

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Camere sferiche per il rilievo speditivo *indoor*



Relatore

Prof. Ing. Andrea Maria Lingua

Co-Relatore

Ing. Nives Grasso

Candidato
Fabiola Viola
Matricola 218407

Ottobre 2017

*“Ho cercato di non barcollare; ho fatto passi falsi lungo il cammino.
Ma ho imparato che solo dopo aver scalato una grande collina,
uno scopre che ci sono molte altre colline da scalare.
Mi sono preso un momento per ammirare
il panorama glorioso che mi circondava,
per dare un’occhiata da dove ero venuto.
Ma posso riposarmi solo un momento,
Perchè con la libertà arrivano le responsabilità
e non voglio indugiare,
Il mio lungo cammino non è finito.”
Nelson Mandela*

Sommario

Introduzione.....	i
Capitolo 1.....	1
Edilizia scolastica	1
1.1. Il Decreto Scuole Sicure	1
1.2. Nuova Anagrafe dell'edilizia scolastica	3
1.3. Il Fondo immobiliare per l'edilizia scolastica	5
Capitolo 2.....	7
3D Mobile Mapping Indoor e Strumenti.....	7
2.1. Camere 360°	8
2.1.1. N-Tech iSTAR	8
2.1.2. GoPro Omni	9
2.1.3. PixPro SP360	10
2.2. Laser scanner mobili manuali.....	11
2.2.1. Microgeo Riegl Vux – 1HA.....	11
2.2.2. Zeb Revo	12
2.2.3. Zeb 1	13
2.2.4. Microgeo Kaarta Contour	14
2.3. Backpack	16
2.3.1. Leica Pegasus	16
2.3.2. 3D Laser mapping Robin	17
2.4. Carrelli attrezzati	18
2.4.1. Trimble Timms.....	19
2.4.2. Leica Pro Scan.....	20
Capitolo 3.....	21
Fotogrammetria.....	21
3.1. Storia della fotogrammetria	21
3.2. <i>Structure from Motion</i>	24
3.2.1. I principi della SfM.....	26
3.3. Immagini piane.....	27
3.3.1. Orientamento interno.....	27
3.3.2. Orientamento esterno	30

3.3.3. Le equazioni di collinearità.....	31
3.4. Immagini sferiche	36
3.4.1. Fotogrammetria sferica multi – immagine.....	36
3.4.2. Estrazione delle corrispondenze tra immagini.....	38
3.4.3. Equazioni di collinearità.....	41
3.4.4. Equazioni di complanarità	44
3.4.5. Ricostruzione geometrica tridimensionale.....	45
Capitolo 4	47
Calibrazione delle camere.....	47
4.1. Calib 3v.....	47
4.1.1. Procedimento.....	48
4.1.1.1. Caricamento delle immagini	48
4.1.1.2. Calibrazione delle immagini	49
4.2. Photoscan	53
4.2.1. Procedimento.....	53
4.3 Confronto dei risultati	56
Capitolo 5	61
Poligono di verifica	61
5.1. Oggetto di rilievo	61
5.2. Posizionamento dei marker e rilievo topografico.....	62
5.3. Rilievo LIDAR.....	63
5.4. Rilievo fotografico	64
5.5. Elaborazione dei dati.....	64
5.5.1. Agisoft Photoscan.....	65
5.5.1.1. Inserimento delle immagini	66
5.5.1.2. Allineamento delle immagini	69
5.5.1.3. Posizionamento dei <i>marker</i>	70
5.5.1.4. Generazione della nuvola densa di punti	73
5.6. Comparazione delle nuvole dense di punti	75
5.6.1. Caso studio	77
5.7. Immagini piane undistorted.....	80
5.7.1. Elaborazione immagini tramite Photoscan	80
5.7.2. Comparazione nuvola densa con quella di riferimento.....	82

Capitolo 6.....	87
Caso reale	87
6.1. Oggetto del rilievo.....	87
6.2 Rilievo topografico e LiDAR.....	88
6.3 Rilievo fotografico.....	88
6.4. Elaborazione dei dati	89
6.4.1. Agisoft Photoscan.....	90
6.4.1.1. Inserimento delle immagini	90
6.4.1.2. Posizionamento dei marker.....	92
6.4.1.3. Allineamento delle immagini.....	93
6.4.1.4. Allineamento e unione dei <i>chunk</i>	93
6.4.1.5. Controllo degli errori.....	94
6.4.1.6. Generazione della nuvola densa di punti.....	98
6.5. Comparazione delle nuvole di punti	99
Capitolo 7.....	103
Estrapolazione delle informazioni	103
7.1. Laboratorio di Fotogrammetria.....	103
7.1.1. Generazione delle ortofoto	103
7.1.2. Dalle ortofoto al CAD	105
7.1.3. Misurazione in Photoscan	105
Capitolo 8.....	107
Conclusioni.....	107
Ringraziamenti	111
Bibliografia	113
Sitografia.....	114
Allegati	115

Introduzione

Scopo di questa Tesi è dimostrare la possibilità di effettuare un rilievo speditivo *indoor* tramite l'utilizzo di strumentazione fotografica.

Tale necessità sorge dal momento in cui ci si rende conto del bisogno di adeguare edifici esistenti, specialmente nel settore pubblico e scolastico, a normative e buone pratiche per la sicurezza, in particolare nell'ambito del decreto "scuole sicure": gli avvenimenti tellurici verificatisi negli ultimi anni e mesi al centro e sud Italia fanno comprendere, ora più che mai, come sia necessaria una verifica dello stato di fatto e un successivo adeguamento antisismico degli edifici.

La tecnica del rilievo fotogrammetrico è stata oggetto di numerose critiche sin dalla sua introduzione, sia per quanto riguarda la precisione nella restituzione degli oggetti che per l'elevato costo delle attrezzature utilizzate e alla complessità delle procedure, per le quali era necessario l'intervento di personale altamente specializzato. In passato, infatti, si utilizzavano camere metriche dal costo molto elevato per il rilievo, mentre per l'elaborazione venivano impiegati dei *computer* ad alte prestazioni, di non facile reperimento a prezzi modici.

Oggi invece la fotogrammetria vanta una vasta gamma di applicazioni, attraverso le quali è possibile rappresentare diverse tipologie di oggetti, a diverse scale, tramite l'ausilio di una macchina fotografica digitale per il rilievo e di un *computer* di prestazioni medie, utilizzando diversi *software*, anche *open source*, per l'elaborazione dei fotogrammi, la restituzione e la modellazione, utilizzabili da un'utenza anche non specializzata.

Il lavoro di Tesi prevede la descrizione del processo fotogrammetrico, tramite l'approccio *Image - Based Modeling*, a partire dalla presa dei fotogrammi fino alla ricostruzione del modello tridimensionale: le immagini sono dei panorami sferici multi-immagine, ottenuti dall'unione di quattro immagini piane, acquisite da differenti camere di uno stesso strumento, iSTAR di NcTech, per le quali si è provveduto alla calibrazione singolarmente. L'elaborazione è stata effettuata mediante il *software* Agisoft Photoscan, che ha permesso la collimazione di

punti omologhi all'interno delle immagini. Il prodotto di tale elaborazione consiste in un insieme di punti, noto come nuvola densa di punti, che può essere depurato da errori grossolani o incongruenze, per poter essere poi utilizzato all'interno di altri *software* di grafica vettoriale: per poter renderizzare tale prodotto e ottenere un solido geometrico, sono necessarie altre elaborazioni e procedure che non sono state trattate in questo lavoro di Tesi.

I risultati ottenuti sono poi stati confrontati con il prodotto del rilievo tramite strumentazioni più sofisticate e costose, quali laser scanner terrestri e sistemi più complessi, come Timms di Trimble, mettendo in evidenza gli errori e i problemi riscontrati. L'obiettivo è quello di ricavare delle informazioni valide per una rappresentazione grafica in scala 1:200.

Le sperimentazioni effettuate prevedono l'utilizzo dello strumento da parte dell'operatore, ma non si esclude la possibilità che esso possa essere montato su veicoli semoventi, con traiettorie prestabilite in precedenza o ancora comandati a distanza.

Si vuole dimostrare che tramite questa metodologia è possibile ottenere una nuvola di punti e un modello tridimensionale in grado di fornire delle informazioni numeriche e dimensioni coerenti con la scena ripresa, in modo tale che il modello ottenuto possa essere utilizzato per rilievi e misurazioni virtuali, senza cioè la presenza fisica dell'operatore all'interno dello spazio che si vuole andare a mappare e misurare.

La Tesi si suddivide nei seguenti capitoli:

Capitolo 1: viene delineato il quadro normativo riguardante la messa in sicurezza dell'edilizia scolastica e della nuova anagrafe per un migliore censimento degli edifici;

Capitolo 2: definizione di *mobile mappig indoor* mediante l'utilizzo di tecniche di rilievo dinamico e analisi delle specifiche tecniche degli strumenti digitali disponibili sul mercato;

Capitolo 3: viene trattato il tema della fotogrammetria, dalle origini sino ai giorni nostri, analisi delle differenze tra immagini piane e immagini sferiche;

Capitolo 4: descrizione teorica della calibrazione delle camere digitali e calibrazione delle camere dello strumento utilizzato, attraverso due differenti metodi;

Capitolo 5: creazione del modello attraverso l'acquisizione di immagini con iSTAR in statico di un locale (laboratorio di fotogrammetria presente all'interno del DIATI, PoliTo), confronto dei risultati ottenuti con il modello creato a partire da una scansione laser in statico;

Capitolo 6: creazione del modello attraverso l'acquisizione di immagini con iStar in dinamico di un corridoio (aule i del Politecnico di Torino) con due livelli di qualità delle immagini (*full e half quality*) e confronto dei risultati ottenuti mediante la scansione del medesimo corridoio attraverso lo strumento Trimble Timms.

Capitolo 7: estrapolazione delle informazioni numeriche e dimensionali attraverso nuvole di punti e ortofoto e passaggio al disegno CAD

Capitolo 1

Edilizia scolastica

L'edilizia scolastica è definita come l'attività di costruzione di edifici destinati esclusivamente all'uso scolastico, definiti in base all'ordine di studio e all'età degli studenti.¹

È ora in fase di attuazione un piano di edilizia scolastica, volto al miglioramento, alla manutenzione e all'adeguamento antisismico degli edifici, nonché alla realizzazione di nuovi stabili.

1.1. Il Decreto Scuole Sicure

Il Decreto "Scuole Sicure", prevede la messa in sicurezza e messa a norma degli edifici a destinazione d'uso scolastica, nello specifico si parla del D.L. 24-4-2014, n. 66, recante misure urgenti per la competitività e la giustizia sociale, convertito con modificazioni dalla legge 23 giugno 2014, n. 89. Pubblicato nella Gazz. Uff. 24 aprile 2014, n. 95.

Nel triennio 2014 - 2017, sono stati aperti 7238 cantieri, tenendo presente che in Italia sono presenti più di 42000 scuole. Più di 5000 sono stati ultimati e, entro la fine del 2017 ne saranno conclusi altri 780. In totale i lavori hanno riguardato la ristrutturazione e il consolidamento degli edifici esistenti, ma anche la realizzazione di nuove scuole, 303 in totale, 209 delle quali sono state portate a termine.

Nel biennio 2014 - 2016 sono stati avviati 12.041 interventi così suddivisi: 40 milioni di euro per le indagini diagnostiche, 905 milioni per la messa in sicurezza, manutenzione, ristrutturazione e nuove costruzioni², 3,7 miliardi per il fabbisogno richiesto dalle regioni, 400 milioni per la sicurezza, 240 milioni di

¹ Sole, M. Crespi, M., *Edilizia scolastica*. Dei Tipografia del Genio Civile, (2014)

² Mutui BEI, Banca Europea degli Investimenti

fondi PON³, per l'efficientamento energetico, 40 milioni per le scuole antisismiche, 122 milioni per il 2015 e 122 per il 2016 per nuove costruzioni⁴, 51 aree per scuole innovative, e l'operazione "sblocca scuole" che ha riscontrato il parere positivo della conferenza Stato Città e Autonomie Locali, ottenendo la disponibilità di ulteriori 39 milioni⁵. Il 10 Novembre 2016 risultavano censiti dall'Anagrafe dell'edilizia scolastica circa 42.000 edifici⁶: da questi dati risulta che una scuola su dieci ha lesioni strutturali e una su tre è sita in un'area di alta sismicità, solamente l'8% è stato progettato con criteri antisismici, e i due terzi sono prive del documento di agibilità statica, in un caso su tre inoltre gli EELL⁷ non effettuano gli interventi strutturali richiesti.⁸

Inoltre sono stati stanziati per il 2017 per oltre 550 interventi di manutenzione straordinaria delle scuole 10 milioni di euro dalla legge Buona Scuola per i mutui agevolati con la BEI, che coprono gli oneri di ammortamento a carico dello Stato e sviluppano un finanziamento totale di circa 240 milioni.⁹

Per quanto riguarda il 2018, è stato pubblicato in Gazzetta Ufficiale il DM 6 giugno 2017 con cui vengono messi a disposizione ulteriori fondi per 292 interventi con i Mutui BEI.

Il decreto stanza e ripartisce tra le Regioni un totale di 238 milioni di euro. Le risorse serviranno a coprire gli oneri di ammortamento sui mutui che le Regioni stipuleranno con la Banca europea degli investimenti.

Con questi fondi saranno finanziati interventi di ristrutturazione, miglioramento, messa in sicurezza, adeguamento antisismico, efficientamento energetico o costruzione di nuovi edifici scolastici. Potranno inoltre essere realizzate nuove palestre o migliorate quelle esistenti.¹⁰

³ Programma Operativo Nazionale

⁴ Per il programma "Scuole nuove"

⁵ In data 20/10/2016

⁶ Anagrafe in corso di aggiornamento

⁷ Enti Locali

⁸ www.edscuola.eu/wordpress/?p=82827, aggiornato al 24 novembre 2016

⁹ www.edscuola.eu/wordpress/?p=80243, aggiornato al 12 Agosto 2016

¹⁰ www.edilportale.it aggiornato al 09 Settembre 2017

È inoltre quasi completo il quadro normativo per lo sblocco di ulteriori 2,6 miliardi di euro per l'edilizia scolastica, e è stato pubblicato l'avviso PON Scuola da 350 milioni di euro per l'adeguamento sismico, la messa in sicurezza antincendio e il conseguimento dell'agibilità statica in Basilicata, Calabria, Campania, Puglia e Sicilia.

La quota maggiore di risorse è stata attribuita la Sicilia (115,220 milioni di euro), seguita da Campania (101,815 milioni), Puglia (62,755 milioni), Calabria (53,655 milioni) e Basilicata (16,555 milioni). Gli Enti locali dovranno spendere i fondi ricevuti per l'adeguamento e il miglioramento sismico degli edifici scolastici, interventi volti all'ottenimento dell'agibilità, bonifica dell'amianto e di altri agenti nocivi, accessibilità e superamento delle barriere architettoniche, efficientamento energetico, attrattività degli edifici scolastici.

1.2. Nuova Anagrafe dell'edilizia scolastica

La nuova Anagrafe dell'Edilizia Scolastica consente di costituire una banca dati di tutti gli edifici scolastici presenti sul territorio Nazionale. Grazie a tale servizio gli Enti locali e Regioni hanno la possibilità di inserire, aggiornare tutti i dati riguardanti gli edifici scolastici e monitorare lo stato degli immobili, la manutenzione necessaria e le migliorie apportate. In questo modo è possibile effettuare una programmazione degli interventi fondata su elementi di valutazione certi.

Per ogni edificio scolastico sono richiesti:

- dati identificativi e anagrafici;
- dati desumibili da certificazioni e documentazione;
- dati dimensionali;
- dati desumibili da valutazioni qualitativo descrittive.

I dati sono trasmessi periodicamente all'Anagrafe Nazionale dell'Edilizia Scolastica del MIUR¹¹.

Tale sistema permette di avere a disposizione dati più dettagliati, per una conoscenza più profonda sullo stato di ciascun edificio scolastico, garantendo informazioni rilevate in tempo reale e più facili da reperire per amministrazioni e cittadini ed una maggiore integrazione con le altre Anagrafi presenti nel sistema informativo del Miur, fra cui quella degli studenti. Si potrà così arrivare entro il termine del 2017 ad un vero e proprio fascicolo elettronico di ciascun edificio scolastico.¹²

Esso costituisce uno strumento essenziale per individuare le priorità di intervento e monitorare lo stato delle opere, garantendo una sempre maggiore trasparenza delle informazioni e velocità di azione.

Sarà ad esempio migliorato il quadro delle informazioni sull'adeguamento sismico degli edifici, sulla presenza di spazi collettivi come palestre o auditorium, sullo stato delle strutture portanti degli edifici. I record dei dati da rendere pubblici per i cittadini passano dagli attuali 151 a 500.¹³ Il 31 dicembre 2016 è avvenuta l'ultima trasmissione dei dati secondo le vecchie procedure. Con l'inizio del 2017 è entrata a regime la nuova modalità di comunicazione per arrivare ad avere un fascicolo elettronico delle scuole.

L'accordo prevede che tutti i dati relativi ad ogni scuola saranno condivisi dalle Regioni e dall'Amministrazione centrale e saranno aggiornati in maniera automatica e non più periodica, secondo un flusso costante e diretto tra gli Enti locali, le Regioni e il Ministero.

Il Fascicolo elettronico dell'edificio scolastico potrà rendere l'Anagrafe una piattaforma gestionale che servirà alle regioni per caricare i progetti ma anche per seguire i lavori dalla fase di progettazione alla realizzazione e al collaudo.

Il portale di ogni Regione, mette a disposizione dei soggetti abilitati quali

¹¹ Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca

¹² www.sistemapiemonte.it

¹³ www.edscuola.eu/wordpress/?p=83550, aggiornato al 10 Novembre 2016

Comuni, Scuole, Province, Osservatori Scolastici Provinciali, Uffici Scolastici Provinciali, Ufficio Scolastico Regionale e Regione Lombardia, le seguenti informazioni:

1. Schede dell'Anagrafe degli Edifici Scolastici relative al Censimento Nazionale;
2. Scheda per il rilievo della vulnerabilità di elementi non strutturali negli edifici scolastici;
3. Planimetrie in AutoCAD di ogni edificio scolastico;
4. Planimetrie e destinazioni d'uso dei locali, in formato PDF;
5. Raccolta in formato elettronico di tutti gli spazi di ogni edificio, delle loro misure planimetriche e volumetriche e le capienze a norma di ogni aula;
6. Georeferenziazione di ogni edificio scolastico;
7. Reportistica dei dati contenuti nella scheda dell'Anagrafe dell'Edificio.

Le risorse necessarie alla modifica del tracciato record e alla realizzazione del nuovo sistema informativo regionale deriveranno dalle risorse dei Fondi di investimento europei, i PON 2014-2020, e saranno a carico del Ministero dell'istruzione, dell'università e della ricerca.¹⁴

1.3. Il Fondo immobiliare per l'edilizia scolastica

È stato presentato nel mese di luglio 2017 il progetto “Fondo immobiliare per l'edilizia scolastica e il territorio”, promosso da Anci, Agenzia del Demanio, Miur e Invimit¹⁵, che prevede lo stanziamento di circa 74 milioni di

¹⁴ http://www.edilportale.com/news/2016/11/lavori-pubblici/scuole-in-arrivo-il-fascicolo-elettronico-del-fabbricato_54944_11.html, aggiornamento al 11 Novembre 2016

¹⁵ **Investimenti Immobiliari Italiani**, è una società di gestione del risparmio del Ministero dell'Economia e delle Finanze che ha ad oggetto la prestazione del servizio di gestione collettiva del risparmio

euro, per la riqualificazione o costruzione di nuovi edifici scolastici.¹⁶

Il progetto coinvolgerà sei Comuni nella fase iniziale: Castel San Pietro Terme (BO), Osimo (AN), Isola Di Capo Rizzuto (KR), Robbiate (LC), Grumolo delle Abbadesse (VI), e Monte Prandone (AP). Una volta a pieno regime dovrebbe diventare un modello di rigenerazione urbana applicabile a tutti i Comuni italiani. Il progetto è basato su tre aspetti fondamentali:

- realizzazione di nuovi poli scolastici innovativi e riqualificazione di vecchi edifici di proprietà comunale secondo le linee guida indicate dal Miur in materia di edilizia scolastica, senza gravare sui saldi di finanza pubblica;
- rigenerazione e valorizzazione del patrimonio immobiliare degli enti, che deve essere reso efficiente in termini economici, superando anche i costi indiretti generati dal degrado;
- rigenerazione e valorizzazione del patrimonio immobiliare degli enti, che deve essere reso efficiente in termini finanziari: l'utilizzo del fondo come strumento finanziario permette ai comuni di evitare forme di indebitamento e relativa realizzazione diretta dell'opera, trasferendo così i rischi al privato.

L'operazione, che vuole avere una valenza a livello nazionale, avrà così un duplice effetto: permetterà di uscire dalla tradizionale logica di opera pubblica, realizzata ricorrendo all'indebitamento pubblico e renderà più veloci tutti i processi di adempimento per la realizzazione e il compimento dei progetti, mantenendo un profilo socio-economico ed ambientale.

¹⁶ www.edilportale.it, aggiornato al 28 Luglio 2017

Capitolo 2

3D Mobile Mapping Indoor e Strumenti

Si definisce *Mobile Mapping System* qualunque piattaforma mobile provvista di sensori e sistemi di misura atti a fornire la posizione 3D quasi continua della piattaforma e contemporaneamente in grado di acquisire dati geografici, senza l'ausilio di punti di controllo a terra.¹⁷

In commercio esistono diverse tipologie di strumenti specifici per il rilievo *indoor* tridimensionale speditivo. In base al dettaglio e alla precisione che si vogliono ottenere, è opportuno confrontare alcune caratteristiche basilari delle apparecchiature disponibili sul mercato, fra cui:

- accuratezza: l'attitudine di uno strumento di misura a dare indicazioni prive di errori sistematici e tendenti al valore vero del misurando;
- risoluzione: ovvero il numero di pixel in uscita del sensore. Per ottenere un buon risultato finale occorre un'ottica di qualità, un sensore con un adeguato rapporto segnale/rumore ed infine la risoluzione del sensore.;
- rapidità e semplicità di utilizzo: a seconda del tipo di rilievo è bene utilizzare strumenti che siano maneggevoli durante le fasi di acquisizione dei dati;
- costi di acquisto e di gestione nel tempo.

In questo capitolo verrà effettuata un'analisi di comparazione fra alcuni strumenti di rilievo, classificati come segue:

- Camere 360°;
- Laser scanner mobile;
- Backpack;
- Carrelli attrezzati;

Per ogni categoria verranno riportate le caratteristiche principali e messe a confronto tra gli strumenti presi in esame.

¹⁷ Geomatica, Andrea Piemonte, Unipi

2.1. Camere 360°

Le camere digitali a 360° o panoramiche sono generalmente costituite da lenti *fisheye*, da 2 a 6, che consentono di catturare la realtà circostante ad alta risoluzione, al fine di avere una documentazione della scena che circonda la camera vista da più angolazioni.

Fino a qualche anno fa per ottenere un'acquisizione panoramica era necessario possedere apparecchiature e *software* molto costosi, per ottenere brevi filmati e perdipiù a bassa qualità.

Le camere a 360° gradi invece, consentono di ottenere foto e video tridimensionali a basso costo, con il vantaggio di essere dispositivi leggeri, facilmente maneggevoli e portatili.

In commercio ne esistono di diverse tipologie e di diversa risoluzione e velocità di acquisizione, con una vasta gamma di prezzi.

Questi strumenti vengono spesso impiegati per applicazioni nel settore dell'ingegneria e architettura, beni culturali e installazioni museali tridimensionali e interattive.

Per poter essere impiegate nel *3D mobile mapping indoor*, le camere devono essere abbinate a sensori o comunque collegate a una rete topografica esistente.

2.1.1.N-Tech iSTAR

iSTAR è una fotocamera panoramica che consente di catturare immagini sferiche complete per documentare in maniera rapida ed efficiente lo stato di fatto di un ambiente.

Resistente, compatta e leggera, la iSTAR è facile da trasportare e mettere in opera sul campo. Il flusso di lavoro semplice ed immediato consente anche ad un operatore senza specifica formazione ed esperienza di eseguire rilievi di alta

qualità. La camera è dotata di 4 coppie sensore-obiettivo, precalibrate in fabbrica, capaci di fornire una immagine fotografica sferica completa da 50 megapixel dotata di un'ampia gamma dinamica in appena 5 secondi.

Tipicamente, la batteria integrata permette la ripresa di circa un centinaio di panorami, mentre la batteria esterna opzionale è pensata per consentire l'utilizzo durante tutta una giornata di lavoro, fino a circa 600 immagini.

La produzione delle immagini panoramiche avviene in laboratorio attraverso il software Immersive Studio in dotazione.¹⁸

iSTAR		
	Dimensioni	104mm x 104mm x 115mm
	Peso	1.4Kg
	Risoluzione Immagini	Full (10000 x 5000) Half (5000 x 2500) Quarter (2500 x 1250)
	Angolo	Full spherical 360° x 274° +/- 5°
	Camere	4 x 10Mp
	Tempo di cattura	min. 5 s per un immagine a 360° (1 esposizione)
	Prezzo	€ 4.700,00

Tabella 1 - Specifiche tecniche iSTAR

2.1.2. GoPro Omni

Omni è una soluzione professionale completa per acquisire, assemblare e pubblicare contenuti di tipo immersivo e realtà virtuale ad alta risoluzione.

Si compone di una serie di 6 videocamere HERO4 Black sincronizzate tramite delle connessioni integrate nell'attrezzatura, che permette di ottenere una maggiore precisione facilitando e rendendo più accurato il montaggio nella fase

¹⁸www.srmtech.it/prodotti/istar-fusion-nctech

di post-produzione.

Il dispositivo può essere attivato anche a distanza grazie al dispositivo GoPro Smart Remote in modalità wireless, e controllato da un Massimo di 180 m di distanza.¹⁹


Cube GoPro Omni		
	Dimensioni	120 mm x 120 mm x 120 mm
	Peso	1,05 kg
	Risoluzione Immagini	1440p / 60 fps (5638x2819) 1440p / 50 fps (5638x2819) 960p / 120 fps (3758x1879)
	Angolo	Full spherical 360° x 360°
	Camere	6 x 12Mp
	Tempo di cattura	50 - 120 fps
	Prezzo	€ 5.400,00

Tabella 2 - Specifiche Cube Go Pro Omni

2.1.3. PixPro SP360

La fotocamera ha una lente sferica a 360° con un sensore da 16 megapixel, che permette di registrare video in full HD 1080p e fotografie di elevata qualità.

La Kodak PixPro SP360 è anche ottima per essere portata in giro in molte situazioni avventurose, infatti è resistente agli urti fino a 2 metri, resiste al freddo fino a meno 10°C, è resistente alla polvere ed anche all'acqua.

La fotocamera è dotata di applicazione per iPhone e Android, ma anche di software editing per Mac e PC, in modo tale da rendere facile editare e trasferire i video VR.²⁰

¹⁹ www.gopro.it

²⁰ www.italianeography.it

Kodak PixPro SP360		
	Dimensioni	41 mm x 50 mm x 38 mm
	Peso	0,1 kg
	Risoluzione Immagini	16 Mp
	Angolo	Full spherical 360° x 360°
	Camere	1 x 16 Mp
	Tempo di cattura	10 fps
	Prezzo	€ 450,00

Tabella 3 - Specifiche Kodak PixPro SP360

2.2. Laser scanner mobili manuali

I laser scanner mobili, utilizzati nel campo di rilevamenti cinematici, hanno dimensioni ridotte e peso contenuto e possono essere pertanto installati anche su droni e veicoli stradali. Sono caratterizzati da alta precisione, fino a 3 mm, e affidabilità, nonché da un'alta velocità di acquisizione.

Essi permettono il rilevamento di elementi tridimensionali a scale e risoluzioni differenti e generalmente vengono utilizzati in abbinamento con distanziometri a impulsi, che misurano il tempo di volo del segnale per la determinazione delle distanze.

A seconda del dispositivo utilizzato è possibile ottenere precisioni (al massimo di $4 \div 6$ mm a circa 100 m) e distanze massime misurabili (circa $800 \div 1000$ m) differenti.

2.2.1. Microgeo Riegl Vux – 1HA

Il Riegl Vux-1HA è uno scanner laser molto leggero e compatto, progettato per affrontare le emergenti applicazioni di rilievo in movimento con le massime prestazioni in termini di prestazioni di misura. Riegl Vux-1HA è stato progettato per essere montato in qualsiasi posizione e in condizioni di spazio e peso

limitato.

L'intero set di dati di una campagna di acquisizione è memorizzata all'interno di un Hard Disk da 240 GByte SSD e fornito in tempo reale tramite l'interfaccia LAN-TCP/IP integrata direttamente su *PC* con *software* di controllo.

Questo sensore può essere montato su qualsiasi tipo di mezzo di trasporto e ha una portata massima di 400 m con una accuratezza di 5 mm. Ha un campo di vista totale a 360° e produce 250 scansioni al secondo.

Può essere utilizzato per laser mapping indoor e outdoor, per rilevare profili di tunnel e per applicazioni ferroviarie.²¹


Vux - 1HA		
	Velocità di acquisizione dati	500000 punti/sec
	Acciuratezza	2,5 cm
	Range massimo	fino a 150 m
	Classe di sicurezza	Classe 1 (eye safe)
	Angolo	360°
	Peso	3,85 kg
	Dimensioni	225 x 180 x 125
	Prezzo	€ 7.200,00

Tabella 4 - Specifiche Vux - 1HA

2.2.2. Zeb Revo

Zeb Revo è un laser scanner in grado di ruotare attorno al proprio asse, leggero ed apponibile su una palettaforma mobile come un veicolo o un dispositivo UAV²². Tutte le fasi del processamento dei dati vengono eseguite automaticamente in un *cloud* utilizzando server altamente sicuri tramite

²¹ www.microgeo.it

²² *unmanned aerial vehicle*, ossia un aeromobile a pilotaggio remoto, comunemente noto come drone

Amazon. Il sistema si basa sulla tecnologia di acquisizione SLAM²³, il cui algoritmo consente un'estrema adattabilità nell'impiego dello strumento in diversi ambienti. Il dispositivo, trasportabile da un solo operatore, è dotato di piattaforma IMU²⁴ e di sensore che ruota automaticamente su se stesso, seguendo i movimenti e il percorso dell'operatore e catturando 43.200 punti al secondo.

Zeb Revo		
	Velocità di acquisizione dati	43,200 punti/sec
	Acciuratezza	2-3 cm
	Range massimo	30 m
	Classe di sicurezza	Classe 1 (eye safe)
	Angolo	270° x 360°
	Peso	4,1 kg
	Dimensioni	86 x 113 x 287 mm
	Prezzo	€ 17.500,00 circa

Tabella 5 - Specifiche Zeb Revo

2.2.3. Zeb 1

Zeb1 è un sistema di mappatura laser trasportabile a mano, che è stato progettato per essere utilizzato senza alcuna conoscenza esperta pregressa di metodi di rilevamento laser 3D. Il sistema leggero e autonomo funziona totalmente in modo indipendente rispetto al sistema GPS ed è progettato per essere utilizzato e trasportato a mano dall'operatore, che è libero di acquisire i

²³ Simultaneous localisation and mapping, ossia localizzazione e mappatura simultanee

²⁴ *inertial measurement unit*, ossia unità di misurazione inerziale

dati, semplicemente camminando. Tutte le fasi del processamento dei dati vengono eseguite automaticamente in un “cloud” utilizzando server altamente sicuri tramite Amazon. Così come Zeb Revo, anche questo strumento di avvale della tecnologia SLAM.

Zeb1 viene utilizzato per completare le indagini di misurazione degli interni degli edifici, per documentare gli incidenti stradali e le scene del crimine, per mappare le reti di miniere e grotte sotterranee, per misurare le proprietà per le valutazioni immobiliari, e per facilitare la pianificazione. Differentemente dai sistemi ancorati su carrello, questo sistema è facile da utilizzare in ambienti su più livelli, come scale e miniere, risultando quindi ideale per il rilievo di ambienti interni ed esterni, tridimensionali difficili da rilevare.²⁵

	Zeb1	
	Velocità di acquisizione dati	43,200 punti/sec
	Acciuratezza	+/- 0.1%
	Range massimo	Fino a 30m (15m in esterni)
	Classe di sicurezza	Classe 1 (eye safe)
	Angolo	270° x 100°
	Peso	665 g
	Dimensioni	60 x 60 x 360 mm
	Prezzo	€ 10.00,00

Tabella 6 - Specifiche Zeb 1

2.2.4. Microgeo Kaarta Contour

Contour è un sistema integrato capace di generare mappe tridimensionali, composto da un sensore LiDAR, una camera HD per la generazione della

²⁵www.3dlasermapping.com/zeb1

texture della nuvola di punti generata, una camera fotogrammetrica per l'affinamento delle traiettorie ed un monitor.

La tecnologia proprietaria di Kaarta²⁶ è stata integrata con un sensore LiDAR²⁷ 3D e una IMU per generare mappe in tempo reale senza l'utilizzo di un GNSS²⁸. I produttori del sistema e i proprietari degli algoritmi di registrazione delle scansioni, hanno vinto la competizione sul posizionamento senza GNSS nel 2016 organizzata da Microsoft. La tecnologia Kaarta non è la tradizionale SLAM, rispetto all'errore del 1-2% di quest' ultima, Contour garantisce lo 0,2% della distanza compiuta. Questo strumento è particolarmente adatto per il rilievo d'interni complessi e su più livelli: trasportato comodamente a mano, ricostruisce in *real-time* l'ambiente circostante. Il rilievo effettuato viene mostrato sul *display* integrato.

Microgeo Kaarta Contour		
	Velocità di acquisizione dati	43,200 punti/sec
	Acciuratezza	+/- 3 cm
	Range massimo	Fino a 20 m
	Classe di sicurezza	Classe 1 (eye safe)
	Angolo	190° x 190°
	Peso	2780 g
	Dimensioni	267 x 267 x 152 mm
	Prezzo	€ 45.000,00 circa

Tabella 7 - Specifiche Microgeo Kaarta Contour

²⁶ Simile alla tecnologia SLAM

²⁷ Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging, è una tecnica di telerilevamento che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie utilizzando un impulso laser

²⁸ *global navigation satellite system*, sistema satellitare globale di navigazione con riferimento ai sistemi di geo-radiolocalizzazione e navigazione terrestre, marittima o aerea, che utilizzano una rete di satelliti artificiali in orbita

2.3. Backpack

I Backpack sono una piattaforma unica di sensori, indossabili come uno zaino, per l'acquisizione della realtà, che combina fotocamere e LiDAR *profiler*, permettendo di ottenere una documentazione completa di ciò che si rileva, sincronizzando le immagini ottenute dalla ripresa fotografica con il dato nuvola di punti, ottenuto tramite tecnologia laser scanner. Molto spesso sono dotati di della tecnologia SLAM e di piattaforme inerziali IMU ad alta precisione, assicurando il posizionamento accurato anche con le interruzioni del GNSS, garantendo la migliore posizione nota, anche in condizioni sfavorevoli, per il rilievo di interni o gallerie sotterranee.

2.3.1. Leica Pegasus

Il backpack Pegasus di Leica è una soluzione per ottenere rilievi *indoor*, *outdoor* e sotterranei, basata sull'uso di cinque telecamere ad alta dinamica e di un LIDAR profiler, che lavorano in una varietà di condizioni di luce. Il rilievo è indipendente dalla posizione di cattura e combina i dati di immagini e nuvole di punti anche in zone in cui non è presente il sistema GNSS.

Progettato per catturare la realtà in maniera semplice e veloce, Pegasus fornisce dei formati in output che si possono poi implementare ai sistemi ArcGis di ESRI e in Autodesk AutoCAD. Tramite l'utilizzo della tecnologia SLAM e di una piattaforma inerziale IMU ad alta precisione, si assicura il posizionamento accurato anche con le interruzioni del GNSS.

Leica Pegasus		
	Peso	32 Kg
	Dimensioni	73 x 27 x 31 cm
	Camera	
	sensori	5
	dimensioni CCD	2046 x 2046
	dimensione pixel	5,5 x 5,5 μm
	velocità	2 fps
	Focale Lenti	6 mm
	copertura	360° x 200°
	Scanner	
	FOV orizzontale/verticale	270°/30° ($\pm 15^\circ$)
	Acquisizione	600000 punti al secondo
	Frequenza	10 Hz
	Copertura	50 m
	Accuratezza	2 .3 cm
	Prezzo	350.000 euro circa

Tabella 8 - Specifiche Leica Pegasus

2.3.2.3D Laser mapping Robin

Robin è uno strumento di ultima generazione per il mobile mapping, che permette di rilevare in modo tridimensionale la realtà che lo circonda.

Lo strumento può essere utilizzato su diverse piattaforme, come backpack mentre si cammina, montato su una vettura o su un UAV.

Robin è facilmente trasportabile grazie al suo basso peso: è stato infatti ideato per poter essere utilizzato da un singolo operatore, permettendo anche una facile e veloce acquisizione dei dati. Esso è provvisto di una piattaforma IMU, che lo rende utilizzabile per il rilievo topografico di dettaglio: per migliorarne la precisione, specialmente per il rilievo di interni, è possibile abbinarlo alle tecnologie SLAM e WINGS²⁹, anche senza l'ausilio del GNSS.

Il sistema si compone del laser scanner RIEGL VUX-1HA, di un sistema di

²⁹ Warning and Intelligence Gathering Sensor (in italiano: sensore di segnalazione e raccolta di informazioni)

navigazione inerziale IGI Compact MEMS, di un ricevitore GNSS Septentrio Dual e di una camera fotografica FLIR Grasshopper 3 12MP camera con sensore CMOS.


3D aser mapping Robin		
	Peso	13,5 Kg
	Dimensioni	62 x 47 x 33 cm
	Camera	
	sensori	1
	dimensioni CCD	4240 x 2824
	dimensione pixel	3.1 μm
	velocità	3 fps
	Focale Lenti	/
	copertura	65" x 45"
	Scanner	
	FOV orizzontale/verticale	360°
	Acquisizione	1000000 punti al secondo
	Frequenza	300 Hz
	Copertura	420 m
	Accuratezza	3 cm
	Prezzo	300.000 euro circa

Tabella 9 - Specifiche Robin

2.4. Carrelli attrezzati

I Carrelli attrezzati, così come i backpack, sono una piattaforma unica di sensori, montati su un unico mezzo, per l'acquisizione della realtà, che combina fotocamere e LiDAR *profiler*, permettendo di ottenere una documentazione completa della realtà rilevata, sincronizzando le immagini con il dato nuvola di punti. Spesso sono dotati di della tecnologia SLAM e di piattaforme inerziali IMU ad alta precisione, assicurando il posizionamento accurato anche con le interruzioni del GNSS, garantendo la migliore posizione nota.

Rispetto ai backpack queste piattaforme presentano un peso più elevato, poiché sono dotati di strumentazioni con una precisione maggiore e di

conseguenza di dimensioni e peso maggiori, e questo vale anche per il prezzo di mercato.

2.4.1. Trimble Timms

TIMMS³⁰ è uno strumento ideale per l'acquisizione di dati geospaziali di interni o di zone senza copertura di segnale GNSS. Durante la fase del rilievo, il TIMMS fornisce sia dati LiDAR, sia immagini sferiche. I dati acquisiti sono tra di loro connessi grazie a sistemi di navigazione a elevata precisione e sono utilizzabili per la creazione di mappe e modelli 3D. TIMMS è un carrello a movimento manuale, ideato per restituire accurati modelli di spazi interni senza avere accesso alla rete GNSS. Esso è costituito da tre parti principali: LiDAR e camere equipaggiati per il rilievo in dinamico, computer ed elettronica per l'acquisizione e processamento dei dati per avere modelli bidimensionali e tridimensionali georiferiti.³¹


Trimble TIMMS		
	Peso	49,5 Kg
	Dimensioni	221 x 88 x 51cm
	Camera	
	sensori	6
	velocità	4 FpS
	Focale Lenti	3,3
	copertura	360°
	Scanner	
	FOV orizzontale/verticale	360°/300°
	Frequenza	97 Hz
	Copertura	130 m
	Accuratezza	3-5 cm
	Prezzo	400.000 euro circa

Tabella 10 - Specifiche Trimble TIMMS

³⁰ Trimble Indoor Mapping Solution

³¹ www.trimble-italia.com

2.4.2. Leica Pro Scan

Utilizzando la piattaforma ProScan, è possibile trasformare il laser terrestre in un sistema cinematico di misura tridimensionale.

Questo sistema è studiato per la cattura di immagini e dati relativi a rilievi in movimento, indicata per il rilievo sia di interni che di esterni. Il modulo GNSS completamente integrato permette di muoversi liberamente e provvede di georeferire tutti i punti della nuvola di punti densa ottenuta.

Esistono tre diverse versioni di questo strumento, che può essere integrato con ricevitori GNSS (G-Series), con un sensore TPS³² (T-Series) oppure con un sensore IMU (I-Series)

Il sistema di base si compone di un laser scanner e di un'unità di controllo.


Leica ProScan		
	Peso	44 Kg
	Dimensioni	104 x 90 x 135cm
	Scanner	
	FOV orizzontale/verticale	360°/290°
	Frequenza	97 Hz
	Copertura	130 m
	Accuratezza	3-5 cm
	Prezzo	400.000 euro circa

Tabella 11 - Specifiche Leica Pro Scan

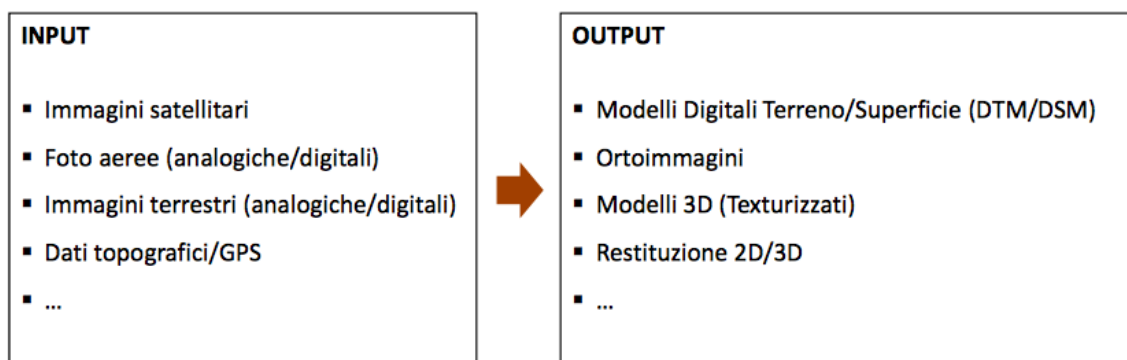
³² throttle position sensor, accelerometro

Capitolo 3

Fotogrammetria

La fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere informazioni affidabili di oggetti fisici e dell'ambiente circostante mediante processi di misura e interpretazione delle immagini fotografiche e digitali formate dall'energia elettromagnetica radiante e da altri fenomeni fisici³³, e di presentarle all'utente in modo efficace³⁴.

Tramite questa scienza è così possibile il rilevamento di oggetti di qualsiasi forma e dimensione che necessitano di un elevato numero di punti per una descrizione di forma completa.



La fotogrammetria si contraddistingue per alcune doti fondamentali che ne costituiscono i punti di forza, quali l'elevata accuratezza geometrica, l'alto livello di dettaglio, l'automazione, il fotorealismo, il basso costo, la portabilità e la flessibilità.

3.1. Storia della fotogrammetria

La storia della fotogrammetria si può fondamentalmente suddividere in tre periodi distinti: l'analogico, l'analitico e il digitale. I primi approcci scientifici della

³³ Manual of Photogrammetry, ASPRS, 1980

³⁴ PE&RS, 1999

fotogrammetria risalgono alla fine dell'ottocento con numerosi campi applicativi, che si sono sviluppati poi a partire dai primi anni del novecento. Nata come ramo della geometria descrittiva, si avvale di principi e concetti caratterizzanti della geometria proiettiva che permette di indagare le relazioni biunivoche che mettono in relazione una realtà tridimensionale ed una sua rappresentazione bidimensionale, che non è necessariamente piana, ma che può essere anche cilindrica o sferica.

La fotogrammetria si basa sulla visione stereoscopica, oltre che al problema inverso della prospettiva, utilizzato per le applicazioni di raddrizzamento fotografico. Già dalle prime applicazioni si denotano delle differenze tra fotogrammetria terrestre e quella aerea: le differenze principali riguardano da un lato gli aspetti di orientamento esterno dei fotogrammi, dall'altro la distanza rispetto all'oggetto da rilevare. Per come si considera oggi la fotogrammetria terrestre, di cui fa parte la fotogrammetria architettonica, è anche conosciuta come *Close Range Photogrammetry*³⁵. Una definizione di estrazione anglosassone molto in uso nella comunità scientifica internazionale è quella di *image-based modeling*³⁶ che viene utilizzata non solo in ambito architettonico ma in tutte quelle materie in cui si fa uso di immagini digitali.

La fotogrammetria aerea è stata molto impiegata per la realizzazione delle carte geografiche tramite gli stereorestitutori analogici, già a partire dal primo ventennio del XX secolo, mentre la fotogrammetria terrestre per il rilevamento di architetture è rimasta spesso confinata al campo della restituzione prospettica ricavata da un singolo fotogramma.

Occorrerà attendere lo sviluppo della fotogrammetria analitica negli anni '70 per registrare un importante salto di qualità nella fotogrammetria architettonica: essa prevedeva la disponibilità e l'utilizzo di uno stereorestitutore analitico con annesso *personal computer* e software dedicato, e di una camera metrica. In questa configurazione il *computer* non era la componente principale, ma

³⁵ Fotogrammetria a stretta distanza

³⁶ Modellazione basata sulle immagini

semplicemente un raccoglitore di dati che venivano generati dallo stereorestitutore, una macchina dotata di un'ottica molto sofisticata attraverso cui visualizzare e restituire il modello stereoscopico.

Era perciò necessaria la presenza di un operatore restituitista, una figura altamente specializzata non solo negli aspetti tecnico-operativi ma anche nella conoscenza dell'architettura per la realizzazione del primo modello tridimensionale *wireframe*, da cui ricavare successivamente le elaborazioni finali di rilievo.

Il passaggio dalla tecnologia analitica a quella digitale è avvenuto inizialmente su due binari paralleli, ma a velocità differenti. Su una linea si è proceduto all'informatizzazione del processo di stereorestituzione: è accaduto cioè che il computer, prima relegato a semplice assistente, sostituisse completamente l'operatore, mentre sull'altra linea si è assistito al lento, ma inesorabile, abbandono del fotosensibile alogenuro d'argento, che ha costituito per più di un secolo, l'anima della tradizionale pellicola fotografica.

Una conseguenza di questa prima fase di digitalizzazione, viste anche le difficoltà iniziali nel riproporre un valido modello stereoscopico, è stata quella di incentivare la diffusione di programmi di fotogrammetria monoscopica: tra questi rientrano tutti i software di raddrizzamento fotografico e quei software che utilizzano più immagini in assenza di visione stereoscopica. Nell'arco di un decennio la fotogrammetria digitale, inizialmente ancorata alle metodologie proprie della fotogrammetria analitica, ha assunto una propria connotazione grazie all'acquisizione di tecniche automatiche sviluppate nell'ambito della *Computer Vision*, ossia quella disciplina che analizza e reinterpreta in chiave informatica la geometria proiettiva della scena.

Nasce poi un ulteriore campo di indagine nel momento in cui ci si pone l'obiettivo dell'automatizzazione della procedura restitutiva, dopo aver automatizzato la procedura di orientamento interno e relativo, di autocalibrazione, di impostazione del modello fotografico digitale, e di tutti quei processi che non richiedono alcun tipo di conoscenza semantica della scena.

Le tecniche automatiche per l'identificazione dei punti omologhi si basano, oltre che sull'ausilio della cosiddetta geometria epipolare attraverso cui è possibile ridurre lo spazio di ricerca delle corrispondenze tra punti omologhi, anche su algoritmi di ultima generazione come il filtro SURF³⁷ o SIFT³⁸.

Il ricorso a processi automatici di ricostruzione della forma se da un lato ha indubbi benefici sulla velocità delle operazioni di rilevamento, dall'altro, venendo meno il rapporto diretto tra l'oggetto e resitutotore può comportare alcune conseguenze negative a livello qualitativo del rilievo inteso nella sua accezione più ampia, non limitato cioè alla sola restituzione geometrica.

È quanto sta accadendo in questi ultimi anni nell'applicazione di software in grado di generare nuvole di punti da immagini fotografiche, al pari di uno scanner laser 3D³⁹.

3.2. *Structure from Motion*

Structure from Motion o SfM⁴⁰ è una tecnica di *range imaging*⁴¹ della *computer vision* e della percezione visiva, con cui il processo di stima di strutture tridimensionali viene generato da sequenze di immagini bidimensionali che possono anche essere georeferite.

Il metodo SfM opera secondo i medesimi principi della fotogrammetria stereoscopica, costituita da una serie di sovrapposizioni di immagini che rappresentano uno stesso oggetto tridimensionale, ripreso da diverse angolazioni. Il SfM differisce dalla fotogrammetria tradizionale poichè per quanto riguarda la geometria della scena, posizione ed orientamento delle camere sono risolti in maniera automatica senza una determinazione a priori:

³⁷ Speeded Up Robust Features

³⁸ Scale Invariant Feature Transform

³⁹ Fotogrammetria e/o Fotomodellazione, Leonardo Paris, Università di Roma Sapienza

⁴⁰ Struttura dal movimento

⁴¹ Gruppo di tecniche che sono usate per produrre un'immagine 2D che mostra la distanza dei punti in una scena da un punto specifico, normalmente associato ad un sensore.

essi vengono calcolati simultaneamente utilizzando una procedura iterativa, basata su un database di caratteristiche o *feature* che vengono estratte automaticamente da una serie di immagini sovrapposte⁴²

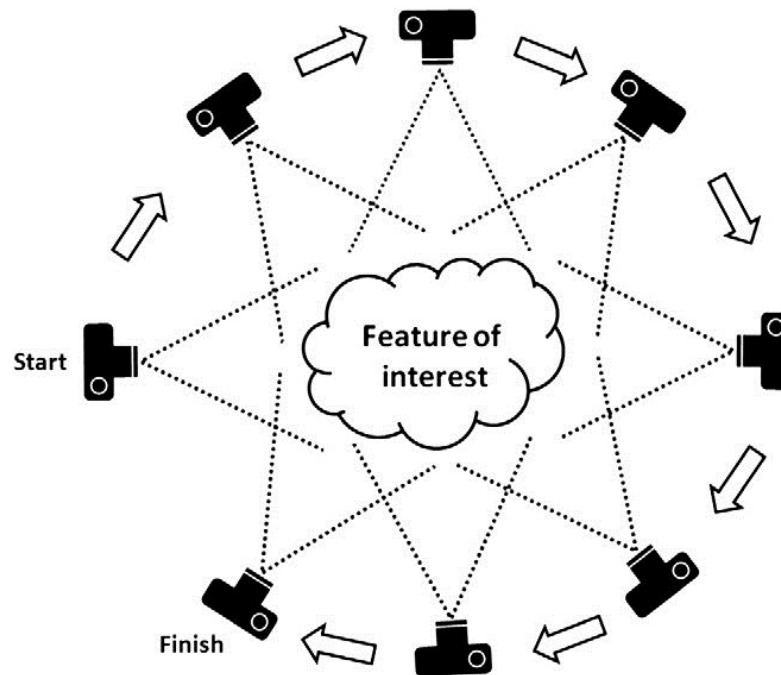


Figura 1 - Structure-from-Motion (SfM): questa tecnica richiede di avere fotogrammi multipli sovrappoventesi per ricavare la feature extraction e gli algoritmi di ricostruzione tridimensionali.

Questa tecnica trae origine dalla *Computer Vision* sin dagli anni 90, e lo sviluppo di algoritmi che ricavassero in maniera automatica le caratteristiche delle camere anche nel decennio precedente.

Esistono diversi *software* in commercio, sia con licenza gratuita che a pagamento, che ricavano automaticamente delle nuvole di punti tridimensionali a partire da set di immagini che hanno una sufficiente sovrapposizione.

⁴² Snavely, 2008

3.2.1. I principi della SfM

Per determinare la posizione 3D dei punti all'interno di una scena, i tradizionali metodi fotogrammetrici richiedono la posizione 3D delle camere o le coordinate tridimensionali di alcuni punti di controllo. In assenza di un sistema GPS o GNSS associato alla camera, la fotogrammetria tradizionale utilizza la triangolazione per ricostruire la geometria della scena, nel caso contrario i punti vengono identificati manualmente nelle fotografie di input e la posizione delle camera viene stimata attraverso un processo chiamato *space resection*.

La SfM invece non richiede che essi siano noti per la ricostruzione tridimensionale di una scena. La posizione delle camere e la geometria vengono ricostruite simultaneamente attraverso l'identificazione automatica in immagini multiple delle feature, che vengono riconosciute immagine per immagine, permettendo un'iniziale stima della posizione delle camere e delle coordinate oggetto, che vengono poi raffinati in maniera iterativa utilizzando il metodo non lineare dei minimi quadrati.

Contrariamente alla fotogrammetria tradizionale, la posizione delle camera non ha informazioni riguardanti la scala e l'orientamento, che vengono forniti dalle coordinate dei punti di controllo, successivamente inseriti. Di conseguenza, la nuvola di punti 3D che viene generata, è proiettata in un sistema di coordinate immagine relative, che deve essere orientato e scalato secondo il sistema di riferimento dello spazio reale. In molti casi il passaggio da un sistema di riferimento locale a uno globale può essere fatto attraverso un sistema tridimensionale di trasformazioni affini, basato su un numero ridotto di punti, che hanno coordinate note nel sistema di riferimento globale. Questi punti possono essere derivati a posteriori, identificando quali sono i punti meglio visibili sul campo e nella nuvola di punti tridimensionale.

Nella pratica è sempre più facile utilizzare dei target fisici con un grande

contrasto e per cui è facile identificarne il centro dopo l'acquisizione delle immagini. Questo approccio semplifica la geolocalizzazione delle immagini e degli oggetti nello spazio e permette di evitare errori non lineari nella ricostruzione tridimensionale, creando una rete di target ben distribuiti all'interno della scena da ricostruire. Può anche essere utile avere ridondanza nella rete dei *check point*, per evitare errori grossolani.

3.3. Immagini piane

3.3.1. Orientamento interno

L'orientamento interno è l'insieme dei parametri utili a definire la geometria interna della camera da presa. I parametri dell'orientamento interno sono:

- ξ_0, η_0 coordinate del punto principale nel sistema fiduciale;
- c distanza principale della camera.

Definiscono la posizione del centro di proiezione rispetto al sistema fiduciale definito sul piano della fotogrammetria.

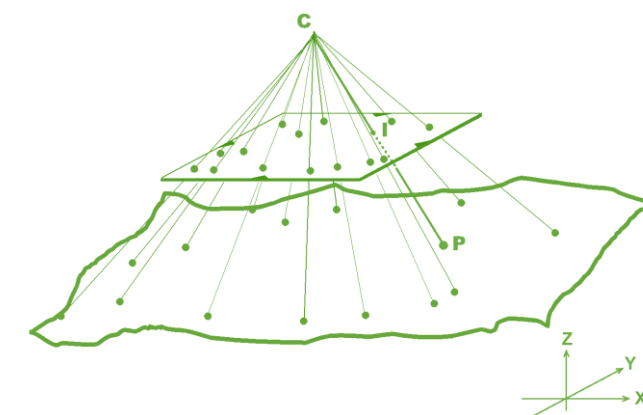


Figura 2 - Stella di direzioni

Una volta definito l'orientamento interno è possibile tracciare la stella di direzioni formata dalle rette che uniscono i singoli punti immagine con il centro di proiezione.

Siccome non si è nel caso di condizioni teoriche di posizione centrale ideale, è necessario andare ad individuare errori e distorsioni dovuti alla geometria della camera utilizzata.

In un modello ideale i punti C, P e I dovrebbero risultare allineati secondo le regole delle prospettive centrali rigorose, ma nella realtà la proiezione del punto P si trova nel punto I', e non nel punto I, a causa di un insieme di effetti deformativi.

Lo scostamento (Δx , Δy) si deve comunque mantenere entro certi limiti: conoscendo la legge di deformazione o una sua approssimazione, si possono correggere le coordinate misurate (x' , y') per avvicinarsi il più possibile alle coordinate teoriche (x , y).

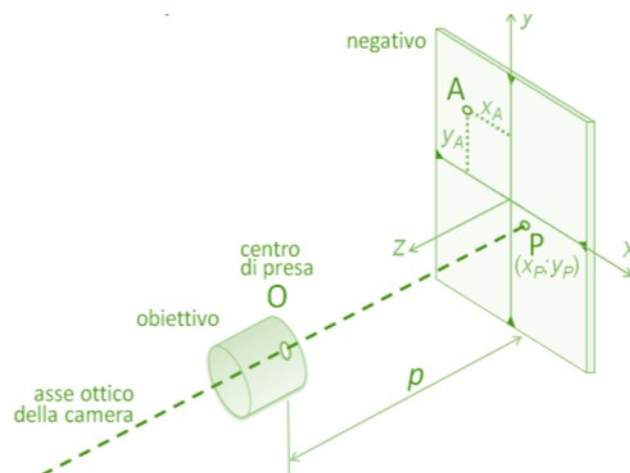


Figura 3 - Posizione del centro di presa rispetto all'immagine

Inoltre, le immagini sono affette da aberrazioni non trascurabili, infatti è necessario tener conto delle distorsioni che causano un discostamento delle posizioni reali dei punti sulla lastra, per esempio il punto A in [Figura 3](#), rispetto a quelle teoriche di una quantità d_r .

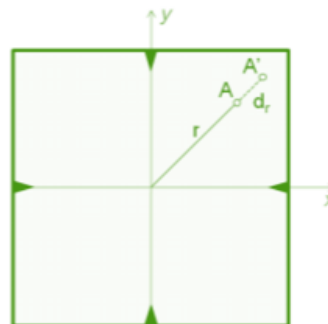
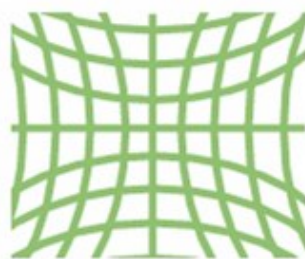


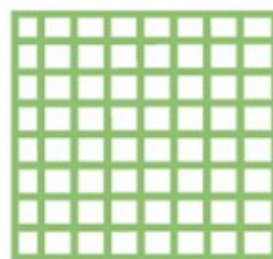
Figura 4 – Effetti della distorsione sul piano lastra

Esistono due tipi di deformazione, radiale e tangenziale.

La distorsione radiale si verifica quando i raggi luminosi mostrano delle alterazioni lungo i bordi della lente rispetto al centro ottico (*Immagine 5*).



Distorsione radiale negativa
"pincushion"



Assenza di distorsione



Distorsione radiale positiva
"barrel"

Figura 5 - Distorsioni radiali

I punti distorti sono denotati come (x_{dis} e y_{dis}):

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

dove:

- x , y posizione dei pixel non distorta, ossia coordinate immagine normalizzate, adimensionali;
- k_1, k_2, k_3 coefficienti di distorsione radiale della lente
- $r^2 = x^2 + y^2$

La distorsione tangenziale si verifica quando l'obiettivo e il piano immagine non sono paralleli e rappresenta il 5% del valore complessivo della distorsione. I punti distorti sono denotati come (x_{dis} e y_{dis}):

$$x_{dis} = x + [2 \cdot p_1 \cdot x \cdot y + p_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2)]$$

$$y_{dis} = y + [p_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot p_2 \cdot x \cdot y]$$

- x, y posizione dei pixel non distorta, ossia coordinate immagine normalizzate, adimensionali;
- p_1, p_2 coefficienti di distorsione tangenziale della lente
- $r^2 = x^2 + y^2$

3.3.2. Orientamento esterno

L'orientamento esterno è l'insieme dei parametri utili alla definizione dell'assetto spaziale della camera, ossia del fotogramma e del punto principale orientati internamente, rispetto ad un sistema di coordinate tridimensionale.

Si tratta quindi di definire la posizione spaziale di un corpo rigido nello spazio, caratterizzata da sei parametri, quali tre coordinate di traslazione t (X_0, Y_0, Z_0) e tre angoli di rotazione R (ω, φ, κ).

L'origine del sistema di coordinate della fotocamera è posizionato nel suo centro ottico e l'asse x e y definiscono il piano dell'immagine.

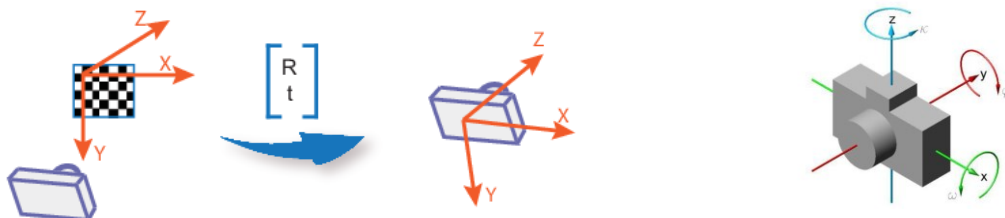


Figura 6 - Orientamento esterno

Per ottenere una restituzione fotogrammetrica è necessario ricostruire la geometria di presa di due fotogrammi per mezzo di una proiezione analitica,

processo reso più immediato conoscendo i parametri di orientamento interno ed esterno dei fotogrammi.

E' possibile procedere con tre differenti approcci:

- Orientamento indipendente di un solo fotogramma;
- Orientamento simultaneo di due fotogrammi in una sola fase;
- Orientamento simultaneo di due fotogrammi in due fasi successive (orientamento relativo e orientamento assoluto);
- Triangolazione fotogrammetrica (orientamento simultaneo di tutti i fotogrammi che compongono il blocco fotogrammetrico).

3.3.3. Le equazioni di collinearità

Le equazioni di collinearità governano le fasi della prospettiva centrale, attraverso la compensazione a stelle proiettive.

Queste relazioni si individuano elaborando le equazioni di una retta nello spazio che delimitano l'allineamento di tre punti (O_1 , A_1 , A) e la rototraslazione tra due sistemi di orientamento:

- 1 il sistema assoluto XYZ, riferimento spaziale appartenente all'elemento da rilevare;
- 2 il sistema interno xyz del fotogramma, con l'origine coincidente con il centro di presa O, l'asse z coincidente con l'asse della camera (distanza principale p) e gli assi x e y paralleli alle marche fiduciali appartenenti al sistema lastra.

Nell' *Immagine 7* è rappresentata la geometria esposta precedentemente che sarà impiegata per ricavare le equazioni di collinearità di due raggi proiettanti r_1 e r_2 pertinenti al punto generico A.

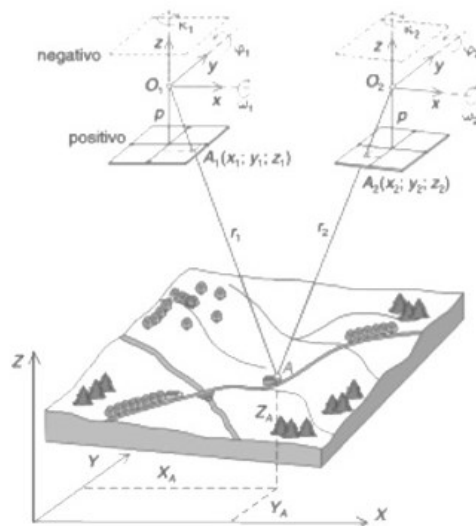


Figura 7 – Raggi proiettanti del punto generico A

Per ottenere la prima equazione di collinearità si prende in considerazione il fotogramma di sinistra raffigurato in *Figura 7*, impiegando la seguente simbologia:

- X_A, Y_A, Z_A : coordinate di un punto generico A appartenente al sistema assoluto XYZ;
- X_{O1}, Y_{O1}, Z_{O1} : coordinate del centro di presa O_1 riferite al sistema assoluto XYZ;
- x_1, y_1, z_1 : coordinate del punto A_1 sul fotogramma rispetto al sistema interno xyz, ottenuto dalla retta che passa per le coordinate del punto A e il centro del sistema di riferimento interno;
- X_{A1}, Y_{A1}, Z_{A1} : coordinate del punto A_1 riferite al sistema assoluto XYZ.

Ora è possibile scrivere l'equazione della retta r_1 passante per i punti A, A_1 e O_1 , studiando le proiezioni r_1^{XZ} e r_1^{YZ} di r_1 sui due piani XZ e YZ del sistema assoluto (*Figura 8*).

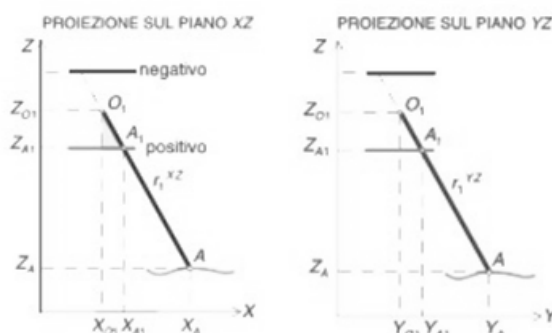


Figura 8 - Proiezione del raggio r_1 sui piani XZ e YZ

Attraverso le proiezioni dei triangoli retti si ricavano le relazioni seguenti:

$$\frac{X_A - X_{O1}}{Z_{O1} - Z_A} = \frac{X_{A1} - X_{O1}}{Z_{O1} - Z_{A1}} \qquad \frac{Y_A - Y_{O1}}{Z_{O1} - Z_A} = \frac{Y_{A1} - Y_{O1}}{Z_{O1} - Z_{A1}}$$

Mentre per il fotogramma di destra:

$$\frac{X_A - X_{O2}}{Z_{O2} - Z_A} = \frac{X_{A2} - X_{O2}}{Z_{O2} - Z_{A2}} \qquad \frac{Y_A - Y_{O2}}{Z_{O2} - Z_A} = \frac{Y_{A2} - Y_{O2}}{Z_{O2} - Z_{A2}}$$

Nelle equazioni ricavate precedentemente sono incluse le coordinate dei due punti immagine A_1 e A_2 (punti omologhi) di A , rispetto al sistema di riferimento assoluto XYZ, e non quelle rispetto al sistema interno xyz. Ora è possibile esplicitare le coordinate assolute in funzione di quelle interne mediante una rototraslazione degli assi, utilizzando i parametri di assetto angolare:

- $\omega_1, \varphi_1, \kappa_1$: assetto angolare degli assi del sistema interno xyz rispetto al sistema assoluto XYZ nella presa O_1 ;
- $\omega_2, \varphi_2, \kappa_2$: assetto angolare nella presa O_2 .

La matrice di rotazione R è ottenuta attraverso la relazione tra i due sistemi di riferimento con l'origine in comune e i coseni direttori degli assi coordinati.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(xX) & \cos(yX) & \cos(zX) \\ \cos(xY) & \cos(yY) & \cos(zY) \\ \cos(xZ) & \cos(yZ) & \cos(zZ) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

La matrice centrale è denominata matrice di rotazione R, nella quale è possibile definire i tre versori i, j e k del sistema interno x, y, z rispettando le tre condizioni di ortogonalità e tre condizioni di normalizzazione:

$$i^T i = j^T j = k^T k = 1$$

$$i^T j = i^T k = j^T k = 0$$

È possibile considerare la rotazione del sistema x, y, z come la conseguenza delle tre rotazioni ω , Φ , κ , ritenute positive se il verso di rotazione, dell'asse corrispondente, è in senso antiorario rispettando la regola della mano destra. Esprimendo le considerazioni appena effettuate, la matrice R diventa:

$$R = R_\omega \cdot R_\Phi \cdot R_\kappa = \begin{pmatrix} \cos\Phi\cos\kappa & -\cos\Phi\sin\kappa & \sin\Phi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\Phi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\Phi\cos\kappa & -\sin\omega\cos\Phi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\Phi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\Phi\sin\kappa & \cos\omega\cos\Phi \end{pmatrix}$$

Dalle relazioni precedenti si può scrivere che:

$$\begin{bmatrix} X_{A1} \\ Y_{A1} \\ Z_{A1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_{O1} \\ Y_{O1} \\ Z_{O1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

Dove:

$$\begin{pmatrix} \cos\Phi\cos\kappa & -\cos\Phi\sin\kappa & \sin\Phi \\ \cos\omega\sin\kappa + \sin\omega\sin\Phi\cos\kappa & \cos\omega\cos\kappa - \sin\omega\sin\Phi\cos\kappa & -\sin\omega\cos\Phi \\ \sin\omega\sin\kappa - \cos\omega\sin\Phi\cos\kappa & \sin\omega\cos\kappa + \cos\omega\sin\Phi\sin\kappa & \cos\omega\cos\Phi \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

Sviluppando il prodotto matriciale si ottiene:

$$X_{A1} = X_{O1} + r_{11}x_1 + r_{12}y_1 + r_{13}z_1$$

$$Y_{A1} = Y_{O1} + r_{21}x_1 + r_{22}y_1 + r_{23}z_1$$

$$Z_{A1} = Z_{O1} + r_{31}x_1 + r_{32}y_1 + r_{33}z_1$$

Ricordando che $z_1 = -p$, si ottiene:

$$X_A = X_{O1} + (Z_A - Z_{O1}) \cdot \frac{r_{11} \cdot x_1 + r_{12} \cdot y_1 - r_{13} \cdot p}{r_{31} \cdot x_1 + r_{32} \cdot y_1 - r_{33} \cdot p}$$

$$Y_A = Y_{O1} + (Z_A - Z_{O1}) \cdot \frac{r_{21} \cdot x_1 + r_{22} \cdot y_1 - r_{23} \cdot p}{r_{31} \cdot x_1 + r_{32} \cdot y_1 - r_{33} \cdot p}$$

In modo analogo si possono ricavare le equazioni riguardanti il fotogramma destro del generico A:

$$X_A = X_{O2} + (Z_A - Z_{O2}) \cdot \frac{r_{11} \cdot x_2 + r_{12} \cdot y_2 - r_{13} \cdot p}{r_{31} \cdot x_2 + r_{32} \cdot y_2 - r_{33} \cdot p}$$

$$Y_A = Y_{O2} + (Z_A - Z_{O2}) \cdot \frac{r_{21} \cdot x_2 + r_{22} \cdot y_2 - r_{23} \cdot p}{r_{31} \cdot x_2 + r_{32} \cdot y_2 - r_{33} \cdot p}$$

Le relazioni riportate, riguardanti il fotogramma sinistro, e il fotogramma destro, sono denominate equazioni di collinearità.

Per venire incontro alla realtà fisica, all'interno delle equazioni di collinearità è opportuno inserire dei parametri che tengano conto delle distorsioni radiali (K_1 , K_2 , K_3), tangenziali (P_1 , P_2) e affine (C_1 , C_2), ottenendo le seguenti equazioni:

$$X_A = X_{O1} + \Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3 + (Z_A - Z_{O1}) \cdot \frac{r_{11} \cdot x_1 + r_{12} \cdot y_1 - r_{13} \cdot p}{r_{31} \cdot x_1 + r_{32} \cdot y_1 - r_{33} \cdot p}$$

$$Y_A = Y_{O1} + \Delta Y_1 + \Delta Y_2 + (Z_A - Z_{O1}) \cdot \frac{r_{21} \cdot x_1 + r_{22} \cdot y_1 - r_{23} \cdot p}{r_{31} \cdot x_1 + r_{32} \cdot y_1 - r_{33} \cdot p}$$

Dove all'interno di ΔX_1 , ΔX_2 , ΔX_3 , ΔY_1 , ΔY_2 sono inclusi i termini che tengono conto delle distorsioni⁴³:

$$\Delta X_1 = K_1 r^2 X + K_2 r^4 X + K_3 r^6 X$$

$$\Delta Y_1 = K_1 Y + K_2 r^4 Y + K_3 r^6 Y$$

$$\Delta X_2 = P_1 (r^2 + 2X^2) + 2P_2 XY$$

$$\Delta Y_2 = P_2 (r^2 + 2X^2) + 2P_1 XY$$

$$\Delta X_3 = C_1 x + C_2 y$$

$$\Delta \eta_3 = 0$$

⁴³ Cannarozzo, Cucchiari, Meschieri (2012) Fotogrammetria. Unità 3 Cap. 7. Zanichelli editore S.p.A., Bologna

3.4. Immagini sferiche

La documentazione attraverso immagini sferiche o panoramiche sta diventando una pratica molto comune in diverse tipologie di visualizzazioni tridimensionali, come ad esempio lo *street view* di Google. Inoltre, da queste acquisizioni è possibile ricavare risultati misurabili, esplorazioni interattive, accurata documentazione e modelli tridimensionali in maniera rapida ed economica. Le immagini panoramiche sferiche o cilindriche vengono generalmente acquisite con costose camere panoramiche ad alte prestazioni che ruotano attorno al proprio asse. In alternativa esse possono essere prodotte acquisendo delle immagini parzialmente ricoprentesi da un unico punto di vista: le immagini vengono poi unite e l'immagine panoramica proiettata su una sfera virtuale. Generalmente la distorsione radiale dell'immagine viene compensata durante il processo di unione delle immagini. La sfera virtuale dell'immagine panoramica viene poi proiettata sul piano cartografico con la rappresentazione equi-rettangolare (longitudine – latitudine), da cui è possibile tracciare le direzioni angolari.

E' poi possibile ricostruire un modello tridimensionale a partire da più immagini panoramiche che rappresentino la medesima scena: l'alta risoluzione delle immagini permette di avere una ricostruzione dettagliata anche a partire da un numero limitato di acquisizioni.

3.4.1. Fotogrammetria sferica multi – immagine

Dopo l'acquisizione delle singole immagini da un unico punto di vista, il mosaico generato è proiettato su una sfera, il cui raggio R è arbitrario, ma corrispondente alla lunghezza focale della camera, per mantenere la risoluzione originaria.

La sfera virtuale dell'immagine panoramica viene poi proiettata sul piano cartografico con la rappresentazione equi-rettangolare (longitudine – latitudine),

e le coordinate immagine sono date da:

$$x = R\theta$$

$$y = R\varphi$$

con le direzioni orizzontali (θ) e verticali (φ) mostrate in *Figura 9*. Questa rappresentazione non risulta nè conforme, nè equivalente. I poli della sfera sono rappresentati da due segmenti di lunghezza uguale alla circonferenza della sfera e perciò equatore e poli hanno la stessa lunghezza.

Anche l'altezza dell'immagine panoramica è pari allo sviluppo di un meridiano di riferimento. Da questa rappresentazione è possibile tracciare gli angoli di direzione della linea proiettiva, e conoscendo l'estensione a dell'immagine panoramica, il raggio della sfera generata sarà pari a:

$$R = \frac{a}{2\pi}$$

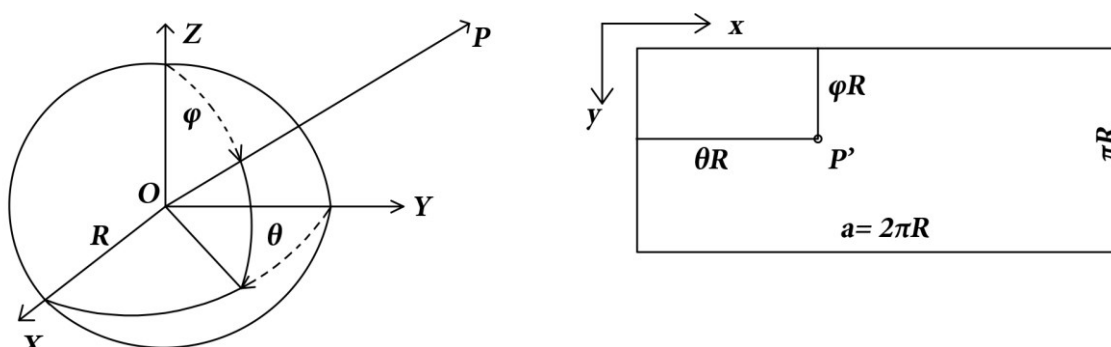


Figura 9 – Relazione tra le coordinate immagine e le coordinate oggetto nel caso di immagini sferiche.

Con le immagini sferiche non è però possibile ottenere la stessa accuratezza che si otterrebbe utilizzando un classico teodolite, per cui è semplice impostare gli assi principali: è necessario stimare due angoli ($d\alpha_x$, $d\alpha_y$) di correzione attorno ai due assi orizzontali.

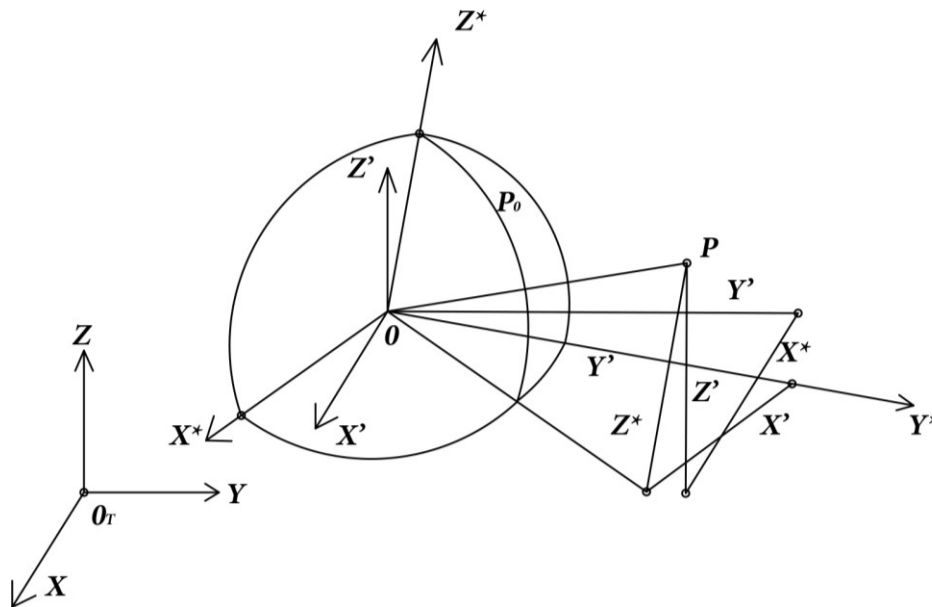


Figura 10 – Relazione tra le coordinate immagine e le coordinate oggetto prima e dopo le due correzioni applicate per compensare la mancata verticalità.

Dopo questa correzione, se si hanno a disposizione diverse immagini sferiche, è possibile utilizzarle in un processo fotogrammetrico, riformulando il modello della prospettiva di presa da coordinate cartesiane a coordinate sferiche, dando un sufficiente numero di punti corrispondenti tra le diverse immagini. Una volta che le posizioni delle camera sono state stimate in coordinate tridimensionali delle immagini corrispondenti, è possibile procedere con la ricostruzione tridimensionale della scena tramite i metodi di *intersection* and *resection*.

3.4.2. Estrazione delle corrispondenze tra immagini

Per l'orientamento di molte immagini sferiche, l'identificazione interattiva delle corrispondenze all'interno delle immagini può richiedere lunghi tempi di elaborazione, perciò si rende necessaria l'automazione di tale processo.

Il metodo sviluppato è basato sull'estrazione e sul *matching* di *scale invariant*

features tramite gli operatori SIFT⁴⁴ e SURF⁴⁵, combinati con alcuni stimatori robusti⁴⁶ che permettono di identificare corrispondenze errate⁴⁷, basati sulla stima della matrice fondamentale⁴⁸.

Questa metodologia è simile agli approcci tradizionali utilizzati per le immagini piane, e viene utilizzata anche per le immagini sferiche per stimare la posizione delle camera.

Quando un'immagine sferica viene sviluppata su un piano, i contenuti presentano differenti risoluzioni (altezza e larghezza), cambiamenti di scala e risulta impossibile utilizzare modelli di camera in coordinate cartesiane.

Mentre un'immagine piana viene descritta dai parametri di calibrazione della camera di presa, una generica immagine panoramica è solamente descritta dalla sua circonferenza a , che corrisponde alla larghezza dell'immagine in pixel, sotto un angolo pari a 2π . Infatti un'immagine sferica può essere intesa come una sfera di raggio unitario S attorno al centro di prospettiva e le coordinate 3D dei punti u possono essere espresse in termini di longitudine θ e colatitudine φ come:

$$\mathbf{u} = [u \ v \ w]^T = [\sin \varphi \cos \theta \ \sin \varphi \sin \theta \ \cos \varphi]^T$$

$$\|\mathbf{u}\| = 1$$

La relazione tra un punto della sfera e le sue coordinate 3D è:

$$\mathbf{u} = \mathbf{X}/\|\mathbf{X}\|$$

⁴⁴ D. LOWE. *Distinctive image features from scale-invariant keypoints*. *International Journal of Computer Vision*, 60(2), pp. 91-110, 2004.

⁴⁵ H. BAY, A. ESS, T. TUYTELAARS, L. VAN GOOL. SURF: Speeded up Robust Features. *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3), pp. 346-359, 2008.

⁴⁶ P. TORR. Bayesian model estimation and selection for epipolar geometry and generic manifold fitting. *Int. J. of Computer Vision*, 50(1): 35-61, 2002.

⁴⁷ P.J. ROUSSEEUW, A.M. LEROY. *Robust Regression and Outlier Detection*. New York, John Wiley, ISBN 978-0471852339, 352 pp., 1987.

⁴⁸ R.I. HARTLEY, A. ZISSERMAN. *Multiple view geometry in Computer Vision*. Cambridge, Cambridge University Press, ISBN 0521540518, 672 pp., 2004.

Utilizzando le proiezioni equirettangolari, le coordinate omogenee \mathbf{m} possono essere così ritrovate sulla sfera:

$$\mathbf{m} = [m_1 \ m_2 \ 1]^T = [R\theta \ R\varphi \ 1]^T$$

dove

$$R = \frac{a}{2\pi}$$

è il raggio della sfera.

Una volta estratte le caratteristiche invarianti dalle immagini sferiche, il mediano della longitudine $\mu(\theta)$ viene estratto da θ , ottenendo così delle nuove longitudini:

$$\theta^* = \theta - \mu(\theta)$$

Questo permette la proiezione di un generico punto \mathbf{p} della sfera sul piano $u = 1$ come:

$$\mathbf{p} = [1 \ p_2 \ p_3]^T = [1 \ \tan \theta \ \cot \varphi / \cos \theta^*]^T$$

dove p_2 e p_3 si possono intendere come le coordinate immagine non omogenee di una nuova immagine piana. Il centro delle immagini sferiche è anche il centro di proiezione della nuova immagine piana, con il vantaggio che, date due immagini sferiche S e S' , un *outlier* può essere rimosso tramite stimatori robusti e la matrice fondamentale.

Questa procedura non può funzionare con grandi variazioni di longitudine.

Ad ogni modo, la suddivisione della sfera in quattro zone ($k\pi/2 \leq \theta < (k+1)\pi/2$, $k = \{0,1,2,3\}$), produce quattro immagini piane locali che possono essere elaborate in modo indipendente.

Una volta data la massima risoluzione al contenuto delle immagini panoramiche, gli operatori utilizzati e la strategia di matching danno un grande

numero di corrispondenze tra le immagini. Per velocizzare il processo e le procedure di *bundle adjustment*, viene applicata una strategia di riduzione. Ogni immagine viene divisa in celle rettangolari e per ciascuna di esse viene tenuto in considerazione il punto con la migliore molteplicità. Le corrispondenze delle immagini estratte vengono poi utilizzate per derivare, con una *bundle solution* in coordinate sferiche, la posizione delle camera e la geometria 3D della scena presa in esame.

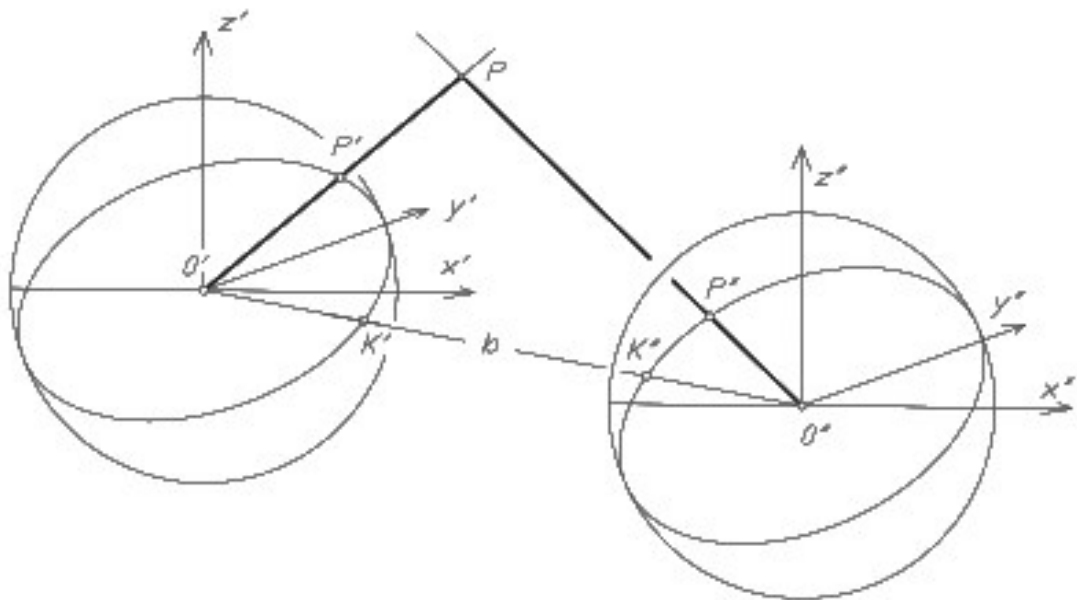


Figura 11 – Condizione di complanarità tra due immagini sferiche

3.4.3. Equazioni di collinearità

Si considerino tre sistemi di riferimento ortogonali:

- “sistema terreno”, $[O_T; X, Y, Z]$ con asse Z verticale;
- “sistema sfera”, un sistema ausiliario $[O; X', Y', Z']$ parallelo al sistema terreno con asse Z verticale e con l'origine nel centro della sfera $O(x_0, y_0, z_0)$;
- “sistema panorama” $[O; X^*, Y^*, Z^*]$, centrato nel centro O della sfera ed orientato parallelamente agli altri due:

$$X' = X - X_0$$

$$Y' = Y - Y_0$$

$$Z' = Z - Z_0$$

Le coordinate sferiche del punto P nel sistema panorama sono:

$$x^* = d \sin \varphi \sin \theta$$

$$y^* = d \sin \varphi \cos \theta$$

$$z^* = d \cos \theta$$

dove $d = OP$ è la distanza dall' oggetto del centro di presa.

La coordinate sferiche del panorama possono essere ricavate da quelle X' , Y' , Z' del sistema ausiliario sfera, considerando piccoli gli angoli di correzione $d\alpha_x$ e $d\alpha_y$, di cui bisogna ruotare il sistema $[O;X',Y',Z']$ per renderlo coincidente con il sistema di coordinate $[O;X^*,Y^*,Z^*]$; quindi linearizzando la matrice di rotazione M si ottiene:

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

Dividendo la prima per la seconda si ricava:

$$\begin{aligned} \theta = \theta_0 + \frac{x}{R} &= \tan^{-1} \frac{X^*}{Y^*} = \tan^{-1} \frac{r_1(X - X_0) + r_2(Y - Y_0) + r_3(Z - Z_0)}{r_4(X - X_0) + r_5(Y - Y_0) + r_6(Z - Z_0)} \\ &= \tan^{-1} \frac{X' - d\alpha_y \cdot Z'}{Y' - d\alpha_x \cdot Z'} \end{aligned}$$

Come noto, l'anomalia dell'origine e l'angolo, in senso orario, compreso fra la direzione del nord e la direzione dell'origine degli angoli.

Si deriva:

$$x = R \left(-\theta_0 + \tan^{-1} \frac{X^*}{Y^*} \right) = R \left(-\theta_0 + \tan^{-1} \frac{X' - d\alpha_y Z'}{Y' - d\alpha_x \cdot Z'} \right)$$

Dalla terza equazione deriva la seguente:

$$\begin{aligned}\varphi &= a \cos \frac{Z^*}{d} = a \cos \frac{r_7(X - X_0) + r_8(Y - Y_0) + r_9(Z - Z_0)}{d} \\ &= a \cos \frac{d\alpha_y X' - d\alpha_x Y' + Z'}{d}\end{aligned}$$

quindi :

$$y = R\varphi = Ra \cos \frac{d\alpha_y X' - d\alpha_x Y' + Z'}{d}$$

dove:

x, y	coordinate immagine dell'immagine panoramica
X, Y, Z	coordinate oggetto 3D
R	raggio della sfera
$d\alpha_x, d\alpha_y$	angoli di correzione (<i>roll e pitch</i>)
θ_0	anomalia dell'origine
X_0, Y_0, Z_0	coordinate oggetto del centro della sfera

con:

$$\begin{aligned}d &= \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2} = \sqrt{X'^2 + Y'^2 + Z'^2} \\ &= \sqrt{(X^*)^2 + (Y^*)^2 + (Z^*)^2} =\end{aligned}$$

distanza fra centro sfera O e punto oggetto P, invariante rispetto ai due sistemi di riferimento e agli elementi della matrice di rotazione M.

Le precedenti equazioni sono le equazioni di collinearità per i panorami sferici, ovvero le equazioni note in topografia come equazioni alla direzione azimutale e dell'angolo zenitale, corrette per tener conto della mancata verticalità della sfera. Esse sono linearizzate intorno a valori prossimi di parametri e coordinate e compensate in blocco. La restituzione grafica del nostro rilievo avviene

tramite la soluzione delle equazioni di collinearità, le quali permettono quindi di passare dalle coordinate spazio foto a quelle sferiche e, quindi, a quelle reali nello spazio oggetto.

I valori prossimi vengono forniti da una procedura classica topografica in cui i valori degli angoli di correzioni $d\alpha_x$ e $d\alpha_y$ vengono tenuti uguali a zero. In altre parole, per stimare i valori prossimi delle coordinate incognite si possono usare le classiche procedure topografiche come se gli angoli di direzione ricavati dai panorami fossero privi di errore, con il vantaggio per gli operatori di usare tecniche già note e sperimentate. Le equazioni delle rette proiettive, possono essere riguardate come le equazioni che uniscono topografia e fotogrammetria, considerato anche che R , raggio della sfera è la distanza principale della camera con cui sono stati formati i panorami.

3.4.4. Equazioni di complanarità

Date una serie di corrispondenze tra le immagini, la posizione delle camera e le coordinate oggetto delle *feature* corrispondenti, vengono calcolate utilizzando le precedenti equazioni di collinearità, con una soluzione ai minimi quadrati, introducendo delle informazioni sui punti di controllo da risolvere per la mancanza di dati e derivare risultati metrici.

Se queste informazioni non sono disponibili, un'immagine panoramica può essere orientata in modo relativo a una qualsiasi altra, utilizzando la condizione di complanarità:

$$[X' \ Y' \ Z']M'^T \begin{bmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -b_x \\ -b_y & b_x & 0 \end{bmatrix} M'' \begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = 0$$

dove:

b_x, b_y, b_z componenti della linea di base b tra le due immagini panoramiche

M' e M''	matrici di rotazione delle immagini panoramiche
X', Y', Z'	coordinate oggetto del punto P'
X'', Y'', Z''	coordinate oggetto del punto P''

Tale relazione viene linearizzata e, dividendo per il valore R del raggio delle due sfere, diventa:

$$[(\sin \varphi' \sin \theta')(\sin \varphi' \cos \varphi') \cos \varphi'] \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta \alpha'_y \\ 0 & 1 & -\delta \alpha'_x \\ -\delta \alpha'_y & \delta \alpha'_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -b_x \\ -b_y & b_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\delta \alpha''_y \\ 0 & 1 & \delta \alpha''_x \\ \delta \alpha''_y & -\delta \alpha''_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (\sin \varphi'' \sin \theta'') \\ (\sin \varphi'' \cos \theta'') \\ (\cos \theta'') \end{bmatrix} = 0$$

L'orientamento relativo serve a collegare fra loro stazioni che non hanno osservazioni reciproche dirette, e dunque a fornire i valori dei parametri e le coordinate incognite approssimate, da introdurre nelle espressioni delle coordinate immagine x e y per la compensazione di blocco.

L'intersezione del piano epipolare con la superficie del sensore, che nella tradizionale fotogrammetria è una retta (la retta epipolare), in questo caso è una circonferenza, che proiettata sul piano di rappresentazione, diventa una curva.

3.4.5. Ricostruzione geometrica tridimensionale

Una volta stimate la posizione delle camere, il passo successivo è la ricostruzione 3D della scena. Nel caso di oggetti dalla forma non regolare, come statue e bassorilievi, è necessaria una procedura automatica di matching per il rilievo di tutti i dettagli geometrici e discontinuità della scena.

Cominciando dalle posizioni stimate delle camere, l'utente può selezionare elementi omologhi per ricavare la struttura 3D della scena: per migliorare la geometria della ricostruzione si possono individuare punti complanari o gruppi di linee parallele.

Il modello 3D così ricavato può essere esportato ed implementato attraverso altri software di visualizzazione e modellazione per la post-produzione, per creare animazioni, tour virtuali e l'aggiunta di effetti speciali.

Capitolo 4

Calibrazione delle camere

Per le sperimentazioni effettuate è stata utilizzata la camera iSTAR di NCTech, come già detto composta da quattro camere *fisheye*.

Per quanto riguarda l'orientamento interno della camera si sono utilizzati due diversi software per ottenere i parametri di calibrazione relativi alle quattro singole camere che compongono lo strumento.

4.1. Calib 3v

Calib 3v è un software sviluppato dal Laboratorio di Fotogrammetria Circe dell'università IUAV di Venezia, per la calibrazione di fotocamere di grande formato *full frame*, ma anche per camere con lenti grandangolari. Il software usa un pannello, che può essere stampato, per la calibrazione e l'utente deve selezionare un'area rettangolare che comprenda i *reference points*. Dopo aver eseguito la calibrazione, l'utente può caricare tutte le immagini prese dalla stessa macchina fotografica con le stesse impostazioni ed eliminare la distorsione.

Inoltre il software può utilizzare sequenze video per riprendere la pagina di calibrazione e avviare il processo; quando tutti i parametri di calibrazione sono stati calcolati, a tutti i video girati con i sensori calibrati può essere eliminata la distorsione⁴⁹.

49 www.iuav.it

4.1.1. Procedimento

4.1.1.1. Caricamento delle immagini

Il primo passo è quello del caricamento delle immagini: in questo caso essendo lo strumento composto da quattro camere fisheye, si è provveduto alla presa, da ciascuna camera, di 8 fotogrammi ritraenti la griglia di prova, cambiando leggermente l'angolo di inclinazione, ma mai l'orientamento.

Calibration → Add images

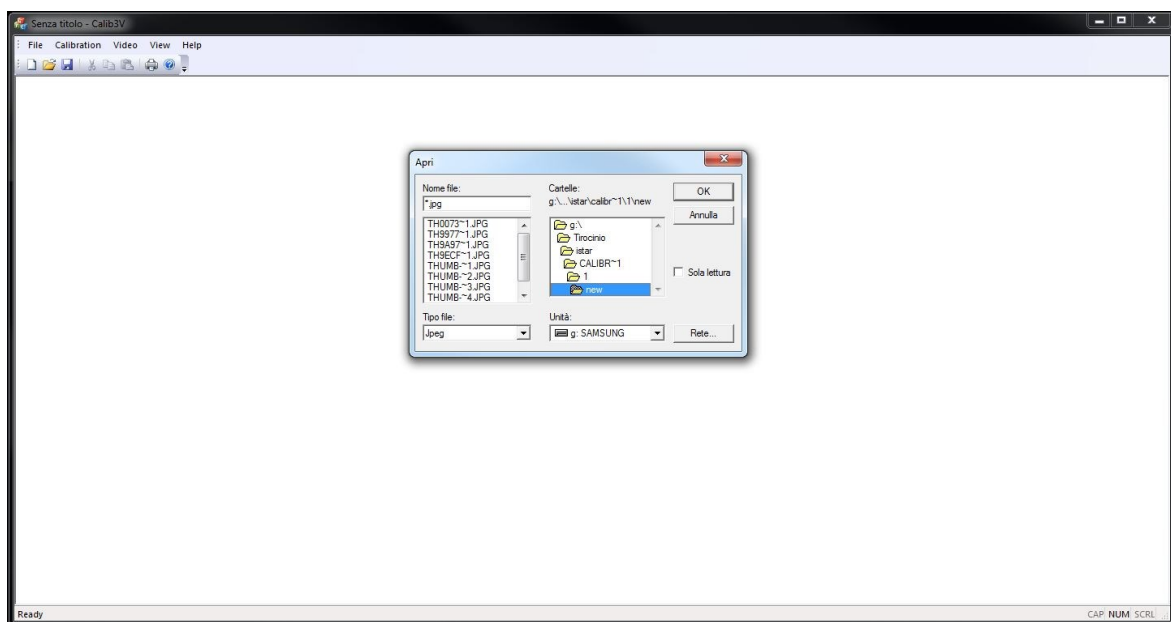


Figura 12 - Inserimento delle immagini

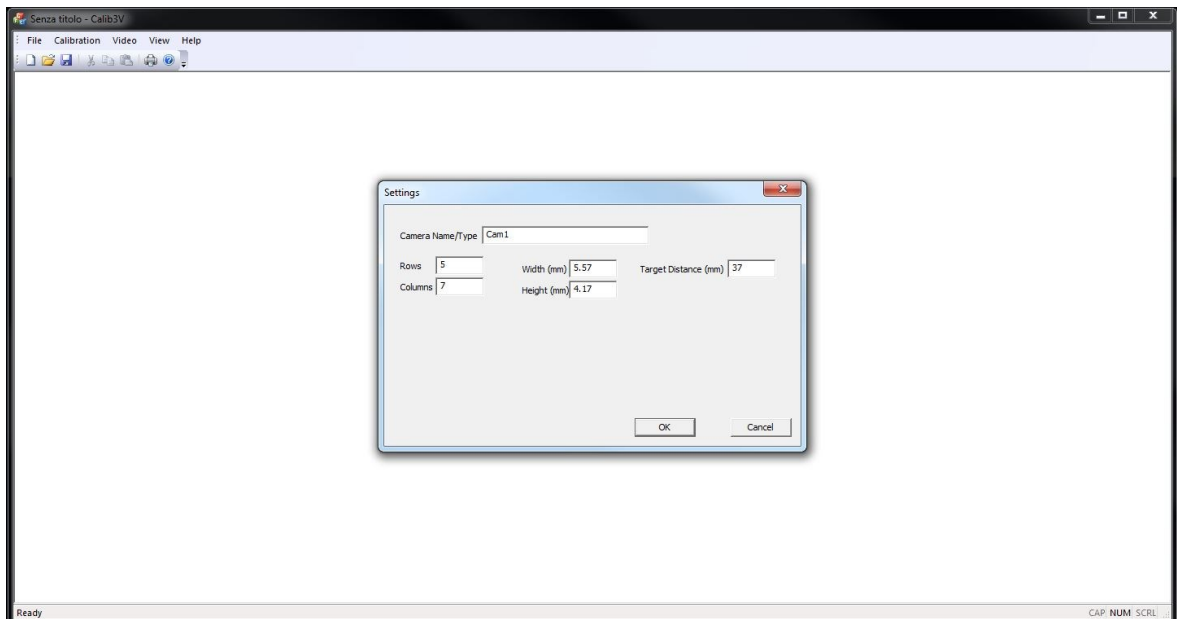


Figura 13 - Impostazioni

<i>camera name</i>	nome associato a ciascuna camera
<i>rows</i>	righe di cerchi che compongono la griglia fornita
<i>columns</i>	colonne di cerchi che compongono la griglia
<i>width/height</i>	larghezza ed altezza del sensore, fornite dal produttore della camera in mm
<i>target distance</i>	distanza tra i centri dei cerchi che compongono la griglia, di 37 mm, fornita dal Laboratorio sviluppatore del software

4.1.1.2. Calibrazione delle immagini

E' molto importante impostare prima di cominciare a selezionare la regione contenente le circonferenze i valori di *threshold*, *font size* e *minimum size*: si seleziona la regione per ogni immagine caricata.

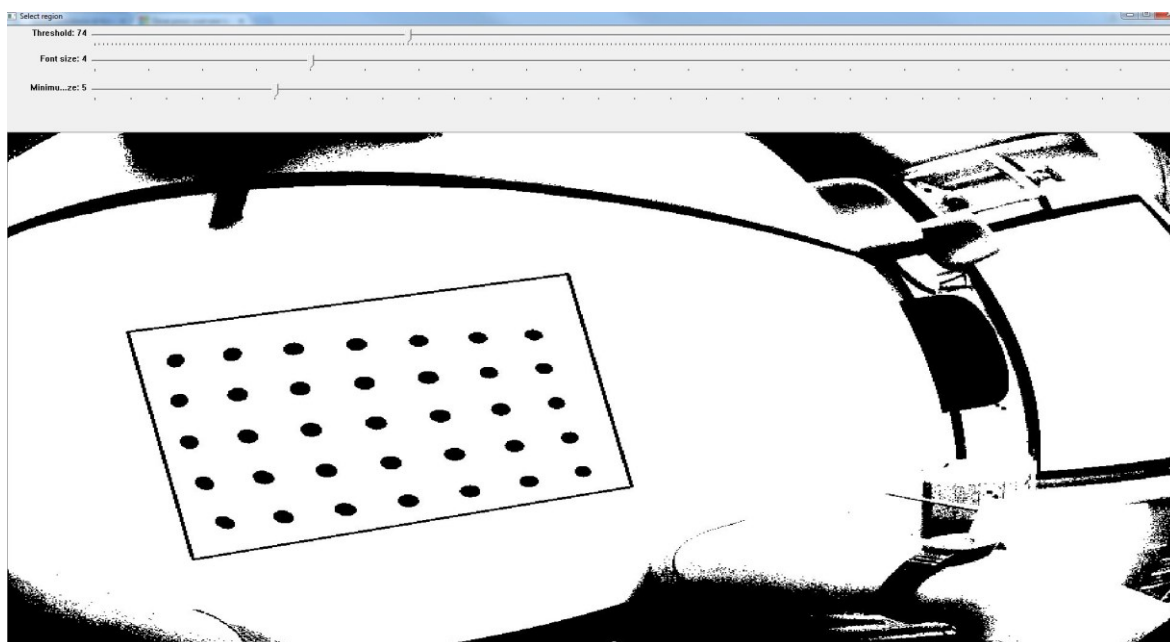


Figura 14 - Selezione della regione

Il programma riconosce la presenza e la posizione delle circonferenze andandole a numerare in automatico, se ciò non avviene, vuol dire che non è riuscito a riconoscere correttamente tutti gli elementi.

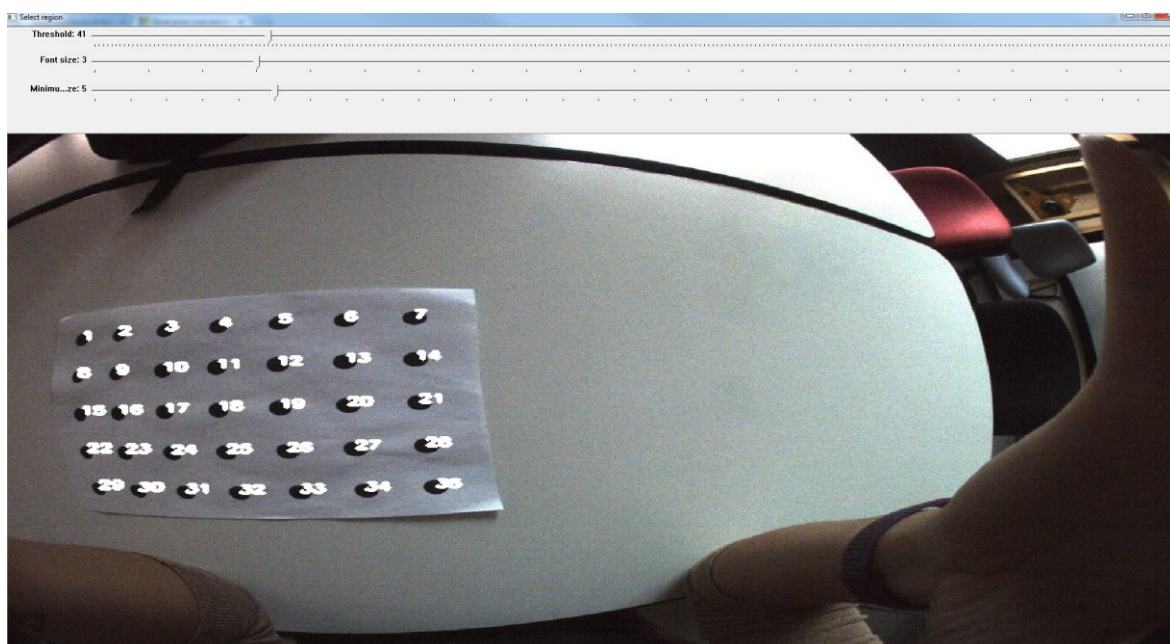


Figura 15 - Numerazione delle circonferenze

Si riportano a titolo esemplificativo le immagini utilizzate per la calibrazione della camera 1 appartenente allo strumento iSTAR:



immagine1.JPG



immagine2.JPG



immagine3.JPG



immagine4.JPG

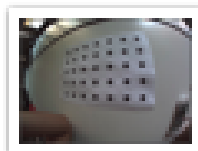


immagine5.JPG



immagine6.JPG

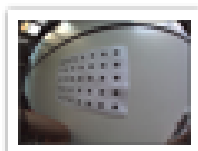


immagine7.JPG

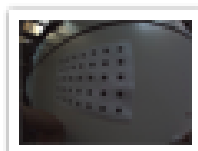


immagine8.JPG

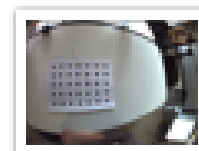


immagine9.JPG

Figura 16 - Immagini utilizzate per la calibrazione della camera 1

Fatto questo per ogni immagine, il programma restituisce i valori di calibrazione interna per ogni camera dello strumento.

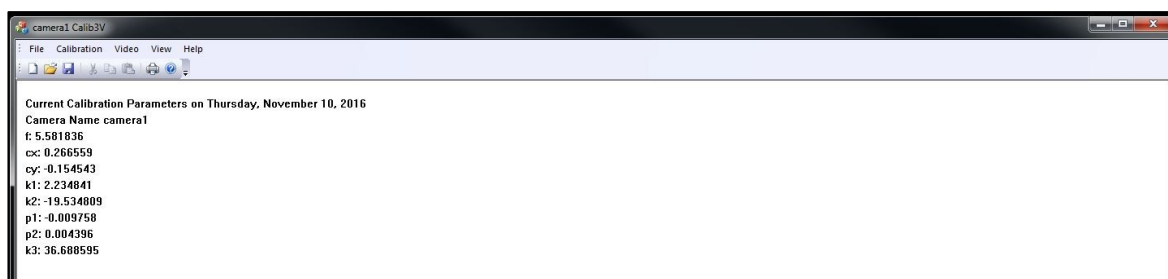


Figura 17 - Parametri ottenuti

Dove:

- f lunghezza focale
- c_x , c_y scostamento nelle direzioni x e y rispetto al centro fiduciale
- k_1 , k_2 , k_3 coefficienti di distorsione radiale
- p_1 , p_2 coefficienti di distorsione tangenziale

Output calib3v	Camera 1	Camera 2	Camera 3	Camera 4
f [mm]	2,9370	2,8596	3,0818	3,7693
c_x [mm]	0,0298	0,0944	0,0391	-0,0089
c_y [mm]	0,0677	0,1784	0,05220	0,1049
k_1	-0,3676	-0,3396	-0,3402	-0,5260
k_2	0,1587	0,11537	0,0988	0,2162
k_3	-0,0364	-0,0185	-0,0122	-0,0411
p_1	0,0041	0,0067	0,0059	0,0278
p_2	0,0014	0,0021	0,0002	-0,0050

Tabella 12 - Parametri in mm

I valori ottenuti sono poi stati convertiti in pixel, conoscendone la dimensione, precedentemente ricavata.

Output calib3v	Camera 1	Camera 2	Camera 3	Camera 4
f [px]	1932,2513	1881,3112	2027,5283	2479,8053
c_x [px]	19,6250	62,0862	25,7487	-5,8816
c_y [px]	44,5493	117,3895	34,3553	69,0461

Tabella 13 - Parametri in pixel

4.2. Photoscan

Un procedimento analogo è stato effettuato anche con il software Photoscan Pro di Agisoft, in grado di elaborare immagini attraverso processi fotogrammetrici. Esso consente di generare ortofoto ad alta risoluzione georeferenziate, e DEM dettagliati di texture e mesh poligonali. Il flusso di lavoro completamente automatizzato consente di trattare migliaia di immagini e di produrre dati fotogrammetrici di precisione.

Agisoft PhotoScan Pro supporta una vasta gamma di formati di input tra cui JPEG, TIFF, PNG e formati output (GeoTiff, xyz, Google KML, Wavefront OBJ, VRML, COLLADA, PDF).

Per georeferire la nuvola di punti ottenuta e le camere, il programma necessita di informazioni riguardanti le camere utilizzate, contenute nell'exif delle immagini, o coordinate GCP che altrimenti possono essere utilizzati per ottenere una maggiore precisione, sia le coordinate GPS se si vuole riferire la nuvola ad un sistema di riferimento globale e non più locale. In questo modo possono essere calcolati anche i parametri di calibrazione della camera e esportati, oppure è possibile inserirli manualmente se essi sono già noti.

4.2.1. Procedimento

Sono stati presi in esame una decina di fotogrammi *fish-eye* ed elaborati singolarmente per ciascuna camera.

In questo caso però i fotogrammi sono relativi ad uno spazio fisico, quale il laboratorio di fotogrammetria presente all'interno del DIATI, utilizzato poi successivamente anche per il rilievo statico con la camera iSTAR.

Dapprima è stato chiesto al programma di provvedere all'allineamento automatico delle immagini con i parametri forniti dal certificato di calibrazione della camera.

Parametri di allineamento:

- Accuracy (Precisione)

Le impostazioni di precisione più elevate consentono di ottenere una stima più precisa delle posizioni delle telecamere. È possibile utilizzare impostazioni di precisione più basse per ottenere le posizioni della videocamera in un tempo più breve. Mentre con l'impostazione alta precisione il software funziona con le foto della dimensione originale, l'impostazione media determina la riduzione dello scostamento di immagine per un fattore 4, 2 volte per lato, mentre i file sorgente a bassa precisione vengono ridimensionati per fattore di 16. L'impostazione più alta di precisione aumenta l'immagine per un fattore 4.

- Preselection (Preselezione)

L'opzione di preselezione di coppie di immagini può accelerare il processo di allineamento grazie alla selezione di un sottoinsieme di coppie di immagini da abbinare. Nella modalità di preselezione generica, le coppie di foto sovrapposte vengono selezionate utilizzando un'impostazione di precisione inferiore. Nella modalità di preselezione di riferimento, le coppie di foto sovrapposte vengono selezionate in base alle posizioni delle telecamere misurate (se presenti).

- Key point limit (Limite dei punti chiave)

Il numero indica il limite superiore dei punti di funzione su ogni immagine da prendere in considerazione durante la fase di elaborazione. L'utilizzo del valore zero consente a PhotoScan di trovare il maggior numero possibile di punti chiave, ma può portare ad un numero elevato di punti meno affidabili.

- Tie point limit (Limite dei punti di legame)

Il numero indica il limite superiore dei punti di corrispondenza per ogni immagine. L'utilizzo del valore zero non applica alcun filtro a punti di collegamento.

In questo caso sono state utilizzate le seguenti impostazioni:

- Accuracy → High
- Preselection → Generic
- Key point limit → 0
- Tie point limit → 0

Si riportano a titolo esemplificativo i fotogrammi presi in esame per la camera 1:

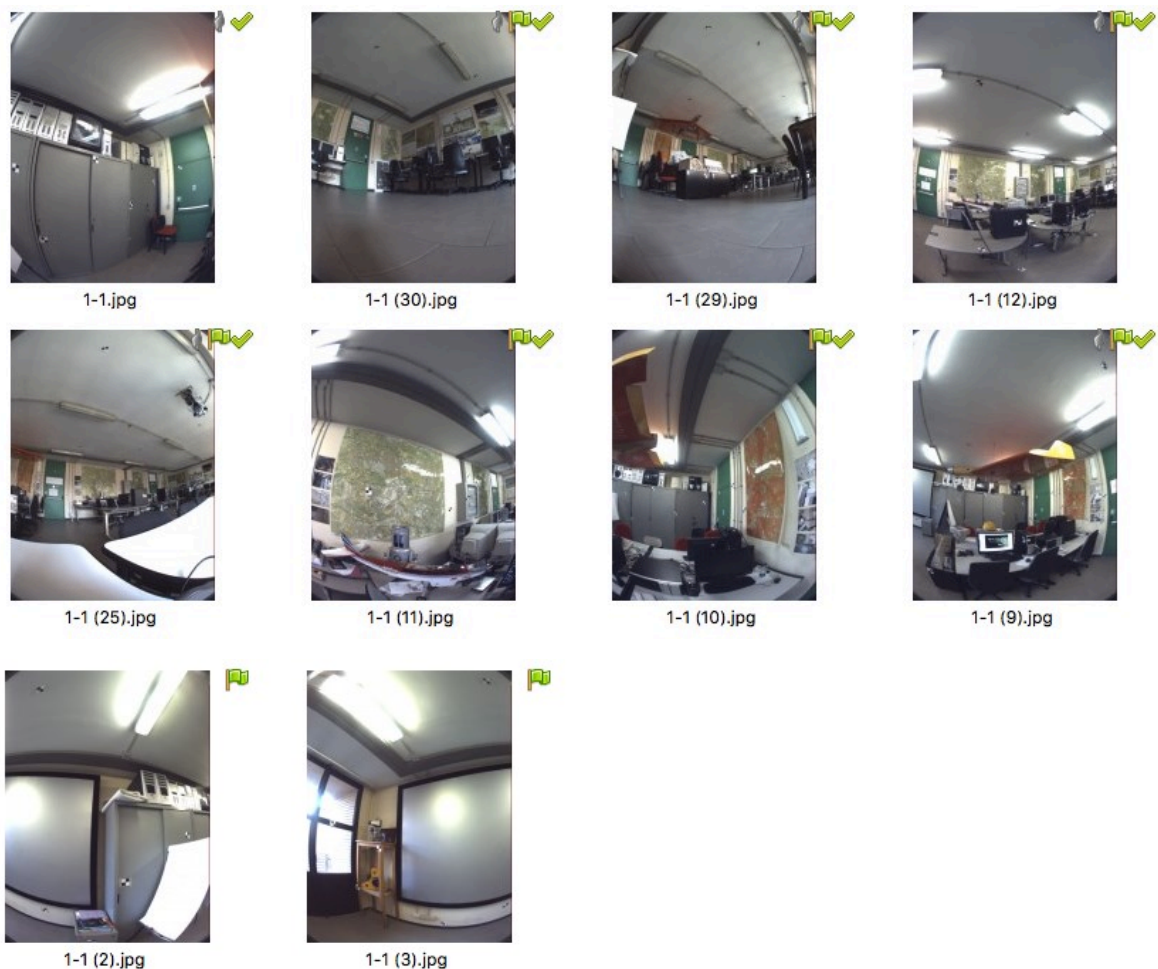


Figura 18 - Fotogrammi utilizzati per la calibrazione della Camera 1

Dopo la prima fase di allineamento delle immagini sono stati inseriti dei *marker* prendendo in considerazione dei punti naturali o dei crocicchi applicati alle pareti del laboratorio e sono stati ricalcolati i parametri iniziali della camera.

Tali operazioni sono state effettuate per ciascuna delle quattro camere che compongono la iStar e sono stati ottenuti i seguenti risultati:

Output Photoscan	Camera 1	Camera 2	Camera 3	Camera 4
f [mm]	2,4704	2,3630	2,4481	2,4303
c _x [mm]	-0,0084	-0,0541	-0,0518	-0,0206
c _y [mm]	-0,0102	0,0112	0,0130	0,0626
k1	-0,1053	-0,0417	-0,0561	-0,0497
k2	0,1303	-0,0612	0,0012	-0,0117
k3	-0,1614	0,0885	-0,0414	-0,0115
p1	0,0014	0,0020	0,0017	-0,0002
p2	0,0048	-0,0013	0,0007	-0,0015

Tabella 14 - Parametri in mm

Output Photoscan	Camera 1	Camera 2	Camera 3	Camera 4
f [px]	1625,2500	1554,6200	1610,6200	1598,8800
c _x [px]	-5,5200	-35,5741	-34,0618	-13,5851
c _y [px]	-6,7355	7,3385	8,5792	41,1600

Tabella 15 - Parametri in px

4.3 Confronto dei risultati

Il certificato di calibrazione della camera, fornito dal produttore restituisce dei dati che sono relativi allo strumento nella sua interezza, considerando le quattro camere come una soltanto, si ritiene pertanto che i valori presentati siano stati mediati e che non siano del tutto corretti.

Attraverso i procedimenti con Calib3v e Photoscan sono stati ottenuti dei valori molto diversi fra loro, ma si ritengono più attendibili quelli ottenuti con Photoscan, poiché Calib3v è consigliato nel caso di immagini piane, mentre photoscan è adatto anche all'elaborazione di immagini *fisheye* e sferiche.

Output	Camera 1	
	Calib3v	Photoscan
f [px]	1932,2513	1625,2500
c_x [px]	19,6250	-5,5200
c_y [px]	44,5493	-6,7355
k1	-0,3676	-0,1053
k2	0,1587	0,1303
k3	-0,0365	-0,1614
p1	0,0041	0,0014
p2	0,0014	0,0048

Tabella 16 - Confronto parametri di calibrazione camera 1

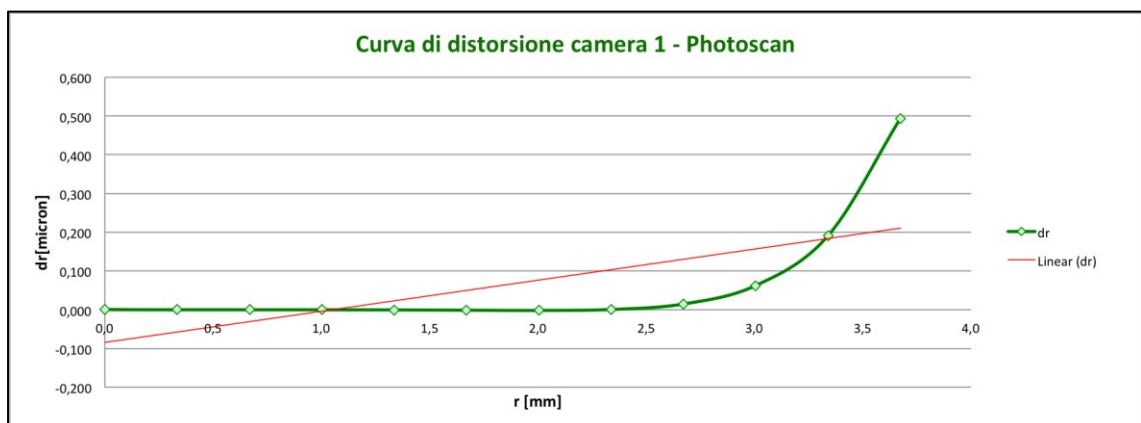
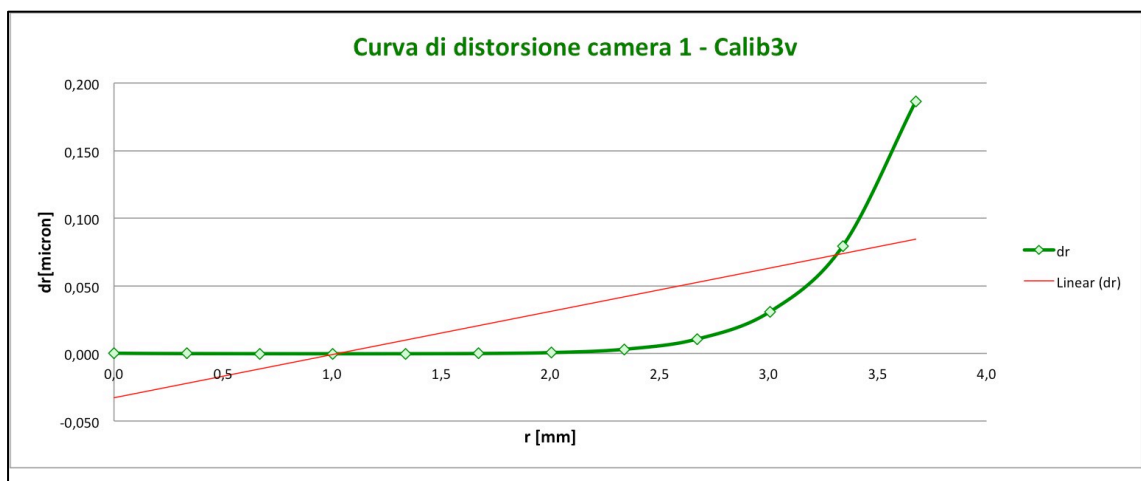


Figura 19 - Curve di distorsione Camera 1

Output	Camera 2	
	Calib3v	Photoscan
f [px]	1881,3112	1554,6200
c _x [px]	62,0862	-35,5741
c _y [px]	117,3895	7,3385
k1	-0,3396	-0,0552
k2	0,1154	-0,0103
k3	-0,0185	0,0054
p1	0,0068	-0,0005
p2	0,0021	0,0003

Tabella 17 - Confronto parametri di calibrazione camera 2

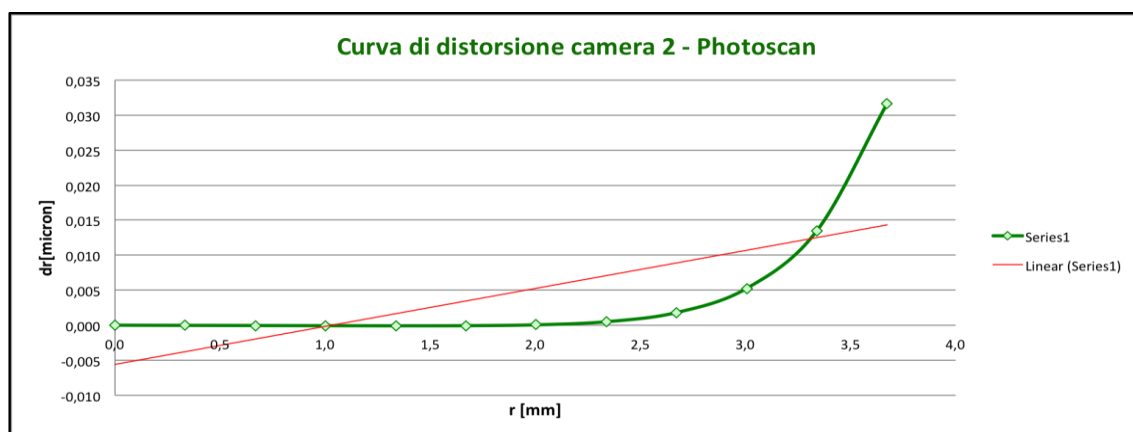
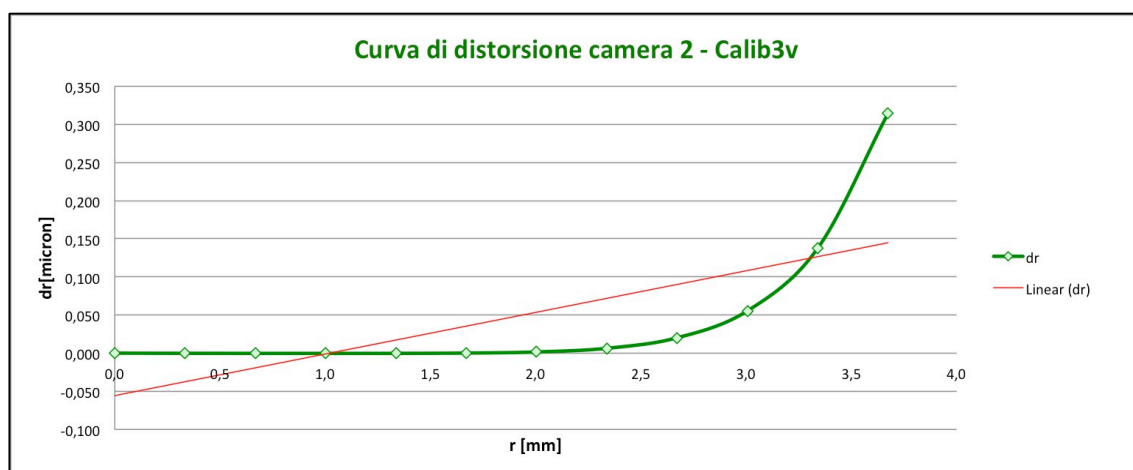


Figura 20 - Curve di distorsione camera 2

Output	Camera 3	
	Calib3v	Photoscan
f [px]	2027,5283	1554,6200
c_x [px]	25,7487	-35,5741
c_y [px]	34,3553	7,3385
k1	-0,3402	-0,0561
k2	0,0988	0,0012
k3	-0,0122	-0,0414
p1	0,0059	0,0017
p2	0,0002	0,0007

Tabella 18 - Confronto parametri di calibrazione camera 3

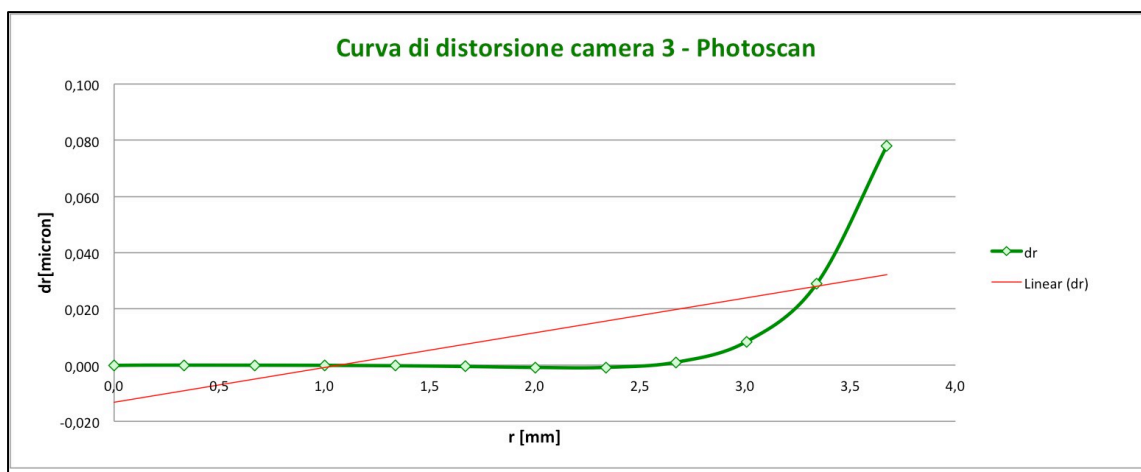
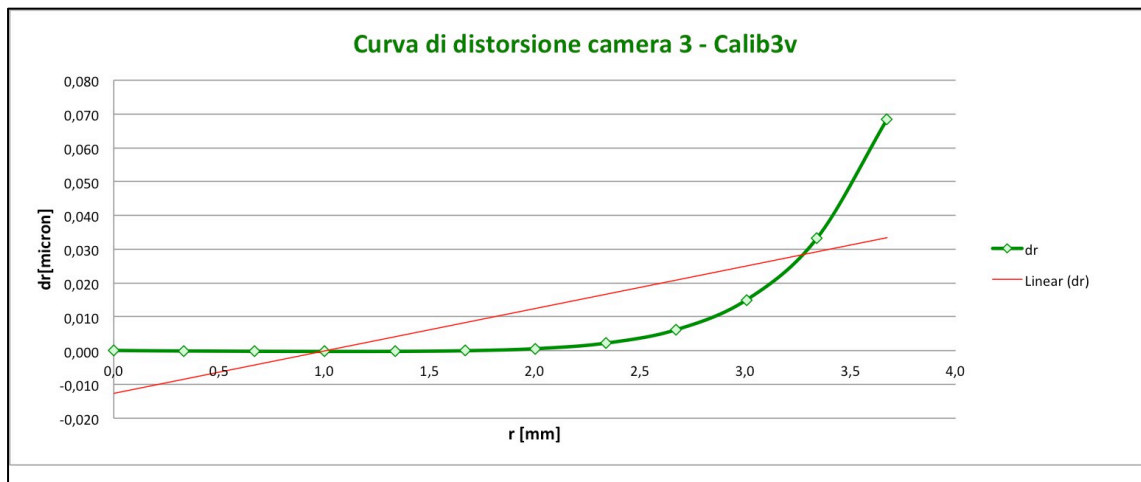


Figura 21 - Curve di distorsione camera 3

Output	Camera 4	
	Calib3v	Photoscan
f [px]	2479,8053	1598,8800
c _x [px]	-5,8816	-13,5851
c _y [px]	69,0461	41,1600
k1	-0,5260	-0,0497
k2	0,2162	-0,0117
k3	-0,0411	-0,0115
p1	0,0278	-0,0002
p2	-0,0050	-0,0015

Tabella 19 - Confronto parametri di calibrazione camera 4

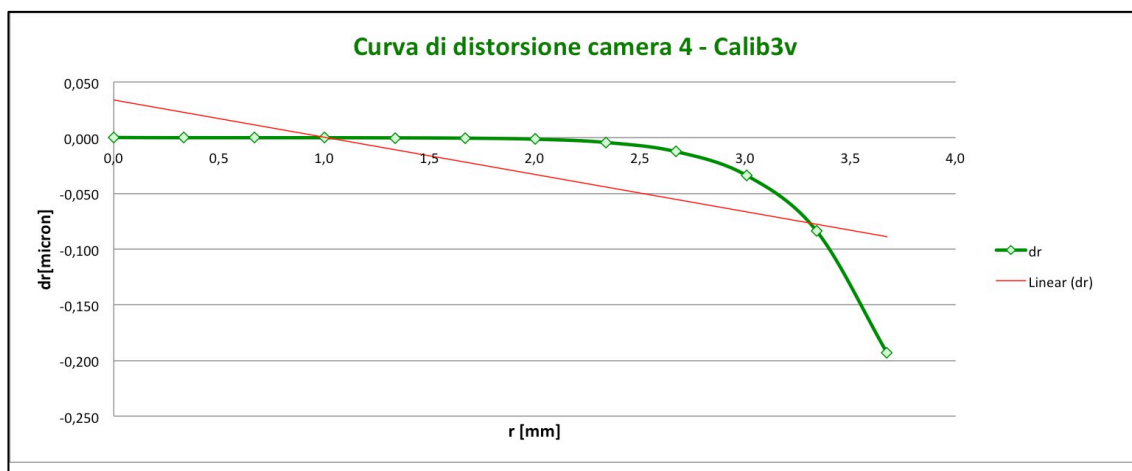
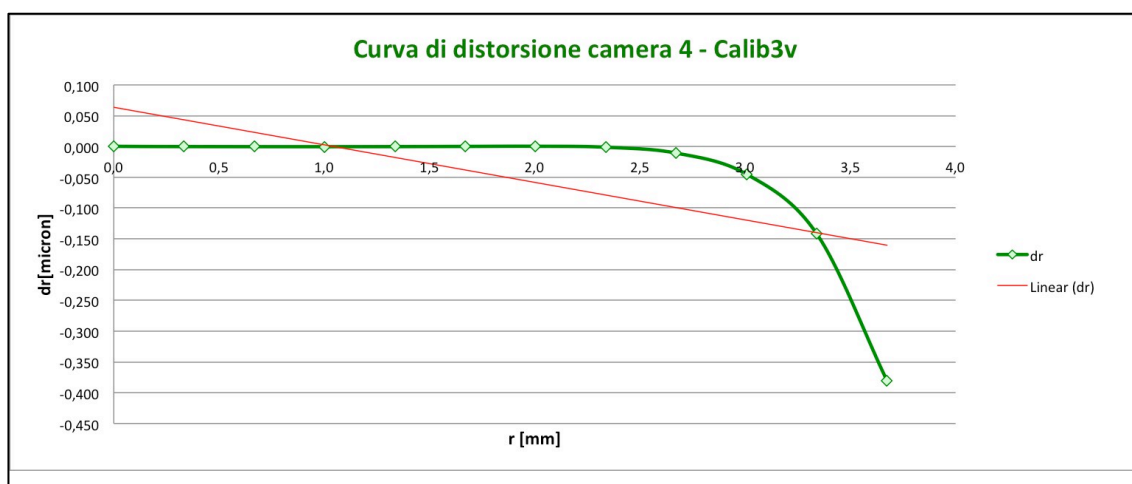


Figura 22 - Curve di distorsione camera 4

Capitolo 5

Poligono di verifica

5.1. Oggetto di rilievo

Il sito oggetto del poligono di verifica, effettuato mediante rilievo statico, è il laboratorio di fotogrammetria e geomatica del dipartimento DIATI del Politecnico di Torino, sede centrale.

Si tratta di un locale *indoor*, costituito da una piccola zona di ingresso, collegata ad un'ampio vano costituito da tre pareti opache e da una parete per la maggior parte vetrata: il vano presenta al suo interno diverse postazioni di lavoro costituite da scrivania, *personal computer*, monitor e seduta, mentre alle pareti sono presenti mappe di rilievo geografico e fotografie. Tenendo conto della complessità degli arredi del locale e dall'alta frequentazione da parte del personale del Politecnico, tirocinanti e tesisti, si è reso necessario effettuare le acquisizioni delle immagini nel minor tempo possibile all'interno della stessa giornata, per evitare che l'ambiente potesse mutare di aspetto e illuminazione naturale.



Figura 23 - Interno del Laboratorio di fotogrammetria e geomatica

5.2. Posizionamento dei marker e rilievo topografico

Per poter georeferire il rilievo del locale, si è reso necessario il posizionamento di alcuni marker costituiti da quattro quadrati, di dimensione 10 cm totali, di colore bianco e nero.

La loro presenza all'interno delle immagini acquisite inoltre, agevola le fasi di allineamento e orientamento, poichè vengono riconosciuti in maniera automatica dai software, proprio grazie alle loro caratteristiche geometriche e cromatiche.

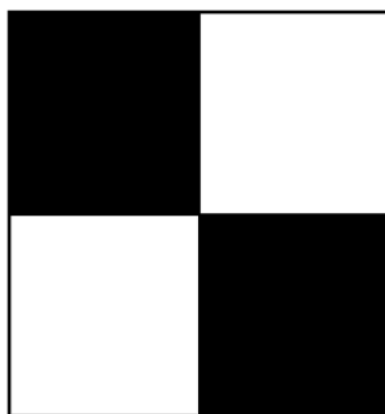


Figura 24 - Marker

I marker sono stati posizionati in modo tale da essere visibili da più postazioni all'interno del locale, la maggior parte sono stati collocati sulle pareti e sul soffitto, mentre alcuni sugli arredi di posizione fissa. I 24 marker corrispondono ai *Control Point*⁵⁰ durante la fase di elaborazione fotogrammetrica.

Si è provveduto poi al rilievo topografico mediante stazione totale, in rilievo diretto. In questo modo è stato possibile misurare angoli e distanze di un certo numero di punti, ossia i marker precedentemente posizionati, di cui si è determinata poi la collocazione spaziale in un sistema di riferimento locale.

⁵⁰ Punti di controllo

5.3. Rilievo LIDAR

I laser scanner sono strumenti in grado di misurare ad altissima velocità la posizione di centinaia di migliaia di punti i quali definiscono la superficie degli oggetti circostanti, restituendo un insieme di punti molto denso, detto “nuvola di punti”. La precisione strumentale viene fornita da un certificato di calibrazione, permettendo così all’utente di scegliere lo strumento più adatto alle proprie esigenze.

Ogni punto della nuvola viene identificato tramite la propria collocazione spaziale, con le coordinate x,y,z, calcolate rispetto ad un punto di riferimento che coincide con il centro dello strumento stesso.

Una volta posizionato il laser scanner su un treppiede opportunamente regolato in posizione perpendicolare al suolo, è necessario impostare alcuni parametri dello strumento: la velocità e il passo delle rotazioni, determinano la risoluzione della scansione, cioè la densità della griglia di punti rilevati a una certa distanza, e la qualità del dato acquisito.

Durante l’acquisizione lo strumento archivia, per ciascun punto rilevato, la distanza calcolata e gli angoli orizzontale e verticale in base alla posizione del corpo e dello specchio. Oltre a queste informazioni, viene acquisito anche il valore di riflettanza⁵¹ della superficie colpita dal laser che sarà tanto più alto quanto la superficie tenderà al colore bianco.

Qualora lo strumento fosse provvisto di una fotocamera digitale integrata, sarebbe possibile mosaicare le immagini acquisite per conferire delle informazioni sul colore dei punti rilevati.

Quando si avvia la procedura di scansione, viene emesso un raggio laser che, colpendo pareti, soffitto e oggetti, genera così una nuvola di punti; questa

⁵¹ La riflettanza misura, in ottica, la capacità di riflettere parte della luce incidente su una data superficie o materiale. Essendo quindi il rapporto tra intensità del flusso radiante riflesso e intensità del flusso radiante incidente, è una grandezza adimensionale.

viene poi georiferita tramite la presegnalazione di alcuni marker, la cui posizione è stata misurata tramite stazione totale.

5.4. Rilievo fotografico

Il rilievo fotografico è stato eseguito in maniera statica, da diverse postazioni all'interno del locale e a diverse altezze, per poter catturare tramite le immagini la maggiore superficie possibile da più angolazioni.

Le immagini sono state acquisite tramite la camera iSTAR 360 di NCTech, presentata al Capitolo 2, posizionata talvolta su un treppiede, talvolta su superfici orizzontali presenti all'interno del laboratorio, come scrivanie o pavimento.

Successivamente la camera è stata collegata a un *personal computer* attraverso cui le quattro immagini piane relative alle singole camere *fisheye* sono state processate con il software *open source* Immersive Studio di NCTech, restituendo le corrispondenti immagini sferiche, trasformando file in formato .NCTRI, in .JPEG.

Grazie all'utilizzo dell'ottica fisheye, gli intervalli di acquisizione delle foto, consentono di avere tra uno scatto e l'altro una buona zona di sovrapposizione. Da ogni set di scatti si ricava un panorama equirettangolare di circa 6 Megapixel (5656×2828 pixel).

5.5. Elaborazione dei dati

L'elaborazione fotogrammetrica delle immagini digitali acquisite è stata effettuata mediante il *software* Photoscan di Agisoft, che genera dati spaziali tridimensionali, per applicazioni GIS, nella documentazione del patrimonio culturale e nella produzione di effetti visivi, nonché nelle misurazioni indirette di oggetti di varie scale.

Il software può essere utilizzato per la generazione automatica di nuvole dense di punti, modelli poligonali strutturati, ortomosaici georeferenziati e DSM / DTM da immagini fisse.

Si è poi utilizzato il *software* CloudCompare per comparare la nuvola di punti ottenuta con quella ricavata dalla scansione laser, impostandola come nuvola di riferimento, in quanto più precisa e più densa di punti.

Il software opera un allineamento preventivo tramite algoritmo ICP⁵² e successivamente effettua il calcolo delle distanze confrontando la distribuzione di riferimento con quella di comparazione e stima della densità del numero di punti vicini.

5.5.1. Agisoft Photoscan

Photoscan è un *software* commerciale di *image processing* con l'obiettivo di creare modelli tridimensionali di un'area attraverso algoritmi di *Computer Vision*. All'interno del programma possono essere inserite immagini riguardanti un'acquisizione terrestre o un volo fotogrammetrico. La procedura per ottenere un modello 3D è divisa in 4 fasi principali:

- allineamento delle immagini: il *software* individua in modo automatico i punti omologhi, rileva la posizione di ogni immagine e affina i parametri di calibrazione, restituendo una nuvola di punti sparsa;
- costruzione di nuvola di punti densa;
- costruzione della mesh poligonale 3D;
- dopo la costruzione della superficie è possibile effettuare operazioni di *texturing*, creare ortofoto e DEM.

⁵² *Iterative Closest Point*

5.5.1.1. Inserimento delle immagini

Le immagini sferiche ottenute dalle precedenti elaborazioni sono state inserite all'interno del programma Agisoft Photoscan, creando una singola sessione o chunk di 28 panorami, con il comando “*Add Photos*”.

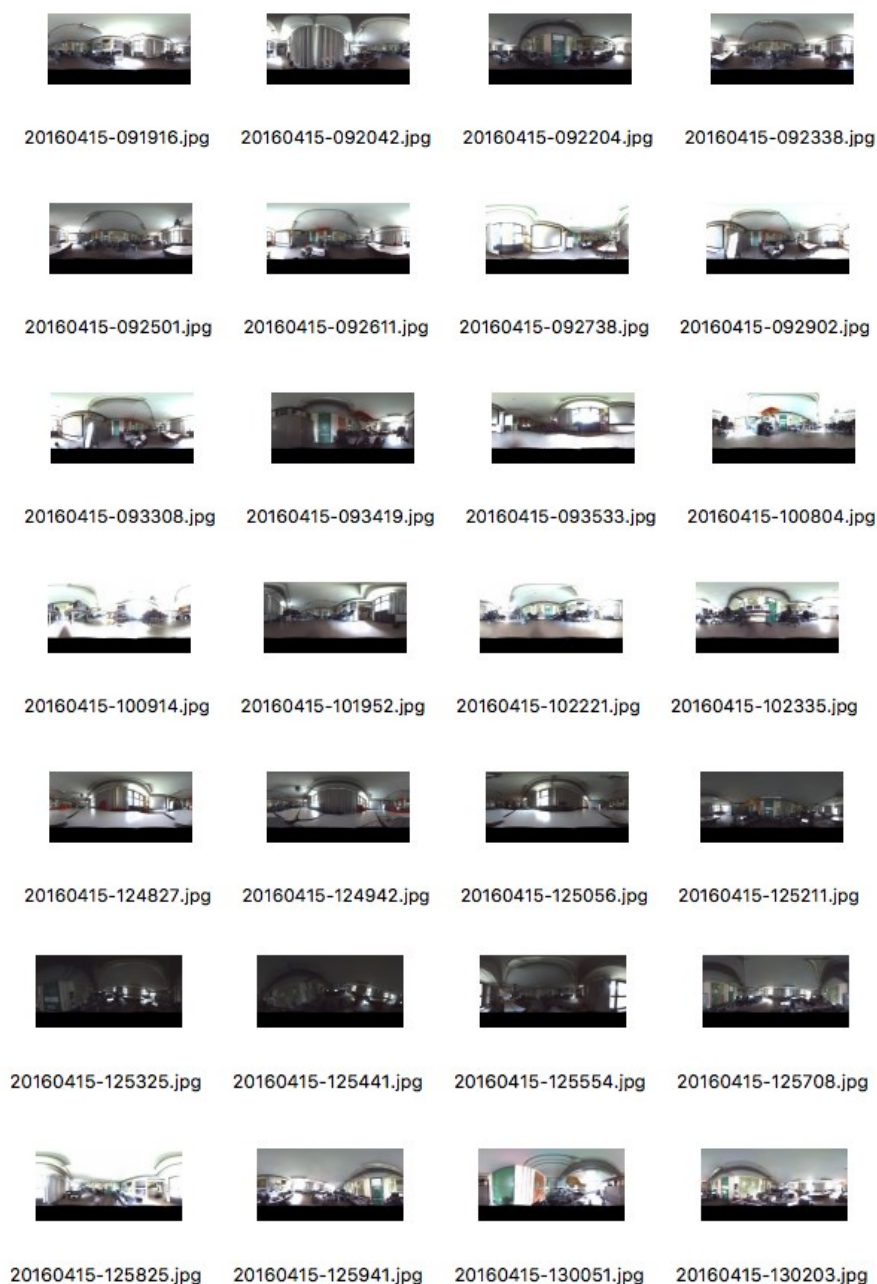


Figura 25 - Immagini sferiche importate

In questa fase è necessario dichiarare il tipo di camera nelle impostazioni di calibrazione “*Camera Calibration*”. Attraverso la lettura dell’ EXIF, contenuto in ogni foto, vengono riconosciuti, in maniera automatica, il formato di *file* immagine con l’aggiunta di specifiche etichette di metadati, come mostrato nella *Figura 26*, contenenti:

- risoluzione delle immagini;
- modello della camera di acquisizione;
- lunghezza focale;
- data ed ora di acquisizione di ogni singola immagine.

Altri contenuti dell’EXIF sono inoltre:

- Spazio e profilo relativi al colore;
- Rapporto focale;
- Programma di esposizione;
- Tempo di esposizione;
- una miniatura per visualizzare un’anteprima sul *display* LCD della fotocamera;
- descrizioni ed informazioni di *copyright*.

Camera Calibration

iSTAR (2.67 mm)
28 images, 5656x2828 pix

Camera type: Spherical

Pixel size (mm): x

Focal length (mm):

Initial Adjusted **GPS/INS Offset**

	Initial	Adjusted	Accuracy
X (m):	0		
Y (m):	0		
Z (m):	0		
Yaw (deg):	0		
Pitch (deg):	0		
Roll (deg):	0		

☒ Fix GPS/INS offset

Camera label ▲	Resolution	Camera model	Focal length	Date & time
2016041...	5656x2828	iSTAR	2.67	2016:04:15 11:19:18
2016041...	5656x2828	iSTAR	2.67	2016:04:15 11:20:43
2016041...	5656x2828	iSTAR	2.67	2016:04:15 11:22:05
2016041...	5656x2828	iSTAR	2.67	2016:04:15 11:23:39
2016041...	5656x2828	iSTAR	2.67	2016:04:15 11:25:02
2016041...	5656x2828	iSTAR	2.67	2016:04:15 11:26:12
2016041...	5656x2828	iSTAR	2.67	2016:04:15 11:27:39
2016041...	5656x2828	iSTAR	2.67	2016:04:15 11:29:03

Cancel OK

Figura 26 - Camera Calibration

La lunghezza focale che compare all'interno dell' EXIF, si riferisce all'immagine sferica, effettuando una sorta di media tra le lunghezze focali delle quattro camere fisheye: questo dato, fornito dal produttore, non è modificabile all'interno del programma, nè ricalcolabile attraverso procedure iterative, come è stato fatto in fase di calcolo dei parametri di calibrazione della camera per quanto riguarda le immagini piane.

5.5.1.2. Allineamento delle immagini

Ora è possibile procedere all'allineamento delle immagini, premendo su “*Align Photos*” da *Workflow*, da cui si può decidere la qualità dell'allineamento.

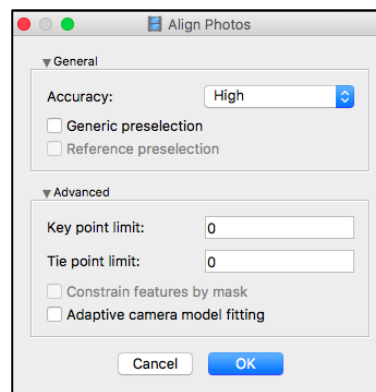


Figura 27 - Impostazioni di allineamento delle immagini

In questa fase il *software* identifica i punti omologhi in ogni fotogramma e li associa fra loro, allineando le foto e posizionandoli nella scena, ottimizzando i parametri di calibrazione della camera, creando una prima *sparse point cloud* ovvero nuvola di punti sparsa.

Le immagini sono risultate tutte allineate, ed è stata stimata una posizione delle camere nello spazio, in un sistema di riferimento locale creato da Photoscan.

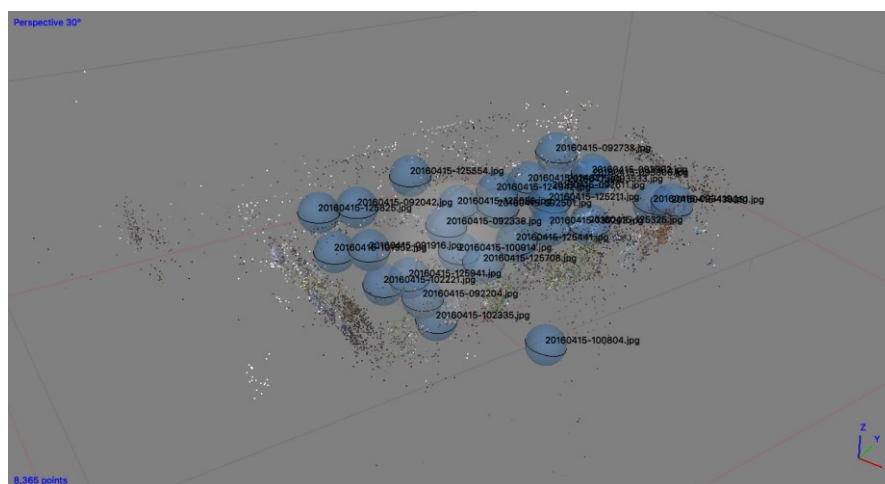


Figura 28 - Posizione delle camere dopo il primo allineamento delle immagini

5.5.1.3. Posizionamento dei *marker*

Il passo successivo consiste nell'importare un file .csv o .txt contenente le coordinate dei punti di controllo, acquisiti nel rilievo topografico mediante stazione totale, e associare ad ogni *marker* la sua collocazione all'interno di ogni immagine (*Figura 29*). Una volta posizionati i primi punti su almeno due o tre immagini differenti, se si effettua un'ottimizzazione della camera, il software individua quale potrebbe essere la posizione dei punti non ancora collocati, indicandoli con una fiammella grigia. I punti verificati e inseriti manualmente dall'utente sono contrassegnati con un simbolo a forma di bandierina verde.



Figura 29 - Posizionamento dei marker all'interno di un'immagine

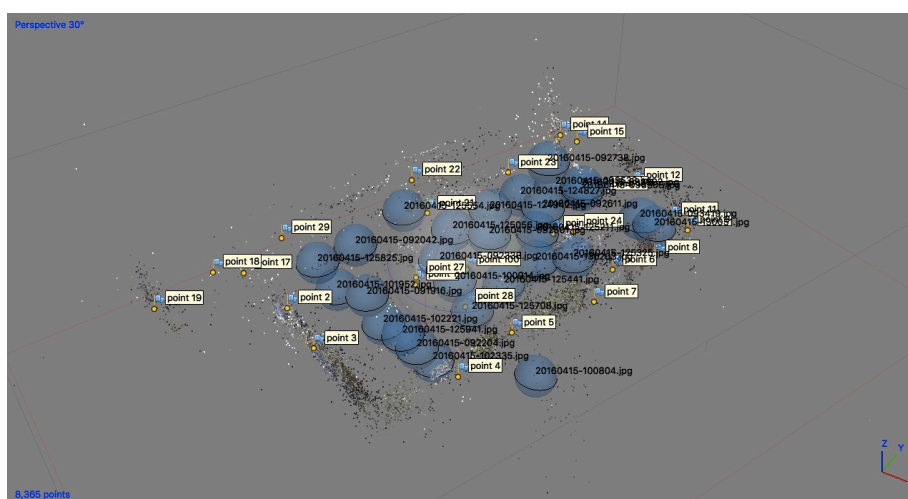


Figura 30 - Posizione delle camere dopo l'inserimento dei marker all'interno delle immagini

Punto	X [m]	Y [m]	Z [m]
1	0,157	-10,066	1,191
2	-2,804	-12,206	0,651
3	-1,608	-12,7	0,084
4	2,393	-11,586	0,071
6	4,599	-6,256	0,679
7	4,346	-6,783	-0,352
8	5,319	-4,39	-0,034
9	5,866	-3,161	0,396
10	2,596	-6,205	1,187
11	5,05	-2,195	-0,256
12	3,458	-1,56	0,101
13	2,208	-1,169	-1,062
14	0	0	0
15	1,31	-1,654	1,197
17	-5,324	-11,213	0,014
18	-5,117	-12,494	1,217
19	-6,773	-13,537	-0,212
21	-1,168	-7,247	1,188
22	-2,92	-5,344	0,494
23	-1,181	-1,689	-1,024
24	2,19	-3,424	-1,043
27	-1,219	-7,974	-0,984
28	0,703	-8,189	-1,093
29	-4,346	-10,346	1,208

Tabella 20 - Coordinate dei marker inseriti

Dopo aver verificato il corretto allineamento totale (*Figura 30*), il prodotto finale può essere controllato attraverso la finestra “*Ground Control*”, in cui viene restituito l’errore di ogni punto in metri, potendo deselezionare i *marker* che restituiscono gli errori maggiori in modo da perfezionare i risultati. In questo caso l’errore massimo riscontrato è comunque molto piccolo, pertanto si sono tenuti in considerazione tutti i punti inseriti.

Marker	Errore [m]	Errore in X [m]	Errore in Y [m]	Errore in Z [m]
point 1	0,004	0,003	0,003	0
point 2	0,013	0,003	0,012	-0,003
point 3	0,013	0,003	0,012	0,001
point 4	0,003	0,001	0,002	0,002
point 5	0,009	-0,004	0,007	-0,003
point 6	0,008	-0,005	-0,004	-0,005
point 7	0,008	0,003	0,007	-0,001
point 8	0,008	-0,003	-0,006	0,004
point 9	0,02	-0,013	-0,015	0,004
point 10	0,008	0,007	0,003	-0,001
point 11	0,009	0,005	-0,007	0,002
point 12	0,009	0,004	-0,007	0,002
point 13	0,058	-0,052	0,025	0,001
point 14	0,016	0,015	-0,005	0
point 15	0,012	0,01	-0,003	0,005
point 17	0,013	0,012	0,006	0
point 18	0,02	-0,016	-0,011	0
point 19	0,036	-0,028	-0,018	0,016
point 21	0,009	0,008	0,002	-0,003
point 22	0,007	0,001	0,003	-0,007
point 23	0,017	-0,008	0,013	-0,007
point 24	0,006	0,006	-0,002	0
point 27	0,016	0,011	0,011	0,001
point 28	0,044	0,028	-0,033	0,003
point 29	0,012	0,004	-0,001	-0,012
Totale RMSE	0,019	0,015	0,011	0,005
Max.	0,058	0,052	0,033	0,016
Min.	0,003	0,001	0,001	0,000
Media	0,015	0,000	0,000	0,000
SQM ⁵³	0,013	0,015	0,012	0,005

Tabella 21 - Errori e SQM

Il valore totale di RMSE⁵⁴ ottenuto è di **0,019 m** (Tabella 21).

⁵³ Lo scarto quadratico medio è uno dei modi per esprimere la dispersione dei dati intorno ad un indice di posizione, che può essere la media aritmetica o una sua stima

⁵⁴ Radice dell'Errore Quadratico Medio, in inglese Root Mean Square Error, corrisponde alla **varianza interna** data dal rapporto fra la devianza interna e la numerosità totale

5.5.1.4. Generazione della nuvola densa di punti

Ora è possibile generare una nuvola densa di punti (*Workflow* → *build dense cloud...*).

I parametri da impostare sono:

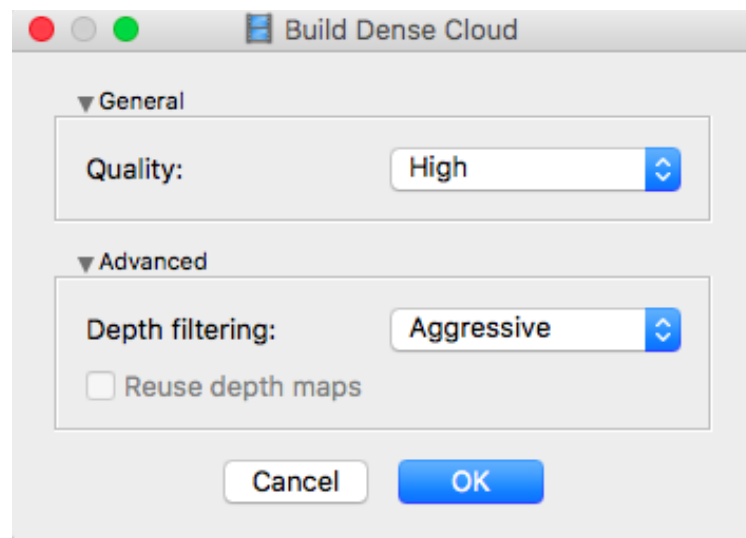


Figura 31 - Impostazioni per la generazione della nuvola densa di punti

- *quality*, specifica la qualità della ricostruzione desiderata. Le impostazioni di qualità più alte, restituiscono una geometria più dettagliata, ma richiedono un tempo di elaborazione più alto. L'interpretazione dei parametri di qualità in questa sezione è simile alle impostazioni date nell'allineamento delle immagini. L'unica differenza è che nel caso di impostazione *Ultra High* le immagini vengono processate nel formato originale, mentre ogni qualità successiva implica una riduzione di scala 4 (2 volte per ogni lato).
- *depth filtering*, indica la profondità della mappa di calcolo di PhotoScan,

ossia la metodologia per affrontare gli *outlier*⁵⁵ fra i punti. Se ci sono molti piccoli dettagli riconoscibili all'interno della scena si utilizza l'algoritmo di filtraggio **Mild**, mentre si utilizza **Aggressive** se si vogliono eliminare la maggior parte degli *outlier*. L'opzione **Moderate** risulta una via di mezzo tra i precedenti algoritmi.

In questo caso i parametri utilizzati sono:

- Quality → **High**;
- Dept filtering → **Aggressive**.

È possibile che al termine dell'elaborazione la nuvola presenti dei punti sparsi rispetto all'oggetto, ed è pertanto necessario eliminarli.

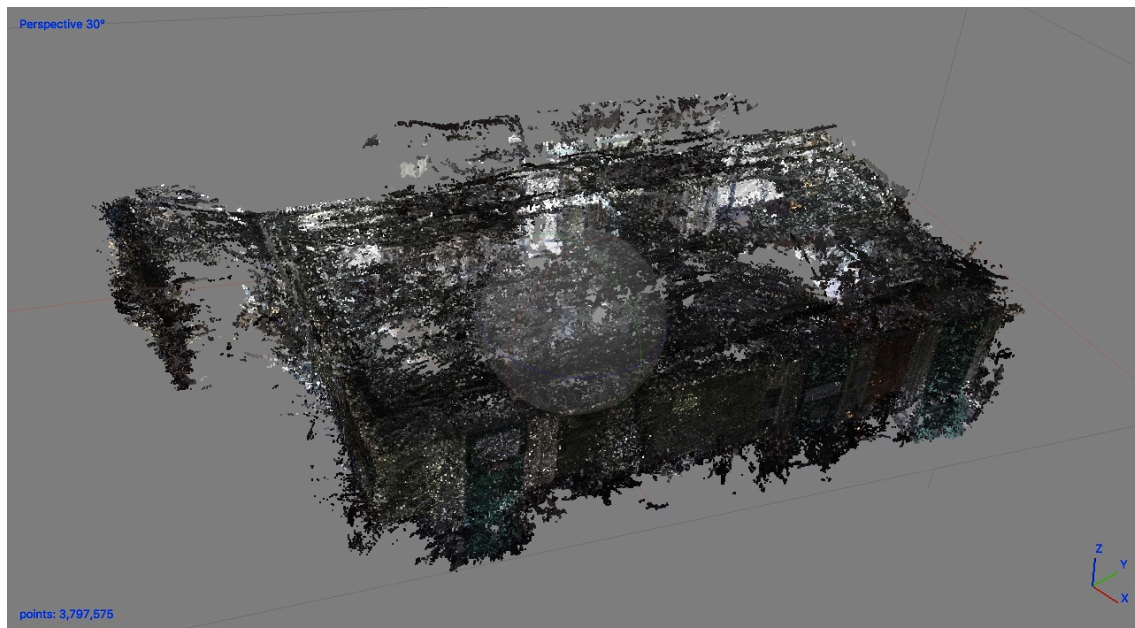


Figura 32 - Nuvola densa di punti generata ad alta qualità

⁵⁵ Punti di anomalia

5.6. Comparazione delle nuvole dense di punti

CloudCompare è un *software* progettato per eseguire il confronto diretto tra nuvole di punti dense tridimensionali, basato sulla tecnica “*Structure Octree*”. Si tratta di un *software* Open Source in grado di aprire e salvare *file* in diversi formati, come BIN, ASCII, PLY, OBJ, VTK, LAS, E57, OUT, PCD, SOI, PN, PV, ICM, e permette il salvataggio per le nuvole di punti in BIN, ASCII, PLY, LAS, E57, VTK, PN, PV, PCD mentre per le *mesh* in OBJ, PLY, VTK, MAYA (ASCII). La “*Structure Octree*” è una struttura in cui ogni nodo è collegato ad altri otto elementi.

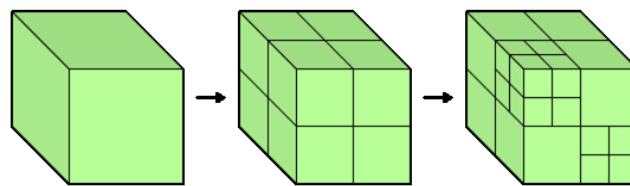


Figura 33 - Structure Octree

CloudCompare considera quasi tutte le entità 3D come nuvole di punti, in grado di confrontarle direttamente senza la necessità di generare una *mesh*, in quanto le nubi sono generalmente molto dense e si hanno già tutte le informazioni necessarie.

CloudCompare è in grado di gestire più campi scalari⁵⁶ sulla stessa nuvola e applicare semplici operazioni aritmetiche tra due campi scalari di una stessa nube.

Qualora i due *file* che si vogliono confrontare siano rappresentati in scale differenti, è possibile misurare un'entità presente e visibile in entrambe le nuvole

⁵⁶ insieme di valori associati ad un punto, che ne descrivono le diverse caratteristiche, quali colori, filtri o posizione.

e misurarla, andando a identificarne la differenza in scala, apportandola successivamente a entrambe le nubi.

Successivamente è possibile di procedere con l'allineamento e la registrazione dei soggetti, nel caso in cui non si abbiano punti di coordinate note, mediante operazioni iterative, quali traslazioni e rotazioni, in modo tale da sovrapporre le nuvole. Esistono due metodi per allineare due nuvole di punti:

- metodo manuale, che consiste nello spostare e ruotare manualmente le entità, ottenendo una sovrapposizione grossolana, oppure centrarle nel loro rispettivo baricentro senza ruotarle. Inoltre è possibile individuare coppie di punti tra le nuvole e registrarli.
- allineamento automatico, più preciso, utilizza un algoritmo ICP⁵⁷ che ha lo scopo di sovrapporre mediante rototraslazioni iterative, volte a minimizzare la distanza tra la nuvola sorgente e quella di riferimento. Tale processo si interrompe nel momento in cui la variazione di posizionamento tra due iterazioni successive raggiunge un valore minimo di soglia.

Per quanto riguarda il calcolo delle distanze si possono utilizzare due metodi:

- *cloud-cloud distances*⁵⁸, per ogni punto della nube, cerca il punto più vicino nella nuvola di riferimento e calcola la distanza euclidea. Per poter eseguire questa funzione è opportuno che la nuvola di riferimento sia ad alta densità in modo da poter individuare correttamente i punti esaminati e assicurarsi che la nuvola di riferimento sia più ampia della nuvola da confrontare;
- *cloud-mesh distances*⁵⁹, ogni punto della nuvola viene confrontato con il triangolo più vicino della maglia di riferimento.

⁵⁷ Iterative Closest Point

⁵⁸ Distanza tra due nuvole di punti

⁵⁹ Distanza tra una nuvola di punti e una maglia

Al termine di tale calcolo, è possibile visualizzare in maniera grafica i risultati ottenuti, tramite grafici e scale di colori che indicano la dispersion dei punti della nuvola confrontata con quella di riferimento.

5.6.1. Caso studio

In questa fase è stata effettuata la comparazione tra la nuvola densa raffigurante il laboratorio ottenuta tramite scansione laser (*labcol*), impostata come riferimento e nuvola densa prodotta tramite l'elaborazione con Photoscan precedentemente descritta (*vertices*). La comparazione mira ad individuare la distanza tra i punti delle due nuvole e la densità di ciascuna.

Entrambe le nuvole sono georiferite, in quanto sono state inserite in precedenza le coordinate dei marker, non risulta pertanto necessario sovrapporle rototraslandole.

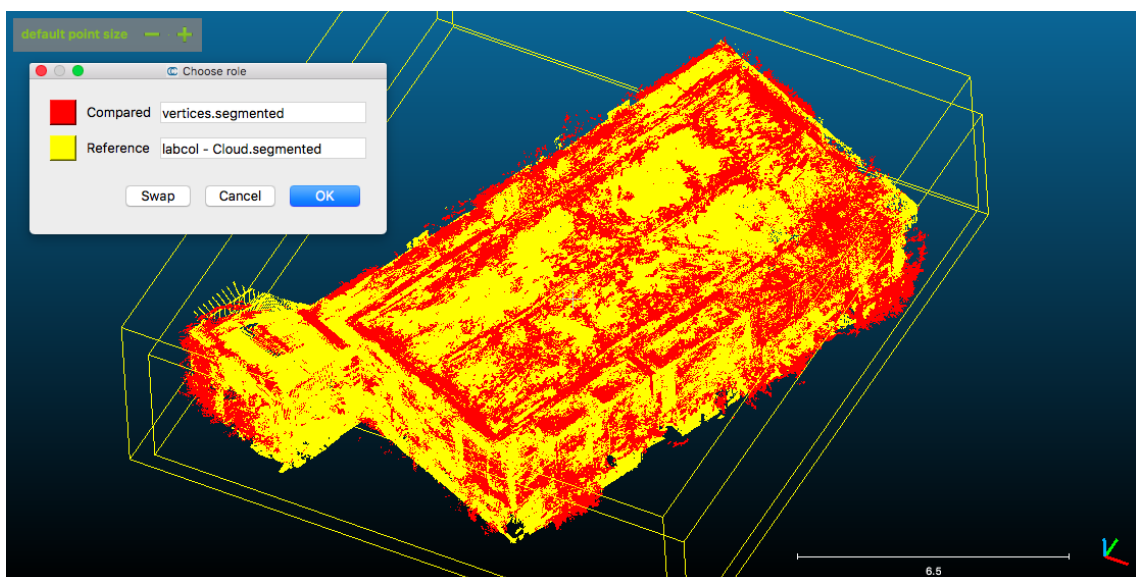


Figura 34 - Nuvola di riferimento e comparazione

A questo punto è necessario indicare al programma quali sono le impostazioni da seguire per effettuare il calcolo delle distanze:

- *Octree Level*, ovvero il livello di suddivisione delle *octree* in cui verrà eseguita la computazione della distanza → **Auto**
- *Max. distance*, cioè la distanza massima usata per limitare la ricerca al di sotto di un valore ragionevole per ottimizzare le tempistiche di calcolo del programma, e a tutti i punti che superano questa distanza viene attribuito il valore di soglia;
- *Local model*, modelli locali → **None**.

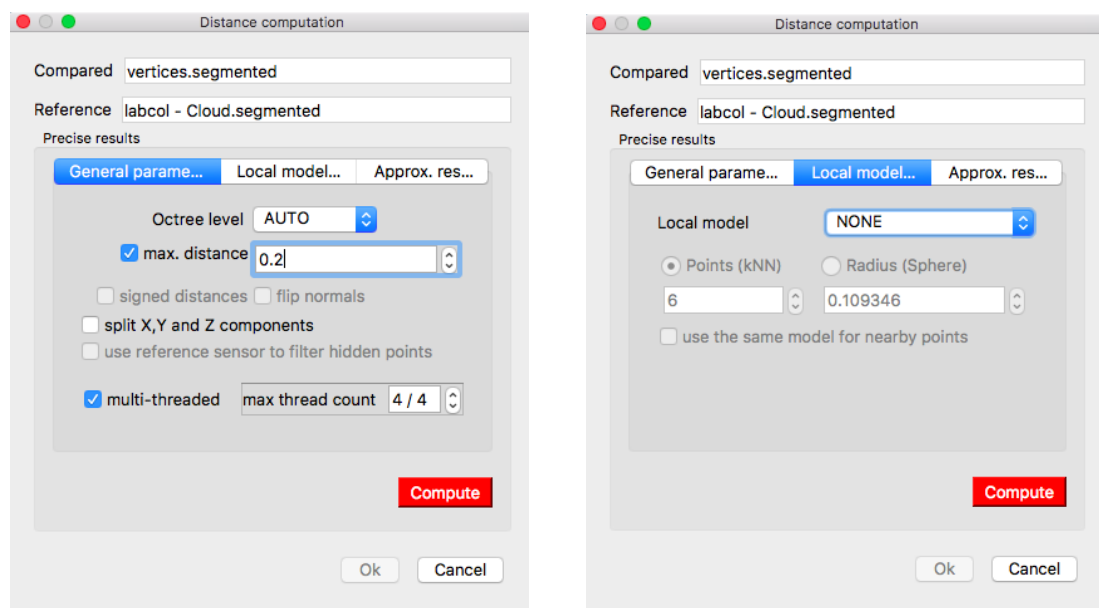


Figura35 - Impostazioni per il calcolo delle distanze

Avviata la procedura, la nuvola che è stata comparata presenta una colorazione in scala, che mostra lo scostamento tra le due entità messe a confronto.

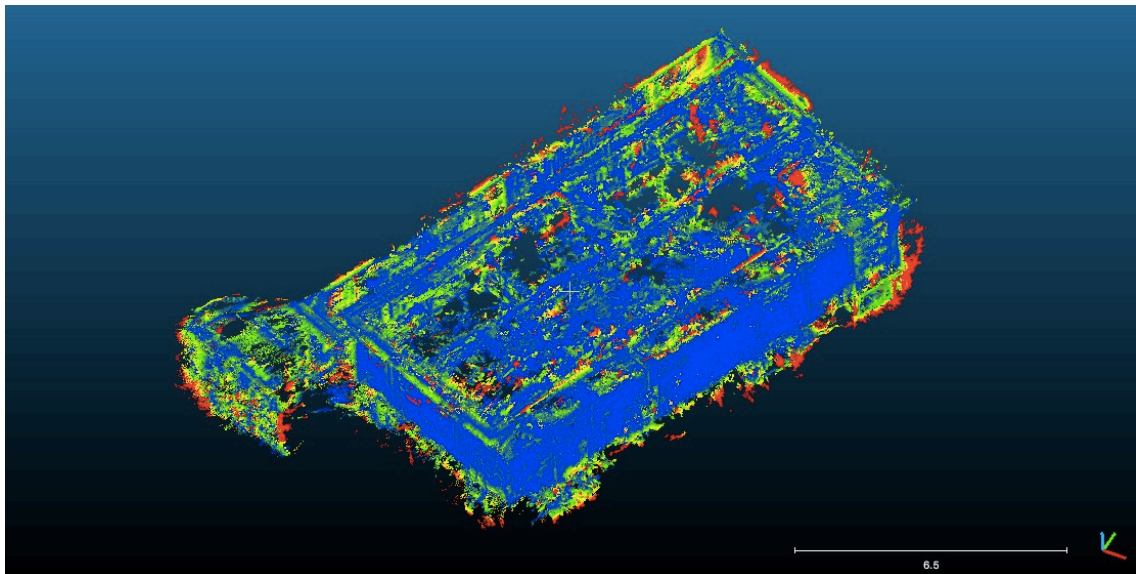


Figura 36 - Distanza dei punti dalla nuvola di riferimento

L'istogramma che ne consegue, mostra come i 3734289 punti iniziali abbiano assunto colorazioni differenti in base alla loro distanza dalla nuvola di riferimento (*Figura 32*).

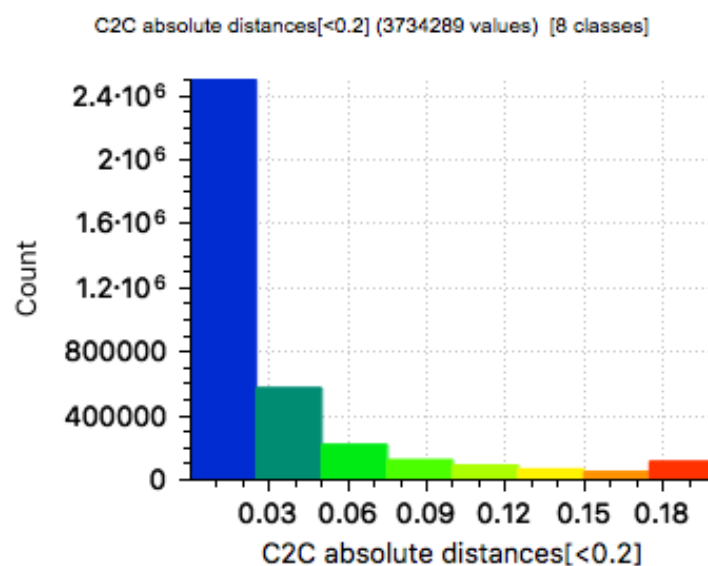


Figura 37 - Istogramma di comparazione

I punti sono stati inoltre ripartiti in 8 classi di scostamento, che vanno da 0 m a 0,2 m, così definite:

Class	Value	Class start	Class end
1	2500541	0	0,025
2	573047	0,025	0,05
3	218576	0,05	0,075
4	122758	0,075	0,1
5	90147	0,1	0,125
6	66774	0,125	0,15
7	49177	0,15	0,175
8	113269	0,175	0,2

Tabella 22 - Classi di scostamento

La maggioranza dei punti rientrano all'interno della prima classe, e ciò significa che la sovrapposizione tra le due entità è risultata molto positiva, mostrando uno scostamento massimo di 0,25 m.

I punti che appartengono all'ottava classe, a cui appartengono i punti più distanti dalla nuvola di riferimento, invece si trovano tutti sull'esterno della geometria.

5.7. Immagini piane undistorted

5.7.1. Elaborazione immagini tramite Photoscan

Un procedimento analogo è stato effettuato per le immagini undistorted, ossia prive di distorsioni. Tali immagini sono state ricavate a partire dal passaggio precedente: per ogni camera, dopo aver calcolato i parametri di calibrazione, sono state generate con l'ausilio di Photoscan delle immagini in cui sono state eliminate le distorsioni, conoscendone le entità.

Per l'allineamento delle immagini sono state utilizzate le seguenti impostazioni:

- Accuracy → High
- Preselection → Generic
- Key point limit → 0
- Tie point limit → 0

Si riportano i fotogrammi presi in esame per la camera 4 dello strumento iSTAR:

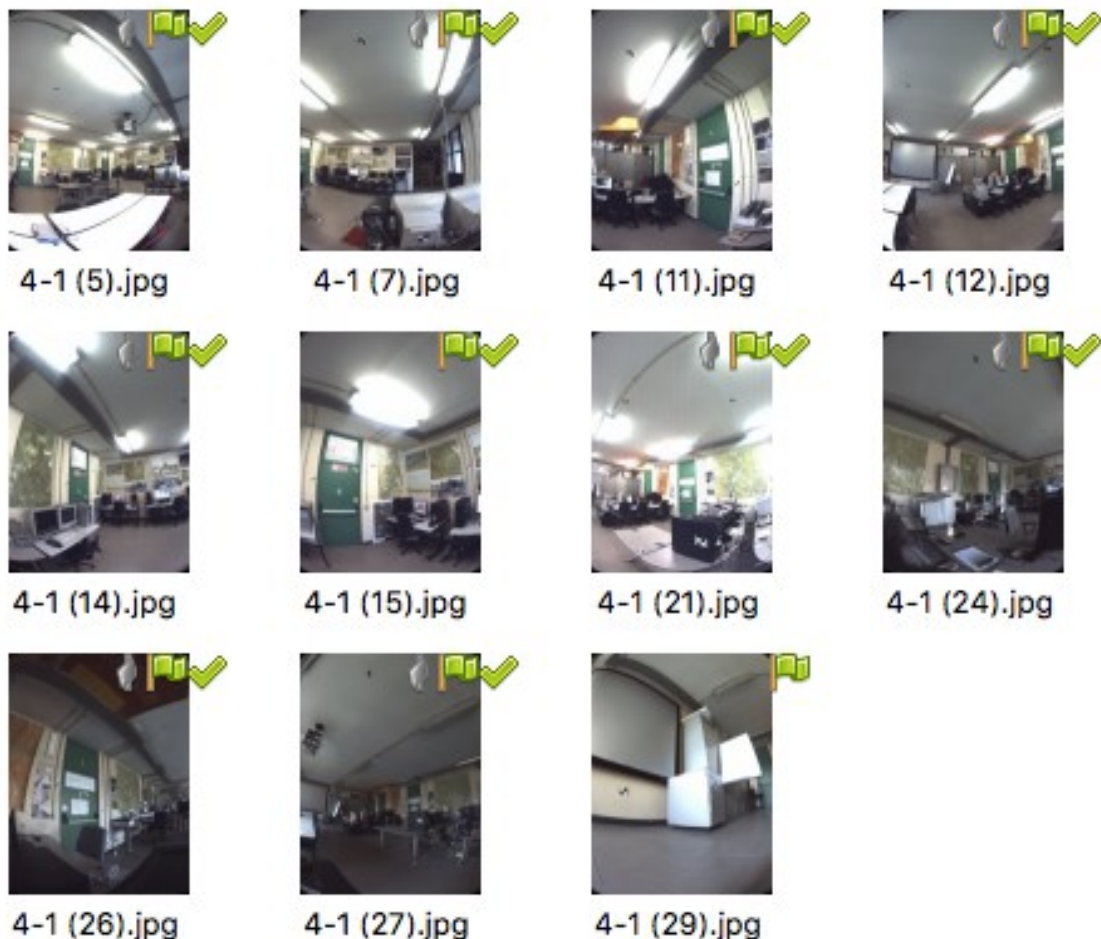


Figura 38 - Immagini piane importate

Dopo la prima fase di allineamento delle immagini sono stati inseriti i *marker* utilizzati per l'elaborazione delle immagini sferiche, è stata poi effettuata un'ottimizzazione delle posizioni delle camere.

Dopo aver verificato il corretto allineamento totale, il prodotto finale può essere controllato attraverso la finestra "*Ground Control*", in cui viene restituito l'errore di ogni punto in metri, potendo deselectare i *marker* che restituiscono gli errori maggiori in modo da perfezionare i risultati. In questo caso l'errore massimo riscontrato è comunque molto piccolo, pertanto si sono tenuti in

considerazione tutti i punti inseriti, a eccezione del punto 13.

Marker	Errore [m]	Errore in X [m]	Errore in Y [m]	Errore in Z [m]
point 2	0,004	0,004	-0,001	-0,001
point 3	0,005	0,003	0,001	0,004
point 4	0,004	-0,002	0,002	0,002
point 5	0,004	-0,003	-0,001	-0,002
point 6	0,004	-0,004	-0,001	-0,002
point 7	0,005	-0,005	-0,001	-0,002
point 8	0,005	-0,001	-0,005	0,000
point 9	0,009	0,007	0,004	0,005
point 10	0,006	0,001	-0,003	-0,005
point 11	0,006	0,006	0,001	0,001
point 12	0,003	-0,002	0,002	0,001
point 13	0,133	-0,034	-0,128	0,001
point 14	0,015	-0,014	0,006	-0,002
point 15	0,004	-0,003	0,002	0,000
Totale RMSE	0,006	0,005	0,003	0,003
Max.	0,015	0,014	0,006	0,005
Min.	0,003	0,001	0,001	0,000
Media	0,006	-0,001	0,001	0,000
SQM	0,003	0,005	0,003	0,003

Tabella 23 - Errori

Il valore di RMSE ottenuto è di **0,006 m** (*Tabella 23*).

Ciò dimostra come l'eliminazione delle distorsioni dalle immagini possa agevolare la riduzione di gran parte dell'errore.

5.7.2. Comparazione nuvola densa con quella di riferimento

Analogamente al procedimento descritto per quanto riguarda il caso studio, si è provveduto alla comparazione della nuvola densa ottenuta dall'elaborazione delle immagini piane epurate dalle distorsioni radiali e tangenziali con quella di

riferimento LiDAR.

Anche in questo caso entrambe le nuvole sono georiferite, in quanto sono state inserite in precedenza le coordinate dei marker, non risulta pertanto necessario sovrapporle rototraslandole.

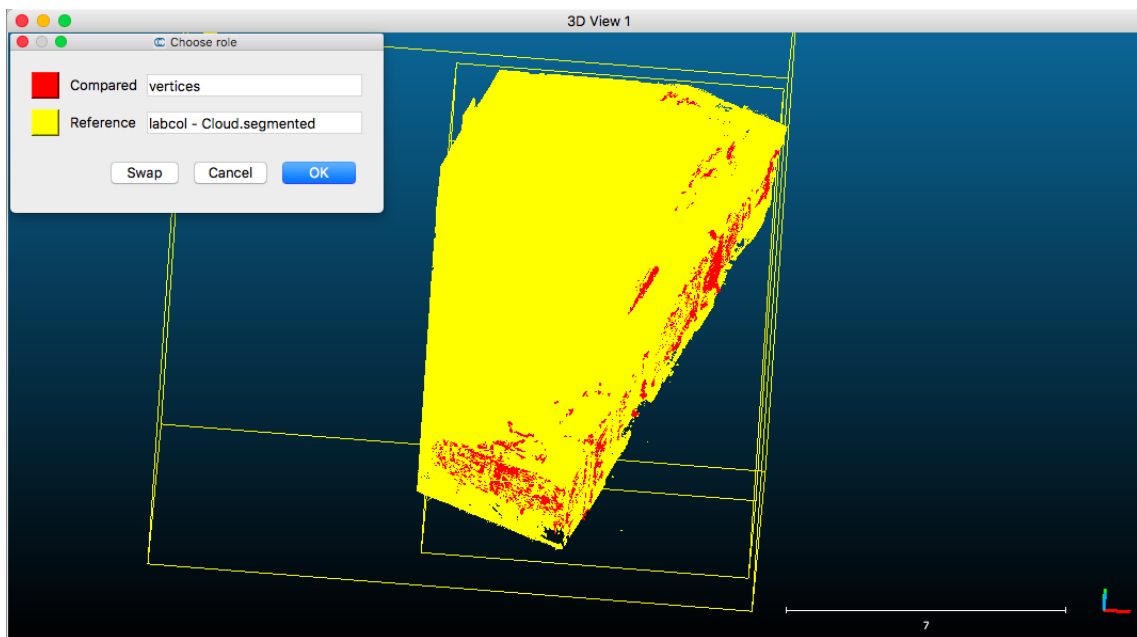


Figura 39 - Nuvola di riferimento e comparazione

Sono state usate le seguenti impostazioni:

- *Octree Level* → **Auto**
- *Max. distance* → **0,2 m**
- *Local model* → **None.**

Avviata la procedura, la nuvola che è stata comparata presenta una colorazione in scala, che mostra lo scostamento tra le due entità messe a confronto.

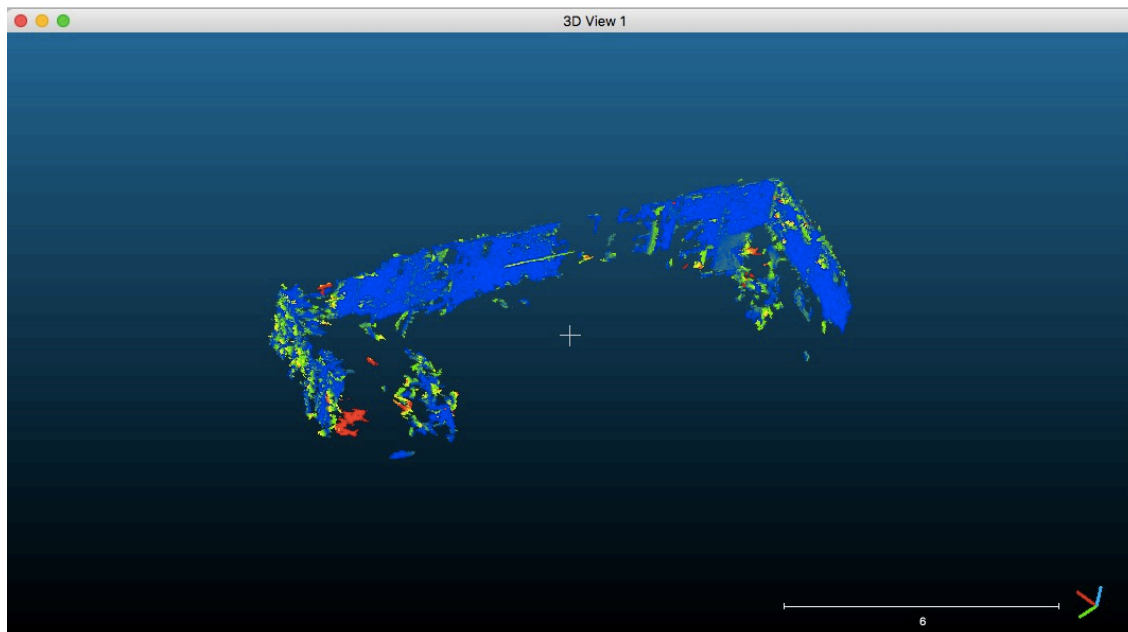


Figura 40 - Distanza dei punti dalla nuvola di riferimento

L'isotogramma che ne consegue, mostra come i 764702 punti iniziali abbiano assunto colorazioni differenti in base alla loro distanza dalla nuvola di riferimento (*Figura 41*).

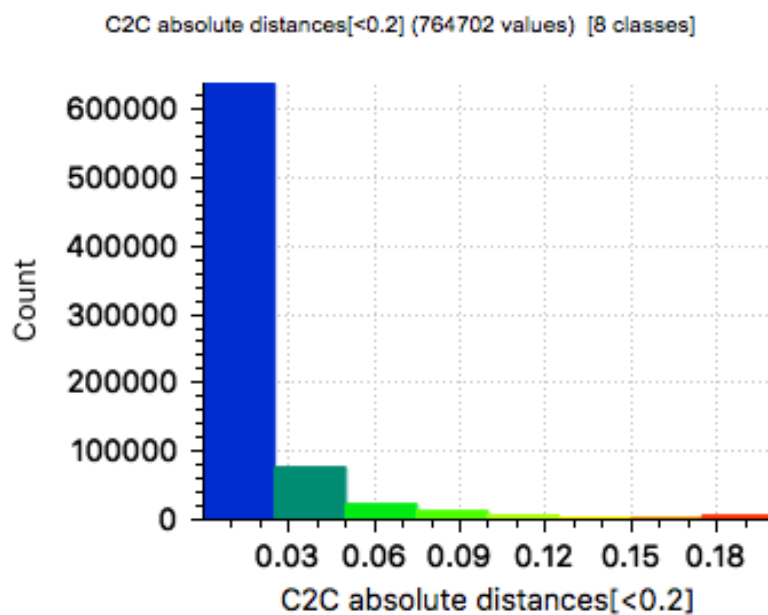


Figura 41 - Istogramma di comparazione

I punti sono stati inoltre ripartiti in 8 classi di scostamento, che vanno da 0 m a 0,2 m, così definite:

Class	Value	Class start	Class end
1	637198	0	0,025
2	76230	0,025	0,05
3	22245	0,05	0,075
4	12099	0,075	0,1
5	5693	0,1	0,125
6	3320	0,125	0,15
7	2309	0,15	0,175
8	5608	0,175	0,2

Tabella 24 - Classi di scostamento

Capitolo 6

Caso reale

6.1. Oggetto del rilievo

L'oggetto del rilievo, effettuato con approccio dinamico, è un ambiente *indoor*, uno dei corridoi della sede centrale del Politecnico di Torino, in corrispondenza delle aule I, che si trova ad un livello inferiore rispetto al piano strada.

Il corridoio presenta una conformazione ad anello, con quattro zone atrio, due delle quali prevalentemente finestate, mentre per quanto riguarda le zone rettilinee sono presenti dei lucernai a soffitto. Gli arredi sono costituiti da porte, estintori e bacheche avvisi: anche in questo caso, per evitare che gli arredi variassero la propria posizione nel tempo, è stato importante effettuare il rilievo fotografico nel minor tempo possibile, anche se in un momento differente rispetto al rilievo tramite *mobile mapping system* ad alta prestazione.

Data la vasta superficie di rilievo, la grande dimensione dei file delle nuvole di punti e il gran numero di immagini acquisite tramite rilievo fotografico, si è deciso di prendere in considerazione solamente una parte dell'anello, nello specifico l'ala delle aule pari.



Figura 42 - Corridoio aule I

6.2 Rilievo topografico e LiDAR

Il rilievo di riferimento è stato effettuato da esterni durante la presentazione della strumentazione Trimble Timms, che hanno restituito una nuvola di punti molto densa e ricca di informazioni, sia dal punto di vista colorimetrico che geografico.

6.3 Rilievo fotografico

Per effettuare il rilievo fotografico è stato utilizzato lo strumento iSTAR di NcTech, provvedendo alla realizzazione di uno zainetto di fattura artigianale, assemblato con un treppiede, in modo tale da poter posizionare la camera al di sopra del livello della testa dell'operatore, in modo da avere all'interno delle immagini il minor disturbo possibile da parte di elementi estranei all'ambiente da rilevare e da poter essere facilmente collegabile ad un *PC*.



Immagine 43 - Strumento utilizzato

Il rilievo è stato effettuato in due versioni differenti, *half quality* e *full quality*, in modo tale da poter verificare e confrontare le differenze in termini di precisione tra i due rilievi. In entrambi i casi, dato il gran numero di immagini, si è deciso non solo di prendere in considerazione la sola ala delle aule pari del corridoio, ma sono state selezionate solo alcune delle immagini restituite dallo strumento, poichè i fotogrammi immediatamente consecutivi risultavano praticamente identici, specie per la qualità *half*, rallentando la fase di elaborazione.

6.4. Elaborazione dei dati

L'elaborazione fotogrammetrica delle immagini digitali acquisite è stata effettuata mediante il *software* Photoscan di Agisoft.

In una prima elaborazione erano stati inseriti 8 chunk da 40 panorami ciascuno, per un totale di 360 immagini sferiche e si era seguita la procedura adottata in precedenza per l'elaborazione delle immagini catturate in modo statico, ma ci si è resi conto solo al termine dell'elaborazione, ossia in fase di controllo degli errori, che tale procedura non era del tutto corretta.

Si è deciso pertanto di ridurre il numero di immagini e di inserire i *marker* di coordinate note come primo passaggio dell'elaborazione, al fine di garantire un migliore allineamento: gli stessi marker poi, sono stati utili per l'allineamento a due a due dei *chunk*, in quanto presenti nelle prime e nelle ultime immagini di chunk consecutivi.

Si è poi utilizzato come in precedenza il *software* CloudCompare per comparare la nuvola di punti ottenuta con quella ricavata dalla scansione laser, impostandola come nuvola di riferimento, in quanto più precisa e più densa di punti.

6.4.1. Agisoft Photoscan

Di seguito viene spiegato e riportato il procedimento di elaborazione utilizzato per le immagini *half quality*, utilizzato successivamente anche per le immagini *full quality*.

6.4.1.1. Inserimento delle immagini

Le immagini sferiche ottenute dalle precedenti elaborazioni sono state inserite all'interno del programma Agisoft Photoscan, creando 4 sessioni o chunk per un totale di 160 panorami, con il comando “*Add Photos*”.

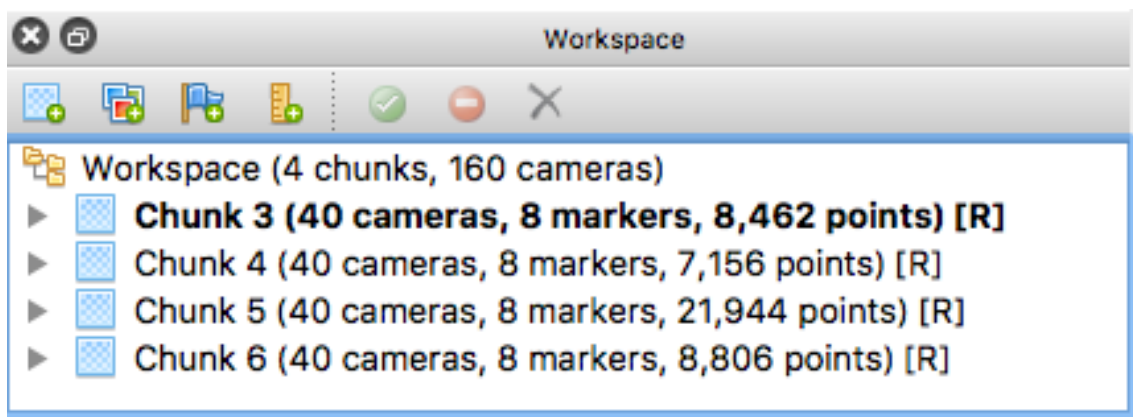


Figura 44 - Suddivisione in *chunk*

In questa fase, così come nel caso di rilievo statico è necessario dichiarare il tipo di camera nelle impostazioni di calibrazione “*Camera Calibration*”.

Attraverso la lettura dell' EXIF, contenuto in ogni foto, vengono riconosciuti, in maniera automatica, il formato del *file* immagine con l'aggiunta di specifiche etichette di metadati, come mostrato nella Figura 45, contenenti:

- risoluzione delle immagini;
- modello della camera di acquisizione;

- lunghezza focale;
- data ed ora di acquisizione di ogni singola immagine.

L' EXIF contiene inoltre:

- Spazio e profilo relativi al colore;
- Rapporto focale;
- Programma di esposizione;
- Tempo di esposizione;
- una miniatura per visualizzare un'anteprima sul *display* LCD della fotocamera;
- descrizioni ed informazioni di *copyright*.

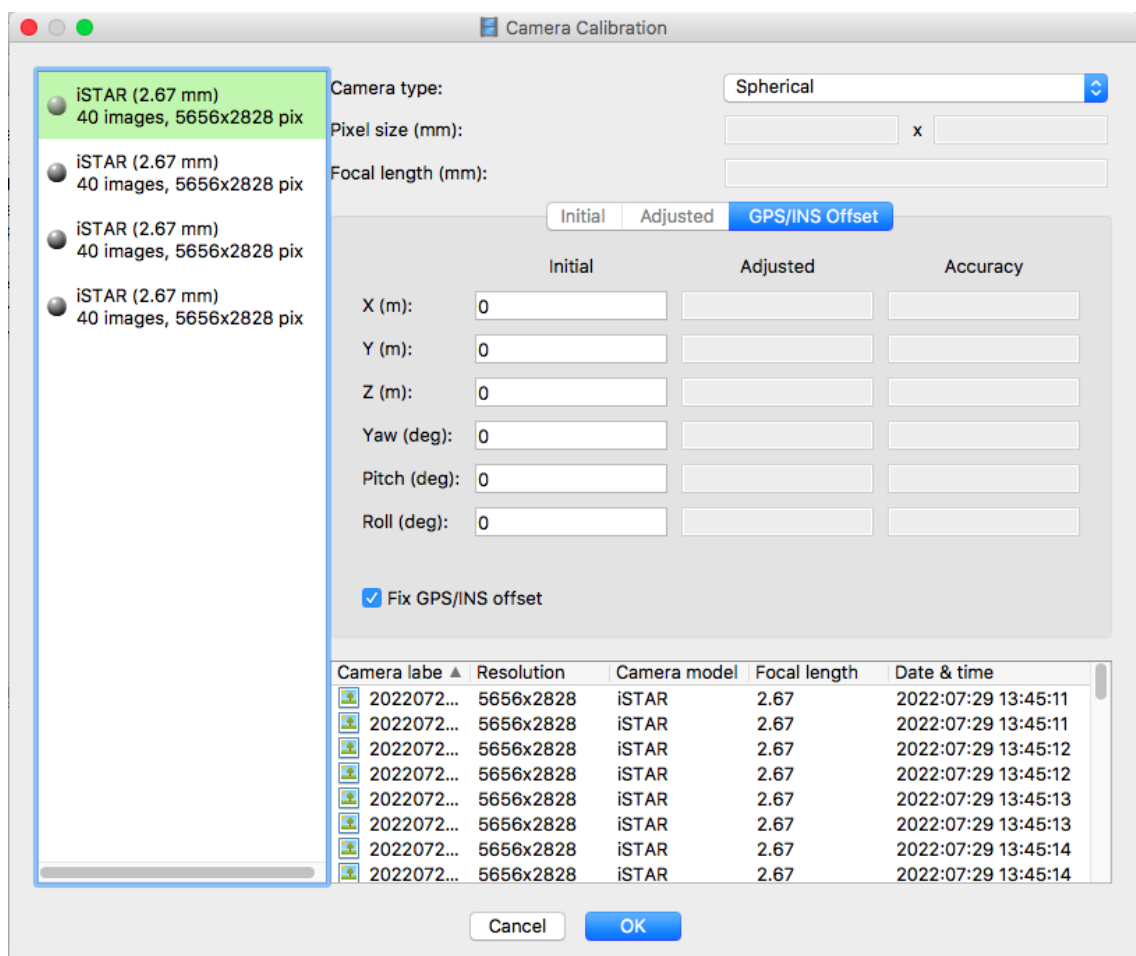


Figura 45 - Parametri di calibrazione della camera

Anche in questo caso, la lunghezza focale che compare all'interno dell' EXIF, si riferisce all'immagine sferica, effettuando una sorta di media tra le lunghezze focali delle quattro camera fisheye: questo dato, fornito dal produttore, non è modificabile all'interno del programma, nè ricalcolabile attraverso procedure iterative, come è stato fatto in fase di calcolo dei parametri di calibrazione della camera per quanto riguarda le immagini piane.

6.4.1.2. Posizionamento dei marker

Il passo successivo consiste nell'importare un file .csv o .txt contenente le coordinate dei punti di controllo, acquisiti nel rilievo topografico mediante stazione totale, e associare a ogni *marker* la sua collocazione all'interno di almeno una decina di immagini (Figura 37). Una volta posizionati i primi punti su almeno due o tre immagini differenti, il software individua quale potrebbe essere la posizione dei punti non ancora collocati, indicandoli con una fiammella grigia. I punti verificati e inseriti manualmente dall'utente sono contrassegnati con un simbolo a forma di bandierina verde.

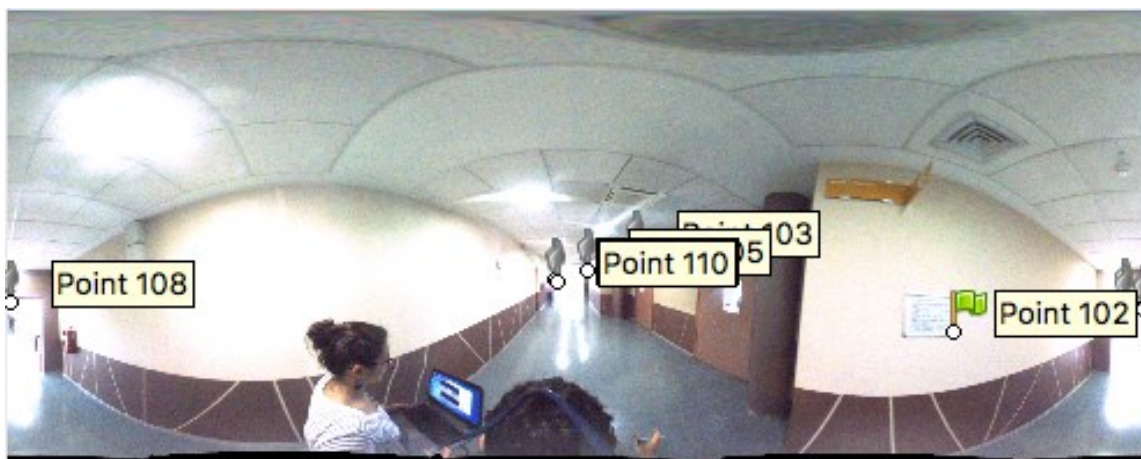


Figura 46 - Posizionamento dei marker di coordinate note

6.4.1.3. Allineamento delle immagini

Ora è possibile procedere all'allineamento delle immagini, premendo su “*Align Photos*” da *Workflow*, da cui si può decidere la qualità dell'allineamento.

In questa fase il *software* identifica i punti omologhi in ogni fotogramma e li associa fra loro, allineando le foto e posizionandoli nella scena, creando una prima nuvola di punti sparsa.

Le immagini sono risultate tutte allineate, ad esclusione del *chunk* 5, dove si è riscontrato un allineamento di 22 immagini su 40, ed è stata stimata una prima posizione delle camere nello spazio, in un sistema di riferimento locale creato da Photoscan.

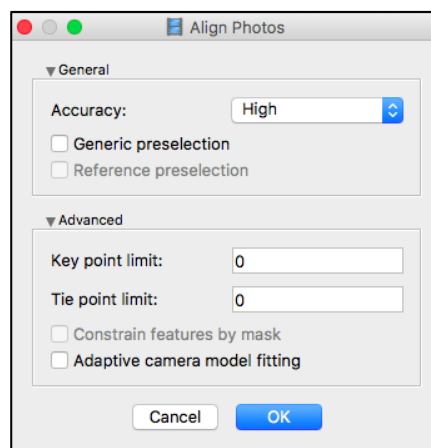


Immagine 47 - Impostazioni di allineamento delle immagini

6.4.1.4. Allineamento e unione dei *chunk*

Questo passaggio prevede l'allineamento tra i *chunk*, le cui immagini sono state allineate in precedenza. È possibile procedere attraverso tre metodologie:

- *marker based* utilizza i *marker* come punti in comune tra i diversi *chunk* ed esegue un allineamento molto rapido;

- *point based* allinea i blocchi accoppiando le foto a cavallo tra i diversi *chunk*. È possibile inoltre impostare il livello di accuratezza desiderato, a maggiore accuratezza corrispondono tempi più lunghi di elaborazione. Un altro parametro che può essere indicato è il numero massimo di punti che devono essere tenuti in considerazione all'interno di ogni immagine, e fissare la scala. È possibile inoltre prevedere una preselezione a coppie di immagini;
- *camera based* allinea i *chunk* in base alla posizione stimata delle camere, che devono avere la stessa etichetta tra i blocchi che si vogliono allineare.

Nel caso oggetto di studio si è deciso di utilizzare il metodo basato sul riconoscimento dei *marker*, poiché nelle prime e ultime immagini di ciascun *chunk* consecutivo erano presenti i medesimi oggetti e punti.

Le sessioni sono state allineate due a due e poi unite: questo procedimento è stato ripetuto fino a che non è stato ottenuto un unico chunk, contenente tutte le 160 immagini.

6.4.1.5. Controllo degli errori

Una volta uniti tutti i *chunk*, si effettua un'ottimizzazione della camera, che ristima la posizione delle immagini rispetto ai punti inseriti.

Dopo aver verificato il corretto allineamento totale ([Figura 48](#)), il prodotto finale può essere controllato attraverso la finestra "*Ground Control*", in cui viene restituito l'errore di ogni punto in metri, potendo deselezionare i *marker* che restituiscono gli errori maggiori in modo da perfezionare i risultati. In questo caso sono stati deselezionati 3 punti che presentavano un errore molto alto (101, 112, 115), ottenendo un RMSE **0,066 m** ([Tabella 25](#)).

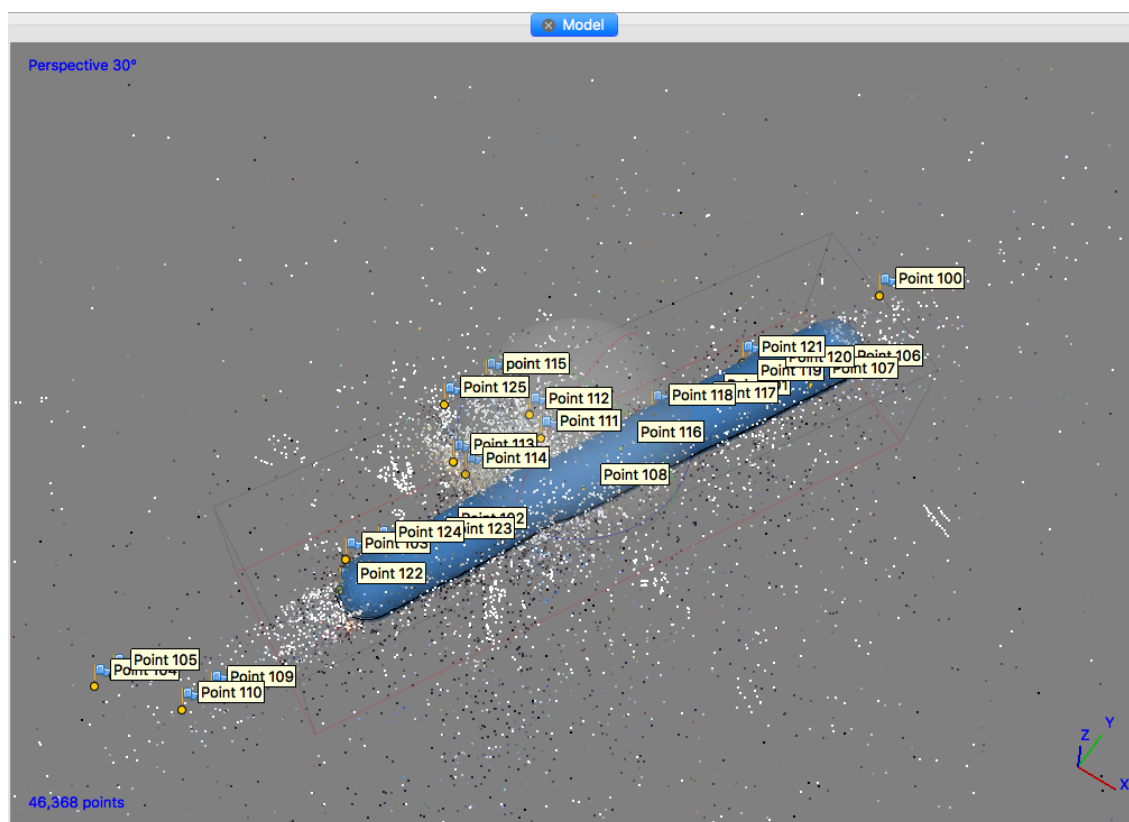


Figura 48 - Posizione delle camere e dei marker inseriti

Punti	X [m]	Y [m]	Z [m]
Point 100	34,154	24,001	2,769
Point 101	26,918	6,988	1,624
Point 102	15,845	-15,224	1,598
Point 103	11,443	-21,277	2,796
Point 104	2,455	-39,343	2,779
Point 105	3,137	-37,989	2,775
Point 106	34,568	16,009	1,444
Point 107	33,421	13,779	1,174
Point 108	23,136	-5,930	2,255
Point 109	9,210	-34,900	1,424
Point 110	8,155	-36,958	1,118
Point 111	17,404	-3,316	1,154
Point 112	15,651	-2,479	2,078
Point 113	12,731	-9,095	1,179
Point 114	14,461	-9,954	2,097
Point 115	11,309	-2,072	2,310

Point 116	23,228	-0,422	1,081
Point 117	26,513	6,170	1,073
Point 118	23,823	3,486	1,850
Point 119	28,441	10,051	1,080
Point 120	29,796	12,761	1,053
Point 121	27,725	11,352	2,684
Point 122	12,373	-22,702	1,388
Point 123	15,351	-16,213	1,079
Point 124	12,704	-18,819	1,851
Point 125	9,484	-5,753	2,311

Tabella 25 - Coordinate dei marker inseriti

Marker	Errore [m]	Errore in X [m]	Errore in Y [m]	Errore in Z [m]
Point 101	0,110	0,017	0,107	-0,016
Point 102	0,089	0,021	0,085	-0,017
Point 106	0,035	0,010	-0,032	-0,010
Point 107	0,031	0,007	0,021	-0,021
Point 108	0,071	0,014	-0,060	0,036
Point 111	0,120	-0,040	-0,082	0,078
Point 112	0,116	0,029	-0,099	0,053
Point 113	0,069	0,012	0,007	-0,067
Point 115	0,324	-0,280	0,062	0,151
Point 116	0,058	-0,006	-0,047	0,033
Point 117	0,046	-0,019	0,024	-0,034
Point 118	0,080	-0,044	-0,028	0,061
Point 120	0,051	0,016	0,047	-0,009
Point 121	0,029	0,004	0,011	-0,027
Point 123	0,028	-0,003	0,009	-0,027
Point 125	0,074	0,044	-0,055	0,024
Totale RMSE	0,066	0,023	0,047	0,040
Max.	0,120	0,044	0,085	0,078
Min.	0,028	0,003	0,007	0,009
Media	0,060	0,001	-0,008	0,002
SQM	0,028	0,024	0,048	0,042

Tabella 26 – Errori *half quality*

Di seguito si riportano gli errori ottenuti per i medesimi punti nell'elaborazione delle immagini *full quality*.

In questo caso sono stati deselezionati 4 punti che presentavano un errore molto alto (112, 115, 122, 125), ottenendo un RMSE di **0,069 m** (*Tabella 26*).

Marker	Errore [m]	Errore in X [m]	Errore in Y [m]	Errore in Z [m]
Point 101	0,025	0,020	0,011	-0,012
Point 102	0,061	-0,059	0,009	0,015
Point 103	0,048	0,023	0,033	-0,026
Point 108	0,036	-0,003	0,030	-0,020
Point 111	0,087	-0,032	-0,080	0,013
Point 112	0,121	-0,006	0,120	-0,015
Point 113	0,137	0,134	-0,017	0,021
Point 114	0,064	-0,023	-0,047	-0,038
Point 115	0,412	-0,362	0,194	0,023
Point 116	0,100	0,010	0,092	0,039
Point 117	0,042	0,012	-0,040	0,001
Point 118	0,018	-0,011	0,014	0,003
Point 119	0,045	0,022	0,012	-0,037
Point 120	0,073	0,040	0,060	-0,014
Point 121	0,099	-0,067	-0,066	0,032
Point 122	0,275	-0,215	-0,136	-0,105
Point 123	0,050	-0,041	0,015	0,025
Point 124	0,035	-0,025	-0,024	-0,001
Point 125	1,162	-1,135	-0,229	0,093
Totale RMSE	0,069	0,047	0,045	0,023
Max.	0,137	0,134	0,092	0,039
Min.	0,018	0,003	0,009	0,001
Media	0,061	0,000	0,000	0,000
SQM	0,033	0,049	0,046	0,024

Tabella 27 - Errori *full quality*

6.4.1.6. Generazione della nuvola densa di punti

Ora è possibile generare una nuvola densa di punti (*Workflow* → *build dense cloud...*).

In questo caso I parametri utilizzati sono:

- Quality → High;
- Dept filtering → Aggressive.⁶⁰

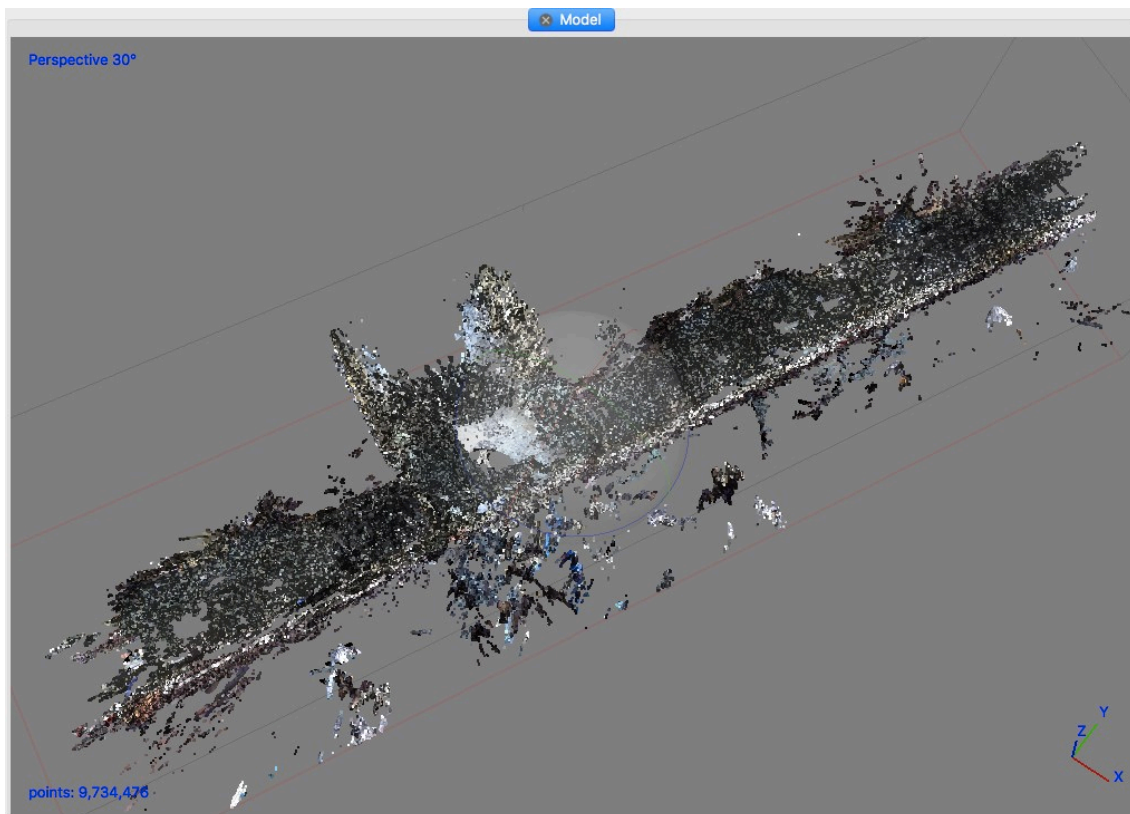


Figura 49 - Nuvola densa di punti ottenuta

⁶⁰ Si è deciso di utilizzare questa impostazione in quanto è risultata la migliore

6.5. Comparazione delle nuvole di punti

La procedura che viene ora descritta è stata seguita per la nuvola densa ottenuta in *half quality*, presentata per intero e successivamente utilizzata per la nuvola ottenuta da immagini *full quality*.

In questa fase è stata effettuata la comparazione tra la nuvola densa ottenuta tramite scansione laser (in giallo), impostata come riferimento e nuvola densa prodotta tramite l'elaborazione con Photoscan precedentemente descritta (*in rosso*). La comparazione mira ad individuare la distanza tra i punti delle due nuvole e la densità di ciascuna.

Entrambe le nuvole sono georiferite, in quanto sono state inserite in precedenza le coordinate dei marker, non risulta pertanto necessario sovrapporre rototraslandole.

Per garantire un'elaborazione più rapida ed efficace, entrambe le nuvole sono state pulite rispetto al prodotto iniziale: la nuvola di riferimento è stata ridotta, in quanto inizialmente prendeva in considerazione tutto l'anello formato dal corridoio e dai quattro atrii, mentre le nuvole dense ottenute dall'elaborazione sono state dapprima epurate dai punti sparsi intorno al corpo centrale, e successivamente ulteriormente ripulite, andando ad eliminare i punti del soffitto e del pavimento, in quanto si è riscontrato che in tali zone la nuvola risultava molto rumorosa e potenzialmente non corretta.

I risultati ottenuti pertanto, si riferiscono solamente alle pareti.

È ora necessario indicare al programma quali sono le impostazioni da seguire per effettuare il calcolo delle distanze:

- *Octree Level*, ovvero il livello di suddivisione delle *octree* in cui verrà eseguita la computazione della distanza → **Auto**;
- *Max. distance*, cioè la distanza massima usata per limitare la ricerca al di sotto di un valore ragionevole per ottimizzare le tempistiche di calcolo del

programma, e a tutti i punti che superano questa distanza viene attribuito il valore di soglia → **0,5 m**;

- *Local model*, modelli locali → **None**.

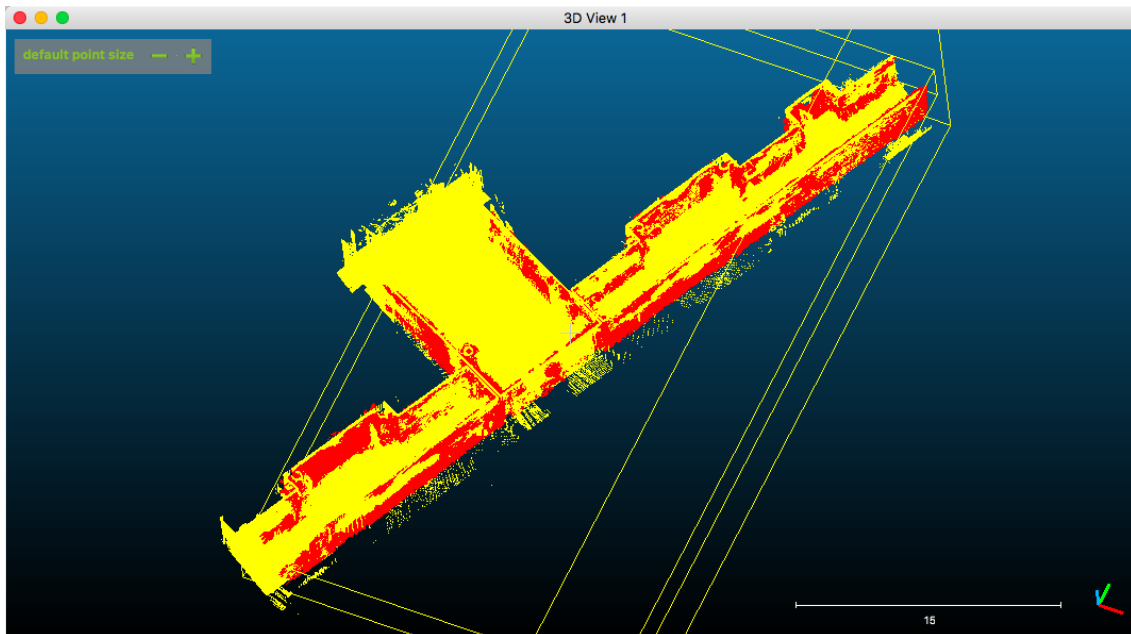


Figura 50 - Nuvola di riferimento e comparazione

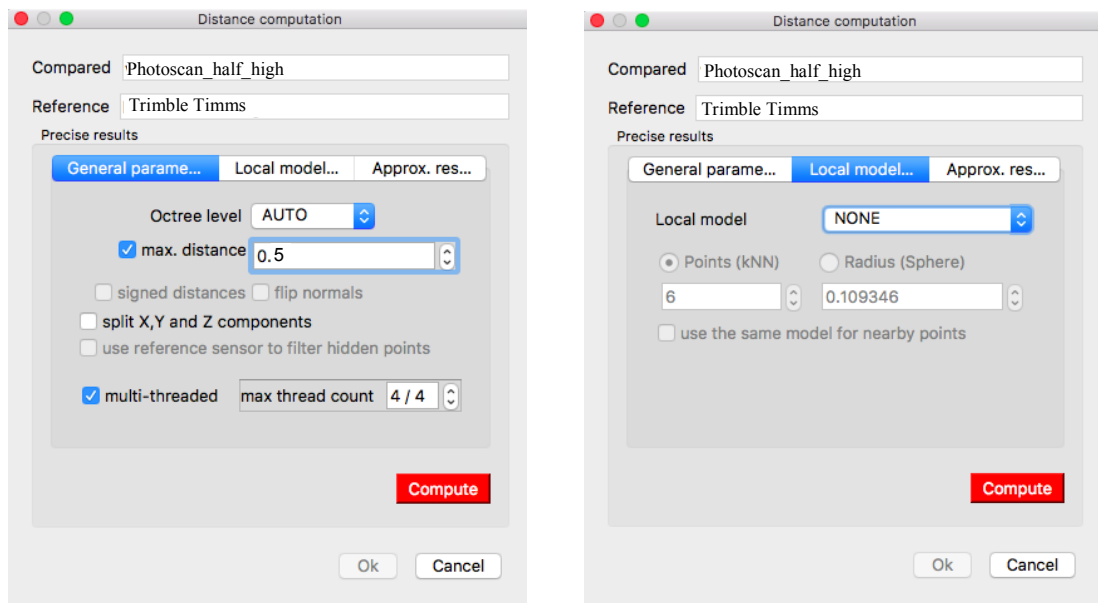


Figura 51 - Impostazioni per il calcolo delle distanze

Avviata la procedura, la nuvola che è stata comparata presenta una colorazione in scala, che mostra lo scostamento tra le due entità messe a confronto.

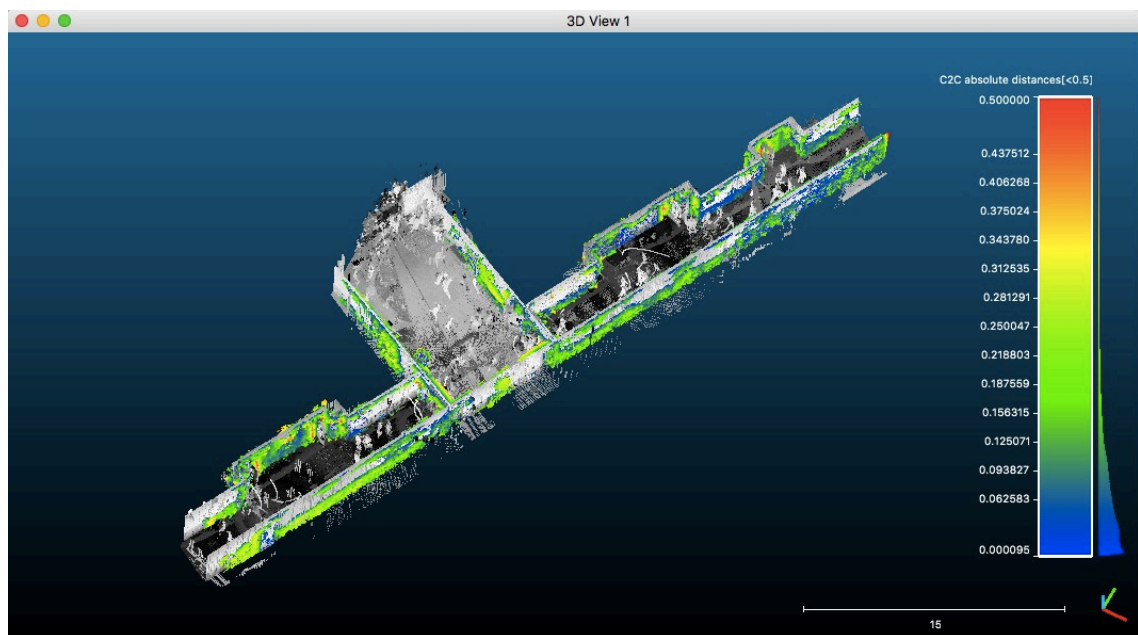


Figura 52 - Distanza dei punti dalla nuvola di riferimento

L'isotogramma che ne consegue, mostra come i 3387964 punti iniziali abbiano assunto colorazioni differenti in base alla loro distanza dalla nuvola di riferimento (Figura 53).

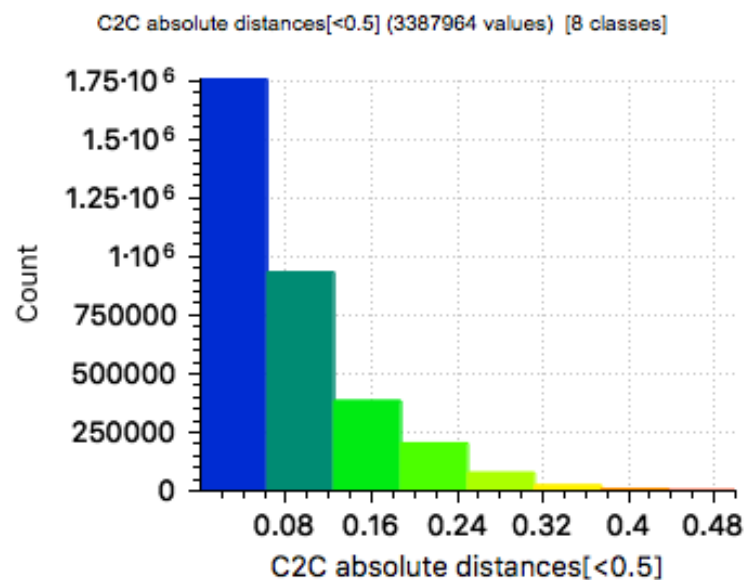


Figura 53 - Istogramma di comparazione

I punti sono stati inoltre ripartiti in 8 classi di scostamento, che vanno da 0 m a 0,5 m, così definite:

Class	Value	Class start	Class end
1	1756697	0	0,063
2	932808	0,063	0,125
3	383402	0,125	0,188
4	203653	0,188	0,25
5	76652	0,25	0,313
6	23450	0,313	0,375
7	9347	0,375	0,438
8	1955	0,438	0,5

Tabella 28 – Classi di scostamento

Per quanto riguarda la nuvola da immagini *full quality* si sono ottenuti i seguenti risultati: l'isotogramma, mostra come i 5120524 punti iniziali abbiano assunto colorazioni differenti in base alla loro distanza dalla nuvola di riferimento (Figura 54).

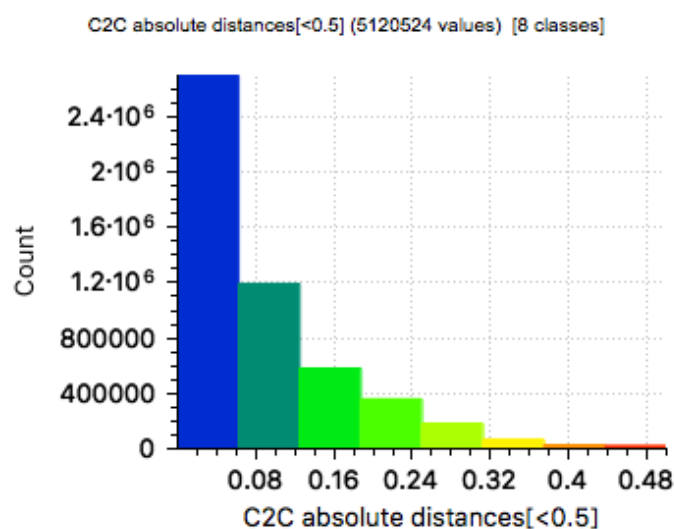


Figura 54 – Istogramma di comparazione *full quality*

Class	Value	Class start	Class end
1	2696185	0	0,063
2	1192789	0,063	0,125
3	581690	0,125	0,188
4	357032	0,188	0,25
5	180850	0,25	0,313
6	65060	0,313	0,375
7	27339	0,375	0,438
8	19579	0,438	0,5

Tabella 29 – Classi di scostamento *full quality*

Capitolo 7

Estrapolazione delle informazioni

Una volta verificata la validità dei dati ottenuti, è possibile estrapolare le informazioni desiderate, quali ad esempio, la posizione degli estintori e delle luci di emergenza o gli accessi e le vie di fuga.

Per fare questo è stato necessario trasporre le informazioni da Photoscan ad un *software* per la rappresentazione grafica bidimensionale, quale Autocad.

Tale procedimento è stato effettuato per il caso statico del laboratorio di Fotogrammetria e per una porzione del caso dinamico del corridoio delle aule i.

7.1. Laboratorio di Fotogrammetria

7.1.1. Generazione delle ortofoto

Un'ortofoto è una fotografia geometricamente corretta, successivamente a un processo di ortorettifica, e georeferenziata: essa può essere considerata equivalente ad una mappa se proiettata sul piano orizzontale o ad un prospetto se proiettata sul piano verticale, e la scala di rappresentazione può essere considerata uniforme.

Diversamente dalle classiche fotografie, un'ortofoto può essere dunque utilizzata per la misurazione di distanze reali, in quanto da essa sono state eliminate le distorsioni della lente ed è stata generata tenendo conto dell'orientamento esterno della camera (*roll, pitch, heading*).

Per questo motivo le ortofoto vengono utilizzate molto spesso per la rappresentazione di prospetti bidimensionali di elementi architettonici complessi, quali cupole, volte e chiese. Nel caso oggetto di studio, a partire dalla nuvola di punti generata in precedenza, sono stati creati 4 nuovi *chunk*, raffiguranti i prospetti necessari e ricavare la pianta e i prospetti del locale. Per ogni prospetto sono state generate mesh e texture e poi creata l'ortofoto,

dalla nuvola di punti generata in precedenza, sono stati creati 4 nuovi *chunk*, raffiguranti i prospetti necessari e ricavare la pianta e i prospetti del locale. Per ogni prospetto sono state generate mesh e texture e poi creata l'ortofoto, proiettando ogni prospetto su un piano parallelo al piano della parete considerata.

Sono state così ottenute quattro ortofoto, contenenti le giuste misure di ogni parete del laboratorio.



Figura 55 - Ortofoto generate

7.1.2. Dalle ortofoto al CAD

Le ortofoto sono poi state riportate su AutoCAD, rendendo così possibile la generazione di una pianta, in scala 1:100 del locale e i prospetti più significativi.

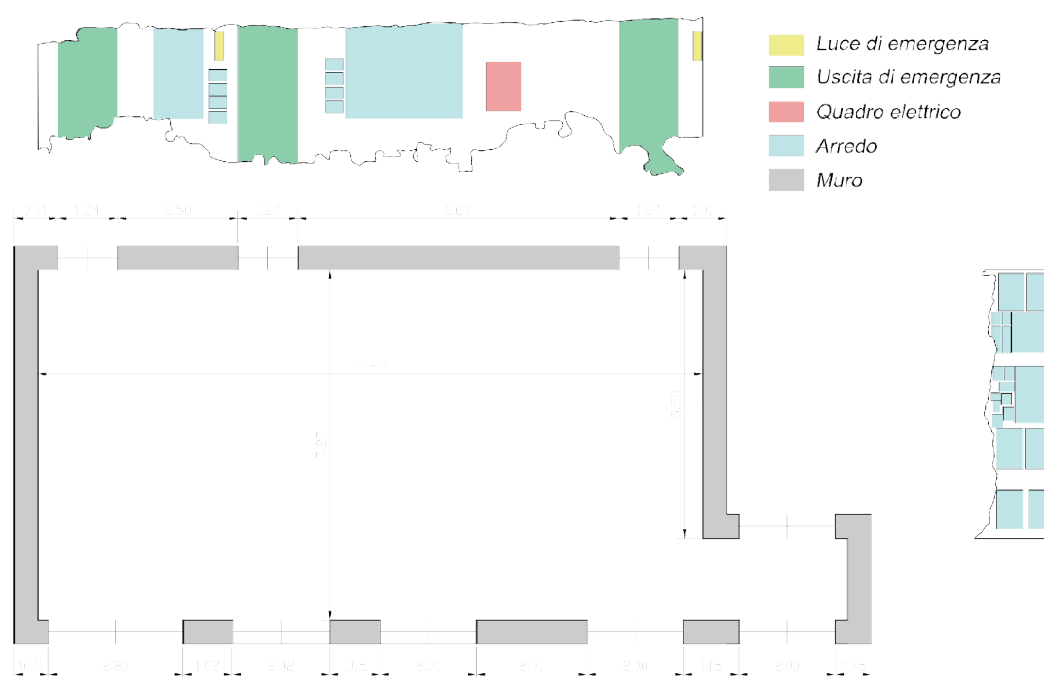


Figura 56 - Pianta e prospetti ricavati dalle ortofoto, non in scala, quote in metri

7.1.3. Misurazione in Photoscan

Allo stesso modo, alcune informazioni significative possono essere desunte direttamente dal modello generato all'interno di Photoscan tramite lo strumento "righello".

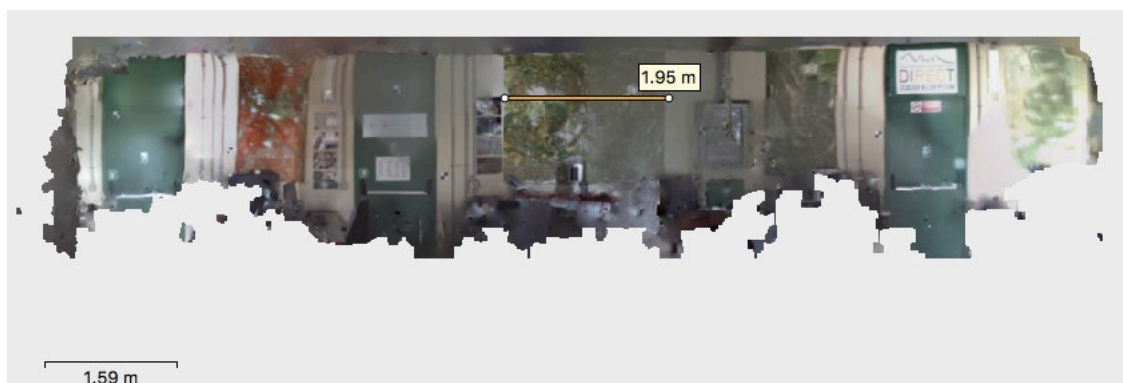


Figura 57 - Misurazione all'interno di Photoscan

Tramite il comando “*look through*” inoltre, è possibile visualizzare il modello a partire dalla posizione di una camera prefissata.

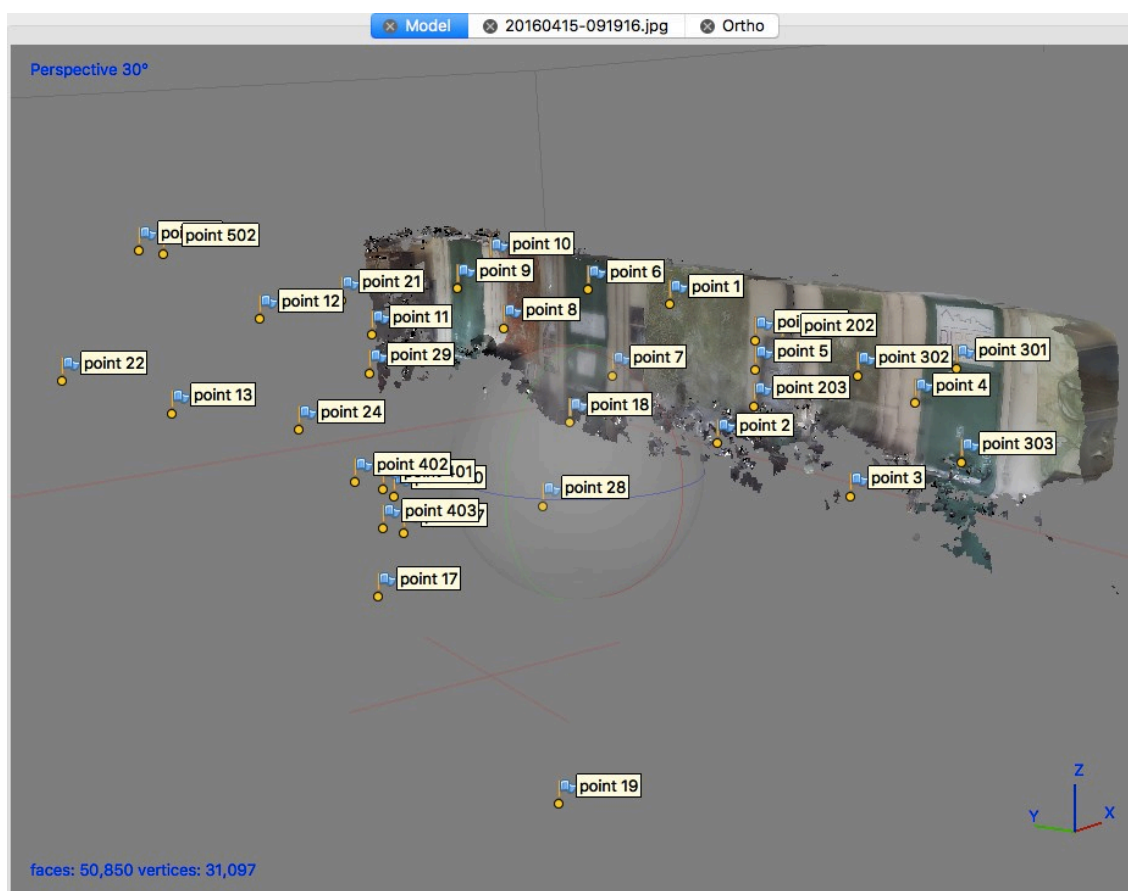


Figura 58 - Visualizzazione del modello da un preciso punto di vista

Capitolo 8

Conclusioni

Lo scopo di questa Tesi è dimostrare come tramite l'approccio *Image - Based Modeling* sia possibile ottenere un modello tridimensionale in grado di fornire delle informazioni numeriche e dimensioni coerenti con la scena ripresa, in modo tale che possa essere utilizzato per rilievi e misurazioni virtuali.

Si è tentato di raggiungere questo obiettivo tramite due differenti metodologie: un primo approccio statico, in cui l'acquisizione delle immagini è avvenuta mantenendo la camera immobile su un treppiede o mantenuta in una posizione ben precisa durante l'acquisizione del panorami e un secondo approccio dinamico, in cui l'acquisizione delle immagini è avvenuta tramite un flusso continuo di streaming fotografico, durante il quale la camere era in movimento, solidale al percorso dell'operatore.

Sicuramente nel primo caso le immagini sono risultate migliori a livello di qualità dei contenuti e riconoscimento della scena ripresa, ma i tempi di acquisizione si sono rivelati più lunghi. Nel secondo caso invece, l'acquisizione è stata molto rapida, ma si sono riscontrate maggiori problematiche durante la fase di allineamento delle immagini.

Al termine della sperimentazione, si nota come nel caso in cui si è mantenuto un approccio statico, si siano ottenuti degli ottimi risultati, sia per quanto riguarda la coerenza dei punti di appoggio utilizzati con quelli stimati all'interno del *software* Photoscan, sia per il confronto delle nuvole con quella di riferimento in CloudCompare. Si è riscontrato inoltre un errore minore nel caso dell'elaborazione delle immagini piane *undistorted*, per cui si sono eliminate le distorsioni delle camere.

Per quanto riguarda l'approccio dinamico non si sono rilevate notevoli differenze di errore tra le elaborazioni delle immagini di diversa risoluzione: in entrambi i casi però la nuvola di punti risulta molto rumorosa in corrispondenza del soffitto e del pavimento e delle fonti di luce naturali e artificiali.

Tali anomalie possono essere date dalla scarsa attitudine delle camere ad adattarsi a repentini cambiamenti di luminosità degli ambienti, dati dallo spostamento all'interno dell'ambiente rilevato, caratterizzato dalla presenza di numerosi punti luce artificiali e grandi aperture finestrate a soffitto e in corrispondenza degli atrii.

Tale problematica era già stata riscontrata in precedenza, durante i rilievi effettuati in un corridoio sotterraneo del Politecnico, caratterizzato da scarsa luminosità, per cui i grandi sbalzi luminosi in corrispondenza delle aperture finestrate hanno reso non elaborabili le immagini ottenute dal rilievo, in questo caso effettuato in movimento a una velocità superiore ai 5 km orari, poiché effettuato montando la camera su di una bicicletta.

In conclusione penso che l'approccio del rilievo fotografico possa essere una buona alternativa al rilievo LiDAR, in quanto risulta molto rapido e di facile esecuzione da parte dell'operatore, non richiedendo particolari conoscenze pregresse della strumentazione, che presenta un'interfaccia abbastanza intuitiva, sia per quanto riguarda la cattura delle immagini attraverso lo streaming in flusso continuo, che l'acquisizione statica, sia per quanto riguarda la creazione dei panorami.

Le fotografie ottenute inoltre, possono essere utilizzate non solo per ottenere un modello tridimensionale misurabile, ma anche semplicemente per avere una visione d'insieme di un ambiente, per poterne valutare lo stato di fatto e lo stato manutentivo, e l'eventuale necessità di intervento a livello di risanamento.

Durante le sperimentazioni eseguite in questo lavoro di Tesi è stato utilizzato un solo strumento di acquisizione, quindi non è possibile dire se la strumentazione fotografica attualmente in commercio, come ad esempio la GoPro Cube, sia già in grado di superare i limiti che ha presentato la iSTAR, ma sicuramente in futuro saranno disponibili degli *hardware* sempre più sofisticati e precisi, con ottiche che non presentino delle problematiche durante l'acquisizione in presenza di fonti di luce e di cambiamenti repentini di luminosità degli ambienti.

Un ulteriore ostacolo alla metodologia proposta, può essere costituito dal fatto che allo stato attuale è necessario l'inserimento di un numero di punti abbastanza cospicuo per far sì che l'allineamento delle immagini sia corretto e la nuvola di punti presenti delle caratteristiche geometriche conformi alla realtà catturata: è stato necessario infatti effettuare un rilievo topografico prima dell'acquisizione delle immagini e l'inserimento dei punti all'interno delle immagini sicuramente costituisce un impiego di tempo che rende tale procedura lievemente macchinosa.

In futuro, per risolvere le problematiche riscontrate si potrebbero utilizzare delle immagini sferiche, opportunamente calibrate e epurate dagli errori di distorsione per ridurre gli errori del modello e la camera potrebbe essere sincronizzata ad un sensore GNSS e IMU, per ottenere immagini georiferite, senza l'ausilio del rilievo topografico.

Un ulteriore passo potrebbe poi essere quello di montare la camera su un carrello semovente o un rover, pilotato a distanza o per il quale è possibile impostare una traiettoria prima del rilievo, in modo tale da automatizzare il processo di cattura delle immagini, consentendo la ripresa di zone anche non accessibili o non sicure.

Ringraziamenti

Come per ogni percorso che volge al termine, è giusto rendere dei ringraziamenti a chi mi ha supportato durante questa impresa.

.

Un grande ringraziamento è d'obbligo nei confronti del Professor Lingua e dell'Ing. Nives Grasso che mi hanno accompagnato e guidato con pazienza e disponibilità durante le fasi di sperimentazione e stesura della Tesi e grazie anche a tutti i borsisti e dottorandi del dipartimento DIATI del Politecnico di Torino, per i preziosi consigli dispensati durante questi mesi.

Ringrazio i miei genitori che mi sono stati vicini in questi lunghi, e non sempre facili, anni al Politecnico.

Un posticino qui e nel mio cuore lo dedico al “TrioSfiga”, un fantastico team di lavoro che non si è mai sciolto sin dal primo giorno di lezioni, anche di fronte alle difficoltà che ci si sono presentate in questi anni: abbiamo condiviso gioie e dolori e ora siamo giunti insieme a questo grande traguardo tanto atteso a sudato, vi voglio bene Gina e Ginello.

Un grande grazie, senza foto di repertorio, a Marco, il mio revisore personale e Elena.

Vorrei porgere un ringraziamento anche a chi ha deciso di non esserci, di non accompagnarmi fino alla fine di questo percorso, perché mi ha ricordato quanto possa essere testarda e determinata nel raggiungimento dei miei obiettivi, riportando alla luce quella forza che ogni tanto dimentico di avere.

Bibliografia

- Slides del corso di Geomatica, Prof.Andrea Piemonte, UniPi;
- Fotogrammetria e/o Fotomodellazione, Leonardo Paris, Università di Roma Sapienza;
- Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri (2012) Fotogrammetria. Unità 3 Cap. 7. Zanichelli editore S.p.A., Bologna;
- Lingua A. M. (2015) Dispense di Cartografia Numerica e GIS. Fotogrammetria, le immagini digitali. Politecnico di Torino;
- Manuale d'uso Agisoft Photoscan: Professional Edition, versione 1.2;
- Manuale d'uso CloudCompare: Version 2.6.1 (2016);
- Thomas Luhmann, Werner Tecklenburg 3D object reconstruction from multiple station panorama imagery, University of Applied Sciences, Institute for Applied Photogrammetry and Geoinformatics;
- E. d'Annibale, Image based modeling from spherical photogrammetry and structure for motion.the case of the treasury, nabatean architecture in Petra, D.A.R.D.U.S., Università Politecnica delle Marche;
- Gabriele Fangi, La fotogrammetria sferica: una nuova tecnica per il rilievo dei vicini;
- Gabriele Fangi, Valutazioni sull'impiego della fotogrammetria sferica nella costruzione di modelli digitali 3D: l'oratorio della chiesa di Santa Caterina a Zejtun (Malta)
- Luigi Barazzetti, Gabriele Fangi, Fabio Remondino, Marco Scaioni Automation in Multi-Image Spherical Photogrammetry for 3D Architectural Reconstructions (2010)
- Tesi di Laurea di Emanuela Bonvecchi: "Il forte di Monserrate e il sistema difensivo della baia di Todos os Santos a Salvador de Bahia" (2013 – 2014).
- Paola Meli, Tesi di Dottorato "La ricostruzione 3D in ambito archeologico e possibile utilizzo nel campo delle infrastrutture stradali: analisi delle potenzialità delle tecniche image-based

Sitografia

- www.italiasicura.governo.it
- www.istruzione.it/edilizia_scolastica
- www.sistemapiemonte.it
- www.edilportale.it
- www.smrtech.it
- www.gopro.it
- www.nctechimaging.com
- www.italianeography.it
- www.microgeo.it
- www.geoslam.it
- www.3dlasermapping.com
- www.trimble-italia.it
- www.leica-geosystems.com
- www.spar3d.com
- www.iuav.it
- www.wikipedia.it

Allegati

• Report_camera1 (Photoscan)	115
• Report_camera2 (Photoscan)	121
• Report_camera3 (Photoscan)	127
• Report_camera4 (Photoscan)	133
• Report laboratorio (Photoscan)	139
• Report laboratorio immagini piane (Photoscan)	145
• Report corridoio half quality (Photoscan)	151
• Report corridoio full quality (Photoscan)	157
• Estrapolazione informazioni laboratorio 1:100	163

Report_camera1

Processing Report
10 October 2017



Survey Data

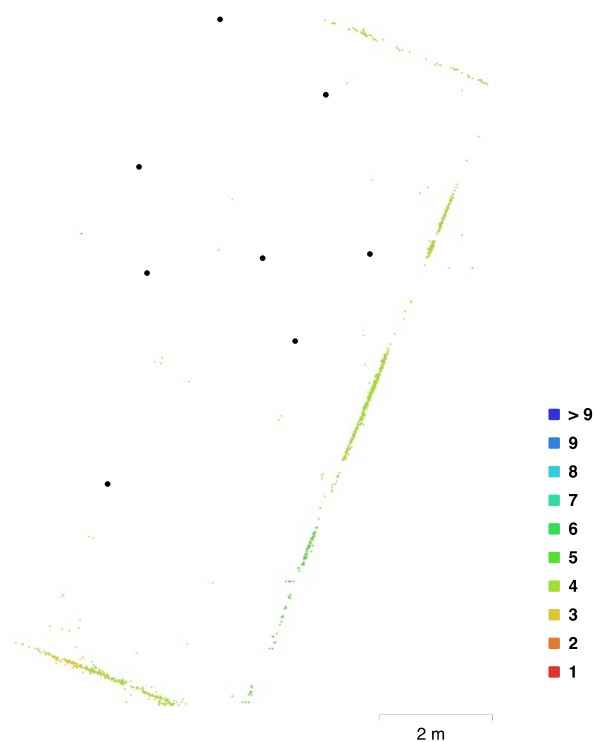


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	30	Camera stations:	8
Flying altitude:	5.31 m	Tie points:	1,707
Ground resolution:	3.27 mm/pix	Projections:	3,716
Coverage area:	4.61e+03 cm ²	Reprojection error:	1.75 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
iSTAR (2.67 mm)	2748 x 3664	2.67 mm	1.52 x 1.52 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

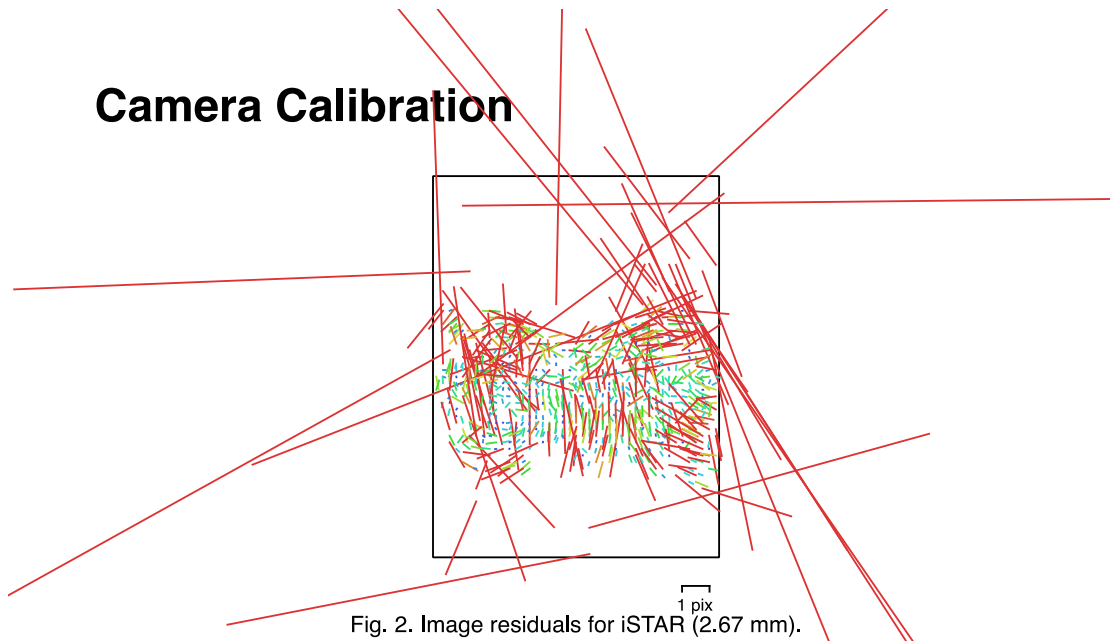


Fig. 2. Image residuals for iSTAR (2.67 mm).

iSTAR (2.67 mm)
30 images

Type
Fisheye

Resolution
2748 x 3664

Focal Length
2.67 mm

Pixel Size
1.52 x 1.52 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	1625.25	4.1	1.00	-0.02	-0.08	-0.76	0.11	-0.29	0.02	0.05	-0.07	0.02	0.12
Cx	-5.52002	5		1.00	-0.01	-0.00	0.07	0.18	-0.20	0.18	-0.17	-0.82	-0.13
Cy	-6.73551	2.8			1.00	0.50	-0.46	0.15	-0.36	0.41	-0.43	0.02	-0.88
B1	-7.76406	3.2				1.00	-0.26	0.10	-0.08	0.06	-0.03	0.10	-0.52
B2	5.24745	2.6					1.00	0.01	0.06	-0.12	0.17	0.05	0.43
K1	-0.105347	0.0034						1.00	-0.87	0.78	-0.72	-0.19	-0.16
K2	0.130319	0.01							1.00	-0.98	0.94	0.22	0.32
K3	-0.161358	0.012								1.00	-0.99	-0.21	-0.37
K4	0.0658073	0.0048									1.00	0.21	0.40
P1	0.00141623	0.00049										1.00	0.05
P2	0.00478282	0.00053											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

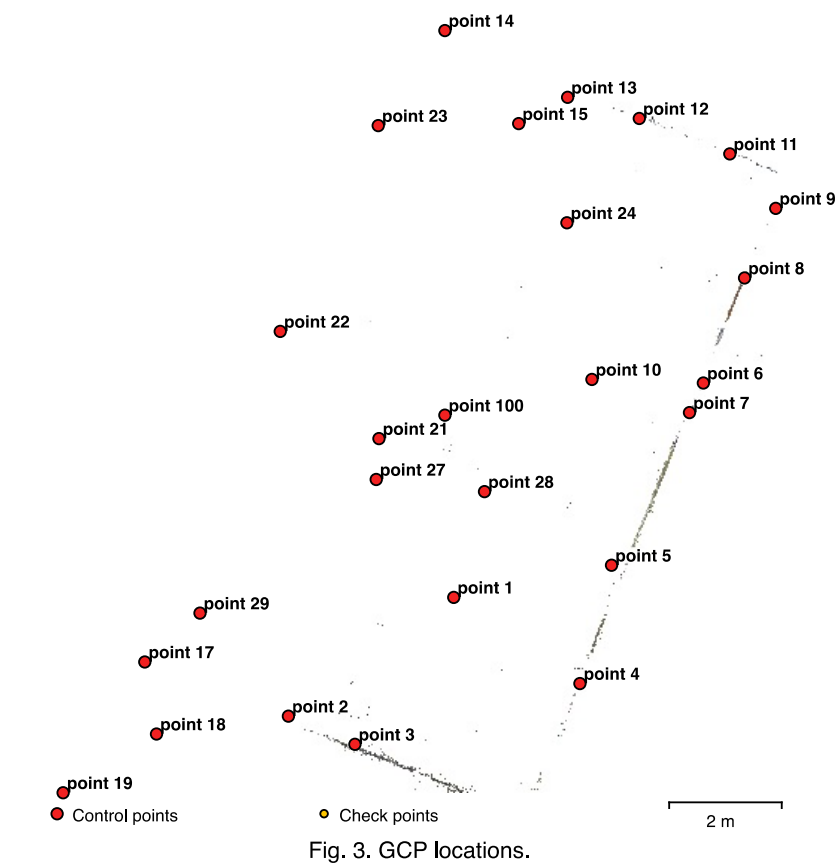


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
13	1.48096	1.29477	1.3899	1.96715	2.40863

Table 3. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 1					
point 10	1.32019	0.906572	-0.386182	1.64739	0.053 (4)
point 100					
point 11	0.657662	0.490516	0.331054	0.884716	0.091 (2)
point 12	-0.725639	-0.292256	-0.0635346	0.784858	0.031 (2)
point 13	-3.09436	-1.81145	-1.75671	3.99279	0.000 (1)
point 14					
point 15					
point 17					
point 18					
point 19					
point 2	2.72974	2.82599	0.725286	3.99546	0.000 (1)
point 21					
point 22					
point 23					
point 24	-2.33206	0.85895	3.98663	4.69782	0.000 (1)
point 27					
point 28					
point 29					
point 3	1.14482	2.46723	1.86999	3.30071	0.000 (1)
point 4	0.377404	-1.01564	0.16154	1.09547	0.110 (4)
point 5	-0.25683	0.970462	0.0298481	1.00432	0.118 (4)
point 6	-1.14641	-0.427245	-1.15837	1.68482	0.099 (3)
point 7	-0.490001	-0.305987	0.565311	0.808273	0.015 (2)
point 8	-0.220576	-0.503347	0.372462	0.663883	0.090 (4)
point 9	0.472372	0.224334	0.146643	0.543107	0.098 (2)
Total	1.48096	1.29477	1.3899	2.40863	0.084

Table 4. Control points.

Digital Elevation Model

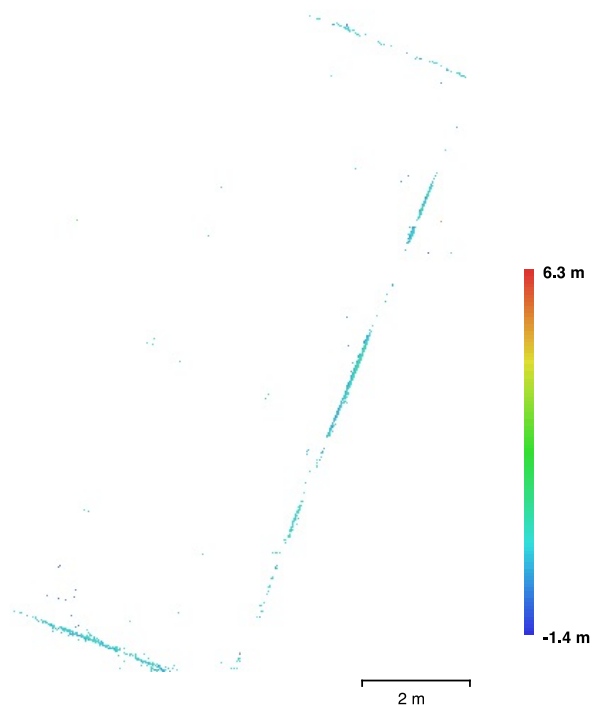


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	30
Aligned cameras	8
Markers	26
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	1,707 of 2,759
RMS reprojection error	0.417412 (1.74537 pix)
Max reprojection error	8.87684 (31.0385 pix)
Mean key point size	5.22362 pix
Effective overlap	2.16818
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	No
Reference preselection	No
Key point limit	0
Tie point limit	0
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 minutes 20 seconds
Alignment time	1 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Fit rolling shutter	No
Optimization time	0 seconds
Software	
Version	1.3.0 build 3772
Platform	Mac OS 64

Report_camera2

Processing Report
10 October 2017



Survey Data

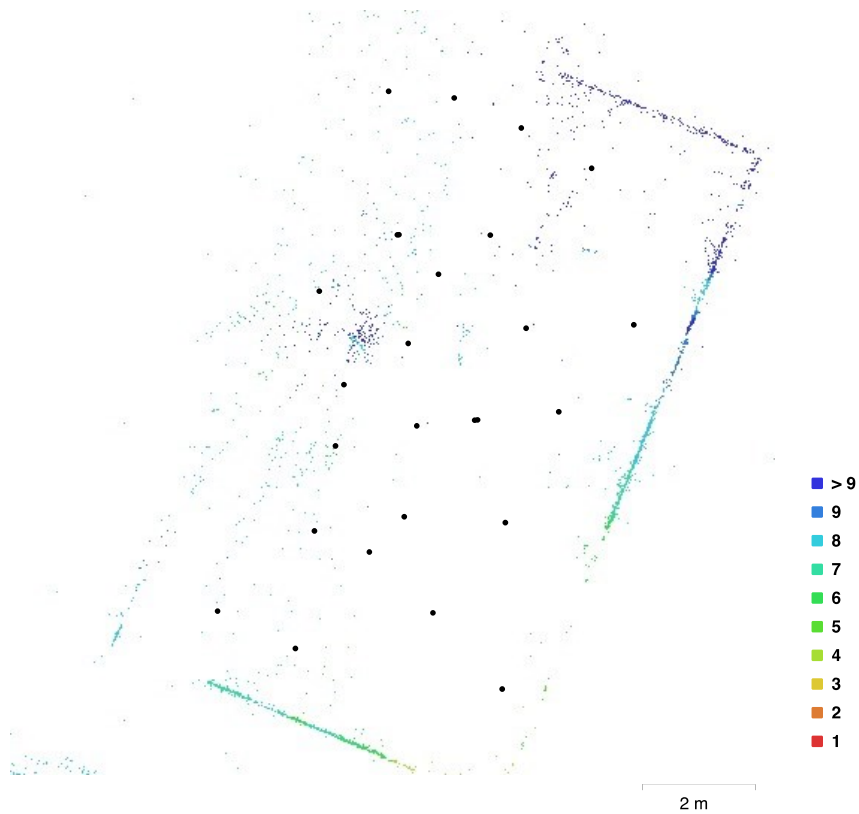


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	30	Camera stations:	26
Flying altitude:	5.19 m	Tie points:	3,390
Ground resolution:	3.25 mm/pix	Projections:	7,753
Coverage area:	1.33 m ²	Reprojection error:	0.905 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
iSTAR (2.67 mm)	2748 x 3664	2.67 mm	1.52 x 1.52 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

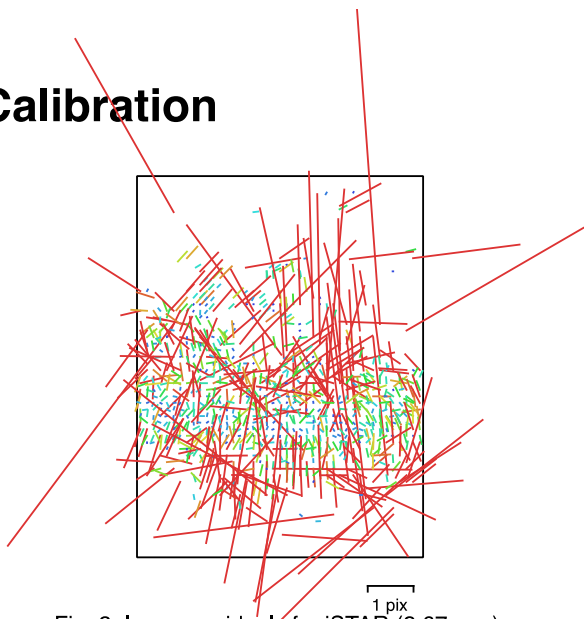


Fig. 2. Image residuals for iSTAR (2.67 mm).

iSTAR (2.67 mm)
30 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Fisheye	2748 x 3664	2.67 mm	1.52 x 1.52 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	1597.94	0.25	1.00	0.17	0.16	-0.33	0.26	-0.23	-0.18	-0.17
Cx	-10.0841	0.68		1.00	0.38	0.13	-0.13	0.13	-0.83	-0.40
Cy	14.7204	0.47			1.00	0.04	-0.09	0.12	-0.18	-0.75
K1	-0.0551893	0.00048				1.00	-0.97	0.90	-0.16	-0.23
K2	-0.0102926	0.00098					1.00	-0.98	0.15	0.23
K3	0.00537966	0.00063						1.00	-0.15	-0.22
P1	-0.000458639	3.9e-05							1.00	0.29
P2	0.000269879	5.2e-05								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

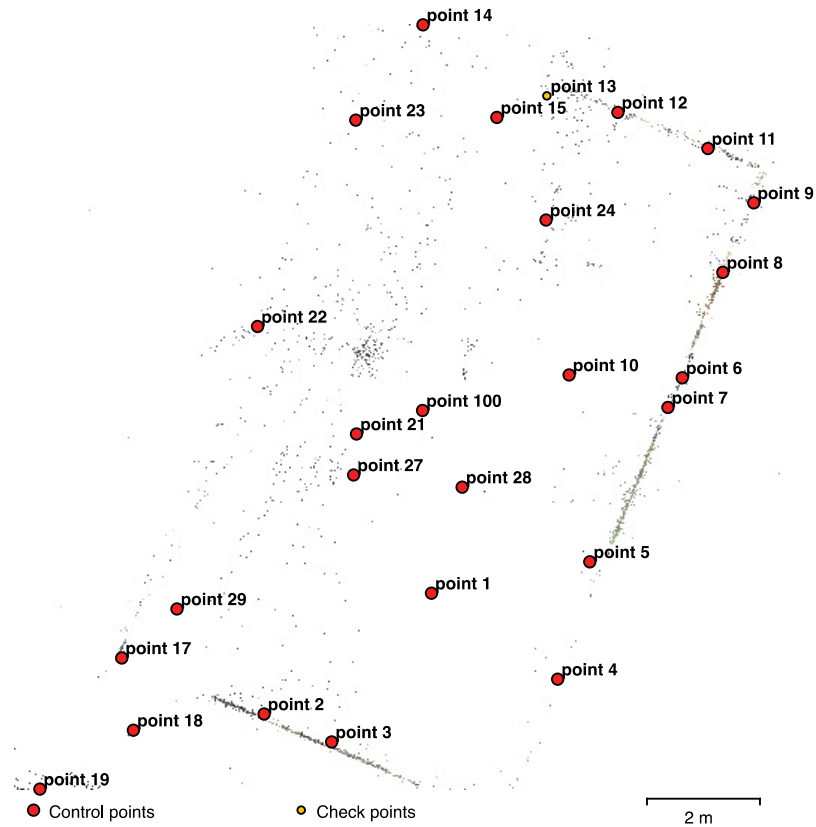


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
12	0.359378	1.16554	0.231893	1.21969	1.24154

Table 3. Control points RMSE.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
1	0.796846	9.18385	0.265079	9.21836	9.22217

Table 4. Check points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 1					
point 10	-0.228635	0.385896	0.323551	0.55306	0.072 (4)
point 100					
point 11	0.119458	0.312913	-0.0427875	0.337662	0.390 (6)
point 12	-0.0311608	0.739101	0.259113	0.783824	0.345 (7)
point 14	0.768841	-0.158196	0.194371	0.808655	0.026 (3)
point 15	0.690035	1.16644	-0.0290814	1.35558	0.165 (4)
point 17					
point 18					
point 19					
point 2					
point 21					
point 22					
point 23					
point 24	-0.284896	-3.5782	-0.174083	3.59374	0.048 (2)
point 27					
point 28					
point 29					
point 3					
point 4	-0.0454341	-0.445861	-0.497531	0.669622	0.030 (2)
point 5	0.0556637	-0.482845	-0.346047	0.596646	0.088 (4)
point 6	-0.194876	0.400185	0.127246	0.462943	0.201 (7)
point 7	-0.268239	0.403096	0.0326257	0.485286	0.155 (6)
point 8	-0.284577	0.361487	0.0509438	0.462874	0.223 (7)
point 9	-0.371232	0.659091	0.124769	0.766669	0.208 (7)
Total	0.359378	1.16554	0.231893	1.24154	0.225

Table 5. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 13	-0.796846	-9.18385	0.265079	9.22217	0.239 (6)
Total	0.796846	9.18385	0.265079	9.22217	0.239

Table 6. Check points.

Digital Elevation Model

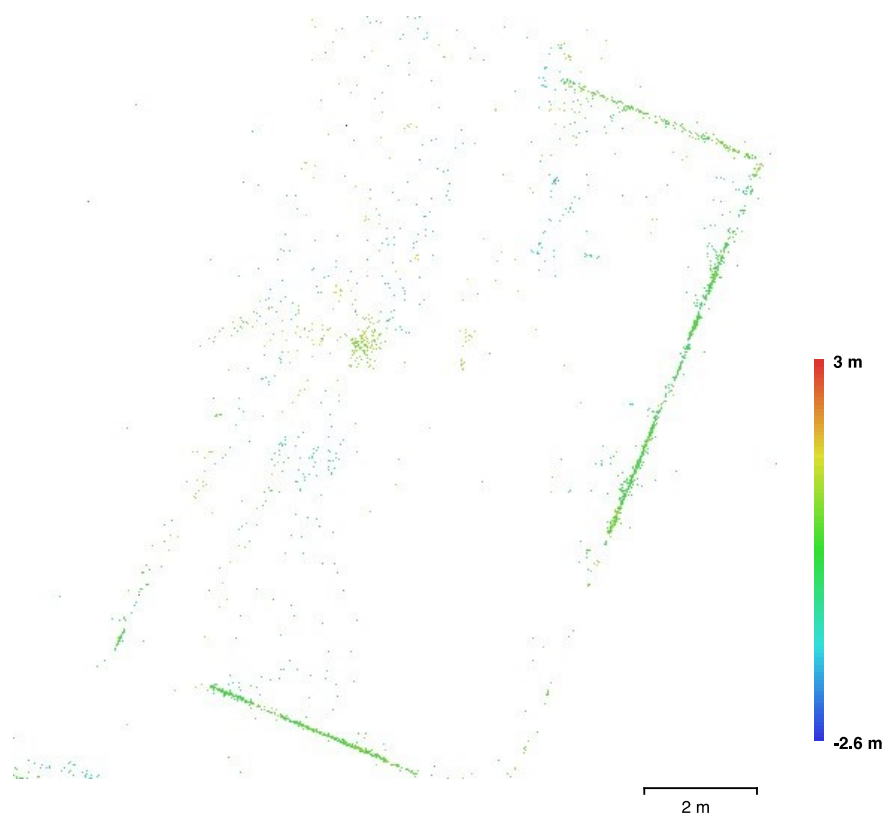


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	30
Aligned cameras	26
Markers	26
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	3,390 of 4,926
RMS reprojection error	0.144428 (0.904715 pix)
Max reprojection error	0.441101 (15.9971 pix)
Mean key point size	5.76406 pix
Effective overlap	2.2704
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	No
Key point limit	0
Tie point limit	0
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	8 minutes 21 seconds
Alignment time	3 seconds
Software	
Version	1.3.0 build 3772
Platform	Mac OS 64

Report_camera3

Processing Report
10 October 2017



Survey Data

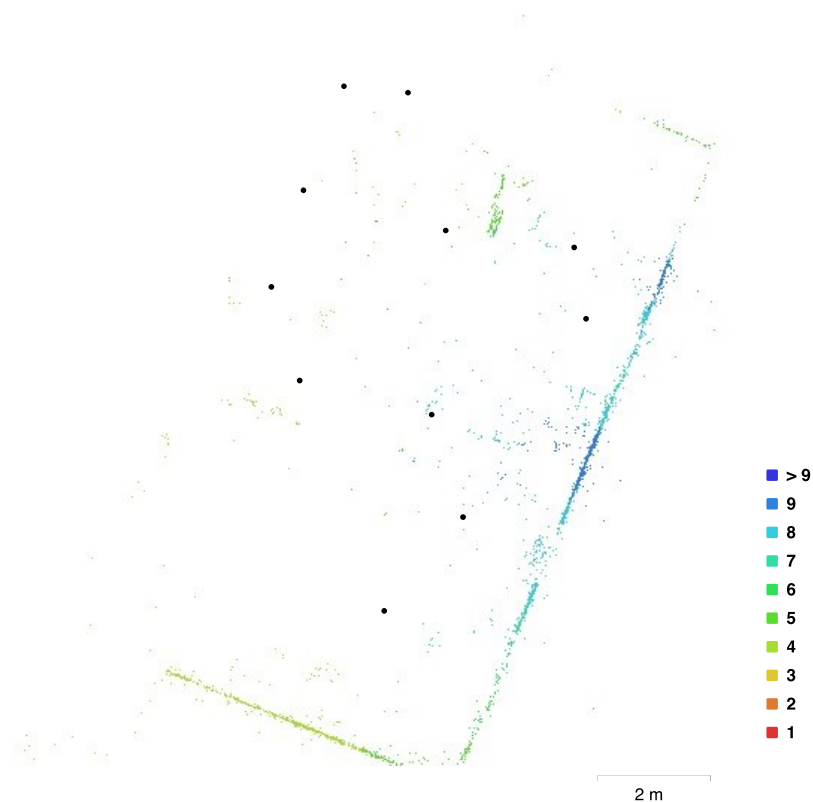


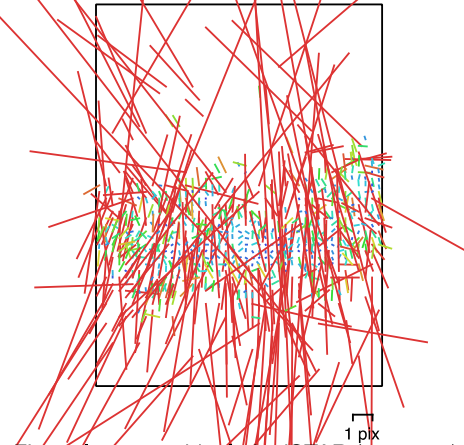
Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	30	Camera stations:	11
Flying altitude:	5.56 m	Tie points:	3,453
Ground resolution:	3.45 mm/pix	Projections:	8,487
Coverage area:	1.13 m ²	Reprojection error:	3.94 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
iSTAR (2.67 mm)	2748 x 3664	2.67 mm	1.52 x 1.52 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration



iSTAR (2.67 mm)
30 images

Type
Fisheye

Resolution
2748 x 3664

Focal Length
2.67 mm

Pixel Size
1.52 x 1.52 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	10.62	3.8	1.00	-0.12	-0.36	-0.96	-0.07	-0.15	0.11	-0.14	0.20	-0.10	0.42
Cx	-34.0618	2.3		1.00	0.12	0.11	-0.24	0.05	0.01	-0.06	0.10	-0.81	-0.20
Cy	8.5792	1.4			1.00	0.46	-0.20	0.06	-0.11	0.13	-0.14	-0.18	-0.82
B1	-8.66871	3.5				1.00	-0.00	0.05	-0.06	0.10	-0.17	0.06	-0.51
B2	12.5643	1.1					1.00	-0.14	0.16	-0.15	0.12	0.46	0.36
K1	-0.0560746	0.0025						1.00	-0.96	0.89	-0.78	-0.05	-0.10
K2	0.0012363	0.0077							1.00	-0.98	0.90	0.08	0.10
K3	-0.0414385	0.0092								1.00	-0.97	-0.05	-0.11
K4	0.0401996	0.0038									1.00	-0.01	0.13
P1	0.00166617	0.00013										1.00	0.30
P2	0.000744916	0.00028											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

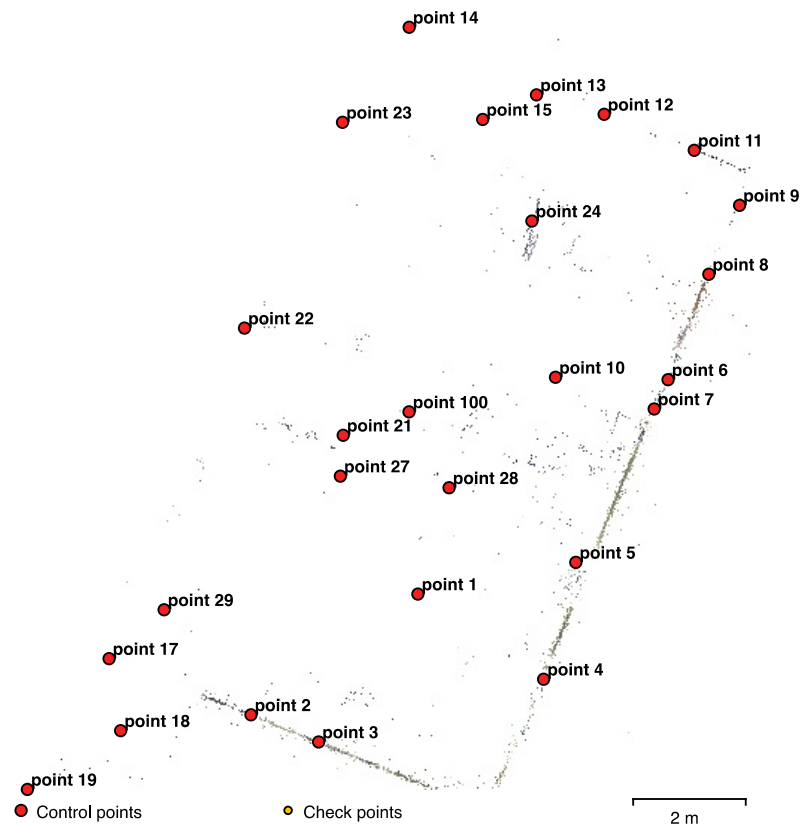


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
16	1.42646	1.19772	0.752376	1.86261	2.00882

Table 3. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 1					
point 10	0.234606	-1.28011	-1.37743	1.895	0.501 (6)
point 100					
point 11	1.19247	0.921132	0.343087	1.54537	0.378 (5)
point 12	0.308942	1.30199	-0.0951137	1.34152	0.291 (3)
point 13	5.34214	-3.19373	-1.203	6.3392	0.000 (1)
point 14	0.268903	0.0117549	-0.337519	0.431702	0.000 (1)
point 15	-0.349027	1.66055	-2.07155	2.67779	0.000 (1)
point 17					
point 18					
point 19					
point 2	-0.104752	-0.708382	-0.332531	0.789528	0.324 (4)
point 21					
point 22					
point 23					
point 24	-0.994403	-1.80134	0.454542	2.10719	0.294 (3)
point 27					
point 28	0.864371	0.885019	-0.27383	1.26704	0.000 (1)
point 29					
point 3	0.226525	0.632791	0.524888	0.852787	0.187 (4)
point 4	-0.501582	0.682689	0.439023	0.954144	0.462 (6)
point 5	-0.223422	0.203179	-0.194476	0.359193	0.356 (8)
point 6	-0.160871	-0.35758	-0.357424	0.530561	0.367 (8)
point 7	0.29333	0.41211	0.327605	0.602662	0.471 (7)
point 8	-0.0766418	0.203326	0.20805	0.300833	0.323 (7)
point 9	-0.183962	-0.189396	0.0631906	0.271488	0.453 (5)
Total	1.42646	1.19772	0.752376	2.00882	0.378

Table 4. Control points.

Digital Elevation Model

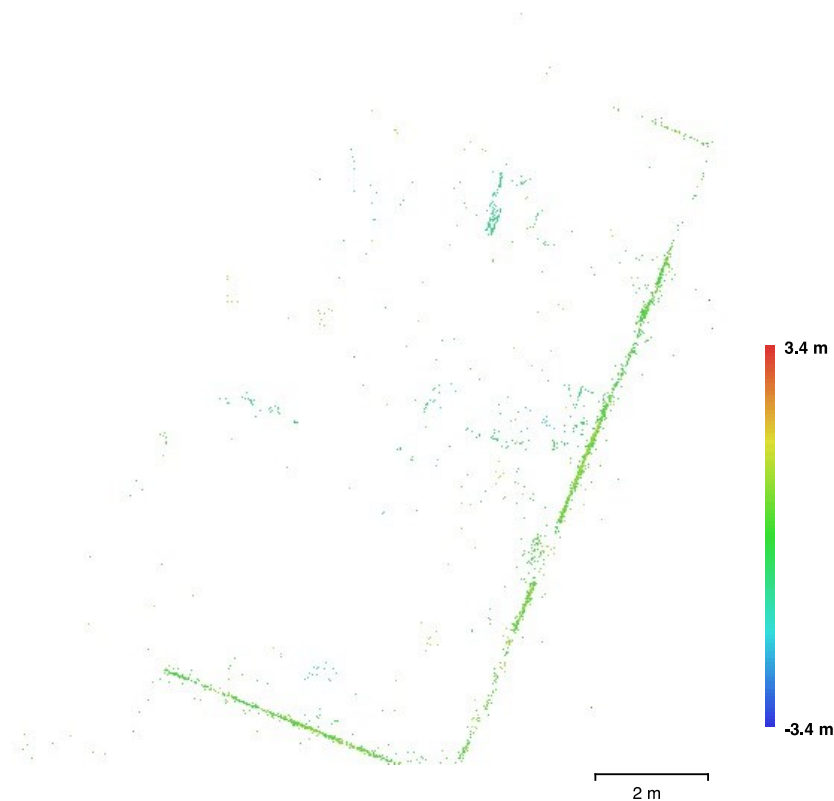


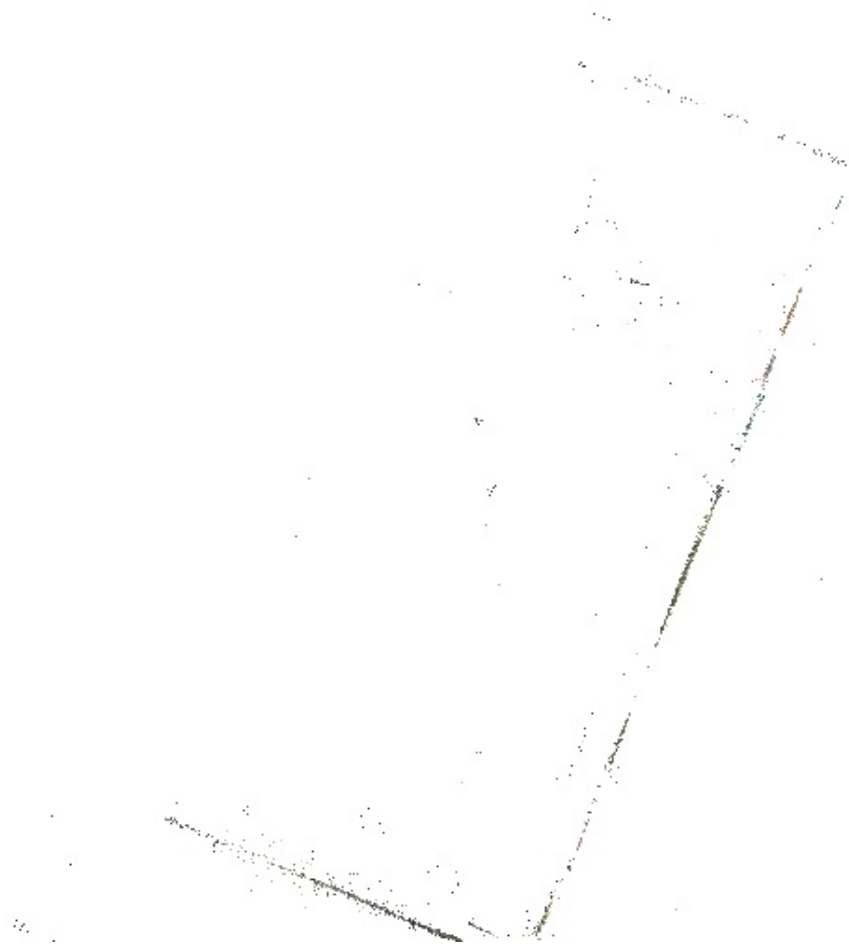
Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	30
Aligned cameras	11
Markers	26
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	3,453 of 4,875
RMS reprojection error	1.04395 (3.94205 pix)
Max reprojection error	32.564 (106.214 pix)
Mean key point size	4.68185 pix
Effective overlap	2.44103
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	No
Reference preselection	No
Key point limit	0
Tie point limit	0
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 minutes 51 seconds
Alignment time	4 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Fit rolling shutter	No
Optimization time	0 seconds
Software	
Version	1.3.0 build 3772
Platform	Mac OS 64

Report_camera4

Processing Report
10 October 2017



Survey Data

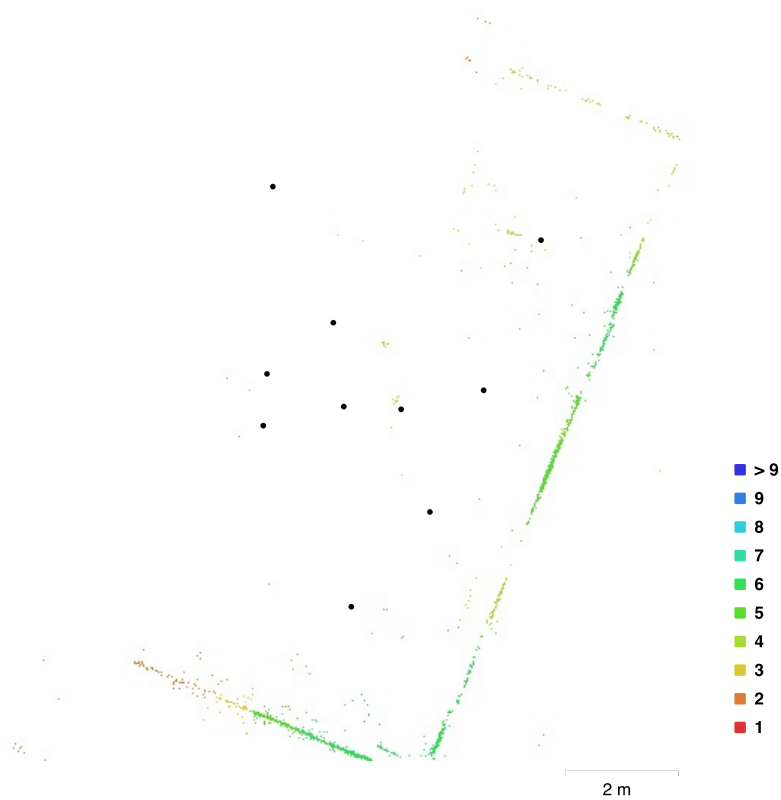


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	30	Camera stations:	10
Flying altitude:	5.64 m	Tie points:	2,305
Ground resolution:	3.53 mm/pix	Projections:	5,764
Coverage area:	7.54e+03 cm ²	Reprojection error:	2.93 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
iSTAR (2.67 mm)	2748 x 3664	2.67 mm	1.52 x 1.52 μm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

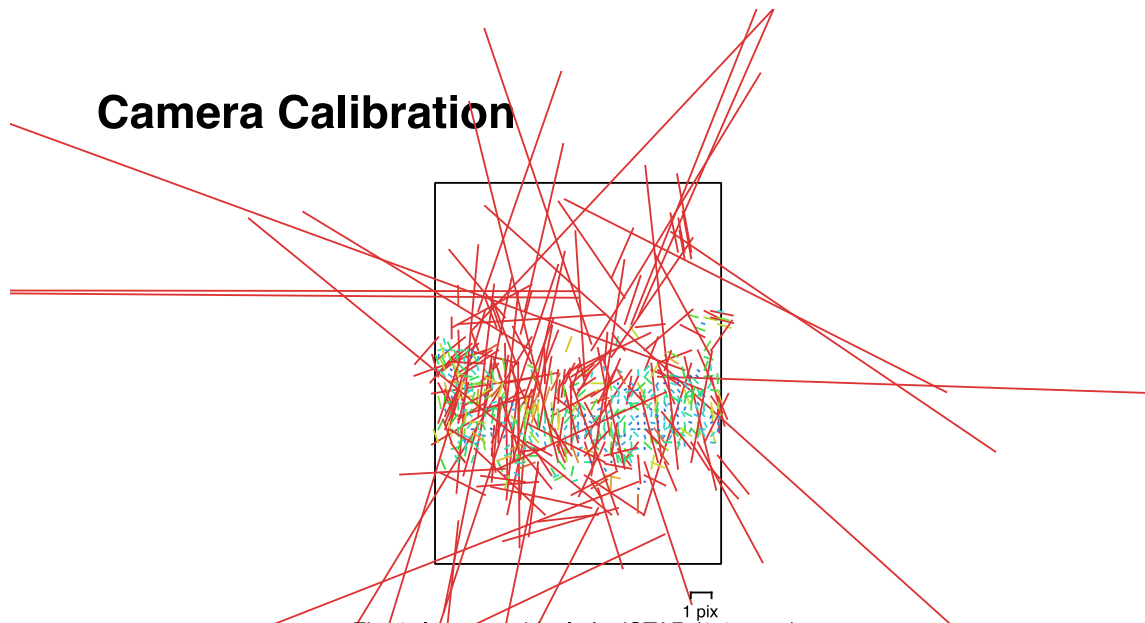


Fig. 2. Image residuals for iSTAR (2.67 mm).

iSTAR (2.67 mm)
30 images

Type
Fisheye

Resolution
2748 x 3664

Focal Length
2.67 mm

Pixel Size
1.52 x 1.52 μm

	Value	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	1598.88	2	1.00	-0.37	-0.38	-0.90	0.17	-0.54	0.48	-0.42	0.34	0.47	0.56
Cx	-13.5851	1.6		1.00	0.16	0.37	-0.36	0.23	-0.22	0.21	-0.18	-0.84	-0.18
Cy	41.16	1.9			1.00	0.49	-0.12	0.15	-0.14	0.12	-0.10	-0.22	-0.85
B1	0.23255	1.6				1.00	-0.18	0.33	-0.29	0.23	-0.17	-0.49	-0.74
B2	-1.06561	0.58					1.00	-0.04	0.11	-0.14	0.14	0.46	0.09
K1	-0.0496732	0.0025						1.00	-0.97	0.91	-0.82	-0.27	-0.21
K2	-0.0117299	0.0084							1.00	-0.98	0.92	0.30	0.18
K3	-0.0115365	0.011								1.00	-0.98	-0.30	-0.13
K4	0.015663	0.005									1.00	0.27	0.09
P1	-0.000226001	0.00011										1.00	0.22
P2	-0.00149781	0.00022											1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

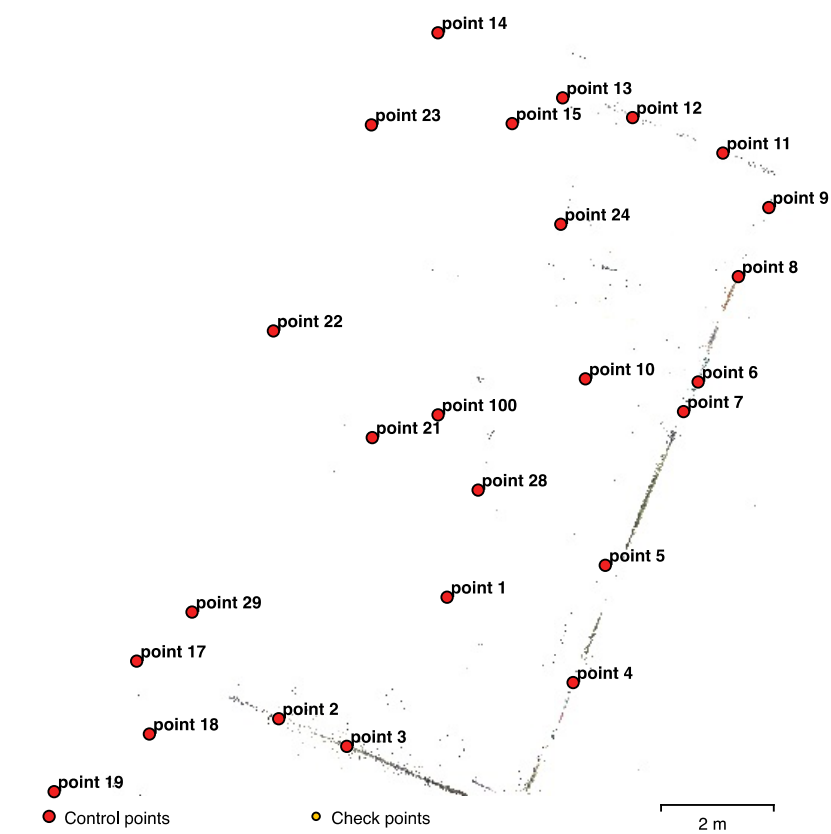


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
21	1.2178	1.96693	1.69115	2.31341	2.86563

Table 3. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 1	0.156295	-0.155711	-0.0323576	0.222983	0.076 (3)
point 10	1.44688	0.979394	0.116495	1.75107	0.106 (5)
point 100					
point 11	-0.138909	0.539624	0.786327	0.963743	0.360 (4)
point 12	-1.04395	-0.0321625	1.60793	1.91737	0.495 (4)
point 13	0.113248	-4.21898	1.35213	4.4318	0.192 (2)
point 14	-0.175394	-5.63036	5.11254	7.60722	0.000 (1)
point 15	0.326484	-1.25036	1.99347	2.37569	0.000 (1)
point 17	-1.95193	1.19415	0.182494	2.2955	0.000 (1)
point 18					
point 19	-3.45173	2.04755	0.968457	4.12854	0.000 (1)
point 2	-2.0154	-1.63128	0.793092	2.71144	0.224 (2)
point 21	0.179025	1.16833	-3.44266	3.63991	0.035 (3)
point 22					
point 23					
point 24	-1.36817	-2.96417	0.912177	3.38973	0.186 (2)
point 28	0.61541	2.10092	-2.49684	3.32067	0.000 (1)
point 29	-1.51491	1.45104	0.127229	2.10158	0.000 (1)
point 3	-1.2045	-1.19805	1.15859	2.05633	0.314 (4)
point 4	0.043483	0.471042	0.635288	0.792062	0.122 (4)
point 5	0.430123	0.541705	-0.557262	0.888252	0.107 (4)
point 6	1.18837	0.699256	-0.756978	1.57296	0.288 (6)
point 7	0.476801	0.710607	-1.18426	1.46109	0.254 (4)
point 8	0.262661	0.86844	-0.553871	1.06299	0.373 (4)
point 9	-0.237599	0.506263	-0.167104	0.583677	0.307 (4)
Total	1.2178	1.96693	1.69115	2.86563	0.256

Table 4. Control points.

Digital Elevation Model

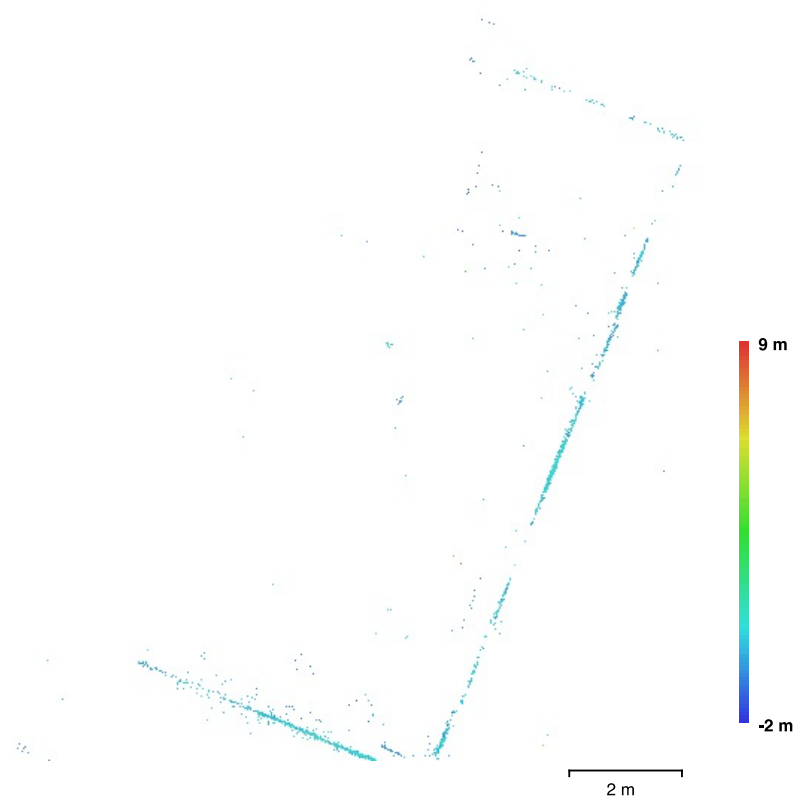


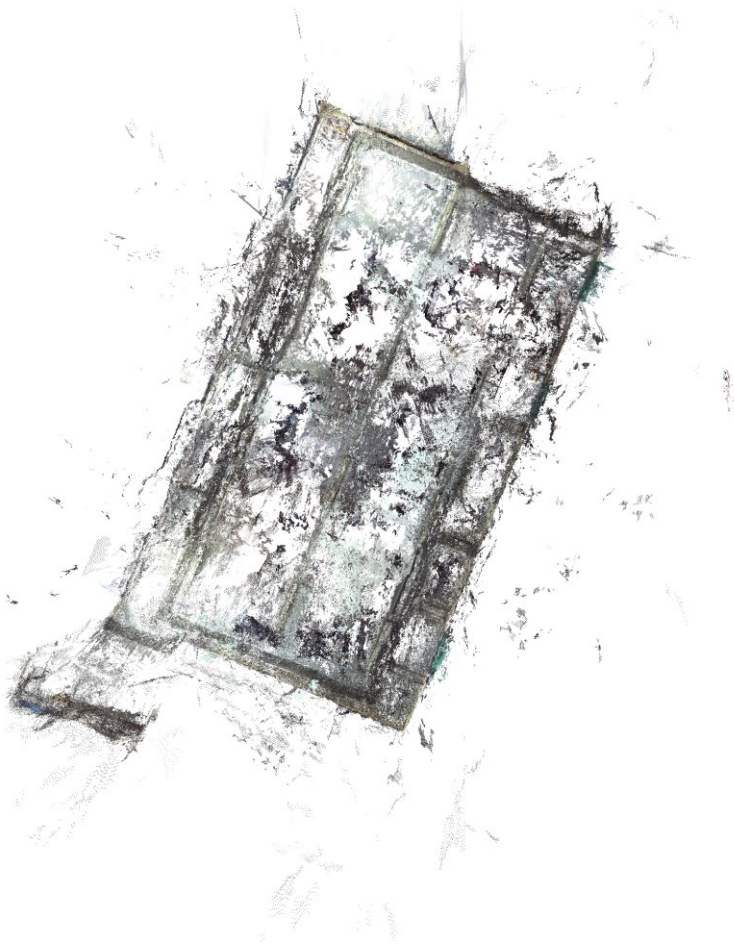
Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	30
Aligned cameras	10
Markers	26
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	2,305 of 3,331
RMS reprojection error	0.62249 (2.92999 pix)
Max reprojection error	16.4929 (66.4416 pix)
Mean key point size	5.31352 pix
Effective overlap	2.4353
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	No
Reference preselection	No
Key point limit	0
Tie point limit	1,000
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 minutes 34 seconds
Alignment time	4 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1, p2
Fit rolling shutter	No
Optimization time	0 seconds
Software	
Version	1.3.0 build 3772
Platform	Mac OS 64

Report_laboratorio

Processing Report
09 October 2017



Survey Data

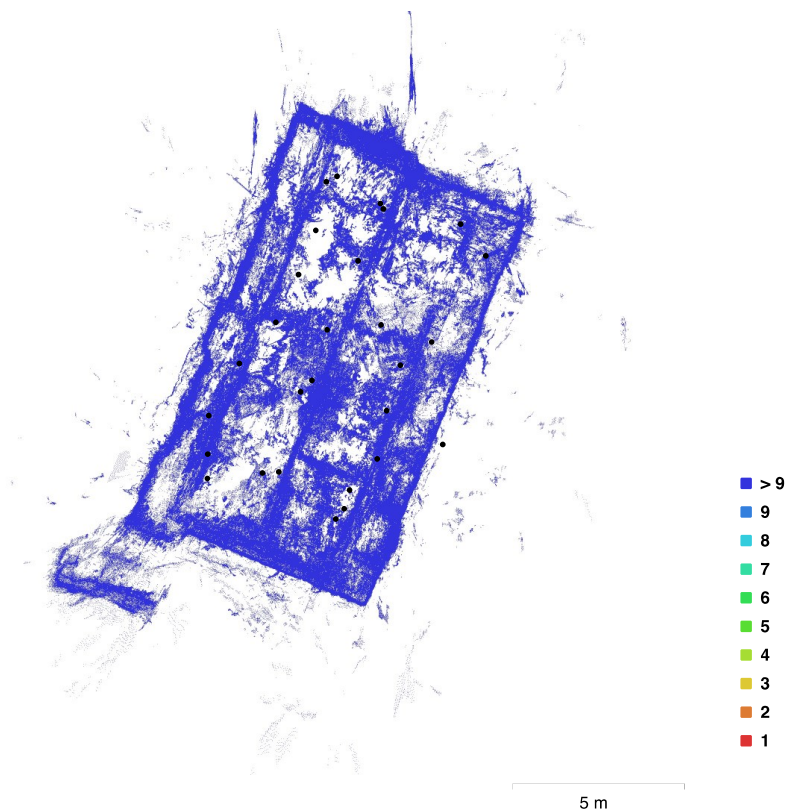


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	28	Camera stations:	28
Flying altitude:	5.46 m	Tie points:	8,365
Ground resolution:	3.47 mm/pix	Projections:	23,386
Coverage area:	69.9 m ²	Reprojection error:	1.73 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
iSTAR (2.67 mm)	5656 x 2828	unknown	unknown	No

Table 1. Cameras.

Ground Control Points

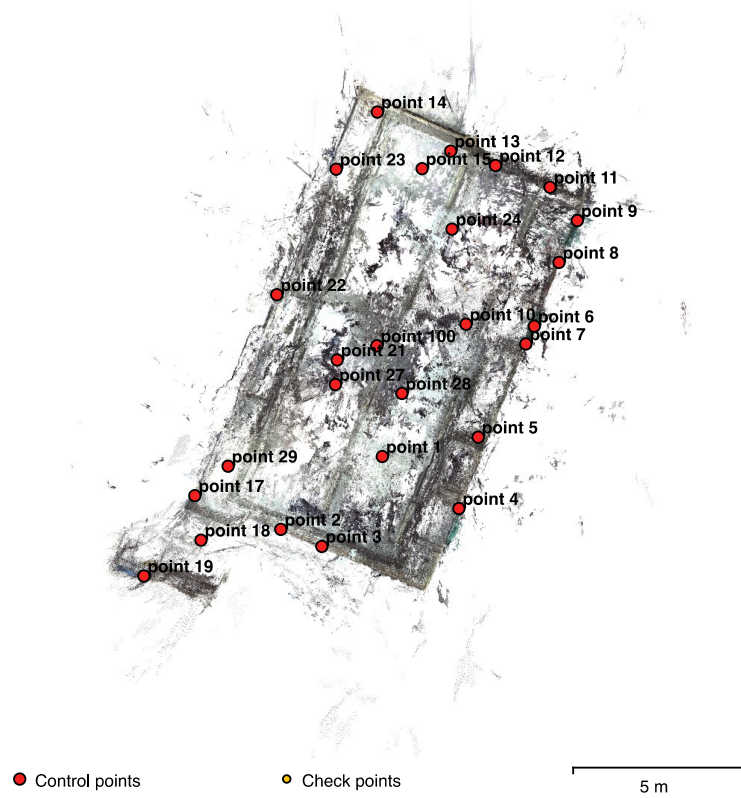


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
25	1.50538	1.15336	0.494981	1.89642	1.95995

Table 2. Control points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 1	0.320545	0.269918	0.0327595	0.420331	1.280 (14)
point 10	0.698424	0.339251	-0.0825796	0.780838	1.874 (15)
point 100					
point 11	0.504118	-0.729023	0.238764	0.917942	1.783 (17)
point 12	0.420949	-0.711667	0.228883	0.857937	1.705 (18)
point 13	-5.20231	2.49877	0.147916	5.77319	1.842 (12)
point 14	1.47839	-0.528487	0.000211085	1.57001	1.592 (10)
point 15	1.03553	-0.298577	0.532384	1.20204	1.910 (8)
point 17	1.16578	0.585887	-0.0373186	1.30526	1.055 (8)
point 18	-1.59594	-1.12997	0.00115073	1.95547	0.721 (4)
point 19	-2.78515	-1.76176	1.56828	3.6497	1.250 (8)
point 2	0.285313	1.18812	-0.344264	1.26947	1.121 (20)
point 21	0.829439	0.218062	-0.256059	0.895034	1.439 (11)
point 22	0.145674	0.260966	-0.677722	0.740697	1.737 (12)
point 23	-0.750223	1.31921	-0.683673	1.6645	1.693 (9)
point 24	0.55935	-0.173354	-0.0123713	0.585728	1.778 (8)
point 27	1.14561	1.09219	0.0601992	1.58396	1.029 (5)
point 28	2.84099	-3.31336	0.270683	4.37297	3.773 (4)
point 29	0.417187	-0.114042	-1.15801	1.23614	0.964 (3)
point 3	0.275628	1.2474	0.137888	1.2849	1.240 (19)
point 4	0.11856	0.247364	0.177664	0.326818	1.126 (16)
point 5	-0.431055	0.694498	-0.335176	0.883447	1.863 (22)
point 6	-0.486038	-0.358302	-0.455218	0.756199	1.559 (20)
point 7	0.270607	0.724209	-0.096191	0.779076	2.159 (17)
point 8	-0.322429	-0.586492	0.403916	0.781717	1.800 (18)
point 9	-1.31682	-1.45454	0.412659	2.00499	2.176 (18)
Total	1.50538	1.15336	0.494981	1.95995	1.686

Table 3. Control points.

Digital Elevation Model

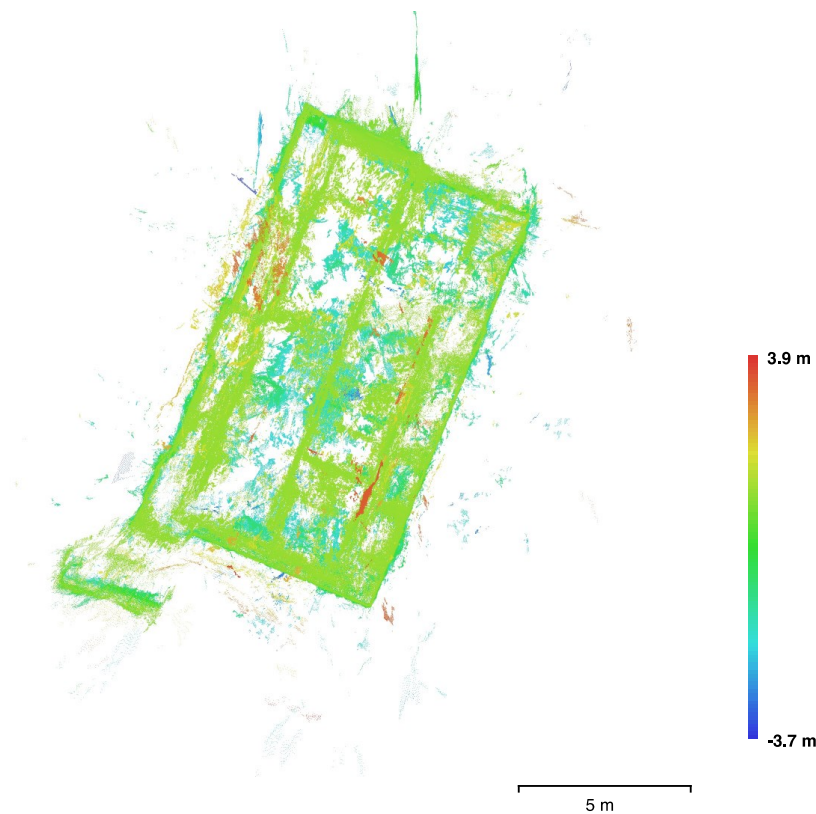


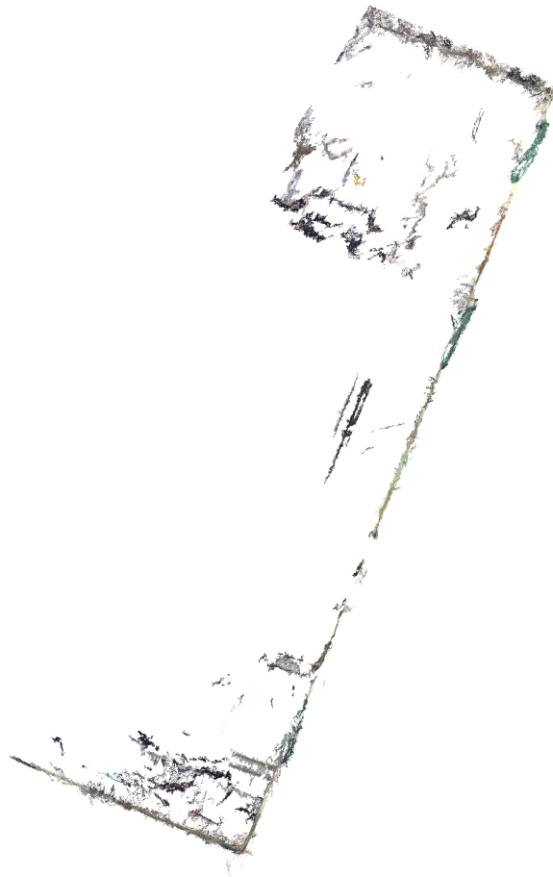
Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	28
Aligned cameras	28
Markers	26
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	8,365 of 22,353
RMS reprojection error	0.494928 (1.72939 pix)
Max reprojection error	8.52959 (21.391 pix)
Mean key point size	4.52709 pix
Effective overlap	3.24261
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	No
Key point limit	0
Tie point limit	0
Adaptive camera model fitting	No
Matching time	20 minutes 55 seconds
Alignment time	9 seconds
Optimization parameters	
Fit rolling shutter	No
Optimization time	0 seconds
Dense Point Cloud	
Points	3,880,450
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	2 hours 10 minutes
Dense cloud generation time	4 minutes 46 seconds
Software	
Version	1.3.0 build 3772
Platform	Mac OS 64

Report_laboratorio_immagini piane

Processing Report
10 October 2017



Survey Data

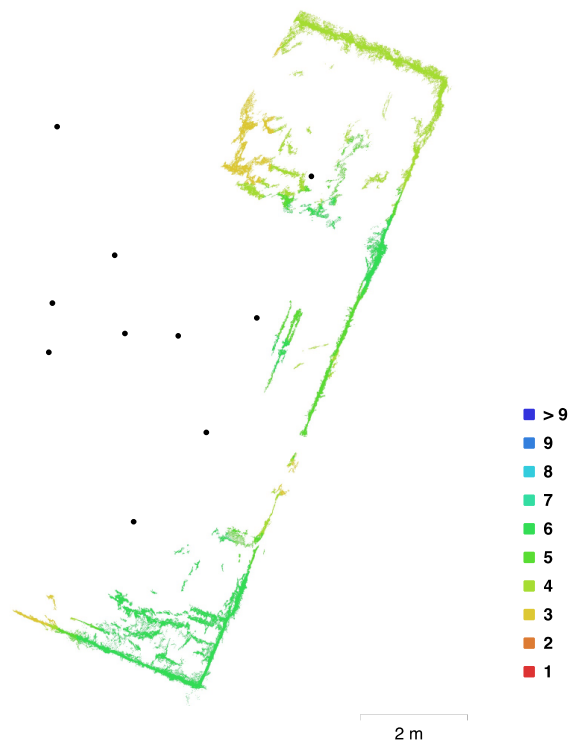


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	11	Camera stations:	10
Flying altitude:	5.61 m	Tie points:	2,703
Ground resolution:	2.3 mm/pix	Projections:	6,507
Coverage area:	3.7 m ²	Reprojection error:	0.904 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
unknown	2748 x 3664	unknown	unknown	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

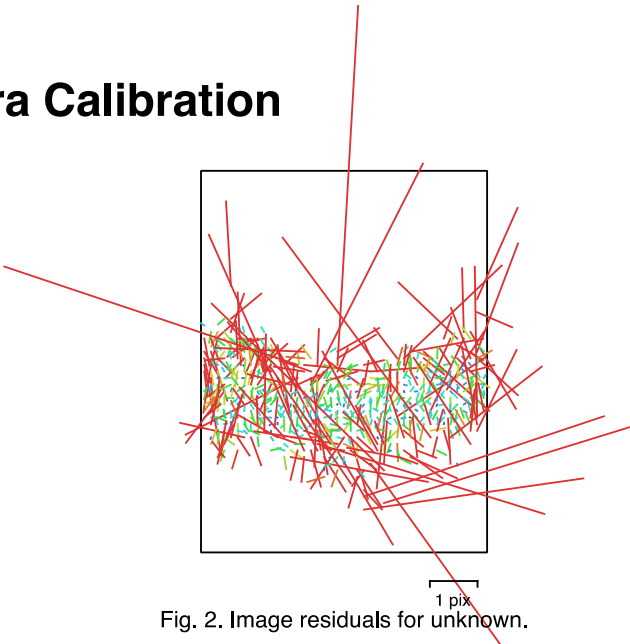


Fig. 2. Image residuals for unknown.

unknown
11 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Fisheye	2748 x 3664	unknown	unknown

	Value	Error	F	Cx	Cy	K1	K2	K3	P1	P2
F	1605.85	0.32	1.00	-0.01	0.10	-0.39	0.40	-0.39	0.26	-0.10
Cx	-10.8427	0.67		1.00	-0.13	0.09	-0.08	0.06	-0.51	-0.19
Cy	-3.95208	0.6			1.00	-0.13	0.17	-0.19	-0.02	-0.62
K1	-0.0229119	0.00067				1.00	-0.97	0.93	-0.17	-0.02
K2	0.0489338	0.0018					1.00	-0.99	0.22	0.00
K3	-0.0329911	0.0015						1.00	-0.22	0.02
P1	0.000187773	3.5e-05							1.00	0.25
P2	-0.000288461	4.5e-05								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

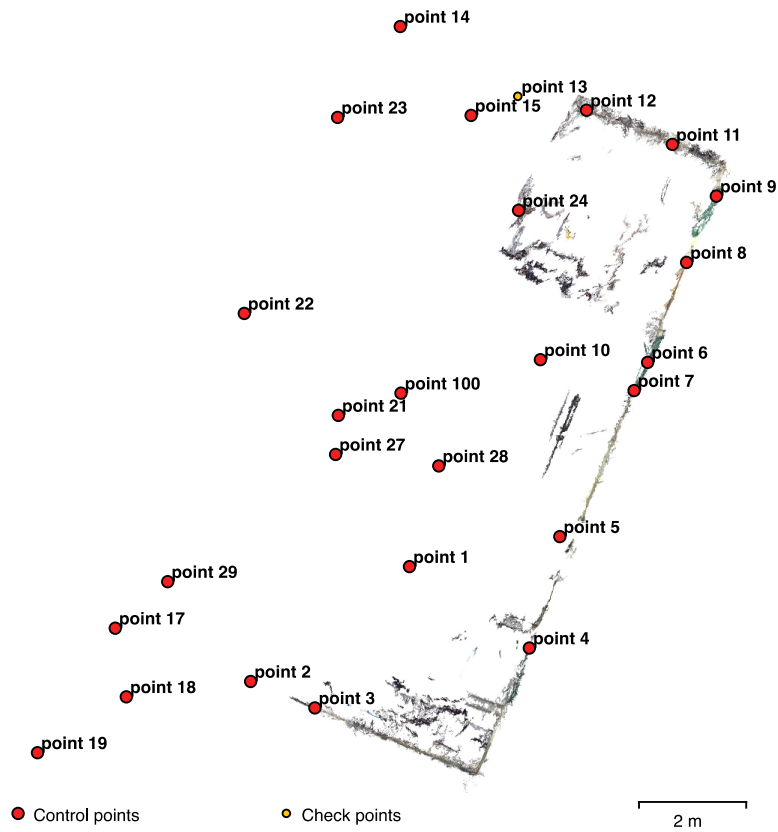


Fig. 3. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
13	0.525981	0.266051	0.250215	0.58944	0.640349

Table 3. Control points RMSE.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
1	3.35391	12.8305	0.0783845	13.2616	13.2618

Table 4. Check points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 1					
point 10	0.0995465	-0.29859	-0.457005	0.554905	0.196 (4)
point 100					
point 11	0.569836	0.0979626	0.0797388	0.583668	0.211 (4)
point 12	-0.211965	0.235957	0.0842779	0.328188	0.226 (4)
point 14	-1.35935	0.567596	-0.160713	1.48183	0.000 (1)
point 15	-0.307394	0.205819	-0.00298679	0.369948	0.028 (2)
point 17					
point 18					
point 19					
point 2	0.371815	-0.0855005	-0.111673	0.397527	0.010 (2)
point 21					
point 22					
point 23					
point 24					
point 27					
point 28					
point 29					
point 3	0.325921	0.0527578	0.357957	0.486971	0.024 (3)
point 4	-0.236572	0.1902	0.248032	0.391997	0.041 (5)
point 5	-0.321315	-0.0620741	-0.217875	0.393149	0.052 (4)
point 6	-0.38281	-0.085229	-0.168478	0.42684	0.115 (6)
point 7	-0.480633	-0.0697729	-0.244692	0.543829	0.150 (4)
point 8	-0.0687272	-0.456376	-0.0314771	0.462594	0.136 (4)
point 9	0.699066	0.361512	0.476341	0.919937	0.198 (4)
Total	0.525981	0.266051	0.250215	0.640349	0.143

Table 5. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
point 13	-3.35391	-12.8305	0.0783845	13.2618	0.142 (2)
Total	3.35391	12.8305	0.0783845	13.2618	0.142

Table 6. Check points.

Digital Elevation Model

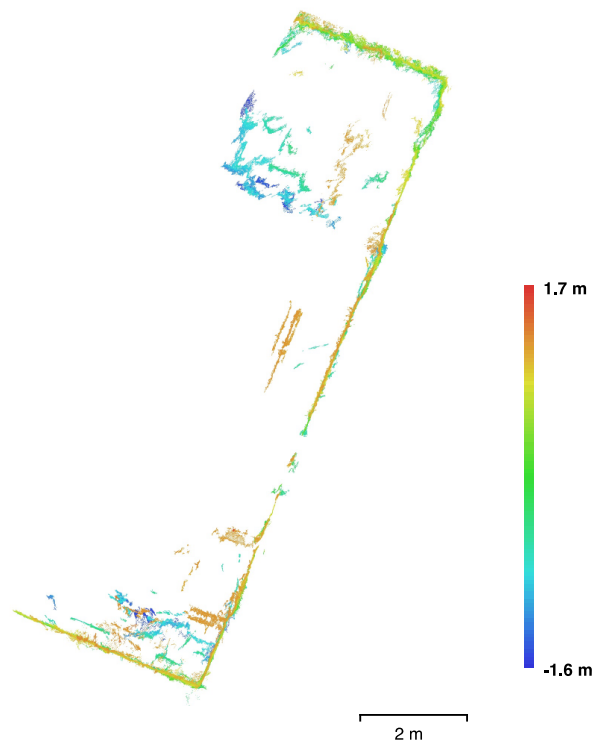


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	11
Aligned cameras	10
Markers	26
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	2,703 of 6,386
RMS reprojection error	0.156665 (0.903977 pix)
Max reprojection error	0.867923 (12.6335 pix)
Mean key point size	5.26535 pix
Effective overlap	2.29549
Alignment parameters	
Accuracy	High
Generic preselection	No
Reference preselection	No
Key point limit	0
Tie point limit	0
Constrain features by mask	No
Adaptive camera model fitting	Yes
Matching time	1 minutes 51 seconds
Alignment time	2 seconds
Optimization parameters	
Parameters	f, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Fit rolling shutter	No
Optimization time	0 seconds
Dense Point Cloud	
Points	764,707
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	1 minutes 53 seconds
Dense cloud generation time	16 seconds
Software	
Version	1.3.0 build 3772
Platform	Mac OS 64

Report_corridoio_half

Processing Report
09 October 2017



Survey Data

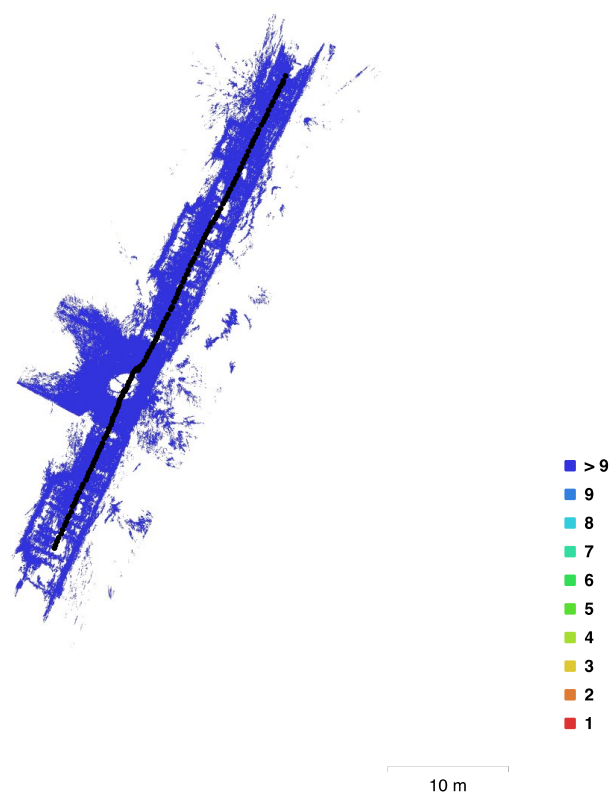


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	160	Camera stations:	142
Flying altitude:	4.05 m	Tie points:	46,368
Ground resolution:	2.54 mm/pix	Projections:	139,828
Coverage area:	241 m²	Reprojection error:	15.3 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
iSTAR (2.67 mm)	5656 x 2828	unknown	unknown	No
iSTAR (2.67 mm)	5656 x 2828	unknown	unknown	No
iSTAR (2.67 mm)	5656 x 2828	unknown	unknown	No
iSTAR (2.67 mm)	5656 x 2828	unknown	unknown	No

Ground Control Points

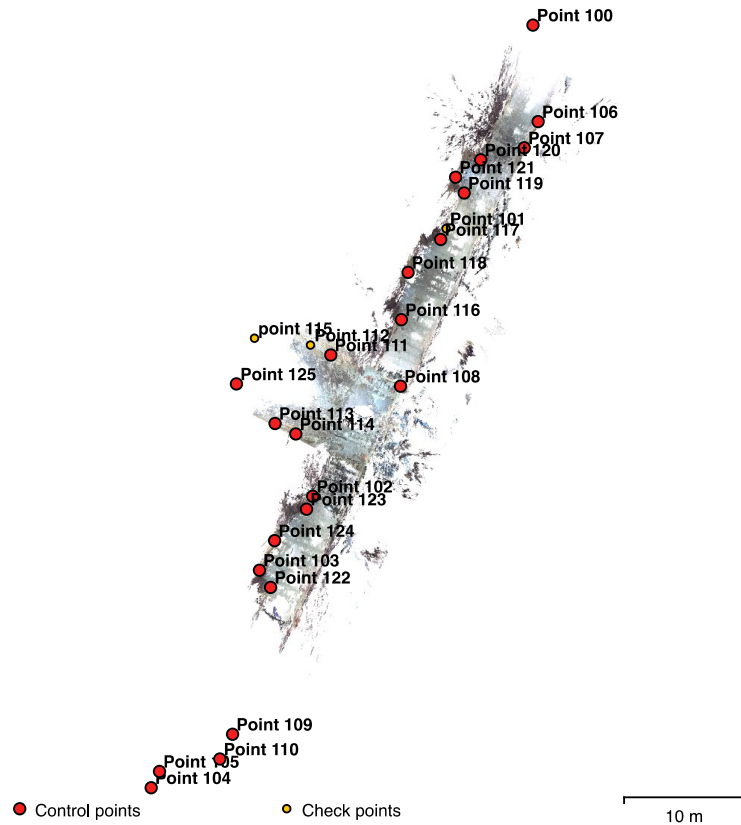


Fig. 6. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
13	2.32389	4.65881	4.00409	5.20624	6.56793

Table 2. Control points RMSE.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
3	16.2558	9.1374	9.30023	18.6479	20.8383

Table 3. Check points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
Point 100					
Point 102	2.0562	8.53222	-1.71819	8.94309	3.978 (12)
Point 104					
Point 105					
Point 106	0.982161	-3.18958	-0.951119	3.47026	0.204 (4)
Point 107	0.69922	2.13608	-2.07639	3.05993	0.369 (5)
Point 108	1.3773	-6.00729	3.61612	7.14568	0.042 (7)
Point 109					
Point 110					
Point 111	-3.96756	-8.24162	7.82814	12.0393	6.394 (8)
Point 113	1.21963	0.682252	-6.70858	6.85259	4.197 (8)
Point 116	-0.581979	-4.69973	3.30471	5.77471	2.458 (8)
Point 117	-1.94263	2.43482	-3.40393	4.61399	10.991 (8)
Point 118	-4.41425	-2.79036	6.1219	8.0467	3.115 (7)
Point 120	1.57628	4.74501	-0.87753	5.0764	5.944 (15)
Point 121	0.360504	1.06467	-2.70553	2.92974	4.458 (8)
Point 123	-0.285934	0.880314	-2.65661	2.81324	11.352 (10)
Point 125	4.3708	-5.47001	2.40075	7.40192	0.000 (1)
Point 103					
Point 114					
Point 119					
Point 122					
Point 124					
Total	2.32389	4.65881	4.00409	6.56793	6.068

Table 4. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
Point 101	1.66729	10.7049	-1.59697	10.951	0.133 (20)
Point 112	2.9349	-9.87413	5.27189	11.5717	5.439 (8)
point 115	-27.9528	6.19541	15.1374	32.3864	0.420 (2)
Total	16.2558	9.1374	9.30023	20.8383	2.813

Table 5. Check points.

Digital Elevation Model

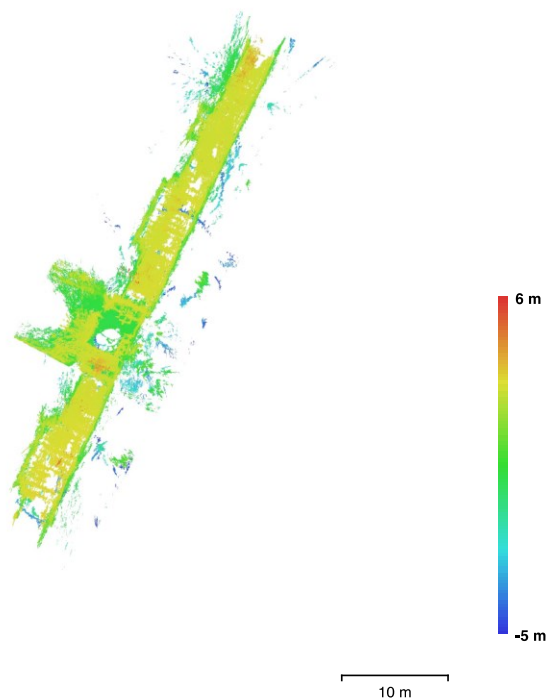


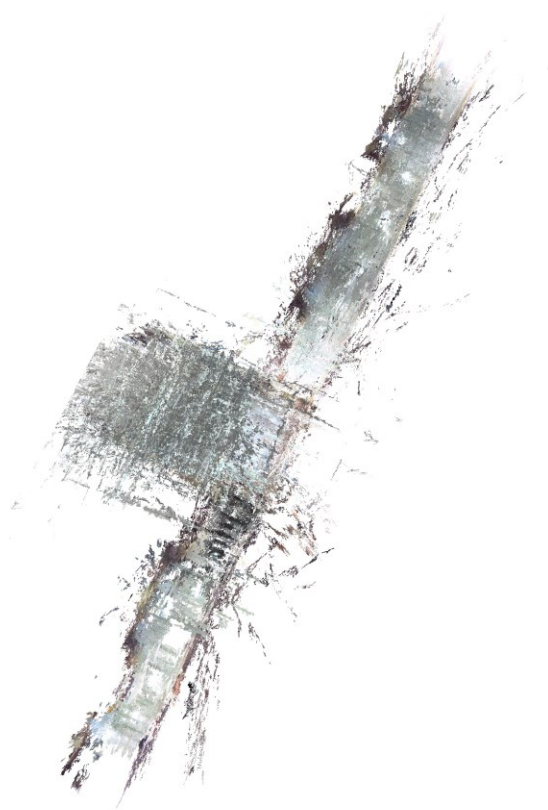
Fig. 7. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	160
Aligned cameras	142
Markers	26
Coordinate system	Local Coordinates (n
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	46,368 of 96,051
RMS reprojection error	1.46335 (15.2528 pix
Max reprojection error	342.497 (2589.72 pix
Mean key point size	9.0438 pix
Effective overlap	3.19276
Optimization parameters	
Fit rolling shutter	Yes
Optimization time	1 seconds
Dense Point Cloud	
Points	9,734,476
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	9 hours 3 minutes
Dense cloud generation time	42 minutes 33 secon
Software	
Version	1.3.0 build 3772
Platform	Mac OS 64

Report_corridoio_full

Processing Report
09 October 2017



Survey Data

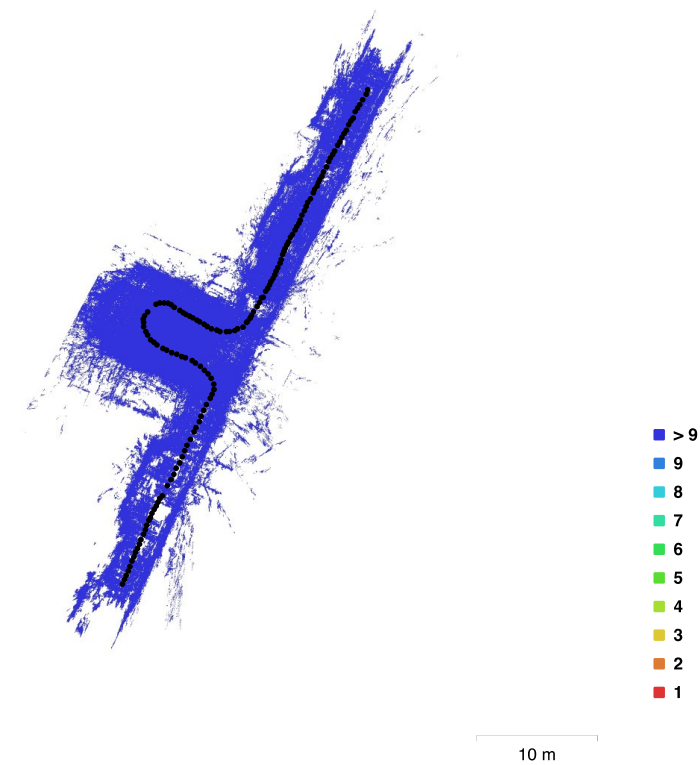


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	147	Camera stations:	147
Flying altitude:	3.57 m	Tie points:	32,728
Ground resolution:	2.97 mm/pix	Projections:	89,364
Coverage area:	328 m²	Reprojection error:	68.5 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
iSTAR (2.67 mm)	5656 x 2828	unknown	unknown	No
iSTAR (2.67 mm)	5656 x 2828	unknown	unknown	No
iSTAR (2.67 mm)	5656 x 2828	unknown	unknown	No
iSTAR (2.67 mm)	5656 x 2828	unknown	unknown	No

Ground Control Points

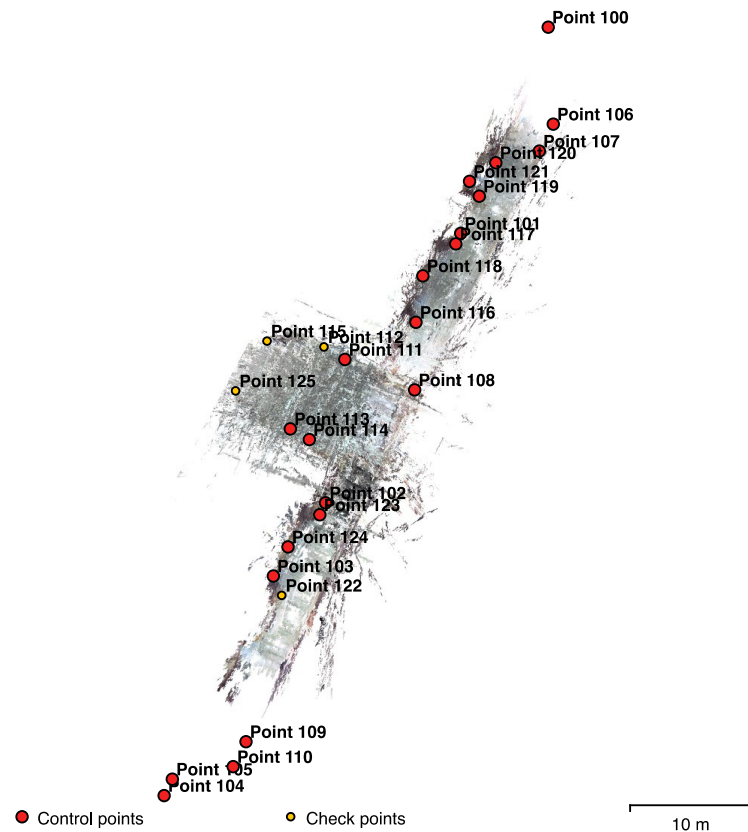


Fig. 6. GCP locations.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
15	4.69867	4.48987	2.33997	6.49896	6.90738

Table 2. Control points RMSE.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
4	60.5549	17.5057	7.16326	63.0345	63.4402

Table 3. Check points RMSE.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
Point 100					
Point 101	1.95331	1.07586	-1.21172	2.53794	2.682 (16)
Point 102	-5.89422	0.923517	1.47111	6.14483	3.442 (5)
Point 103	2.30921	3.25716	-2.58574	4.75685	7.922 (15)
Point 104					
Point 105					
Point 106					
Point 107					
Point 108	-0.315101	2.9554	-2.0056	3.58554	1.273 (13)
Point 109					
Point 110					
Point 111	-3.19763	-8.03026	1.2512	8.73358	15.053 (18)
Point 113	13.4139	-1.72262	2.09236	13.6849	12.014 (18)
Point 114	-2.27791	-4.66729	-3.76441	6.4143	11.533 (18)
Point 116	0.982059	9.20648	3.90189	10.0473	7.830 (32)
Point 117	1.17566	-4.01629	0.0832963	4.18565	4.520 (33)
Point 118	-1.06444	1.37655	0.276685	1.76195	1.970 (20)
Point 119	2.18147	1.2465	-3.71834	4.48761	3.059 (22)
Point 120	3.99723	5.97073	-1.41095	7.32245	3.511 (22)
Point 121	-6.66101	-6.61005	3.23728	9.92682	2.700 (14)
Point 123	-4.14566	1.49592	2.46272	5.04869	5.717 (20)
Point 124	-2.46097	-2.42395	-0.0804024	3.4552	11.285 (20)
Total	4.69867	4.48987	2.33997	6.90738	7.642

Table 4. Control points.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
Point 112	-0.634088	11.9874	-1.52419	12.1005	8.868 (17)
Point 115	-36.2486	19.3774	2.26593	41.1652	2.825 (12)
Point 122	-21.4521	-13.5826	-10.5333	27.4887	16.339 (20)
Point 125	-113.548	-22.8503	9.31886	116.198	24.355 (15)
Total	60.5549	17.5057	7.16326	63.4402	15.647

Table 5. Check points.

Digital Elevation Model

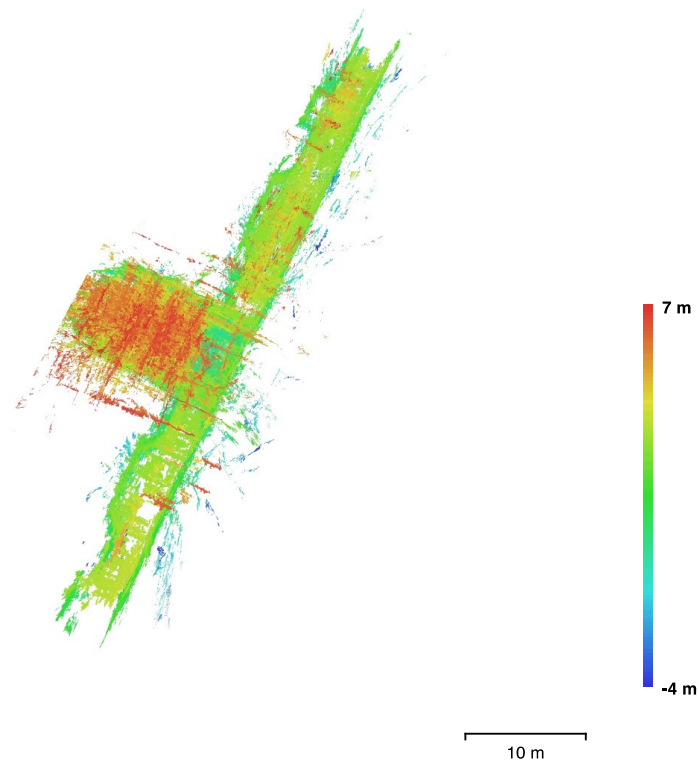


Fig. 7. Reconstructed digital elevation model.

Processing Parameters

General	
Cameras	147
Aligned cameras	147
Markers	26
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Rotation angles	Yaw, Pitch, Roll
Point Cloud	
Points	32,728 of 63,663
RMS reprojection error	9.97562 (68.47 pix)
Max reprojection error	770.722 (3117.79 pix)
Mean key point size	11.6997 pix
Effective overlap	2.94834
Optimization parameters	
Fit rolling shutter	No
Optimization time	0 seconds
Dense Point Cloud	
Points	13,350,123
Reconstruction parameters	
Quality	High
Depth filtering	Aggressive
Depth maps generation time	8 hours 22 minutes
Dense cloud generation time	49 minutes 7 seconds
Software	
Version	1.3.0 build 3772
Platform	Mac OS 64

Estrapolazione informazioni Laboratorio

