



POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

A.A 2018-2019

Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3D e la realtà virtuale**

Relatore

Prof. Filiberto Chiabrando

Candidato

Davide Einaudi

a chi ha saputo essere una
guida per il mio cammino...

Sommario

Abstract lingua italiana	11
Abstract lingua inglese	13
Premessa.....	15
1. Il rilievo fotogrammetrico terrestre e UAV per la modellazione 3d.....	24
1.1. Definizione e storia della tecnica fotogrammetrica.....	24
1.2. Principi alla base della tecnica fotogrammetrica	26
1.3. Algoritmi per l'automazione nel processo fotogrammetrico.....	31
1.4. Le fasi del processo fotogrammetrico	35
1.5. Classificazione delle camere utilizzate nei processi di fotogrammetria e soluzioni innovative	36
1.6. Fotogrammetria Terrestre - <i>Close Range Photogrammetry</i>	40
1.7. Approccio aerofotogrammetrico territoriale	43
1.8. Metodologia tradizionale per le acquisizioni attraverso aerofotogram- metria da UAV	45
1.9. Le immagini e la fotogrammetria sferica	48
1.9.1. Equazioni di corrispondenza tra superficie sferica e piano della rappresentazione	50
1.10. L'orientamento assoluto e il rilievo di appoggio per la fotogrammetria	53
1.11. Rilievo Topografico Satellitare	54
1.11.1. NRTK Network Real Time Kinematic.....	58
1.12. Scelta della camera sferica utilizzata nello studio	59
1.13. Scelta del mezzo UAV per le applicazioni	62
1.14. Note bibliografiche	65

2. Utilizzo e calibrazione di camere *fisheye* per applicazioni di *Structure*

<i>From Motion</i>.....	68
2.1. La storia del <i>fisheye</i>	69
2.2. Caratteristiche delle ottiche <i>fisheye</i> e distorsioni	71
2.3. Calibrazione della camera <i>fisheye</i> scelta per lo studio	74
2.3.1. La fase di calibrazione.....	77
2.3.2. Modello stenopeico di fotocamera.....	78
2.3.3. Errori dovuti alla camera e all'obiettivo.....	79
2.3.4. Orientamento interno ed esterno della camera	81
2.3.5. Punto Principale	81
2.3.6. Lunghezza focale	82
2.3.7. Coefficienti di Distorsione Radiale.....	84
2.3.8. Coefficienti di Distorsione Tangenziali	85
2.3.9. Combinazione di distorsioni radiali e tangenziali.....	86
2.4. Self Calibration	87
2.4.1. Scelta dell'area del Poligono di Calibrazione	87
2.4.2. Posizionamento dei <i>target</i> ed eidotipi	88
2.4.3. Metodologia di acquisizione per le prove di calibrazione	
91	
2.4.4. Schema del metodo di acquisizione.....	93
2.4.5. Elaborazione dei dati.....	95
2.4.6. Risultati <i>Self Calibration</i>	98
2.5. Camera Calibration Tool Matlab R2018a	105
2.6. Agisoft Lens.....	112
2.6.1. <i>Chessboard</i> utilizzato per la calibrazione.....	114
2.6.2. Condizioni di luce per le acquisizioni.....	114
2.6.3. <i>Dataset</i> per la calibrazione.....	117

2.6.4. Processamento dei <i>dataset</i>	118
2.6.5. Risultati calibrazione attraverso <i>Agisoft Lens</i>	120
2.6.6. Ottimizzazione dei risultati di calibrazione.....	123
2.6.7. Risultati <i>Camera Front Lens Calibration Tool</i>	125
2.6.8. Errori nei <i>Target</i> e <i>Control Point Camera Front</i>	127
2.6.9. Densificazione della nuvola di punti e creazione della <i>mesh</i> per la <i>Camera Front</i>	131
2.6.10. Risultati <i>Camera Back Lens Calibration Tool</i>	135
2.6.11. Errori nei <i>Target</i> e <i>Control Point Camera Back</i>	137
2.6.12. Densificazione della nuvola di punti <i>Camera Back</i>	140
2.7. Analisi degli errori di riproiezione	142
2.8. Acquisizioni <i>laser scanner</i> e confronto dei dati	148
2.8.1. Acquisizione dati.....	148
2.8.2. Registrazione delle scansioni per forma	149
2.8.3. Registrazione delle scansioni per target	151
2.9. Comparazione nuvole di punti da <i>fotogrammetria fisheye</i> e <i>lidar</i> .	153
2.9.1. Analisi della parete: valutazione della distanza tra i punti	154
2.9.2. Analisi del sottoscala: valutazione distanza tra i punti..	158
2.9.3. Analisi ricostruzione della prima rampa delle scale: valutazio- ne distanza tra i punti	162
2.9.4. Calcolo del <i>crop factor</i>	165
2.10. Calcolo della focale equivalente.....	167
2.11. Miglior modello di calibrazione ottenuto	168
2.12. Considerazioni sui risultati di calibrazione	169
2.13. Note bibliografiche	171

3. Le immagini sferiche e la Fotogrammetria	174
3.1. La realizzazione di un panorama sferico.....	174
3.2. Tipologie di proiezione dei panorami sferici:	175
3.2.1. Proiezione cilindrica	175
3.2.2. Proiezione cubiche	175
3.2.3. Proiezione sferica o equirettangolare.....	176
3.3. Applicazioni di fotogrammetria sferica.....	177
3.3.1. Preparazione dei dati e <i>stitching</i> delle immagini	177
3.4. Altri metodi di <i>stitching</i>	182
3.4.1. Conversione delle Distorsioni Radiali.....	185
3.4.2. Riepilogo parametri per procedure di <i>stitching</i> avanzate	186
3.4.3. Self Stitching Processing.....	187
3.4.4. Modifica <i>exif</i> e correzione della lunghezza focale	190
3.4.5. Inserimento manuale dei parametri di orientamento interno sui fotogrammi con <i>exif</i> e focale modificati.....	195
3.4.6. Considerazioni sui processi di <i>stitching</i> alternativi	197
3.5. Valutazione della sovrapposizione tra i fotogrammi	198
3.6. Applicazioni fotogrammetriche terrestri tramite immagini sferiche	200
3.7. Differenti metodologie di processamento dei fotogrammi sferici...	202
3.7.1. Processamento dei fotogrammi sferici	203
3.7.2. Acquisizioni terrestri delle proiezioni sferiche sul poligono di calibrazione	206
3.7.3. Elaborazione dei dati <i>fisheye</i> come <i>station point</i>	210
3.7.4. Processamento dei dati come <i>fisheye</i> attraverso l'opzione camera multi-spettrale.....	220
3.8. Note bibliografiche	222

4. Applicazioni di aerofotogrammetria sferica in scenari urbani e prove sperimentali..... 224

4.1. Introduzione ai casi studio.....	224
4.2. Sviluppo del sistema di connessione Camera/UAV	226
4.2.1. Disegno dei supporti e stampa 3D	227
4.2.2. Considerazioni sui supporti realizzati e nuovi test.....	233
4.3. Soluzione adottata per le sperimentazioni	239
4.3.1. Linee guida per le acquisizioni	243
4.3.2. Prestazioni del sistema e possibilità di utilizzo dei sensori	244
4.4. Approccio aerofotogrammetrico territoriale	245
4.5. Utilizzo terrestre dati sferici per l'orientamento immagini <i>frame</i>	249
4.6. Test del sistema in volo in ambiente controllato	252
4.10. Influenza tie point e key point e nuove versioni software.....	269
4.7. Scelta delle aree di studio	273
4.8. Accenni normativa aeronautica per il sorvolo in ambienti urbani ..	275
4.8.1. Da aeromodello a aeromobile	276
4.8.2. Operatore e Pilota	277
4.8.3. Operazioni critiche e non Critiche	278
4.8.4. Utilizzo di Apr di massa inferiore ai 300g	282
4.9. Il Castello del Valentino	289
4.9.1. Acquisizioni aeree e finalità della ricerca sul Castello del Va-	
lentino.....	293
4.9.2. Rilievo topografico di punti naturali	295
4.10.1. Elaborazioni aeree a scala urbana.....	298
4.10.2. Restituzione e analisi realizzabili attraverso l'integrazione di	
immagini frame e sferiche sul <i>Casello del Valentino</i>	314

4.10.3. Elaborazioni fotogrammetriche sui prospetti della Corte del <i>Castello del Valentino</i>	329
4.11. Il Borgo Medievale.....	338
4.11.1. Acquisizioni aeree <i>Borgo Medievale</i>	339
4.11.2. Vantaggi offerti dalle Immagini 360° in ambienti complessi con l'approccio multi-immagine da UAV	348
4.11.3. Acquisizione delle immagini sferiche da camera <i>frame</i> 351	
4.11.4. Stitching delle immagini frame per la realizzazione dei pa- norami	352
4.11.5. Estrazione dei <i>frame</i> dai filmati aerei	360
4.11.6. Elaborazione dati sull'area del caso studio	362
4.11.7. Risultati ottenuti	364
4.11.8. Confronto nuvole di punti <i>lidar</i> e fotogrammetriche ...	365
4.11.9. Elaborati ottenuti dal processo fotogrammetrico	369
4.12. Note bibliografiche	380
 5. Utilizzo di immagini e video 360° per applicazioni di <i>Virtual Reality</i>..	382
5.1. Introduzione	382
5.2. Differenze tra Realtà Aumentata (AR) e Realtà Virtuale (VR).....	382
5.3. Storia dei primi strumenti per la Realtà Virtuale	384
5.4. Hardware e applicazioni moderne di VR e AR.....	387
5.4.1. <i>Head Mounted Display (HMD)</i>	388
5.5. Camere sferiche ed applicazioni di <i>Virtual Reality</i>	394
5.5.1. Realizzazione <i>Virtual Tour Multi-Sensoriale</i>	394
5.5.2. Applicazioni di Virtual Reality su modelli 3D fotogrammetrici texturizzati.	404

5.5.3. Limiti e potenzialità del prodotto finito	410
6. Divulgazione dei risultati su portale web.....	418
7. Conclusioni	421
Allegati grafici.....	425
Ringraziamenti.....	445
Bibliografia.....	447
Sommario figure	460
Sommario tabelle.....	447

Attualmente la ricerca nel campo della fotogrammetria si sta muovendo nella direzione di sperimentare l'integrazione delle informazioni ricavate attraverso l'impiego di soluzioni multi-sensore e sullo sviluppo di sistemi di *rapid mapping*, in grado di fornire velocemente dati accurati, prerogativa di molte applicazioni operative.

Nell'ultimo decennio si è assistito ad una crescita esponenziale del mercato delle camere commerciali a basso costo il cui sviluppo si è mosso parallelamente all'introduzione di nuove tipologie di sensori. In particolare, la nascita di soluzioni multi-sensore ha trovato impiego nella realizzazione di immagini panoramiche per finalità di visualizzazione, comunicazione e documentazione (video e foto 360°, applicazioni VR/AR).

Allo stesso modo, il mercato degli UAV (*Unmanned Aerial Vehicles*) utilizzati per scopi civili è cresciuto sensibilmente, permettendo, da un lato, un abbassamento dei costi e dall'altro la possibilità di trasporto di sensori sempre più avanzati. L'uso dei droni per applicazioni di aerofotogrammetria è una pratica ormai consolidata ed è stata applicata con successo in un gran numero di scenari operativi.

Il lavoro di tesi prova a dare una risposta a questi temi indagando le potenzialità di utilizzo dei panorami sferici per acquisizioni aeree finalizzate all'ottenimento di disegni architettonici, ortofoto, modelli tridimensionali, modelli digitali di

elevazione (*DSM*) in tempi contenuti. L'uso di camere sferiche a basso costo per ottenere informazioni metriche è un tema attuale di ricerca nel campo della geomatica. Ad oggi risultano eseguite prime analisi di applicazione su casi studio terrestri, ma non sono state trovate in bibliografia prove significative di applicazioni aeree di questa tecnologia per le finalità illustrate. Nello specifico è stata presa in esame una camera sferica commerciale composta da due sensori *fish-eye* ed una camera tradizionale (attraverso un approccio multi-immagine) al fine di testarne le potenzialità di ricostruzione tridimensionale. La prima fase dello studio è stata la calibrazione di camera mirata alla stima di un modello matematico per ognuno dei sensori impiegati. Successivamente sono stati condotti test specifici per valutare l'accuratezza dei risultati ottenuti. Particolare attenzione è stata posta allo sviluppo del sistema di connessione camera sferica/*UAV* testandone varie tipologie ed eseguendo la relativa attività sperimentale. In ultimo sono stati condotti alcuni test su due casi studio (*Castello del Valentino* e *Borgo Medievale* a Torino) mirati ad indagare le potenzialità di utilizzo di questo approccio sui Beni Culturali. Saranno illustrate le soluzioni adottate per l'orientamento fotogrammetrico combinando immagini acquisite da camere 360° e tradizionali. Infine sono state sperimentate applicazioni di *Virtual Reality* finalizzate alla comunicazione attraverso navigazione immersiva dei beni studiati.

Nowadays the research in photogrammetric field is dealing with the integration of information using multi-sensor solutions and the development of rapid mapping systems able to provide accurate information in a very short time.

During the last decade, the market of low cost commercial camera has drastically increased, and in parallel, new sensors and camera typologies have been developed. In particular, the growth of multi-sensor solution allowed to produce spherical images commonly used for visualization, communication and documentation purpose (video and photo 360°, *VR/AR* applications).

At the same time, the *UAV* (Unmanned Aerial Vehicles) civil market has exponentially increased allowing significant cost reduction and the sensor transport possibility has been enhanced. Drones photogrammetry application is a well established practice and have been successfully applied in a large number of operational scenarios.

In the thesis some tests on the possibility of using spherical panorama in aerial acquisition with the aim to obtain valid architectural drawings, orthoimages, 3d models and digital elevation model (*DSM*) have been performed. The use of low-cost spherical camera solutions was followed in order to obtain accurate metric informations according to the recent research trend in the geomatic field. The first application of

this technology has been tested in terrestrial scenarios, while no significant works have been found in bibliography for aerial acquisition.

In the present work a low cost commercial camera solution, composed of two fisheye sensors and a traditional camera (using a multi-image approach) has been used with the aim to test the 3d reconstruction capability.

In the first part of the thesis the cameras have been calibrated using the photogrammetric approach in order to estimate the best mathematical model for every sensors. Furthermore specific tests have been performed in order to verify the accuracy of the final results.

Another important aspect was related to the development of the 360° camera/UAV connection by testing different solution.

Moreover, different tests were carried out taking into consideration two case studies (Castello del Valentino and the Borgo Medievale in Turin) in order to investigate the possibilities of using this technology on Cultural Heritage. In the work the pipeline for image orientation will be presented, combining images acquired from 360° and traditional cameras. Finally the use of spherical data for communication purpose through immersive navigation have been tested in Virtual Reality applications.

Premessa

L'utilizzo di tecnologie utili a restituire modelli tridimensionali con finalità metriche è diventato negli ultimi anni un aspetto preminente in svariati campi. A partire dalle primissime applicazioni di rilievo tramite tecnologie laser scanner ci si è accorti di trovarsi di fronte ad un cambiamento senza precedenti in grado di scardinare le metodologie che fino ad allora erano state impiegate lasciando intuire la possibilità di ottenere una mole di dati in tempi brevissimi e la possibilità di svolgere una serie di analisi fino ad allora inimmaginabili.

L'avvento del laser scanner e della fotogrammetria hanno portato con loro la possibilità di ottenere dati geometrici desumibili da nuvole di punti, fatto che da subito, si è rivelato uno strumento di fondamentale importanza nel campo del rilievo metrico. Queste tecnologie hanno dato un contributo concreto in diversi campi tra cui quello architettonico, cartografico e militare, rendendo possibile la documentazione accurata di edifici, terreni e beni architettonici, in un modo nuovo.

Dopo una fase di entusiasmo iniziale, in particolare per la tecnologia del laser scanner terrestre, c'è stata un'inversione di tendenza. Si conosceva la tecnologia ma l'utilizzo di questa faceva ancora fatica ad affermarsi a causa dei costi delle strumentazioni necessarie. Lo sviluppo degli algoritmi legati alla *Computer Vision* ha permesso una brusca accelerazione nel campo della fotogrammetria, rendendo possibile l'utilizzo di camere non metriche attraverso sofisticati processi di stima automatica di modelli di calibrazione e, con l'avvento di potenti algoritmi, sono stati possibili in tempi ragionevoli calcoli che fino

ad allora richiedevano complessi processi manuali. Questi progressi tecnologici hanno portato in breve tempo a sviluppare tecniche di ricostruzione tridimensionale basate su immagini attraverso la tecnica nota con il termine *Structure From Motion (SFM)*.

Negli ultimi anni queste metodologie si sono progressivamente affinate e la loro messa in pratica è diventata sempre meno complessa. Le numerose ricerche in ambito accademico nel frattempo hanno dimostrato la possibilità di utilizzo della *SFM* ottenendo risultati paragonabili (in termini di accuratezza) a quelle ottenibili con tecnologia laser scanner.

In questa fase dove la conferma dell'attendibilità dei risultati ottenibile con un sistema *low-cost* (come quello basato sull'impiego di camere non metriche) si affermava in modo netto nello sviluppo di queste tecnologie, si è progredito nello sviluppo di maggiori automatismi nella fase di elaborazione dei dati.

Fin dalle sue origini l'idea della fotogrammetria è sempre stata accompagnata dal desiderio di spostare la prospettiva in vista della possibilità di applicazione alle immagini aeree. Nei primi anni del novecento *Julius Neubronner*¹ aveva provato a muoversi in questa direzione attaccando primi modelli di macchine fotografiche al corpo di comuni volatili, riuscendo nella sua impresa ma ottenendo risultati scadenti e certamente non utilizzabili per fini metrici. Bisognerà attendere alcuni anni per potere installare i primi modelli di sofisticate camere posizionate su aeromobile per vedere il contributo della fotogrammetria per le acquisizioni aeree in vista dello sviluppo cartografico. Tale soluzio-

1 Julius Gustav Neubronner (Kronberg im Taunus, 1852 – Kronberg im Taunus, 1932) appassionato di fotografia e cinematografia tedesco è stato un inventore, chimico, e fotografo tedesco.

ni richiedevano tuttavia strumentazione molto costosa e costringevano ad acquisizioni a quote molto elevate per questioni di sicurezza. In pochi anni si è iniziato a sperimentare, oltre alle acquisizioni da aereo e da elicottero, soluzioni innovative quali palloni aerostatici, dirigibili, mongolfiere. Successivamente si iniziarono a sviluppare soluzioni che utilizzavano veicoli a pilotaggio remoto che nella realtà apparivano come degli aerei in miniatura controllabili da una stazione a terra, sui quali venivano installate delle camere. In ognuna di queste proposte, tuttavia, la sfida è sempre stata la medesima: riuscire a portare in aria camere che permettessero acquisizioni dall'alto delle aree di interesse.

Lo sviluppo tecnologico degli *UAV (Unmanned Aerial Vehicles)* ha in un certo senso riscritto le potenzialità di queste applicazioni, permettendo, con soluzioni economicamente accessibili, l'acquisizione di dati prima inimmaginabili. Quando si parla di *UAV* ci si riferisce ai comunemente detti "droni", in particolare agli aeromobili a pilotaggio remoto di tipologia multirottore.

Soluzioni di questo tipo, come ad esempio quadricotteri o esacotteri, erano già note da diversi anni, tuttavia si limitavano al campo del modellismo dal momento che risultavano troppo imprecisi e difficilmente controllabili. Con lo sviluppo dell'elettronica di controllo delle centraline di volo, di motori *brushless* e di *ESC (Electronic Stability Control)*, questi mezzi hanno iniziato a risultare estremamente affidabili. Tuttavia è con l'avvento dello sviluppo dei sistemi di posizionamento satellitare che questi strumenti hanno raggiunto l'apice grazie alla capacità dell'elettronica di bordo di controllare la potenza dei motori al fine di compensare gli spostamenti orizzontali e verticali del mezzo.

Raggiunto questo traguardo, il passaggio successivo, quello di installare su queste piattaforme delle camere, è stato immediato.

Tutto quello che sembrava fino a qualche anno fa anche solo inimmaginabile è diventato possibile. Una rivoluzione di questo tipo ha portato con sé lo sviluppo di una nuova industria che negli ultimi anni ha prodotto fatturati eccezionali e ha dato un nuovo input agli sviluppi software ad esso connessi. In pochissimo tempo questi progressi hanno permesso non solo di raggiungere l'obiettivo di portare su questi mezzi camere ad alta definizione, ma anche di installarle su stabilizzatori meccanici per compensare le vibrazioni del mezzo.

La miniaturizzazione della sensoristica ha fatto sì che si sviluppassero soluzioni atte all'installazione di termocamere, sensori multi-spettrali, sensori di prossimità, barometri, giroscopi, accelerometri, anemometri, fino a rilevatori di radiazioni, di controllo della qualità dell'aria ecc.

Si è potuto assistere in un breve periodo al progressivo utilizzo di questi sistemi in svariati campi di applicazione: dall'agricoltura di precisione, alla sicurezza, al monitoraggio, all'industria cinematografica, alla ricerca e soccorso e ovviamente al campo del rilievo architettonico e della ricostruzione tridimensionale, oggetto di questo studio. Di fronte a questo scenario più volte ci si è interrogati sulle possibilità di espansione di queste tecniche ormai consolidate da diversi anni e quali orientamenti potesse assumere il percorso di ricerca nell'ottica di dare un contributo significativo allo stato dell'arte. Nonostante il progresso tecnologico senza precedenti degli ultimi anni la ricerca non si è rallentata, anzi, sono all'ordine del giorno sperimentazioni che mirano alla realizzazione di nuovi sistemi sempre più performanti. Se fino ad ora ci si era mossi nell'ottica di rendere possibile una soluzione prima inimmaginabile, nella fase attuale si sta cercando di migliorarne l'efficienza dei risultati e sviluppando soluzioni mirate alla raccolta dati nel minore tempo possibile. La riduzione delle tempistiche, al giorno d'oggi, è

uno dei campi di ricerca più attivi nel campo della fotogrammetria. Se prima ci si interrogava sul come ottenere tipologie differenti di dati ora ci si sta interrogando sul come averli in meno tempo. Il tempo assume primaria importanza nel fronteggiare situazioni catastrofiche, citiamo a titolo esemplificativo fenomeni alluvionali o fenomeni sismici, nei quali la prontezza di dati risulta indispensabile per organizzare una risposta dei soccorsi immediata, per ricercare dispersi o sviluppare ortofoto aeree, per valutare quali percorsi risultino i più sicuri per evacuare le persone o quali lo siano meno.

Tuttavia, non soltanto la gestione degli eventi catastrofici trova giovamento dalla riduzione delle tempistiche nelle elaborazioni dei dati. Il campo della cartografia e del rilievo architettonico necessitano di mettere in atto, per la buona riuscita della restituzione del rilievo delle acquisizioni topografiche tradizionali per la determinazione, di alcuni punti di coordinate note a terra visibili nelle immagini aeree per restituire un modello correttamente scalato e georiferito. Questo processo risulta ancora per quanto efficace e indispensabile ancora molto lungo. Evitare di dovere disporre e misurare le coordinate dei punti a terra, o ridurre il numero a parità di accuratezza comporterebbe un incremento importante della produttività ottenibile. Abbattere le tempistiche comporta un abbassamento dei costi delle operazioni e la possibilità di concentrarsi maggiormente sul *data processing e analysis*.

Dopo questa lunga ma doverosa premessa al lettore risulterà certamente più chiaro il motivo di questo studio. Nell'ottica di proseguire il processo di ricerca fino ad ora svolto e con le prerogative che lo hanno contraddistinto si è pensato di proporre e sperimentare la possibilità di utilizzo di immagini sferiche nella produzione da poter utilizzare per differenti scopi. Molti studi sperimentali svolti negli ultimi anni hanno identificato nelle immagini sferiche la possibilità di applicazione delle tecnologie di *Structure From Motion* e

Range imaging per i processi di ricostruzione *3d image based*. L'uso dell'immagine sferica costituisce già di per sé una risposta intrinseca ad uno dei temi di maggiore interesse: la riduzione dei tempi di acquisizione. Appare chiaro che un'immagine a 360° è immaginabile come una serie di immagini scattate ad un intervallo angolare prestabilito da un centro di presa fisso. Il che ci porta a comprendere che una sola immagine scattata con camere a 360° gradi sostituisce il tempo necessario alla realizzazione di molti scatti tradizionali. Non solo. Acquisire immagini con camere a 360° ha permesso l'applicazione della fotogrammetria in aree prima impensabili: un esempio è il caso dello studio condotto dal *National Technical University of Athens*² nel villaggio medievale di *Kalamoti*, nel quale un sistema camere tradizionale e 360° hanno portato a risultati significativi nell'acquisizione di 5600 m² di prospetti medievali in vie dalla larghezza media di 2,30 metri.

Una difficoltà presente in tutti gli studi fino ad ora svolti è stata la bassa risoluzione dei sensori *fisheyes* attualmente in commercio o, in caso di utilizzo di camere tradizionali, di errori di *stitching* (ovvero connessione delle immagini), che hanno prodotto modelli molto rumorosi e con aree restituite in modo errato. Non a caso nello studio citato (Kossieris, S. & Al. 2017) sul sito di Kalamoti le camere sferiche sono state utilizzate dopo diversi tentativi per:

“...the 360° camera was selected in order to connect the smaller GSD imagery of the facades captured by the action cameras...”

Si ritiene che il processo nello sviluppo di questi sensori allo stato attuale permetta di raggiungere risultati migliori se impiegate attraverso approcci

2 Kossieris, S., Kourounioti, O., Agrafiotis, P., & Georgopoulos, A. (2017). Developing a low cost system for 3D data acquisition. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42

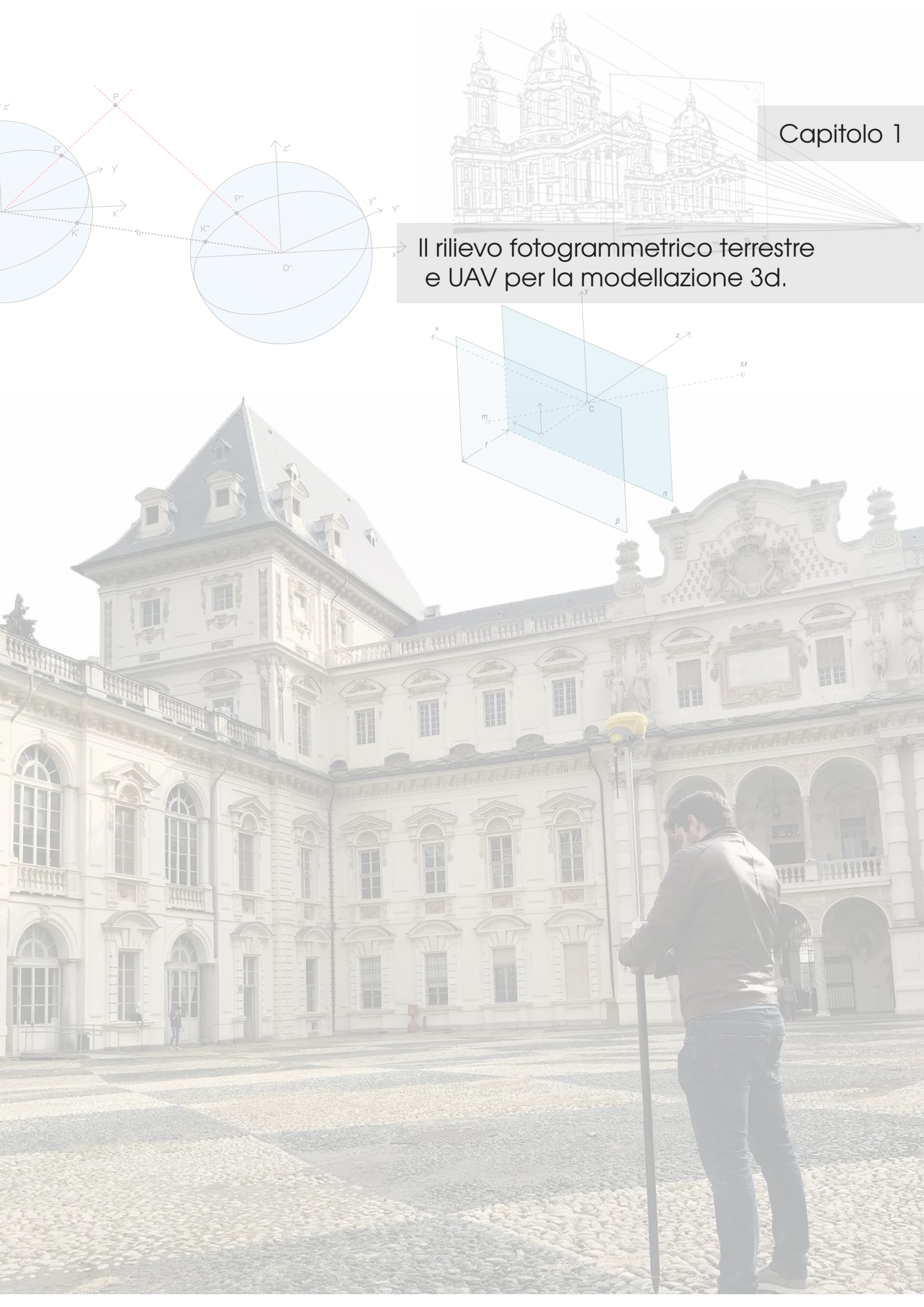
multi-sensore con camere tradizionali. Il lavoro di ricerca si è articolato in una prima fase di identificazione della camera da utilizzare nello studio, della sua calibrazione e di svariati test su casi studio per testarne la funzionalità. Saranno esposti gli esiti delle applicazioni di fotogrammetria terrestre per la verifica dei modelli di calibrazione stimati per poi concentrarsi in modo più approfondito sull'applicazione del sensore 360° su UAV e sull'uso congiunto di immagini sferiche e tradizionali attraverso approcci multi-sensore. Dopo una fase di test e messa a punto del sistema sull'aeromobile sono state eseguite acquisizioni su un area di test e successivamente testate alcune applicazioni pratiche su Beni Culturali.

Sono state inoltre sperimentate le potenzialità offerte da tali acquisizioni per la realizzazione di *Virtual Tour* e video immersivi in realtà aumentata offrendo al fruitore la possibilità di navigare virtualmente sospeso nell'aria a differenti quote visualizzando informazioni su quello che vede intorno. I virtual tour prodotti saranno resi fruibili online attraverso la realizzazione di un portale web che permetterà la navigazione e l'integrazione del tour aereo con mappe di riferimento della navigazione e l'integrazione dei dati già esistenti fruibili gratuitamente tramite *Google Street View*.

Applicare queste metodologie di acquisizione sferica aerea ha costretto al confronto con aspetti normativi stringenti e non trascurabili. Per rispettare la Normativa Aeronautica è stato necessario ottenere due attestati di pilotaggio di *SAPR* (droni) rispettivamente una per lo svolgimento di operazioni non critiche e una seconda per operazioni critiche. A questo è seguita una lunga fase di certificazione dei mezzi redigendone la manualistica, svolgendone le prove sperimentali, le analisi del rischio, i programmi di manutenzione e i documenti di configurazione. Si è proceduto successivamente

a richiedere autorizzazione del mezzo all' Ente Nazionale Aviazione Civile e a stipulare le adeguate polizze assicurative. Per svolgere le operazioni a Torino inoltre trovandosi in area interdetta al volo si è chiesto permesso speciale alla *Prefettura di Torino*.

Il rilievo fotogrammetrico terrestre e UAV per la modellazione 3d.



1. Il rilievo fotogrammetrico terrestre e UAV per la modellazione 3d

1.1. Definizione e storia della tecnica fotogrammetrica

Il termine fotogrammetria si riferisce ad una tecnica di rilievo in cui i dati sono composti da immagini che, in seguito a particolari processi di calcolo, consentono una rappresentazione grafica tridimensionale dell'oggetto fotografato. L'idea di ricavare informazioni dimensionali da oggetti fisici nasce immediatamente dopo l'invenzione della fotografia. Nel 1839 infatti lo studioso e uomo politico *François Jean Dominique Arago* portò all'attenzione dell'*Accademia di Francia* l'invenzione di *Louis Mandé Daguerre*, di quella che da allora fu chiamata la dagherrotipia, un primo esemplare del moderno concetto di fotografia.

Parallelamente si ricorreva alla topografia tradizionale per la rappresentazione del territorio attraverso il rilievo dei punti caratteristici per la descrizione delle geometrie restituite successivamente per via analitica. In particolare per ampie porzioni di territorio la topografia richiedeva grandi investimenti dal momento che richiedeva un rilievo manuale, con la conseguenza di tempi di campagna molto lunghi. Altra criticità non trascurabile era la rappresentazione planimetrica di oggetti non lineari o curve di livello che rendevano necessario ricorrere ad interpolazioni. Appare chiaro che l'obiettivo (che da alcuni anni può considerarsi raggiunto), era quello di utilizzare le immagini per ricavare informazioni metriche, così da permettere una riduzione delle tempistiche delle operazioni di campagna garantendo la possibilità di estrarre i dati a posteriori ottenendo precisioni elevate.

Nel corso degli anni diverse definizioni sono state date a questa tecnica di rilievo, citeremo di seguito alcune delle più rilevanti:

«La fotogrammetria è l'arte e la scienza per determinare la posizione e la

forma degli oggetti a partire da fotografie»; [Fotogrammetria, K. Kraus]^I

«La Fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere informazioni affidabili di oggetti fisici e dell'ambiente attraverso processi di registrazione, misura e interpretazione di immagini fotografiche e campioni di energia radiante elettromagnetica e altri fenomeni.» [Manual of Photogrammetry, ASPRS, 1980]^{II}

«La Fotogrammetria comprende un insieme di tecniche che, partendo dalle fotografie di un oggetto, consentono di definirne la forma (qualunque sia la dimensione) e di collocarlo nello spazio.» [J.P S. Aubin, 1999]^{III}.

Tutte le definizioni riportate mettono in risalto la potenzialità di desumere dati metrici a partire dalle immagini acquisite sugli oggetti.

Tra i vantaggi di questa tecnologia va sottolineata la possibilità di eseguire un controllo della precisione degli elaborati della rappresentazione, dal momento che la tolleranza è stabilita a priori. Non solo, i rilievi fotogrammetrici permettono di andare a descrivere in modo esauriente geometrie complesse. La finalità di un rilievo è quella di tradurre in rappresentazioni le caratteristiche dimensionali e morfologiche proprie di un oggetto. Tale compito è intrinsecamente legato al concetto di interpretazione dal momento che, la restituzione dei dati di rilievo per la rappresentazione, risulta una sintesi più o meno dettagliata della realtà secondo il grado di tolleranza stabilito.

Bisogna attendere il 1859 quando il colonnello francese A. Laussedat il fondatore della tecnica presentò alla *Commissione dell'Accademia delle Scienze di Parigi* una relazione che illustrava un metodo per la determinazione di coordinate ottenute da una coppia di fotografie tramite l'intersezio-

ne di raggi a partire da una coppia di immagini. Tuttavia bisogna attendere qualche tempo prima che *A. Meydenbauer* riuscisse con successo nella prima applicazione della tecnica per l'esecuzione di un rilievo edilizio.

1.2. Principi alla base della tecnica fotogrammetrica

La determinazione della posizione di uno o più punti di un oggetto posto in un ambiente a partire dalla sua posizione su una fotografia necessita la definizione delle relazioni geometriche che stanno alla base delle proiezioni dei punti oggetto sul piano immagine. Ad ogni punto nello spazio corrisponde, infatti, un punto omologo sul piano immagine. La possibilità di ottenere informazioni metriche dalle fotografie deriva dal fatto che la fotografia può essere considerata una prospettiva centrale. Nel capitolo dedicato alla calibrazione della camera maggiormente utilizzata in questo lavoro, sarà illustrato dettagliatamente il modello geometrico stenopeico.

Quello che è importante definire per la comprensione della tecnica è il fatto che esiste una corrispondenza biunivoca tra i punti oggetto in uno spazio tridimensionale e le proiezioni degli stessi punti sul piano immagine.

La definizione di un punto nello spazio necessita di due immagini acquisite da punti differenti in cui tale punto risulti visibile. Analizzando il problema dal punto di vista geometrico e ipotizzando di conoscere la posizione del centro di presa e l'assetto del raggio proiettante, si può affermare che corrisponderanno infiniti punti appartenenti alla retta proiettante punto immagine-centro di presa. Introducendo una seconda proiezione risulta possibile determinare la posizione del medesimo punto oggetto tridimensionale. Il problema geometrico può essere compreso meglio tramite un esempio semplificato

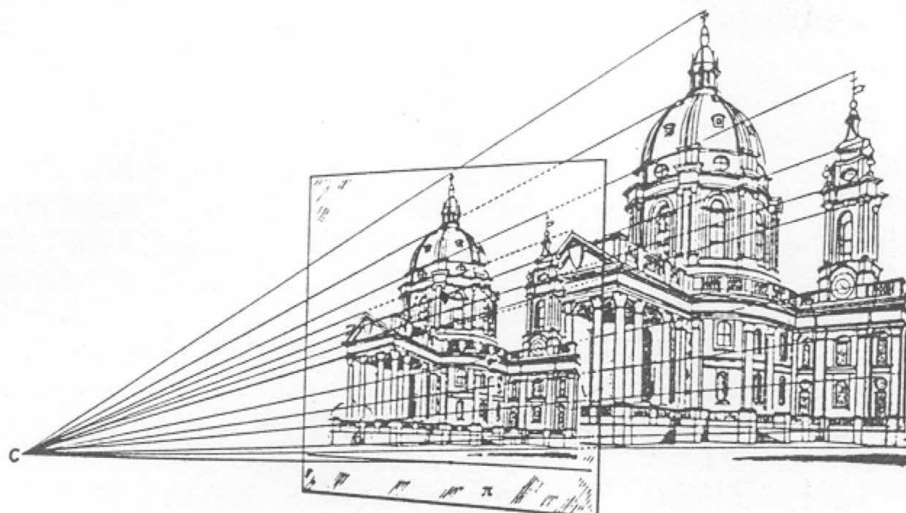


Fig. 1. Relazione tra punto immagine e oggetto reale. Le linee corrispondono alle rette proiettanti mentre C corrisponde al centro di presa. [https://www.unirc.it/ consultato 10/06/2018]

che permette di ottenere le coordinate tridimensionali (x_p, y_p, z_p) di un punto generico P nello spazio reale a partire dalle sue coordinate immagine x_{p1}, y_{p1} e x_{p2}, y_{p2} , *attraverso la risoluzione di triangoli semplici*.

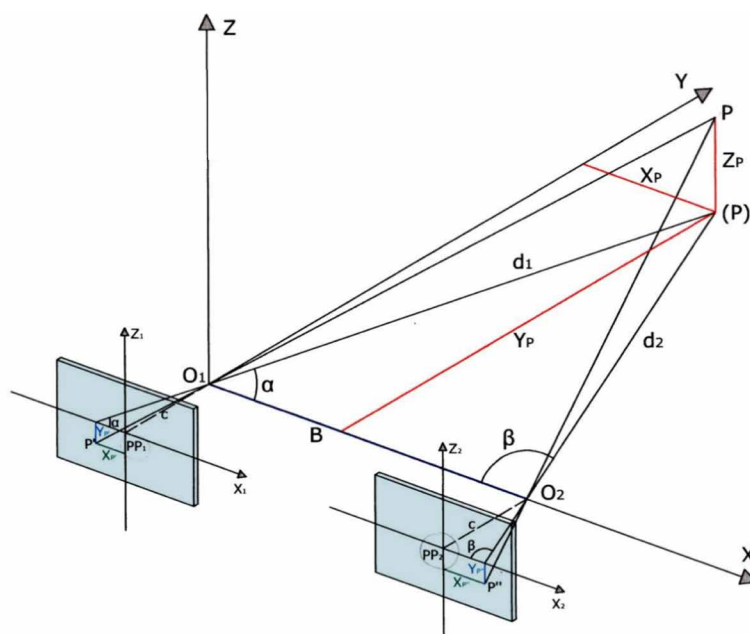


Fig. 2. Schematizzazione semplice del processo di determinazione della posizione di un punto oggetto (3D) a partire da due immagini. Nello schema B corrisponde alla distanza tra i punti tra i punti di presa detta *base di presa*; c corrisponde alla *distanza principale*, $PP1$ e $PP2$ i *punti principali* e $O1$ e $O2$ i *centri di proiezione*. [Tratto e rieditato da A. Spanò, Dispense di Fotogrammetria digitale e scansioni 3D, Politecnico di Torino, 2017]

Lo schema riportato nell'immagine precedente corrisponde, tuttavia, ad un caso particolare in cui sono stati posti appositamente i centri di proiezione appartenenti ad un piano parallelo al piano di proiezione e risultano tra loro complanari. È stato adottato, inoltre, il medesimo sistema di riferimento per le coordinate e gli assi ottici risultano paralleli.

Ponendo il caso di un problema più generico, invece, (in cui non si pongano le semplificazioni del primo caso), è necessario svolgere calcoli analitici più complessi attraverso quelle che sono chiamate *equazioni di collinearità*. Attraverso un processo analitico detto *rototraslazione di collinearità* è possibile esprimere la posizione dei punti che risultano in differenti sistemi di riferimento. «I due approcci presentati visti richiamano le profonde trasfor-

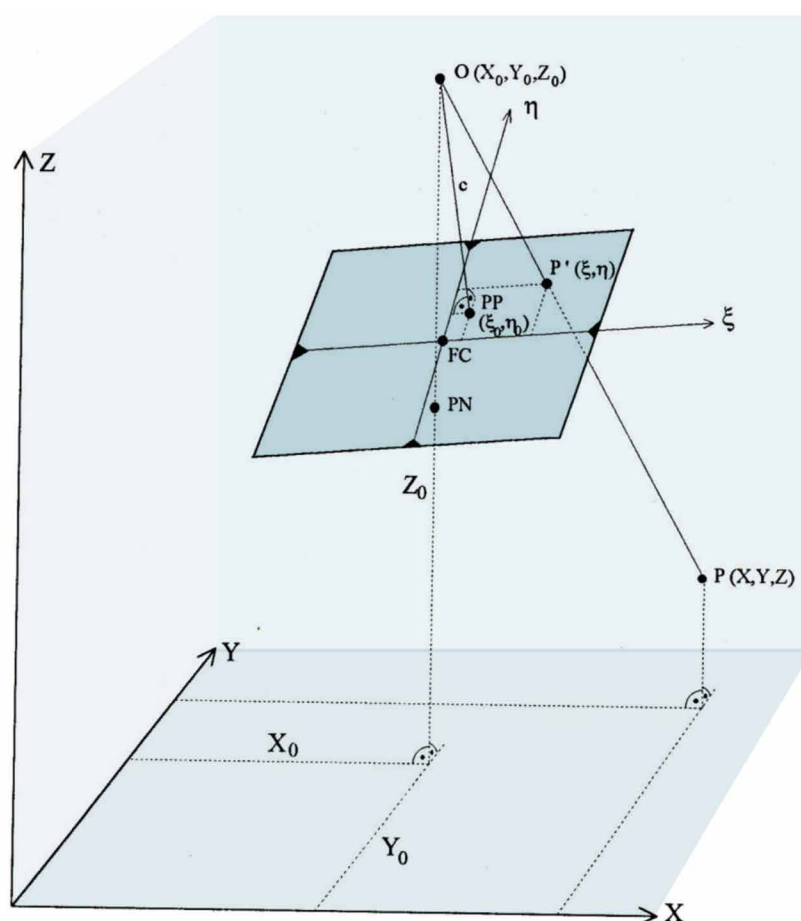


Fig. 3. Fondamenti analitici della fotogrammetria. Il sistema di riferimento ξ, η è definito dalla posizione di marche fiduciali e dal relativo centro FC (intersezione delle rette che uniscono marche fiduciali opposte); in cui sia noto anche il punto PP , proiezione del centro O sul piano di proiezione, di coordinate ξ_0, η_0 . [Tratto e rieditato da A. Spanò, Dispense di Fotogrammetria digitale e scansioni 3D, Politecnico di Torino, 2017]

mazioni che hanno interessato la Fotogrammetria, che riguardano i metodi che man mano sono stati studiati e messi a punti per risolvere il problema proiettivo di intersezione di raggi omologhi». [A. Spano, 2010]^{IV}

Appurato il fatto che il problema fotogrammetrico venga risolto andando a ricavare le coordinate dell'intersezione spaziale tra i raggi omologhi attraverso un sistema di equazioni che abbiamo detto assumere il nome di

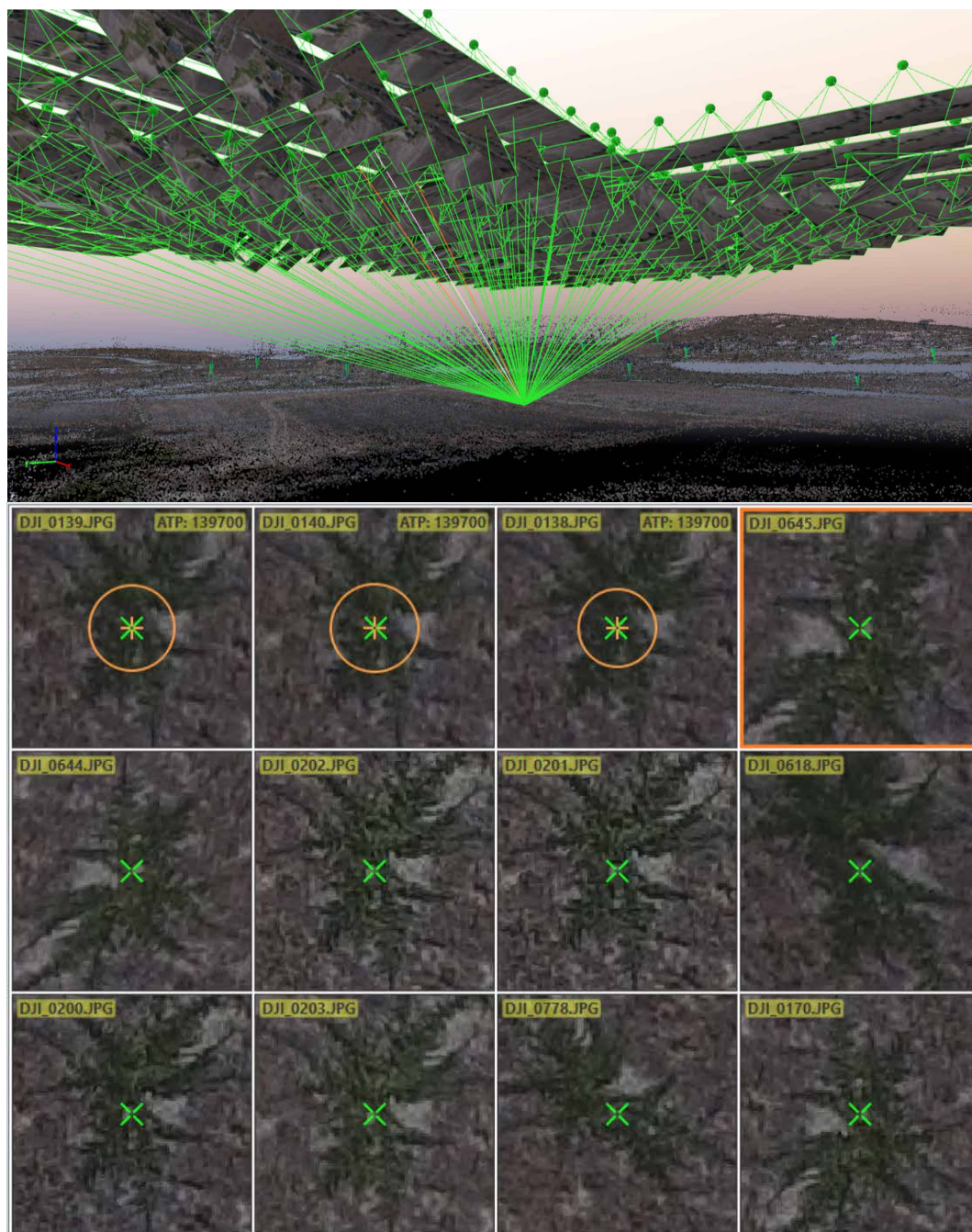


Fig. 4. Esempio di collimazione semi automatica di un punto tramite il software Pix4d su dati acquisiti da UAV.

equazioni di collinearità (ottenute da relazioni di geometria analitica) è importante considerare che in passato le operazioni erano eseguite con strumenti ottici o meccanici appositamente realizzati e la tecnica prendeva il nome di **fotogrammetria analogica**. Questi strumenti prendevano il nome di fotorestitutori tramite i quali si faceva sì che i fotogrammi assumessero

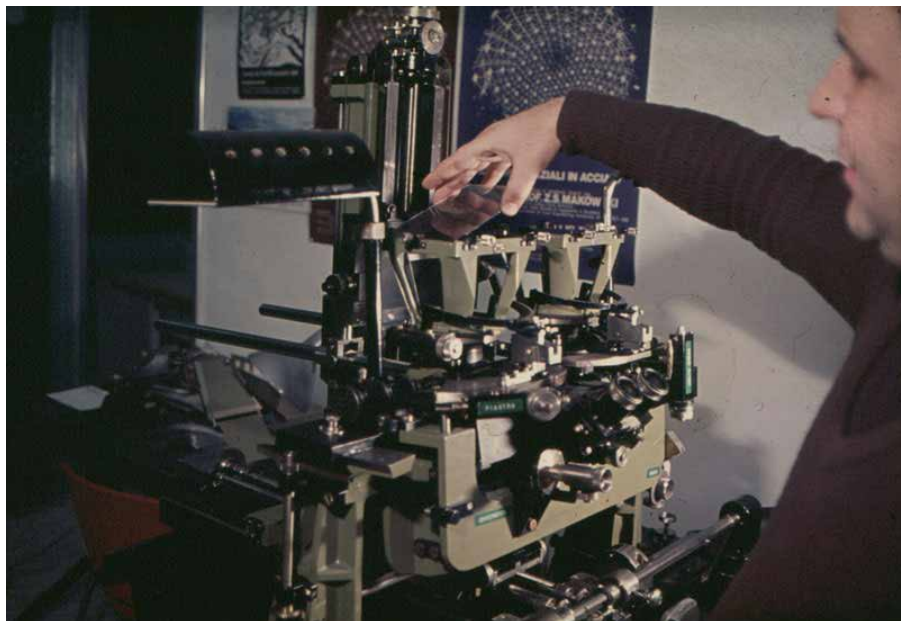


Fig. 5. Un esempio di restitutore fotorestitutore analogico [fonte: <http://rilievo.stereofot.it>]

una posizione reciproca analoga a quella assunta nell'istante dell'acquisizione.

Successivamente, con la **Fotogrammetria analitica**, si è iniziato ad usare calcolatori che permettevano di risolvere sistemi di equazioni ad alto numero di incognite: *«viene definito il processo di calcolo per la determinazione di un punto $X Y Z$ qualsiasi in funzione delle coordinate lastra x_1, y_1 e x_2, y_2 (coordinate bidimensionali misurate sul fotogramma). Le immagini sono fotogrammi su pellicola che tramite uno stereo-comparatore (dotato di un microscopio di collimazione) vengono tradotte in matrici di numeri.»*

Lo stadio attuale della tecnica è rappresentata dalla **fotogrammetria digitale** che si è affermata con il diffondersi delle immagini digitali e dello svi-

luppo di potenti mezzi di calcolo. Questi sviluppi hanno permesso il diffondersi della tecnologia e la possibilità di produzione di nuovi elaborati derivati come i modelli di terreno e le ortofoto.

Ulteriori complicazioni nell'uso di questa tecnica sono legate al tema delle distorsioni radiali e tangenziali, oltre che alla posizione di punto principale. Dopo avere definito un modello matematico è importante considerare che le ottiche delle camere si discostano da esso a causa di diversi fattori costruttivi e fisici. Queste differenze fanno sì che la risoluzione del sistema sia decisamente più complessa e necessiti una stima accurata di alcuni coefficienti che permettono di adattare il modello allo strumento utilizzato. La stima di questi parametri prende il nome di calibrazione della camera e risulta fondamentale per l'estrazione di informazioni metriche accurate attraverso l'utilizzo di questa tecnica. Questi temi saranno approfonditi nel capitolo relativo alla calibrazione di camera in cui sarà posta attenzione al tema delle distorsioni e analizzati singolarmente i parametri utilizzati per la definizione del modello.

1.3. Algoritmi per l'automazione nel processo fotogrammetrico

Allo stato dell'arte, il processo di fotogrammetria digitale è reso possibile grazie ai sempre più accurati algoritmi di automazione, che diventano sempre più performanti. L'implementazione di procedure di intelligenza artificiale ha permesso la simulazione di processi logici che prima potevano essere svolti solo dall'operatore umano. La *Computer Vision* ha contribuito allo sviluppo di meccanismi di automatismo sempre più avanzati. Attualmente quando ci si riferisce alla fotogrammetria basata su questi automatismi, si intende quella che è comunemente definita *Structure From Motion (SfM)*. Nel corso di questo lavoro d'ora in avanti ci si riferirà al termine fotogramme-

tria intendendo per semplicità l'uso delle avanzate tecnologie di *Computer Vision*, quindi riferendoci alla *SFM*.

Di seguito si elencano alcune delle fasi del processo fotogrammetrico digitale che hanno beneficiato della creazione di algoritmi appositi:

1. *Feature Extraction / image matching* (algoritmi di auto-correlazione): questo algoritmo è realizzato allo scopo di riconoscere forme e geometrie sulle immagini digitali attraverso operazioni statistiche di confronto.
2. *Operatori di Interesse*: permettono secondo criteri prestabiliti, di individuare su ogni fotogramma i punti che meglio si prestano ad una successiva correlazione.
3. *Ricampionamento*: permette di trasformare le immagini digitali. È utilizzato in particolar modo per il fotoraddrizzamento o per la produzione di elaborati come ortomosaici

Lo sviluppo degli algoritmi di autocorrelazione ha permesso alla tecnica un salto di qualità non indifferente. Senza entrare nello specifico il processo di autocorrelazione è composto dalle seguenti fasi:

1. *Selezione dell'entità per la correlazione in una immagine;*
2. *Individuazione della corrispondente entità su un'altra immagine;*
3. *Calcolo della posizione nello spazio del punto considerato;*
4. *Valutazione della qualità della correlazione.*^v

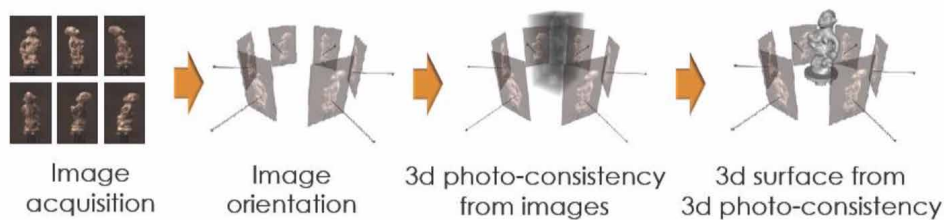


Fig. 6. Processo di estrazione dei punti di legame o tie point tramite tecniche di autocorrelazione. [Tratto da A. Spanò, Dispense di Fotogrammetria digitale e scansioni 3D, Politecnico di Torino, 2017]

Le operazioni di correlazione sono eseguite per il riconoscimento sulle immagini di entità differenti. Per ottenere questi risultati esistono differenti algoritmi che si basano principalmente sul riconoscimento di entità sulle immagini in funzione dei valori radiometrici. I principali tipi di algoritmi in grado di correlazione sono tre:

1. algoritmi di **Area Based Matching (ABM)**;
2. algoritmi di **Feature Based Matching (FBM)**;
3. algoritmi di **matching relazionale**.

Questi algoritmi differiscono per la tipologia di entità che viene considerata. Gli algoritmi *Area Based* si basano sul confronto dei dati radiometrici tra le immagini utilizzando solitamente i livelli di grigio. Gli algoritmi *Feature Based* si basano sulla determinazione della presenza di elementi geometrici semplici (punti, linee, aree), mentre, infine quelli di *matching relazionale* indagano le relazioni spaziali tra i differenti elementi nelle immagini.

Tra quelli descritti, le soluzioni basate sull'*Area Based Matching* sono risultate le più adoperate in campo fotogrammetrico. Senza entrare nello speci-

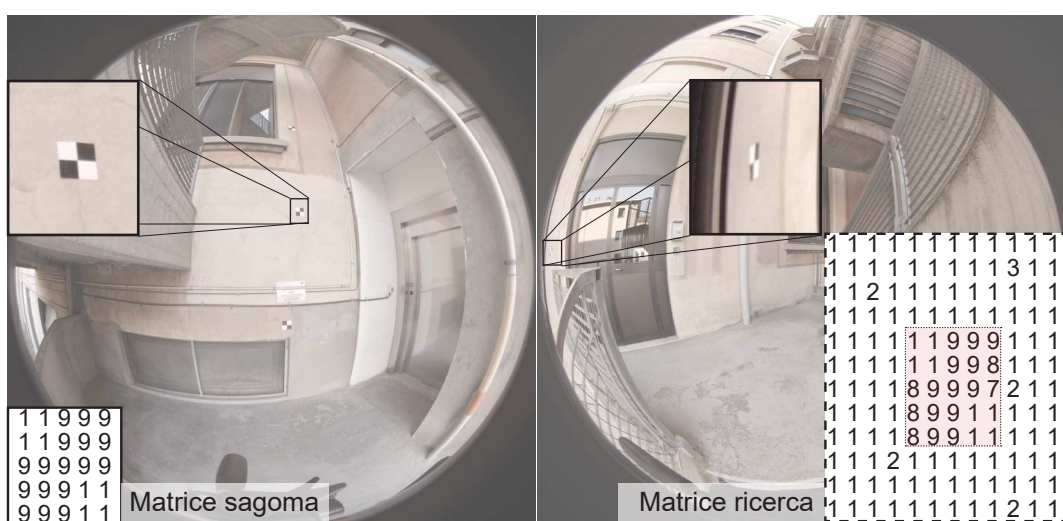


Fig. 7. Esempi di estrazione di un image patches e relativa determinazione delle matrici sagoma e ricerca su una coppia di immagini fisheye eseguite sul poligono di calibrazione utilizzato per la calibrazione delle camere in questo studio.

fico questo tipo di algoritmo è basato sul confronto delle intensità di grigio tra i *pixel* nelle immagini analizzate. In particolare vengono prese in analisi piccole porzioni di *pixel* estratte da immagini differenti. Queste porzioni immagine sono note come *image patches*. Una delle porzioni è definita matrice sagoma e viene tenuta fissa, mentre la seconda, detta matrice di ricerca, viene spostata sulla prima per trovare l'esatto punto di corrispondenza. Questo processo è basato principalmente su due tecniche per l'individuazione dei punti: *Cross-Correlation* e *Least-Squares Matching*.

La tecnica di *Cross-Correlation* mira alla ricerca della più alta correlazione tra i livelli di grigio tra le matrici derivate dagli *image patches*. La posizione cercata è quindi determinata dall'area in cui le matrici presentano la più alta correlazione rispetto a tutte le possibili posizioni della matrice di ricerca nell'immagine. Le tecniche di *Cross-Correlation* sono limitate ad una precisione al livello del *pixel*. Per ottenere precisioni più accurate al livello del *sub-pixel*, infatti, è necessario l'utilizzo della tecnica dei *Least Squares Matching* dal momento che quest'ultima tiene in considerazione le possibili deformazioni geometriche e radiometriche tra le due matrici comparate. Le deformazioni geometriche risultano sempre presenti nelle immagini dal momento che esse raffigurano lo stesso oggetto da punti di presa differenti.

1.4. Le fasi del processo fotogrammetrico

Le operazioni di rilievo fotogrammetrico si articolano in tre fasi distinte che possono essere identificate in:

- 1. Acquisizione:** questa fase si compone nella presa di immagini fotografiche tramite opportune tecniche attraverso macchine fotografiche che assumono il nome di camere;
- 2. Orientamento:** in questa fase sono determinati i parametri che definiscono le relazioni analitiche tra punti oggetto e punti immagine.
- 3. Restituzione:** questa fase si articola in numerosi passaggi operativi: *«l'esecuzione delle misure sul modello stereoscopico conseguente l'orientamento dei fotogrammi, la determinazione delle coordinate tridimensionali dei punti oggetto, il controllo e l'integrazione con rilievi ulteriori (editing) e la rappresentazione grafica finale.»*. [A. Spano, 2010]^{vi}

Le metodologie di acquisizione più utilizzate saranno illustrate sia per le acquisizioni terrestri che per quelle aeree nel corso di questo capitolo .

Quando, invece, si parla di orientamento fotogrammetrico è importante andare a suddividerlo in *orientamento interno* (che è legato alla stima dei parametri di camera che compongono i relativi certificati di calibrazione) e *orientamento esterno* in cui viene determinata la posizione dei fotogrammi sulla base dell'intersezione dei raggi proiettanti. Si parla di *orientamento esterno relativo* quando l'operazione è eseguita in una scala arbitraria e in una posizione generica dello spazio, mentre prende il nome di *orientamento esterno* il processo di rototraslazione e messa in scala del modello attraverso l'uso di punti di appoggio di coordinate note.

La fase di restituzione rappresenta l'ultimo stadio del processo e consente

di ottenere, (nel caso della fotogrammetria digitale), lo svolgimento automatico di tutte le operazioni necessarie, dalla analisi dei fotogrammi sino al tracciamento cartografico o alla produzione di modelli ed elaborati.

ORIENTAMENTO FOTOGRAMMETRICO		
Orientamento interno	Insieme di parametri che consentono di ricostruire la metrica della proiezione centrale, quindi delle stelle di raggi proiettanti. Essi sono uguali per tutti i fotogrammi del rilievo, in quanto legati alla camera utilizzata nella presa, e vengono forniti dal costruttore della camera in appositi documenti (certificati di calibrazione).	
Orientamento esterno	relativo	Determina la posizione relativa dei due fotogrammi, realizzando l'intersezione dei raggi proiettanti, dunque del modello tridimensionale dell'oggetto, ma in una scala arbitraria e con una giacitura spaziale generica (quindi svincolato dal sistema di riferimento assoluto XYZ legato all'oggetto rilevato).
	assoluto	Il modello ricavato nella fase precedente viene rototraslato e scalato, in modo da riferirlo al sistema di riferimento assoluto e dimensionarlo alla scala desiderata. In questa fase è necessaria la conoscenza della posizione di alcuni punti di appoggio al suolo.

Tab. 1. Schema del processo di orientamento fotogrammetrico [Cannarozzo. (2019). Retrieved from http://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Principi_e_strumenti_fotogrammetria.pdf].

1.5. Classificazione delle camere utilizzate nei processi di fotogrammetria e soluzioni innovative

Le camere utilizzate nei processi di fotogrammetrici tradizionali possono essere classificate in:

- 1. Camere metriche:** questa tipologia di camere viene realizzata appositamente per questi scopi. Corredato a queste camere è fornito un certificato di calibrazione nel quale sono illustrati con precisione i parametri di orientamento interno:
- 2. Camere semi-metriche:** sono soluzioni non progettate dal principio per applicazioni fotogrammetriche, ma adattate a queste successiva-

mente;

3. Camere amatoriali: sono le camere di uso comune che possono essere utilizzate grazie alla *Computer Vision* tramite processi di auto-calibrazione.

In relazione, poi, al modo di acquisizione dell'immagine fotografica, si possono distinguere:

1. Camere analogiche: in cui è sfruttato il processo chimico basato sull'emulsione fotosensibile su un supporto detto pellicola o su opportune lastre;

2. Camere digitali: in cui l'acquisizione avviene tramite sensori *CCD* che permettono la trasformazione di fotoni in elettroni e la relativa memorizzazione delle informazioni in file.

Negli ultimi anni tipologie innovative di camere hanno iniziato ad essere utilizzate nelle applicazioni pratiche di questa tecnologia. Le tecniche della fotogrammetria trovano applicazione con tipologie di sensori molto differenti in grado di immagazzinare informazioni di differenti tipologie: *RGB*, multi-spettrali, fino alle informazioni termiche. Soluzioni di utilizzo di sensori multi-spettrali stanno trovando particolari applicazioni ad esempio nella cosiddetta "agricoltura di precisione" che utilizza sensori in grado di percepire lunghezze d'onda relative al campo dell'infrarosso vicino per l'elaborazione di mappe di vigore delle culture attraverso il calcolo di indici vegetativi. Sensori termici sono utilizzati nell'edilizia e nelle ispezioni infrastrutturali. In questo lavoro saranno analizzate applicazioni innovative basate sull'utilizzo di camere sferiche multi-sensore che permettono, attraverso l'unione di immagini realizzate da ottiche fisheye la realizzazione di immagini sferiche..



Fig. 8. Esempio di camera metrica terrestre modello *WILD P32*. Il formato utile dell'immagini acquisita dalla camera è pari a 10 x 13 cm.



Fig. 9. Esempio della camera semimetrica *ROLLEI 6008 Phase One*. Formato sensore: 5440*4080 pixel 48.96 * 36.72 mm. Focale: 40 mm Dimensione pixel: 9 μ m.



Fig. 10. Alcuni esempi di camere amatoriali digitali. (a) Nikon D 800; (b) CANON EOS 5D; (c) KODAK DCS pro 14n.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 11. Alcuni esempi di soluzioni di camere innovative. (a) Agrowin - SONY QX1 Modificata; (b) Parrot Sequoia Multi-Spectral Sensor; (c) Sentra Quad Multispectral Sensor (d); Ista360 Pro; (e) Garmin VIRB 360; (f) Termocamera Flir Duo Pro R 336.

1.6. Fotogrammetria Terrestre - *Close Range Photogrammetry*

Quando si parla di *close range photogrammetry* (fotogrammetria degli oggetti vicini), solitamente, ci si riferisce alle applicazioni terrestri della tecnica. Spesso, l'ambito di applicazione più diffuso è quello architettonico dal momento che, questa tecnica risulta particolarmente adatta al rilievo di edifici ma anche di strutture più grandi (ponti, dighe etc.). Motore trainante degli sviluppi di questa tecnologia è stata la necessità di documentazione sempre più accurata del patrimonio dei beni culturali architettonici e archeologici. In questo paragrafo verranno illustrate le linee guida per l'effettuazione delle acquisizioni terrestri. Una delle tipologie maggiormente utilizzate, in particolar modo per le applicazioni di fotogrammetria architettonica è quella definita: "presa normale" in cui l'asse ottico è mantenuto il più ortogonale possibile alla facciata oggetto di rilievo. Come avverrà per le immagini aeree, anche nella fotogrammetria terrestre, assicurare che le immagini presentino porzioni di sovrapposizione risulta fondamentale. Affinché gli stessi punti dell'oggetto siano ripresi in due immagini consecutive, infatti, è necessario che questi presentino un'area in cui entrambi contengano la stessa porzione di oggetto. La sovrapposizione tra le immagini è legata

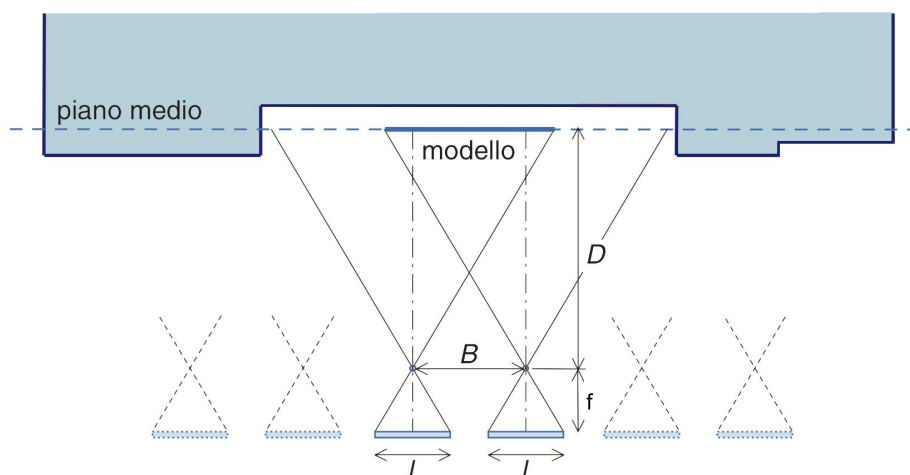


Fig. 12. Schema di un'acquisizione normale per la fotogrammetria terrestre.

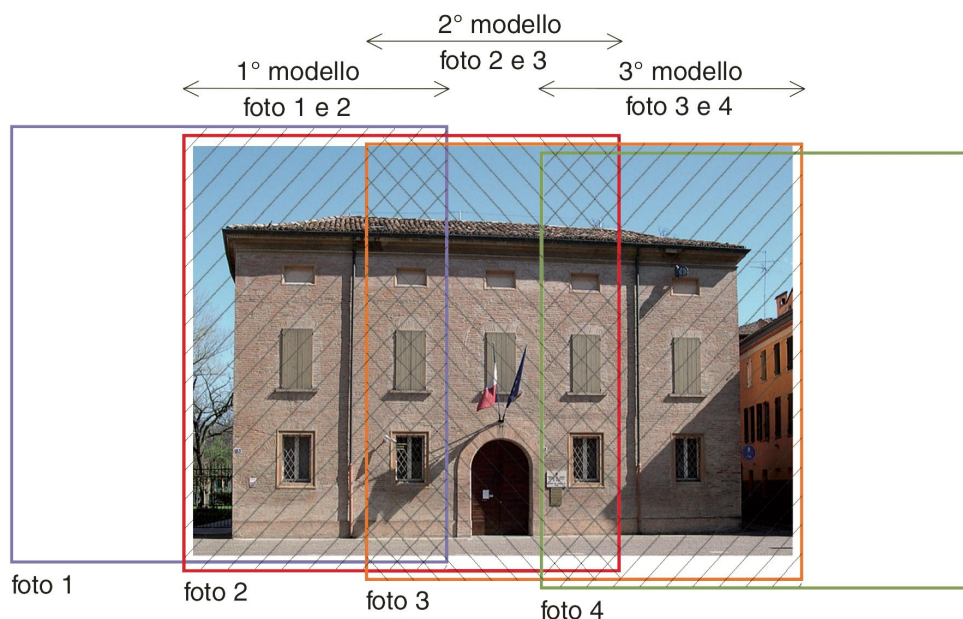


Fig. 13. Illustrazione relativa all'area di sovrapposizione tra immagini consecutive.

intrinsecamente al concetto di base di presa (indicato nell'immagine come B) ovvero la distanza tra due centri di presa consecutivi. Altro fattore che influenza l'*overlap* fra le immagini è l'abbracciamento (L) che corrisponde alla porzione reale dell'oggetto contenuta nell'immagine. Nella fotogrammetria tradizionale

$$B = \frac{l \cdot D}{p} \cdot (1 - \mu) \quad [1]$$

Fig. 14. Formula per la determinazione della base di presa. Per applicazioni aeree è necessario sostituire la distanza tra camera e oggetto (D) con l'altezza (H)

Se, per esempio, in un rilievo è stata determinata una distanza di acquisizione dall'oggetto del rilievo pari a 15 m con quest'ultima dotata di obiettivo di distanza principale $p = 50 \text{ mm}$ e formato $60 \cdot 60 \text{ mm}$, volendo ottenere un ricoprimento longitudinale del 70%, la base di presa dovrà essere:

$$D = 15 \text{ [m]}$$

$$p = 50 \text{ [mm]} \rightarrow 0.05 \text{ [m]}$$

$$l = 0.06 \text{ [m]}$$

$$\mu = 0,7 \text{ [-]}$$

$$B = \frac{0.06 \cdot 15}{0.05} \cdot (1 - 0.7)$$

Di seguito si illustrano le principali linee guida per la realizzazione di valide acquisizioni per le applicazioni di fotogrammetria terrestre relative al rilievo di oggetti isolati, di spazi interni e di prospetti. Come si può osservare dagli schemi è necessario eseguire le acquisizioni variando sempre il centro di presa spostandosi progressivamente intorno all'oggetto di interesse o linealmente e parallelamente al prospetto preso in esame.

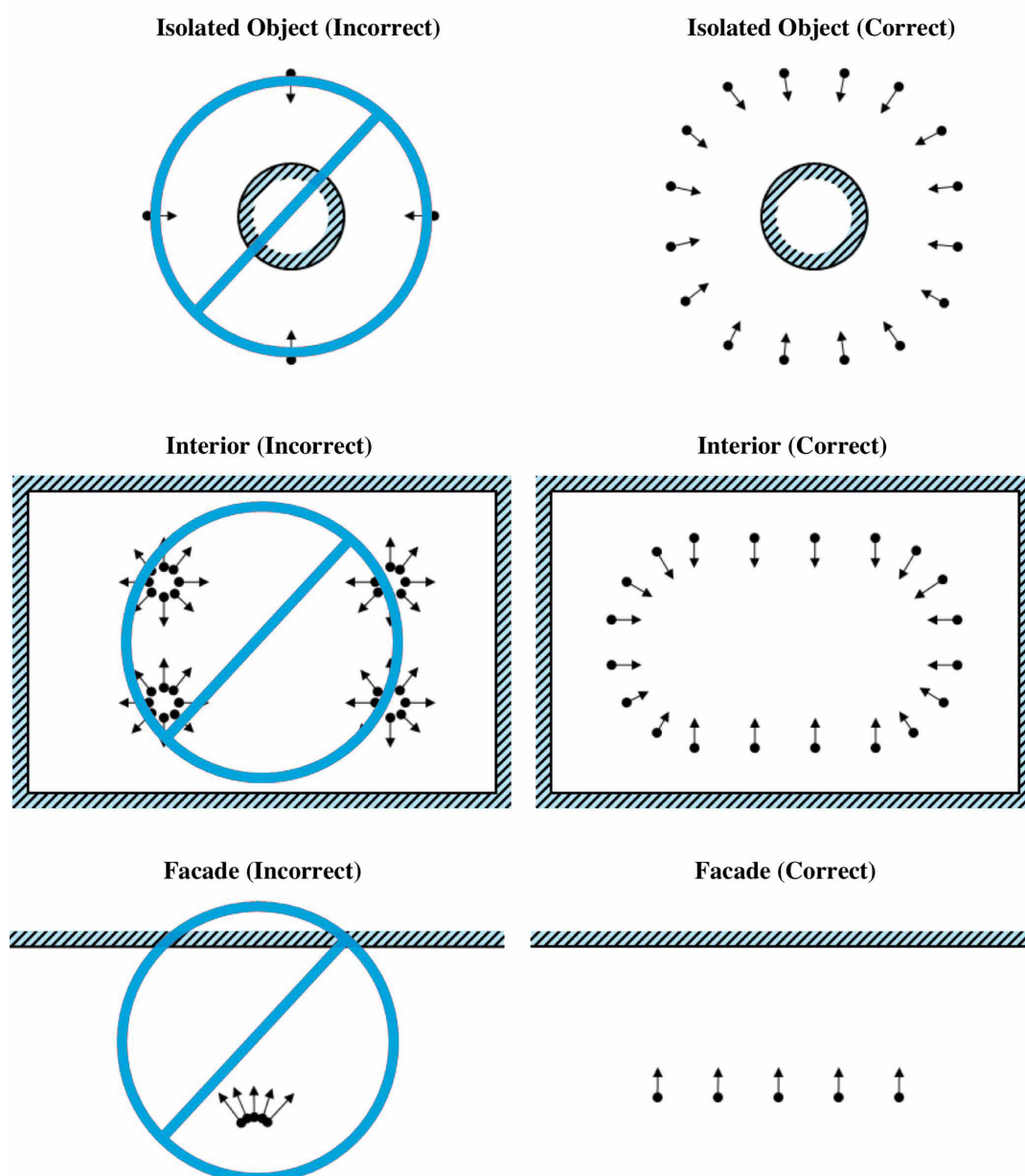


Fig. 15. Linee guida per esecuzione di acquisizioni terrestri di *close range photogrammetry*, relative al rilievo di oggetti isolati, ambienti interni e prospetti. [Agisoft LLC. (2018). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4 [Ebook] (pp. 9-10). Retrieved from https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf]

1.7. Approccio aerofotogrammetrico territoriale

Le principali applicazioni della tecnica fotogrammetrica hanno trovato largo impiego nel rilevamento del territorio e la produzione di cartografia avvalendosi delle acquisizioni da aereo. Il ricorso alla fotogrammetria aerea ha permesso la realizzazione e il relativo aggiornamento della Cartografia Nazionale a differenti livelli di scala (1:25.000, 1:50.000 e 1:100.000), oltre alle Cartografie Tecniche Regionali (in scala 1:5.000 e 1:10.000) fino ad arrivare alle scale urbane per la realizzazione della relativa cartografia tecnica a scala ravvicinata (1:500, 1:1.000). Attualmente, inoltre, a corredo delle carte tecniche si trova la *Cartografia Tematica* rappresentate a differenti scale (ad es. *Mappe di Dissesto Idrogeologico, Geologica, Uso del suolo*). L'utilizzo di database topografici integrati alla tecnologia GIS (*Geographic Information Systems*) ha reso facilmente accessibili queste tipologie di dati permettendo un sostanziale miglioramento della conoscenza del territorio.

La fotogrammetria aerea ha permesso che si sviluppassero elaborati chiamati *ortofotocarte*, ovvero carte realizzate a partire da informazioni foto-

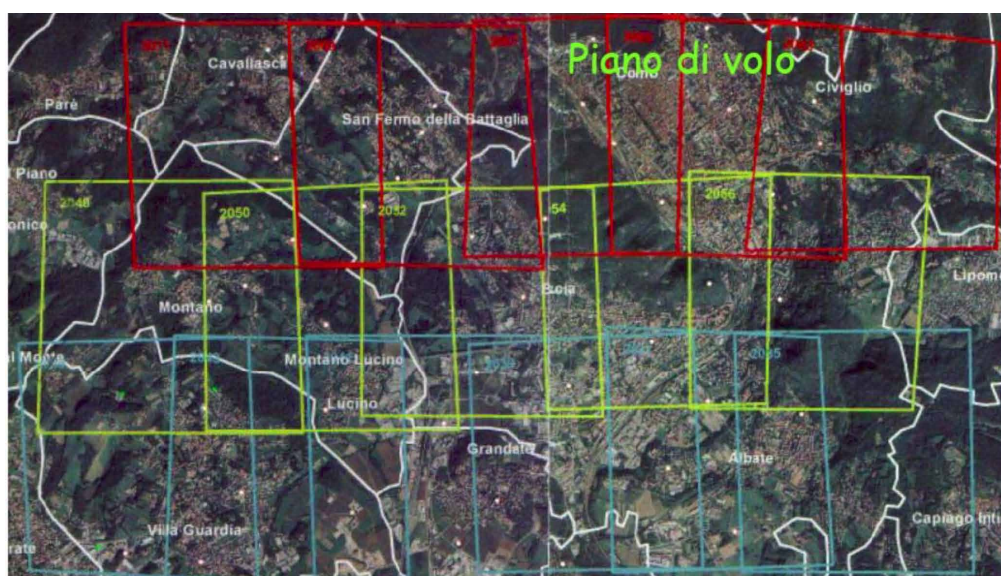
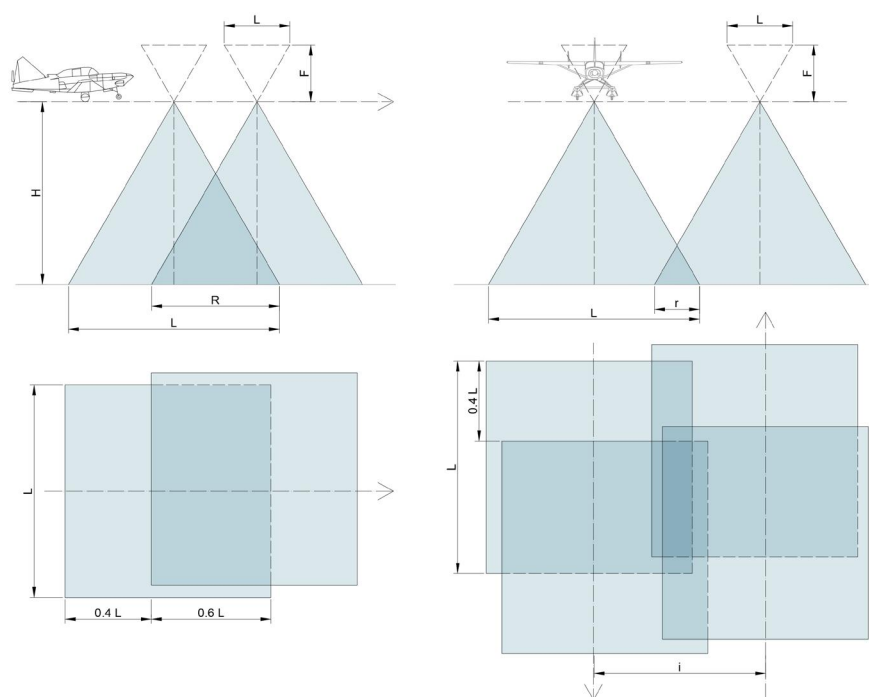


Fig. 16. Determinazione area di sovrapposizione (*overlap* e *sidelap*) tra le strisciate su un'acquisizione fotogrammetrica aerea [Fichera, P. *Dispense Corso di Laurea Costruzioni rurali e Topografia - Rilievo e rappresentazione del territorio*. Università Mediterranea Reggio Calabria. Retrieved from https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/598_2008_71_2237.pdf]

grafiche in scala, oltre che le prime rappresentazioni digitali dei modelli del territorio che hanno assunto diversi nomi: *DSM*, *DTM*, *DEM*, in funzione della tipologia di rappresentazione del terreno. Analogamente a quanto riportato per le acquisizioni terrestri, quelle aeree sono realizzate eseguendo traiettorie di volo a velocità e quota di volo costante acquisendo le immagini con valori di overlap stabilito a priori. Per questo tipo di applicazioni sono impiegate particolari camere metriche appositamente realizzate per essere montate su aeromobili. Le acquisizioni territoriali sono realizzate attraverso l'acquisizione di sequenze di fotogrammi ad intervalli regolari. I piani di volo sono elaborati per ottenere una sovrapposizione di almeno il 60% tra i fotogrammi adiacenti di ogni strisciata (*overlap*), garantendo allo stesso tempo una sovrapposizione laterale minima del 15% (*sidelap*).



H = quota di volo

f = focale dell'obiettivo della camera di presa

R = *overlap*; r = *sidelap*

L = lato del quadrato di territorio inquadrato

l = lato del quadrato della pellicola fotografica (23 cm)

Fig. 17. Sovrapposizione longitudinale (*overlap*) e trasversale (*sidelap*) tra le strisciate su un'acquisizione fotogrammetrica aerea. [Tratto e rieditato: Fichera, P. *Dispense Corso di Laurea Costruzioni rurali e Topografia - Rilievo e rappresentazione del territorio*. Università Mediterranea Reggio Calabria. Retrieved from https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/598_2008_71_2237.pdf]

1.8. Metodologia tradizionale per le acquisizioni attraverso aerofotogrammetria da UAV

L'uso della fotogrammetria aerea ha subito una profonda modificazione con l'avvento dei droni, mezzi che, negli ultimi anni, hanno contribuito sensibilmente alla trasformazione di una pratica che risultava consolidata ormai da tempo. L'avvento di questi mezzi ha reso possibile effettuare acquisizioni aeree alla scala del singolo edificio permettendo di operare a quote drasticamente più basse (con la fotogrammetria da aereo per ragioni di sicurezza non si scendeva sotto i 300 metri di quota), ma, soprattutto abbattendo drasticamente i costi delle strumentazioni che con gli sviluppi paralleli della *Computer Vision* hanno reso possibile l'utilizzo di camere a basso costo grazie ai sofisticati algoritmi di auto-calibrazione.

In questo paragrafo si illustreranno le principali tipologie di acquisizione che solitamente vengono impiegate sui droni. Come nelle applicazioni terrestri e da aereo, la sovrapposizione tra le immagini è la chiave per la riuscita del processo. Per eseguire un'acquisizione aerea è necessario effettuare una pianificazione dei voli andando a determinare, sulla base della scala di rappresentazione attesa: la quota, la velocità del mezzo, la tipologia di camera

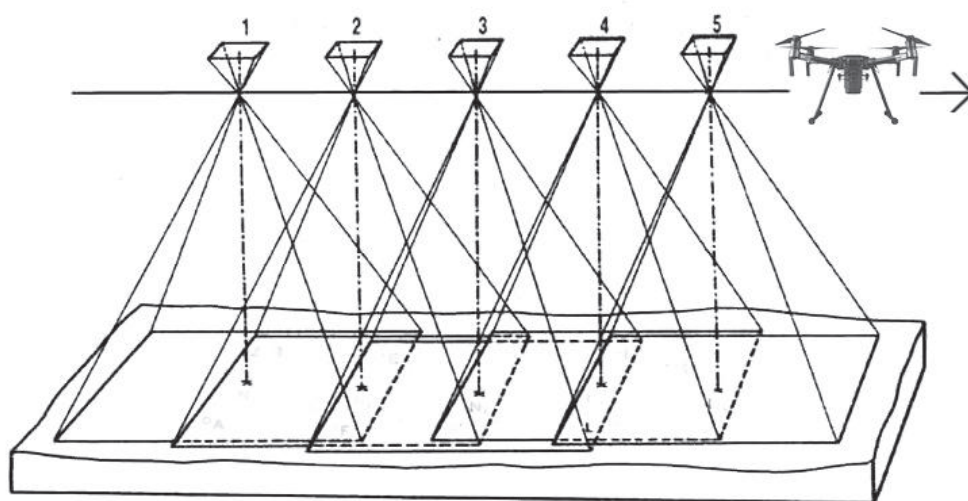


Fig. 18. Schematizzazione di una strisciata da UAV con acquisizioni nadirali.

utilizzata ed il numero di scatti. La soluzione più performante, analogamente a quanto descritto per le acquisizioni da aereo, è quella di realizzare dei passaggi aerei paralleli detti “strisciate” effettuando acquisizioni mantenendo la camera nadirale, ovvero con l’asse ottico normale al terreno. In alcuni casi le strisciate sono ripetute secondo passaggi tra loro ortogonali per aumentare ulteriormente la sovrapposizione tra le immagini acquisite. Oltre alle acquisizioni nadirali da qualche anno si sono introdotte le prese inclinate a 45° . L’uso delle acquisizioni inclinate ha permesso di raggiungere obiettivi prima di allora inimmaginabili nella ricostruzione degli alzati dei fabbricati. L’uso delle immagini inclinate, infatti, migliora significativamente

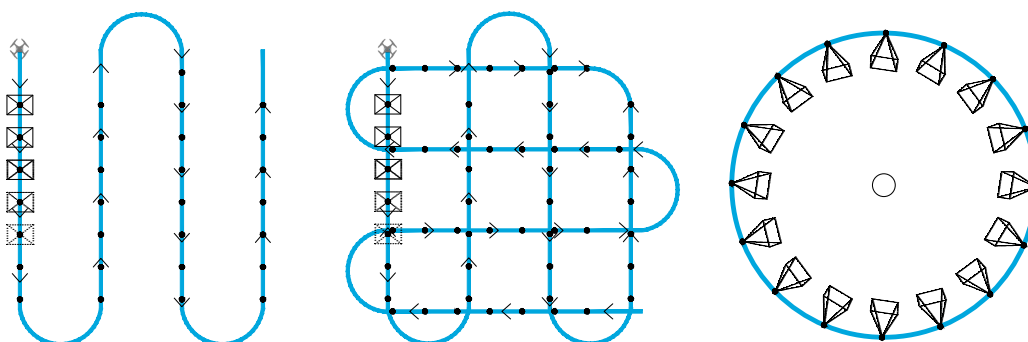


Fig. 19. Tipologie di pianificazioni di voli fotogrammetrici da UAV. (A) Strisciata singola; (B) Strisciata a doppia maglia; (C) Volo circolare.

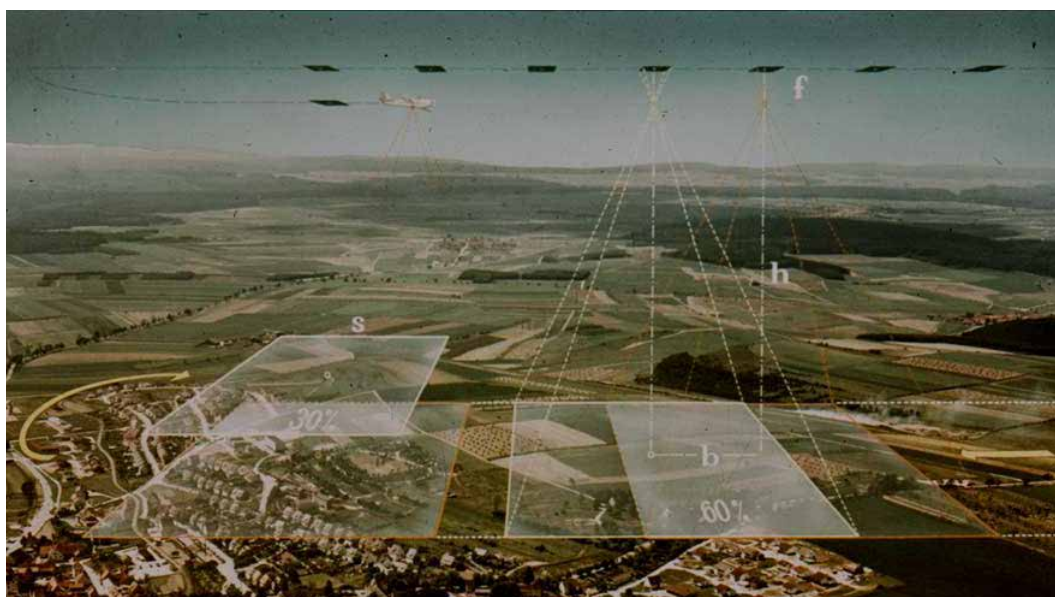


Fig. 20. Sovrapposizione tra le immagini in un'acquisizione aerea [Tratto dal catalogo illustrativo Carl Zeiss 1976 https://it.wikiversity.org/wiki/Rilievo_aerofotogrammetrico consultato il 23/12/2018]

la tridimensionalità del modello ricostruito. Come per le acquisizioni nadirali, anche nel caso delle inclinate si utilizza una pianificazione automatica composta da strisciate che spesso sono replicate in entrambi i sensi. Altra tipologia di acquisizione è quella circolare dove le acquisizioni inclinate vengono realizzate non più attraverso strisciate parallele ma seguendo un volo circolare attorno all'oggetto. Nel corso di questo lavoro sarà analizzato un'applicazione innovativa di rilievo fotogrammetrico eseguito da *UAV* tramite una particolare camera composta da due sensori fisheye posti in direzioni opposte, in grado di acquisire panorami sferici a 360°. Questo sistema appena illustrato è impiegato per valutare le potenzialità di ricostruzione tridimensionale per scenari di emergenza in cui il tempo per le acquisizioni ed elaborazioni deve essere estremamente rapido.

1.9. Le immagini e la fotogrammetria sferica

La fotogrammetria sferica è una particolare tecnica che si basa sull'utilizzo di panorami multi-immagine come supporto per acquisire informazioni [G. Fangi, 2006^{VII}, 2007^{VIII}, 2010^{IX}]. Uno dei punti di forza di questa tecnica è quello di presentare bassi costi di strumentazione oltre che estrema rapidità sul campo permettendo quindi anche a soggetti non esperti la fase di acquisizione [D. Abate et al, 2017]^X.

I panorami sferici sono il risultato della somma di più immagini parzialmente sovrapposte realizzate dallo stesso punto di presa, proiettate sulla superficie di una sfera virtuale e, successivamente, rappresentate in un piano seguendo le tecniche delle rappresentazioni cartografiche.

Punto di forza è quello dell'ampiezza di campo dei panorami che, essendo a 360°, permette una comprensione più completa dell'oggetto oltre alla possibilità di fruire dei panorami attraverso la navigazione in realtà virtuale disponibile in tempi estremamente rapidi e con risultati immersivi prima non raggiungibili. Rispetto al loro uso per la ricostruzione tridimensionale questa tecnologia permette di ridurre in modo drastico il numero di immagini rispetto ad acquisizioni fotogrammetriche eseguite con camere non sferiche. Per le immagini sferiche così come per le immagini tradizionali, è necessario definire un sistema di identificazione univoco dei punti sull'immagine. Po-



Fig. 21. Proiezione panoramica eseguita da un drone.

nendo infatti che l'ambiente geometrico non sia più il piano euclideo ma piuttosto la superficie di una sfera, per individuare un punto P è necessario ricorrere ad un sistema che differisce dalle comuni coordinate cartesiane. Considerando che il piano euclideo (che nominiamo E) e la superficie sferica (S) siano due superfici bidimensionali, sono necessari due parametri per identificare in modo univoco un punto nello spazio. Questi parametri prendono il nome di *ascissa-ordinata* nel piano bidimensionale e *latitudine-longitudine* per la superficie sferica. La principale differenza è che nel primo caso i parametri si riferiscono a misure di distanze, mentre, nel secondo caso, i parametri corrispondono a misure angolari. Con questa premessa appare evidente che questo tipo di rappresentazione permette di ricavare le direzioni angolari analogamente misurabili tramite un teodolite con il centro coincidente con quello della sfera [G. Fangi, 2010^{XI}].

“I limiti della tecnica invece sono quelli comuni alla fotogrammetria monoscopica, in cui la restituzione è limitata ad alcuni punti isolati, che devono essere ben riconoscibili nelle diverse immagini... La precisione di restituzione è quella tipica dei sistemi fotogrammetrici monoscopici multi-immagine, cioè compresa fra 1/1000 e 1/5000 della distanza oggetto-fotocamera. La tecnica si presta bene a rilievi a breve distanza.” [E. D'Annibale 2012]^{XII}

La generazione dei panorami multi-immagine è resa possibile dallo sviluppo di sistemi automatici di *stitching* (ovvero di unione dei differenti fotogrammi che saranno approfonditi nelle prossime pagine) che hanno permesso lo sviluppo di questa tecnica rendendola fruibile per l'utilizzo di qualsiasi macchina fotografica o smartphone. Rispettando alcune condizioni necessarie per la buona riuscita di un panorama sferico, infatti, come l'acquisizione da un punto di presa fisso e un buon *overlap* (ovvero l'area di sovrapposizione tra le immagini) è possibile ottenere validi risultati velocemente. Sarà approfondita in questo studio, inoltre, la possibilità di acquisizione di questo

tipo di panorami utilizzando veicoli a pilotaggio remoto (comunemente noti come droni), sia attraverso immagini single frame acquisiti da fotocamere con ottiche tradizionali che attraverso obiettivi *fish-eye*, connesse tramite processi specifici.

1.9.1. Equazioni di corrispondenza tra superficie sferica e piano della rappresentazione

A partire dalla proiezione delle immagini su una sfera virtuale è possibile che la rappresentazione avvenga su un piano attraverso la proiezione *azimut-zenit* anche detto *latitudine-longitudine* o equirettangolare. Di seguito sono riportate le equazioni di corrispondenza tra superficie sferica e piano della rappresentazione:

$$x=r.\theta \text{ e } y = \varphi.r$$

Nella semplice formula θ e φ rappresentano gli angoli di direzione al punto oggetto, mentre x e y sono le coordinate immagine ed r il raggio della sfera. Le coordinate sono quindi scalate di un valore pari al raggio della sfera. A differenza del teodolite, l'asse della sfera non può essere reso verticale con lo stesso grado di precisione rendendo necessario stimare due angoli di rotazione attorno agli assi orizzontali x e y . [tratto da Fangi, 2010]^{xiii}. Oc-

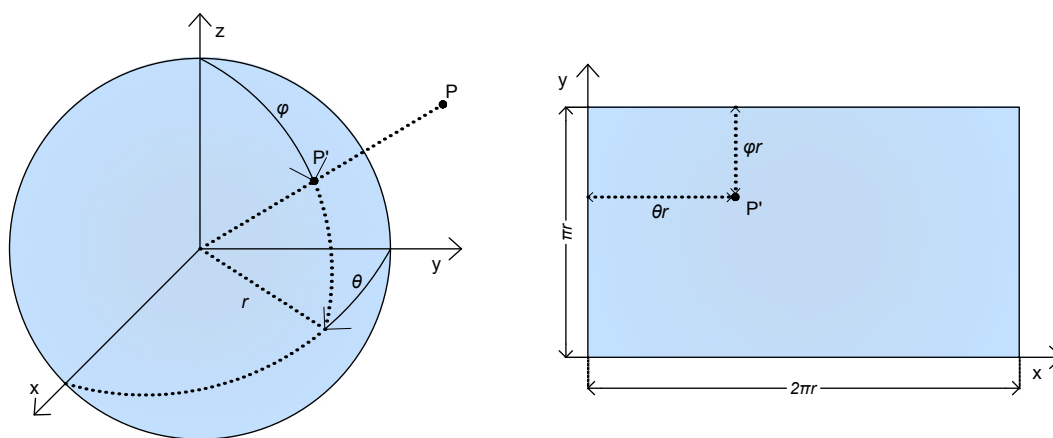


Fig. 22. Rappresentazione grafica della latitudine/longitudine. Nella figura θ e φ rappresentano gli angoli di direzione al punto oggetto, mentre x e y sono le coordinate immagine ed r il raggio della sfera.

corre pertanto identificare e applicare due angoli di rotazione per rendere l'asse della sfera verticale permettendo la restituzione di misure angolari corrette.

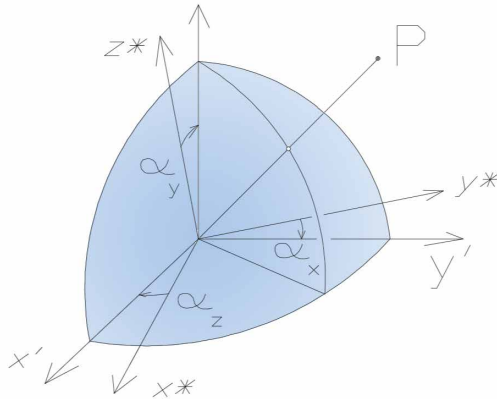


Fig. 23. Compensazioni angolari per determinare la verticalità dell'asse verticale. Tratto e rieditato da D'Annibale, E. (2012). *Fotogrammetria close-range e visual design per i beni culturali* (Università Politecnica delle Marche), pag 33.

“Le equazioni tra le coordinate terreno X, Y, Z di un arbitrario punto oggetto P , le coordinate sfera X', Y', Z' del suo punto immagine P' , in un sistema centrato nel centro della sfera di coordinate X_0, Y_0, Z_0 e parallelo a quello terreno, sono:

$$[1] \quad \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -d\alpha_y \\ 0 & 1 & d\alpha_x \\ d\alpha_y & -d\alpha_x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \sin \theta \sin \varphi \\ d \cos \theta \sin \varphi \\ d \cos \varphi \end{bmatrix}$$

Dividendo la prima per la seconda si elimina la distanza all'oggetto d e le [1] diventano con semplici passaggi:

$$[2] \quad y = R \cdot a \cos \frac{\alpha_y(X - X_0) - \alpha_x(Y - Y_0) + (Z - Z_0)}{\sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2}}$$

$$x = R \cdot \left(-\theta_0 + \operatorname{atg} \frac{(X - X_0) - \alpha_y(Y - Y_0)}{(Y - Y_0) + \alpha_x \cdot (Z - Z_0)} \right)$$

Se poniamo $d\alpha_x = d\alpha_y = 0$ otteniamo le consuete equazioni alla direzione orizzontale e all'angolo zenitale, avendo trascurato l'effetto di sfericità e rifrazione. La restituzione avviene per intersezione di due o più rette proiettive [2].” [tratto da Fangi, 2010]^{XIV}

Le coordinate del centro di presa (x, y, z) e i tre angoli di assesto (ω, φ, κ)^{xv} degli assi sono i sei parametri di orientamento di un panorama sferico mentre l'orientamento interno e le distorsioni delle immagini sono stimate dal software di elaborazione.

L'orientamento tra panorami avviene tramite le condizioni di complanarità come si orienta una stazione di teodolite [G. Fangi, 2010]^{xvi} effettuando una rototraslazione nel nuovo sistema di riferimento di una serie di coordinate di punti stimate. La ricostruzione 3d dell'oggetto avviene successivamente tramite intersezione di rette proiettive.

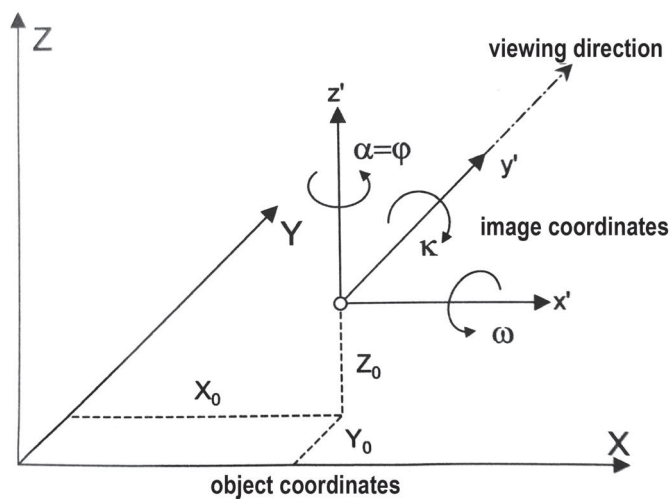


Fig. 24. L'Orientamento esterno nella fotogrammetria. Le coordinate del centro di presa (x, y, z) e i tre angoli di assesto (ω, φ, κ). [tratto da: Luhmann, Thomas & Robson, Stuart & Kyle, Stephen & Boehm, Jan. (2013). Close Range Photogrammetry and 3D Imaging.]

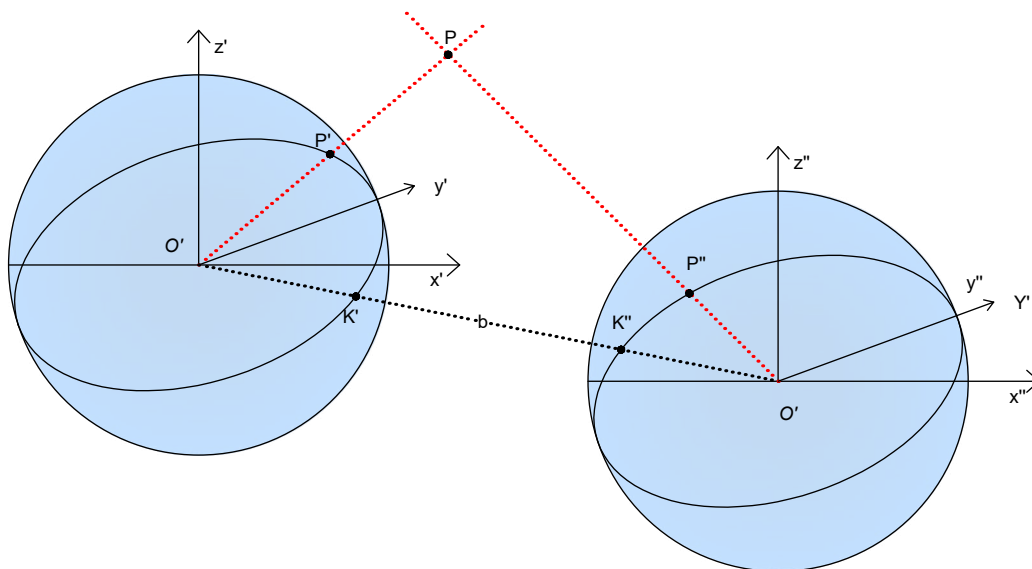


Fig. 25. Rappresentazione grafica della rette proiettive per la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto.

1.10. L'orientamento assoluto e il rilievo di appoggio per la fotogrammetria

Nei paragrafi precedenti si è accennato al tema dell'orientamento esterno suddividendolo in orientamento relativo e orientamento assoluto. La finalità delle ricostruzioni tridimensionali realizzate attraverso il ricorso alla fotogrammetria è solitamente quello di estrarre dai modelli informazioni metriche accurate. Per raggiungere questi obiettivi si rende necessaria la rototraslazione e scalatura al fine di restituire un modello correttamente disposto nello spazio. Per effettuare questi passaggi è necessario disporre delle coordinate di alcuni punti che risultino chiaramente identificati nelle immagini. Per l'ottenimento di queste coordinate di questi punti si ricorre ai rilievi topografici attraverso l'impiego di stazioni totali o attraverso *GPS* topografici. A seguito del processo di orientamento le coordinate passano da un sistema immagine locale e bidimensionale ad un sistema tridimensionale. La conseguenza di questo è il fatto che, a seguito dell'orientamento esterno, è possibile ricavare le coordinate di qualsiasi punto visibile nelle immagini nelle sue tre componenti x , y , z .

Senza entrare nel merito dei processi del rilievo topografico, si sottolinea che in questo lavoro sono stati utilizzati differenti soluzioni per il rilievo delle coordinate dei *control point* sia attraverso stazione totale, (utilizzando più tecniche di rilievo tra cui il rilievo diretto di punti attraverso celerimensura e la tecnica dell'intersezione in avanti), che il ricorso a *GPS* topografici avvalendosi di una particolare tecnologia detta *NRTK*. Quest'ultima è risultata particolarmente indicata dal momento che, nell'ottica di simulare un impiego dei panorami sferici in scenari di emergenza, risultata la tipologia che fornisce in tempi contenuti coordinate dei punti di controllo con precisioni compatibili con gli obiettivi prefissati in questo lavoro.

Sarà di seguito introdotto un approfondimento sul rilievo topografico satellitare in quanto è stato quello maggiormente impiegato nelle applicazioni testate.

1.11. Rilievo Topografico Satellitare

Lo sviluppo tecnologico e scientifico ha portato, alla fine degli anni '90, all'introduzione della geodesia satellitare e alla progressiva e diffusione dei satelliti in orbita intorno alla terra. In breve tempo si è intuita la possibilità di utilizzo per scopi geodetici garantendo precisioni significative anche in rilievi di grandi estensione. I sistemi satellitari permettono, infatti, la localizzazione sulla superficie terrestre di punti. Il sistema più noto è quello di matrice statunitense detto *Global Positioning System* o *GPS*, realizzato per scopi militari e successivamente esteso all'uso civile. La controparte russa



Fig. 26. Rappresentazione grafica della rette proiettive per la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto.

è il *Global Navigation Satellite System* o *GLONASS* il quale differisce dal *GPS* per la tipologia di elementi come: *control segment*, *space segment* e *signal structure*. Il sistema *GNSS* subì un forte calo in termini di quantità di satelliti con la caduta dell'*Unione Sovietica* ma dal 2011 risulta pienamente operativo.

Il posizionamento satellitare è possibile andando a calcolare il tempo intercorso tra l'invio di un segnale da un satellite in orbita e la sua ricezione da parte di un'antenna sulla terra.

In questo paragrafo sarà fornita un introduzione generale al funzionamento del sistema di posizionamento e particolare attenzione sarà posta sul funzionamento della tecnologia *NRTK*. Per definire la posizione di un punto sulla superficie terrestre è necessario che l'antenna a terra riceva le informazioni da più satelliti. Nello specifico un solo satellite vincola la posizione del ricevitore ad una sfera, mentre due satelliti vincolano la posizione del



Fig. 27. Rappresentazione grafica della rette proiettive per la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto.

punto alla circonferenza, generata dall'intersezione delle due sfere. Con tre satelliti la posizione è limitata ulteriormente a due punti. Con tre satelliti è possibile determinare la posizione considerando il fatto che uno dei due punti di intersezione è posto in posizione diametralmente opposta al punto di interesse sulla superficie terrestre. È opportuno che l'antenna veda un numero molto maggiore di satelliti per aumentare la precisione in modo proporzionale.

Il principio fisico su cui si basa la misura satellitare è dipendente dalla relazione che intercorre tra velocità spazio e tempo, in particolare:

$$\text{Velocità (V)} = \text{spazio (S)} / \text{tempo (T)}$$

da cui

$$S = V \cdot T$$

Per *spazio* si intende la distanza percorsa dal segnale satellitare e per velocità la *velocità* della luce. Ciò che avviene è essenzialmente una misura del



Fig. 28. Connessione del ricevitore satellitare topografico alla rete delle stazioni permanenti attraverso l'uso della connessione di rete.

tempo impiegato dal messaggio a raggiungere l'antenna ricevente da quando è stato trasmesso. I satelliti trasmettono un segnale semplice ripetuto nel tempo, quello che è necessario sapere è quando il messaggio sia stato trasmesso al satellite. Un solo milionesimo di secondo di differenza comporta un errore nell'ordine dei 300 m. Per gli scopi topografici si è optato quindi ad analizzare anche la lunghezza dell'onda elettromagnetica su cui viaggia il messaggio, effettuando un conteggio relativo al numero di onde intere che arrivano al ricevitore e misurando lo sfasamento che ne rimane.

Bisogna tenere in considerazione, inoltre che le onde elettromagnetiche trasmesse dal satellite al ricevitore terrestre non viaggiano nel vuoto ma attraversano l'atmosfera la cui velocità di propagazione varia a seconda degli strati attraversati. Ottenere errori centimetrici a causa di quanto accennato risulta pertanto impossibile utilizzando un solo ricevitore.

Per ovviare a queste problematiche si ricorre a quello che è definito come posizionamento differenziale che si basa sull'utilizzo di un secondo ricevitore posto in una posizione differente. Entrambe le misure risulteranno affette dalla stessa tipologia di errore, ma, attraverso il metodo del posizionamento differenziale, che si basa sulla determinazione della cosiddetta *baseline*, ovvero il vettore che li congiunge, è possibile il raggiungimento di precisioni centimetriche. Sfruttando il principio alla base del metodo di posizionamento differenziale, tuttavia, hanno iniziato a diffondersi sul territorio una serie di ricevitori fissi, detti stazioni permanenti, che permettono di accedere ai dati che questi registrano e permettano il contatto da parte di un secondo ricevitore in modalità *RTK*. Allo stato attuale esistono servizi di stazioni permanenti gratuiti o a pagamento. Grazie a queste reti di stazioni permanenti risulta possibile pertanto effettuare un rilievo attraverso un solo ricevitore satellitare topografico con precisioni adatte al rilievo metrico con precisioni centimetriche.

1.11.1. NRTK Network Real Time Kinematic

Da qualche tempo sono state create reti attraverso la condivisione dei dati di diverse stazioni permanenti. Queste reti permettono un particolare posizionamento che si chiama NRTK (Network Real Time Kinematic). Questa tecnologia sfrutta la rete di stazioni permanenti i cui dati, dopo essere stati processati in un centro di calcolo, sono inviati al ricevitore sul campo, attraverso connessione dati GSM, al fine di effettuare le correzioni RTK di rete.

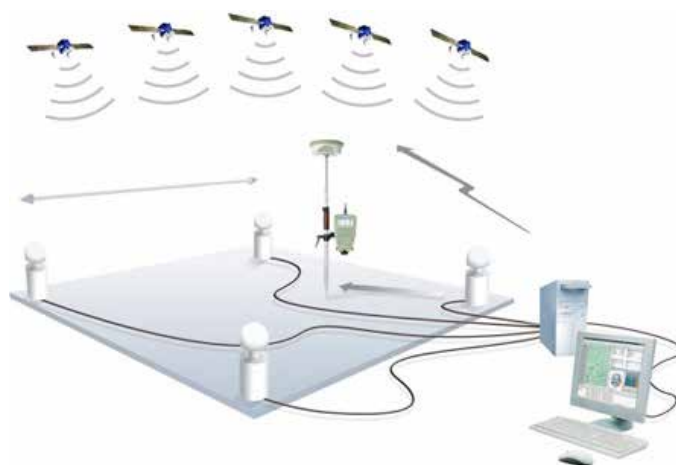


Fig. 29. Rappresentazione grafica della rette proiettive per la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto.

In questo lavoro l'utilizzo della tecnologia RTK è stata testato attraverso l'utilizzo della rete di stazioni permanenti gratuita della *Regione Piemonte* e di quella a pagamento di *ItaPos*. La scelta di utilizzare la tecnologia NRTK è stata dettata dalla necessità di rapidità di acquisizione dei dati sul campo ricercando una soluzione in grado di ottenere precisioni elevate. Questa soluzione corredata dalle acquisizioni sferiche è risultata particolarmente adatta al rilievo in situazioni di emergenza in cui il tempo è un fattore non trascurabile.

1.12. Scelta della camera sferica utilizzata nello studio

Lo sviluppo di sensori innovativi negli ultimi anni ha subito una brusca accelerazione dovuta allo sviluppo di nuovi dispositivi sempre più performanti, alla fruizione più agevole dei contenuti acquisiti ed alla possibilità di condivisione di immagini e video. In particolare sarà approfondito in questo lavoro il tema dello sviluppo dei sensori *fisheye* applicati alla realizzazione di panorami sferici. L'innovazione della fotografia sferica ha permesso la diffusione di nuove potenzialità ancora in parte inesplorate garantendo la possibilità di scenari innovativi mai vista prima d'ora. Quando colossi come *Google* e *Facebook* hanno permesso la condivisione di questo tipo di contenuti la rivoluzione è iniziata. Non solo, un fattore chiave, (forse il più importante), in questo campo è stata la riduzione vertiginosa dei costi di questi dispositivi. Attualmente esiste in commercio una moltitudine di soluzioni a basso costo le cui soluzioni più economiche si aggirano intorno al centinaio di euro. Ulteriore spinta a questa nuova tipologia di fotografia è stata resa possibile grazie a soluzioni software che permettono la generazione di panorami attraverso l'unione delle immagini acquisite tramite l'uso di normali fotocamere (comprese quelle di comuni smartphone). Questo non è certo il primo studio che utilizza questo tipo di camere con finalità di ricavare e testare la capacità di ottenere dati metrici (per citarne alcuni G. Fangi (2006)^{xvii} ; K. Kwiatek & R. Tokarczyk, (2014)^{xviii} ; A. Pérez Ramos, G. Robleda Prieto, (2016)^{xix} . Tuttavia, a differenza degli studi precedentemente condotti, l'obiettivo di questo lavoro è stato quello di testare l'uso di una camera sferica composta da due sensori fisheye opposti che permettono un'acquisizione a 360° con la finalità di sperimentare applicazioni di fotogrammetria applicata a UAV e applicazioni di *Virtual Reality*.

La scelta della camera oggetto di questo studio è stata pertanto fonda-

mentale dal momento che, per le finalità illustrate erano richieste differenti caratteristiche:

1. Medio basso costo;
2. Peso contenuto per applicazioni da *UAV*
3. Migliore risoluzione rispetto a quelle testate in studi precedenti
4. Soluzione compatta
5. Possibilità di controllo remoto
6. Possibilità di temporizzare gli scatti

Problematica emersa da precedenti applicazioni di bibliografia con immagini sferiche è stata la risoluzione della camera. Non a caso in uno studio pubblicato da S. Kossieris & al, (2017)^{xx}, nel processo di acquisizione dati delle tortuose strade medievali di *Kalamoti*, veniva adoperata una camera 360° per l'acquisizione ottenendo scarsi risultati al punto tale da testarne l'utilizzo (in un secondo tentativo) solamente per orientare altri scatti realizzati da altre *action camera*. La scelta di testare nuovamente il sistema, tuttavia, appare fondata per il miglioramento delle prestazioni di questa nuova tipologia di camera e dell'uscita sul mercato di nuove soluzioni commerciali sulla carta più performanti. Obiettivo del lavoro come anticipato è quello di proporre una soluzione di acquisizione dello spazio rapida ed economica in grado di restituire buoni risultati in breve tempo. Si è deciso pertanto di testare un prodotto dal prezzo accessibile nell'ottica di proporre una soluzione ed una metodologia di lavoro relativamente *low cost*.

La scelta è ricaduta sulla *GoPro Fusion*. Questa soluzione è apparsa la migliore per gli obiettivi preposti componendosi di una camera che integra due sensori da 1/2.3" a 9.3 MP ciascuno in grado di acquisire filmati in 5.2K

RIEPILOGO CARATTERISTICHE TECNICHE CAMERA 360°	
	
CAMERA 360° GOPRO FUSION	
Weight	200g
Sensor	2 x CMOS
Sensor Size	2x 1/2.3"
Pixel Size	0.00112 mm
Sensor Resolution	9.3 MP
Focal Length	1.218 mm
Maximum Aperture	f/2.8
Size (W x H x D)	2.9 x 2.9 x 1.2" / 7.4 x 7.4 x 3.0 cm
Still Image Resolution	18 Megapixel
Video Resolution	5228 x 2624 at 25, 30 fps
	3000 x 1504 at 50, 60 fps
Supported Projection Types:	Equirectangular

Tab. 2. Nella tabella le principali caratteristiche tecniche relative alla camera 360° Gopro Fusion

nel peso di circa 200g. Inizialmente erano state prese in considerazione soluzioni multi-camera (come ad esempio supporti per sei *action camera* che acquisivano in contemporanea ad angolazioni differenti). Quest'ultima soluzione non risultava funzionale dal momento che il peso del *payload* era eccessivo per essere sollevato da *UAV* secondo le normative per il volo in scenari urbani (successivamente approfondito), ma, soprattutto perché per questa tipologia di sistema era già stato testato in ricerche precedenti [L. Teppati Losè, & al, 2017]^{XXI} con buoni risultati ma problemi non trascurabili

nell'unione dei panorami e nell'estrazione delle immagini, le cui acquisizioni necessitavano di essere sincronizzate tra le sei differenti camere. Come sarà illustrato nel corso dei prossimi capitoli si è cercato di realizzare una soluzione *CAMERA+UAV* dal peso inferiore ai 2 kg di massa operativa al decollo al fine di semplificare il *risk assessment* delle operazioni sul campo. L'obiettivo era quindi quello di realizzare un *payload* di peso contenuto, trasportabile dal drone senza difficoltà e con un ingombro che non interferisse con il *gimbal*¹ e la relativa camera installata di serie sull'*UAV*.

La scelta della *GoPro Fusion* rispetta le prerogative precedentemente descritte e, allo stesso tempo, permetteva di acquisire grandi quantità di dati in tempi decisamente più brevi rispetto ai sistemi tradizionali, non richiedendo, inoltre, un elevato livello di specializzazione da parte dell'operatore per la fase di acquisizione sul campo.

1.13. Scelta del mezzo UAV per le applicazioni

Parallelamente alla scelta della camera si è cercato di identificare un mezzo UAV in grado di sopportare il peso del *payload* della stessa (oltre a quello della camera compatta già installata di serie), presentando valori di massa massima operativa al decollo (*MTOM*: / *Max Take-Off Mass*), compatibili con l'uso in scenario urbano e nel il rispetto delle condizioni di sicurezza previsti dal *risk assessment*. A seguito di queste considerazioni si è scelto di utilizzare un APR² che, equipaggiato con la camera sferica, non eccedesse

1 Per *gimbal* si intende un supporto cardanico corrisposto in 2 o 3 assi, che permette di ottenere immagini stabilizzate in grado di compensare i movimenti ai fini della stabilizzazione delle immagini in ripresa.

2 Per *APR* si intende un aeromobile a pilotaggio remoto comunemente noto come drone, ovvero un apparecchio volante caratterizzato dall'assenza del pilota a bordo controllato da un pilota remoto o da un computer a bordo del mezzo aereo.

nel peso i 2 kg. La soluzione migliore tra quelle ipotizzate è stata identificata nel *DJI Phantom 4 Pro Obsidian* che presenta, allo stato attuale, la soluzione più adatta come compromesso tra prestazioni e possibilità di garantire le condizioni di sicurezza mantenendo aree di *buffer*³ non eccessivamente ampie. Approfondimenti in tema di normativa aeronautica più specifici saranno illustrati nel capitolo che tratta le applicazioni svolte sui casi studio.

3 Per area di buffer si intende lo spazio di sicurezza oltre all'area delle operazioni, entro cui in caso di problemi imprevisti si potrà terminare il volo con procedure di emergenza senza mettere a rischio persone



Tab. 3. Drone e camera scelti per le sperimentazioni. Nello specifico *Dji Phantom 4 Obsidian* con installata la camera sferica *GoPro Fusion*.

Si riportano di seguito le principali caratteristiche del mezzo scelto.

RIEPILOGO CARATTERISTICHE TECNICHE UAV SCELTO



AIRCRAFT DJI PHANOTOM 4 PRO OBSIDIAN	
Weight (Battery & Propellers Included)	1388 g
Diagonal Size (Propellers Excluded)	350 mm
Max Ascent Speed	S-mode: 6 m/s
	P-mode: 5 m/s
Max Descent Speed	S-mode: 4 m/s
	P-mode: 3 m/s
Max Speed	S-mode: 45 mph (72 kph)
	A-mode: 36 mph (58 kph)
	P-mode: 31 mph (50 kph)
Max Wind Speed Resistance	10 m/s
Max Flight Time	Approx. 30 minutes
Operating Temperature Range	32° to 104°F (0° to 40°C)
Satellite Positioning Systems	GPS/GLONASS
Hover Accuracy Range	Vertical:
	±0.1 m (with Vision Positioning)
	±0.5 m (with GPS Positioning)
	Horizontal:
	±0.3 m (with Vision Positioning) ±1.5 m (with GPS Positioning)
CAMERA	
Sensor	1" CMOS
	Effective pixels: 20M
Lens	FOV 84° 8.8 mm/24 mm (35 mm format equivalent) f/2.8 - f/11 auto focus at 1 m - ∞

Tab. 4. Nella tabella le principali caratteristiche tecniche relative all'UAV selezionato.

1.14. Note bibliografiche

- I Kraus, K., Waldhäusl, P., & Dequal, S. (1994). *Fotogrammetria vol. 1 Teoria e applicazioni*. Torino: Libreria universitaria Levrotto e Bella.
- II Slama, C. (1980). *Manual of photogrammetry* (4th ed.). Falls Church: American Society of Photogrammetry.
- III Saint-Aubin, J. P., Baratin, L., Selvini, A., & Ferro, C. (1999). *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*. Moretti & Vitali.
- IV A. Spanò, (2017). *Dispense di Fotogrammetria digitale e scansioni 3D*, Politecnico di Torino,
- V Brutto, V. F. M. L. (2005). Elementi di fotogrammetria digitale. Università degli Studi di Palermo - Dispense del corso di Topografia.
- VI A. Spanò, (2017). *Dispense di Fotogrammetria digitale e scansioni 3D*, Politecnico di Torino.
- VII Fangi, G. (2006), *Investigation On The Suitability Of The Spherical Panoramas By Realviz Stitcher For Metric Purposes*, ISPRS Archive, Vol. XXXVI, Part 5, Dresden, 25–27 September 2006, ISSN 1682-175.
- VIII Fangi, G. (2007), Una nuova fotogrammetria architettonica con i panorami sferici multimmagine – Convegno Sifet, Arezzo, 27–29 Giugno 2007, CD ISSN: 1682–1777, ISBN 88-901939-4-8
- IX Fangi, G. (2010), *La Fotogrammetria sferica. Una nuova tecnica per il rilievo dei vicini*. Archeomatica, anno 1, n.2 Giugno 201, ISSN 2037 – 2485
- X Abate, D., Toschi, I., Sturdy-Colls, C., & Remondino, F. (2017). *A low cost panoramic camera for the 3D documentation of contaminated crime scenes*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 42.
- XI cfr, nota VIII
- XII D'Annibale, E. (2012). *Fotogrammetria close-range e visual design per i beni culturali* (Università Politecnica delle Marche).
- XIII Fangi, G. (2010), *La Fotogrammetria sferica. Una nuova tecnica per il rilievo dei vicini*. Archeomatica, anno 1, n.2 Giugno 201, ISSN 2037 – 2485
- XIV ibidem.
- XV Luhmann, Thomas & Robson, Stuart & Kyle, Stephen & Boehm, Jan. (2013). *Close Range Photogrammetry and 3D Imaging*.
- XVI Fangi, G. (2010), *La Fotogrammetria sferica. Una nuova tecnica per il*

rilievo dei vicini. Archeomatica, anno 1, n.2
Giugno 201, ISSN 2037 – 2485,

XVII cfr. nota VII

XVIII Kwiatek, K., & Tokarczyk, R.
(2014). *Photogrammetric applications of
immersive video cameras*. ISPRS Annals
of the Photogrammetry, Remote Sensing
and Spatial Information Sciences, 2(5),
211.

XIX Ramos, A. P., & Prieto, G. R.
(2016). *Only image based for the 3D metric
survey of gothic structures by using frame
cameras and panoramic cameras*. Inter-
national Archives of the Photogrammetry,
Remote Sensing & Spatial Information
Sciences, 41.

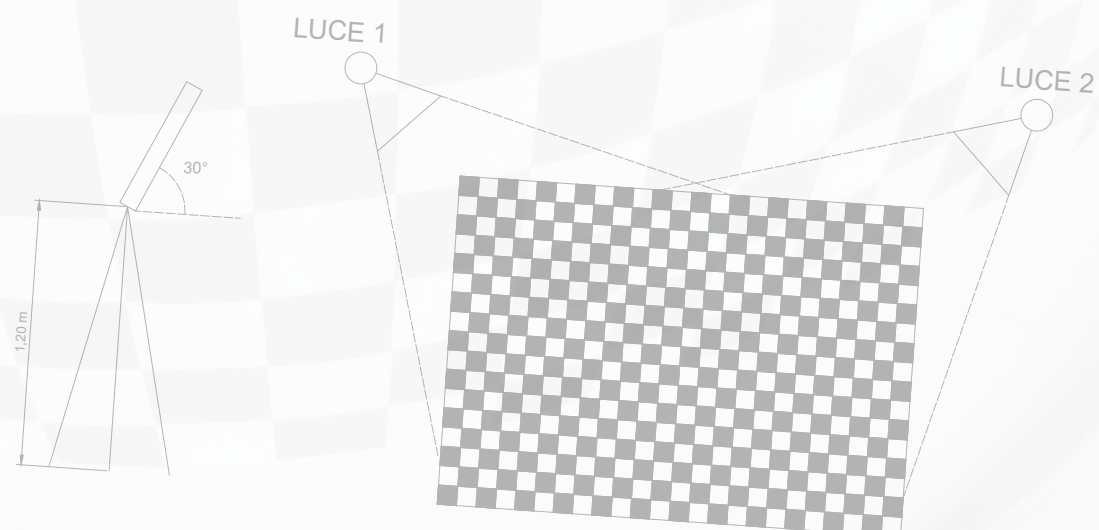
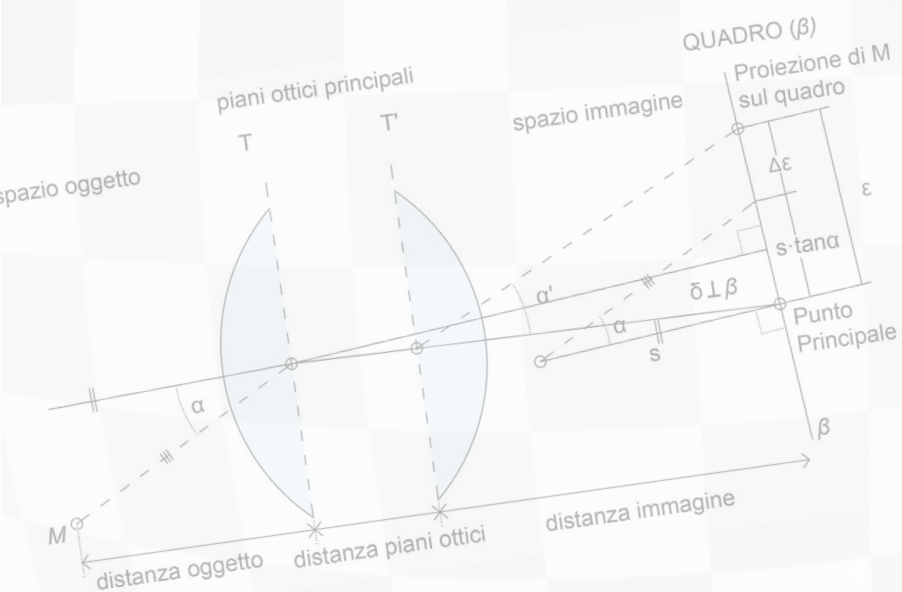
XX Kossieris, S., Kourounioti, O.,
Agrafiotis, P., & Georgopoulos, A. (2017).
*Developing a low cost system for 3D data
acquisition*. International Archives of the
Photogrammetry, Remote Sensing & Spa-
tial Information Sciences, 42.

XXI Teppati Losè, L., Chiabrando, F.,
& Spanò, A. (2018). Preliminary evaluatio-
nof a commercial 360 multi-camera rig for
photogrammetric purposes. *International
Archives of the Photogrammetry, Remote
Sensing & Spatial Information Scien-
ces*, 42(2).

Utilizzo e calibrazione di camere fisheyes e applicazioni di Structure From Motion

$$r^4 K_2 + \bar{x} r^6 K_3 + (r^2 + 2\bar{x}^2) P_1 + 2\bar{x}\bar{y} P_2$$

$$r^4 K_2 + \bar{y} r^6 K_3 + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2$$



2. Utilizzo e calibrazione di camere *fisheyes* per applicazioni di *Structure From Motion*

Un *fisheye* è un particolare tipologia di obiettivo grandangolare estremo, che presenta un angolo di campo molto ampio non minore di 180° ed in alcuni casi superiore. A differenza di altre tipologie di lenti, esse appaiono di dimensioni maggiori e spesso presentano una curvatura caratteristica. In queste ottiche la lenti frontali sono più grandi rispetto al corpo dell'obiettivo e presentano una forma a fungo. La produzione di questo tipo di ottiche è stata portata avanti da quasi tutte le case produttrici. Attualmente le soluzioni *fisheye* più utilizzate sono due che differiscono per valori di lunghezza focale. La principale è nota come *full frame fisheye lens* che con una lunghezza focale di 16 mm riempie completamente la dimensione del sensore 24x36mm coprendo 180° con una diagonale di 43mm (fig.30 a destra). Soluzioni differenti, invece, vanno ad utilizzare solo una porzione di sensore, scartandone l'uso negli angoli e restituendo immagini circolari (da cui il nome *circular fisheye*). Queste ultime soluzioni presentano lunghezze focali infe-



Fig. 30. Qualche esempio di lenti *fisheye*. In alto a sinistra Nikkor 6 mm f/2.8 circular *fisheye* (Fov 220°), al centro Nikkor 8mm f/2.8 circular *fisheye* a destra: Nikkor 16 mm f/2.8 full frame *fisheye*. [tratto da: WGN, *Journal of the International Meteor Organization*, vol. 33, no. 1, p. 10]

riori (solitamente di 8 mm) e realizzano fotogrammi che coprono l'intero emisfero. Esistono, tuttavia, soluzioni con focali ancora inferiori che si spingono fino a 6 mm e acquisiscono un angolo di 220°.¹

Nel corso di questo studio verrà approfondito il caso

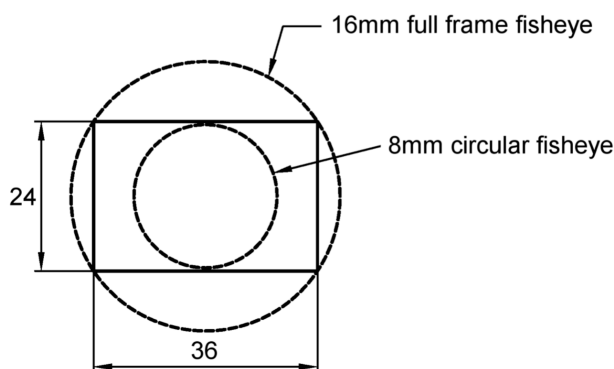


Fig. 31. Comparazione tra un full frame e un fisheye circolare. Nel primo caso è utilizzato tutto il sensore e misura 180° sulla diagonale, nel secondo invece una parte del sensore risulta inutilizzata. [tratto da: WGN, Journal of the International Meteor Organization, vol. 33, no. 1, p. 9]

della *mass market camera* denominata *Fusion* prodotta da GoPro a partire dal 2018. Si avrà modo di approfondire nel corso dei prossimi capitoli le specificità di questa camera, tuttavia, è possibile intuire fin d'ora, che dopo avere stimato la lunghezza focale come 1.21 mm (come sarà illustrato) su un sensore da 1/2.3" e averla rapportata al 35 mm ottenendo un valore di circa 6.80 mm, la tipologia di *fish-eye* oggetto di studio acquisisce un angolo molto ampio e superiore ai 180°. Ovviamente a differenza degli obiettivi grandangolari a prospettiva rettilinea, i fisheye forniscono sempre un'immagine affetta da distorsioni. In particolare le deformazioni aumentano all'aumentare della distanza dal centro.

2.1. La storia del *fish-eye*

L'idea che ha portato alla nascita di questa tipologia di ottiche trae le sue origini agli inizi del secolo scorso. Il termine nella sua traduzione italiana "occhio di pesce" deve il suo nome dagli studi di *Robert W. Wood*¹¹ il quale illustrava nella sua pubblicazione del 1906, la teoria per la quale i pesci sarebbero in grado vedere sopra l'acqua e con un campo visivo molto più grande a causa della differenza di rifrazione tra il fluido e l'aria. Fu così che,

poste le basi teoriche, nel 1919 *Wood* riempì una camera stenopeica con acqua riuscendo per la prima volta nella storia ad ottenere un'esposizione fisheye. Queste prime prove sperimentali avvenivano circa un secolo dopo la scoperta della camera oscura come strumento fotografico (1826). Fu qualche anno più tardi, precisamente nel 1922, che questi studi furono ripresi da *W. N. Bond* ^{III} che realizzò altre esposizioni fisheye ma sostituì il liquido con una lente sferica a piano convesso.

La soluzione di *Wood* trovava come limite il fatto di non essere in grado di raccogliere molta luce (cosa che la soluzione di *Bond*, invece, era in grado di fare). Tuttavia anche quest'ultima soluzione presentava delle problematiche significative causate dalla grande curvatura del campo, che influenzava la nitidezza. Ulteriori miglioramenti sono stati apportati nel 1926 da *R. Hill* ^{IV} che intuì che tali problematiche potevano essere risolte o limitate aggiungendo un grande menisco negativo davanti all'obiettivo piano-convesso della soluzione di *Wood*. Quest'ultima versione del sistema ha posto le basi per le soluzioni attuali di ottiche fisheye (*Miyamoto*, 1964) ^V.

Questo primo modello di fisheye il *Robin Hill Sky*, fabbricato dalla ditta londinese *Beck* ^{VI} è concepito per studiare le formazioni di nubi che venivano riprodotte su una lastra che riproduceva l'immagine di tutto il cielo grazie alla fortissima distorsione a barilotto indotta dalle lenti. Il progresso di questa soluzione ha iniziato ad essere adoperato nei campi più svariati: per misurare la percentuale di nuvole, nelle torri di controllo del traffico aereo, nelle ispezioni di condotti o per lo studio degli angoli di vista in autovetture. Nonostante gli studi su questi modelli di camera ed i primi disegni costruttivi pubblicati da *Naumann* nel 1954 bisogna attendere ancora una decina di anni prima che la soluzione venga commercializzata. La prima azienda che mise in commercio soluzioni *fish-eye* è stata *Nikon* che da sola sviluppò e commercializzò sei tipologie di cui quattro di design differenti (*Vorst*, 1978). ^{VII}

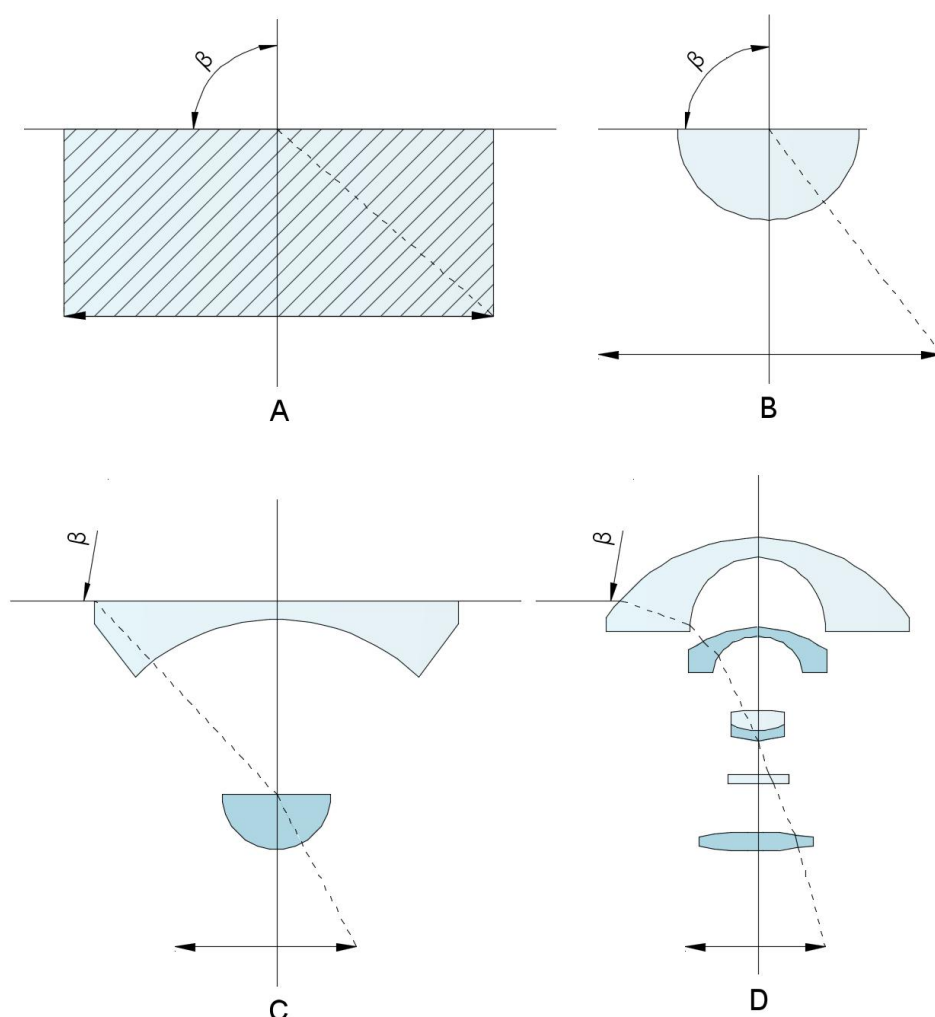


Fig. 32. Fasi degli sviluppi delle lenti fisheye: (A) Modello di *Wood* realizzato tramite il riempimento con acqua di un modello *pinhole* di camera; (B) Modello di *Bond* realizzato sostituendo l'acqua con una lente piano-convessa; (C) Modello di *Hill* realizzato tramite l'utilizzo di una lente a menisco negativo; (D) Moderna tipologia di fisheye attualmente utilizzata. [tratto e rieditato da: *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, vol. 33, no. 1, p. 11]

2.2. Caratteristiche delle ottiche *fish-eye* e distorsioni

Come chiaramente intuibile, la specificità di questo modello di camera è data dalla presenza del menisco negativo che permette all'obiettivo di ottenere le caratteristiche che lo differenziano dagli altri. È importante sottolineare che le ottiche fisheye per loro natura sono molto differenti dalle soluzioni grandangolari anche dette *wide angles lens*. Queste differenze sono dovute al fatto che nelle soluzioni grandangolari la distorsione viene in parte corret-

ta, generando di conseguenza un risultato più naturale.

Sebbene sul mercato esistano soluzioni dette convertitori fisheye che consistono in ottiche montate su lenti standard o *wide angle* che agiscono riducendo la lunghezza focale e conseguentemente aumentando l'angolo di visione, il risultato presenta solitamente un effetto vignettatura molto marcato ed esse spesso non riescono ad arrivare ad angoli di visione di 180° . La presenza del menisco negativo genera un grande angolo di visione mentre una seconda lente positiva permette all'immagine di proiettarsi sul piano immagine.



Fig. 33. Esempio di un convertitore fisheye commerciale.

Nelle soluzioni moderne i due gruppi di lenti assicurano che la distanza tra l'ultima lente e il piano immagine sia più largo della lunghezza focale stessa. La distanza tra l'ultima lente e il piano immagine è nota come *back focal length* o *BFL*. Questo è fondamentale per garantire il sollevamento dello specchio in una *SLR* camera. Questo design prende il nome di retrofocus o *teleobiettivo invertito* (Laikin, 2001).^{viii} Al fine di ottenere valori di *BFL* adeguati risulta pertanto condizione necessaria, utilizzare lenti frontali con curvature molto pronunciate. Le prime soluzioni di *fish-eye* non tenevano in considerazione il retrofocus con la conseguenza che lo specchio andava sollevato prima di attaccare l'obiettivo al corpo macchina.

La rappresentazione su un piano bidimensionale di un'immagine emisferica, così come approfondiremo per proiezioni sferiche, genera inevitabilmente delle distorsioni. Per ogni lente si può individuare una relazione tra l'angolo di ingresso e la posizione che il punto assume sull'immagine. Una

lente convenzionale senza le distorsioni segue la semplice formula :

$$r = f \tan(\theta)$$

dove θ corrisponde al valore angolare misurato dall'asse ottico, f è la lunghezza focale mentre r la distanza al piano dell'immagine misurata dall'asse ottico. Appare chiaro che questa relazione non può essere valida per un obiettivo *fisheye* perché un valore angolare di 90° (ovvero dell'orizzonte) richiederebbe al piano immagine di avere dimensioni infinite. Le relazioni che sono utilizzabili con ottiche *fisheye* sono, infatti, più complesse.

Sebbene non andremo ad indagare nel corso di questo studio le relazioni matematiche che le definiscono è importante ricordare quella che nota come proiezione ortografica definita come:

$$r = f \sin(\theta)$$

in quanto utilizzata molto spesso in ambito architettonico per andare a definire lo *Sky View Factor*, *SVF*, ovvero il rapporto tra la frazione non ostruita del

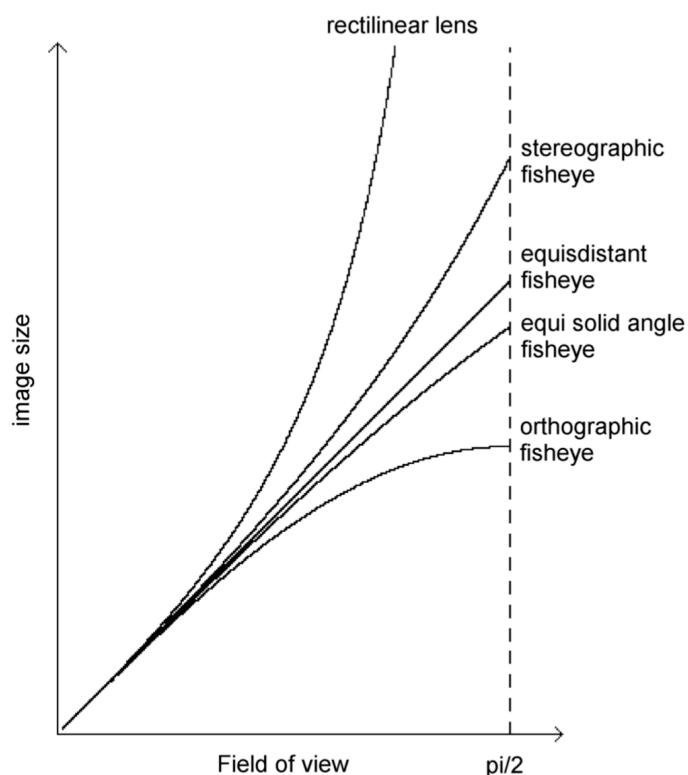


Fig. 34. Comparazione tra le distorsioni di una lente rettilineare e differenti tipologie di proiezioni *fisheye* considerando per tutte la stessa lunghezza focale. [tratto da: *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, vol. 33, no. 1, p. 12]

cielo e l'emisfero totale. Nonostante esistano differenti formule di proiezione (*rectilinear*, *stereographic*, *equidistant equi solid angle*, *ortographic*), all'atto pratico le formule del modello matematico per quanto si avvicinino non riescono a descrivere esattamente ciò che avviene nella realtà.

2.3. Calibrazione della camera *fisheye* scelta per lo studio

Una prima operazione fondamentale è stata quella della calibrazione delle camere. La calibrazione è una fase molto importante nel processo di *Structure From Motion* in particolar modo quando le immagini sono utilizzate con la finalità di ricavare informazioni metriche. Conoscere in modo preciso i parametri di calibrazione interna delle distorsioni radiali dovute alle lenti e le coordinate del punto principale risulta pertanto fondamentale. Questo processo nel caso della camera in esame è stato attuato utilizzando diversi strumenti che analizzeremo nel dettaglio in questo capitolo.

Il processo ha presentato da subito delle complessità dal momento che il sistema analizzato si compone di due sensori *fisheye* (che d'ora in avanti chiameremo *Camera Back* e *Camera Front*) opposti che acquisiscono ciascuno una porzione spaziale di 180°. Nel concreto sono acquisite simultaneamente due immagini distinte che possono essere successivamente connesse a completamento della sfera tramite un'operazione definita *stitching*. Appare chiaro pertanto che è stato necessario effettuare la calibrazione per entrambe le camere singolarmente.

Obiettivo della calibrazione illustrata in questo capitolo è stato quello di stimare i seguenti parametri che saranno analizzati singolarmente nei prossimi paragrafi:

Focal lenght [mm]

Principal Point X [mm]

Principal Point Y [mm]

Radial distortion K1, K2, K3, K4

Decentri distortion P1,P2

Skew B1,B2

Per raggiungere questo scopo ottenendo valori il più accurati possibile si è eseguita la calibrazione più volte utilizzando tecniche e strumenti differenti. Sono stati presi in considerazione diversi software professionali di calibrazione i cui dati sono stati posti a confronto tra cui: *MathWorks Matlab*, *Agisoft Lens* e l'algoritmo di *Self-Calibration* di *Agisoft Photoscan*. La scelta di utilizzare i primi due software è stata già sperimentata e testata in diverse ricerche (Fryskowska et al., 2016)^{ix} anche se su casi di camera standard e non *fisheyes*. Si è proceduto, inoltre, all'allestimento di un poligono di calibrazione all'interno del quale sono stati posti marker topografici, ovvero superfici bidimensionali di 10 x 10 cm rappresentanti una porzione di scacchiera in bianco e nero il cui centro risulti chiaramente identificabile nei fotogrammi. Tali marker sono stati posti in modo uniformemente distribuito all'interno del poligono di calibrazione e per ognuno di essi sono state misurate le coordinate tramite l'ausilio di una stazione totale. Si è anzitutto testata, su tale area, la *Self Calibration*, ovvero la stima automatica dei parametri di calibrazione della camera, valutando i risultati senza e con l'inserimento delle coordinate dei target nei fotogrammi.

Successivamente, sono state adottate altre metodologie di calibrazione alternative alla *Self Calibration* e si è proceduto ad un confronto con acquisizioni laser scanner al fine di verificare la validità delle calibrazioni desunte. Il poligono di calibrazione ha permesso inoltre di svolgere diverse verifiche circa la qualità delle calibrazioni ottenute fornendo una base su cui testare in un ambiente controllato i parametri di calibrazione ottenuti.

Le calibrazioni effettuate si possono dividere in due categorie: quelle eseguite sull'area di test e quelle basate su *target chessboard* ovvero su superfici a scacchiera appositamente realizzate. Si analizzeranno le differenti tipologie di calibrazione e i risultati ottenuti.

PROCESSO DI CALIBRAZIONE UTILIZZATO:

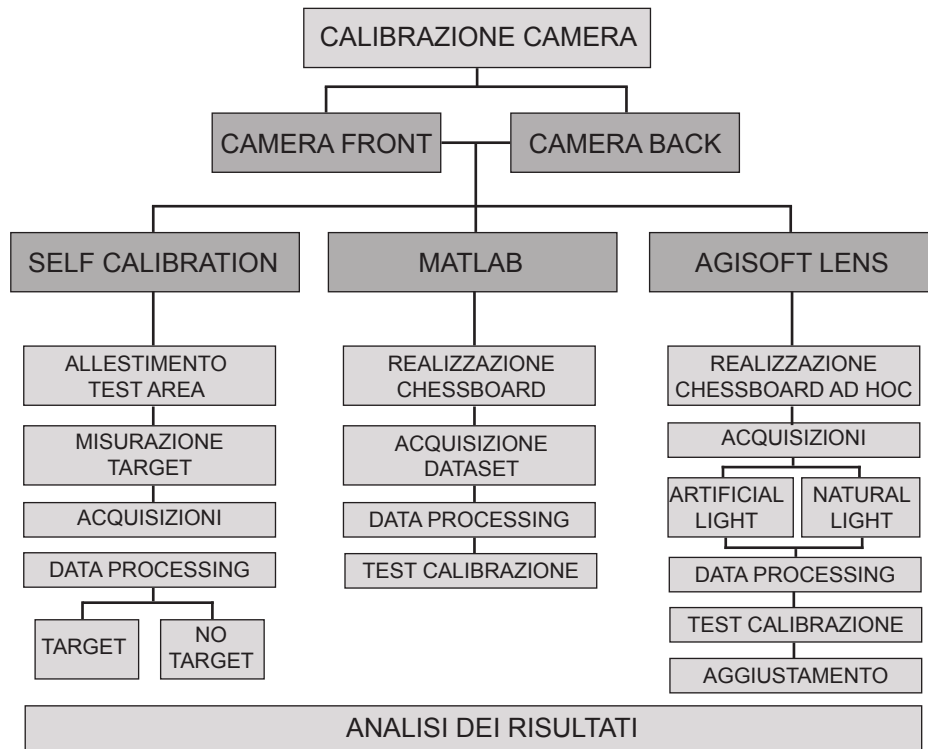


Fig. 35. Schematizzazione del processo e dei software utilizzato per la stima del modello di calibrazione per la camera presa in esame.

2.3.1. La fase di calibrazione

Per utilizzare i dati immagine con l'obiettivo di una restituzione tridimensionale è importante tenere conto del fatto che il modello teorico della proiezione centrale nella realtà subisce delle modificazioni a causa delle deformazioni dando origine ad errori sistematici ed accidentali. Questi errori sono generati da diversi fattori: problematiche relative al fotogramma, all'obiettivo o alla camera. Il risultato è che la proiezione di un punto nello spazio subisce delle variazioni che fanno sì che la sua posizione si discosti dalla posizione teorica che il punto dovrebbe avere per le motivazioni sopra esposte. Per ovviare a queste problematiche è stato necessario introdurre dei fattori di correzione che permettano di minimizzare questi scostamenti. La determinazione di tali fattori prende il nome di calibrazione della camera. Sul mercato esistono camere con Certificati di Calibrazione ovvero con i parametri di correzione delle distorsioni radiali, tangenziali e del punto principale garantiti. Con lo sviluppo della *Computer Vision*, tuttavia, e il miglioramento degli algoritmi è stato possibile tramite il processo di *Strutture From Motion* determinare in modo automatizzato questi parametri di correzione permettendo l'utilizzo di camere prive di tali certificati per le finalità di ricostruzione tridimensionale con ottimi risultati, rendendo accessibile e sempre più utilizzata questa tecnologia. Tuttavia, come si potrà riscontrare nel corso di questo capitolo, la stima automatizzata di tali coefficienti correttivi non è sempre attendibile, in particolare modo con l'utilizzo di obiettivi fisheyes che presentano valori di distorsioni importanti, rendendo necessaria la loro determinazione tramite calibrazioni specifiche.

2.3.2. Modello stenopeico di fotocamera

Per introdurre il problema della determinazione dei parametri per la camera oggetto di questo studio si introdurrà un modello geometrico. Questo processo di stima dei parametri prende comunemente il nome di calibrazione della fotocamera. Per introdurre tali concetti verrà illustrata la relazione tra la posizione di un punto nella scena e la posizione del medesimo nell'immagine mediante l'utilizzo di un modello geometrico semplificato.

Per semplicità il modello di fotocamera utilizzato sarà quello stenopeico (anche detto prospettico) che consiste in un *quadro o piano immagine* (β) e di un *centro di proiezione* (C) la cui distanza è detta *lunghezza focale* (f). Nominiamo *asse ottico* (asse z) la retta passante per il centro di proiezione (C) e ortogonale al quadro (β) e definiamo l'intersezione con quest'ultimo **punto principale** (di coordinate u_0, v_0). Il piano parallelo al quadro contenente il centro di proiezione è posto ad una distanza pari alla lunghezza focale prende il nome di *piano focale* (η). I punti su questo piano si proiettano all'infinito sul piano immagine β . Dato un punto nello spazio, quest'ultimo si proietta sul piano immagine (β) nel punto in cui la retta (s), passante per esso e per il centro di proiezione (C), interseca il piano.

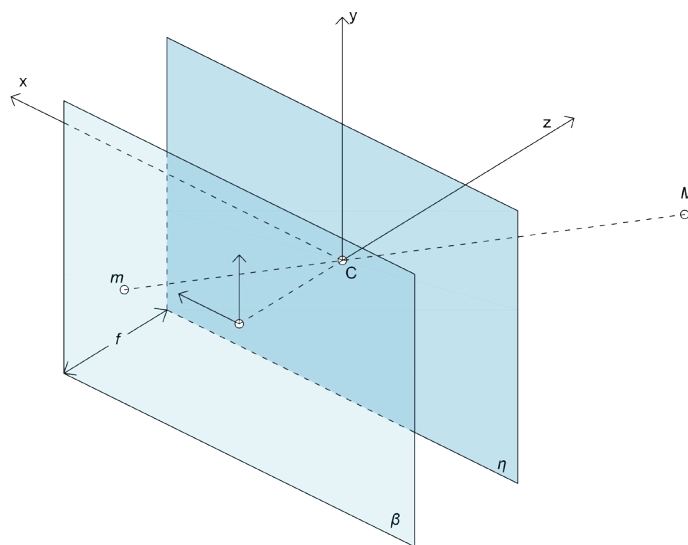


Fig. 36. Modello geometrico stenopeico della fotocamera. Introduzione punto principale, lunghezza focale e piani di riferimento. Proiezione di un punto nello spazio sul piano immagine.

2.3.3. Errori dovuti alla camera e all'obiettivo

Gli errori più rilevanti dovuti alla camera sono due:

1. una non perpendicolarità del quadro rispetto all'asse ottico;
2. la distanza principale effettiva diversa dalla distanza principale ottica.

Quando invece si parla di errori dovuti all'obiettivo ci si riferisce a due problemi:

1. i centri ottici non sono allineati;
2. l'angolo di rifrazione non è uguale all'angolo di incidenza .

In questi casi la distorsione prodotta non può essere trascurata ai fini dell'orientamento interno. Una più chiara comprensione di queste tipologie di errore appare evidente osservando le immagini che seguono:

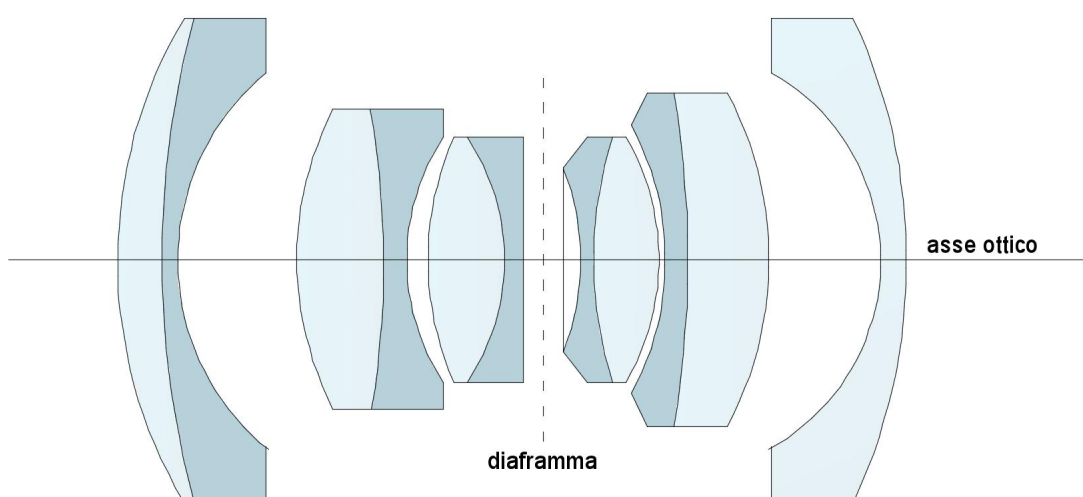


Fig. 37. Modello teorico dei sistemi ottici. [Tratto e rieditato: A.Spanò, dispense di "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D", Politecnico di Torino, 2017]

Le tipologie di distorsioni principali verranno trattate separatamente nelle loro due componenti principali, quelle radiali e quelle tangenziali ma dipendono direttamente da tipologia e posizione delle lenti. Le distorsioni prodotte da una lente, infatti, sono direttamente proporzionali alla distanza dal centro del fotogramma. I sistemi ottici costituiti da più lenti presentano relazioni più complesse che richiedono di essere stimate in laboratorio tramite l'elaborazione delle curve di distorsione.

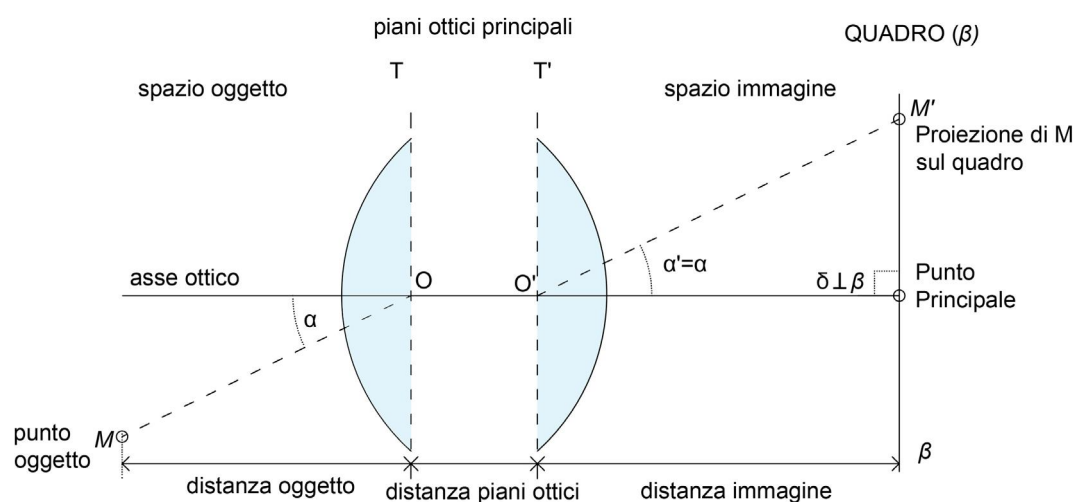


Fig. 38. Modello teorico dei sistemi ottici. [Tratto e rieditato: A.Spanò, dispense di "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D", Politecnico di Torino, 2017]

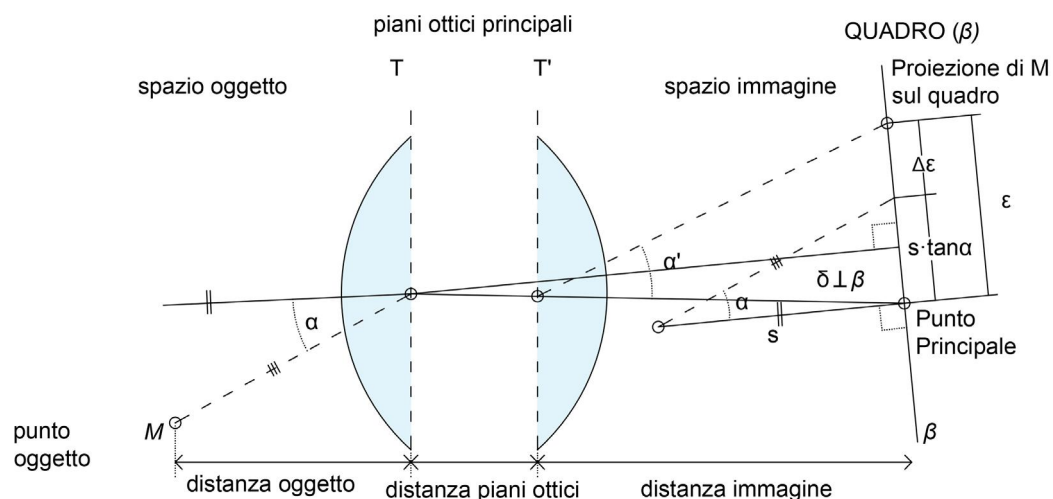


Fig. 39. Schematizzazione errori derivati da un piano immagine non ortogonale all'asse ottico. [Tratto e rieditato: A.Spanò, dispense di "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D", Politecnico di Torino, 2017]

2.3.4. Orientamento interno ed esterno della camera

Il processo di restituzione fotogrammetrica si basa sulla trasformazione prospettica tra immagini e spazio oggetto. Il problema si basa sulla determinazione delle coordinate relative allo spazio oggetto e le corrispondenti coordinate immagine in più fotogrammi. Per risolvere questo problema è necessario effettuare una calibrazione, ovvero andare a determinare i parametri di orientamento interno, e quelli di orientamento esterno. Verrà posta particolare attenzione in questo capitolo ai parametri di orientamento interni ovvero quelli necessari a collegare le coordinate in pixel dei punti di un'immagine con i punti corrispondenti nel sistema di riferimento camera.

Per orientamento esterno, invece, si intende la determinazione della posizione e l'assetto della struttura di riferimento della fotocamera rispetto ad una struttura di riferimento conosciuta nel sistema mondo. Tramite un processo inverso a quello della presa a partire dalle intersezioni dei raggi omologhi si effettua la ricostruzione della geometria.

Verranno di seguito analizzati i parametri di orientamento interno.

2.3.5. Punto Principale

Per Punto Principale, si intende il punto in cui l'asse ottico interseca il piano immagine. Come si può osservare in fig.40, idealmente il punto principale dovrebbe coincidere con l'origine del sistema di coordinate immagine, ma, nella realtà questo non avviene. Si osserva infatti uno spostamento tra la posizione reale di tale punto e l'origine

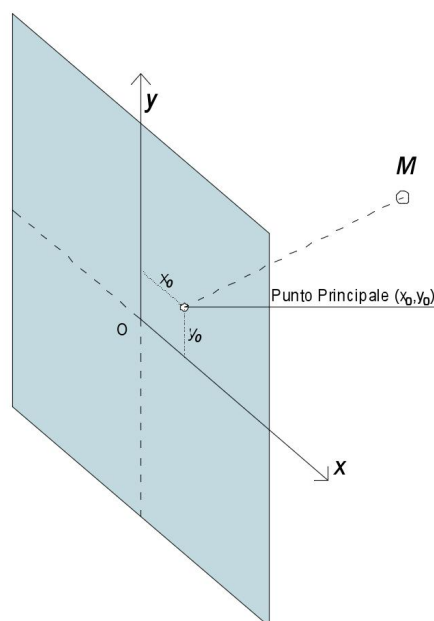


Fig. 40. Determinazione delle coordinate del Punto Principale.

ne degli assi del sistema. Determinare l'*offset* di questo punto in termini di coordinate appare fondamentale per una accurata restituzione. La posizione di tale punto, infatti, può variare molto in modo particolare con l'uso di camere a medio/basso costo. A tale proposito in fig. 41 un esempio di variazione di posizione delle coordinate del punto principale in uno articolo pubblicato nel 2018 eseguito su sei camere modello *GoPro Hero 4 Silver* (L. Teppati Losè, & al., 2018)^x.

	A	B	C	D	E
f(focale -mm)	3,049	3,042	3,040	3,040	3,044
f(focale -px)	1761,739	1757,888	1756,620	1756,499	1758,889
cx (px)	-59,928	-76,449	21,457	-1,514	48,974
cy (px)	-23,881	-30,115	-44,285	-6,173	54,031
k1 (mm)	0,00533	0,00523	0,00496	0,00518	0,00518
k2 (mm)	0,00018	0,00017	0,00021	0,00020	0,00019
k3 (mm)	-7,820E-06	-7,684E-06	-8,792E-06	-8,3076E-06	-8,068E-06
b1 (px)	0,0528	-0,4354	0,2083	-0,0041	-0,0546
b2 (px)	-0,0820	-0,0213	0,0472	0,2613	0,0571
p1 (mm)	-2,640E-05	1,6157E-05	-8,781E-06	2,110E-05	1,993E-05
p2 (mm)	3,470E-05	-1,490E-07	1,640E-06	-1,131E-06	-1,470E-07

Fig. 41. Variazione della posizione del punto principale su differenti camere del medesimo modello (*GoPro Hero 4 Silver*) pubblicate nello studio "Losè, L. T., Chiabrando, F., & Spanò, A. (2018). *Preliminary Evaluation Of A Commercial 360 Multi-Camera Rig For Photogrammetric Purposes. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2).".

2.3.6. Lunghezza focale

Quando si parla di lunghezza focale, ci si riferisce alla distanza misurata sull'asse ottico che intercorre tra il *piano immagine* e il *centro di proiezione*. Tale grandezza è solitamente specificata come un vettore bidimensionale $[fx, fy]$.

$$fx = F \cdot sx$$

$$fy = F \cdot sy$$

dove F è la lunghezza focale espressa in millimetri mentre sx e sy il numero di pixel nelle rispettive dimensioni. Le dimensioni di fx e fy sono pertanto espresse in *pixels*.

All'aumentare della curvatura della lente la lunghezza focale diminuisce progressivamente. Non a caso ottiche *fisheye* presentano valori di lunghez-

za focale estremamente bassi. Dalla lunghezza focale dipendono svariati fattori nella fotografia come la profondità di campo e l'angolo di visione (anche detto *field of view*) e l'ingrandimento.

L'ingrandimento ad esempio fa sì che più la distanza tra la lente e l'oggetto sia ridotta più l'immagine dello stesso risulti ingrandita. Questo ingrandimento dipende dalla lunghezza focale. Maggiore è il valore di lunghezza focale, più l'ingrandimento apparirà evidente. La relazione che lega la focale all'ingrandimento è la seguente:

$$I = f/(f-d)$$

dove I corrisponde all'ingrandimento, f alla lunghezza focale e d alla distanza dell'oggetto dal centro della lente.

Per quanto riguarda l'incidenza della lunghezza focale sulla profondità di campo è importante considerare il fatto che ponendo distanza e diaframma come costanti minore è la lunghezza focale e maggiore sarà la profondità di campo e viceversa.

Per ultimo, collegato alla lunghezza focale, troviamo anche l'angolo di campo anche detto *Field of View (FOV)*. Questo valore è espresso in gradi. Al crescere dei valori di lunghezza focale l'angolo di campo si riduce progressivamente aumentando fino a valori estremi, arrivando, per valori di f inferiori ai 7,5 mm a superare i 180°. ^{XI}

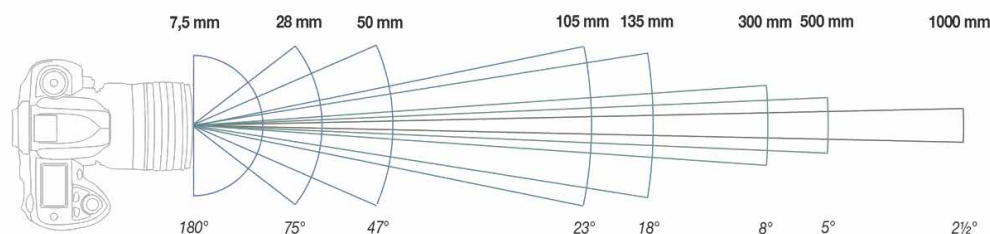


Fig. 42. Relazione tra lunghezza focale e angolo di campo. [tratto e rieditato da: *3dmetrica.it*]

2.3.7. Coefficienti di Distorsione Radiale

Il modello di geometrico di camera illustrato precedentemente prevede che tutti i raggi ottici passino per un punto di dimensioni infinitesime. Questo modello, tuttavia, risulta ideale dal momento che, per ragioni costruttive, l'allineamento delle lenti o imperfezioni presenti su di esse fanno sì che si generino delle difformità che producono distorsioni sulle immagini. Tra queste difformità troviamo le distorsioni radiali che si manifestano dal momento che i raggi luminosi tendono a inclinarsi maggiormente vicino agli spigoli rispetto a quanto avviene nella zona centrale della lente, in modo particolare nelle ottiche a focale corta. È importante sottolineare che tali distorsioni appaiono inversamente proporzionali alle dimensioni delle lenti. Il risultato di tali distorsioni appare evidente osservando un'immagine, rendendo identificabili le due tipologie di distorsioni radiali denominate rispettivamente *barrel* e *pincushion distortion* (fig. 43). Per esprimere le coordinate di un punto a seguito delle distorsioni radiali è necessario ricorrere all'uso di coefficienti solitamente denominati k_1, k_2, k_3, k_4 .

In molti casi k_3 e k_4 vengono trascurati se non in casi di distorsioni importanti e qualora la precisione metrica sia fondamentale (come nel caso proposto in questo capitolo). Le coordinate di un punto in seguito a questa tipologia di distorsioni sono esprimibili come:

$$\begin{aligned}x_{dist} &= x(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6) \\y_{dist} &= y(1 + k_1 * r^2 + k_2 * r^4 + k_3 * r^6)\end{aligned}$$

x, y = posizione del pixel non affetto da distorsione

x_{dist}, y_{dist} = posizione del pixel a seguito delle distorsioni radiali

k_1, k_2, k_3 = coefficienti di distorsione radiale delle lenti.

$$r^2 = x^2 + y^2$$

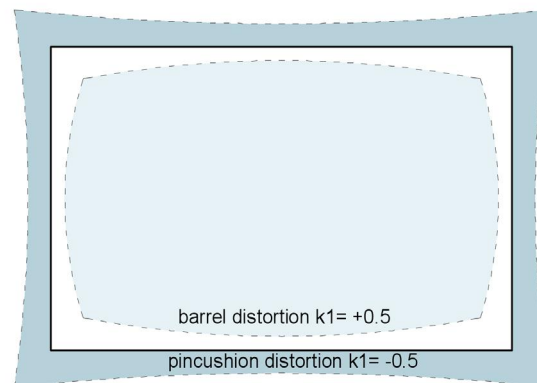


Fig. 43. Rappresentazione tipologie di distorsione radiale a botte ($k_1 > 0$) e a cuscino ($k_1 < 0$).

2.3.8. Coefficienti di Distorsione Tangenziali

Nel modello stenopeico di fotocamera si è assunto che le lenti e il piano immagine fossero paralleli. La condizione reale, tuttavia, presenta delle differenze e le lenti inoltre non risultano perfettamente centrate lungo l'asse ottico. Queste cause originano una seconda tipologia di distorsione detta distorsione tangenziale espressa dai coefficienti P_1 e P_2 . Le coordinate di un punto affette da distorsione tangenziale sono esprimibili come:

$$x_{dist} = x + [2 * P_1 * y + P_2 * (r^2 + 2 * x^2)]$$

$$y_{dist} = y + [2 * P_2 * x + P_1 * (r^2 + 2 * y^2)]$$

x, y = posizione del pixel non affetto da distorsione

x_{dist}, y_{dist} = posizione del pixel a seguito delle distorsioni tangenziali

P_1, P_2 = coefficienti di distorsione tangenziale delle lenti.

$$r^2 = x^2 + y^2$$

È stata evidenziata una relazione tra i parametri P_1 e P_2 e la posizione del punto principale rispetto all'origine del sistema ideale. Questa relazione fa sì che valori elevati di distorsione tangenziale possano essere compensati dallo spostamento del punto principale.

2.3.9. Combinazione di distorsioni radiali e tangenziali

È possibile esprimere la variazione di posizione di un punto in funzione della combinazione di distorsioni radiali e tangenziali tramite un modello fisico in cui compaiono entrambe le tipologie di coefficienti. Questo tipo di formulazione viene chiamato *modello fisico*, in quanto tutti i suoi componenti possono direttamente essere attribuiti a sorgenti di errori fisici.

$$\Delta x = \bar{x}r^2K_1 + \bar{x}r^4K_2 + \bar{x}r^6K_3 + (r^2 + 2\bar{x}^2)P_1 + 2\bar{x}\bar{y}P_2$$

$$\Delta y = \bar{y}r^2K_1 + \bar{y}r^4K_2 + \bar{y}r^6K_3 + 2\bar{x}\bar{y}P_1 + (r^2 + 2\bar{y}^2)P_2$$

I coefficienti di distorsione radiale e tangenziale sono espressi con i relativi coefficienti:

K_1, K_2, K_3 = parametri di distorsione radiale delle lenti

P_1, P_2 = parametri di distorsione tangenziale delle lenti

Mentre, i parametri individuali rappresentano:

$$\bar{x} = x - x_0$$

$$\bar{y} = y - y_0$$

$$r^2 = \bar{x}^2 + \bar{y}^2$$

Quantitativamente la deformazione tangenziale appare in misura inferiore rispetto a quella radiale pertanto in taluni casi viene trascurata.

2.4. Self Calibration

Si è provveduto a testare in primo luogo i risultati di calibrazione ricavabili tramite *Self Calibration* di *Agisoft Photoscan*. A tale scopo sono state realizzate acquisizioni a tale scopo su un'area di test allestita per questa finalità.

2.4.1. Scelta dell'area del Poligono di Calibrazione

Il poligono di calibrazione è stato allestito presso l'*Istituto Galileo Ferraris* a Torino negli spazi esterni del cortile. Quest'area è stata scelta in base alle sue caratteristiche morfologiche oltre alla possibilità di distribuire i punti di controllo ad altezze differenti. Per la complessità della geometria l'area scelta è stata quella della scala di emergenza addossata all'edificio. Su tutta l'area di interesse sono stati disposti marker topografici a scacchiera di dimensioni di 10x10 cm posizionati in modo permanente sul prospetto del fabbricato e sulle porzioni di scala interessate.

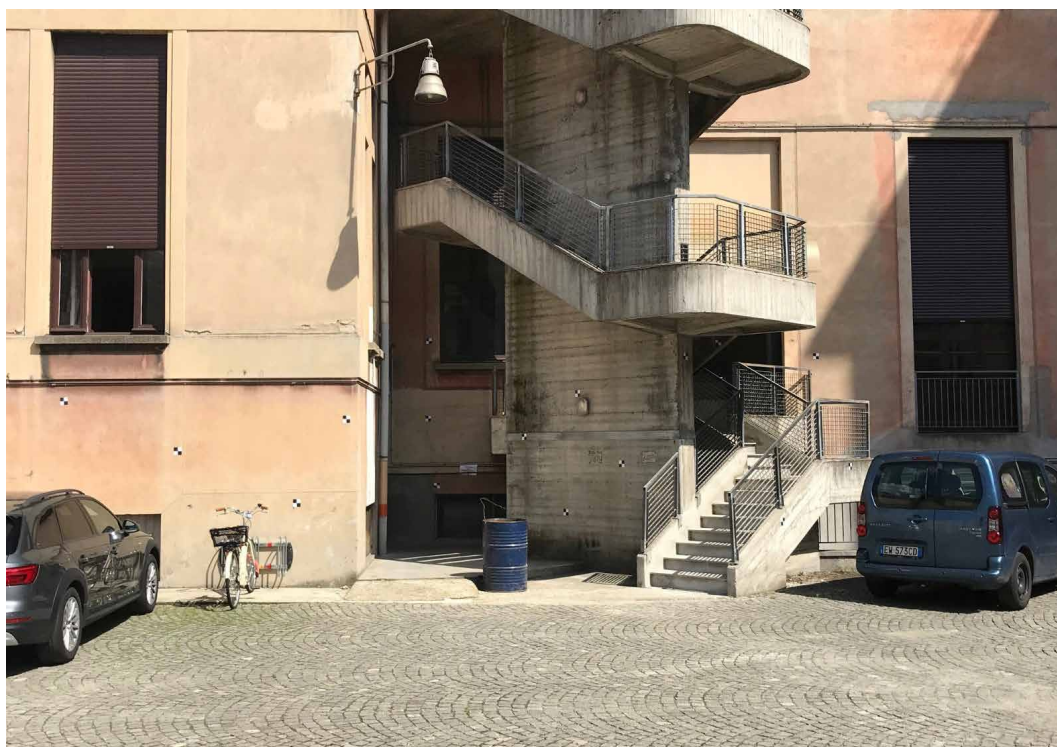


Fig. 44. - Vista dell'area di test scelta per la *Self Calibration*

2.4.2. Posizionamento dei *target* ed eidotipi

Sono stati disposti 16 *target* con l'obiettivo di ricoprire l'intera area avendo cura di posizionarli a quote differenti e in numero adeguato alle variazioni di morfologia dell'area del poligono. Si è provveduto a realizzare gli eidotipi dell'area di acquisizione del poligono e successivamente a misurare i punti

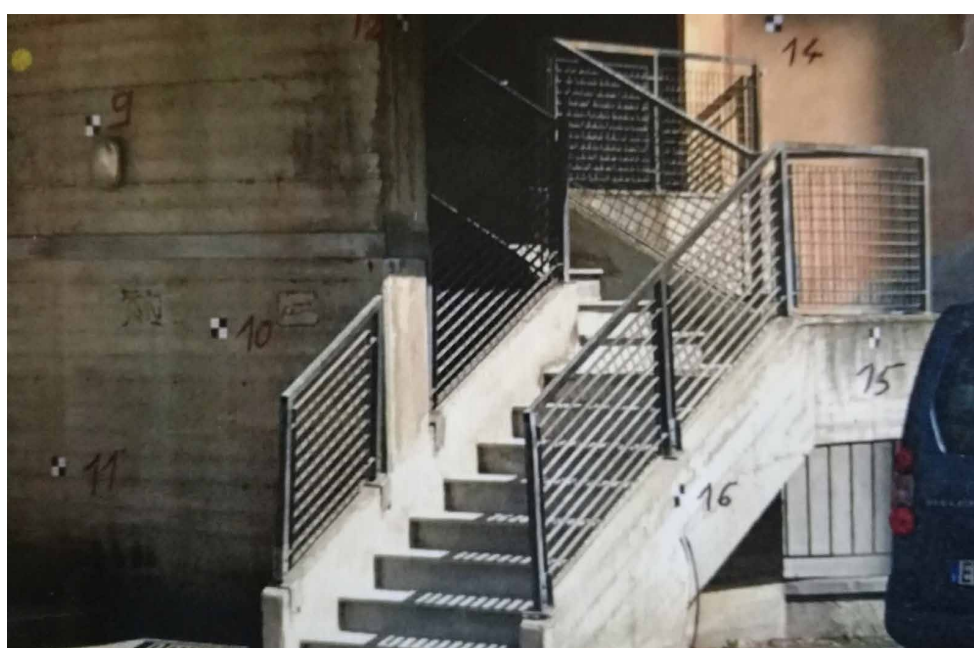
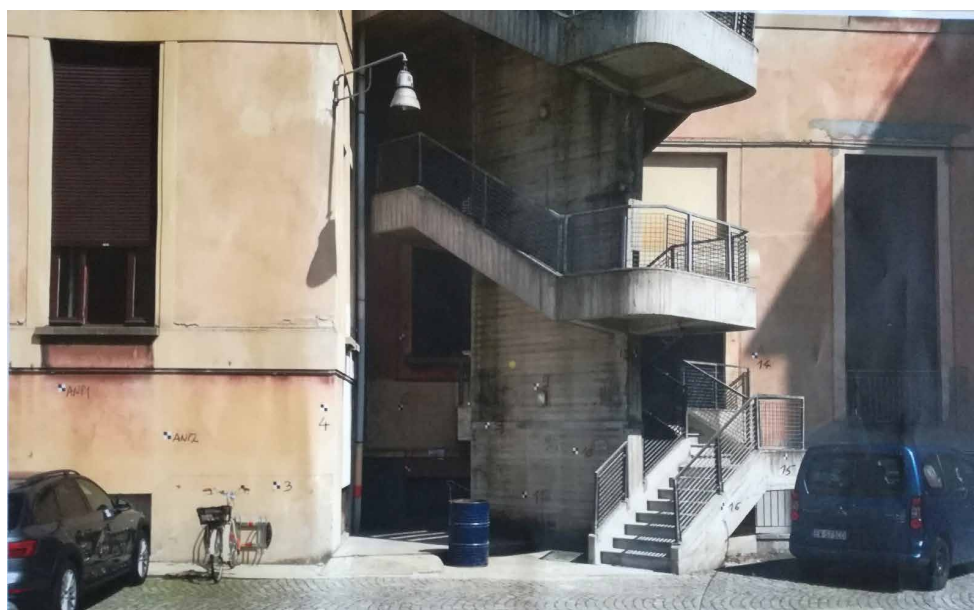


Fig. 45. - Numerazione dei target per la fase di misura successiva sul poligono di calibrazione

tramite stazione totale. Sono stati materializzati due punti di stazione sui quali si è proceduto con la misurazione dei target tramite la tecnica dell'intersezione in avanti dopo averne redatto monografia rispettiva e averne disegnato eidotipi. Ogni punto è stato pertanto misurato due volte una per punto di stazione. Tutti i punti sono stati misurati, inoltre, sia con l'uso di un mini-prisma che senza, tuttavia, si è scelto di utilizzare le coordinate ricavate dalla acquisizione *reflectorless* ovvero direttamente sugli oggetti di rilievo in quanto le distanze non subivano variazioni di carattere significativo.

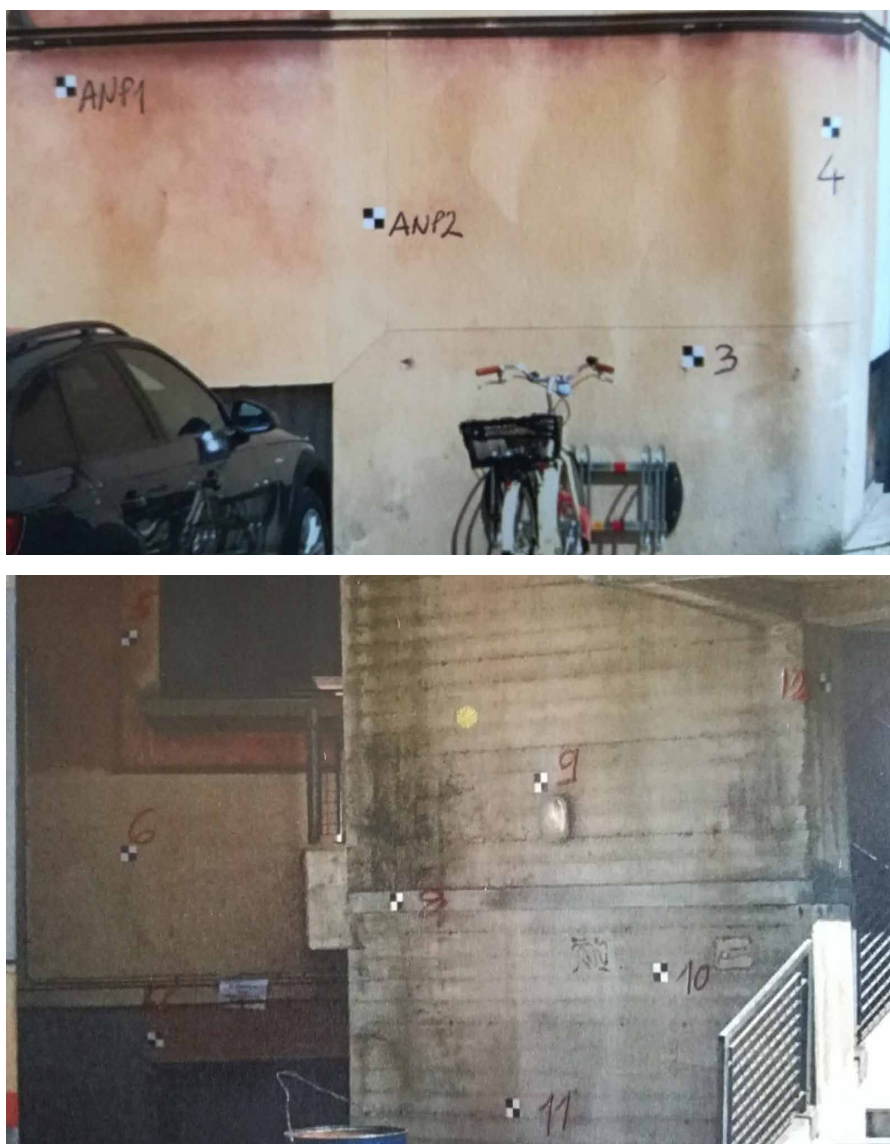
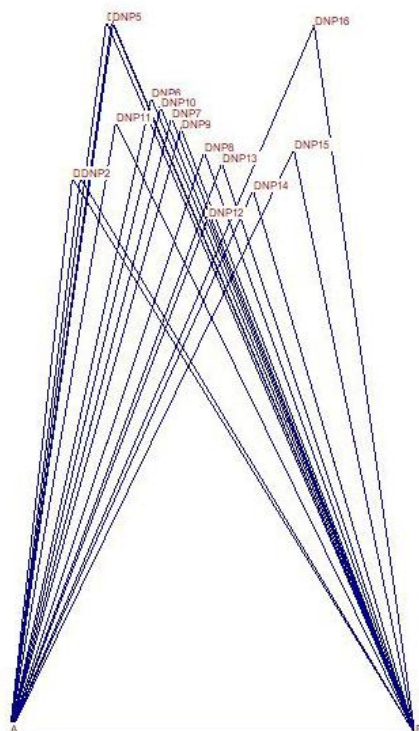


Fig. 46. Numerazione dei target per la fase di misura successiva sul poligono di calibrazione

Le figure 47-48 mostra la posizione dei punti di stazione e del modo in cui sono stati misurati i punti. I punti misurati dalle stazioni sono successivamente stati compensati tramite il software *Surveysoft Star*Net* realizzato per la compensazione di reti geodetiche.



Acquisizione 14/06/2018

Vertice A --> h stazione
1,576

Prisma B --> h prisma 1,575

Stazione in B --> h stazione
1,562

Prisma in A --> h prisma 1,575

Fig. 47. Visualizzazione della posizione dei punti di scansione e delle misure dei target estratti dopo la compensazione eseguita con *Surveysoft Star*Net*.

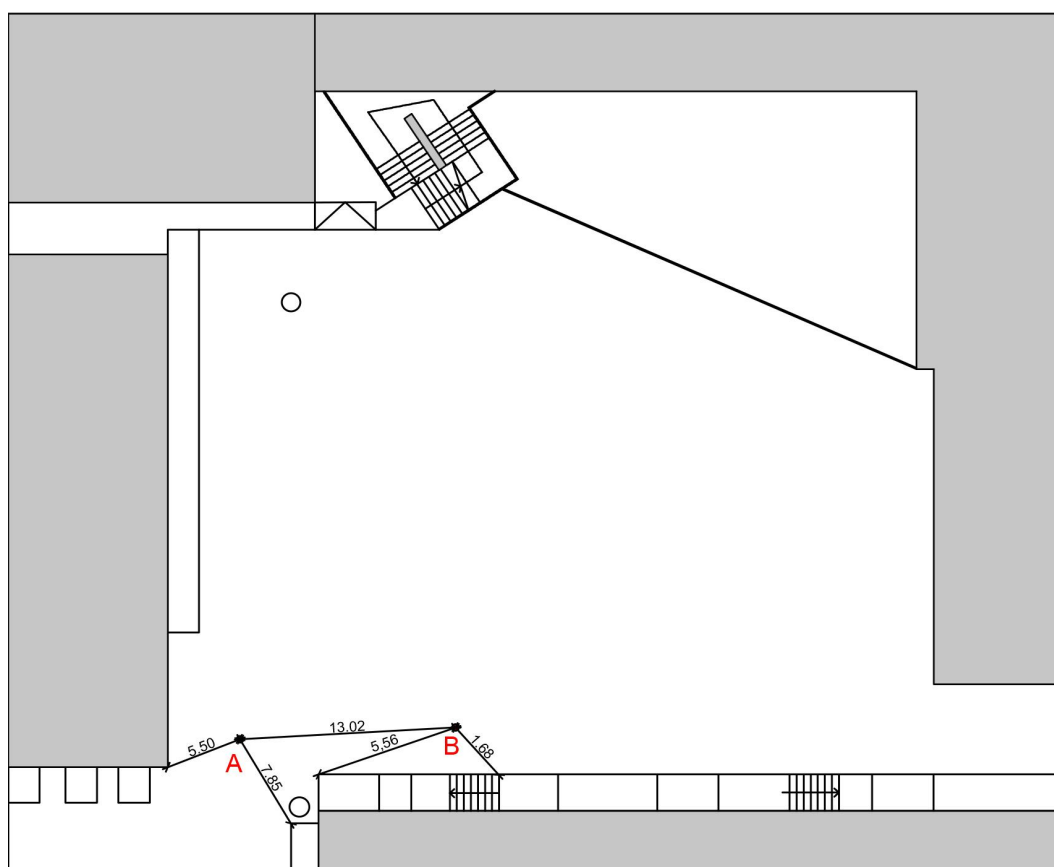


Fig. 48. Posizione dei vertici dei punti di stazione sul poligono di calibrazione.

2.4.3. Metodologia di acquisizione per le prove di calibrazione

La fase di acquisizione si è articolata tramite la realizzazione di due *dataset* di immagini distinte, rispettivamente una per camera oggetto di calibrazione. Le metodologie utilizzate sono quelle visibili dallo schema in figura 51. Tutte le acquisizioni sono state eseguite mantenendo la camera su un cavalletto fotografico. Per migliorare il processo di calibrazione in particolar modo per la determinazione delle coordinate del punto principale ogni *dataset*, è stato acquisito con la metodologia riportata in questo paragrafo con la camera in posizione standard che ribaltata di 180° (Fig. 49-50). La scelta di ribaltare la camera è stata dettata, inoltre, dalla necessità degli esperimenti presentati nei capitoli seguenti, di utilizzo della stessa su UAV sul quale la camera verrà posta in tale posizione. Nello specifico sono state in primo luogo realizzate due strisciate di acquisizioni (differenti per distanza dal prospetto), a passo di circa 1 metro spostando la camera parallelamente alla facciata mantenendo il più possibile ortogonale l'asse alla parete (Fig.52). Successivamente sono state eseguite due strisciate (approssimativamente a 45°) una verso destra e una verso sinistra ad asse convergente per ottenere nelle elaborazioni dati tridimensionali migliori (Fig. 53-54). Inizialmente sono stati eseguite due acquisizioni rispettivamente composte da 126 e 105 immagini, che a seguito delle in fase di elaborazione, (utilizzando un metodo di calibrazione approfondito nei paragrafi seguenti), sono state considerate eseguite da una distanza di presa eccessiva. Esse restituivano geometrie non sufficientemente definite che non permettevano la formulazione di considerazioni sull'attendibilità dei punti tramite un'analisi grafica delle aree con errori di riproiezione maggiori anche a causa delle poche immagini relative alla porzione della scala e del sottoscala non permettendo un confronto valido su tali con i dati laser scanner. È stato necessario, pertanto, eseguire

due nuove campagne a distanza più ravvicinata e aggiungendo acquisizioni del sottoscala (Fig. 55) rispettivamente una per camera nella quale sono state acquisite rispettivamente 221 immagini per la *Camera Front* e 227 per la *Camera Back*.



Fig. 49. Camera in posizione normale.

Fig. 50. Camera ruotata di 180°.

Lo schema proposto riassume come si svolto il processo di acquisizione nelle sue fasi schematizzate nella pagina successiva. Si può osservare che la stessa metodologia è pertanto stata ripetuta in totale 4 volte (2 volte per camera) rispettivamente a camera in posizione normale e ruotata di 180°.

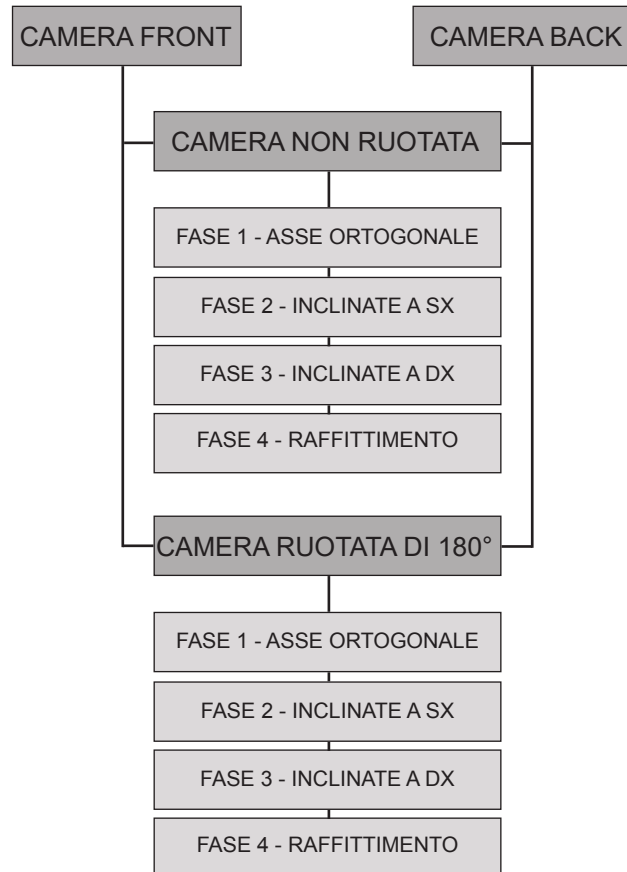


Fig. 51. Schema delle metodologie di acquisizione dei *dataset*.

2.4.4. Schema del metodo di acquisizione

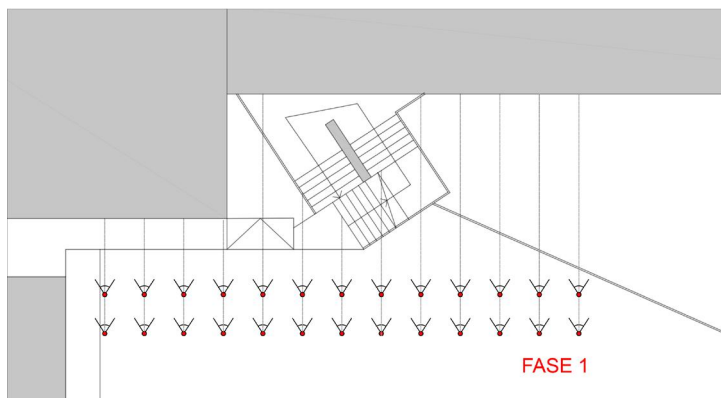


Fig. 52. Fase 1: **Acquisizioni ad asse ortogonale al prospetto** a passo costante di circa 1m su due diverse distanze.

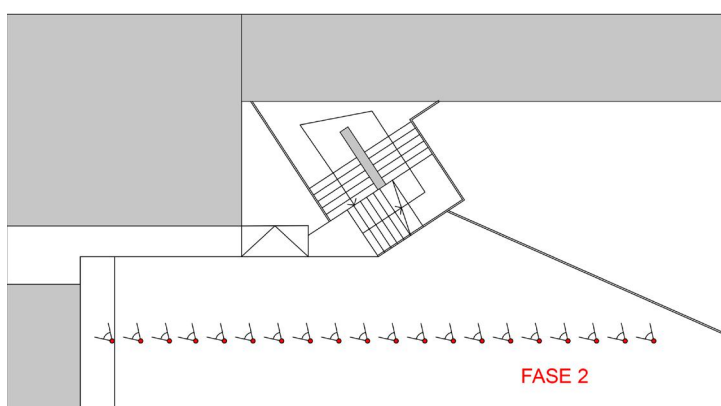


Fig. 53. Fase 2: **Acquisizioni ad asse inclinato verso sinistra** di circa 45° rispetto al prospetto. Passo costante di circa 1m.

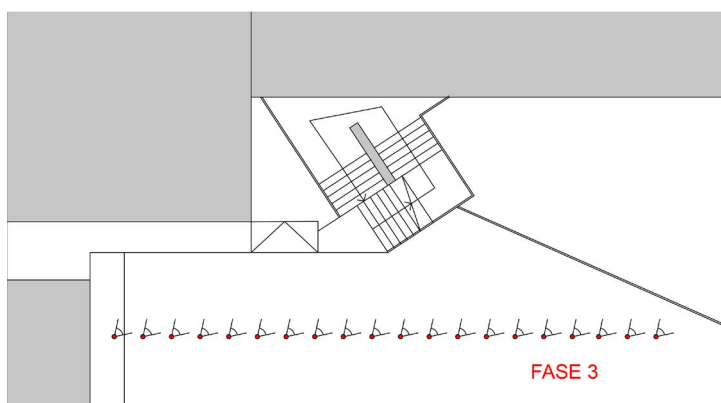


Fig. 54. Fase 3: **Acquisizioni ad asse inclinato verso destra** di circa 45° rispetto al prospetto. Passo costante di circa 1m.

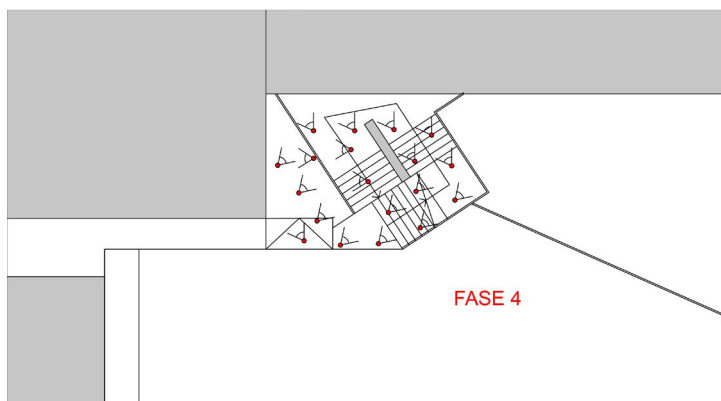


Fig. 55. Fase 4: **Acquisizioni di raffittimento** della porzione della scala e del sottoscala.

CAMERA NORMALE



CAMERA RUOTATA DI 180°



Fig. 56. Esempi di immagini eseguite durante le acquisizioni.

2.4.5. Elaborazione dei dati

I dati acquisiti con la metodologia esposta nel paragrafo precedente sono successivamente stati processati tramite il software *Agisoft Photoscan Professional 1.4.0 build 5650*, in due progetti distinti (*Camera Front* e *Camera Back*). Ognuno dei due progetti è composto dalle acquisizioni a camera ruotata e normale inseriti in un unico gruppo. Come prima cosa si è proceduto a cancellare tutte le coordinate contenuti nei meta-dati della camera in quanto frutto del ricevitore *GPS* integrato, non utile per questo scopo in quanto con precisioni non compatibili con quanto prefissato, e si è impostato un sistema di riferimento locale.

Successivamente i *dataset* sono stati elaborati due volte: una inserendo i marker posizionati manualmente su tutte le immagini prima di avviare il processo di allineamento e l'altra eseguendolo senza l'aggiunta dei marker. Nelle impostazioni di calibrazione camera si è settato il *camera type* come *fisheye* e *pixel size* e la *focal length* espresse in millimetri.

Al fine di desumere i dati di calibrazione tramite la *Self Calibration* di *Agisoft Photoscan* si è impostata il tipo di calibrazione "*Auto*" senza pertanto inserire i coefficienti di distorsioni radiali e tangenziali.

Di seguito si riportano le impostazioni inserite:

Pixel size:	0.00112 x 0.00112	[mm]
Focal Lenght:	1.218	[mm]

Come riportato nelle pagine precedenti, questo processo di elaborazione è stato ripetuto due volte con dataset di immagini derivate questa volta da un nuovo processo di acquisizione eseguito per ottenere una migliore restituzione delle aree del sottoscala. Nella seconda acquisizione infatti le acquisizioni della fase 1-2-3 (rispettivamente acquisizioni ad asse ortogonale e inclinato, Fig. 52-53-54) sono state eseguite ad una distanza più

ravvicinata ed è stata aggiunta la fase 4 (di raffittimento, Fig. 55). In totale sono state elaborate per la *Self Calibration* della camera *Fisheye* un totale di 8 blocchi di calcolo: seguendo lo schema sotto riportato.

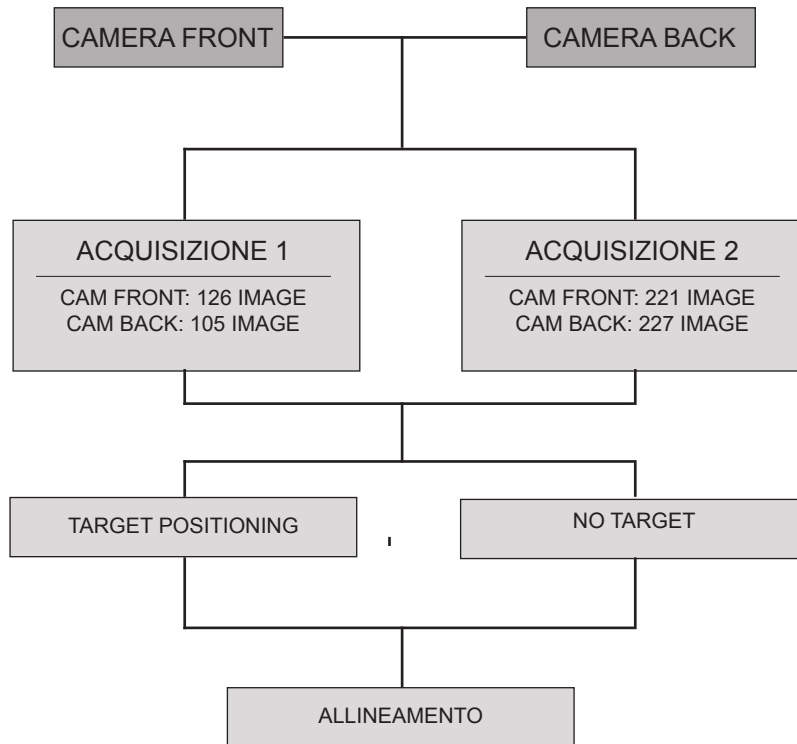


Fig. 58. Immagini acquisite nelle differenti acquisizioni per le differenti camere.

Nella figura si riporta un esempio di immagine con marker posizionati. Per semplificare questo processo è stato eseguito un allineamento in bassa

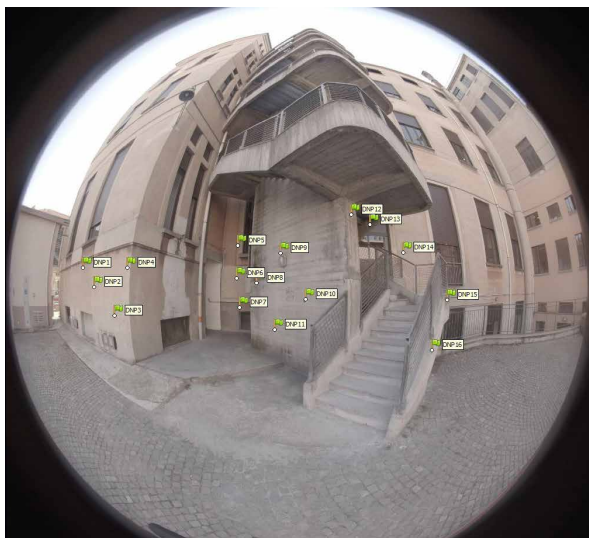


Fig. 57. Posizionamento manuale di un target.

qualità e su questo si è proceduto al posizionamento dei target. Questo ha permesso una notevole semplificazione del *matching* manuale dei target sulle immagini dal momento che *Photoscan* dopo averne determinata la posizione di un numero sufficiente propone in automatico un posizionamento del



Fig. 59. Posizionamento manuale di un target.

target che l'operatore deve semplicemente confermare o correggere.

Dopo tale processo si è proceduto ad esportare un file di posizionamento dei target sulle immagini che ha permesso di poter eseguire il

processo di allineamento con differenti parametri di calibrazione che saranno esposti nei sottocapitoli seguenti garantendo le stesse condizioni di input di base.

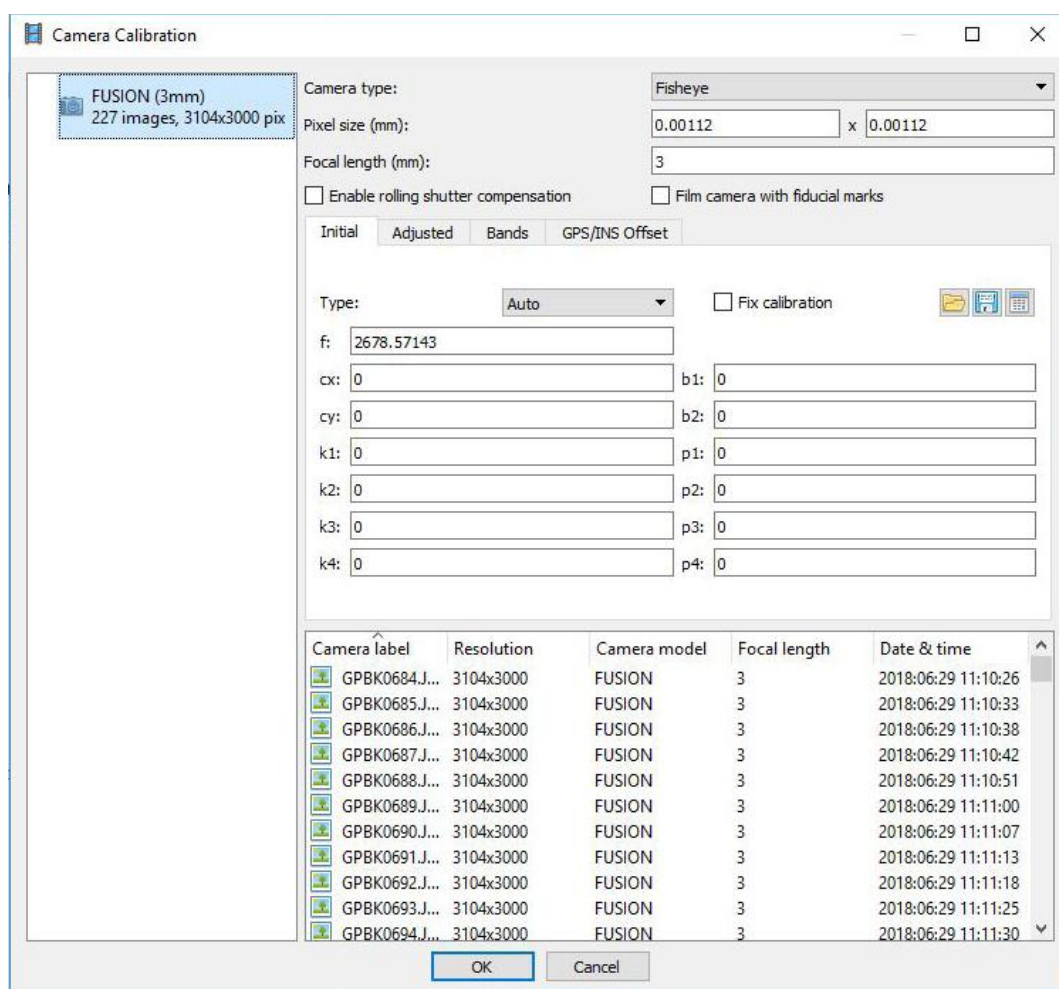


Fig. 60. Settaggi camera per *Self-Calibration*

2.4.6. Risultati *Self Calibration*

Il processo di *Self Calibration* in nessuno dei casi testati con questa tipologia di *fisheye* ha presentato risultati soddisfacenti al punto di dovere ricercare nuovi strumenti di calibrazione proposti nelle pagine seguenti. Si ritiene che il modello di calcolo della tipologia *fisheye* nella versione attuale non sia sviluppato ancora a sufficienza in modo particolare con grandangolari molto spinti (nel caso proposto ogni scatto acquisisce 180°).

In particolare in tutte le analisi *Photoscan* a seguito del processamento si ottiene un allineamento di circa 1/4 delle immagini mentre le restanti vengono scartate. Da questo risultano i seguenti problemi: un numero esiguo di *Tie Points*, un errore nei target molto alto che non rende possibile l'uso della camera con finalità metriche, distorsioni nella ricostruzione delle geometrie ed un allineamento impreciso nel quale la posizione delle strisciate parallele tende ad incurvarsi alle estremità (Fig. 61).

È stato notato un miglioramento importante sia per quanto riguarda il numero di immagini allineate, che per un incremento del numero di *tie point* estratti, nei risultati dell'allineamento per i *dataset* elaborati con i target po-

	TYPE	N°IMMAGINI	TARGET	N° ALLINEATE
ACQUISIZIONE 1	CAMERA	126	NO TARGET	v
	FRONT		TARGET	106/126
	CAMERA	105	NO TARGET	38/105
	BACK		TARGET	38/105
ACQUISIZIONE 2	CAMERA	221	NO TARGET	61/221
	FRONT		TARGET	69/221
	CAMERA	227	NO TARGET	46/227
	BACK		TARGET	55/227

Tab. 5. Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti tramite *Self Calibration*.

sizionati . In particolare su un totale di 679 immagini nei *dataset* nei quali non sono stati assegnate le posizioni dei *target* di coordinate note (prima di avviare il processo) sono state allineate 200 contro le 268 degli stessi dataset con target con un incremento del 134%. Il numero totale di *tie point* passa da 355.046 (*dataset* senza *target*) a 516.847. Con un incremento del 146%. Le tempistiche di processamento dei dati, invece, non presentano variazioni significative.

Nelle tabelle 5-6 si possono trovare i dati ottenuti elaborando i 4 *dataset*. Come precedentemente accennato e facilmente intuibile osservando l'*RMS* degli errori di riproiezione esso risulta troppo alto per restituire valori attendibili relativi ai coefficienti di distorsioni radiali e tangenziali e, certamente non compatibile con l'uso di questo tipo di camera con finalità di desumere informazioni metriche dai modelli generati.

Appare chiaro che la *Self Calibration* da sola non è sufficiente per i motivi sopra esposti e la calibrazione della camera richiede in questo caso strumenti differenti.

	TYPE	TIE POINT	RMS REPROJE ER- ROR	TIME PROCESS
ACQUISIZIONE 1	CAMERA FRONT	76.657	13.05 pix	21 min 05 sec
		172.960	11.35 pix	21 min 41 sec
	CAMERA BACK	90.542	4.47 pix	14 min 05 sec
		71.605	11.65 pix	12 min 55 sec
ACQUISIZIONE 2	CAMERA FRONT	106.767	11.21 pix	53 min 31 sec
		154.747	9.53 pix	51 min 16 sec
	CAMERA BACK	81.080	10.03 pix	38 min 10 sec
		117.535	9.57 pix	38 min 21 sec

Tab. 6. Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti tramite *Self Calibration*.

Nelle immagini è posto un confronto tra i risultati ottenuti da uno degli allineamenti tramite Self Calibration (Fig. 61) e un calibrazione realizzata “*ad hoc*” le cui metodologie saranno illustrate nei capitoli seguenti (Fig. 62) . Si può notare come nella prima immagine gli scatti allineati risultano di numero molto inferiore. La geometria appare poco definita e rumorosa ma soprattutto affetta da una deformazione evidenti.

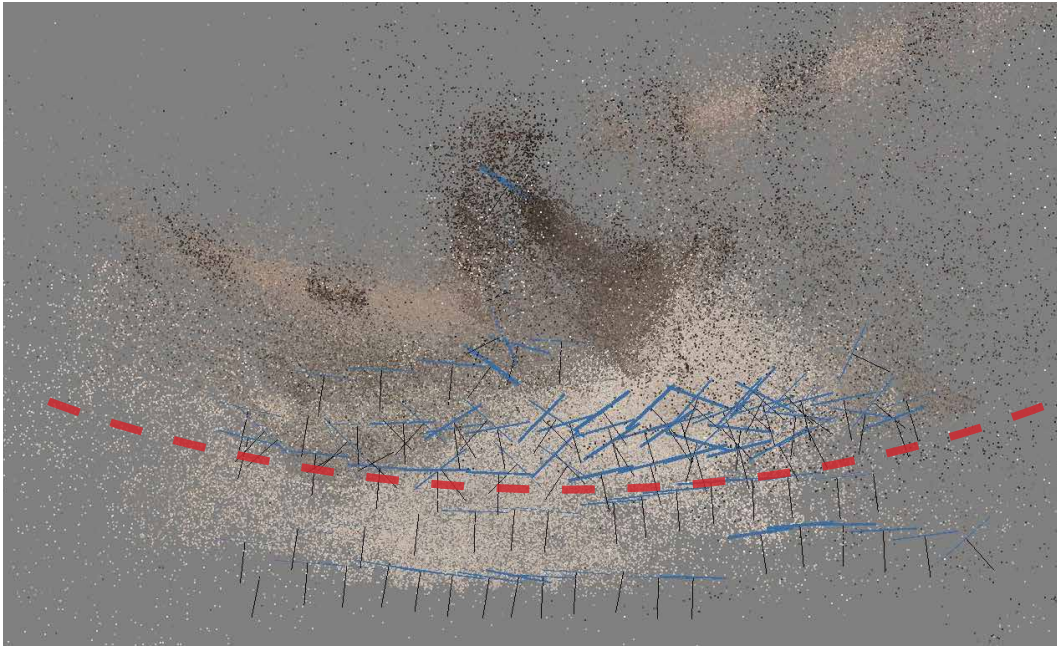


Fig. 61. Visualizzazione di pianta *sparse cloud Camera Front Self Calibration*.

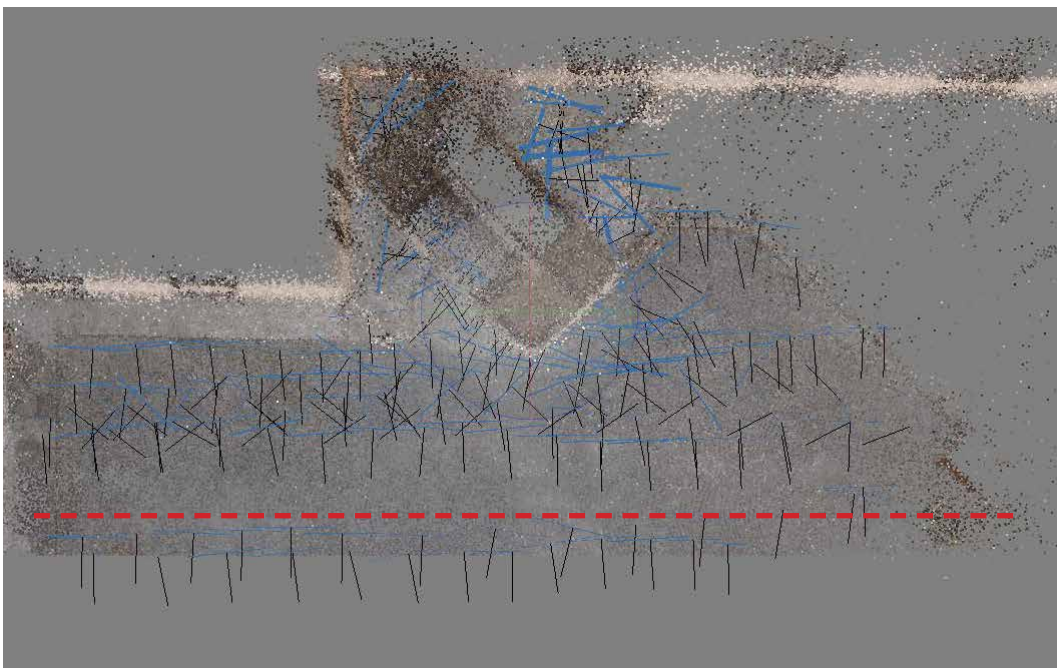


Fig. 62. Visualizzazione di pianta *sparse cloud Camera Front* con calibrazione ricavata tramite metodi alternativi alla *Self Calibration*.

L'effetto visibile nell'immagine 61 è definito *bowl effect*. Recenti studi hanno evidenziato l'insorgere di problematiche nel trattamento di acquisizioni lineari dovute a stime errate dei parametri interni delle camere (Nocerino et al., 2013^{xii}, Nocerino et al., 2014^{xiii}, James et al., 2014^{xiv}, Wu, 2014^{xv}). Appare pertanto chiaro che i parametri desunti tramite *self calibration* non risultano correttamente stimati, mentre nei modelli ricavati con metodi di calibrazione basati su *chessboard* (approfonditi nei prossimi paragrafi) il problema non si manifesta in modo evidente. Inserendo, infatti, valori di calibrazione di camera nel processo tali problematiche possono essere corrette durante la procedura di allineamento dei fotogrammi. Tuttavia, il *workflow* consigliato per *Agisoft Photoscan Professional* sarebbe quello di correggere i possibili errori di *bowl effect* attraverso il processo di ottimizzazione sulla camera o tramite l'inserimento delle coordinate dei *Ground Control Points* dopo il processo di allineamento.

Nel caso proposto, a causa del numero molto elevato di immagini non allineate, è stato fondamentale l'inserimento di valori di calibrazione stimati a priori e utilizzati come precalibrazione la cui stima verrà affrontata nei prossimi paragrafi.

La stima dei parametri interni risulta pertanto fondamentale nel caso si scelga di utilizzare questa tipologia di camera per ricostruzione tridimensionali.

Nella tabella 7 sono mostrate le percentuali di immagini allineate per le due camere oggetto di calibrazione per ogni tipologia di acquisizione. Il numero di immagini allineate pertanto corrisponde alla somma tra gli allineamenti relativi alle due acquisizioni eseguite.

CAMERA FRONT	IMG. TOTALI	ALLINEATE	% ALLINEAMENTO
NO TARGET	347	116	33,4%
TARGET		175	50,4%

CAMERA BACK	IMG. TOTALI	ALLINEATE	% ALLINEAMENTO
NO TARGET	332	84	25,3%
TARGET		93	28,0%

Tab. 7. Percentuale di allineamento relativa alla somma delle due acquisizioni eseguite suddivise per camera e assenza o presenza di target nella fase di calcolo.

Vengono inoltre proposti i dati di riepilogo relativi ai *tie point* e ai valori di *RMS* relativi agli errori di riproiezione. Si sottolinea che anche questi dati sono il risultato della somma dei *tie point* ottenuti nella prima e seconda acquisizione per tipologia di camera mentre i valori di *RMS* degli errori di riproiezione considerando la media di tali valori.

	TYPE	TIE POINT	RMS REPROJECTION ERROR
CAMERA FRONT	NO TARGET	183.424	12,13
	TARGET	327.707	10,44
CAMERA BACK	NO TARGET	171.622	7,25
	TARGET	189.140	11,65

Tab. 8. Numero di tie point ottenuto tramite la somma di quelli ottenuti nelle due acquisizioni e media dei valori di *RMS* degli errori di riproiezione suddivisi per camera e assenza o presenza di target nella fase di calcolo.

Si riportano infine i risultati dei parametri ricercati desunti nel processo di *Self Calibration*. Come si può osservare dalle tabelle 9-10, si trova nuovamente conferma dell'impossibilità di ottenere risultati validi (chiaramente osservabile dalla variabilità dei dati riportati). Le tabelle riportano infatti i valori incogniti che sono stati stimati dal programma per ognuna delle acquisizioni effettuate con e senza il posizionamento dei target. Appare chiaro già solo analizzando i risultati relativi alla *focal length* e del *principal point* suddiviso

nelle sue coordinate C_x e C_y che i dati risultano piuttosto variabili. Appaiono inoltre evidenti alcuni valori *outliers* che si presentano in modo particolare nei *dataset* nei quali non sono stati aggiunti target.

Infine, si può osservare come alcuni parametri incogniti (comprese le coordinate del punto principale relativo alla prima acquisizione della camera front), non siano stati stimati.

	CAMERA FRONT			
	PRIMA ACQUISIZIONE		SECONDA ACQUISIZIONE	
	TARGET	NO TARGET	TARGET	NO TARGET
F [px]	1312.920	1762.61	1308.850	2425.760
C_x [px]	-	-	-0.031	-114.204
C_y [px]	-	-	-0.017	59.105
B1 [px]	5.162	-	4.808	-731.120
B2 [px]	8.119	-	5.290	-
k_1 [mm]	-0.090	-0.221	-0.082	-0.231
k_2 [mm]	-0.006	-0.037	-0.009	0.023
k_3 [mm]	-	0.028	-	-
p_1 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.014
p_2 [mm]	-0.001	0.000	0.000	0.010

Tab. 9. Risultati parametri di calibrazione desunti tramite la *Self Calibration* di *Agisoft Photoscan* relativi alla *Camera Front*.

	CAMERA BACK			
	PRIMA ACQUISIZIONE		SECONDA ACQUISIZIONE	
	TARGET	NO TARGET	TARGET	NO TARGET
F [px]	1264.660	2678.570	1254.000	1358.570
C_x [px]	-0.055	-14.246	-0.306	-0.026
C_y [px]	-0.113	3.218	-0.532	-0.003
B1 [px]	-	-1304.040	-14.616	-
B2 [px]	-	41.018	-	-
k_1 [mm]	-0.067	-0.202	-0.066	-0.105
k_2 [mm]	-	0.054	-0.009	-0.004
k_3 [mm]	-	-0.009	-	-
p_1 [mm]	-0.002	0.001	0.000	0.000
p_2 [mm]	0.002	0.000	-0.001	-0.002

Tab. 10. Risultati parametri di calibrazione desunti tramite la *Self Calibration* di *Agisoft Photoscan* relativi alla *Camera Back*.

Si è infine proceduto ad eseguire un'ottimizzazione dell'allineamento richiedendo al software di calcolare tutti i parametri di calibrazione. Ottenendo i risultati seguenti:

	CAMERA FRONT OPTIMIZED ALIGNMENT			
	PRIMA ACQUISIZIONE		SECONDA ACQUISIZIONE	
	TARGET	NO TARGET	TARGET	NO TARGET
F [px]	1312.906	2538.424	1308.852	2162.650
Cx [px]	0.000	-13.781	-0.031	-91.555
Cy [px]	0.000	2.862	-0.017	40.199
B1 [px]	5.162	-1173.290	4.808	-582.339
B2 [px]	8.118	37.569	5.290	-8.101
k1 [mm]	-0.090	-0.196	-0.082	-0.173
k2 [mm]	-0.006	0.050	-0.009	-0.056
k3 [mm]	0.000	-0.008	0.000	0.068
p1 [mm]	0.000	0.001	0.000	0.012
p2 [mm]	-0.001	0.000	0.000	-0.008

Tab. 11. Ottimizzazione dei parametri di calibrazione ottenuti tramite *Self Calibration* relativi alla *Camera Front*.

	CAMERA BACK OPTIMIZED ALIGNMENT			
	PRIMA ACQUISIZIONE		SECONDA ACQUISIZIONE	
	TARGET	NO TARGET	TARGET	NO TARGET
F [px]	1264.265	2538.424	1247.959	1358.396
Cx [px]	-0.055	-13.781	-0.382	-0.031
Cy [px]	-0.119	2.862	-0.635	-0.004
B1 [px]	0.058	-1173.290	-14.177	0.012
B2 [px]	0.008	37.569	0.061	-0.006
k1 [mm]	-0.067	-0.196	-0.065	-0.104
k2 [mm]	0.000	0.050	-0.009	-0.004
k3 [mm]	0.000	-0.008	0.000	0.000
p1 [mm]	-0.002	0.001	0.000	0.000
p2 [mm]	0.002	0.000	-0.001	-0.002

Tab. 12. Ottimizzazione dei parametri di calibrazione ottenuti tramite *Self Calibration* relativi alla *Camera Back*.

2.5. Camera Calibration Tool Matlab R2018a

In fase di test di laboratorio sono stati eseguiti diverse procedure di calibrazione e differenti strumenti alternativi alla *Self Calibration* nell'ottica di stimare nel modo più corretto possibile i parametri interni delle camere prese in esame. Tra i vari test eseguiti si è scelto di testare lo strumento di calibrazione camera fornito da software *Mathworks Matlab R2018a*. Nello specifico è stato utilizzato *tool* di calibrazione di *Matlab* che permette di determinare otto parametri di calibrazione tra cui la lunghezza focale espressa in coordinate f_x e f_y , coordinate del punto principale x_0 , y_0 , distorsioni radiali K_1 , K_2 , K_3 e distorsioni tangenziali P_1 , P_2 . Per funzionare è necessario disporre di un *pattern* che d'ora in avanti chiameremo *chessboard* che alterna quadrati di colore differente di cui è necessario specificare in fase di calibrazione le dimensioni.

Nel caso proposto si è scelto di realizzare il *chessboard* avvalendosi di un pannello ligneo sul quale tramite incisione laser è stato impresso un *pattern* ottenuto un disegno il più possibile privo di imprecisioni. Successivamente



Fig. 63. Chessboard utilizzato per la stima dei parametri interni attraverso il Camera Calibration Tool di Matlab R2018a.

si è proceduto alla fase di acquisizione per la quale sono state opportunamente segnate le due camere con codici identificativi differenti in modo da rendere facilmente riconoscibili le immagini per la calibrazione. Seguendo le linee guida del programma sono state eseguiti circa 20 scatti per calibrazione avendo cura di variare la posizione della camera e acquisendo

il pannello di calibrazione da angolazioni e altezze differenti.

Una delle problematiche da subito riscontrate è stato il fatto che attraverso il

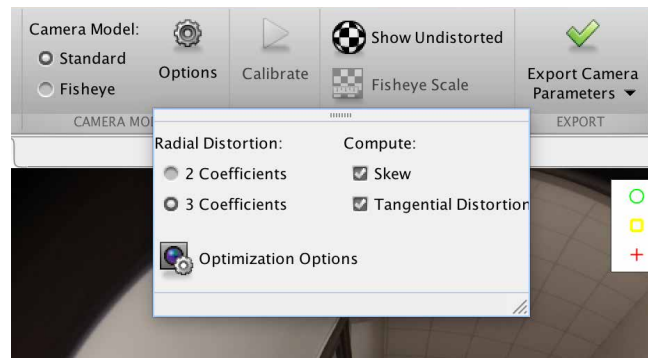


Fig. 64. Impostazione del modello di camera per la stima dei parametri interni.

settaggio del modello di camera *fisheye* nel *tool* di calibrazione solo una parte delle informazioni utili viene stimato. Infatti a seguito del processo di calibrazione solo le coordinate del punto principale risultano stimate mentre altre tipologie di distorsione non sono determinate. Per ovviare a queste problematiche è stato necessario forzarne la stima andando a settare il modello di camera come standard. L'uso del modello di camera standard, ha permesso la stima di tutti i parametri oggetto di interesse che, tuttavia, sono risultati poco attendibili in quanto generati attraverso algoritmi non adatti alla tipologia di dati *input*. Si procede nelle pagine che seguono ad illustrare i procedimenti eseguiti per la stima dei parametri.

A seguito del processo di acquisizione, le immagini sono state importate in *Matlab* e si è impostato un modello di camera standard per i motivi espressi nelle righe precedenti. Si è inoltre scelto di calcolare tre valori distinti per le *distorsioni radiali* (rispettivamente $K1, K2, K3$) oltre alle *distorsioni tangenziali* e *skew*. Si è pertanto eseguita una prima calibrazione. Successiva-

mente si è avviato il processo di calibrazione che analizzando le immagini inserite ha effettuato il riconoscimento della posizione delle intersezioni tra i quadrati scuri e quelli chiari sul chessboard procedendo ad un confronto tra le differenti posizioni di acquisizione. Si segnala che in questa fase non tutte le immagini sono state ritenute adatte dal programma, ad esempio per la prima camera testata su 18 immagini di input solo 10 sono state conside-

rate attendibili dal programma.

Eseguendo la calibrazione Matlab permette di vedere gli errori di ri-proiezione. I risultati ottenuti sono visibili nell'immagine contrassegnata con il numero 1 dalla quale si evince che l'immagine 9 presenta un errore medio espresso in pixel doppio rispetto alle altre immagini.

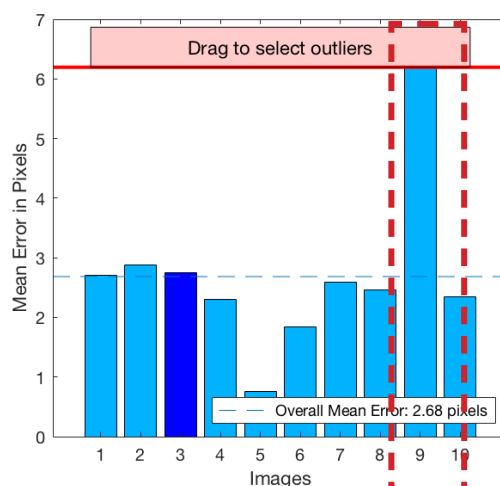


Fig. 65. Identificazione dei valori outliers a seguito della calibrazione attraverso il *Camera Calibration Tool* di *Matlab R2018a*.

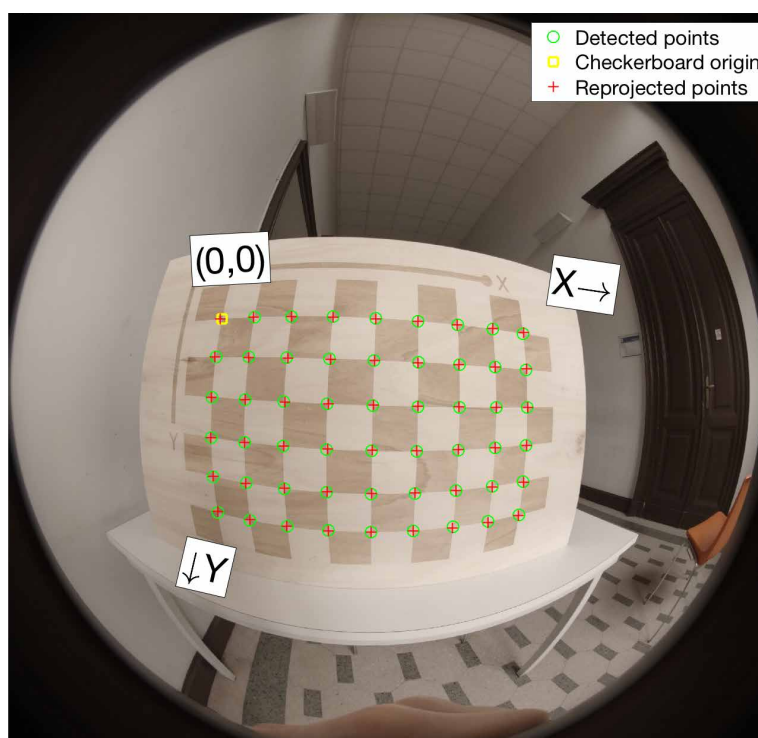


Fig. 66. Riconoscimento automatico del *chessboard* (attraverso il *Camera Calibration Tool* di *Matlab R2018a*), per la stima dei parametri interni

Includendo quest'immagine nel calcolo l'*errore medio totale* è di 2,68 px. Appare evidente che escludendo quest'immagine i risultati miglioreranno in modo significativo passando da 2,68 a 0,74 px. Ancora una volta si è scelto di rimuovere altre due immagini per migliorare i risultati così da ottenere un errore medio totale di 0,50 px. Nell'immagini seguente si può osservare la comparazione dei risultati con e senza i valori *outliers*.



Fig. 67. Alcune immagini di esempio utilizzate per la calibrazione della camera attraverso il *Camera Calibration Tool Matlab R2018a*.

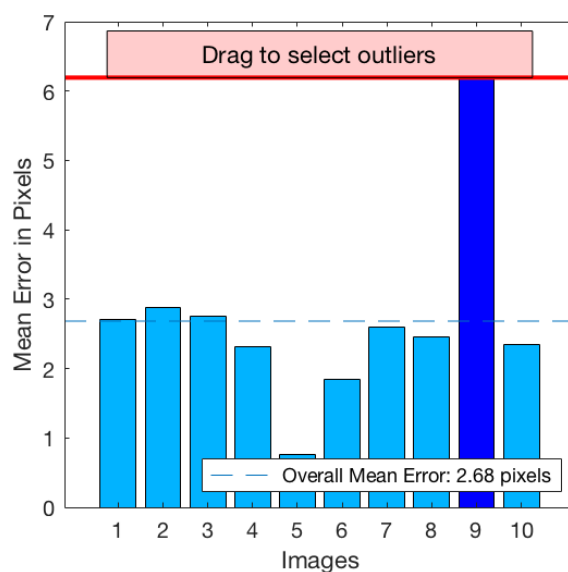


Fig. 68. Primo processo di calibrazione della *Camera Front* utilizzando attraverso il *Camera Calibration Tool di Matlab R2018a*. Come si può osservare la camera presenta un errore di riproiezione molto più alto delle altre ed è considerevole un valore *outliers*. Errore medio totale 2,68 px

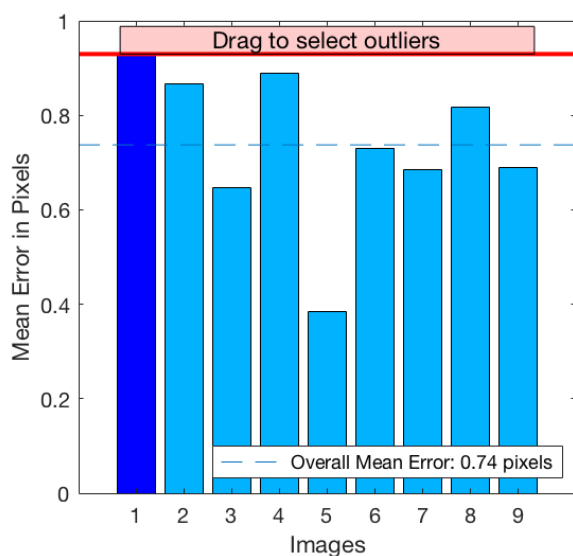


Fig. 69. Valutazione dell'errore di riproiezione della *Camera Front* eliminando il valore outliers. Errore medio totale 0,74 px

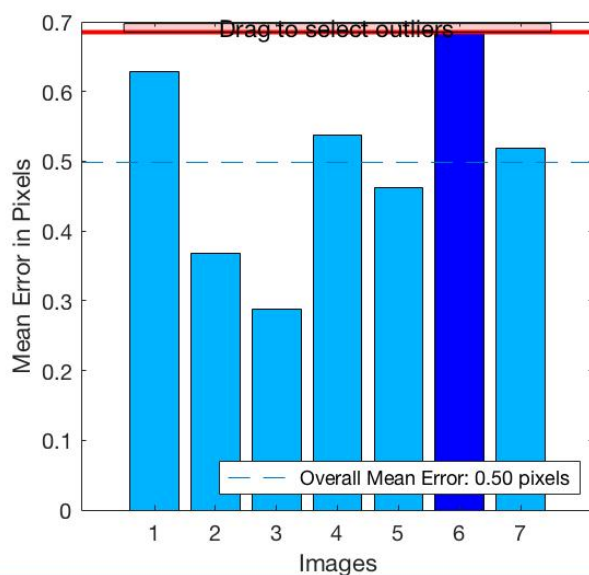


Fig. 70. Ulteriore miglioramento dei risultati della *Camera Front*. Errore medio totale 0,50 px

Di seguito si riportano i valori relativi alle *Camera Front* desunti attraverso i processi sopra elencati.

GOPRO FUSION FRONT MATLAB CALIBRATION			
PRINCIPAL POINT	Cx	Cy	
	1547.905	1498.194	
RADIAL LENS DISTORTION	k1	k2	k3
	-0.357	0.141	-0.0270374
TANGENTIAL LENS DISTORTION	P1	P2	
	0.0004	0.0001	
FOCAL LENGTH	fx	fy	
	1085.139	1084.590	
SKEW	0.198		

DEVIAZIONI STANDARD CAMERA FRONT MATLAB CALIBRATION			
PRINCIPAL POINT	Cx	Cy	
	0.824	0.628	
RADIAL LENS DISTORTION	k1	k2	k3
	0.002	0.002	0.001
TANGENTIAL LENS DISTORTION	P1	P2	
	0.000	0.000	
FOCAL LENGTH	fx	fy	
	1.638	1.696	
SKEW	0.204		

Tab. 13. Risultati stima parametri interni (pagina precedente) e deviazioni standard per la *Camera Front* a seguito del processo di calibrazione su *chessboard* attraverso il *Camera Calibration Tool* di *Matlab R2018a*.

Le medesime operazioni sono state compiute con la camera 2 (d'ora in avanti *Camera Back*). Su 19 immagini ne sono state utilizzate 10 per il calcolo. Utilizzando tutte e 10 le immagini si ottiene un errore medio totale di 2,99 px. mentre rimuovendo alcune immagini si riesce a ridurre l'errore a 1.17 px.

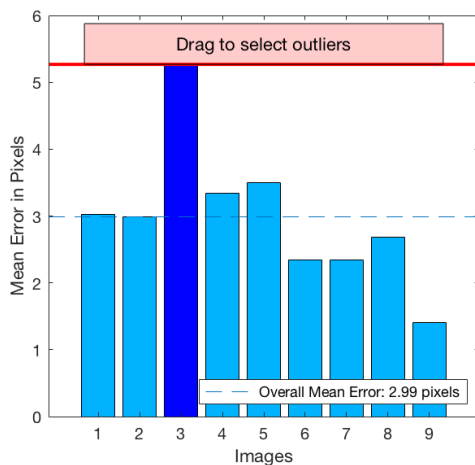


Fig. 72. Risultati Calibrazione Camera Back attraverso *Matlab* utilizzando tutte le immagini acquisite. Errore medio totale 2.99 px

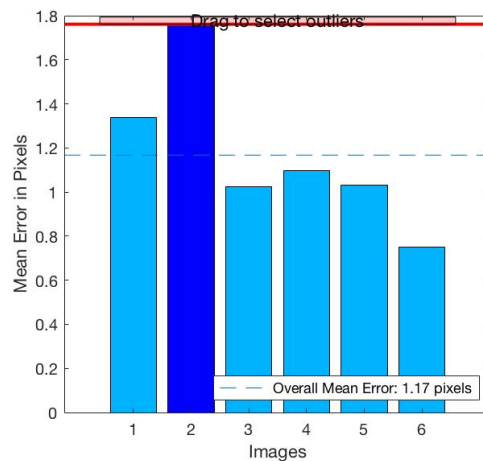


Fig. 71. Valutazione dell'errore di riproiezione a seguito dell'eliminazione del valore outliers. Errore medio totale 1.17 px

Di seguito si riportano i valori relativi alle *Camera Back* desunti attraverso i processi sopra elencati.

GOPRO FUSION BACK MATLAB CALIBRATION			
PRINCIPAL POINT	Cx	Cy	
	1565.672	1498.051	
RADIAL LENS DISTORTION	k1	k2	k3
	-0.324	0.103	-0.014168
TANGENTIAL LENS DISTORTION	p1	p2	
	-0.001	0.000	
FOCAL LENGTH	fx	fy	
	1068.227	1067.314	
SKEW	-1.102		

DEVIAZIONI STANDARD CAMERA BACK MATLAB CALIBRATION			
PRINCIPAL POINT	Cx	Cy	
	1.418	1.243	
RADIAL LENS DISTORTION	k1	k2	k3
	0.002	0.001	0.000
TANGENTIAL LENS DISTORTION	P1	P2	
	0.000	0.000	
FOCAL LENGTH	fx	fy	
	1.778	2.061	
SKEW	0.426		

Tab. 14. Risultati stima parametri interni e deviazioni standard per la *Camera Back* a seguito del processo di calibrazione su *chessboard* attraverso il *Camera Calibration Tool* di *Matlab R2018a*.

2.6. Agisoft Lens

Dopo avere testato la *Self Calibration* e il *Camera Calibration Tool* di *Matlab* senza ottenere risultati soddisfacenti per le finalità oggetto di questo studio si è proceduto al calcolo dei parametri di calibrazione della camera con il



Fig. 73. Target *chessboard* realizzato per la calibrazione con il tool *Lens* di *Agisoft Photoscan*

software *Agisoft Lens*.

Si è scelto di utilizzare questa soluzione dal momento che permetteva di ottenere i parametri di calibrazione su una tipologia di obiettivo *fish-eye*, tipologia presente in *Matlab* ma

non sviluppata ancora a

sufficienza come visto nel paragrafo precedente.

Il programma normalmente si articola in un *workflow* di lavoro che si compone di una prima fase di acquisizione di immagini di un *pattern*, composto dalla ripetizione di quadrati neri e bianchi (Fig. 73), eseguendo fotografie dello schermo con l'obiettivo di coprire con le singole immagini la porzione di *chessboard* più ampia possibile variando la posizione e l'angolo di acquisizione. Nel caso proposto, a causa della tipologia di obiettivo *fish-eye*, non è risultato possibile percorrere questa strada dal momento che ogni immagine acquisisce porzioni di 180°. Dopo svariati test si è scelto di realizzare nuove acquisizioni di immagini e predisporre una nuova tipologia di *chessboard* adatta allo scopo. È stata, infatti, realizzata una soluzione “*ad hoc*” composta dall'alternanza di quadrati neri e bianchi di lato 50 mm predisposti su un formato più ampio. In questo modo è stato possibile, eseguire prese

adatte allo scopo. La scelta di utilizzare questa tipologia di *pattern* è stata dettata dalla necessità di proporre un campione di immagini il più possibile simili a quelle acquisibili secondo il *workflow* standard previsto dal programma. Particolare attenzione è stata posta nella predisposizione dell'area di acquisizione. Quest'ultima è stata creata mantenendo piana la superficie di calibrazione e in condizioni di luce adeguate. Per calibrare gli obiettivi delle due camere sono state realizzate in totale quattro campagne di ripresa. Per ogni sensore sono, infatti, state eseguite due campagne di presa: una in condizioni di luce naturale e una seconda in condizione di luce artificiale (ottenute tramite l'illuminazione con due lampade a led dimmerabili ad asse convergente). Le prese eseguite con luce artificiale hanno permesso di eliminare qualunque tipo di ombra sul *pattern* di calibrazione.

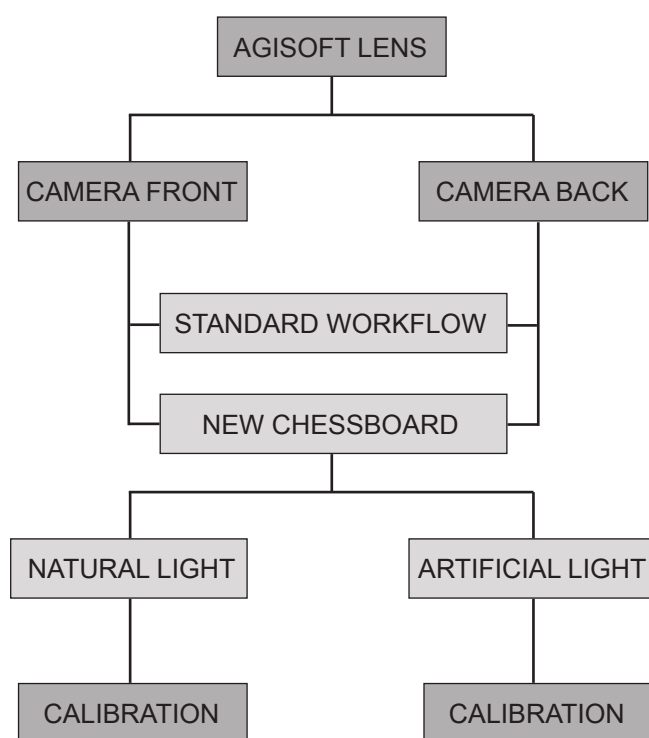


Fig. 74. Processo utilizzato per la calibrazione con il tool *Lens* di *Agisoft Photoscan*.

In totale sono stati effettuati quattro modelli di calibrazione, rispettivamente due per camera (uno eseguito in condizioni di luce naturale e l'altro in condizioni di luce artificiale).

2.6.1. Chessboard utilizzato per la calibrazione

Come spiegato nel paragrafo precedente, la metodologia standard di calibrazione offerta da *Agisoft Lens*, non si è dimostrata adatta a causa della tipologia di camera oggetto di calibrazione. Di seguito è illustrato il *marker* realizzato per la calibrazione. Il *pattern* creato è stato reso il più possibile simile a quello standard proposto dal programma. È stato stampato, infatti, un nuovo *chessboard* su un supporto più ampio cartaceo di dimensioni 1189 x 841 mm e con ogni quadrato della scacchiera di 50 mm.

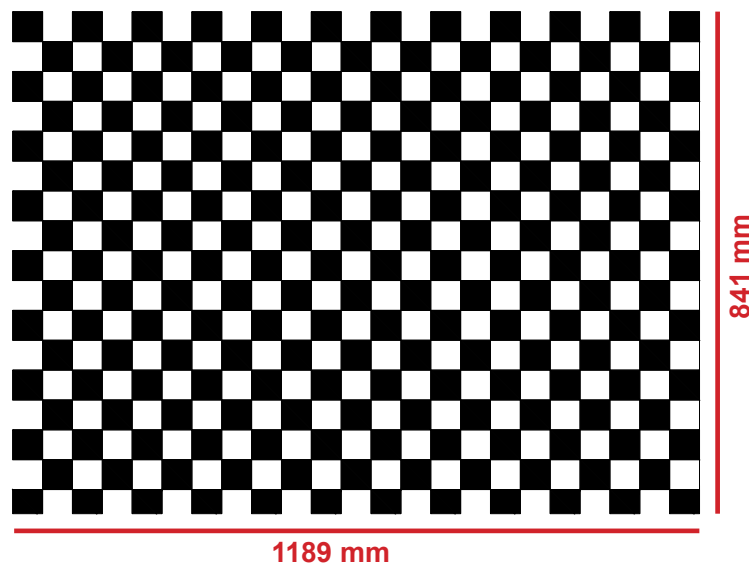


Fig. 75. Dimensioni del *chessboard* utilizzato per la calibrazione.

La calibrazione con questo tipo di *pattern* ha permesso, grazie alle sue dimensioni più ampie, che le immagini acquisite riuscissero a coprire un'area di molto maggiore del *target* rispetto a quelle ottenibili tramite calibrazione a schermo.

2.6.2. Condizioni di luce per le acquisizioni

La procedura di calibrazione con questo tipo di soluzione è stata ripetuta due volte variando solamente le condizioni di illuminazione. Per tutte le acquisizioni si è prestata attenzione a garantire la planarità della superficie di calibrazione fissando adeguatamente il *chessboard*. Dai risultati ottenuti e

mostrati nelle pagine seguenti si è riscontrato un miglioramento della qualità della calibrazione nelle acquisizioni in condizione di luce artificiale, sebbene entrambe abbiano permesso il corretto allineamento dei fotogrammi in fase di verifica. Di seguito alcune immagini di confronto tra le acquisizioni in condizioni di luce naturale e artificiale:

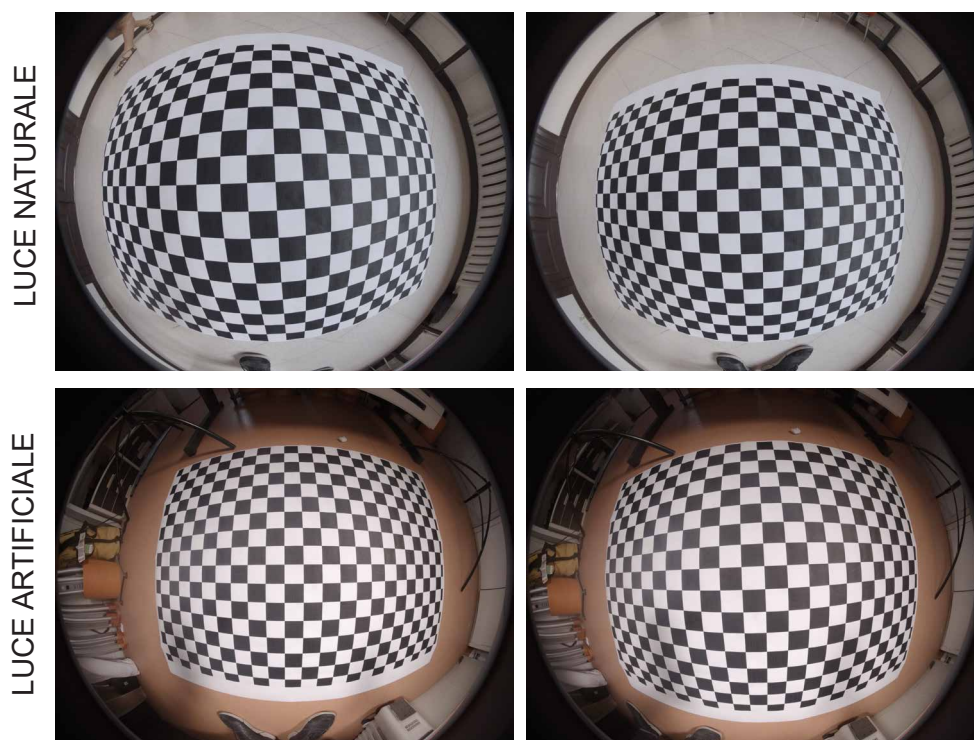


Fig. 76. Esempi di immagini utilizzate nella calibrazione con Agisoft Lens, rispettivamente in condizioni di luce naturale e artificiale.

In condizioni di luce artificiale sono state utilizzate due *banklight* a led poste secondo il seguente schema:

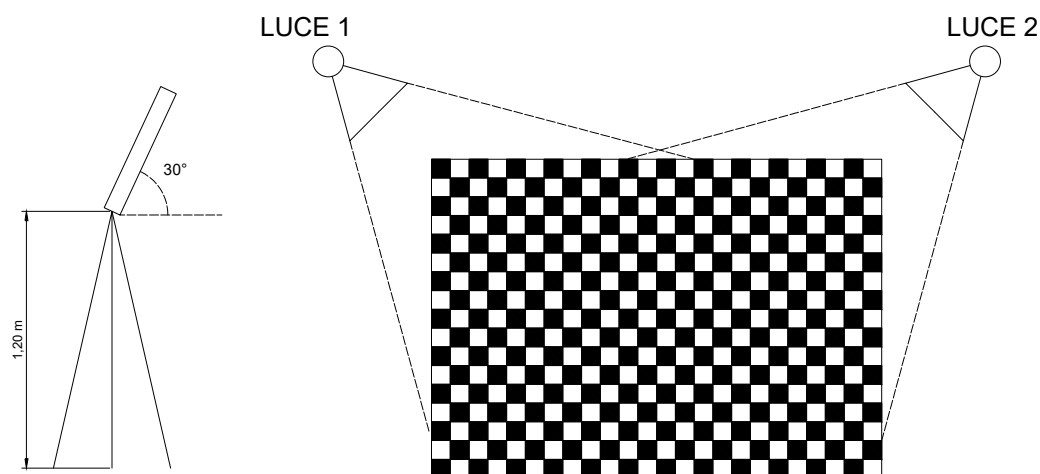


Fig. 77. Schema del posizionamento delle luci sul target di calibrazione.



Fig. 78. *Pattern* di calibrazione per la stima dei parametri interni della camera fisheye tramite Agisoft Lens.



Fig. 79. Acquisizione in luce naturale.

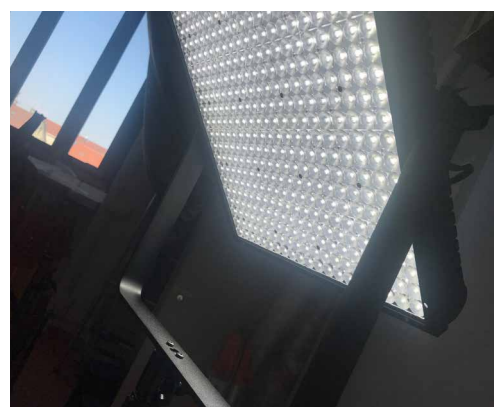
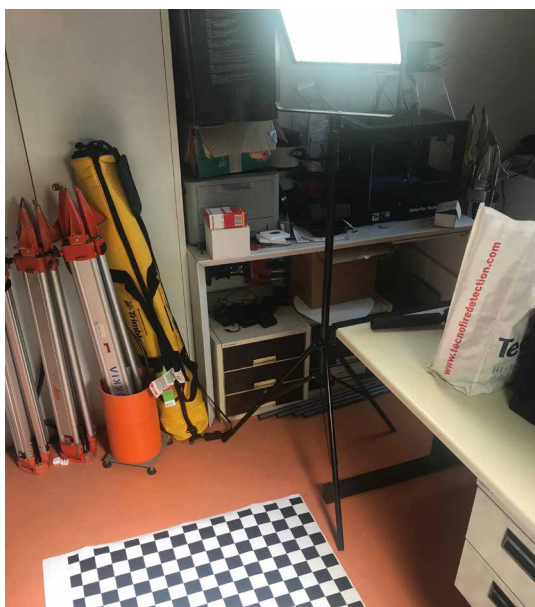


Fig. 81. Dettaglio *banklight* utilizzata.

Fig. 80. Allestimento area di test per acquisizione in luce artificiale.

2.6.3. Dataset per la calibrazione

Sono stati realizzati 4 dataset acquisendo immagini da angolazioni differenti. Di seguito sono riportate informazioni sul numero di immagini per ogni modello di calibrazione calcolato:

	CONDITION	IMAGE NUMBER
CAMERA FRONT	NATURAL LIGHT	19
	ARTIFICIAL LIGHT	15
CAMERA BACK	NATURAL LIGHT	17
	ARTIFICIAL LIGHT	12

Tab. 15. Numeri di immagini e condizioni di illuminazione dei dataset per la fase di calibrazione con *Agisoft Lens*.

Di seguito sono riportate a titolo d'esempio alcune delle immagini utilizzate durante il processo di calibrazione.

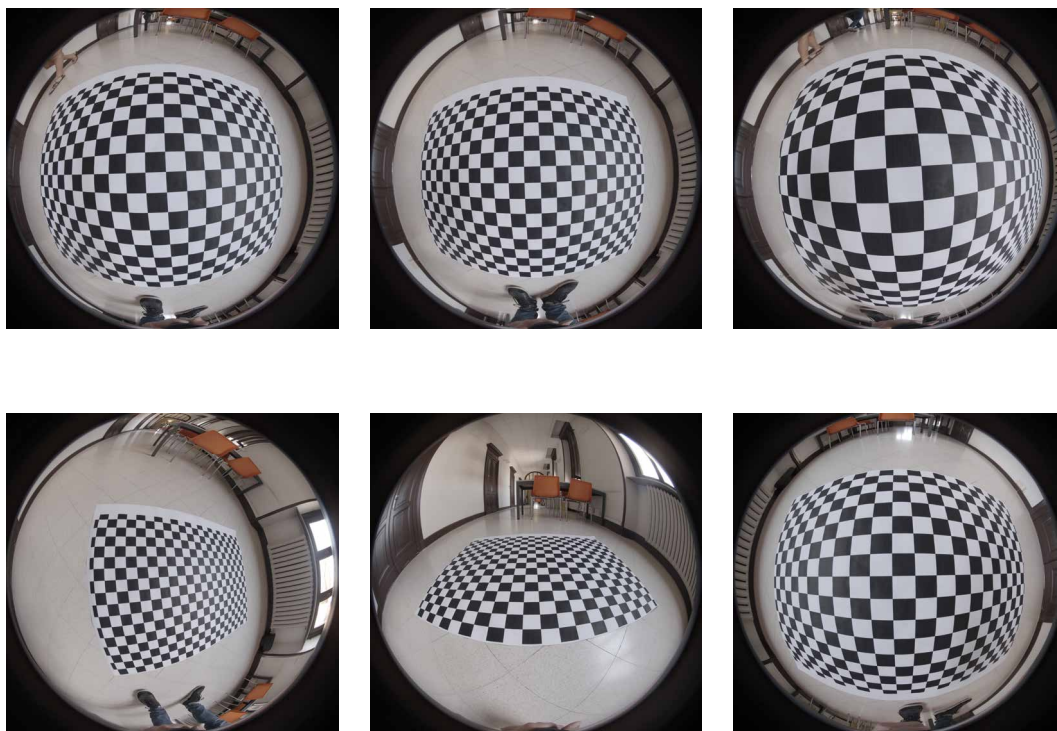


Fig. 82. Esempi di immagini in condizioni di luce naturale utilizzate nel processo di calibrazione della camera tramite *Agisoft Lens*.

2.6.4. Processamento dei dataset

I dataset sono stati elaborati e sono stati dedotti i parametri di calibrazione. A seguito del processo il *pattern* viene riconosciuto e confrontato e le immagini vengono allineate. Il tool *Lens di Agisoft Photoscan Professional* non permette di visualizzare i *tie point* in questa fase, ma permette una visualizzazione delle posizioni di presa.

Tutte le immagini sono state allineate dal programma ad eccezione di un'immagine della *camera back* che appariva eccessivamente vicina al *chessboard* e presentava distorsioni radiali molto elevate.

È possibile, invece, visualizzare il *match* dei punti sul *pattern* per ogni immagine e la sua riproiezione.

Camera type: Fisheye	
Pixel size (mm):	0.00112 x 0.00112
Focal length (mm):	3
<input type="checkbox"/> Enable rolling shutter compensation <input type="checkbox"/> Film camera with fiducial marks	
Initial Adjusted Bands GPS/INS Offset	
f:	1091.75113
cx:	-5.63437
cy:	-4.70873
k1:	-0.0571527
k2:	0.0045775
k3:	-0.00142075
k4:	-0.00149537
b1:	-1.21806
b2:	0.0178152
p1:	0.000379788
p2:	0.000727731
p3:	-0.336762
p4:	0.0154064

Fig. 83. Output dei parametri di calibrazione di uno dei dataset.



Fig. 84. Visualizzazione della ricostruzione della posizione delle prese di un dataset.

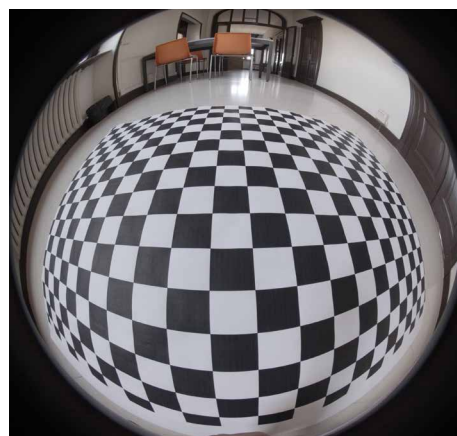


Fig. 85. Unica immagine non allineata nel processo relativo alla camera back.

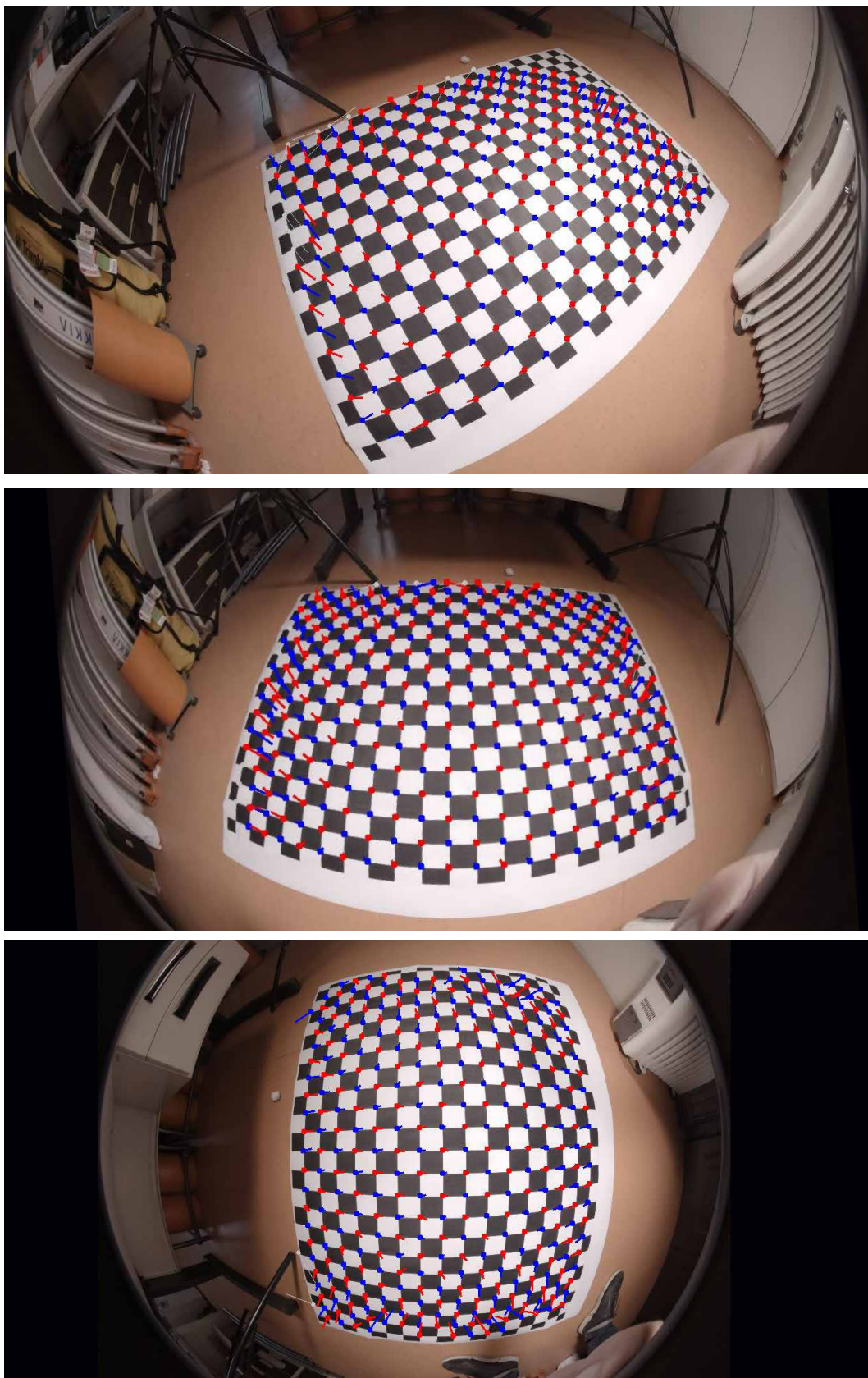


Fig. 86. Esempi del riconoscimento del pattern realizzato per il processo di calibrazione in sostituzione di quello standard visualizzabile a monitor.

2.6.5. Risultati calibrazione attraverso *Agisoft Lens*

Ognuno dei dataset analizzati ha restituito un modello di calibrazione. Sono quindi stati realizzati due modelli per ognuna delle camere.

A differenza di quanto ottenuto tramite *Self Calibration* in questo caso i risultati appaiono coerenti e variabili in misura accettabile.

Ci si aspettava, come effettivamente è accaduto, che i dati di calibrazione relativi alle due camere fossero simili in quanto realizzate in modo identico, ma si differenziassero leggermente dal momento che ogni camera per come è stata realizzata e assemblata presenta delle proprie specificità.

I modelli di calibrazione relativi alla stessa camera variano in misura molto più lieve e tali variazioni possono dipendere da fattori come le condizioni di acquisizione, la posizione delle prese e dalla temperatura dell'ambiente.

Per valutare la qualità di questi modelli di calibrazione si è proceduto a testarli sui dataset acquisiti per la *Self Calibration* relativi all'area di test al fine di valutare quale di questi permettesse di allineare le immagini restituendo

	CAMERA FRONT		CAMERA BACK	
	NATURAL LIGHT	ARTIFICIAL LIGHT	NATURAL LIGHT	ARTIFICIAL LIGHT
F [px]	1087.139	1091.751	1083.617	1087.957
Cx [px]	-8.276	-5.634	-1.972	-3.728
Cy [px]	-4.536	-4.709	-6.710	-4.662
B1 [px]	-2.672	-1.218	-1.143	-1.831
B2 [px]	1.293	0.018	1.753	-0.016
k1 [mm]	-0.051	-0.057	-0.048	-0.066
k2 [mm]	0.003	0.005	-0.007	0.044
k3 [mm]	-0.005	-0.001	0.000	-0.056
p1 [mm]	-0.001	0.000	0.000	0.000
p2 [mm]	0.001	0.001	0.000	0.000

Tab. 16. I quattro modelli di calibrazione calibrati realizzati tramite l'applicativo *Lens* di *Agisoft Photoscan Professional*.

un numero maggiore di *tie point* e valutando l'errore nei *target* e nei *control points*. Per raggiungere tale obiettivo si è proceduto ad eseguire dei nuovi processi di allineamento utilizzando tali valori di calibrazione.

Da subito si è potuto osservare come tali modelli di calibrazione siano risultati funzionali permettendo finalmente di raggiungere i risultati sperati.

Utilizzando questi parametri, infatti, il processo di allineamento è riuscito in tutti i casi ad allineare la quasi totalità dei fotogrammi escludendo solamente quelli che risultavano essere errori di acquisizione o che non presentavano nessun *overlap*, ovvero una sovrapposizione non sufficiente le acquisizioni. Si è scelto di proporre questo confronto per i due dataset prima denominati "Seconda Acquisizione", dal momento che un maggior numero di immagini permette un confronto più completo e un numero maggiore di *tie points* per un'analisi degli errori di riproiezione. Di seguito si riportano i risultati ottenuti

	CAMERA FRONT		CAMERA BACK	
	NATURAL LIGHT	ARTIFICIAL LIGHT	NATURAL LIGHT	ARTIFICIAL LIGHT
IMAGES ALIGNED	221/222	222/222	225/227	227/227

Tab. 17. Numeri di immagini allineate relative all'area test al variare delle condizioni di illuminazione dei dataset adottati per la fase di calibrazione con *Agisoft Lens*.

utilizzando questi parametri:

Appare evidente che tutti i profili di calibrazione hanno raggiunto uno dei primi obiettivi, quello di allineare un numero maggiore di immagini. Rispetto al processo di *Self Calibration* si è passati da un allineamento che in un caso risultava del 25% a valori prossimi al 99,5%.

Al fine di valutare la soluzione di calibrazione migliore si sono confrontati i dati relativi alle tensioni nei target. Per fare questo si è proceduto alla collimazione manuale dei target su tutte le immagini al fine di potere effettuare un confronto. I risultati ottenuti in questa prova sono risultati variabili. Il processo di allineamento è stato realizzato sempre utilizzando il settaggio

High e togliendo i limiti di punti nella generazione dei *Tie Point*. Ci si è accorti infatti che rieseguendo più volte il processo sugli stessi dati, i risultati fossero variabili. In modo particolare le tensioni sui *marker* variavano in modo significativo modificando la qualità dell'allineamento da *High* a *Low*. Gli errori si abbassavano notevolmente cancellando alcuni *marker* e semplicemente riposizionandoli nuovamente nelle medesime posizioni.

Per cercare di garantire un confronto tra i dati si era cercato di analizzarli tutti con lo stesso posizionamento dei *target* sulle immagini in modo da rendere le condizioni di analisi il più possibile simili, tuttavia, si sottolinea che per raggiungere un risultato accettabile, si è cercato di ovviare i problemi software sopra esposti (che sono stati riscontrati soltanto con questo tipo di immagini *fisheye*) provvedendo alla cancellazione e reinserimento manuale dei target nelle immagini ottenendo un immediato abbassamento significativo degli errori. Dalle analisi effettuate si è riscontrato che i modelli di calibrazione realizzati in condizioni di luce artificiale hanno prodotto un risultato migliore, anche se a causa delle problematiche sopra citate andrebbero fatte ulteriori verifiche. Alla luce di quanto detto, verranno illustrati i due modelli di calibrazione realizzati in condizioni di luce artificiale i quali hanno prodotto un ottimo risultato a livello di errori di posizione stimata dei *target*. Quello che emerge osservando la risposta dei dati e che il modello di calibrazione realizzato seguendo questo metodo risulta il migliore dal momento che permette l'allineamento di tutte le immagini e risultati compatibili con applicazioni finalizzati all'ottenimento di informazioni metriche. Per migliorare ulteriormente l'attendibilità della calibrazione nel paragrafo successivo si illustreranno i risultati ottenuti tramite un processo di ottimizzazione automatizzato dei coefficienti di calibrazione ricavati nel processo (*Bundle Block Adjustment*).

2.6.6. Ottimizzazione dei risultati di calibrazione

Dopo avere processato i dati con i modelli di calibrazione precedentemente elencati si è proceduto alla ricalibrazione automatica realizzata dal software. Durante tale processo vengono nuovamente stimati i parametri di calibrazione attraverso una correzione di quelli precedentemente inseriti. Questa scelta è stata compiuta dopo avere testato il sistema mantenendo fissi i valori di calibrazione. L'ottimizzazione ha portato ad un miglioramento importante dei risultati riducendo notevolmente gli errori sui target. Il risultato sono stati due nuovi modelli di calibrazione con i parametri ottimizzati dal software. In tale fase è possibile scegliere quali coefficienti correggere con tale processo: essendo che tramite il *tool Lens* sono stati stimati tutti i parametri si è scelto di effettuare una correzione su tutti. La scelta di ottimizzare i dati è stata dettata inoltre dal fatto che le acquisizioni sono state eseguite

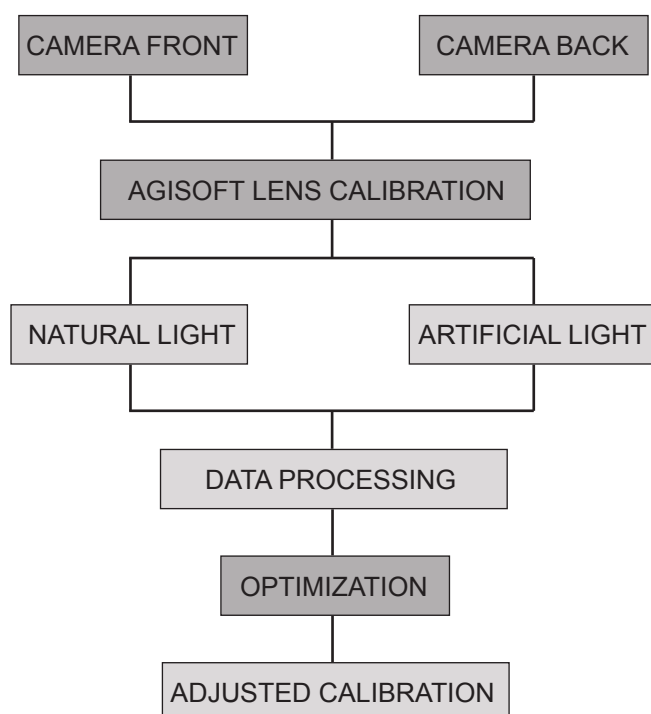


Fig. 87. Schematizzazione del processo di ottimizzazione della calibrazione.

alcuni giorni dopo la fase di calibrazione e anche modeste variazioni di temperatura potrebbero portare a variazioni seppur marginali dell’assetto delle ottiche interne alla camera.

Nella tabella sono riportati i valori ottenuti prima e dopo la fase di aggiustamento relativi alla calibrazione effettuata in condizioni di luce artificiale:

	CAMERA FRONT		CAMERA BACK	
	ORIGINAL CALIBRATION	OPTIMIZED CALIBRATION	ORIGINAL CALIBRATION	OPTIMIZED CALIBRATION
F [px]	1090.826	1086.856	1087.957	1089.578
Cx [px]	-5.826	-5.378	-3.728	-3.256
Cy [px]	-4.378	-1.104	-4.662	-2.138
B1 [px]	-1.120	-0.429	-1.831	-0.158
B2 [px]	-0.044	0.030	-0.016	-0.038
k1 [mm]	-0.058	-0.053	-0.066	-0.096
k2 [mm]	0.006	-0.001	0.044	0.082
k3 [mm]	-0.002	-0.001	-0.056	-0.062
p1 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000
p2 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000

Tab. 18.Nella tabella i valori della calibrazione ottenuta con Agisoft Lens e successivamente corretti tramite la procedura di ottimizzazione su un area campione con 16 punti di controllo di coordinate note.



Fig. 88. Schermata relativa alla scelta dei parametri oggetto della procedura automatizzata di ottimizzazione.

2.6.7. Risultati *Camera Front Lens Calibration Tool*

Di seguito si presentano i risultati ottenuti sulla *Camera Front* utilizzando la calibrazione eseguita in condizioni di luce artificiale. Dopo il caricamento delle immagini e l'inserimento dei valori della precalibrazione desunti si è proceduto al *matching* dei target manualmente su tutte le immagini. Successivamente è stato avviato il processo di allineamento utilizzando il settaggio *High* a seguito del quale sono stati verificati gli errori stimati nei *target*. Il risultato è stato un modello ad elevata precisione che ha generato una calibrazione precisa.

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
GOPRO FUSION	3104 x 3000	3 mm [*]	1.12 x 1.12 μm	Yes

Tab. 19. Tipologia di camera utilizzata. *Si segnala che il valore di 3 mm come Focal Length è stato fornito dai *exrif* della camera. Da analisi più approfondite (illustrate nei capitoli successivi) esso risulterà circa 1.21 mm. Tale valore non presenta tuttavia problematiche per il calcolo dal momento che la calibrazione permette di ricavare correttamente il valore utile.

L'immagine che segue permette di avere un riscontro sull'overlap cioè il numero di immagini che ricoprono la medesima area. In accordo con quanto pianificato, la sovrapposizione nel caso proposto è volutamente molto alta, e, nella maggior parte delle aree superiore a 9 immagini.

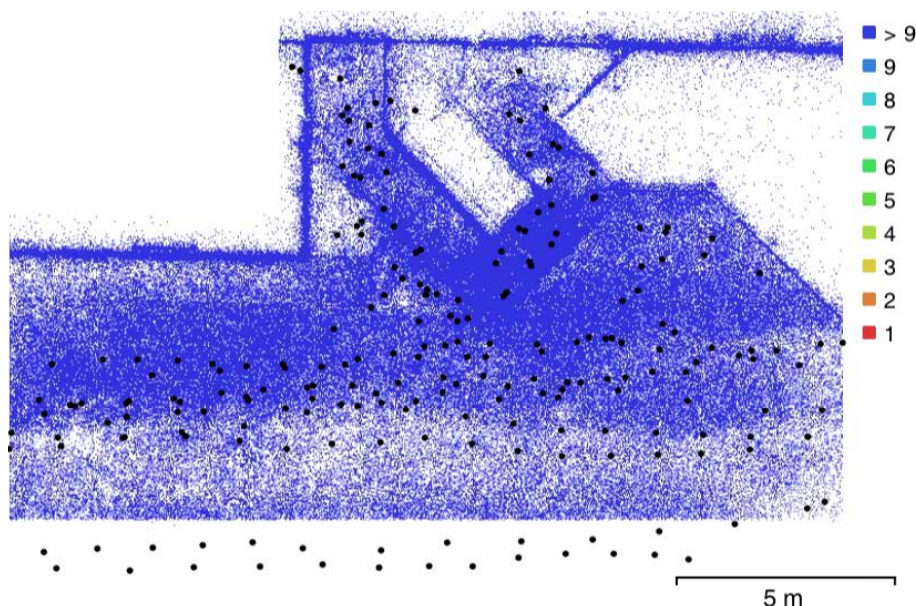


Fig. 89. Posizioni delle prese e *overlap* dell'elaborazione relativa alla *Camera Front*.

È possibile avere un riscontro grafico dei residui della camera oggetto di calibrazione e della sua matrice di correlazione.

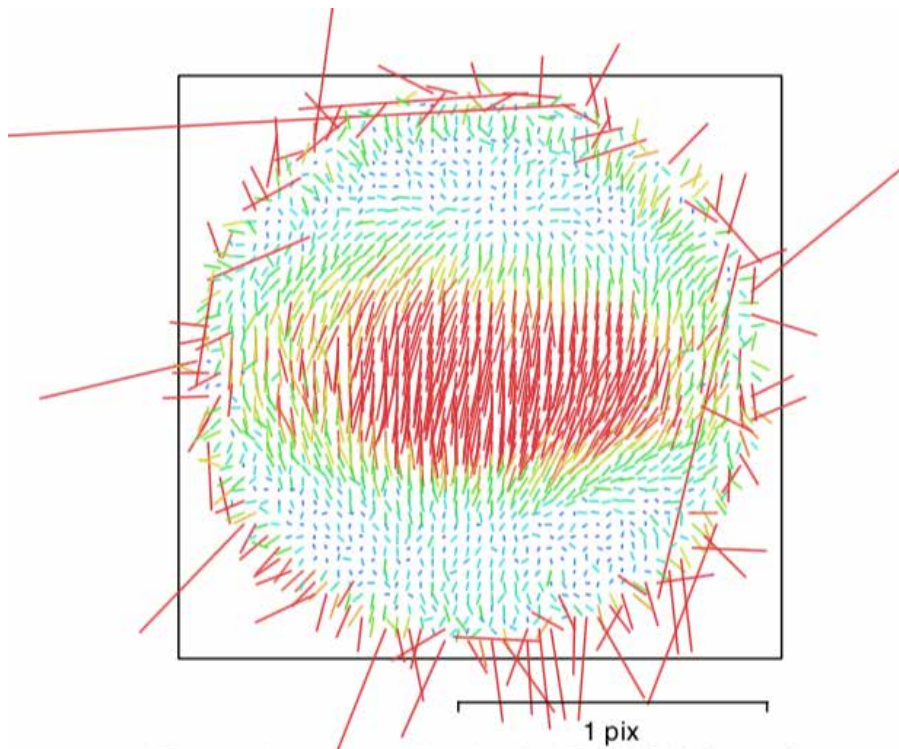


Fig. 90. Visualizzazione grafica dei residui.

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2	P3	P4
F	1086.86	0.011	1.00	-0.06	-0.01	-0.66	-0.05	-0.44	0.36	-0.34	0.33	0.00	-0.02	0.01	-0.01
Cx	-5.37778	0.0056		1.00	0.01	0.06	0.05	0.02	-0.02	0.02	-0.03	-0.18	0.00	-0.00	0.00
Cy	-1.10367	0.0037			1.00	-0.01	0.03	-0.00	0.01	-0.01	0.01	0.04	0.02	-0.04	0.04
B1	-0.429246	0.0084				1.00	0.03	0.01	-0.01	0.03	-0.04	0.01	0.03	-0.03	0.03
B2	0.0303994	0.0059					1.00	0.01	-0.02	0.02	-0.03	-0.00	0.01	-0.01	0.01
K1	-0.0532588	2.2e-05						1.00	-0.97	0.92	-0.86	-0.03	-0.03	0.03	-0.03
K2	-0.00125922	3.6e-05							1.00	-0.99	0.95	0.03	0.03	-0.03	0.03
K3	-0.00140718	2.3e-05								1.00	-0.99	-0.03	-0.02	0.03	-0.03
K4	0.000173991	4.8e-06									1.00	0.03	0.02	-0.02	0.02
P1	1.18102e-06	2.2e-07										1.00	0.98	-0.97	0.97
P2	1.30877e-05	2.4e-06											1.00	-1.00	1.00
P3	10.4569	2.1												1.00	-1.00
P4	-2.68323	0.56													1.00

Tab. 20.Coefficienti di calibrazione e matrice di correlazione.

2.6.8. Errori nei Target e Control Point Camera Front

Dei sedici target di coordinate per la *Camera Front* così come per la *Camera Back*, si è scelto di utilizzarne 11 come *control points* i restanti 5 come *check points* (scelti casualmente) per valutare l'accuratezza della ricostruzione. Nell'immagine 91 si possono osservare la posizione e gli errori stimati. Gli errori sull'asse X e Y sono rappresentati da un ellisse le cui dimensioni sono dipendenti dall'errore, mentre sull'asse Z è rappresentato dal colore utilizzato. La posizione stimata dei *Ground Control Points* è rappresentata da un punto mentre quella dei *Check Points* dalla lettera T.

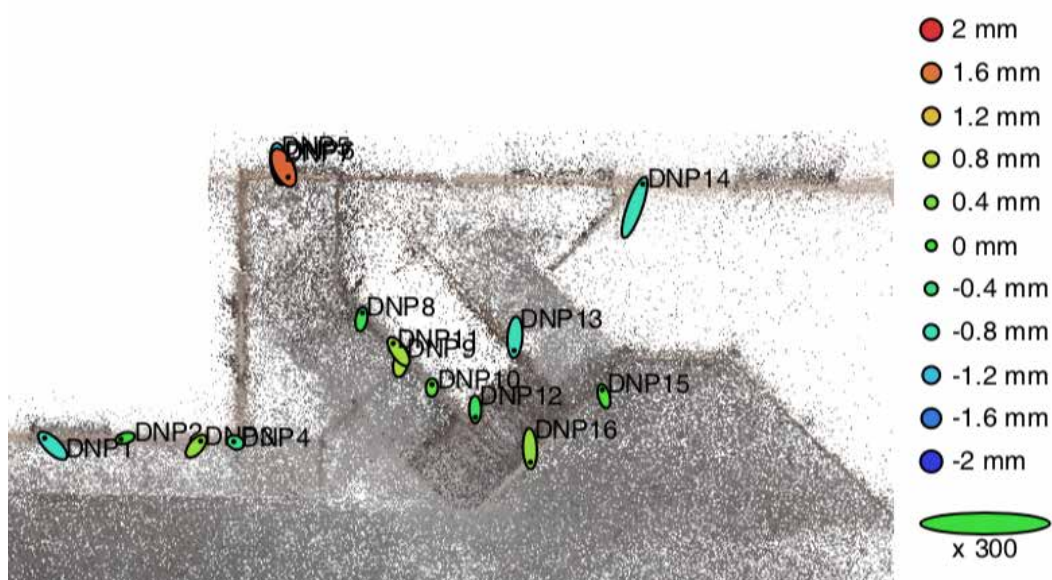


Fig. 91. Visualizzazione degli errori sui target relativi all'elaborazione eseguita per la *Camera Front*.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
DNP1	-0.611	0.931	-0.611	1.270	0.297 (93)
DNP4	-0.035	0.131	-0.437	0.458	0.297 (119)
DNP5	0.399	-1.965	-0.740	2.138	0.290 (104)
DNP6	0.075	-1.580	0.640	1.706	0.270 (86)
DNP8	0.166	0.730	0.080	0.753	0.270 (90)
DNP9	0.223	0.869	0.809	1.209	0.270 (115)
DNP10	-0.035	0.441	0.336	0.556	0.243 (112)
DNP11	-0.730	1.102	0.866	1.580	0.320 (108)
DNP13	-0.167	-1.811	-0.806	1.989	1.504 (66)
DNP14	0.822	2.618	-0.586	2.806	0.338 (96)
DNP16	-0.105	-1.467	0.447	1.537	0.336 (72)
Total	0.412	1.421	0.621	1.605	0.470

Tab. 21. Errori stimati in millimetri nei *Ground Control Points* nelle elaborazioni della *Camera Front*.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
DNP2	-0.236	-0.101	0.170	0.308	0.270 (105)
DNP3	0.742	0.800	0.762	1.331	0.249 (119)
DNP7	0.617	-1.322	2.344	2.761	0.239 (91)
DNP12	-0.002	-1.046	-0.344	1.101	0.383 (93)
DNP15	-0.452	0.890	0.0476	1.00	0.339 (76)
Total	0.488	0.925	1.116	1.530	0.297

Tab. 22. Errori stimati in millimetri nei *Check Points* nelle elaborazioni della *Camera Front*.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
11	0.412	1.422	0.621	1.480	1.605

Tab. 23. Errori stimati totali in millimetri nei *Ground Control Points* nelle elaborazioni della *Camera Front*.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
5	0.489	0.926	1.11	1.047	1.530

Tab. 24. Errori stimati totali in millimetri nei *Check Points* nelle elaborazioni della *Camera Front*.

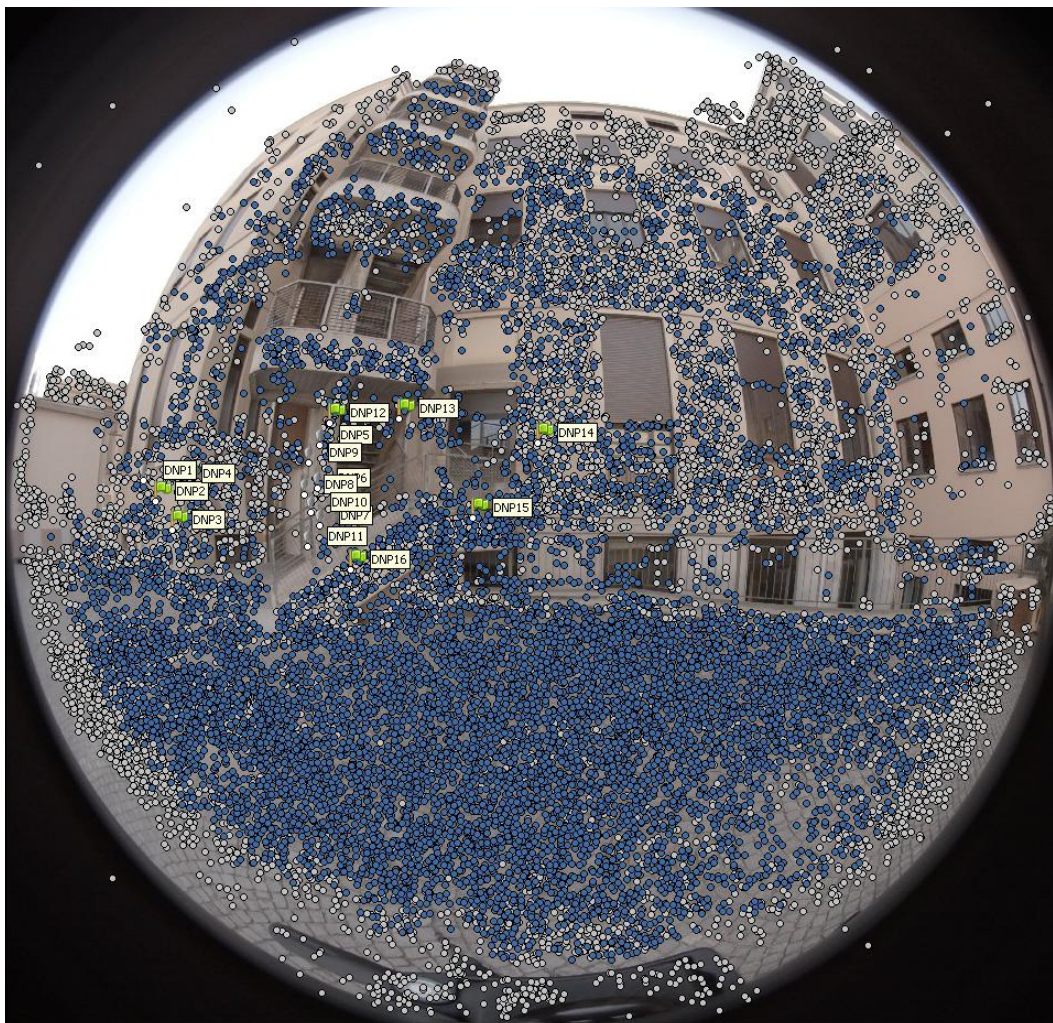


Fig. 92. Visualizzazione dei tie point su un immagine utilizzata nel processamento.



Fig. 93. Visualizzazione dei tie point su un immagine, ingrandimento.

Nelle immagini seguenti alcune visualizzazioni dei tie point costituenti la nuvola rada.

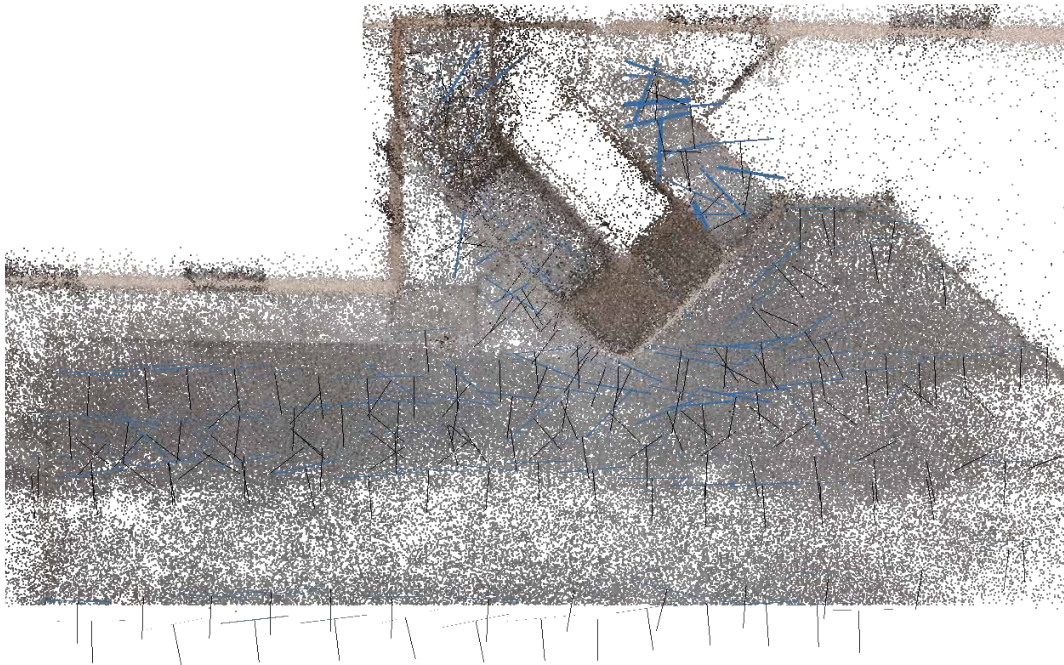


Fig. 94. Visualizzazione dall'alto della *sparse cloud* relativa alla *Camera Front*.

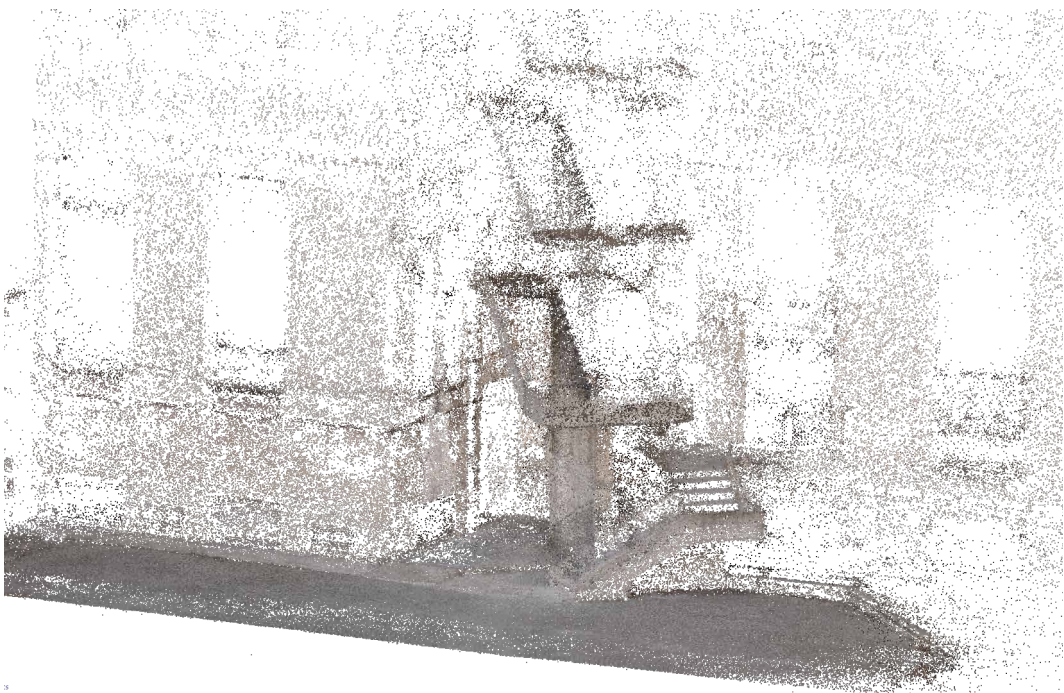


Fig. 95. Visualizzazione assonometrica della *sparse cloud* relativa alla *Camera Front*.

2.6.9. Densificazione della nuvola di punti e creazione della *mesh* per la *Camera Front*

Successivamente si è proceduto alla densificazione della nuvola di punti sulla base dei *tie points* estratti nella fase precedente. Il risultato è stato un incremento cospicuo del numero di punti ricostruiti. Nello specifico la nuvola densa relativa alla *Camera Front* elaborata con settaggio *High* e successivamente segmentata alla sola area di interesse è composta da circa 28 milioni punti. Successivamente è stata elaborata la *mesh* e la relativa *texture*.

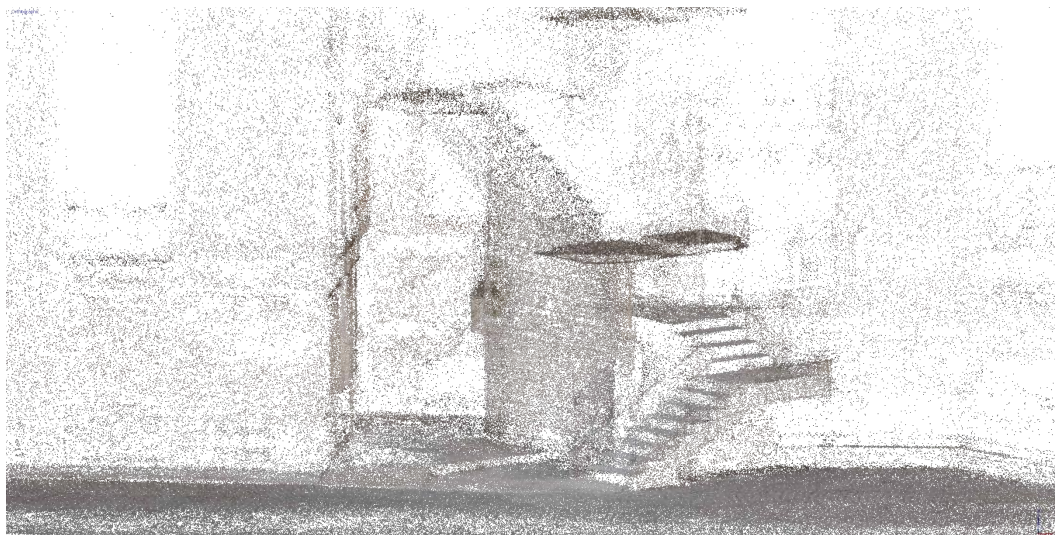


Fig. 96. Visualizzazione dall'alto della *sparse cloud* relativa alla *Camera Front*.



Fig. 97. Visualizzazione dall'alto della *dense cloud* relativa alla *Camera Front*.

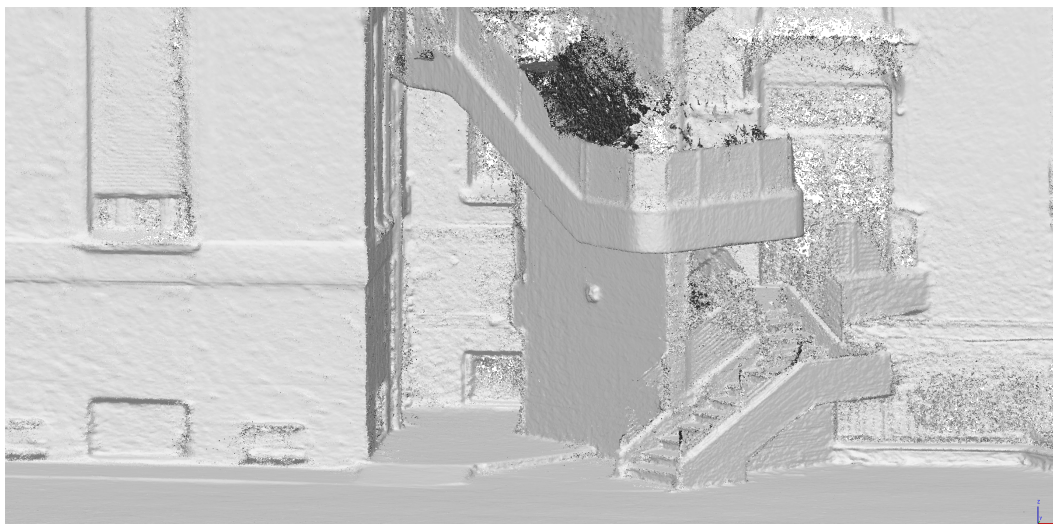


Fig. 98. Visualizzazione nuvola di punti monocromatica relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Front*.

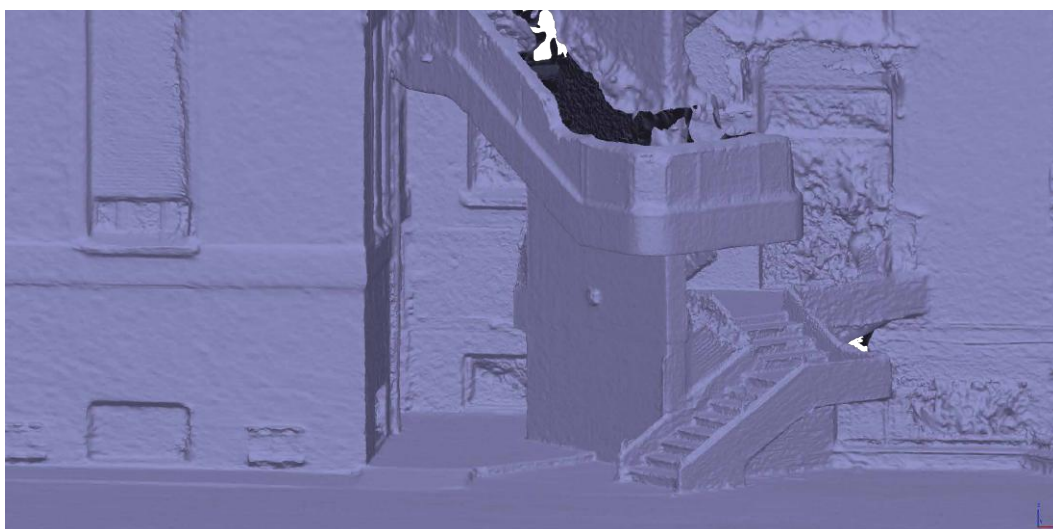


Fig. 99. Visualizzazione della mesh monocromatica relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Front*.



Fig. 100. Visualizzazione dalla mesh texturizzata relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Front*.

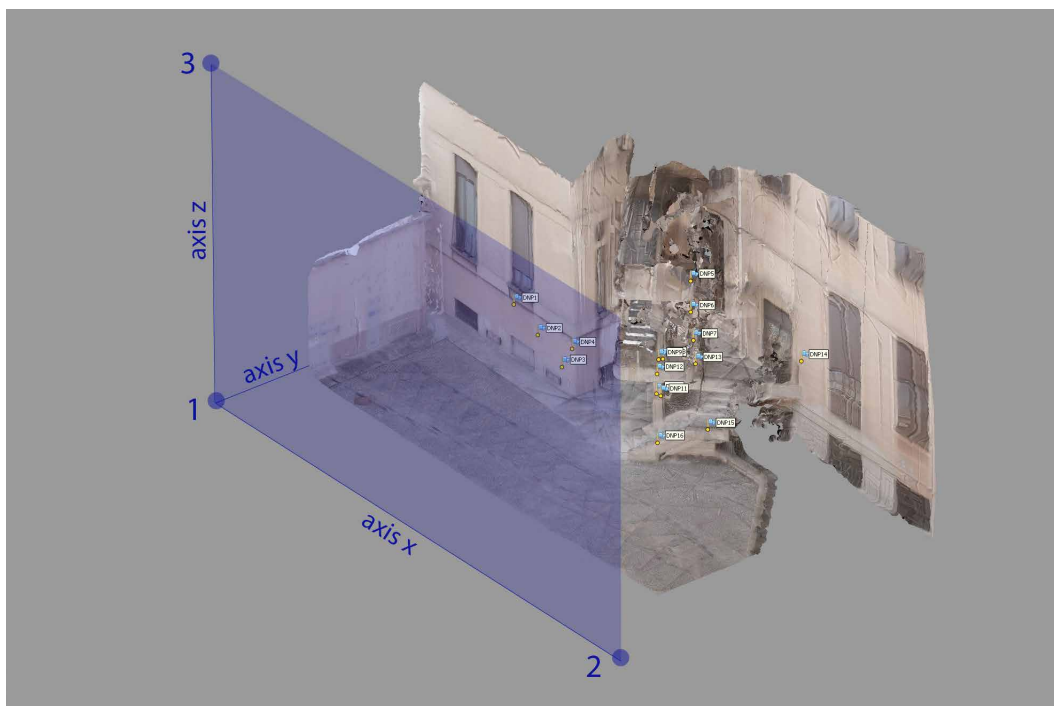


Fig. 101. Determinazione del piano di proiezione tramite marker per l'elaborazione dell'ortofoto.

Al fine di generare un'ortofoto si è proceduto alla determinazione del piano di proiezione che in questo caso è stato scelto parallelo alla parete di principale che occupa la scena. Per determinare il piano di proiezione è stato necessario identificare tre marker di coordinate note al fine di orientare gli assi x,y,z correttamente. A tale scopo le nuvole di punti sono state esportate all'interno del software Pointcab attraverso il quale è stata generata una sezione monocromatica orizzontale attraverso la quale è risultato più semplice identificare i tre marker. Una volta identificate le coordinate di questi punti e generati in Photoscan Professional si è proceduto nella fase di genera-

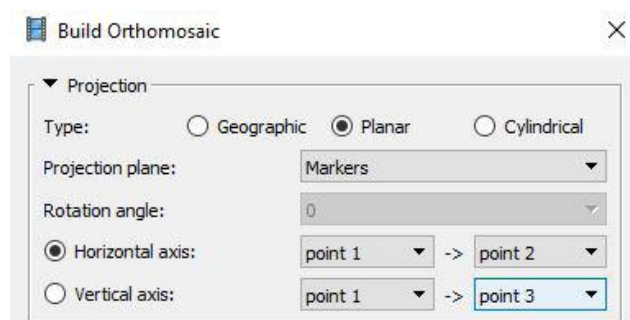


Fig. 102. Orientamento degli assi cartesiani sulla base dei *target* generati a tale scopo.

zione dell'ortofoto ad indicarli orientando l'asse orizzontale dal punto 1 al punto 2 e quello verticale da 1 a 3, utilizzando quindi il punto uno come origine degli assi cartesiani.

Infine si è proceduto alla generazione di un'ortofoto basata sulla mesh appena generata. Quest'ultima immagine in quanto priva di distorsioni risulta fondamentale nella fase di interpretazione metrica e ridisegno delle geometrie. Appare perciò fondamentale indagare la buona riuscita di quest'ultima.



Fig. 103. Visualizzazione dell'ortofoto relativa alle elaborazioni della *Camera Front*.



Fig. 104. Porzione dell'ortofoto relativa alle elaborazioni della *Camera Front*.

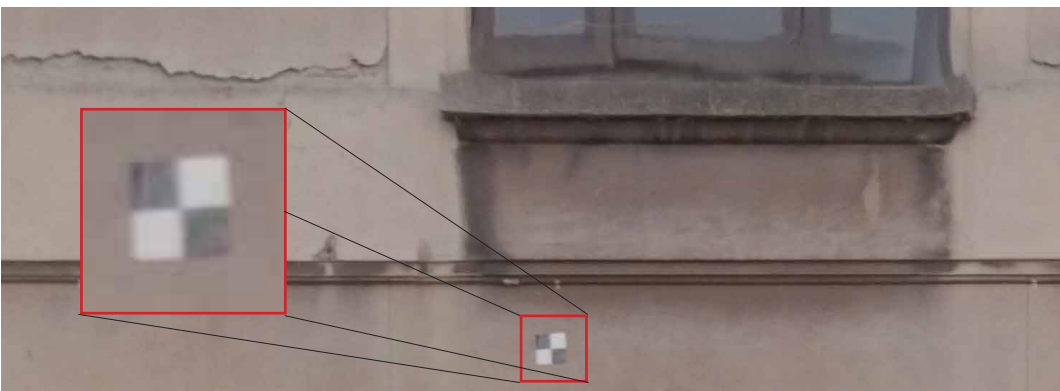


Fig. 105. Dettaglio dell'ortofoto relativa alle elaborazioni della *Camera Front*.

2.6.10. Risultati *Camera Back Lens Calibration Tool*

In modo analogo a quanto presentato nel paragrafo precedente si procede ad elencare i risultati sulla *Camera Back* utilizzando la calibrazione ottenuta tramite *Lens* per il *dataset* realizzato in condizioni di luce artificiale. Anche in questo caso dopo il caricamento delle immagini e l'inserimento dei valori della precalibrazione desunti si è proceduto alla collimazione dei *target* manualmente su tutte le immagini. I dati di partenza relativi alla tipologia di camera utilizzata sono i medesimi proposti in tabella 19 mentre ovviamente differenti sono i parametri di calibrazione.

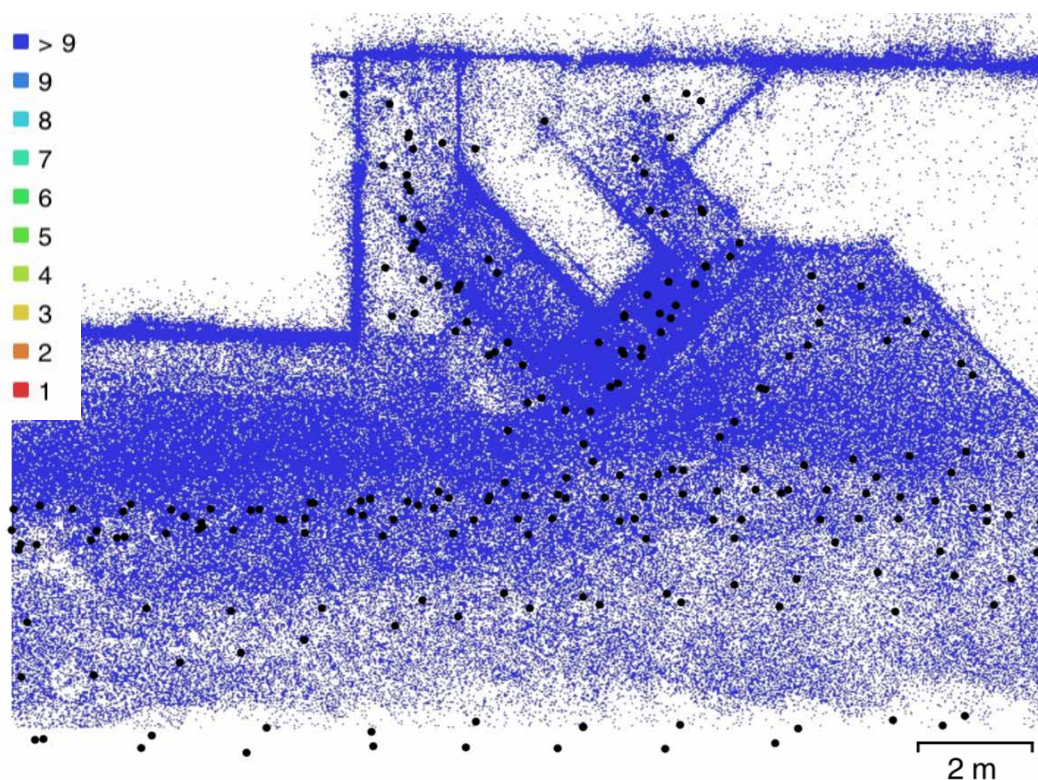


Fig. 106. Posizioni delle prese e *overlap* dell'elaborazione relativa alla *Camera Back*.

E' possibile avere un riscontro grafico dei residui della camera oggetto di calibrazione e della sua matrice di correlazione. Per la realizzare questo tipo di visualizzazione si è scelto di scartare i valori outliers impostando un *cut-off* sugli errori di riproiezione oltre 3,5 pixel (meno del 3%).

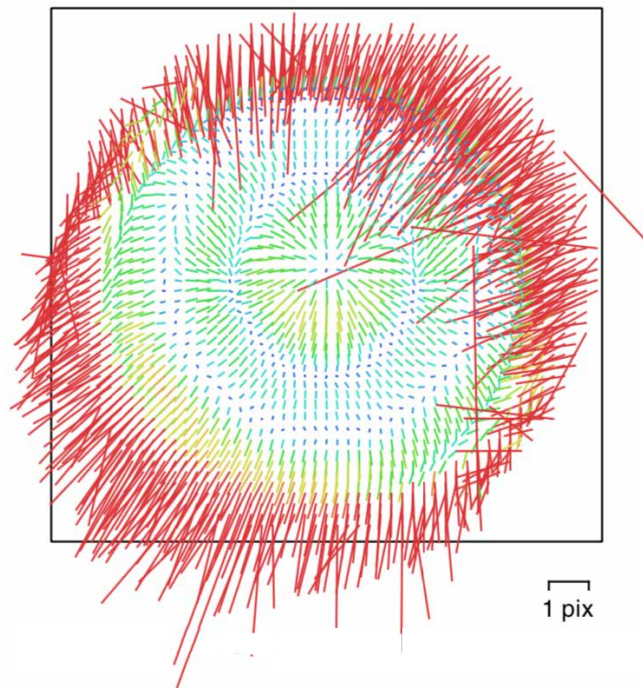


Fig. 107. Visualizzazione grafica dei residui relativa alla *Camera Back*.

Di seguito la matrice di correlazione e i parametri di calibrazione ottenuti dopo la fase di ottimizzazione della precalibrazione iniziale ottenuta tramite *Lens* e i valori di errore relativi.

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2	P3	P4
F	1089.58	0.09	1.00	-0.02	0.01	-0.70	0.00	-0.41	0.34	-0.32	0.32	0.01	-0.01	-0.02	0.01
Cx	-3.25565	0.039		1.00	-0.18	0.02	0.02	0.00	-0.01	0.02	-0.03	0.02	-0.05	0.44	-0.00
Cy	-2.13845	0.029			1.00	-0.02	0.01	0.00	-0.01	0.01	-0.01	-0.00	-0.02	-0.27	0.03
B1	-0.158327	0.071				1.00	-0.00	-0.01	0.03	-0.03	0.03	-0.02	0.02	0.01	-0.02
B2	-0.0377817	0.051					1.00	0.02	-0.03	0.03	-0.03	-0.02	0.01	-0.00	-0.02
K1	-0.0958641	0.00017						1.00	-0.97	0.92	-0.86	0.02	-0.02	0.01	0.02
K2	0.0815877	0.00028							1.00	-0.98	0.95	-0.02	0.02	-0.01	-0.02
K3	-0.0620166	0.00018								1.00	-0.99	0.01	-0.01	0.00	0.01
K4	0.0150767	3.8e-05									1.00	0.00	-0.00	0.00	0.00
P1	-3.09908e-05	9.2e-06										1.00	-1.00	0.55	0.99
P2	4.92361e-05	1.5e-05											1.00	-0.56	-0.99
P3	-0.969738	0.19												1.00	0.46
P4	2.80182	0.71													1.00

Tab. 25. Coefficienti di calibrazione e matrice di correlazione relativa alla *Camera Back*.

2.6.11. Errori nei *Target* e *Control Point Camera Back*

In modo analogo alla *Camera Front* dei sedici *target* di coordinate note è scelto di utilizzarne 11 come *control points* i restanti 5 come *check points* per valutare l'accuratezza della ricostruzione. Nell'immagine 108 si possono osservare la posizione e gli errori stimati. Gli errori sull'asse X e Y sono rappresentati da un ellisse le cui dimensioni sono dipendenti dall'errore, mentre sull'asse Z è rappresentato dal colore utilizzato. La posizione stimata dei *Ground Control Points* è rappresentata da un punto mentre quella dei *Check Points* dalla lettera T.

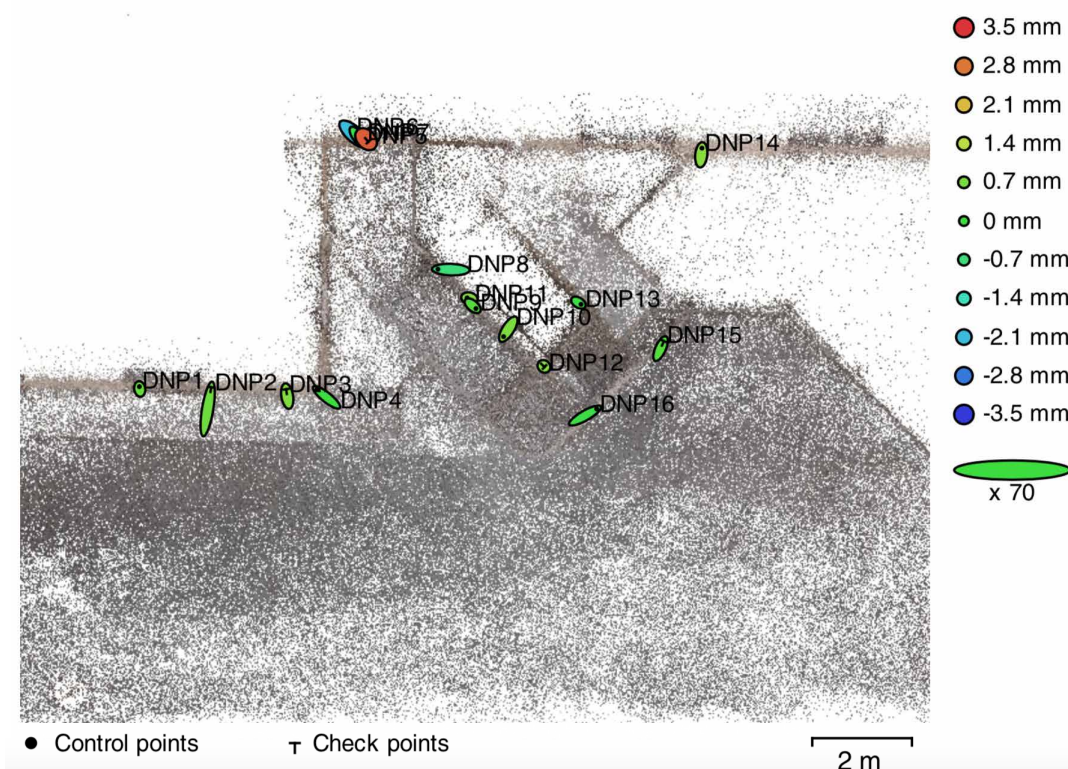


Fig. 108. Posizione stimata dei *Ground Control Points* e dei *Check Points* con visualizzazione grafica degli errori stimati nell'elaborazione dei dati relativi alla *Camera Back*.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
DNP1	-0.210	1.329	0.505	1.437	1.172 (95)
DNP4	-5.502	4.401	-0.001	7.046	5.440 (112)
DNP5	4.554	-4.118	-2.095	6.488	2.153 (87)
DNP6	2.102	-2.961	-0.183	3.636	1.370 (77)
DNP8	-7.394	0.246	-0.721	7.433	4.859 (98)
DNP10	-2.685	-4.236	0.734	5.068	2.782 (109)
DNP11	-1.255	0.307	0.817	1.529	6.347 (103)
DNP13	1.486	-0.968	-0.122	1.778	1.298 (63)
DNP9	1.884	-1.613	0.293	2.498	2.410 (109)
DNP16	6.619	3.787	-0.084	7.626	8.273 (72)
DNP14	0.402	3.824	0.856	3.939	0.752 (103)
Total	3.916	2.977	0.812	4.986	4.070

Tab. 26. Errori stimati in millimetri nei *Ground Control Points* nelle elaborazioni della *Camera Back*.

Label	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	Total (mm)	Image (pix)
DNP7	1.363	-1.459	3.058	3.653	0.987 (76)
DNP12	0.367	-0.350	0.804	0.951	5.280 (101)
DNP15	1.913	4.275	0.287	4.692	2.482 (76)
DNP2	2.059	12.498	0.563	12.679	7.542 (100)
DNP3	-0.658	3.981	0.753	4.105	2.918 (111)
Total	1.437	6.206	1.481	6.540	4.640

Tab. 27. Errori stimati in millimetri nei *Check Points* nelle elaborazioni della *Camera Back*.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
11	3.916	2.977	0.812	4.919	4.986

Tab. 28. Errori stimati totali in millimetri nei *Ground Control Points* nelle elaborazioni della *Camera Back*.

Count	X error (mm)	Y error (mm)	Z error (mm)	XY error (mm)	Total (mm)
5	1.437	6.206	1.481	6.370	6.540

Tab. 29. Errori stimati totali in millimetri nei *Check Points* nelle elaborazioni della *Camera Back*.

Nelle immagini seguenti alcune visualizzazioni dei *tie point* costituenti la nuvola rada.

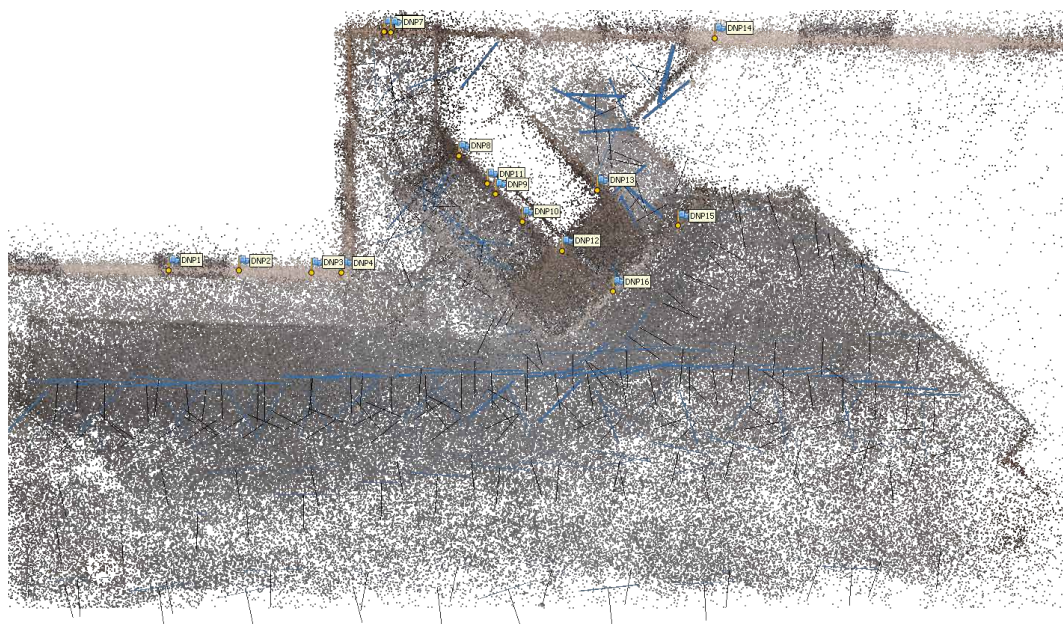


Fig. 109. Visualizzazione dall'alto della *sparse cloud* ottenuta nelle elaborazioni della *Camera Back*.

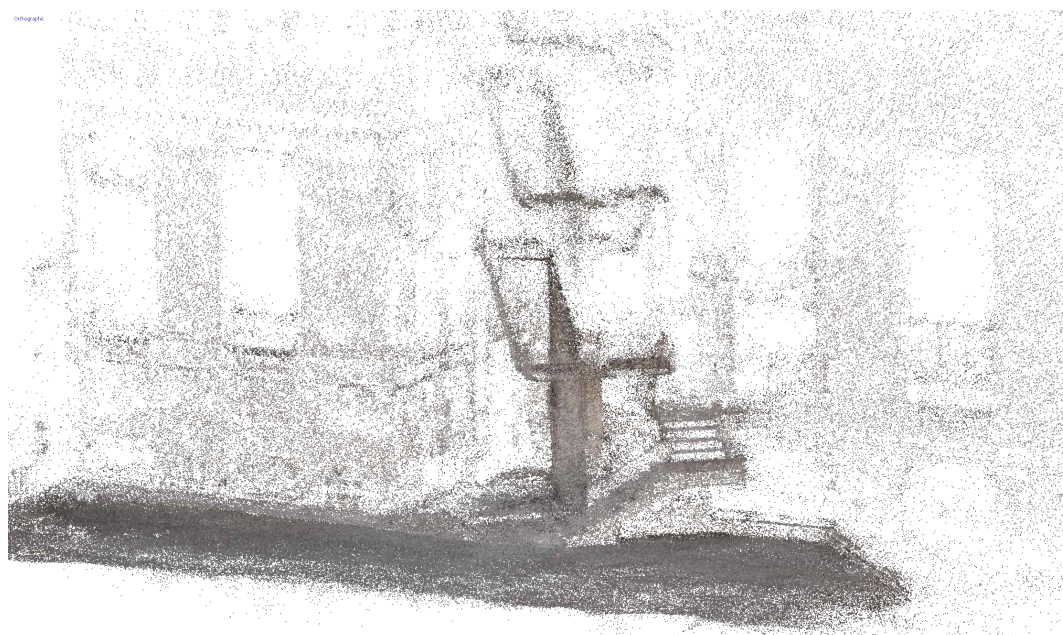


Fig. 110. Visualizzazione assonometrica della *sparse cloud* ottenuta nelle elaborazioni della *Camera Back*.



Fig. 111. Visualizzazione Prospetto della *sparse cloud* ottenuta nelle elaborazioni della *Camera Back*.

2.6.12. Densificazione della nuvola di punti *Camera Back*

Analogamente alla *Camera Front* anche per la *Camera Back* si è proceduto alla densificazione della *sparse cloud*, alla generazione della *mesh* e alla sua texturizzazione e alla generazione dell'ortofoto.



SPARSE CLOUD

DENSE CLOUD

Fig. 112. Confronto tra la *sparse cloud* (a sinistra) e la *dense cloud* (a destra) ottenuta dalle elaborazioni relative alla *Camera Back*.

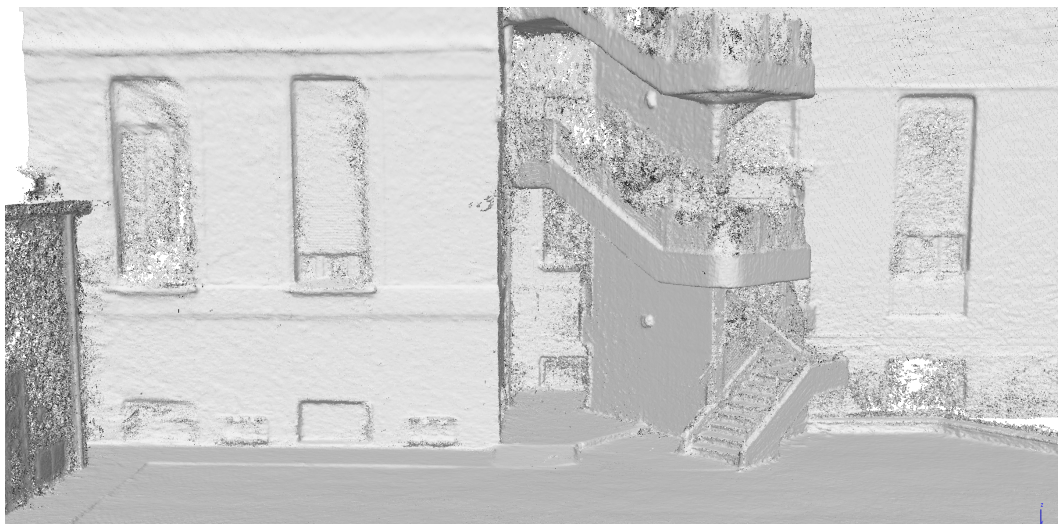


Fig. 113. Visualizzazione nuvola di punti monocromatica relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Back*.

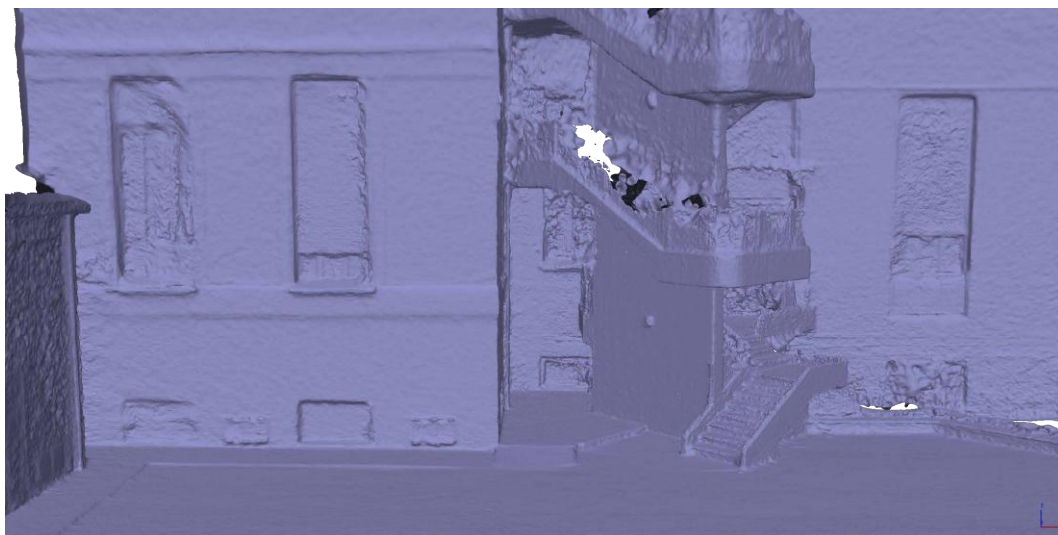


Fig. 114. Visualizzazione della mesh monocromatica relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Back*.



Fig. 115. Visualizzazione dalla mesh texturizzata relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Back*.



Fig. 116. Porzione di ortofoto di ricostruzione eseguita attraverso la *Camera Back*.

2.7. Analisi degli errori di riproiezione

Si è proceduto ad un'analisi degli errori di riproiezione per valutare la robustezza dei punti del modello e vedere in quali aree si presentano gli errori maggiori. A tale scopo è stato adoperato uno *script* che ha permesso la generazione di un file testuale che ha associato alle coordinate dei *tie point* della *sparse cloud* il relativo errore di riproiezione. Successivamente si è provveduto ad analizzare tali risultati al fine di valutare e identificare i valori *outliers*. Di seguito un esempio dei dati ricavati tramite l'esecuzione dello script:

I dati estratti sono organizzati in cinque colonne, rispettivamente: Id, Coordinate X/Y/Z ed errore di riproiezione stimato. A ogni punto corrisponde una riga del file. Come prima operazione si è proceduto ad ordinare i dati sulla base dell'errore di riproiezione relativo. Una volta ordinati i dati è stato

ID	X POSITION	Y POSITION	Z POSITION	REP. ERROR
1	97.207	115.231	99.936	0.139
2	95.868	115.412	99.949	0.412
3	96.686	115.568	99.940	0.155
4	96.668	115.623	99.942	0.257
5	97.533	115.489	99.941	0.816

Tab. 30. Esempio di struttura del file generato tramite *script* che mette in relazione per ogni punto le sue coordinate e l'errore di riproiezione stimato.

possibile identificare facilmente i punti con un errore eccessivo e valutarne la numerosità e la posizione.

Si è proceduto al calcolo delle percentuali dei punti sotto una certa soglia di errore scelta arbitrariamente. Ciò ha permesso di effettuare una valutazione più approfondita sulla distribuzione degli errori.

Per calcolare la distribuzione normale degli errori si è scelto di considerare solamente i punti al di sotto di un errore di un valore di 1 px. Per fare questo si è proceduto al calcolo della media e della deviazione standard relativo a tali dati. La tabella mostra inoltre la percentuale di punti al variare del valore di *threshold* scelto. Osservando le curve di distribuzione e le percentuali relative ai valori soglia determinati possiamo definire accurata la calibrazione effettuata. In media su entrambe le camere i *tie point* con un errore inferiore ad 1 pixel sono l'88,64% mentre risultano del 98,26% se il valore limite è imposto a 2 pixel. Se, invece consideriamo 5 pixel come valore soglia allora otteniamo che la quasi totalità dei punti ricadono al di sotto di questa valore (nello specifico il 99,87%), i punti restanti 0,13% sulla media delle acquisizioni sono considerabili *outliers* e sono scartabili all'interno delle elaborazioni successive.

Per ottenere un riscontro grafico su quanto riportato si è proceduto ad importare i dati su programmi che permettessero di visualizzare le nuvole di punti generate assegnando una scala di colore RGB ai valori relativi agli errori di riproiezione stimati. Per ottenere tale obiettivo sono stati utilizzati due programmi differenti nello specifico la soluzione *open source Cloud Compare* e *Hexagon 3D Reshaper* entrambi con la medesima finalità. Si riportano per semplicità solamente le analisi eseguite con *Hexagon 3D Reshaper* in quanto permettono una più semplice interpretazione dei risultati.

Prima di procedere con l'importazione dei dati si è proceduto a ordinare la classificazione dei punti sulla base degli errori di riproiezione e successi-

REPROJECTION ERROR		
% POINTS BELOW	CAMERA FRONT	CAMERA BACK
0.5 PX	77.22%	48.70%
1 PX	95.55%	81.73%
2 PX	99.30%	97.21%
5 PX	99.92%	99.81%

Tab. 31. Percentuali punti per soglie di errori di riproiezione stimati sulle due camere oggetto di calibrazione

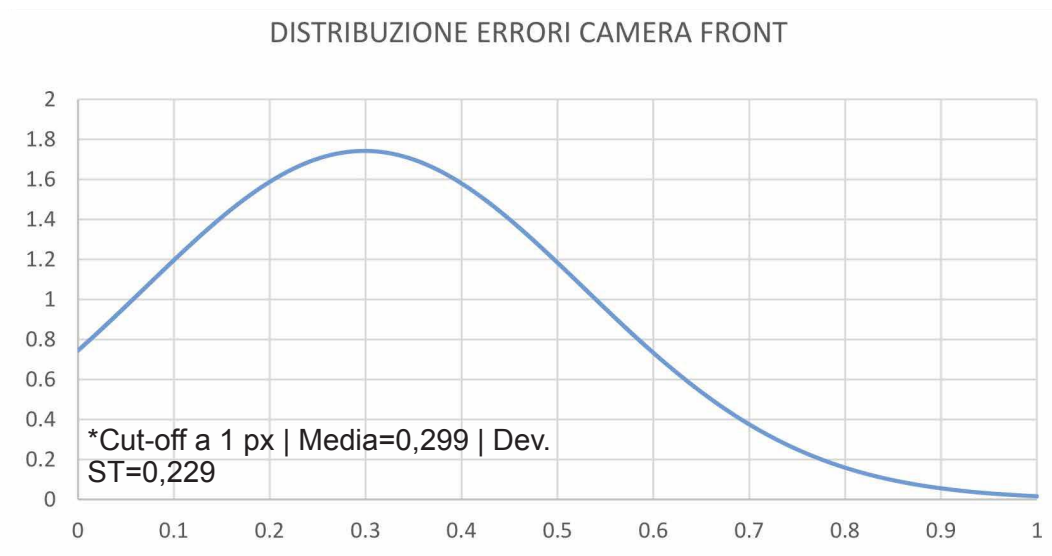


Fig. 117. Distribuzione degli errori di riproiezione nella *Camera Front*.

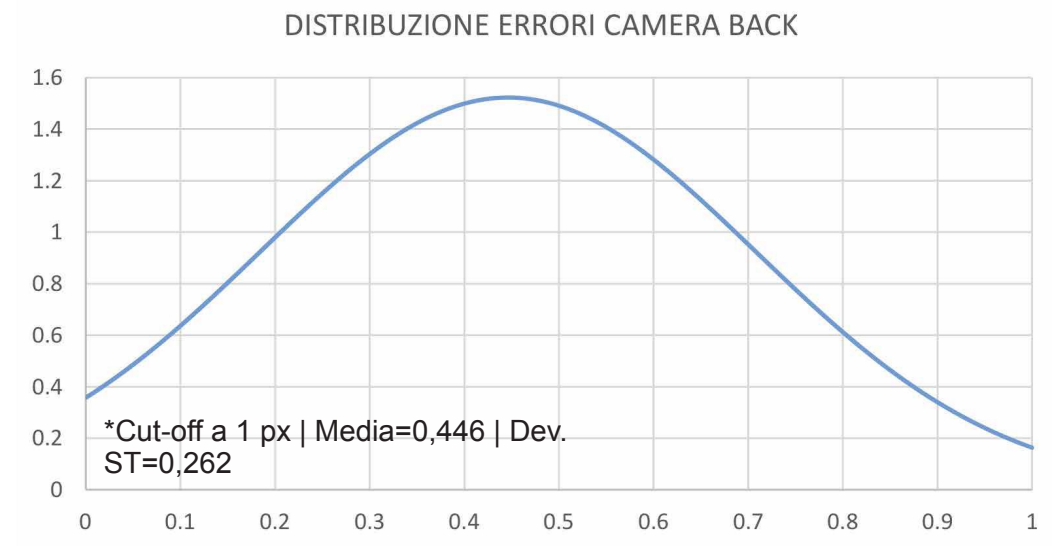


Fig. 118. Distribuzione degli errori di riproiezione nella *Camera Back*.

vamente creando più versioni differenti per valori soglia impostati. I punti sopra il valore soglia fissato sono stati eliminati così da permettere una visualizzazione degli errori del range selezionato eliminando di fatto i valori non rilevanti per l'analisi che non avrebbero permesso di valutare graficamente i risultati.

Le analisi presentate sono state realizzate per entrambe le camere (prendendo in considerazione i *tie point* generati a partire dai migliori valori di calibrazione ottenuti) abbassando progressivamente il valore di soglia partendo da un valore di 10 pixel che ha permesso di avere un riscontro immediato delle aree maggiormente affette da errori di riproiezione per poi scendere progressivamente a 2 pixel e 1 pixel come valori di *threshold*.

Abbassando progressivamente il valore soglia e concentrando le analisi sulle aree di maggiore interesse si può osservare la variazione dell'errore di riproiezione stimato nel range prestabilito.

La medesima analisi è stata replicata sulla *Camera Front*. I risultati ottenuti dai due modelli di calibrazione sono apparsi confrontabili presentando valori e distribuzione degli errori di riproiezione stimati simili.

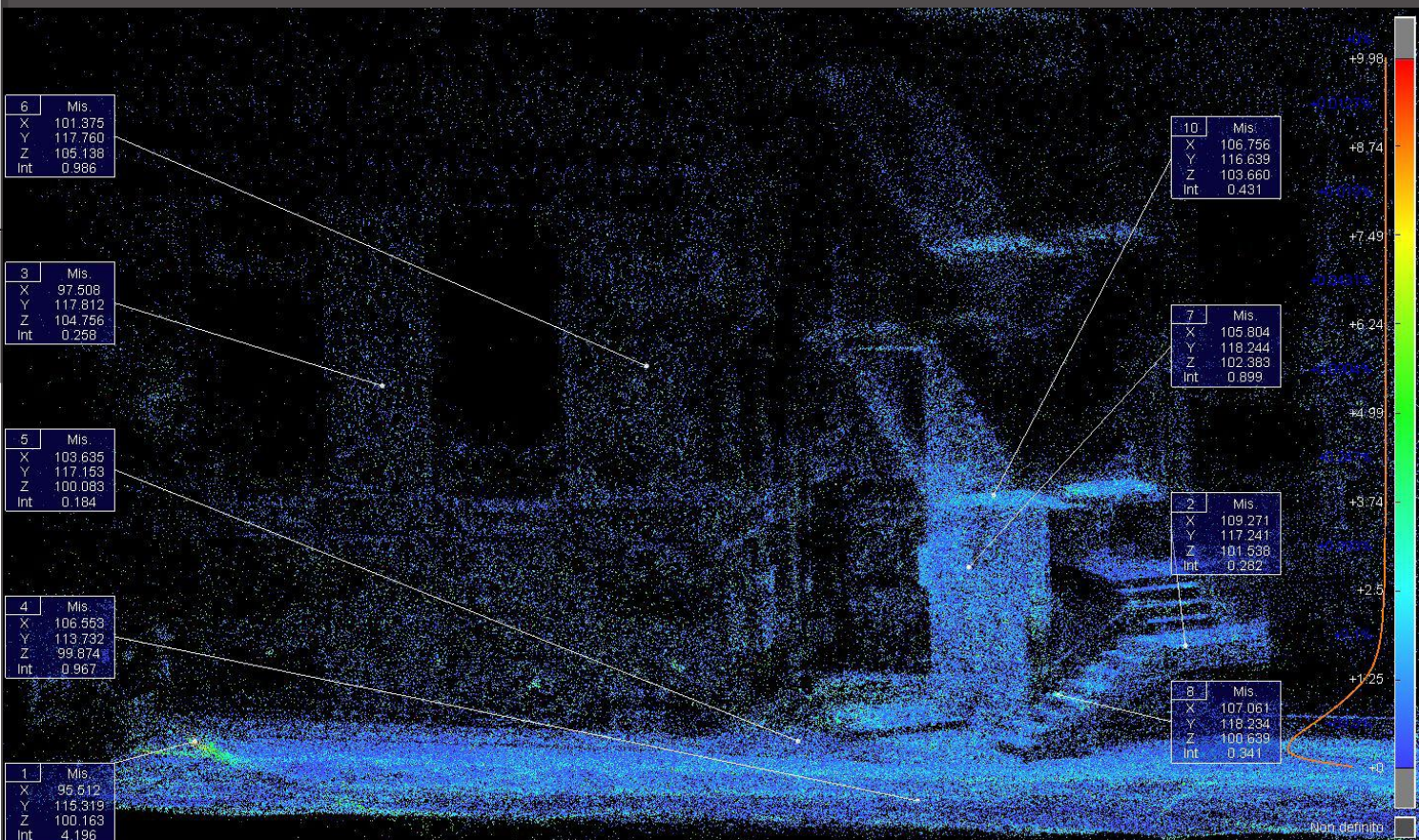


Fig. 120. Visualizzazione intensità degli errori di riproiezione relativi alla Camera Back con un valore di *threshold* di 10 pixel.



Fig. 119. Visualizzazione intensità degli errori di riproiezione relativi alla Camera Back con un valore di *threshold* di 1 pixel.

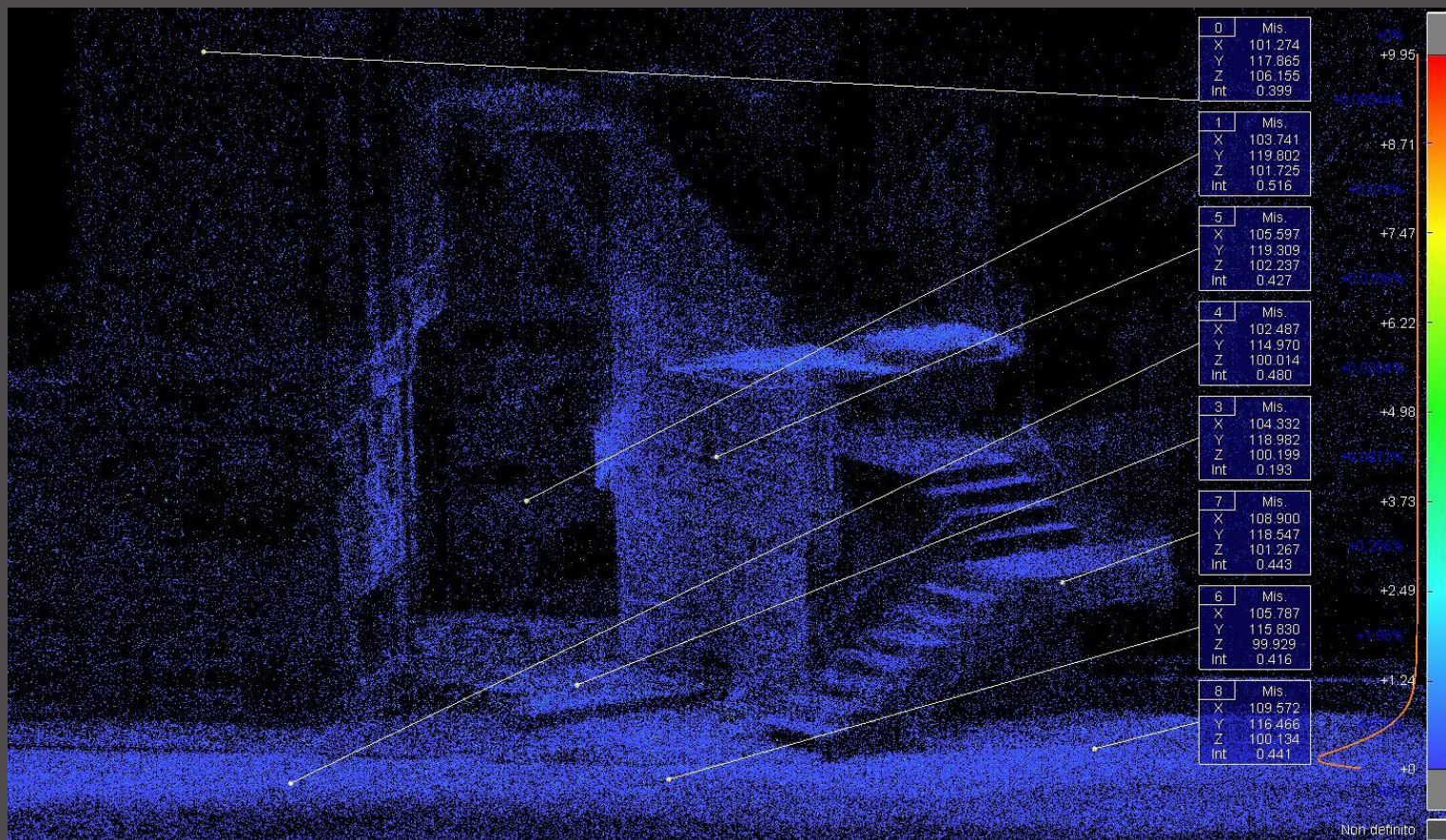


Fig. 122. Visualizzazione intensità degli errori di riproiezione relativi alla *Camera Front* con un valore di *threshold* di 10 pixel.



Fig. 121. Visualizzazione intensità degli errori di riproiezione relativi alla *Camera Front* con un valore di *threshold* di 1 pixel.

2.8. Acquisizioni *laser scanner* e confronto dei dati

Per effettuare una valutazione di confronto dei risultati ottenuti sono state realizzate acquisizioni *laser scanner* dell'area oggetto di test al fine di utilizzarle come strumento di riferimento per le analisi. In particolare dopo la fase di acquisizione e registrazione delle scansioni sono state svolte analisi di distanza tra i punti rispetto alle nuvole generate tramite fotogrammetria. In tal modo è stato possibile valutare, utilizzando i dati *laser* come riferimento, le aree ricostruite in modo più impreciso. Per raggiungere questi obiettivi si illustra nei paragrafi successivi le fasi svolte.

2.8.1. Acquisizione dati

Per le acquisizioni è stato utilizzato il *laser scanner* terrestre *FARO Focus3d x 30* attraverso il quale sono state realizzate quattro scansioni dalle seguenti posizioni sul poligono di calibrazione:



Fig. 123. Posizione delle scansioni *laser scanner* terrestre eseguite tramite *FARO Focus3d x330* sull'area di test.

2.8.2. Registrazione delle scansioni per forma

Per la fase di registrazione delle scansioni si è utilizzato il *software FARO Scene v. 7.1.0.12*. Le scansioni sono state importate nel software e si è proceduto alla loro registrazione eseguendo prima una registrazione per forma e successivamente tramite i *target*. Questa prima fase è servita per effettuare un primo allineamento tra le scansioni tramite un'analisi automatica delle loro geometrie andando a sovrapporre le aree di *overlap* tra le

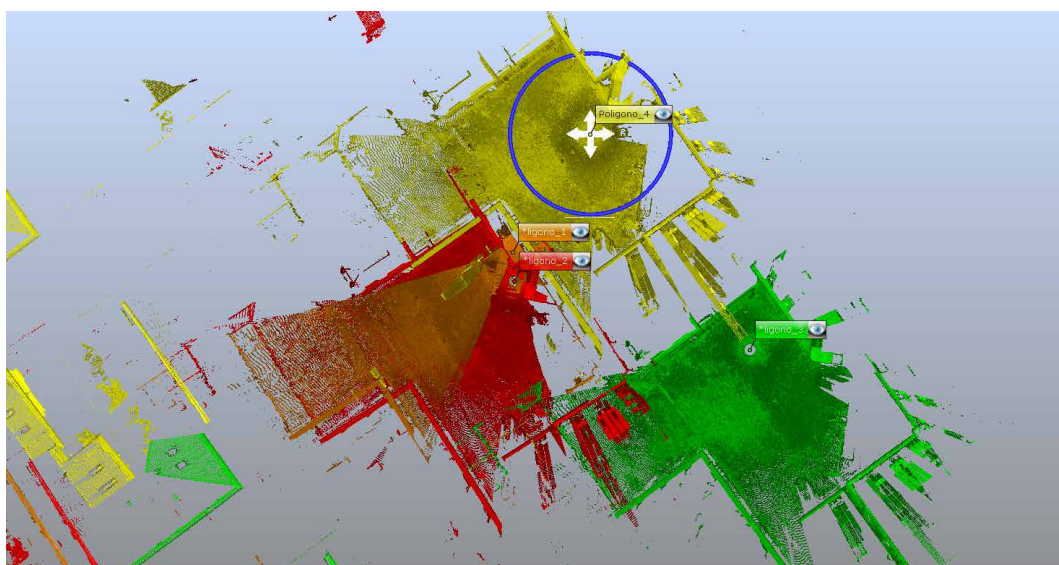


Fig. 124. Vista dall'alto delle corrispondenze tra le scansioni per la registrazione per forma.

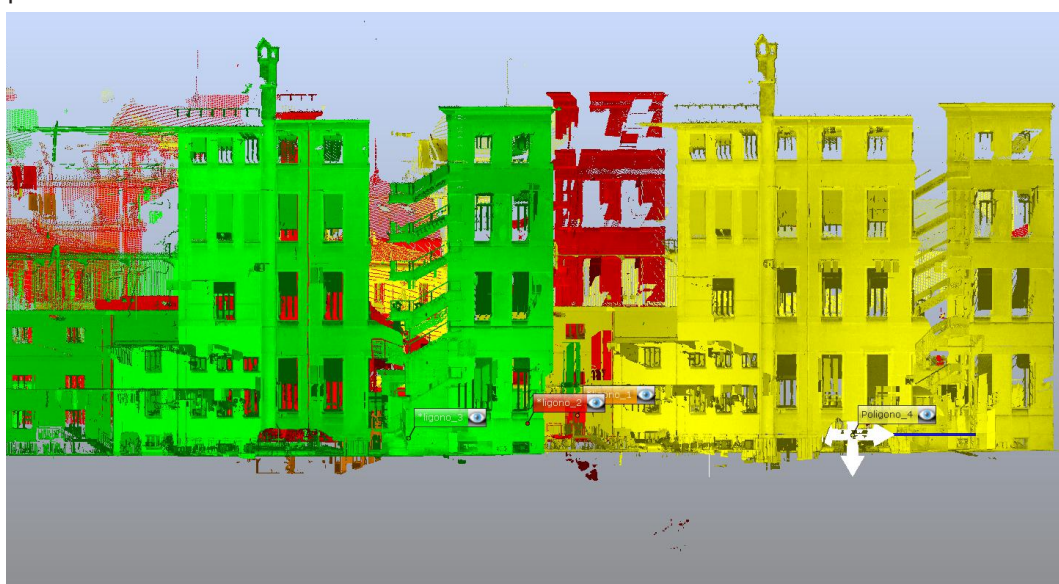


Fig. 125. Vista laterale delle corrispondenze tra le scansioni per la registrazione per forma.

differenti scansioni. A tale scopo le scansioni sono state prima sovrapposte manualmente secondo le viste frontali e laterali in modo da agevolare il software nella fase di confronto tra le geometrie. L'algoritmo infatti richiede di settare una distanza di ricerca e il sottocampionamento, pertanto, esegui-

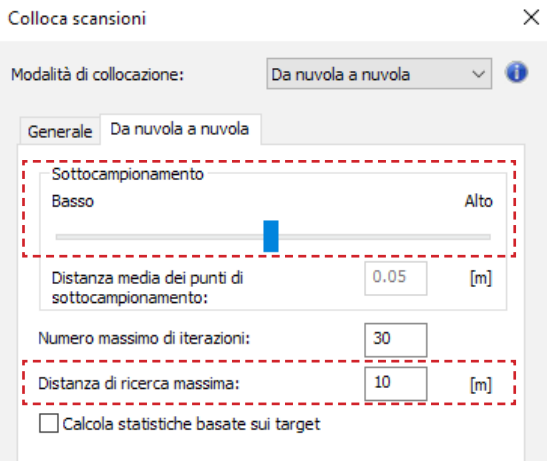


Fig. 126. Settaggi utilizzati nella prima fase del processo di registrazione per forma delle scansioni laser scanner terrestri.

sima di ricerca come visibili nella fig. 126 e una seconda volta intervenendo su questi ultimi abbassando i valori di campionamento e la distanza di ricerca. Successivamente si è proceduto a controllare i risultati relativi agli errori di distanza punti medi di scansione per ogni posizione acquisita.

Oggetto ottimizzato	Errore dist punto medio di scansione [mm]	Scansione/Gruppo
ScanFit	0.87	Varoni_Scan_022
ScanFit	1.08	Varoni_Scan_024
ScanFit	1.27	Varoni_Scan_023
ScanFit	1.44	Varoni_Scan_021

Fig. 127. Riepilogo errore distanza punto medio di scansione in mm per ogni posizione acquisita.

Statistiche complessive	
Medio:	1.1644 [mm]
< 4 mm:	82.0 [%]

Fig. 128. Statistiche di riepilogo errore distanza punto medio di scansione in mm complessivo

Gruppo/Scansione 1	Gruppo/Scansione 2	Medio [mm]	< 4 mm [%]	Sovrapposizione [%]	Punti utilizzati
Varoni_Scan_023	Varoni_Scan_021	2.069	70.7	30.1	20301
Varoni_Scan_024	Varoni_Scan_021	1.335	79.7	26.8	23300
Varoni_Scan_024	Varoni_Scan_023	0.971	86.4	82.5	62173
Varoni_Scan_024	Varoni_Scan_022	0.93	86.2	72.0	56034
Varoni_Scan_022	Varoni_Scan_021	0.903	82.5	34.6	23466

Fig. 129. Analisi dell'errore, della sovrapposizione e dei punti utilizzati tra le singole scansioni nella fase di allineamento per forma.

re un allineamento di massima manuale semplifica e migliora i risultati di calcolo dal momento che pone le scansioni vicine tra loro.

Il processo di registrazione per forma è stato eseguito due volte al fine di migliorare i risultati: una prima volta utilizzando i valori di sottocampionamento e distanza mas-

Successivamente dopo avere ottenuto risultati soddisfacenti di tensioni nei target si è proceduto a bloccare i risultati in modo da procedere in modo più efficiente nella fase di registrazione con target (illustrata nel paragrafo seguente) eseguita successivamente all'allineamento per geometria.

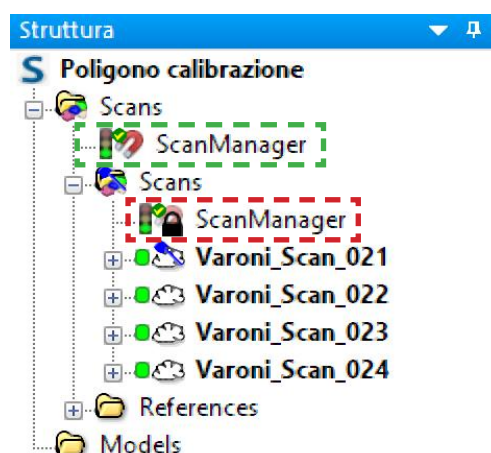


Fig. 130. Struttura del progetto e blocco dei risultati relativi alla registrazione per forma (in rosso) e predisposizione di una nuova procedura di registrazione (in verde).

2.8.3. Registrazione delle scansioni per target

Al fine di portare le scansioni nello stesso sistema di riferimento locale delle acquisizioni fotogrammetriche illustrati nei sottocapitoli precedenti si è proceduto al posizionamento dei 16 *target* di coordinate note sulle quattro scansioni utilizzando la visualizzazione piana delle scansioni e collimando i punti manualmente. Per questa fase le scansioni sono state colorate per semplificare il riconoscimento manuale dei *target*.

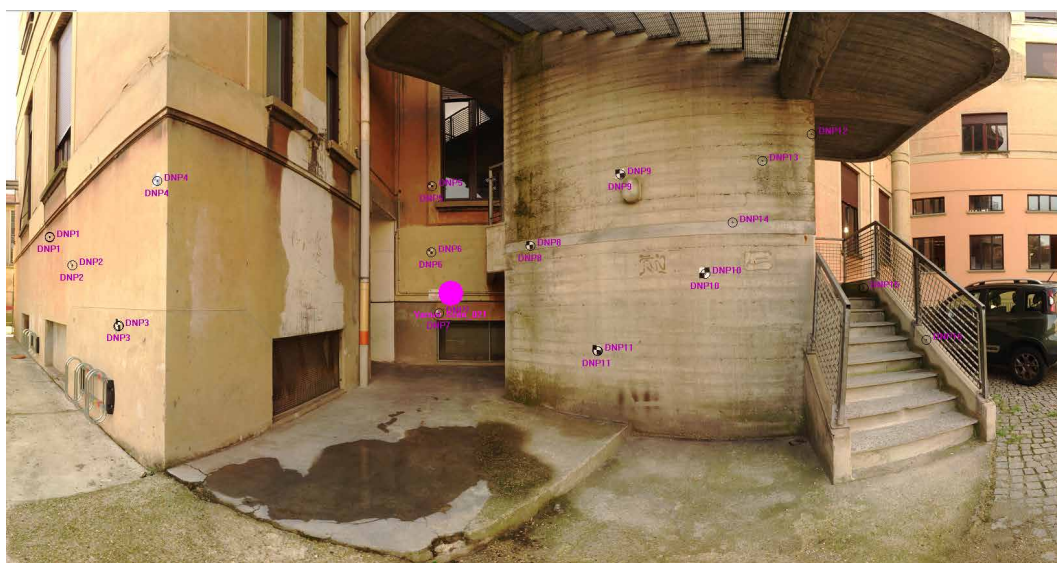


Fig. 131. Posizionamento dei target sulla visualizzazione piana di una delle scansioni laser scanner terrestri.

Il posizionamento dei target ha permesso di effettuare il processo di rototraslazione per riportare la nuvola lidar nello stesso sistema di riferimento locale delle nuvole di punti ricavate tramite fotogrammetria. In fig. 133 i risultati in termini di tensione nei *target* espresse in millimetri. La media degli errori di distanza è di 2.16 mm mentre gli errori angolari medi sono di 0.002°.

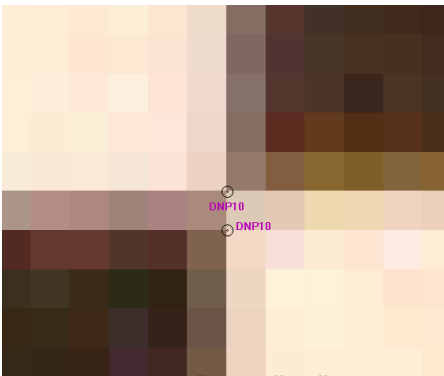


Fig. 132. Dettaglio di un target dopo la procedura di registrazione. Si può osservare la presenza di due punti che rappresentano il punto posizionato su una scansione tramite la visualizzazione piana e il suo spostamento dopo il processo di registrazione sulla base degli altri target sulle altre scansioni.

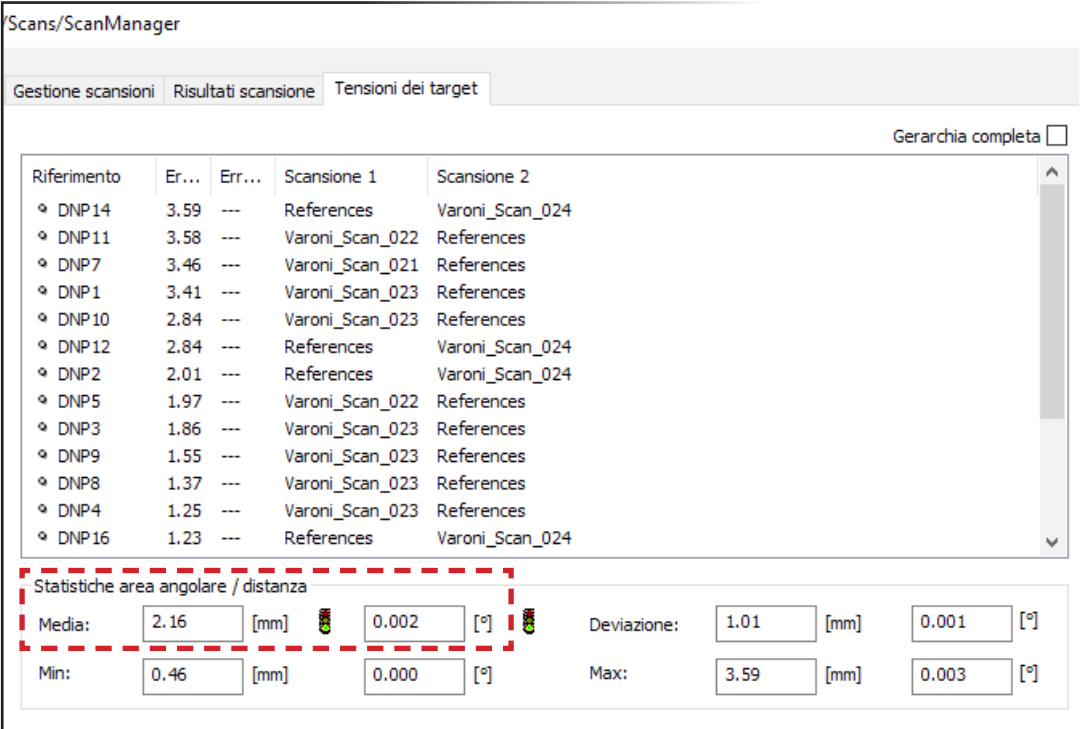


Fig. 133. Risultati delle tensioni nei target a seguito della registrazione delle scansioni laser scanner tramite *target*.

2.9. Comparazione nuvole di punti da *fotogrammetria fisheye* e *lidar*

A seguito dei processi esposti è stato possibile effettuare confronti tra i risultati ottenuti tramite le due tecniche. Essendo i dati nello stesso sistema di riferimento, infatti, si è potuto effettuare analisi sulla distanze tra i punti e controlli sull'accuratezza delle geometrie ricostruite analizzando le potenzialità della tecnica proposta oggetto di questo studio. Per effettuare queste analisi sono stati utilizzati i dati ottenuti tramite laser scanner come riferimento in quanto di precisione maggiore come chiaramente osservabile dai risultati di tensione media dei *target* esposti nella fig. 133.

Nello specifico sono state svolte tre differenti analisi mirate a valutare quali aree ricostruite tramite fotogrammetria si discostassero maggiormente dalla nuvola ottenuta tramite laser scanner utilizzata come riferimento. Nello specifico:

1. Analisi della parete;
2. Analisi dell'area del sottoscala;
3. Analisi ricostruzione della prima rampa delle scale.

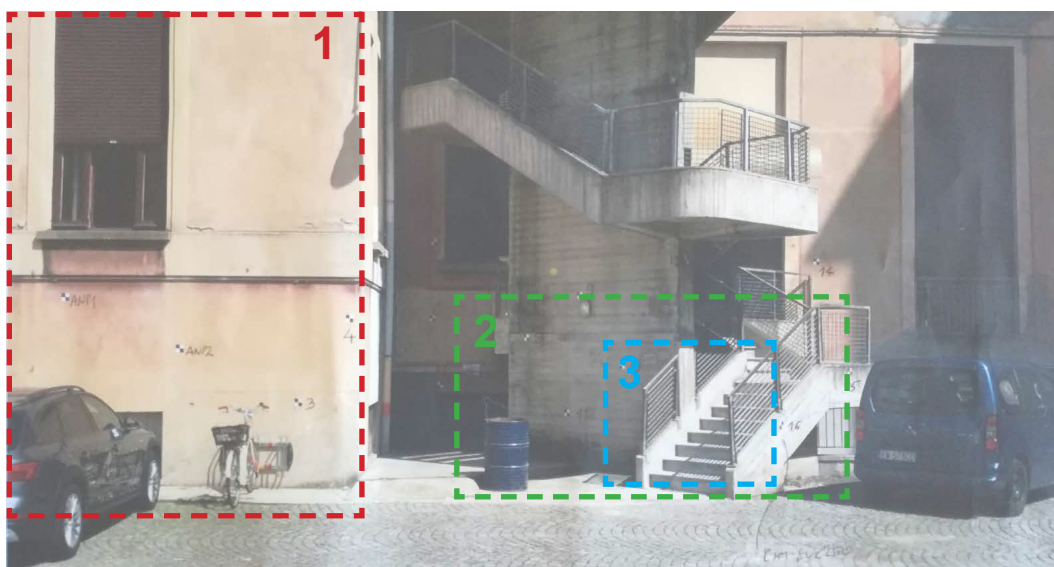


Fig. 134. Identificazione delle aree analizzate tramite comparazione delle distanze dei punti tra le nuvole ottenute tramite *lidar* e quelle ricavate dalle immagini *fisheye* a seguito della calibrazione delle camere e del processo di ricostruzione fotogrammetrica.

2.9.1. Analisi della parete: valutazione della distanza tra i punti

Di seguito si espongono i risultati relativi alle analisi fatte sulla parete verticale dell'area di test. Si è scelto di eseguire questa analisi per valutare la rumorosità della ricostruzione *Structure From Motion* nella porzione della parete. Per eseguire tale analisi le nuvole di punti sono state segmentate eliminando le parti superflue come gli sfondati delle finestre non ritenuti rilevanti per l'analisi. Quest'analisi come tutte le altre è stata ripetuta due volte ovvero utilizzando in un primo momento la nuvola ottenuta dai dati della *Camera Front* e successivamente della *Camera Back*.

Gauss: mean = 0.006691 / std.dev. = 0.007792 [1826 classes]

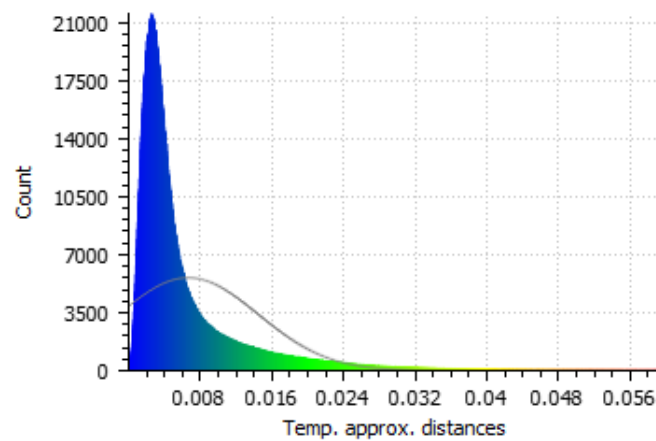


Fig. 135. Gaussianiana dei risultati della comparazione della distanza tra i punti della nuvola di punti *Lidar* (reference) e la nuvola di punti *SFM* della *Camera Front*.

Gauss: mean = 0.008378 / std.dev. = 0.008654 [1950 classes]

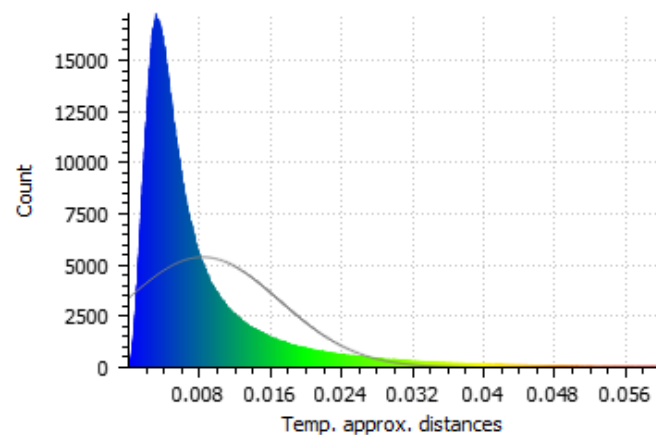


Fig. 136. Gaussianiana dei risultati della comparazione della distanza tra i punti della nuvola di punti *Lidar* (reference) e la nuvola di punti *SFM* della *Camera Back*.

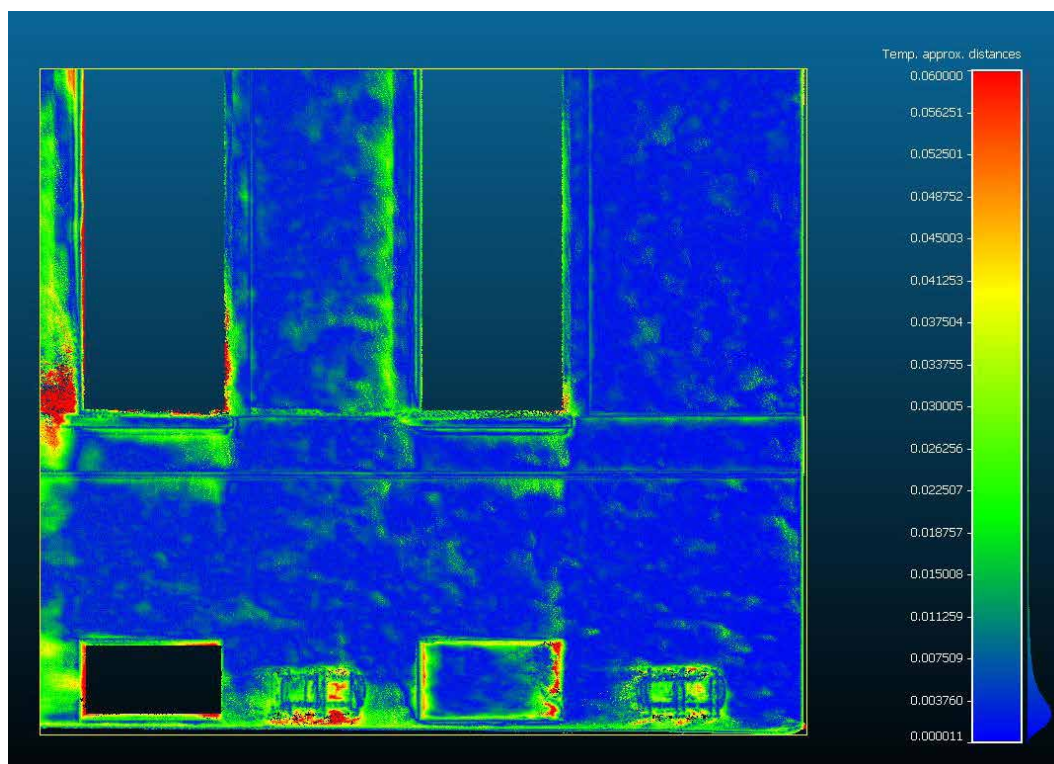


Fig. 137. Analisi visuale della distanza tra la nuvola di punti *Lidar (reference)* e la nuvola di punti fotogrammetrica della *Camera Front*.

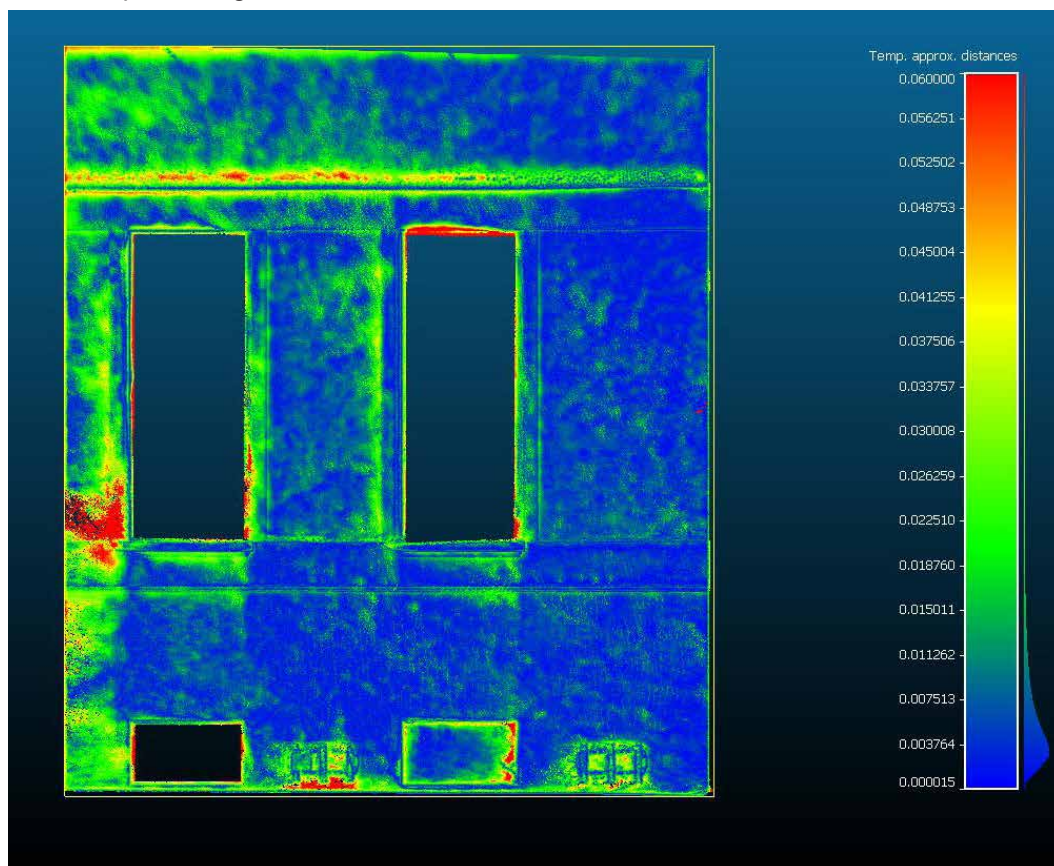


Fig. 138. Analisi visuale della distanza tra la nuvola di punti *Lidar (reference)* e la nuvola di punti fotogrammetrica della *Camera Back*.

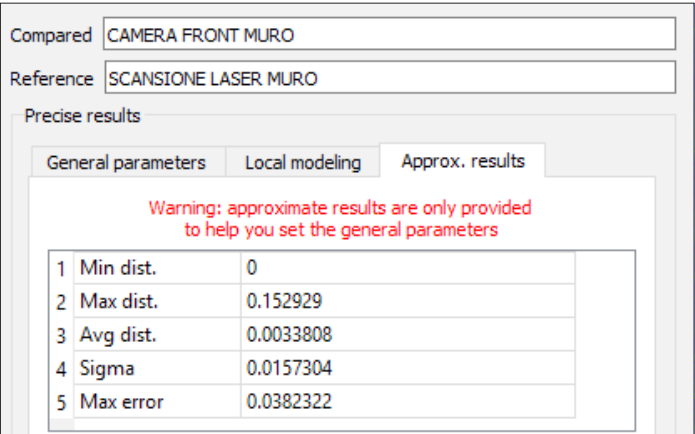


Fig. 139. Risultati della comparazione tra nuvola lida e nuvola fotogrammetrica relativa alla *Camera Front*.

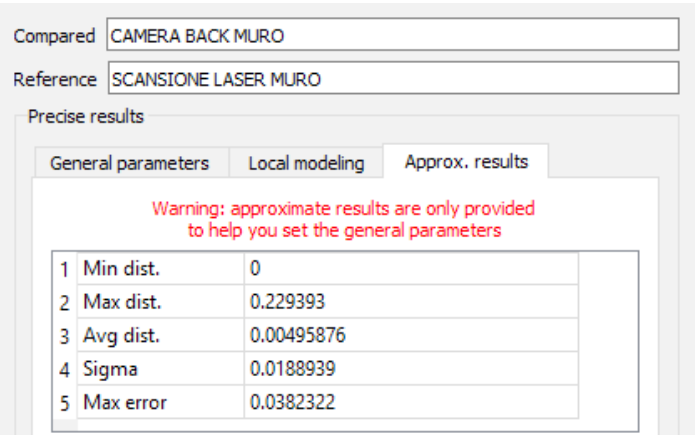


Fig. 140. Risultati della comparazione tra nuvola lida e nuvola fotogrammetrica relativa alla *Camera Back*.

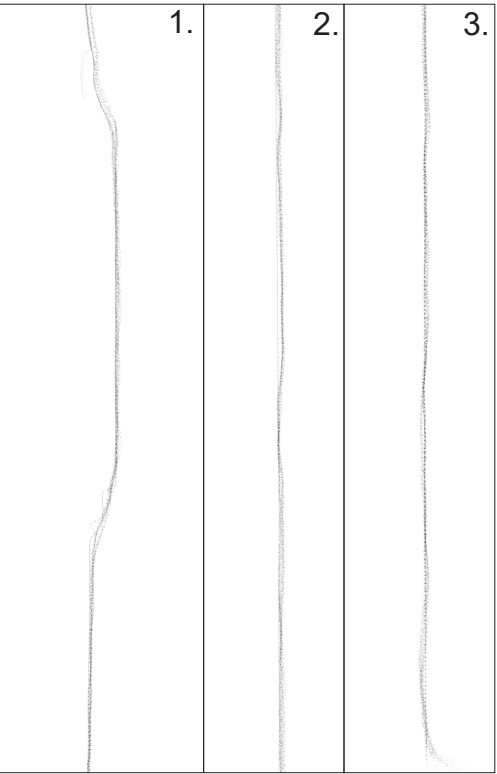


Fig. 141. Alcuni tratti della parete in sezione realizzati con le tre nuvole di punti sovrapposte: *lidar*, *SFM Camera Front/Back*.

Dall’analisi appare chiaro che i risultati ottenuti dalle comparazioni sono paragonabili tra le due camere e le ricostruzioni risultano attendibili presentando una media tra le due ricostruzioni del 94.23% di punti che presentano una distanza inferiore ai 0.024 metri e il 70,46% inferiore agli 0,008 metri. Ulteriori conferme si possono trovare osservando i valori di media

di distanza approssimata rispettivamente 0.003 m e 0,004 m. Sono state prodotte, inoltre, sezioni eseguite sulla muratura per valutare la qualità della geometria ricostruita e l’uniformità del profilo. Nella fig.141 tre tratti di parete con le tre nuvole di punti attive. Si può osservare l’assenza di variazioni significative se non per l’area della fascia (caso 1) ricostruita con mino-

re precisione nelle nuvole ottenute tramite fotogrammetria per entrambe le tipologie di camera mentre i profili degli spigoli appaiono meglio ricostruiti nella nuvola *lidar*.

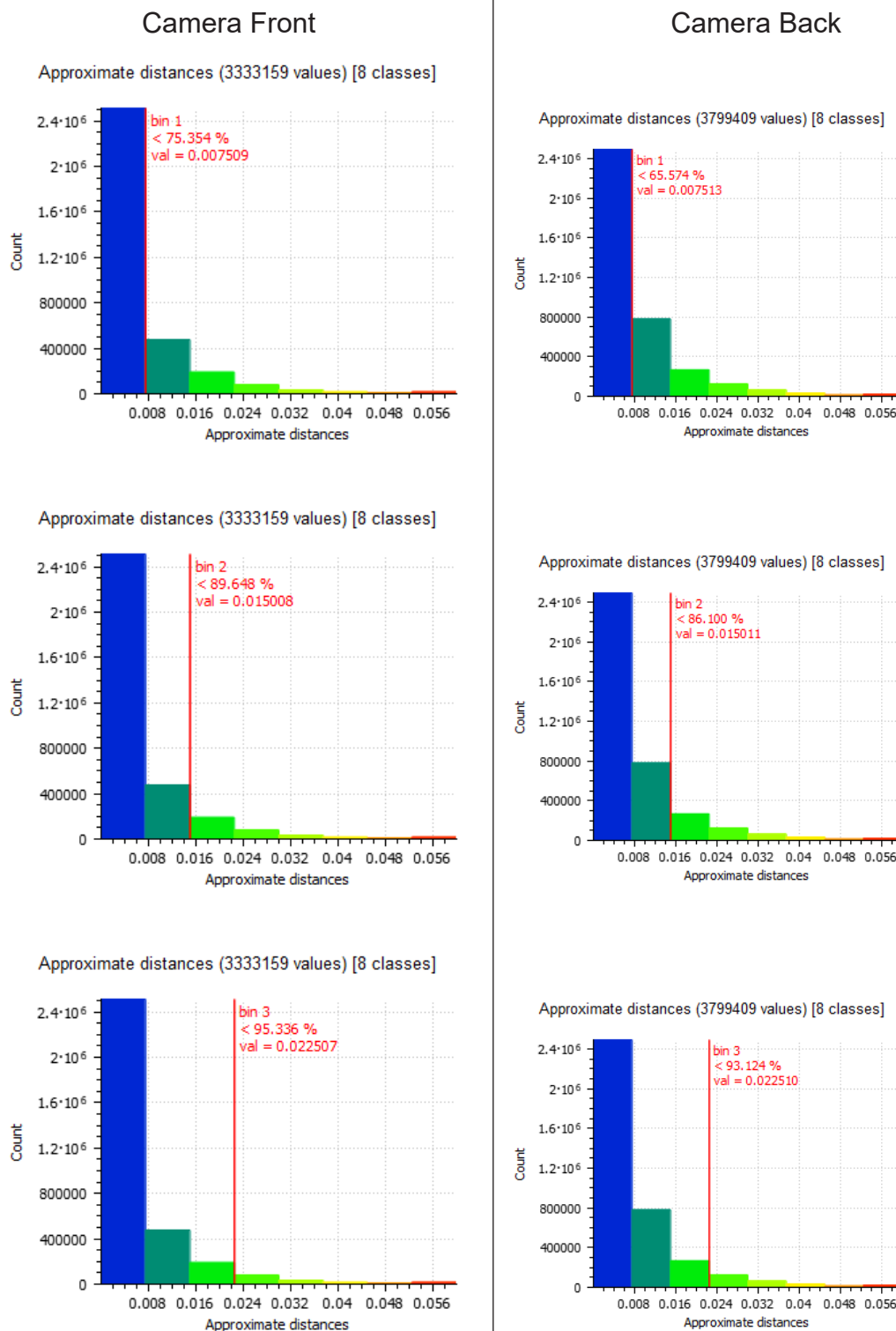


Fig. 142. Istogrammi che mostrano il numero di punti in funzione della distanza approssimata tra nuvola *lidar* (*reference*) e nuvola ottenuta tramite *Structure From Motion* (*compared*) relativa alla *Camera Front* sulla sinistra e alla *Camera Back* a destra.

Osservando le figure 137 e 138 si nota inoltre che le aree che presentano una distanza maggiore rispetto alla nuvola *lidar* (identificate in colore rosso) sono dislocate nelle stesse aree. Questo è dovuto con ogni probabilità alla mancanza di overlap tra le immagini per quelle zone.

2.9.2. Analisi del sottoscala: valutazione distanza tra i punti

Come seconda area di analisi si è scelta l'area del sottoscala per via delle sue geometrie più complesse da ricostruire. Anche per quest'area i risultati tra le due comparazioni sono state molto simili. Nuovamente si può osser-

Gauss: mean = 0.006691 / std.dev. = 0.007792 [1826 classes]

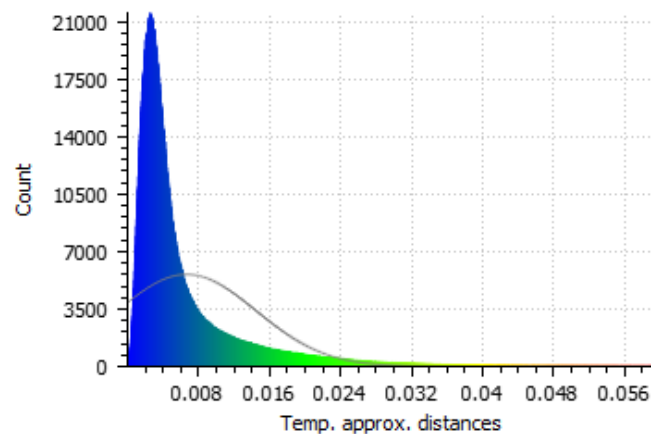


Fig. 143. Gaussiana dei risultati della comparazione della distanza tra i punti della nuvola di punti *Lidar* (*reference*) e la nuvola di punti *SFM* della *Camera Front* per l'area del sottoscala.

Gauss: mean = 0.004855 / std.dev. = 0.005641 [1147 classes]

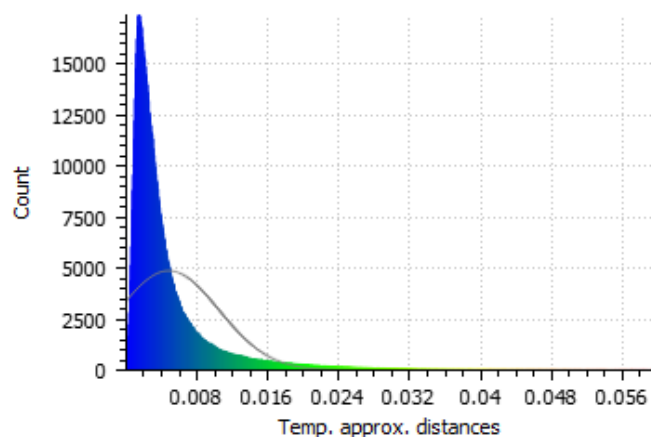


Fig. 144. Gaussiana dei risultati della comparazione della distanza tra i punti della nuvola di punti *Lidar* (*reference*) e la nuvola di punti *SFM* della *Camera Back* per l'area del sottoscala.

vare dalle analisi visuali che le zone che presentano distanze maggiori, si presentano nei medesimi punti del modello in particolare nella porzione delle alzate dei gradini per le quali l'altezza di acquisizione non aveva per una copertura sufficiente di queste zone.

Nuovamente troviamo risultati simili se analizziamo gli istogrammi e il

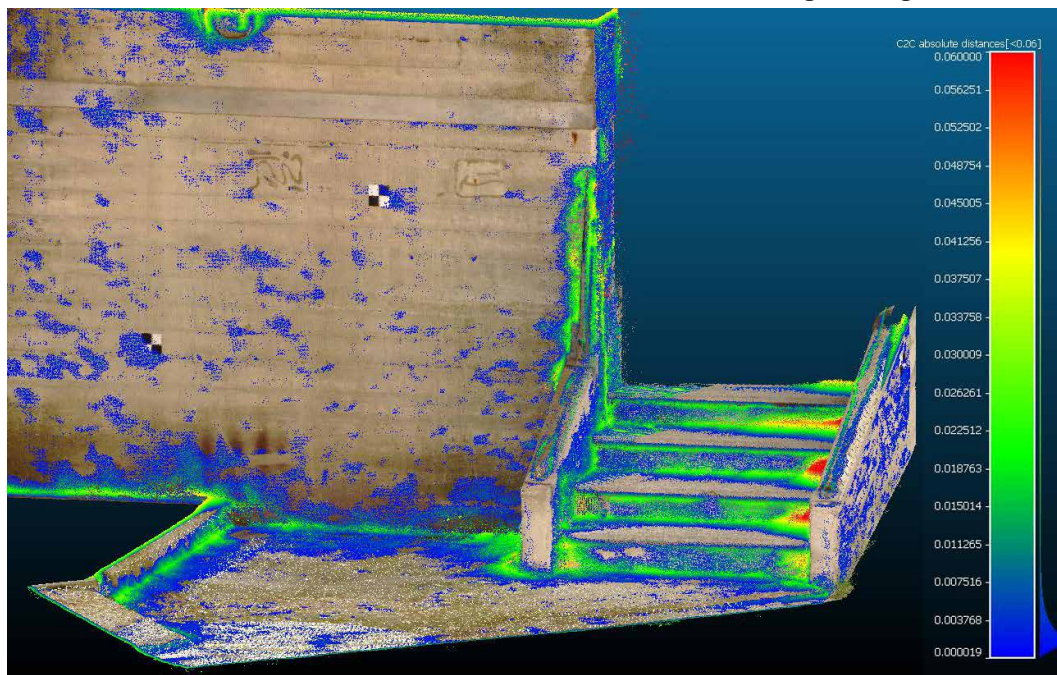


Fig. 145. Analisi visuale della distanza tra la nuvola di punti *lidar* (*reference*) e la nuvola di punti fotogrammetrica della *Camera Front*.

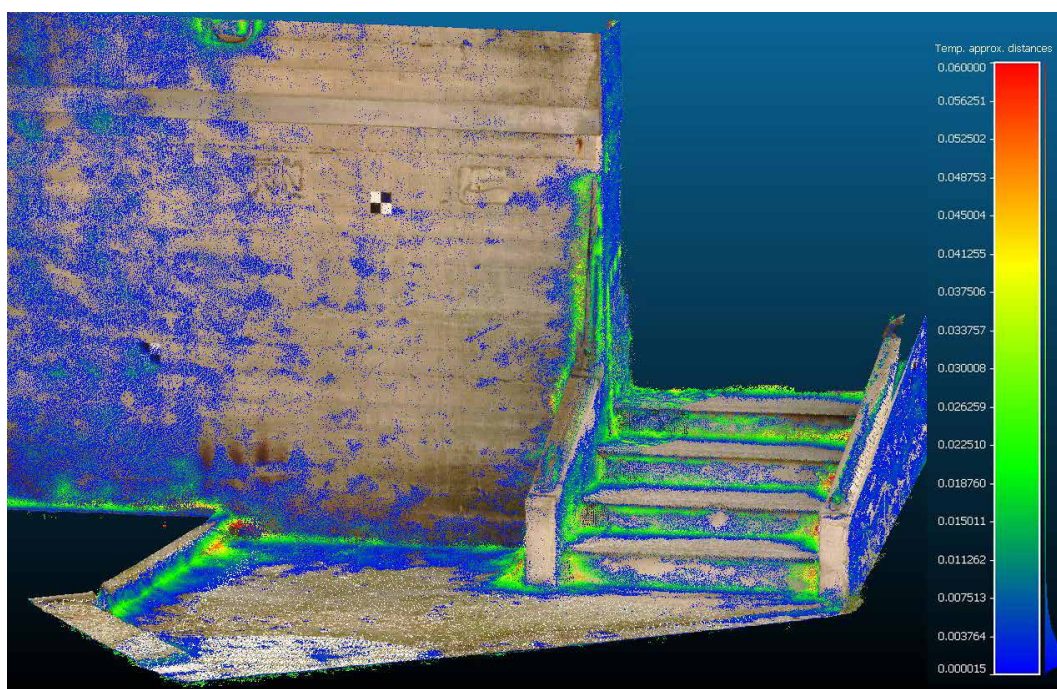


Fig. 146. Analisi visuale della distanza tra la nuvola di punti *lidar* (*reference*) e la nuvola di punti fotogrammetrica della *Camera Back*.

Compared	CAMERA FRONT MURO
Reference	SCANSIONE LASER MURO
Precise results	
General parameters Local modeling Approx. results	
Warning: approximate results are only provided to help you set the general parameters	
1 Min dist.	0
2 Max dist.	0.152929
3 Avg dist.	0.0033808
4 Sigma	0.0157304
5 Max error	0.0382322

Fig. 147. Risultati della comparazione tra nuvola *lidar* e nuvola *SFM* relativa alla *Camera Front*.

Compared	CAMERA BACK SCALA
Reference	SCANSIONE LASER SCALA
Precise results	
General parameters Local modeling Approx. results	
Warning: approximate results are only provided to help you set the general parameters	
1 Min dist.	0
2 Max dist.	0.562161
3 Avg dist.	0.0017352
4 Sigma	0.00783929
5 Max error	0.0177771

Fig. 148. Risultati della comparazione tra nuvola *lidar* e nuvola *SFM* relativa alla *Camera Back*.

diagramma di gauss attraverso i quali si può evincere che le variazioni delle distanze dei punti risulta sotto il centimetro. In quest'analisi infatti, mediando il risultato su entrambe le ricostruzioni tramite *fotogrammetria* si ottiene che il 79,31% di punti presenta una distanza inferiore agli 0,008 metri e che il 96,55% risulta ognimodo sotto gli 0,024 metri. È impor-

tante sottolineare che all'interno di quest'analisi non sono state rimosse per il calcolo alcune aree lacunose nella ricostruzione o quelle in cui non erano state acquisite immagini per la ricostruzione ad esempio la porzione alta della lampada sul sottoscale, o le alzate dei gradini che avrebbero richiesto l'acquisizione di immagini dal basso al fine di ottenere le informazioni sulle aree non visibili dalle posizioni di acquisizioni in quanto collocate ad altezza troppo elevata. I risultati ottenuti pertanto appaiono incoraggianti in quanto la maggior parte dei punti è stata posizionata correttamente, confermano che il modello di calibrazione desunto dalla camera risulta valido e che l'utilizzo di queste camere *fish-eye* è compatibile con le tecniche *Structure From Motion* mirate all'ottenimento di dati metrici dalle geometrie ricostruite.

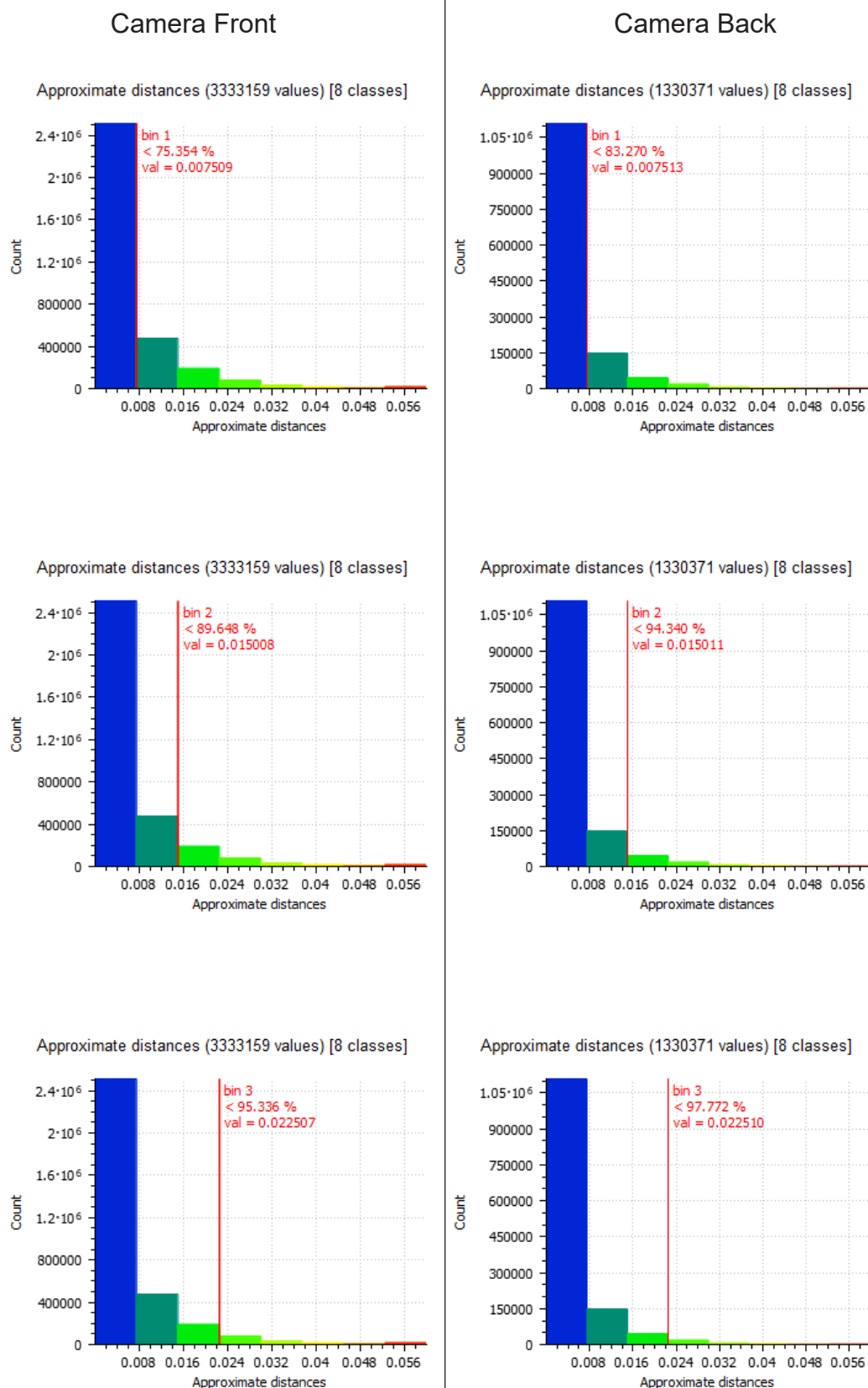


Fig. 149. Istogrammi che mostrano il numero di punti in funzione della distanza approssimata tra nuvola *lidar* (*reference*) e nuvola ottenuta tramite fotogrammetria (*compared*) relativa alla *Camera Front* sulla sinistra e alla *Camera Back* a destra per le analisi svolte sulla scala.

2.9.3. Analisi ricostruzione della prima rampa delle scale: valutazione distanza tra i punti

Come ultima analisi si propone un dettaglio sulla qualità della ricostruzione tridimensionale della prima rampa di scale. Quest'area è stata scelta in quanto la complessità della sua geometria ha permesso di effettuare valutazioni mirate sulla qualità delle ricostruzioni. Osservando la fig.150 che propone in colori differenti le tre nuvole di punti ricostruite (quella ricavata dal *lidar* e le due ottenute tramite fotogrammetria relative alle due camere in analisi), si può osservare come siano state ricostruite con cura le porzioni orizzontali e verticali per le quali non si osservano variazioni significative mentre si osservano imprecisioni di ricostruzione per quanto riguarda gli spigoli agli innesti tra alzata e pedata. Come già osservabile dall'analisi precedente sull'area del sottoscala le aree con ricostruzione imprecisa della geometria sono quelle aree per cui il numero di informazioni acquisite non è stato sufficiente. Alla luce dei risultati ottenuti, la geometria appare correttamente ricostruita e le imprecisioni potrebbero essere irrilevanti in caso

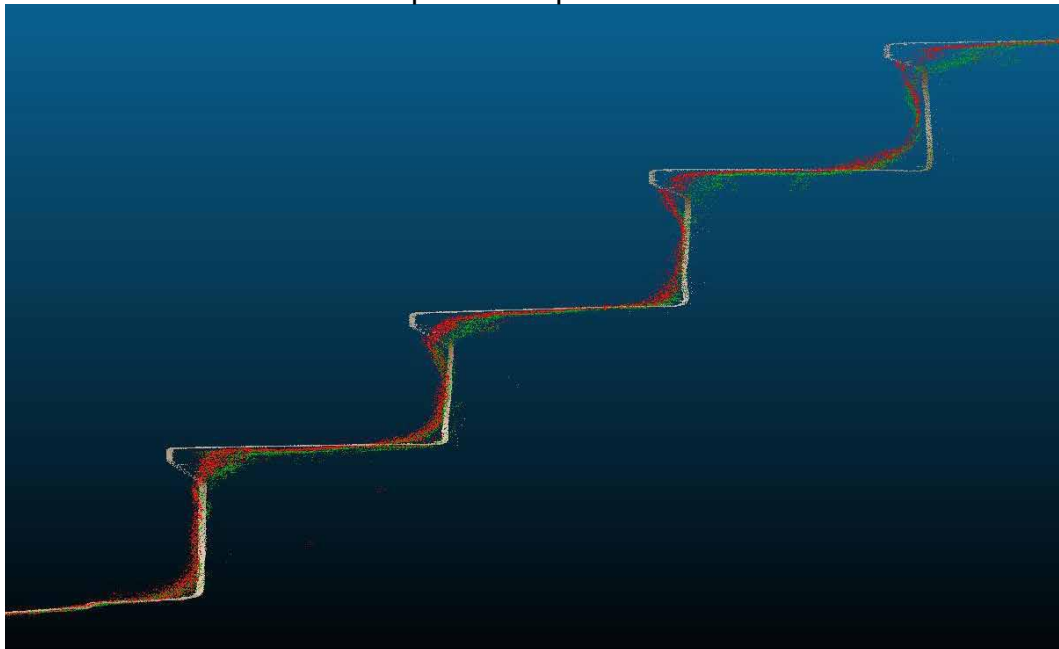


Fig. 150. Profilo di sezione di dettaglio della prima rampa di scale. Confronto tra le geometrie ricostruite dalle nuvole di punti: *lidar* (RGB), *Camera Front* (Rosso), *Camera Back* (Verde) .

si scelga una scala di rappresentazione opportuna. Nella fig.151 è nuovamente riportata una sezione delle tre nuvole di punti secondo un'altra tipologia di visualizzazione e di una porzione più estesa. Da questa immagine possiamo chiaramente distinguere la nuvola ottenuta tramite laser scanner terrestre rispetto alle altre. Le ricostruzioni *SFM* per quanto imprecise nei tratti esposti nelle righe precedenti appaiono estremamente simili tra loro presentando un andamento analogo. Risulta pertanto chiaro che questi dati sono validi per ottenere informazioni in modo molto rapido ma accurato sulle geometrie semplici (partizioni orizzontali e verticali) mentre è opportuno utilizzare soluzioni differenti in caso di rilievi di dettaglio o di aree complesse (modanature, decorazioni). Questo non significa che le geometrie complesse non possano essere ricostruite tramite queste tecniche ma, piuttosto, che la riuscita della ricostruzione di tali aree dipenda principalmente dalla quantità di dati su di esse oltre che dalle condizioni di illuminazione di tali aree. A conferma di questo in figura fig.152-153 sono riportati due stralci di sezione relativi alla soletta orizzontale del pianerottolo tra le rampe di

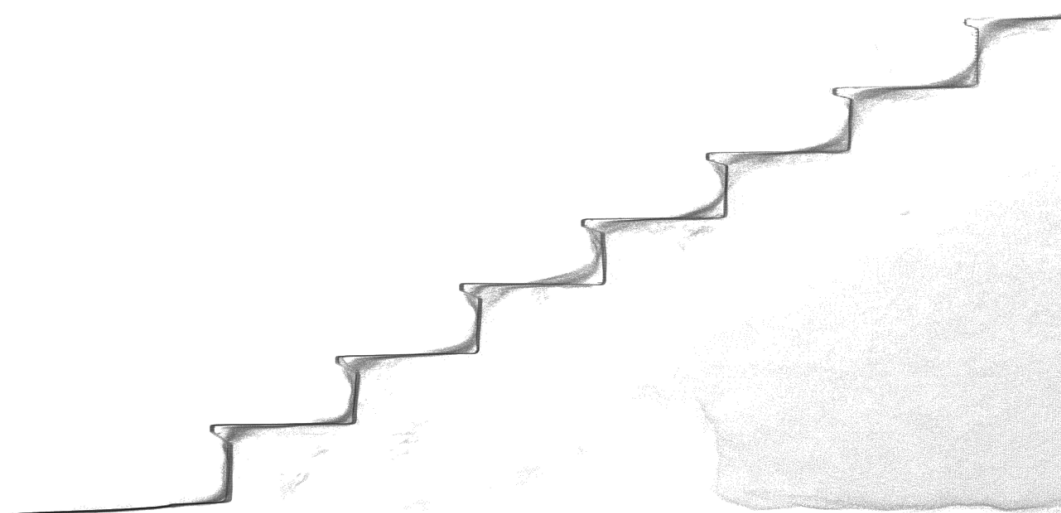


Fig. 151. Profilo di sezione di dettaglio monocromatica della prima rampa di scale effettuata sulle tre nuvole di punti: *lidar*, *Camera Front*, *Camera Back*.

scale di due livelli differenti, rispettivamente quello del primo e del secondo livello. Osservando le ricostruzioni di queste aree si può osservare come in quella del livello inferiore gli spigoli della geometria siano stati ricostruiti in modo accurato anche nelle nuvole ottenute tramite *SFM* e le differenze rispetto ai dati *lidar* siano minimi. Questo perché per tali aree le informazioni acquisite dagli obiettivi *fisheye* sono risultate sufficienti e la distanza di acquisizione era contenuta. Osservando la soletta del secondo livello invece appare chiaro come la geometria ricostruita tramite *SFM* risulti imprecisa e l'imprecisione di ricostruzione appare sempre più marcata al progredire della distanza tra gli oggetti e la posizione di acquisizione. Appare importante ricordare che l'uso di obiettivi *fisheye* con questa finalità è da considerarsi una tipologia di rilievo speditiva a basso costo se confrontata a quella laser scanner. I risultati ottenuti risultano quindi compatibili con questi intenti.

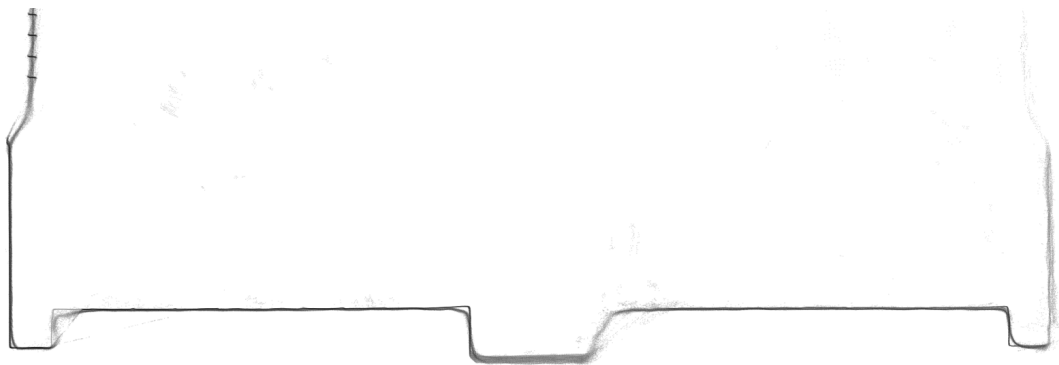


Fig. 152. Profilo di sezione di dettaglio monocromatica della soletta tra le rampa di scale effettuata sulle tre nuvole di punti: *lidar*, *Camera Front*, *Camera Back* relativa al primo livello.

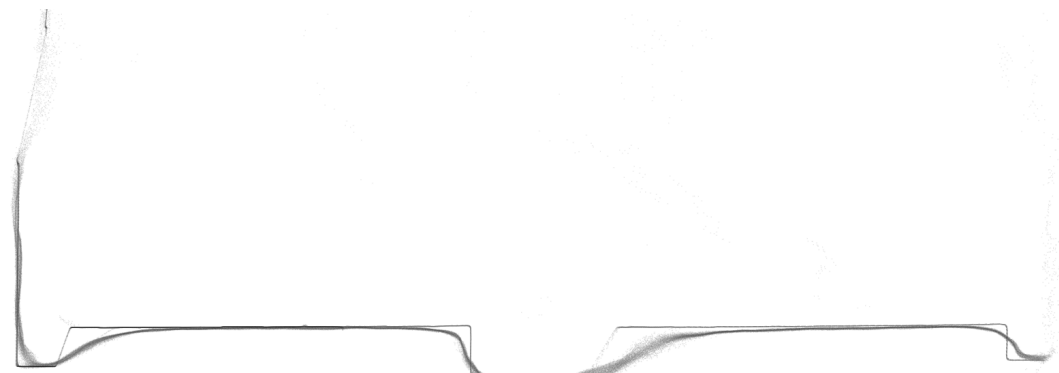


Fig. 153. Profilo di sezione di dettaglio monocromatica della soletta tra le rampa di scale effettuata sulle tre nuvole di punti: *lidar*, *Camera Front*, *Camera Back* relativa al secondo livello.

2.9.4. Calcolo del *crop factor*

Oltre alla stima dei parametri per la calibrazione è importante, al fine di una conoscenza più accurata della camera, introdurre il concetto di *crop factor* e nello specifico andare a calcolarne il valore per comprendere al meglio il funzionamento della *GoPro Fusion* e il rapporto tra i sensori *fisheye* e una camera *full frame*. Quando si parla di *Crop Factor*, infatti, si intende il rapporto tra un sensore specifico e un sensore *full frame* a 35mm. Ogni

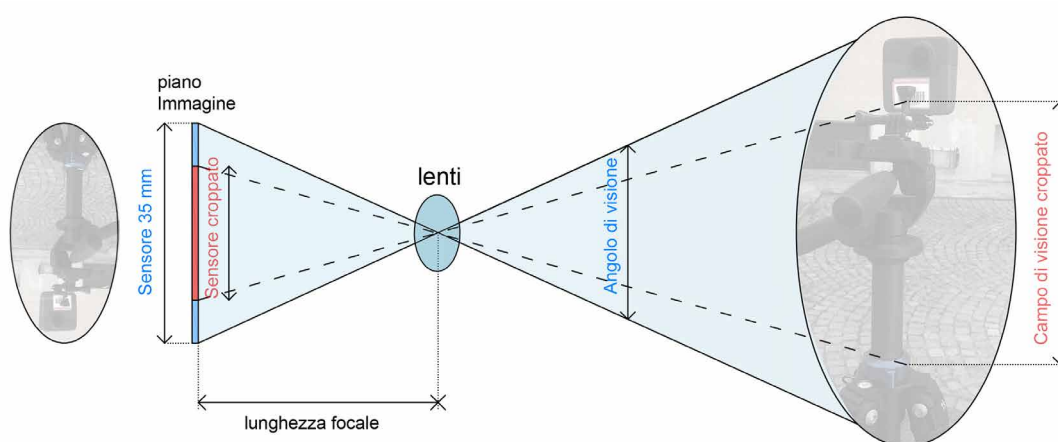


Fig. 154. Schema grafico relativo ai differenti angoli di visione di un sensore *full frame* 35mm e un sensore di dimensioni inferiori (croppato).

qualvolta si utilizzi un sensore più piccolo o più grande del *full frame* di riferimento, infatti, questo fattore permette la determinazione del campo visivo equivalente. Nello specifico quando parliamo di fattore di *crop* intendiamo

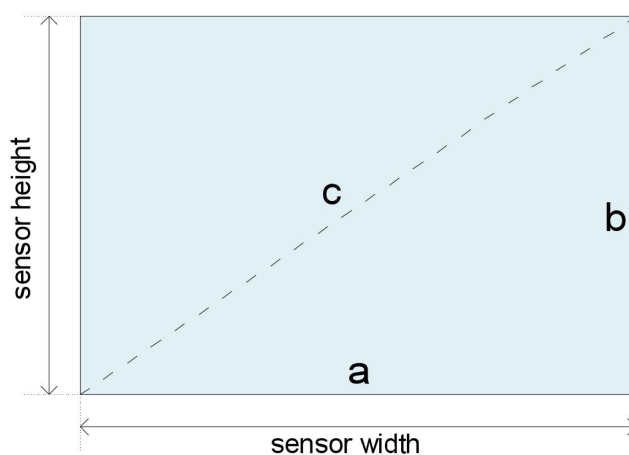


Fig. 155. Calcolo della diagonale del sensore per calcolo del *crop factor*.

il rapporto tra la dimensione diagonale del sensore *full frame* e quella del sensore specifico. Il calcolo della diagonale del sensore avviene tramite l'utilizzo del teorema di pitagora dove:

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \text{quindi} \quad c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Nel caso specifico di questo studio, le due camere in esame possiedono un sensore 1/2.3". Note le dimensioni di questo sensore come 6.17mm x

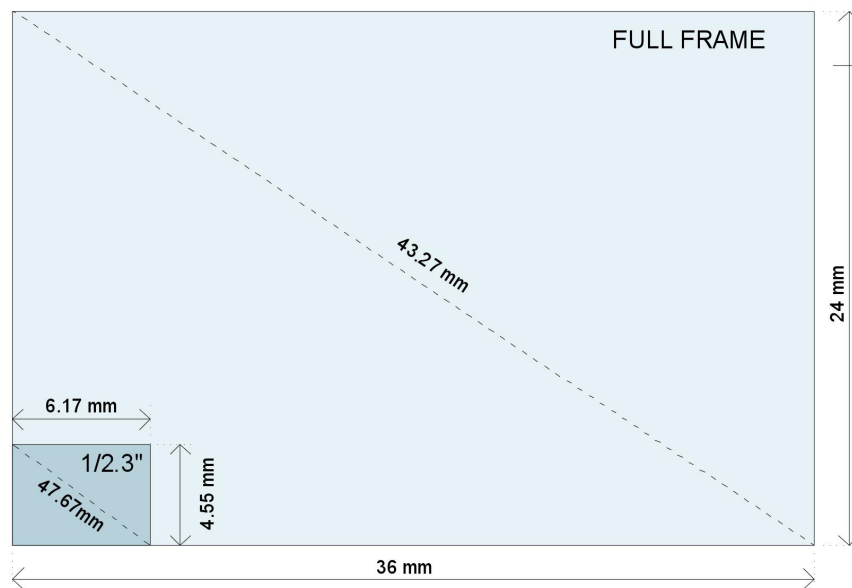


Fig. 156. Determinazione delle diagonali sul sensore full frame 35mm di 36mm x 24mm e uno da 1/2.3" da 6.17mm x 4.55mm.

4.55mm. Quello che occorre per calcolare il fattore di *crop* è andare a calcolare le diagonali per questo sensore e per quello *full frame* 35mm dalle dimensioni di 36mm x 24mm.

$$\text{Diagonale sensore full frame 35mm} = \sqrt{36^2 + 24^2} = 43.27 \quad [\text{mm}]$$

$$\text{Diagonale sensore 1/2.3"} = \sqrt{6.17^2 + 4.55^2} = 7.67 \quad [\text{mm}]$$

Determinate queste due grandezze si può ricavare il fattore di *crop*:

$$\text{Crop Factor} = \text{Diagonale full frame 35mm} / \text{Diagonale 1/2.3"}$$

$$\text{Crop Factor} = 43.27 / 7.67 = 5.64$$

2.10. Calcolo della focale equivalente

Dopo avere stimato la focale in mm ed avere calcolato il fattore di *Crop* per relazionare il sensore in esame ad un sensore *full frame* da 35mm è stato possibile stimare la focale equivalente moltiplicando la focale espressa in millimetri per il fattore di *crop* precedentemente determinato.

$$Focale\ equivalente_{(35mm)\ [mm]} = Focale_{(sensore\ specifico)\ [mm]} \cdot Crop\ Factor_{[-]}$$

nel caso specifico:

$$Focale\ eq.\ CAMERA\ BACK\ (35mm)\ [mm] = 1.218\ [mm] \cdot 5.64\ [-] = 6.87\ [mm]$$

$$Focale\ eq.\ CAMERA\ FRONT\ (35mm)\ [mm] = 1.217\ [mm] \cdot 5.64\ [-] = 6.86\ [mm]$$

Come si può osservare dai risultati la lunghezza focale equivalente stimata è pressoché la medesima per entrambe le camera e la sua variazione è così piccola da potere essere trascurata in fase di calcolo.

I valori di focale equivalente stimati risultano coerenti con le attese in quanto, è nota una correlazione tra la focale e il *Field of View (FOV)*; osservan-

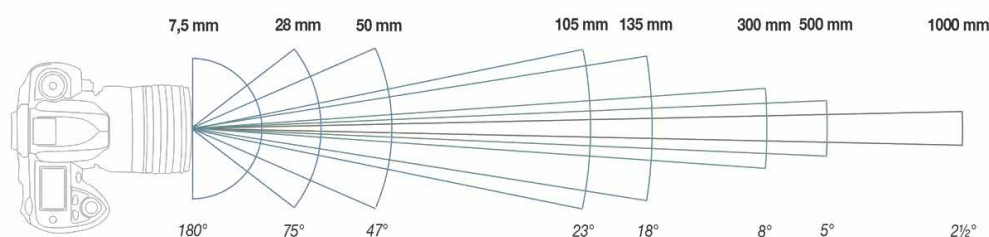


Fig. 157. Relazione tra lunghezza focale e angolo di campo. [tratto e rieditato da: 3dmetrica.it]

do la Fig.157 appare chiaro che la focale stimata risulti coerente. Come si può osservare nell'immagine, infatti in cui sono correlate le lunghezze focali rapportate al *FOV* (ad una focale di 28mm corrisponde un angolo di campo di 75° mentre per valori di 7,5 mm l'angolo è di 180°). Dalle stime eseguite

un valore di 6,8 mm da origine ad un angolo di campo maggiore di 180° garantendo una percentuale di sovrapposizione tra le immagini che appare congrua con quella stimata e illustrata nei paragrafi relativi alla connessione delle immagini illustrati nel corso di questo lavoro.

2.11. Miglior modello di calibrazione ottenuto

Si riassumono in tabella i risultati ritenuti più accurati relativi al modello di calibrazione della camera utilizzata in questo studio. Tale modello, come già illustrato, si riferisce alle calibrazioni realizzate attraverso *Agisoft Lens* secondo la metodologia e le procedure illustrate nel relativo sottocapitolo.

	FRONT CAMERA	BACK CAMERA
F [px]	1086.856	1089.578
Cx [px]	-5.378	-3.256
Cy [px]	-1.104	-2.138
B1 [px]	-0.429	-0.158
B2 [px]	0.030	-0.038
k1 [mm]	-0.053	-0.096
k2 [mm]	-0.001	0.082
k3 [mm]	-0.001	-0.062
p1 [mm]	0.000	-0.000
p2 [mm]	0.000	0.000

Tab. 32. In tabella il modello di calibrazione ritenuto più valido e realizzato attraverso *Agisoft Lens*.

2.12. Considerazioni sui risultati di calibrazione

Appare chiaro dai paragrafi precedenti che il processo di calibrazione per questo tipo di camera non è risultato un'operazione facile. Questo per diversi fattori: le elevate distorsioni radiali dovute al tipo di obiettivo *fish-eye*, *software* di calibrazione non ancora sviluppati a sufficienza per queste tipologie, necessità di utilizzare *marker* sviluppati su misura per la calibrazione. Dopo avere provato ad effettuare ricostruzioni tridimensionali con la camera in esame tramite *Self Calibration* con risultati scadenti era apparso fondamentale, fin dalle prime fasi, trovare un modo per calibrare questa tipologia di camera per renderla adatta agli scopi preposti. Dopo i risultati della *Self Calibration* è stato testato l'utilizzo del software *Matlab* che tuttavia non ha permesso di ottenere una calibrazione significativa per la camera *fish-eye* in questione al punto da obbligare ad utilizzare l'algoritmo per camere standard.

L'ultima soluzione presentata, ovvero la calibrazione ottenuta tramite *Agisoft Lens*, ha prodotto, invece, dopo svariati tentativi e la realizzazione di una nuova *chessboard* per la calibrazione, i risultati sperati. Dopo avere utilizzato un'area di test che permettesse di effettuare un confronto utilizzando più tipologie di calibrazioni ottenute tramite varie metodologie presentate in questi paragrafi è, infatti, risultato chiaro che l'ultima tipologia sia risultata la più efficace.

Dopo svariati tentativi si reputa che, nell'ottica di utilizzare queste tipologie di *fish-eye* per la ricostruzione tridimensionale, la soluzione più opportuna è quella di immettere prima della fase di calcolo i dati desunti da *Agisoft Lens* come precalibrazione tramite la quale il programma sarà in grado di

utilizzare la maggior parte delle immagini di *input*. Ad allineamento concluso è fortemente consigliato ottimizzare i dati di calibrazione permettendo l'aggiustamento di tutti i valori precedentemente immessi. In questo modo il risultato sarà un nuovo modello di calibrazione che, a partire dai dati di base della precalibrazione, sarà in grado di correggere ed aggiustando eventuali imprecisioni o leggere modificazioni dovute a variazioni delle condizioni rispetto al momento di calibrazione (es. variazioni di temperatura, umidità ecc.). Sarebbe utile ripetere la precalibrazione di tanto in tanto e rieseguirla in caso di urti o cadute della camera.

Si può affermare che, ottenendo una valida calibrazione della camera, l'utilizzo di un sensore *fish-eye* di questo tipo, risulta compatibile con finalità di ricostruzione tridimensionale con l'obiettivo di desumere dati metrici dai modelli elaborati ottenendo una precisione centimetrica.

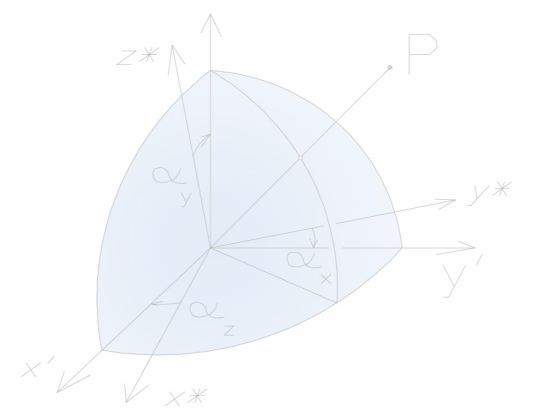
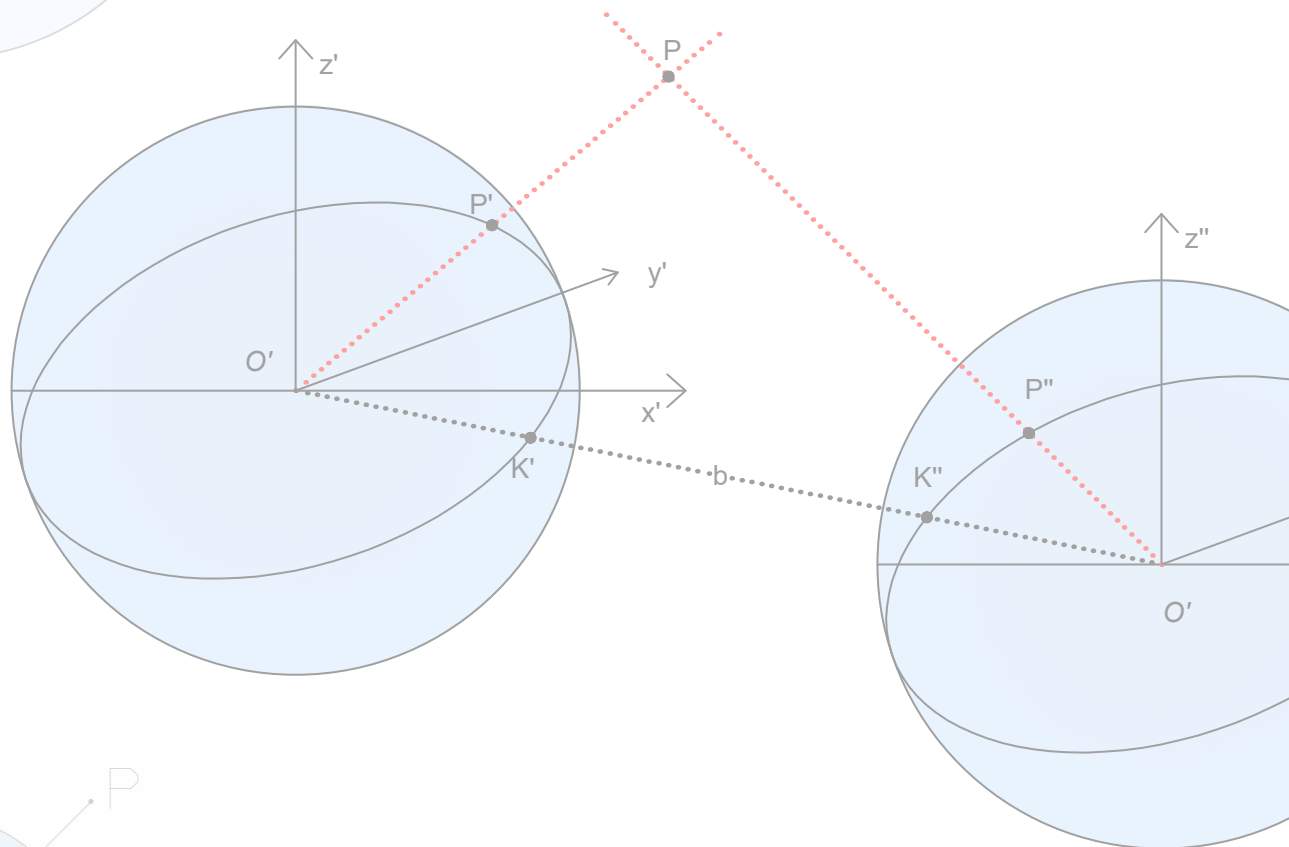
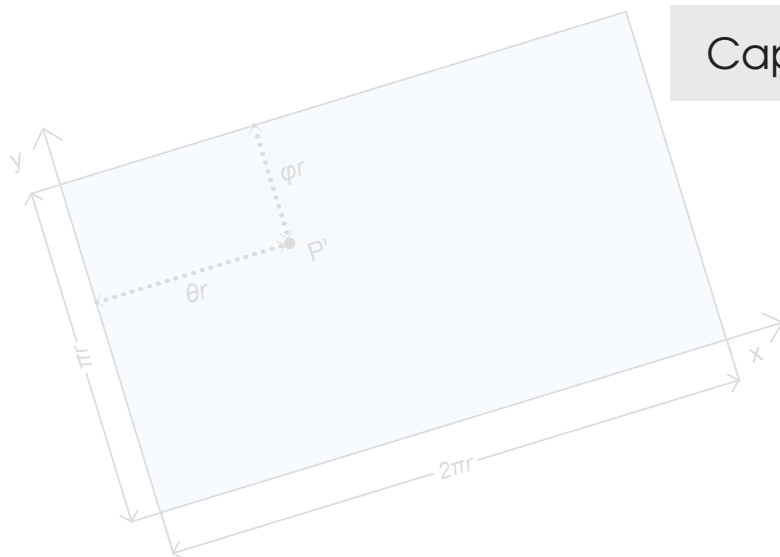
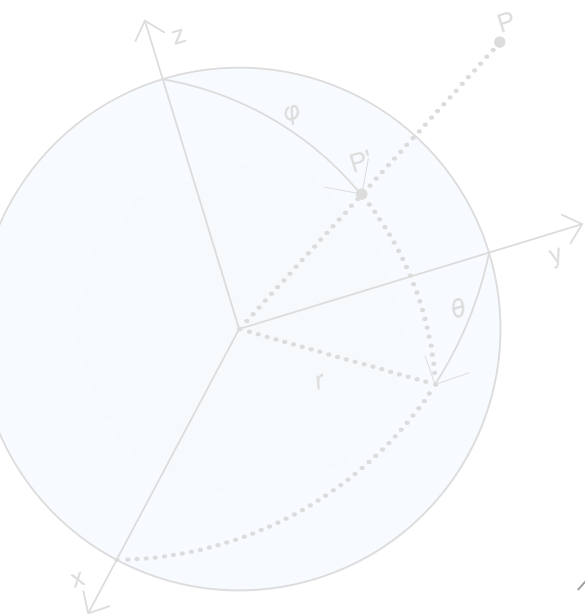
2.13. Note bibliografiche

- I WGN, Journal of the International Meteor Organization, vol. 33, no. 1, p. 9-14.
- II Wood, R. W. (1906). XXIII. Fish-eye views, and vision under water. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 12(68), 159-162.
- III Bond, W. N. (1922). LXXXIX. A wide angle lens for cloud recording. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 44(263), 999-1001.
- IV R. Hill. (1926) *A Lens for Whole Sky Photography*, Proc. Opt. Conv. 2, pag. 878-883
- V Miyamoto K. (1964). *Fisheye lens*. Journal of the Optical Society of America, 54, 1060.
- VI W. Merte, R. Richter, M. von Rohr. (1932). *Das Photographische Objektiv*, (traduzione in inglese dal titolo *Photographic Lenses* a cura di CADO, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton Ohio, 1949)
- VII Vorst J. (1978). *Het Nikon reflex boek*. Elsevier, Amsterdam.
- VIII Laikin, M. (2001). *Lens Design*, 3rd edn., ed. by BJ Thompson.
- IX Fryskowska, A., Kedzierski, M., Grochala, A., & Braula, A. (2016). CALIBRATION OF LOW COST RGB AND NIR UAV CAMERAS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- X Teppati Losè, L., Chiabrando, F., & Spanò, A. (2018). *Preliminary evaluation of a commercial 360 multi-camera rig for photogrammetric purposes*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2).
- XI <https://3dmetrica.it/lunghezza-focale-in-fotogrammetria/> consultato il 01/11/2018
- XII Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Saler, R., (2013). *Accuracy and block deformation analysis in automatic uav and terrestrial photogrammetry - lesson learnt*. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W1, pp. 203-208.

XIII Nocerino, E., Menna, F., & Remondino, F. (2014). *Accuracy Of Typical Photogrammetric Networks In Cultural Heritage 3D Modeling Projects*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, XL-5, pp. 465-472.

XIV James, M. R., Robson, S., (2014). *Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground based image networks*. Earth Surface Processes and Landforms, 39(10), pp. 1413-1420.

XV Wu, C., (2014). *Critical configurations for radial distortion self- calibration*. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Columbus (USA), pp. 25-32.



3. Le immagini sferiche e la Fotogrammetria

3.1. La realizzazione di un panorama sferico

Il processo di elaborazione di panorami sferici avviene, come accennato, tramite l'acquisizione dallo stesso punto di presa di fotogrammi con l'obiettivo di ricoprire una porzione di 360° avendo cura di garantire una sufficiente sovrapposizione tra gli stessi. Il processo di presa può essere eseguito con qualunque tipologia di camera con risultati proporzionati alla qualità della stessa. L'ausilio di un treppiede garantisce una migliore riuscita, anche se risultati accettabili per la visualizzazione sono ottenibili anche senza. L'uso di un treppiede con testa motorizzata resta ogni modo la soluzione migliore. Dopo la fase di presa è necessario proiettare le immagini su una sfera virtuale di raggio pari alla focale della camera, mediante l'uso di software appositamente realizzati (a titolo d'esempio *Autopano*, *PTgui*, *Hugin*). Tramite questi strumenti automatizzati basati sul noto algoritmo di *Computer Vision Scale-invariant feature transform* (o *SIFT*) che permette di rilevare e descrivere caratteristiche delle immagini, si ottiene la proiezione sulla sfera virtuale per mezzo della connessione tra le immagini. La proiezione viene poi proiettata su un piano utilizzando diversi sistemi tra cui il più noto è quello della proiezione equirettangolare (cfr. 1.9.1)



Fig. 158. Acquisizione delle immagini per la realizzazione del panorama sferico tramite cavalletto. [Tratto da G.Fangi (2007) *Dispense "La Fotogrammetria Sferica Una Nuova Tecnica Per La Documentazione Del Patrimonio Monumentale"* Università Politecnica delle Marche.]



Fig. 159. Proiezione degli scatti su una sfera virtuale avente come raggio la lunghezza focale della camera.

3.2. Tipologie di proiezione dei panorami sferici:

Come accennato nel paragrafo precedente esistono molteplici tipologie di proiezione delle immagini sferiche, tra le principali: quella cilindrica, cubica, equirettangolare, prospettica anche se ne esistono molte altre. Nel seguito sono illustrate le principali tecniche di proiezione.

3.2.1. Proiezione cilindrica

Nel caso di proiezione cilindrica le immagini sono proiettate su una geometria cilindrica che sviluppa quindi un campo orizzontale di 360° ed un'altezza verticale parziale. Tale metodo di proiezione è molto sviluppato sia nella visualizzazione piana di questa tipologia di proiezione che per la visualizzazione all'interno di dispositivi di visualizzazione tridimensionali.

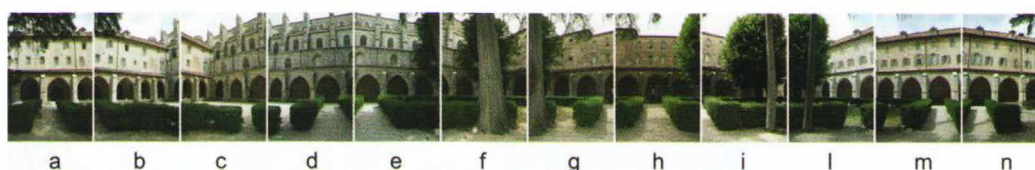
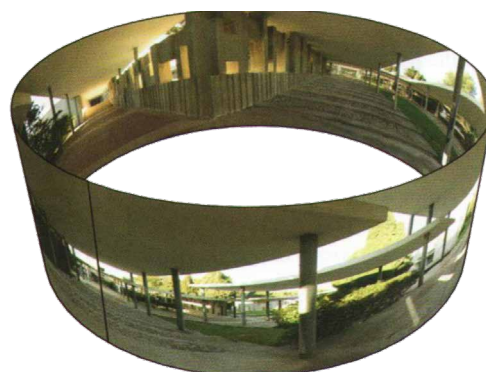
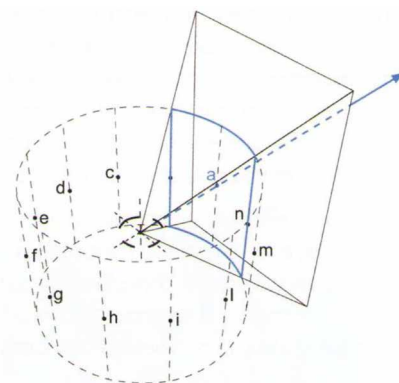


Fig. 160. Proiezione cilindrica [Tratte da: De Luca, L. (2011). La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie, Dario Flaccovio Editore, Palermo.]

3.2.2. Proiezione cubiche

Nel caso di proiezione cubica le immagini sono proiettate secondo una proiezione prospettica classica sulle sei facce della geometria di un cubo a partire dal centro ottico. Uno dei vantaggi di questa tipologia rispetto all'uso dell'immagine sferica è una più agevole modifica delle sei immagini piane.

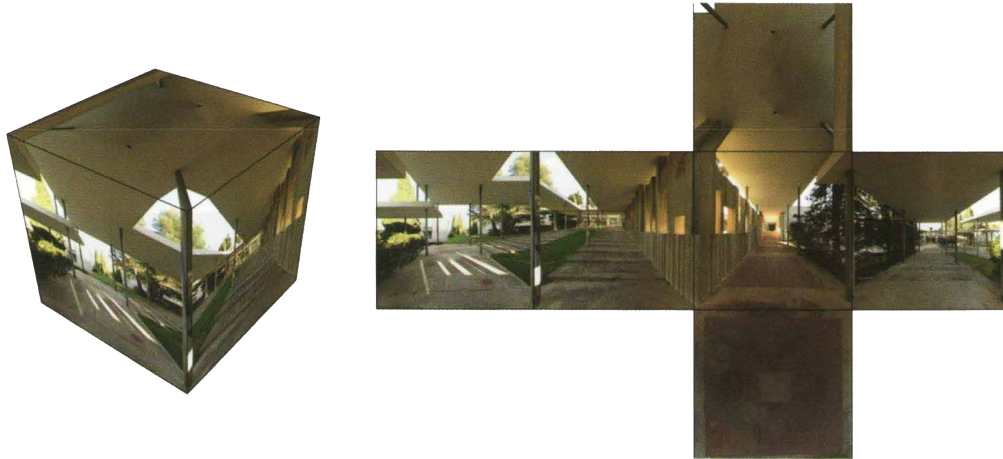


Fig. 161. Proiezione cubica [fonte: ibidem]

3.2.3. Proiezione sferica o equirettangolare

La specificità di questa tipologia di proiezione è la sua rappresentazione piana, è trattata in modo più approfondito nel capitolo 1.9.1, tuttavia, se ne riporta una definizione generale. In questa tipologia di proiezione le immagini a partire da un centro sono proiettate sulla superficie di una sfera virtuale che permette un rappresentazione omogenea dello spazio distribuito sui 360° dell'asse orizzontale e 180° dell'asse verticale.

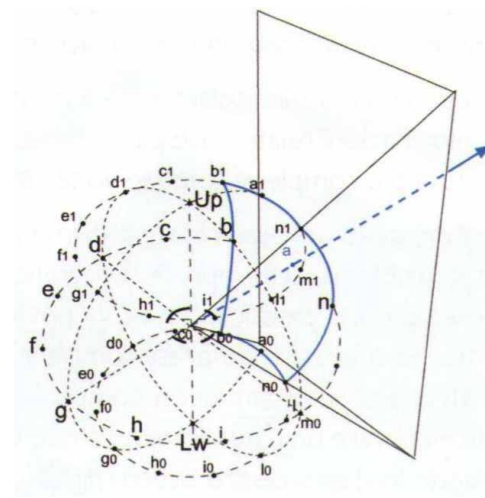


Fig. 162. Proiezione sferica o equirettangolare [fonte: ibidem]



Fig. 163. Esempio di proiezione sferica o equirettangolare .

3.3. Applicazioni di fotogrammetria sferica

Al fine di testare le validare di ricostruzione tridimensionale dei panorami sferici generati da questo modello di camera sono stati svolti più test terrestri ed aerei che saranno illustrati nei prossimi capitoli. Il primo di questi è stato eseguito nuovamente sul poligono di calibrazione le cui specificità sono state illustrate nel capitolo precedente. Questo ha permesso di effettuare una comparazione tra i dati generati dai fotogrammi *fisheye* confrontandoli con le proiezioni sferiche. Saranno illustrate differenti soluzioni per l'utilizzo di questo tipo di fotogrammi sferici per processi di *Structure From Motion*. Successivamente saranno illustrati le peculiarità e potenzialità del sistema in volo tramite aerofotogrammetria in sostituzione, confronto o supporto delle camere tradizionali.

3.3.1. Preparazione dei dati e *stitching* delle immagini

La prima fase svolta per tutte le tipologie di acquisizione con questa camera è stata quella di unione delle immagini. La maggior parte dei test riportati in questo studio, anche per quanto riguarda le applicazioni di fotogrammetria sferica sono stati eseguiti con la camera *GoPro Fusion* oggetto di calibrazione, tuttavia, sono state testate applicazioni di fotogrammetria sferica realizzata anche tramite camere non *fisheye*.

Come analizzato precedentemente le due camere di *GoPro Fusion*, grazie ai particolare obiettivi *fisheye* di cui sono dotate, al momento dello scatto producono due immagini che, opportunamente connesse tramite il processo denominato *stitching* (in italiano: cucitura), permettono di generare un panorama sferico equirettangolare. Tale processo non avviene in modo automatico al momento della presa ma richiede un elaborazione successiva. La casa produttrice della camera oggetto di questo studio propone un software realizzato appositamente per questo modello per svolgere il



Fig. 164. Immagini scattate simultaneamente dalle due camere prima del processo di *stitching*.



Fig. 165. Esito del processo di *stitching* delle due immagini realizzato con *GoPro Fusion Studio*.

processo in modo automatizzato denominato *GoPro Fusion Studio*. Tramite quest'ultimo, infatti le immagini delle due camere (es. in fig. 164-165), dopo essere state scaricate vengono automaticamente trattati dando origine al panorama sferico (fig.165). Come si può facilmente osservare il risultato del processo è un immagine equirettangolare (o secondo le altre tipologie di rappresentazione selezionabili) in cui, in modo automatizzato, è stato effettuato un bilanciamento del bianco e una correzione colore. Il punto di legame, inoltre, delle due immagini non risulta più visibile impedendo all'osservatore di percepire i fotogrammi di partenza. L'utilizzo del software appare estremamente immediato e il risultato finale valido. Uno dei limiti di questo

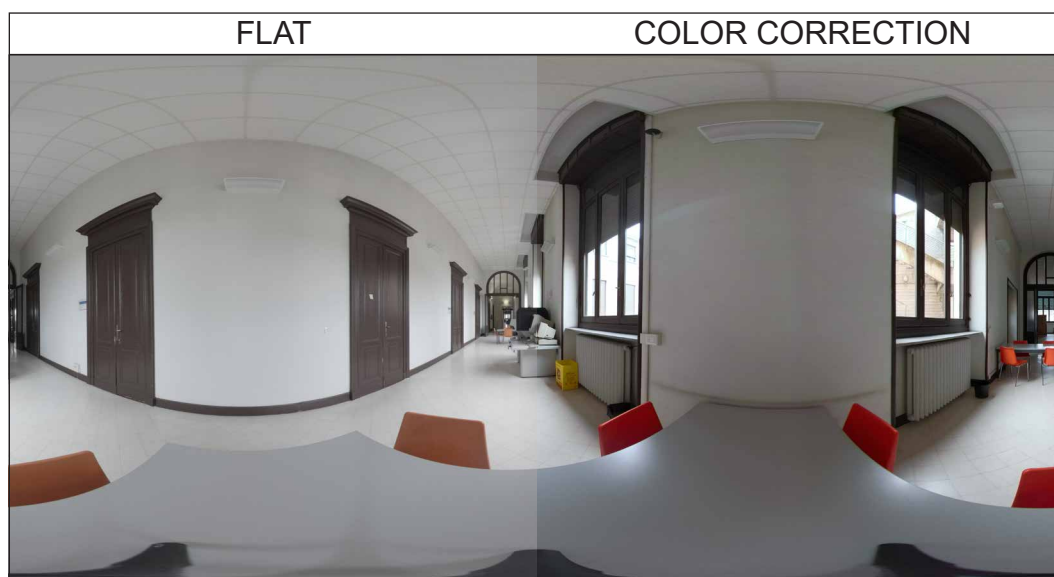


Fig. 166. Esempio di proiezione equirettangolare con e senza correzione colore e bilanciamento bianco con settaggi di *default* tramite *GoPro Fusion Studio*.

sistema, tuttavia, è rappresentato dall'impossibilità di un controllo relativo alla stima dei parametri interni come la posizione del punto principale e le distorsioni radiali, stimate dal programma nella proiezione delle immagini sferiche. Non è noto, inoltre, il grado di sovrapposizione percentuale delle immagini e non risulta possibile valutare la posizione dei punti di unione stimati dall'algoritmo. Nonostante questi limiti le immagini finali non presentano errori visibilmente riconoscibili se non per la modesta porzione di *pixel* in corrispondenza dell'attacco del cavalletto alla camera. Le linee verticali

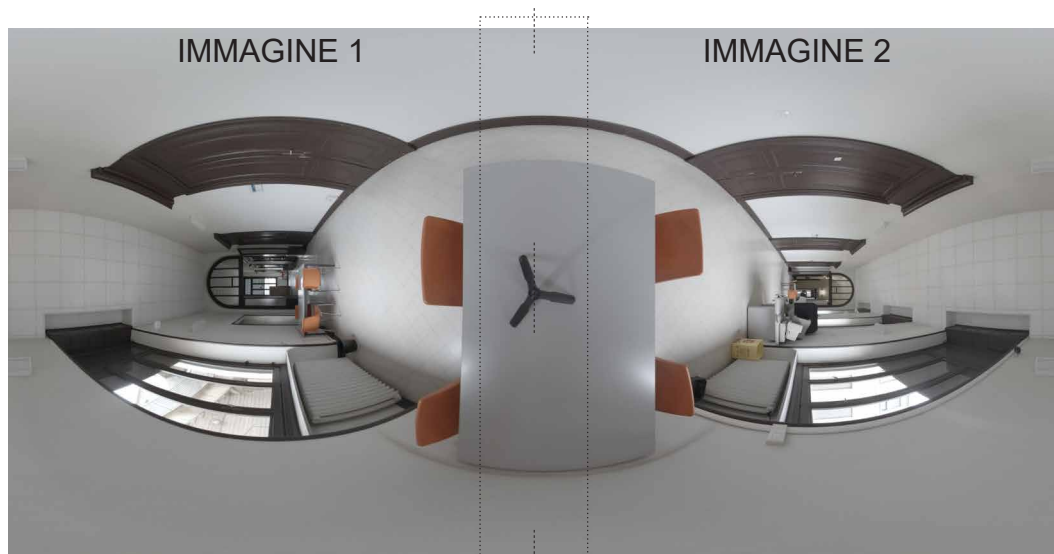


Fig. 167. Analisi dei punti di connessione tra le immagini da cui si può osservare l'assenza di segni che indichino problemi relativi alle aree di sovrapposizione.

appaiono perfettamente lineari e l'orizzonte appare al centro dell'immagine. È possibile intervenire sui valori di assetto e sulla correzione e bilanciamento dei colori per le proiezioni elaborate. Intervenendo su questi controlli è stato realizzato lo *stitching* di due immagini di un interno con pareti bianche al fine di valutare, grazie sulla superficie uniforme delle pareti, se, a seguito del processo di unione, risultino aree in cui la presenza delle zone di connessione tra le immagini appare distinguibile. I risultati mostrano che le aree di sovrapposizione non risultano distinguibili e che il panorama si presenta uniforme. A tale proposito il software proprietario permette di ottenere risultati adatti per la maggior parte delle esigenze di questo studio senza, tuttavia, la possibilità di intervento sui settaggi specifici.

Al fine di valutare più accuratamente la qualità di connessione tra le immagini, la proiezione precedentemente mostrata (fig. 167) è stata successivamente modificata agendo sui comandi controllo dell'assetto, così da permettere una valutazione visiva più accurata (fig. 168). Anche in questo caso non sono state riscontrate problematiche di carattere significativo.



Fig. 168. Analisi dei punti di connessione tra le immagini da cui si può osservare l'assenza di segni che indichino problemi relativi alle aree di sovrapposizione.

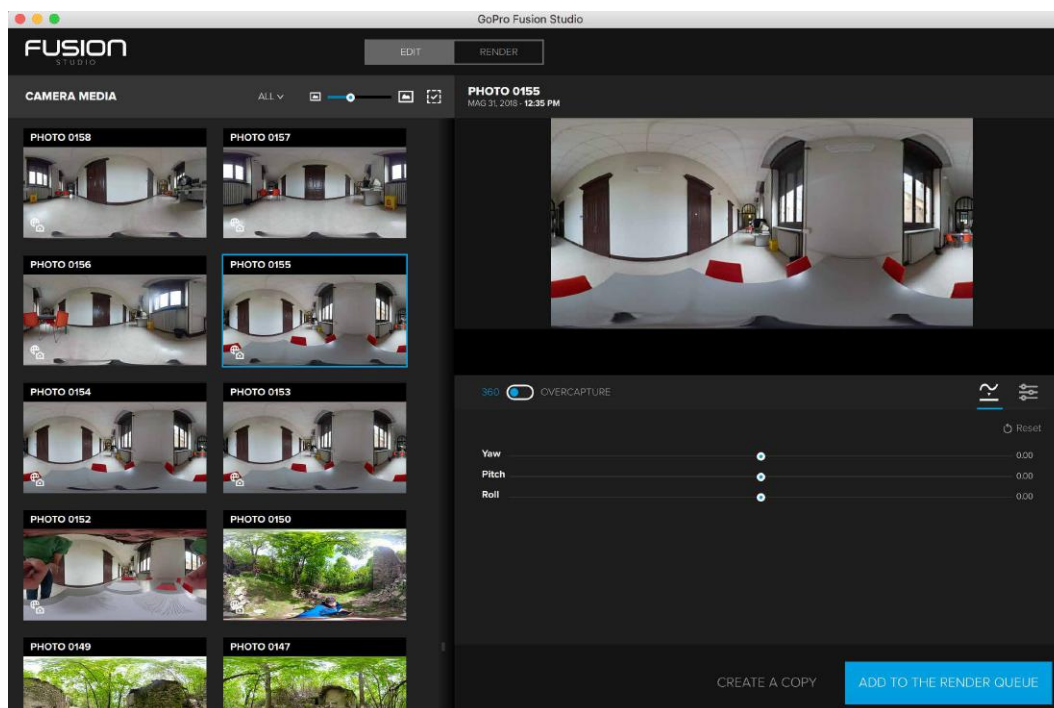


Fig. 169. Interfaccia del software *GoPro Fusion Studio*.

3.4. Altri metodi di *stitching*

Per quanto il software proprietario produca ottimi risultati nel processo di fusione fra le immagini, esso non permette un controllo su tale processo che si configura come una procedura automatizzata *user friendly*. Tuttavia, per le finalità di questo studio, appare necessario svolgere valutazioni più accurate dello stesso. Una delle prerogative era quella di assegnare i parametri interni di camera precedentemente stimati e determinare il grado di sovrapposizione tra le immagini. Per raggiungere questi obiettivi sono stati utilizzati software alternativi per il processo di fusione dei due fotogrammi *fisheye* che hanno permesso il raggiungimento di tali obiettivi. Per tali sperimentazioni sono stati usati i software *Open Source Hugin versione 2017.0.0* e il software *AutoPano Giga versione 4.4*. Di seguito si illustreranno i risultati ottenuti.

Le *immagini fisheye* generate da questo modello di camera presentano una sovrapposizione molto limitata tra i fotogrammi e pertanto una difficoltà nota è rappresentata dalla ricerca di punti di connessione in tali porzioni ristrette di fotogramma. In caso di impossibilità di determinare punti di legame validi o in numero non sufficiente, infatti, il processo di unione fallisce o restituisce risultati imprecisi.

Un vantaggio rappresentato da software come *AutoPano Giga* è quello di potere andare a modificare i parametri interni di camera ottenendo una migliore unione delle immagini del panorama. Per raggiungere questo obiettivo, tuttavia, è stata necessaria una modifica dei *metadati*, ovvero delle informazioni contenute all'interno dei fotogrammi (es. apertura, tipologia di camera, focale, orario e data acquisizione, ISO ecc.) in almeno una delle due camere per far sì che fossero trattate dal software come modelli diffe-

renti. Il software considera, infatti, i fotogrammi realizzati dalla camera oggetto di questo studio, come analoghi procedendo, pertanto, alla stima dei parametri interni solo una volta per entrambe le camere. Questo fa sì che la stima dei parametri interna risulti la medesima su due camere nella realtà differenti generando un'immagine sferica con errori di carattere rilevante. A titolo di esempio viene riportato l'utilizzo della procedura utilizzata su due fotogrammi campione:



Fig. 170. Immagini utilizzate per il test di modalità di *stitching* alternative con inserimento dei parametri interni (Punto Principale, Distorsioni Radiali $K_1/K_2/K_3$ e Lunghezza Focale) per ciascuna delle due camere.

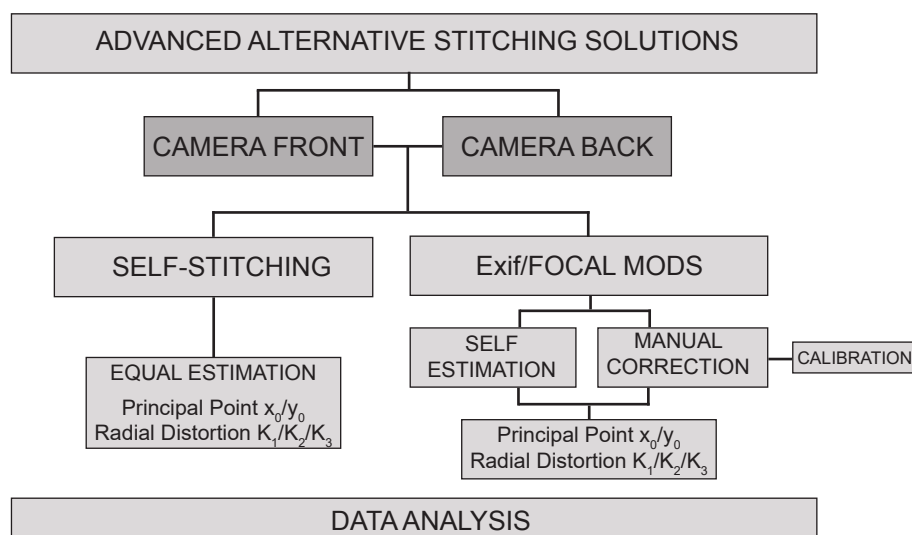


Fig. 171. Nello schema un riepilogo del flusso di lavoro utilizzato in questo studio nelle fasi di test relative all'utilizzo di metodi alternativi di stitching tramite il controllo dei parametri interni di camera stimati dal software o imposti a priori.

In un primo momento si è scelto di testare il processo automatizzato proposto dal software *Autopano Giga* senza intervenire su alcun parametro e utilizzando pertanto le impostazioni di default. Testando questa procedura su differenti coppie di immagini si è riscontrato che solo per alcune di esse il software è stato in grado di riconoscere correttamente punti di connessione tra le immagini. Questo problema è imputabile a più fattori: in primo luogo i fotogrammi sono creati da due camere differenti, che, tuttavia sono considerate identiche dal programma dal momento che esso estrae le informazioni sul modello di camera attraverso i file *EXIF* (*EXchangeable Image File*), ovvero un insieme di informazioni aggiuntive, condiviso da tutti produttori di fotocamere. Sebbene dalla lettura di questi dati le immagini risultino acquisite dallo stessa tipologia di camera, sappiano che, per quanto il tipo di camera, lenti e sensori sia il medesimo i parametri interni risultano differenti e, per effettuare un'unione delle immagini accurata, è importante tenerne conto dal momento che le aree di sovrapposizione tra i fotogrammi si presentano nelle porzioni più esterne ovvero quelle affette dagli effetti più marcati di distorsione.

Una delle prime operazioni eseguite dal software è quella della stima dei parametri interni che vengono poi di fatto applicati ai singoli fotogrammi. Tuttavia nel caso in esame essendo i fotogrammi considerati come generati da una sola camera essi vengono stimati una volta soltanto restituendo un modello di ricostruzione impreciso o del tutto assente.

Un altro problema è il fatto che prima della fase di calcolo il software considera la lunghezza focale come 3mm. Questo perché il database del programma non contiene attualmente ancora informazioni su questa tipologia di camera, indicando pertanto un valore che dalle stime di calibrazione è risultato essere errato. Nel corso di questo studio, si è proceduto a inserire manualmente questi dati attraverso le informazioni desunte in modo più

approfondito dal processo di calibrazione delle camere (si faccia riferimento al capitolo 2). Si è proceduto a comunicare agli sviluppatori del software le stime di tali parametri in funzione di un futuro aggiornamento dei database. La focale espressa in pixel è stata convertita in mm (al fine di essere utilizzata correttamente dal software durante il processo) come segue:

$$Focal\ length_{[mm]} = Focal\ length_{[px]} * Sensor\ Pixel\ Size_{[px]}$$

è stato necessario andare a determinare la focale equivalente al 35mm dal momento che era richiesta come dato di input e determinare a tal fine il fattore di *crop* sul sensore.

3.4.1. Conversione delle Distorsioni Radiali

Si riportano inoltre le coordinate relative al punto principale e alle distorsioni radiali nei coefficienti K_1 , K_2 , K_3 .

Si segnala che per i valori di distorsioni radiali è stata necessaria una conversione dei dati precedentemente stimati per esprimerli nella tipologia richiesta da *Autopano Giga* che utilizza la lunghezza focale in millimetri. La conversione di tali coefficienti è avvenuta nel modo seguente:

$$K_1 = K_{1, (stimato)} / (Focale_{mm})^2$$

$$K_2 = K_{2, (stimato)} / (Focale_{mm})^4$$

$$K_3 = K_{3, (stimato)} / (Focale_{mm})^6$$

Dove per $K_{1,2,3, (stimato)}$ intendiamo i valori stimati nel capitolo sulla calibrazione delle due camere.

3.4.2. Riepilogo parametri per procedure di *stitching* avanzate

Di seguito si riportano in tabella i parametri principali che sono stati utilizzati per lo stitching delle immagini con il software *Autopano Giga* risultati di rilevante importanza per ottenere l'unione dei fotogrammi corretta. Si riportano i valori di lunghezza focale per ognuna delle due camere espresse rispettivamente in pixel e millimetri oltre alla lunghezza focale equivalente al *35mm*.

	CAMERA FRONT	CAMERA BACK
Sensore	1/23"	
Diagonale Sensore [mm]	7.67	
Pixel size [mm]	0.00112	
Crop Factor [-]	5.6	
Focale [px]	1086.86	1087.96
Focale [mm]	1.217	1.219
Focale eq 35mm [mm]	6.817	6.824
Punto principale (x_o, y_o) [px]	(-5.38, -1.10)	(-3.26, -2.14)
$K1_{\text{Stimato}}$	-0.053	-0.07
$K1_{\text{Convertito}}$	-0.036	-0.04
$K2_{\text{Stimato}}$	-0.001	0.04
$K2_{\text{Convertito}}$	-0.001	0.02
$K3_{\text{Stimato}}$	-0.001	-0.06
$K3_{\text{Convertito}}$	-0.000	-0.02

Tab. 33. Tabella di riepilogo dei principali parametri utilizzati in *Autopano Giga* per testare metodi di *stitching* più avanzati.

3.4.3. Self Stitching Processing

Come accennato precedentemente come prima sperimentazione testata si è proceduto all'utilizzo dei parametri di *default* proposti dal software *Autopano Giga v4.4* semplicemente inserendo i fotogrammi per l'elaborazione senza effettuare alcuna correzione. Per questo processo le informazioni degli *Exif* sono state lasciate inalterate così come i valori di lunghezza focale e relativa focale equivalente al 35mm. Si può sintetizzare i risultati di questi test come segue:

1. Gran parte delle coppie di immagini non risulta allineata e la procedura di unione fallisce.
2. Nei casi di realizzazione del panorama si riscontrano problemi macroscopici sulle immagini e distorsioni non trascurabili.
3. La lunghezza focale stimata in mm risulta errata.
4. I parametri interni: punto principale e distorsioni radiali $K_1/K_2/K_3$ risultano stimati una sola volta e applicati indistintamente ad entrambe le camere.

Per queste considerazioni è stata necessaria la ricerca di soluzioni differenti per risolvere le problematiche sovraesposte, dal momento che i dati ottenuti non risultano soddisfacenti rispetto agli scopi preposti.

	Focale	Vecale calcolata	K1	K2	K3	Offset X	Offset Y
 (1) GPBK2399....	11.00...	9.586mm	0.875	0.900	0.000	5.11	-2.66
 (2) GPFR2399....	11.00...	9.586mm	0.875	0.900	0.000	5.11	-2.66

	Velocità	Apertura	Iso	Imbardata	Beccheqqic	Rollio	FOV
 (1) GPBK2399....	1/1218	F2.8	100	-31.772	-0.309	-0.547	183.934
 (2) GPFR2399....	1/323	F2.8	100	148.229	0.489	1.096	183.934

Fig. 172. In figura i parametri di orientamento interno ed esterno stimati dal software utilizzando desunti tramite *Self Stitching Processing*. I fotogrammi acquisiti dalla *Camera Front* e *Camera Back* vengono considerati come acquisiti dalla stessa camera, con la conseguenza che i parametri di orientamento interno sono stimati erroneamente una volta soltanto.

Analizzando i punti omologhi riconosciuti in modo automatico dal software possiamo notare che quelli trovati risultano corretti e appaiono come aspettato nelle parti esterne delle immagini, tuttavia, in alcune aree delle immagini (vedere le aree riquadrate in rosso), nelle quali visivamente si possono identificare delle aree di overlap, essi non sono stati riconosciuti. Per ovviare questi problemi si è provato ad utilizzare una procedura semi-automatizzata di riconoscimento tramite l'analisi geometrica che consiste nell'identificare sulle immagini l'area su cui effettuare un riconoscimento di maggior dettaglio.

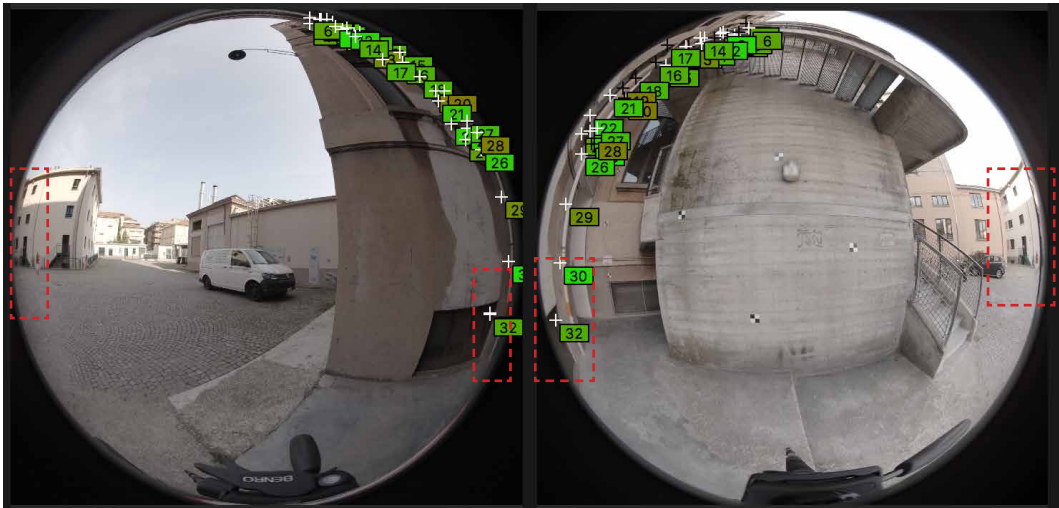


Fig. 173. In figura i punti omologhi riconosciuti tra le immagini. Si osservino le zone riquadrate in rosso dalle quali si può riconoscere la presenza di aree di sovrapposizione non correttamente riconosciute.



Fig. 174. In figura i punti omologhi riconosciuti tra le immagini aggiunti tramite la procedura semi-automatizzata di riconoscimento tramite analisi geometrica.

Dopo avere aumentato il numero di punti omologhi fra le immagini si è proceduto all'ottimizzazione dei dati per andare a correggere i parametri interni ed esterni precedentemente calcolati, che vengono come precedentemente segnalato applicati in modo analogo tra le immagini (nel prossimo paragrafo sarà analizzata con dettaglio questa problematica). A causa di questi fattori l'elaborazione del panorama è affetta da importati problematiche e distorsioni marcate di carattere non trascurabile.

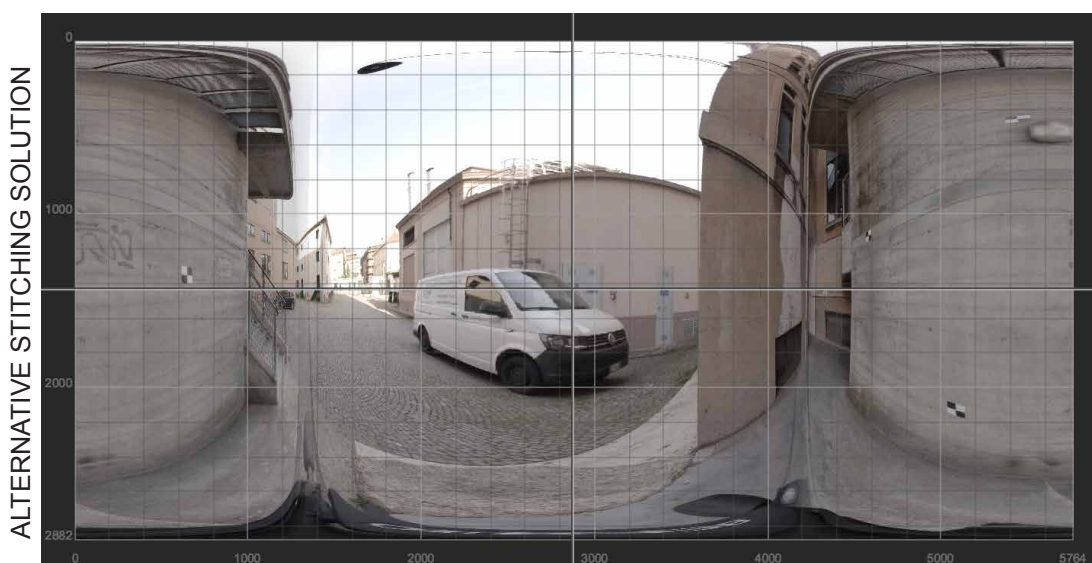


Fig. 175. Anteprima della proiezione del panorama prima del rendering. Si noti l'importante presenza di distorsioni sulle immagini.



Fig. 176. Panorama realizzato tramite il software proprietario GoPro Studio confrontato con l'elaborazione automatizzata di Autopano Giga 4.4 visibile in fig. 27.



		Focale	Focale calcolata	K1	K2	K3	Offset X	Offset Y
	(1) GPBK2399....	11.00...	9.581mm	0.900	0.900	0.000	0.62	-1.91
	(2) GPFR2399....	11.00...	9.581mm	0.900	0.900	0.000	0.62	-1.91

Fig. 177. In figura i parametri di orientamento interno ed esterno stimati dal software desunti tramite *Self Stitching Processing* dopo l'aggiunta semi-automatica dei punti di controllo e la successiva ottimizzazione.

3.4.4. Modifica *Exif* e correzione della lunghezza focale

Per cercare di correggere le problematiche affrontate nel corso del paragrafo precedente si è proceduto con la modifica dei dati *Exif* di una delle due camere. In tal modo, infatti, modificando manualmente il nome attribuito al modello di camera in uno dei due fotogrammi esso è riconosciuto come differente e conseguentemente i parametri interni di camera sono stimati in modo indipendente. Per ottenere questi obiettivi è stato utilizzato il software *Analog Exif* attribuendo il nome *Fusion Front* e *Fusion Back*. Inoltre si è proceduto con correggere manualmente i valori relativi alla lunghezza focale contenuti nell'*exif* con quelli esito della stima ottenuta nella fase di calibrazione precedentemente illustrata. Si è pertanto intervenuto modificando i parametri indicati come segue:

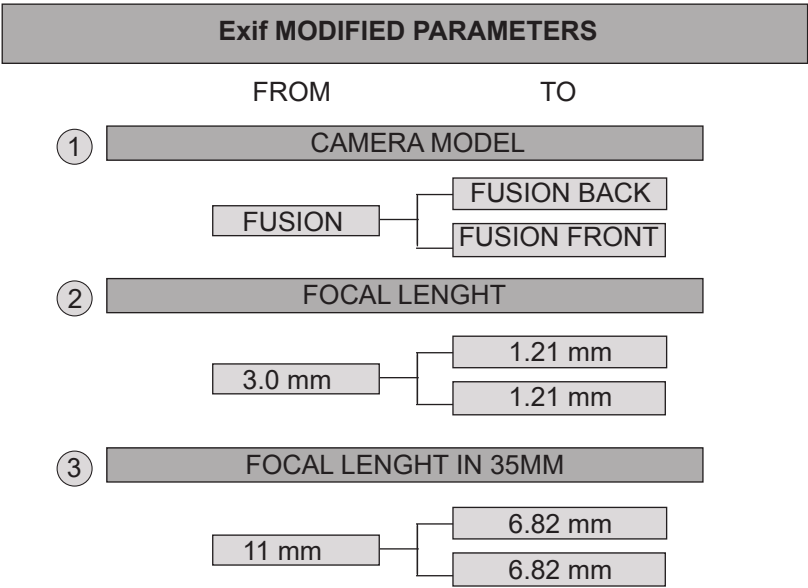


Fig. 178. Nello schema sono riportate le modifiche che sono state eseguite sugli *exif* per i fotogrammi oggetto di questo studio.

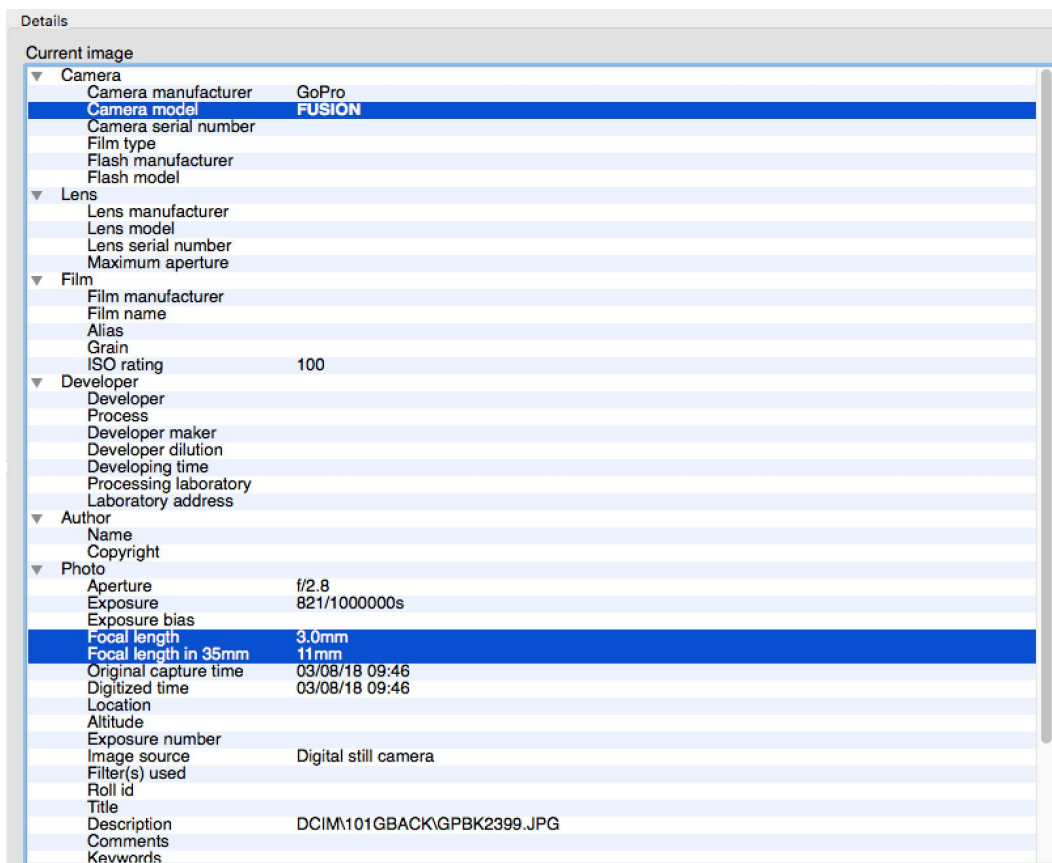


Fig. 179. In figura un esempio di visualizzazione dei dati *exif* per un fotogramma campione tramite il software *Analog Exif*. In blu sono evidenziati i valori che sono stati oggetto di modifica.

Successivamente alla modifica di questi parametri si è proceduto al salvataggio dei fotogrammi e al caricamento degli stessi nel software di *stitching* *AutoPano Giga* in modo da valutare l'impatto di tali modifiche sulla realizzazione dei panorami.

All'interno del programma sono stati effettuati due test: il primo è stato quello di effettuare una valutazione dei risultati di *Self Estimation*, (ovvero la stima automatica realizzata dal software) dei parametri interni paragonata a quelli precedentemente stimati, il secondo invece è stato quello di verificare la riuscita del panorama a seguito dell'inserimento manuale delle coordinate del punto principale e dei coefficienti di distorsione radiale precedentemente stimati (*Manual Correction*).

Per quanto riguarda la lunghezza focale equivalente al 35 mm, in fase di modifica il file *exif* non supporta per questo valore la presenza di cifre decimali, ne consegue che il valore inserito nei *metadati* risulti un'approssimazione. Per tale motivo questo valore è stato ulteriormente corretto all'interno del software tramite uno strumento che consente di determinare il valore di questo parametro inserendo come input il valore della lunghezza focale espressa in millimetri e del *crop factor* calcolato. Al momento della correzione il programma segnala che non è in grado di riconoscere il modello di camera in esame non risultando nel suo database. A tale proposito, nel corso di questa ricerca si è provveduto a condividere con gli sviluppatori i valori stimati relativi alla camera in questione in modo che questi possano essere resi disponibili con un futuro aggiornamento del programma con l'obiettivo di semplificare il più possibile tale processo per i fruitori.

Dopo avere eseguito tali correzioni si è avviato il processo automatico di *stitching* in modo da valutarne i risultati ottenuti. Al termine del processo, i parametri interni risultano questa volta stimati come da attese due volte. Tuttavia, il software genera errori macroscopici nella fase di connessione delle

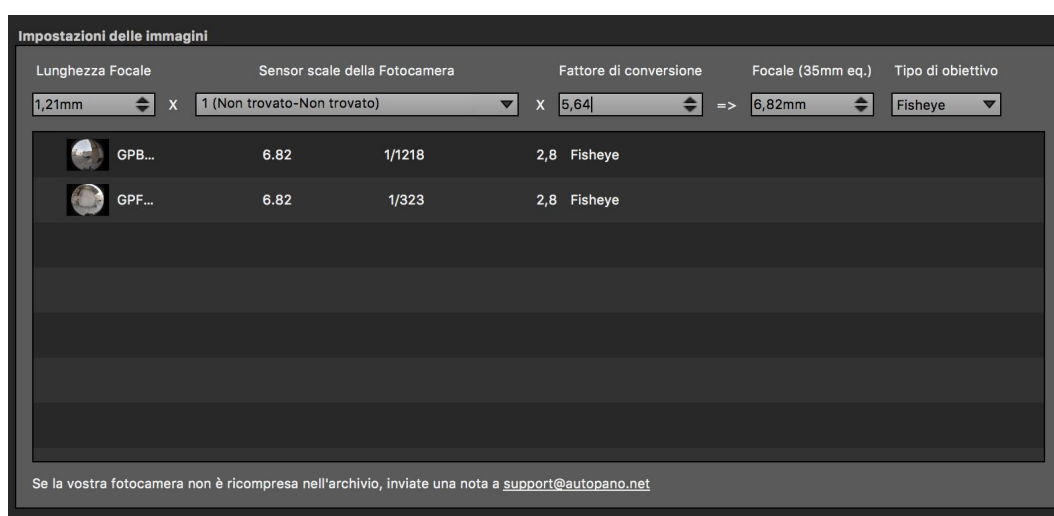


Fig. 180. Nella figura la schermata di Autopano Giga che consente di calcolare e correggere il valore della lunghezza focale 35mm equivalente per mezzo dell'ausilio del fattore di conversione (*crop factor*) e della lunghezza focale espressa in mm.

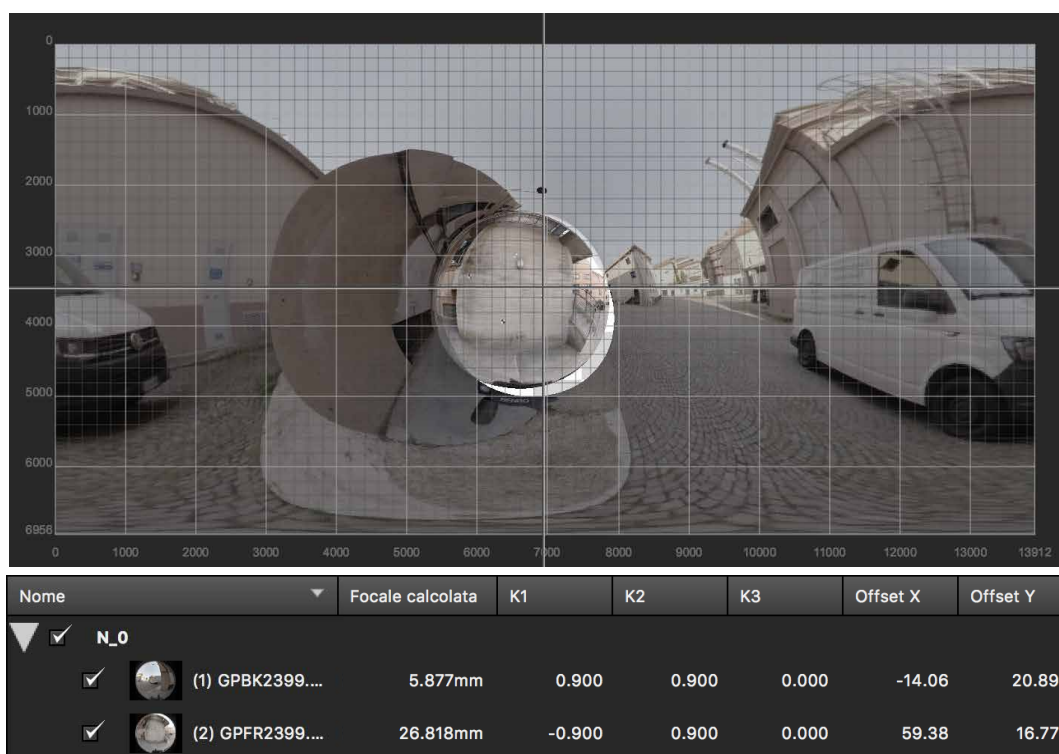


Fig. 181. Nella figura sono mostrati il risultato delle unioni delle immagini dopo la correzione degli exif. Si possono osservare errori significativi nello *stitching* delle immagini oltre che valori stimati in modo errato per quanto riguarda i parametri di orientamento interno.



Fig. 182. Nella figura sono mostrati il risultato delle unioni delle immagini dopo la correzione degli exif e a seguito del processo di ottimizzazione eseguito sui risultati della figura precedente. Si possono osservare miglioramenti significativi nello *stitching* delle immagini oltre che l'eliminazione dei valori *outliers* dei parametri di orientamento interno.

immagini (si faccia riferimento alla figura 181). I parametri di orientamento interno, infatti, seppure stimati due volte presentano valori molto distanti da quelli stimati precedente in fase di calibrazione e considerabili, pertanto, come errori di stima (si osservino ad esempio i valori della lunghezza focale e delle coordinate del punto principale della *Camera Front*).

Si è scelto, per tali considerazioni, di andare a valutare con maggiore attenzione i punti di connessione stimati e procederne alla ricerca di nuovi tramite il processo semi-automatico di riconoscimento tramite analisi geometrica, (come avvenuto negli esperimenti illustrati precedentemente) dal momento che, si reputa che tali errori possano derivare principalmente dal numero esiguo di punti trovati. Nonostante i punti di connessione identificati appaiano compatibili con quelli osservabili in figura 173, il processo di raffittimento dei punti nelle aree indicate dal tratteggio in rosso questa volta fallisce non riuscendo a determinare punti validi nelle aree di ricerca.

Una delle scelte di questo studio è stata quella di non utilizzare procedure interamente manuali di *matching* tra i punti di sovrapposizione in quanto, seppur potenzialmente risolutori, risulterebbero non compatibili con gli intenti di questo lavoro, ovvero quello di ottenere dati tridimensionali tramite l'utilizzo di immagini sferiche in tempi il più possibile contenuti. Essendo le procedure manuali dispendiose in termini di tempistiche e necessitando nei processi di *Structure From Motion* di un numero importante di fotogrammi per raggiungere gli obiettivi prefissati, si è scelto di ricercare soluzioni che permettano un controllo utente sui dati ottimizzando il più possibile le tempistiche.

Sebbene, pertanto, le procedure di raffittimento semi-automatiche non abbiano contribuito a determinare nuovi punti utili, si è proceduto ad ottimizza-

re i parametri esito del calcolo precedente ottenendo un importante miglioramento in termini di resa grafica della proiezione generata oltre che valori dei parametri di orientamento interni senza la presenza di errori macroscopici (confrontare Fig.181-182).

Nel prossimo paragrafo si procederà come ultimo test all'inserimento manuale dei parametri di orientamento interno precedentemente calcolati in fase di calibrazione sulla base dei risultati di questo paragrafo.

3.4.5. Inserimento manuale dei parametri di orientamento interno sui fotogrammi con *exif* e focale modificati

Sulla base dei risultati raggiunti dopo le modifiche sui file *exif* illustrati nel paragrafo precedente si è provato ad inserire i valori stimati in fase di calibrazione sulle due camere oggetto di studio, procedendo quindi all'inserimento dei valori relativi alle coordinate del punto principale e dei coefficienti di distorsione radiale k_1 , k_2 , k_3 opportunamente convertiti (si faccia riferimento alla tabella 33). Una problematica ulteriore e non trascurabile è rappresentata dal fatto che risulta possibile inserire questi valori solamente dopo la fase di calcolo del programma. Ne consegue che qualora il programma non riesca ad effettuare una connessione tra le immagini (seppur errata) non c'è modo di andare a modificare questi parametri. Solo in caso in cui il programma identifichi una connessione tra i fotogrammi, infatti risulta possibile agire nella modifica di questi valori. Questo fatto rappresenta un'importante limitazione non trascurabile. Spesso infatti, proprio a causa della mancanza di tali informazioni, il processo di *stitching* fallisce non riuscendo a connettere le immagini o restituendo un risultato errato o impreciso.

L’inserimento manuale contribuisce, infatti, ad un miglioramento significativo della proiezione limitando le distorsioni evidenti delle immagini ottenute con i metodi descritti nei paragrafi precedenti.

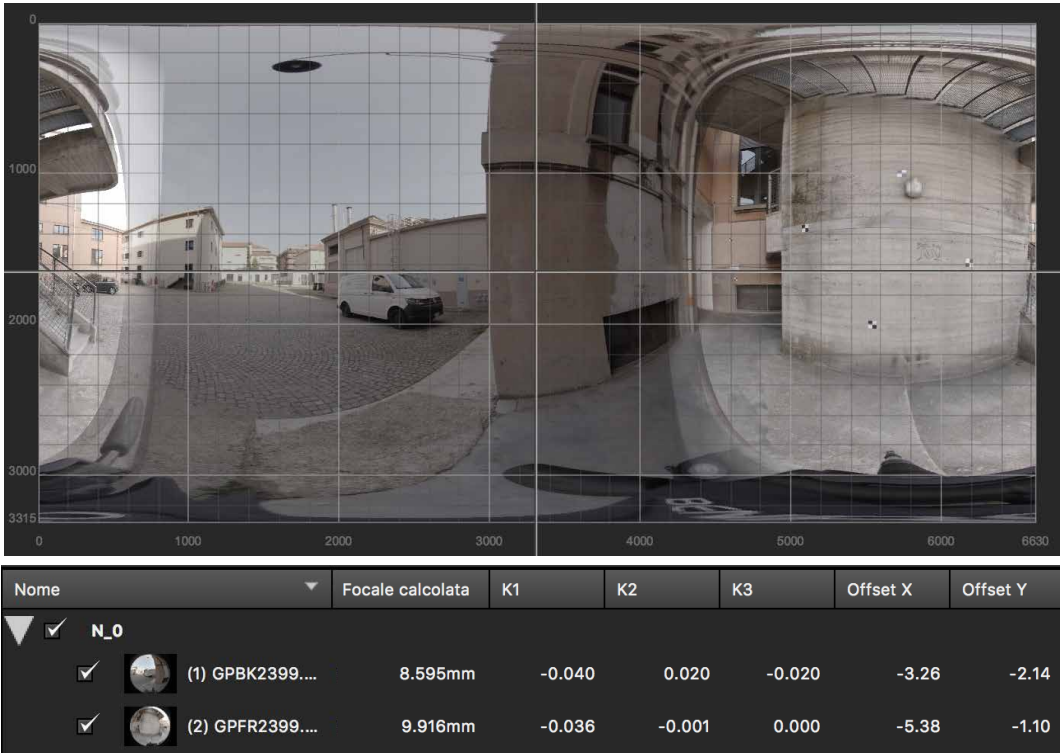


Fig. 183. Nella figura sono mostrati il risultato delle unioni delle immagini dopo la correzione degli *exif* e la correzione manuale dei parametri di orientamento interno utilizzando quelli stimati attraverso la calibrazione della camera. Si possono osservare miglioramenti significativi nella proiezione generata utilizzando tali valori. Si noti che l’esposizione differente viene corretta in fase di rendering della proiezione. Sono tuttavia ancora presenti errori, seppur minori, nella proiezione.

3.4.6. Considerazioni sui processi di *stitching* alternativi

Come facilmente desumibile dall'analisi dei risultati esposti nelle pagine precedenti, i metodi di *stitching* alternativi se da un lato garantiscono un controllo più accurato sul processo di connessione delle immagini (permettendo di intervenire in modo mirato sui parametri di orientamento), dall'altro risultano per il modello di camera in esame non sufficientemente sviluppati e con evidenti problematiche. La soluzione attualmente più performante risulta l'utilizzo del software proprietario *GoPro Studio* che, pur non permettendo un controllo delle fasi del processo (essendo realizzato per un target di utenza non specializzata), ha permesso di ottenere ottimi risultati in tutti i test eseguiti, risultando una soluzione valida per la connessione di questo tipo di fotogrammi. Per quanto anche con metodi alternativi sia stato possibile ottenere risultati incoraggianti, non si reputano allo stato attuale validi per gli scopi di questo studio. La corretta realizzazione dei panorami infatti è condizione necessaria alla riuscita delle ricostruzioni tridimensionali che utilizzando immagini sferiche.

Nel corso dei prossimi paragrafi si illustreranno i risultati di processi fotogrammetrici da terra e in quota testando l'utilizzo delle proiezioni equirettangolari generate con *GoPro Fusion Studio* e metodi alternativi di utilizzo basati sull'utilizzo dei fotogrammi *fisheye* separati, ma considerati come punto di stazione acquisito dal medesimo punto o ancora l'uso dei fotogrammi separati andando ad utilizzare la funzione camera multi-spetteale di *Pho-toscan* che permette di considerare un offset tra le immagini acquisite in configurazioni *rig a distanza* fissi.

3.5. Valutazione della sovrapposizione tra i fotogrammi

La percentuale di sovrapposizione tra i fotogrammi è un dato molto rilevante dal momento che influisce in modo significativo nel processo di unione delle immagini poiché i punti di connessione vengono determinati solamente nelle porzioni di sovrapposizione. La stima delle aree di *overlap* tra i fotogrammi ha richiesto nuovamente di ricorrere a soluzioni alternative rispetto al software *GoPro Fusion Studio* dal momento che quest'ultimo non restituisce tale valore. Nell'effettuare questa stima è importante tenere conto che essa è stata determinata in modo empirico e ricorrendo ad un'analisi visiva dei fotogrammi. Questo perché, sebbene programmi come *Autopano Giga* o *Hugin* restituiscano un valore di *overlap* stimato esso non è stato in alcuni casi ritenuto attendibile a causa degli errori descritti nei paragrafi sui processi di *stitching* alternativi. Per ottenere questo valore sono state analizzate differenti coppie di fotogrammi per le quali è stato richiesto al software, dopo avere compiuto i passaggi illustrati precedentemente, di effettuare l'unione delle immagini senza intervenire sulla correzione dei colori e dell'esposizione. Il risultato è la presenza delle aree di sovrapposizione visibili nelle immagini come una banda più scura. Orientando opportunamente i



Fig. 184. In evidenza l'area di sovrapposizione (enfaticizzata) tra le immagini utilizzate per la determinazione della percentuale di sovrapposizione.

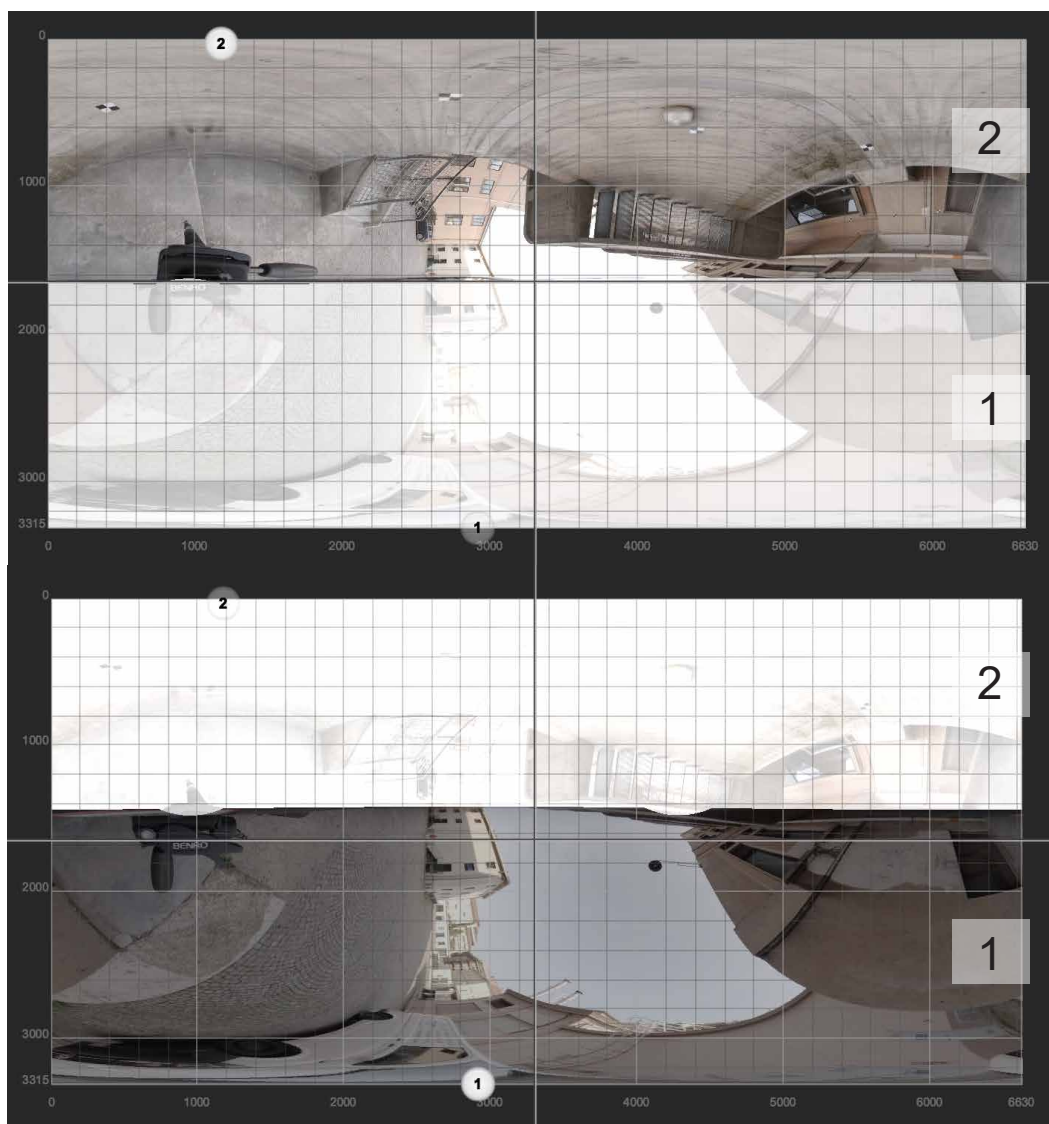


Fig. 185. Nelle immagini sono poste in evidenza nella proiezione equirettangolare i fotogrammi che la compongono.

panorami al fine di disporre la banda di sovrapposizione orizzontalmente è risultato possibile successivamente andare a calcolare l'area della stessa e rapportarla con le dimensioni dell'immagini. Dalle stime eseguite l'area di overlap stimata si attesta intorno al 6.5%.

	DIMENSIONE	AREA
PROIEZIONE COMPLETA [px]	9944 x 4972	49.441.568
AREA DI OVERLAP [px]	9944 x 327	3.251.688

OVERLAP STIMATO [-]	6.58 %
----------------------------	--------

Tab. 34. Nelle tabella si riporta a titolo esemplificativo i dati relativi alla stima del valore di sovrapposizione tra le immagini.

3.6. Applicazioni fotogrammetriche terrestri tramite immagini sferiche

L'utilizzo di immagini sferiche terrestri nei processi fotogrammetrici è ormai una pratica consolidata da numerosi studi nel settore in particolare citiamo quelli di G. Fangi (2006^I, 2007^{II}, 2010^{III}) . In questo capitolo verranno presentati i risultati relativi alle ricostruzioni tridimensionali ottenuti dalle elaborazioni dei dati acquisiti su un area di test. Il contributo di questa ricerca è quello di testare questa tecnologia tramite l'utilizzo del modello di camera commerciale a medio/basso costo utilizzato in questo studio per ricostruzioni 3D.

Uno di vantaggi ottenibili con questa tipologia di camera è quello di ridurre notevolmente il numero di fotogrammi per la riuscita del processo di ricostruzione ottenendo vantaggi concreti in tempi di presa sul campo e permettendo l'acquisizione anche ad utenti non esperti. Nell'esporre i risultati delle applicazioni di questa tecnica si procederà, analogamente a quanto svolto nelle elaborazioni dei fotogrammi *fish-eye*, alla valutazione delle ricostruzioni in termine di tensioni nei *target* e nei punti di controllo. Verrà, infine posta una comparazione tra le nuvole di punti ricostruite mediante elaborazioni con camera sferica (ovvero utilizzando i fotogrammi *fish-eye* uniti tramite *stitching* come illustrato nei capitoli precedenti) e quelle ottenute dall'elaborazione dei fotogrammi singoli prendendo in considerazione una delle due camere *fish-eye*. Saranno poi illustrati in modo dettagliato due casi studio per i quali sono state sperimentate ricostruzioni tramite questa tecnologia in sostituzione di immagini non sferiche e alla loro integrazione di differenti tipologie di dati.

Le prime analisi, tuttavia, sono state svolte nuovamente sull'area del poligono di calibrazione così da garantire un confronto tra le nuvole di punti

delle elaborazioni esito dei processi di calibrazione di camera sugli obiettivi *fish-eye*.

A seguito delle considerazioni sui processi di *stitching* alternativo delle immagini illustrate nei capitoli precedenti è stato scelto di effettuare questi primi test utilizzando le proiezioni sferiche realizzate con il software proprietario in quanto è quello che ha fornito i migliori risultati in termini di unione dei fotogrammi.

I test sono stati compiuti realizzando una nuova acquisizione sul poligono di calibrazione avvalendosi del supporto di un cavalletto fotografico in modo da consentire un supporto stabile ad un altezza di circa 1,50 metri dal terreno. Per effettuare gli scatti è stato utilizzato un *tablet* connesso tramite *Wi-Fi* alla camera al fine di potere eseguire gli scatti da distanza al fine di non comparire nei fotogrammi sferici.

In fase di acquisizione si è posta attenzione a fare sì che l'asse ottico di una delle due camere fosse il più possibile ortogonale alle superfici di parete più rilevanti e ad eseguirle parallelamente a tali superfici variando soltanto la distanza dalle stesse. Nello specifico è stata eseguita una campagna di acquisizione nella quale sono state eseguite 106 immagini (rispettivamente 53 con la *Camera Front* e 53 con la *Camera Back*) per un totale di 53 proiezioni equi-rettangolari. Su questi dati sono state realizzate più analisi: in un primo momento si è scelto di procedere con l'allineamento di tutti i fotogrammi e l'inserimento delle coordinate dei *marker* e successivamente si è ripetuto il processo di elaborazione riducendo progressivamente il numero di fotogrammi analizzando di volta in volta i risultati ottenuti. In ognuna delle elaborazioni sono stati inseriti i 16 *target* topografici di coordinate note il cui calcolo è stato illustrato nel capitolo precedente.

3.7. Differenti metodologie di processamento dei fotogrammi sferici

La realizzazione di processi di *Structure From Motion* dei dati sferici può essere eseguito utilizzando differenti metodologie: è possibile andare a processare le immagini come sferiche, ovvero usando i dati generati attraverso il processo di *stitching* (secondo tipologie di proiezione differenti in base al software utilizzato ma, nella maggior parte dei casi, utilizzando la proiezione equirettangolare), oppure mantenere le coppie di fotogrammi *fisheye* scollegate avendo tuttavia cura di indicarle manualmente come coppie che sono state acquisite dal medesimo punto di stazione e da considerare pertanto come connesse in fase di calcolo. Nel corso dei prossimi paragrafi verranno illustrate in modo dettagliato le due metodologie di processamento dei dati e si proporrà un confronto tra le due metodologie tramite il controllo delle tensioni nei target.

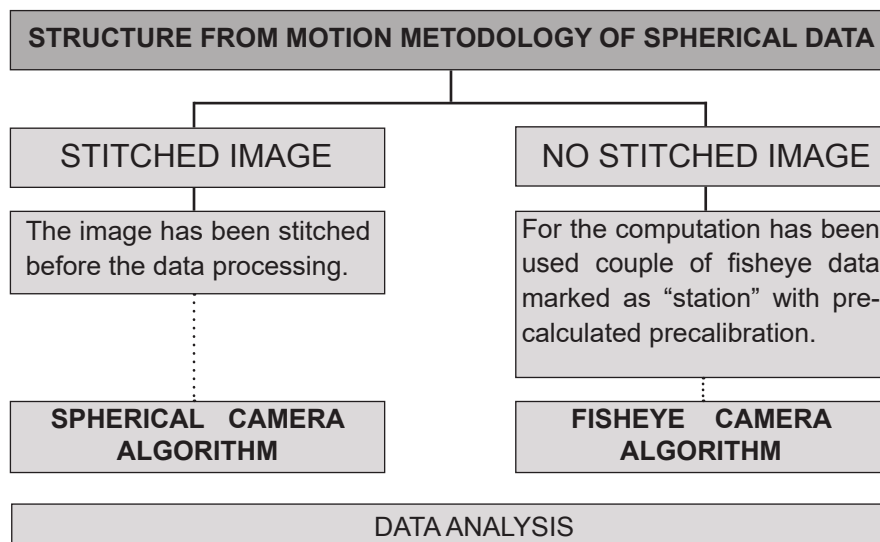


Fig. 186. Nello schema illustrate le differenti possibilità di elaborazione dei fotogrammi. In un caso sono utilizzate le proiezioni planari equirettangolari dei panorami elaborate tramite processi di stitching dei fotogrammi fisheye, nell'altro l'elaborazione avviene direttamente su fotogrammi fisheye senza passare dalla loro unione ma assegnando loro la caratteristica di punto di stazione di scatto condivisa.

3.7.1. Processamento dei fotogrammi sferici

La prima tipologia di analisi che è stata svolta è stato il processamento delle proiezioni equirettangolari ottenute tramite le procedure di *stitching* illustrate nel corso dei paragrafi precedenti attraverso l'utilizzo del software proprietario *GoPro Studio*. I fotogrammi sono stati processati impostando come tipologia di camera il modello sferico come si può osservare nell'immagine seguente. Questa operazione è risultata condizione necessaria per

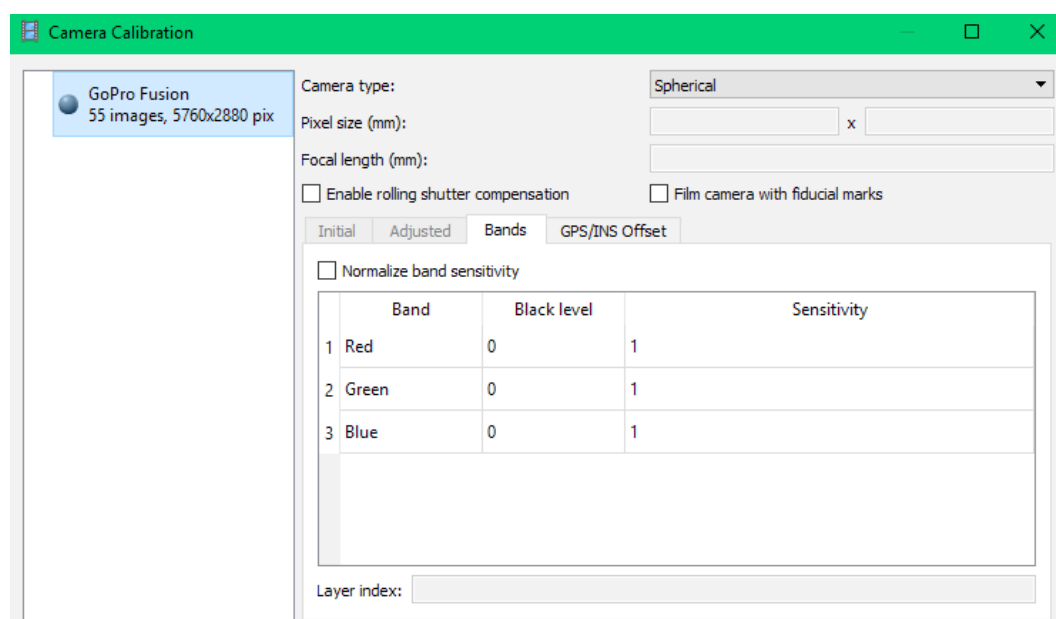


Fig. 187. Nell'immagine la schermata di selezione del *camera type* che è necessario impostare su *Spherical* per processare correttamente la tipologia di fotogrammi illustrata in questo paragrafo.

la corretta riuscita del processo e del relativo corretto allineamento dei fotogrammi. I fotogrammi processati sono stati 53 e sono stati tutti allineati con successo (come si può osservare in fig. 187). Appare chiaro che la posizione dei punti di presa non ha seguito volutamente un percorso pianificato, questo per simulare il rilievo da parte di un operatore non esperto e in una fase di acquisizione speditiva. L'unica accortezza adottata è stata quella di disporre gli obiettivi parallelamente alle pareti principali al fine di minimizzare l'uso delle aree di connessione in quanto più affette da distorsioni per la ricostruzione delle geometrie principali. Utilizzando l'algoritmo di calcolo



Fig. 188. Test ricostruzione tridimensionale utilizzando tutti i fotogrammi sferici acquisiti, nello specifico 53 proiezioni equirettangolari generate a partire da 106 fotogrammi *fisheye*.

relativo alle camere sferiche si può osservare come l'allineamento delle prese risulti correttamente eseguito. I processi di calcolo appaiono inoltre molto più veloci rispetto alle elaborazioni dei soli dati relativi ai fotogrammi *fisheye*, questo fatto è principalmente conseguenza della riduzione drastica del numero di fotogrammi.

Se da una parte i risultati appaiono convincenti, tuttavia, è importante sottolineare diverse criticità relative all'utilizzo di questa tipologia di dati. In primo luogo la qualità del modello tridimensionale restituito è funzione della risoluzione delle camere dalle quali esso è generato. Per questo motivo come precedentemente trattato (si faccia riferimento al paragrafo 2.9.3) all'aumentare della distanza tra l'oggetto e il punto di presa la qualità della geometria ricostruita cala drasticamente. Ne consegue che per la tipologia di camera in questione per distanze superiori ai 10/15 metri si evince un peggioramento dei dati significativo e non trascurabile. In linea generale si può definire che per distanze inferiori ai 10 metri tra la camera e l'oggetto

la ricostruzione sarà compatibile con una rappresentazione in scala 1:100 o maggiore, mentre, aumentando la distanza di presa, potrebbe essere necessario effettuare un passaggio di scala al 200 o al 500.

Non solo, i modelli generati utilizzando gli algoritmi che permettono l'utilizzo di camere sferiche, se da un lato risultano in grado di allineare senza difficoltà i fotogrammi, allo stesso tempo, generano nuvole di punti decisamente più rumorose e meno precise rispetto a quelle ottenibili con l'uso di camere tradizionali. Questo problema appare più marcato in caso di immagini sferiche sovrabbondanti. Dagli esempi che saranno illustrati in questo paragrafo si può osservare che la riduzione dei panorami produce nuvole meno dense ma meno affette da problemi di rumorosità.

L'intero processo di utilizzo di queste tipologie di dati produce errori nei *target* ed errori di riproiezione stimati leggermente più elevati rispetto alle elaborazioni viste nei capitoli precedenti ma sufficientemente bassi per soddisfare i criteri prefissati per l'utilizzo degli stessi per l'estrazione di dati dimensionali dai modelli. Questi problemi potrebbero essere dovuti al fatto che le proiezioni equirettangolari hanno subito un processo di *stitching* che comporta già da solo errori che, seppur minimi, si sommano a quelli generati dalla stima dell'orientamento esterno e interno delle camere nel processo di fotogrammetrico.

In questo studio nell'ottica di testare a fondo le potenzialità di questo sistema si è proceduto con la riduzione progressiva del numero di immagini fino al numero minimo per ottenere un risultato utile. Questa scelta è stata dettata dal fatto di testare l'utilizzo delle camere sferiche per il *rapid mapping* con la finalità di ottenere informazioni geometriche in tempi brevi. Si illustrerà nel dettaglio, nel capitolo riguardante i casi studio, l'utilizzo di un numero ridotto di immagini sferiche in utilizzo congiunto con tipologie di fotogrammi acquisiti da fotocamere tradizionali. Si illustreranno, infatti, soluzioni che

utilizzeranno questi sensori *fisheye* a bordo di veicoli a pilotaggio remoto, indagandone le potenzialità e i limiti. Ridurre al minimo il numero di immagini, rappresenta un risparmio non trascurabile in termini di tempistiche di acquisizione sul campo e di elaborazione dei dati.

3.7.2. Acquisizioni terrestri delle proiezioni sferiche sul poligono di calibrazione

I test sono stati condotti riducendo progressivamente il numero dei panorami sferici partendo dall'uso di tutti i dati forniti sul campo (53 immagini) e arrivando progressivamente ad una riduzione superiore al 75%. Si riportano i risultati ottenuti dalle ricostruzioni ottenute elaborando n° 53, 30, 17 e 12 immagini sferiche.

Come si può osservare in figura 189 il processo automatico di estrazione dei *tie point* risulta accurato e gli unici erroneamente estratti nelle porzioni di cielo non vengono considerati per i processi successivi (punti di colore bianco). Allo stesso modo i punti estratti nelle porzioni immagine basse che ritraggono il cavalletto di supporto sono stati correttamente ignorati rendendo superflua la mascheratura manuale di queste aree nei panorami permet-

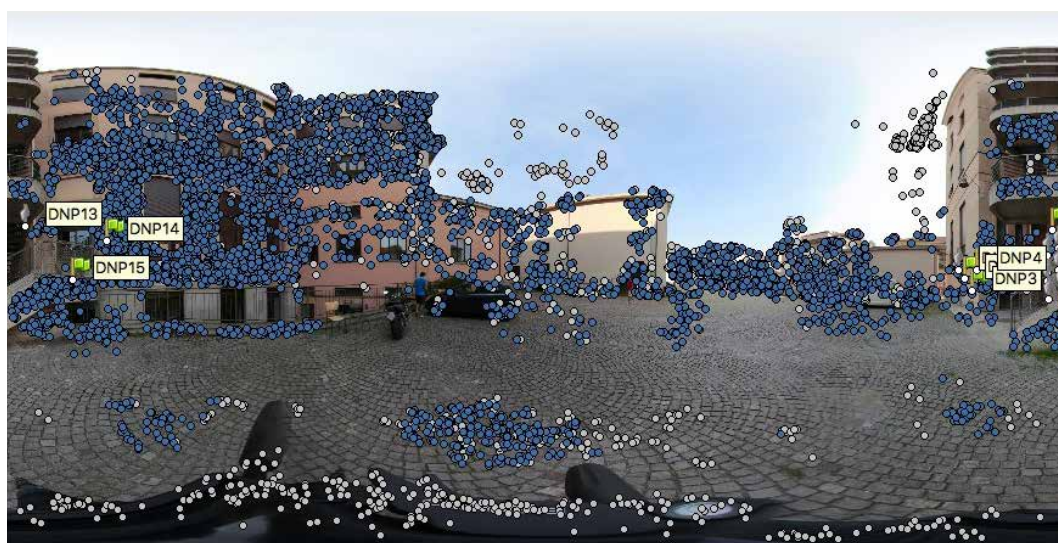


Fig. 189. Un esempio di *tie point* estratti in una proiezione sferica utilizzata nel processo.

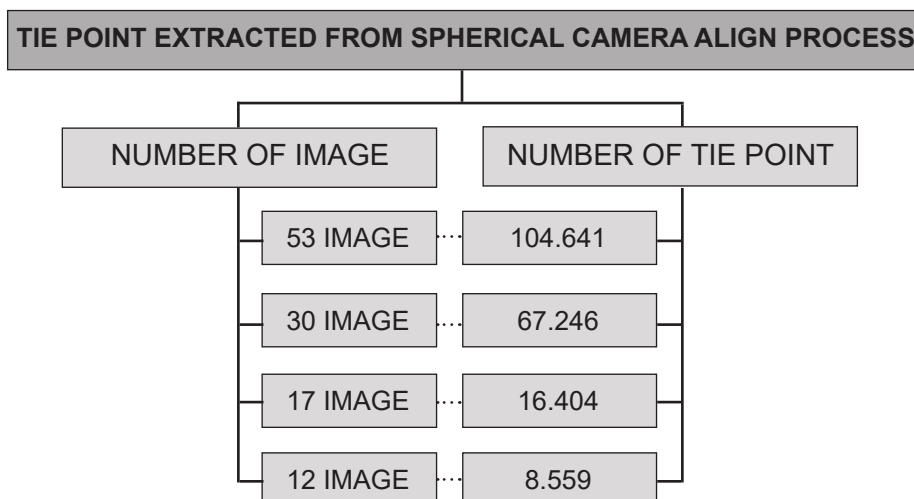


Fig. 190. Relazione tra il numero di *tie point* estratti e il numero di fotogrammi relativi alle proiezioni equirettangolari del poligono di calibrazione.

tendo un ulteriore risparmio in termini di tempistiche.

Osservando i grafici riportati appare evidente che il numero di *tie point* estratti risulti direttamente proporzionale al numero di immagini. Passando da 53 a 12 fotogrammi il numero di *tie point* si riduce di circa il 92%. Tuttavia, anche le tempistiche dei processi di allineamento (estrazione *tie points*, *matching* e allineamento camere) si riduce in modo significativo. Osservando la tabella riepilogativa si può osservare che un numero medio basso di panorami permette di contenere le tempistiche sia di processamento che di acquisizione sul campo, garantendo allo stesso tempo errori di riproiezione

N°	ALLINEATE	TIE POINT	DENSE CLOUD	REPROJECTION ERROR	ALIGNMENT TIME
53	53/53	104.641	12.704.512	1.73 pix	10 min 42 sec
30	30/30	67.246	7.888.899	1.16 pix	20 min 30 sec
17	16/17	16.404	18.805.707*	1.26 pix	4 min 7 sec
12	10/12*	8.559	11.601.561*	2.69 pix	36 sec

Tab. 35. Nella tabella una comparazione tra le analisi svolte al variare del numero di immagini.

*Settaggio *Ultra High* a causa del numero esiguo di fotogrammi. Le altre elaborazioni sono state svolte con settaggio *High* su *Agisoft Photoscan Professional*.

sufficientemente bassi. Nei processi di ricostruzione con 17 e 12 fotogrammi si è scelto di effettuare il processo di densificazione andando ad aumentare la qualità della stessa al fine di raggiungere un risultato più accurato in tempi tutto sommato contenuti a causa del ridotto numero di fotogrammi.

Risultati incoraggianti per questo tipo di tecnologia sono osservabili da un'analisi relativa alle tensioni sui target per ognuna delle quattro analisi effettuate.

GROUND CONTROL POINTS ERROR ESTIMATES					
N° IMAGE	X ERROR (CM)	Y ERROR (CM)	Z ERROR (CM)	XY ERROR (CM)	TOTAL (CM)
53	0.64	1.19	0.39	1.35	1.41
30	0.66	1.16	0.37	1.34	1.39
17	0.64	0.64	0.32	0.91	0.96
12	1.47	4.26	1.94	4.51	4.91

Tab. 36. Valori degli errori stimati *control points* espressi in centimetri per i differenti test effettuati con le proiezioni sferiche.

CHECK POINTS ERROR ESTIMATES					
N° IMAGE	X ERROR (CM)	Y ERROR (CM)	Z ERROR (CM)	XY ERROR (CM)	TOTAL (CM)
53	0.98	0.79	0.65	1.26	1.41
30	1.43	1.02	0.72	1.75	1.89
17	1.26	0.65	0.60	1.42	1.54
12	4.31	6.92	1.92	8.16	8.37

Tab. 37. Valori degli errori stimati nei *check points* espressi in centimetri per i differenti test effettuati con le proiezioni sferiche.

53 IMMAGINI



17 IMMAGINI



12 IMMAGINI



Fig. 191. Ricostruzioni fotogrammetriche attraverso l'utilizzo di panorami sferici in numero decrescente e valutazione sulla qualità delle nuvole di punti restituite. In alto la nuvola di punti generata da 53 immagini, in centro da 17 e in basso da 12.

3.7.3. Elaborazione dei dati *fisheye* come *station point*

L'utilizzo delle immagini *fisheye* separate al posto che l'utilizzo come proiezioni sferiche (in cui esse sono state connesse in una sola immagine) assolve diverse problematiche: in primo luogo, infatti, il ricoprimento resta il medesimo dei panorami realizzati tramite *stitching* ovvero 360°, ma non è necessaria la connessione delle stesse attraverso software esterni ed è possibile, inoltre, inserire i valori di calibrazione stimati sulle due camere di *GoPro Fusion*. Ciò significa che al posto della proiezione sferica sono inserite nel software due immagini distinte, ovvero le immagini generate simultaneamente dalle due camere *fisheye* al momento dell'acquisizione.

Questa soluzione permette di aggirare le problematiche generate dalla connessione delle immagini che, seppur dalle prove eseguite tramite l'uso del software proprietario *GoPro Fusion Studio* risultassero valide in termini visivi, non garantivano un controllo più accurato e approfondito sul processo che le ha generate. Dall'altro lato i metodi di connessione alternativi sperimentati, che permettevano di intervenire sui parametri interni non hanno portato al raggiungimento dei risultati sperati restituendo proiezioni imprecise.

Questa tipologia pertanto si pone in modo intermedio tra l'elaborazione di fotogrammi *fisheye* e quella di fotogrammi sferici: sono infatti utilizzati gli algoritmi della prima tipologia che risultano, allo stato attuale, più sviluppati e le immagini sono indicate come acquisite dal medesimo punto come accade nell'elaborazione delle immagini sferiche. Un altro vantaggio è rappresentato, inoltre, dalla possibilità di intervenire sui parametri di calibrazione delle due camere in modo indipendente permettendo non soltanto l'utilizzo dei certificati stimati (seguendo le metodologie trattate precedentemente) come precalibrazione ma, anche l'utilizzo della *Self Calibration* per la correzione

degli stessi valori attraverso il processo di ottimizzazione dell'allineamento. Gli stessi produttori del software utilizzato in questo lavoro (*Photoscan Professional Pro*) consigliano di elaborare i dati in questo modo:

"In case you are capturing panoramas with a rotated frame/fisheye camera, we recommend to process original images in PhotoScan using camera station function instead of stitching them in external software...If all the photos or a subset of photos were captured from one camera position - camera station, for PhotoScan to process them correctly it is obligatory to move those photos to a camera group and mark the group as Camera Station."^{IV}

Per quanto le premesse di utilizzo di questa metodologia di calcolo risultino le migliori, si sono riscontrati diversi problemi con l'utilizzo dei dati applicati al modello di camera preso in esame in questo studio.

Di seguito si illustra il *workflow* da seguire con il software *Agisoft Photoscan Professional* per l'utilizzo di questa tipologia di analisi:

1. Importazione di tutte le immagini.
2. Creazione e suddivisione in gruppi delle immagini per ogni punto di stazione. (Nel caso presentato ogni gruppo è composto da due fotogrammi *fisheye*, rispettivamente generati simultaneamente dalla *Camera Back* e *Camera Front*).
3. Modifica della tipologia di gruppo impostando "*station*" ad ognuno dei gruppi creati (fig. 192).
4. Inserimento dei dati di orientamento interno all'interno della schermata denominata "*Camera Calibration*" (fig. 193).
5. Allineamento delle prese.

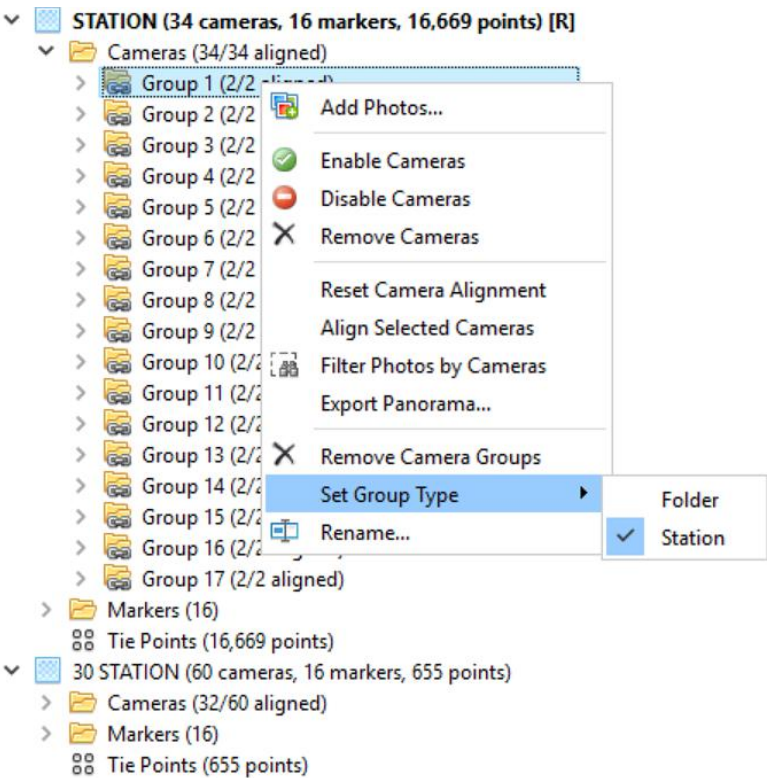


Fig. 192. Organizzazione di 34 immagini panoramiche in 17 gruppi. Ogni gruppo corrisponde ad una proiezione sferica.

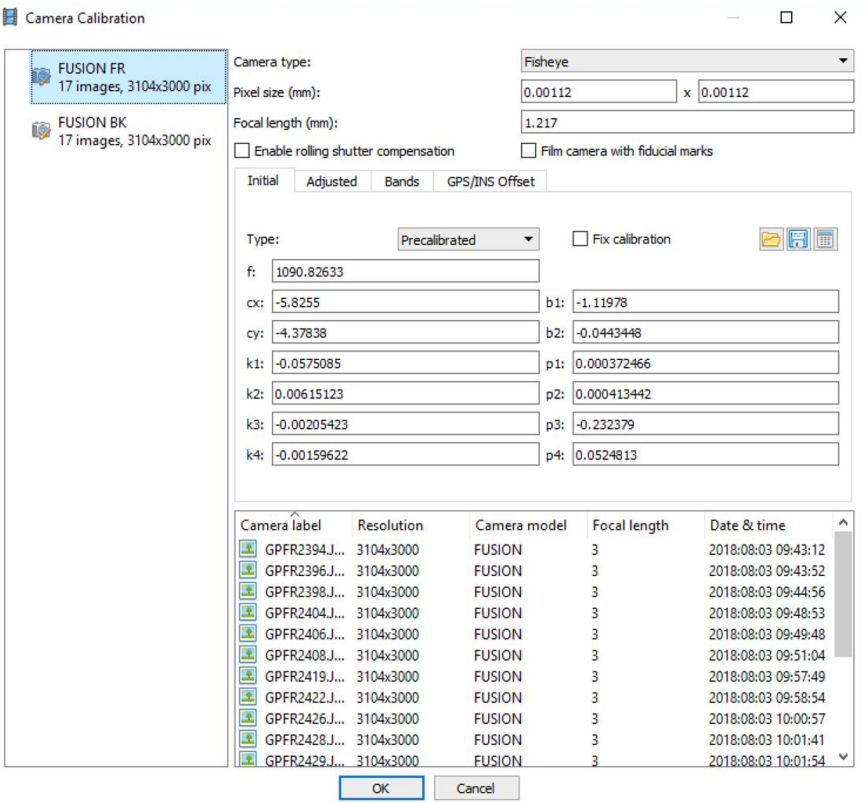


Fig. 193. Nell'immagine illustrata la possibilità utilizzando questo workflow di intervenire sulla calibrazione delle immagini relative alle due camere.

Si segnala che all'interno della schermata di *Camera Calibration* (fig. 193) inizialmente le immagini sono state riconosciute come appartenenti ad un solo modello di camera in quanto, (come approfondito nei paragrafi precedenti) la lettura avviene all'interno dei dati *exif* sulla base del *Camera Model*. Le possibilità da mettere in campo per ovviare queste problematiche possono essere: l'*editing* e la modifica delle informazioni relative al modello di camera per ogni immagine assegnando due nomi differenti per quelle eseguite dalla *Camera Front* e *Back* all'interno dei dati *exif*, oppure, più semplicemente, selezionando le immagini all'interno della schermata e creando un gruppo contenente tutti gli scatti per ogni camera. Successivamente è stato assegnato il relativo certificato di calibrazione stimato ad ognuno dei gruppi creati.

Attraverso questa metodologia di analisi sono stati replicate le prove precedentemente presentate sulle immagini sferiche.

A seguito di diversi test eseguiti, sono presentati, nelle successive tabelle i risultati ottenuti. Si cercherà di riassumere le principali anomalie riscontrate nell'elaborazione dei dati seguendo il *workflow* illustrato in questo paragrafo. L'utilizzo di questa tipologia di immagini *fisheye* ha generato da subito

N° STATION	ALLINEATE	TIE POINT	REPROJECTION ERROR	ALIGNMENT TIME
53	105/106	83.439	1.56 pix	7 min 00 sec
30	58/60	35.764	1.83 pix	2 min 09 sec
17	32/34	21.536	12.7 pix	6 min 50 sec
12	23/24	5.007	19.4 pix	3 min 25 sec*

Tab. 38. Nella tabella una comparazione tra le analisi svolte al variare del numero di immagini.

*Settaggio *Ultra High* a causa del numero esiguo di immagini. Le altre elaborazioni sono state svolte con settaggio *High* su *Agisoft Photoscan Professional*.

GROUND CONTROL POINTS ERROR ESTIMATES					
N° IMAGE	X ERROR (CM)	Y ERROR (CM)	Z ERROR (CM)	XY ERROR (CM)	TOTAL (CM)
53	2.42	3.78	1.31	4.49	4.68
30	0.60	1.64	0.48	1.75	1.82
17	1.16	1.35	0.66	1.78	1.90
12	1.32	3.03	1.10	3.30	3.48

Tab. 39. Valori degli errori stimati *control points* espressi in centimetri per i differenti test effettuati con l'uso del settaggio *camera station* e i fotogrammi *fisheye* separati.

CHECK POINTS ERROR ESTIMATES					
N° IMAGE	X ERROR (CM)	Y ERROR (CM)	Z ERROR (CM)	XY ERROR (CM)	TOTAL (CM)
53	4.45	2.47	2.23	5.09	5.56
30	0.77	1.63	1.06	1.80	2.09
17	2.12	2.10	0.70	2.98	3.06
12	2.28	1.81	0.84	2.91	3.03

Tab. 40. Valori degli errori stimati nei *check points* nei punti di controllo espressi in centimetri per i differenti test effettuati.

delle problematiche in fase di elaborazione. Nello specifico *Agisoft PhotoScan* in alcune occasioni restituisce risultati differenti a parità di settaggio e sui medesimi *dataset*. Eseguendo l'elaborazione più volte e analizzando le tensioni nei punti di controllo si osservano variazioni non trascurabili che oscillano tra errori centimetrici fino a diversi metri. Non solo, in diversi casi il software non risulta in grado di estrarre correttamente i *tie point*, il cui numero risulta variabile. Si illustra nella pagina seguente un esempio di quanto appena descritto.

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> DNP12	106.796000	118.314000	102.992000	0.005000	7717.826177	9	408.644
<input checked="" type="checkbox"/> DNP1	98.668000	117.918000	102.408000	0.005000	1012.241259	9	274.675
<input checked="" type="checkbox"/> DNP16	107.835000	117.468000	100.791000	0.005000	202.083488	5	714.301
<input checked="" type="checkbox"/> DNP2	100.108000	117.895000	101.758000	0.005000	4.867054	8	208.704
<input checked="" type="checkbox"/> DNP15	109.189000	118.828000	101.464000	0.005000	4.681777	6	453.072
<input checked="" type="checkbox"/> DNP10	105.977000	118.928000	101.516000	0.005000	1.814034	11	802.835
<input checked="" type="checkbox"/> DNP11	105.245000	119.702000	100.801000	0.005000	1.401120	9	467.871
<input checked="" type="checkbox"/> DNP9	105.418000	119.488000	102.543000	0.005000	0.951069	10	166.460
<input checked="" type="checkbox"/> DNP8	104.665000	120.277000	101.921000	0.005000	0.609635	7	94.009
Total Error							
Control points					inf		542.613
Check points							

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> DNP8	104.665000	120.277000	101.921000	0.005000	0.023113	7	2.124
<input checked="" type="checkbox"/> DNP6	103.113000	122.842000	102.282000	0.005000	0.022458	11	2.628
<input checked="" type="checkbox"/> DNP10	105.977000	118.928000	101.516000	0.005000	0.020959	11	2.266
<input checked="" type="checkbox"/> DNP5	103.127000	122.849000	103.645000	0.005000	0.020903	16	1.358
<input checked="" type="checkbox"/> DNP11	105.245000	119.702000	100.801000	0.005000	0.019376	9	2.304
<input checked="" type="checkbox"/> DNP3	101.611000	117.864000	101.075000	0.005000	0.015022	9	21.148
<input checked="" type="checkbox"/> DNP1	98.668000	117.918000	102.408000	0.005000	0.013104	10	10.722
<input checked="" type="checkbox"/> DNP7	103.262000	122.837000	101.112000	0.005000	0.012242	9	2.497
<input checked="" type="checkbox"/> DNP2	100.108000	117.895000	101.758000	0.005000	0.002755	8	16.007
Total Error							
Control points					0.023479		10.482
Check points					0.091822		18.885

Markers	X (m)	Y (m)	Z (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> DNP7	103.262000	122.837000	101.112000	0.005000		8	nan
<input checked="" type="checkbox"/> DNP8	104.665000	120.277000	101.921000	0.005000		8	nan
<input checked="" type="checkbox"/> DNP9	105.418000	119.488000	102.543000	0.005000		10	nan
<input checked="" type="checkbox"/> DNP10	105.977000	118.928000	101.516000	0.005000		11	nan
<input checked="" type="checkbox"/> DNP11	105.245000	119.702000	100.801000	0.005000		10	nan
<input checked="" type="checkbox"/> DNP12	106.796000	118.314000	102.992000	0.005000		6	nan
<input type="checkbox"/> DNP13	107.526000	119.572000	103.292000	0.005000		4	nan
<input checked="" type="checkbox"/> DNP14	109.953000	122.703000	103.340000	0.005000		3	nan
<input checked="" type="checkbox"/> DNP15	109.189000	118.828000	101.464000	0.005000		5	787.588
<input checked="" type="checkbox"/> DNP16	107.835000	117.468000	100.791000	0.005000		5	nan
Total Error							
Control points							nan

Fig. 194. Esempi di variabilità dei risultati ottenuti su un *dataset* campione composto da 60 immagini (30 *station groups*) su cui sono stati posizionati gli stessi *control point* ottenendo risultati differenti.

ATTEMPT	TOTAL FRAME	ALIGNED	TIE POINTS	ERROR (M)
1	60 (30 STATION)	19	4.652	0.02
2		23	121	N/A
3		59	11.545	0.02

Tab. 41. Esempi di variabilità nel numero di immagini allineati correlati al numero di *tie point* e all'errore stimato nei *control point*.

Le problematiche incontrate negli studi effettuati si sono manifestate in particolare nei processi di allineamento ed hanno spinto a svolgere ricerche più approfondite sulle cause che li hanno generati. Questi anomalie risultano non prevedibili e controllabili in quanto non si presentano con costanza, esse, infatti, si manifestano in particolare quando, dopo avere già eseguito un allineamento delle prese, si inseriscono i *target* e successivamente si procede ad un *rematch* eliminando l'allineamento precedente. Un'altra problematica emerge quando si importano le posizioni dei *target* poste sulle immagini da un progetto analogo contenente gli stessi dati. Risulta opportuno, inoltre, non collimare i *target* posti in aree molto periferiche delle immagini dal momento che generano problematiche importanti nella successiva fase di calcolo. Nonostante in alcune occasioni si riescano ad ottenere mo-



Fig. 195. A sinistra la posizione di un *target* che non è consigliato inserire in quanto posto in una zona troppo affetta da distorsione dell'immagine. A destra la posizione migliore in cui fissare la posizione del *target*.

delli con validi risultati, analizzando le immagini panoramiche generate nei differenti punti di stazione (anche nei casi di riuscita del processo), si possono chiaramente identificare problematiche che fanno intuire le cause dei problemi manifestati. Per ogni punto di stazione, infatti è possibile esportare una proiezione panoramica a seguito di un processo di *stitching* eseguito dal software stesso.

Riportiamo i risultati di alcune proiezioni generate tramite questa metodologia sulle immagini di *GoPro Fusion*:

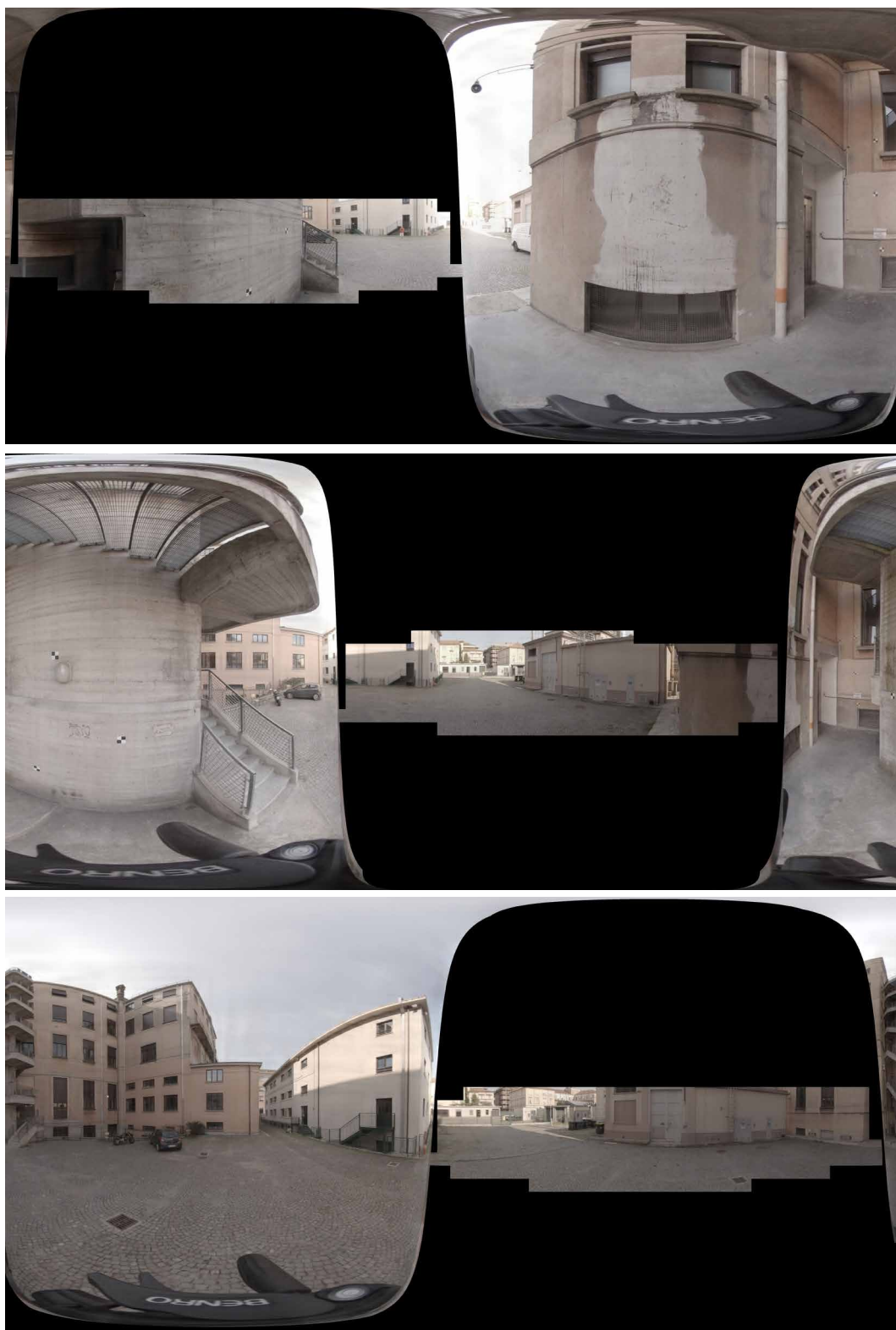


Fig. 196. Tre esempi di esportazioni delle immagini panoramiche affette da problematiche nell'unione dei fotogrammi realizzate nei punti di stazione composti da due fotogrammi ciascuno realizzati da *Agisoft Photoscan Professional*.

È importante considerare il fatto che questo *workflow* di lavoro, per quanto non risulti funzionale i con questo specifico modello di camera, offre ottimi risultati se utilizzato con camere tradizionali, risultando un'ottima soluzione per l'elaborazione di fotogrammi acquisiti da un punto presa analogo o con variazioni contenute.

A tal proposito sono stati eseguiti nuovi test per verificare la validità di questo processo di calcolo utilizzando immagini generate con camere tradizionali.

Viene illustrato un esempio di panorama realizzato da scatti aerei realizzati da un drone modello *DJI Spark* (fig. 199-201) tramite l'acquisizione automatizzata di 46 fotogrammi con una camera 12MP su un sensore 1/2.3" con focale equivalente di 25mm. Questa tipologia di soluzione (di cui ora si accenna), sarà presentata e approfondita specificatamente nell'illustrazione di uno dei casi studio nei prossimi capitoli.

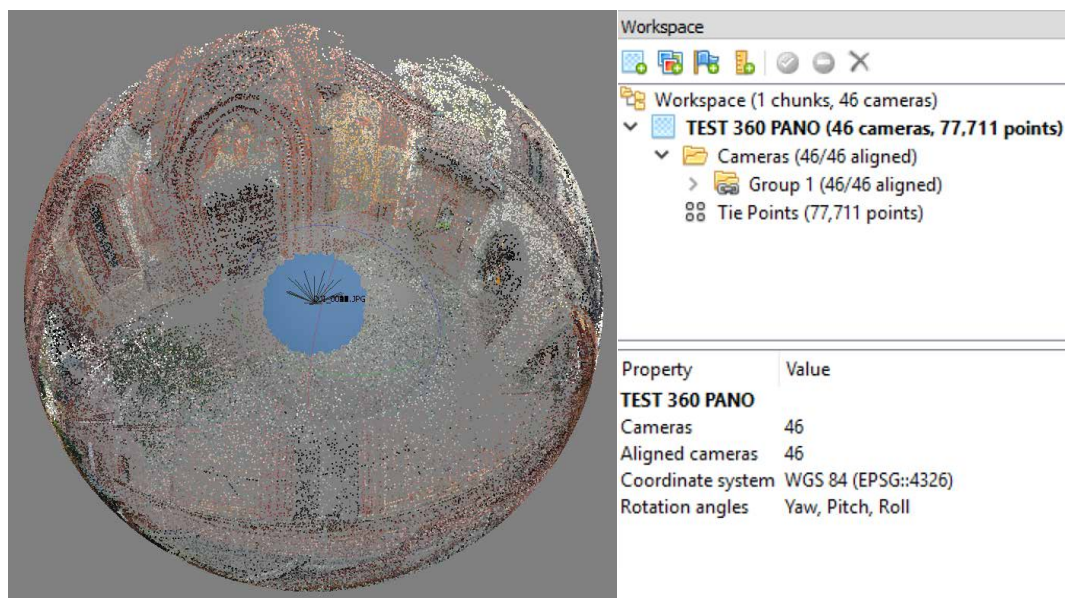


Fig. 197. Utilizzo di 46 immagini realizzati tramite drone attraverso l'utilizzo della modalità *camera station*.




Camera type: Frame

Pixel size (mm): 0.00156667 x 0.00156667

Focal length (mm): 4.49

☐ Enable rolling shutter compensation ☐ Film camera with fiducial marks

Initial Adjusted Bands GPS/INS Offset

f: 2944.3122

cx: 35.7415 b1: 2.00111

cy: 27.8809 b2: 3.02889

k1: 0.0873078 p1: 0.000181296

k2: -0.163277 p2: 0.00144618

k3: 0 p3: 0

k4: 0 p4: 0

Fig. 198. Risultati della *Self Calibration* eseguita sul campione di immagini per l'elaborazione del panorama.



Fig. 199. Esportazione dell'immagine panoramica correttamente realizzata a partire dai 46 immagini acquisite da drone.

3.7.4. Processamento dei dati come *fisheye* attraverso l'opzione camera multi-spettrale

A seguito delle problematiche illustrate nel paragrafo precedente relative al processo di allineamento delle coppie di immagini *fisheye* tramite il raggruppamento per posizioni di acquisizione, sono state testate ulteriori soluzioni e differenti metodi di trattamento di questi dati nell'ottica di riuscire a superare tali criticità. Si è proceduto, pertanto, a contattare direttamente gli sviluppatori del software *Agisoft Photoscan* per segnalare le problematiche affrontate. Si propone in questo paragrafo una nuova tipologia di elaborazione dei dati che sfrutta i processi per l'uso delle camere multispettrali.

Il *workflow* proposto si articola in questi *step*:

1. Suddividere le immagini in cartelle differenti creandone una per ogni camera utilizzata. È fondamentale che l'ordine delle immagini sia il medesimo tra le cartelle analizzate (alla prima immagine di ogni cartella deve corrispondere la medesima posizione di presa)
2. Inserire le cartelle precedentemente create in una cartella "*master*".
3. Aprire *Photoscan* in una nuova *chunk* e attraverso il comando *Add Folder* selezionare la cartella "*master*" precedentemente creata e contenente come sottocartelle le immagini per ogni camera utilizzata.
4. Selezionare nella finestra di dialogo immediatamente successiva l'opzione *Create Multispectral Cameras*.
5. Aprire la schermata di *Camera Calibration*, impostare il *camera type* come *fisheye* e successivamente, sotto la voce *Tool* della barra dei menù ed espandere il contenuto della sezione denominata "*master band*" e per tutte le "*slave band*" settare la voce *Layer Index* con gli stessi valori

di “*master band*” (in questo caso può essere lasciato 0 come valore di default)

6. Inserire i parametri di calibrazione precedentemente stimati per le due camere in analisi

7. Sempre all'interno della schermata di *Camera Calibration* spuntare l'opzione *Fit Location* che si trova nella sezione *Slave offset*.

Attraverso questi settaggi *Photoscan* dovrebbe essere in grado di capire che le due camere possiedono un orientamento fissato che sarà stimato automaticamente durante la procedura di allineamento. Il settaggio del *Layer Index* sugli stessi valori indica che tutte le immagini siano scattate nello stesso range (in questo caso *RGB*).

Per la camera in esame, tuttavia, i risultati ottenuti non sono risultati soddisfacenti a causa di problematiche relative all'orientamento delle coppie di immagini.

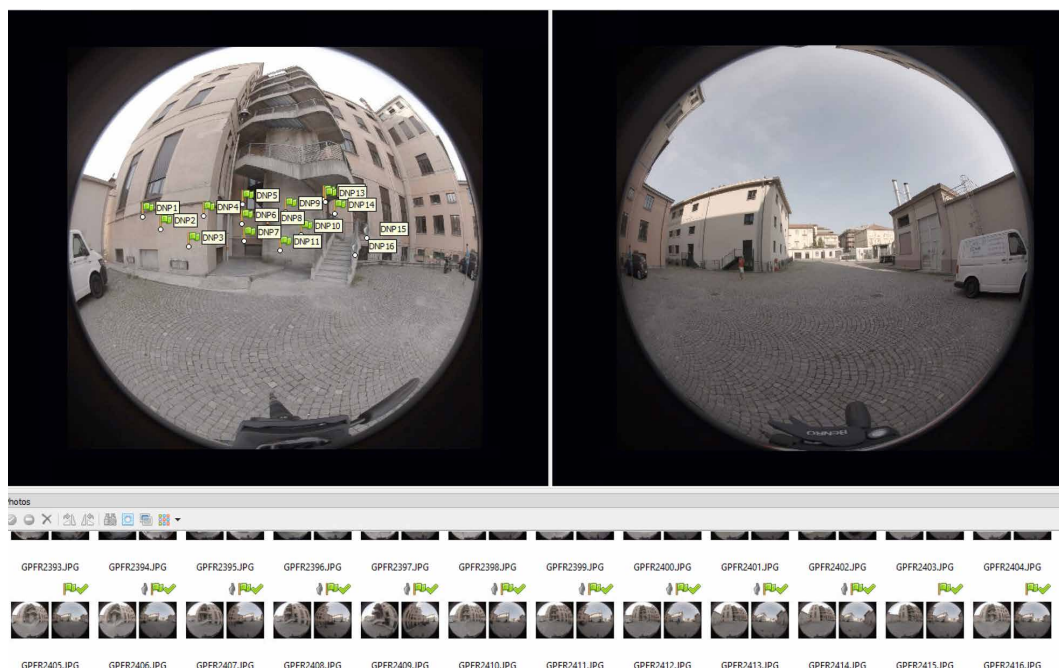


Fig. 200. Schermata di *Agisoft Photoscan* relativa alla visualizzazione delle immagini *fisheye* attraverso l'utilizzo dei settaggi di elaborazioni per le camere multispettrali .

3.8. Note bibliografiche

I Fangi, G. (2006), *Investigation On The Suitability Of The Spherical Panoramas By Realviz Stitcher For Metric Purposes*, ISPRS Archive, Vol. XXXVI, Part 5, Dresden, 25–27 September 2006, ISSN 1682-175.

II Fangi, G. (2007), Una nuova fotogrammetria architettonica con i panorami sferici multimmagine – Convegno Sifet, Arezzo, 27–29 Giugno 2007, CD ISSN: 1682–1777, ISBN 88-901939-4-8

III Fangi, G. (2010), *La Fotogrammetria sferica. Una nuova tecnica per il rilievo dei vicini*. Archeomatica, anno 1, n.2 Giugno 201, ISSN 2037 – 2485

IV Agisoft LLC. (2018). *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4* [Ebook] (pp. 9-10). Retrieved from https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf

Applicazioni di aerofotogrammetria sferica in
scenari urbani e prove sperimentali



4. Applicazioni di aerofotogrammetria sferica in scenari urbani e prove sperimentali

4.1. Introduzione ai casi studio

Alla luce delle sperimentazioni terrestri effettuate si è scelto di testare le potenzialità di impiego delle immagini sferiche per acquisizioni da *UAV* con le finalità di ricostruzione di modelli tridimensionali. Per ottenere questi obiettivi sono stati condotti numerosi test che saranno illustrati nel corso di questo capitolo. Verranno presentati nello specifico differenti usi di questa tecnologia applicata alle acquisizioni aeree e diversi approcci di elaborazione dati. Obiettivo di questi studi è quello di indagare le potenzialità di impiego di questa nuova tecnica, fino ad ora non ancora sviluppata nel campo delle acquisizioni da *UAV*, al fine di ottenere un vantaggio in termini di tempistiche di acquisizione e di elaborazione oltre che valutare l'integrazione di tipologie differenti di dati acquisiti da sensori differenti. Particolare attenzione sarà posta sul tema dell'integrazione delle immagini sferiche a supporto o sostituzione di immagini da camere tradizionali nell'ottica di ottenere un concreto miglioramento nel processamento dei dati.

Il processo presentato in questo capitolo si è articolato attraverso numerosi test svolti in laboratorio e sul campo con l'obiettivo di valutare la stabilità del sistema aereo sviluppato e delle sue prestazioni. Dopo avere effettuato in laboratorio differenti test sui sistemi di connessione tra il sensore e l'*UAV*, infatti, si è proceduto allo svolgimento dell'attività sperimentale in campo volo che ha permesso di ottenere in un ambiente sicuro un riscontro operativo sul sistema.

Al termine delle fasi sperimentali, sono stati identificati due casi studio diffe-

renti relative ai beni culturali del *Castello del Valentino* e del *Borgo Medievale* a Torino. I casi studio hanno permesso di verificare le potenzialità del sistema in uno scenario reale con le complessità ad esso annesse.

Per lo svolgimento di questi studi è stato necessario richiedere autorizzazioni aeronautiche specifiche agli enti preposti al fine di ottenere i permessi allo svolgimento degli stessi. È pertanto stato necessario un coordinamento tra: *ENAC (Ente Nazionale Aviazione Civile)*, Prefettura di Torino, Questura di Torino, Polizia Municipale, Politecnico di Torino, Operatore *SAPR* e Pilota *CRO*. A seguito dei permessi ottenuti e delle acquisizioni sul campo particolare attenzione è stata posta alle elaborazioni e alle relative restituzioni. Questi test hanno permesso di conoscere le potenzialità del sistema applicate a scenari reali e il contributo di questa tipologia innovativa di dati nel campo della ricostruzione tridimensionale.

4.2. Sviluppo del sistema di connessione Camera/UAV

La connessione tra la camera sferica scelta (*GoPro Fusion*) ed il drone si è rivelata da subito operazione complessa. Questo perché è stato necessario che la connessione rispettasse le seguenti peculiarità:

Stabilità del supporto

1. Corretto bilanciamento dei pesi sul mezzo
2. Assenza di interferenze con la camera di serie del mezzo
3. Connessione salda in grado di sopportare vibrazioni e bruschi cambi di direzione
4. Posizionamento della camera il più possibile esterna all'*UAV* per permettere migliori acquisizioni a 360°.



Fig. 201. Primi studi e applicazioni dei sistemi di ancoraggio tra il *Dji Phantom 4 Pro Obsidian* e *GoPro Fusion*.

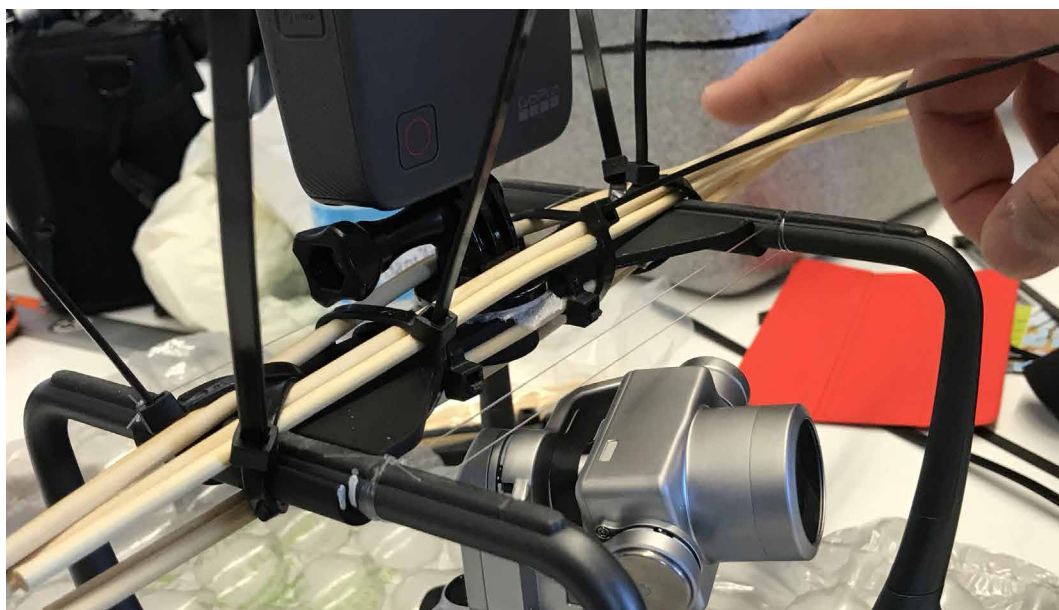


Fig. 202. Sviluppo in laboratorio e test di sistemi di stabilizzazione e bilanciamento.

Per ottenere questi risultati sono state testate differenti soluzioni su diversi mezzi. Di seguito si illustreranno le principali soluzioni testate illustrandone pregi e difetti per poi descrivere in modo più accurato la soluzione ritenuta migliore.

4.2.1. Disegno dei supporti e stampa 3D

Fin dai primi test si è compreso che una delle migliori possibilità di supporto per il posizionamento della camera sarebbe stata quella di sfruttare le gambe plastiche alla base del mezzo posizionando la camera sotto lo stesso. Questa soluzione permette di avere una superficie di ancoraggio valida e, allo stesso tempo, il posizionamento della camera in un'area piuttosto libera con la sola ostruzione del mezzo.

Dopo avere identificato l'area si è avviata una ricerca relativa alla migliore connessione da realizzare.

In un primo momento sono stati disegnate diverse tipologie di sostegni che dopo essere stati stampati in 3d tramite una stampante *CTC BIZER* sono

stati testati in ambiente protetto su un drone *DJI Phantom 3 Professional*.

Si illustrano due tipologie di supporti testati che variano per il metodo di connessione alle gambe del mezzo:

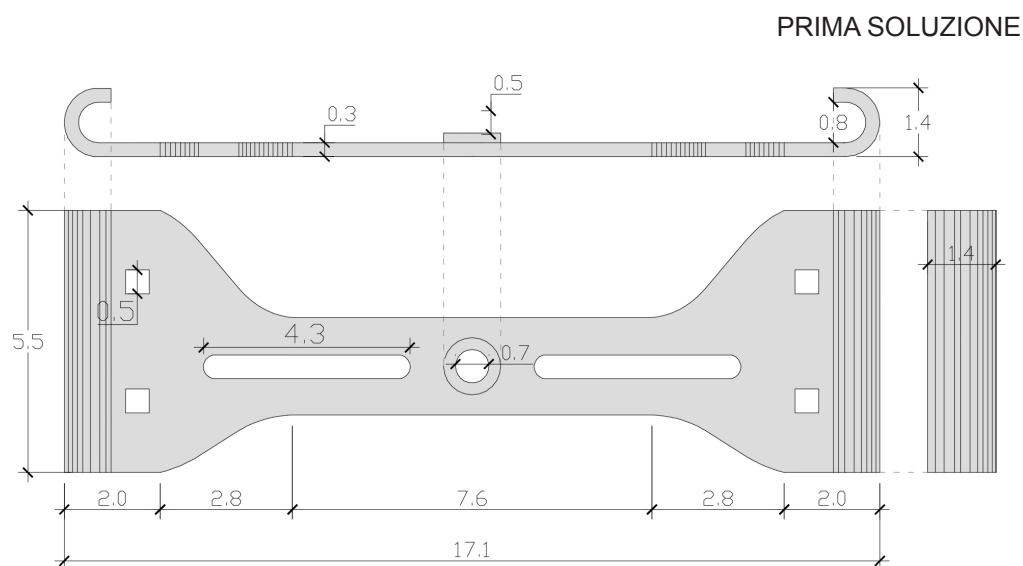


Fig. 203. Primo progetto di supporto testato su *DJI Phantom 3 Pro*. (misure espresse in *centimetri*).

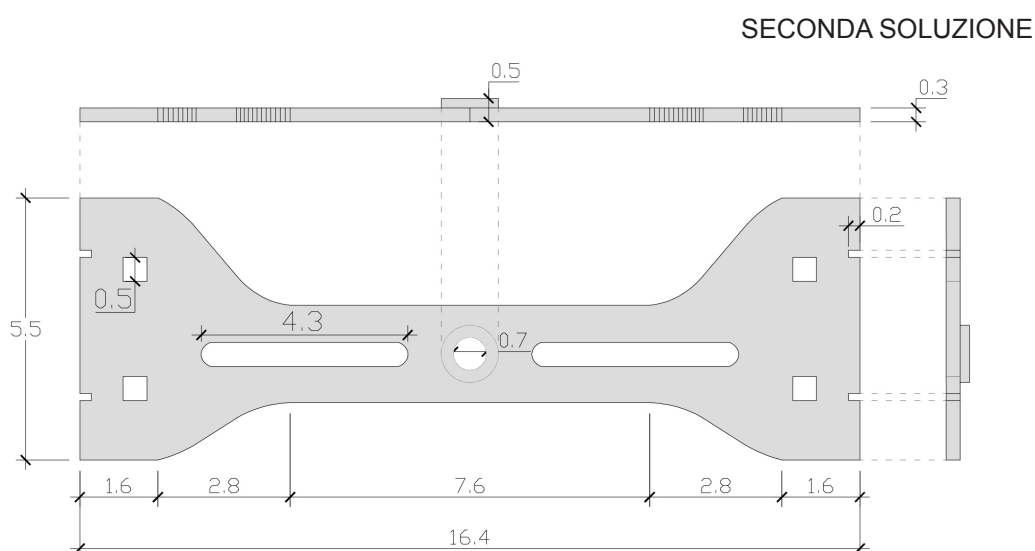


Fig. 204. Secondo progetto di supporto testato su *DJI Phantom 3 Pro* (misure espresse in *centimetri*).

Entrambe le soluzioni sono state stampate con uno spessore *layer*¹ 0.02 in *PLA*² e con un *infill*³ esagonale del 60% ad una temperatura di 240° C e piatto⁴ a 60°C. La prima soluzione ha necessitato di maggiori accortezze in fase di stampa dovute alla presenza delle aree ricurve utilizzate come aggancio alla struttura. Per queste aree è stato necessario predisporre dei supporti per permettere al materiale fuso di depositarsi correttamente. Dopo la stampa si è proceduto alla rimozione dei supporti, operazione che si è dimostrata complessa per la morfologia dell'oggetto. Proprio per questo motivo è stata realizzata una seconda soluzione che si differenzia dalla precedente per l'eliminazione di questa zona prevedendo un nuovo sistema di aggancio realizzato a incastro sulla geometria del mezzo e sull'uso di fascette plastiche di sicurezza per assicurare la stabilità della soluzione. Come si può osservare le geometrie di entrambe le soluzioni sono state alleggerite andando a predisporre delle forature posizionate in modo da non compromettere la stabilità del supporto.

1 Questo valore corrisponde allo spessore di ogni livello di stampa. Al ridursi di questo valore aumentano la qualità e tempi di stampa.

2 Il *PLA* o acido polilattico, è il materiale più usato nella realizzazione di prodotti mediante l'utilizzo di macchine di prototipazione rapida che utilizzano tecniche produttive basate sull'*FDM* (*Fused Deposition Modeling*). Questo materiale è particolarmente utilizzato poiché permette uno stampaggio con temperature relativamente basse e con un minor ritiro durante il raffreddamento.

3 È un valore espresso in percentuale relativo al riempimento dell'oggetto. In fase di stampa la superficie interna risulta piena quanto questo valore è del 100% ed è sostituita da un reticolo in grado di ridurre il materiale necessario alla stampa al diminuire di questo valore.

4 Il piatto è la superficie su cui poggia l'oggetto durante la stampa, quest'ultimo viene riscaldato al fine di limitare il fenomeno del ritiro del materiale stampato dovuto al raffreddamento dello stesso.

PRIMA SOLUZIONE

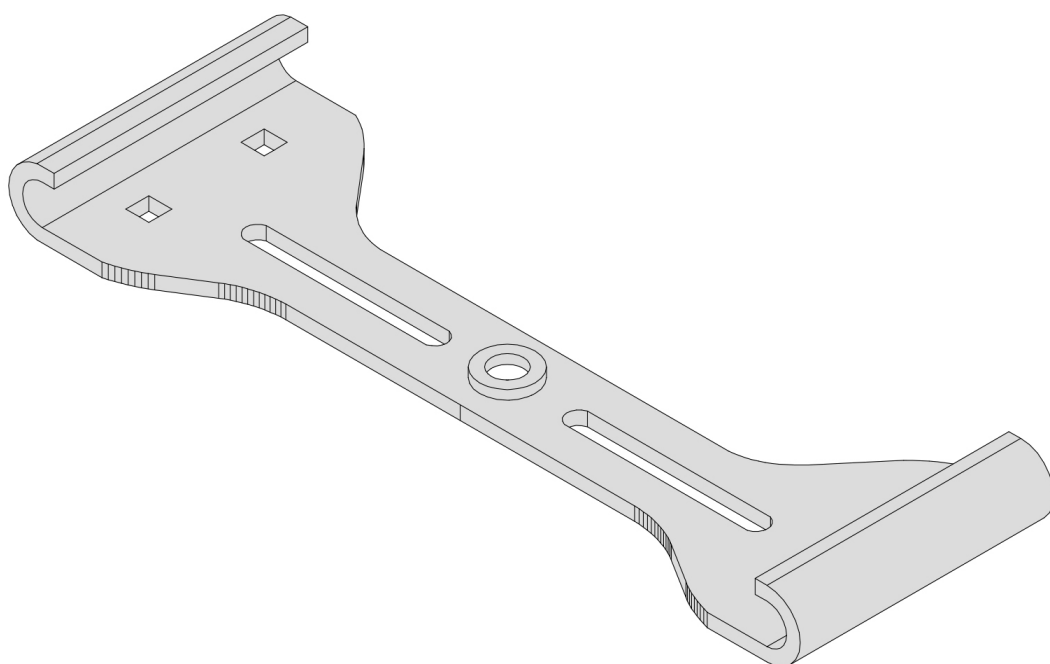


Fig. 206. Rappresentazione isometrica del prototipo del primo tipo di supporto stampato.

SECONDA SOLUZIONE

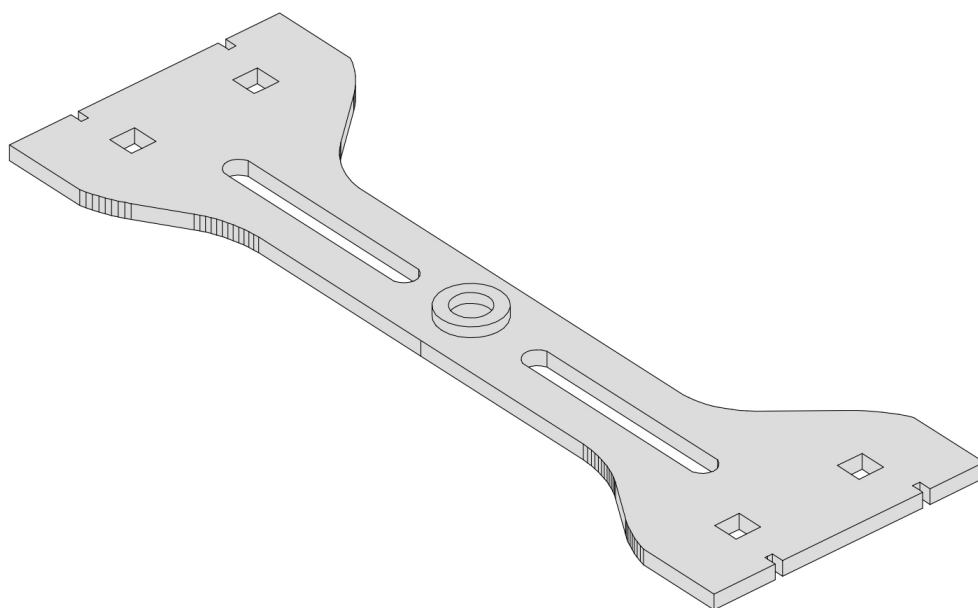


Fig. 205. Rappresentazione isometrica del prototipo del secondo tipo di supporto stampato.

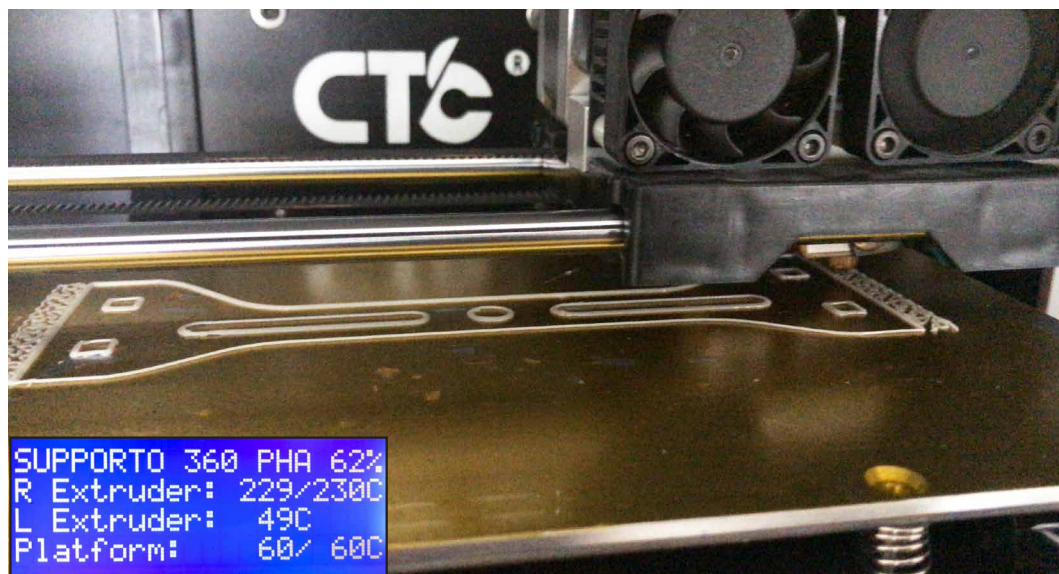


Fig. 207. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d

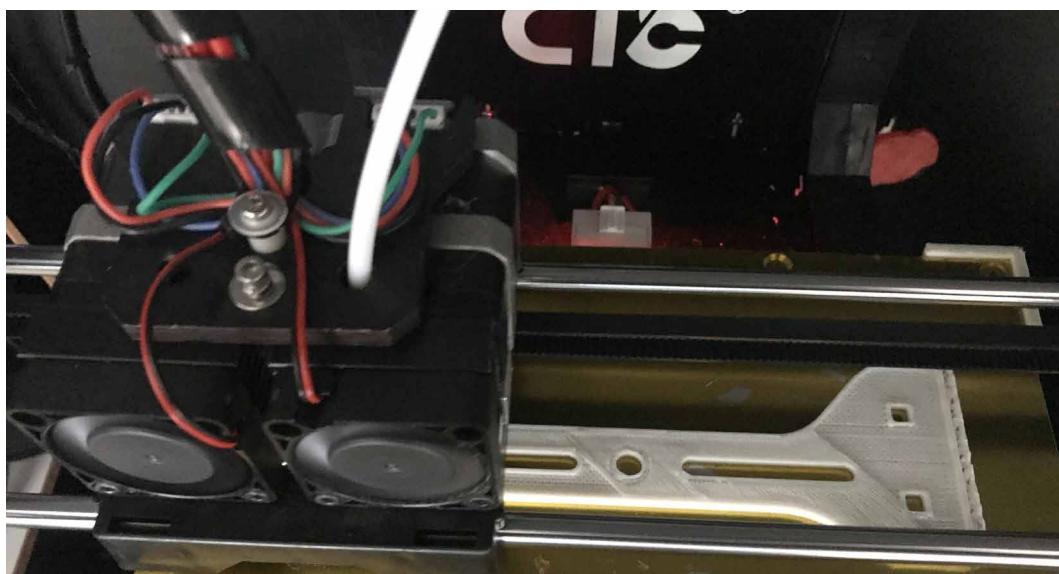


Fig. 208. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d

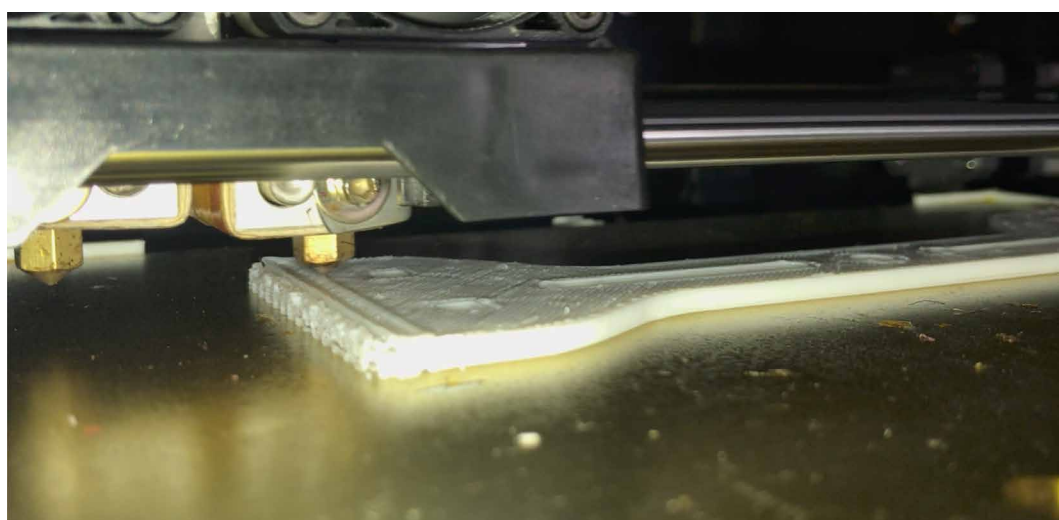


Fig. 209. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d



Fig. 210. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d



Fig. 211. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d



Fig. 212. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d

4.2.2. Considerazioni sui supporti realizzati e nuovi test

A seguito della realizzazione le soluzioni prototipali sono state testate sul drone *Phantom 3 Professional* in un ambiente controllato. Dopo svariati tentativi i supporti realizzati si sono manifestati validi nel sostenere la camera, ma inutilizzabili a causa delle eccessive vibrazioni indotte sulla struttura alla quale sono agganciati. Le gambe di supporto di questo modello di drone subiscono durante il volo sollecitazioni eccessive per ottenere un risultato accettabile. Per tale motivo, alla luce di queste considerazioni, si è scelto di testare il sistema su un modello più avanzato identificato nel *Phantom 4 Pro Obsidian* (le cui prestazioni sono state illustrate dettagliatamente all'inizio di questo capitolo). La struttura di questo UAV appare più solida e pertanto potenzialmente in grado di migliorare le problematiche manifestate con la soluzione precedente. È stata testata una soluzione commerciale appositamente progettata per questo mezzo. Il supporto utilizzato, è realizzato da *PolarPro* e si compone di un sistema ad incastro molto simile alle tipologie di prototipi stampati. Tutte le soluzioni testate sono state studiate per non interferire con la camera di serie del mezzo e, grazie a questo, verranno presentate soluzioni in grado di effettuare l'acquisizione simultanea dei dati.



Fig. 213.
4 Pro.

Soluzione commerciale di supporto realizzata da *PolarPro* per *Phantom*



Fig. 214. Dettagli del sistema di supporto di *PolarPro* per *Phantom 4 Pro*.

Quest'ultima soluzione si è dimostrata valida per il drone testato ma, per l'uso con *Gopro Fusion*, necessita di ulteriori modifiche e accortezze al fine di risultare stabile. È importante sottolineare il fatto che, dopo che la camera è stata posizionata sull'*UAV*, esso non risulta più in grado di decollare e atterrare direttamente da terra. Per non danneggiare la camera, infatti, è necessario fare decollare il drone manualmente tramite l'ausilio di una persona terza che sorregge e guida le manovre di decollo e atterraggio. Questa tuttavia non è l'unica limitazione. Sono stati riscontrati vibrazioni diffuse sul corpo camera e un'importante variazione della stabilità dovuta soprattutto all'influenza dell'aerodinamicità e allo spostamento del baricen-

tro dello stesso. Osservando un disegno tecnico del sistema adottato si può osservare l'indipendenza delle due camere che risultano in grado di acquisire dati simultaneamente. Le frecce nei disegni illustrano le problematiche

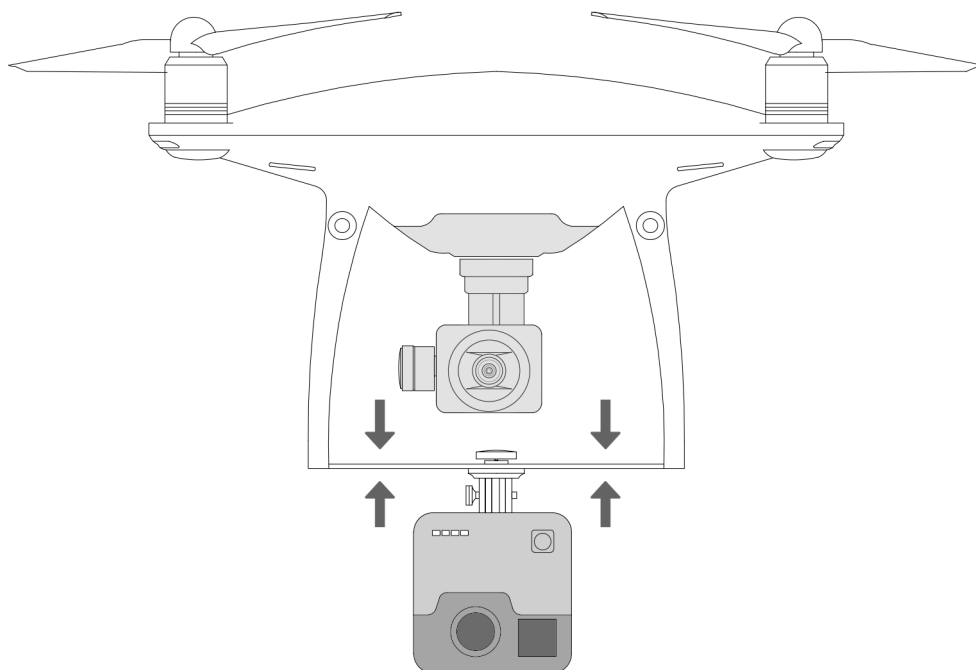


Fig. 215. Vista frontale dell'UAV con installata la camera sferica sull'apposito supporto. Le frecce indicano le problematiche di vibrazioni verticali.

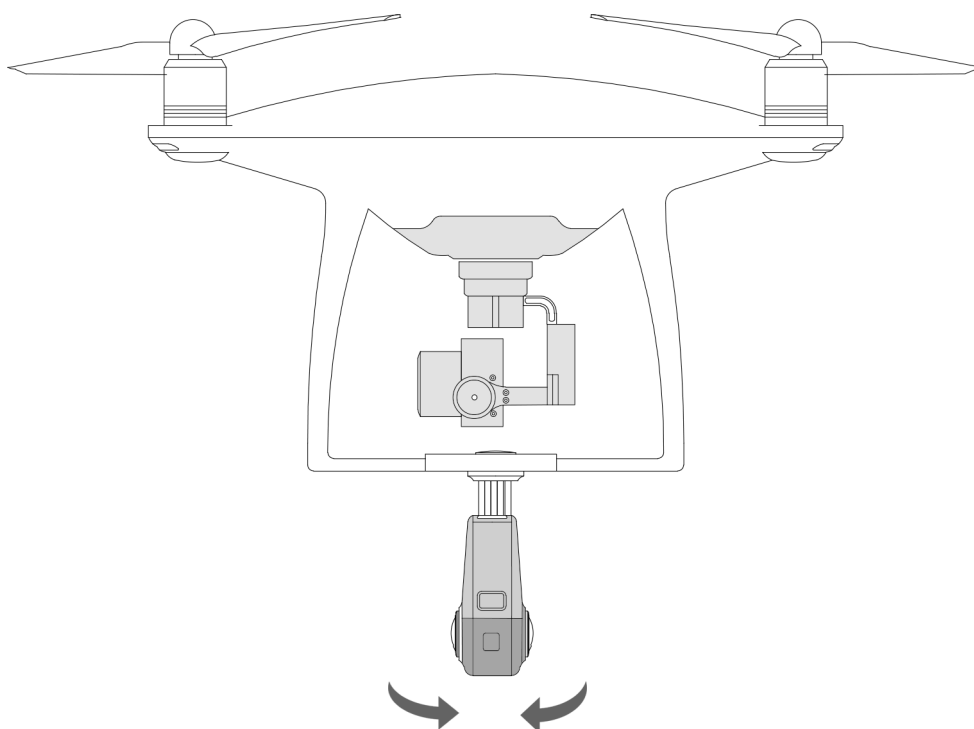


Fig. 216. Vista laterale dell'UAV con installata la camera sferica sull'apposito supporto. Le frecce indicano le problematiche di oscillazioni orizzontali.

riscontrate sul sistema dovute alle vibrazioni del drone. Al fine di porre rimedio a tali problematiche sono state messe in atto diverse soluzioni:

1. Schermatura della parte superiore del supporto al fine di ridurre l'influenza delle correnti d'aria sulla camera
2. Prova di stabilizzazione tramite tiranti e messa in tensione delle gambe del mezzo.
3. Variazione della posizione del supporto della camera
4. Irrigidimento del supporto

In un primo momento una piastra flessibile in cartone è stata posta sul supporto al fine creare un deflusso dell'area esternamente al drone per ridurre la turbolenza sulla camera. Come si può osservare dai disegni, se da un lato questa soluzione ha ridotto le vibrazioni sulla camera ha indotto una nuova problematica. Utilizzando questo sistema l'UAV tende a salire verso l'alto e risulta molto complesso da controllare per via della deviazione dei flussi d'aria indotta dalla piastra. A seguito di questi esperimenti questa soluzione è stata ritenuta inadeguata.

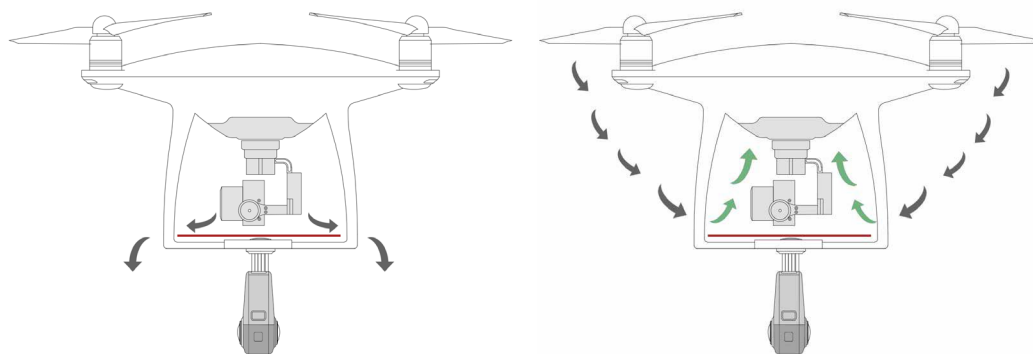


Fig. 217. Schematizzazione delle problematiche dovute alla variazione dei flussi d'aria dopo l'introduzione della piastra.

In fase sperimentale si è proceduto a testare la stabilità del sistema introducendo dei tiranti che immobilizzassero la camera e introducessero le sollecitazioni di compressione sul supporto e di trazione sulle gambe dell'UAV a cui esso risulta agganciato tramite incastro come si può osservare dalle immagini che seguono. Queste soluzioni hanno portato ad un miglioramen-

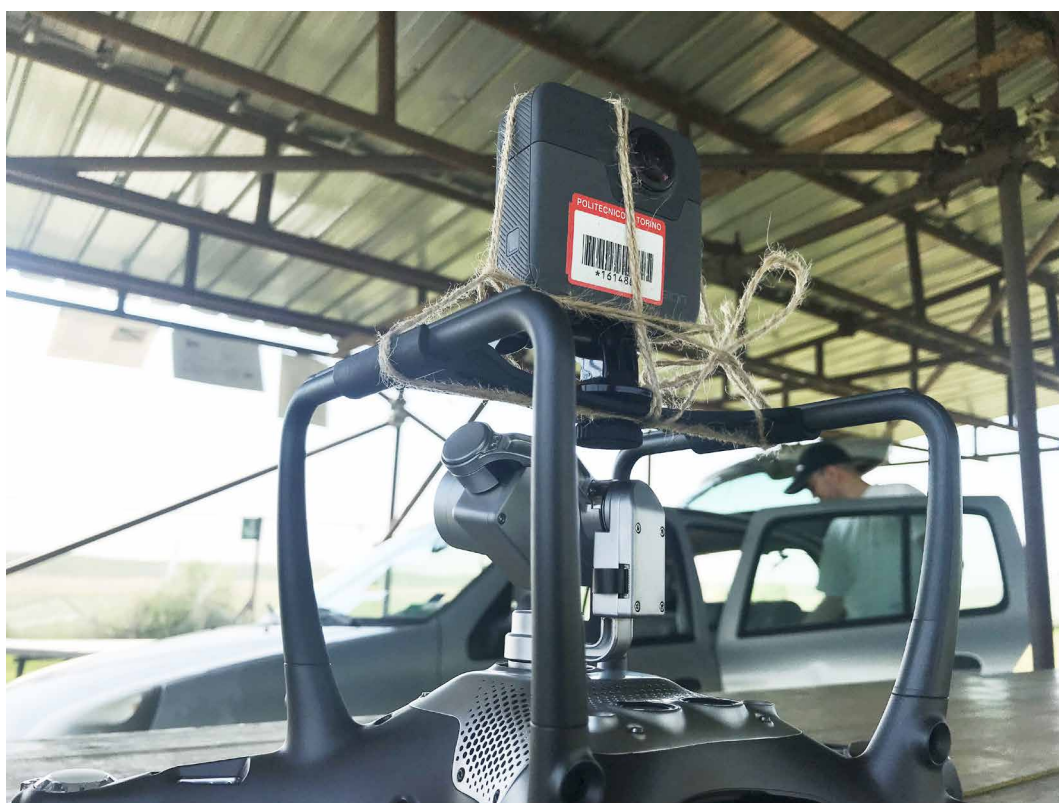


Fig. 218. Nelle immagini le prime prove di stabilizzazione della camera tramite l'introduzione di tiranti al fine di ridurre le vibrazioni sulla stessa. Successivamente dopo questi test sono stati adottati tiranti in *nylon* per un minore impatto sulle immagini acquisite.

to per quanto riguarda le problematiche vibrazionali, introducendo tuttavia ingombro visivo nell'acquisizione dei dati. Per ovviare a queste nuove difficoltà sono stati impiegati tiranti in *nylon* trasparente ad elevata resistenza.



Fig. 219. Introduzione dei tiranti in *nylon* per stabilizzare il corpo camera.

In fase di test è apparso evidente che è necessario porre particolare attenzione alla disposizione dei pesi introdotti sul drone al fine di non modificare il bilanciamento. Sbilanciando i pesi, infatti, la centralina grazie ai dati del sistema di posizionamento è in grado di mantenere fermo in *hovering* il drone, compensando gli spostamenti tramite l'aumento dei giri delle eliche opposte. Il risultato è che, sebbene il drone appaia stabile, i suoi movimenti risultano rallentati in quanto i motori devono, oltre a consentire i movimenti, stabilizzare il mezzo. Lo spostamento di pochi millimetri del supporto in-

fluisce notevolmente sulle prestazioni e sulla risposta ai comandi. Dai test eseguiti i migliori risultati si ottengono rispettando le distanze per il supporto riportate di seguito:

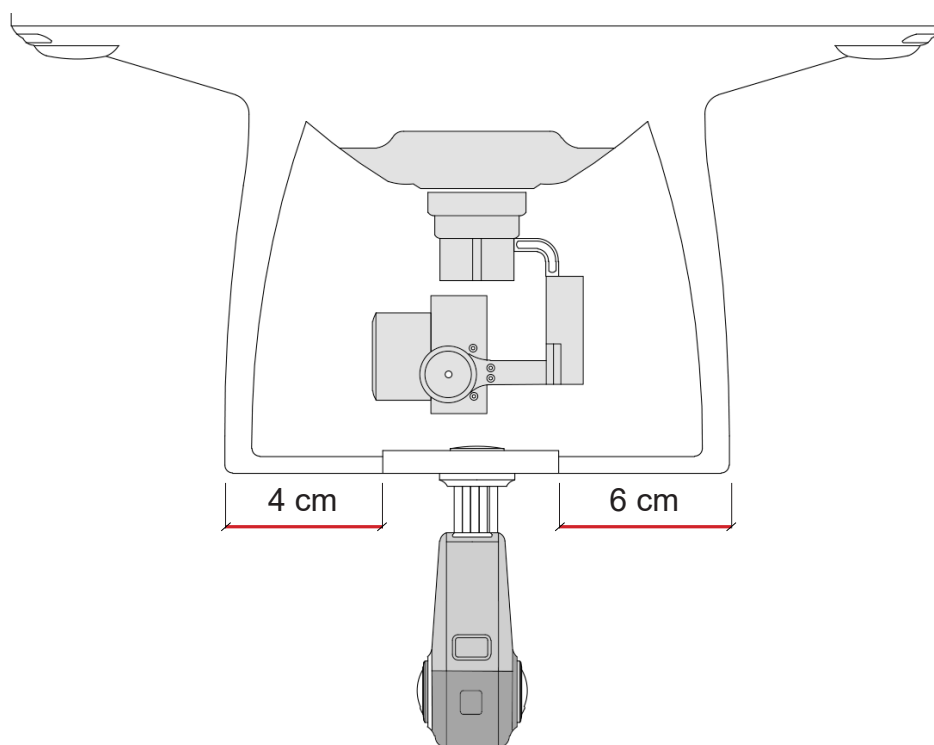


Fig. 220. Distanze ottimali per il posizionamento del supporto.

4.3. Soluzione adottata per le sperimentazioni

A seguito di tutti i test eseguiti, nell'ottica di dover utilizzare il sistema in uno scenario urbano, con la necessità conseguente di garantire le condizioni di sicurezza, ulteriori ottimizzazioni sono state eseguite. In questo paragrafo si procede con l'illustrazione della soluzione definitiva adottata nelle acquisizioni sui casi studio.

Tutte le necessità emerse dai test sono state considerate ma è stata posta maggiore attenzione all'irrigidimento del supporto. Tramite l'inserimento di astine di rinforzo, vincolate con fascette plastiche si è ulteriormente migliorata la stabilità del sistema di aggancio e ridotto le vibrazioni sulla camera. Attraverso l'adozione di questo sistema le vibrazioni si sono attenuate in

modo significativo permettendo così l'esecuzione di acquisizioni più fluide. Le bacchette di legno dopo essere state posizionate sono state tagliate a misura. Tuttavia se da un lato il problema delle vibrazioni era da considerar-



Fig. 221. Assemblaggio del prototipo di connessione *Camera/Uav* in laboratorio.



Fig. 222. Assemblaggio del prototipo di connessione *Camera/Uav* in laboratorio. Bacchette lignee di stabilizzazione.

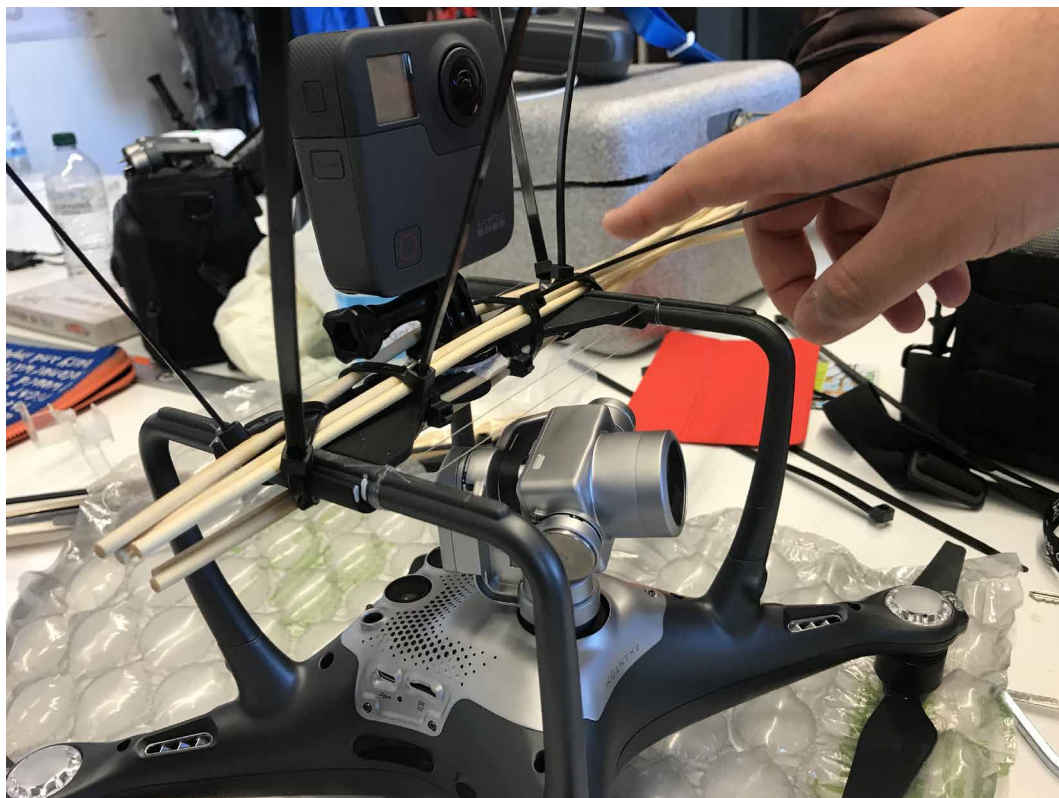


Fig. 224. Assemblaggio del prototipo di connessione *Camera/Uav* in laboratorio.



Fig. 223. Prototipo ultimato in laboratorio per la connessione *Camera/Uav*.

si risolto nuove difficoltà sono emerse nella manovrabilità del drone a causa dell'interferenza con i sensori di bordo del *Visual Position Sistem* (o *VPS*). Questi sensori si compongono di due camere ed un sensore ad ultrasuoni e sono realizzati per permettere un volo stabile in ambienti indoor senza l'ausilio del sistema di posizionamento satellitare. Questo sistema di sensori è in grado di determinare l'altezza del drone dal terreno fino a 20 metri dal suolo. L'installazione della camera interferisce con questo sensore il quale non risulta in grado di determinare la distanza dal suolo in modo corretto. Il *VPS* segnala un'altezza fissa di circa 12 cm che è la distanza dei sensori dal supporto camera. Questa errata percezione della quota fa sì che, in fase operativa, il mezzo tenda a salire verso l'alto opponendo resistenza significativa durante la discesa. Risulta fondamentale al fine di eliminare questa problematica disattivare tramite software il *VPS* al fine di potere effettuare i voli in sicurezza, diversamente il rischio di ingovernabilità del mezzo sarebbe estremamente elevato. La disabilitazione di questo sensore non influisce sulle prestazioni di questo sistema testato in quanto tutti i voli sono effettuati in ambiente esterno ad altezze dal suolo superiori ai 10 metri, utilizzando

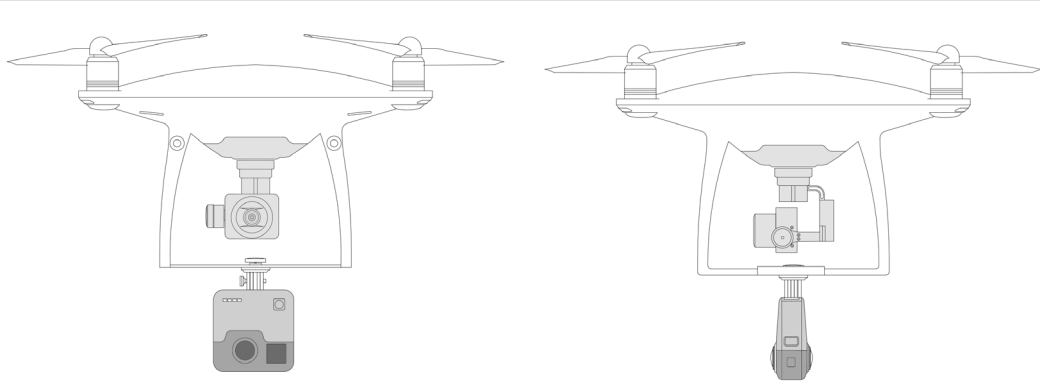


Fig. 225. Distanze ottimali per il posizionamento del supporto.

l'ausilio del sistema di posizionamento satellitare.

4.3.1. Linee guida per le acquisizioni

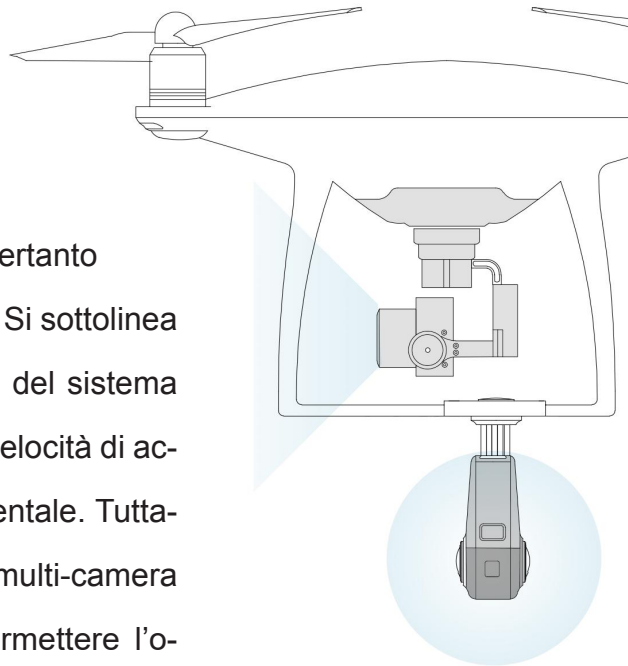
Sebbene soluzioni più prestanti e qualitativamente più performanti sarebbero state possibili utilizzando altri UAV e camere 360° la soluzione sviluppata per le sue possibilità di utilizzo in ambiente urbano attraverso l'uso dei cosiddetti Scenari Standard (che saranno approfonditi successivamente) risulta vantaggiosa. Nella tabella che seguono si riassumono le linee guida per il corretto funzionamento.

LINEE GUIDA PER IL CORRETTO FUNZIONAMENTO DEL SISTEMA	
	
TIPOLOGIA DI SUPPORTO ADOTTATO	
Supporto utilizzato	Polar Pro 360 Mount Phantom 4 Pro
Tipologia di ancoraggio	Incastro
Presenza di elementi di irrigidimento	Necessari elementi ulteriori di stabilizzazione per assicurare la riduzione delle vibrazioni in volo.
Tipologia di irrigidimenti utilizzati	Bacchette lignee diametro 3mm (6 elementi) vincolate tramite fascette plastiche.
Presenza di cavi di tensionamento	Uso di cavo di nylon ad alta resistenza per mettere in tensione le gambe dell'UAV
Visual Position System (VPS)	Disabilitato
PRESTAZIONI DEL MEZZO IN ARIA	
Atterraggio e decollo	Assistito da persona esterna al pilota
Stabilità in aria	Molto Buona
Manovrabilità	Molto Buona
Reattività ai comandi	Buona
Velocità massima	Limitata a scopo cautelativo
Consumo batteria	Incremento del 30% superiore
Tempo di volo consigliato	15 minuti

Tab. 42. Nella tabella le principali caratteristiche tecniche relative alla camera 360° GoPro Fusion

4.3.2. Prestazioni del sistema e possibilità di utilizzo dei sensori

Dopo lo sviluppo del sistema di connessione sono stati eseguiti diversi test con l'utilizzo congiunto delle camere presenti sull'*UAV* nell'ottica di eseguire acquisizioni fotogrammetriche. Una delle caratteristiche peculiari di questo sistema è proprio quello di utilizzare simultaneamente le due camere al fine di acquisire velocemente grandi quantità di dati e riducendo pertanto le tempistiche di acquisizione. Si sottolinea la potenzialità di applicazione del sistema in casi di emergenza dove la velocità di acquisizione dati risulta fondamentale. Tuttavia il sistema di acquisizione multi-camera è stato testato anche per permettere l'orientamento di immagini tradizionali in situazioni in cui le fotocamere da sole non risultino in grado di restituire modelli validi. Basti pensare alle acquisizioni per la restituzione di prospetti in centri storici dove la poca distanza tra i fabbricati fa sì che si richieda un grande numero di immagini e la misura di numerosi target topografici. Tra le sperimentazioni sull'uso di questi sistemi multi-camera terrestri si può citare lo studio di (S. Kossieris & Al 2017)ⁱ sulle vie medievali di *Kalamoti* che ha proposto un approccio simile con l'uso di camere 360° e *action* camere. Applicazioni di integrazione tra camere sferiche e tradizionali eseguite da *UAV* per la ricostruzione non risultano ancora in bibliografia se non modesti accenni preliminari (Ihsanudin, T., & Affriani, A. R. 2017)ⁱⁱ. Allo scopo di rendere più chiari gli studi compiuti è necessario introdurre le tipologie di pianificazione di volo eseguite per le applicazioni di aerofotogrammetria.



4.4. Approccio aerofotogrammetrico territoriale

L'uso della fotogrammetria da *UAV* è ormai una tecnica consolidata da diversi anni. In questo paragrafo si illustreranno le principali tipologie di acquisizione che solitamente vengono impiegate. Come nelle applicazioni terrestri la sovrapposizione tra le immagini è la chiave per la riuscita del processo. Per eseguire un'acquisizione aerea è necessario effettuare una pianificazione dei voli andando a determinare, sulla base della scala di rappresentazione scelta per il prodotto finale, della velocità del mezzo, della tipologia di camera utilizzata, il numero di scatti. La soluzione più performante è quella di realizzare una serie di passaggi aerei paralleli detti "strisciate" effettuando acquisizioni mantenendo la camera nadirale, ovvero con l'asse ottico normale al terreno. In alcuni casi sono eseguite strisciate parallele alle prime per aumentare ulteriormente la sovrapposizione tra le immagini acquisite. Oltre alle acquisizioni nadirali da qualche anno si sono introdotte le prese inclinate a 45° . L'uso delle acquisizioni inclinate ha permesso di raggiungere obiettivi prima di allora inimmaginabili nella ricostruzione degli alzati dei fabbricati. L'uso delle immagini inclinate, infatti, migliora significativamente la tridimensionalità del modello ricostruito. Come per le acquisizioni nadirali,

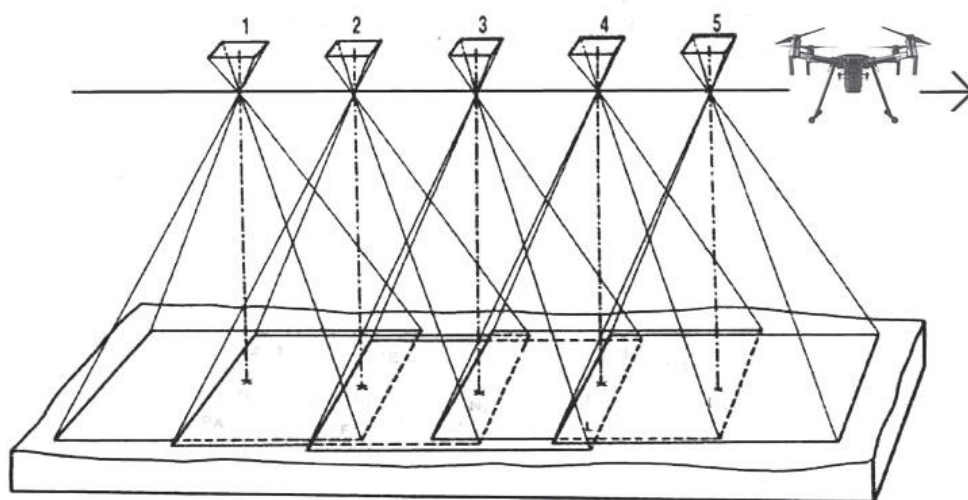


Fig. 226. Schematizzazione di una striscia da *UAV* con acquisizioni nadirali.

anche nel caso delle inclinate si utilizza una pianificazione automatica composta da strisciate che spesso sono replicate in entrambi i sensi.

Altra tipologia di acquisizione è quella circolare dove le acquisizioni inclinate vengono realizzate non più attraverso strisciate parallele ma seguendo un'orbita circolare attorno all'oggetto.

Sebbene fino ad alcuni anni fa l'aerofotogrammetria era possibile solamente attraverso elicotteri o aerei con l'introduzione degli UAV, in grado di volare a quote drasticamente inferiori con costi di gran lunga minori (e risultati metrici altrettanto validi), che questa tecnica ha fatto un sensibile passo in avanti.

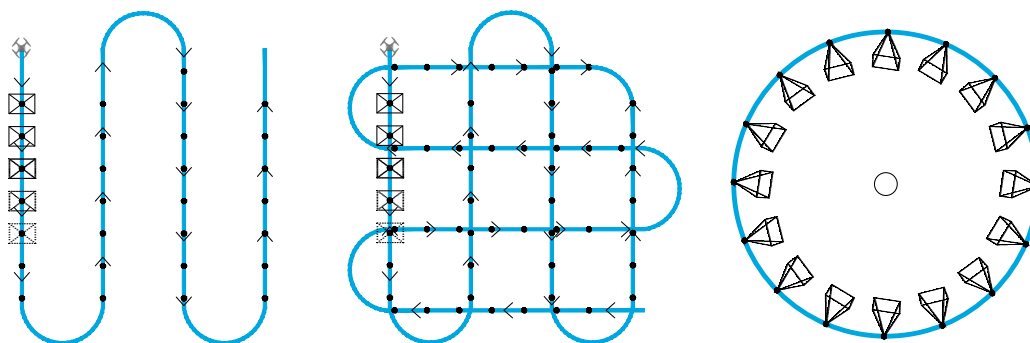


Fig. 227. Tipologie di pianificazioni di voli fotogrammetrici da UAV. (A) Strisciata singola; (B) Strisciata a doppia maglia; (C) Orbita circolare.

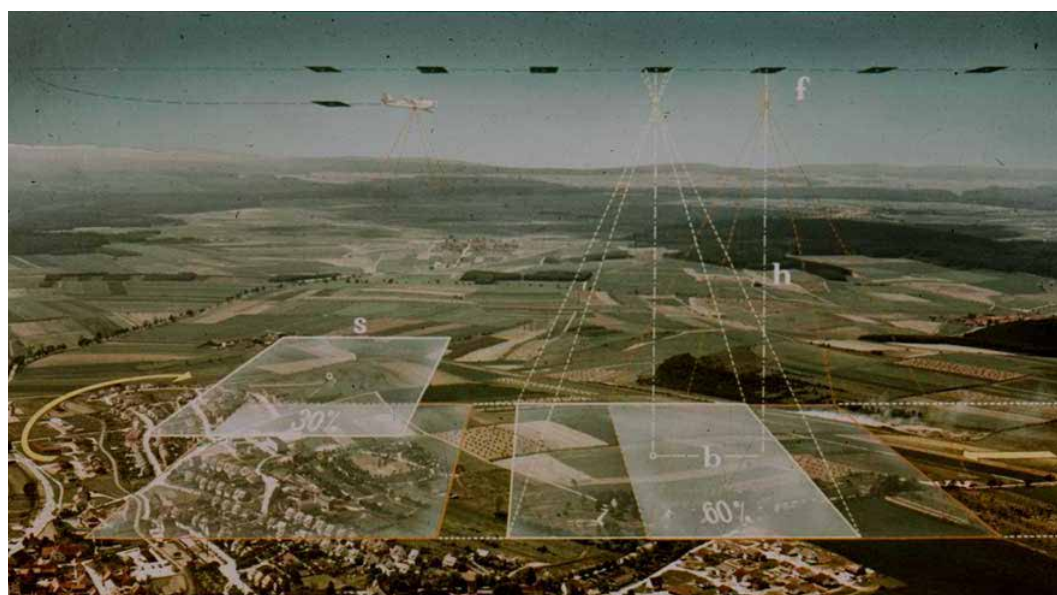


Fig. 228. Tratto dal catalogo illustrativo *Carl Zeiss* (1976) [fonte: https://it.wikiversity.org/wiki/Rilievo_aerofotogrammetrico consultato il 23/12/2018]

Un'acquisizione aerea con l'obiettivo di documentare un bene culturale, solitamente è realizzata attraverso diversi voli allo scopo di documentare l'oggetto nel miglior modo possibile: eseguendo pertanto una maglia semplice con camera nadirale e acquisizioni a camera inclinata a maglia semplice (spesso replicata due volte invertendo le strisciate così da riprendere gli alzati da entrambi i lati) e un'orbita inclinata a 45° (in alcuni casi replicata

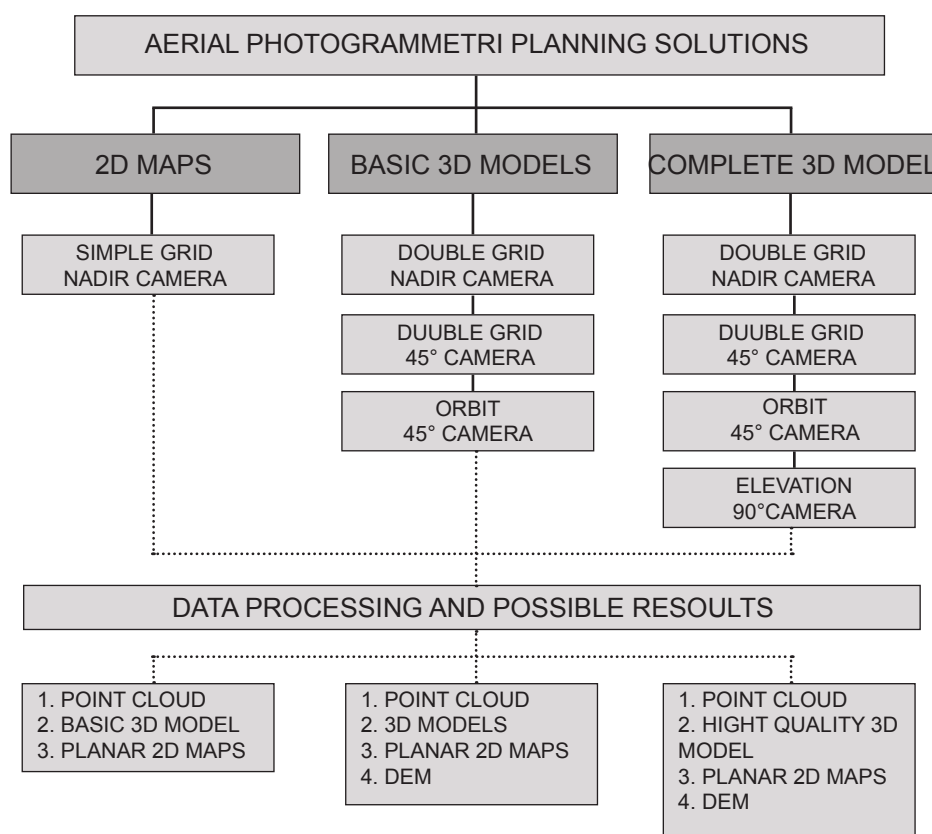


Fig. 229. Tipologie di pianificazione dei voli per l'esecuzione di fotogrammetria aerea in funzione dell'obiettivo.

più volte a quote differenti). Qualora sia necessario documentare con maggiore dettaglio i prospetti dei fabbricati sono, invece, necessarie strisciate orizzontali parallele a quote di volo crescenti. I vantaggi dell'uso delle immagini sferiche in questo processo sono molteplici: nell'analisi dei casi studio saranno proposte differenti soluzioni di impiego dei dati e illustrate le relative potenzialità di integrazione tra differenti sensori. Buona parte dei test

effettuati hanno visto l'utilizzo delle immagini 360° utilizzate come strumento per allineare correttamente le immagini acquisite dalla camera a bordo

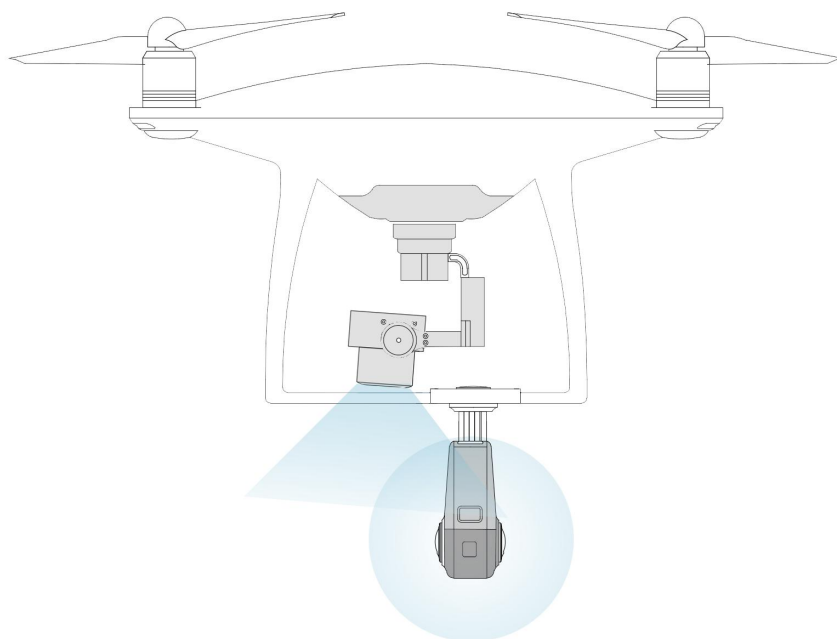


Fig. 230. Raffigurazione della posizione delle camere per l'acquisizione simultanea dei dati.

dell'UAV, ma sono state testate applicazioni che propongono di sostituire completamente le prese inclinate ottenendo un risparmio significativo nei tempi di acquisizione dal momento che con la soluzione proposta è possibile eseguire acquisizioni nadirali e 360° simultaneamente. È importante sottolineare che è stato necessario inclinare di circa 5° la posizione della camera di bordo rispetto ad una acquisizione completamente nadirale affinché i le immagini non presentassero

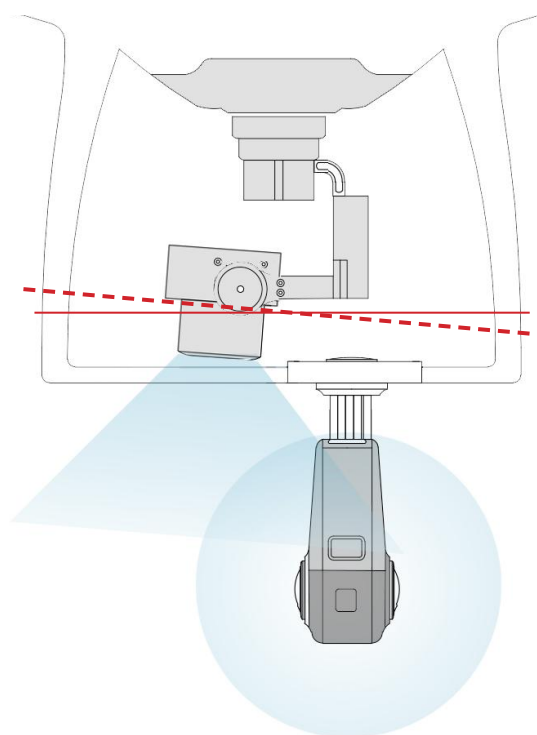


Fig. 231. Nell'immagine l'introduzione di un'inclinazione di 5° rispetto alla posizione della camera nadirale per evitare l'interferenza delle camere nei dati acquisiti.

aree parzialmente ostruite dalla camera aggiuntiva. Dalle verifiche svolte questa inclinazione, tuttavia, non presenta cambiamenti percepibili in fase di elaborazione.

4.5. Utilizzo terrestre dei dati sferici per l'orientamento di immagini *frame*

Prima di introdurre i casi studio, in cui l'uso delle camere sferiche è stato testato per acquisizioni da *UAV*, sono stati compiuti dei test mirati a comprendere le potenzialità di utilizzo del sistema per applicazioni di *Structure From Motion* terrestri attraverso l'integrazione di immagini sferiche e *frame*, dove con il termine *frame* ci si riferisce alle immagini acquisite attraverso fotocamere tradizionali.

Nel caso presentato è stata utilizzata, infatti, la camera con sensore *CMOS* di 1", installata di serie sull'*UAV (Phantom 4 Obsidian)* utilizzato in associazione alla camera sferica utilizzata in questo studio. In questa fase il mezzo non è stato posto in volo, ma utilizzato solamente come stabilizzatore di camera terrestre.

Lo scopo di questo test è stato quello di valutare le potenzialità del processo di allineamento e orientamento esterno delle immagini *frame* coadiuvate da quelle sferiche.

In un primo momento sono stati processati insieme i dati delle due camere avendo cura di andare ad inserire il rispettivo modello di calibrazione per la tipologia di immagine corrispondente. Questi test sono stati nuovamente eseguiti nell'area del poligono di calibrazione (precedentemente descritta) al fine di permettere una valutazione circa la validità metrica dei risultati at-

traverso l'analisi delle tensioni e degli errori di riproiezione medi stimati nei *control points* e nei *check points*. Le prime prove sono state compiute attraverso l'utilizzo di 11 immagini sferiche e 15 immagini *frame*. Come si può osservare dalle immagini riportate, il software è risultato in grado di allineare in modo opportuno i dati di input e l'allineamento risulta correttamente eseguito. Le immagini *frame*, all'interno del processo di calcolo presentavano delle aree di sovrapposizione, non permettendo quindi di comprendere a

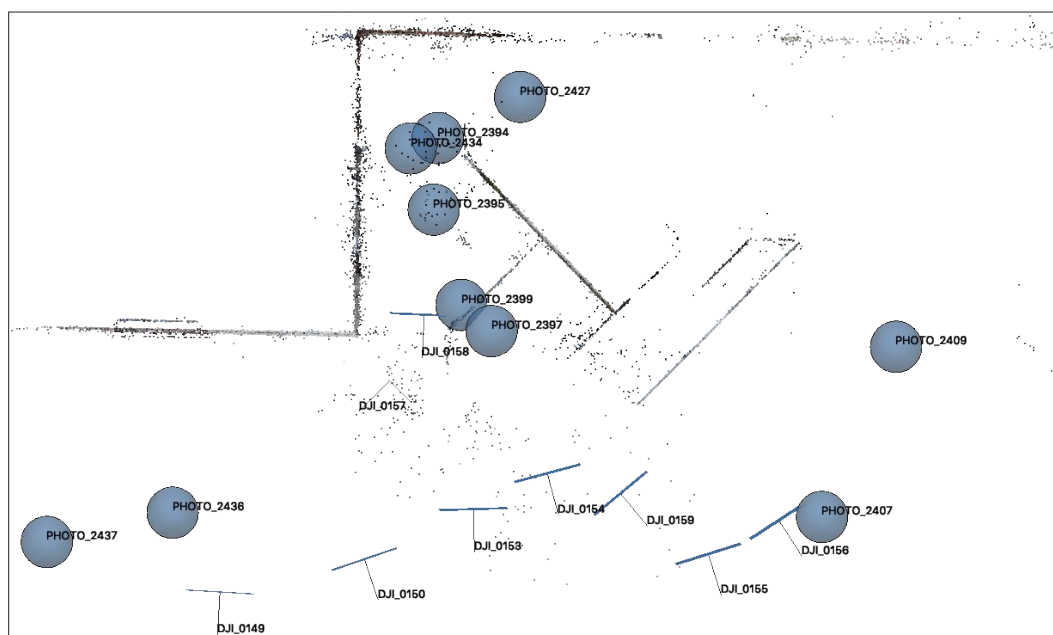


Fig. 232. Risultati di integrazione dati per processo di allineamento di immagini sferiche e *frame*.

fondo se il risultato conseguito fosse dipeso dalla presenza delle sferiche o meno. Per questo motivo, al fine di testare le potenzialità dell'utilizzo delle immagini sferiche per l'allineamento, si è proceduto ad effettuare una riduzione significativa del numero di immagini *frame* affinché queste non presentassero più alcuna area di sovrapposizione tra loro se non con le

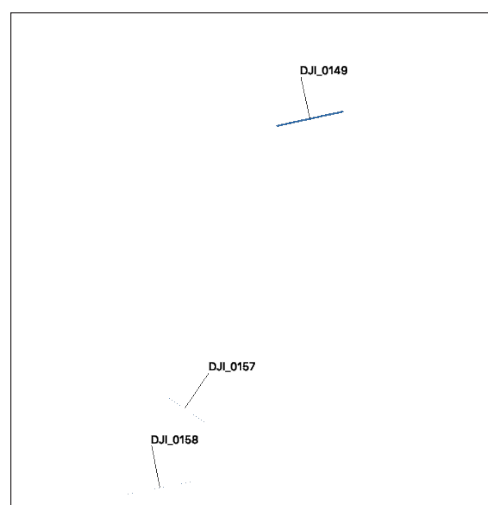


Fig. 233. Errato orientamento delle immagini frame in assenza delle immagini sferiche.

immagini sferiche. Per sincerarsi della assenza di aree di sovrapposizione, inoltre, è stato eseguito un nuovo processamento dati utilizzando soltanto 6 immagini frame.

Dai risultati ottenuti a conferma dell'assenza di aree di *overlap* il processo fallisce restituendo un allineamento di 3 immagini su 6 il cui allineamento risulta come previsto errato. Ottenuta questa conferma sono state quindi reinserite le immagini sferiche ed è stato compiuto un terzo processamento dei dati.

L'uso delle camere sferiche permetterebbe l'orientamento di immagini *frame* che non possiedono aree di sovrapposizione e che pertanto non risulterebbero senza di esse utilizzabili nell'elaborazione.

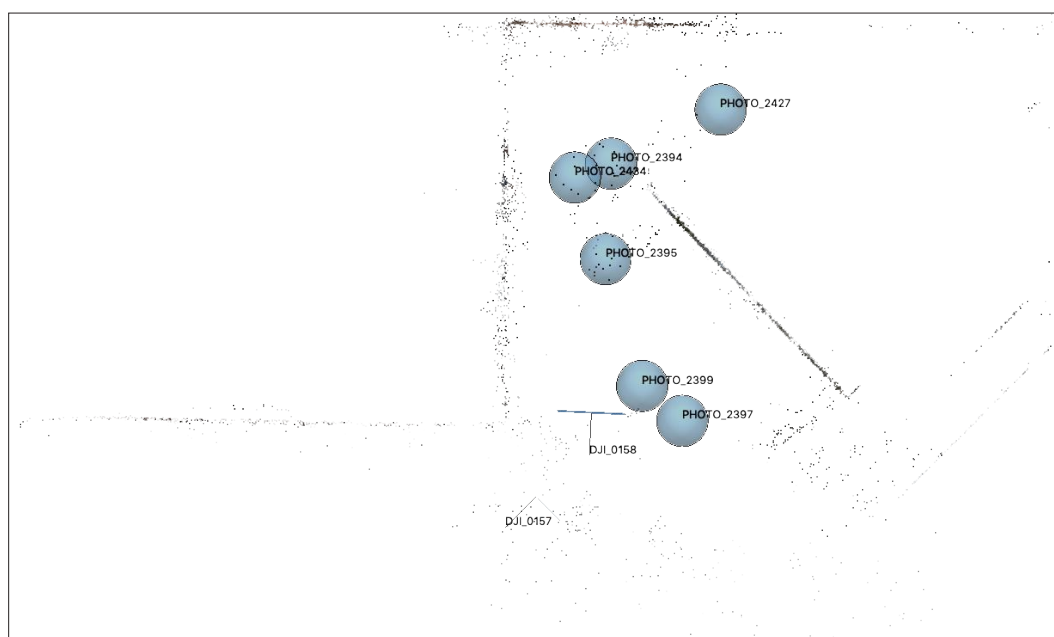


Fig. 234. Risultati di integrazione dati per processo di allineamento di immagini sferiche e *frame*.

4.6. Test del sistema in volo in ambiente controllato

Dopo i test di laboratorio sono stati eseguite diverse prove in campo volo, ovvero un'area appositamente realizzata per effettuare in sicurezza prove e attività sperimentale attraverso l'uso di UAV. Dopo avere eseguito diverse prove oltre che compreso le potenzialità del sistema (dopo i miglioramenti e gli sviluppi illustrati nelle pagine precedenti) sono stati compiute delle prime acquisizioni aerofotogrammetriche testando le potenzialità del sistema in volo. In questa fase sono state eseguite differenti tipologie di analisi che verranno riassunte nel corso di questo paragrafo. Sulla base di tali considerazioni e a seguito della verifica della stabilità del drone sono state eseguite le sperimentazioni in scenari urbani che saranno illustrate nel corso di questo capitolo. L'uso del campo volo come area di prova è risultata fondamentale in quanto ha permesso di testare in completa sicurezza la strumentazione prima dell'utilizzo nelle applicazioni urbane.

Le prove eseguite sono state molteplici, in un primo momento sono state realizzate prove di tipo tecnico che si possono riassumere in:

5. Test di assetto del mezzo
6. Valutazione risposta ai comandi
7. Valutazione durata delle batterie
8. Stazionamento del mezzo
9. Test con e senza l'ausilio del GPS
10. Disabilitazione del *Vision Positioning System (VPS)*
11. Test software volo automatico (*Pix4d Capture, DJI Go, Litchi App*)

Successivamente dopo il superamento dei test precedenti si è simulato uno scenario reale e sono stati svolti voli programmati e manuali al fine dell'ac-

quisizione di dati per la realizzazione di modelli tridimensionali. Questo tipo di prove sono state eseguite dopo il rilievo delle coordinate di target a terra attraverso l'utilizzo di una stazione totale e *GPS* topografico attraverso l'uso della tecnologia *NRTK* in appoggio alle reti di stazioni permanenti di *ITAL-POS*. Trattandosi l'area di prova di una superficie priva di ostacoli tridimensionali significativi sono stati posti nel campo di volo una serie di ostacoli artificiali per valutare la capacità di ricostruzione della tridimensionalità degli oggetti.

Si è scelto di illustrare nel corso di questo paragrafo soltanto alcune delle prove eseguite: ad esempio saranno illustrati solamente i dati con le coordinate dei target ottenute mediante *NRTK* trascurando quelle della stazione totale dal momento che, per quanto accurate, hanno richiesto maggiori tempi sul campo. La tecnologia *NRTK* che appare più speditiva permettendo un risparmio concreto in termini di tempo sul campo.



Fig. 235. Utilizzo della stazione totale per la misura di coordinate di punti a terra.

Nella tabella sono riassunte i test eseguiti:

TEST SPERIMENTALI ESEGUITI		
TIPO DI TEST	DATA	NOTE
Test di assetto del mezzo	03/07/2018	Il mezzo si dimostra stabile in tutte le prove eseguite.
Valutazione risposta ai comandi	03/07/2018	La risposta ai comandi non risulta avere subito variazioni significative.
Valutazione durata delle batterie	03/07/2018	Il consumo di batteria appare maggiore rispetto alla durata del mezzo e i consumi appaiono maggiori del 30%. E consigliata una durata di volo non superiore ai 15 min.
Stazionamento del mezzo	03/07/2018	Il mezzo appare stabile in assenza di comandi in ambienti esterni con buona copertura <i>GPS</i> .
Test con e senza l'ausilio del <i>GPS</i>	03/07/2018	L'ausilio del <i>GPS</i> migliora la stabilità del mezzo. In ambienti interni è necessario prestare massima attenzione essendo disabilitato il sensore di posizionamento visivo (<i>VPS</i>)
Disabilitazione del <i>Vision Positioning System (VPS)</i>	03/07/2018	In ambienti esterni con buona copertura satellitare la disabilitazione del <i>VPS</i> non genera cambiamenti significativi.
Test software volo automatico (<i>Pix4d Capture, DJI Go, Litchi App</i>)	03/07/2018	Tutti i software di volo appaiono funzionanti.
SIMULAZIONI OPERATIVE ESEGUITE		
Acquisizioni aerofotogrammetriche tramite volo manuale	03/07/2018	Esecuzione di strisciate parallele manuali a 10 metri di altezza tramite scatti programmati ogni secondo.
Volo automatico tramite <i>Pix4d Capture</i> per acquisizioni aerofotogrammetriche	03/07/2018	Esecuzione di strisciate parallele manuali a 30 metri di altezza tramite scatti programmati ogni secondo. Sono acquisiti in simultanea dati da entrambe le camere la camera frame richiede inclinazione a 5° per le acquisizioni nadirali.
Programmazione piani di volo e test stabilità del mezzo con <i>Litchi App</i>	03/07/2018	Test di volo programmato per acquisizioni <i>Virtual Reality</i> su più quote di volo.
Utilizzo simultaneo delle della camera sferica e della camera onboard di serie	03/07/2018	La camera di serie viene utilizzata in posizione nadirale.

Tab. 43. Test sperimentali eseguiti sul drone in campo volo.

Per simulare uno scenario reale sono stati distribuiti uniformemente sull'area di test 14 marker topografici allo scopo di potere ottenere un controllo sulla qualità della ricostruzione tridimensionale. Tali marker sono realizzati in modo da potere essere chiaramente identificabili nelle immagini aeree scattate. La modalità di acquisizione selezionata sulla *GoPro Fusion* è stata quella dello scatto temporizzato impostando un lasso di tempo variabile da 1 a 3 secondi tra gli scatti.

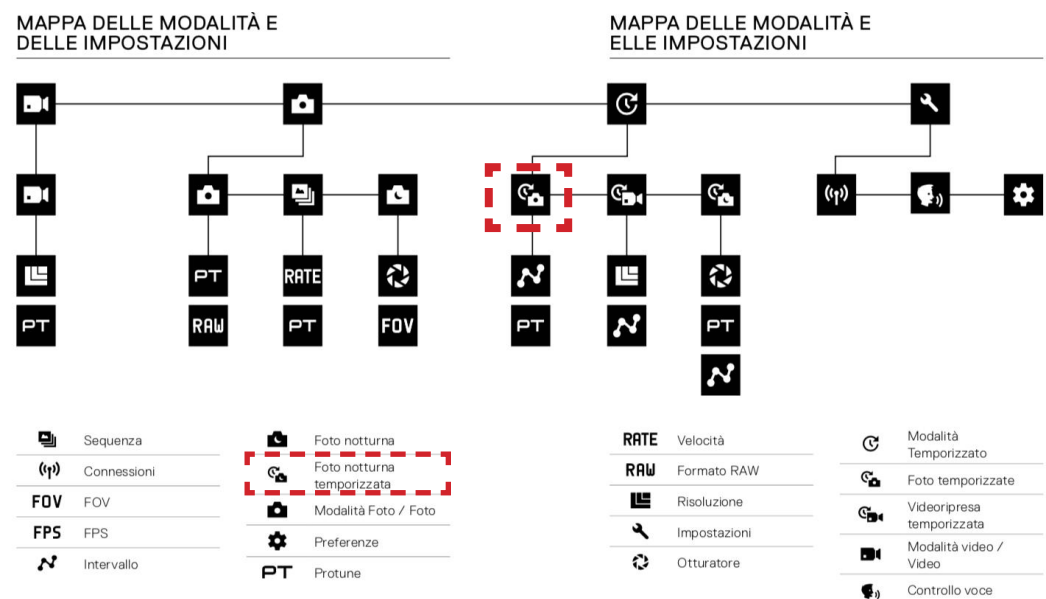


Fig. 236. Modalità impostata su *GoPro Fusion* per il settaggio degli scatti temporizzati.

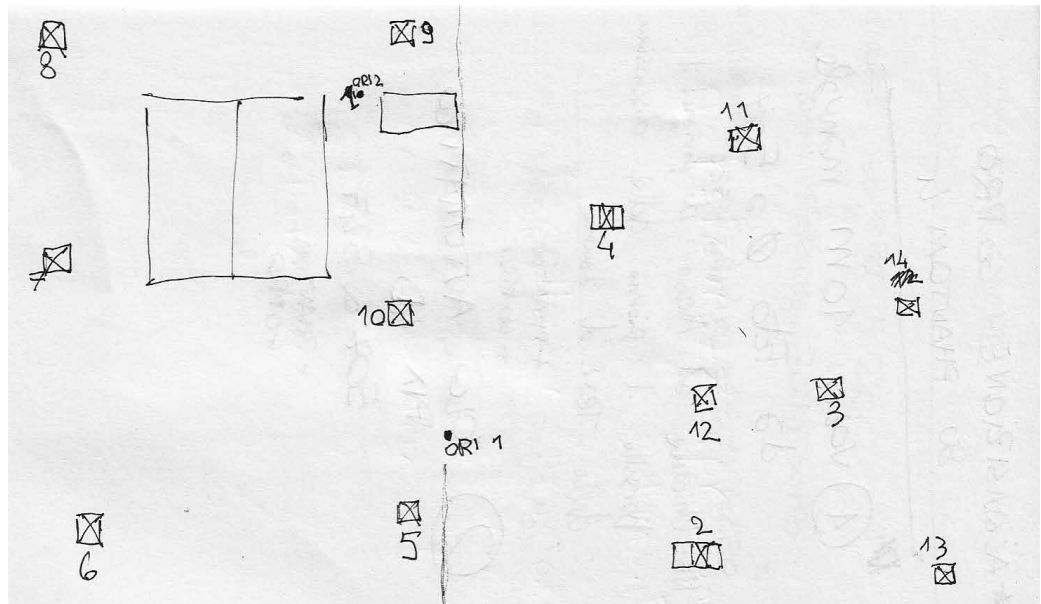


Fig. 237. Eidotipo posizione dei *target* topografici per aerofotogrammetria su campo volo.

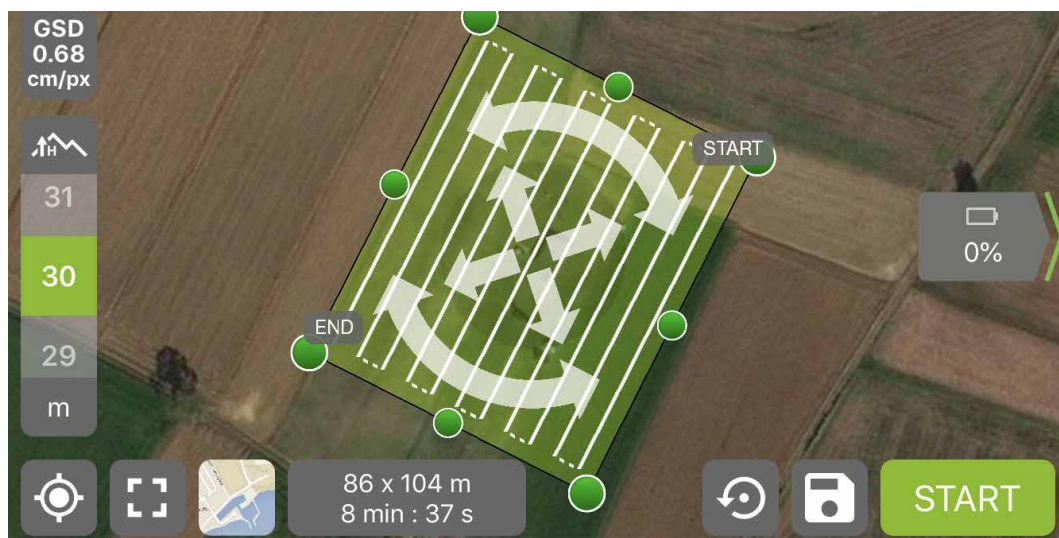


Fig. 238. Pianificazione del volo con *Pix4d Capture* sull'area di studio.



Fig. 239. Target topografici per il volo aerofotogrammetrico.



Fig. 240. Acquisizione coordinate dei target topografici attraverso tecnologia *NRTK*.

Le strutture artificiali realizzate hanno permesso di valutare ulteriormente la rispondenza del modello al variare della quota di volo.

Dopo la fase di acquisizione, a seguito dei risultati esposti nei capitoli precedenti e nell'ottica di restituire un modello valido in tempi contenuti, si è scelto di procedere alla connessione delle immagini realizzate dai due sensori della camera *Go Pro* attraverso la soluzione software proprietaria in quanto si è dimostrata la più valida dopo i test effettuati precedentemente. Delle diverse prove effettuate si riporteranno i risultati relativi alle programmazioni di volo automatico eseguite ad un'altezza di metri 30 (in quanto più simili a quelle da eseguire sugli scenari reali in ambiente urbano che saranno illustrati successivamente).

La prima operazione effettuata è stata quella della selezione dei dati dal momento che le immagini sferiche acquisite tramite acquisizioni temporizzate risultavano in numero eccessivo. Per farlo ci si è avvalsi di tecniche differenti: in un primo momento si è scelto, dopo avere calcolato il tempo intercorso tra gli scatti eseguiti dalla camera presente sul mezzo, di effet-

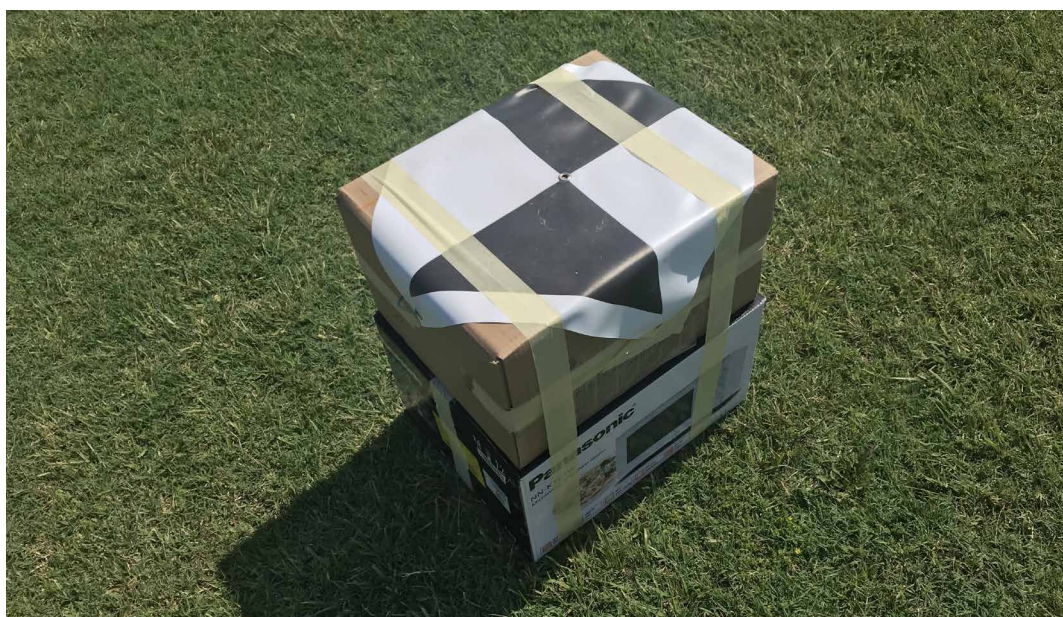


Fig. 241. Realizzazione di volumi artificiali per la valutazione della qualità delle geometrie ricostruite.

tuare una prima selezione delle immagini andando a ridurre drasticamente il numero scegliendo di mantenere un'immagine ogni 4 ovvero così da avere uno scatto ogni 3 secondi (la temporizzazione era impostata per 1 scatto ogni secondo). Successivamente è stata eseguita una selezione più precisa attraverso la visualizzazione delle posizioni delle prese su mappa (possibile grazie alle informazioni di *geotag* acquisite tramite il *GPS* interno delle rispettive camere). In questo modo sono state mantenute soltanto le immagini ritenute valide ai fini dello studio da eseguire. Attraverso questi metodi è stato possibile effettuare una selezione che ha permesso di elaborare solo il minimo indispensabile di dati.

Il secondo passaggio è stato quello del calcolo delle coordinate. Come detto precedentemente si esporrà il solo caso dell'utilizzo delle coordinate ottenute tramite *NRTK* attraverso il ricevitore *GNSS Geomax Zenith 35* connesso alla rete delle stazioni permanenti *Italpos*. Il calcolo delle coordinate ottenuto tramite questo metodo è molto semplice in quanto è necessario solamente andare a correggere i valori delle quote che essendo ellissoidiche

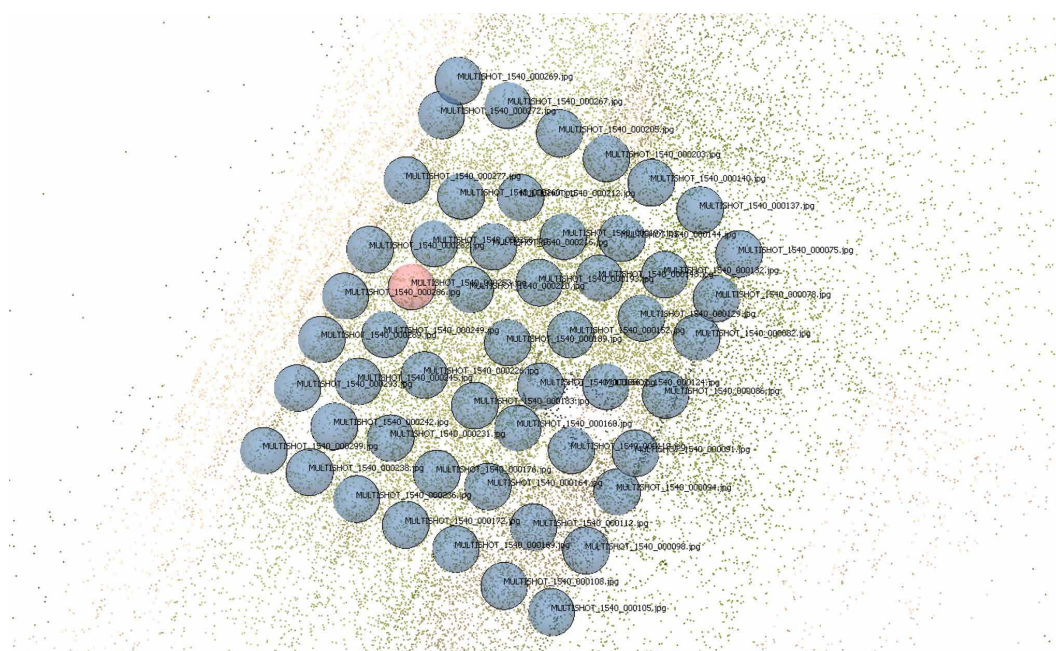


Fig. 242. Selezione manuale delle immagini sferiche su mappa eseguita tramite la visualizzazione delle informazioni di *geotag* attraverso *Agisoft Photoscan*.

necessitano di essere proiettate sul geoide. Lo scarto per riportare sul geoide quote ellissoidiche, come si può osservare dalla tabella, risulta di circa 50m mentre le coordinate *EST* e *NORD* non subiscono alcuna variazione. Per effettuare questo processo si è utilizzato il software *ConveRgo_ge* alla versione 2.05.



Fig. 243. Settaggi utilizzati per la proiezione delle coordinate da ellissoidiche a geoidiche attraverso *ConveRgo_ge* alla versione 2.05.

PROIEZIONE COORDINATE ACQUISITE SUL GEOIDE				
Punto	Est	Nord	Quota	Quota Corretta
5	384985.304	4988776.242	351.393	301.000
6	384999.277	4988766.673	351.148	300.758
7	384992.016	4988752.959	351.043	300.652
8	384984.872	4988739.597	350.988	300.597
9	384970.144	4988748.199	351.281	300.887
10	384978.869	4988764.075	351.361	300.968
11	384958.746	4988763.683	351.525	301.129
12	384964.644	4988776.109	351.608	301.212
13	384954.705	4988791.409	351.890	301.492
14	384947.291	4988777.526	351.806	301.407

Tab. 44. Coordinate dei *target* topografici prima e dopo la proiezione sul geoide di riferimento.

Successivamente si è proceduto con la fase di ricostruzione per la quale è opportuno sottolineare alcuni aspetti. Le acquisizioni sono state eseguite sia tramite volo automatico che volo naturale e possono essere riassunte in:

1. Acquisizioni nadirali + 360°
2. Acquisizioni camera inclinata 45° + 360

Verranno esposti nel corso di questo paragrafo le sperimentazioni sull'uso delle immagini 360 a supporto delle acquisizioni a camera inclinata dal momento che in questa fase sono risultate quelle di maggior interesse. L'uso delle immagini nadirali e delle sferiche sarà invece approfondito nelle applicazioni sui casi studio.

In un primo momento i dati sono stati elaborati indipendentemente per tipologia ovvero sono state inserite in progetti differenti le immagini sferiche e le immagini inclinate. Problematiche significative sono state riscontrate nell'allineamento delle camere inclinate a 45: questi dati infatti, sono stati elaborati prendendo in considerazione indipendentemente ognuna del-

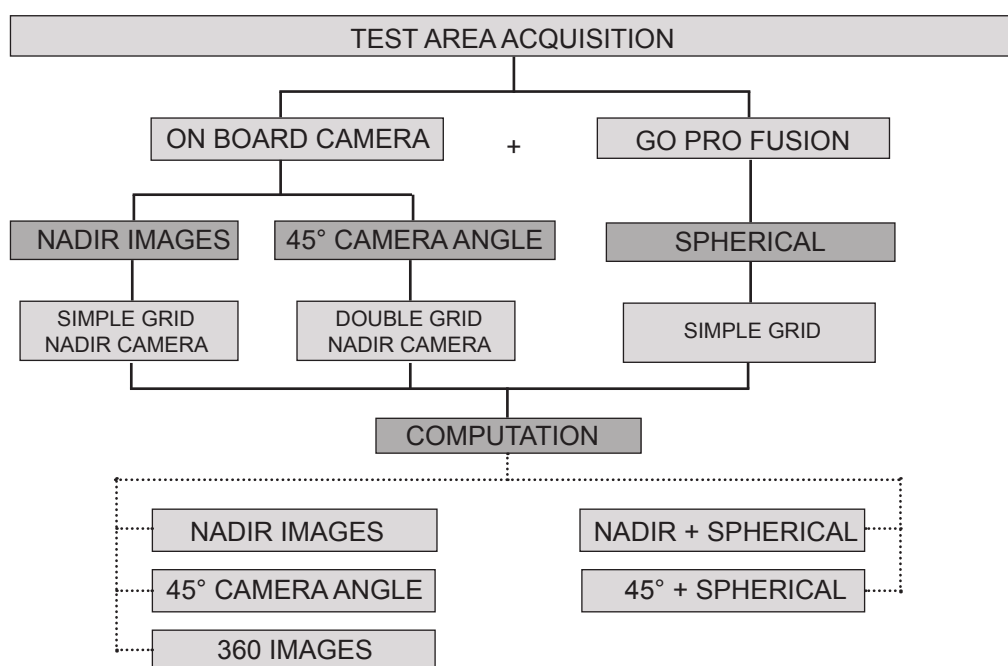


Fig. 244. Schematizzazione acquisizioni effettuate e relativo processamento per i dati acquisiti in area sperimentale.

le griglie di strisciate effettuate. Per la tipologia di camera inclinata, infatti, sono stati eseguiti due voli automatici che si differenziavano per l'orientamento dei percorsi di volo. Sebbene, non inserendo le coordinate dei target topografici posti a terra in fase di orientamento, il software risulti in grado di allineare tutte le immagini questo non è possibile nel momento in cui queste vengono inserite facendo sì che solo 37 su un totale di 87 immagini siano allineate correttamente. Questo fatto rende impossibile utilizzare di fatto una sola strisciata di immagini inclinate con l'inserimento delle coordinate dei punti di controllo disposti a terra. Normalmente questa tipologia di dati viene associata in fase di calcolo alle acquisizioni nadirali e a una seconda griglia di inclinate perpendicolare alla prima. Associando immagini nadirali e inclinate, come solitamente avviene, il problema non si manifesta. Questo comporta, tuttavia, l'esecuzione di più voli per ottenere un valido risultato con la conseguenza di un aumento dei tempi delle acquisizione sul campo. Parallelamente, le immagini sferiche generate dalla *GoPro Fusion*, elaborate in un processo separato, non presentano problematiche di allineamento e generano correttamente nuvole di punti (seppur con errori stimati nei punti di controllo leggermente più elevati a causa della risoluzione inferiore delle stesse dovute alla tipologia di camera utilizzata). In termini numerici, sugli stessi punti di controllo acquistati con tecnologia *NRTK*, a parità di altezza di volo (30m) e condizioni al contorno, gli errori stimati appaiono nell'ordine dei 2-3 cm per le acquisizioni realizzate attraverso la camera tradizionale del mezzo, mentre si attestano sui 5-6 cm per quelle realizzate dalla *GoPro Fusion*. L'uso delle sole immagini sferiche aeree risulta, dopo gli studi compiuti, compatibile con le esigenze di *mapping* speditivo di un aerea dal momento che permette di ottenere in tempi brevissimi dati metrici validi (seppur leggermente meno accurati) di grandi aree già attraverso la realizzazione di poche immagini con una conseguente riduzione significativa

oltre che dei tempi sul campo anche delle relative elaborazioni.

Valutate le problematiche dell'utilizzo delle sole immagini inclinate e dei buoni risultati conseguiti nel progetto delle sole immagini sferiche si è tentato di utilizzare insieme queste tipologie di dati al fine di valutare i vantaggi ottenibili dall'integrazione di queste tipologie di dati.

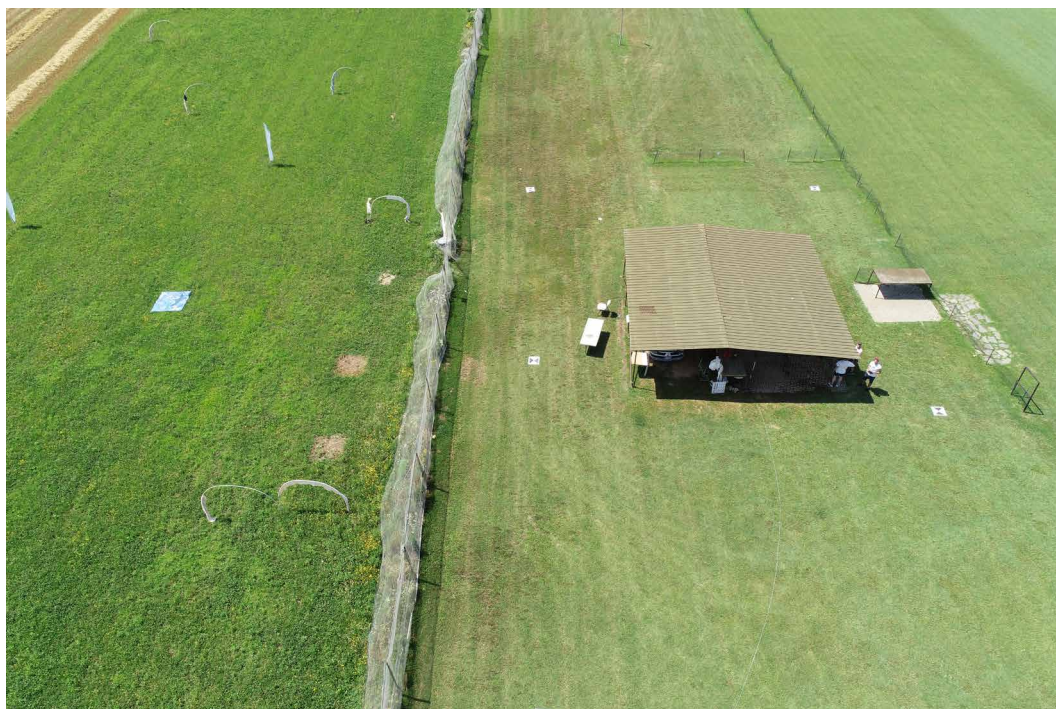


Fig. 245. Esempio di immagine realizzata con la camera *onboard* del *Phantom 4 Pro Obsidian* inclinata a 45° .



Fig. 246. Esempio di immagine sferica acquisita da *GoPro Fusion*

45°

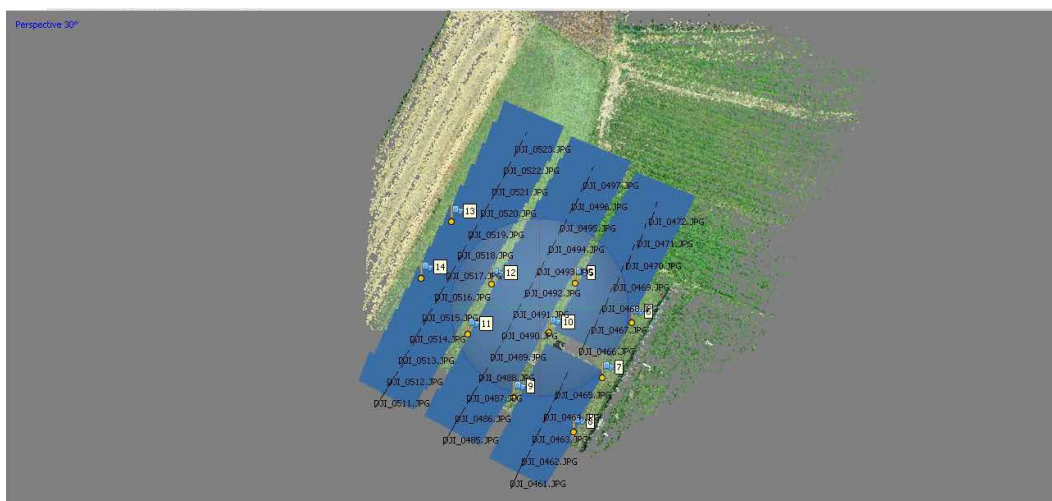


Fig. 247. Allineamento delle sole immagini a camera inclinata realizzate con APR DJI Phantom 4 Pro Obsidian.

360°

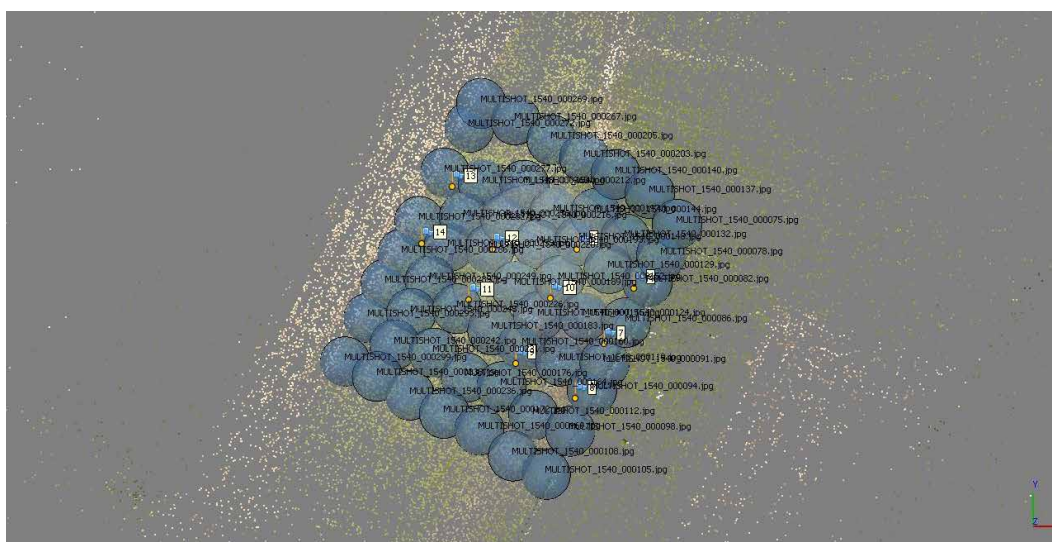


Fig. 248. Allineamento delle sole immagini a camera sferiche realizzate attraverso la Camera Go Pro Fusion

45 + 360°

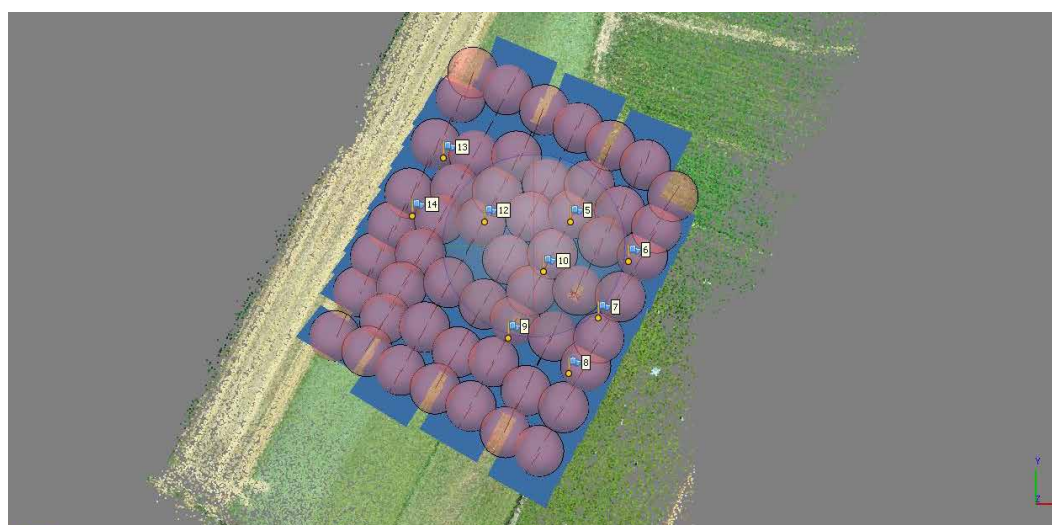


Fig. 249. Utilizzo delle immagini sferiche per l'orientamento delle inclinate. Il colore rosso indica che le immagini sono state disabilitate per le fasi successive all'allineamento.

Per tali motivi si è provato ad elaborare all'interno di uno stesso progetto sia le immagini sferiche che quelle inclinate, utilizzando le prime per la prima fase del processo di ricostruzione, ovvero quella di orientamento e, successivamente, non utilizzandole per i processi di densificazione della nuvola di punti, di realizzazione della *mesh*, texturizzazione. Grazie ai dati sferici, le acquisizioni inclinate risultano tutte correttamente allineate rendendo possibile l'utilizzo del 100% delle immagini di partenza.

Entrando nello specifico è stata compiuta un analisi dei dati ottenuti nei differenti stadi del processo di ricostruzione tridimensionale (come illustrato nello schema) rispettivamente per ognuno dei progetti (acquisizioni inclinate 45°, immagini sferiche 360° e 45+360°) prendendo in considerazione tutti i prodotti della ricostruzione (*Spare/Dense point cloud, Mesh, Texture, Ortoimage*). Osservando i risultati presentati nelle immagini comparative si può osservare che con il solo utilizzo delle immagini a 45°, la relativa nuvola

TIPOLOGIA DATI	N° IMMAGINI ALLINEATE	% IMMAGINI ALLINEATE
Camera inclinata (45°)	38/87	43.7%
Immagini Sferiche (360°)	53/53	100%
45° + 360°	140/140	100%

Tab. 45. Percentuali e numero di immagini allineate per le differenti elaborazioni.

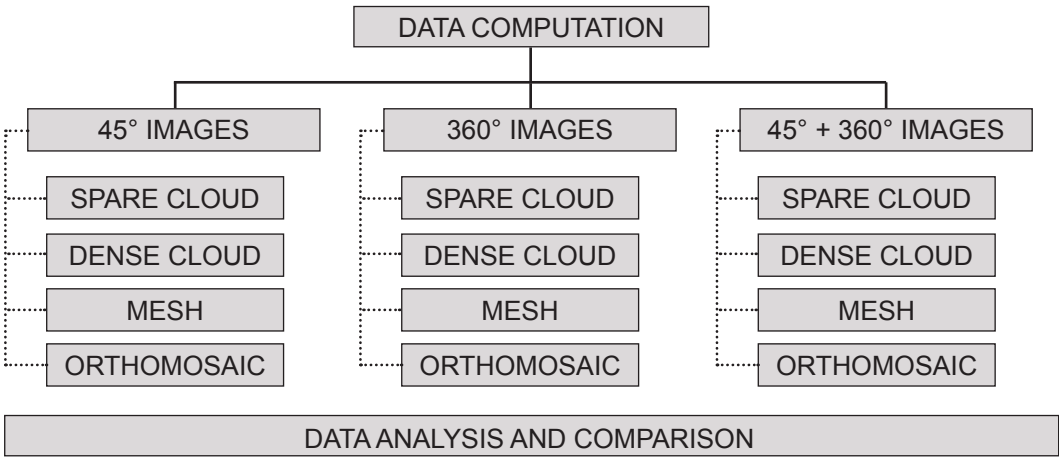


Fig. 250. Schematizzazione del processo utilizzato per elaborare i dati acquisiti e i relativi elaborati ottenuti. Le immagini sono state elaborate prima in modo indipendente per tipologia e poi all'interno di uno stesso progetto.

45°

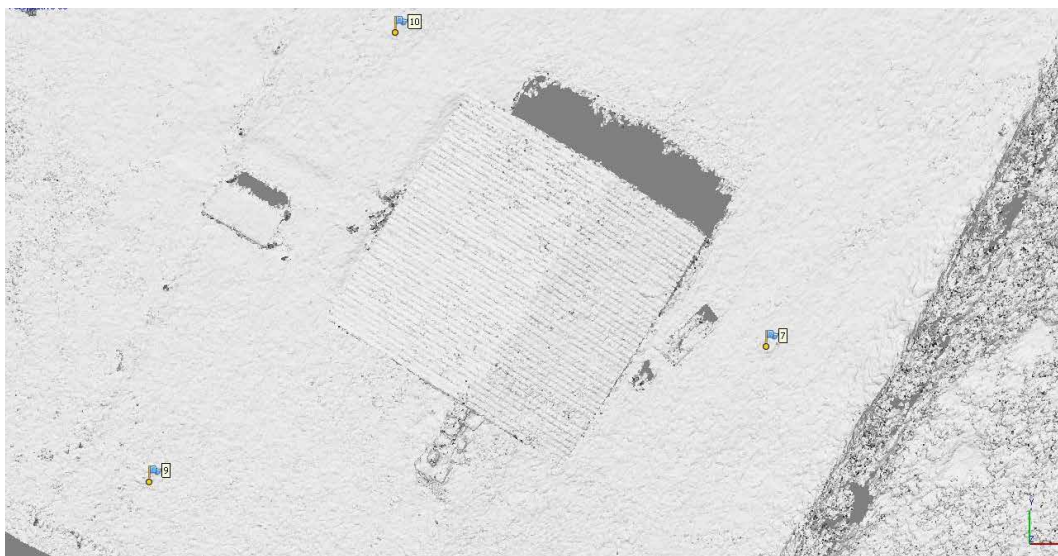


Fig. 251. Allineamento delle immagini a camera inclinata sull'area delle sperimentazioni.

360°

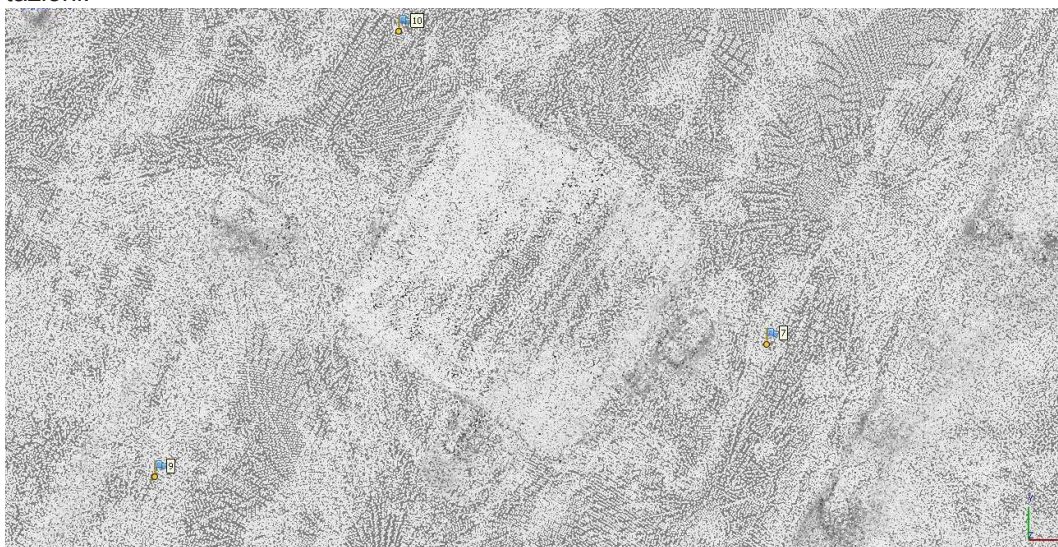


Fig. 252. Allineamento delle sole immagini a camera sferiche sull'area delle sperimentazioni.

45 + 360°



Fig. 253. Utilizzo delle immagini sferiche per l'orientamento delle inclinate sull'area delle sperimentazioni.

di punti appare più definita ma presenta delle lacune nelle aree non coperte dalle immagini. Ciò non avviene per la nuvola ricavata dalle immagini sferiche che appare priva di porzioni mancanti anche se meno densa. La nuvola realizzata tramite integrazione dei dati presenta, invece, la densità di punti dell'elaborazione delle sole inclinate senza, tuttavia, la presenza di porzioni mancanti dal momento che, attraverso questa metodologia di integrazione, le immagini inclinate (il cui allineamento falliva se utilizzate da sole) risultano tutte correttamente allineate. Il confronto risulta più chiaro ponendo l'attenzione sulla mesh generata e sull'ortomosaico relativo a ogni tipologia di elaborazioni: la mesh realizzata con l'integrazione dei dati, pur non presentando il livello dettaglio di quella ottenuta con sole immagini inclinate, non presenta più alcuna lacuna e ponendo l'attenzione su aree come quella delle automobili attorno al fabbricato ci si accorge che i contorni appaiono meglio delineati. Miglioramenti significativi sono osservabili anche nell'ortomosaico ricavato tramite l'integrazione dei dati che presenta un miglior



Fig. 254. Comparazione di un area di dettaglio sulla mesh con le diverse tipologie di acquisizioni.



Fig. 255. Comparazione di un area di dettaglio sull'ortomosaico con le diverse tipologie di acquisizioni.

45°



Fig. 256. Mesh realizzata attraverso l'uso delle sole immagini a camera inclinata.

360°

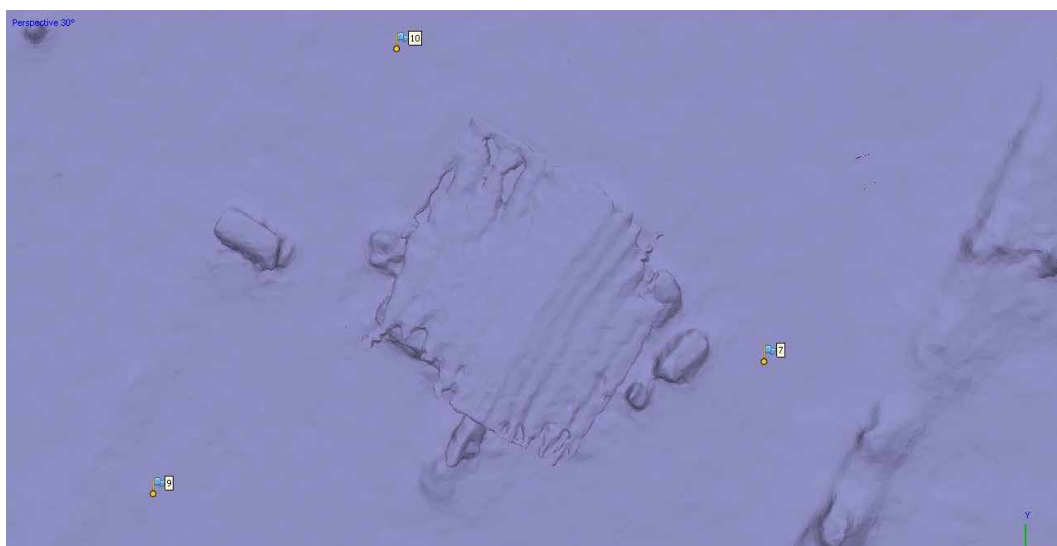


Fig. 257. Mesh realizzata attraverso l'uso delle sole immagini a camera sferiche.

45 + 360°

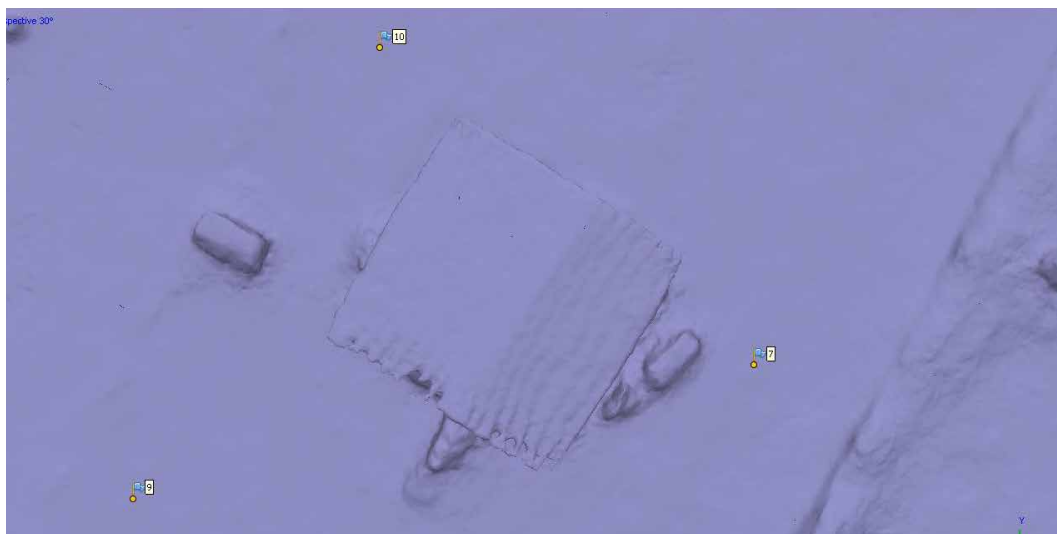


Fig. 258. Mesh realizzata attraverso l'uso delle sfere per l'orientamento delle inclinate.

45°



Fig. 259. Ortomosaico realizzato attraverso l'uso delle sole immagini a camera inclinata.

360°

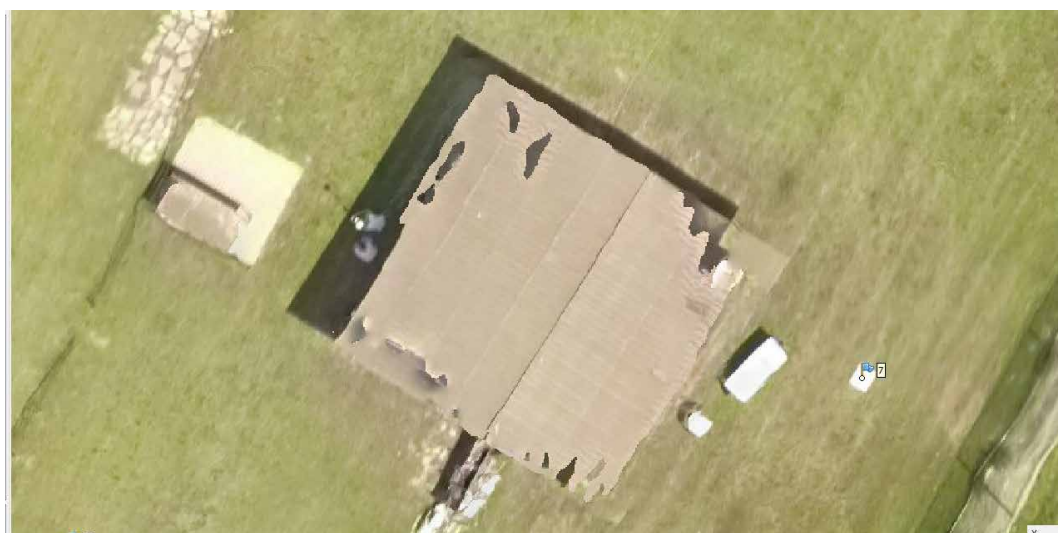


Fig. 260. Ortomosaico realizzato attraverso l'uso delle sole immagini a camera sferiche.

45° + 360°



Fig. 261. Ortomosaico realizzato attraverso l'uso delle sferiche per l'orientamento delle inclinate.

dettaglio seppur con una leggera presenza di distorsione a barilotto (*barrel effect*).

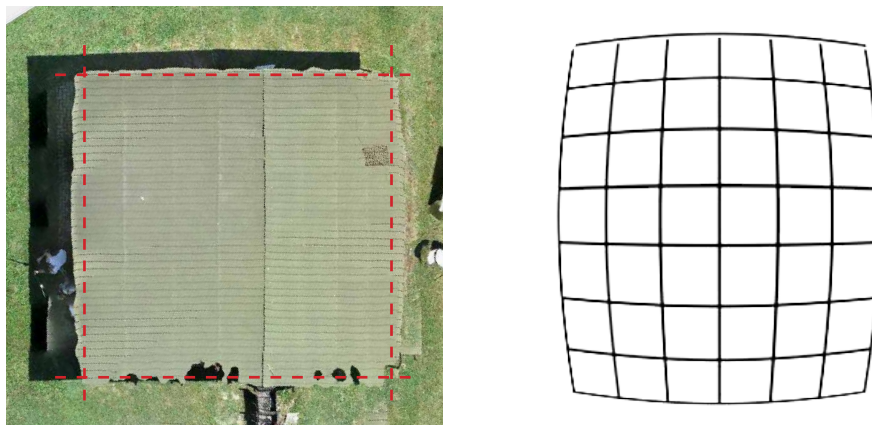


Fig. 262. Dettaglio della manifestazione del leggero effetto di distorsione a barile riscontrata nell'ortomosaico realizzato tramite l'integrazione di immagini sferiche e inclinate.

APPROFONDIMENTI

4.10. Influenza tie point e key point e nuove versioni software

I test sperimentali esposti in questa sezione sono stati realizzati attraverso l'uso della versione di *Photoscan Professional 1.4.0 build 5650*, tuttavia per completezza sono stati eseguiti nuovamente dei test con la versione più recente *1.4.4 build 6848* che hanno prodotto risultati differenti. In particolare si è testato l'allineamento delle camere inclinate ottenendo risultati contrastanti.

Come si può osservare, infatti, il software non appare più in grado di allineare correttamente le immagini elaborandole con i medesimi settaggi (ovvero senza limitare il numero di *tie point* e *key point* (fig.264). Le problematiche di allineamento, si manifestano, con

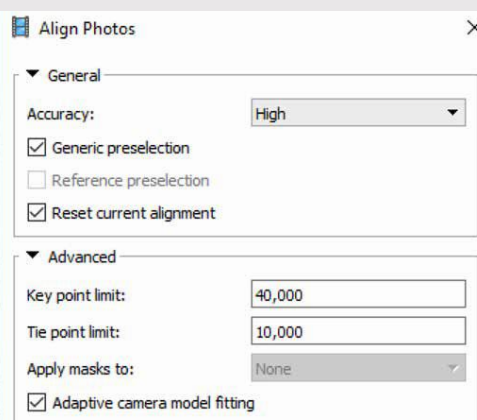


Fig. 263. Limitazione dei *Key Point* e dei *Tie Point*.

l'inserimento dei *marker*. Se nelle prove finora esposte si riusciva ad allineare correttamente una porzione delle immagini corrispondente a circa il 44% immagini inclinate (fig. 265), nessuna risulta allineata correttamente con la versione *1.4.4 build 6848*. In particolar modo, dopo avere testato differenti approcci per ovviare il problema, è stata trovata come soluzione quella di limitare il numero di *key point* da illimitati a 40.000 e i *tie point* da illimitati a 10.000. Attraverso questa variazione di settaggio anche in questa versione risulta possibile allineare correttamente la totalità delle immagini (qualora le coordinate dei marker non siano state inserite prima del calcolo inserendole quindi dopo la fase di allineamento) (fig.266). Effettuando la collimazione dei *target* topografici prima di procedere con l'allineamento il software riesce ad allineare 62/87 ovvero il 71.3% (fig. 267) Nonostante queste variazioni marginali della nuova *build* si giunge alla medesima conclusione ovvero che una griglia semplice composta da sole immagini inclinate non risulta integralmente allineabile in presenza di target di coordinate note in assenza delle immagini sferiche.

	ALLINEATE	% ALLINEATE	ERR. STIMATO
<i>Photoscan Pro v. 1.4.0 build 5650 (nessun limite tie/key point) GCP prima dell'allineamento.</i>	38/87	43.7%	0.056 [m]
<i>Photoscan Pro v. 1.4.4 build 6848 (nessun limite tie/key point).</i>	87/87**	100%**	0.20** [m]
<i>Photoscan Pro v. 1.4.4 build 6848 (limite: key point 40.000 tie point 10.000) GCP prima dell'allineamento.</i>	62/87	71.3%	0.017
<i>Photoscan Pro v. 1.4.4 build 6848 (limite: key point 40.000 tie point 10.000) GCP dopo dell'allineamento.</i>	87/87	100%	0.015

Tab. 46. Nella tabella la percentuale di allineamento relativa a tutti i test eseguiti.

**Per quanto il programma restituisca un allineamento del 100% questo risulta errato. Si faccia riferimento alla prima figura della pagina successiva.

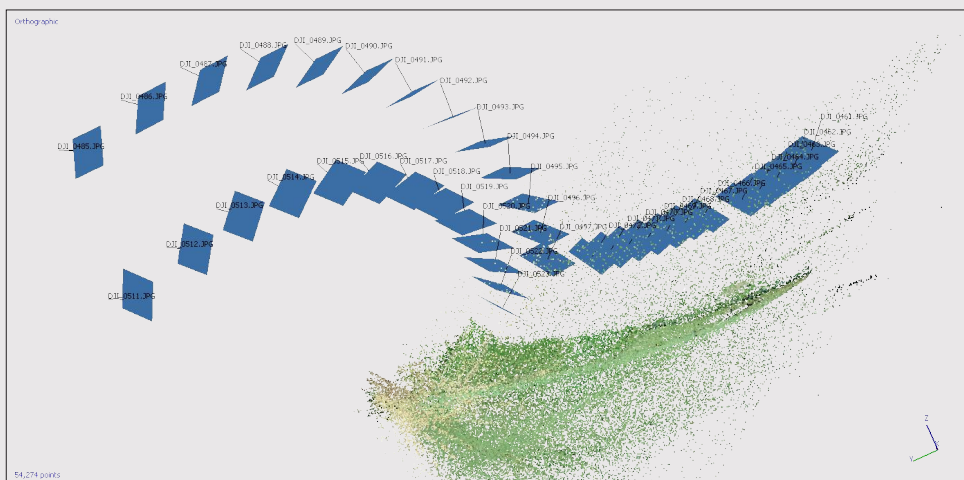


Fig. 264. Risultati di allineamento delle immagini inclinate nella versione di *Photoscan 1.4.4 build 6848* (nessun limite *tie/key point*).

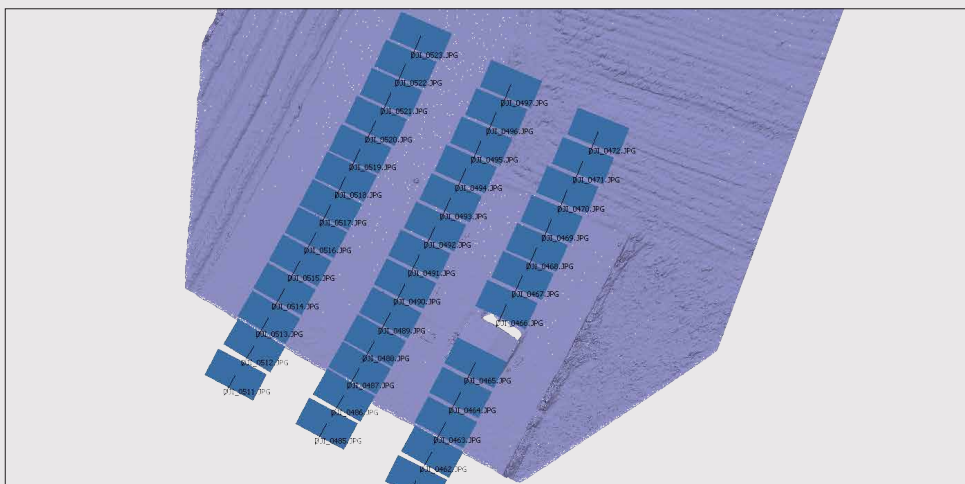


Fig. 265. Risultati di allineamento delle immagini inclinate nella versione di *Photoscan Pro v. 1.4.0 build 5650* (nessun limite *tie/key point*) GCP prima dell'allineamento.

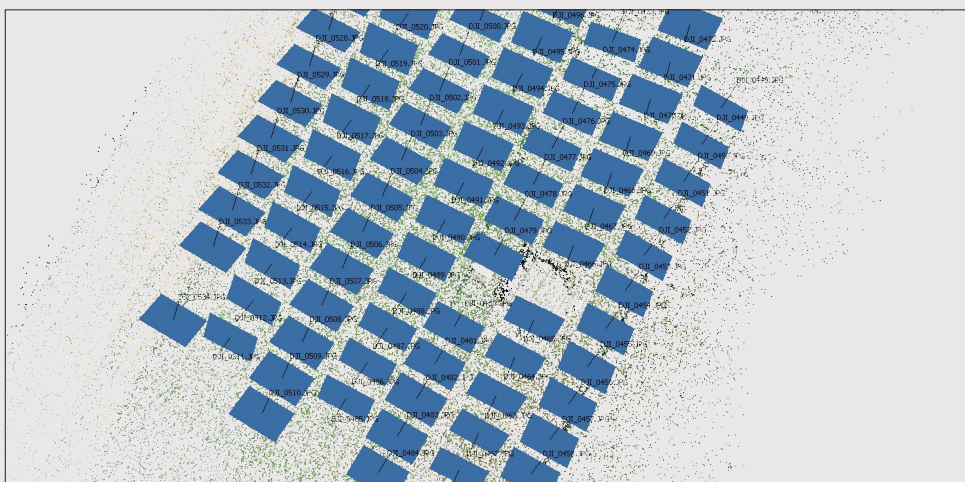


Fig. 266. Risultati di allineamento delle immagini inclinate nella versione di *Photoscan 1.4.4 build 6848*

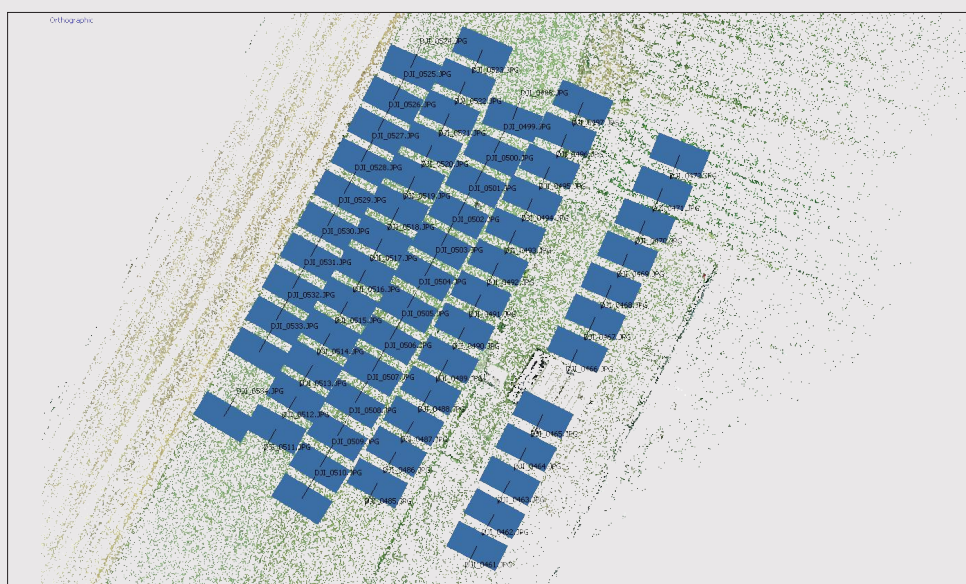


Fig. 267. Risultati di allineamento delle immagini inclinate nella versione di *Photoscan 1.4.4 build 6848*. Limite: *key point 40.000 tie point 10.000*) GCP prima dell'allineamento.

4.7. Scelta delle aree di studio

A seguito dei risultati conseguiti in fase sperimentale si è scelto di testare il sistema in uno scenario urbano. Per questo motivo sono state identificate due aree nel *Comune di Torino* che per la loro conformazione hanno reso possibili differenti tipologie di applicazioni di questa tecnologia. Le aree selezionate sono state quella del *Castello del Valentino* e del *Borgo Medievale*



Fig. 269. Veduta del Borgo Medievale di Torino visto dal fiume [immagine autoprodotta]



Fig. 268. Vista attuale del fronte principale verso il corso Marconi del Castello del Valentino [immagine autoprodotta]

a Torino.

Il Castello del Valentino è stato scelto come esempio di un bene culturale di elevata rilevanza la cui documentazione con tecnologie innovative potrebbe dare il via ad ulteriori approfondimenti oltre che permettere una migliore conoscenza del bene architettonico stesso.

Il Borgo Medievale di Torino, invece, è stato scelto per la sua particolare conformazione morfologica composta da vie molto strette su cui si attestano i fronti degli edifici. Un rilievo fotogrammetrico di tali aree eseguito in modo tradizionale presenta criticità evidenti dovute alla difficoltà di acquisizione di immagini valide per la ricostruzione degli alzati e del loro orientamento. L'uso della camera sferica applicata su un *UAV* ben si applica in questo contesto permettendo di ottenere benefici concreti in fase di acquisizione e per futuri rilievi di caratteristiche simili (come nel caso di centri storici o aree complesse), ottenendo concreti benefici con una semplificazione importante nei processi di acquisizione.

Su questi due casi studio saranno compiute diverse applicazioni della tecnologia della camera sferica applicata a *UAV* con l'obiettivo di fornire validi dati per documentare questi beni culturali. Per raggiungere questi obiettivi, a fronte delle applicazioni sperimentali, saranno illustrate ulteriori tipologie di acquisizione ed elaborazione dei dati mirate in particolar modo all'integrazione tra camera sferica e camere tradizionali.

4.8. Accenni di normativa aeronautica per il sorvolo di APR in ambienti urbani

Il sorvolo di agglomerati urbani attraverso SAPR⁵, (ovvero sistemi a pilotaggio remoto) è regolamentato sul suolo italiano dall'ENAC (*Ente Nazionale Aviazione Civile*) secondo quanto prescritto dal *Codice della Navigazione* attraverso il *Regolamento "Mezzi aerei a pilotaggio remoto" Ed. 2 Emendamento 4 del 21 maggio 2018*^{III}. Si riassumeranno in queste pagine le principali parti della normativa che interessano le operazioni svolte in questo lavoro.

In primo luogo il regolamento differenzia gli aeromobili dagli aeromodelli⁶, definendo i secondi come utilizzabili esclusivamente per impiego ricreazionale e sportivo e per questo motivo differenti dagli aeromobili ai fini del loro assoggettamento alle previsioni del Codice della Navigazione.

Nel lavoro illustrato nel corso di questo capitolo, tuttavia, non risultando le finalità ricreative e trattandosi di uno scenario urbano soggetto a particolari richieste di autorizzazioni (che saranno ora approfondite) è stato necessario ricorrere all'uso di un aeromobili ovvero mezzi utilizzabili per operazioni specializzate⁷ ed attività di ricerca e sviluppo^{IV}. D'ora in avanti ci si riferirà con il termine SAPR ad un aeromobile utilizzato in applicazioni professionali. Il regolamento suddivide i SAPR in base al peso. Più volte nel corso di questo capitolo si è accennato al tema della massa operativa al decol-

5 Con il termine *SAPR* ci si riferisce ai Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto

6 Per aeromodello si intende un dispositivo aereo a pilotaggio remoto, senza persone a bordo, impiegato esclusivamente per scopi ricreativi e sportivi.

7 Per operazioni specializzate si intendono le attività che prevedono l'effettuazione, con un SAPR, di un servizio a titolo oneroso o meno, quale ad esempio: riprese cinematografiche, televisive e servizi fotografici, sorveglianza del territorio o di impianti, monitoraggio ambientale, impieghi agricoli, fotogrammetria, pubblicità, addestramento.

lo, si illustreranno le prescrizioni relative ai Sistemi Aeromobili a Pilotaggio Remoto per i mezzi di massa operativa al decollo minore di 25 kg e ci si concentrerà in particolar modo con le soluzioni dette VL (Very Light) ovvero di MTOM⁸ inferiore ai 4Kg.

4.8.1. Da aeromodello a aeromobile

Si può già intuire che per fare sì che un UAV venga riconosciuto come aeromobile è necessario eseguire una serie di adempimenti come la redazione della manualistica del mezzo, l'esecuzione di apposite prove sperimentali oltre che altri rigidi criteri relativi alla manutenzione e identificazione dei mezzi. La fase di redazione della manualistica di un mezzo si conclude con la dichiarazione firmata dell'operatore e recepita dall'*ENAC* e comporta un impegno cospicuo articolandosi in prove sul campo e di laboratorio sul mezzo.

La manualistica prodotta si articola nei seguenti documenti:

1. Manuale Di Manutenzione
2. Analisi Di Rischio
3. Attività Sperimentale
4. Manuale Delle Operazioni
5. Documento Di Configurazione
6. Manuale Di Volo

8 Per *MTOM* si intende la massa operativa al decollo del *SAPR*.

4.8.2. Operatore e Pilota

Un SAPR necessita di un'organizzazione composta da un Operatore⁹ e un Pilota¹⁰ (una persona può esercitare entrambe le funzioni). L'operatore ha differenti compiti tra cui l'assunzione dei rischi connessi alle operazioni, ha il compito di richiedere eventuali autorizzazioni specifiche e disporre le relative assicurazioni sui mezzi. Il pilota, invece, deve essere formato appositamente tramite il superamento di specifici esami in scuole di Volo per la categoria di mezzi in uso.

9 L'operatore è colui che in figura giuridica o in figura personale, si assume il rischio d'impresa con tutte le responsabilità derivanti dalle normative civili di riferimento.

10 Il pilota è il professionista che commercializza le proprie capacità e competenze mettendole a disposizione dell'operatore. Il pilota deve essere appositamente formato allo svolgimento delle specifiche missioni. In possesso di attestato riconosciuto da ENAC e con visita medica aeronautica LAPL o di seconda classe in corso di validità.

Missioni: Non critica, Critica STD, Critica

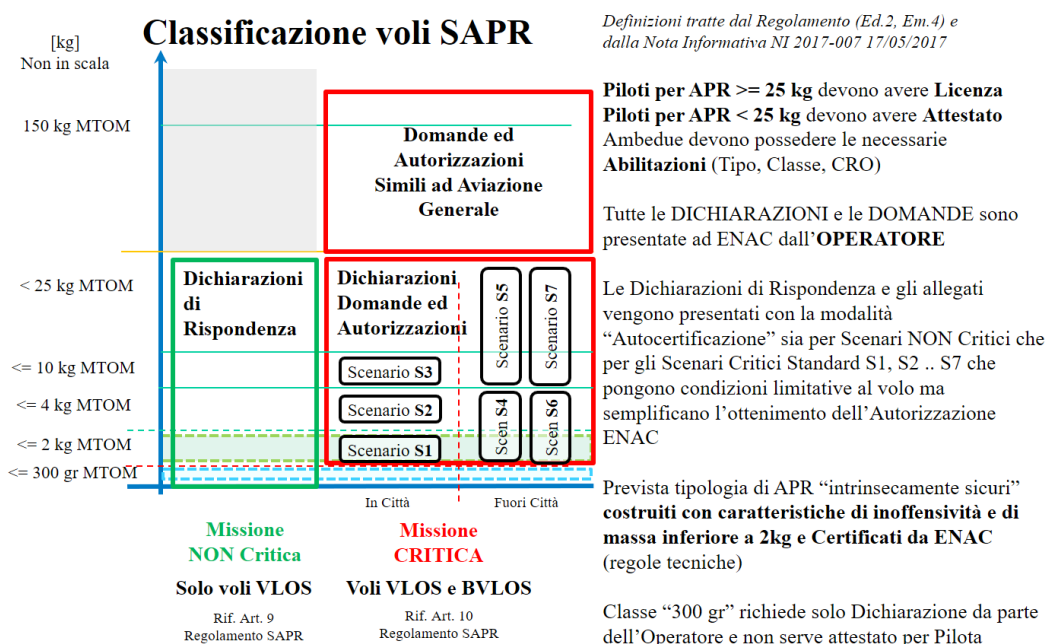


Fig. 270. Classificazione voli SAPR e tipologie delle operazioni. [AOPA ITALIA divisione APR]

4.8.3. Operazioni critiche e non Critiche

La normativa di riferimento, inoltre, suddivide ulteriormente le operazioni specializzate in non critiche e critiche. Dove per non critiche [Regolamento Mezzi a Pilotaggio Remoto art.9] si intende quelle operazioni condotte in VLOS^{11,V} (ovvero in volo a vista) che non prevedono il sorvolo, anche in caso di avarie e malfunzionamenti, di:

7. Aree congestionate;
8. Assembramenti di persone;
9. Agglomerati urbani;
10. Infrastrutture sensibili.

11 *Visual Line of Sight (VLOS)*: operazioni condotte entro una distanza, sia orizzontale che verticale, tale per cui il pilota remoto è in grado di mantenere il contatto visivo continuativo con il mezzo aereo, senza aiuto di strumenti per aumentare la vista, tale da consentirgli un controllo diretto del mezzo per gestire il volo, mantenere le separazioni ed evitare collisioni.

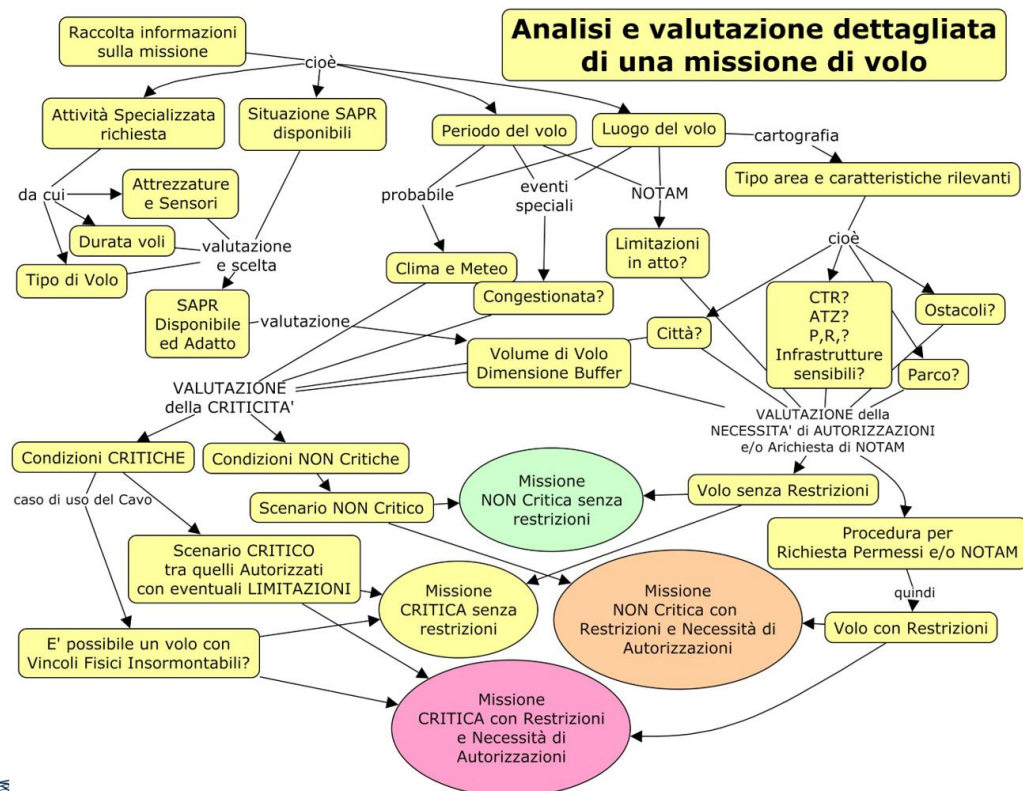


Fig. 271. Analisi e valutazioni di una missione di volo. [AOPA ITALIA divisione APR]

Per operazioni critiche come prescritto all'articolo 10 del regolamento sopracitato invece: «*si intendono quelle operazioni che non rispettano, anche solo parzialmente, quanto al precedente art. 9, comma 1*».

Risulta chiaro quindi che qualunque operazione condotta in uno scenario urbano è considerabile un'operazione critica. Le operazioni che verranno esposte in questo lavoro risultano di questa tipologia trattandosi di beni architettonici posti nel tessuto urbano della città di Torino oltre che di zone con il potenziale assembramento di persone e richiedono pertanto abilitazione per il pilota alle suddette attraverso attestato VL/CRO.

	S01	S02	S03	S04	S05	S06	S07
Vmax (m/s)	5	5	5	5	5	5	5
Vwind (m/s)	3	3	3	5	5	5	5
Buffer Minimo (m)	30	50	N.A.	30	N.A.	20	N.A.
Buffer Minimo con geofence (m)	15	25	50	15	50	N.A.	20
Buffer minimo con cavo (m)	5	5	5	5	5	5	5
Funzione di recovery	Attiva	Attiva	Attiva	Attiva	Attiva	Attiva	Attiva
sistema di terminazione del volo*	Opzionale	Si	Si	Opzionale	Si	Opzionale	Si
sistema di comando e controllo dotato di funzionalità geofencing	Opzionale	Opzionale	Attiva	Opzionale	Attiva	Opzionale	Attiva
Luci di riconoscimento dell'APR **	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Tab. 47. Nella tabella le preiscrizioni relative ad ognuno degli scenari standard. In rosso evidenziato lo scenario utilizzato per questo lavoro. [tratto da: <https://www.d-flight.it> consultato il 04/01/2019]

	Descrizione dello scenario	MTOW: M	Volo	Altezza Massima Diurna (m)	Altezza Massima Notturna (m)	Distanza Massima Diurna (m)	Distanza Massima Notturna (m)
S01	Aree urbane che non prevedono il sorvolo di persone nell'area delle operazioni a meno che non siano indispensabili alle operazioni e addestrate allo scopo	$M \leq 2\text{Kg}$	VLOS	50	50	100	100
S02	Aree urbane che non prevedono il sorvolo di persone nell'area delle operazioni a meno che non siano indispensabili alle operazioni e addestrate allo scopo	$2\text{kg} < M \leq 4\text{Kg}$	VLOS	50	50	100	100
S03	Aree urbane che non prevedono il sorvolo di persone nell'area delle operazioni a meno che non siano indispensabili alle operazioni e addestrate allo scopo	$4\text{kg} < M \leq 10\text{Kg}$	VLOS	50	50	100	100
S04	Rilievi su cantieri in aree extraurbane e rilievi su infrastrutture lineari (e.g. autostrade, elettrodotti, ferrovie, gasdotti) che non prevedono il sorvolo di persone nell'area delle operazioni a meno che non siano addestrate allo scopo	$M \leq 4\text{Kg}$	VLOS	150	50	500	100
S05	Rilievi su cantieri in aree extraurbane e rilievi su infrastrutture lineari (e.g. autostrade, elettrodotti, ferrovie, gasdotti) che non prevedono il sorvolo di persone nell'area delle operazioni a meno che non siano addestrate allo scopo	$4\text{kg} < M \leq 25\text{Kg}$	VLOS	150	50	500	100
S06	Riprese televisive/cinematografiche di eventi in aree extraurbane che non prevedono il sorvolo di persone nell'area delle operazioni a meno che non siano indispensabili alle operazioni e addestrate allo scopo	$M \leq 4\text{Kg}$	VLOS	150	50	500	100
S07	Riprese televisive/cinematografiche di eventi in aree extraurbane che non prevedono il sorvolo di persone nell'area delle operazioni a meno che non siano indispensabili alle operazioni e addestrate allo scopo	$4\text{kg} < M \leq 25\text{Kg}$	VLOS	150	50	500	100

Tab. 48. Nella tabella gli scenari e le relative preescrizioni relative alla distanza dal pilota orizzontale e verticale in base al peso del mezzo e alla tipologie di operazioni per ogni scenario. In rosso evidenziato lo scenario utilizzato per questo lavoro. [tratto da: <https://www.d-flight.it> consultato il 04/01/2019]

La normativa di riferimento all'articolo 10 comma 3 riporta: «Le operazioni specializzate critiche possono essere condotte ove sia assicurato un livello di sicurezza coerente con l'esposizione al rischio, con riferimento alle operazioni dell'aviazione generale. Il livello di sicurezza di tali operazioni è determinato dall'insieme dei contributi forniti dal SAPR, dal pilota, dalle procedure operative e di gestione delle attività di volo, dalle condizioni ambientali e dagli altri elementi essenziali per determinare un impiego sicuro di tali mezzi, inclusa la corretta attuazione del programma di manutenzione. Il sistema nel suo complesso deve pertanto assicurare un livello di affidabilità minimo...e adeguato al conseguimento di appropriati livelli di sicurezza in relazione alla tipologia di operazioni. Nel caso di scenari standard le prescrizioni tecniche e le limitazioni operative stabilite dall'ENAC sono commisurate al livello di rischio crescente con la massa operativa al decollo dell'APR e lo scenario operativo e garantiscono i livelli di sicurezza previsti dal presente Regolamento».

Come si può osservare l'articolo 10 comma 3 cita gli scenari standard (tab. 47-48), ovvero delle operazioni critiche svolte in scenari per cui ENAC ha già svolto un'analisi del rischio e stabilito le relative condizioni di mitigazione. Tali scenari sono stati introdotti dalla *NI-2017-007 del 17 maggio 2017*¹². Se fino ad alcuni mesi fa era necessario richiedere un'autorizzazione specifica per ogni operazione critica attraverso gli scenari standard la procedura viene semplificata notevolmente.

«Sono stati quindi definiti degli scenari standard, in funzione delle fasce di massa operativa al decollo e dell'ambiente operativo, che consentano di associare agli stessi prescrizioni tecnico operative in base all'esposizio-

¹² Nota informativa di ENAC relativa all'implementazione degli scenari standard per le operazioni specializzate critiche di aeromobili a pilotaggio remoto datata 17 maggio 2017

ne al rischio, tali da garantire i livelli di sicurezza previsti dal Regolamento ENAC». ^{VI}

Nel presente lavoro è stato utilizzato lo *Scenario Standard S01* che prevede l'uso di droni di massa operativa al decollo inferiore ai 2kg «in aree urbane che non prevedono il sorvolo di persone nell'area delle operazioni a meno che non siano indispensabili alle operazioni e addestrate allo scopo». ^{VII}

4.8.4. Utilizzo di Apr di massa inferiore ai 300g

Dal momento che in alcuni casi non sarebbe stato possibile ottemperare le prescrizioni tecniche operative dello scenario, in modo particolare per impossibilità di segregazione delle aree o eccessiva dimensione del buffer, sono stati utilizzati APR di peso inferiore ai 300g che, attraverso l'unione delle immagini acquisite da camere *frame*, hanno permesso la generazione di immagini sferiche adatte alla ricerca. Il vantaggio di utilizzare APR di questa classe di peso è ben chiarito dalle Linee Guida 2016/003-NAV - Ed.



Fig. 272. Esempio dell'APR utilizzato (DJI Spark) appositamente alleggerito. Gli alleggerimenti sono stati realizzati tramite stampa 3d.

«Le operazioni specializzate condotte con APR di massa al decollo minore o uguale a 0,3 kg con parti rotanti protette da impatto accidentale e con velocità massima minore o uguale a 60 km/h, fermo restando quanto previsto al comma 2 del presente articolo, sono considerate non critiche in tutti gli scenari operativi. Il pilota, al quale non è richiesto il possesso di un Attestato secondo quanto previsto al successivo art. 21, deve comunque garantire che le operazioni siano svolte in osservanza delle regole di circolazione definite nella Sezione V».^{IX}

L'uso di questi APR, secondo il Regolamento e le relative Linee Guida, permettono grandi vantaggi per l'uso in ambienti urbani permettendo il sorvolo di persone (eccetto in assembramento) evitando pertanto nella maggior parte dei casi di dovere richiedere la segregazione dell'area e l'occupazione di suolo pubblico. Questa tipologia di mezzo è stata utilizzata sul caso studio del Borgo Medievale al fine di effettuare le operazioni in maniera non invasiva evitando di dovere richiedere la chiusura degli ingressi con la conseguente interruzione delle visite.

Caratteristiche dello spazio aereo delle aree dei casi studio

La pianificazione della missione specializzata ha previsto la verifica delle tipologie degli spazi aerei relativi. Questa operazione ha permesso di richiedere le autorizzazioni necessarie ai relativi Enti preposti. Come si può

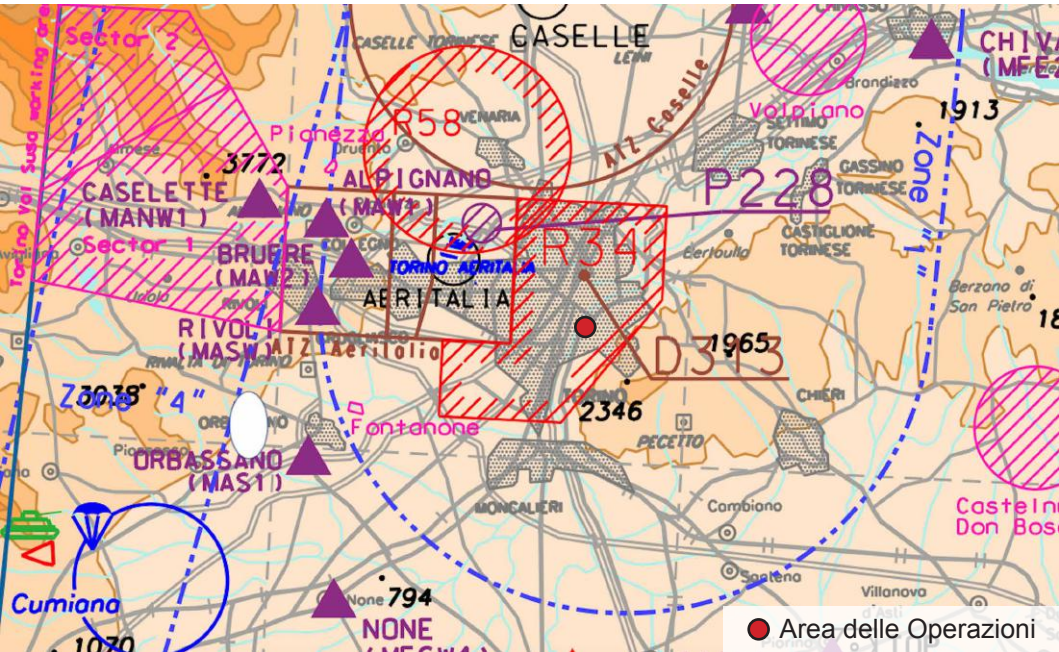


Fig. 273. Consultazione delle cartografie aeronautiche per identificazione dell'area delle operazioni. [Fonte: AIP Italia consultabile sui enav.it]

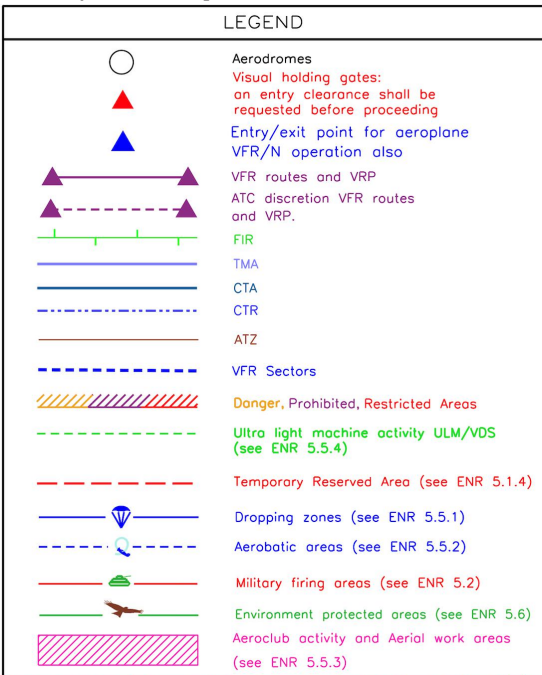
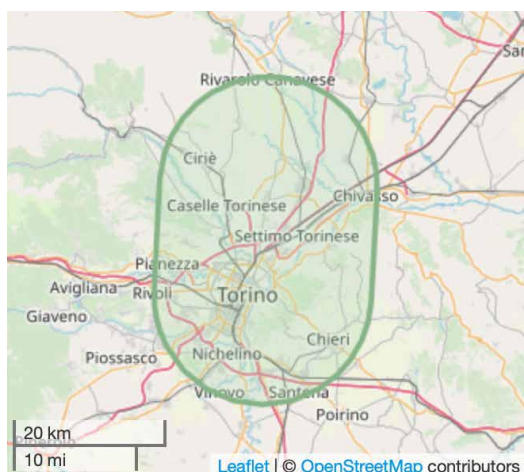


Fig. 274. Legenda cartografia aeronautica riportata [Fonte: AIP Italia consultabile sui enav.it]

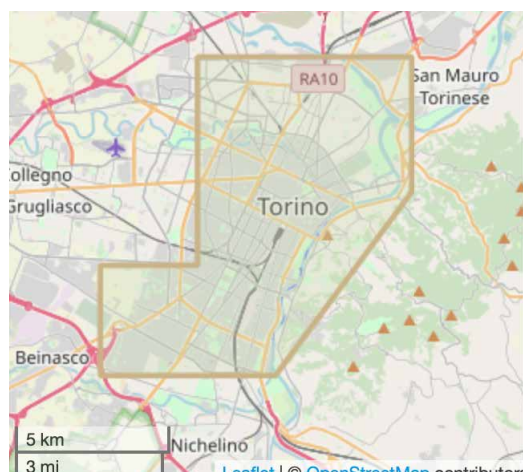
osservare nell'immagine l'area delle operazioni ricade all'interno della CTR¹³ Torino Caselle e in area LIR34 - Torino Città. Si procederà quindi con l'analisi delle tipologie di spazi aerei su cui insiste l'area delle operazioni andando ad identificare per ognuno eventuali limitazioni al fine di predisporre le richieste di autorizzazioni necessarie allo svol-

13 Controlled Traffic Region Area posta a protezione degli aeroporti.



id: LIMF1
 Nome: Zona/Zone '1'
 Tipo: CTR
 Classe: D
 Limite inferiore: piedi
 Limite superiore: 2500 piedi

Fig. 275. Dettaglio e limiti CTR1. [tratto da: <https://www.d-flight.it> consultato il 04/01/2019]



id: LIR34
 Nome: LI R34 - Torino città
 Tipo: R
 Limite inferiore: piedi
 Limite superiore: 2500 piedi

Fig. 276. Dettaglio area ristretta LIR34 - Torino città. [tratto da: <https://www.d-flight.it> consultato il 04/01/2019]

REGOLE OPERAZIONI SPECIALIZZATE	
CTR ZONA 1	LIR34 - TORINO CITTÀ
Le operazioni dei SAPR all'interno dei CTR sono consentite esclusivamente ai sistemi con mezzi aerei di massa operativa al decollo minore di 25 kg, fino ad un'altezza massima di 70 m AGL e fino ad una distanza massima sul piano orizzontale di 200 m.	Le operazioni dei SAPR non possono essere condotte all'interno delle aree regolamentate attive. All'interno di quest'area le operazioni specializzate critiche e non critiche possono essere condotte solo previa autorizzazione da parte di ENAC.

Tab. 49. Regole operazioni specializzate nelle aree CTR Zona 1 e LIR34 - Torino Città.

gimento delle attività di volo. Come previsto dal *Regolamento Mezzi a Pilotaggio Remoto art.24 comma 5*, il volo in CTR è ammesso utilizzando SAPR di massa operativa al decollo minore di 25 kg, limitando l'altezza massima a 70 m AGL e fino ad una distanza massima sul piano orizzontale di 200 m. Più complesso invece è il tema dell'area LIR34 in quanto tale zona

risulta estesa dalla *SFC*¹⁴, ovvero dalla superficie del terreno fino a 2500ft *AMSL*¹⁵ o 1500ft *AGL*¹⁶ (vale il limite superiore più alto tra i due). Per tale area è necessaria una specifica autorizzazione scritta di ENAC e valutazione positiva della Prefettura di Torino, della Questura e della Città di Torino. La procedura autorizzativa è stata realizzata tramite istanza di nulla osta. Essendo ancora poche le richieste di sorvolo tramite APR con queste finalità ottenere questo tipo di autorizzazioni è risultato particolarmente complesso. Sono state riscontrate problematiche significative di tempistiche dovute alla necessità di coordinamento di diversi enti indipendenti. Nello specifico sono state presentate due richieste di Nulla Osta: la prima è stata negata su valutazione della Questura di Torino, per tale motivo si è proceduto a variare le date delle operazioni e la domanda è stata ripresentata attraverso una nuova istanza. Nello schema seguente si illustra l'iter relativo alla procedura di autorizzazione attuato per queste operazioni:

14 *SFC* dall'inglese *Surface* si intende la superficie del terreno.

15 *AMSL* dall'inglese *Above Mean Sea Level* - Al di sopra del livello medio del mare.

16 *AGL* dall'inglese *Above Ground Level* - Al di sopra del livello del suolo.

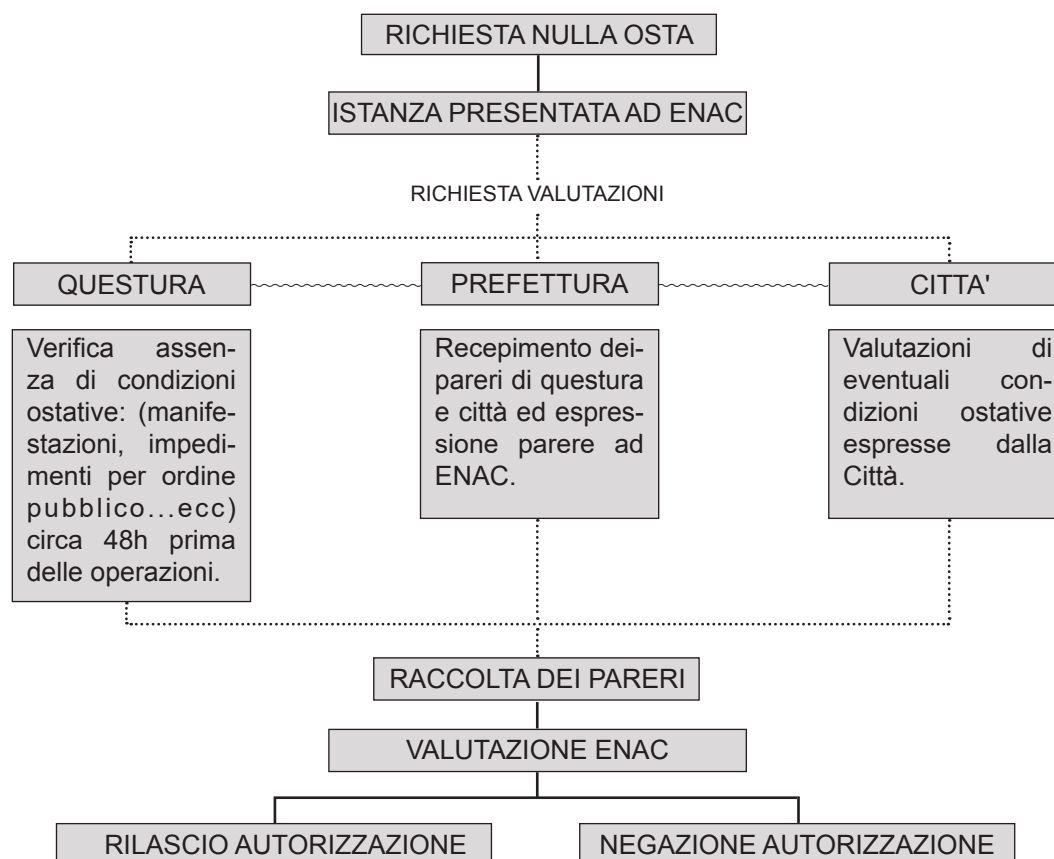


Fig. 277. Schema della procedura autorizzativa relativa all'area LI34 - Torino Città.



Droni Service
di Davide Einaudi
Via Genova 218, 10127 Torino
Tel. +39 338 8755528
Email: davide.einaudi@gmail.com
PEC: davide.einaudi@pec.it
P.IVA: 11925010016
Lab. Geomatica
POLITECNICO DI TORINO



Spett.le

Prefettura di Torino
Piazza Castello, 205/199 | 10124 - Torino
P.E.C.: protocollo.presto@pec.interno.it

Ente Nazionale Aviazione Civile Direzione Regionale Aeroporti e Spazio Aereo
Via Castro Pretorio 118 | 00185 | Roma
Alla c.a. Ing. Sebastiano Vecchia
p.c. ten. Col. Francesco Quero

287

OGGETTO: RICHIESTA DI NULLA OSTA AL SORVOLO DELLO SPAZIO AEREO "LI R34 -Torino Città"

Con la presente il sottoscritto Dott. Davide Einaudi, nato a Torino, il 01/02/1994, in possesso dell'attestato di pilota APR VI/MC CRO Nr. I.APR.A.004683, in qualità di pilota e operatore (n°. rif. ENAC 21374), in relazione alla necessità di effettuare riprese aeree con finalità di ricerca, monitoraggio e documentazione con tecnologie all'avanguardia nel rispetto delle condizioni di sicurezza in collaborazione e esplicita richiesta del **Politecnico di Torino** per il Laboratorio di Geomatica, nel periodo compreso tra il 2/7 OTTOBRE compresi (6 GIORNI) relative al controllo fluviale e di ispezioni puntuali sullo stato di fatto delle strutture ad esso limitrofe nell'area del Parco del Valentino. I dati acquisiti saranno resi disponibili alla città.

CHIEDE IL NULLA OSTA

al sorvolo dello spazio aereo regolamentato LI R34 Torino Città.
L'area interessata dal volo sarà circoscritta specificatamente ai punti specifici oggetto di ispezione intorno alle coordinate geografiche N 45°3'1.897" E 7°41'12.58", utilizzando mezzo riconosciuto come **inoffensivo** (<300g) o applicando lo **scenario S01** (in tal caso come previsto **garantendo di non sorvolare persona alcuna durante le operazioni**) e **nel rispetto dell'analisi del rischio svolta**. Le operazioni di volo si svolgeranno tutte a bassa quota e comunque non oltre l'altezza massima dei fabbricati limitrofi all'area e comunque entro i limiti e secondo le condizioni previste dal "Regolamento ENAC "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" emendamento 4 dell'ed. 2 delibera n. 14/2018 approvato in data 21 maggio 2018.

Le riprese aeree sarebbero effettuate dalla mia persona registrata quale **Operatore ENAC autorizzato per operazioni specializzate critiche (CRO)** come la medesima, nr rif. 21374, per mezzo dei seguenti mezzi che saranno utilizzati nei limiti previsti dallo scenario **Standard S1** o mezzi inoffensivi o eventualmente secondo i criteri autorizzati in questa richiesta.

FTX01; Rif.Enac 22139; Classificazione **inoffensivo**, Data informativa 03/05/2018, APR: APR-FTX01; SPR: SPR-FTX01; Flight Controller: 0ASDE550A100F3; Peso: 0,3 kg; Costruttore: Davide Einaudi

DE001PH3; Rif. Enac 21374; Approvato il 17/04/2018, Prot. 0040109-P; APR: P76DDA06B26365 ; SPR: 077JDA04011040; Flight Controller: 03Z0682755; Peso: 1,6 kg; Costruttore: Davide Einaudi; Nell'ambito dello scenario standard S1 o secondo eventuali le prescrizioni della presente.

E qualora necessario con la collaborazione dell'operatore: Lab. di Rilievo per i Beni Culturali - DAD - Politecnico di Torino (Rif.Enac 24497) da docenti del Politecnico di Torino adeguatamente qualificati.

APR Phantom4-PRO; Data informativa 28/06/2018; APR: 0AXDE230A31169; SPR: 0CLJE230C10151; Flight Controller: 03Z0682755; Peso: 1,9 kg; Costruttore: DJI ; Operatore: Lab. di Rilievo per i Beni Culturali - DAD - Politecnico di Torino

L'attività di sorvolo è prevista per il giorno 2/10/2018 dalle ore 06.00 del mattino sino alle ore 12 ora locale, per una attività complessiva di volo di circa 40 min. Qualora le condizioni meteo fossero avverse o per motivi logistici, previa comunicazione, si eseguirà il lavoro in un altro dei giorni prefissati. Prima dell'inizio dei sorvoli si provvederà ad apporre un'adeguata segnalazione che avverte delle attività di volo dei mezzi APR in corso. I mezzi utilizzati risultano come previsto adeguatamente assicurati verso terzi. Qualora non riteniate opportune le date proposte per qualsiasi motivo ci rendiamo fin d'ora disponibili a variarle accettando quelle da Voi proposte.

L'operatore fin d'ora si assume la responsabilità totale del rispetto delle condizioni di sicurezza e del rispetto di quanto previsto dal Regolamento ENAC "Mezzi Aerei a Pilotaggio Remoto" emendamento 4 dell'ed. 2 delibera n. 14/2018 approvato in data 21 maggio 2018.

Ringraziando anticipatamente per la gentile collaborazione resto in attesa di un vostro cortese riscontro.



Cordiali saluti,
Davide Einaudi

Fig. 278.
coinvolti.

Seconda istanza di nulla osta al sorvolo della LI-R34 Torino città presentata dagli operatori



**Direzione Regolazione
Aeroporti e Spazio Aereo**

A: Droni Service di Davide Einaudi
Via Genova 2018
10127 Torino
davide.einaudi@pec.it

E, p.c. Prefettura di Torino
Piazza Castello 205
10124 Torino
protocollo.prefeto@pec.interno.it

ENAC Direzione Aeroportuale NORD OVEST

ENAV ACC Milano
pec_acc.milano@pec.enav.it

Oggetto: Droni Service di Davide Einaudi -Autorizzazione attraversamento zona LI R34.

Riferimento: a foglio Droni Service di Davide Einaudi datato 17.09.2018.
b foglio Prefettura di Torino prot.0138271 datato 27.09.2018

Con riferimento all'istanza datata 17.09.2018 di codesta società e visto il Nulla Osta espresso dalla Prefettura di Torino col foglio in riferimento b, si autorizza la Droni Service di Davide Einaudi ad effettuare l'attraversamento della zona LI-R34 per l'attività di lavoro aereo, con gli aeromobili tipo e marche riportate nel foglio a riferimento.

L'attraversamento della zona indicata dovrà avvenire nel rispetto di quanto previsto dall'AIP – ITALIA ENR 5.1.1-1 e dei Notams in vigore.

Si richiama l'obbligo del rispetto di eventuali restrizioni derivanti da disposizioni di varia natura (Leggi Nazionali/Regionali, ordinanze di Autorità locali etc.).

La presente autorizzazione è valida il 02.10.2018

Cordiali saluti

Dr
Sergio Legnante
(documento informatico firmato digitalmente
ai sensi dell'art. 24 D.Lgs. 82/2005 e ss.mm.ii.)

FQ



sede legale : Viale Castro Pretorio, 118
sede operativa : Via Gaeta, 3
00185 - Roma
c.f. 97158180584
RAS

tel. +39 06 4459 6802
fax +39 06 4459 6628
aeroporti.spazioaereo@enac.gov.it
protocollo@pec.enac.gov.it
www.enac.gov.it

Fig. 279. Lettera di autorizzazione alle operazioni.

4.9. Il Castello del Valentino

La storia del Castello del Valentino è stata illustrata da diversi studiosi (Giriodi, S., & Mamino, L., 1988) e trae le sue origini nel 1564 quando Emanuele Filiberto acquistò una villa fluviale appartenente a Renato Birago¹⁷, che si trovava in un'area denominata «*Vallantinum*». L'acquisto avvenne conseguentemente al trasferimento della capitale del ducato sabauda a Torino dopo la pace di *Cateau-Cambrésis*¹⁸. Il nome della regione «*Vallantinum*» è noto già in documenti risalenti al secolo XVII e trae le sue origini dalle carat-

17 René de Birague, anche noto come Renato Birago, (Milano, 1507 – Parigi, 1583) è stato un nobile italiano che ha occupato la carica di cardinale e cancelliere di Francia.

18 La pace di Cateau-Cambrésis è datata 2/3 aprile dell'anno 1559, fu un trattato di pace che stabiliva accordi che sancirono la fine delle guerre d'Italia e interruppero gli scontri tra gli Asburgo e la Francia.



Fig. 280. Veduta verso la città. Incisione anonima su disegno di Giovanni Tommaso Borgonio, 1668, in *Theatrum Statuum Regiae Celsitudinis Sabaudiae Ducis, Pedemonti Principis, Cypri Regis. Pars Prima, exhibens Pedemontium, et in eo Augustam Taurinorum et loca viciniora*, Amstelodami, apud Haeredes Iohannis Blaeu, 1682, vol. I, tav. 28. ASCT, Collezione Simeom, *Theatrum Sabaudiae*, I, 28, su concessione dell'Archivio Storico della Città di Torino.

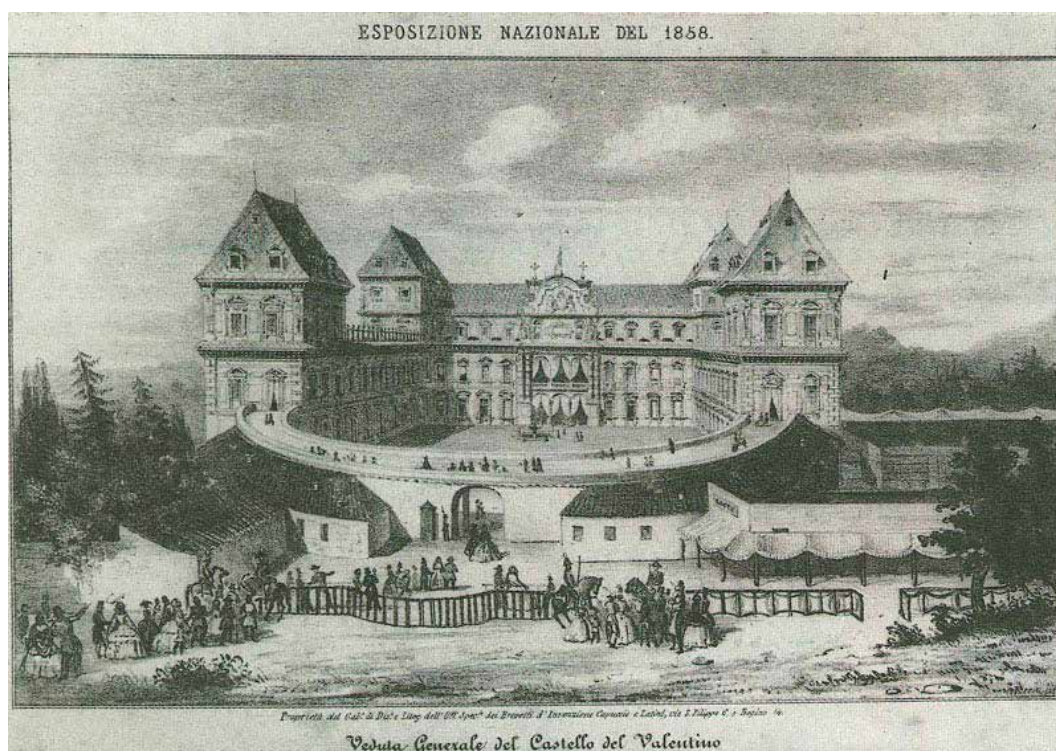


Fig. 282. Litografia del «Gab.o di Dis.o e Litog. Dell'Uff. Spec.le dei Brevetti d'Invenzione Capuccio e Latini», in Album descrittivo dei principali oggetti esposti nel Real Castello del Valentino in occasione della Sesta Esposizione Nazionale dei prodotti d'industria nell'anno 1858, Torino, Stamperia dell'Unione Tipografico Editrice, 1858, tav. non numerate. ASCT, Collezione Simeom, C 1911, su concessione dell'Archivio Storico della Città di Torino.

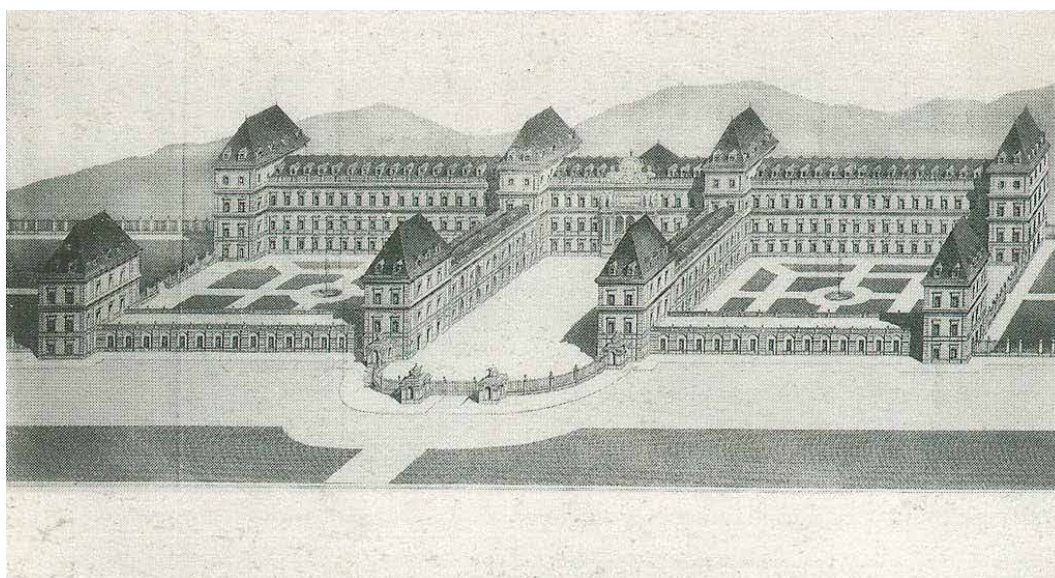


Fig. 281. Incisione in rame su disegno di Domenico Ferri in Giovanni Vico, Il Real Castello del Valentino. Monografia storica, Torino, Stamperia Reale, 1858. ASCT, Collezione Simeom, B 577, su concessione dell'Archivio Storico della Città di Torino.

teristiche geomorfologiche del territorio dovute alla sua conformazione pianeggiante della valle. Alla seconda metà del settecento la villa presentava un affaccio principale verso il fiume Po. Una decina d'anni dopo l'acquisto, il fabbricato subì lavori di abbellimento che si protrassero per circa tre anni, fino al 1578, concentrandosi, in particolar modo, sugli ambienti interni. La villa fluviale si articolava su quattro piani disposti parallelamente al fiume in una manica semplice, delimitati da una torre a sud che permetteva, tramite il vano scala, la distribuzione sui piani e da un corpo sporgente verso nord. L'edificio cambiò volto per merito di Cristina di Francia che, su progetto di Carlo di Castellamonte, avviò la trasformazione del palazzo fluviale in *maison de plaisance* seguendo il modello transalpino, tra il 1620-1621, integrandola nel contesto territoriale circostante che si estendeva dalla città alla collina. I progetti di Carlo e Amedeo di Castellamonte arrivarono a realizzare qualche anno più tardi 1645-1646, importanti modifiche, adattando il complesso allo schema del *pavillon-système*¹⁹ francese, tramite il raddoppio della struttura preesistente, oltre alla realizzazione di due torri, connesse da portici terrazzati a due nuovi padiglioni, e di un'edera semicircolare che racchiude un grande Cortile d'Onore. Gli sviluppi progettuali sono dettati dalla simmetria della composizione. Negli interni i due appartamenti laterali, uguali per numero e disposizione delle sale, risultano riccamente decorati da maestranze dalla regione dei Laghi.

Venute meno le esigenze della residenza di corte, all'inizio dell'Ottocento, il palazzo ospitò la Scuola di Veterinaria, successivamente cambia funzione in caserma militare per poi essere ceduto dalla Corona al Demanio dello

19 Il termine *pavillon-système* si riferisce alla struttura della copertura delle torri del Castello che viene definita «a padiglione» caratterizzata da falde molto inclinate, con manto in lastre di ardesia fissate a tavolato, sostenute da incavallature lignee. Tale sistema è realizzato da capriate alla francese di sostegno poste lungo la luce minore.

Stato nel 1850. Alla metà del secolo, l'area sulla sponda sinistra del Po fu adibita a parco pubblico, presentato in occasione della Sesta Esposizione nazionale dei prodotti di industria voluta dal Ministro delle Finanze Camillo Benso conte di Cavour²⁰ al Castello del Valentino, allora restaurato su progetto di Luigi Tonta e Domenico Ferri. Ulteriori modifiche interessarono le terrazze di collegamento tra le torri che vengono sostituite da due gallerie. L'affaccio principale nell'ottocento venne ribaltato definitivamente verso Torino, rafforzando il passaggio da palazzo a castello. Con l'avvento della legge Casati²¹ del 1859 il Castello del Valentino ospitò a partire dai primi anni Sessanta la Regia Scuola di applicazione per gli ingegneri. Il Castello subì ulteriori interventi di ampliamento e di restauro nel corso degli anni. In particolare tra il 1862-1866 venne demolito l'emiciclo e realizzate due nuove terrazze verso oltre che una cancellata verso la città. Tra il 1864-1880 venne inoltre costruita la manica a sud, allo scopo di ospitare gli esperimenti idraulici della scuola di applicazione.

Oggetto di successivi interventi di ampliamento e di restauro, il Castello divenne sede universitaria, con Istituzione del Politecnico di Torino dall'unione tra la Regia Scuola di Applicazione per gli Ingegneri e il Regio Museo Industriale.^x

[tratto e rieditato da Giriodi, S., & Mamino, L. (1988). Castello del Valentino, Facoltà di architettura: progetti a confronto. CELID.]

20 Camillo Paolo Filippo Giulio Benso, conte di Cavour, di Cellarengo e di Isolabella, noto semplicemente come conte di Cavour o Cavour (Torino, 10 agosto 1810 – Torino, 6 giugno 1861), è stato un politico e imprenditore italiano. Fu protagonista del Risorgimento come sostenitore delle idee liberali.

21 Per legge Casati si intende il regio decreto legislativo datato 13 novembre 1859, n. 3725 del Regno di Sardegna, entrato in vigore nel 1861 e successivamente esteso, con l'unificazione, a tutta l'Italia, il quale prevedeva una riforma sostanziale dell'intero ordinamento scolastico.

4.9.1. Acquisizioni aeree e finalità della ricerca sul Castello del Valentino

Nell'ottica di fornire documentazione accurata sul bene culturale del Castello del Valentino sono state eseguite diverse acquisizioni aeree che mirano a valutare le potenzialità offerte dall'utilizzo delle immagini sferiche per la ricostruzione tridimensionale. Nell'ottica di produrre una valida documentazione sono stati eseguiti diversi voli sia generali che di dettaglio al fine di restituire elaborati e analisi tecniche che migliorino la conoscenza dell'oggetto in esame. Le finalità delle acquisizioni eseguite è stata quella di produzione dei seguenti elaborati tecnici:

1. *Ortofoto georiferita* dell'area urbana del Castello compatibili con un dettaglio di rappresentazione alla scala 1:100
2. *Nuvola di punti densa*
3. *Mesh tridimensionale texturizzata* per applicazioni di visualizzazione e Virtual Reality
4. Ortofoto dei prospetti interni della corte compatibili con la rappresentazione alla scala 1:50

Per ottenere questi risultati sono state testate diverse soluzioni che prevedono in particolar modo l'utilizzo dei panorami sferici per l'orientamento delle immagini *single frame*. Le acquisizioni sono state eseguite con i sensori in acquisizione simultanea; questo ha permesso di ridurre le tempistiche sul campo in modo significativo. Sono state nello specifico acquisite diverse tipologie di dati al fine di potere, in fase di elaborazione, testare differenti possibilità di utilizzo. In particolare si è proceduto da un lato all'acquisizione di strisciate con elevati valori di ricoprimento mantenendo l'asse della camera nadirale al terreno e successivamente inclinato a 45°. I voli effettuati

per l'elaborazione di ortofoto aeree si possono riassumere in:

1. Acquisizioni 360+Nadirali
2. Acquisizioni 45°

Mentre i voli di dettaglio sui prospetti sono stati così realizzati:

1. Acquisizioni di dettaglio degli alzati attraverso acquisizioni 360+Nadirali a distanza di approssimativamente 20 metri dagli alzati dei prospetti che si attestano sulla corte.
2. Strisciata di acquisizioni centrali di panorami sferici a passo costante.

Sul caso studio sono state approssimativamente acquisite 950 immagini (circa 450 utilizzate per le elaborazioni delle ortofoto aeree e 500 per i dettagli degli alzati). Le acquisizioni sono state effettuate tramite pianificazione dei voli automatica attraverso l'applicativo Pix4d Capture.

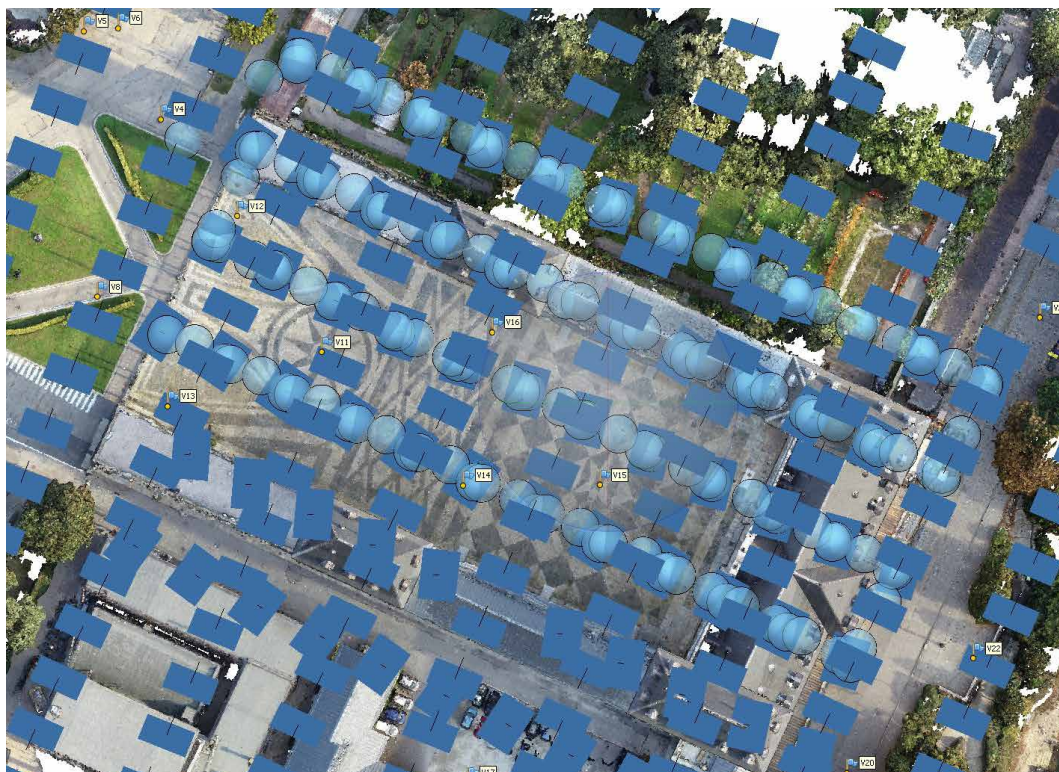


Fig. 283. Orientamento delle immagini single frame (nadirali e inclinate) e panorami sferici.

4.9.2. Rilievo topografico di punti naturali

Parallelamente alle acquisizioni aeree sono state rilevate le coordinate di un certo numero di punti naturali a terra, successivamente utilizzati come *ground control point*. Il rilievo di tali punti ha permesso di georiferire il rilievo fotogrammetrico e valutarne l'accuratezza. Per il rilievo dei punti di dettaglio si è ricorso ad un rilievo topografico satellitare attraverso la tecnologia *NRTK* acquisendo un totale di 24 punti naturali in coordinate globali distribuiti in modo uniforme sulla superficie di rilievo. Sono stati inoltre rilevati 50 punti naturali sui fronti del Castello il cui rilievo sarà approfondito nelle pagine seguenti.



Fig. 284. Acquisizione di punti naturali attraverso rilievo topografico satellitare NRTK.

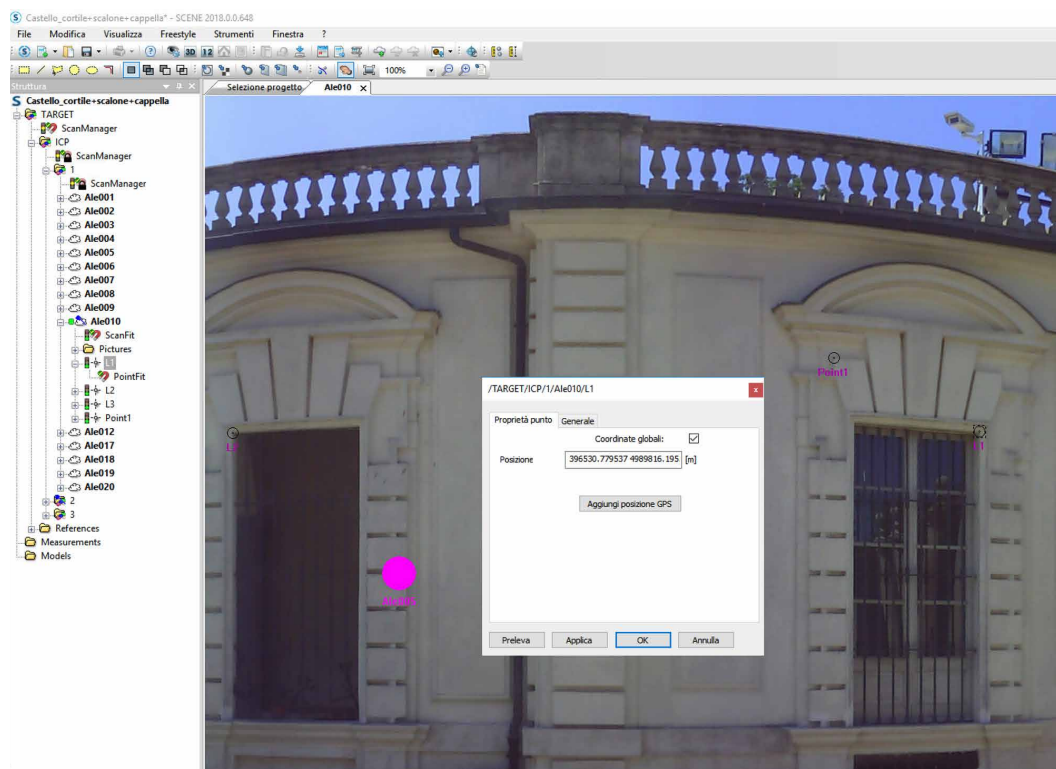
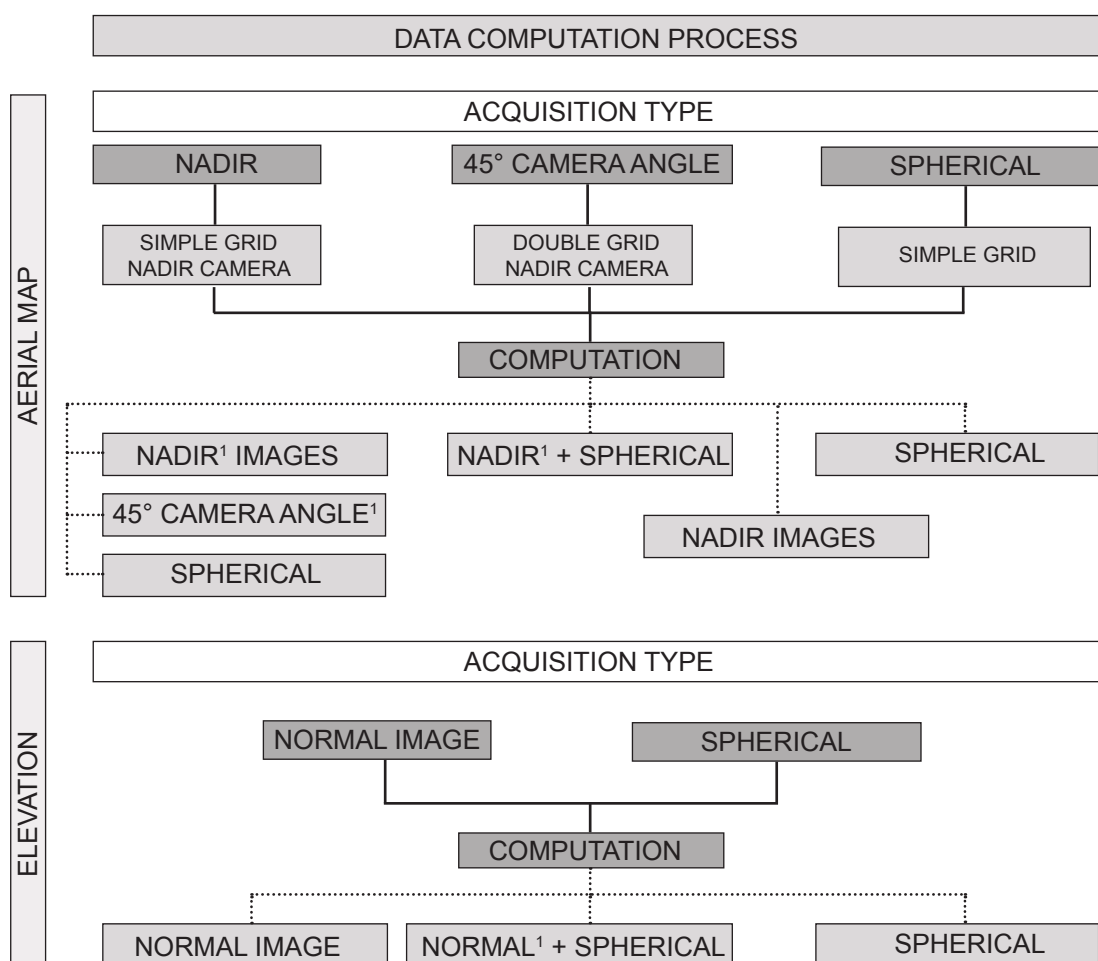


Fig. 285. Estrazione delle scansioni laser scanner di coordinate di punti naturali sui prospetti del corpo di fabbrica.

4.9.2.1. Elaborazione dei dati sul Castello del Valentino

La scelta della tipologia di elaborazioni si è rivelata particolarmente complessa a causa, da un lato, della grande mole di immagini acquisite, ma soprattutto per l'assenza in bibliografia di applicazioni specifiche simili per il rilievo tridimensionale e circa l'integrazione di immagini sferiche e single frame tradizionali acquisite da UAV. La ricerca in questa fase si è rivelata particolarmente complessa e ha reso necessario un gran numero di test ed elaborazioni. Si riassumono nello schema proposto (prima di entrare nel dettaglio) le differenti elaborazioni eseguite sul Castello del Valentino. Successivamente saranno analizzate le differenti soluzioni affrontando le criticità ed i benefici provando a delineare le linee guida per ottenere su casi studio simili i migliori risultati possibili.

Le elaborazioni sono state suddivise in una prima fase per tipologia consi-



¹GCP on frame image

Fig. 286. Schematizzazione acquisizioni effettuate e relativo processamento per i dati acquisiti in area sperimentale.

derando i dati in base alla finalità di elaborati finali (modello tridimensionali generale e ricostruzione di dettaglio degli alzati). In ognuno dei casi testati i dati sono stati in un primo momento processati escludendo le immagini sferiche, eseguendo una normale acquisizione aerofotogrammetrica single frame. Parallelamente sono state elaborate le immagini sferiche (attraverso l'uso delle proiezioni equirettangolari). In ultimo sono state indagate le potenzialità rappresentate dall'integrazione dei dati generati da entrambi i sensori. Verranno analizzati singolarmente le elaborazioni eseguite suddivise per tipologia.

4.10.1. Elaborazioni aeree a scala urbana

4.10.1.1. Elaborazione sole immagini nadirali

La prima elaborazione eseguita ha indagato le potenzialità delle sole immagini nadirali di ricostruzione delle geometrie al fine di fornire dati per una comparazione più specifica con le altre tipologie di processamento. Come da attese, sebbene questa tipologia di dati permetta una ricostruzione tridimensionale valida per l'elaborazione di mappe bidimensionali, presenta evidenti limiti nella ricostruzione della tridimensionalità del modello.

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
7	0.81	1.16	0.93	1.41	1.69

Tab. 50.Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points.

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
4	1.22	1.10	3.07	1.64	3.48

Tab. 51.Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points.

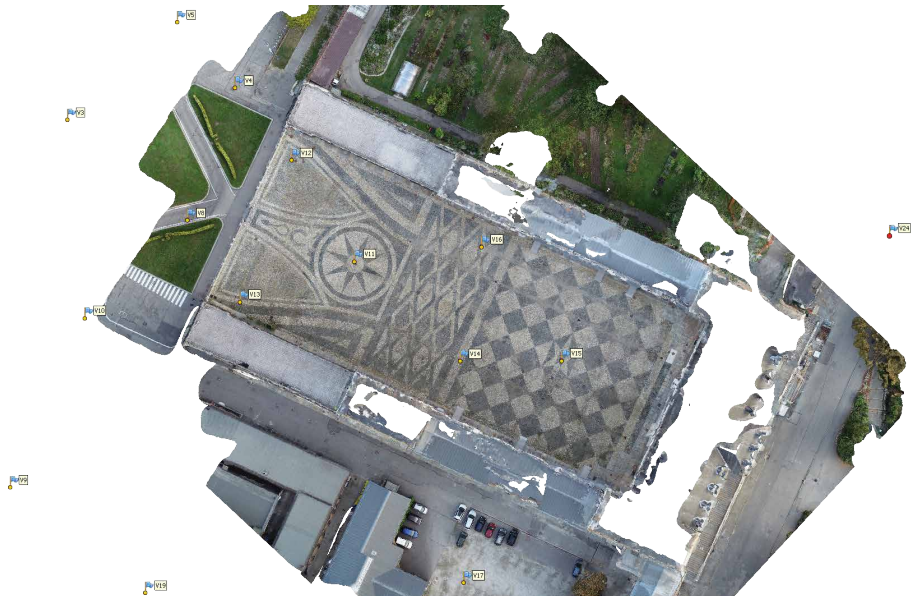


Fig. 287. Visualizzazione ortogonale dall'alto della nuvola di punti dalla quale si possono osservare alcune aree non correttamente ricostruite.



Fig. 288. Visualizzazione assonometrica della nuvola di punti dalla quale appaiono evidenti le problematiche di ricostruzione degli alzati attraverso il solo uso di immagini nadirali.

4.10.1.2. Elaborazione sole immagini sferiche

Parallelamente l'elaborazione delle sole immagini sferiche acquisite dalla *GoPro Fusion* installata su UAV ha permesso di risolvere alcune delle criticità evidenziate dall'elaborazione delle sole camere nadirali, in particolare l'oggetto risulta meglio ricostruito, seppure i limiti della risoluzione della camera appaiono evidenti rendendo particolarmente complessa la collimazione di punti naturali di coordinate note a causa della difficile identificazione degli stessi sulle immagini e per la poca definizione del modello che appare povero di dettagli. Effettuando una comparazione tra le elaborazioni sferiche e nadirali si può osservare che le nuvole di punti ricavate attraverso immagini

IMAGE TYPE	N°IMAGE	ALIGNED	POINT CLOUD
NADIRAL	64	64/64	10.734.635
SPHERICAL	174	174/174	2.631.858

Tab. 52. Visualizzazione ortogonale dall'alto della nuvola di punti dalla quale si possono osservare alcune aree non correttamente ricostruite.

sferiche appaiono meno dense rispetto a quelle generate da immagini singole frame nadirali. In questa elaborazione si è testata l'elaborazione delle immagini sia con, che senza la realizzazione di maschere, che escludessero la parte alta coperta dalla presenza dell'UAV. Dalle analisi eseguite l'operazione di mascheratura delle immagini si è rivelata influente in minima parte dal momento che i *tie point* estratti in automatico scartano la quasi totalità dei punti trovati nelle porzioni alte delle immagini. Tuttavia per assicurare il raggiungimento dei migliori risultati è consigliato mascherare le immagini sebbene non siano stati riscontrati cambiamenti significativi nei test eseguiti.

Analizzando gli errori stimati sui Ground Control Point si può osservare come questi aumentino leggermente attestandosi sui 5 cm sui punti naturali acquisiti tramite rilievo topografico NRTK. L'ortofoto generata risulta compatibile con rappresentazioni circa alla scala 1:200. Tuttavia, nonostante la scala compatibile permetta la rappresentazione di un grado di dettaglio inferiore rispetto alla tecnologia di acquisizioni *single frame*, è importante sottolineare il fatto che le elaborazioni sferiche permettono in un solo volo

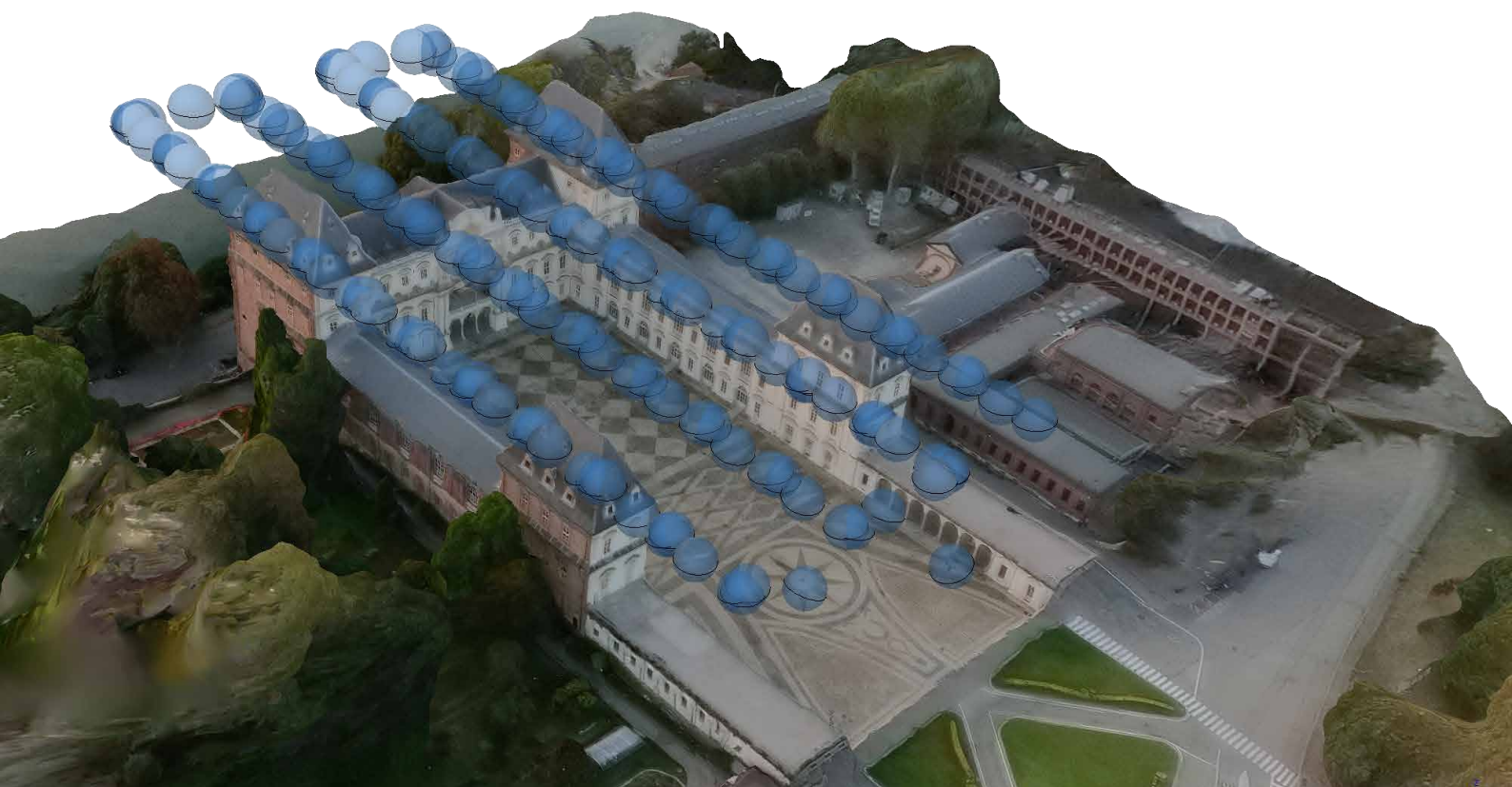




Fig. 289. Torino, *Castello del Valentino*, proiezione equirettangolare di un immagine sferica acquisita da UAV tramite la camera GoPro Fusion.

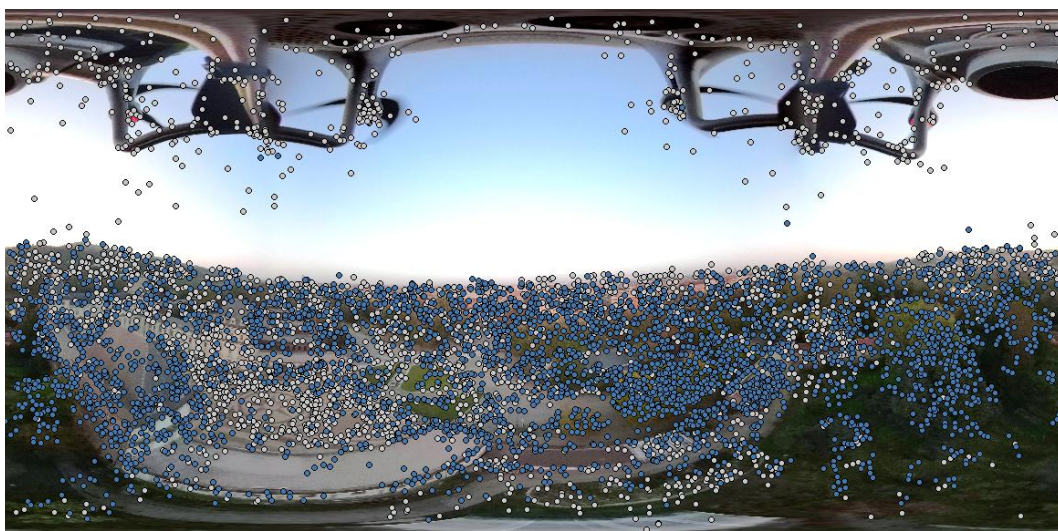


Fig. 290. Torino, *Castello del Valentino*, estrazione *Tie Point* su panorama sferico senza mascheratura del UAV visibile nella parte alta delle immagini.

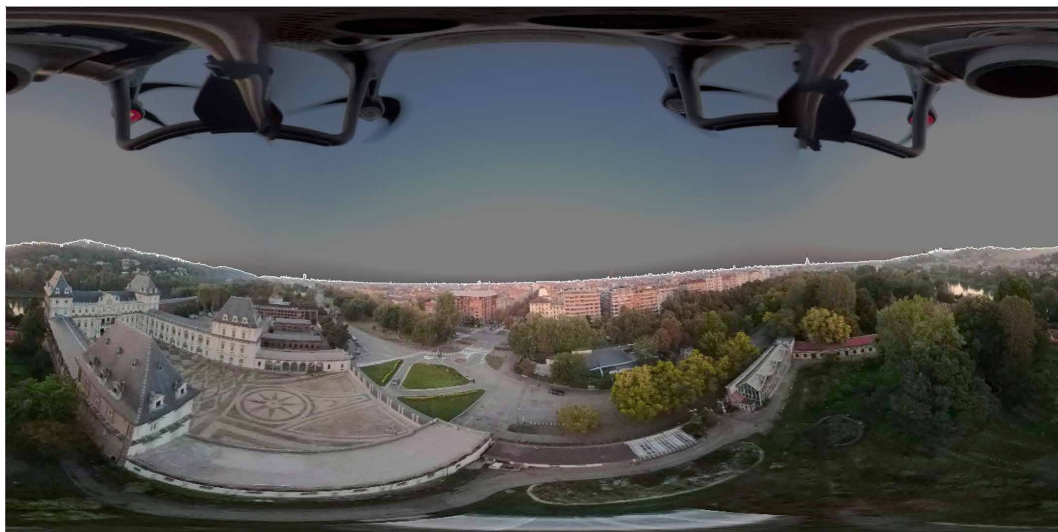


Fig. 291. Torino, *Castello del Valentino*, mascheratura delle porzioni alte dell'immagini, superflue per il processo di ricostruzione tridimensionale.

di acquisire informazioni complete di una grande parte di territorio rendendosi estremamente efficaci in modo particolare nelle operazioni di *Disaster Management* in cui serve velocità nell'ottenere delle prime informazioni dimensionali su larga scala per un rapido intervento di soccorso. In ultimo, osservando la *mesh*, si ritiene particolarmente idoneo l'utilizzo delle sole

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
4	1.22	4.53	2.72	4.69	5.42

Tab. 53.Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points per le elaborazioni sul Castello del Valentino delle sole immagini sferiche.

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
1	1.68	3.15	3.66	3.57	5.11

Tab. 54.Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points per le elaborazioni sul Castello del Valentino delle sole immagini sferiche.

immagini sferiche per la finalità di visualizzazione e comunicazione grafica dal momento che queste applicazioni non richiedono modelli con un elevato grado di dettaglio.

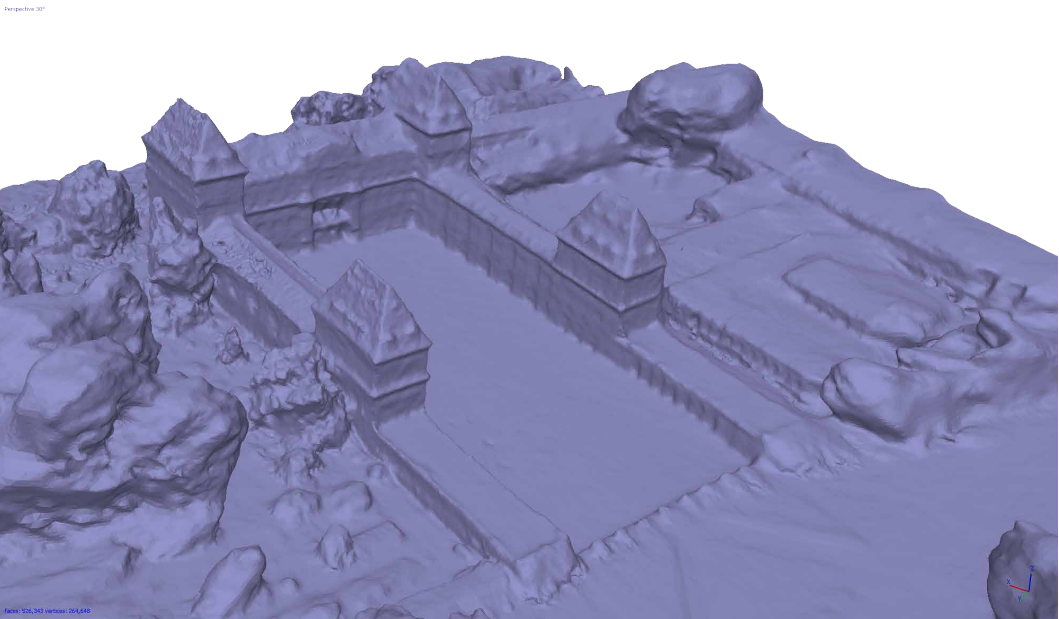


Fig. 292. Torino, Castello del Valentino, Mesh tridimensionale ottenuta dalle sole immagini sferiche tramite acquisizione UAV.



Fig. 294. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione a volo d'uccello del modello tridimensionale texturizzato generato attraverso le sole immagini sferiche acquisite da UAV.



Fig. 293. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto generata dalle sole immagini sferiche tramite acquisizione UAV.

4.10.1.3. Elaborazione congiunta di immagini sferiche e nadirali

La terza tipologia di elaborazione dei dati sul Castello del Valentino è stata quella che ha consentito l'unione delle immagini sferiche e tradizionali. Questa scelta è stata dettata dalla necessità di verificare la potenzialità di integrazione dei dati acquisiti da differenti tipologie di sensori per la generazione di modelli tridimensionali. Appurate le criticità dell'elaborazione separata di queste immagini illustrata nelle precedenti elaborazioni, è apparso chiaro che i limiti di un'elaborazione sembravano essere compensati dai punti di forza dell'altra e viceversa. Nella tabella sono riportati i punti di forza e debolezza per ognuna delle elaborazioni. In particolare modo la criticità della bassa risoluzione delle immagini sferiche è stata compensata da quella migliore della camera frame *RGB* installata sull'UAV mentre le immagini sferiche hanno contribuito a garantire la tridimensionalità dell'oggetto ricostruito. Questa tipologia di analisi è risultata inoltre di particolare interesse per il fatto che l'acquisizione di entrambi i sensori è avvenuta simultanea-

IMMAGINI		<i>STRENGTHS</i> (Punti di forza)	<i>WEAKNESSES</i> (Debolezze)
	TRADIZIONALI	Basso numero di immagini necessario, esecuzione rapida dei voli. Sensore con risoluzione elevata. Bassi errori stimati nei <i>GCP</i> . Elevato dettaglio delle ortofoto generale e buona ricostruzione dei dettagli delle geometrie di ricostruzione anche da altezze elevate.	Impossibilità di ricostruzione degli alzati. Modello tridimensionale incompleto. Ortofoto con aree mancanti per assenza di informazioni tridimensionali valide.
IMMAGINI	SFERICHE	Rapidità di acquisizioni realizzabili in tempi molto brevi su porzioni di territorio medio-ampie. Buona ricostruzione della tridimensionalità delle geometrie.	Bassa risoluzione delle immagini. Difficoltà significative nella collimazione dei punti di coordinate note. Errori nei punti di controllo conseguentemente più elevati.

Tab. 55. Analisi dei punti di forza e delle debolezze relative all'utilizzo indipendente delle immagini frame e delle immagini sferiche.

mente in un unico volo.

Si riportano informazioni più dettagliate circa l'acquisizione svolta per questi test. In fase di elaborazione si è scelto di sfruttare il vantaggio della miglior risoluzione delle immagini *frame* per andare a collimare i marker solamente

DATE/TIME	OVERLAP / SIDELAP	FLIGHT TIME	PATH	ALTITUDE
5/10/18 7:52	70%	13 min 58 s	867	40 m

Tab. 56. Approfondimento sul volo eseguito per l'acquisizione simultanea dei dati.

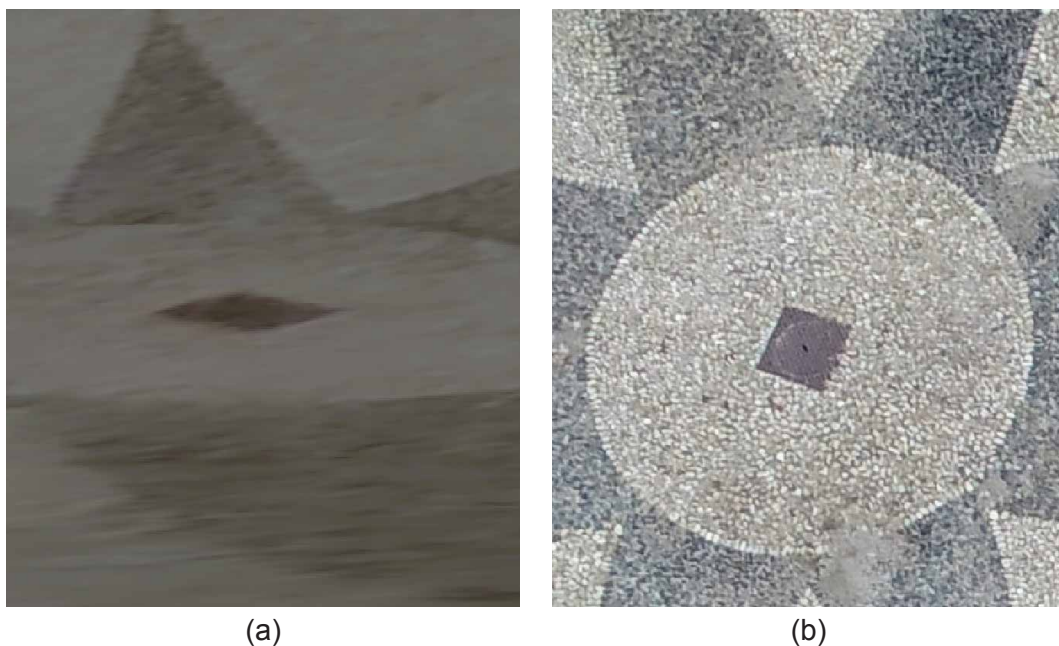


Fig. 295. Comparazione del differente risoluzione delle immagini acquisite da un altezza di 40 metri su una delle posizioni dei punti naturali. Immagine sferica (a); immagine frame (b)

su queste. Le immagini sferiche sono state utilizzate per migliorare la ricostruzione 3D. In questa fase non sono state riscontrate variazioni significative in termini di errori stimati nei punti di controllo dal momento che il dato delle immagini nadirali si è dimostrato valido per l'orientamento del modello. Come si può osservare dalla immagini presentate, l'uso congiunto permette di ottenere *mesh* più definite e composte da un maggior numero di triangoli. In particolare i dettagli delle geometrie appaiono meglio delineati. In ultimo si propongono, come per le precedenti elaborazioni presentate, i risultati

relativi agli errori stimati nei *Ground Control Point* e nei *Check Point* per questo test. Si è passati alla generazione dell'ortofoto che ha permesso di ottenere i migliori vantaggi dell'utilizzo congiunto delle immagini sferiche associate alle immagini *frame*. Per l'elaborazione delle ortofoto sono state testati due differenti approcci. Il primo ha visto la generazione dell'ortomosaico

SPHERICAL IMAGES MESH

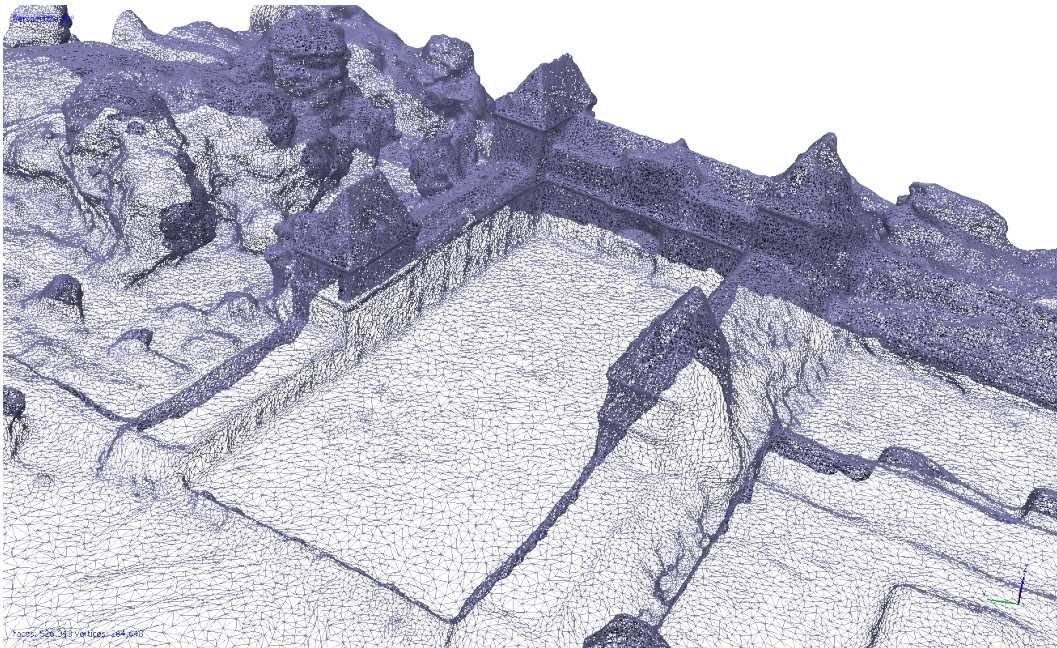


Fig. 296. Torino, *Castello del Valentino*, mesh generata dalle sole immagini 360.

NADIR + SPHERICAL IMAGES MESH

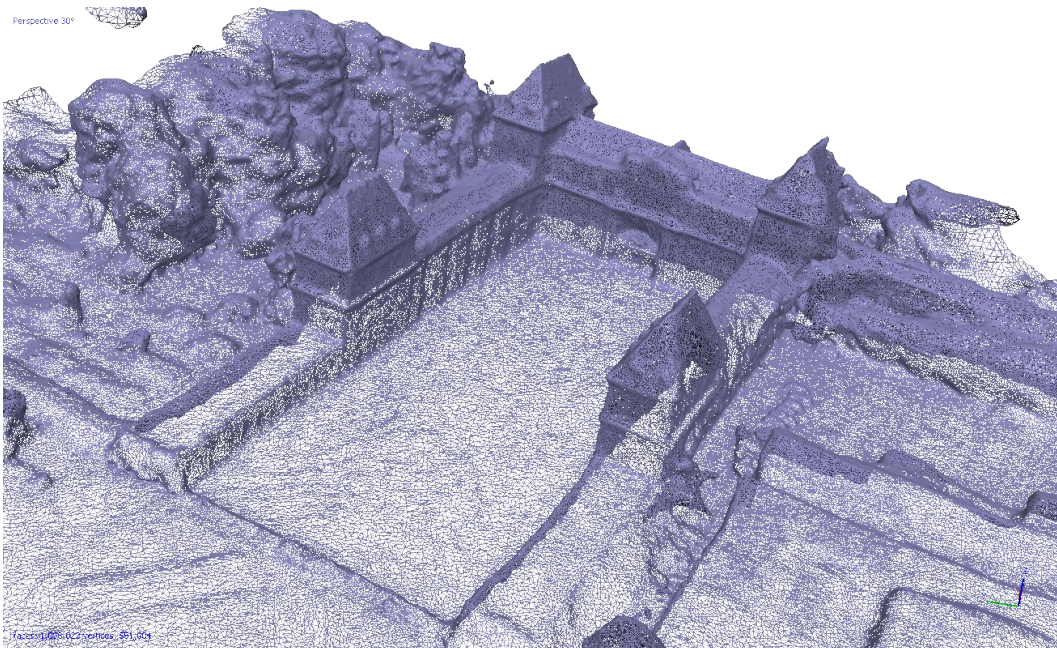


Fig. 297. Torino, *Castello del Valentino*, mesh generata dalle acquisizioni frame nadirali e dalle immagini 360.

NADIR IMAGES

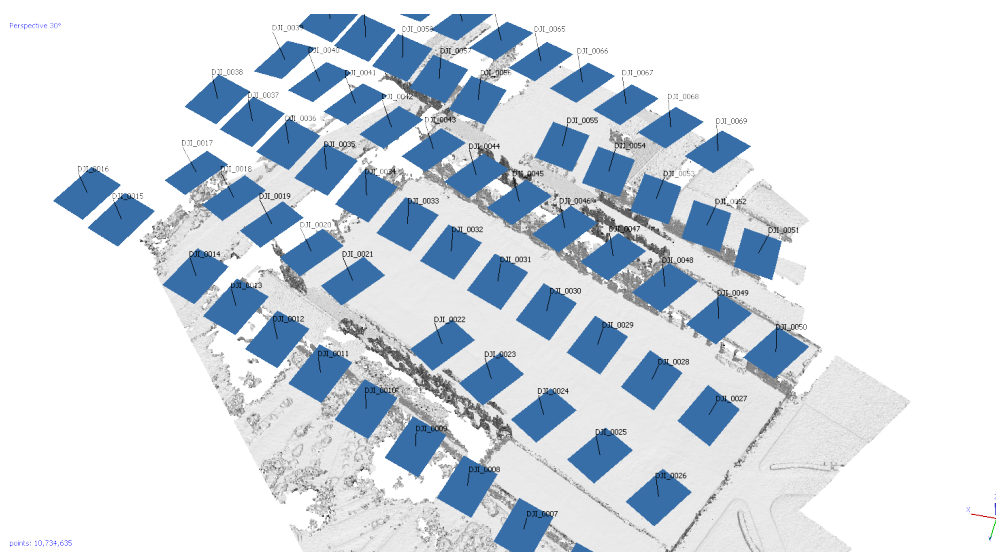


Fig. 298. Torino, Castello del Valentino, allineamento delle immagini nadirali.

SPHERICAL IMAGES

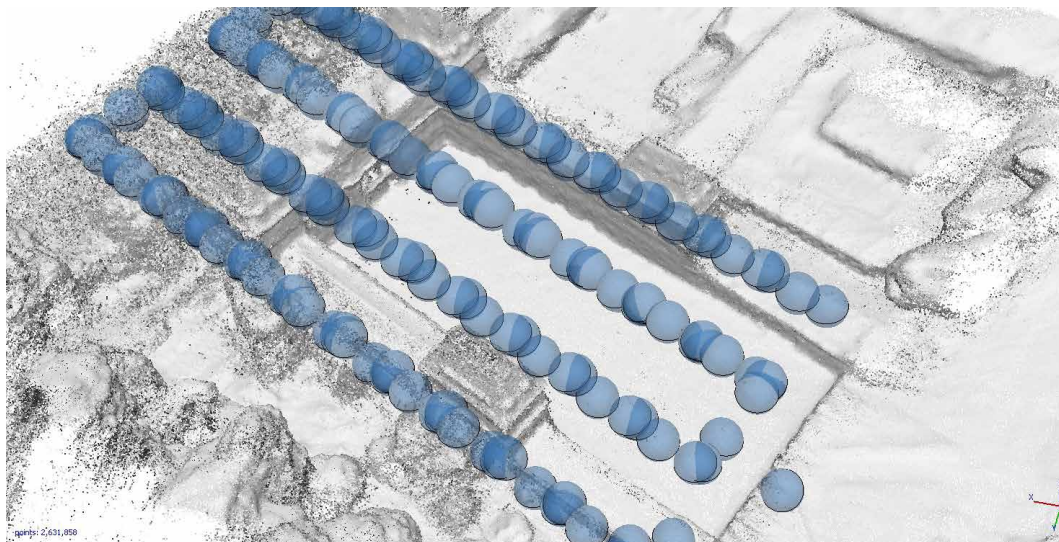


Fig. 299. Torino, Castello del Valentino, allineamento delle immagini sferiche.

NADIR + SPHERICAL IMAGES

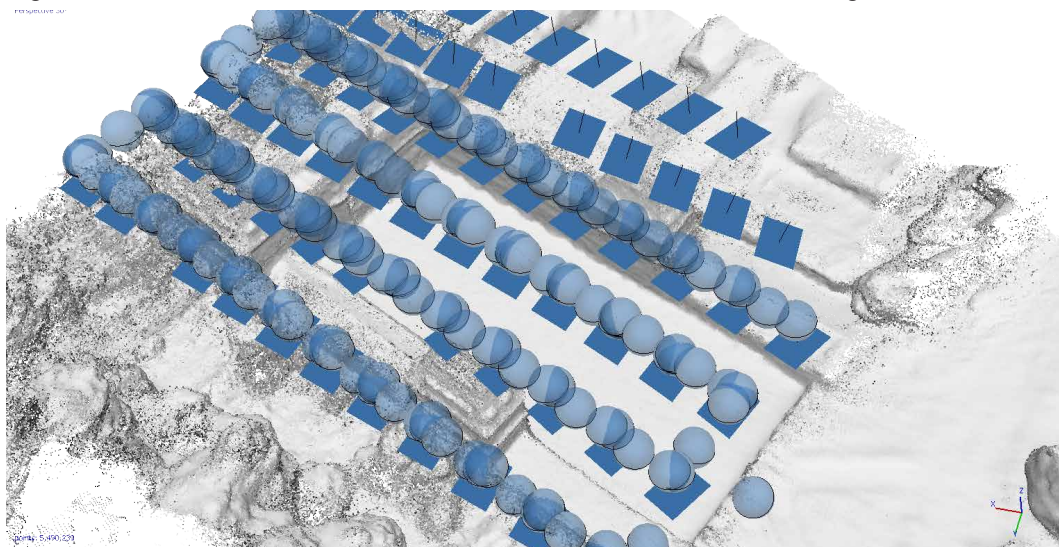


Fig. 300. Torino, Castello del Valentino, allineamento delle immagini frame nadirali sferiche.

lasciando scegliere al software liberamente le immagini, mentre il secondo ha previsto l'imposizione di utilizzo delle sole immagini frame nadirali. Come

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
7	0.53	1.36	1.43	1.46	2.04

Tab. 57. *Root Mean Squared (RMS) Error* nei *Control points* per le elaborazioni sul *Castello del Valentino* delle immagini frame associate alle immagini sferiche.

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
4	1.26	1.09	2.23	1.67	2.78

Tab. 58. *Root Mean Squared (RMS) Error* nei *Check points* per le elaborazioni sul *Castello del Valentino* delle immagini frame associate alle immagini sferiche.

si può osservare dai risultati, entrambe le ortofoto risultano correttamente generate, ma da un'analisi più accurata, si osserva che il software sembra prediligere le immagini sferiche alle nadirali che risultano meno definite, inserendo le immagini nadirali solo in alcune porzioni. Questo problema fa sì che, per quanto l'ortofoto prodotta risulti correttamente eseguita, alcune zone presentano un grado di dettaglio maggiore ed altre inferiore. A causa di questo motivo si è optato per rigenerare l'ortofoto utilizzando solo le immagini nadirali andando ad escludere i panorami. Il risultato rappresenta un notevole miglioramento di tutti i test precedentemente eseguiti dal momento che l'ortofoto non presenta più le problematiche espresse nelle prove precedenti risultando uniforme nella risoluzione, ma, soprattutto risolvendo efficacemente il problema di utilizzo delle sole immagini nadirali che producevano aree di vuoto causate dalla mancata ricostruzione delle geometrie nella *mesh*.



Fig. 301. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto generata dall'uso congiunto di immagini nadirali e sferiche, dettaglio della pavimentazione con identificate le aree in cui è osservabile la differente risoluzione delle immagini utilizzate.



Fig. 302. Torino, *Castello del Valentino*, comparazione del dettaglio tra l'ortofoto realizzata con le immagini sferiche (a sinistra) e con le nadirali (a destra)

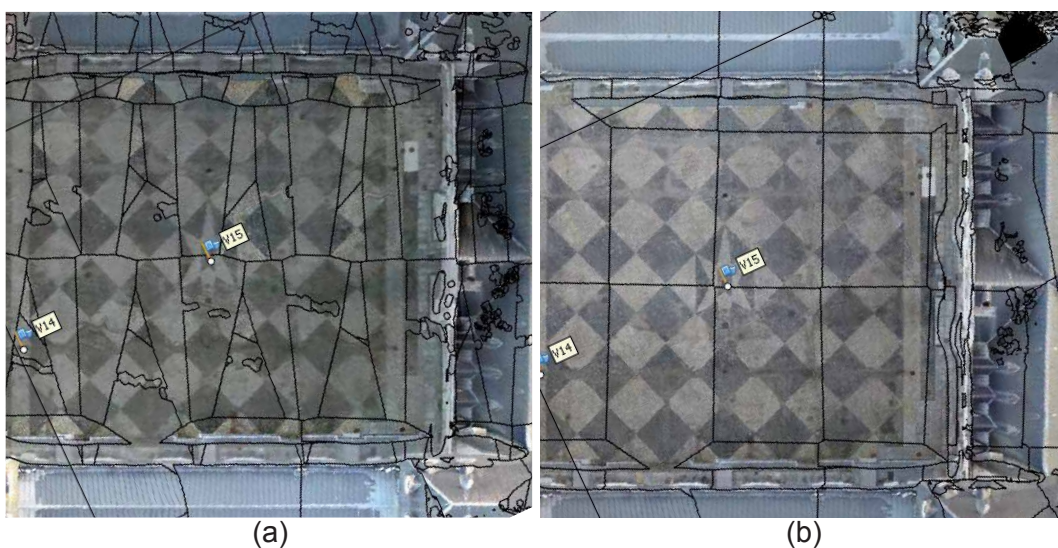


Fig. 303. Torino, *Castello del Valentino*, *seamlines* sulle ortofoto relative al modello generato dalle immagini nadirali + sferiche; (a) ortofoto generata dalle immagini nadirali e sferiche; (b) ortofoto generata soltanto dalle immagini nadirali.

NADIR IMAGES
ORTHOIMAGE

Fig. 304. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto generata sul modello ottenuto dalle sole immagini nadirali.

SPHERICAL + NADIR IMAGES
(BOTH) ORTHOIMAGE

Fig. 305. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto del modello generato dalle immagini nadirali e dalle immagini sferiche utilizzando entrambe per la realizzazione dell'ortofoto.

SPHERICAL + NADIR IMAGES
(ONLY NADIRAL) ORTHOIMAGE

Fig. 306. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto del modello generato dalle immagini nadirali e dalle immagini sferiche utilizzando solo le nadirali per la realizzazione dell'ortofoto.

4.10.1.4. Elaborazione congiunta di immagini sferiche, nadirali e inclinate

Appurati i benefici rappresentati dalla possibilità di integrazione delle immagini sferiche e delle acquisizioni *frame* nadirali applicate alle acquisizioni da UAV sul caso studio, e, nell'ottica di migliorare ulteriormente la qualità del modello 3D, si è deciso di testare in aggiunta alle immagini sferiche e nadirali le immagini *frame* inclinate. Quest'ultima tipologia di elaborazione è quella che in assoluto ha dato i risultati più significativi. Le immagini inclinate permettono di migliorare la definizione del modello ricostruito in quanto (come le acquisizioni nadirali) presentano risoluzione maggiore e contribuiscono conseguentemente a mantenere costanti le tensioni nei punti di controllo permettendo inoltre la generazione di ortofoto a risoluzione più elevata. Nonostante nei paragrafi precedenti siano stati illustrati risultati validi ottenuti in assenza delle camere inclinate, si è scelto di utilizzare quest'ultima elaborazione per tutte le analisi tecniche delle analisi che sa-

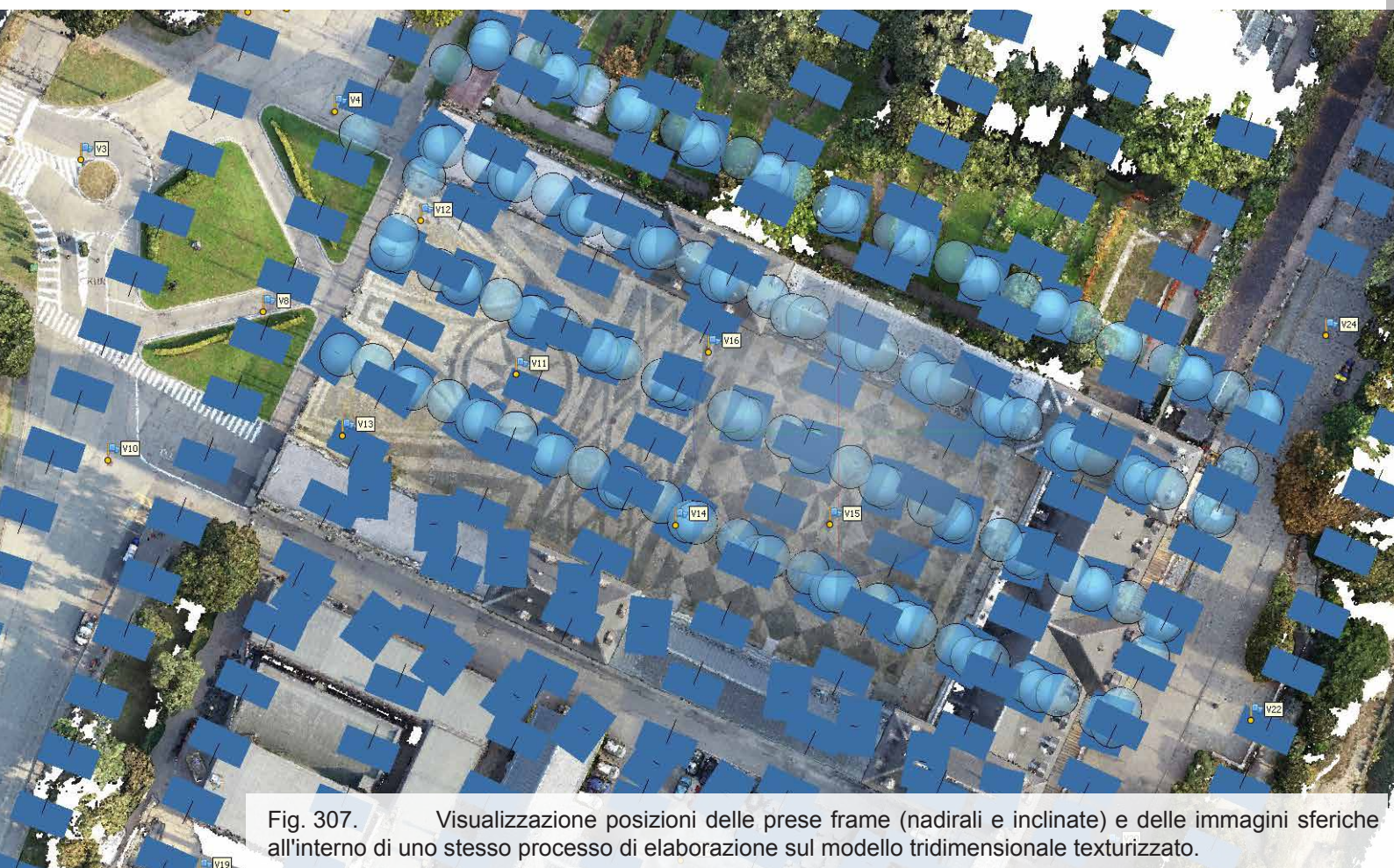


Fig. 307. Visualizzazione posizioni delle prese frame (nadirali e inclinate) e delle immagini sferiche all'interno di uno stesso processo di elaborazione sul modello tridimensionale texturizzato.

ranno presentate in quanto si reputa che il modello ricostruito sia risultato in assoluto il più accurato. È importante sottolineare che anche in questo caso il contributo delle immagini sferiche ha permesso sensibili miglioramenti per le performance del processo di *BBA (Bundle Block Adjustment)*.

Number of images:	438	Camera stations:	438
Flying altitude:	40.3 m	Tie points:	643,707
Ground resolution:	1.64 cm/pix	Projections:	1,837,181
Coverage area:	0.0971 km ²	Reprojection error:	0.875 pix

Fig. 308. *Dati di riepilogo per le elaborazioni sul Castello del Valentino delle immagini tradizionali nadirali e inclinate associate alle immagini sferiche.*

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
13	1.58	1.46	1.98	2.16	2.93

Tab. 59.*Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points per le elaborazioni sul Castello del Valentino delle immagini tradizionali nadirali e inclinate associate alle immagini sferiche.*

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
6	0.83	1.68	1.47	1.87	2.34

Tab. 60.*Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points per le elaborazioni sul Castello del Valentino delle immagini tradizionali nadirali e inclinate associate alle immagini sferiche.*



Fig. 309. *Torino, Castello del Valentino, Mesh di ricostruzione texturizzata, realizzata attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici.*

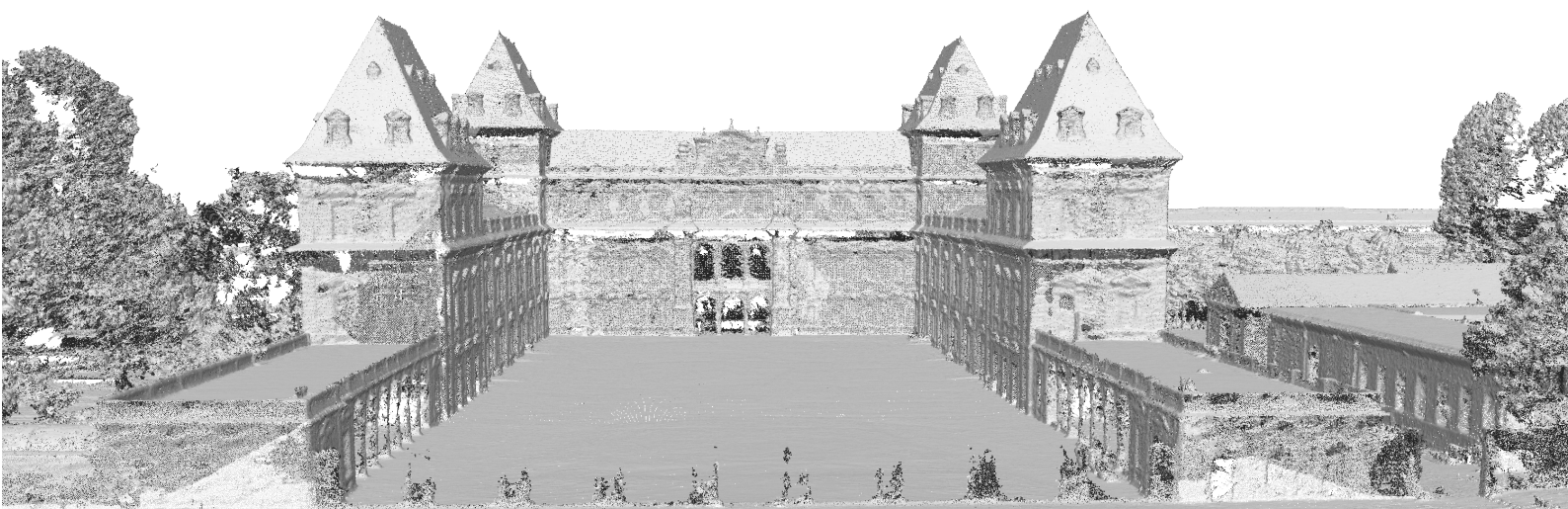


Fig. 310. Torino, *Castello del Valentino*, *Nuvola di punti monocromatica*; ricostruzione basata sull'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici.

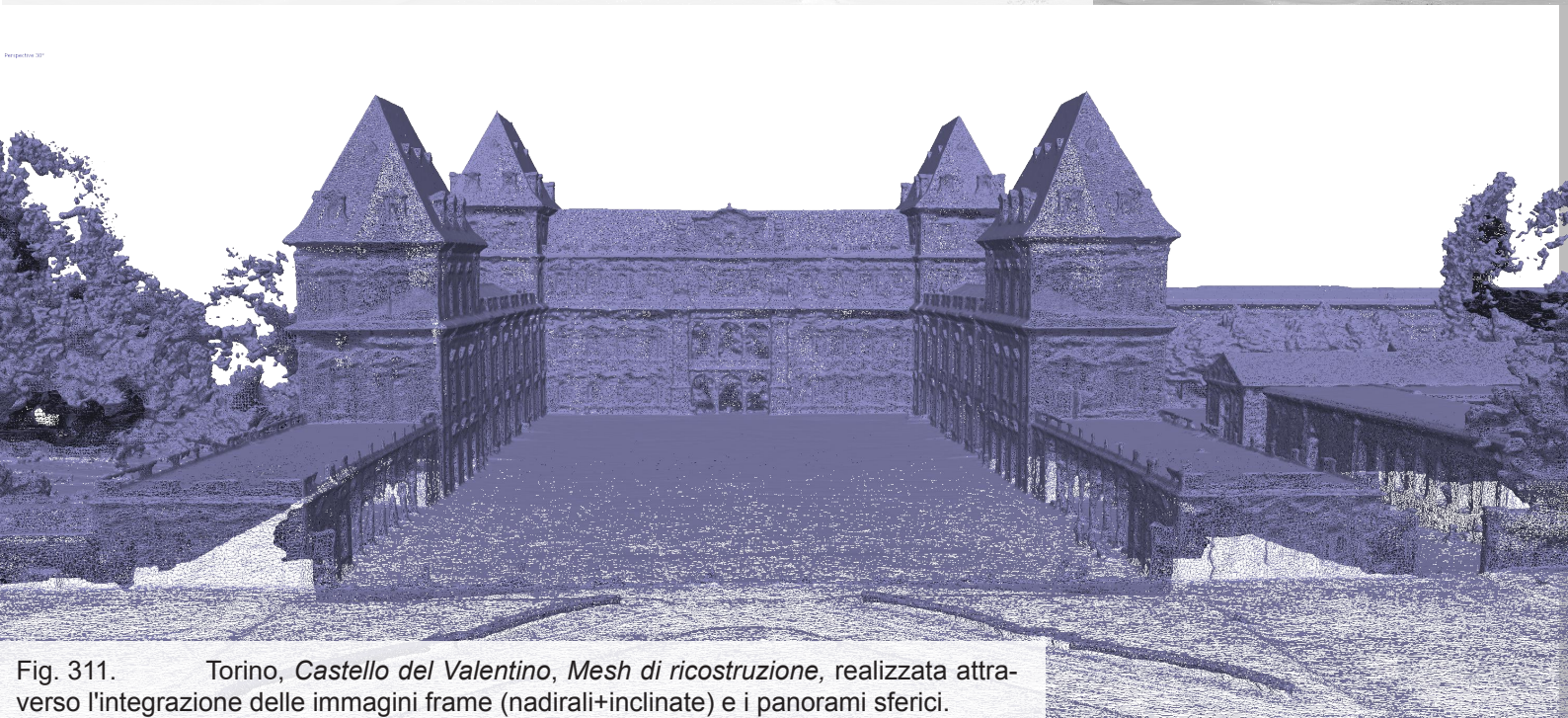


Fig. 311. Torino, *Castello del Valentino*, *Mesh di ricostruzione*, realizzata attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici.



Fig. 312. Torino, *Castello del Valentino*, *Mesh di ricostruzione*, realizzata attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici.

4.10.2. Restituzione e analisi realizzabili attraverso l'integrazione di immagini frame e sferiche sul *Casello del Valentino*

Le acquisizioni sul caso studio proposto hanno permesso la realizzazione di diverse tipologie di elaborati che contribuiscono ad accrescere la conoscenza del Bene Architettonico studiato. Nel corso di questo paragrafo saranno illustrati alcuni esempi che mettono in luce le possibilità offerte dal modello 3D ottenuto.

Gli elaborati realizzabili attraverso l'impiego dei panorami multi-immagine associati a single frame sono quelli generati dall'elaborazione fotogrammetrica tradizionale. In particolar modo possiamo riassumere le restituzioni possibili in:

1. Nuvole di punti
2. Modelli tridimensionali texturizzati
3. *DSM (Digital Surface Model)*
4. Ortofoto

La realizzazione di nuvole di punti e il *DSM* in particolare fanno da base per la realizzazione di elaborati tecnici tra cui analisi delle pendenze, deformazioni, redazione di elaborati architettonici oltre che specifiche analisi sulle geometrie. L'uso delle ortofoto aeree realizzate in coordinate globali e del *DSM* in ambiente *GIS* ha aperto un gran numero di possibilità di analisi alla scala urbana.

GIS

In ambiente *GIS*, utilizzando le informazioni contenute nel *DSM* generato grazie all'integrazione di immagini sferiche e immagini *frame* acquisite da drone sul caso studio, sono state realizzate, a titolo di esempio, alcune analisi sul caso studio. Nello specifico le elaborazioni prodotte possono essere riassunte in:

1. Analisi di ombreggiamento
2. Analisi di esposizione
3. Analisi delle pendenze

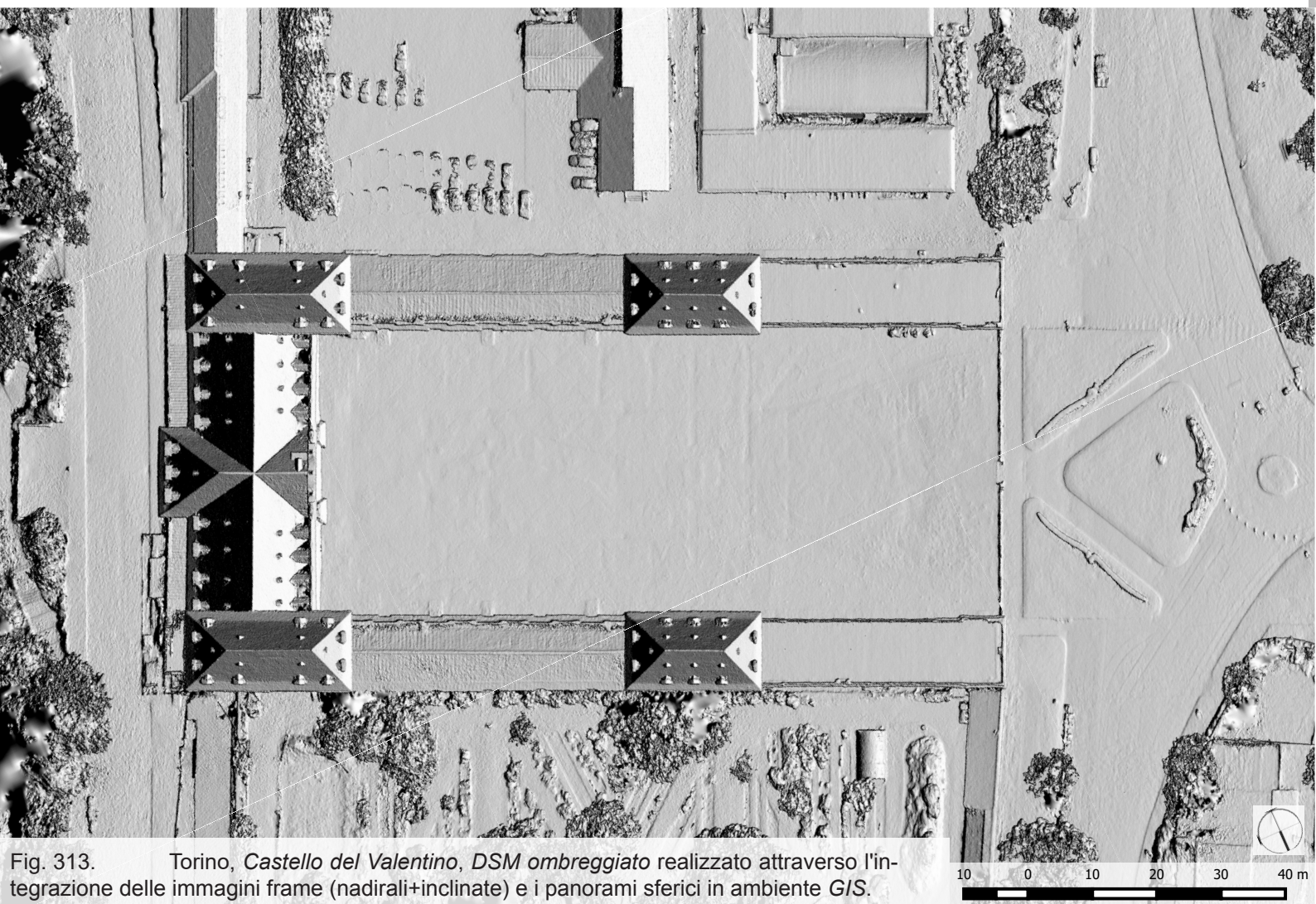


Fig. 313. Torino, Castello del Valentino, DSM ombreggiato realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+incline) e i panorami sferici in ambiente *GIS*.

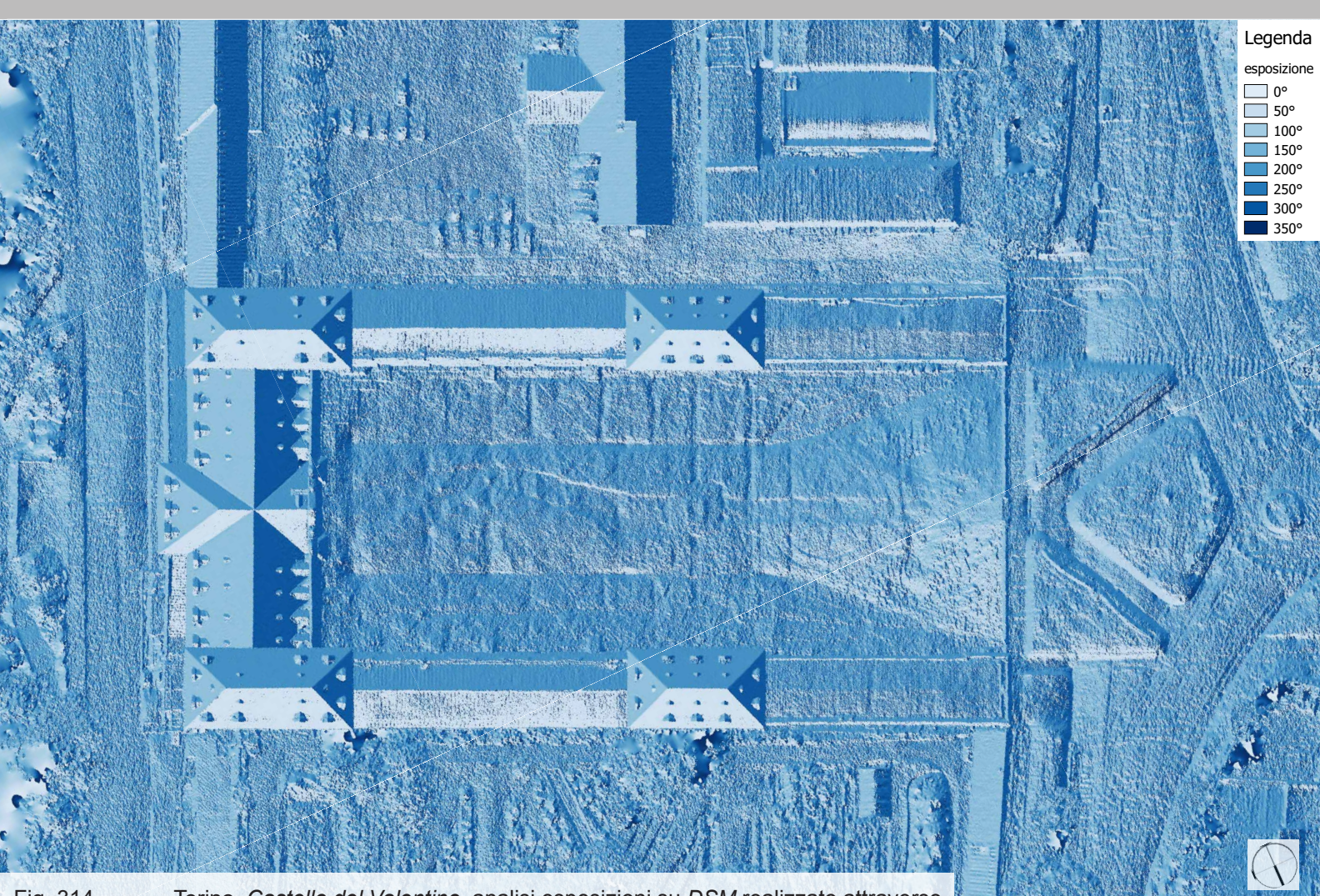
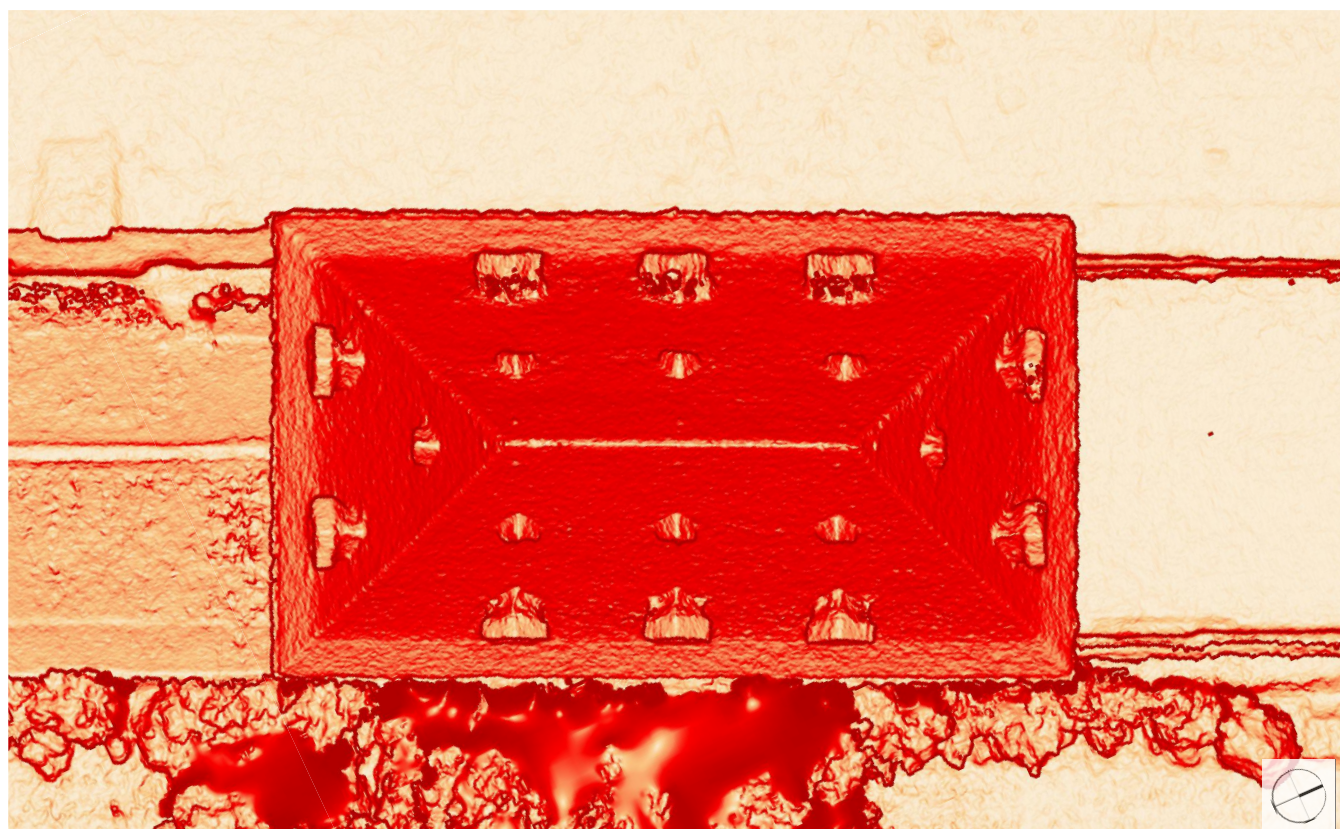
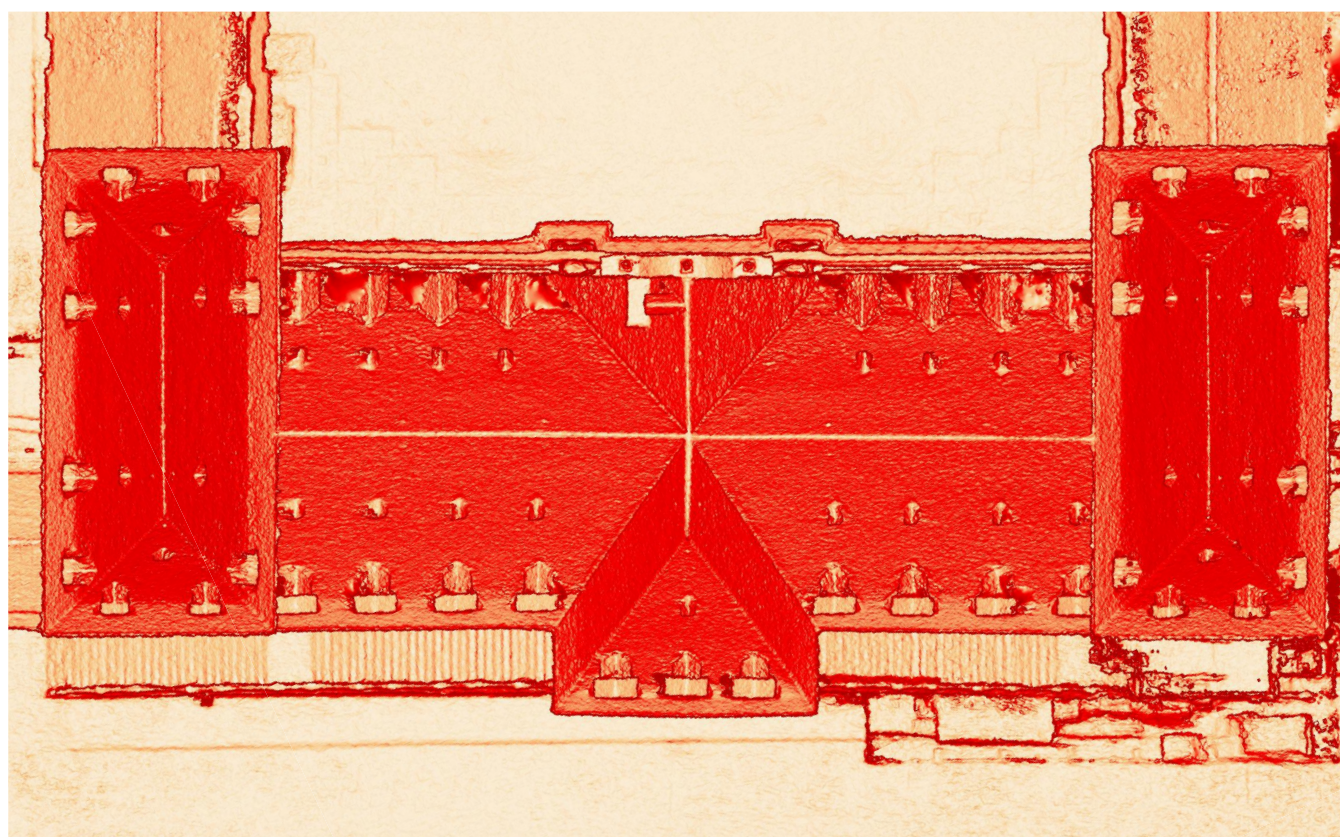


Fig. 314. Torino, *Castello del Valentino*, analisi esposizioni su *DSM* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici in ambiente *GIS*.



Fig. 315. Torino, *Castello del Valentino*, analisi pendenze su *DSM* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici in ambiente *GIS*.



LEGENDA PENDENZE 1° 20° 40° 55° 80° 0 2.5 5 7.5 10 m

Fig. 316. Torino, Castello del Valentino, analisi pendenze su *DSM* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici in ambiente GIS.

L'utilizzo del *G/S* ha permesso, essendo il modello stato elaborato in coordinate globali, di utilizzare le informazioni ad integrazione di quelle già presenti sull'area ed espandere la conoscenza e le possibilità di analisi dei dati. Queste analisi hanno permesso di mettere in luce importanti informazioni in particolar modo relative alla pendenza delle falde di copertura, tema che è stato ulteriormente approfondito attraverso analisi sulla nuvola di punti che hanno permesso di poter quantificare numericamente l'inclinazione di

1	6.39°	7	66.655
2	0.53°	8	0.53°
3	65.03°	9	65.03°
4	64.96°	10	64.96°
5	45.43°	11	45.43°
6	26.13°	12	26.13°

Tab. 61. Quantificazione numerica delle pendenze espresse in gradi per i punti delle coperture del *Castello del Valentino* rappresentati nella figura seguente.

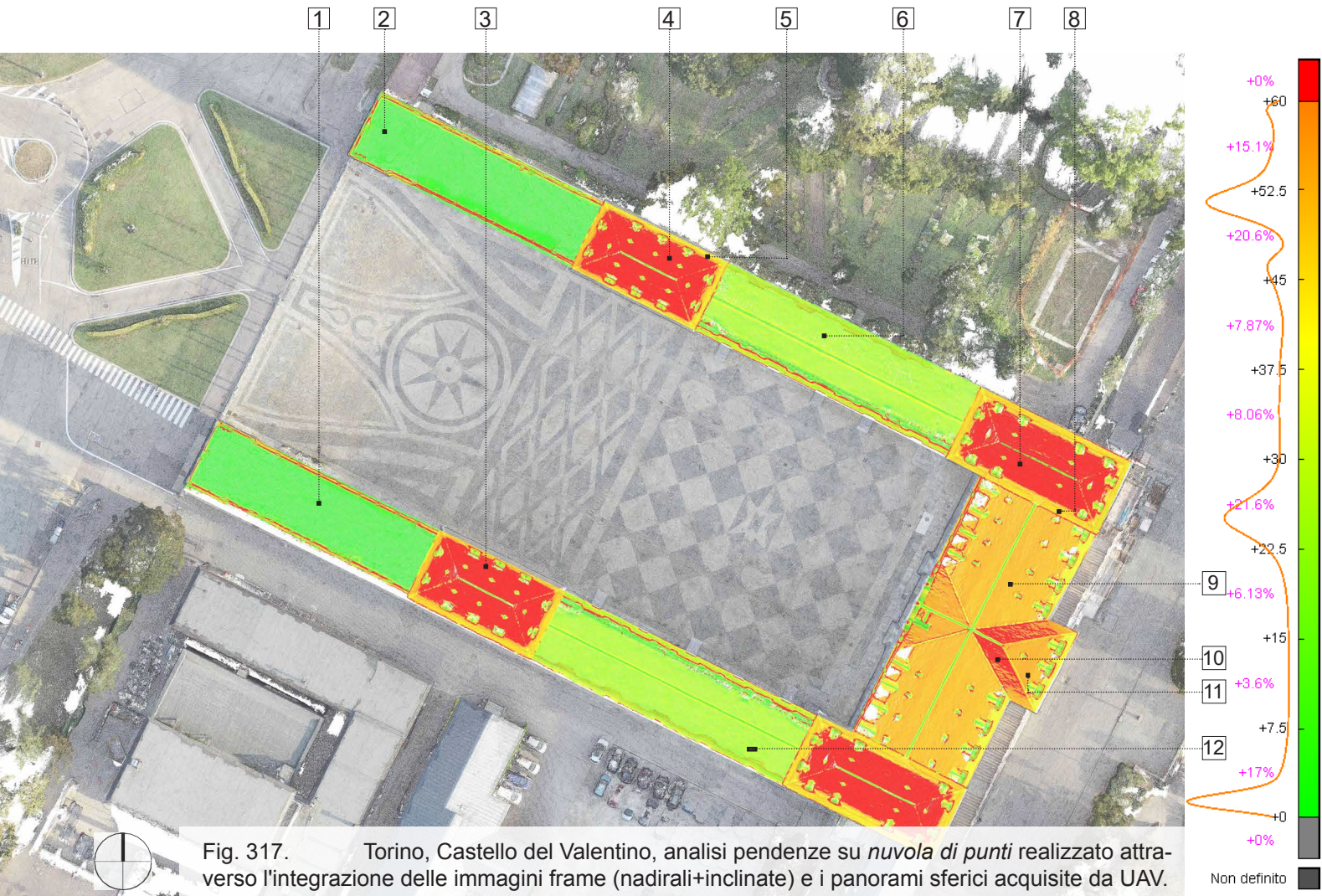
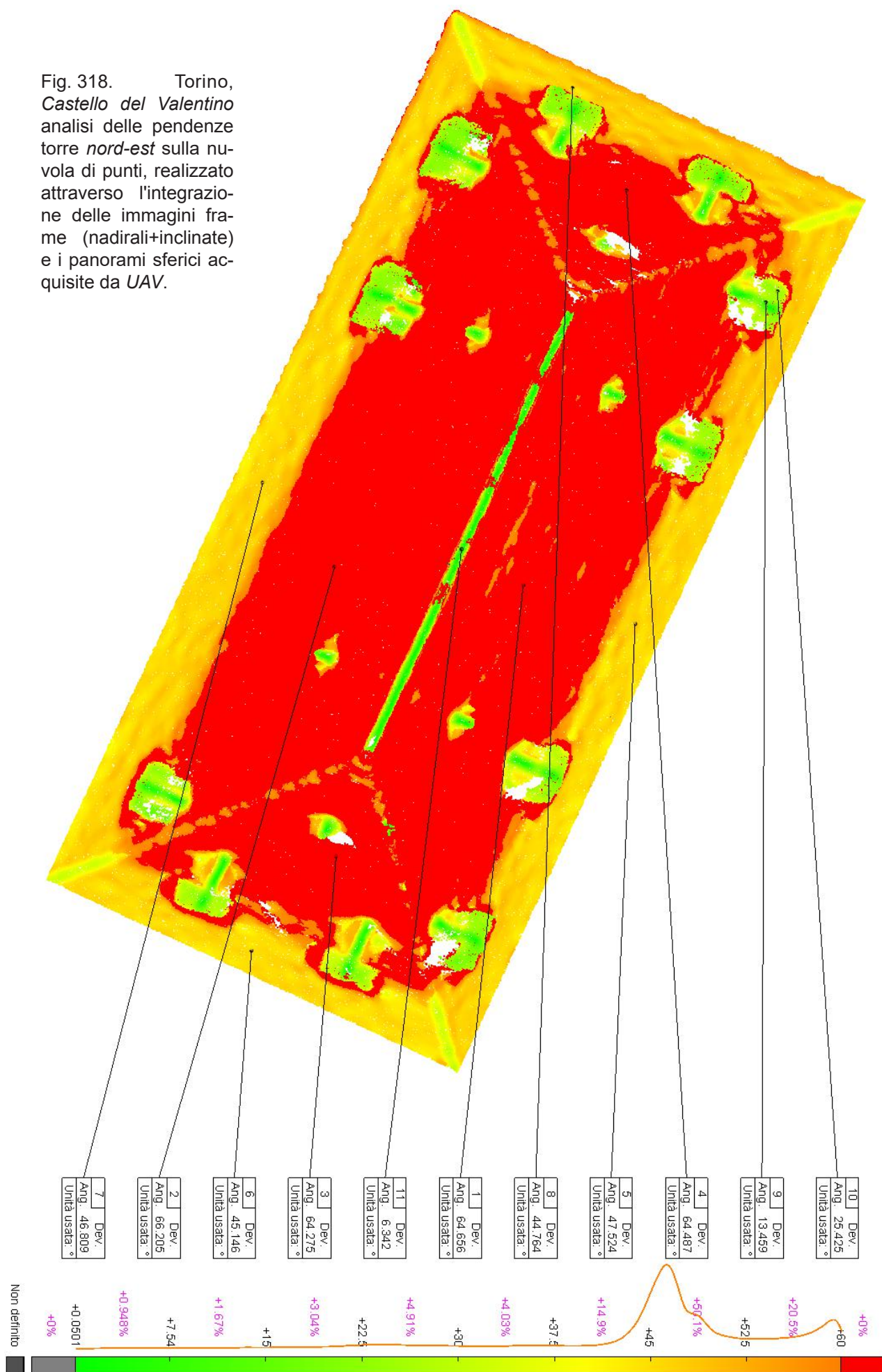


Fig. 317. Torino, Castello del Valentino, analisi pendenze su *nuvola di punti* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.

Fig. 318. Torino, *Castello del Valentino* analisi delle pendenze torre *nord-est* sulla nuvola di punti, realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frange (nadirali+incline) e i panorami sferici acquisite da UAV.



ogni punto del modello ricostruito. L'esecuzione di queste prove è stata supportata dal software *Hexagon 3DReshaper* che permette il trattamento di nuvole di punti e mesh tridimensionali attraverso strumenti avanzati di elaborazione. Sono stati riportati in tabella i valori delle pendenze espresse in gradi [°] relativi alle aree di maggior interesse del Bene Architettonico ed è stato proposto un approfondimento ulteriore sulle pendenze della torre nord-est.

Sono state svolte ulteriori analisi tecniche, rese nuovamente possibili grazie alla nuvola di punti, mirate a valutare la planarità del cortile e l'estrazione delle relative curve di livello. Queste prove hanno consentito di misurare con precisione le quote altimetriche di ogni punto del cortile e effettuare valutazioni circa le pendenze di scolo delle acque piovane. Nello specifico si è potuto osservare come l'area di accesso al cortile, verso *corso Marconi*, si trovi ad una quota più elevata che degrada velocemente permettendo di indirizzare le acque piovane verso il centro del cortile, dove la raccolta è

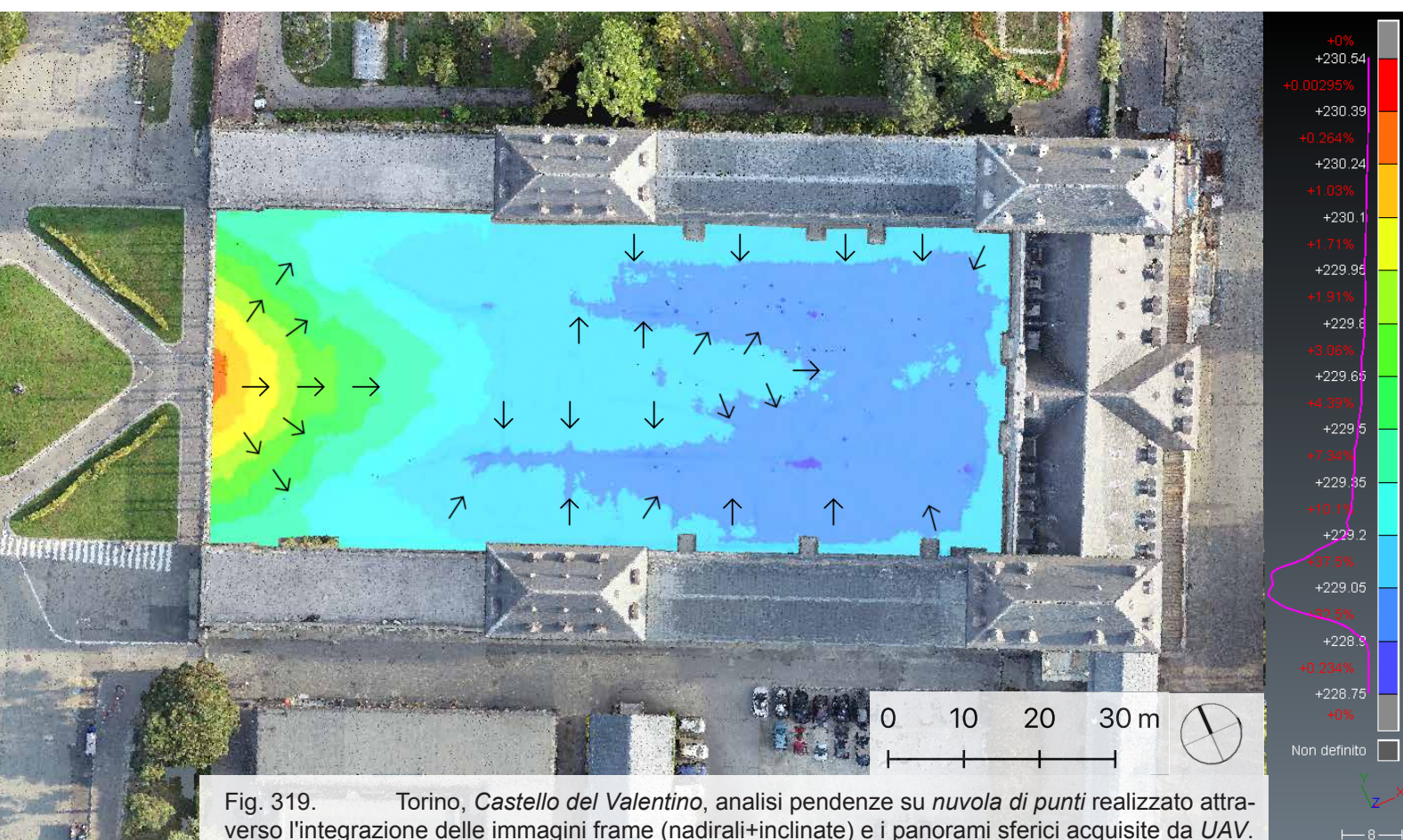
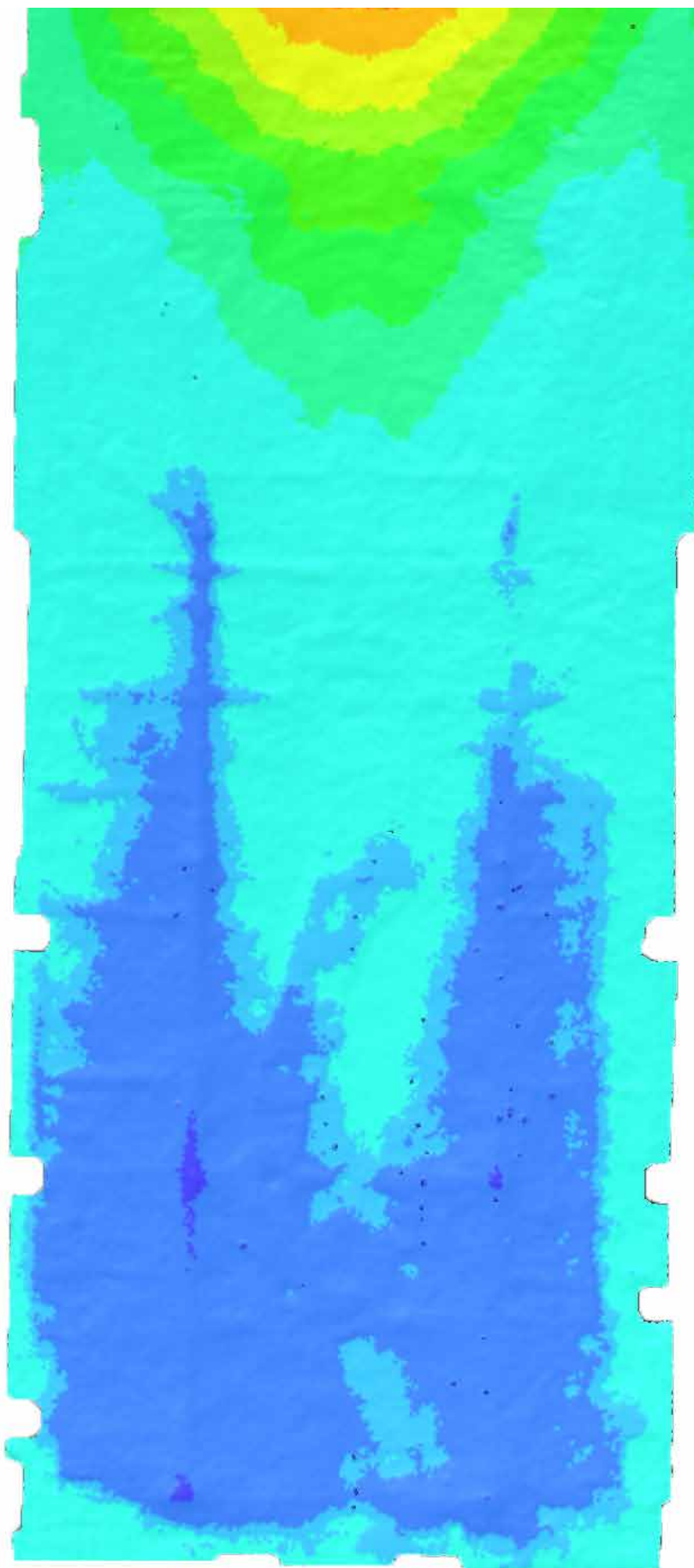


Fig. 320. Torino, *Castello del Valentino* analisi della planarità del cortile, eseguito sulla mesh ricavata dalla nuvola di punti realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinata) e i panorami sferici acquisite da UAV.



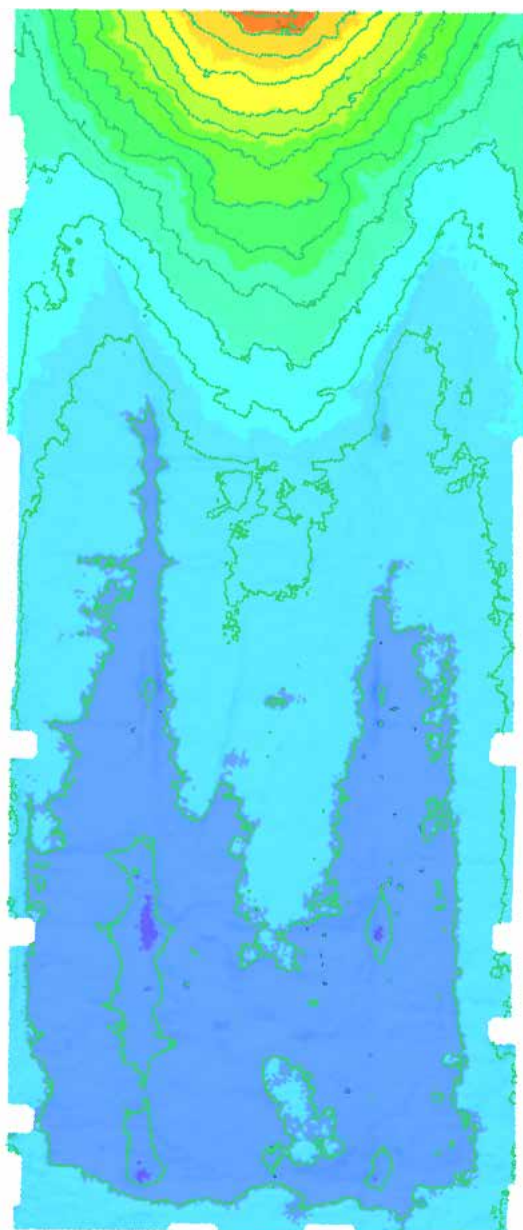
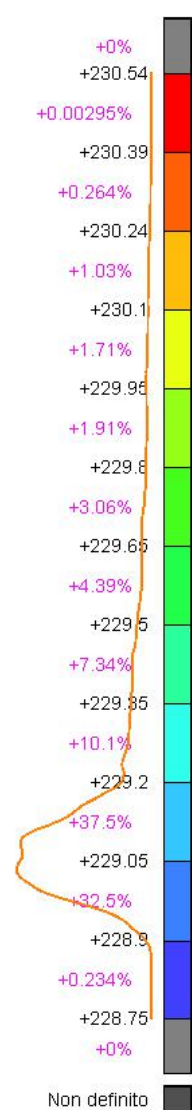
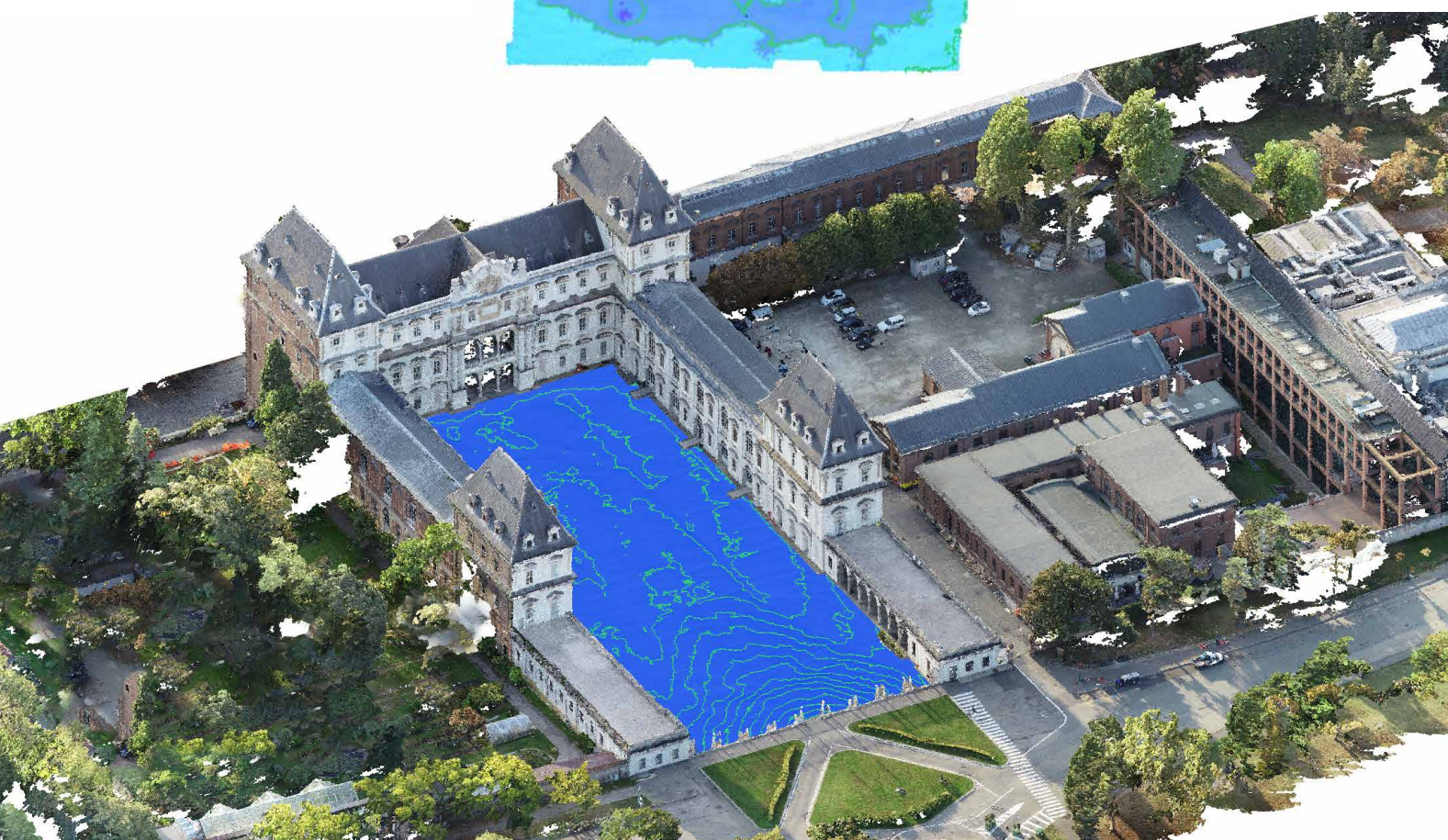


Fig. 321. Torino, *Castello del Valentino* analisi della planarità del cortile e sovrapposizione delle curve di livello a passo di 0.1 m, eseguito sulla *mesh* ricavata dalla nuvola di punti realizzato attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.

Fig. 322. Torino, *Castello del Valentino* vista assonometrica cortile, curve di livello su modello di integrazione *mesh* e nuvola di punti.



resa possibile da due canaline lineari a vista, poste a quota inferiore che si sviluppano parallelamente ai prospetti delle maniche a quota inferiore. Per evidenziare questi temi sono state generate le curve di livello estratte dalla mesh ricavata dalla nuvola di punti attraverso l'ausilio di piani a passo costante lungo l'asse verticale. Ogni curva di livello rappresenta l'intersezione di un piano con il modello aerofotogrammetrico. Per migliorare la lettura della planarità del cortile è stato associato alle informazioni altimetriche un gradiente di colore così da permettere una più agevole comprensione della conformazione del terreno del sito.

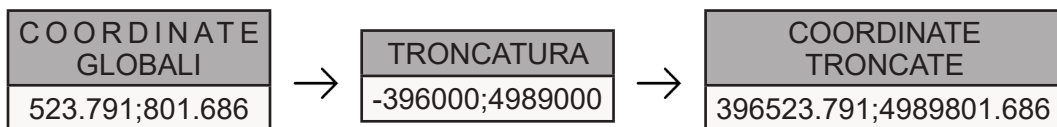
4.10.2.2. Realizzazione Ortofoto a scala urbana

Oltre alle analisi tecniche proposte un grande vantaggio rappresentato dalla aerofotogrammetria è la possibilità di ottenere ortofoto. Nel caso specifico l'integrazione delle immagini sferiche e *frame*, come illustrato nel dettaglio nei paragrafi precedenti, ha rappresentato un notevole miglioramento, dal momento che, il progresso del processo di allineamento, reso possibile dai vincoli geometrici introdotti nel processo di *BBA (Bundle Block Adjustment)*, ha sensibilmente contribuito a migliorare il prodotto finale. La realizzazione dell'ortofoto in coordinate globali è stata possibile grazie all'utilizzo di *Ground Control Point* identificati in sito da punti naturali e misurati attraverso tecnologia *NRTK* avvalendosi di un ricevitore GPS topografico avvalendosi della rete di stazioni permanenti di *ITALPOS*.

Per semplificare il processo di calcolo si è scelto di effettuare una troncatura delle coordinate globali dei punti di controllo al fine di velocizzare il processo. Molti programmi di analisi e visualizzazione delle nuvole di punti, infatti, presentano difficoltà non trascurabili nell'utilizzo di nuvole di punti

molto lontane dall'origine e dal peso molto elevato. Pertanto, a partire dalle coordinate globali, è stato creato un sistema locale "ad hoc" attraverso una traslazione controllata del modello per di avvicinarlo all'origine degli assi. Successivamente a seguito dei processi di ricostruzione tridimensionale, si è proceduto alla realizzazione ed esportazione dell'ortofoto che è stata riportata in coordinate globali andando a eseguire la traslazione inversa rispetto a quella eseguita precedentemente. Per riportare l'ortofoto in coordinate globali è stato utilizzato *ESRI ArcMap 10.3*.

ESMPIO DI TRONCATURA



Tab. 62. Esempio di troncatura delle coordinate globali eseguita su un *Ground Control Point*.

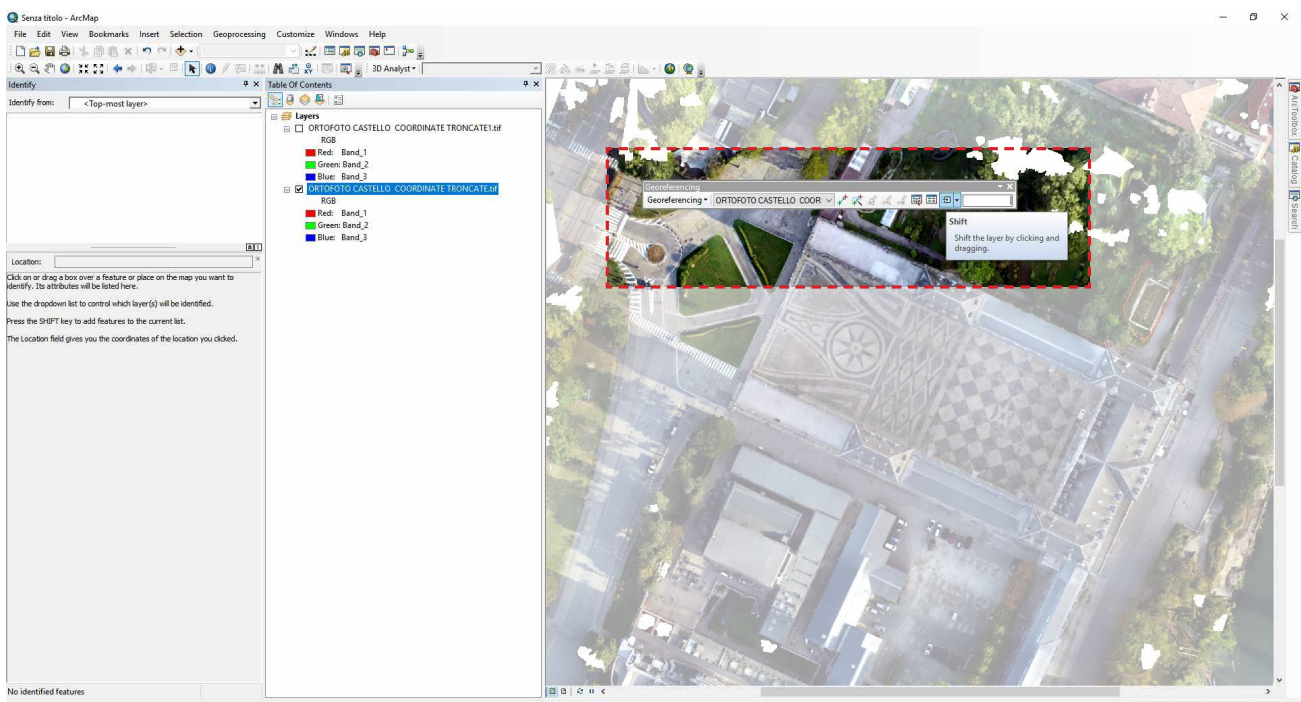


Fig. 323. Traslazione dell'ortofoto per riportarla in coordinate globali attraverso il comando di *Shift* di *Esri Arc Map 10.3*

Nelle tabelle è riportato un esempio di troncatura utilizzato sui *control point* per il processo di *SFM*. Dopo avere riportato l'ortofoto in coordinate globali è stato possibile attraverso l'ausilio di applicativi GIS sovrapporla alla cartografia tecnica già presente oltre che all'Ortofoto 2016^{xi} con i dati satellitari forniti da *Google* dalla cui comparazione si può constatare un aumento significativo della qualità presentata in questo lavoro.

ORTOFOTO 2016



GOOGLE MAPS



ORTOFOTO UAV



Fig. 324. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Generale (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.



Fig. 325. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Generale (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.



Fig. 326. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Generale (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.



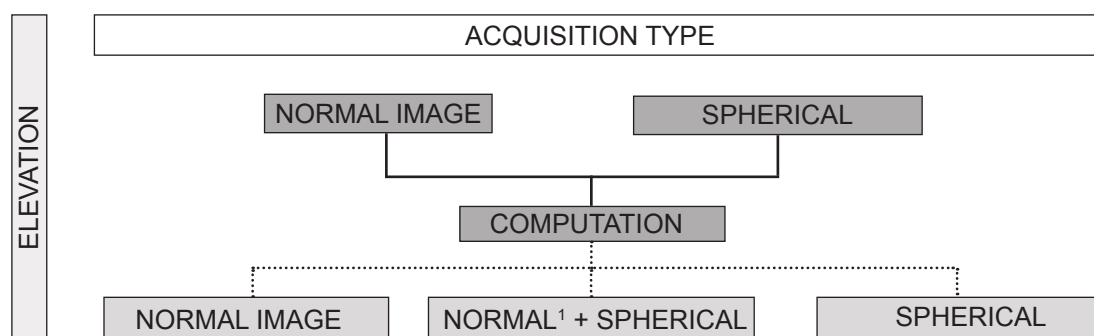
Fig. 327. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Dettaglio Cortile (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.



Fig. 328. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Dettaglio Pavimentazione (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.

4.10.3. Elaborazioni fotogrammetriche sui prospetti della Corte del Castello del Valentino

Obiettivo di questo ulteriore test è stato quello di generare le ortofoto sui prospetti della corte del castello. L'utilizzo del drone ha permesso di raggiungere questi obiettivi permettendo la realizzazione di ortofotopiani ad alta risoluzione con *Ground Sample Distance (GSD)*, ovvero la dimensione del pixel sull'oggetto di rilievo estremamente basso, nell'ordine dei 2/4mm. Per la realizzazione di questi obiettivi sono stati eseguiti voli specifici a bassa quota. Utilizzando, il sistema *GPS* di bordo è stata impostata l'esecuzione di uno scatto ogni 2 metri in orizzontale ed in verticale per la camera tradizionale mentre per le acquisizioni sferiche si è scelto un lasso di tempo di due secondi tra ogni immagine. Sono quindi stati eseguiti passaggi lineari su tutti i prospetti in esame su più quote con la camera tradizionale, mentre, con la camera sferica, invece, sono state realizzate due strisciate: una centrale (fig. 330 a sx) ed una a distanza fissa dai prospetti del castello (fig. 330 a dx). Per ottenere un modello in coordinate globali sono state rilevate le coordinate di circa 50 punti naturali sui prospetti attraverso l'estrazione delle informazioni sui punti da scansioni laser scanner precedentemente acquisite. Per il processo di ricostruzione tridimensionale sono stati utilizzati diversi approcci che sono illustrati nello schema proposto.



¹GCP on frame image

Fig. 329. Schematizzazione delle acquisizioni e delle elaborazioni eseguiti sui prospetti del *Castello del Valentino*.

4.10.3.1. Uso delle sole immagini sferiche

Le immagini sferiche sono state acquisite attraverso una sola strisciata parallela ai prospetti ad una quota media di 10 metri. Le elaborazioni svolte su su questa tipologia di dati utilizzata da sola hanno presentato delle criticità dovute alla distanza di acquisizione, che, a causa della bassa risoluzione dei panorami hanno reso difficoltosa la collimazione dei punti naturali di coordinate note con un conseguente aumento significativo delle tensioni nei punti di controllo. L'utilizzo di *control point* in particolare ha generato problematiche nell'allineamento delle immagini. Le problematiche illustrate sono risultate particolarmente rilevanti a causa ripetitività e simmetria degli elementi del prospetto.

La distanza di acquisizione per le camere sferiche è stata approssimativamente di 15 metri. Si ritiene che la distanza operativa consigliata per le applicazioni di fotogrammetria con l'uso sole immagini sferiche realizzate attraverso l'uso della *GoPro Fusion* non debba essere superiore ai 5/10 metri.

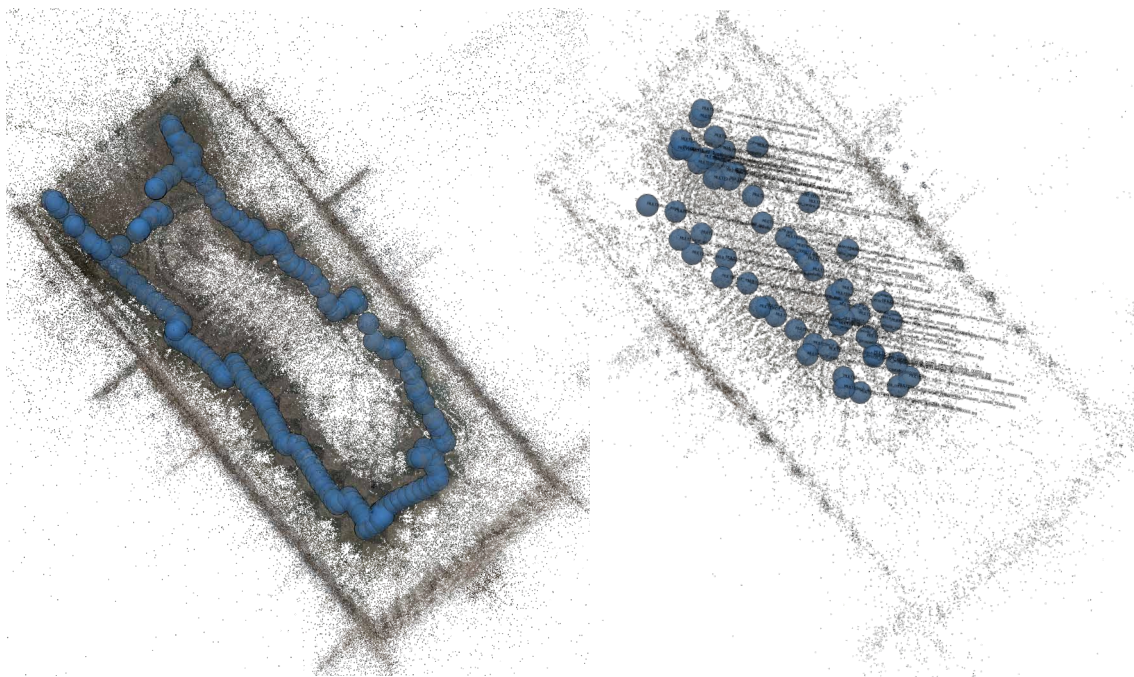


Fig. 330. Nelle immagini la tipologie di acquisizioni impiegata per la i test eseguiti sulla ricostruzione del modello tridimensionale con immagini sferiche.

L'uso delle sole immagini sferiche risulta perfettamente compatibile con la realizzazione di modelli tridimensionali con finalità comunicative e di visualizzazione ma non è consigliato, allo stato attuale, qualora sia necessario estrarre dati metrici accurati.

4.10.3.2. Uso congiunto delle immagini sferiche e tradizionali

Al fine di indagare più a fondo sulle potenzialità di sfruttamento di queste immagini anche per finalità metriche sono stati testati approcci differenti che prevedono (analogamente alle elaborazioni precedentemente illustrate) l'integrazione di immagini sferiche e *frame*. Per l'esecuzione di queste prove sono state elaborate le immagini in un processo simultaneo per di testare anche in questo caso le potenzialità di miglioramento rappresentate dall'uso delle immagini 360° rispetto al *Bundle Block Adjustment (BBA)*.

L'uso delle immagini sferiche anche in quantità modesta ha permesso l'allineamento delle immagini tradizionali nelle prove eseguite ma sono emer-

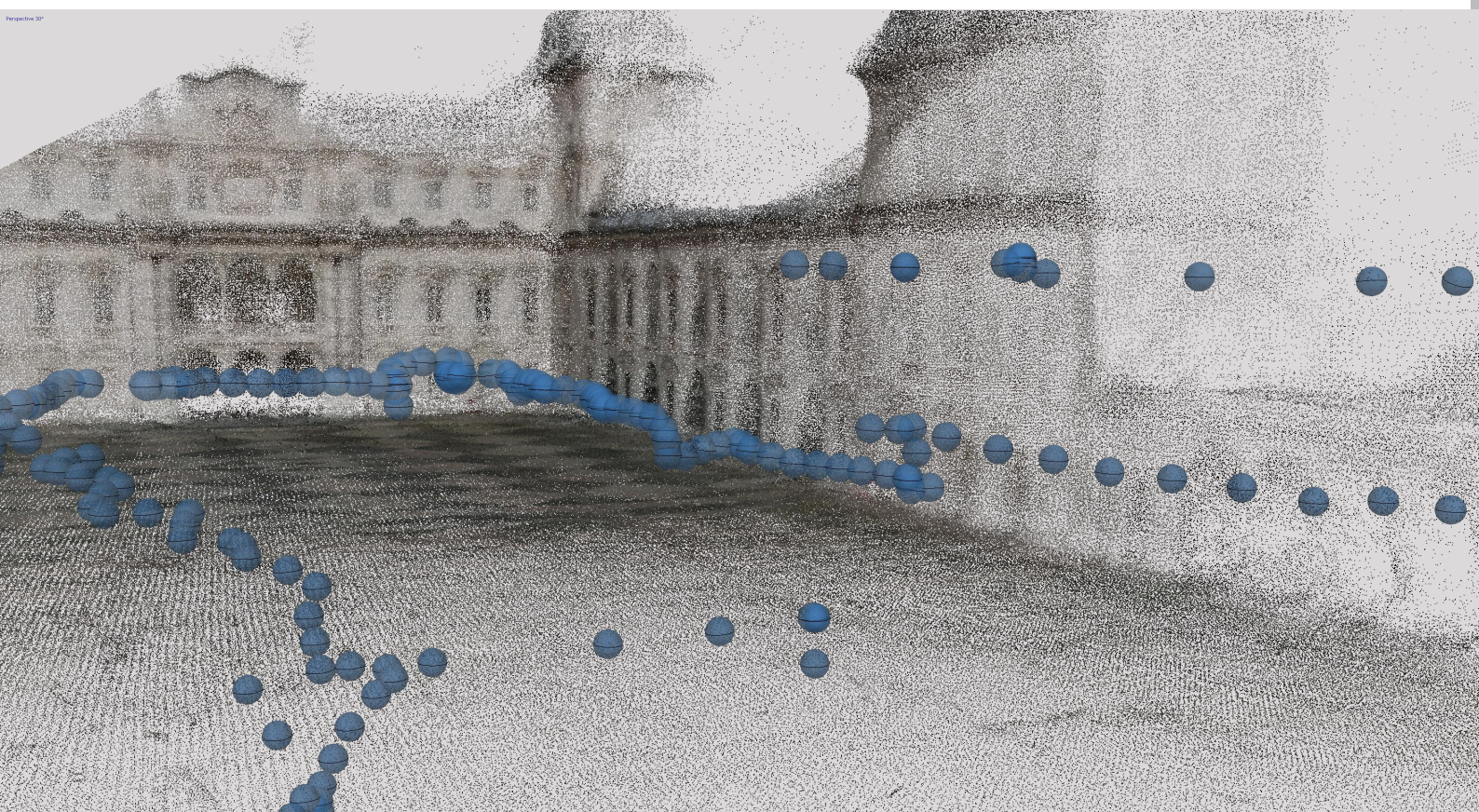


Fig. 331. Torino, *Castello del Valentino*, Ricostruzione tridimensionale della Nuvola di punti realizzata da UAV attraverso l'impiego delle sole immagini sferiche.

se alcune criticità. In un primo momento, per effettuare una prima verifica della qualità del *BBA* sono state utilizzate le immagini tradizionali di due dei tre prospetti di interesse con le immagini sferiche. Questa prima analisi ha restituito risultati incoraggianti in quanto è stato possibile allineare corretta-

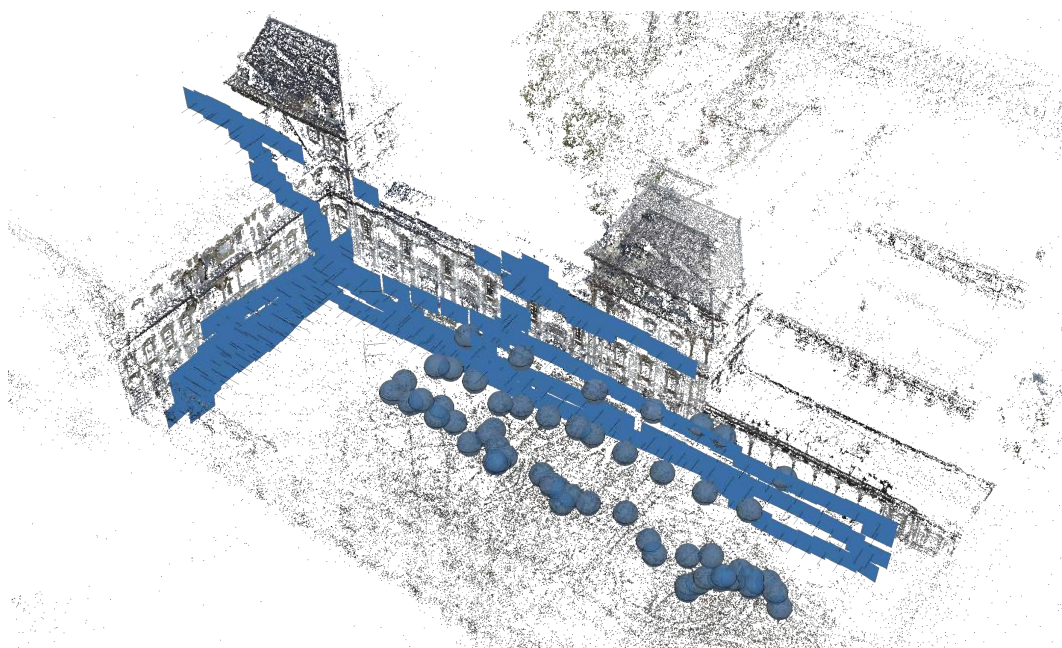


Fig. 332. Prime prove di integrazione utilizzano le immagini tradizionali di due dei tre fronti del *Castello del Valentino* e le immagini sferiche.

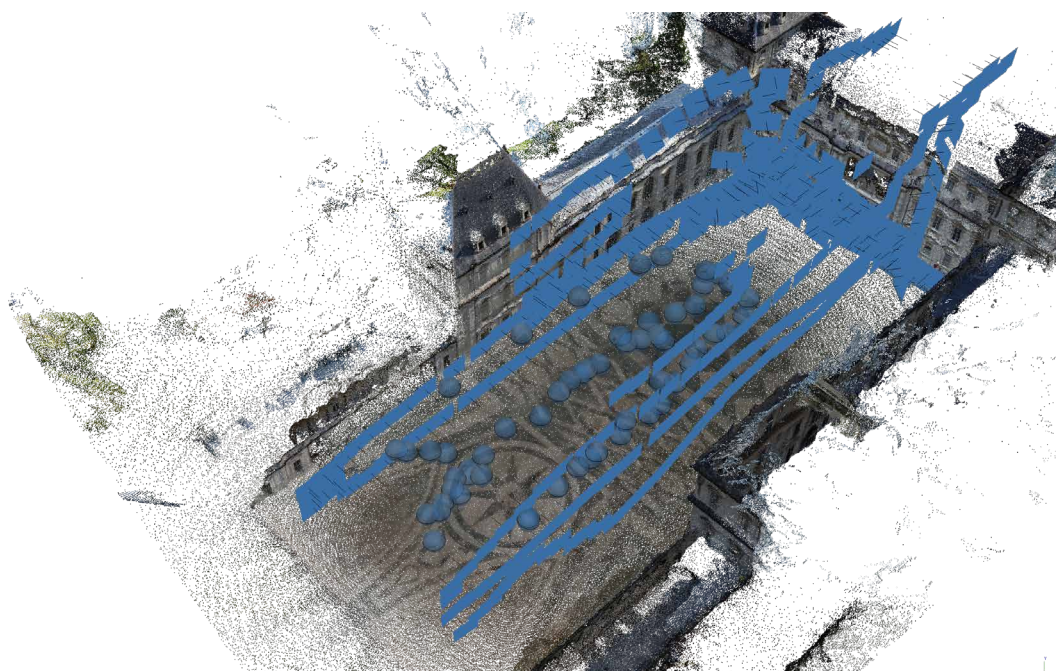


Fig. 333. Integrazione di immagini sferiche e tradizionali sui fronti del *Castello del Valentino*.

mente le immagini (fig. 332). Sono poi state aggiunte le immagini del fronte mancante ed in questo caso sono stati ottenuti risultati contrastanti. L'allineamento sembra riuscire qualora si utilizzino a supporto le informazioni di *geotag* (fig. 333), ovvero la posizione della camera al momento dello scatto ricavata dai dati del GPS della camera, che, per quanto approssimata,

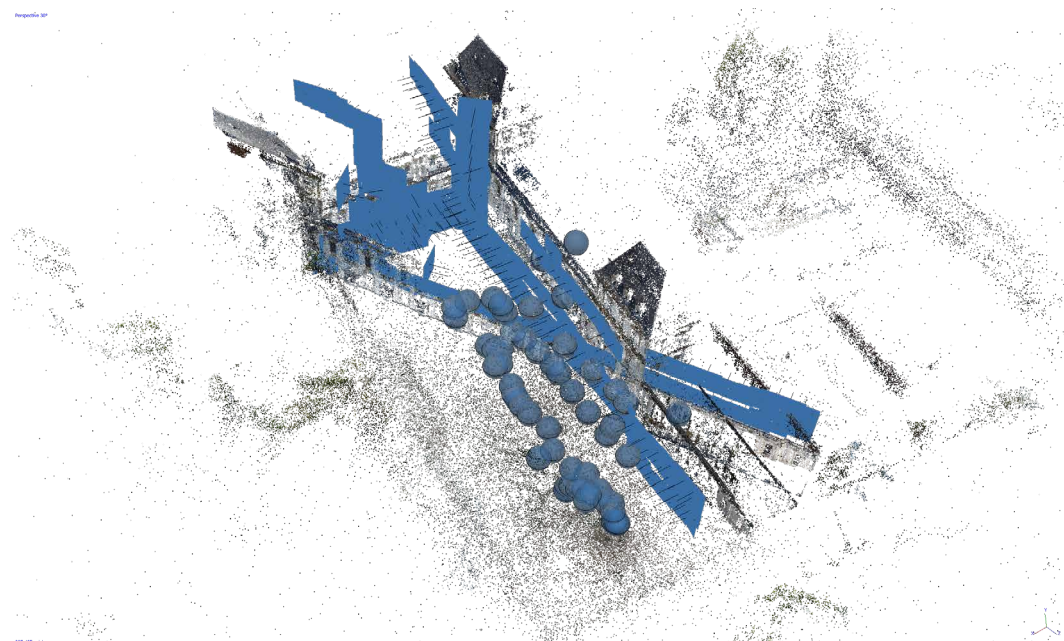


Fig. 334. Criticità emerse nel processo di orientamento delle immagini sferiche e tradizionali sui fronti del *Castello del Valentino* in assenza delle informazioni di *geotag*, vista di prospettiva.

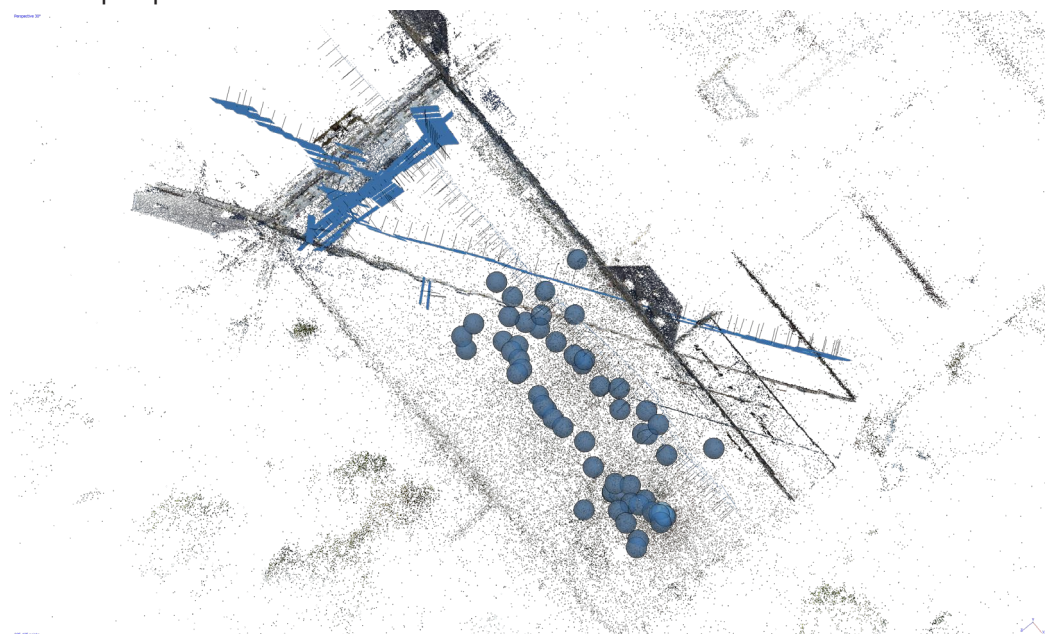


Fig. 335. Criticità del processo di orientamento delle immagini sferiche e tradizionali sui fronti del *Castello del Valentino* in assenza delle informazioni di *geotag*, vista di pianta.

contribuisce ad aggiungere vincoli geometrici in grado di migliorare il *BBA*. Andando invece ad eliminare queste informazioni o procedendo con la collimazione dei punti naturali di coordinate note sono emerse criticità. In particolare si può osservare come l'allineamento della manica di sinistra risulti errato ponendosi trasversalmente rispetto all'elevato opposto (fig.334-335).

Dalle prove eseguite si può affermare che le immagini sferiche risultano in grado di migliorare in modo significativo il *Bundle Block Adjustment*, sebbene in questo particolare caso studio, la simmetria e la ripetitività della scansione delle geometrie sugli alzati, associata ad una distanza di acquisizione che si è dimostrata eccessiva per il sensore utilizzato abbia presentato le criticità illustrate. Per risolvere efficacemente queste problematiche sono state utilizzate le immagini sferiche in numero contenuto (solo per le porzioni laddove le immagini tradizionali presentavano problematiche di allineamento). I fronti sono, inoltre, stati processati in blocchi separati e

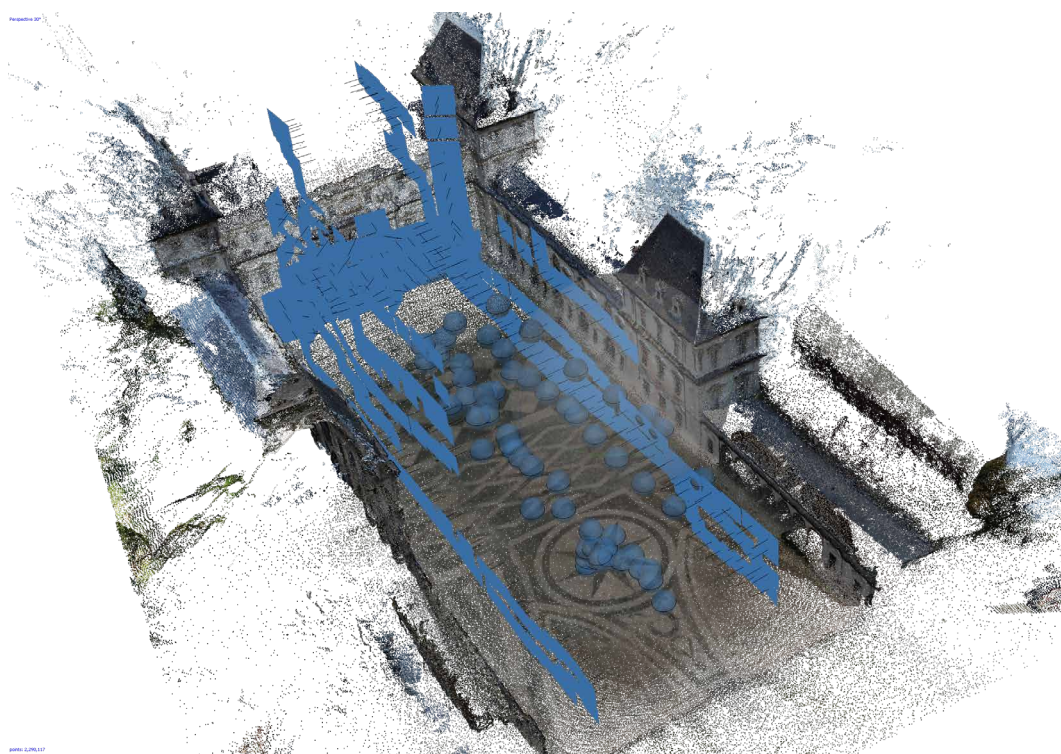


Fig. 336. Integrazione di immagini sferiche e tradizionali sui fronti del *Castello del Valentino*, vista prospettica.

posti in sistema globale attraverso la disposizione di *Ground Control Point* uniformemente distribuiti sugli alzati. Solo al termine di queste operazioni le nuvole di punti sono state unite in un unico progetto a attraverso il quale sono state generate le ortofoto di interesse.

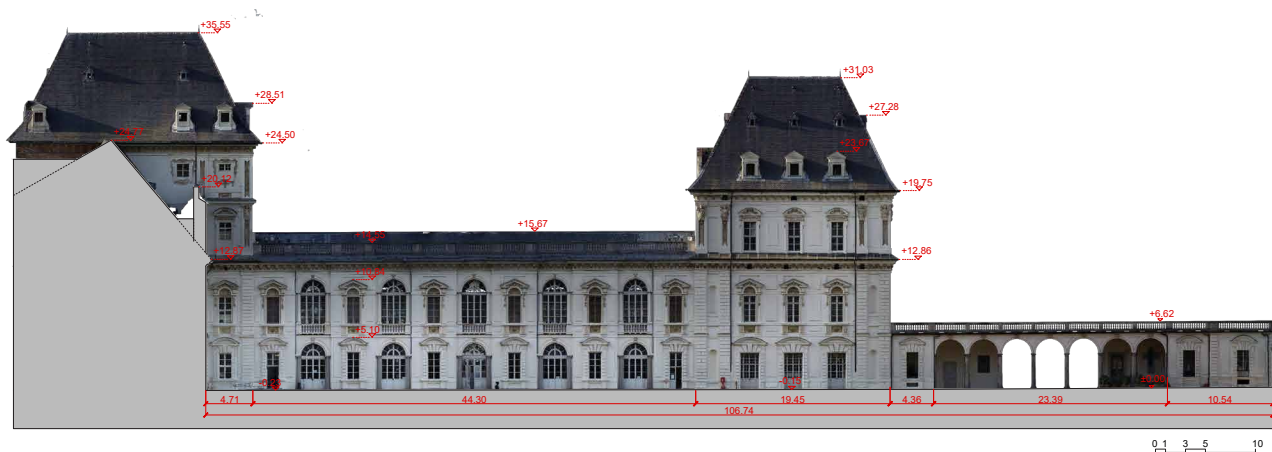


Fig. 337. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto quotata fuori scala prospetto sud. (vd. allegati grafici)

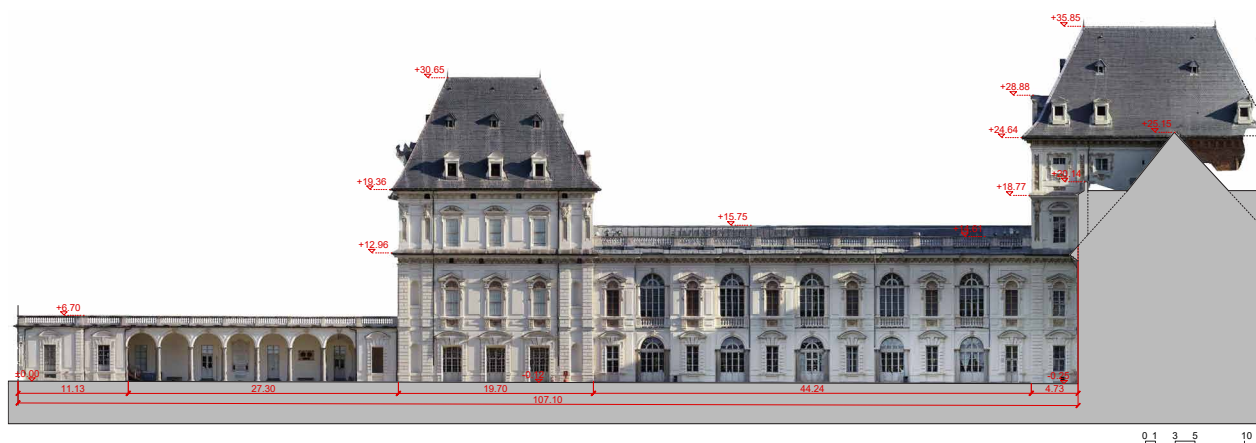


Fig. 338. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto quotata fuori scala prospetto nord. (vd. allegati grafici)

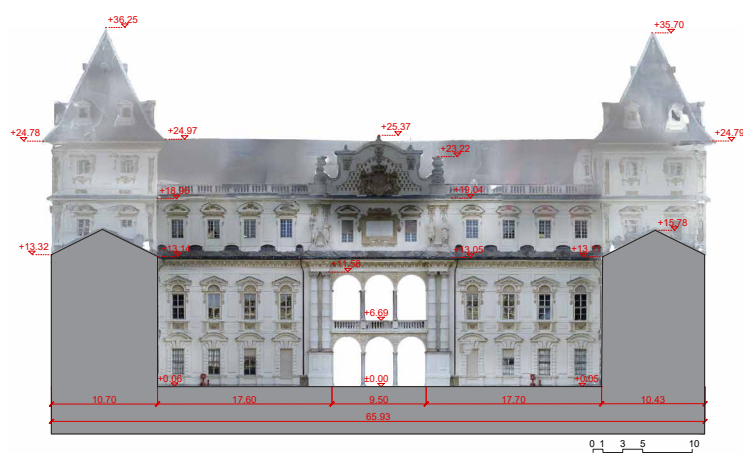


Fig. 339. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto quotata fuori scala prospetto est. (vd. allegati grafici)



Fig. 340.

Torino, *Castello del Valentino*, Stralcio di ortofoto del prospetto nord (fuori scala)



Fig. 341.

Torino, *Castello del Valentino*, Stralcio di ortofoto del prospetto nord (fuori scala)

4.11. Il Borgo Medievale

Il *Borgo Medievale* di Torino nasce nel 1884 in occasione della *Esposizione Generale Italiana*, all'interno del *Parco del Valentino* con l'intento di riprodurre un borgo feudale del XV secolo. Il *Borgo* fu progettato prendendo come riferimento edifici, decorazioni e arredi che furono riprodotti fedelmente da esempi piemontesi e valdostani del Quattrocento.

La fase di progettazione ha visto la collaborazione di tecnici, maestranze e storici oltre al contributo dell'architetto Alfredo D'Andrade.¹

Il *Borgo Medievale* è stato realizzato sulle rive del fiume Po in un'area protetta che isola il costruito dall'ambiente urbano della città. Grande cura e perizia furono posti nella scelta dei particolari costruttivi. L'edificato interno è protetto da mura merlate, da un ponte levatoio e le costruzioni del Borgo si susseguono lungo la via maestra, allargandosi solamente in alcuni tratti

¹ Alfredo D'Andrade (Lisbona, 1839 – Genova, 1915), è stato un archeologo, architetto e pittore portoghese.



Fig. 342.

Torino, *Borgo Medievale*, 2018, immagine aerea acquisita da drone.

che permettono differenti scorci al visitatore.

Gli edifici riproducono gli scenari e le attività tipiche di un borgo del Quattrocento caratterizzato dalla presenza di botteghe artigiane, dal forno per il pane, dal laboratorio del maniscalco, dalla cartiera, all'Ospizio per accogliere i pellegrini ed una chiesa.

La presenza delle botteghe sottolineava e richiamava la valorizzazione dell'artigianato in un momento in cui l'avviato processo di industrializzazione ne metteva in forse la sopravvivenza.

4.11.1. Acquisizioni aeree *Borgo Medievale*

Le acquisizioni eseguite attraverso l'utilizzo di droni sul *Borgo Medievale* hanno permesso di ottenere diversi elaborati che contribuiscono ad un miglioramento della conoscenza del sito. In particolare sono stati eseguiti diverse missioni allo scopo di acquisire dati per i processi fotogrammetrici e voli per acquisizioni video e immagini sferiche per la realizzazione di *Virtual Tour* al fine di sviluppare sistemi di visualizzazione immersiva.

4.11.1.1. Acquisizioni per la ricostruzione tridimensionale image based attraverso UAV

Su questo caso studio nello specifico sono state eseguite differenti tipologie di volo ricorrendo a varie soluzioni di pianificazione. Per le acquisizioni finalizzate alla generazione dell'ortofoto sono, in questo caso, state utilizzate soltanto le immagini frame in quanto le sperimentazioni di integrazione con le immagini sferiche sono state illustrate precedentemente per il caso studio del *Castello del Valentino*. Oltre alle immagini aeree, nell'area del *Borgo Medievale* sono state svolte applicazioni più specifiche tra gli edificati

finalizzate alla valutazione della potenzialità di orientamento delle immagini *frame* attraverso la realizzazione di panorami sferici, utilizzando un approccio multi-immagine, a partire da normali immagini tradizionali acquisite dalla fotocamera del drone. Anche in questo caso studio sono state rilevate le coordinate di 22 punti naturali utilizzati in parte come *Ground Control Point* e *Check Point* per valutare l'attendibilità metrica dei risultati finali. Per le acquisizioni fotogrammetriche sono state utilizzate differenti tipologie di

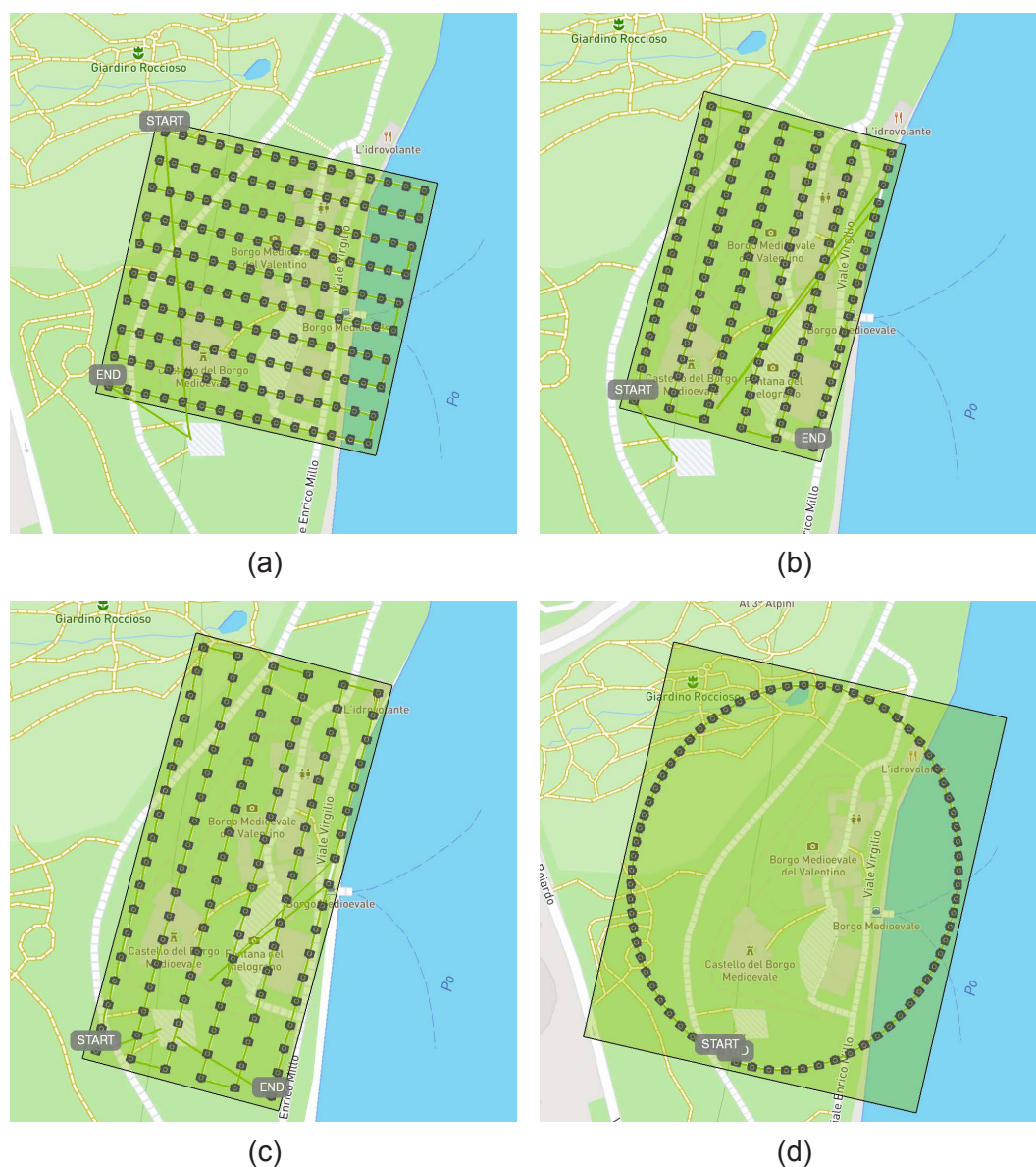


Fig. 343. Torino, *Borgo Medievale*, 2018, pianificazione traiettorie di volo UAV per la ricostruzione tridimensionale aerofotogrammetrica; (a) acquisizioni nadirali; (b) e (c) acquisizioni camera inclinata a 45°; (d) volo circolare.

volo che differiscono per traiettorie di volo e per orientamento della camera (nadirale o inclinata a 45°). L'elevato ricoprimento fra le strisciate, oltre all'alto numero di immagini acquisite sull'area hanno permesso la riuscita del processo di *Bundle Block Adjustment*. Per le acquisizioni eseguite per la generazione di ortofoto aeree sono stati utilizzati due differenti droni: un *Phantom 4 Obsidian* e un *Dji Spark*. In tabella sono riportate le caratteristiche di ciascuna camera e le tensioni nei punti di controllo.

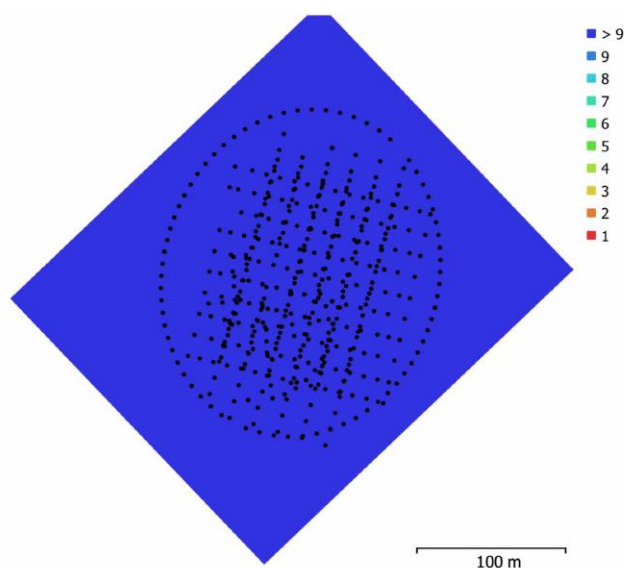


Fig. 345. Posizione delle camere e sovrapposizione delle immagini. Come si può osservare ogni punto dell'area è visto da un numero non inferiore a 9 immagini.

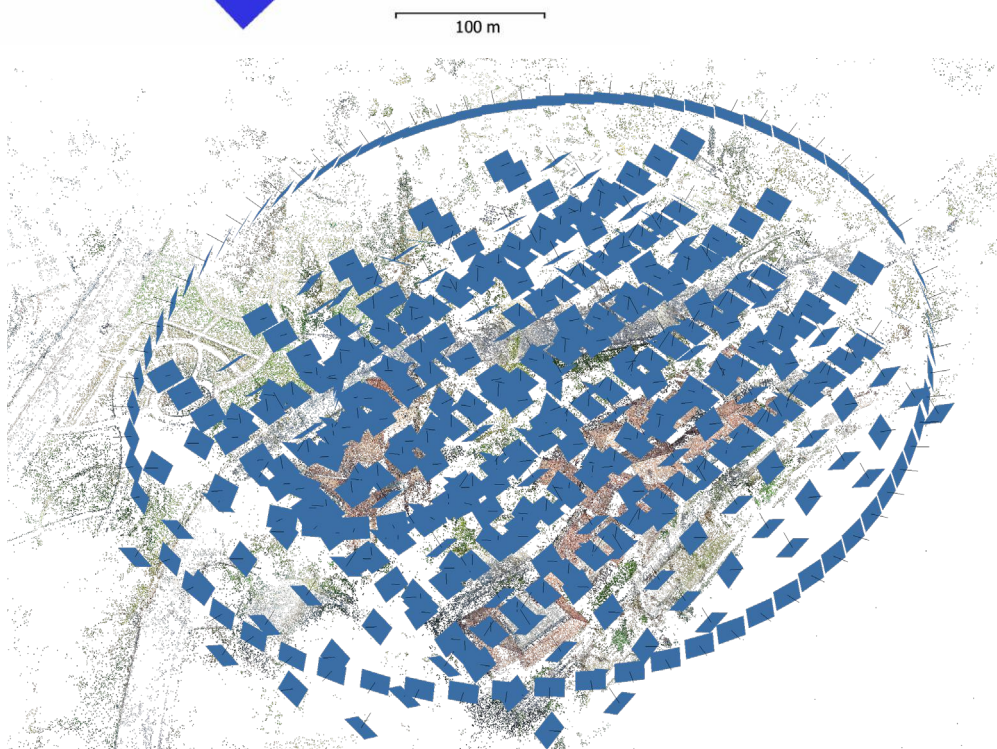


Fig. 344. Orientamento di tutte le immagini utilizzate nel processo di ricostruzione tridimensionale sull'area del *Borgo Medievale* di Torino.

Camera Model	Resolution	Focal Lenght	Pixel Size
FC6310 (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μ m
FC1102 (4.49mm)	3968 x 2976	4.49 mm	1.57 x 1.57 μ m

Tab. 65. Tipologia di camere utilizzate per le acquisizioni sul *Borgo Medievale*.

Number of images:	487	Camera stations:	483
Flying altitude:	50.7 m	Tie points:	535,179
Ground resolution:	1.5 cm/pix	Projections:	1,479,683
Coverage area:	0.0711 km ²	Reprojection error:	0.625 pix

Fig. 346. *Dati di riepilogo per le elaborazioni sul Borgo Medievale delle immagini frame nadirali e inclinate.*

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
16	1.77	1.49	1.39	2.32	2.71

Tab. 63. *Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points per le elaborazioni sul Borgo Medievale delle immagini frame nadirali e inclinate.*

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
6	1.74	1.19	1.65	2.11	2.68

Tab. 64. *Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points per le elaborazioni sul Borgo Medievale delle immagini frame nadirali e inclinate.*

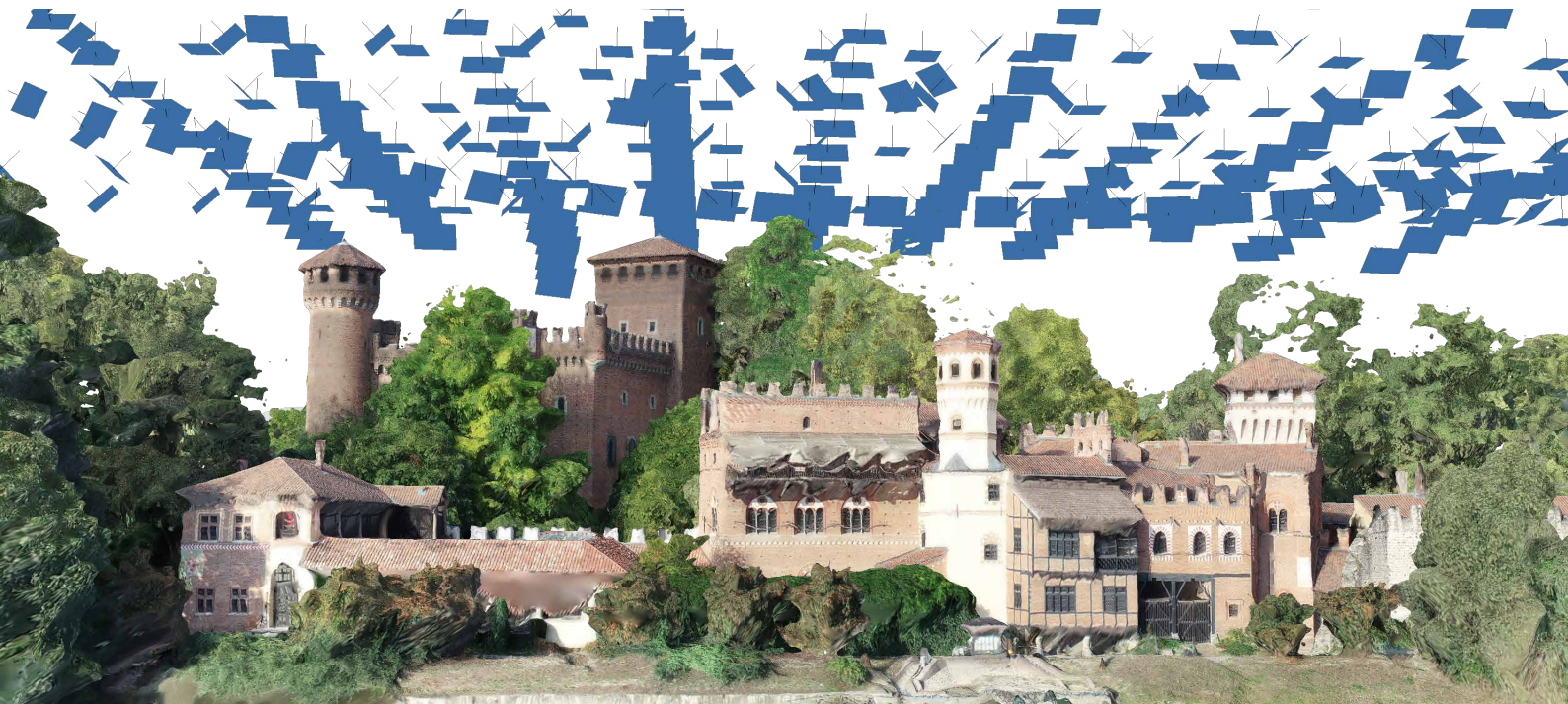


Fig. 347. Torino, *Borgo Medievale*, (2018), Visualizzazione posizioni delle immagini frame (nadirali e inclinate).

4.11.1.2. Restituzione aeree sull'area del *Borgo Medievale*

Analogamente a quanto eseguito sul caso studio del Castello del Valentino presentato precedentemente, anche per il *Borgo Medievale*, le acquisizioni aeree eseguite hanno permesso la generazione di ortofoto georiferite ad alta risoluzione utili alla comprensione dell'oggetto di studio e come strumento di supporto per l'elaborazione dei disegni architettonici. Anche in questo caso l'utilizzo dei dati in ambiente *GIS* ha permesso di sviluppare diverse analisi che saranno presentate in questo paragrafo. I principali elaborati ottenuti possono essere riassunti in:

1. Nuvole di punti
2. Modelli tridimensionali texturizzati
3. *DSM (Digital Surface Model)* e relative elaborazioni





Fig. 349.

Torino, *Borgo Medievale*, (2018), Ortofoto realizzata tramite volo UAV.

Anche sul *Borgo* è stato possibile sovrapporre l'ortofoto alla cartografie esistenti in *GIS* oltre che realizzare attraverso il *DSM* analisi sulle pendenze (fig.352) e modelli ombreggiati (fig. 351).

Inoltre la nuvola di punti è stata classificata, tramite il ricorso ad algoritmi di riconoscimento automatico delle geometrie, al fine di andare ad estrarre i soli punti del terreno escludendo pertanto la vegetazione e l'edificato del *Borgo* (fig. 353). Questo ha permesso la realizzazione delle curve di livello a passo costante per le sole aree di terreno desumibili dal modello (fig. 354).



Fig. 350. Torino, *Borgo Medievale*, (2018), Dettaglio Ortofoto realizzata tramite volo UAV (fuorisca)



Fig. 351. Torino, Borgo Medievale, *DSM ombreggiato* realizzato attraverso fotogrammetria UAV in ambiente GIS.

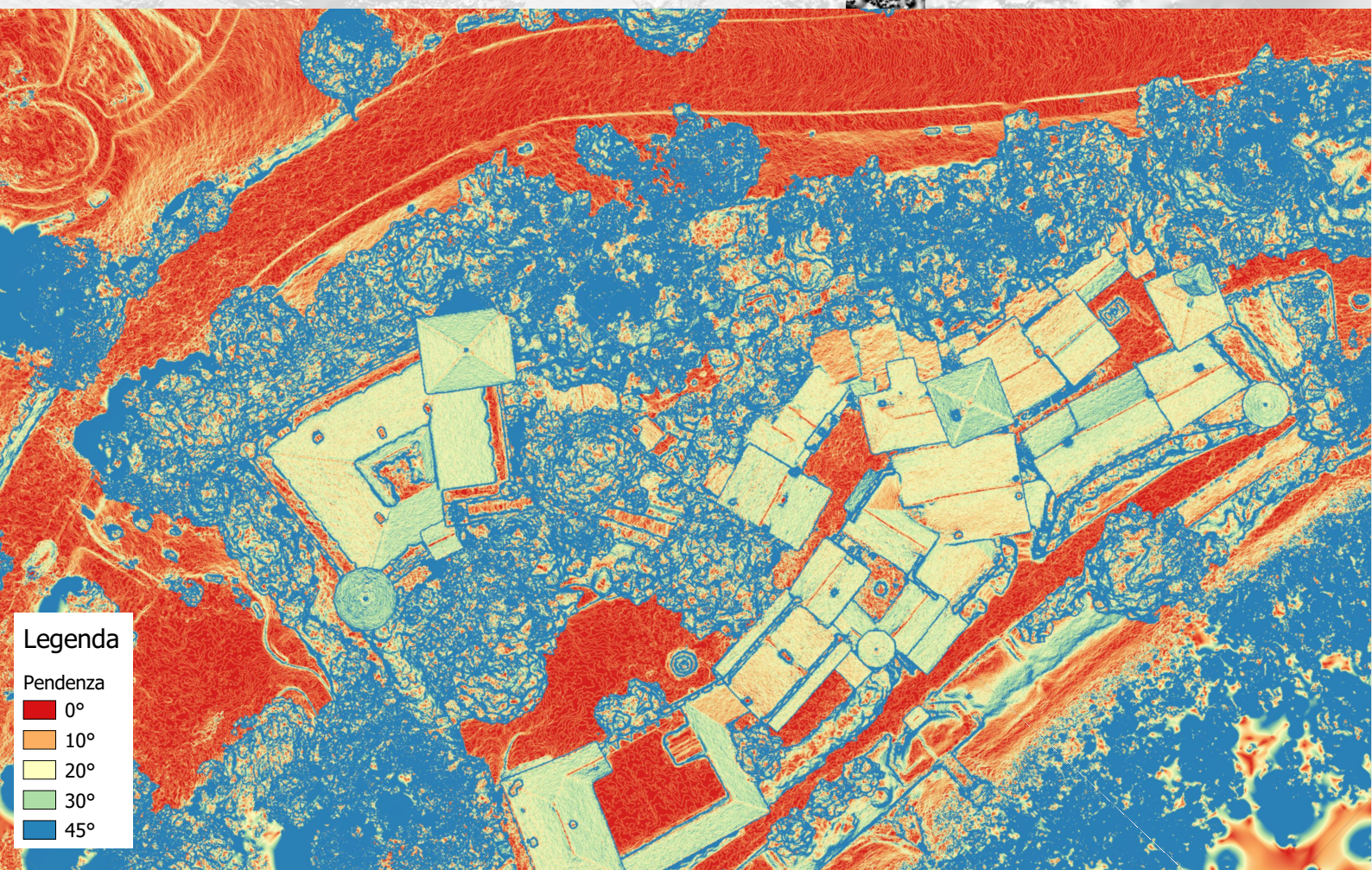
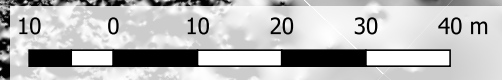
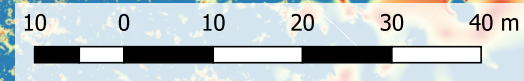


Fig. 352. Torino, *Borgo Medievale*, *DSM ombreggiato* realizzato attraverso fotogrammetria UAV in ambiente GIS. (in rosso il terreno, in blu la vegetazione)



4.11.2. Vantaggi offerti dalle Immagini 360° in ambienti complessi con l'approccio multi-immagine da UAV

Le applicazioni sperimentali sul Borgo Medievale sono state eseguite allo scopo di valutare il contributo delle immagini sferiche sulle ricostruzioni tridimensionali in ambienti con una morfologia particolarmente complessa. La conformazione del Borgo, infatti, poiché si articola su edificati in affaccio su una via maestra dalla larghezza di circa 7 metri, risulta particolarmente adatta a questi scopi. Tipologie di studi di ricostruzione fotogrammetrica, in scenari dalle caratteristiche morfologiche simili, con l'ausilio di camere sferiche terrestri sono stati compiuti, tuttavia, allo stato attuale non risultano in bibliografia applicazioni eseguite attraverso l'applicazione di camere sferiche su UAV. In questa sezione verrà illustrato come l'impiego delle immagini sferiche da UAV ha permesso il rilievo di aree prima d'ora difficil-



Fig. 355. Incisione in rame su disegno di Domenico Ferri in Giovanni Vico, *Il Real Castello del Valentino*. Monografia storica, Torino, Stamperia Reale, 1858. ASCT, Collezione Simeom, B 577, su concessione dell'Archivio Storico della Città di Torino.

mente rilevabili in poco tempo. Nello specifico si è proceduto ad identificare all'interno del Borgo un area che presentasse un alto grado di difficoltà per l'esecuzione di un rilievo fotogrammetrico tradizionale, in cui fosse possibile avere un riscontro circa le potenzialità offerte da questa nuova tecnologia. L'area selezionata è stata quella antistante alla chiesa in quanto presentava un affaccio di quattro edifici in uno spazio ridotto. La chiesa ha inoltre un'altezza rilevante che supera i 17 metri fronteggiata da un fabbricato a circa 7 metri di distanza con un'altezza di 11 metri. Come si può facilmente immaginare questa conformazione presenta particolari criticità nell'esecuzione di un rilievo terrestre richiedendo un grande numero di punti di controllo oltre che problematiche significative per le porzioni in quota dei fabbricati. Allo stesso modo, anche l'esecuzione delle acquisizioni da UAV, in queste

aree risulta particolarmente complessa per più fattori come l'impossibilità di utilizzo del *GPS onboard* a causa della morfologia del sito e grandi difficoltà dell'allineamento delle immagini relative alle facciate opposte. La principale difficoltà è rappresentata dalla ricostruzione della relazione tra i fabbricati dovuta all'impossibilità di realizzare immagini con



Fig. 356. Chiesa Borgo Medievale, Torino, Borgo Medievale, 2004 (P. Robino)

sufficienti valori di *sovrapposizione*.

In un primo momento si era pianificato l'utilizzo del sistema *UAV-Camera* sferica già testato in campo volo, tuttavia in fase di acquisizione dopo le *checklist* pre-volo di *routine*, non si è ritenuto sufficientemente sicuro il sistema in assenza di *GPS* e senza la possibilità di ausilio del sistema di posizionamento visuale (*VPS*) disabilitato a causa della presenza del supporto della camera sferica come documentato precedentemente. Inoltre l'uso dell'*UAV* proposto (*Phantom 4 Pro*) avrebbe reso necessaria per la tipologia di rilievo la chiusura di alcuni minuti del sito come previsto dal *Regolamento Mezzi a Pilotaggio Remoto* di riferimento. A causa di queste problematiche si è optato per questo particolare caso studio per l'utilizzo di un *APR* (drone) di massa al decollo inferiore ai 300g precedentemente riconosciuto come inoffensivo (nello specifico un *DJI Spark*). L'uso di questo *UAV* è stato testato per la realizzazione di immagini sferiche a partire da immagini frame secondo il workflow che sarà illustrato in questo capitolo. Questo drone, proprio per le sue caratteristiche di inoffensività, risulta particolarmente adatto in questo scenario permettendo il sorvolo dei visitatori e garantendo, allo stesso tempo, grazie al sistema *VPS* (non alterato nel suo funzionamento) e senza il *payload* aggiuntivo della *GoPro Fusion*, un volo sicuro e stabile.

Prima di entrare nel merito del flusso di lavoro eseguito e dei risultati conseguiti in termini di elaborati è importante sottolineare che l'obiettivo costante di tutte le sperimentazioni presentate in questo lavoro è quello di ridurre al minimo le tempistiche di acquisizione ed elaborazione simulando l'applicazione di questa tecnologia applicata in scenari di emergenza. A tale scopo tutte le acquisizioni sui prospetti dei corpi di fabbrica sono state estratte da un filmato in cui sono eseguite strisciate parallele sull'elevato con la camera normale ad esso. Questo ha permesso un vantaggio sulle tempistiche di ac-

quisizione permettendo l'estrazione dei *frame* in una fase successiva. Si è scelto inoltre di valutare l'accuratezza della ricostruzione attraverso il rilievo delle coordinate di diversi punti naturali posti sugli elevati e a terra attraverso l'estrazione di queste da un precedente rilievo laser scanner. Sempre attraverso l'ausilio di questa scansione è stato possibile valutare la qualità della ricostruzione utilizzando come riferimento la nuvola di punti *lidar*.

4.11.3. Acquisizione delle immagini sferiche da camera *frame*

Come riportato precedentemente, l'utilizzo di una camera *frame* per l'elaborazione di immagini sferiche richiede particolari accortezze. In particolare è necessaria l'esecuzione di più scatti caratterizzati da una valida sovrapposizione eseguiti da un centro di presa il più possibile fisso. L'esecuzione di questi panorami da UAV attraverso l'uso di una camera *frame* è resa possibile dall'utilizzo di un processo automatico di acquisizione in grado di eseguire autonomamente il numero di immagini necessario per una valida riuscita del processo. Per ottenere questi risultati sono state testati più

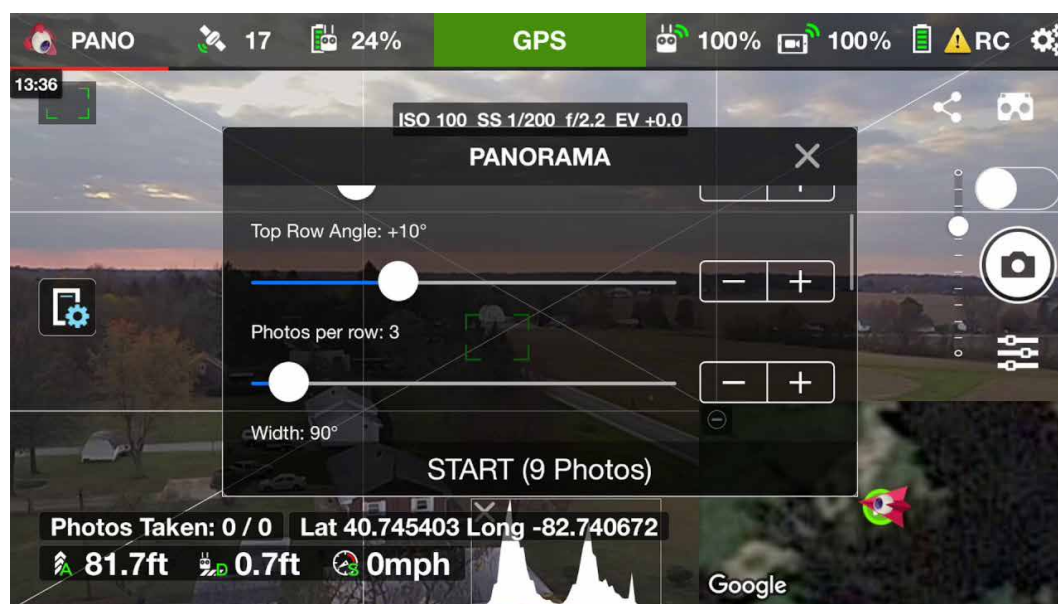


Fig. 357. Incisione in rame su disegno di Domenico Ferri in Giovanni Vico, *Il Real Castello del Valentino*. Monografia storica, Torino, Stamperia Reale, 1858. ASCT, Collezio

applicativi che permettono la pianificazione delle immagini necessarie alla realizzazione della sfera. In particolar modo è stato testato l'applicativo *LITCHI* e l'applicazione proprietaria *DJI GO 4*. Nello specifico per realizzare un panorama sferico attraverso la camera di bordo del *DJI Spark* sono necessarie 46 immagini che andranno successivamente connesse in modo opportuno.

4.11.4. Stitching delle immagini frame per la realizzazione dei panorami

L'unione delle immagini frame per la trasformazione in panorami sferici è una fase fondamentale per la riuscita del processo. Nel capitolo dedicato alla fotogrammetria sferica sono state illustrate differenti possibilità per effettuare questa operazione attraverso diversi software di elaborazione che sono riassumibili in:

1. Stitching in software esterni prima del processo di calcolo;
2. Utilizzo delle immagini attraverso la creazione di gruppi *station*.

La prima soluzione prevedeva di inserire, in fase di elaborazione, tutte le immagini componenti il panorama raggruppandole in un gruppo specifico. Questo metodo di processamento dei dati già testato in questo lavoro sulla camera sferica *Go Pro Fusion*, in questo specifico caso, ha presentato problematiche dovute al fatto che nelle acquisizioni da *UAV*, in particolar modo in assenza del segnale *GPS* (come in questo caso), leggere variazioni del centro di presa tra gli scatti generano problematiche nell'allineamento delle immagini. La connessione delle immagini attraverso software appositamente realizzati, al contrario, ha permesso la restituzione di valide immagini panoramiche. In questo caso studio è stato utilizzato nuovamente il software

AutoPano Giga v 4.4.2 attraverso il quale sono state realizzate proiezioni equirettangolari.

I passaggi eseguiti sono i seguenti:

1. Importazione dei dati suddivisi in gruppi di 46 immagini;
2. Avvio del processo di unione automatico;
3. Controllo dei parametri interni stimati (o inserimento manuale se precedentemente stimati);
4. Valutazione del risultato del processo di connessione automatizzato;
5. Controllo a campione dei tie point stimati eventuali correzioni manuali;
6. Impostazioni di ritaglio della proiezione;
7. Esportazione delle immagini.

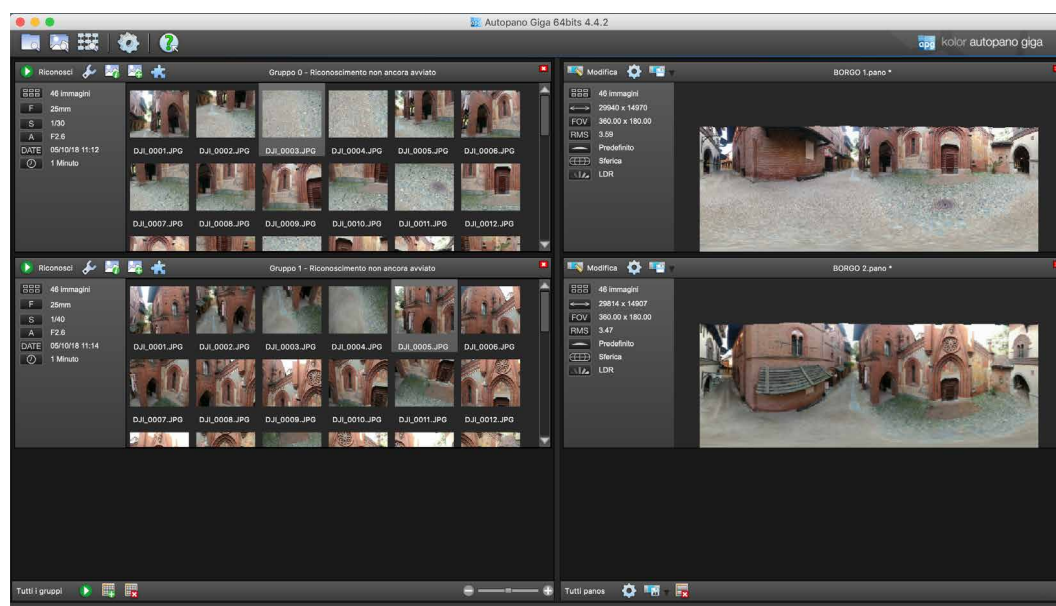


Fig. 358. Importazione delle immagini. Sulla sinistra due gruppi ciascuno composto da 46 immagini acquisite da UAV; a destra la proiezione equirettangolare corrispondente.

	Focale	Velocità	Apertura	Iso	Imbardata	Beccheogic	Rollio	FOV	Focale calcolata	K1	K2	K3	Offset X	Offset Y
(1) DJI_0001.JPG	25.00...	1/30	F2.6	112	-0.000	15.682	-0.106	67.714	25.797mm	0.071	-0.092	0.000	32.96	43.73
(2) DJI_0002.J...	25.00...	1/30	F2.6	112	0.746	-14.212	-0.793	67.714	25.797mm	0.071	-0.092	0.000	32.96	43.73
(3) DJI_0003.J...	25.00...	1/30	F2.6	112	1.160	-43.993	-1.328	67.714	25.797mm	0.071	-0.092	0.000	32.96	43.73
(4) DJI_0004.J...	25.00...	1/30	F2.6	112	2.882	-73.068	-3.179	67.714	25.797mm	0.071	-0.092	0.000	32.96	43.73

Fig. 359. Stima dei parametri interni per la camera utilizzata relativi all'orientamento esterno e interno. Per ognuna delle immagini i parametri interni restano i medesimi in quanto generati dalla stessa camera (nell'immagine riportate 4 immagini di esempio).

Le 46 immagini acquisite hanno permesso una *sovrapposizione* molto elevata che è risultato fondamentale per la riuscita del processo. Per questa applicazione sono stati utilizzati quattro panorami sferici. Come si può osservare dai dati riportati nella tabella tutte le immagini sferiche realizzate presentano valori simili relativi alle connessioni tra le immagini, punti di col-

	Image N°	IMAGE LINKS	TIE POINT	OVERLAP	GLOBAL RMS
Spherical 1	46	219	12263	99.4	3.59
Spherical 2		229	15779	99.4	3.47
Spherical 3		228	10860	99.4	3.61
Spherical 4		225	11059	99.4	3.46

Tab. 66.Comparazione dei risultati del processo di connessione tra le immagini.

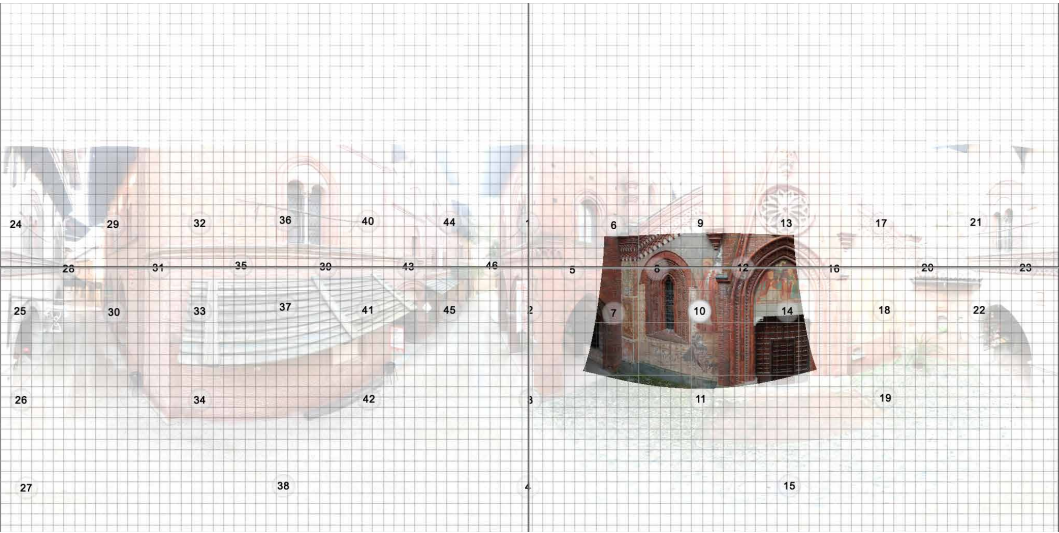


Fig. 360. Visualizzazione delle singole immagini proiettate sulla sfera.

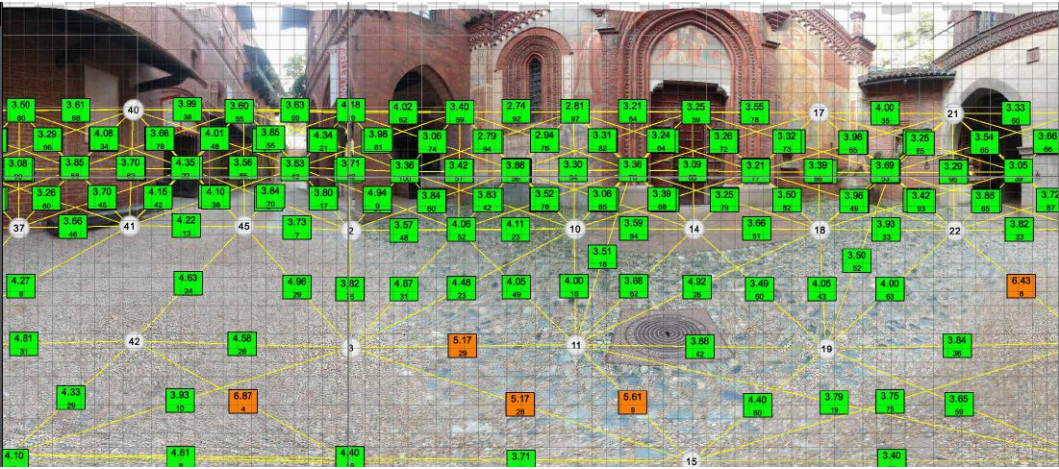


Fig. 361. Analisi della qualità delle connessione tra le immagini per la realizzazione del panorama sferico.

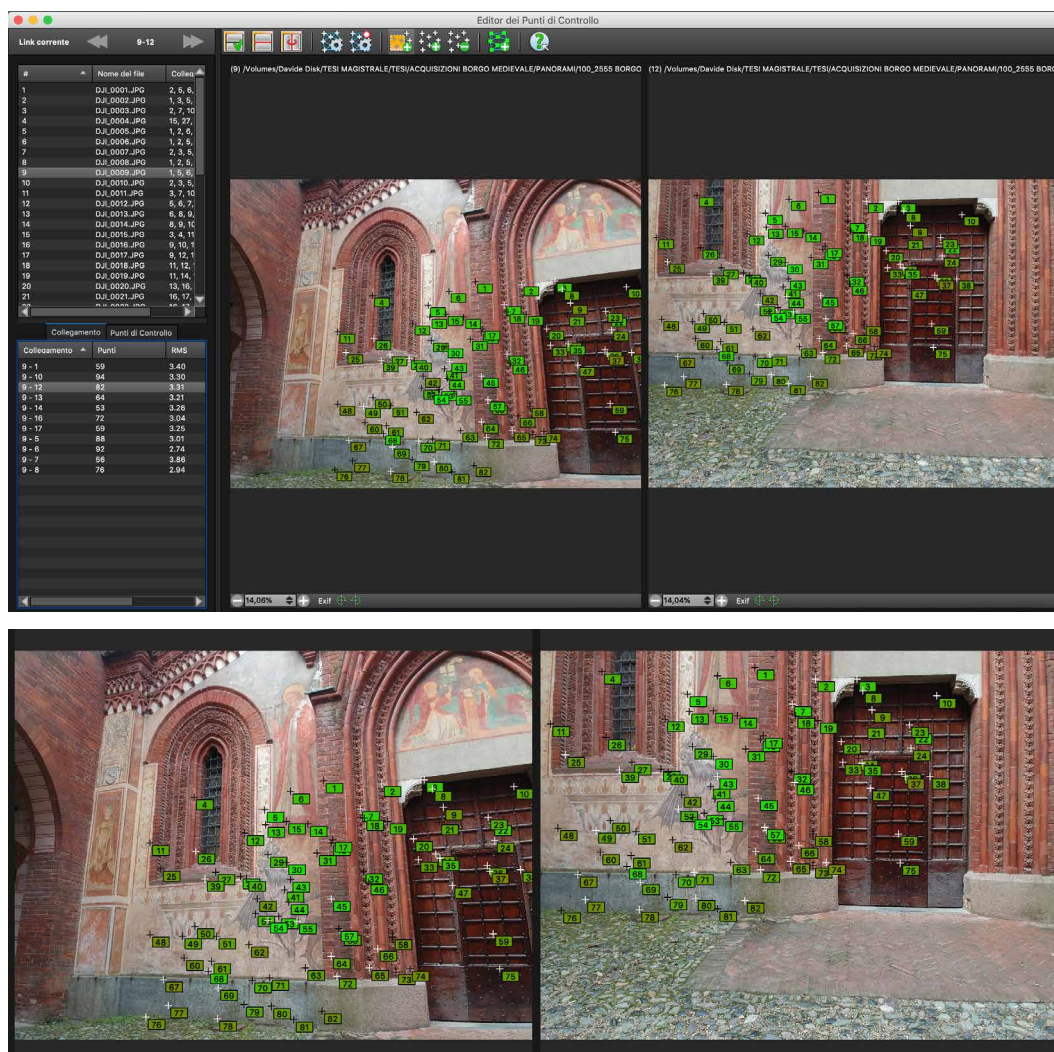


Fig. 362. Valutazione dei punti di connessione stimati dal software e eventuale aggiunta manuale di punti.

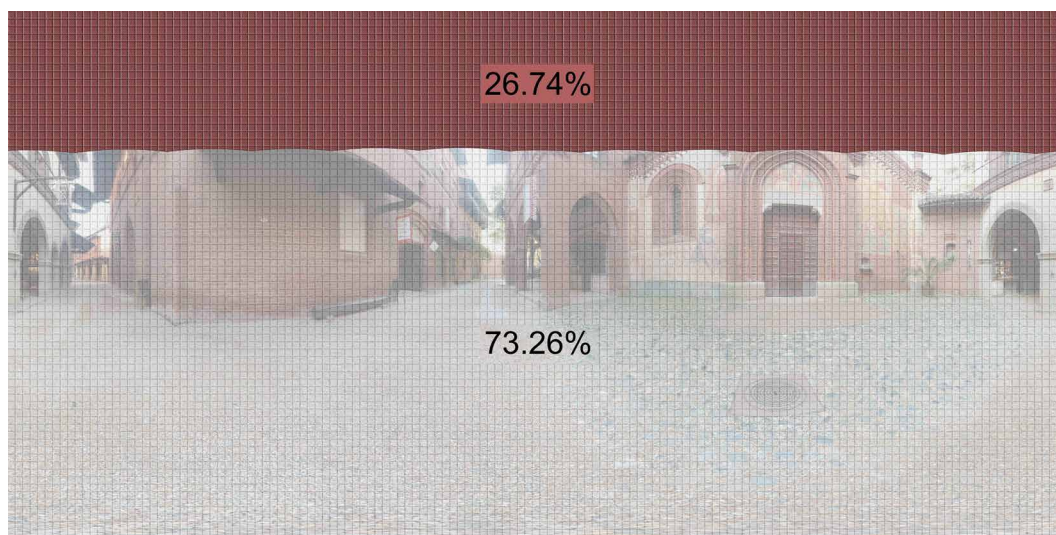
legamento stimati e sovrapposizione. A seguito delle prove eseguite si può affermare che per le finalità di questo test non sono necessarie correzioni relative al numero di punti stimati in modo automatico.

Risulta importante sottolineare che i panorami eseguiti attraverso *UAV* non sono in grado di coprire una porzione di sfera di 360° in quanto la geometria dell'*APR* impedisce alla camera di acquisire verso l'alto a causa della rotazione delle eliche e del suo posizionamento.

La porzione di sfera utilizzabile risulta dalle analisi effettuate pari a circa il 73% della superficie totale.

L'utilizzo delle immagini sferiche rende necessaria l'esportazione della sfera

completa, per questo è importante in fase di esportazione non andare ad effettuare crop sull'area utile. In fase di inserimento nel software di *SFM* sarà necessario realizzare una maschera per impedire l'estrazione dei *tie point*



	DIMENSIONS	AREA	%
USEFUL AREA [px]	10.000 x 3.663	36.630.000	73.26
MISSING AREA [px]	10.000 x 1.337	13.370.000	26.74
TOTAL AREA [px]	10.000 x 5.000	50.000.000	100

Tab. 67. Calcolo area utile della superficie della sfera generata tramite immagini acquisiti tramite *UAV DJI Spark*. Per effettuare il calcolo si è partiti per semplicità di calcolo da una proiezione compressa a 10.000 x 5000 px.

in tale area così da utilizzare solamente la porzione utile.

Ulteriore accortezza va posta in fase di esportazione dei panorami dal momento che questi risultano di notevoli dimensioni, essendo composti da un grande numero di immagini. Nonostante la generazione di un panorama sferico come questi permetta di ottenere un proiezione di approssimativamente 30.000*15.000 px per 440 *mega-pixel* e una dalla dimensione effettiva a 300 dpi di 2.50 m x 1.30 m, si è scelto di ridurre la qualità dei panorami per semplificare il calcolo dal momento che inserire un immagine di quelle dimensioni sarebbe risultato superfluo per le applicazione testate

e avrebbe allungato i tempi di calcolo inutilmente. Si è scelto, a seguito di queste considerazioni di utilizzare immagini con una dimensioni massima di 10.000x5000 px.

Infine si è optato per effettuare una settaggio specifico (fig.365) per evitare le problematiche delle cosiddette aree fantasma ovvero porzioni di immagini non adeguatamente connesse a causa di fattori esterni (come il passag-

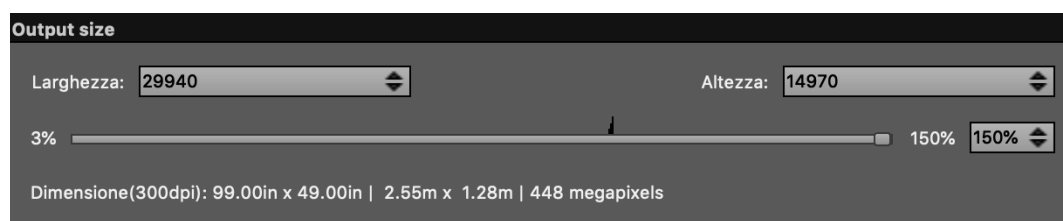


Fig. 363. Esempio di esportazione di uno dei panorami sferici generati alla massima qualità.

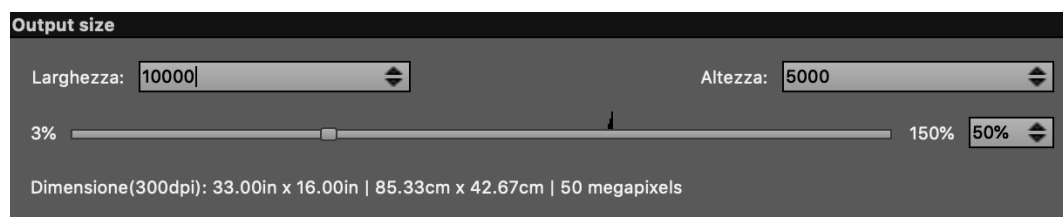


Fig. 364. Riduzione delle dimensioni del panorama sferico a 10.000 x 5000 px per semplificare i processi di Structure From Motion per le finalità dello studio.

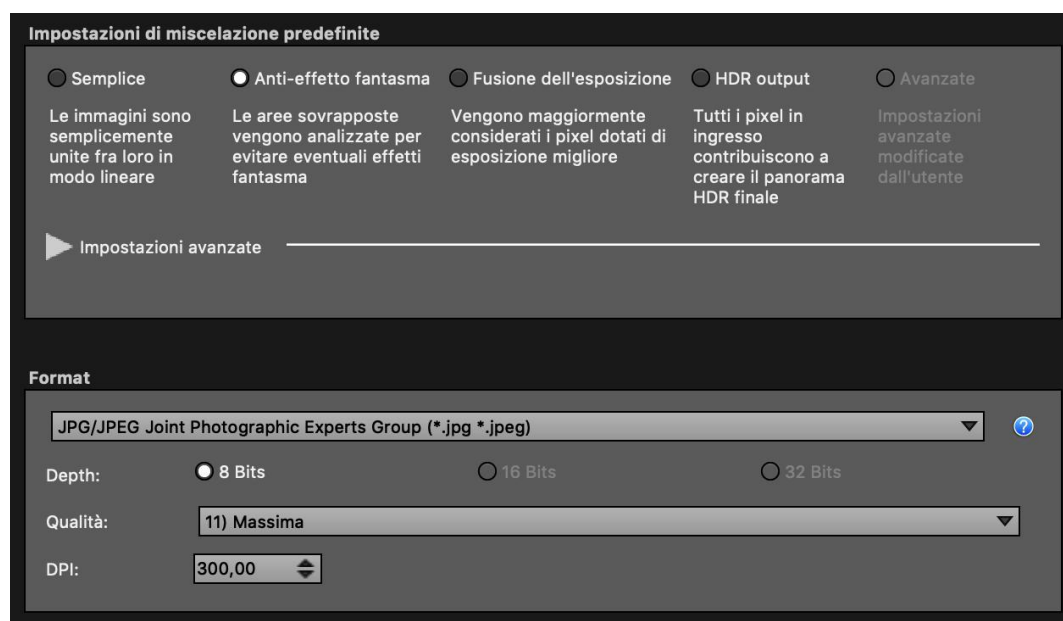


Fig. 365. Scelta della tipologia di miscelazione delle immagini e formato di esportazione delle proiezioni.

gio di una persona durante la fase di acquisizione). Il formato prescelto per il salvataggio è stato il JPEG.

ELEVATION	IMAGE NUMBER
NORD	42
SOUTH	20
EAST	140
WEST	165
<hr/>	
TOTAL IMAGE	367

Tab. 68. Numero di *frame* estratti dai filmati suddivisi nei quattro fronti dell'area oggetto di rilievo. È stato estratto un *frame* ogni 60 ovvero circa 1 ogni 2 secondi.

Uso della funzione camera station di Agisoft Photoscan Pro

Per completezza si accenna alla funzione *Camera Station* di *Agisoft Photoscan Pro* che permette l'impiego di immagini frame acquisite da uno stesso punto di presa. Questo metodo non ha prodotto tuttavia i risultati attesi sui panorami da UAV. Nonostante il processo restituisca correttamente i panorami, il loro utilizzo insieme ad altre immagini genera ricostruzioni poco accurate e problemi nell'allineamento delle immagini.

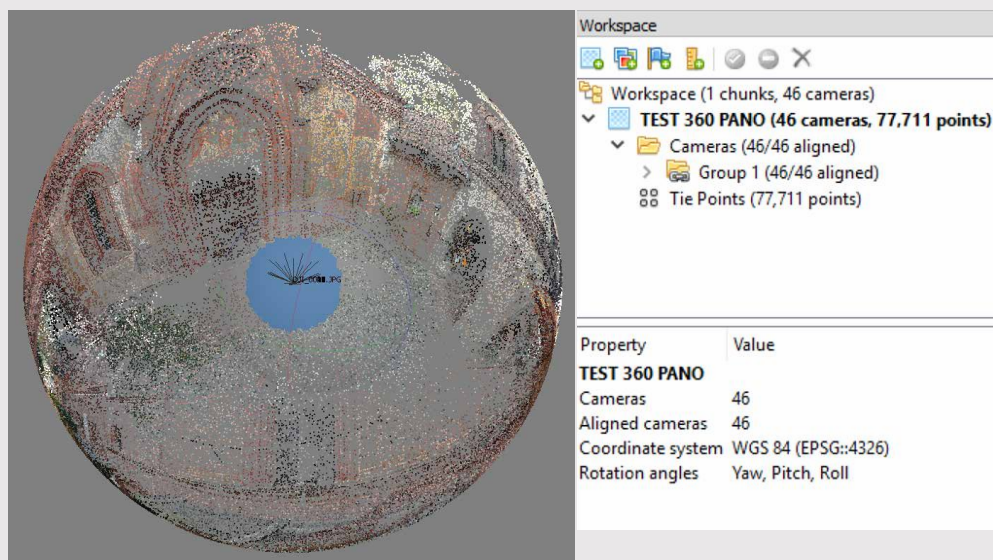


Fig. 366. Utilizzo di 46 fotogrammi realizzati tramite APR attraverso l'utilizzo della modalità camera station di Agisoft Photoscan Pro..



Fig. 367. Proiezione generata all'interno del software di Structure From Motion di uno dei panorami eseguiti da UAV

4.11.5. Estrazione dei *frame* dai filmati aerei

Nell'ottica di realizzare acquisizioni veloci sull'area di studio si è scelto di eseguire filmati sugli oggetti di interesse seguendo le linee guida per la fotogrammetria e successivamente di estrarre da questi filmati un numero congruo di immagini. Nello specifico trattandosi di voli in cui la velocità del drone è stata mantenuta costante e con filmati sono eseguiti in 1080p ad un *framerate* al secondo pari a 29.97 si è deciso di estrarre un frame ogni 60 frame, ovvero circa uno ogni 2 secondi. In questo modo sono state estratte immagini per ognuno dei quattro fronti oggetto di interesse.

A seguito dell'estrazione dei *frame* è importante sottolineare che si è riscontrata la perdita delle informazioni contenute nei *exif* (es. *apertura*, *velocità di scatto*, *lunghezza focale*, *localizzazione*) in particolare relative alla tipologia di sensore e sulla *pixel size* che sono stati estrapolati da un immagini e inseriti manualmente nel software di calcolo.

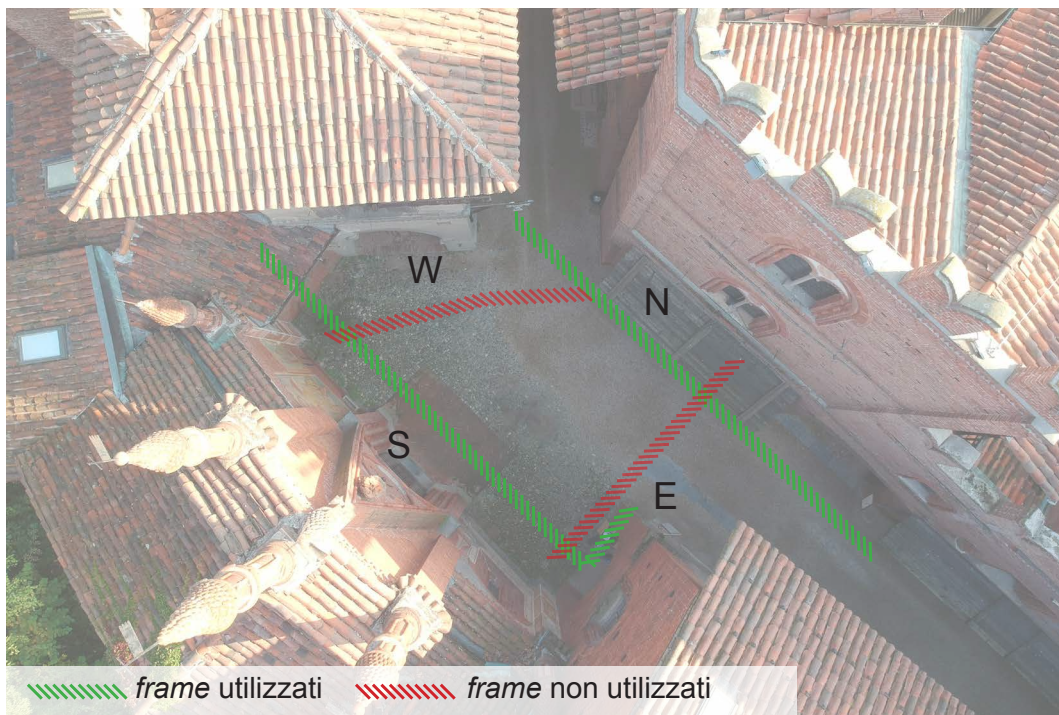


Fig. 368. Strisciate di acquisizione dei frame utilizzati (in verde) e scartati (in rosso). Eliminando le immagini acquisite lungo le strisciate rosse i due percorsi risultano totalmente indipendenti tra loro.

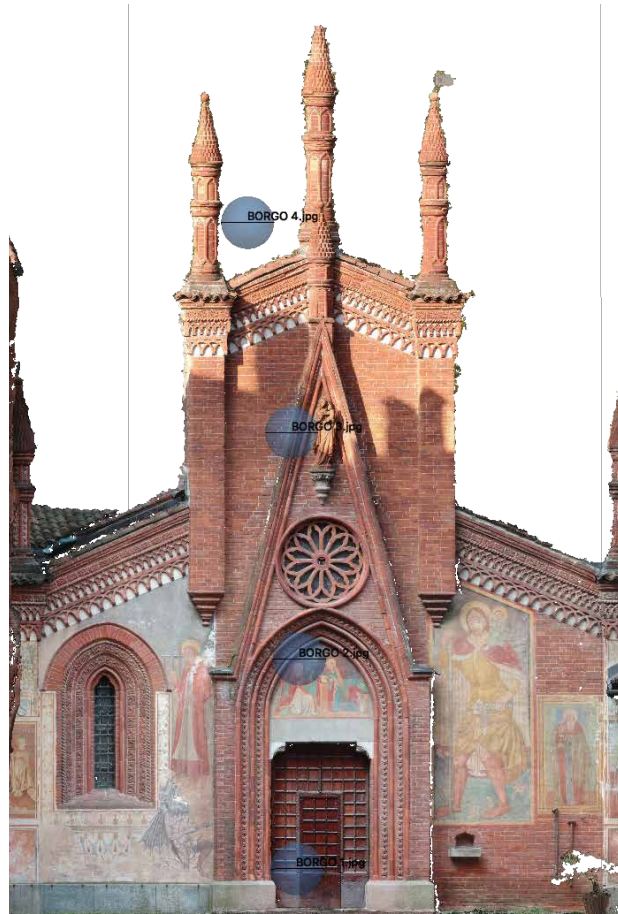
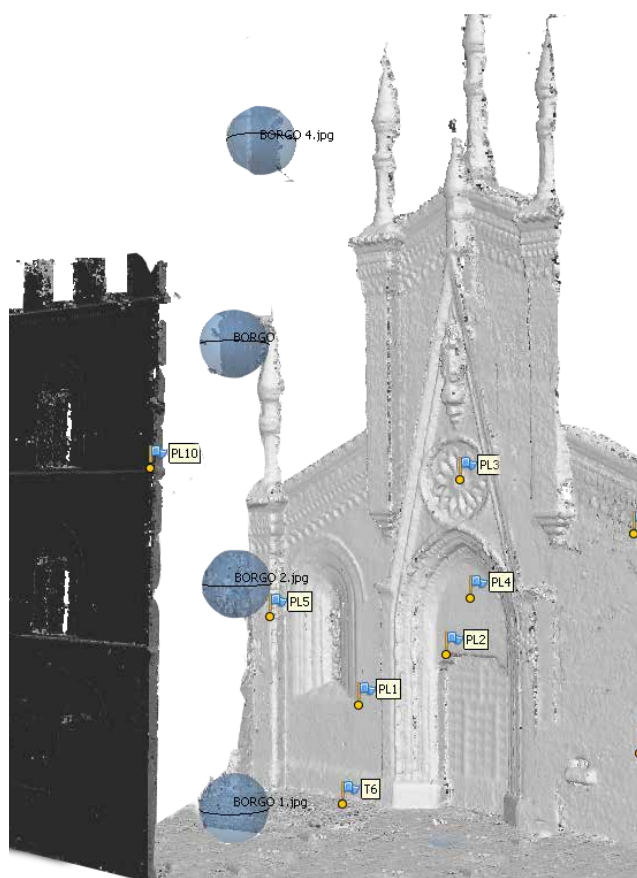


Fig. 369. Posizione delle immagini sferiche sulla nuvola di punti monocromatica (in alto) e sul modello texturizzato (in basso) ottenuta nel processo di ricostruzione realizzato dalle camere sferiche e dai frame acquisiti da UAV

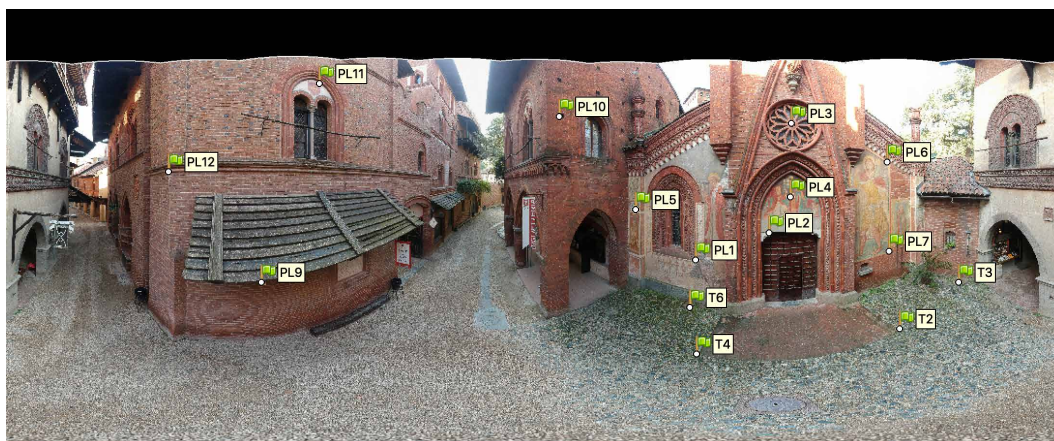


Fig. 370. Posizione dei punti di controllo su una delle immagini sferiche. In fase di elaborazione solo alcuni dei punti sono stati utilizzati mentre i restanti sono stati impiegati come *check point*.

4.11.6. Elaborazione dati sull'area del caso studio

Obiettivo di questa applicazione è quello di dimostrare le potenzialità delle camere sferiche utilizzate per l'orientamento delle immagini frame. Per valutare concretamente le potenzialità offerte dai panorami sferici si è deciso di imporre delle condizioni particolarmente complesse per mettere alla prova

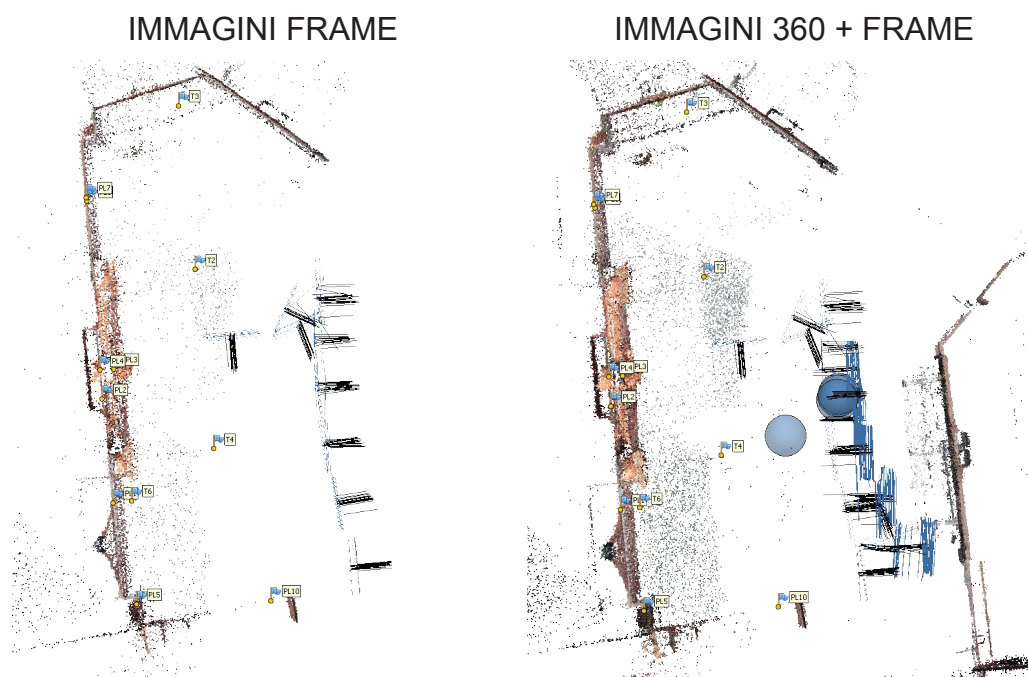


Fig. 371. Comparazione dell'allineamento delle sole immagini frame in cui metà delle immagini non viene allineato e solo un fronte è ricostruito (a sinistra); l'allineamento realizzato con l'aggiunta di quattro immagini frame in cui tutte le immagini sono state allineate e entrambi i fronti risultano correttamente ricostruiti (a destra).

l'uso di questi dati. Si è scelto di usare, infatti, soltanto quattro proiezioni limitate per dimensioni come descritto nel paragrafo sull'unione delle immagini e utilizzare solamente le immagini *frame* relative ai due fronti contrapposti. Come si può osservare dall'immagine 407 sono state mantenute solamente

TYPE	ELEVATION	N° IMAGE	N° ALLINEATE
FRAME	WEST	165	165/165
	EST	140	0/140
FRAME + 360	WEST	165	160/160
	EST	140	140/140
	SPHERICAL	4	4/4

Tab. 69. Numero di immagini allineate con e senza la presenza di camere 360°.

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
8	1.84	1.41	0.42	2.32	2.35

Tab. 70. Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points.

COUNT	X ERROR [cm]	Y ERROR [cm]	Z ERROR [cm]	XY ERROR [cm]	TOTAL
4	1.07	0.87	1.13	1.38	1.79

Tab. 71. Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points.

le acquisizioni relative ai due edifici contrapposti, eliminando le acquisizioni lungo i percorsi rossi si è assicurata l'assenza di aree di sovrapposizione rendendo totalmente indipendenti le due strisciate. Questo ha permesso di potere andare a valutare le potenzialità di allineamento offerte da un numero esiguo di immagini sferiche. Le immagini sferiche, realizzate tramite l'unione di 184 immagini, sono state eseguite a 4 differenti quote (fig 369) in modo da andare a coprire tutti gli elevati dei corpi di fabbrica. Come si può osservare l'allineamento di queste immagini viene correttamente eseguito. Per andare a valutare l'accuratezza dei modelli sono stati utilizzati diversi

punti di coordinate note come *Ground Control Point* e come *check point*. In un primo momento sono state testate ricostruzioni utilizzando soltanto i *frame* estratti dai filmati in assenza di immagini sferiche sui quali sono stati inseriti i punti di controllo. I risultati, come previsto, sono che la metà delle immagini viene scartata in fase di allineamento dal momento che non risultano aree di sovrapposizione tra le strisciate verticali opposte. Questo fa sì che la ricostruzione risulti possibile soltanto per uno dei due elevati scelto arbitrariamente dal software. Per aggirare questo problema sarebbe stato possibile allineare in progetti separati ma questo avrebbe richiesto di acquisire un numero molto più elevato di punti di controllo. A seguito di queste considerazioni sono state inserite le quattro immagini sferiche ed il processo è stato ripetuto.

4.11.7. Risultati ottenuti

L'uso dei panorami ha reso possibile l'allineamento di tutti i *frame* rendendo di conseguenza possibile la ricostruzione di entrambi i prospetti contrapposti. Come si può osservare dagli errori stimati nei punti di controllo (GCP) e nei check point i risultati sono coerenti e compatibili con la restituzione alla scala 1:100.



Fig. 372. Visualizzazione della nuvola di punti SFM.

Per ottenere questi risultati non sono stati inseriti certificati di calibrazione relativi alla camera utilizzata, si è optato, infatti, in questo caso studio, per l'affidamento alla *Self Calibration*. L'uso di soli quattro panormi sferici non rendeva possibile il corretto allineamento delle immagini andando ad inserire punti di controllo su entrambi i fronti. Questo ha fatto sì che per valutare l'effettiva funzionalità dei panorami si è stati costretti ad utilizzare il maggior numero possibile di punti di controllo senza però poterli disporre su entrambi i prospetti in analisi. Queste analisi sono state replicate oltre che tramite *Agisoft Photoscan* attraverso il software *Pix4d Mapper* ottenendo i medesimi risultati. Si è scelto di testare tramite analisi specifiche di comparazione i risultati ottenuti prendendo in considerazione i progetti in cui l'uso delle camere sferiche ha permesso l'allineamento di tutte le immagini con il maggior numero possibile di *GCP*.

4.11.8. Confronto nuvole di punti *lidar* e fotogrammetriche

Allo scopo di verificare la qualità del modello ricostruito è stata compiuta un'analisi di confronto tra la nuvola di punti generata da un'acquisizione laser scanner che ha messo in luce le potenzialità e i limiti del sistema testato. In particolar modo è apparso subito evidente che mentre il fronte della Chiesa risultava accuratamente ricostruito, l'altro fronte, che volutamente non presentava un numero elevato di punti di controllo a causa delle problematiche precedentemente descritte, presenta delle criticità. Nello specifico il prospetto del corpo di fabbrica opposto alla Chiesa presentava degli errori. Effettuando un calcolo della distanza tra le nuvole di punti risulta per il fronte della chiesa (considerando come riferimento la nuvola di punti *lidar* in quanto generata con uno strumento di precisione strumentale maggiore) che la distanza media tra i punti nel 50% dei casi risulta inferiore al centimetro. A

conferma di quanto riportato sono state prese in considerazione diverse aree sulle quali sono state svolte analisi di distanza che hanno confermato quanto riportato. Osservando l'immagine riportata di fianco si può notare subito che la ricostruzione fotogrammetrica presenta marcati errori di ricostruzione. La geometria infatti è ricostruita due volte. Nel primo caso appare erroneamente posizionata e ad una scala non coerente con il dato di riferimento, mentre la seconda corretta nella porzione alta ma con una evidenti deformazioni nella porzione bassa della nuvola di punti. Ne consegue che per utilizzare questi dati per finalità di rilievo metrico è necessario disporre di un numero superiore di immagini sferiche.



— lidar — fotogrammetrica

Fig. 373. Sezione trasversale di sovrapposizione delle nuvole di punti *lidar* e *fotogrammetrica* nelle aree critiche della ricostruzione dalla quale si può osservare lo sdoppiamento della geometria per la nuvola generata attraverso l'uso dei quattro panorami sferici.

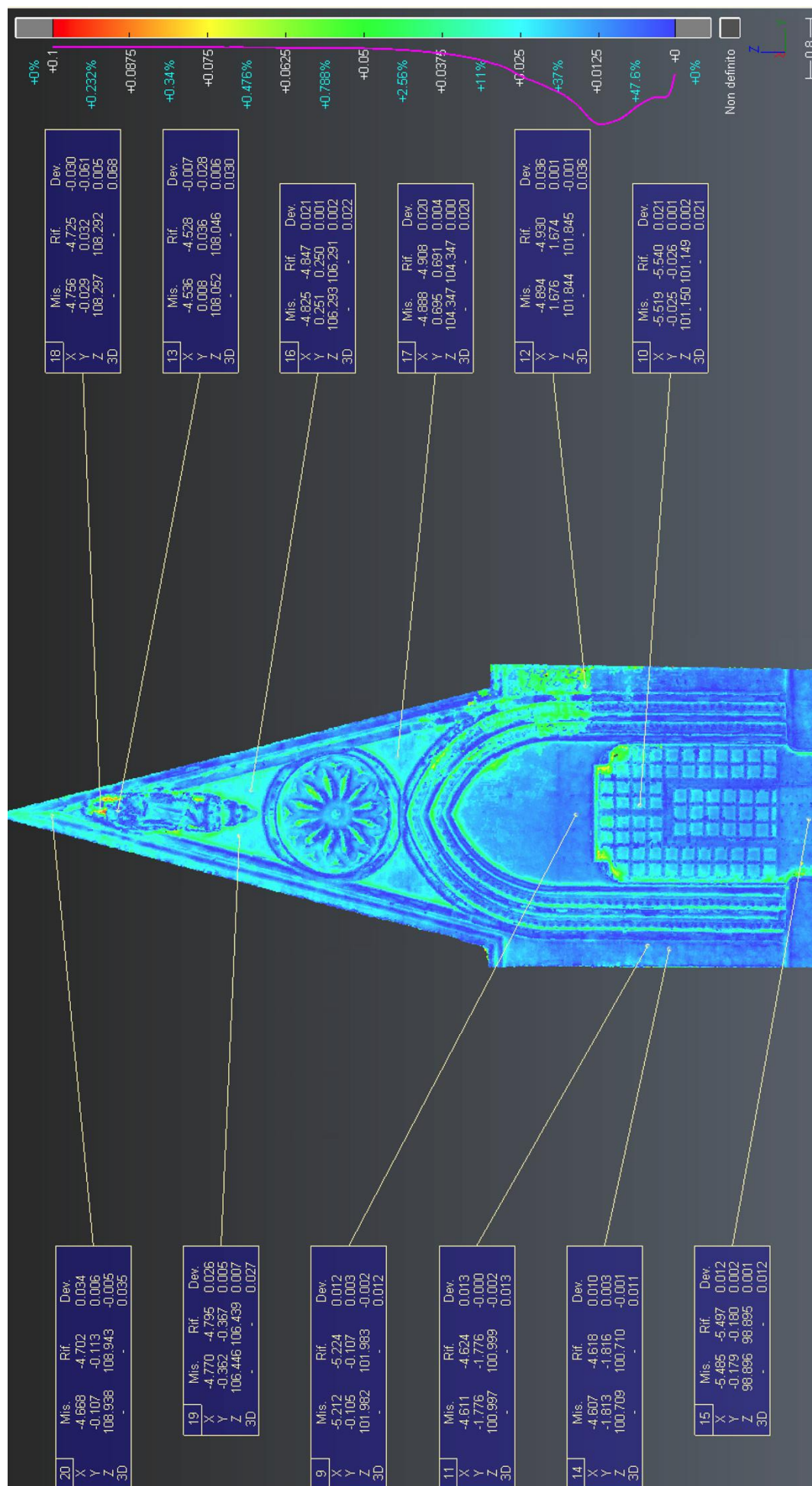


Fig. 374. Analisi distanza cloud to cloud tra i dati *lidar* (riferimento) e la ricostruzione *SFM* attraverso immagini sferiche e frame acquisiti da *UAV* sulla porzione principale del prospetto della Chiesa (le misure riportate sono espresse in metri).

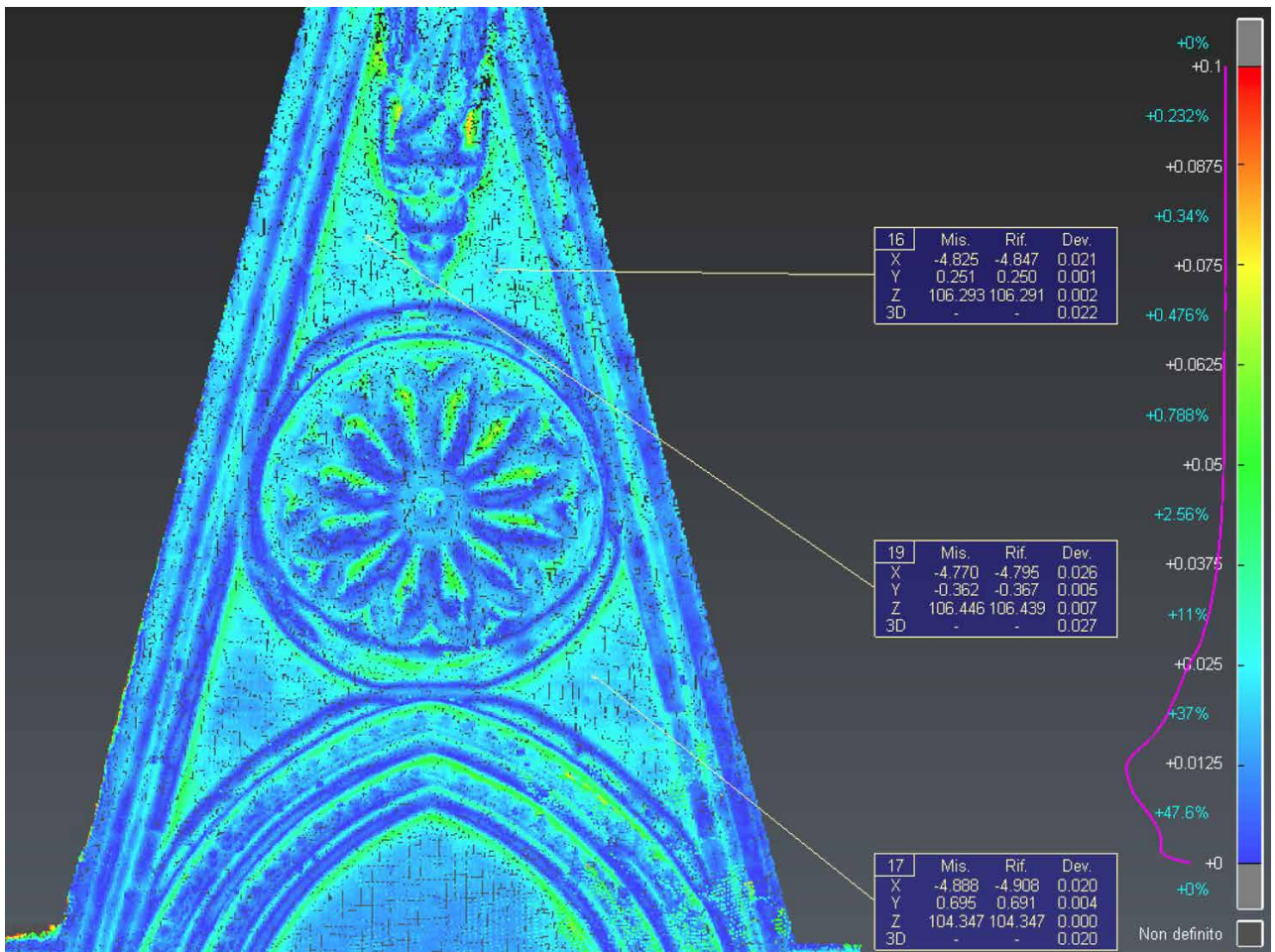
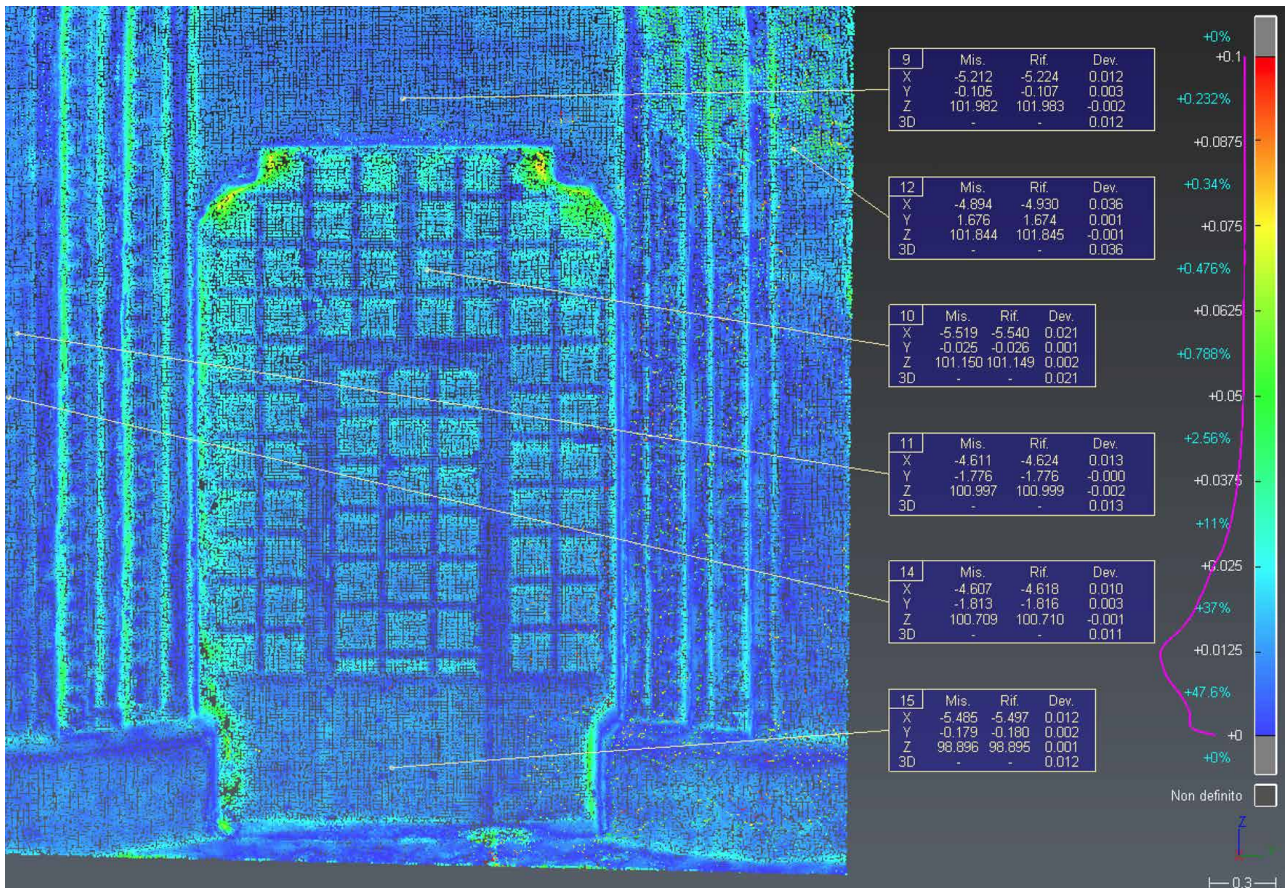


Fig. 375. Analisi distanza *cloud to cloud* tra i dati *lidar* (riferimento) e la ricostruzione *fotogrammetrica* attraverso immagini sferiche e frame acquisiti da UAV sul portale d'ingresso della Chiesa (le misure riportate sono espresse in metri).

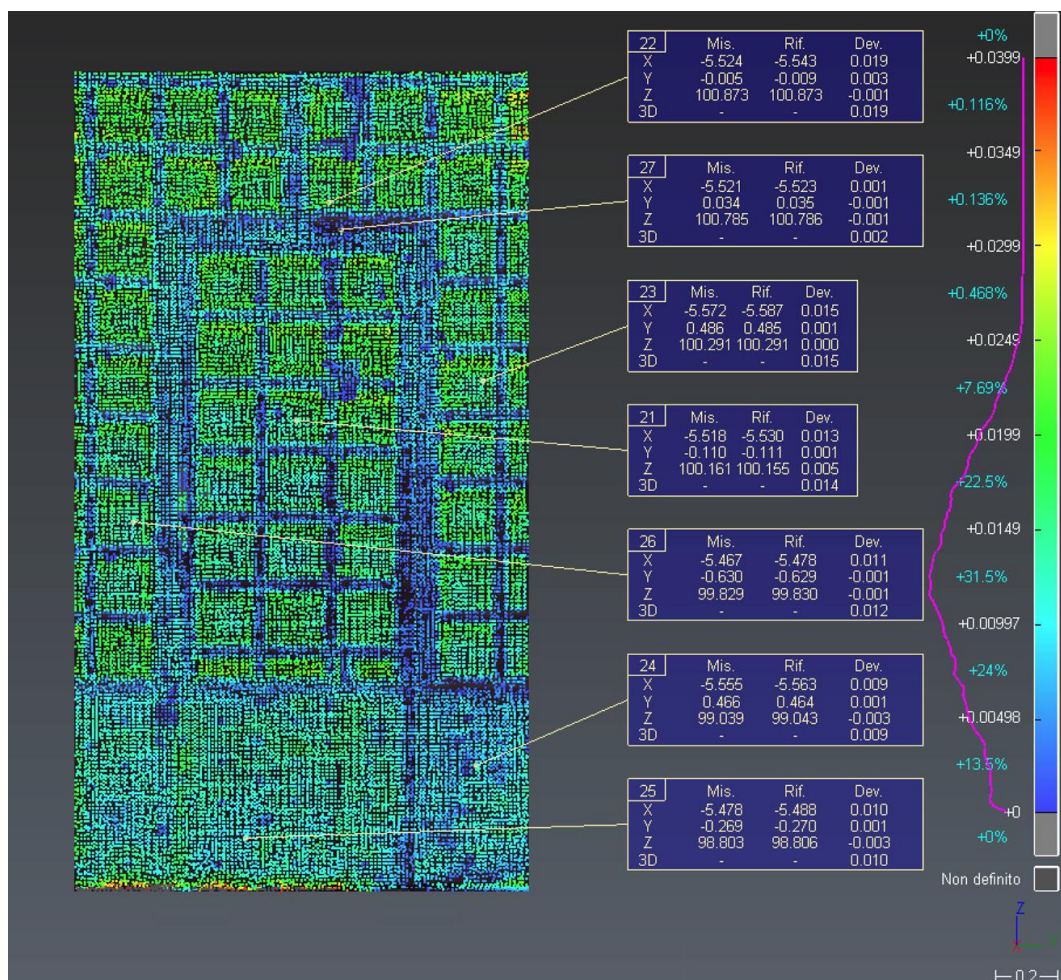


Fig. 376. Analisi distanza *cloud to cloud* tra i dati *lidar* (riferimento) e la ricostruzione fotogrammetrica attraverso immagini sferiche e frame acquisiti da UAV sulla porzione principale del prospetto della Chiesa (le misure riportate sono espresse in metri).

4.11.9. Elaborati ottenuti dal processo fotogrammetrico

Il processo di elaborazione che ha visto l'integrazione di immagini sferiche e frame estratti da filmati ha permesso la generazione di elaborati utili al disegno architettonico di rilievo dei corpi di fabbrica. In particolar modo è stato possibile estrarre sezioni ed ortofoto di prospetti ad alta qualità che hanno permesso la stesura di un rilievo metrico accurato. Nello specifico per il fronte della chiesa, come si evince dai risultati presentati nei paragrafi precedenti, il grado di accuratezza ha permesso di redigere disegni alla scala 1:100 e generare un modello tridimensionale accurato. Per quanto riguarda

il secondo fronte per il quale non è stato possibile garantire l'accuratezza attraverso punti di controllo, è risultato comunque possibile elaborare ortofoto in grado di supportare la restituzione di rilievo permettendo di verificare la relazioni geometriche tra gli elementi di prospetto ma, soprattutto, offrire un supporto per ulteriori studi. Si illustreranno in questo paragrafo le procedure messe in atto per la generazione degli ortomosaici.

Il primo passaggio eseguito è stato quello della pulitura della nuvola di punti e la sua segmentazione realizzata per andare ad eliminare le geometrie imprecise o non necessarie. Successivamente si è proceduto alla generazio-

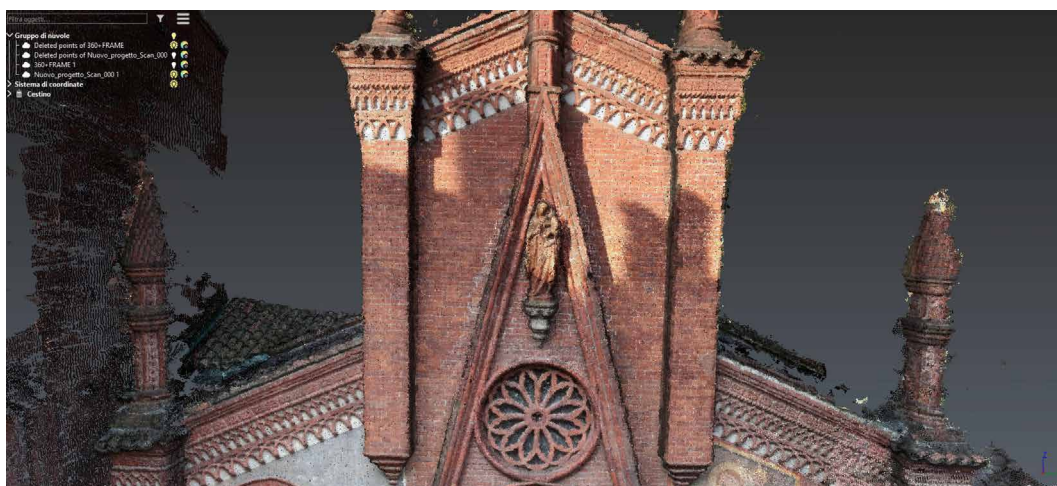


Fig. 378. Visualizzazioni di una porzione di nuvola di punti fotogrammetrica. Fronte Ovest.

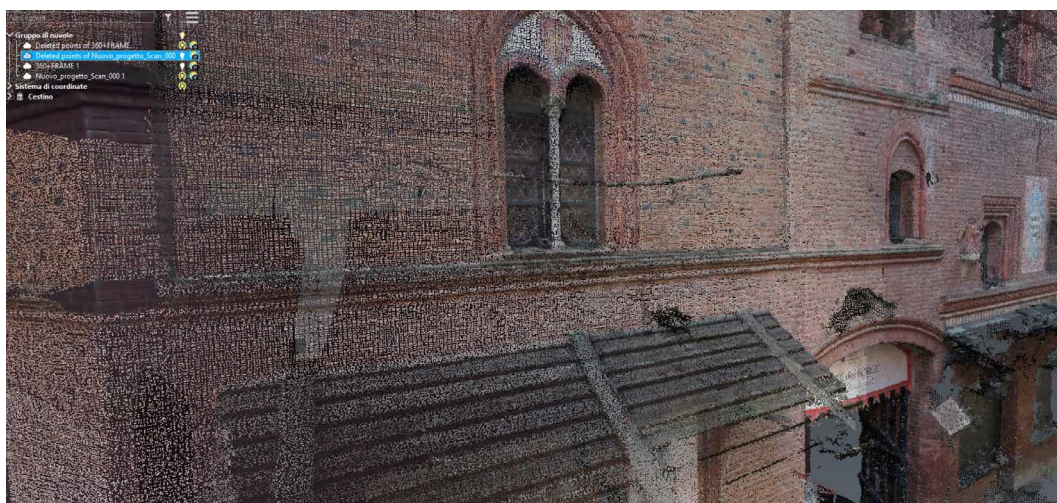


Fig. 377. Visualizzazioni di una porzione di nuvola di punti fotogrammetrica. Fronte Est.

ne di una *mesh* tridimensionale sulla quale sono state proiettate le immagini prive di distorsioni per la realizzazione dell'ortofoto. Per un migliore risultato è stata generata una mesh con un alto numero di triangoli al fine di ottenere una migliore geometria di partenza e si è proceduto al miglioramento delle geometrie nel software esterno *3DReshaper*, attraverso il quale si è andato ad affinare, attraverso procedure più specifiche, la qualità delle geometrie di ricostruzione oltre che ad eliminare le porzioni di triangoli isolate. Dopo questo passaggio si è proceduto a reimportare la geometria migliorata nel software fotogrammetrico. Questo passaggio ha permesso la generazione dell'ortofoto su una mesh migliore nella quale le principali criticità sono state corrette. Dopo i processi di miglioramento delle geometrie si è proceduto

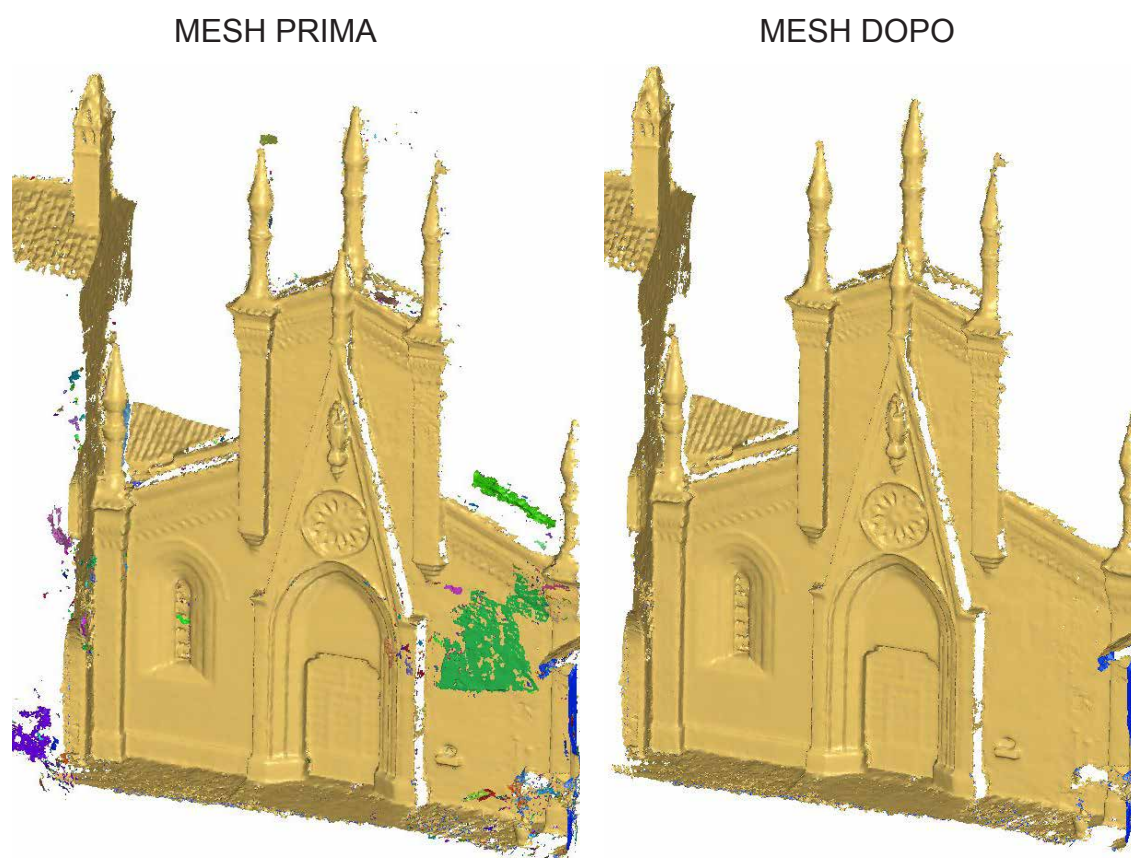


Fig. 379. Correzione della *mesh* tridimensionale prima e dopo il processo di eliminazione delle porzioni superflue di geometria avvenuto attraverso il software *Hexagon 3D Reshaper*.

alla determinazione del piano di proiezione che è stato determinato tramite l'identificazione di tre punti sulla nuvola di punti complanari al piano parallelo all'elevato del corpo di fabbrica. Per andare a calcolare con precisione le



Fig. 380. Ortofoto Chiesa Borgo Medievale, Torino, scala 1:100. L'immagine è stata generata dall'integrazione di single frame e immagini sferiche.

coordinate di questi punti è stato utilizzato il software *Pointcab* che ha permesso di estrarre una sezione orizzontale della nuvola di punti a partire dalla quale sono state estratte le coordinate dei punti che definiscono il piano. Imponendo, infine, la generazione dell'ortofoto passante per il piano definito è stata generata un'ortofoto che è stata successivamente editata al fine di

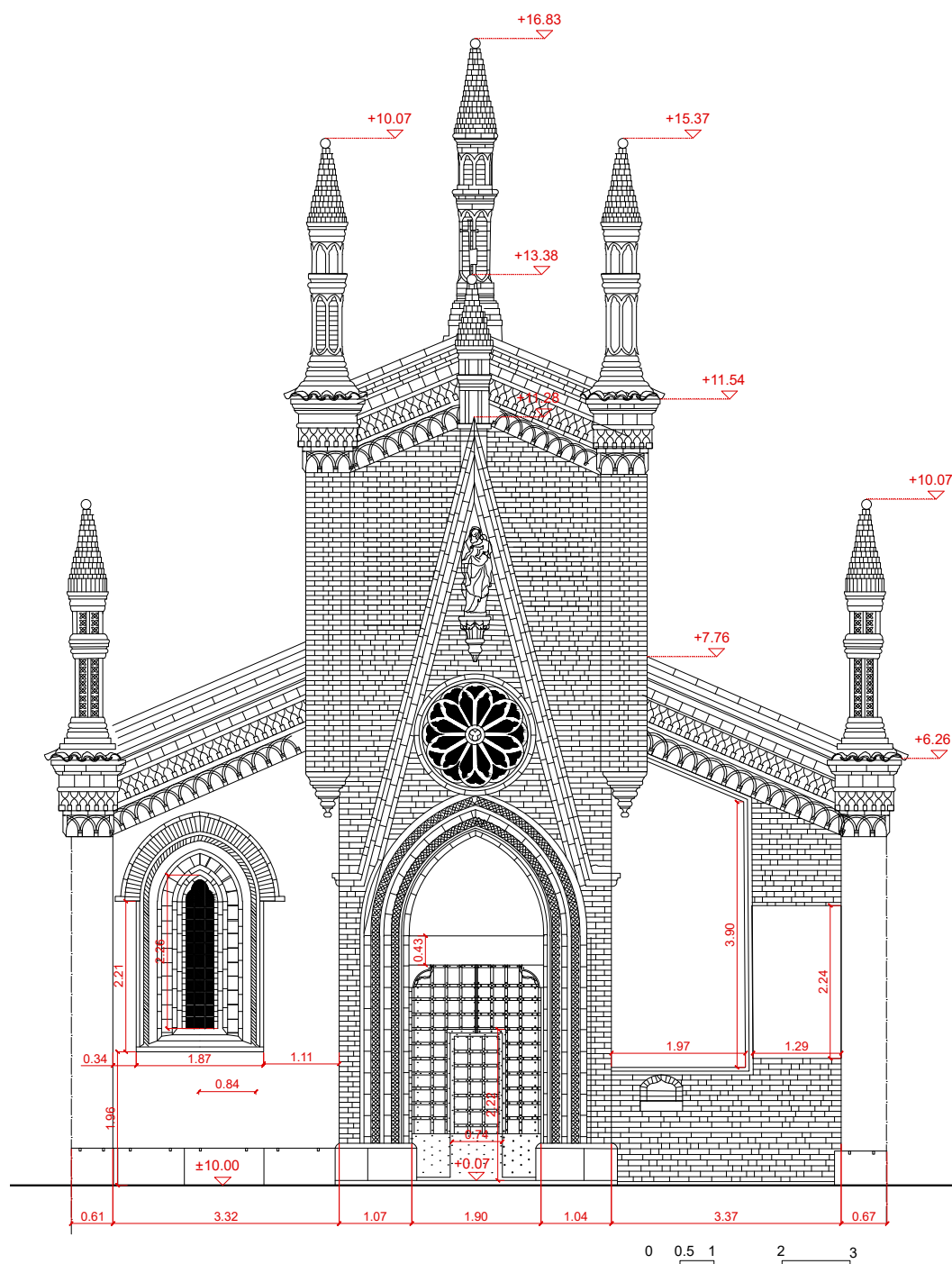


Fig. 381. Vettorializzazione ortofoto della Chiesa Borgo Medievale, Torino. (scala 1:100)

migliorare la definizione dei contorni eliminando le porzioni di ricostruzione in eccesso. La generazione dell'ortofoto ha reso possibile il processo di vettorializzazione¹ finalizzata alla produzione di elaborati bidimensionali.

Gli elaborati ottenuti hanno permesso di accrescere la conoscenza fino ad ora posseduta sui due edifici analizzati di cui si riportano alcuni disegni e fotografie di archivio riportanti alcuni particolari degli edifici di riferimento.

1 La vettorializzazione è una procedura di trasformazione delle immagini analogiche in immagini digitali vettoriali.

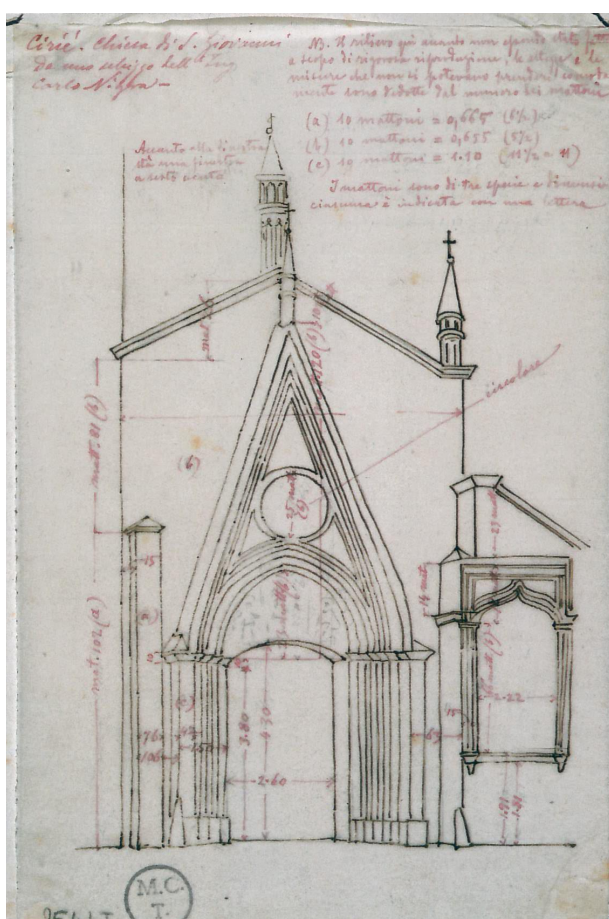


Fig. 382. A. D'Andrade, Ciriè, *facciata della chiesa di San Giovanni Battista*, 1883 ca.; penna e matita, mm 197 x 129 (GAM, FdA, LT254).

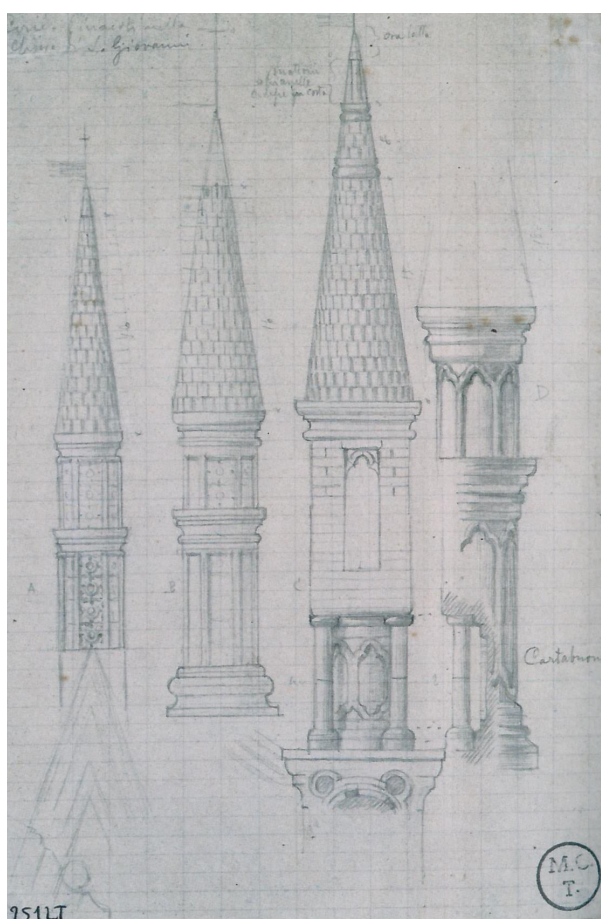


Fig. 383. A. D'Andrade, Ciriè, *pinnacoli della chiesa di San Giovanni Battista*, 1883 ca.; penna e matita, mm 195 x 134 (GAM, FdA, LT251).



Fig. 385. Vittorio Ecclesia, "Castello Feudale e Borgo", particolare della chiesa, 1884; stampa fotografica, mm 200 x 265 (GAM, Biblioteca d'Arte dei Musei Civici di Torino, GFII ECCL.)



Fig. 384. A. D'Andrade, Valperga, chiesa di San Giorgio in castello, parete esterna della navata destra, affreschi e cotti ornamentali, 1883 ca.; matita, mm 132 x 194 (GAM, FdA, LT434).



Fig. 386. Ciriè, *Chiesa Parrocchiale di San Giovanni Battista*, 2004 (P. Robino).



Fig. 387. Ciriè, *Chiesa Parrocchiale di San Giovanni Battista*, particolare di pinnacolo, 2004 (P. Robino).



Fig. 388. Torino, Borgo Medievale, "*Casa di Chieri*", 2004 (P. Robino).



Fig. 389. Ortofoto *Casa di Chieri*, Torino, Borgo Medievale, (fuoriscala). L'immagine è stata generata dall'integrazione di single frame e immagini sferiche.

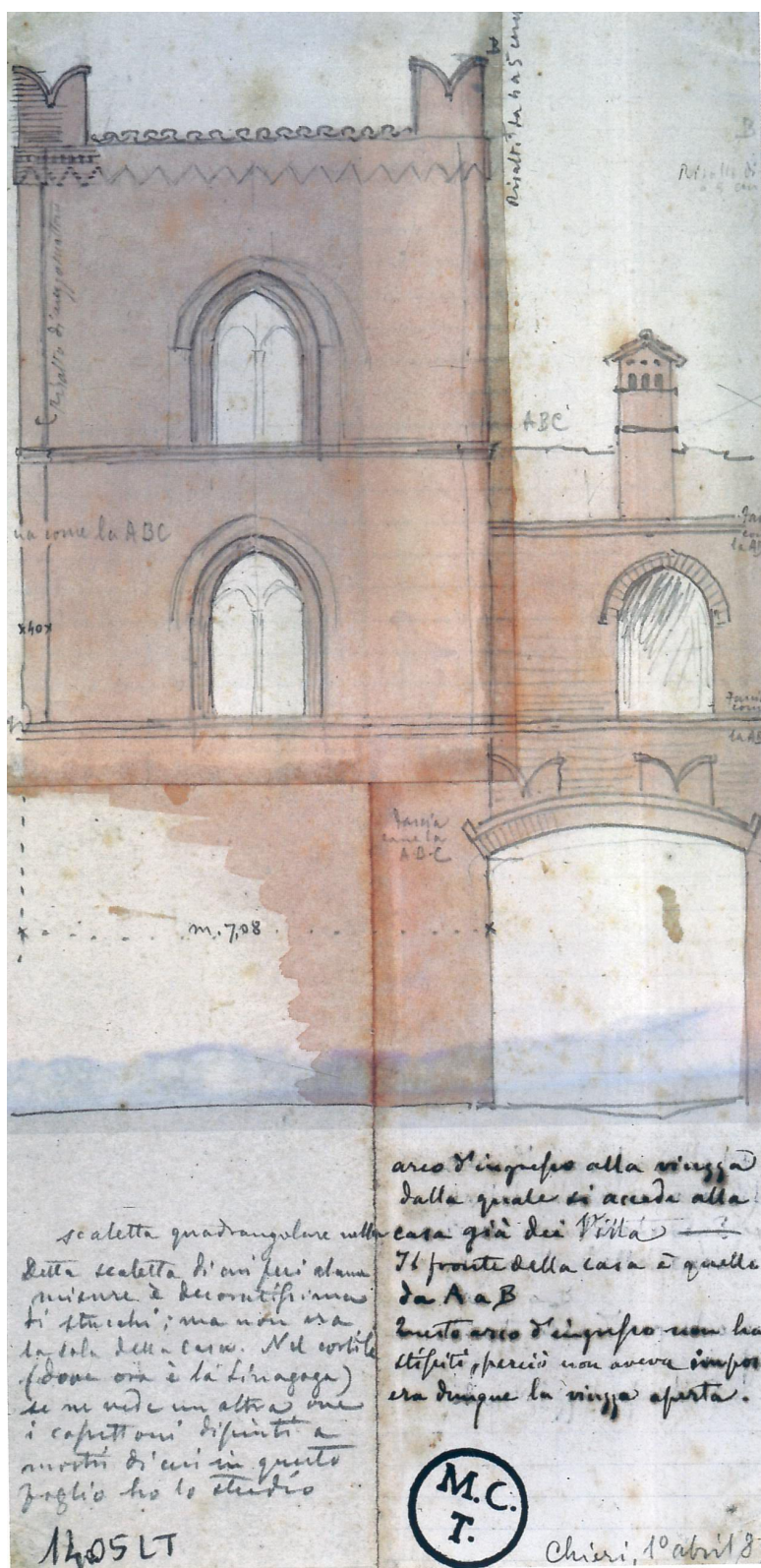
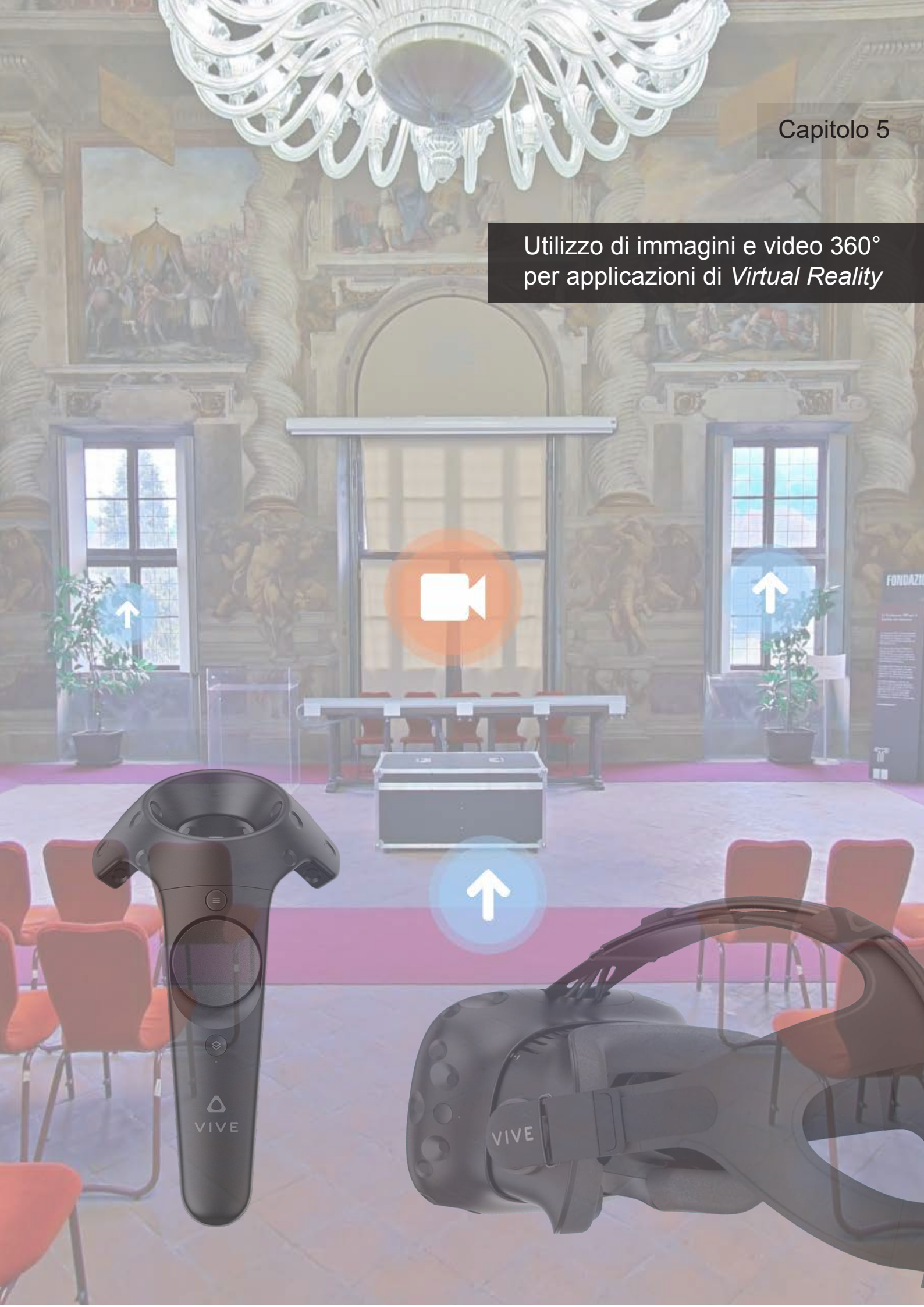


Fig. 390. A
D'andrade, Chieri,
casa dei Villa, 1 aprile 1883; matita, penna e acquarello, mm 192 x 91 (GAM, FdA, LT1405)

4.12. Note bibliografiche

- I Kossieris, S., Kourounioti, O., Agraftotis, P., & Georgopoulos, A. (2017). Developing a low cost system for 3D data acquisition. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42
- II Ihsanudin, T., & Affriani, A. R. (2017, December). The Combination of Spherical Photogrammetry and UAV for 3D Modeling. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 98, No. 1, p. 012057). IOP Publishing.
- III *Regolamento Ente Nazionale Aviazione Civile (ENAC) "Mezzi aerei a pilotaggio remoto"* https://www.enac.gov.it/sites/default/files/allegati/2018-Lug/Regolamento_APR_Ed2_Em4_180704.pdf [consultato il 4/01/2019]
- IV *Regolamento Ente Nazionale Aviazione Civile (ENAC) "Mezzi aerei a pilotaggio remoto" Ed. 2 Emendamento 4 del 21 maggio 2018, art 7 comma 2.*
- V *Regolamento Ente Nazionale Aviazione Civile (ENAC) "Mezzi aerei a pilotaggio remoto" Ed. 2 Emendamento 4 del 21 maggio 2018, pag.9]*
- VI NI-2017-007 del 17 maggio 2017, pag. 2-3 art 3 comma 1
- VII Operazioni Critiche - *Scenario Standard S01* - Prescrizioni Tecniche Operative <https://www.enac.gov.it> consultato il 05/01/2019
- VIII *Linee Guida 2016/003-NAV - Ed. n.1 del 1° giugno 2016* - Aeromobili a pilotaggio remoto con caratteristiche di inoffensività
- IX *Regolamento Ente Nazionale Aviazione Civile (ENAC) "Mezzi aerei a pilotaggio remoto" Ed. 2 Emendamento 4 del 21 maggio 2018, art 12 comma 5*
- X Castello del Valentino. Facoltà di Architettura Progetti a confronto, a cura di Sisto Giriodi, Lorenzo Mamino, Torino, Celid, 1988 e Il Castello del Valentino, a cura di, Torino, Allemandi, 2007]
- XI Ortofoto Comune di Torino (2016), CSI Piemonte, riprese CGR, GSD 0.2 m

Utilizzo di immagini e video 360°
per applicazioni di *Virtual Reality*



5. Utilizzo di immagini e video 360° per applicazioni di *Virtual Reality*

5.1. Introduzione

Quando si parla di Realtà Virtuale (VR) ci si riferisce alla simulazione della realtà attraverso tecnologie informatiche di ambienti reali in maniera fotorealistica permettendo al fruitore di immergersi in una scena fittizia simulata. L'obiettivo di questo strumento è quello di permettere una visione immersiva dello spazio permettendo attraverso avanzate tecnologie l'interazione con gli oggetti presenti nelle scene. Ad oggi la realtà virtuale, essendo un ambiente fittizio permette l'integrazione di differenti livelli informativi, oltre che la possibilità di nuove fruizioni degli spazi.

5.2. Differenze tra Realtà Aumentata (AR) e Realtà Virtuale (VR)

Le applicazioni immersive possono differenziarsi in due categorie principali che prendono il nome di Realtà Aumentata (AR) e Realtà Virtuale (VR). Queste due categorizzazioni presentano delle differenze sostanziali. Quando si parla di Realtà Aumentata (AR) si intende il potenziamento delle informazioni percepite dal mondo reale circostante. Attraverso la realtà aumentata si continua a mantenere la percezione dell'ambiente reale. Quando invece si parla di Realtà Virtuale o VR ci si riferisce alle visualizzazioni immersive (solitamente multisensoriali) il cui obiettivo è quello di interrompere la percezione del mondo reale immergendosi in uno spazio completamente virtuale. La realtà virtuale, per sua stessa definizione, simula la realtà effettiva. Per comprendere al meglio la divisione tra ambiente reale e modellato ci si può riferire al concetto di *Reality-virtuality continuum* illustrato nel (1994) da Milgram, P., & Kishino, F.¹, la cui schematizzazione è ben visibile nello schema proposto nella pagina seguente.

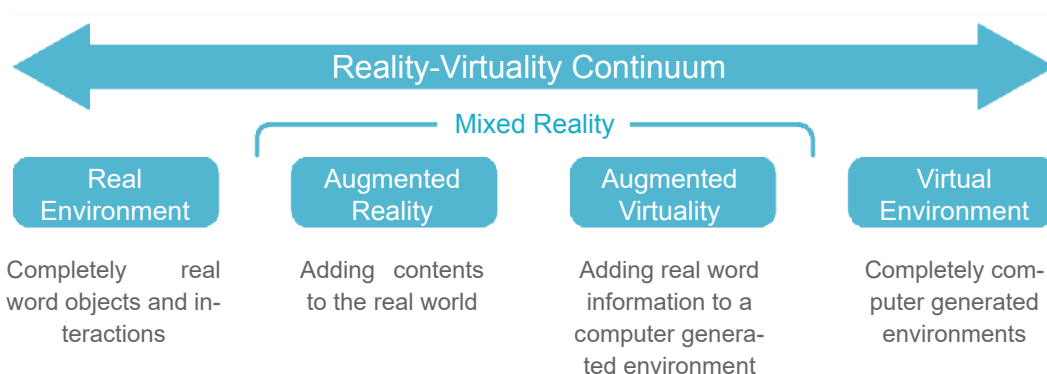


Fig. 391. *Reality-virtuality continuum*. [Tratto e rieditato da: Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 77(12), 1321-1329.]

Attraverso lo schema si può osservare che l'*Augmented Reality* (AR) e l'*Augmented Virtuality* (AV) si pongono in condizioni intermedie, infatti prevedono l'aggiunta di contenuti virtuali al mondo reale (nel primo caso) o di contenuti reali al mondo virtuale (nel secondo caso). Sia l'AR che l'AV, tuttavia, sono considerabili quindi spazi intermedi in cui realtà e finzione interagiscono attivamente tra loro.



Tab. 72. Un esempio di visualizzazione del modello del Castello del Valentino in realtà aumentata attraverso la fotocamera di uno smartphone.

5.3. Storia dei primi strumenti per la Realtà Virtuale

La storia della Realtà Virtuale intesa come oggi la conosciamo è stata costruita da un gran numero di strumenti, prototipi e ricerche (attualmente ancora in corso) che si sono sviluppate indicativamente nella seconda metà degli anni '50. Sarà proprio in questo periodo che saranno realizzati i primi, ingombranti, prototipi meccanici di visori. Molti progetti innovativi vennero abbandonati dopo poche sperimentazioni a causa degli elevati costi di produzione.

Il primo prototipo fu realizzato da *Morton Heilig*¹ nel 1957 e prendeva il nome di Sensorama (fig. 387), una futuristica cabina in cui l'osservatore poteva visionare una pellicola proiettata mentre complessi sistemi ricreavano

1 Morton Leonard Heilig (1926-1997) regista, direttore della fotografia e inventore americano noto per la realizzazione del Sensorama un primo prototipo di visore per la realtà aumentata.

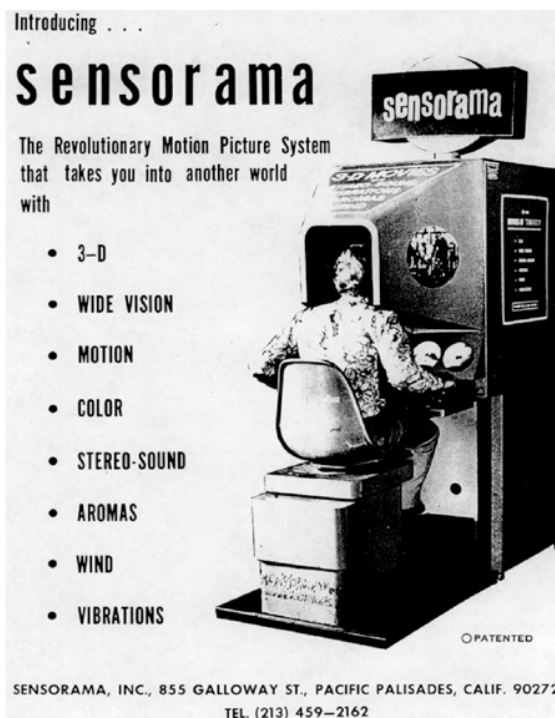
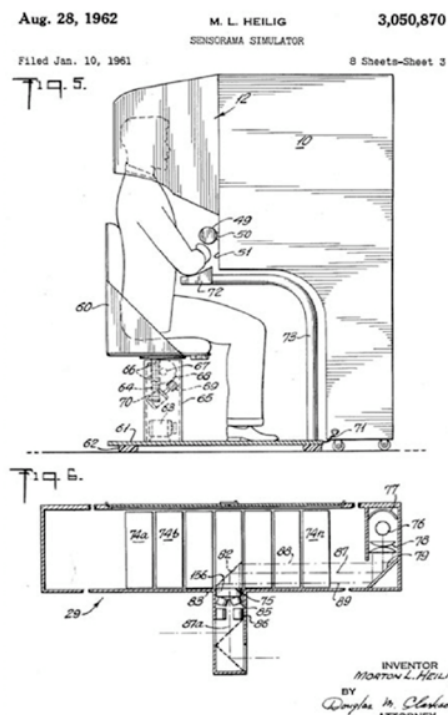


Fig. 392. Sensorama, uno dei primi visori 3d.[tratto da: Basso, A. (2017). *Advantages, Critics and Paradoxes of Virtual Reality Applinied to Digital Systems of Architectural Prefiguration, the Phenomenon of Virtual Migration*. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 1, No. 9, p. 915).]

le sensazioni acustiche, olfattive e tattili. Il Sensorama era, infatti, in grado di riprodurre immagini stereo 3D, simulare il vento, fornire una sensazione tattile di movimento, e disponeva di un sofisticato sistema di emissione di fragranze. Il progetto fu abbandonato a causa dei costi elevati e la carenza di finanziamenti dopo la produzione di soli 5 filmati sperimentali.

Nel 1961 fu realizzato da *Comeau* e *Bryan*, due ingegneri della *Philco*, azienda americana produttrice di elettrodomestici, un nuovo tipo di visore denominato *Headsight*. Sebbene questo prototipo non sia considerabile un visore di realtà virtuale vero e proprio, ha gettato le basi per gli sviluppi negli anni a venire. Il casco permetteva di visualizzare le immagini di una telecamera e di attivarla o disattivarla a distanza grazie ad un sensore magnetico dei movimenti della testa.

Un nuovo sensore fu sviluppato nel 1968 da *Ivan Sutherland*, studioso e professore americano che vent'anni più tardi fu insignito del *Premio Turing* come padre della computer grafica moderna. Questo dispositivo, a causa della sua forma e dimensioni, assunse il nome di *Spada di Damocle* (fig.

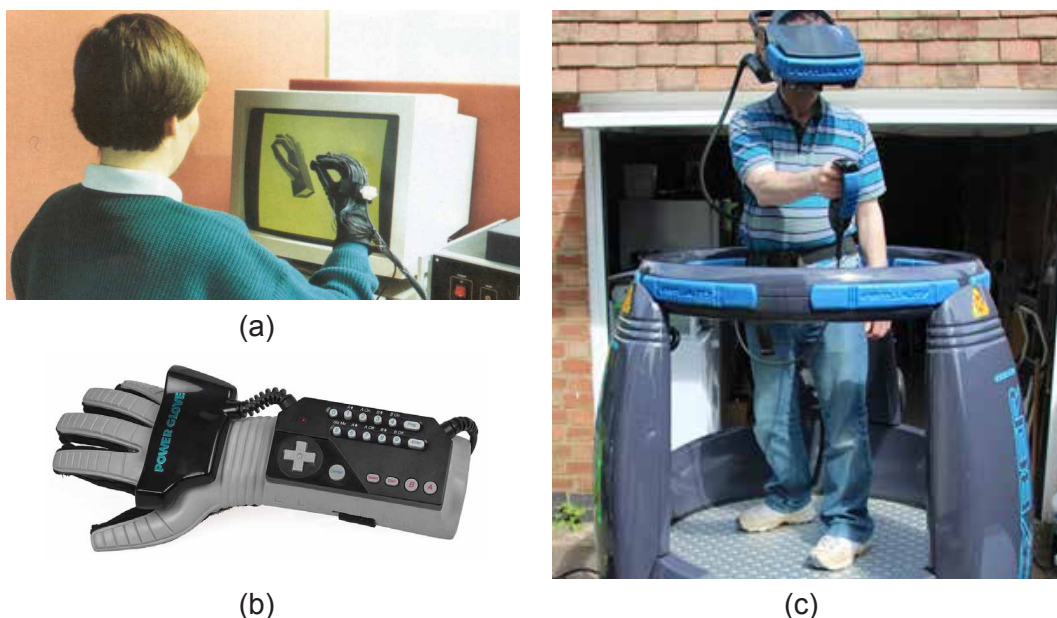


Fig. 393. Alcuni dei primi prototipi per la realtà virtuale. (a) *Data Glove* [tratta da https://en.wikipedia.org/wiki/Power_Glove consultato il 13/12/2018]; (b) *Nintendo Power Glove* [Evan-Amos [Public domain], from Wikimedia Commons]; (c) *Virtuality Cs 1000* [tratto da <http://www.retro-vr.co.uk/test/1000CS.html> consultato il 13/12/2018]

394). Il prototipo era costituito da due tubi catodici in grado di proiettare direttamente davanti agli occhi immagini tridimensionali elaborate, primi modelli di computer.

Circa quindici anni più tardi l'*Atari*, storica azienda video ludica californiana, nel 1982 intraprese ricerche nel campo della realtà virtuale applicata ai videogiochi. A capo del progetto *Thomas Zimmerman* curò lo sviluppo del *DataGlove* (fig.393a), un guanto dotato di sensori che permetteva di convertire i movimenti della mano in segnali elettrici. Lo sviluppo a causa dei costi fu interrotto venendo poi ripreso e concluso qualche anno più tardi dalla *VPL Research*, per poi essere anche adottato dalla *NASA* e dalla *Nintendo*. Quest'ultima ne sviluppò una versione molto più avanzata in grado di riconoscere oltre 250 posizioni per dito, con una precisione di gran lunga superiore rispetto al suo precursore (fig 393b).

Nel 1991, fu sviluppato il *Virtuality Cs 1000* (fig.393c) che disponeva di tecnologie avanzate tramite le quali l'utente interagiva con l'ambiente virtuale attraverso un visore per la riproduzione di filmati, un sistema di riproduzione sonora e una pedana controllata da un *joystick 3D*.

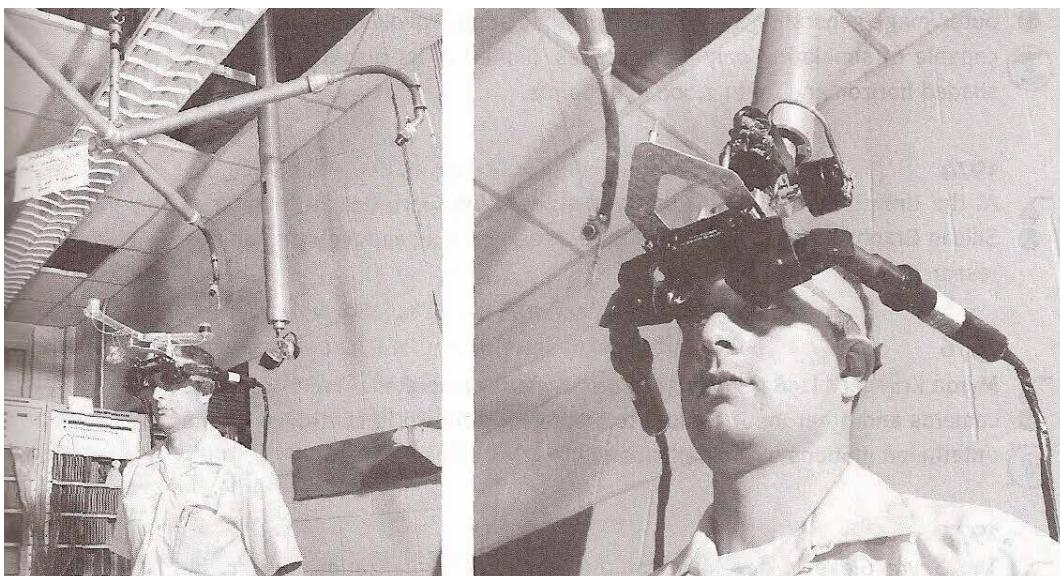


Fig. 394. Modello di visore del 1968 progettato da *Ivan Sutherland* denominato *Spada di Damocle* [tratto da: <https://www.virtualerealta.it/storia-realta-virtuale-30/> consultato il 13/01/2018]

5.4. Hardware e applicazioni moderne di VR e AR

L'avanzamento delle tecnologie informatiche ha permesso di navigare in ambientazioni fotorealistiche in tempo reale, interagendo con gli oggetti presenti in esse attraverso l'uso di sensori avanzati. Queste applicazioni necessitano di elevata potenza di calcolo *GPU* e *CPU* oltre che hardware specifici che si differenziano in base alle applicazioni richieste. Nello schema si possono osservare le soluzioni hardware maggiormente utilizzate per la *VR* e per la *AR* anche se, soluzioni e sensori innovativi, sono in rapida crescita ed evoluzione. In modo particolare il mondo dei visori immersivi è in rapida evoluzione permettendo soluzioni sempre più avanzate supportate da schede video e processori sempre più prestanti.

HARDWARE		VIRTUAL REALITY	AUGMENTED REALITY
	INDISPENSABILE	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Head Mounted Display (HMD)</i> 2. Sistema di riproduzione sonora 3. Dispositivi di interazione e manipolazione (<i>joypad</i>, guanti, telecomandi ecc.) 4. <i>CPU/GPU</i> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Telecamera o smartphone 2. Schermi o appositi visori 3. <i>CPU/GPU</i>
	AGGIUNTIVO	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sensori inerziali 2. Tute integrali con sensori vari 3. Accelerometri 4. GPS 5. Bussole 6. Dispositivi di manipolazione (es. - guanti, <i>joypad</i>, ecc.) 7. Sensori Vari 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sensori inerziali 2. Accelerometri 3. GPS 4. Bussole 5. Dispositivi di manipolazione (es. <i>joypad</i>, telecomandi, guanti ecc.) 6. Altro...

Tab. 73. Hardware indispensabile e aggiuntivo per le applicazioni di *Virtual Reality* e *Augmented Reality*.

5.4.1. Head Mounted Display (HMD)

Le applicazioni di realtà virtuale necessitano di particolari visori per la visualizzazione. Questi dispositivi sono noti come *head-mounted display*, o *HMD*, ovvero visori dotati di schermo e lenti, montati sulla testa dello spettatore attraverso apposite maschere o caschi. Attualmente in commercio è disponibile un gran numero di questi visori che differiscono per prezzo e tipologia di schermo. Le principali tecnologie per i *display* sono risumibili in: *cathode ray tubes (CRT)*, *liquid crystal displays (LCDs)*, *liquid crystal on silicon (LCos)*, or *organic light-emitting diodes (OLED)*.

Alcuni visori permettono inoltre di combinare le immagini del mondo sovrapponendole a quello virtuale per le applicazioni di realtà aumentata.



Fig. 396. Esempi di *head-mounted display*. (a) *Google Glass*; (b) *Samsung Gear Vr*; (c) *Sony Playstation Vr*.



Fig. 395. *Google Glass* esempio di visore per la realtà aumentata [fonte: technobuffalo.com consultato il 3/12/2018]

5.4.1.1. Introduzione di sistemi *low-cost* per la visualizzazione

Negli ultimi anni sono state introdotte soluzioni di visori *low cost* auto-costruiti. Lo sviluppo di questi dispositivi (dal costo di pochi euro), è stato reso possibile dallo diffusione parallela dei moderni smartphone con prestazioni grafiche elevate. La soluzione più nota è stata introdotta da *Google* ed è conosciuta con il nome di *Google Cardboard* (fig. 398), un progetto la cui finalità è quella di avvicinare l'utenza di massa alla realtà virtuale attraverso uno strumento dal prezzo a contenuto. Il sistema base è realizzato in cartone che, opportunamente piegato, permette l'alloggiamento per lo smartphone (fig.397). Un elemento verticale permette di suddividere la visione oculare permettendo la visualizzazione di una porzione pari alla metà del display. Attraverso apposite applicazioni, il dispositivo è in grado di riprodurre i contenuti rispettivamente per ognuno delle due porzioni al fine di dare la sensazione di tridimensionalità. A partire da *Google Cardboard* sono nati



Fig. 397. Sistema *Google Cardboard* prima dell'assemblaggio delle parti. [<http://www.vigamusmagazine.com/139722/tutorial-come-costruire-un-google-cardboard/> consultato il 13/02/2019]



Fig. 398. Installazione dello smartphone all'interno di *Google Cardboard* [<http://geoawesome.com/google-cardboard-paper-virtual-reality-set-now-supports-street-view-app/> consultato il 13/02/2019]

nuovi visori sempre a basso costo che permettono una migliore visione attraverso la possibilità di messa a fuoco delle lenti ed il controllo della distanza oculare al fine di adattare lo strumento per ottenere una visione migliore attraverso apposite ghiera. Questi strumenti risultando dei semplici alloggiamenti per hardware esterno presentando anche nelle versioni più per-



Fig. 400. Esploso di un visore 3D *low cost*. [fonte: <https://yammo.store/prodotto/vr-box-joypad-bluetooth/>]

manti prezzi contenuti. Lo sviluppo di questo tipo di visori ha permesso alla realtà di virtuale di essere apprezzata su larga scala con un conseguente aumento delle soluzioni software, delle applicazioni di visualizzazione disponibili, oltre che videogiochi e multimedia.



Fig. 399. Esempi di visualizzatori *low cost* simili alla soluzione di Google Cardboard il cui funzionamento è dipendente dall'istallazione di uno smartphone interno.

5.4.1.2. Soluzioni professionali per la visualizzazione

Oltre alle soluzioni *HDM* a basso costo, sono state sviluppate, negli ultimi anni, soluzioni avanzate per la visualizzazione immersiva a scopo professionale. In commercio, infatti, sono disponibili vari prodotti ad alte prestazioni che permettono di raggiungere visualizzazioni sempre più performanti.

Nel corso di questo paragrafo si introdurrà il funzionamento del visore *HTC Vive* in quanto è quello su cui sono stati eseguiti i test presentati in questo lavoro.

Il sistema si compone di un visore *HDM*, due *Base Stations wireless* e due *controllers* manuali. Le Base Station vengono poste in posizioni contrapposte, in posizione rialzata con un angolo di inclinazione di circa 45° ad asse convergente verso l'utilizzatore, il loro scopo è quello di permettere il tracciamento del movimento dei *controllers*. I controllers, infatti, permettono la navigazione del modello oltre a garantire la possibilità di interazione virtuale con gli elementi presenti nelle scene. Nella figura 396 si possono osservare



Fig. 401. Soluzione commerciale per la applicazioni di VR. *HTC VIVE* composto da un visore *HDM*, due *Base Stations wireless* e due *controllers* manuali per l'interazione. [Fonte: <https://www.vive.com/us/product/vive-virtual-reality-system/>]



Fig. 402. Soluzione commerciale per la applicazioni di VR. *HTC VIVE* dettaglio sul visore *HDM*, vista laterale. [Fonte: ibidem]



Fig. 403. Soluzione commerciale per la applicazioni di VR. *HTC VIVE* dettaglio sulle *Base Stations wireless*. [Fonte: ibidem]



Fig. 404. Soluzione commerciale per la applicazioni di VR. *HTC VIVE* dettaglio di uno dei *controllers* manuali per l'interazione. [Fonte: ibidem]

gli elementi che compongono la soluzione presentata, successivamente dettagliati nelle immagini 402-403-404. Le figure 405-406 schematizzano le linee guida nel posizionamento delle *Base Station*, indispensabili per il corretto funzionamento del sistema ed indicano la posizione che l'utilizzatore deve assumere durante l'utilizzo.

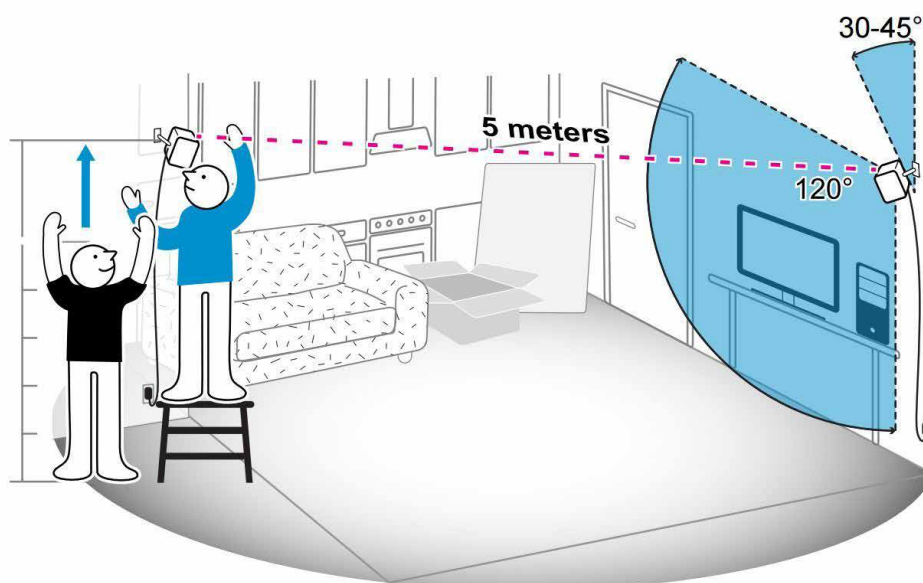


Fig. 405. Precauzioni per il montaggio *Base Stations wireless* [Fonte: Manuale Utente HTC Vive; https://www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/vive_pre_user_guide.pdf consultato il 14/01/2019]

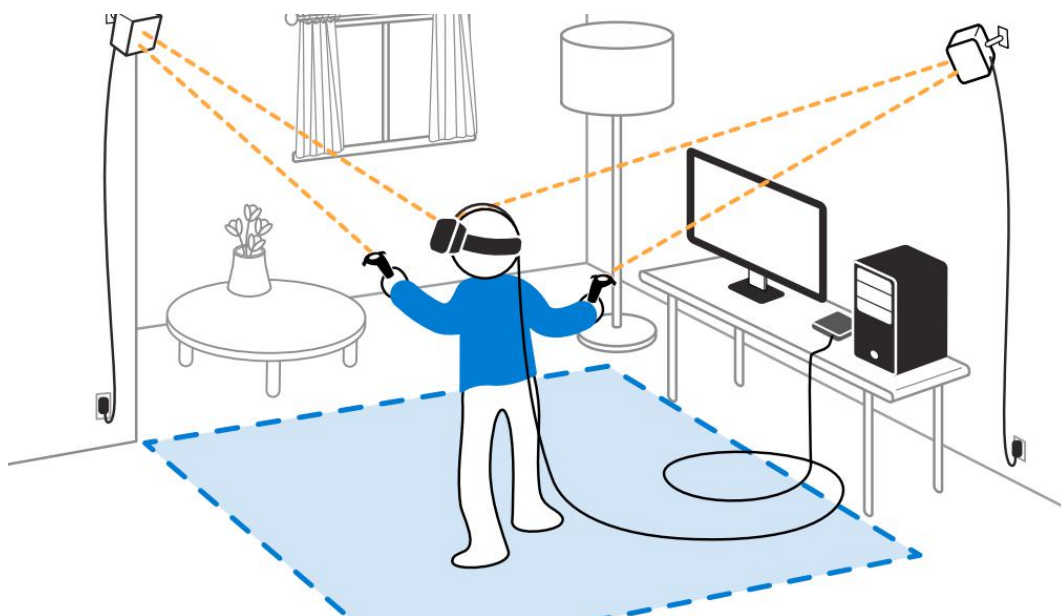


Fig. 406. Interazione tra le componenti del sistema *HTC Vive* in funzionamento. [Fonte: Manuale Utente HTC Vive; https://www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/vive_pre_user_guide.pdf consultato il 14/01/2019]

5.5. Camere sferiche ed applicazioni di *Virtual Reality*

Saranno seguiti tre differenti approcci che saranno testati singolarmente e possono essere riassunti in:

1. **Realizzazione di *Virtual Tour Multi-Sensoriale*** sui Beni Culturali oggetto di studio attraverso l'utilizzo di immagini sferiche terrestri e da UAV.
2. **Realizzazione di filmati immersivi tramite acquisizioni da UAV** in grado di fornire informazioni specifiche sui beni culturali;
3. **Applicazioni di VR/AR di modelli 3D fotogrammetrici texturizzati** e nuvole di punti realizzati attraverso integrazione di immagini sferiche e tradizionali acquisite UAV.

5.5.1. Realizzazione *Virtual Tour Multi-Sensoriale*

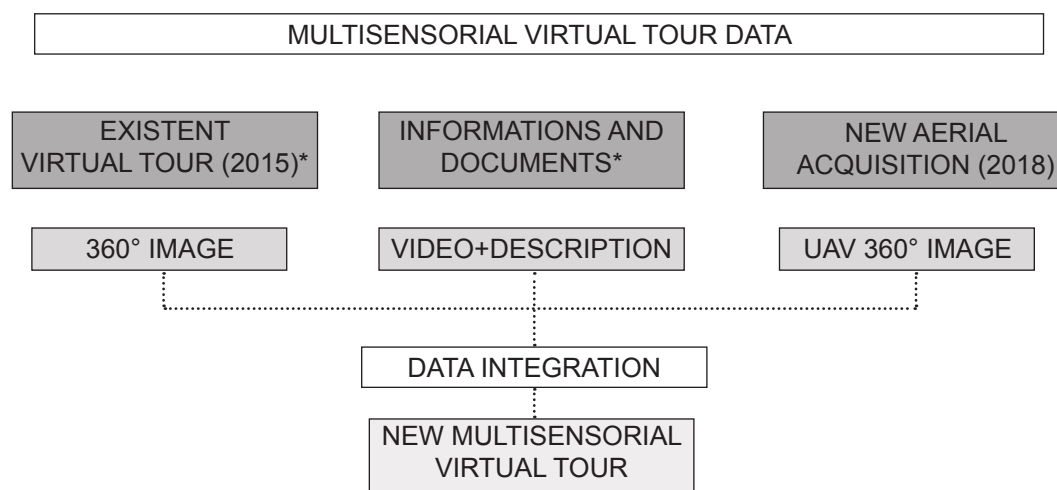
«Un nuovo punto di vista sulla città »

L'utilizzo di camere sferiche ha permesso di sviluppare interessanti applicazioni fruibili attraverso i sistemi di *Virtual Reality*. Le potenzialità rappresentate dall'uso di queste particolari camere risulta subito chiaro se si pensa che esse non sono altro che proiezioni equirettangolari che, come definito nel corso dei capitoli precedenti, corrispondono a rappresentazioni bidimensionali della superficie di una sfera. Immaginando di potersi porre come osservatori all'interno di questa sfera risulta possibile, grazie all'uso di accelerometri, tracciare i movimenti eseguiti dallo spettatore rendendolo in grado di visualizzare il panorama muovendo la testa e girandosi intorno come si farebbe in un ambiente reale. Al giorno d'oggi l'uso delle immagini

panoramiche per la realizzazione di virtual tour è ormai una pratica consolidata. La diffusione di questa tipologia di fruizione degli spazi è stata sviluppata su scala mondiale da *Google* che attraverso la piattaforma denominata *Street View* ha offerto la possibilità di navigazione a livello stradale attraverso panorami sferici acquisiti da apposite auto dotate di complessi sistemi multi-camera per acquisizione speditiva in movimento. Sebbene l'uso di questi strumenti sia quindi pratica ormai consolidata questa ricerca prova ad andare sviluppare ulteriori innovative potenzialità non ancora esplorate a sufficienza. In particolare un'innovazione proposta in questo lavoro è rappresentata dalla possibilità di integrare ai panorami terrestri quelli acquisiti da *UAV* per la realizzazione di *Virtual Tour* immersivi in grado di offrire nuovi punti di vista sulla nostre città. La realizzazione di panorami sferici ad alta risoluzione acquisiti da *UAV* offre nuove possibilità di fruizione dello spazio dove l'utente ha la possibilità di osservare la città sospeso nell'aria potendo navigare da un panorama all'altro spostandosi e alzandosi di quota con lo sguardo.

Sarà proposta un'applicazione di *Virtual Tour* sui casi studio dei Beni Culturali del *Castello del Valentino* e del *Borgo Medievale* di Torino, realizzando un prodotto finale fruibile in *Virtual Reality* attraverso l'integrazione di differenti tipologie di dati. In particolare per il *Castello del Valentino* esisteva già un *Virtual Tour* delle sale del piano nobile (realizzato nel giugno del 2015), questo permetteva di navigare tra le diverse sale del piano senza però fornire alcuna informazione o descrizione. Il Virtual Tour esistente è attualmente disponibile sul sito web <http://castellodelvalentino.polito.it/>. Sempre all'interno di questo sito risultano presenti informazioni sulle differenti sale attraverso filmati, descrizioni ed immagini che però non sono integrate all'interno della visita virtuale.

In questo lavoro si è provato a dare una risposta al problema della frammentazione delle informazioni realizzando un nuovo *Virtual Tour* utilizzando i dati già esistenti per le acquisizioni degli interni andando però a integrare a queste informazioni di descrizioni sonore, testi e riferimenti web direttamente all'interno della visita virtuale. Questo ha dato la possibilità di visitare le stanze attraverso un'esperienza multisensoriale che permette un'esperienza di visita coinvolgente. Oltre alle integrazioni di dati già esistenti, inoltre, in questa tesi il virtual tour è stato notevolmente ampliato andando ad aggiungere i panorami acquisiti da drone che rendono possibile la conoscenza da parte del pubblico di luoghi inesplorati come la sommità delle coperture a *pavillon système* o nuove visuali del Castello da 50 metri di altezza sul fiume *Po* e sul *corso Marconi*. Attraverso le integrazioni con i dati già acquisiti per il *Politecnico di Torino* nel 2015.



* <http://castellodelvalentino.polito.it>

Fig. 407. Integrazione dati per la realizzazione del Virtual Tour Multi-Sensoriale

5.5.1.1. Acquisizione dati e preparazione immagini sferiche

Il processo di raccolta dei dati aerei per la realizzazione del *Virtual Tour* ha seguito differenti approcci. In particolare le immagini sferiche sono state acquisite utilizzando la camera 360 *GoPro Fusion* le cui potenzialità sono state a fondo illustrate nei precedenti capitoli e la camera tradizionale installata su drone. Tutti i voli sono stati eseguiti manualmente senza ricorrere alla pianificazione automatica ad eccezione di alcune porzioni relative al caso studio del *Borgo Medievale*. Il volo manuale ha permesso di ottenere un controllo di precisione sul drone dando la possibilità di avvicinarsi con un margine di sicurezza ai Beni Culturali oggetto di studio. Mentre le acquisizioni realizzate attraverso la camera sferica sono composte da sole due immagini *fisheye* la realizzazione di panorami attraverso la camera tradizionale ha richiesto un numero variabile di immagini a seconda della tipologia di camera utilizzata (in quasi tutti i casi superiore ai 40 scatti).

A seguito delle acquisizioni sul campo le immagini sono state connesse utilizzando il software proprietario *Go Pro Fusion Studio* per quelle realizzate attraverso la camera sferica e *Autopano Giga* per quelle realizzate da camere tradizionali. È opportuno precisare che le proiezioni sferiche generate a partire da camere tradizionali risultano di qualità estremamente migliore rispetto a quelle eseguite dalla *GoPro Fusion* in quanto composte da un numero maggiore di immagini a risoluzione più elevata. Essendo lo scopo di questo approfondimento quello di realizzare un virtual tour accessibile dal web e da dispositivi mobili si è optato per esportare le proiezioni equirettangolari andandone a ridurre le dimensioni a 15.000 px di larghezza, permettendo in questo modo un peso più contenuto in termini di spazio di memoria occupato dai *file*.

5.5.1.2. Generazione del *Virtual Tour* Multi-Sensoriale

I panorami creati sono stati selezionati e la loro posizione è stata segnata sulla mappa. Sono quindi stati raccolti i dati esistenti estraendo le viste più significative dal *Virtual Tour* già fruibile online.

Successivamente sono stati testati differenti software per la realizzazione della visita virtuale tra cui possiamo citare i principali: *Kolor Panotour*, *RoundMe*, *Pano2Vr*, *Mapillary*, *HoloBuilder*. A seguito dei test condotti si è identificato in *Holobuilder* la soluzione che, a parità di risultato, garantisce la maggiore stabilità e possibilità di fruizione del prodotto direttamente da *browser web*, sia per applicazioni desktop che tramite tablet e dispositivi mobili. In particolar modo la piattaforma web risulta compatibile con l'impiego di *Head-Mounted Display*, oltre che con l'utilizzo degli accelerometri presenti nei comuni smartphone, impiegati per adattare la visualizzazione dei panorami.

Holobuilder è un'applicazione web accessibile da *browser* a pagamento che però presenta alcune funzioni gratuite. All'interno del sito è stato possibile caricare i panorami, collegarli attraverso *hotspot* e aggiungere a que-

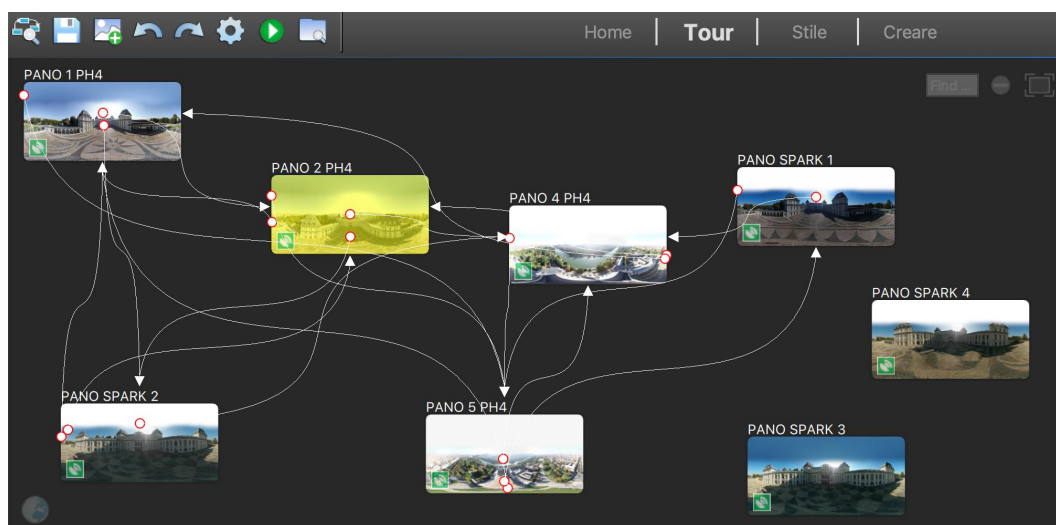


Fig. 408. Nell'immagine la realizzazione del *Virtual Tour* attraverso *Kolor Panotour*

sti elementi interattivi personalizzabili come ad esempio icone informative, testi, audio, immagini, filmati, modelli 3d, riferimenti esterni a documenti, siti web ecc. Attraverso questi strumenti è stato quindi possibile andare ad integrare nella visita virtuale informazioni utili ad una migliore comprensione delle sale per offrire un nuovo strumento di comunicazione efficace ai fruitori.

L'esperienza multi-sensoriale proposta è stata resa possibile dall'estrazione delle descrizioni audio di ognuna delle sale a partire da alcuni filmati (<http://castellodelvalentino.polito.it>)¹. Le tracce audio sono quindi state editate e tagliate, suddivise per ambiente al fine di esserne inserite a descrizione e per rendere l'esperienza maggiormente coinvolgente la riproduzione è stata impostata come contemporanea all'ingresso nella sala. L'utente può ascoltare la descrizione dell'ambiente, delle sue decorazioni e degli affreschi mentre grazie al visore può osservare lo spazio come se lo stesse visitando realmente. Oltre all'audio guida scritte tridimensionali permettono la visualizzazione del nome dell'ambiente così da offrire una esperienza utente più coinvolgente. Inoltre in ogni sala è stato inserito un collegamento che rimanda alla corrispondente pagina di approfondimento sul sito web già citato (www.castellodelvalentino.polito.it), che permette ulteriori approfondimenti.

Un pulsante permette inoltre la riproduzione dei filmati corrispondenti ad ogni sala. Sebbene la visualizzazione sia possibile da ogni dispositivo, le migliori esperienze sono rese possibili dall'utilizzo di visualizzatori profes-

1 È importante sottolineare che l'intento di questa ricerca è puramente accademico e didattico e che tutti i filmati e tutti i panorami sferici delle sale del castello già realizzati da terzi sono stati impiegati a scopo puramente dimostrativo per illustrare le potenzialità di utilizzo di immagini sferiche e di soluzioni di *Virtual Tour* immersive in grado di offrire nuove possibilità per la ricerca futura.

sionali come il caso dell'*HTC Vive* che risulta pienamente compatibile anche se tramite visori a basso costo sono possibili esperienze coinvolgenti.

5.5.1.3. Navigazione dei panorami attraverso *keyplan* e ortofoto

Per semplificare l'esperienza utente virtuale sono state aggiunti differenti *keyplan*, ovvero mappe create con la funzione di navigatore che permettono di visualizzare la posizione dei panorami limitrofi e la navigazione direttamente selezionando la stanza di interesse (fig. 404-405). Questa funzione permette di avere un maggior controllo sulla visita virtuale rendendo possibile passare da un panorama all'altro oltre che una migliore comprensione degli spazi. Per questi navigatori sono stati utilizzati rispettivamente una pianta del piano nobile e l'ortofoto generata attraverso fotogrammetria *UAV* presentata nel capitolo precedente.

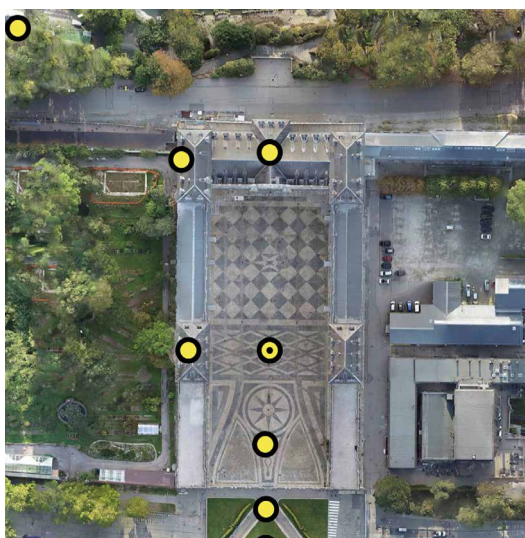


Fig. 409. Torino, *Castello del Valentino*, posizionamento degli *hotspot* relativi alle immagini sferiche aeree acquisite da drone per la realizzazione del Virtual Tour.

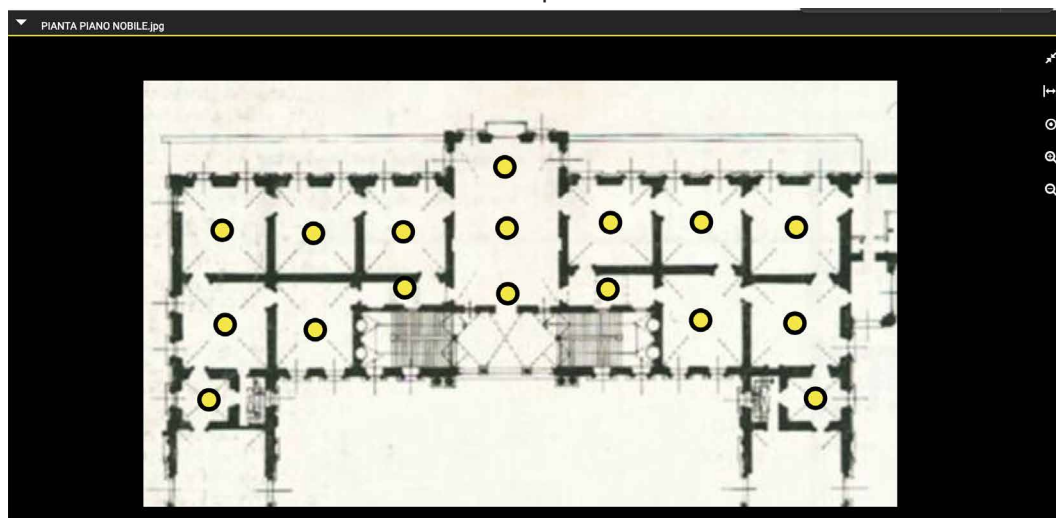


Fig. 410. Torino, *Castello del Valentino*, *keyplan* piano nobile, *hotspot* relativi alle immagini sferiche interne utilizzate per il Virtual Tour.

5.5.1.4. Inserimento controlli ed elementi interattivi

L'esperienza utente interattiva è stata realizzata tramite l'inserimento dei seguenti elementi:

1. Testi 3D che indicano il nome di ognuna delle sale del piano nobile
2. Controllo di riproduzione dell'audio descrizione per ogni sala
3. Controllo per la visualizzazione o spegnimento delle grafiche
4. Link alla pagina web di approfondimento per acquisire maggiori informazioni descrittive sulle sale e sulle decorazioni
5. Portali per la navigazione tra panorami (sia per lo spostamento tra le sale che per navigare dalle finestre nei panorami aerei)

L'uso di questi controlli è reso possibile attraverso il *click* del mouse (in caso di navigazione da computer), tramite tocco (in caso di utilizzo di smartphone/tablet), attraverso lo sguardo (nel caso di *Head Mounted Display*). In particolare, l'esperienza in realtà virtuale permette concentrando lo sguardo su questi punti di leggere le informazioni relative e attivare le funzioni previste dai differenti pulsanti anche se, allo stato attuale, alcuni controlli non risultano compatibili con tutti i visori. Sono stati riscontrati problemi con la riproduzione audio con i dispositivi mobili *Apple* (iphone/ipad) basati su sistema operativo *IOS*.



Controllo audio



Approfondimenti
online



Portale navigazione
panorami



Controllo video

Fig. 411. Torino, *Castello del Valentino*, *keyplan* piano nobile, *hotspot* relativi alle immagini sferiche interne utilizzate per il Virtual Tour.

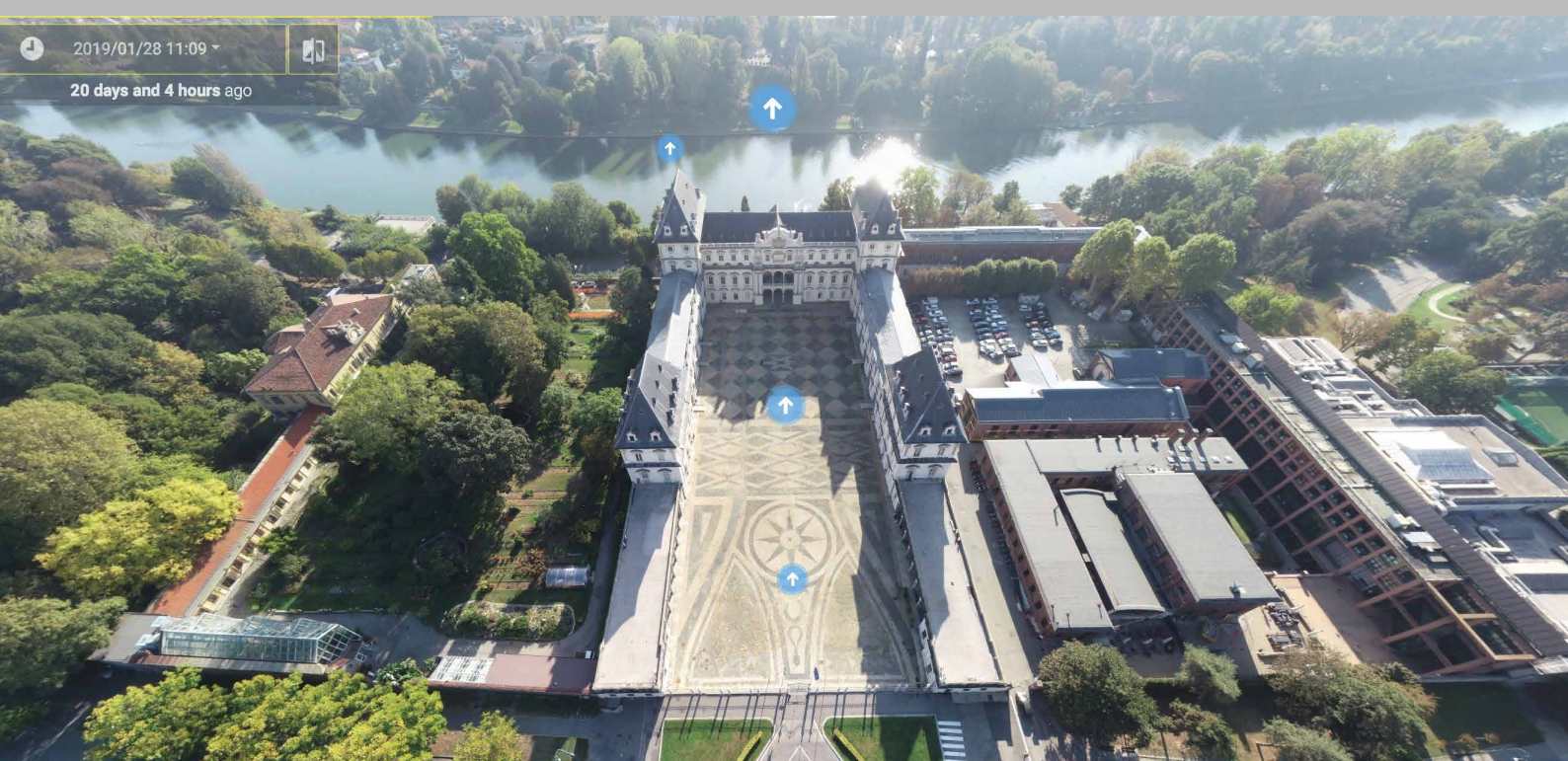


Fig. 412. Torino, *Castello del Valentino*, tre esempi di panorami sferici esterni realizzato da UAV ed inseriti nel Virtual Tour realizzato.

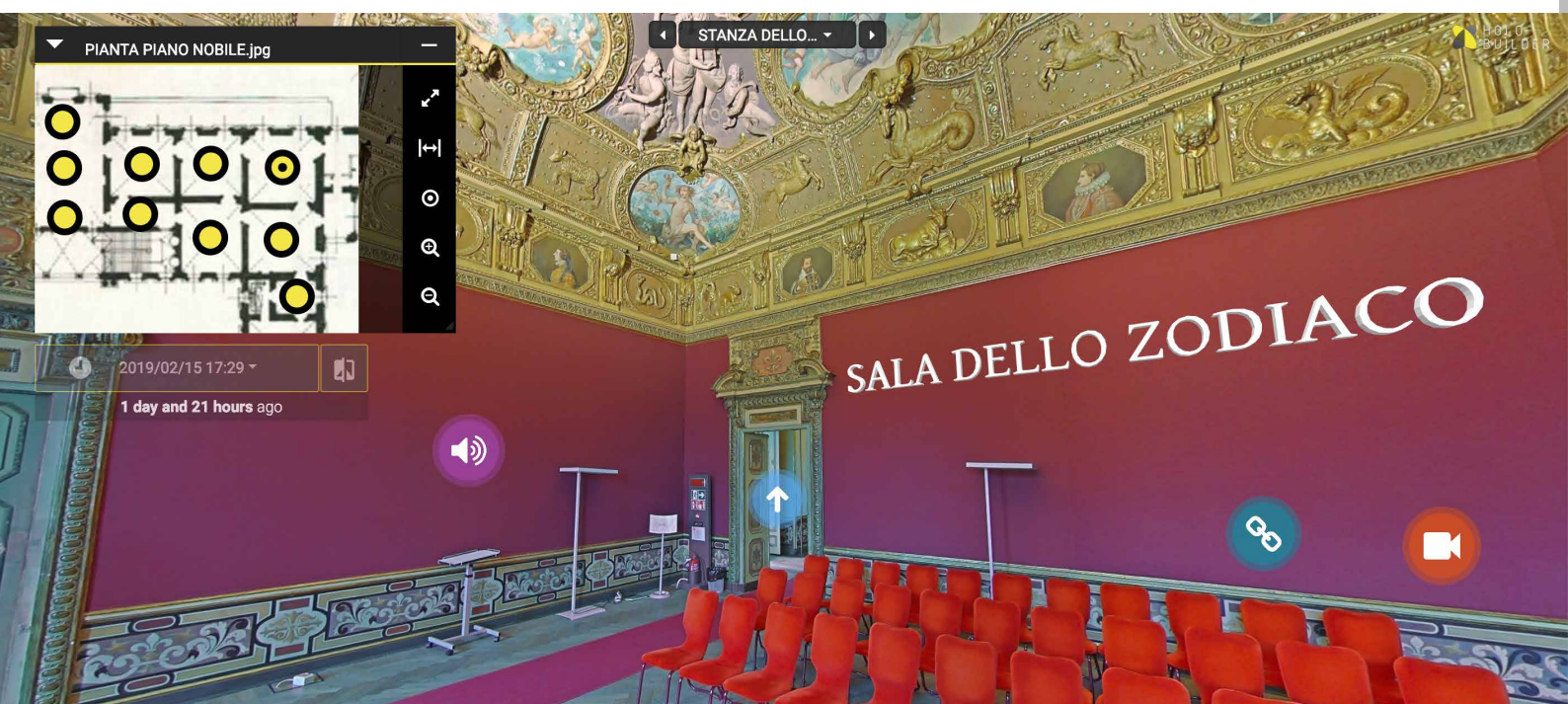


Fig. 413. Torino, *Castello del Valentino*, viste di tra ambienti interni del piano nobile inseriti nel Virtual Tour realizzato.

5.5.2. Applicazioni di Virtual Reality su modelli 3D fotogrammetrici texturizzati.

Sono state testate differenti soluzioni allo scopo di rendere possibile la visualizzazione di modelli tridimensionali generati attraverso l'impiego di immagini sferiche e tradizionali da UAV, per applicazioni di *Virtual Reality*. Nello specifico è stato preso in esame nuovamente il caso studio del *Castello del Valentino* la cui modello è stato generato attraverso l'approccio *Image Based* di immagini tradizionali nadirali e inclinate integrate alle sferiche, come precedentemente descritto.

L'obiettivo è stato quello di fornire la possibilità di visualizzazione immersiva rendendo possibile spostarsi all'interno del modello digitale e la possibilità di utilizzo di informazioni circa i modelli analizzati. Per rendere fruibili i modelli in VR si è optato per il caricamento della *mesh* sul portale web *Sketchfab* anche se sono state testate altri applicativi desktop come ad esempio *Unreal Engine*. La scelta è ricaduta sulla prima soluzione dal momento che è risultata maggiormente fruibile sia da smartphone, tablet che PC permettendo la visualizzazione attraverso un gran numero di visori disponibili in commercio.

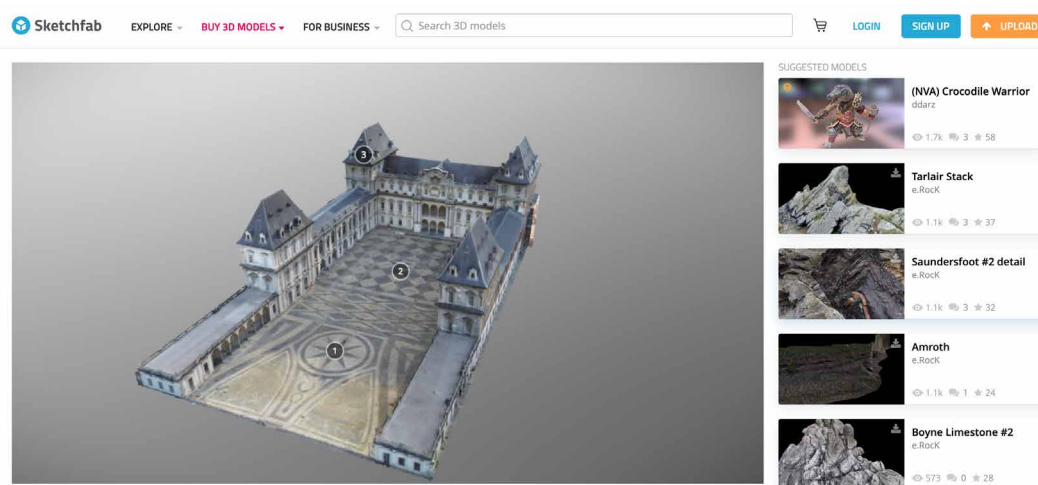


Fig. 414. Visualizzazione del modello tridimensionale texturizzato ottenuto tramite aerofotogrammetria nel portale web di *SketchFab*.

La preparazione del modello ha reso necessaria l'unione dei due processi fotogrammetrici differenti in un modello tridimensionale unico. In particolare, i due modelli si riferiscono alle acquisizioni di dettaglio sui prospetti e territoriali, entrambe realizzate attraverso UAV. Sebbene il processo fotogrammetrico realizzato attraverso l'impiego di immagini sferiche e tradizionali inclinate abbia permesso anche la ricostruzione delle geometrie 3D degli alzati, le elaborazioni sui prospetti, sviluppate grazie ad apposite acquisizioni possedevano un dettaglio ed una definizione di ricostruzione migliore. Per questo motivo, dopo avere unito in un solo progetto tutte le immagini ed esportato le relative nuvole di punti, queste sono state importate nel software esterno *Hexagon 3D Reshaper*, attraverso il quale è stata effettuata una segmentazione manuale (ovvero una suddivisione dei punti) per utilizzare le porzioni di nuvola relativa alle acquisizioni sui prospetti per gli alzati e quella relativa alle acquisizioni a più alta quota per le porzioni delle coperture. Dopo avere eliminato le aree superflue delle nuvole di punti queste sono state unite in una sola che è stata riportata all'interno del software fotogrammetrico. A partire dalla nuova nuvola di punti è stata generata la mesh e su questa sono state proiettate le immagini per ottenere di un mo-

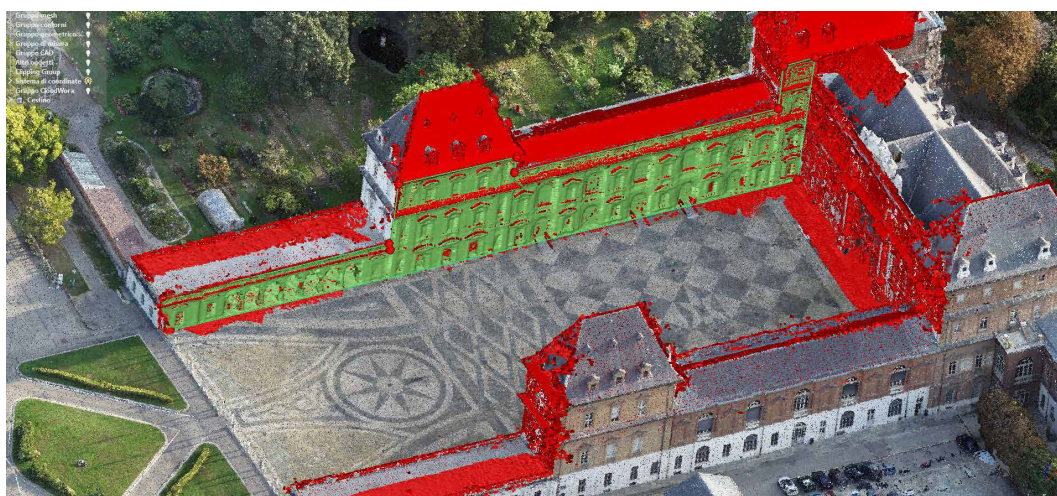


Fig. 415. Torino, *Castello del Valentino*, Nuvole di punti delle differenti acquisizioni sovrapposte. In rosso la nuvola di punti per le acquisizioni sui prospetti, in verde le aree della nuvola di punti realizzata dalle acquisizioni aeree generali da rimuovere.

dello texturizzato. Grazie a questo processo il modello ottenuto possiede un'elevata definizione geometrica anche per le aree dei prospetti. Il modello finale è quindi l'unione di due modelli differenti che sono stati posti all'interno dello stesso sistema di riferimento. Il caricamento del modello texturizzato ha reso necessaria una decimazione importante della mesh ovvero una riduzione del numero di triangoli che la compongono per permettere una visualizzazione più agevole anche da dispositivi mobili. Questo processo ha portato alla riduzione di circa il 50% dei triangoli di partenza. Questo ha ov-

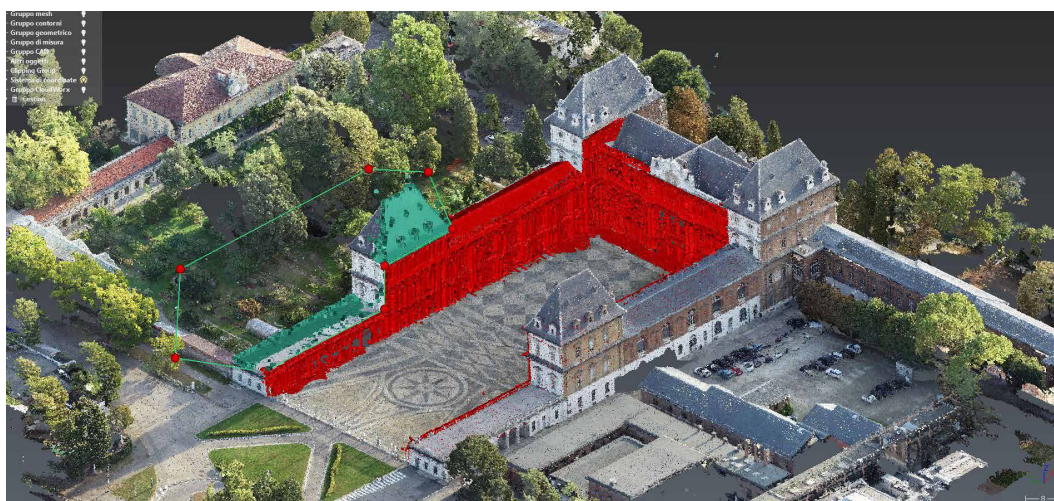


Fig. 416. Torino, *Castello del Valentino*, Nuvole di punti delle differenti acquisizioni sovrapposte. In rosso la nuvola di punti per le acquisizioni sui prospetti, in verde selezionate le porzioni di copertura ridondanti da eliminare dalla nuvola dei prospetti.

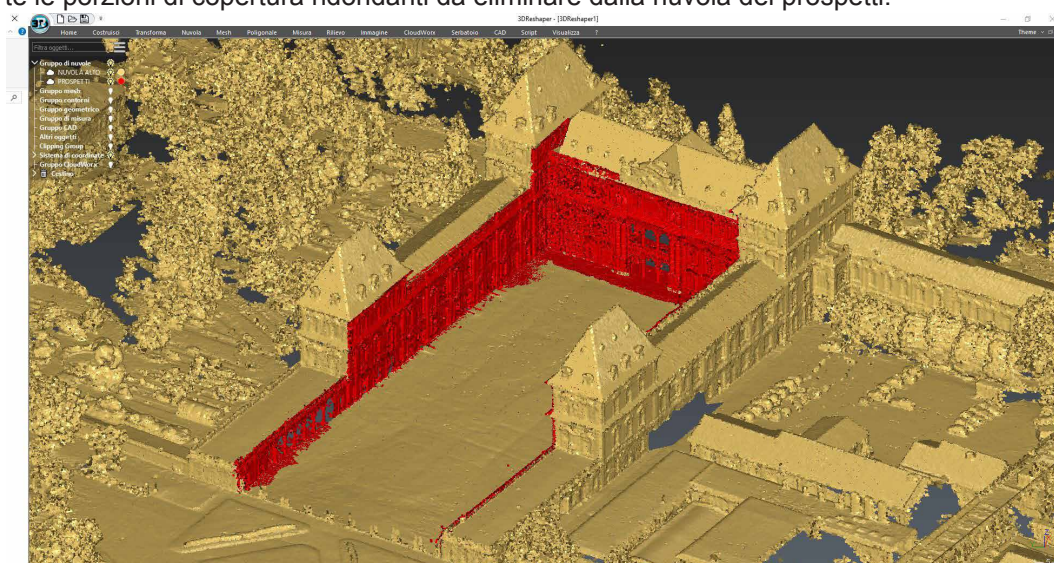


Fig. 417. Torino, *Castello del Valentino*, Nuvole di punti; in rosso le porzioni di nuvola di punti generata dalle acquisizioni sui prospetti, in giallo le porzioni mantenute dalla nuvola di punti generale.

viamente peggiorato la definizione del modello in favore di una più agevole visualizzazione. Dopo il caricamento del modello è stato possibile andare a definire la posizione base dell'osservatore e la sua altezza rispetto al piano di calpestio per la visualizzazione in VR oltre che andare l'inserimento di una serie di annotazioni e viste predefinite. Utilizzando l'*HTC Vive* risulta possibile spostarsi all'interno dello spazio modello utilizzando i *controllers* o interagendo con la tastiera del dispositivo. Attraverso i *controllers* è altresì possibile scalare il modello nello spazio. Uno dei vantaggi rappresentati

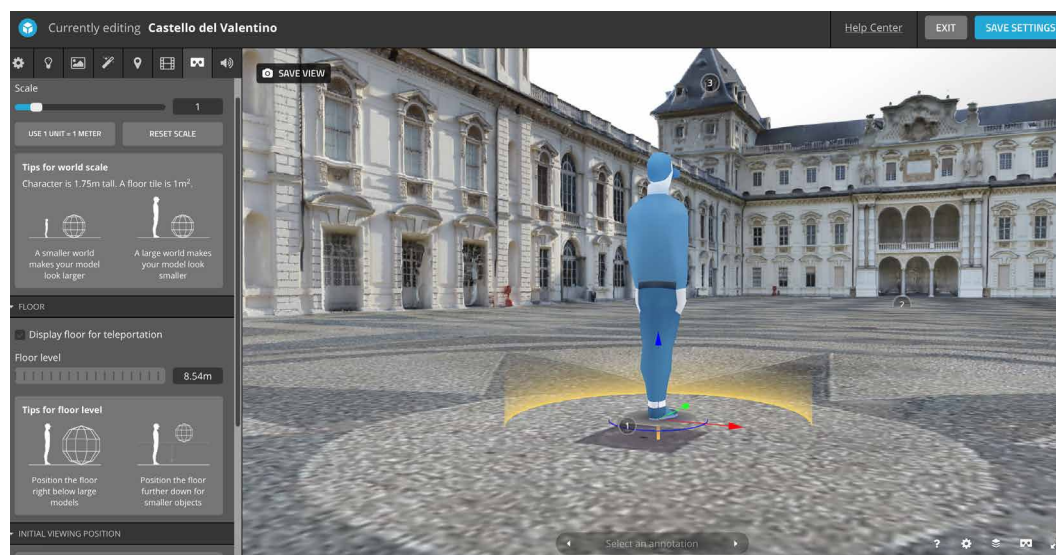


Fig. 418. Torino, *Castello del Valentino*, preparazione del modello alla *Virtual Reality* attraverso il settaggio dell'altezza dell'osservatore predefinita.

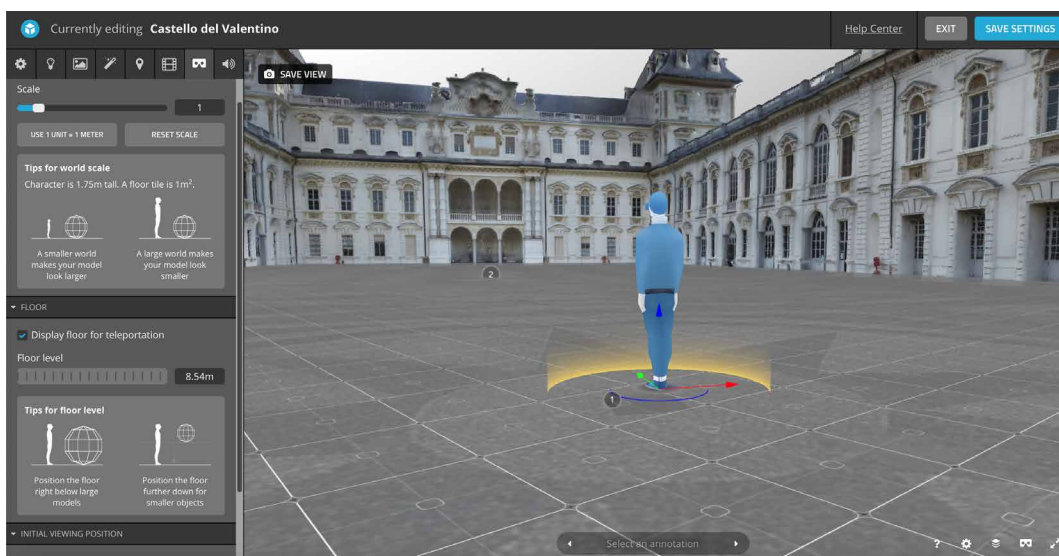


Fig. 419. Torino, *Castello del Valentino*, preparazione del modello alla *Virtual Reality* impostazione manuale del livello del piano di calpestio.



Fig. 420. Visualizzazione della *mesh* texturizzata da un normale computer portatile.

di questa soluzione di visualizzazione è rappresentata dal fatto di essere multi-piattaforma per permettere l'inserimento di informazioni a supporto delle viste tridimensionali per una migliore comprensione dell'oggetto. L'infografica permette, infatti, di associare alla visualizzazione informazioni sul



Fig. 421. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione informazioni storiche sul modello del fotogrammetrico .

modello, stabilire viste personalizzate e percorsi di visita. Il prodotto finito ha integrato sul modello le informazioni storiche, ha illustrato le elaborazioni svolte nel corso di questo lavoro e reso possibile la presentazione delle analisi svolte in modo interattivo. Per andare ad inserire queste informazioni

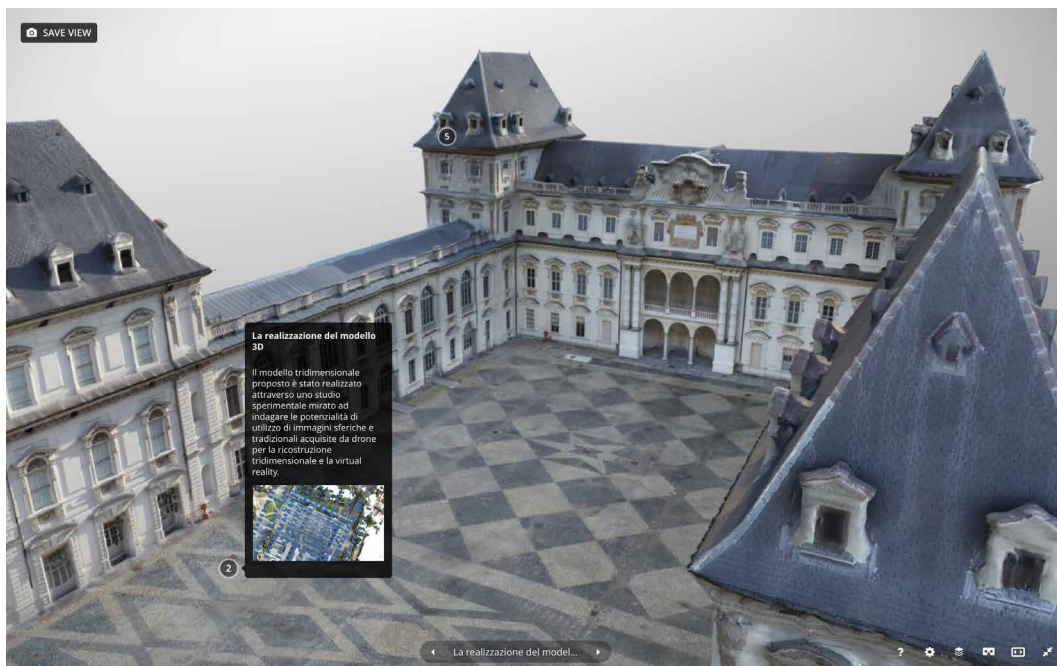


Fig. 422. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione informazioni sul processo di realizzazione della mesh fotogrammetrica.

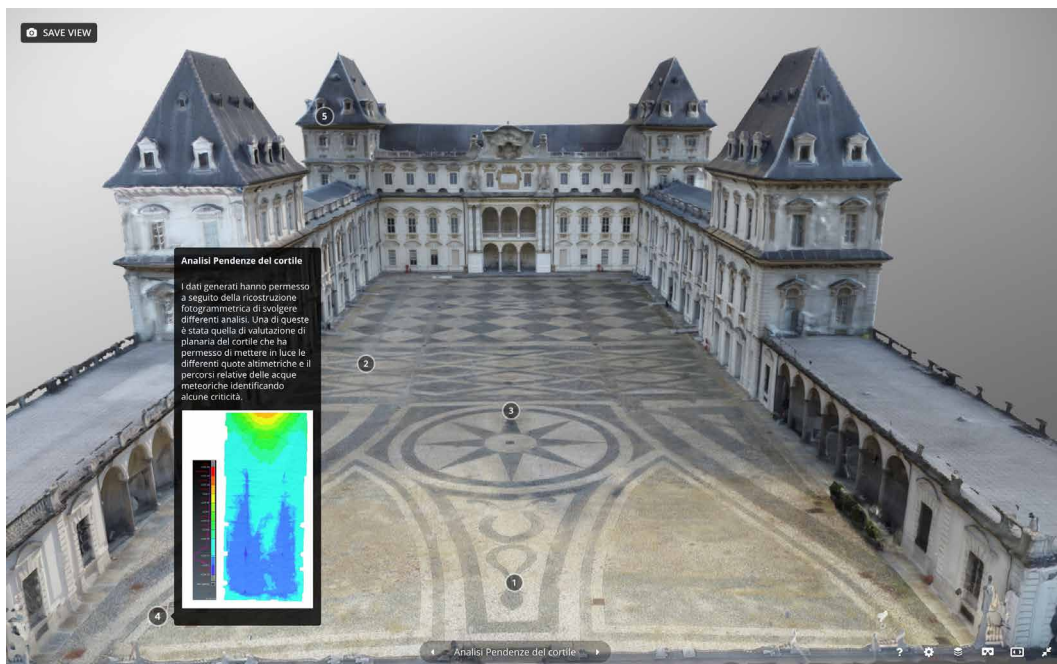


Fig. 423. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione informazioni sull'analisi della planarità della pavimentazione del cortile.

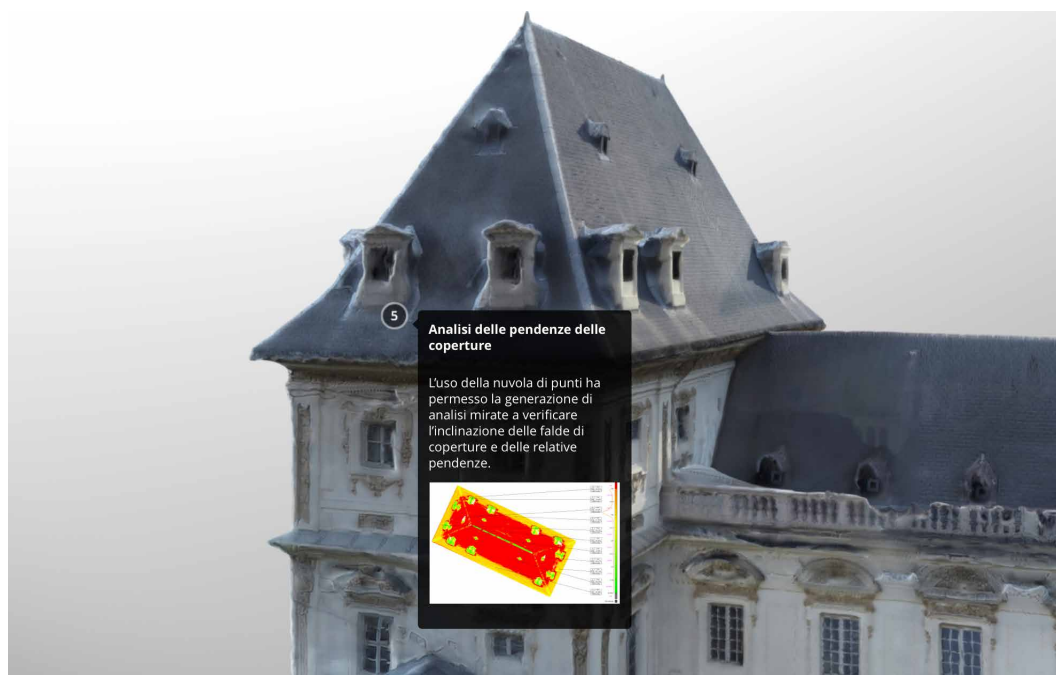


Fig. 424. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione informazioni sull'analisi della planarità della pavimentazione del cortile.

grafiche è stato necessario integrare immagini attraverso l'utilizzo di semplici righe di codice *HTML* di cui si propone un esempio:

```
<img src= "Link_immagine" alt= "Nome_immagine">
```

Una volta create le grafiche sono stati eseguite prove di utilizzo su diverse tipologie di dispositivi per verificarne il funzionamento. Al fine di realizzare una visualizzazione intuitiva del modello sono stati inseriti all'interno dell'infografica *link* per l'approfondimento del tema trattato.

5.5.3. Limiti e potenzialità del prodotto finito

La potenzialità offerta dalla visualizzazione di modelli 3D attraverso l'utilizzo di visualizzatori online multi-piattaforma è sicuramente un tema di grande interesse. Le applicazioni spaziano da attività didattiche fino a quelle ludiche. La fotogrammetria *UAV* e in particolar modo l'impiego di immagini sferiche garantisce la possibilità di realizzazione di accurati modelli navigabili alla

scala urbana offrendo una navigazione interattiva dei modelli prima d'ora impossibile.

I limiti della soluzione sono, allo stato attuale, quelli legati alla complessità delle elaborazioni fotogrammetriche e la necessità di gestione di una grande mole di dati immagine, oltre che l'impossibilità di visualizzare in alcuni visori VR correttamente le infografiche, problema che sicuramente verrà risolto nel futuro più prossimo.

5.5.3.1. Realizzazione di filmati sferici arei immersivi

In ultimo è stata testata un applicazione di filmato sferico per la visualizzazione in realtà aumentata. Fino ad ora in questa tesi sono state prese in considerazione solamente le immagini sferiche, tuttavia, analogamente a quanto avviene per queste ultime è possibile acquisire e generare video a 360° attraverso l'unione dei frame *fisheye* generate dalle camere della Go-Pro Fusion. Sono stati infatti realizzati appositi voli sui casi Studio del Castello del Valentino e sul Borgo Medievale per l'acquisizione di questo tipo di filmati. Per l'acquisizione di questi filmati sono stati eseguiti voli manuali e automatici. In particolare, l'utilizzo di voli automatici ha permesso di miglio-



Fig. 425. Torino, *Borgo Medievale*, pianificazione dei voli automatici attraverso il *Mission Hub* di *LitchiApp* per l'acquisizione di filmati 360°

rare nettamente la fluidità dei filmati grazie alla precisione di controllo permesso dalla centralina di volo per la regolazione della velocità di crociera. Le prove di volo automatico prima di essere condotte sul caso studio sono state testate in superficie di campo volo dove apposite sperimentazioni sono eseguite per valutare l’affidabilità del sistema. Anche durante il volo automatico il drone è stato tenuto sotto controllo in ogni momento attraverso la stazione di terra per monitorarne lo stato. Per la pianificazione del

Units

Metric

Imperial

Heading Mode

Auto (TNW)

Initial (ID)

Manual (UC)

Custom (WD)

Finish Action

None

RTH

Land

Back to 1

Reverse

Path Mode

Straight Lines

Curved Turns

Cruising Speed

15.0km/h

Max Flight Speed

28.8km/h

Default Curve Size

75%

Default Gimbal Pitch Mode

Disabled

Focus POI

Interpolate

Show Discover Missions

☒

Fig. 426. Torino, *Borgo Medievale*, settaggio dei parametri di volo automatico per l’acquisizione di filmati 360° attraverso il *Mission Hub* di *LitchiApp*.

Delete

POI 1 SETTINGS

Latitude

45.048845

Longitude

7.685037

Altitude

1m

Above Ground

☐

<

>

Delete

Insert

WAYPOINT 9 SETTINGS

Latitude

45.048411

Longitude

7.684931

Altitude

30m

Above Ground

☐

Speed

Cruising

Curve Size

11m

Heading

10°

POI

1

Gimbal Pitch

Disabled

Focus POI

Interpolate

Fig. 427. Torino, *Borgo Medievale*, settaggio dei waypoint e punti di orientamento per volo automatico per l’acquisizione di filmati 360° attraverso il *Mission Hub* di *LitchiApp*.

volo automatico è stato utilizzato l'applicativo *Litchi* tramite l'inserimento di *waypoint* e la realizzazione di appositi percorsi di volo.

Il processo di unione dei *frame* ha richiesto diverse ore di elaborazione e generato video ad alta definizione in 5.2K ProRes (5120x2560 px a 29.97p). La gestione dei filmati sferici a questa qualità è risultata particolarmente complessa dal momento che, pochi minuti di filmato occupano a questa risoluzione svariati *GigaByte* che aumentano in modo esponenziale in fase di montaggio a causa della generazione di render per la visualizzazione degli effetti applicati ai filmati. Il software proprietario *GoPro Fusion Studio* permette di selezionare differenti qualità per l'esportazione sia relativamente alla dimensione (1080/4K/5.2K) che per *codec* di esportazione. La qualità 5.2K è possibile solo attraverso la codifica *ProRes* o *Cineform '422 High'*, mentre risoluzioni inferiori come il 4K/3K/2K sono possibili con codifica di compressione *H264*.

Per dare un'idea in termini numerici del peso di queste differenti video si può osservare in tabella una comparazione relativa ad uno stesso filmato acquistato per questa tesi attraverso differenti codifiche.

FILMATO	Durata	5.2K ProRes	4K H.264
Castello del Valentino	12.41 min	85.45 [GB]	3.39 [GB]
Borgo Medievale	7.11 min	47.72 [GB]	1.81 [GB]

Fig. 428. Pesi dei file in termini di *GigaByte* per differenti risoluzioni e codifiche di filmato.

Il montaggio di questi filmati è stato eseguito attraverso il software di editing professionale *Final Cut Pro X* su dispositivo *Apple* pertanto si è scelto di lavorare in 5.2K Pro Res. Di seguito si illustrano alcune linee guida consiglia-

te per una più agevole gestione di queste tipologie di dati nel caso si decida di lavora senza alcuna compressione alla migliore risoluzione:

1. Utilizzo di hard disk allo stato solido esterno (SSD) su cui andare ad archiviare i filmati utilizzati.
2. Utilizzo di hard disk allo stato solido interno (SSD) su cui è installato il software di montaggio
3. Conversione dei filmati in *"Proxy"*, ovvero filmati compressi generati appositamente per semplificare la fase di montaggio. Il processo di editing avviene su questi file più leggeri a bassa qualità e solo in fase di esportazione questi sono sostituiti dai filmati originali di cui sono la copia. Questi file permettono un notevole riduzione delle tempistiche necessarie per il montaggio che risulta quindi possibile anche da *laptop*.
4. Eseguire il rendering delle sole parti necessarie per la visualizzazione.

Si segnala inoltre che è importante valutare la compatibilità della qualità 5.2K con il dispositivo di visualizzazione.

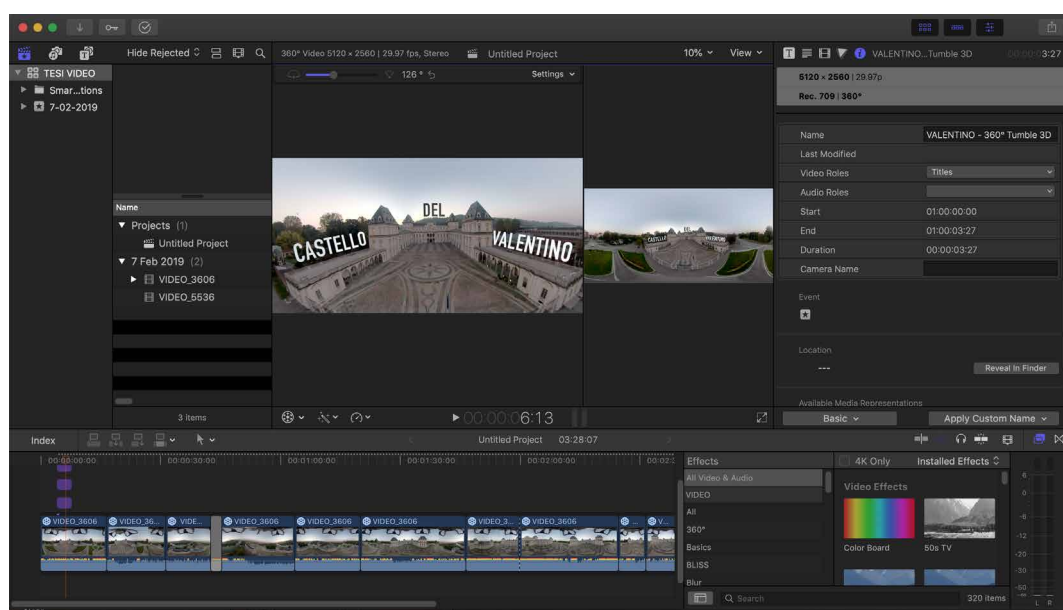


Fig. 429. Schermata relativa al montaggio dei video sferici generati dalla *GoPro Fusion* attraverso *Final Cut Pro X*.

5.5.3.2. Correzioni grafiche e *Color Correction*

Una fase molto importante della fase di editing è stata quella della *color correction*, processo attraverso il quale si è intervenuto sulle esposizioni, sulla saturazione e sulla gestione dei colori. Questi processi hanno permesso di effettuare operazioni come il bilanciamento del bianco e la regolazione dei colori. Inoltre è stata eseguita un'operazione mirata alla mascheratura del drone visibile nella porzione alta del filmato dal momento che una delle prerogative era quella di fornire una visualizzazione a sospesa immersiva. La rimozione dell'UAV aumenta la percezione generata dalla vista in realtà virtuale tramite visore *HMD*. Per eseguire la mascheratura sono stati prelevati pixel dalle porzioni di cielo limitrofe da aree campione che, attraverso particolari tecniche di fusione delle immagini, hanno permesso di risultare del tutto invisibili integrandosi perfettamente con la parte di cielo restante.

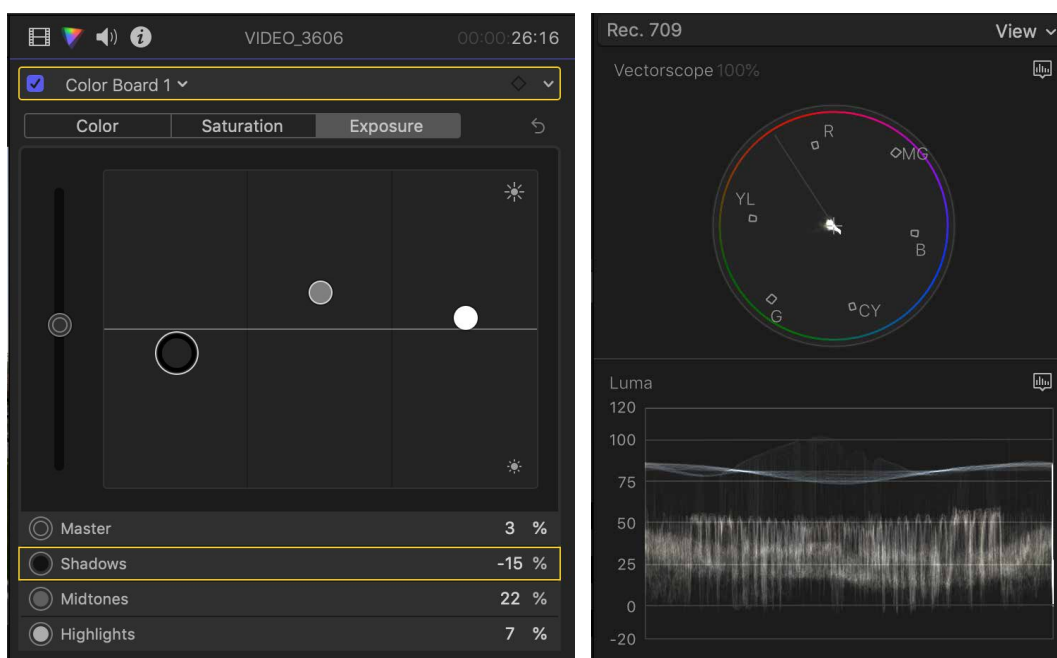
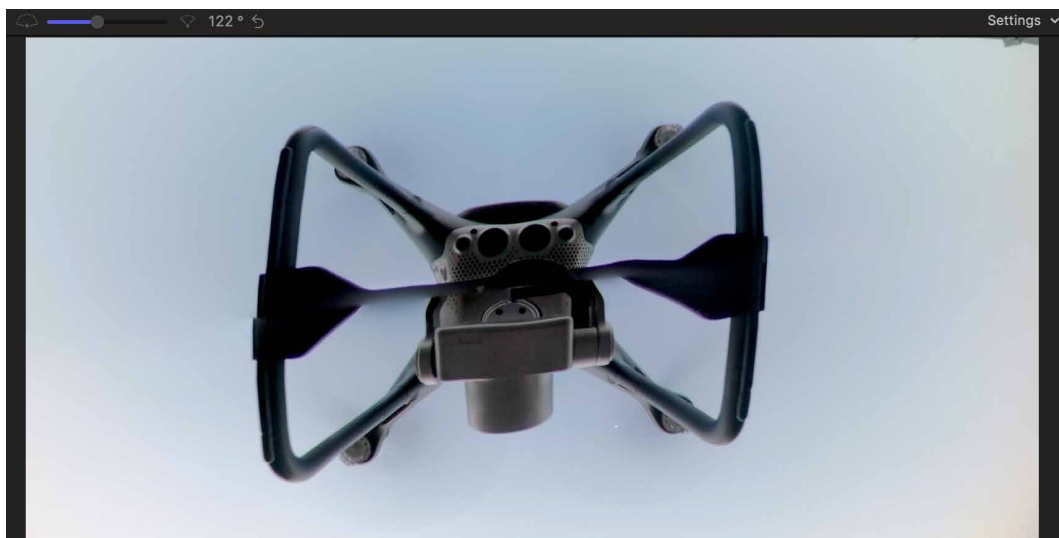


Fig. 430. Schermata relativa al controllo dei colori, saturazione ed esposizione dei video sferici generati dalla *GoPro Fusion* in *Final Cut Pro X*.

PRIMA



DOPO

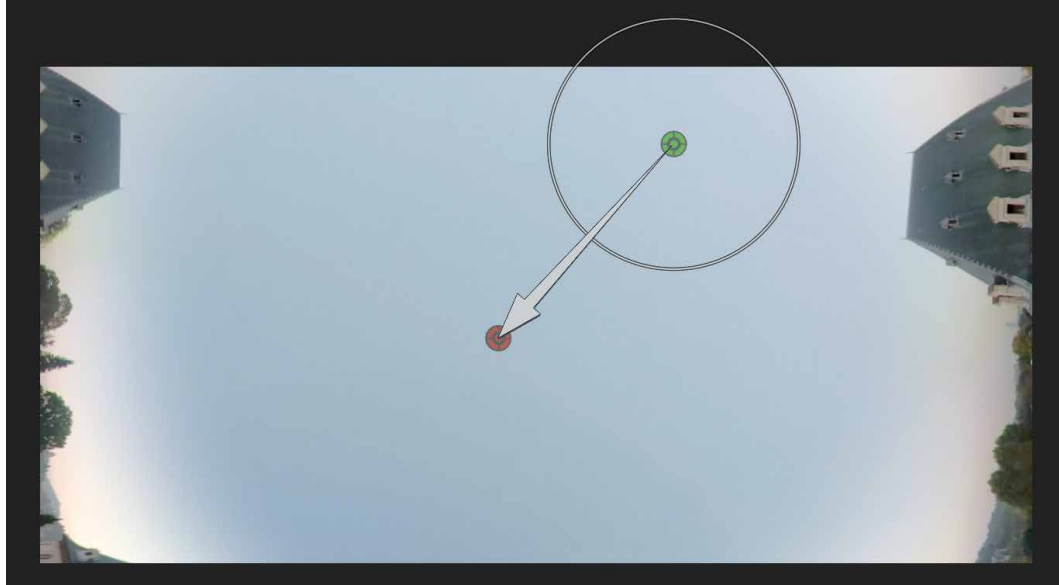


Fig. 431. Mascheratura del drone attraverso strumento *Patch* in *Final Cut Pro X* per la mascheratura del drone nei filmato.



Fig. 432. Settaggio della maschera applicata sul drone attraverso strumento *Patch* in *Final Cut Pro X*.

Note di chiusura

I Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 77(12), 1321-1329.

6. Divulgazione dei risultati su portale web

Al termine di questo percorso di ricerca si è pensato di realizzare un portale web per divulgare i risultati raggiunti in questo lavoro.

Si cercava uno strumento che permettesse la consultazione del materiale realizzato, accessibile da utenza non specializzata al fine di rendere possibile la navigazione dei modelli 3D (realizzati tramite aerofotogrammetria), oltre che la visualizzazione delle differenti applicazioni di realtà virtuale.

Il web rappresenta un ottimo strumento in grado di rendere possibile la divulgazione di contenuti multimediali. L'obiettivo di questa applicazione è stato quello di fornire informazioni divulgative di carattere innovativo, sfruttando la tecnologia delle immagini 360° applicate a droni, sui Beni Culturali in oggetto.

Il portale realizzato è visualizzabile sul sito internet appositamente creato:

www.culturalheritage.it



Fig. 433. Descrizione dell'immagine da inserire

Questo strumento vuole essere un esempio delle nuove possibilità offerte dalla tecnologia studiata in questa tesi che si è dimostrata perfettamente rispondente, oltre alle applicazioni di rilievo metrico, anche per la divulgazione di informazioni permettendo una migliore conoscenza, attraverso gli strumenti proposti, dei Beni Culturali studiati.

Internet abbatte le distanze permettendo la fruizione dei contenuti da qualsiasi parte del mondo, rendendo possibile la conoscenza dei Beni Culturali oggetto di questo studio in modo universale. Lo strumento del *Virtual Tour* Multisensoriale, in particolare, ben si adatta alle finalità turistiche rendendo possibile la visita virtuale in qualunque momento. Non solo. Questo strumento sembra particolarmente indicato in tutti quei casi in cui, per motivi di conservazione dei beni architettonici, la fruizione deve necessariamente essere interdetta. Attraverso questi strumenti non invasivi, è possibile continuare nella divulgazione del sito con costi contenuti. Sono infatti stati utilizzati visualizzatori gratuiti o a prezzi contenuti.

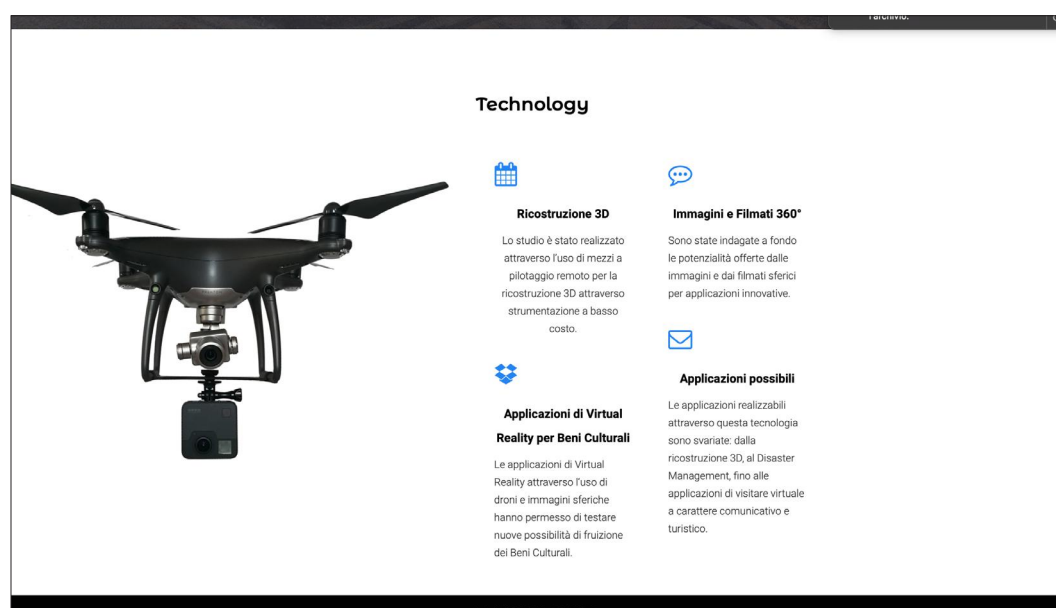


Fig. 434. Descrizione dell'immagine da inserire

La realizzazione di questo portale ha integrato differenti tipologie di informazione a carattere di esempio. In particolare per i due casi studio sono stati presentati tre differenti prodotti:

1. Modello 3D realizzato attraverso aerotogrammetria
2. *Virtual Tour* Multisensoriale
3. Video aerei 360°

Particolare attenzione è stata posta nella possibilità di fruizione di questi dati da differenti piattaforme. Il portale web e i suoi contenuti, infatti, sono visualizzabili da desktop (PC / MAC), smartphone e tablet (ios/android), e hanno dimostrato piena compatibilità con l'uso di visori a basso costo (es. *Google Cardboard*) e da visori HMD professionali (es. *HTC VIVE*).

Per semplicità è possibile raggiungere i contenuti inquadrando i qr code.



www.culturalheritage.it

7. Conclusioni

Al termine degli studi presentati in questa tesi si può affermare che l'utilizzo di camere sferiche multi-sensore su *UAV* è compatibile con le finalità di ricostruzione tridimensionale attraverso le tecniche della fotogrammetria e permette applicazioni di *rapid mapping* utilizzabili in differenti contesti operativi come ad esempio il rilievo del territorio, il *disaster management* e tutti quei casi in cui la rapidità nel reperire informazioni metriche sia condizione fondamentale.

L'attività sperimentale si è concentrata sulla valutazione delle potenzialità offerte da camere *low cost* in grado di acquisire panorami sferici; i primi test condotti hanno permesso di valutare le potenzialità di ricostruzione tridimensionale di immagini *fisheye*. Da queste prove si è compreso che, sebbene sia possibile ottenere modelli tridimensionali accurati a partire da questa tipologia di immagini, sono necessari appositi processi di calibrazione. Questi processi, in particolar modo nel caso di immagini *fisheye* con angoli di campo superiori ai 180°, infatti, risultano particolarmente complessi, e sono argomento di ricerca attuale sul quale la comunità scientifica. Allo stato attuale, sono note diverse criticità dovute al non sufficiente sviluppo software e alla carenza di studi bibliografici specifici. Questi problemi sono stati risolti adattando metodologie di calibrazione di camere tradizionali attraverso l'impiego di specifici *target* di calibrazione.

Successivamente, è stato testato l'impiego di immagini sferiche per la ricostruzione tridimensionale a seguito di processi

di unione delle stesse con appositi software. Questa soluzione si è dimostrata efficace non necessitando di una calibrazione preventiva delle camere dal momento che questa è risolta nel processo di orientamento. Le immagini sferiche sono risultate di più semplice gestione restituendo, allo stesso tempo, validi risultati.

Gli esiti incoraggianti dei test eseguiti da terra hanno consentito di procedere nella ricerca con la prerogativa di testare la possibilità di acquisizioni da drone.

Le ipotesi alla base delle sperimentazioni aeree erano quelle di indagare i benefici rappresentati dall'impiego di questi dati da soli o associati ad immagini tradizionali, oltre che una riduzione significativa delle tempistiche di acquisizione. I test eseguiti in area sperimentale hanno confermato le potenzialità offerte da questa soluzione e messo in luce la possibilità di ottenere buoni risultati sia dall'utilizzo di sole immagini sferiche ma anche dall'integrazione con le immagini tradizionali. Proprio quest'ultima soluzione è quella che ha dato maggiori benefici. L'impiego di immagini sferiche ha, infatti, permesso di allineare correttamente le acquisizioni di immagini inclinate eseguite da camere tradizionali, con una riduzione importante del numero delle stesse rispetto al *workflow* tradizionale. Il sistema sviluppato in laboratorio per la connessione *UAV* camera ha permesso l'acquisizione simultanea multi-sensore consentendo in un solo volo di registrare le informazioni dalla camera 360° e di quella tradizionale.

Il *focus* della ricerca è stato quindi quello di testare i notevoli vantaggi offerti da questa tecnologia per applicazioni urbane sui Beni Culturali. I casi studio hanno permesso di effettuare un

grande numero di test per ottenere ulteriori risultati a supporto delle ipotesi di questa tesi. Sull'area del *Castello del Valentino* a Torino sono state svolte applicazioni di *rapid mapping* dalle quali si evince che le immagini sferiche, in pochi minuti di acquisizione aerea, permettono di generare modelli tridimensionali con grande facilità e con una precisione nell'ordine di 5 cm. Inoltre si è ottenuta nuovamente conferma del fatto che i migliori risultati si ottengono attraverso l'integrazione dati con le immagini tradizionali. Gli studi hanno dimostrato che un volo ad acquisizione simultanea di immagini frame nadirali e sferiche permette di ottenere modelli 3D dai quali è possibile ottenere ortofoto ad alta definizione in tempi brevi.

Ulteriori conferme sui benefici dell'integrazione di questi dati con quelli tradizionali sono apparse evidenti testando un esiguo numero di panorami sferici realizzati da drone attraverso una camera tradizionale (approccio multi-immagine) nelle strette vie del *Borgo Medievale* di Torino. Le immagini sferiche, seppure con alcune criticità, sono apparse adatte per allineare le immagini tradizionali con un notevole miglioramento rappresentato dalla riduzione significativa dei punti di controllo e delle immagini necessarie.

L'integrazione dati si è dimostrata in assoluto la soluzione più valida dal momento che tutti i test eseguiti hanno confermato i benefici ad essa connessi, anche se, per ottenere modelli nel minore tempo possibile, l'uso delle sole immagini sferiche rappresenta un'ottima soluzione.

Le applicazioni di *Virtual Reality* hanno dimostrato come l'uso di immagini e video sferici, in particolare modo nel caso delle applicazioni aeree a bassa quota, rappresenti una innovativa prospettiva futura offrendo nuove possibilità di fruizione, interpretazione e conoscenza dei Beni Culturali, fornendo efficaci strumenti di interazione sugli stessi come ad esempio la possibilità di realizzare *Virtual Tour* multi-sensoriali fruibili in realtà virtuale.

In ultimo è stato realizzato un portale web che raccoglie le differenti applicazioni di realtà virtuale e navigazione dei modelli 3D. Questo strumento è esempio di come le tecniche presentate in questa tesi possano contribuire, oltre che ad applicazioni specializzate, alla fruizione dei contenuti da personale non specializzato con finalità interattive di conoscenza, attraverso innovative tecnologie divulgative di informazioni sui Beni Culturali oggetto di studio.

Questo lavoro di tesi è da considerarsi come un primo passo verso la conoscenza di queste nuove applicazioni delle quali sono state messe in luce le prime potenzialità e criticità. Ulteriori studi saranno necessari per indagare più a fondo i benefici offerti testando altre soluzioni di camere a maggior risoluzione e a differenti fasce di prezzo, nell'ottica di sviluppare ulteriormente i risultati ottenuti in questo lavoro.

Allegati grafici

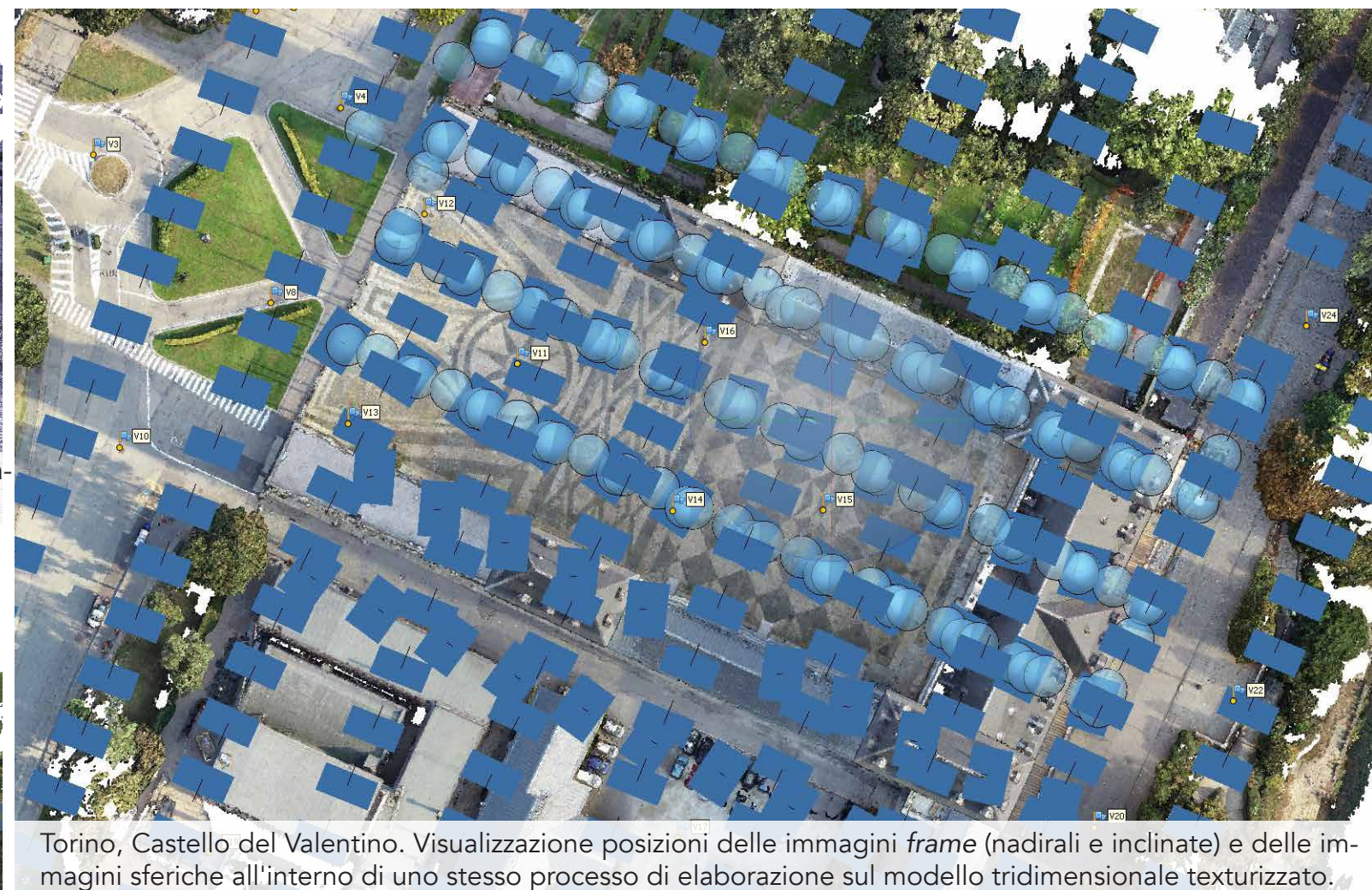
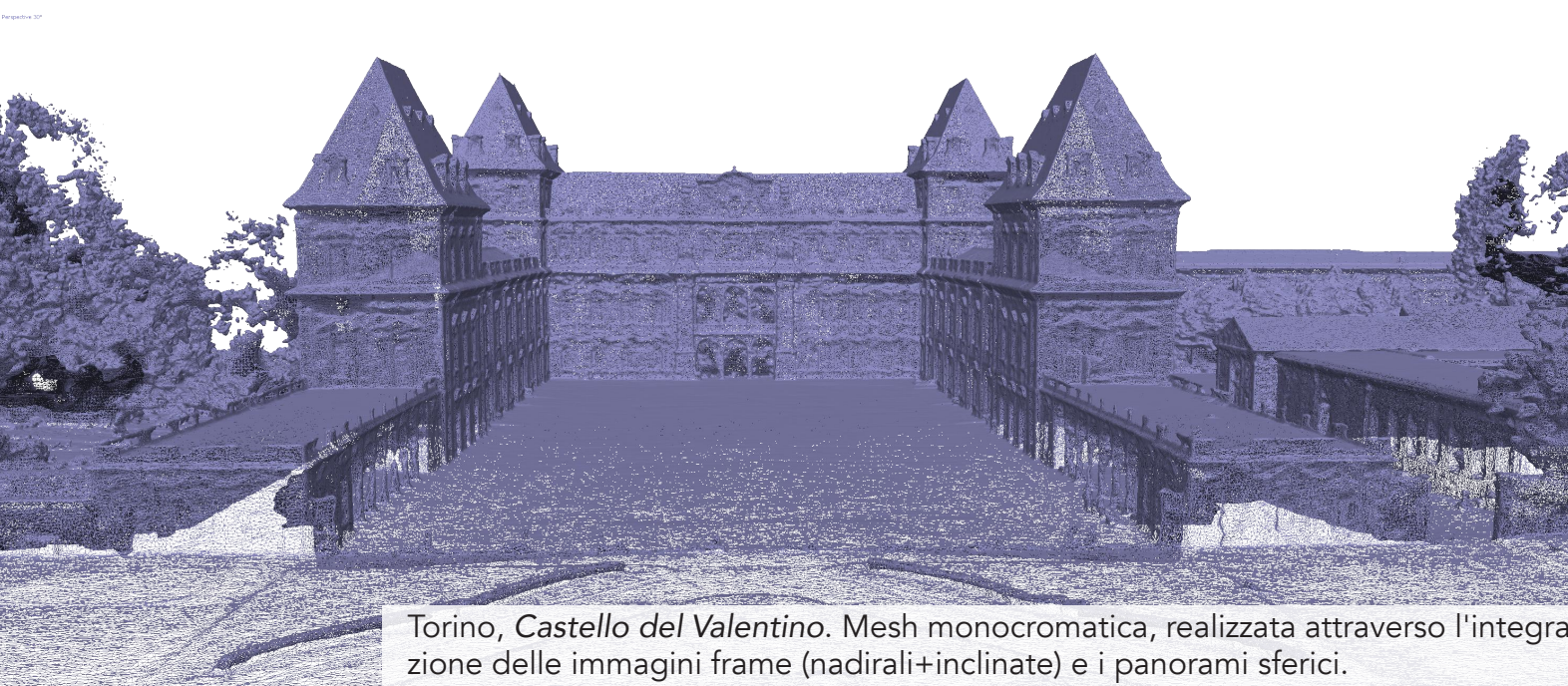
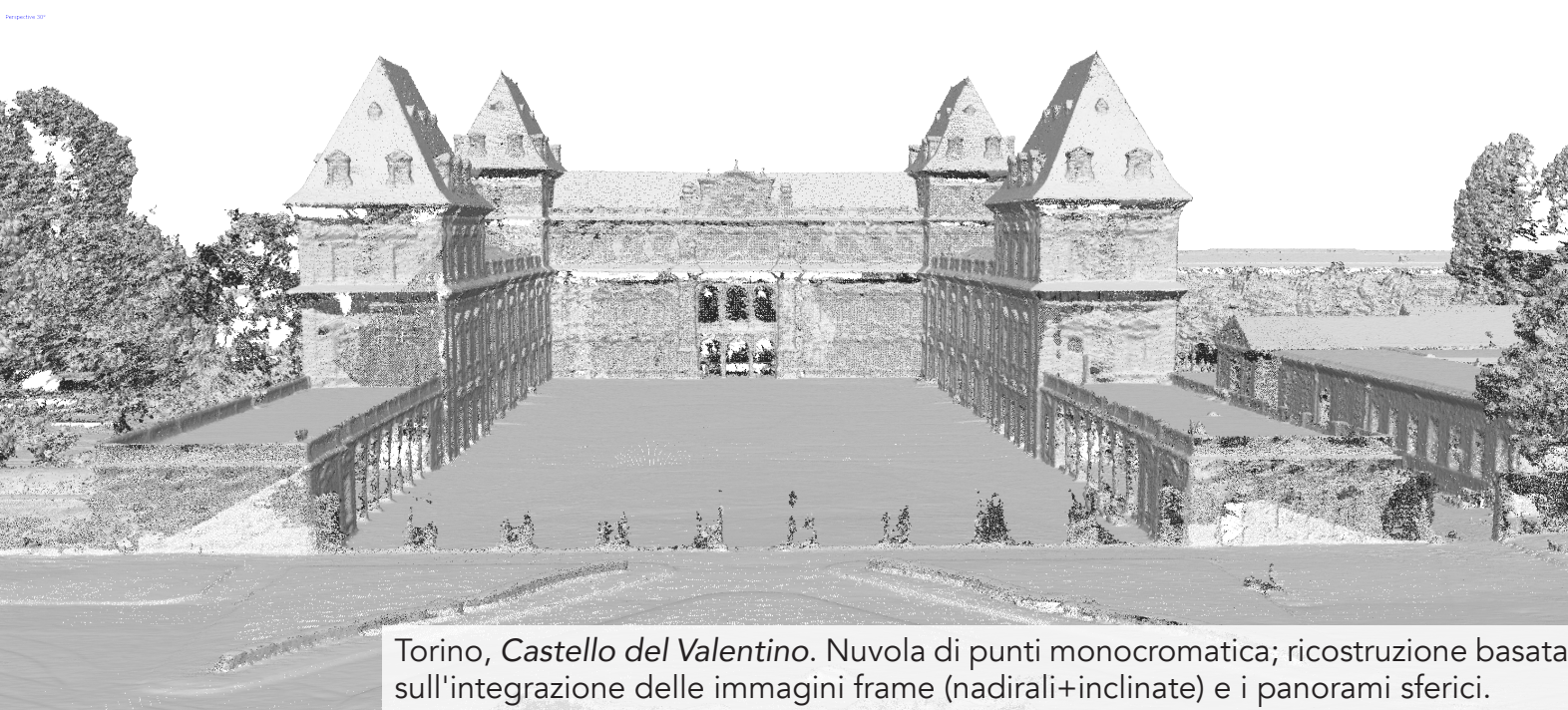


20

0

20

40 m



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

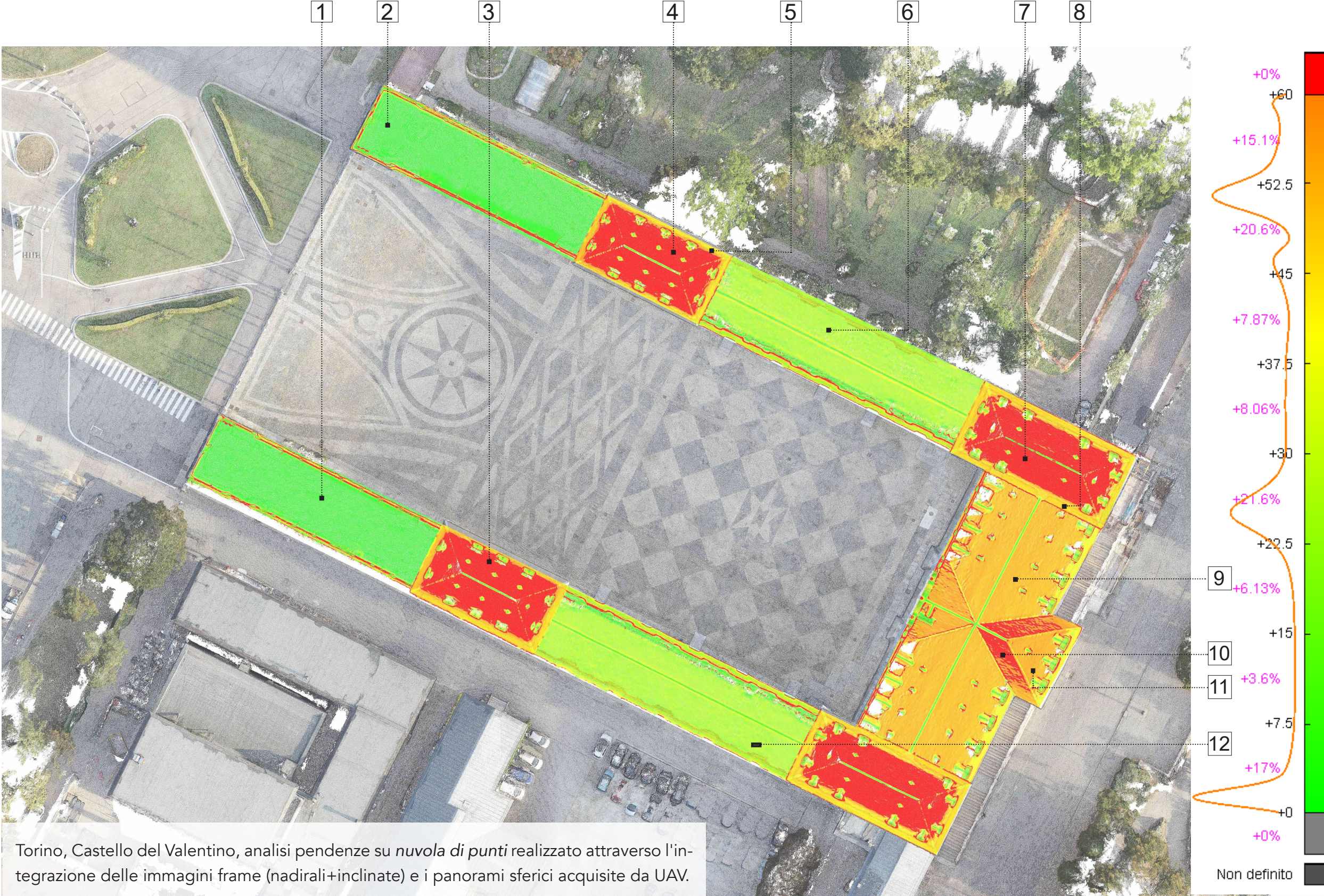
Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi

Analisi pendenze su nuvola di punti del *Castello del Valentino*



Torino, Castello del Valentino, analisi pendenze su *nuvola di punti* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.

1	6.39°
2	0.53°
3	65.03°
4	64.96°
5	45.43°
6	26.13°

7	66.655
8	0.53°
9	65.03°
10	64.96°
11	45.43°
12	26.13°

Quantificazione numerica delle pendenze espresse in gradi per i punti delle coperture del *Castello del Valentino* rappresentati nella figura seguente.



POLITECNICO DI TORINO

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE

Tesi di Laurea Magistrale

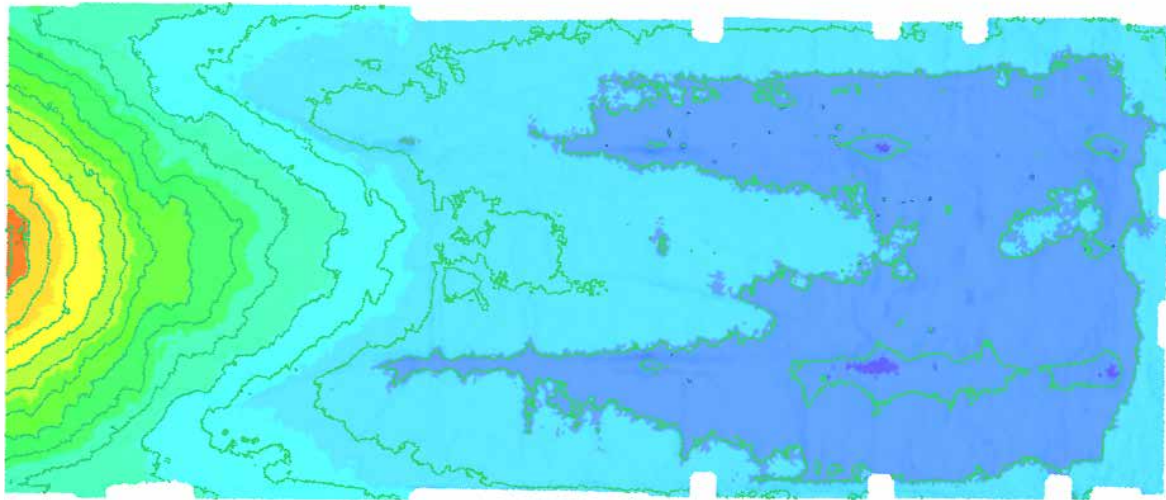
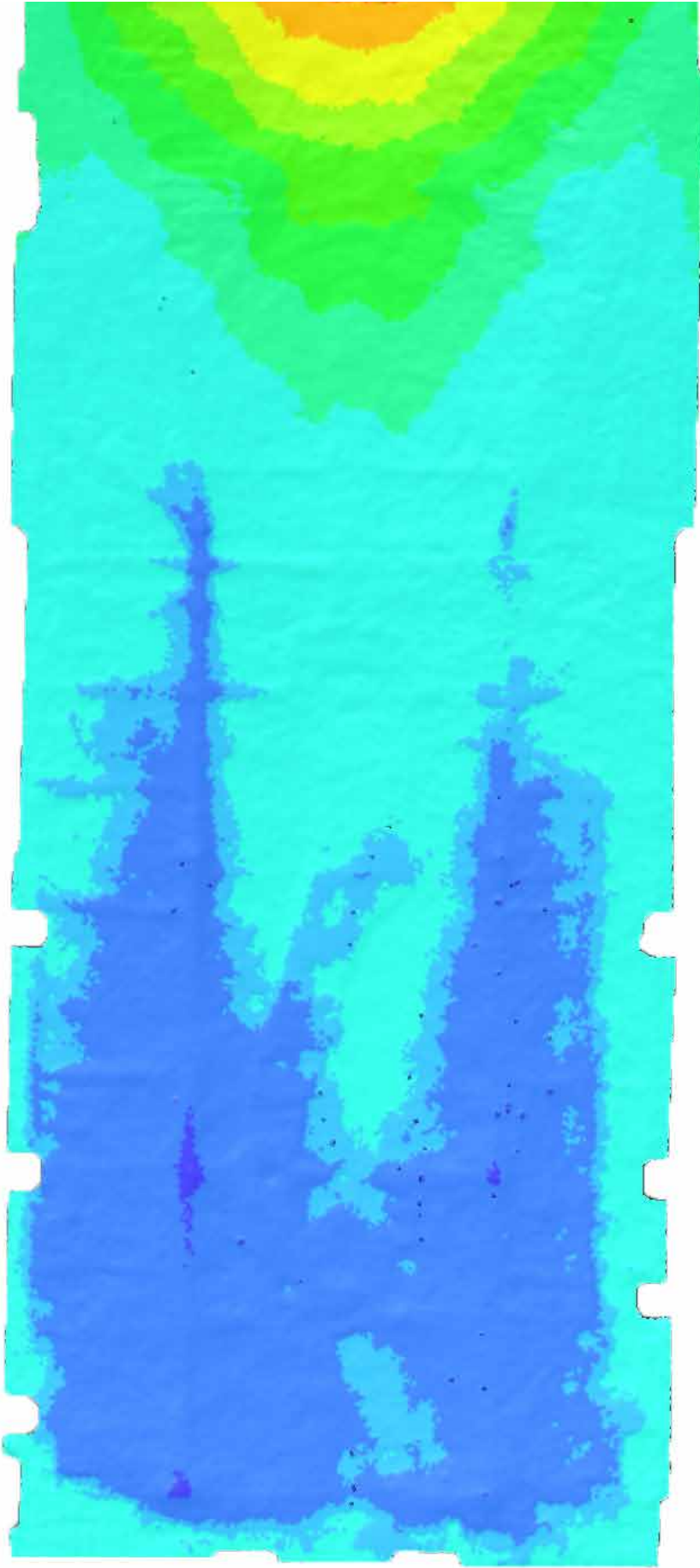
Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi

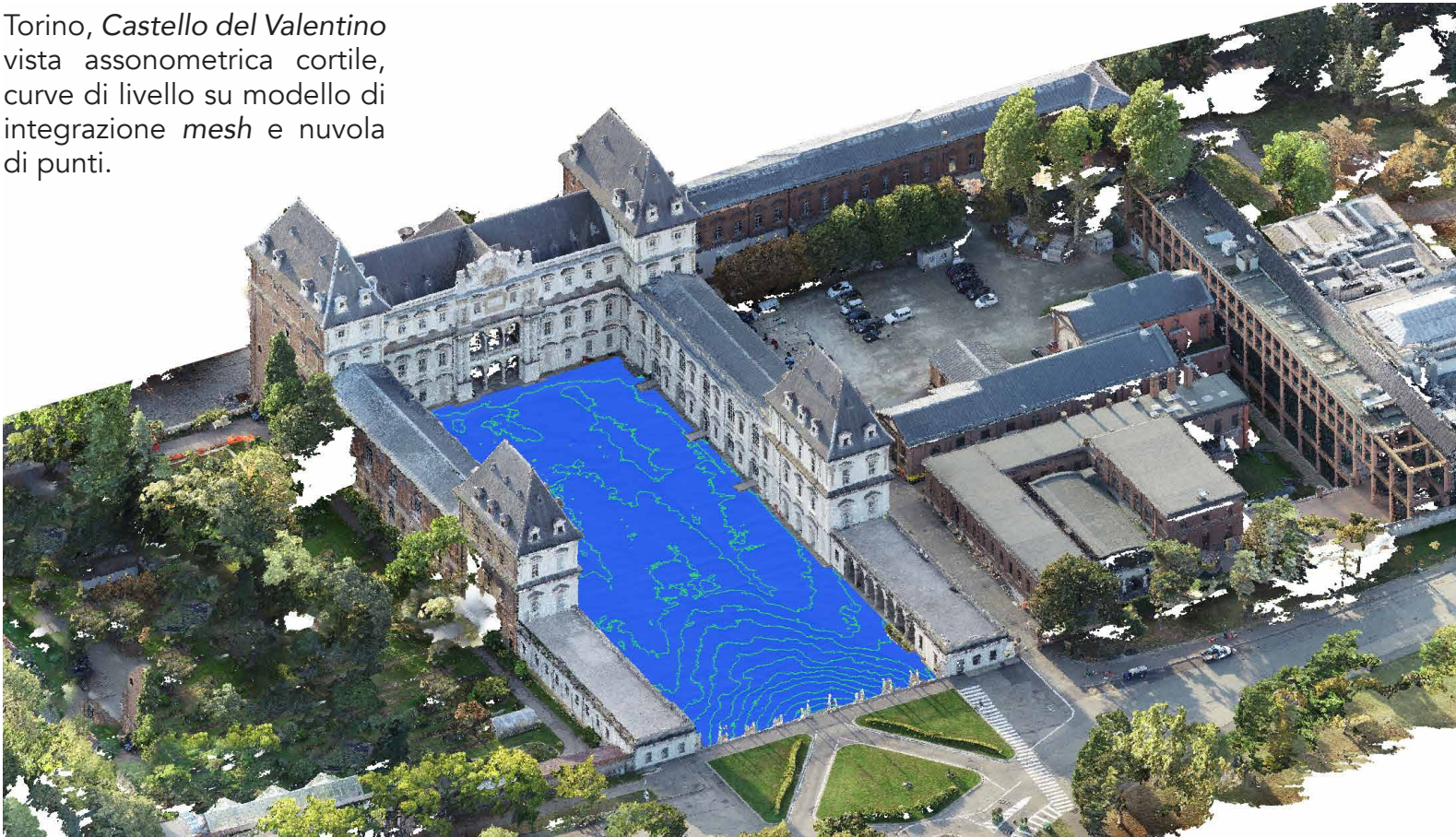
Analisi planarità del cortile del *Castello del Valentino*

Torino, *Castello del Valentino* analisi della planarità del cortile, eseguito sulla mesh ricavata dalla nuvola di punti realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.



Torino, *Castello del Valentino* analisi della planarità del cortile e sovrapposizione delle curve di livello a passo di 0.1 m, eseguito sulla *mesh* ricavata dalla nuvola di punti realizzato attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.

Torino, *Castello del Valentino* vista assonometrica cortile, curve di livello su modello di integrazione *mesh* e nuvola di punti.



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi



Torino, Castello del Valentino. Porzione dell'ortofoto realizzata attraverso fotogrammetria UAV con l'ausilio delle immagini sferiche (fuori scala).



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore

Prof. Filiberto Chiabrando

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi



Torino, Castello del Valentino. Porzione dell'ortofoto realizzata attraverso fotogrammetria UAV con l'ausilio delle immagini sferiche (fuori scala).

Castello del Valentino - Fronte Nord - Ortofoto Quotata

quota 0.00 = 229.37 m



POLITECNICO
DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE

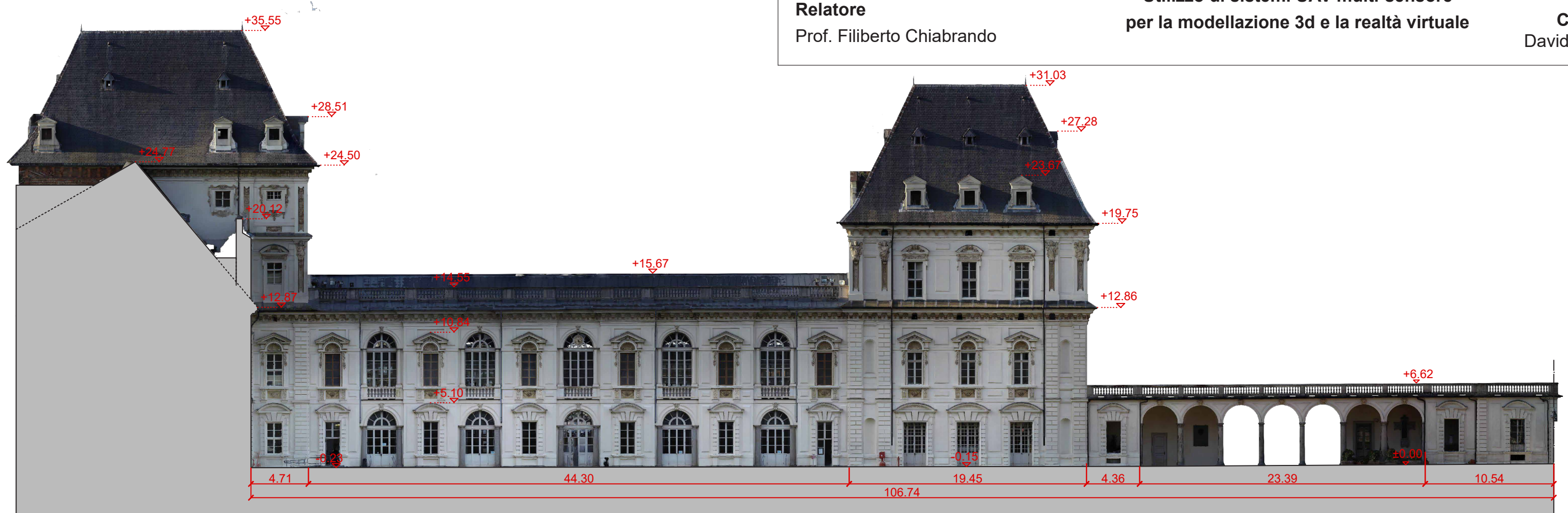
Tesi di Laurea Magistrale

Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale

Relatore

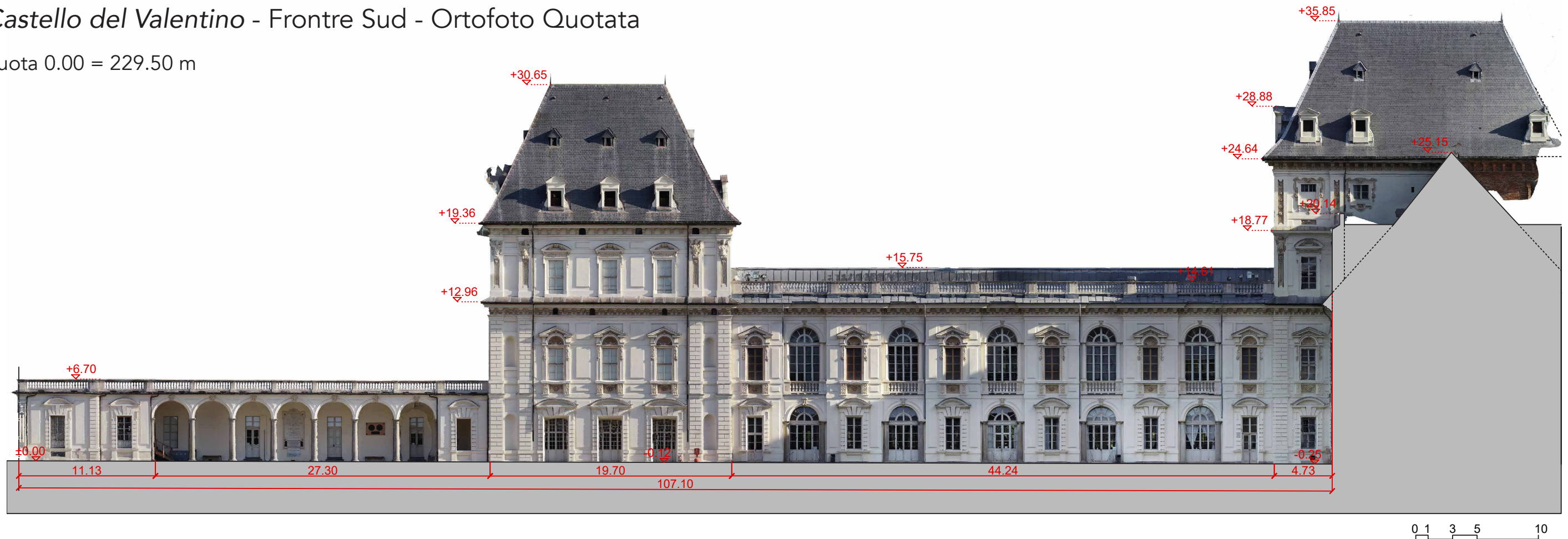
Prof. Filiberto Chiabrando

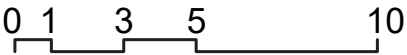
Candidato
Davide Einaudi

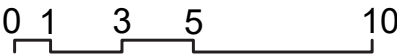
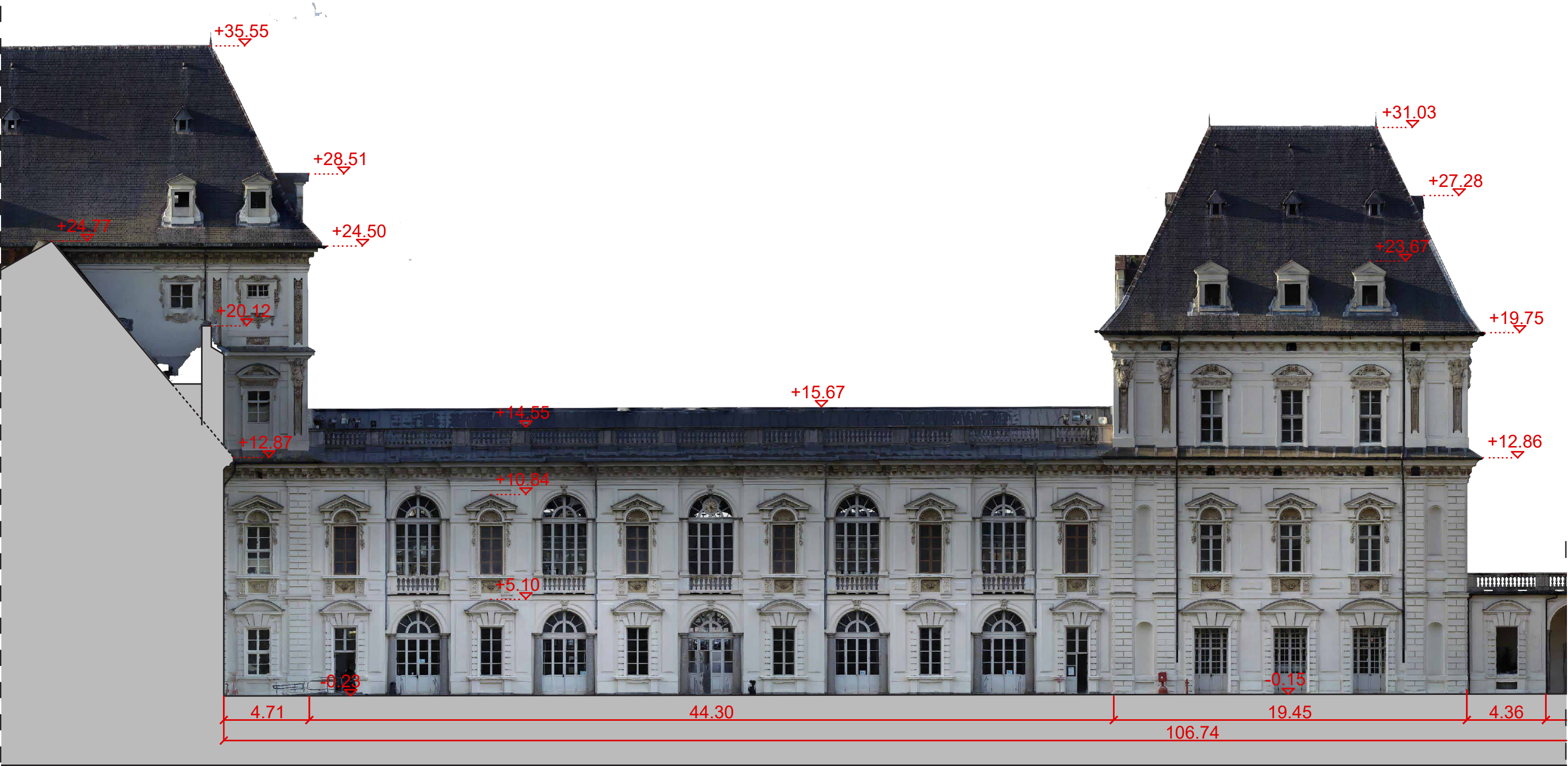


Castello del Valentino - Fronte Sud - Ortofoto Quotata

quota 0.00 = 229.50 m







Castello del Valentino - Fronte EST - Ortofoto Quotata

quota 0.00 = 229.13 m



**POLITECNICO
DI TORINO**

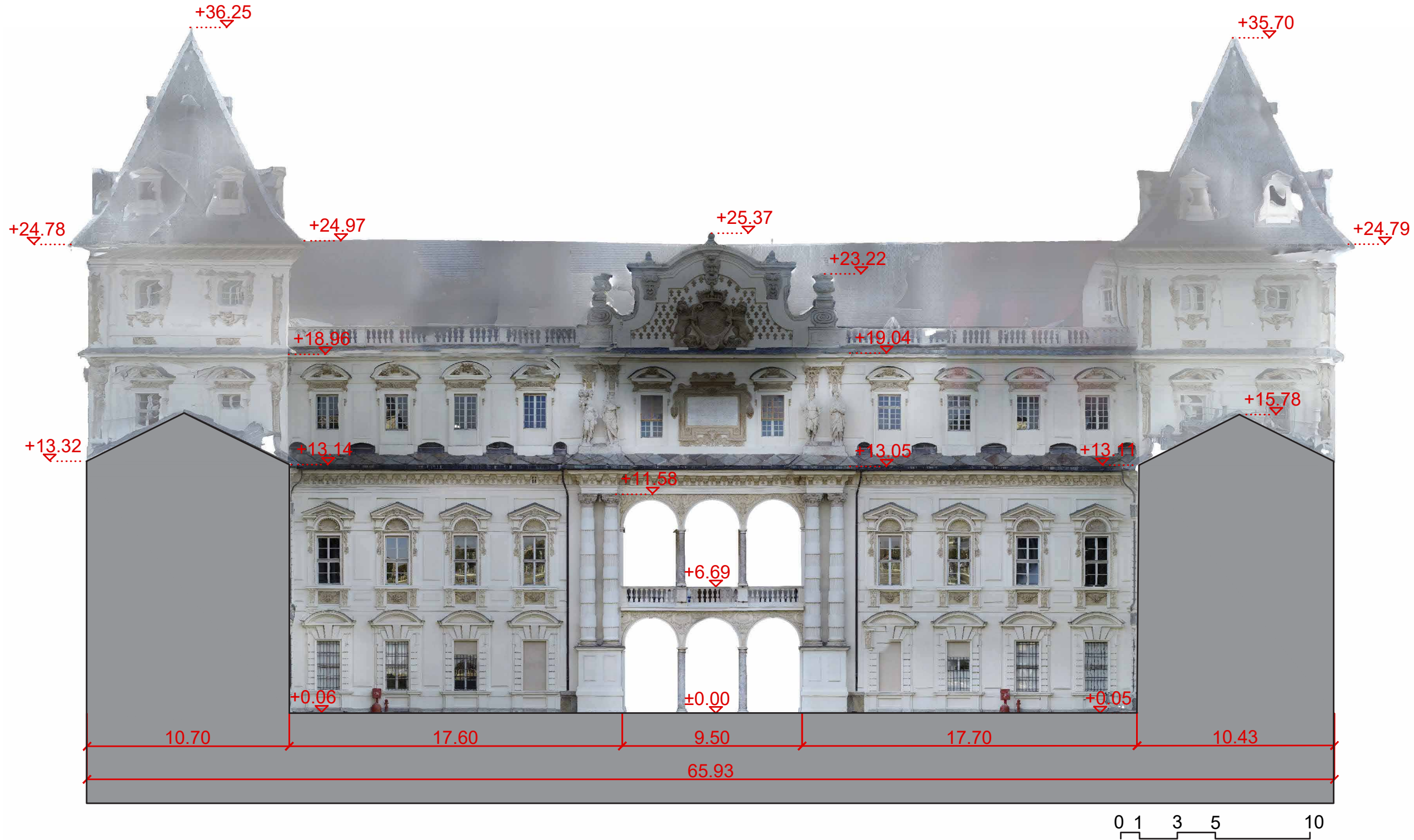
Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

Candidato
Davide Einaudi





**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

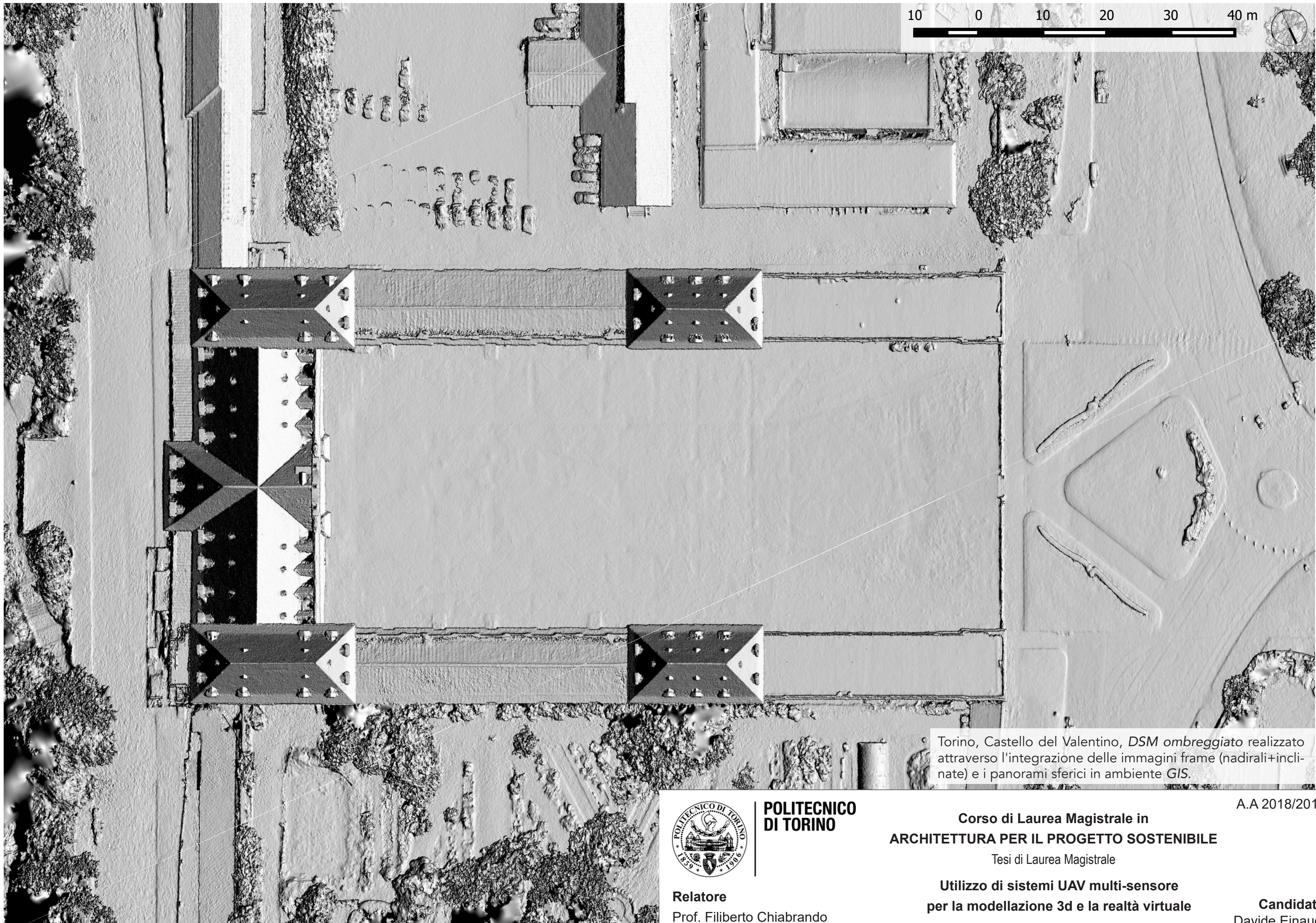
Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi





Torino, Castello del Valentino, *DSM ombreggiato* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici in ambiente GIS.



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

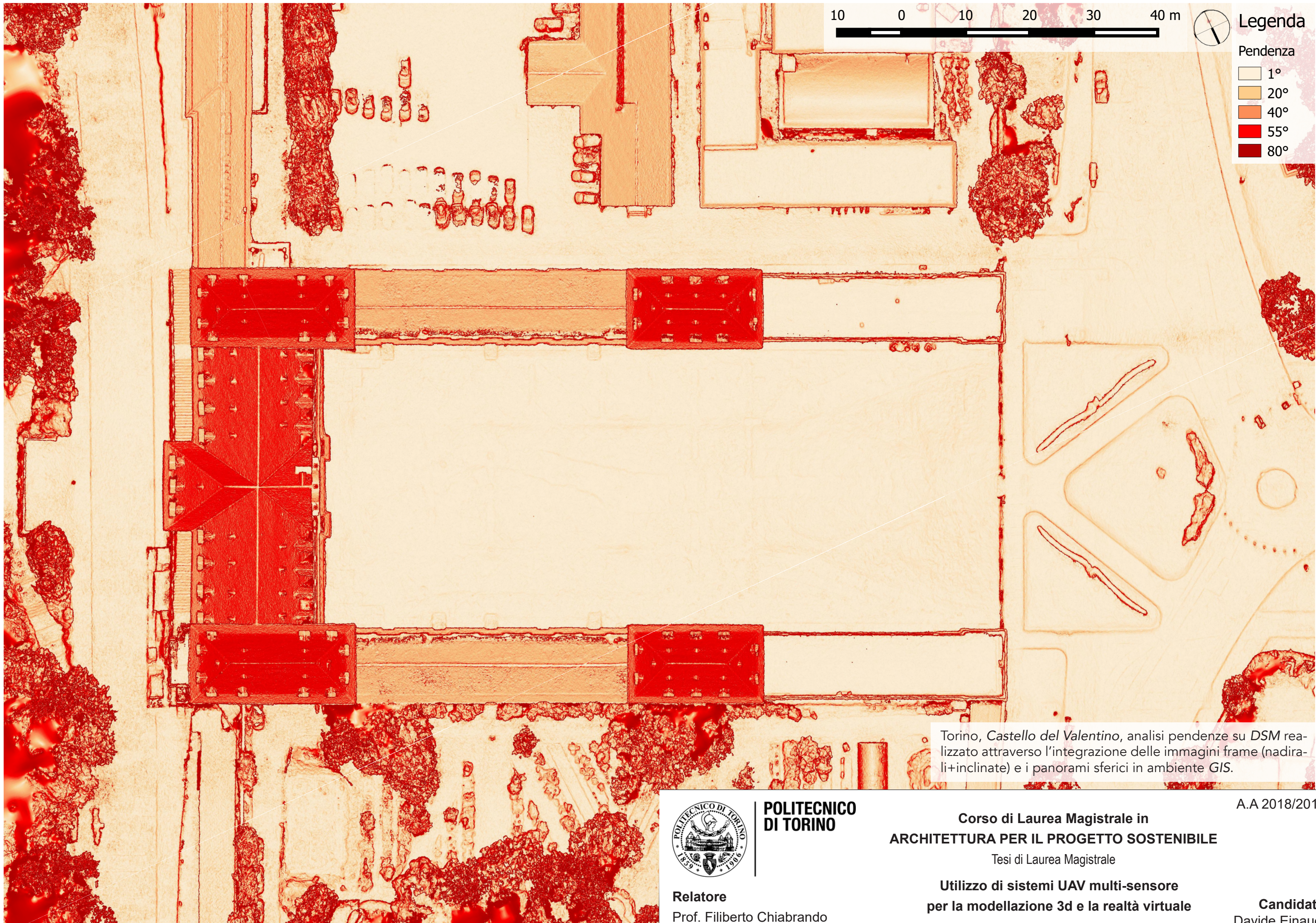
**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

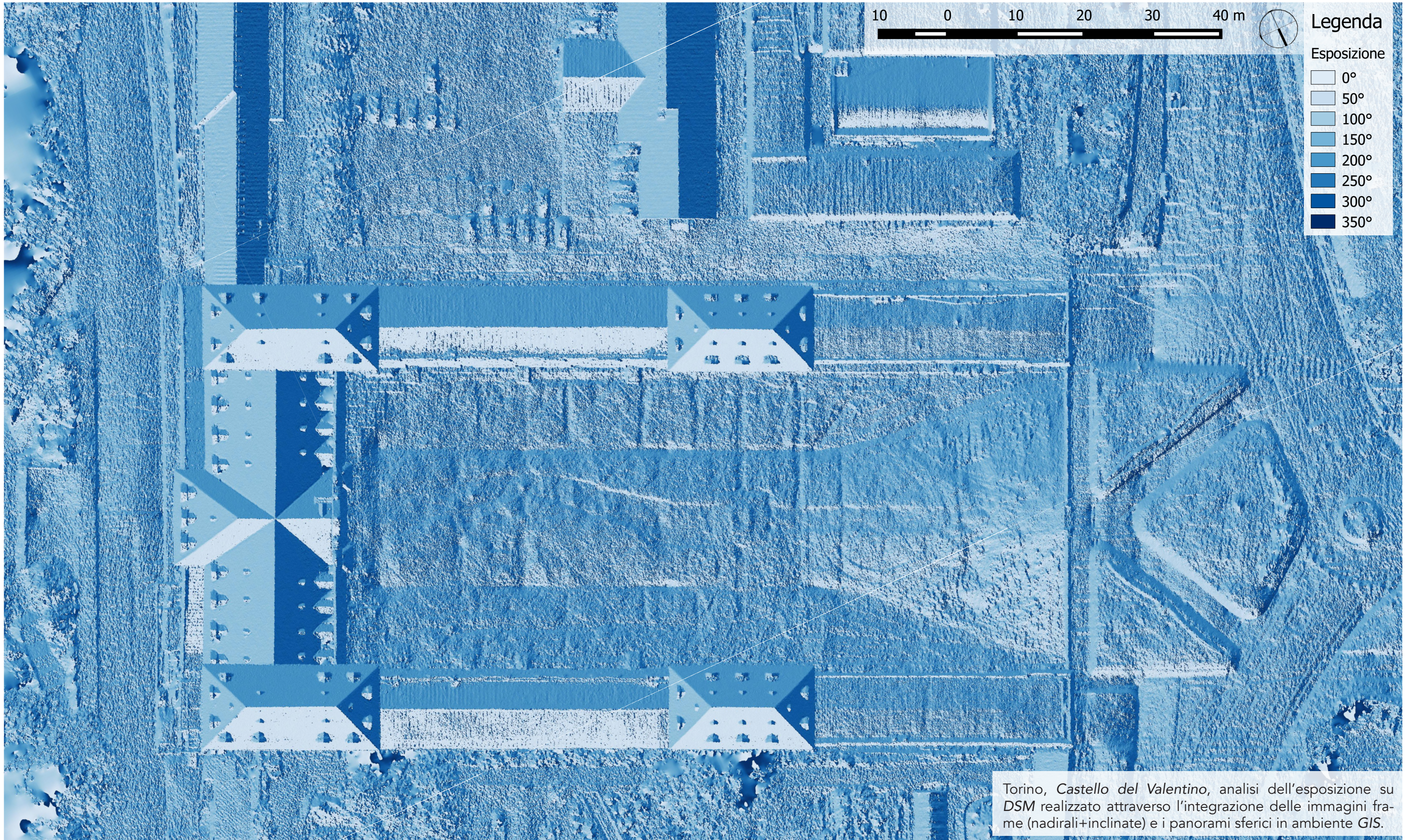
**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi

Torino, Borgo Medievale. Ortofoto realizzata attraverso fotogrammetria UAV con l'ausilio delle immagini sferiche.



Torino, *Castello del Valentino*, analisi pendenze su *DSM* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici in ambiente *GIS*.



**POLITECNICO
DI TORINO**

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

**Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE**

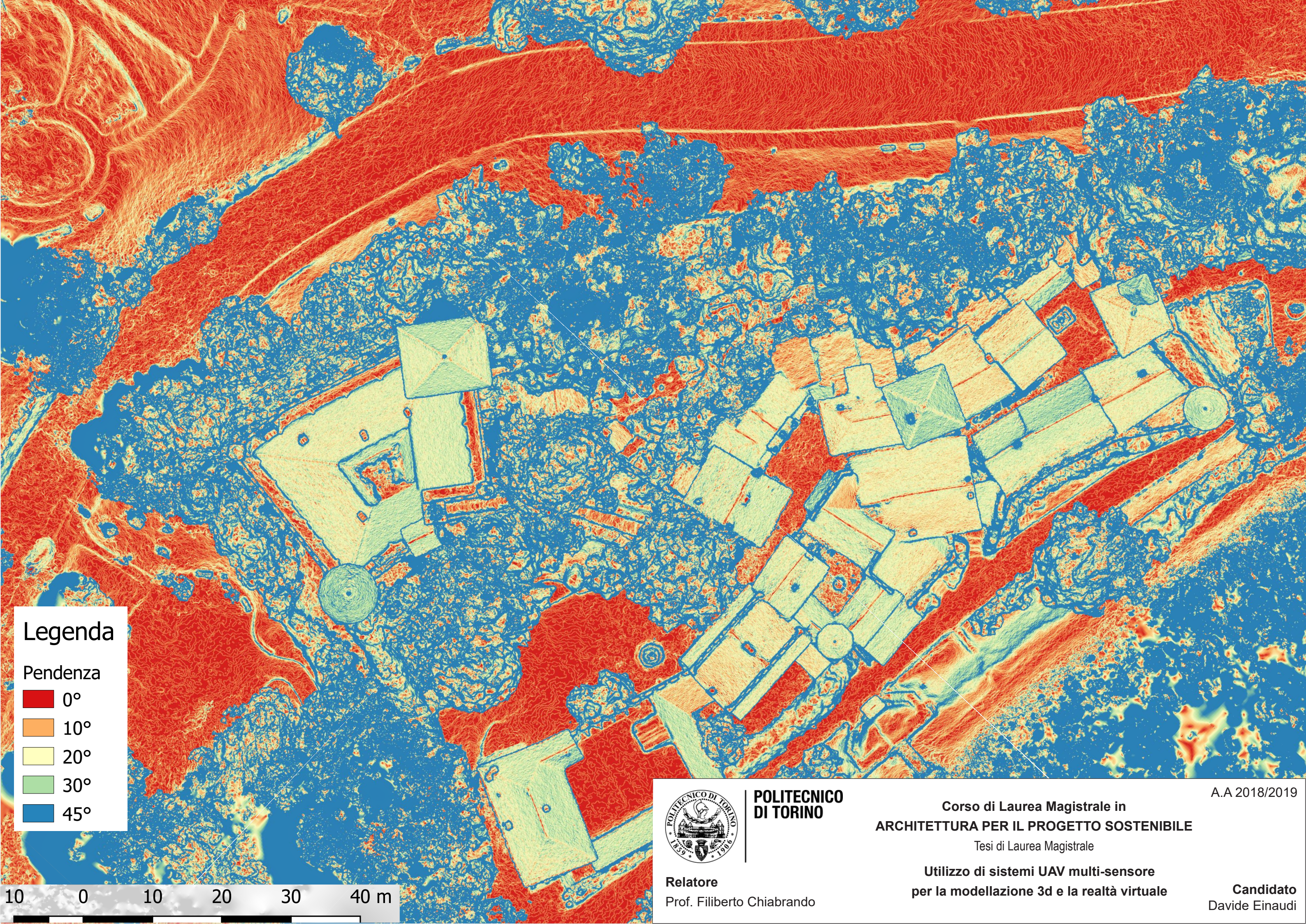
Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi

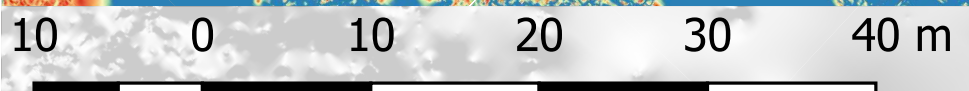
10 0 10 20 30 40 m



Legenda

Pendenza

0°
10°
20°
30°
45°



**POLITECNICO
DI TORINO**

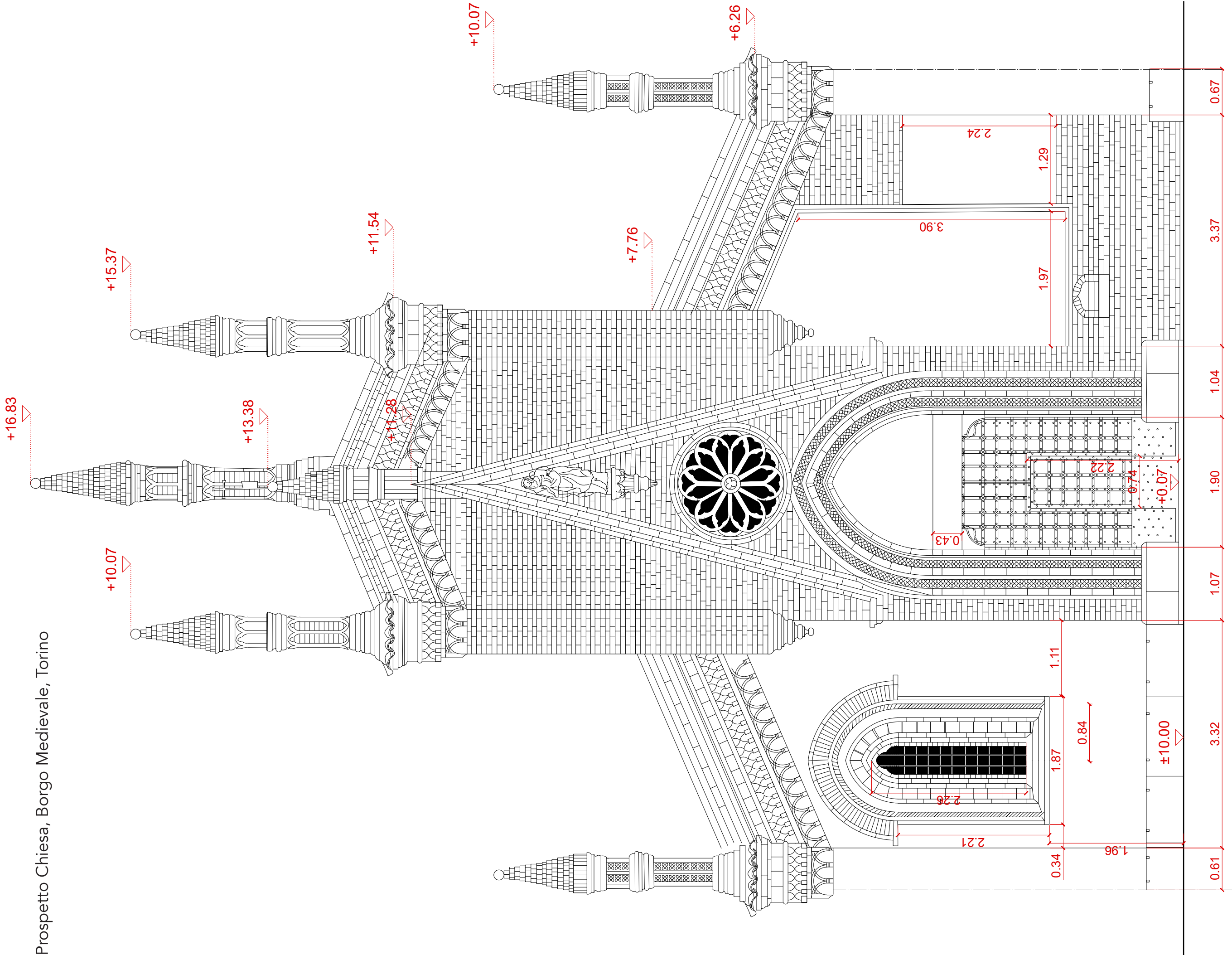
Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE
Tesi di Laurea Magistrale

**Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale**

A.A 2018/2019

Candidato
Davide Einaudi



POLITECNICO
DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in
ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE

Tesi di Laurea Magistrale

Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale

Candidato
Davide Einaudi

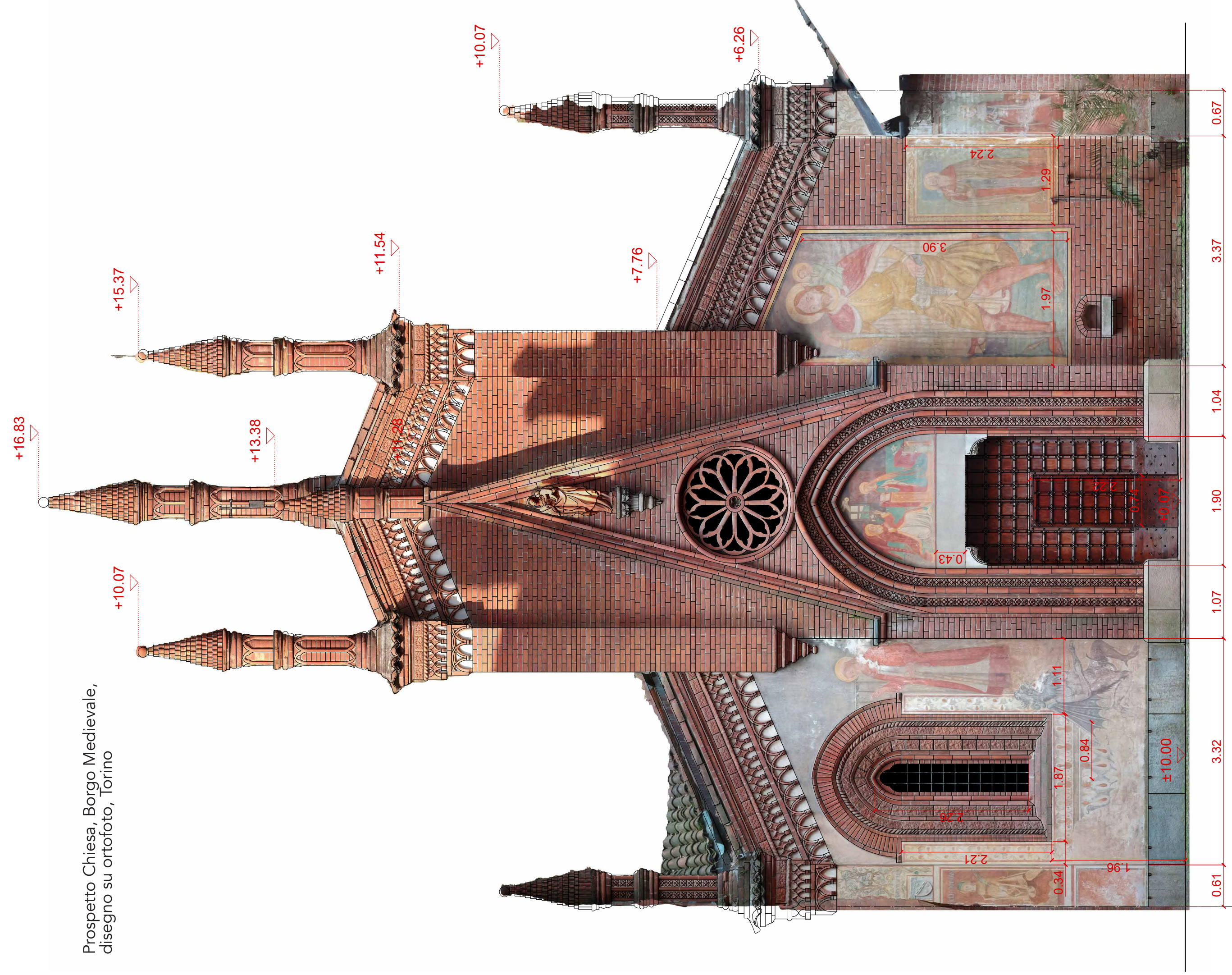
scala 1:50

0 0.5 1 2 3

Relatore
Prof. Filiberto Chiabrando

A.A 2018/2019

Prospetto Chiesa, Borgo Medievale,
disegno su ortofoto, Torino



POLITECNICO
DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in

ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE

Tesi di Laurea Magistrale

0 0.5 1 2 3

scala 1:50

Relatore

Prof. Filiberto Chiabrando

Utilizzo di sistemi UAV multi-sensore
per la modellazione 3d e la realtà virtuale

Candidato
Davide Einaudi

A.A 2018/2019

Ringraziamenti

Al termine di questo lungo percorso di ricerca, come al termine di ogni lavoro impegnativo, ci si trova a fare i conti con gli obiettivi raggiunti quasi che le difficoltà incontrate scompaiano per qualche istante lasciando lo spazio ai traguardi. In realtà trovo particolarmente difficile considerare questo lavoro come ultimato perché mi accorgo di quanto piccola sia la ricerca condotta nella moltitudine di studi esistenti che la fanno apparire come un piccolo granello di sabbia. Tuttavia io sono fiero di questo piccolo granello che si è costruito giorno dopo giorno e che mi rendo conto alla fine, non sarebbe stato possibile senza le persone che ho incontrato durante il mio cammino.

Voltandomi indietro vorrei tentare il difficile compito di ringraziare tutti coloro che hanno avuto un ruolo importante nella mia formazione accademica e, più in generale, nella mia vita. Mi scuso fin d'ora per coloro che ometterò solamente per mia inavvertenza.

In primo luogo desidero ringraziare il Prof. Filiberto Chiabrando, mio relatore, che, oltre ad avermi sostenuto nella redazione della tesi, è riuscito a trasmettermi la Sua passione per la materia e per la ricerca. A Lui devo la mia partecipazione alle attività del Team Direct che mi hanno permesso di acquisire conoscenza pratica in attività di valore etico e professionale oltre al mio avvicinamento al mondo dei droni.

Un ringraziamento doveroso al gruppo di tesisti, tirocinanti, collaboratori e dottorandi del Laboratorio di Geomatica e tutti i membri del Team Direct, il loro supporto è stato per me fonte di costante stimolo e aiuto. Mi hanno accolto nel loro gruppo dandomi la possibilità costante di imparare

da loro. Tra questi mi sento di ringraziare in modo particolare Lorenzo Tepati Losè per il suo costante supporto e per la gentilezza dimostrata durante tutte le fasi della mia ricerca. Un sincero grazie va anche a Alessio Calantropio e Giacomo Patrucco per avermi supportato e seguito in particolare nelle fasi di acquisizione sul campo. Mi preme ringraziare anche la Prof.ssa Antonia Teresa Spanò, Emilio Abbate, Giulia Sammartano, Elisabetta Colucci e Alessandra Spreafico.

Grazie alle persone che hanno condiviso con me i corsi di studi con le quali ho avuto modo di interagire nei corsi di progettazione: siete stati importanti per la mia crescita e, oltre che compagni di lavoro, amici. Tra questi in particolare ci tengo a ringraziare personalmente Letizia Garbolino e Stefania Ghietto, amiche sincere dalle quali ho imparato e condiviso tanti momenti della mia vita.

Un pensiero va ai miei genitori. Grazie mamma e papà per avermi sostenuto educato e ascoltato in ogni momento della mia vita senza mai lasciarmi da solo nelle difficoltà. Grazie mamma per avermi insegnato con il tuo esempio a trovare un motivo per essere felici in ogni momento. Un grazie speciale a mio fratello Gabriele per essere stato un costante esempio per la mia vita e per avermi sempre consigliato e protetto nel modo migliore. A Fabiana per il suo supporto e a Valentino per essere stato mio maestro sia in campo che fuori dal campo. A te nonna Dorina, sei stata la prima persona con cui ho condiviso la gioia nell'intraprendere l'inizio del percorso dei miei studi universitari. So che ora saresti fiera di vederne la conclusione.

Spero che questo lavoro possa essere oltre che conclusione punto di inizio per andare a costruire giorno per giorno, granello dopo granello, la mia vita di domani.

- [1.] Abate, D., Toschi, I., Sturdy-Colls, C., & Remondino, F. (2017). A low cost panoramic camera for the 3D documentation of contaminated crime scenes. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.
- [2.] Abbate, E. (2016). *Sperimentazione per il riconoscimento automatico di elementi parametrici (BIM) da scansioni laser (LIDAR) finalizzata all'analisi agli elementi finiti (FEM)* (Politecnico di Torino).
- [3.] Agisoft LLC. (2018). *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4* [Ebook] (pp. 9-10). Retrieved from https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf
- [4.] Aicardi, I., Chiabrando, F., Lingua, A. M., Noardo, F., & Piras, M. (2014). Unmanned aerial systems for data acquisitions in disaster management applications. JUNCO. Journal of universities and international development cooperation university of Turin. Turin: Università di Torino, 164-171.
- [5.] Aicardi, I., Boccardo, P., Chiabrando, F., Donadio, E., Lingua, A., Maschio, P., ... & Spanò, A. (2015). Modelli 3D multisensore per l'acropoli segusina. L'arco di Susa ei monumenti della propaganda imperiale in età augustea, *Segusium*, 195-216.
- [6.] Aicardi, I., Chiabrando, F., Grasso, N., Lingua, A. M., Noardo, F., & Spanò, A. (2016). UAV Photogrammetry With Oblique Images: First Analysis On Data Acquisition and Processing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.
- [7.] Alferi, C. (2013). *Metodi d'indagine del patrimonio costruito antico: applicazione della tecnologia LIDAR e*

dell'analisi FEM al complesso terme-chiesa a Hierapolis di Frigia (Politecnico di Torino).

[8.] Arfaoui, A., & Thibault, S. (2013). Fisheye lens calibration using virtual grid. *Applied optics*, 52(12), 2577-2583.

[9.] Balla, E. (2014). *Tecniche multiplatforma per il rilievo e la modellazione 3D: il caso studio di un bene architettonico inaccessibile: "La Furnasetta" di Morano sul Po* (Politecnico di Torino).

[10.] Barazzetti, L., Previtali, M., & Roncoroni, F. (2017). Fisheye lenses for 3d modeling: evaluations and considerations. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 79.

[11.] Barazzetti, L., Previtali, M., & Roncoroni, F. (2017). 3D modelling with the Samsung Gear 360. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 85.

[12.] Basso, A. (2017). Advantages, Critics and Paradoxes of Virtual Reality Applunied to Digital Systems of Architectural Prefiguration, the Phenomenon of Virtual Migration. In *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings* (Vol. 1, No. 9, p. 915).

[13.] Bettonvil, F. (2005). Fisheye lenses. *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, 33, 9-14.

[14.] Bendea, H., Chiabrando, F., Tonolo, F. G., & Marenchino, D. (2007, October). Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV. The Augusta Bagiennorum test site. In *XXI International CIPA Symposium* (Vol. 1).

[15.] Boccardo, P., Chiabrando, F., Dutto, F., Tonolo, F. G., & Lingua, A. (2015). UAV deployment exercise for mapping purposes: Evaluation of emergency response applications. *Sensors*, 15(7), 15717-15737.

- [16.] Bond, W. N. (1922). LXXXIX. *A wide angle lens for cloud recording. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 44(263), 999-1001.
- [17.] Borriello, C. (2018). *From point cloud based models to VR visualization for Cultural Heritage at risk: St. Nicola Church in Tolentino* (Politecnico di Torino).
- [18.] Botto, L. (2017) *Immagini panoramiche video 360° per il rilievo metrico dell'architettura. Un'applicazione indoor di fotogrammetria digitale* (Politecnico di Torino).
- [19.] Brutto, V. F. M. L. (2005). Elementi di fotogrammetria digitale. Università degli Studi di Palermo - Dispense del corso di Topografia.
- [20.] Chiabrando, F., Piatti, D., & Rinaudo, F. (2008). Sperimentazione sull'utilizzo di un UAV per il rilievo delle emergenze archeologiche. In *Proceedings of XII Conferenza nazionale Asita, L'Aquila* (pp. 719-724).
- [21.] Chiabrando, F., Nex, F., Piatti, D., & Rinaudo, F. (2011). UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy). *Journal of Archaeological Science*, 38(3), 697-710.
- [22.] Chiabrando, F., Lingua, A., Maschio, P., Rinaudo, F., & Spanò, A. (2012). Mezzi aerei non convenzionali a volo autonomo per il rilievo fotogrammetrico in ambito archeologico. *Una giornata informale per i*, 70, 1-12.
- [23.] Chiabrando, F., Lingua, A., & Piras, M. (2013). Direct photogrammetry using UAV: tests and first results. *ISPRS Archives*, 1, W2.
- [24.] Chigiotti, F. (2003). *Realizzazione di un sistema robusto di calibrazione di fotocamere digitali* (Università degli studi di Milano)

[25.] Cannarozzo, R., Cucchiarini, L., & Meschieri, W. (2012). *Misure, rilievo, progetto*. Zanichelli.

[26.] Cannella, M. (2013). *Valutazioni sull'impiego della fotogrammetria sferica nella costruzione di modelli digitali 3D: l'oratorio della chiesa di Santa Caterina a Zejtun (Malta)*. DISEGNARE CON..., 6.

[27.] Dalpozzi, M. (2014). Modelli 3D e realtà aumentata: un'applicazione sul Salone d'Onore al Castello del Valentino (Politecnico di Torino).

[28.] D'Annibale, E., S.Massa, G.Fangi (2010) - Photomodeling and point clouds from spherical panorama - Nabatean Architecture in Petra, Jordan - C.I.P.A. Workshop, Petra 4-8 November 2010.

[29.] D'Annibale, E., Piermattei, L., & Fangi, G. (2011, September). Spherical photogrammetry as emergency photogrammetry. In *INTERNATIONAL CIPA SYMPOSIUM* (Vol. 23).

[30.] D'Annibale, E. (2012). *Fotogrammetria close-range e visual design per i beni culturali* (Università Politecnica delle Marche).

[31.] De Luca, L. (2011). *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Dario Flaccovio Editore, Palermo

[32.] Donato, G. (2006). *Omaggio al Quattrocento dai Fondi d'Andrade*. Brayda, Vacchetta, Torino.

[33.] Dondi, P. (2018), *Introduzione alla realtà aumentata*, Università degli Studi di Pavia.

[34.] Fangi, G. (2006), *Investigation On The Suitability Of The Spherical Panoramas By Realviz Stitcher For Metric Purposes*, ISPRS Archive, Vol. XXXVI, Part 5, Dresden, 25–27 September 2006, ISSN 1682-175

- [35.] Fangi, G (2007) *Dispense “La Fotogrammetria Sferica Una Nuova Tecnica Per La Documentazione Del Patrimonio Monumentale”* Università Politecnica delle Marche.
- [36.] Fangi, G (2007) *La Fotogrammetria sferica dei mosaici di scena per il rilievo architettonico* – bollettino SIFET n. 3 pg. 23-42.
- [37.] Fangi, G (2007). *The Multi-image spherical Panoramas as a tool for Architectural Survey* - XXI International CIPA Symposium, 1-6 October 2007, Atene, ISPRS International Archive – vol. XXXVI-5/C53 – ISSN 1682-1750 – CIPA Archives vol. XXI – 2007, ISSN 0256-1840 - pg.311-316.
- [38.] Fangi, G. (2007), *Una nuova fotogrammetria architettonica con i panorami sferici multimmagini* – Convegno Sifet, Arezzo, 27–29 Giugno 2007, CD ISSN: 1682–1777, ISBN 88-901939-4-8
- [39.] Fangi, G. (2010), *La Fotogrammetria sferica. Una nuova tecnica per il rilievo dei vicini*. Archeomatica, anno 1, n.2 Giugno 201, ISSN 2037 – 2485, pp. 6–10
- [40.] Fangi, G., & Nardinocchi, C. (2013). Photogrammetric processing of spherical panoramas. *The photogrammetric record*, 28(143), 293-311.
- [41.] Fangi, G., Piermattei, L., & Wahbeh, W. (2013). Spherical Photogrammetry as Rescue Documentation for the Reconstruction of Some UNESCO Sites in Syria. *International Journal of Heritage in the Digital Era*, 2(3), 335–341. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.2.3.335>
- [42.] Frischer, B. (2007). *Il Cultural Virtual Reality Laboratory: storia, missione, progetti*.
- [43.] Fryskowska, A., Kedzierski, M., Grochala, A., & Braula, A. (2016). CALIBRATION OF LOW COST RGB AND NIR UAV CAMERAS. *International Archives of the Photogramme-*

try, *Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.

[44.] Fusiello, A. (2018). *Visione computazionale: Tecniche di ricostruzione tridimensionale*. FrancoAngeli.

[45.] Gomarasca, M. A. (2009). *Basics of geomatics*. Springer Science & Business Media

[46.] Gruen, A., & Beyer, H. A. (2001). System calibration through self-calibration. In *Calibration and orientation of cameras in computer vision* (pp. 163-193). Springer, Berlin, Heidelberg.

[47.] Gruen, A., & Huang, T. S. (Eds.). (2013). *Calibration and orientation of cameras in computer vision* (Vol. 34). Springer Science & Business Media..

[48.] R. Hill. (1926) *A Lens for Whole Sky Photography*, Proc. Opt. Conv. 2, 1926, pag. 878-883

[49.] Huang, J., Chen, Z., Ceylan, D., & Jin, H. (2017, March). 6-DOF VR videos with a single 360-camera. In *Virtual Reality (VR), 2017 IEEE* (pp. 37-44). IEEE.

[50.] Ihsanudin, T., & Affriani, A. R. (2017, December). *The Combination of Spherical Photogrammetry and UAV for 3D Modeling*. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 98, No. 1, p. 012057). IOP Publishing.

[51.] James, M. R., Robson, S., (2014). *Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground based image networks*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10), pp. 1413-1420.

[52.] Kossieris, S., Kourounioti, O., Agrafiotis, P., & Georgopoulos, A. (2017). Developing a low cost system for 3D data acquisition. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42.

[53.] Kraus, K., Waldhäusl, P., & Dequal, S. (1994). *Foto-*

grammetria vol. 1 Teoria e applicazioni. Torino: Libreria universitaria Levrotto e Bella.

[54.] Kraus, K. (2004). *Fotogrammetria-Vol. I-Teoria ed applicazioni*. Levrotto & Bella di Gualini T. & C.

[55.] Kwiatek, K., & Tokarczyk, R. (2014). Photogrammetric applications of immersive video cameras. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2(5), 211.

[56.] Laikin, M. (2001). *Lens Design*, 3rd edn., ed. by BJ Thompson.

[57.] Li, S., & Hai, Y. (2011). Easy calibration of a blind-spot-free fisheye camera system using a scene of a parking space. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(1), 232-242.

[58.] Luhmann, T. (2004). A historical review on panorama photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(5/W16), 8.

[59.] Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. A., & Harley, I. A. (2006). *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications*. Whittles.

[60.] Luhmann, Thomas & Robson, Stuart & Kyle, Stephen & Boehm, Jan. (2013). *Close Range Photogrammetry and 3D Imaging*

[61.] W. Merte, R. Richter, M. von Rohr. (1932). *Das Photographische Objektiv*, (traduzione in inglese dal titolo *Photographic Lenses* a cura di CADO, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton Ohio, 1949)

[62.] Milgram, P., & Kishino, F. (1994). *A taxonomy of mixed reality visual displays*. *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 77(12), 1321-1329.

- [63.] Miyamoto K. (1964). *Fisheye lens*. Journal of the Optical Society of America, 54, 1060.
- [64.] Mundhenk, T. N., Rivett, M. J., Liao, X., & Hall, E. L. (2000, October). Techniques for fisheye lens calibration using a minimal number of measurements. In *Intelligent Robots and Computer Vision XIX: Algorithms, Techniques, and Active Vision* (Vol. 4197, pp. 181-191). International Society for Optics and Photonics.
- [65.] Nawrat, A., & Kuś, Z. (Eds.). (2013). *Vision Based Systems for UAV Applications* (Vol. 481). Springer.
- [66.] Nocerino, E., Menna, F., Remondino, F., Saler, R., (2013). *Accuracy and block deformation analysis in automatic uav and terrestrial photogrammetry - lesson learnt*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W1, pp. 203-208.
- [67.] Nocerino, E., Menna, F., & Remondino, F. (2014). *Accuracy Of Typical Photogrammetric Networks In Cultural Heritage 3D Modeling Projects*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, XL-5, pp. 465-472.
- [68.] Perfetti, L., Polari, C., & Fassi, F. (2017). Fisheye photogrammetry: tests and methodologies for the survey of narrow spaces. In *3DArch* (pp. 573-580).
- [69.] Perri, S. (2018). *Metodi di Rilievo metrico 3D multiscale per il patrimonio costruito. Applicazioni aeree e terrestri in differenti scenari* (Politecnico di Torino).
- [70.] Pinzòn Mejía, V. C. (2017). *Analisi nel sito del Castello di Valperga tramite Fotogrammetria da UAV (Unmanned Aerial Vehicles) e scansioni terrestri (LIDAR) integrate con tecniche GPR (Ground Penetrating Radar)* (Politecnico di Torino).
- [71.] Ramos, A. P., & Prieto, G. R. (2016). Only image based

for the 3Dmetric survey of gothic structures by using frame cameras and panoramic cameras. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 41.

[72.] Remondino, F., & Stylianidis, E. (2016). *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage* (Vol. 2). Whittles Publishing.

[73.] Saint-Aubin, J. P., Baratin, L., Selvini, A., & Ferro, C. (1999). *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*. Moretti & Vitali.

[74.] Schwalbe, E. (2005). *Geometric modelling and calibration of fisheye lens camera systems*. Institute of Photogrammetry and Remote Sensing-Dresden University of Technology, Dresden.

[75.] Selvini, A. (1988). *Principi di fotogrammetria*. Clup.

[76.] Slama, C. (1980). *Manual of photogrammetry* (4th ed.). Falls Church: American Society of Photogrammetry.

[77.] A. Spanò, (2017). *Dispense di Fotogrammetria digitale e scansioni 3D*, Politecnico di Torino.

[78.] Szeliski, R., Shum, H. Y., Shum, H. Y., & Shum, H. Y. (1997, August). Creating full view panoramic image mosaics and environment maps. In *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 251-258). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.

[79.] Teppati Losè, L., Chiabrando, F., & Spanò, A. (2018). Preliminary evaluation of a commercial 360 multi-camera rig for photogrammetric purposes. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2).

- [80.] Tournadrea, V., Pierrot-Deseilligny, M., & Faure, P. H. (2015). UAV linear photogrammetry. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 40.
- [81.] Vorst J. (1978). Het Nikon reflex boek. Elsevier, Amsterdam.
- [82.] Wahbeh, W., & Nardinocchi, C. (2015). Toward the Interactive 3D Modelling Applied to Ponte Rotto in Rome. *Nexus Network Journal*, 17(1), 55-71.
- [83.] WGN, *Journal of the International Meteor Organization*, vol. 33, no. 1, pp. 9-12
- [84.] Wood, R. W. (1906). XXIII. Fish-eye views, and vision under water. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 12(68), 159-162.
- [85.] Wu, C., (2014). *Critical configurations for radial distortion self- calibration*. The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Columbus (USA), pp. 25-32.

SITOGRAFIA

- [1.] <https://www.enav.it/> consultato il 4/04/2018
- [2.] <https://www.enac.it/> consultato il 4/04/2018
- [3.] <https://www.d-flight.it> consultato il 04/01/2019
- [4.] <https://www.3dreshaper.com/> consultato il 04/05/2018
- [5.] https://it.wikipedia.org/wiki/Julius_Neubronner consultato il 5/05/2018
- [6.] <http://www.3dmetrica.it> consultato il 5/05/2018
- [7.] <https://sv.appio.eu> consultato il 5/05/2018
- [8.] <https://www.agisoft.com> consultato il 5/05/2018
- [9.] <https://www.pix4d.com> consultato il 5/05/2018
- [10.] <https://www.bentley.com> consultato il 5/05/2018
- [11.] <https://www.danielgm.net/cc/> consultato il 7/06/2018
- [12.] www.kolor.com consultato il 7/06/2018
- [13.] <https://roundme.com> consultato il 9/06/2018
- [14.] <https://www.mapillary.com> consultato il 9/06/2018
- [15.] <https://www.holobuilder.com> consultato il 9/06/2018
- [16.] <http://castellodelvalentino.polito.it> consultato il 12/07/2018
- [17.] <https://www.unrealengine.com/> consultato il 12/07/2018
- [18.] <https://unity3d.com> consultato il 12/07/2018
- [19.] <https://www.vive.com/> consultato il 12/07/2018
- [20.] <https://www.viveport.com/> consultato il 12/07/2018

- [21.] Cannarozzo. (2019). Retrieved from http://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Principi_e_strumenti_fotogrammetria.pdf consultato il 18/08/2018
- [22.] <https://sketchfab.com/> consultato il 12/09/2018
- [23.] <https://www.oculus.com> consultato il 12/09/2018
- [24.] https://it.wikipedia.org/wiki/Realtà_virtuale consultato il 12/09/2018
- [25.] <https://www.pointcab-software.com> consultato il 4/10/2018
- [26.] <https://www.faro.com> consultato il 4/10/2018
- [27.] <https://shuttermuse.com/calculate-cameras-crop-factor/> consultato il 4/10/2018
- [28.] <https://mmcalc.com/> consultato il 4/10/2018
- [29.] <https://3dmetrica.it/lunghezza-focale-in-fotogrammetria/> consultato il 01/11/2018
- [30.] https://it.wikiversity.org/wiki/Rilievo_aerofotogrammetrico consultato il 23/11/2018
- [31.] https://it.wikipedia.org/wiki/Alfredo_d%27Andrade consultato il 23/11/2018
- [32.] https://it.wikipedia.org/wiki/Realtà_aumentata consultato il 24/11/2018
- [33.] https://www.researchgate.net/figure/Reality-virtuality-continuum-Adapted-from-A-taxonomy-of-mixed-reality-visual-displays_fig5_314620425 consultato il 24/11/2018
- [34.] https://vision.unipv.it/corsi/InformationTechnology/IT_AR.pdf consultato il 24/11/2018

- [35.] <https://www.grunge.com/11190/virtual-realty-technologies-that-failed-hard/> consultato il 28/11/2018
- [36.] <http://www.retro-vr.co.uk/test/1000CS.html> consultato il 13/12/2018
- [37.] https://en.wikipedia.org/wiki/Power_Glove consultato il 13/12/2018
- [38.] <http://geoawesomeness.com/google-cardboard-paper-virtual-reality-set-now-supports-street-view-app/> consultato il 18/01/2019
- [39.] <http://www.vigamusmagazine.com/139722/tutorial-come-costruire-un-google-cardboard/> consultato il 18/01/2019
- [40.] Carl Zeiss 1976 https://it.wikiversity.org/wiki/Rilievo_aerofotogrammetrico consultato il 21/01/2019
- [41.] <https://www.pcmag.com/article/342537/the-best-virtual-reality-vr-headsets> consultato il 21/01/2019
- [42.] <https://steamcommunity.com/steamvr> consultato il 21/01/2019
- [43.] <https://www.qgis.org/it/site/> consultato il 21/01/2019

Sommario Figure

Le immagini senza fonte sono state realizzate appositamente per questo lavoro

Fig. 1. Relazione tra punto immagine e oggetto reale. Le linee corrispondono alle rette proiettanti mentre C corrisponde al centro di presa. [https://www.unirc.it/ consultato 10/06/2018] 27

Fig. 2. Schematizzazione semplice del processo di determinazione della posizione di un punto oggetto (3D) a partire da due immagini. Nello schema B corrisponde alla distanza tra i punti tra i punti di presa detta *base di presa*; c corrisponde alla *distanza principale*, $PP1$ e $PP2$ i *punti principali* e $O1$ e $O2$ i *centri di proiezione*. [Tratto e rieditato da A. Spanò, Dispense di Fotogrammetria digitale e scansioni 3D, Politecnico di Torino, 2017] 27

Fig. 3. Fondamenti analitici della fotogrammetria. Il sistema di riferimento ξ, η è definito dalla posizione di marche fiduciali e dal relativo centro FC (intersezione delle rette che uniscono marche fiduciali opposte); in cui sia noto anche il punto PP , proiezione del centro O sul piano di proiezione, di coordinate ξ_0, η_0 . [Tratto e rieditato da A. Spanò, Dispense di Fotogrammetria digitale e scansioni 3D, Politecnico di Torino, 2017] 28

Fig. 4. Esempio di collimazione semi auto-

matica di un punto tramite il software Pix4d su dati acquisiti da UAV. 29

Fig. 5. Un esempio di restitutore fotorestitutore analogico [fonte: <http://rilievo.stereo-fot.it>] 30

Fig. 6. Processo di estrazione dei punti di legame o tie point tramite tecniche di autocorrelazione. [Tratto da A. Spanò, Dispense di Fotogrammetria digitale e scansioni 3D, Politecnico di Torino, 2017] 32

Fig. 7. Esempi di estrazione di un image patches e relativa determinazione delle matrici sagoma e ricerca su una coppia di immagini fisheye eseguite sul poligono di calibrazione utilizzato per la calibrazione delle camere in questo studio. 33

Fig. 8. Esempio di camera metrica terrestre modello *WILD P32*. Il formato utile dell'immagini acquisita dalla camera è pari a 10 x 13 cm. 38

Fig. 9. Esempio della camera semimetrica *ROLLEI 6008 Phase One*. Formato sensore: 5440*4080 pixel 48.96 * 36.72 mm. Focale: 40 mm Dimensione pixel: 9 μ m. 38

Fig. 10. Alcuni esempi di camere amatoriali digitali. (a) Nikon D 800; (b) CANON EOS 5D; (c) KODAK DCS pro 14n. 38

Fig. 11. Alcuni esempi di soluzioni di camere innovative. (a) *Agrowin - SONY QX1 Modificata*; (b) *Parrot Sequoia Multi-Spectral Sensor*; (c) *Sentera Quad Multispectral Sensor*

(d); *Ista360 Pro*; (e) *Garmin VIRB 360*; (f) Termocamera *Flir Duo Pro R 336*. 39

Fig. 12. Schema di un'acquisizione normale per la fotogrammetria terrestre. 40

Fig. 13. Illustrazione relativa all'area di sovrapposizione tra immagini consecutive. 41

Fig. 14. Formula per la determinazione della base di presa. Per applicazioni aeree è necessario sostituire la distanza tra camera e oggetto (D) con l'altezza (H) 41

Fig. 15. Linee guida per esecuzione di acquisizioni terrestri di *close range photogrammetry*, relative al rilievo di oggetti isolati, ambienti interni e prospetti. [Agisoft LLC. (2018). *Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.4* [Ebook] (pp. 9-10). Retrieved from https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf] 42

Fig. 16. Determinazione area di sovrapposizione (*overlap* e *sidelap*) tra le strisciate su un'acquisizione fotogrammetrica aerea [Fichera, P. *Dispense Corso di Laurea Costruzioni rurali e Topografia - Rilievo e rappresentazione del territorio*. Università Mediterranea Reggio Calabria. Retrieved from https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/598_2008_71_2237.pdf] 43

Fig. 17. Sovrapposizione longitudinale (*overlap*) e trasversale (*sidelap*) tra le strisciate su un'acquisizione fotogrammet-

rica aerea. [Tratto e rieditato: Fichera, P. *Dispense Corso di Laurea Costruzioni rurali e Topografia - Rilievo e rappresentazione del territorio*. Università Mediterranea Reggio Calabria. Retrieved from https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/598_2008_71_2237.pdf] 44

Fig. 18. Schematizzazione di una strisciata da UAV con acquisizioni nadirali. 45

Fig. 19. Tipologie di pianificazioni di voli fotogrammetrici da UAV. (A) Strisciata singola; (B) Strisciata a doppia maglia; (C) Volo circolare. 46

Fig. 20. Sovrapposizione tra le immagini in un'acquisizione aerea [Tratto dal catalogo illustrativo Carl Zeiss 1976 https://it.wikiversity.org/wiki/Rilievo_aerofotogrammetrico consultato il 23/12/2018] 46

Fig. 21. Proiezione panoramica eseguita da un drone. 48

Fig. 22. Rappresentazione grafica della latitudine/longitudine. Nella figura θ e φ rappresentano gli angoli di direzione al punto oggetto, mentre x e y sono le coordinate immagine ed r il raggio della sfera. 50

Fig. 23. Compensazioni angolari per determinare la verticalità dell'asse verticale. Tratto e rieditato da D'Annibale, E. (2012). *Fotogrammetria close-range e visual design per i beni culturali* (Università Politecnica delle Marche), pag 33. 51

Fig. 25. Rappresentazione grafica della rette proiettive per la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto. 52

Fig. 24. L'Orientamento esterno nella fotogrammetria. Le coordinate del centro di presa (x,y,z) e i tre angoli di assesto (ω , ϕ , κ). [tratto da: Luhmann, Thomas & Robson, Stuart & Kyle, Stephen & Boehm, Jan. (2013). *Close Range Photogrammetry and 3D Imaging*.] 52

Fig. 26. Rappresentazione grafica della rette proiettive per la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto. 54

Fig. 27. Rappresentazione grafica della rette proiettive per la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto. 55

Fig. 28. Connessione del ricevitore satellitare topografico alla rete delle stazioni permanenti attraverso l'uso della connessione di rete. 56

Fig. 29. Rappresentazione grafica della rette proiettive per la ricostruzione tridimensionale dell'oggetto. 58

Fig. 30. Qualche esempio di lenti fisheye. In alto a sinistra Nikkor 6 mm f/2.8 circular fish-eye (Fov 220°), al centro Nikkor 8mm f/2.8 circular fisheye a destra: Nikkor 16 mm f/2.8 full frame fisheye. [tratto da: *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, vol. 33, no. 1, p. 10] 68

Fig. 31. Comparazione tra un full frame e

un fisheye circolare. Nel primo caso è utilizzato tutto il sensore e misura 180° sulla diagonale, nel secondo invece una parte del sensore risultà inutilizzata. [tratto da: *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, vol. 33, no. 1, p. 9] 69

Fig. 32. Fasi degli sviluppi delle lenti fish-eye: (A) Modello di *Wood* realizzato tramite il riempimento con acqua di un modello *pinhole* di camera; (B) Modello di *Bond* realizzato sostituendo l'acqua con una lente piano-convessa; (C) Modello di *Hill* realizzato tramite l'utilizzo di una lente a menisco negativo; (D) Moderna tipologia di fisheye attualmente utilizzata. [tratto e rieditato da: *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, vol. 33, no. 1, p. 11] 71

Fig. 33. Esempio di un convertitore fisheye commerciale. 72

Fig. 34. Comparazione tra le distorsioni di una lente rettilineare e differenti tipologie di proiezioni fisheye considerando per tutte la stessa lunghezza focale. [tratto da: *WGN, Journal of the International Meteor Organization*, vol. 33, no. 1, p. 12] 73

Fig. 35. Schematizzazione del processo e dei software utilizzato per la stima del modello di calibrazione per la camera presa in esame. 76

Fig. 36. Modello geometrico stenopeico della fotocamera. Introduzione punto principale, lunghezza focale e piani di riferimento.

- Proiezione di un punto nello spazio sul piano immagine. 78
- Fig. 37. Modello teorico dei sistemi ottici. [Tratto e rieditato: A.Spanò, dispense di "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D", Politecnico di Torino, 2017] 79
- Fig. 38. Modello teorico dei sistemi ottici. [Tratto e rieditato: A.Spanò, dispense di "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D", Politecnico di Torino, 2017] 80
- Fig. 39. Schematizzazione errori derivati da un piano immagine non ortogonale all'asse ottico. [Tratto e rieditato: A.Spanò, dispense di "Fotogrammetria digitale e scansioni 3D", Politecnico di Torino, 2017] 80
- Fig. 40. Determinazione delle coordinate del Punto Principale. 81
- Fig. 41. Variazione della posizione del punto principale su differenti camere del medesimo modello (*GoPro Hero 4 Silver*) pubblicate nello studio "Losè, L. T., Chiabrando, F., & Spanò, A. (2018). *Preliminary Evaluation Of A Commercial 360 Multi-Camera Rig For Photogrammetric Purposes. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2).". 82
- Fig. 42. Relazione tra lunghezza focale e angolo di campo. [tratto e rieditato da: *3dmetrica.it*] 83
- Fig. 43. Rappresentazione tipologie di distorsione radiale a botte ($k_1 > 0$) e a cuscino ($k_1 < 0$). 85
- Fig. 44. - Vista dell'area di test scelta per la *Self Calibration* 87
- Fig. 45. - Numerazione dei target per la fase di misura successiva sul poligono di calibrazione 88
- Fig. 46. Numerazione dei target per la fase di misura successiva sul poligono di calibrazione 89
- Fig. 48. Posizione dei vertici dei punti di stazione sul poligono di calibrazione. 90
- Fig. 47. Visualizzazione della posizione dei punti di scansione e delle misure dei target estratti dopo la compensazione eseguita con *Surveysoft Star*Net*. 90
- Fig. 49. Camera in posizione normale. 92
- Fig. 51. Schema delle metodologie di acquisizione dei *dataset*. 92
- Fig. 50. Camera ruotata di 180° . 92
- Fig. 52. Fase 1: **Acquisizioni ad asse ortogonale al prospetto** a passo costante di circa 1m su due diverse distanze. 93
- Fig. 53. Fase 2: **Acquisizioni ad asse inclinato verso sinistra** di circa 45° rispetto al prospetto. Passo costante di circa 1m. 93
- Fig. 54. Fase 3: **Acquisizioni ad asse inclinato verso destra** di circa 45° rispetto al prospetto. Passo costante di circa 1m. 93

- Fig. 55. Fase 4: **Acquisizioni di raffittimento** della porzione della scala e del sottoscala. 93
- Fig. 56. Esempi di immagini eseguite durante le acquisizioni. 94
- Fig. 58. Immagini acquisite nelle differenti acquisizioni per le differenti camere. 96
- Fig. 57. Posizionamento manuale di un target. 96
- Fig. 59. Posizionamento manuale di un target. 97
- Fig. 60. Settaggi camera per *Self-Calibration* 97
- Fig. 61. Visualizzazione di pianta *sparse cloud Camera Front Self Calibration*. 100
- Fig. 62. Visualizzazione di pianta *sparse cloud Camera Front* con calibrazione ricavata tramite metodi alternativi alla *Self Calibration*. 100
- Fig. 63. *Chessboard* utilizzato per la stima dei parametri interni attraverso il *Camera Calibration Tool di Matlab R2018a*. 105
- Fig. 64. Impostazione del modello di camera per la stima dei parametri interni. 106
- Fig. 65. Identificazione dei valori outliers a seguito della calibrazione attraverso il *Camera Calibration Tool di Matlab R2018a*. 107
- Fig. 66. Riconoscimento automatico del *chessboard* (attraverso il *Camera Calibration Tool di Matlab R2018a*), per la stima dei parametri interni 107
- Fig. 67. Alcune immagini di esempio utilizzate per la calibrazione della camera attraverso il *Camera Calibration Tool Matlab R2018a*. 108
- Fig. 68. Primo processo di calibrazione della *Camera Front* utilizzando attraverso il *Camera Calibration Tool di Matlab R2018a*. Come si può osservare la camera presenta un errore di riproiezione molto più alto delle altre ed è considerabile un valore *outliers*. Errore medio totale 2,68 px 108
- Fig. 69. Valutazione dell'errore di riproiezione della *Camera Front* eliminando il valore outliers. Errore medio totale 0,74 px 109
- Fig. 70. Ulteriore miglioramento dei risultati della *Camera Front*. Errore medio totale 0,50 px 109
- Fig. 72. Risultati Calibrazione Camera Back attraverso *Matlab utilizzando tutte le immagini acquisite*. Errore medio totale 2.99 px 110
- Fig. 71. Valutazione dell'errore di riproiezione a seguito dell'eliminazione del il valore outliers. Errore medio totale 1.17 px 110

- Fig. 73. Target *chessboard* realizzato per la calibrazione con il tool *Lens di Agisoft Photoscan*. 112
- Fig. 74. Processo utilizzato per la calibrazione con il tool *Lens di Agisoft Photoscan*. 113
- Fig. 75. Dimensioni del *chessboard* utilizzato per la calibrazione. 114
- Fig. 76. Esempi di immagini utilizzate nella calibrazione con Agisoft Lens, rispettivamente in condizioni di luce naturale e artificiale. 115
- Fig. 77. Schema del posizionamento delle luci sul target di calibrazione. 115
- Fig. 81. Dettaglio *banklight* utilizzata. 116
- Fig. 80. Allestimento area di test per acquisizione in luce artificiale. 116
- Fig. 78. *Pattern* di calibrazione per la stima dei parametri interni della camera fisheye tramite Agisoft Lens. 116
- Fig. 79. Acquisizione in luce naturale. 116
- Fig. 82. Esempi di immagini in condizioni di luce naturale utilizzate nel processo di calibrazione della camera tramite Agisoft Lens. 117
- Fig. 83. Output dei parametri di calibrazione di uno dei dataset. 118
- Fig. 84. Visualizzazione della ricostruzione della posizione delle prese di un dataset. 118
- Fig. 85. Unica immagine non allineata nel processo relativo alla camera back. 118
- Fig. 86. Esempi del riconoscimento del pattern realizzato per il processo di calibrazione in sostituzione di quello standard visualizzabile a monitor. 119
- Fig. 87. Schematizzazione del processo di ottimizzazione della calibrazione. 123
- Fig. 88. Schermata relativa alla scelta dei parametri oggetto della procedura automatizzata di ottimizzazione. 124
- Fig. 89. Posizioni delle prese e *overlap* dell'elaborazione relativa alla *Camera Front*. 125
- Fig. 90. Visualizzazione grafica dei residui. 126
- Fig. 91. Visualizzazione degli errori sui target relativi all'elaborazione eseguita per la *Camera Front*. 127
- Fig. 92. Visualizzazione dei tie point su un'immagine utilizzata nel processamento. 129
- Fig. 93. Visualizzazione dei tie point su un'immagine, ingrandimento. 129
- Fig. 94. Visualizzazione dall'alto della

sparse cloud relativa alla *Camera Front*.
130

Fig. 95. Visualizzazione assonometrica della *sparse cloud* relativa alla *Camera Front*.
130

Fig. 96. Visualizzazione dall'alto della *sparse cloud* relativa alla *Camera Front*.
131

Fig. 97. Visualizzazione dall'alto della *dense cloud* relativa alla *Camera Front*.
131

Fig. 98. Visualizzazione nuvola di punti monocromatica relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Front*. 132

Fig. 99. Visualizzazione della mesh monocromatica relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Front*. 132

Fig. 100. Visualizzazione dalla mesh texturizzata relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Front*. 132

Fig. 101. Determinazione del piano di proiezione tramite marker per l'elaborazione dell'ortofoto. 133

Fig. 102. Orientamento degli assi cartesiani sulla base dei *target* generati a tale scopo. 133

Fig. 103. Visualizzazione dell'ortofoto relativa alle elaborazioni della *Camera Front*. 134

Fig. 104. Porzione dell'ortofoto rela-

tiva alle elaborazioni della *Camera Front*.
134

Fig. 105. Dettaglio dell'ortofoto relativa alle elaborazioni della *Camera Front*.
134

Fig. 106. Posizioni delle prese e *overlap* dell'elaborazione relativa alla *Camera Back*. 135

Fig. 107. Visualizzazione grafica dei residui relativa alla *Camera Back*.
136

Fig. 108. Posizione stimata dei *Ground Control Points* e dei *Check Points* con visualizzazione grafica degli errori stimati nell'elaborazione dei dati relativi alla *Camera Back*. 137

Fig. 109. Visualizzazione dall'alto della *sparse cloud* ottenuta nelle elaborazioni della *Camera Back*. 139

Fig. 110. Visualizzazione assonometrica della *sparse cloud* ottenuta nelle elaborazioni della *Camera Back*.
139

Fig. 111. Visualizzazione Prospetto della *sparse cloud* ottenuta nelle elaborazioni della *Camera Back*. 140

Fig. 112. Confronto tra la *sparse cloud* (a sinistra) e la *dense cloud* (a destra) ottenuta dalle elaborazioni relative alla *Camera Back*. 140

- Fig. 113. Visualizzazione nuvola di punti monocromatica relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Back*. 141
- Fig. 114. Visualizzazione della mesh monocromatica relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Back*. 141
- Fig. 115. Visualizzazione dalla mesh texturizzata relativa alle elaborazioni relative alla *Camera Back*. 141
- Fig. 116. Porzione di ortofoto di ricostruzione eseguita attraverso la *Camera Back*. 142
- Fig. 117. Distribuzione degli errori di riproiezione nella *Camera Front*. 144
- Fig. 118. Distribuzione degli errori di riproiezione nella *Camera Back*. 144
- Fig. 120. Visualizzazione intensità degli errori di riproiezione relativi alla *Camera Back* con un valore di *threshold* di 10 pixel. 146
- Fig. 119. Visualizzazione intensità degli errori di riproiezione relativi alla *Camera Back* con un valore di *threshold* di 1 pixel. 146
- Fig. 122. Visualizzazione intensità degli errori di riproiezione relativi alla *Camera Front* con un valore di *threshold* di 10 pixel. 147
- Fig. 121. Visualizzazione intensità degli errori di riproiezione relativi alla *Camera Front* con un valore di *threshold* di 1 pixel. 147
- Fig. 123. Posizione delle scansioni laser scanner terrestre eseguite tramite *FARO Focus3d x330* sull'area di test. 148
- Fig. 124. Vista dall'alto delle corrispondenze tra le scansioni per la registrazione per forma. 149
- Fig. 125. Vista laterale delle corrispondenze tra le scansioni per la registrazione per forma. 149
- Fig. 126. Settaggi utilizzati nella prima fase del processo di registrazione per forma delle scansioni laser scanner terrestri. 150
- Fig. 127. Riepilogo errore distanza punto medio di scansione in mm per ogni posizione acquisita. 150
- Fig. 129. Analisi dell'errore, della sovrapposizione e dei punti utilizzati tra le singole scansioni nella fase di allineamento per forma. 150
- Fig. 128. Statistiche di riepilogo errore distanza punto medio di scansione in mm complessivo 150
- Fig. 131. Posizionamento dei target sulla visualizzazione piana di una delle scansioni laser scanner terrestri. 151

- Fig. 130. Struttura del progetto e blocco dei risultati relativi alla registrazione per forma (in rosso) e predisposizione di una nuova procedura di registrazione (in verde). 151
- Fig. 133. Risultati delle tensioni nei target a seguito della registrazione delle scansioni laser scanner tramite *target*. 152
- Fig. 132. Dettaglio di un target dopo la procedura di registrazione. Si può osservare la presenza di due punti che rappresentano il punto posizionato su una scansione tramite la visualizzazione piana e il suo spostamento dopo il processo di registrazione sulla base degli altri target sulle altre scansioni. 152
- Fig. 134. Identificazione delle aree analizzate tramite comparazione delle distanze dei punti tra le nuvole ottenute tramite *lidar* e quelle ricavate dalle immagini *fisheye* a seguito della calibrazione delle camere e del processo di ricostruzione fotogrammetrica. 153
- Fig. 135. Gaussiana dei risultati della comparazione della distanza tra i punti della nuvola di punti *Lidar (reference)* e la nuvola di punti *SFM* della *Camera Front*. 154
- Fig. 136. Gaussiana dei risultati della comparazione della distanza tra i punti della nuvola di punti *Lidar (reference)* e la nuvola di punti *SFM* della *Camera Back*. 154
- Fig. 137. Analisi visuale della distanza tra la nuvola di punti *Lidar (reference)* e la nuvola di punti fotogrammetrica della *Camera Front*. 155
- Fig. 138. Analisi visuale della distanza tra la nuvola di punti *Lidar (reference)* e la nuvola di punti fotogrammetrica della *Camera Back*. 155
- Fig. 139. Risultati della comparazione tra nuvola *lida* e nuvola fotogrammetrica relativa alla *Camera Front*. 156
- Fig. 140. Risultati della comparazione tra nuvola *lida* e nuvola fotogrammetrica relativa alla *Camera Back*. 156
- Fig. 141. Alcuni tratti della parete in sezione realizzati con le tre nuvole di punti sovrapposte: *lidar*, *SFM Camera Front/Back*. 156
- Fig. 142. Istogrammi che mostrano il numero di punti in funzione della distanza approssimata tra nuvola *lidar (reference)* e nuvola ottenuta tramite *Structure From Motion (compared)* relativa alla *Camera Front* sulla sinistra e alla *Camera Back* a destra. 157
- Fig. 143. Gaussiana dei risultati della comparazione della distanza tra i punti della nuvola di punti *Lidar (reference)* e la nuvola di punti *SFM* della *Camera Front* per

l'area del sottoscala. 158

Camera Back (Verde) . 162

Fig. 144. Gaussianiana dei risultati della comparazione della distanza tra i punti della nuvola di punti *Lidar* (*reference*) e la nuvola di punti *SFM* della *Camera Back* per l'area del sottoscala. 158

Fig. 151. Profilo di sezione di dettaglio monocromatica della prima rampa di scale effettuata sulle tre nuvole di punti: *lidar*, *Camera Front*, *Camera Back*. 163

Fig. 145. Analisi visuale della distanza tra la nuvola di punti *lidar* (*reference*) e la nuvola di punti fotogrammetrica della *Camera Front*. 159

Fig. 152. Profilo di sezione di dettaglio monocromatica della soletta tra le rampa di scale effettuata sulle tre nuvole di punti: *lidar*, *Camera Front*, *Camera Back* relativa al primo livello. 164

Fig. 146. Analisi visuale della distanza tra la nuvola di punti *lidar* (*reference*) e la nuvola di punti fotogrammetrica della *Camera Back*. 159

Fig. 153. Profilo di sezione di dettaglio monocromatica della soletta tra le rampa di scale effettuata sulle tre nuvole di punti: *lidar*, *Camera Front*, *Camera Back* relativa al secondo livello. 164

Fig. 147. Risultati della comparazione tra nuvola *lidar* e nuvola *SFM* relativa alla *Camera Front*. 160

Fig. 154. Schema grafico relativo ai differenti angoli di visione di un sensore *full frame 35mm* e un sensore di dimensioni inferiori (croppato). 165

Fig. 148. Risultati della comparazione tra nuvola *lidar* e nuvola *SFM* relativa alla *Camera Back*. 160

Fig. 155. Calcolo della diagonale del sensore per calcolo del *crop factor*. 165

Fig. 149. Istogrammi che mostrano il numero di punti in funzione della distanza approssimata tra nuvola *lidar* (*reference*) e nuvola ottenuta tramite fotogrammetria (*compared*) relativa alla *Camera Front* sulla sinistra e alla *Camera Back* a destra per le analisi svolte sulla scala. 161

Fig. 156. Determinazione delle diagonali sul sensore full frame 35mm di 36mm x 24mm e uno da 1/2.3" da 6.17mm x 4.55mm. 166

Fig. 150. Profilo di sezione di dettaglio della prima rampa di scale. Confronto tra le geometrie ricostruite dalle nuvole di punti: *lidar* (RGB), *Camera Front* (Rosso),

Fig. 157. Relazione tra lunghezza focale e angolo di campo. [tratto e rieditato da: 3dmetrica.it] 167

Fig. 158. Acquisizione delle immagini-

ni per la realizzazione del panorama sferico 179

tramite cavalletto. [Tratto da G.Fangi (2007) *Dispense "La Fotogrammetria Sferica Una Nuova Tecnica Per La Documentazione Del Patrimonio Monumentale"* Università Politecnica delle Marche.] 174

Fig. 159. Proiezione degli scatti su una sfera virtuale avente come raggio la lunghezza focale della camera. 174

Fig. 160. Proiezione cilindrica [Tratte da: De Luca, L. (2011). *La fotomodellazione architettonica. Rilievo, modellazione, rappresentazione di edifici a partire da fotografie*, Dario Flaccovio Editore, Palermo.] 175

Fig. 161. Proiezione cubica [fonte: ibidem] 176

Fig. 163. Esempio di proiezione sferica o equirettangolare . 176

Fig. 162. Proiezione sferica o equirettangolare [fonte: ibidem] 176

Fig. 164. Immagini scattate simultaneamente dalle due camere prima del processo di *stitching*. 178

Fig. 165. *Esito del processo di stitching* delle due immagini realizzato con *GoPro Fusion Studio*. 178

Fig. 166. Esempio di proiezione equirettangolare con e senza correzione colore e bilanciamento bianco con settaggi di *default* tramite *GoPro Fusion Studio*.

Fig. 167. Analisi dei punti di connessione tra le immagini da cui si può osservare l'assenza di segni che indichino problemi relativi alle aree di sovrapposizione. 179

Fig. 168. Analisi dei punti di connessione tra le immagini da cui si può osservare l'assenza di segni che indichino problemi relativi alle aree di sovrapposizione. 180

Fig. 169. Interfaccia del software *GoPro Fusion Studio*. 181

Fig. 170. Immagini utilizzate per il test di modalità di *stitching* alternative con inserimento dei parametri interni (Punto Principale, Distorsioni Radiali $K_1/K_2/K_3$ e Lunghezza Focale) per ciascuna delle due camere. 183

Fig. 171. Nello schema un riepilogo del flusso di lavoro utilizzato in questo studio nelle fasi di test relative all'utilizzo di metodi alternativi di stitching tramite il controllo dei parametri interni di camera stimati dal software o imposti a priori. 183

Fig. 172. In figura i parametri di orientamento interno ed esterno stimati dal software utilizzando desunti tramite *Self Stitching Processing*. I fotogrammi acquisiti dalla *Camera Front* e *Camera Back* vengono considerati come acquisiti dalla stessa camera, con la conseguenza che i parame-

tri di orientamento interno sono stimati erroneamente una volta soltanto. 187

Fig. 173. In figura i punti omologhi riconosciuti tra le immagini. Si osservino le zone riquadrate in rosso dalle quali si può riconoscere la presenza di aree di sovrapposizione non correttamente riconosciute. 188

Fig. 174. In figura i punti omologhi riconosciuti tra le immagini aggiunti tramite la procedura semi-automatica di riconoscimento tramite analisi geometrica. 188

Fig. 175. Anteprima della proiezione del panorama prima del rendering. Si noti l'importante presenza di distorsioni sulle immagini. 189

Fig. 176. Panorama realizzato tramite il software proprietario GoPro Studio confrontato con l'elaborazione automatizzata di Autopano Giga 4.4 visibile in fig. 27. 189

Fig. 177. In figura i parametri di orientamento interno ed esterno stimati dal software desunti tramite *Self Stitching Processing* dopo l'aggiunta semi-automatica dei punti di controllo e la successiva ottimizzazione. 190

Fig. 178. Nello schema sono riportate le modifiche che sono state eseguite sugli *exif* per i fotogrammi oggetto di questo studio. 190

Fig. 179. In figura un esempio di visualizzazione dei dati *exif* per un fotogramma campione tramite il software *Analog Exif*. In blu sono evidenziati i valori che sono stati oggetto di modifica. 191

Fig. 180. Nella figura la schermata di Autopano Giga che consente di calcolare e correggere il valore della lunghezza focale 35mm equivalente per mezzo dell'ausilio del fattore di conversione (*crop factor*) e della lunghezza focale espressa in mm. 192

Fig. 181. Nella figura sono mostrati il risultato delle unioni delle immagini dopo la correzione degli *exif*. Si possono osservare errori significativi nello *stitching* delle immagini oltre che valori stimati in modo errato per quanto riguarda i parametri di orientamento interno. 193

Fig. 182. Nella figura sono mostrati il risultato delle unioni delle immagini dopo la correzione degli *exif* e a seguito del processo di ottimizzazione eseguito sui risultati della figura precedente. Si possono osservare miglioramenti significativi nello *stitching* delle immagini oltre che l'eliminazione dei valori *outliers* dei parametri di orientamento interno. 193

Fig. 183. Nella figura sono mostrati il risultato delle unioni delle immagini dopo la correzione degli *exif* e la correzione manuale dei parametri di orientamento interno utilizzando quelli stimati attraverso la cal-

ibrazione della camera. Si possono osservare miglioramenti significativi nella proiezione generata utilizzando tali valori. Si noti che l'esposizione differente viene corretta in fase di rendering della proiezione. Sono tuttavia ancora presenti errori, seppur minori, nella proiezione. 196

Fig. 184. In evidenza l'area di sovrapposizione (enfaticizzata) tra le immagini utilizzate per la determinazione della percentuale di sovrapposizione. 198

Fig. 185. Nelle immagini sono poste in evidenza nella proiezione equirettangolare i fotogrammi che la compongono. 199

Fig. 186. Nello schema illustrate le differenti possibilità di elaborazione dei fotogrammi. In un caso sono utilizzate le proiezioni planari equirettangolari dei panorami elaborate tramite processi di stitching dei fotogrammi fisheye, nell'altro l'elaborazione avviene direttamente su fotogrammi fisheye senza passare dalla loro unione ma assegnando loro la caratteristica di punto di stazione di scatto condivisa. 202

Fig. 187. Nell'immagine la schermata di selezione del *camera type* che è necessario impostare su *Spherical* per processare correttamente la tipologia di fotogrammi illustrata in questo paragrafo. 203

Fig. 188. Test ricostruzione tridimen-

sionale utilizzando tutti i fotogrammi sferici acquisiti, nello specifico 53 proiezioni equirettangolari generate a partire da 106 fotogrammi *fisheye*. 204

Fig. 189. Un esempio di *tie point* estratti in una proiezione sferica utilizzata nel processo. 206

Fig. 190. Relazione tra il numero di *tie point* estratti e il numero di fotogrammi relativi alle proiezioni equirettangolari del poligono di calibrazione. 207

Fig. 191. Ricostruzioni fotogrammetriche attraverso l'utilizzo di panorami sferici in numero decrescente e valutazione sulla qualità delle nuvole di punti restituite. In alto la nuvola di punti generata da 53 immagini, in centro da 17 e in basso da 12. 209

Fig. 192. Organizzazione di 34 immagini panoramiche in 17 gruppi. Ogni gruppo corrisponde ad una proiezione sferica. 212

Fig. 193. Nell'immagine illustrata la possibilità utilizzando questo *workflow* di intervenire sulla calibrazione delle immagini relative alle due camere. 212

Fig. 194. Esempi di variabilità dei risultati ottenuti su un *dataset* campione composto da 60 immagini (30 *station groups*) su cui sono stati posizionati gli stessi *control point* ottenendo risultati differenti. 215

- Fig. 195. A sinistra la posizione di un *target* che non è consigliato inserire in quanto posto in una zona troppo affetta da distorsione dell'immagine. A destra la posizione migliore in cui fissare la posizione del *target*. 216
- Fig. 196. Tre esempi di esportazioni delle immagini panoramiche affette da problematiche nell'unione dei fotogrammi realizzate nei punti di stazione composti da due fotogrammi ciascuno realizzati da *Agisoft Photoscan Professional*. 217
- Fig. 197. Utilizzo di 46 immagini realizzati tramite drone attraverso l'utilizzo della modalità *camera station*. 218
- Fig. 198. Risultati della *Self Calibration* eseguita sul campione di immagini per l'elaborazione del panorama. 219
- Fig. 199. Esportazione dell'immagine panoramica correttamente realizzata a partire dai 46 immagini acquisite da drone. 219
- Fig. 200. Schermata di *Agisoft Photoscan* relativa alla visualizzazione delle immagini *fisheye* attraverso l'utilizzo dei settaggi di elaborazioni per le camere multispettrali. 221
- Fig. 201. Primi studi e applicazioni dei sistemi di ancoraggio tra il *Dji Phantom 4 Pro Obsidian* e *GoPro Fusion*. 226
- Fig. 202. Sviluppo in laboratorio e test di sistemi di stabilizzazione e bilanciamento. 227
- Fig. 203. Primo progetto di supporto testato su *DJI Phantom 3 Pro*. (misure espresse in *centimetri*). 228
- Fig. 204. Secondo progetto di supporto testato su *DJI Phantom 3 Pro* (misure espresse in *centimetri*). 228
- Fig. 206. Rappigurazione assonometrica del prototipi del primo tipo di supporto stampato. 230
- Fig. 205. Rappigurazione assonometrica del prototipi del secondo tipo di supporto stampato. 230
- Fig. 207. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d 231
- Fig. 208. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d 231
- Fig. 209. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d 231
- Fig. 210. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d 232
- Fig. 211. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d 232
- Fig. 212. Realizzazione prototipo di supporto tramite stampa 3d 232
- Fig. 213. Soluzione commerciale di supporto realizzata da *PolarPro* per *Phantom 4 Pro*. 233

- Fig. 214. Dettagli del sistema di supporto di *PolarPro* per *Phantom 4 Pro*. 234
- Fig. 215. Vista frontale dell'*UAV* con installata la camera sferica sull'apposito supporto. Le frecce indicano le problematiche di vibrazioni verticali. 235
- Fig. 216. Vista laterale dell'*UAV* con installata la camera sferica sull'apposito supporto. Le frecce indicano le problematiche di oscillazioni orizzontali. 235
- Fig. 217. Schematizzazione delle problematiche dovute alla variazione dei flussi d'aria dopo l'introduzione della piastra. 236
- Fig. 218. Nelle immagini le prime prove di stabilizzazione della camera tramite l'introduzione di tiranti al fine di ridurre le vibrazioni sulla stessa. Successivamente dopo questi test sono stati adottati tiranti in *nylon* per un minore impatto sulle immagini acquisite. 237
- Fig. 219. Introduzione dei tiranti in *nylon* per stabilizzare il corpo camera. 238
- Fig. 220. Distanze ottimali per il posizionamento del supporto. 239
- Fig. 221. Assemblaggio del prototipo di connessione *Camera/Uav* in laboratorio. 240
- Fig. 222. Assemblaggio del prototipo di connessione *Camera/Uav* in laboratorio. Bacchette lignee di stabilizzazione. 240
- Fig. 224. Assemblaggio del prototipo di connessione *Camera/Uav* in laboratorio. 241
- Fig. 223. Prototipo ultimato in laboratorio per la connessione *Camera/Uav*. 241
- Fig. 225. Distanze ottimali per il posizionamento del supporto. 242
- Fig. 226. Schematizzazione di una strisciata da *UAV* con acquisizioni nadirali. 245
- Fig. 227. Tipologie di pianificazioni di voli fotogrammetrici da *UAV*. (A) Strisciata singola; (B) Strisciata a doppia maglia; (C) Orbita circolare. 246
- Fig. 228. Tratto dal catalogo illustrativo *Carl Zeiss* (1976) [fonte: https://it.wikiversity.org/wiki/Rilievo_aerofotogrammetrico consultato il 23/12/2018] 246
- Fig. 229. Tipologie di pianificazione dei voli per l'esecuzione di fotogrammetria aerea in funzione dell'obiettivo. 247
- Fig. 230. Raffigurazione della posizione delle camere per l'acquisizione simultanea dei dati. 248
- Fig. 231. Nell'immagine l'introduzione di un'inclinazione di 5° rispetto alla

posizione della camera nadirale per evitare l'interferenza delle camere nei dati acquisiti. 248

Fig. 232. Risultati di integrazione dati per processo di allineamento di immagini sferiche e *frame*. 250

Fig. 233. Errato orientamento delle immagini frame in assenza delle immagini sferiche. 250

Fig. 234. Risultati di integrazione dati per processo di allineamento di immagini sferiche e *frame*. 251

Fig. 235. Utilizzo della stazione totale per la misura di coordinate di punti a terra. 253

Fig. 236. Modalità impostata su *GoPro Fusion* per il settaggio degli scatti temporizzati. 255

Fig. 237. Eidotipo posizione dei *target* topografici per aerofotogrammetria su campo volo. 255

Fig. 238. Pianificazione del volo con *Pix4d Capture* sull'area di studio. 256

Fig. 239. Target topografici per il volo aerofotogrammetrico. 256

Fig. 240. Acquisizione coordinate dei target topografici attraverso tecnologia *NRTK*. 256

Fig. 241. Realizzazione di volumi ar-

tificiali per la valutazione della qualità delle geometrie ricostruite. 257

Fig. 242. Selezione manuale delle immagini sferiche su mappa eseguita tramite la visualizzazione delle informazioni di *geotag* attraverso *Agisoft Photoscan*. 258

Fig. 243. Settaggi utilizzati per la proiezione delle coordinate da ellissoidiche a geoidiche attraverso *ConveRgo_ge* alla versione 2.05. 259

Fig. 244. Schematizzazione acquisizioni effettuate e relativo processamento per i dati acquisiti in area sperimentale. 260

Fig. 245. Esempio di immagine realizzata con la camera *onboard* del *Phantom 4 Pro Obsidian* inclinata a 45°. 262

Fig. 246. Esempio di immagine sferica acquisita da *GoPro Fusion*. 262

Fig. 247. Allineamento delle sole immagini a camera inclinata realizzate con APR DJI Phantom 4 Pro Obsidian. 263

Fig. 248. Allineamento delle sole immagini a camera sferiche realizzate attraverso la Camera Go Pro Fusion. 263

Fig. 249. Utilizzo delle immagini sferiche per l'orientamento delle inclinate. Il colore rosso indica che le immagini sono state disabilitate per le fasi successive all'al-

- lineamento. 263
- Fig. 250. Schematizzazione del processo utilizzato per elaborare i dati acquisiti e i relativi elaborati ottenuti. Le immagini sono state elaborate prima in modo indipendentemente per tipologia e poi all'interno di uno stesso progetto. 264
- Fig. 251. Allineamento delle immagini a camera inclinata sull'area delle sperimentazioni. 265
- Fig. 252. Allineamento delle sole immagini a camera sferiche sull'area delle sperimentazioni. 265
- Fig. 253. Utilizzo delle immagini sferiche per l'orientamento delle inclinate sull'area delle sperimentazioni. 265
- Fig. 254. Comparazione di un area di dettaglio sulla mesh con le diverse tipologie di acquisizioni. 266
- Fig. 255. Comparazione di un area di dettaglio sull'ortomosaico con le diverse tipologie di acquisizioni. 266
- Fig. 256. Mesh realizzata attraverso l'uso delle sole immagini a camera inclinata. 267
- Fig. 257. Mesh realizzata attraverso l'uso delle sole immagini a camera sferiche. 267
- Fig. 258. Mesh realizzata attraverso l'uso delle sferiche per l'orientamento delle inclinate. 267
- Fig. 259. Ortomosaico realizzato attraverso l'uso delle sole immagini a camera inclinata. 268
- Fig. 260. Ortomosaico realizzato attraverso l'uso delle sole immagini a camera sferiche. 268
- Fig. 261. Ortomosaico realizzato attraverso l'uso delle sferiche per l'orientamento delle inclinate. 268
- Fig. 262. Dettaglio della manifestazione del leggero effetto di distorsione a barre riscontrata nell'ortomosaico realizzato tramite l'integrazione di immagini sferiche e inclinate. 269
- Fig. 263. Limitazione dei *Key Point* e dei *Tie Point*. 269
- Fig. 264. Risultati di allineamento delle immagini inclinate nella versione di *Photoscan 1.4.4 build 6848* (nessun limite tie/key point). 271
- Fig. 265. Risultati di allineamento delle immagini inclinate nella versione di *Photoscan Pro v. 1.4.0 build 5650* (nessun limite tie/key point) GCP prima dell'allineamento. 271
- Fig. 266. Risultati di allineamento delle immagini inclinate nella versione di *Photoscan 1.4.4 build 6848* 271
- Fig. 267. Risultati di allineamen-

to delle immagini inclinate nella versione di *Photoscan 1.4.4 build 6848*. Limite: *key point 40.000 tie point 10.000*) *GCP prima* dell'allineamento. 272

Fig. 269. Veduta del Borgo Medievale di Torino visto dal fiume [immagine autopordotta] 273

Fig. 268. Vista attuale del fronte principale verso il corso Marconi del Castello del Valentino [immagine autopordotta] 273

Fig. 270. Classificazione voli SAPR e tipologie delle operazioni. [AOPA ITALIA divisione APR] 277

Fig. 271. Analisi e valutazioni di una missione di volo. [AOPA ITALIA divisione APR] 278

Fig. 272. Esempio dell'APR utilizzato (DJI Spark) appositamente alleggerito. Gli alleggerimenti sono stati realizzati tramite stampa 3d. 282

Fig. 273. Consultazione delle cartografie aeronautiche per identificazione dell'area delle operazioni. [Fonte: *AIP Italia* consultabile sui *enav.it*] 284

Fig. 274. Legenda cartografia aeronautica riportata [Fonte: *AIP Italia* consultabile sui *enav.it*] 284

Fig. 275. Dettaglio e limiti *CTR1*. [tratto da: <https://www.d-flight.it> consultato il 04/01/2019] 285

Fig. 276. Dettaglio area ristretta *LIR34 - Torino città*. [tratto da: <https://www.d-flight.it> consultato il 04/01/2019] 285

Fig. 277. Schema della procedura autorizzativa relativa all'area *LI34 - Torino Città*. 286

Fig. 278. Seconda istanza di nulla osta al sorvolo della *LI-R34 Torino città* presentata dagli operatori coinvolti. 287

Fig. 279. Lettera di autorizzazione alle operazioni. 288

Fig. 280. Veduta verso la città. Incisione anonima su disegno di Giovanni Tommaso Borgonio, 1668, in *Theatrum Statuum Regiae Celsitudinis Sabaudiae Ducis, Pedemonti Principis, Cypri Regis. Pars Prima, exhibens Pedemontium, et in eo Augustam Taurinorum et loca viciniora, Amstelodami, apud Haeredes Iohannis Blaeu, 1682, vol. I, tav. 28. ASCT, Collezione Sim-eom, Theatrum Sabaudiae, I, 28, su concessione dell'Archivio Storico della Città di Torino. 289*

Fig. 282. Litografia del «Gab.o di Dis.o e Litog. Dell'Uff. Spec.le dei Brevetti d'Invenzione Capuccio e Latini», in *Album descrittivo dei principali oggetti esposti nel Real Castello del Valentino in occasione della Sesta Esposizione Nazionale dei prodotti d'industria nell'anno 1858, Torino, Stamperia dell'Unione Tipografico Editrice,*

1858, tav. non numerate. ASCT, Collezione Simeom, C 1911, su concessione dell'Archivio Storico della Città di Torino.

290

Fig. 281. Incisione in rame su disegno di Domenico Ferri in Giovanni Vico, *Il Real Castello del Valentino*. Monografia storica, Torino, Stamperia Reale, 1858. ASCT, Collezione Simeom, B 577, su concessione dell'Archivio Storico della Città di Torino. 290

Fig. 283. Orientamento delle immagini single frame (nadirali e inclinate) e panorami sferici. 294

Fig. 284. Acquisizione di punti naturali attraverso rilievo topografico satellitare NRTK. 295

Fig. 285. Estrazione delle scansioni laser scanner di coordinate di punti naturali sui prospetti del corpo di fabbrica. 296

Fig. 286. Schematizzazione acquisizioni effettuate e relativo processamento per i dati acquisiti in area sperimentale. 297

Fig. 287. Visualizzazione ortogonale dall'alto della nuvola di punti dalla quale si possono osservare alcune aree non correttamente ricostruite. 298

Fig. 288. Visualizzazione assonometrica della nuvola di punti dalla quale

appaiono evidenti le problematiche di ricostruzione degli alzati attraverso il solo uso di immagini nadirali. 299

Fig. 289. Torino, *Castello del Valentino*, proiezione equirettangolare di un'immagine sferica acquisita da UAV tramite la camera GoPro Fusion. 301

Fig. 290. Torino, *Castello del Valentino*, estrazione *Tie Point* su panorama sferico senza mascheratura del UAV visibile nella parte alta delle immagini. 301

Fig. 291. Torino, *Castello del Valentino*, mascheratura delle porzioni alte dell'immagini, superflue per il processo di ricostruzione tridimensionale. 301

Fig. 292. Torino, *Castello del Valentino*, Mesh tridimensionale ottenuta dalle sole immagini sferiche tramite acquisizione UAV. 302

Fig. 294. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione a volo d'uccello del modello tridimensionale texturizzato generato attraverso le sole immagini sferiche acquisite da UAV. 303

Fig. 293. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto generata dalle sole immagini sferiche tramite acquisizione UAV. 303

Fig. 295. Comparazione del differente risoluzione delle immagini acquisite da un'altezza di 40 metri su una delle posizioni

- dei punti naturali. Immagine sferica (a); immagine frame (b) 305
- Fig. 296. Torino, *Castello del Valentino*, mesh generata dalle sole immagini 360. 306
- Fig. 297. Torino, *Castello del Valentino*, mesh generata dalle acquisizioni frame nadirali e dalle immagini 360. 306
- Fig. 298. Torino, *Castello del Valentino*, allineamento delle immagini nadirali. 307
- Fig. 299. Torino, *Castello del Valentino*, allineamento delle immagini sferiche. 307
- Fig. 300. Torino, *Castello del Valentino*, allineamento delle immagini frame nadirali sferiche. 307
- Fig. 301. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto generata dall'uso congiunto di immagini nadirali e sferiche, dettaglio della pavimentazione con identificate le aree in cui è osservabile la differente risoluzione delle immagini utilizzate. 309
- Fig. 302. Torino, *Castello del Valentino*, comparazione del dettaglio tra l'ortofoto realizzata con le immagini sferiche (a sinistra) e con le nadirali (a destra) 309
- Fig. 303. Torino, *Castello del Valentino*, *seamlines* sulle ortofoto relative al modello generato dalle immagini nadirali + sferiche; (a) ortofoto generata dalle immagini nadirali e sferiche; (b) ortofoto generata soltanto dalle immagini nadirali. 309
- Fig. 304. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto generata sul modello ottenuto dalle sole immagini nadirali. 310
- Fig. 305. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto del modello generato dalle immagini nadirali e dalle immagini sferiche utilizzando entrambe per la realizzazione dell'ortofoto. 310
- Fig. 306. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto del modello generato dalle immagini nadirali e dalle immagini sferiche utilizzando solo le nadirali per la realizzazione dell'ortofoto. 310
- Fig. 307. Visualizzazione posizioni delle prese frame (nadirali e inclinate) e delle immagini sferiche all'interno di uno stesso processo di elaborazione sul modello tridimensionale texturizzato. 311
- Fig. 309. Torino, *Castello del Valentino*, *Mesh di ricostruzione texturizzata*, realizzata attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici. 312
- Fig. 308. *Dati di riepilogo* per le elaborazioni sul *Castello del Valentino* delle immagini tradizionali nadirali e inclinate associate alle immagini sferiche. 312
- Fig. 310. Torino, *Castello del Valentino*, *Nuvola di punti monocromatica*; ri-

costruzione basata sull'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici. 313

Fig. 311. Torino, *Castello del Valentino*, *Mesh di ricostruzione*, realizzata attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici. 313

Fig. 312. Torino, *Castello del Valentino*, *Mesh di ricostruzione*, realizzata attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici. 313

Fig. 313. Torino, *Castello del Valentino*, *DSM ombreggiato* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici in ambiente GIS. 315

Fig. 314. Torino, *Castello del Valentino*, analisi esposizioni su *DSM* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici in ambiente GIS. 316

Fig. 315. Torino, *Castello del Valentino*, analisi pendenze su *DSM* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici in ambiente GIS. 316

Fig. 316. Torino, *Castello del Valentino*, analisi pendenze su *DSM* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici in

ambiente GIS. 317

Fig. 317. Torino, *Castello del Valentino*, analisi pendenze su *nuvola di punti* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV. 318

Fig. 318. Torino, *Castello del Valentino* analisi delle pendenze torre *nord-est* sulla nuvola di punti, realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV. 319

Fig. 319. Torino, *Castello del Valentino*, analisi pendenze su *nuvola di punti* realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV. 320

Fig. 320. Torino, *Castello del Valentino* analisi della planarità del cortile, eseguito sulla mesh ricavata dalla nuvola di punti realizzato attraverso l'integrazione delle immagini frame (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV. 321

Fig. 321. Torino, *Castello del Valentino* analisi della planarità del cortile e sovrapposizione delle curve di livello a passo di 0.1 m, eseguito sulla *mesh* ricavata dalla nuvola di punti realizzato attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV. 322

Fig. 322. Torino, *Castello del Valentino*

no vista assonometrica cortile, curve di livello su modello di integrazione *mesh* e nuvola di punti. 322

Fig. 323. Traslazione dell'ortofoto per riportarla in coordinate globali attraverso il comando di *Shift* di *Esri Arc Map* 10.3 324

Fig. 325. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Generale (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV. 325

Fig. 324. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Generale (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV. 325

Fig. 326. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Generale (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV. 326

Fig. 327. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Dettaglio Cortile (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV. 327

Fig. 328. Torino, *Castello del Valentino*, Ortofoto Dettaglio Pavimentazione (fuori scala); Realizzata attraverso l'integrazione delle immagini *frame* (nadirali+inclinate) e i panorami sferici acquisite da UAV.

328

Fig. 329. Schematizzazione delle acquisizioni e delle elaborazioni eseguiti sui prospetti del *Castello del Valentino*.

329

Fig. 330. Nelle immagini la tipologie di acquisizioni impiegata per la i test eseguiti sulla ricostruzione del modello tridimensionale con immagini sferiche. 330

Fig. 331. Torino, *Castello del Valentino*, Ricostruzione tridimensionale della Nuvola di punti realizzata da UAV attraverso l'impiego delle sole immagini sferiche.

331

Fig. 332. Prime prove di integrazione utilizzano le immagini tradizionali di due dei tre fronti del *Castello del Valentino* e le immagini sferiche. 332

Fig. 333. Integrazione di immagini sferiche e tradizionali sui fronti del *Castello del Valentino*. 332

Fig. 334. Criticità emerse nel processo di orientamento delle immagini sferiche e tradizionali sui fronti del *Castello del Valentino* in assenza delle informazioni di *geotag*, vista di prospettiva. 333

Fig. 335. Criticità del processo di orientamento delle immagini sferiche e tradizionali sui fronti del *Castello del Valentino* in assenza delle informazioni di *geotag*, vista di pianta. 333

- Fig. 336. Integrazione di immagini sferiche e tradizionali sui fronti del *Castello del Valentino*, vista prospettica. 334
- Fig. 337. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto quotata fuori scala prospetto sud. (vd. allegati grafici) 335
- Fig. 338. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto quotata fuori scala prospetto nord. (vd. allegati grafici) 335
- Fig. 339. Torino, *Castello del Valentino*, ortofoto quotata fuori scala prospetto est. (vd. allegati grafici) 335
- Fig. 340. Torino, *Castello del Valentino*, Stralcio di ortofoto del prospetto nord (fuori scala) 336
- Fig. 341. Torino, *Castello del Valentino*, Stralcio di ortofoto del prospetto nord (fuori scala) 337
- Fig. 342. Torino, *Borgo Medievale*, 2018, immagine aerea acquisita da drone. 338
- Fig. 343. Torino, *Borgo Medievale*, 2018, pianificazione traiettorie di volo UAV per la ricostruzione tridimensionale aerofotogrammetrica; (a) acquisizioni nadirali; (b) e (c) acquisizioni camera inclinata a 45°; (d) volo circolare. 340
- Fig. 344. Orientamento di tutte le immagini utilizzate nel processo di ricostruzione tridimensionale sull'area del *Borgo Medievale* di Torino. 341
- Fig. 345. Posizione delle camere e sovrapposizione delle immagini. Come si può osservare ogni punto dell'area è visto da un numero non inferiore a 9 immagini. 341
- Fig. 347. Torino, *Borgo Medievale*, (2018), Visualizzazione posizioni delle immagini frame (nadirali e inclinate). 342
- Fig. 346. *Dati di riepilogo* per le elaborazioni sul *Borgo Medievale* delle immagini frame nadirali e inclinate. 342
- Fig. 348. Torino, *Borgo Medievale*, (2018), Ortofoto realizzata attraverso aerofotogrammetria UAV. 343
- Fig. 349. Torino, *Borgo Medievale*, (2018), Ortofoto realizzata tramite volo UAV (fuoriscala) 344
- Fig. 350. Torino, *Borgo Medievale*, (2018), Dettaglio Ortofoto realizzata tramite volo UAV (fuoriscala) 345
- Fig. 351. Torino, *Borgo Medievale*, *DSM ombreggiato* realizzato attraverso fotogrammetria UAV in ambiente GIS. 346
- Fig. 352. Torino, *Borgo Medievale*, *DSM ombreggiato* realizzato attraverso fotogrammetria UAV in ambiente GIS. (in rosso il terreno, in blu la vegetazione) 346
- Fig. 354. Torino, *Borgo Medievale*,

- Classificazione della nuvola di punti per l'estrazione del terreno. 347
- Fig. 353. Estrazione delle curve di livello a passo costante di 0.5 m sul *DSM* per le sole porzioni di terreno estratte dalla nuvola di punti. 347
- Fig. 355. Incisione in rame su disegno di Domenico Ferri in Giovanni Vico, *Il Real Castello del Valentino*. Monografia storica, Torino, Stamperia Reale, 1858. ASCT, Collezione Simeom, B 577, su concessione dell'Archivio Storico della Città di Torino. 348
- Fig. 356. Chiesa Borgo Medievale, Torino, Borgo Medievale, 2004 (P. Robino) 349
- Fig. 357. Incisione in rame su disegno di Domenico Ferri in Giovanni Vico, *Il Real Castello del Valentino*. Monografia storica, Torino, Stamperia Reale, 1858. ASCT, Collezio 351
- Fig. 358. Importazione delle immagini. Sulla sinistra due gruppi ciascuno composto da 46 immagini acquisite da UAV; a destra la proiezione equirettangolare corrispondente. 353
- Fig. 359. Stima dei parametri interni per la camera utilizzata relativi all'orientamento esterno e interno. Per ognuna delle immagini i parametri interni restano i medesimi in quanto generati dalla stessa camera (nell'immagine riportate 4 immagini di esempio). 353
- Fig. 360. Visualizzazione delle singole immagini proiettate sulla sfera. 354
- Fig. 361. Analisi della qualità delle connessioni tra le immagini per la realizzazione del panorama sferico. 354
- Fig. 362. Valutazione dei punti di connessione stimati dal software e eventuale aggiunta manuale di punti. 355
- Fig. 363. Esempio di esportazione di uno dei panorami sferici generati alla massima qualità. 357
- Fig. 364. Riduzione delle dimensioni del panorama sferico a 10.000 x 5000 px per semplificare i processi di Structure From Motion per le finalità dello studio. 357
- Fig. 365. Scelta della tipologia di miscelazione delle immagini e formato di esportazione delle proiezioni. 357
- Fig. 366. Utilizzo di 46 fotogrammi realizzati tramite APR attraverso l'utilizzo della modalità camera station di Agisoft Photoscan Pro.. 359
- Fig. 367. Proiezione generata all'interno del software di Structure From Motion di uno dei panorami eseguiti da UAV 359
- Fig. 368. Strisciate di acquisizione

dei frame utilizzati (in verde) e scartati (in rosso). Eliminando le immagini acquisite lungo le strisciate rosse i due percorsi risultano totalmente indipendenti tra loro.

360

Fig. 369. Posizione delle immagini sferiche sulla nuvola di punti monocromatica (in alto) e sul modello texturizzato (in basso) ottenuta nel processo di ricostruzione realizzato dalle camere sferiche e dai frame acquisiti da UAV 361

Fig. 370. Posizione dei punti di controllo su una delle immagini sferiche. In fase di elaborazione solo alcuni dei punti sono stati utilizzati mentre i restanti sono stati impiegati come *check point*. 362

Fig. 371. Comparazione dell'allineamento delle sole immagini frame in cui metà delle immagini non viene allineato e solo un fronte è ricostruito (a sinistra); l'allineamento realizzato con l'aggiunta di quattro immagini frame in cui tutte le immagini sono state allineate e entrambi i fronti risultano correttamente ricostruiti (a destra).

362

Fig. 372. Visualizzazione della nuvola di punti SFM. 364

Fig. 373. Sezione trasversale di sovrapposizione delle nuvole di punti *lidar* e *fotogrammetrica* nelle aree critiche della ricostruzione dalla quale si può osservare lo sdoppiamento della geometria per la nuvola

generata attraverso l'uso dei quattro panorami sferici. 366

Fig. 374. Analisi distanza *cloud to cloud* tra i dati *lidar* (riferimento) e la ricostruzione *SFM* attraverso immagini sferiche e frame acquisiti da UAV sulla porzione principale del prospetto della Chiesa (le misure riportate sono espresse in metri). 367

Fig. 375. Analisi distanza *cloud to cloud* tra i dati *lidar* (riferimento) e la ricostruzione *fotogrammetrica* attraverso immagini sferiche e frame acquisiti da UAV sul portale d'ingresso della Chiesa (le misure riportate sono espresse in metri). 368

Fig. 376. Analisi distanza *cloud to cloud* tra i dati *lidar* (riferimento) e la ricostruzione *fotogrammetrica* attraverso immagini sferiche e frame acquisiti da UAV sulla porzione principale del prospetto della Chiesa (le misure riportate sono espresse in metri). 369

Fig. 378. Visualizzazioni di una porzione di nuvola di punti fotogrammetrica. Fronte Ovest. 370

Fig. 377. Visualizzazioni di una porzione di nuvola di punti fotogrammetrica. Fronte Est. 370

Fig. 379. Correzione della *mesh* tridimensionale prima e dopo il processo di eliminazione delle porzioni superflue di geometria avvenuto attraverso il software

Hexagon 3D Reshaper. 371

Fig. 380. *Ortofoto Chiesa Borgo Medievale*, Torino, scala 1:100. L'immagine è stata generata dall'integrazione di single frame e immagini sferiche. 372

Fig. 381. *Vettorializzazione ortofoto della Chiesa Borgo Medievale*, Torino. (scala 1:100) 373

Fig. 382. A. D'Andrade, Ciriè, *facciata della chiesa di San Giovanni Battista*, 1883 ca.; penna e matita, mm 197 x 129 (GAM, FdA, LT254). 374

Fig. 383. A. D'Andrade, Ciriè, *pinna-coli della chiesa di San Giovanni Battista*, 1883 ca.; penna e matita, mm 195 x 134 (GAM, FdA, LT251). 374

Fig. 385. Vittorio Ecclesia, *"Castello Feudale e Borgo"*, *particolare della chiesa*, 1884; stampa fotografica, mm 200 x 265 (GAM, Biblioteca d'Arte dei Musei Civici di Torino, GFII ECCL.) 375

Fig. 384. A. D'Andrade, Valperga, *chiesa di San Giorgio in castello, parete esterna della navata destra, affreschi e cotti ornamentali*, 1883 ca.; matita, mm 132 x 194 (GAM, FdA, LT434). 375

Fig. 386. Ciriè, *Chiesa Parrocchiale di San Giovanni Battista*, 2004 (P. Robino). 376

Fig. 387. Ciriè, *Chiesa Parrocchiale di San Giovanni Battista, particolare di pinn-*

acolo, 2004 (P. Robino). 376

Fig. 388. Torino, Borgo Medievale, *"Casa di Chieri"*, 2004 (P. Robino). 377

Fig. 389. *Ortofoto Casa di Chieri*, Torino, Borgo Medievale, (fuoriscala). L'immagine è stata generata dall'integrazione di single frame e immagini sferiche. 378

Fig. 390. A. D'andrade, *Chieri, casa dei Villa*, 1 aprile 1883; matita, penna e acquarello, mm 192 x 91 (GAM, FdA, LT1405) 379

Fig. 391. *Reality-virtuality continuum*. [Tratto e rieditato da: Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A taxonomy of mixed reality visual displays. IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 77(12), 1321-1329.] 383

Fig. 392. Sensorama, uno dei primi visori 3d.[tratto da:Basso, A. (2017). Advantages, *Critics and Paradoxes of Virtual Reality Applunied to Digital Systems of Architectural Prefiguration, the Phenomenon of Virtual Migration*. In Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings (Vol. 1, No. 9, p. 915).] 384

Fig. 393. Alcuni dei primi prototipi per la realtà virtuale. (a) *Data Glove* [tratta da https://en.wikipedia.org/wiki/Power_Glove consultato il 13/12/2018]; (b) *Nintendo Power Glove* [Evan-Amos [Public

domain], from Wikimedia Commons]; (c) *Virtuality Cs 1000* [tratto da <http://www.retro-vr.co.uk/test/1000CS.html> consultato il 13/12/2018] 385

Fig. 394. Modello di visore del 1968 progettato da *Ivan Sutherland* denominato *Spada di Damocle* [tratto da: <https://www.virtualerealta.it/storia-realta-virtuale-30/> consultato il 13/01/2018] 386

Fig. 396. Esempi di *head-mounted display*. (a) *Google Glass*; (b) *Samsung Gear Vr*; (c) *Sony Playstation Vr*. 388

Fig. 395. *Google Glass* esempio di visore per la realtà aumentata [fonte: tech-nobuffalo.com consultato il 3/12/2018] 388

Fig. 397. Sistema *Google Cardboard* prima dell'assemblaggio delle parti. [<http://www.vigamusmagazine.com/139722/tutorial-come-costruire-un-google-cardboard/> consultato il 13/02/2019] 389

Fig. 398. Installazione dello smartphone all'interno di *Google Cardboard* [<http://geoawesomeness.com/google-cardboard-paper-virtual-reality-set-now-supports-street-view-app/> consultato il 13/02/2019] 389

Fig. 400. Esploso di un visore 3D *low cost*. [fonte: <https://yammo.store/prodotto/vr-box-joypad-bluetooth/>] 390

Fig. 399. Esempi di visualizzatori *low cost* simili alla soluzione di *Google Cardboard* il cui funzionamento è dipendente dall'installazione di uno smartphone interno. 390

Fig. 401. Soluzione commerciale per la applicazioni di VR. *HTC VIVE* composto da un visore *HDM*, due *Base Stations wireless* e due *controllers* manuali per l'interazione. [Fonte: <https://www.vive.com/us/product/vive-virtual-reality-system/>] 391

Fig. 402. Soluzione commerciale per la applicazioni di VR. *HTC VIVE* dettaglio sul visore *HDM*, vista laterale. [Fonte: ibidem] 392

Fig. 403. Soluzione commerciale per la applicazioni di VR. *HTC VIVE* dettaglio sulle *Base Stations wireless*. [Fonte: ibidem] 392

Fig. 404. Soluzione commerciale per la applicazioni di VR. *HTC VIVE* dettaglio di uno dei *controllers* manuali per l'interazione. [Fonte: ibidem] 392

Fig. 405. Precauzioni per il montaggio *Base Stations wireless* [Fonte: Manuale Utente HTC Vive; https://www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/vive_pre_user_guide.pdf consultato il 14/01/2019] 393

Fig. 406. Interazione tra le componenti del sistema *HTC Vive* in funzionamento. [Fonte: Manuale Utente HTC Vive;

https://www.htc.com/managed-assets/shared/desktop/vive/vive_pre_user_guide.pdf consultato il 14/01/2019] 393

Fig. 407. Integrazione dati per la realizzazione del Virtual Tour Multi-Sensoriale 396

Fig. 408. Nell'immagine la realizzazione del *Virtual Tour* attraverso *Kolor Panotour* 398

Fig. 410. Torino, *Castello del Valentino*, *keyplan* piano nobile, *hotspot* relativi alle immagini sferiche interne utilizzate per il Virtual Tour. 400

Fig. 409. Torino, *Castello del Valentino*, posizionamento degli *hotspot* relativi alle immagini sferiche aeree acquisite da drone per la realizzazione del Virtual Tour. 400

Fig. 411. Torino, *Castello del Valentino*, *keyplan* piano nobile, *hotspot* relativi alle immagini sferiche interne utilizzate per il Virtual Tour. 401

Fig. 412. Torino, *Castello del Valentino*, tre esempi di panorami sferici esterni realizzato da UAV ed inseriti nel Virtual Tour realizzato. 402

Fig. 413. Torino, *Castello del Valentino*, viste di tra ambienti interni del piano nobile inseriti nel Virtual Tour realizzato. 403

Fig. 414. Visualizzazione del model-

lo tridimensionale texturizzato ottenuto tramite aerofotogrammetrica nel portale web di *SketchFab*. 404

Fig. 415. Torino, *Castello del Valentino*, Nuvole di punti delle differenti acquisizioni sovrapposte. In rosso la nuvola di punti per le acquisizioni sui prospetti, in verde le aree della nuvola di punti realizzata dalle acquisizioni aeree generali da rimuovere. 405

Fig. 416. Torino, *Castello del Valentino*, Nuvole di punti delle differenti acquisizioni sovrapposte. In rosso la nuvola di punti per le acquisizioni sui prospetti, in verde selezionate le porzioni di copertura ridondanti da eliminare dalla nuvola dei prospetti. 406

Fig. 417. Torino, *Castello del Valentino*, Nuvole di punti; in rosso le porzioni di nuvola di punti generata dalle acquisizioni sui prospetti, in giallo le porzioni mantenute dalla nuvola di punti generale. 406

Fig. 418. Torino, *Castello del Valentino*, preparazione del modello alla *Virtual Reality* attraverso il settaggio dell'altezza dell'osservatore predefinita. 407

Fig. 419. Torino, *Castello del Valentino*, preparazione del modello alla *Virtual Reality* impostazione manuale del livello del piano di calpestio. 407

Fig. 420. Visualizzazione della *mesh* texturizzata da un normale computer por-

tatile. 408

Fig. 421. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione informazioni storiche sul modello del fotogrammetrico . 408

Fig. 422. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione informazioni sul processo di realizzazione della mesh fotogrammetrico. 409

Fig. 423. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione informazioni sull'analisi della planarità della pavimentazione del cortile. 409

Fig. 424. Torino, *Castello del Valentino*, Visualizzazione informazioni sull'analisi della planarità della pavimentazione del cortile. 410

Fig. 425. Torino, *Borgo Medievale*, pianificazione dei voli automatici attraverso il *Mission Hub* di *LitchiApp* per l'acquisizione di filmati 360° 411

Fig. 426. Torino, *Borgo Medievale*, settaggio dei parametri di volo automatico per l'acquisizione di filmati 360° attraverso il *Mission Hub* di *LitchiApp*. 412

Fig. 427. Torino, *Borgo Medievale*, settaggio dei waypoint e punti di orientamento per volo automatico per l'acquisizione di filmati 360° attraverso il *Mission Hub* di *LitchiApp*. 412

Fig. 428. Pesi dei file in termini di Gi-

gaByte per differenti risoluzioni e codifiche di filmato. 413

Fig. 429. Schermata relativa al montaggio dei video sferici generati dalla *GoPro Fusion* attraverso *Final Cut Pro X*. 414

Fig. 430. Schermata relativa al controllo dei colori, saturazione ed esposizione dei video sferici generati dalla *GoPro Fusion* in *Final Cut Pro X*. 415

Fig. 431. Mascheratura del drone attraverso strumento *Patch* in *Final Cut Pro X* per la mascheratura del drone nei filmati. 416

Fig. 432. Settaggio della maschera applicata sul drone attraverso strumento *Patch* in *Final Cut Pro X*. 416

Fig. 433. Descrizione dell'immagine da inserire 418

Fig. 434. Descrizione dell'immagine da inserire 419

Sommario Tabelle

Tab. 1. Schema del processo di orientamento fotogrammetrico [Cannarozzo. (2019). Retrieved from http://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Principi_e_strumenti_fotogrammetria.pdf]. 36

Tab. 2. Nella tabella le principali caratteristiche tecniche relative alla camera 360° Go-pro Fusion 61

Tab. 3. Drone e camera scelti per le sperimentazioni. Nello specifico *Dji Phantom 4 Obsidian* con installata la camera sferica *GoPro Fusion*. 63

Tab. 4. Nella tabella le principali caratteristiche tecniche relative all'UAV selezionato. 64

Tab. 5. Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti tramite *Self Calibration*. 98

Tab. 6. Tabella riepilogativa dei risultati ottenuti tramite *Self Calibration*. 99

Tab. 7. Percentuale di allineamento relativa alla somma delle due acquisizioni eseguite suddivise per camera e assenza o presenza di target nella fase di calcolo. 102

Tab. 8. Numero di tie point ottenuto tramite la somma di quelli ottenuti nelle due acquisizioni e media dei valori di *RMS* degli errori di riproiezione suddivisi per camera e assenza o presenza di target nella fase di

calcolo. 102

Tab. 9. Risultati parametri di calibrazione desunti tramite la *Self Calibration* di *Agisoft Photoscan* relativi alla *Camera Front*. 103

Tab. 10. Risultati parametri di calibrazione desunti tramite la *Self Calibration* di *Agisoft Photoscan* relativi alla *Camera Back*. 103

Tab. 11. Ottimizzazione dei parametri di calibrazione ottenuti tramite *Self Calibration* relativi alla *Camera Front*. 104

Tab. 12. Ottimizzazione dei parametri di calibrazione ottenuti tramite *Self Calibration* relativi alla *Camera Back*. 104

Tab. 13. Risultati stima parametri interni (pagina precedente) e deviazioni standard per la *Camera Front* a seguito del processo di calibrazione su *chessboard* attraverso il *Camera Calibration Tool* di *Matlab R2018a*. 110

Tab. 14. Risultati stima parametri interni e deviazioni standard per la *Camera Back* a seguito del processo di calibrazione su *chessboard* attraverso il *Camera Calibration Tool* di *Matlab R2018a*. 111

Tab. 15. Numeri di immagini e condizioni di illuminazione dei dataset per la fase di calibrazione con *Agisoft Lens*. 117

Tab. 16. I quattro modelli di calibrazione calibrati realizzati tramite l'applicativo *Lens*

di *Agisoft Photoscan Professional*.

120

Tab. 17. Numeri di immagini allineate relative all'area test al variare delle condizioni di illuminazione dei dataset adottati per la fase di calibrazione con *Agisoft Lens*. 121

Tab. 18. Nella tabella i valori della calibrazione ottenuta con *Agisoft Lens* e successivamente corretti tramite la procedura di ottimizzazione su un area campione con 16 punti di controllo di coordinate note.

124

Tab. 19. Tipologia di camera utilizzata. *Si segnala che il valore di 3 mm come Focal Length è stato fornito dai *exrif* della camera. Da analisi più approfondite (illustrate nei capitoli successivi) esso risulterà circa 1.21 mm. Tale valore non presenta tuttavia problematiche per il calcolo dal momento che la calibrazione permette di ricavare correttamente il valore utile. 125

Tab. 20. Coefficienti di calibrazione e matrice di correlazione. 126

Tab. 21. Errori stimati in millimetri nei *Ground Control Points* nelle elaborazioni della *Camera Front*. 128

Tab. 22. Errori stimati in millimetri nei *Check Points* nelle elaborazioni della *Camera Front*. 128

Tab. 23. Errori stimati totali in millimetri nei *Ground Control Points* nelle elaborazioni

della *Camera Front*. 128

Tab. 24. Errori stimati totali in millimetri nei *Check Points* nelle elaborazioni della *Camera Front*. 128

Tab. 25. Coefficienti di calibrazione e matrice di correlazione relativa alla *Camera Back*. 136

Tab. 26. Errori stimati in millimetri nei *Ground Control Points* nelle elaborazioni della *Camera Back*. 138

Tab. 27. Errori stimati in millimetri nei *Check Points* nelle elaborazioni della *Camera Back*. 138

Tab. 28. Errori stimati totali in millimetri nei *Ground Control Points* nelle elaborazioni della *Camera Back*. 138

Tab. 29. Errori stimati totali in millimetri nei *Check Points* nelle elaborazioni della *Camera Back*. 138

Tab. 30. Esempio di struttura del file generato tramite *script* che mette in relazione per ogni punto le sue coordinate e l'errore di riproiezione stimato. 142

Tab. 31. Percentuali punti per soglie di errori di riproiezione stimati sulle due camere oggetto di calibrazione 144

Tab. 32. In tabella il modello di calibrazione ritenuto più valido i realizzate attraverso *Agisoft Lens*. 168

Tab. 33. Tabella di riepilogo dei principali

- parametri utilizzati in *Autopano Giga* per testare metodi di *stitching* più avanzati. 186
- Tab. 34. Nella tabella si riporta a titolo esemplificativo i dati relativi alla stima del valore di sovrapposizione tra le immagini. 199
- Tab. 35. Nella tabella una comparazione tra le analisi svolte al variare del numero di immagini. 207
- Tab. 36. Valori degli errori stimati *control points* espressi in centimetri per i differenti test effettuati con le proiezioni sferiche. 208
- Tab. 37. Valori degli errori stimati nei *check points* espressi in centimetri per i differenti test effettuati con le proiezioni sferiche. 208
- Tab. 38. Nella tabella una comparazione tra le analisi svolte al variare del numero di immagini. 213
- Tab. 39. Valori degli errori stimati *control points* espressi in centimetri per i differenti test effettuati con l'uso del settaggio *camera station* e i fotogrammi *fisheye* separati. 214
- Tab. 40. Valori degli errori stimati nei *check points* nei punti di controllo espressi in centimetri per i differenti test effettuati. 214
- Tab. 41. Esempi di variabilità nel numero di immagini allineati correlati al numero di *tie point* e all'errore stimato nei *control point*. 215
- Tab. 42. Nella tabella le principali caratteristiche tecniche relative alla camera 360° GoPro Fusion 243
- Tab. 43. Test sperimentali eseguiti sul drone in campo volo. 254
- Tab. 44. Coordinate dei *target* topografici prima e dopo la proiezione sul geoide di riferimento. 259
- Tab. 45. Percentuali e numero di immagini allineate per le differenti elaborazioni. 264
- Tab. 46. Nella tabella la percentuale di allineamento relativa a tutti i test eseguiti. 270
- Tab. 47. Nella tabella le prescrizioni relative ad ognuno degli scenari standard. In rosso evidenziato lo scenario utilizzato per questo lavoro. [tratto da: <https://www.d-flight.it> consultato il 04/01/2019] 279
- Tab. 48. Nella tabella gli scenari e le relative prescrizioni relative alla distanza dal pilota orizzontale e verticale in base al peso del mezzo e alla tipologie di operazioni per ogni scenario. In rosso evidenziato lo scenario utilizzato per questo lavoro. [tratto da: <https://www.d-flight.it> consultato il 04/01/2019] 280
- Tab. 49. Regole operazioni specializzate

nelle aree CTR Zona 1 e LIR34 - Torino Città. 285

Tab. 50. Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points. 298

Tab. 51. Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points. 298

Tab. 52. Visualizzazione ortogonale dall'alto della nuvola di punti dalla quale si possono osservare alcune aree non correttamente ricostruite. 299

Tab. 53. Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points per le elaborazioni sul *Castello del Valentino* delle sole immagini sferiche. 302

Tab. 54. Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points per le elaborazioni sul *Castello del Valentino* delle sole immagini sferiche. 302

Tab. 55. Analisi dei punti di forza e delle debolezze relative all'utilizzo indipendente delle immagini frame e delle immagini sferiche. 304

Tab. 56. Approfondimento sul volo eseguito per l'acquisizione simultanea dei dati. 305

Tab. 57. Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points per le elaborazioni sul *Castello del Valentino* delle immagini frame associate alle immagini sferiche. 308

Tab. 58. Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points per le elaborazioni sul *Castello del Valentino* delle immagini frame associate alle immagini sferiche. 308

Tab. 59. Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points per le elaborazioni sul *Castello del Valentino* delle immagini tradizionali nadirali e inclinate associate alle immagini sferiche. 312

Tab. 60. Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points per le elaborazioni sul *Castello del Valentino* delle immagini tradizionali nadirali e inclinate associate alle immagini sferiche. 312

Tab. 61. Quantificazione numerica delle pendenze espresse in gradi per i punti delle coperture del Castello del Valentino rappresentati nella figura seguente. 318

Tab. 62. Esempio di troncatura delle coordinate globali eseguita su un Ground Control Point. 324

Tab. 65. Tipologia di camere utilizzate per le acquisizioni sul Borgo Medievale. 342

Tab. 63. Root Mean Squared (RMS) Error nei Control points per le elaborazioni sul *Borgo Medievale* delle immagini frame nadirali e inclinate. 342

Tab. 64. Root Mean Squared (RMS) Error nei Check points per le elaborazioni sul Bor-

go *Medievale* delle immagini frame nadirali e inclinate. 342

Tab. 66.Comparazione dei risultati del processo di connessione tra le immagini. 354

Tab. 67.Calcolo area utile della superficie della sfera generata tramite immagini acquisiti tramite *UAV DJI Spark*. Per effettuare il calcolo si è partiti per semplicità di calcolo da una proiezione compressa a 10.000 x 5000 px. 356

Tab. 68.Numero di *frame* estratti dai filmati suddivisi nei quattro fronti dell'area oggetto di rilievo. È stato estratto un *frame* ogni 60 ovvero circa 1 ogni 2 secondi. 358

Tab. 69.Numero di immagini allineate con e senza la presenza di camere 360°. 363

Tab. 70.*Root Mean Squared (RMS) Error* nei *Control points*. 363

Tab. 71.*Root Mean Squared (RMS) Error* nei *Check points*. 363

Tab. 72.Un esempio di visualizzazione del modello del Castello del Valentino in realtà aumentata attraverso la fotocamera di uno smartphone. 383

Tab. 73.Hardware indispensabile e aggiuntivo per le applicazioni di *Virtual Reality* e *Augmented Reality*. 387