

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale



Politecnico di Torino

Tesi di Laurea Magistrale

Realizzazione di un sistema automatizzato per le ispezioni visive

Relatore

Prof. Maurizio Galetto

Candidato

Raffaele Picardo

Anno Accademico 2021/2022

ABSTRACT

Il presente elaborato di tesi ha come obiettivo principale l'implementazione di un set up fisico per un sistema di ispezione visiva automatizzata basato sulla tecnica della fotogrammetria. Attraverso l'analisi della letteratura scientifica si evince che questo argomento è ancora in fase iniziale in quanto ancora non vi sono dei veri e propri sistemi di ispezione visiva che sfruttano la fotogrammetria. Infatti, questa tecnica viene solitamente utilizzata per il rilevamento topografico del territorio ma in questo studio la fotogrammetria viene impiegata per ricostruire digitalmente in 3D l'oggetto che si vuole ispezionare e di cui si vogliono ottenere misure.

Nella prima fase del lavoro svolto è stato costruito il sistema fotogrammetrico. Esso è composto sia parti hardware e software e consente la ricostruzione digitale di qualsiasi oggetto. Successivamente, l'obiettivo è quello di rilevare delle misure direttamente dalla geometria tridimensionale ottenuta con il sistema sviluppato. Ciò viene effettuato tramite software specifici in commercio in maniera manuale ma la prospettiva futura di questo studio è quello di automatizzare il rilevamento di tali misure sfruttando la machine vision e il pattern recognition.

Dopo un'accurata rilevazione delle misure, viene approfondita la tematica dell'incertezza di misura del sistema relativa sia a dimensioni che a forma degli oggetti analizzati.

Per concludere, per verificare la bontà di tali misure, vengono effettuati dei confronti tramite test d'ipotesi tra le misure ottenute con il sistema fotogrammetrico e misure ottenute con sistemi convenzionali con performance elevate, come sistema a luce strutturata o microscopi, con l'obiettivo di constatare che tramite il sistema implementato si ottengono misure paragonabili a quelle che si hanno con i sistemi tradizionali.

INDICE

Abstract.....	1
1 ISPEZIONE VISIVA AUTOMATIZZATA	5
1.1 Introduzione	5
1.2 Ispezione	5
1.2.1 Ispezione visiva manuale	7
1.2.2 Machine vision e ispezione visiva automatizzata	9
1.2 ARCHITETTURA DEI MODERNI SISTEMI DI MACHINE VISION	12
1.2.1 Sistema basato su PC	13
1.2.2 Sistema integrato	14
1.2.3. Smart camera.....	14
1.3 CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI VISIVI INDUSTRIALI	15
1.3.1 Qualità dimensionale.....	16
1.3.2 Qualità di superficie	17
1.3.3 Qualità strutturale.....	19
1.3.4 Qualità operativa.....	19
1.4 ALGORITMI DI MACHINE VISION.....	19
1.4.1 Algoritmi di elaborazione e analisi di immagini.....	20
1.4.2 Algoritmi di classificazione	21
2 FOTOGRAMMETRIA	24
2.1 Cenni storici.....	24
2.2 Principio di base della fotogrammetria	25
2.2.1 Modello matematico della fotocamera.....	27
2.2.2 Workflow	29
2.2.3. Confronto con laser scanning.....	30
2.3 Fotogrammetria digitale.....	31
2.3.1 Immagini digitali	31
2.3.2 Stazioni di lavoro fotogrammetriche digitali	33
2.3.3. Image matching.....	35
2.4 Fotogrammetria a distanza ravvicinata	36
2.4.1 Tecnologie dei sensori	38
2.5 Taratura della fotocamera	41
2.5.1 Taratura dei sistemi off-line	41
2.5.2 Taratura dei sistemi on-line.....	42

2.6	Misurazioni	42
2.6.1	Misurazione di un singolo punto	42
2.6.2	Misurazione di punti multipli	43
2.6.3	Misurazione di superfici	43
2.6.4	Structure for motion (fotogrammetria multimmagine)	44
3	Definizione di concetti di metrologia industriale	47
3.1	Caratteristiche metrologiche	47
3.1.1	Risoluzione	47
3.1.2	Sensibilità	47
3.1.3	Stabilità	48
3.1.4	Precisione	48
3.1.5	Giustezza	49
3.1.6	Accuratezza	49
3.1.7	Incertezza	49
3.1.8	Taratura	50
4	Progettazione sistema	51
4.1	Fotocamera	51
4.2	Tavola rotante	52
4.3	Markers	53
4.3.1	Coordinate dei marker	54
4.3.2	Distanze tra i marker	63
4.4	Software per fotogrammetria: Agisoft Metashape	65
4.4.1	Flusso di lavoro	66
4.5	Software per la misurazione delle mesh: Atos Professional 2020	68
5	Caratterizzazione metrologica del sistema di misura	69
5.1	Metodologia	69
5.2	Caso studio Ball-bar	69
5.2.1	Misurazioni GOM	69
5.2.2	Misurazioni sistema fotogrammetrico	71
5.2.3	Test d'ipotesi	82
5.3	Caso studio: saldatura laser	86
5.3.1	Misurazioni al microscopio	87
5.3.2	Misurazioni sistema fotogrammetrico	88
5.3.3	Test d'ipotesi	90
6	Ulteriori misurazioni	91

6.1 Circuito stampato	91
6.2 Tagliente	92
7 Conclusioni.....	94
Bibliografia.....	95

1 ISPEZIONE VISIVA AUTOMATIZZATA

1.1 Introduzione

Nella produzione industriale, l'ispezione del prodotto è una fase importante del processo di produzione e ha lo scopo di confermare la qualità del prodotto in relazione ai suoi requisiti e standard. Poiché l'affidabilità del prodotto è uno degli aspetti fondamentali, il processo di ispezione è normalmente uno dei costi più consistenti della produzione. L'ispezione visiva cerca di identificare entrambi difetti funzionali ed estetici e indubbiamente l'automazione delle ispezioni va ad incrementare la produttività e migliorare la qualità del prodotto.

Al giorno d'oggi quasi tutti i beni prodotti industrialmente vengono ispezionati visivamente più o meno intensamente. In precedenza, tale compito veniva svolto o da personale specializzato, opportunamente formato a tal fine, o da normali dipendenti in aggiunta al loro lavoro abituale. Oggigiorno, le ispezioni visive automatizzate e la machine vision si stanno sempre più diffondendo in ambito della misurazione industriale e nel controllo qualità nei settori tecnico e ingegneristico. Lo sviluppo di queste tecniche è agevolato in particolar modo da computer con prestazioni sempre più potenti e da prezzi ragionevoli per i componenti delle fotocamere.

Inoltre, progressi nella tecnologia informatica, nei dispositivi di rilevamento, nell'elaborazione delle immagini e nei modelli riconoscimento hanno portato ad un'attrezzatura per l'ispezione visiva industriale migliore e più economica. L'ispezione visiva automatizzata per la produzione è ora di ampio uso commerciale e in rapida espansione. L'industria elettronica è quella più attiva nell'applicare l'ispezione visiva automatizzata a prodotti come i circuiti stampati, chip di circuiti integrati, e circuiti ibridi.

1.2 Ispezione

Con il termine "ispezione" si intende un processo, o procedura, atta ad esaminare attributi di una parte e determinare se è conforme o meno alle specifiche di progettazione. Gli attributi che vengono esaminati possono essere quantitativi (es. dimensioni) o qualitativi (es. aspetto). L'ispezione è generalmente effettuata a garantire la qualità del prodotto desiderata, minimizzando lo spreco di materiali (rottami), gli arresti dei sistemi di produzione, le interruzioni nel flusso di produzione, la restituzione della merce venduta e, in generale, per salvaguardare la reputazione aziendale.

L'ispezione, anche se garantisce il prodotto qualità, richiede tempo e spesso è molto costosa. È naturale, quindi, chiedersi se sia possibile trascurare la fase di ispezione. Ci sono casi, per quanto rari, in cui si può eliminare l'ispezione completamente o sottoporsi a un'ispezione minima. Le situazioni che favoriscono l'assenza di ispezioni produzione sono quelli in cui l'indice di capacità di processo (C_p) supera in modo significativo 1 ma è inferiore a 2 ($\geq 1,33$ per un esistente processo e $\geq 1,50$ per un nuovo processo (Montgomery, 1985)). L'indice di capacità di processo è uno strumento statistico che permette di misurare la capacità di un processo di generare un output che soddisfa i limiti di specifica ed è definito come:

$$Cp = \frac{USL - LSL}{6s}$$

In questa condizione, la differenza tra la specifica superiore e inferiore limiti è maggiore della tolleranza naturale limite ($\pm 3s$) di un processo. Il Cp può anche essere significativamente maggiore di 1 se il processo è stabile e la variabilità del processo s è piccola. In effetti, ci sono aziende che sono state in grado di ridurre la variabilità del processo ad a punto che la produzione senza ispezione è possibile (ad es. stampanti laserjet Hewlett Packard (Mital et al 1998)). Tuttavia, per la stragrande maggioranza dei produttori l'ispezione rimane un'attività essenziale e critica sia a causa della variabilità del processo (s grande), sia per il fatto di limiti delle specifiche ($USL-LSL$) troppo stretti, che determinano una frazione significativa della produzione che non soddisfa le specifiche.

Ispezione visiva significa "ispezionare guardando". Da un lato, l'ispezione visiva è preposta a garantire specifiche caratteristiche qualitative dei beni intermedi o finali, e dall'altro, può essere utilizzata per rilevare e analizzare le variazioni di un processo di produzione (Mullany et al 2022). I singoli compiti dell'ispezione visiva possono essere suddivisi nella seguente ispezione categorie:

- *Riconoscimento di oggetti conosciuti e pattern*: verifica della presenza di componenti;
- *Correttezza di posizione e orientamento*: verifica sul posizionamento e sull'orientamento dei componenti;
- *Persistenza di dimensioni, forma e angoli di componenti e strumenti*: determinazione di misure e verifica del soddisfacimento delle tolleranze dimensionali;
- *Condizione della superficie e texture*: verifica della condizione e dei limiti di tolleranza delle superfici;
- *Proprietà ottiche*: verifica del colore e dei comportamenti di riflessione dei componenti;
- *Identificazione dei materiali*: rilevamento e classificazione di diversi materiali;
- *Difetti sia estetici che tecnici*: rilevamento di tracce di vernice sulla superficie (difetto estetico) e rilevamento di graffi sui componenti ottici (difetto tecnico).

1.2.1 Ispezione visiva manuale

Con l'ispezione visiva manuale tutte le attività legate all'ispezione sono eseguite da esperti umani. Anche se il sistema visivo umano, composto da occhi e cervello, ha numerose capacità che oggi non possono essere fornite da una macchina con prestazioni competitive, l'ispezione visiva effettuata dall'uomo presenta alcuni gravi svantaggi. Innanzitutto, l'essere umano è più lento delle macchine e si stanca rapidamente. Inoltre, gli esperti umani sono difficili da trovare o mantenere in un settore, richiedono formazione e le loro competenze possono richiedere tempo per svilupparsi. Ci sono anche casi in cui l'ispezione tende a essere noiosa o difficile, anche per gli esperti più preparati. In alcune applicazioni, informazioni precise devono essere estratte e utilizzate in modo rapido o ripetitivo e in alcuni ambienti (ad es. ispezione subacquea, industria nucleare, industria chimica, ecc.) l'ispezione può essere difficile o pericolosa. La machine vision può sostituire efficacemente l'ispezione umana in casi così impegnativi in quanto un adeguato sistema automatizzato funziona senza fatica, produce risultati imparziali e riproducibili, e permette un'analisi completa e dettagliata documentazione.

Contrariamente ai sistemi di ispezione visiva basati su machine vision, il sistema visivo umano può essere facilmente ingannato da illusioni ottiche, il che rappresenta un grosso svantaggio dell'ispezione visiva manuale. L'esempio seguente, in Fig. 1.1, che risale a Adelson, mostra le difficoltà degli umani a riconoscere due sfumature di grigio.

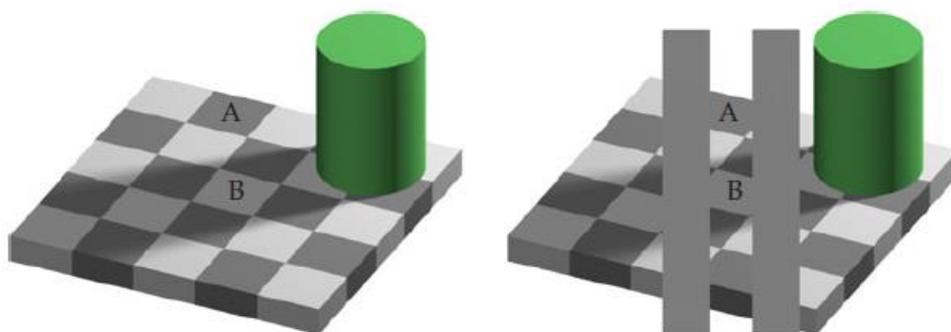


Fig. 1.1: illusione ottica di Adelson, l'immagine a destra prova che le zone A e B hanno lo stesso valore di grigio

Per un osservatore umano, è difficile credere che le zone 'A' e 'B' della scacchiera in figura hanno lo stesso valore di grigio. Ma questo può essere verificato rapidamente coprendo la figura con un pezzo di carta colorato avente dei fori esattamente nella posizione delle zone 'A' e 'B'. L'immagine digitale della scacchiera è rappresentata da una matrice di valori di grigio e sistema visivo automatizzato confronterebbe solo i valori corrispondenti alle due zone, notando loro uguaglianza, e non si farebbe ingannare.

Inoltre, gli esseri umani non hanno una "memoria fotografica" per le tonalità e le intensità dei colori. Ad esempio, se si vuole fare un'operazione di riverniciatura e quindi è necessario acquistare lo stesso colore quale l'oggetto da riparare è dipinto, molto probabilmente un essere umano comprerà il colore sbagliato se si basa solo sulla memoria del colore desiderato. Con un sistema automatizzato, le tonalità e le intensità di colore possono essere confrontate quantitativamente senza difficoltà se le immagini

corrispondenti sono state acquisite nelle stesse condizioni e quindi non fallirà in questa operazione.

Tuttavia, non è sempre ragionevole puntare a una soluzione completamente automatizzata. Molti sistemi di ispezione visiva implementati con successo hanno tecnicamente risolto soltanto le attività che possono ben essere automatizzate. Tutto il resto, in particolare ciò che può essere fatto particolarmente bene da un essere umano, sarà fatto manualmente e quindi si stabilisce un sistema uomo-computer, che combina i punti di forza della tecnologia con quelli di un essere umano in modo simbiotico.

Il sistema visivo umano ha, comunque, enormi capacità cognitive che un sistema di machine vision non possiede. Nella Fig. 1.2 vengono riportati due esempi di attività che possono essere svolti facilmente da un operatore umano. Per l'immagine in Fig. 1.2(a) un operatore umano può riconoscere senza alcuna esitazione il carattere '5'. Diversamente, un computer dovrebbe prima discriminare tra le due texture, riconoscere le aree collegate, e quindi classificare l'area tratteggiata come un '5' confrontandola con schemi noti. Per l'immagine in Fig. 1.2(b) un essere umano, grazie alle sue capacità cognitive e al suo intuito, riesce a riconoscere immediatamente il triangolo che copre parzialmente i tre cerchi.

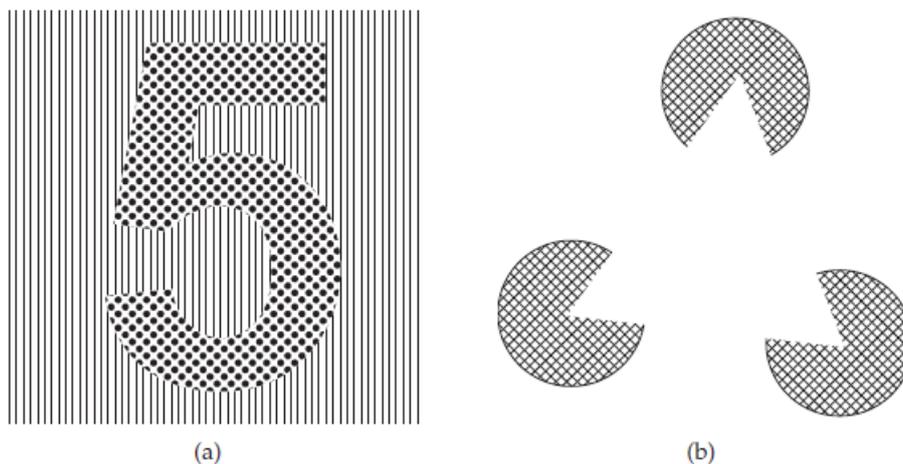


Fig. 1.2: attività che possono essere svolte facilmente dagli umani

Questi esempi mostrano chiaramente che un essere umano risolve determinati compiti visivi rapidamente e senza alcun problema. Tuttavia, un essere umano non è consapevole del processo sottostante, ovvero non è consapevole dei suoi algoritmi. Per lo sviluppo di sistemi di ispezione visiva automatizzati, di solito è necessaria una codifica. Un pensiero comune nel campo pratico dell'ispezione visiva automatizzata è che se un problema è facile da risolvere per un essere umano, questo deve essere altrettanto facile creare programmi automatizzati equivalenti, ma nella realtà non è così.

1.2.2 Machine vision e ispezione visiva automatizzata

La machine vision viene definita come un insieme di tecnologie e metodi computazionali usate per estrarre informazioni da un'immagine. I sistemi di machine vision sono progettati per sostituire gli operatori umani nel processo di ispezione industriale e ottenere un processo di produzione e un controllo qualità più robusto e più performante. Lo scopo della machine vision è ampio ed essa può essere applicata ad un'ampia gamma di attività come la guida di precisione per robot, il controllo qualità, lo smistamento, la movimentazione di materiali, la calibratura ottica, l'assemblaggio automatizzato e l'ispezione di prodotti, come circuiti integrati, parti di veicoli e componenti, alimentari e farmaceutici.

Grazie all'evoluzione di hardware per la machine vision, come fotocamere intelligenti, illuminazione a LED, telecamere a tempo di volo (ossia uno strumento che permette di stimare in tempo reale la distanza tra la telecamera e gli oggetti o la scena inquadrati, misurando il tempo che occorre ad un impulso luminoso per percorrere il tragitto telecamera-oggetto-telecamera), processori multicore e unità di elaborazione grafica (GPU), si è potuta realizzare una soluzione conveniente e con alte prestazioni per le attività di ispezione.

Il processo di ispezione visiva automatizzata prevede l'osservazione dello stesso tipo di oggetto ripetutamente per rilevare anomalie. Il processo inizia con l'imaging del componente da essere ispezionato da uno o più sensori da cui vengono raccolti e inviati dati visivi al processore per l'analisi. Le caratteristiche che rappresentano l'oggetto vengono quindi estratte e abbinate ad un modello predefinito. Questo processo di corrispondenza tra caratteristica e modello è la tecnica più comune per rilevare i difetti. Dopo il rilevamento, vengono prese le decisioni per classificare l'oggetto in un tipo di difetto. La sequenza di attività di un sistema di machine vision è mostrata in Fig. 1.3, che deve essere letta dal basso verso l'alto.

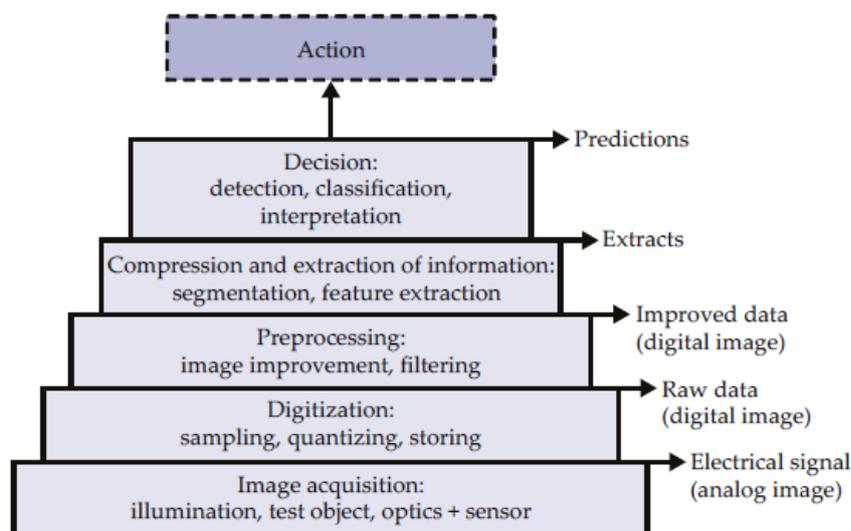


Fig. 1.3: sequenza di attività di un sistema di machine vision

1. *Acquisizione dell'immagine*: vengono acquisite immagini contenenti le informazioni richieste in forma digitale tramite fotocamere, digitalizzatori, ecc. La luce emessa dalla sorgente luminosa interagisce con l'oggetto di prova, passa attraverso la lente, e infine raggiunge il sensore, dove viene trasformato in un segnale elettrico. Questo segnale analogico, che di solito è una tensione elettrica, è discretizzato e limitato rispetto allo spazio e all'ampiezza.
2. *Digitalizzazione*: il segnale elettrico viene processato da un computer e salvato come un'immagine digitale.
3. *Elaborazione delle immagini*: una volta acquisite le immagini digitali, esse vengono filtrate per rimuovere i rumori di sottofondo o riflessi indesiderati dal sistema di illuminazione. Può anche essere applicato il restauro delle immagini per migliorare la qualità e correggere le distorsioni geometriche introdotte dal sistema di acquisizione (es. telecamera).
4. *Estrazione delle caratteristiche*: dalle immagini vengono estratte un insieme di caratteristiche note, in modo tale da poter raggiungere una migliore classificazione. Esempi di tali caratteristiche includono dimensioni, posizione, misurazione del profilo tramite rilevamento dei bordi, nonché misurazioni di texture sulle regioni. Tali caratteristiche possono essere calcolate e analizzate da statistiche o altre tecniche di calcolo (es. neurali reti (NN)). L'insieme delle caratteristiche calcolate costituiscono la descrizione dell'immagine in input.
5. *Decision-making*: il primo passo nel processo decisionale tenta di ridurre la dimensione dello spazio delle caratteristiche alla dimensione intrinseca del problema. L'insieme delle caratteristiche viene, poi, elaborato per prendere una decisione. Questa decisione, così come i tipi di caratteristiche e misure calcolate, dipende dall'applicazione. Per esempio, nel caso di ispezione visiva durante la produzione il sistema decide se le parti prodotte soddisfano alcuni standard di qualità andando a confrontare le caratteristiche elaborate con qualche modello noto.

I risultati di questa elaborazione possono essere utilizzati per:

- controllare un processo di produzione (ad es. per guidare i bracci di un robot nella collocazione di componenti su circuiti stampati, ecc.).
- ulteriori elaborazioni (es. classificazione) se trasferiti ad altri dispositivi esterni
- caratterizzare i difetti di articoli difettosi e intraprendere azioni per la segnalazione e correzione di tali guasti e la sostituzione o la rimozione delle parti difettose dalla linea di produzione.

1.2.1.1 Esempio freni a disco

Al giorno d'oggi, i dischi dei freni della maggior parte delle automobili sono ventilati internamente per motivi di raffreddamento (Beyerer et al 2015), come mostrato in Fig. 1.4(a). I dischi dei freni sono generalmente realizzati in ghisa lamellare. Le cavità sono formate utilizzando anime in sabbia il cui fissaggio viene rimosso dopo la solidificazione del metallo, in modo che la sabbia possa essere rimossa dalle cavità. Queste anime in sabbia sono più o meno fragili. Le anime in sabbia rotte possono essere la causa di canali di ventilazione parzialmente o completamente chiusi, che rendono inutilizzabile il freno a disco. Molto spesso, le colate sono ispezionate visivamente dall'uomo. A causa dei canali posizionati radialmente, il lavoratore deve ruotare il disco del freno per verificare se tutti siano liberi. Considerando che tali colate possono raggiungere un peso compreso tra 15 e 50 kg, è chiaro che questa operazione grava pesantemente su un lavoratore umano. Questa attività di ispezione può essere automatizzata molto bene. In questo esempio viene implementato un metodo che produce un'immagine ad altissimo contrasto che può essere utilizzata per verificare simultaneamente se tutti i canali di ventilazione sono liberi. Per far ciò viene acquisita un'immagine binaria (immagine in bianco e nero), mostrata in Fig. 1.4(b), che rende l'analisi quasi banale e quindi estremamente attendibile.

Poiché questa immagine contiene solo informazioni utili lungo uno stretto anello circolare, la struttura può essere ritagliata e trasformata in un sistema di coordinate polari, dove avrà una forma lineare e quindi potrà essere visualizzata su un display in maniera efficiente, come riportato in Fig. 1.4(c).

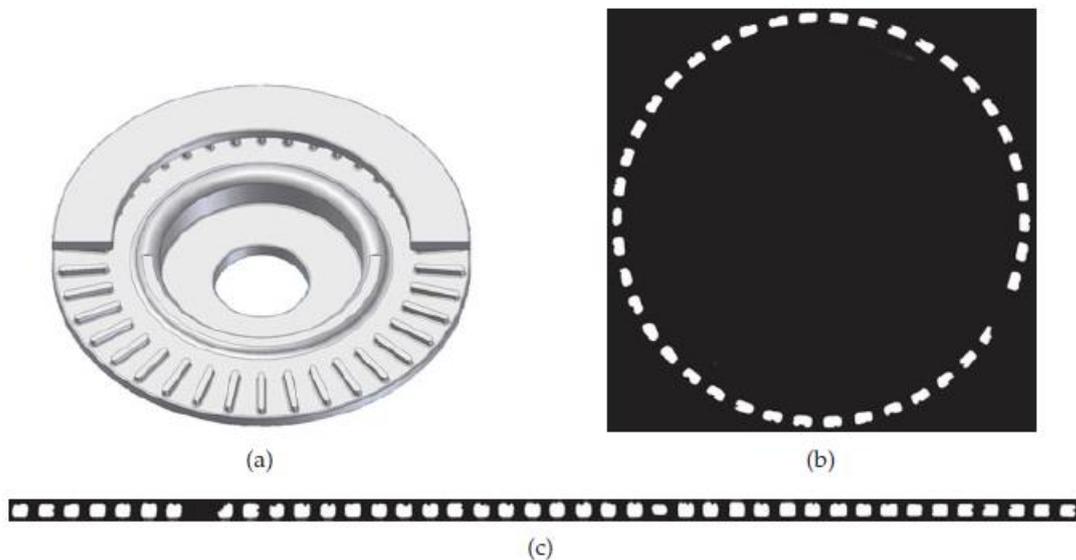


Fig. 1.4: ispezione visiva automatizzata dei canali di ventilazione di un freno a disco: (a) schizzo di un freno a disco ventilato internamente con canali di ventilazione disposti radialmente; (b) risultato dell'acquisizione dell'immagine; (c) la sezione dell'immagine rilevante per l'ispezione trasformata in coordinate polari

1.2 ARCHITETTURA DEI MODERNI SISTEMI DI MACHINE VISION

I requisiti per la progettazione e lo sviluppo di un sistema visivo di successo variano a seconda del dominio dell'applicazione e sono correlati alle attività da svolgere. Non esiste un sistema di visione industriale in grado di gestire tutte le attività in ogni campo di applicazione. Proprio per questo, le decisioni riguardo la progettazione e lo sviluppo dell'applicazione possono essere prese solo una volta che siano stati specificati i requisiti di un particolare dominio dell'applicazione. Il primo problema da risolvere nell'automazione di un sistema di machine vision è capire che tipo di informazioni il sistema deve recuperare e come queste devono essere tradotte in misure o caratteristiche estratte dalle immagini. Per esempio, è importante specificare in anticipo cosa significhi 'difettoso' in termini di misurazioni e regole in modo tale da implementare appropriatamente le attività nel software o nell'hardware.

Affinché il sistema sia affidabile, è necessario andare a ridurre al minimo, per quanto possibile, la probabilità di accettare parti non conformi e la probabilità di rifiutare parti conformi. Rendere il sistema affidabile è una responsabilità delle unità di processo e di classificazione, ma è opportuno dire che l'efficacia della classificazione è fortemente influenzata anche dalla qualità delle immagini acquisite. Un sistema visivo industriale deve essere anche robusto, ossia deve ottenere prestazioni costantemente elevate nonostante eventuali irregolarità nell'illuminazione o nello sfondo. È difficile ottenere prestazioni robuste poiché si ottengono solo alti tassi di riconoscimento e classificazione soltanto in determinate condizioni di buona illuminazione e basso rumore. Infine, un sistema di visione industriale deve essere veloce e costoso efficiente.

Un moderno sistema di machine vision consiste in dispositivi digitali di input/output e reti di computer per il funzionamento automatico di apparecchiature o sistemi di controllo qualità. Ci sono fondamentalmente tre categorie di sistemi (Liu et al 2015):

1. *sistema basato su PC;*
2. *sistema integrato (embedded) e*
3. *smart camera.*

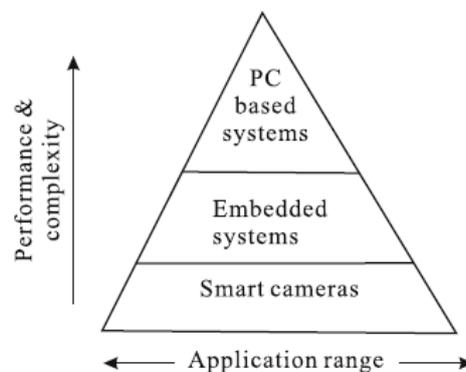


Fig. 1.5: panoramica dei tre tipici sistemi di machine vision

La Figura 5 mostra i tre tipi di sistema. I sistemi basati su telecamere intelligenti coprono una gamma più ampia di applicazioni, mentre i sistemi di visioni integrati e basati su PC offrono maggiore flessibilità e maggiori prestazioni a causa di una maggiore complessità del sistema.

1.2.1 Sistema basato su PC

Un tipico sistema di machine vision basato su PC è composto dai seguenti componenti come illustrato in Fig. 1.6:

- telecamere e lenti
- dispositivo di illuminazione
- frame grabber
- software per l'ispezione
- interfaccia digitale I/O e connessione di rete

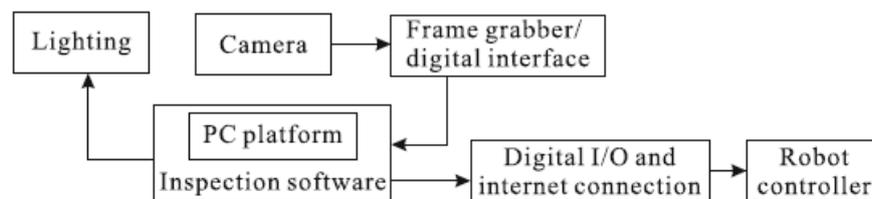


Fig. 1.6: un tipico Sistema basato su PC per l'ispezione industriale e il controllo qualità

Il sistema di machine vision basato su PC utilizza una o più telecamere e obiettivi per catturare un'immagine dell'oggetto in ispezione. Possono essere utilizzate diversi tipi di telecamere, come quella monocromatica, a colori RGB, a scansione progressiva o a scansione lineare. Per garantire una migliore qualità dell'immagine, l'oggetto viene illuminato con il dispositivo di illuminazione. L'illuminazione può essere data da lampade fluorescenti ad alta frequenza, emettitori di luce diodo (LED), fibra ottica a incandescenza e lampade alogene e può essere configurata in varie forme e dimensioni con diversi livelli di intensità. Il frame grabber o digitalizzatore video è un dispositivo elettronico che cattura singoli fotogrammi digitali da un segnale video analogico o da un flusso video digitale e fornisce anche funzionalità di interfaccia di basso livello con gli altri componenti del sistema ed il computer. Esso può anche controllare la fotocamera impostando l'attivazione, tempo di esposizione/integrazione, velocità, ecc. La piattaforma PC esegue l'ispezione software per elaborare i dati delle immagini acquisite per prendere una decisione binaria, ad es. accettare/rifiutare. Per varie attività di ispezione, è necessario sviluppare algoritmi utilizzando appropriati strumenti software. Tramite l'interfaccia Input/Output digitale e/o la connessione di rete viene eseguito lo scambio di dati e la comunicazione con sistemi e database esterni. Ogni sistema di machine vision basato su PC deve essere configurato in base agli specifici requisiti e all'obiettivo dell'ispezione.

1.2.2 Sistema integrato

La visione integrata può essere considerata come la fusione tra il computer vision e sistemi embedded.

La sequenza di attività che sono svolte in questi sistemi è del tutto analoga a quella dei sistemi basati su PC ma contrariamente ai computer generici riprogrammabili un sistema embedded ha dei compiti noti già durante lo sviluppo, che andrà grazie ad una combinazione hardware/software specificamente studiata per la tale applicazione. Grazie a ciò l'hardware può essere ridotto ai minimi termini per contenerne lo spazio occupato limitando così anche i consumi, i tempi di elaborazione (maggiore efficienza) ed il costo di fabbricazione. Inoltre, l'esecuzione del software è spesso in tempo reale per permettere un controllo deterministico dei tempi di esecuzione.

La visione integrata è diventata una tecnologia chiave per l'ispezione automatizzata nella produzione e per i sistemi di controllo qualità. Di solito è la visione integrata è implementata con una combinazione di elementi di elaborazione, come CPU, processore di segnale digitale (DSP) ad alte prestazioni e un gran numero di processori che lavorano simultaneamente in parallelo.

I sistemi di visione integrati sono generalmente sviluppati sia per accelerare algoritmi complessi che gestiscono grandi flussi di dati provenienti da immagini, ad esempio stereo matching e compressione di video, sia per ridurre al minimo la potenza nei sistemi con risorse limitate, compresi i droni o i sistemi di assistenza alla guida autonoma.

La visione integrata viene ampiamente adottata nelle applicazioni di ispezione industriale e sta diffondendo ampiamente nei mercati con l'emergere di processori programmabili ad alte prestazioni, a basso costo ed efficienti dal punto di vista energetico.

1.2.3. Smart camera

Una Smart Camera (o telecamera intelligente) è un sistema di visione compatto che integra entro un unico contenitore lenti, sensori, processori, interfacce da fotocamera a computer, e software ed eseguono un'analisi in tempo reale di ciò che vedono. L'architettura complessiva di una smart telecamera è illustrata in Fig. 1.7.

Questa architettura consente di realizzare applicazioni più compatte rispetto a soluzioni tradizionali che utilizzano elaboratori esterni (spesso dispositivi dedicati o PC) per elaborare le immagini riprese dalla telecamera.

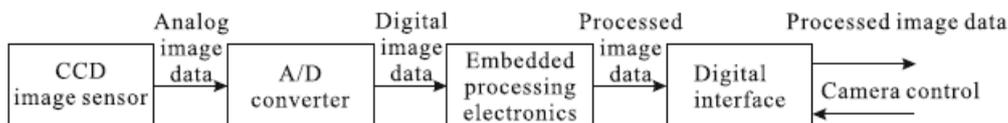


Fig. 1.7: architettura di una smart camera

L'impiego di microprocessori dedicati con sistemi operativi relativamente semplici ha spesso il vantaggio di una maggiore affidabilità in ambienti industriali e consente l'avviamento del sistema in frazioni di secondo. La presenza di un processore dedicato in

ogni telecamera semplifica applicazioni in cui numerose unità debbano operare indipendentemente e contemporaneamente.

In generale, nel settore della visione, i tradizionali sistemi basati su PC stanno venendo sempre più rimpiazzati da telecamere intelligenti poiché quest'ultime, oltre che una maggiore semplicità di utilizzo, presentano anche un costo relativamente basso.

I vantaggi più importanti delle smart camera sono l'alta velocità di elaborazione e un basso consumo energetico sono e la ragione per cui i Vision System on Chip sono considerati la tendenza per il futuro.

1.3 CLASSIFICAZIONE DEI SISTEMI VISIVI INDUSTRIALI

I sistemi visivi industriali possono essere classificati a seconda della caratteristica che si vuole ispezionare. In particolare, possiamo avere quattro categorie di ispezione (Malamas et al 2003):

1. Ispezione della qualità dimensionale;
2. Ispezione della qualità di superficie;
3. Ispezione del corretto assemblaggio (qualità strutturale) e
4. Ispezione della qualità operativa



Fig. 1.8 Categorie di sistemi visivi industriali

Ispezione	Caratteristiche
Dimensionale	Dimensioni, forma, posizionamento, orientamento, angoli
Di superficie	Graffi, crepe, usura, finitura, rugosità
Strutturale	Assemblaggio (fori, asole, rivetti, viti, morsetti); Corpi estranei (polvere)
Operazionale	Incompatibilità delle operazioni a norme e specifiche

Tab. 1: Potenziali caratteristiche dei prodotti ispezionati

La Tab.1 esplicita alcune delle caratteristiche più comuni ispezionate.

Si nota che, nonostante le differenze intrinseche nella natura delle quattro categorie di ispezione, queste hanno in comune la finalità di conferma del soddisfacimento degli standard di qualità, che è, nella maggior parte dei casi, si esplicita in una decisione binaria ("si/no"). La Fig. 1.8 mostra questa relazione.

1.3.1 Qualità dimensionale

Verificare se le dimensioni di un oggetto sono all'interno tolleranze specificate o se gli oggetti hanno la forma corretta, sono compiti ordinari per i sistemi visivi industriali che implicano l'ispezione delle caratteristiche geometriche degli oggetti, in due o tre dimensioni. Diverse industrie sono coinvolte nello sviluppo di sistemi di visione per la misurazione automatizzata della qualità dimensionale. Per esempio, nell'industria dell'imballaggio, i compiti variano dalla misurazione del livello di riempimento in bottiglie fino all'ispezione delle bombole dell'airbag (ad es. sistemi online di misura che rilevano l'altezza, la concentricità e diametro delle bombole dell'airbag).

1.3.1.1 PCB

Una delle applicazioni per sistemi visivi industriali più diffuse è l'ispezione e la classificazione dei giunti di saldatura su circuiti stampati (PCB), Kim et al. nel loro articolo (Kim et al 1999) ne mostrano un esempio.

L'elaborazione delle immagini PCB consiste in due fasi principali. Per prima cosa viene eseguita una preelaborazione per rimuovere il rumore e rendere più semplice il tracciamento dei giunti di saldatura sull'immagine del PCB. Quindi, i giunti di saldatura vengono classificati in base al tipo di difetto. Vengono definite quattro classi di giunto, ovvero buono, eccesso di saldatura, insufficiente e senza saldatura.

In questo articolo scientifico, per l'ispezione dei giunti di saldatura è proposta una classificazione a due stadi che utilizza sia il 2D che il 3D. Il primo stadio presenta una rete neurale che utilizza funzionalità 2D e il secondo, invece, è un classificatore bayesiano che utilizza la funzionalità 3D. Se il valore massimo dei nodi di output è inferiore a 0,7 (non nell'intervallo di confidenza), viene utilizzato il secondo stadio con il classificatore bayesiano assumendo che la distribuzione sia gaussiana.

L'intera procedura di ispezione è mostrata nella Fig. 1.9.

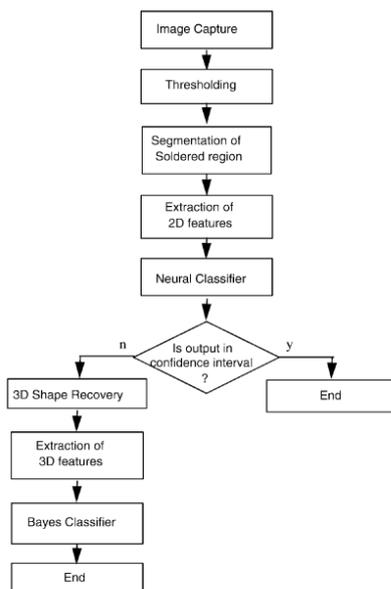


Fig. 1.9: processo d'ispezione

La performance di questo classificatore proposto è stata valutata in termini di tasso di riconoscimento ed il tempo di esecuzione, prendendo come riferimento un campione di 203 elementi. Utilizzando solo funzioni 2D, il tasso di riconoscimento è del 99,5%. Invece, includendo anche le funzionalità 3D, che richiedono più calcoli, il tasso di riconoscimento arriva al 100%. Ma con un tempo di esecuzione di 19,83 s, ovvero circa 10 volte più lungo del calcolo delle caratteristiche 2D.

1.3.2 Qualità di superficie

I compiti tipici di un sistema di ispezione della qualità di superficie sono l'individuazione di graffi, crepe, usura sulle pareti di un oggetto o il controllo delle superfici per la corretta finitura, rugosità e struttura. Utilizzando sistemi di visione per il rilevamento dei guasti e per la verifica della qualità si ottengono significativi risparmi di manodopera soprattutto nel settore tessile, del legno e metallurgico.

1.3.2.1 Cuciture tessili

L'ispezione superficiale automatizzata può essere utilizzata nel settore tessile per andare ad eseguire il controllo qualità delle cuciture. Balhmann et al. nel loro articolo (Balhmann et al 1999) ne mostrano un esempio.

Il sistema è costituito da un adeguato setup per l'acquisizione delle immagini, un algoritmo per la localizzazione della cucitura, una fase di estrazione delle caratteristiche e una rete neurale per classificazione delle cuciture.

Il processo consiste nelle seguenti quattro distinte fasi:

1. *Acquisizione delle immagini*: vengono scattate delle foto alle cuciture da analizzare. I campioni vengono disposti verticalmente e la fotocamera viene

posizionate frontalmente rispetto ad essi. Infine, vi è un'illuminazione a fascio con un angolo di 20° rispetto al piano del campione per ottenere migliori risultati.

2. *Rilevamento e allineamento della cucitura*: viene utilizzata una trasformazione di Hough per rilevare la cucitura e per traslare e ruotare l'immagine della cucitura in una posizione normalizzata.
3. *Estrazione delle caratteristiche*: Dall'immagine normalizzata, vengono estratte le caratteristiche per classificazione della qualità. Il vettore delle caratteristiche si basa su coefficienti di Fourier selezionati lungo le colonne di pixel a diverse distanze parallela alla cucitura.
4. *Classificazione*: Le caratteristiche selezionate sono classificate in cinque qualità categorie, utilizzando una mappa delle caratteristiche auto-organizzante (mappa di Kohonen).

Le prestazioni del sistema sono state valutate dalla classificazione di 200 esemplari di cucitura di colore e materiale variabile. I risultati mostrano che anche con poche caratteristiche, ma ben scelte, possono essere raggiunti buoni risultati di classificazione. Il tasso di classificazione ammonta a circa l'80% di classificazioni corrette (rispetto alle classificazioni date dagli esperti umani), il restante 20% differisce dal voto corretto soltanto di un valore (su una scala di cinque). Confrontando questo risultato con l'errore degli esperti umani, che può essere misurato dal disaccordo tra un comitato di diversi esperti, si nota che si raggiunge il medesimo livello di accuratezza. Tuttavia, il tempo necessario per la classificazione su un PC standard è di circa 1 s, che è molto meno di quello di cui hanno bisogno gli esperti tessili (30 s).

Una panoramica del processo è mostrata in Fig. 1.10.

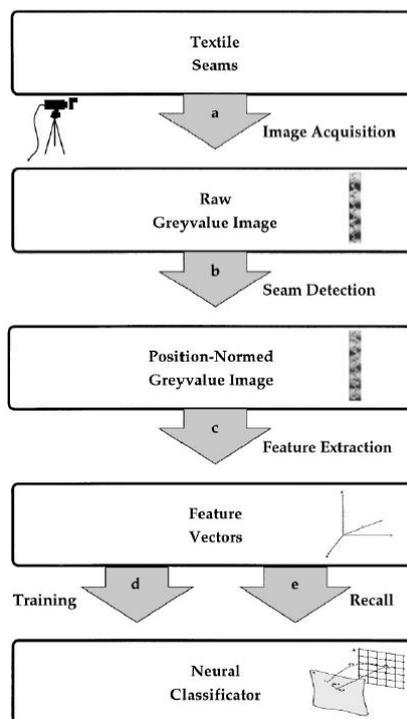


Fig. 1.10: struttura del sistema

1.3.3 Qualità strutturale

I tipici compiti di questa classe di ispezione di qualità sono la verifica della presenza di componenti mancanti (es. viti, rivetti, ecc.) sulle parti assemblate e la verifica della presenza di oggetti estranei o extra.

L'ispezione della qualità strutturale può essere applicata ai componenti PCB. Si presume che gli oggetti ispezionati (componenti elettronici) presentino piccole variazioni in dimensione o forma ma variazioni significative nelle immagini a livello di grigio.

Innanzitutto, per l'addestramento del sistema, si utilizzano dei campioni di PCB per costruire dei modelli statistici dei livelli di grigio. Successivamente, viene utilizzata una tecnica di ricerca multi-risoluzione per individuare il modello che meglio rappresenti una regione di un'immagine di input. Infine, viene utilizzata anche una misura di adattamento per determinare se vi è davvero una corrispondenza tra modello e regione ispezionata. Il metodo mostra tassi di errore accettabili per l'uso in un ambiente reale (cioè 1 su 1000 campioni).

1.3.4 Qualità operativa

L'ispezione della qualità operativa è correlata alla verifica delle corrette operazioni eseguite sui prodotti ispezionati secondo gli standard di fabbricazione.

Un esempio è dato dall'ispezione dei giunti di saldatura laser. Una telecamera cattura la traccia del cordone di saldatura e determina il percorso di saldatura e la dimensione del gioco. Viene, poi, eseguita una fase di eliminazione del rumore. Successivamente, vengono calcolati il percorso di saldatura e il gioco da immagini di saldatura segmentate mediante un filtro laplaciano. Le informazioni elaborate, quindi, permettono il controllo automatico della testa laser per la saldatura.

1.4 ALGORITMI DI MACHINE VISION

Un generico algoritmo di machine vision, come rappresentato in Fig. 1.10, consiste in una sequenza di fasi utili ad elaborare immagini acquisite. Le fasi iniziali servono a correggere distorsioni geometriche causate dalle lenti, ad aumentare il contrasto e a stabilizzare le immagini. La successiva serie di fasi converte le immagini grezze in informazioni sugli oggetti identificando i bordi, il colore, la dimensione e altri attributi. L'ultima serie di fasi, infine, consiste nell'applicazione di inferenze statistiche sugli oggetti per classificarli.

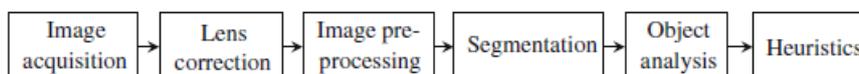


Fig. 1.10: fasi di un generico algoritmo di machine vision

1.4.1 Algoritmi di elaborazione e analisi di immagini

L'elaborazione delle immagini viene solitamente eseguita all'interno di rettangoli, cerchi o lungo linee e archi. Le operazioni di elaborazione delle immagini includono il filtraggio (ad es. levigatura, nitidezza), il rilevamento dei bordi, operazioni morfologiche, ecc.

Tali operazioni possono essere utilizzate per migliorare la qualità dell'immagine (ad es. rimuovere il disturbo, migliorare il contrasto) e per migliorare o separare alcuni attributi dell'immagine (ad es. regioni, bordi) dallo sfondo. Le operazioni di elaborazione delle immagini trasformano un'immagine di input in un'altra immagine aventi desiderate caratteristiche.

L'analisi delle immagini trasforma le immagini in misurazioni. In particolare, l'analisi dell'immagine è correlata all'estrazione e alla misurazione di alcune caratteristiche dell'immagine (ad es. linee e angoli) e trasforma queste caratteristiche dell'immagine in numeri, vettori, stringhe di caratteri, ecc.

L'analisi dell'immagine prevede operazioni di estrazione delle caratteristiche (ad es. la trasformata di Hough per il rilevamento di linee e curve) e operazioni che misurano l'intensità luminosa media, struttura e la forma come descrittori di Fourier. L'obiettivo finale dell'analisi delle immagini è il riconoscimento di pattern, ovvero l'estrazione di caratteristiche che possono essere utilizzate dai classificatori per riconoscere o classificare oggetti.

La Figura 1.11 mostra gli algoritmi di elaborazione delle immagini classificati da Dechow per i vari compiti di ispezione che includono la caratterizzazione di attributi e difetti, e l'orientamento 2D e 3D.

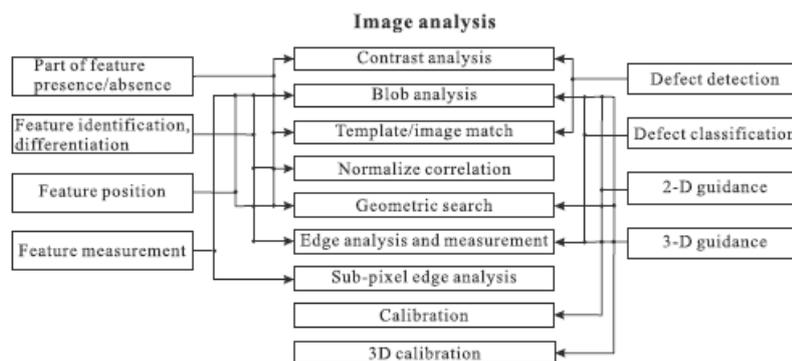


Fig. 1.11: algoritmi per i vari compiti di ispezione

Le caratteristiche dell'immagine vengono evidenziate ed estratte tramite operazioni, come filtraggio, miglioramento del contrasto e segmentazione.

Il rilevamento Blob (riconoscimento di regioni) ha l'obiettivo di rilevare punti e/o regioni in una immagine che differisce in proprietà come luminosità o colore comparata con l'ambiente.

Gli algoritmi di correlazione e ricerca geometrica trovano una caratteristica predefinita, che viene proiettata in una nuova immagine con diverse dimensioni e scala.

Il template matching viene eseguito per classificare e interpretare le immagini. Per il rilevamento dei difetti, gli algoritmi in Fig. 1.11 sono configurati per lavorare insieme e condurre analisi. Per classificare ulteriormente i difetti, è possibile eseguire l'analisi Blob o Edge in modo tale da caratterizzare i difetti e confrontarli con parametri noti.

Infine, per ottenere una risoluzione a livello di sub-pixel si può misurare la posizione di una linea, di un punto o di un bordo nell'immagine con una precisione superiore alla risoluzione nominale in pixel dell'immagine.

1.4.2 Algoritmi di classificazione

1.4.2.1 Reti neurali (NN)

Una rete neurale (NN "Neural Network" in inglese) è un modello matematico/informatico di calcolo basato sulle reti neurali biologiche.

Esse vengono applicate con successo in un'ampia gamma di applicativi in economia, medicina, geologia e fisica per risolvere problemi di predizione, classificazione e controllo.

Le NN sono composte da un numero di unità simili di elaborazione elementari (neuroni) collegate tra loro in una rete, come mostrato in Fig 1.12. I neuroni sono disposti a strati e al primo stato vi sono i dati di input. I dati attraversano la rete e vengono elaborati di livello in livello fino ad arrivare allo strato di output.

Le reti neurali adattano i pesi dei loro neuroni durante un periodo di apprendimento e dopo questo periodo una rete neurale è in grado di mettere in relazione i dati del problema agli spazi di soluzione, ovvero generare una relazione input/output, offrendo così una valida soluzione a un nuovo problema diverso dagli esempi usati in fase di addestramento. Esse sono in grado di gestire un'ampia varietà di compiti di classificazione delle immagini nella visione industriale, che vanno dalla semplice misurazione a problemi avanzati di classificazione, come rilevamento guasti, riconoscimento ottico dei caratteri, previsione del funzionamento, monitoraggio e controllo, ecc. (Malamas et al 2003)

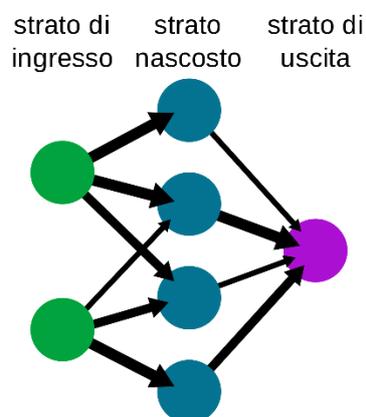


Fig. 1.12: rete neurale

Le NN possono essere utilizzati sia come tecniche autonome o in combinazione con altri metodi e vengono applicate in tutte le classi di ispezione di qualità introdotte, vale a dire la qualità dimensionale, qualità di superficie, qualità strutturale e operativa (Malamas et al 2003). Esse sono applicabili in quasi tutte le situazioni dove vi è una relazione tra parametri di input di e output, anche nei casi in cui questa relazione è molto complessa e non può essere espressa o gestita da mezzi matematici o altri mezzi di modellazione.

1.4.2.2 Sistemi fuzzy (FS)

L'utilizzo di sistemi fuzzy (FS) e sistemi neuro-fuzzy (NFS) hanno apportato grandi benefici in svariate applicazioni di machine vision. Esempi di tali applicazioni sono ispezione della qualità del sughero, identificazione delle tolleranze dimensionali dei componenti meccanici, controllo qualità ecc. (Malamas et al 2003).

Il concetto cardine di un insieme fuzzy (fuzzy set) è che ogni elemento può appartenere all'insieme con un certo grado di appartenenza rappresentato da un numero che va da 0 ad 1, diversamente dalla logica bivalente secondo cui un elemento può appartenere totalmente ad un insieme (assumendo valore 1) oppure non appartenervi (assumendo valore 0). Questo livello di appartenenza ad un insieme viene descritto mediante una funzione, detta appunto "funzione di appartenenza" ("membership function"), che assume valori compresi tra 0 e 1 (dove 1 denota appartenenza a pieno titolo e 0 indica nessuna appartenenza) seguendo andamenti di crescita/decrecita tipicamente sigmoidali oppure lineari. Queste funzioni assumono infatti una forma spesso triangolare, trapezoidale oppure a campana.

Per esempio, una tolleranza dimensionale in lunghezza può definire un sistema fuzzy 'piccolo', 'medio' e 'grande' rispetto ai suoi valori, come mostrato in Fig. 1.13.

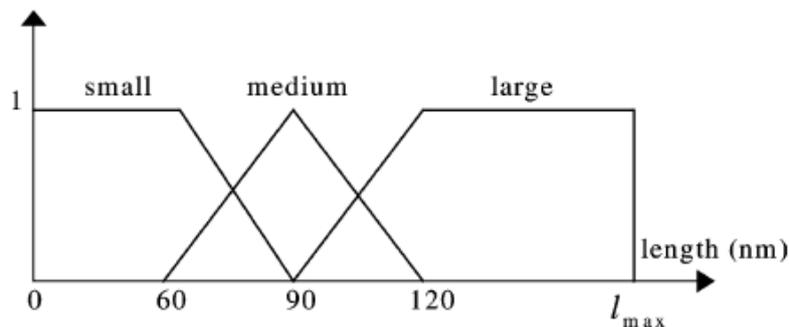


Fig. 1.13: esempio di funzione di appartenenza

I sistemi decisionali classici di solito cercano di evitare informazioni vaghe, imprecise o incerte. Viceversa, i sistemi fuzzy utilizzano deliberatamente queste informazioni attraverso la funzione di appartenenza che descrive il grado in cui la misurazione appartiene a determinati insiemi o classi. Pertanto, le operazioni di "intersezione", "unione" e "complemento" di insiemi fuzzy sono definite tramite le funzioni di

appartenenza degli insiemi coinvolti. I valori di input sono confrontati con le precondizioni delle regole "if-then" definite sugli insiemi fuzzy, che descrivono il comportamento del sistema. Questo tipo di conoscenza fornisce al sistema un meccanismo di elaborazione basato su regole.

Le reti neurali, al contrario, non hanno regole predefinite da cui operare e traggono tutte le loro conclusioni basandosi sull'osservazione.

1.4.2.3 Sistemi neuro-fuzzy (NFS)

I sistemi neuro-fuzzy costituiscono una categoria speciale di sistemi emersi dall'integrazione dei sistemi fuzzy (FS) e delle reti neurali (NN).

I sistemi neuro-fuzzy mantengono le proprietà e le architetture di base delle reti neurali ma hanno alcuni dei loro elementi "fuzzy". Possono essere dati come input sia valori binari che continui, e questo va ad aumentare la robustezza del sistema. Di solito, i componenti fuzzy si traducono in una maggiore velocità di apprendimento delle reti neurali.

Il vantaggio finale delle reti neurali fuzzy è che hanno il potenziale per sviluppare un livello rudimentale di pensiero indipendente e un processo decisionale che si adatta al cambiamento dell'ambiente circostante.

2 FOTOGRAMMETRIA

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo che consente di ottenere informazioni metriche, come forma, dimensioni e posizione, di oggetti reali mediante la misura e l'interpretazione di immagini fotografiche.

Uno dei maggiori ostacoli che fino a poco tempo fa non ne hanno permesso il pieno utilizzo è stato sicuramente l'elevato costo delle attrezzature necessarie. Lo sviluppo di calcolatori in grado di gestire una grande quantità di dati e della grafica computerizzata ne hanno permesso un utilizzo più semplice e rapido e con costi minori. L'avvento di queste tecnologie, infatti, ha reso obsolete le vecchie apparecchiature ottiche. In seguito a questi cambiamenti, la fotogrammetria è ora utilizzata anche in ambiti dove raramente era utilizzata in passato.

L'obiettivo di questa tesi è proprio quello di utilizzare la fotogrammetria come tecnica di estrazione di attributi per un sistema di ispezione visiva automatizzata.

2.1 Cenni storici

Lo sviluppo della fotogrammetria dipende chiaramente dallo sviluppo generale di scienza e tecnologia. Le quattro fasi principali della fotogrammetria, infatti, sono direttamente correlati alle invenzioni tecnologiche in ambito della fotografia, computer ed elettronica. La Fig. 2.1 illustra le quattro generazioni di fotogrammetria. La fotogrammetria ha avuto il suo inizio a partire dall'invenzione della fotografia da parte di Daguerre e Niepce nel 1839.

Tradizionalmente, viene considerato iniziatore di questa disciplina il colonnello francese A. Laussedat che nel 1859 presentò una relazione al Comitato dell'Accademia del Scienze a Parigi sulla possibilità di definire le coordinate dei punti di un oggetto a partire da una coppia di fotografie. Questa *prima generazione*, che va dalla metà fino alla fine del diciannovesimo secolo, è stata una fase pionieristica e sperimentale che ha fondato le basi della fotogrammetria terrestre.

La seconda generazione, solitamente indicata come *fotogrammetria analogica*, è caratterizzata dall'invenzione della stereofotogrammetria di Pulfrich (1901) che ha guidato E. Von Orel a costruire il primo stereo-autografo, uno strumento che permette il tracciamento continuo di linee planimetriche e di curve di livello partendo da fotogrammi terrestri. Inoltre, durante la Prima guerra mondiale si ebbe anche lo sviluppo di aerei e macchine fotografiche che hanno agevolato l'evoluzione della fotogrammetria.

La fotogrammetria, così, si è affermata come un efficiente metodo di rilevamento e mappatura. La teoria matematica di base era nota, ma la quantità di calcolo era proibitivo per le soluzioni numeriche e di conseguenza tutti gli sforzi erano orientati verso metodi analogici.

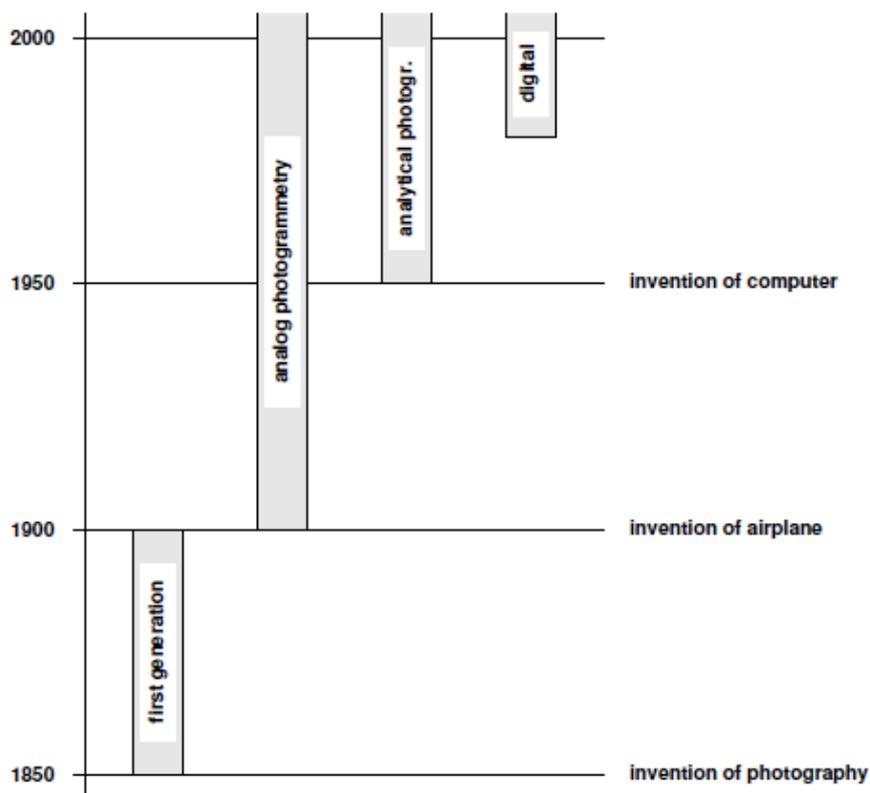


Fig. 2.1: fasi principali della fotogrammetria

La vera e propria rivoluzione della fotogrammetria si ebbe negli anni '50' con l'introduzione dei primi calcolatori che sostituirono i componenti ottico-meccanici e permisero il passaggio alla *fotogrammetria analitica*. Con l'utilizzo dei computer paradossalmente, dopo i cambiamenti nei suoi metodi operativi, la fotogrammetria è ritornata al suo carattere numerico originario. Infatti, i primi rilievi fotogrammetrici avevano formato numerico e prevedevano il calcolo manuale e con l'utilizzo dei calcolatori si è potuto automatizzare e velocizzare questa fase. Alla base della fotogrammetria analitica vi sono le equazioni di collinearità sviluppate da Otto Von Gruber nel 1932. Sempre negli anni '50 si sviluppa una tecnica, la triangolazione aerea, che consente di diminuire il numero dei punti di appoggio da utilizzare per le operazioni di orientamento esterno riducendo al minimo le operazioni topografiche.

L'ultimo passaggio è avvenuto negli anni '90 con l'introduzione delle camere digitali con le quali si passa alla *fotogrammetria digitale*. Adesso, tutto il processo fotogrammetrico avviene appunto in modalità digitale dalla fase di acquisizione fino al processamento.

2.2 Principio di base della fotogrammetria

La fotogrammetria consente di definire la posizione, la forma e le dimensioni degli oggetti sul terreno, utilizzando le informazioni contenute in opportune immagini fotografiche degli stessi oggetti, riprese da punti diversi.

Per ottenere le informazioni tridimensionali la fotogrammetria utilizza lo stesso principio utilizzato dall'uomo per vedere gli oggetti nello spazio, ovvero la visione stereoscopica.

Il cervello di un essere umano, in ogni momento ottiene due immagini leggermente diverse risultanti dalle diverse posizioni dell'occhio destro e dell'occhio sinistro, in accordo con la prospettiva centrale dell'occhio. Quindi, se si hanno due (o più) foto dello stesso oggetto ma prese da posizioni diverse, si possono facilmente calcolare le coordinate tridimensionali di qualsiasi punto rappresentato in entrambe le foto.

Per poter determinare le posizioni dei punti di un oggetto nell'ambiente reale del territorio utilizzando le posizioni dei punti corrispondenti sulla fotografia, è necessario definire le relazioni geometriche fra le posizioni tridimensionali dei punti dell'oggetto e quelle delle loro immagini sul piano della fotografia.

Ad ogni punto dell'oggetto tridimensionale A, B, \dots (spazio oggetto) corrisponde un punto omologo A_1, B_1, \dots sul piano della lastra (spazio immagine).

A questo proposito è possibile, con sufficiente approssimazione, pensare alla fotografia come a una prospettiva centrale, in base alla quale i segmenti che congiungono i punti dell'oggetto con le loro corrispondenti immagini si incontrano tutti in un punto O , distante pochi centimetri dal piano di fotografia, detto centro di presa, come mostrato in Fig. 2.2.

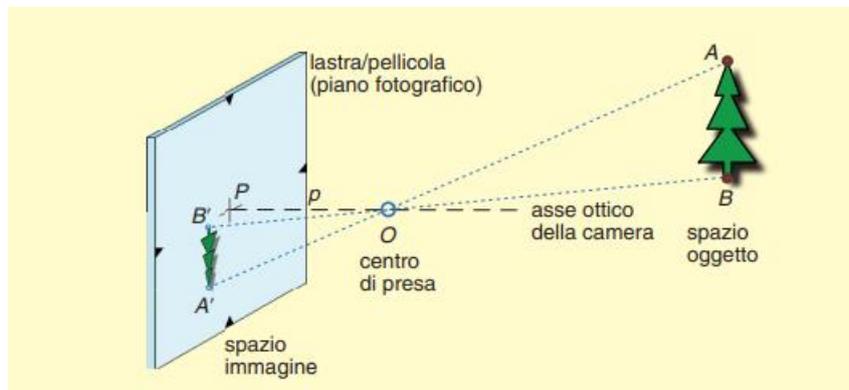


Fig. 2.2: Schema della geometria della presa fotografica nella configurazione terrestre

La distanza tra il centro di presa O e il piano della lastra è detta distanza principale e indicata con p . Essa si mantiene fissa e può essere considerata uguale alla distanza focale dello stesso obiettivo ($p = f$).

Il principio del processo è la triangolazione e quindi per ottenere misure nello spazio occorre disporre di almeno due immagini che ritraggono l'oggetto del rilievo da due angolazioni differenti, in quanto non è possibile ricostruire un oggetto da una sola retta proiettiva. Infatti, mentre ad un punto dello spazio oggetto corrisponde uno ed un solo punto nello spazio immagine, ad un punto dello spazio immagine non corrisponde uno ed un solo punto dello spazio oggetto.

Si nota subito che una sola immagine piana (come quella della fotografia) non contiene informazioni sufficienti a definire la posizione e le dimensioni di un oggetto tridimensionale. Dalla Fig. 2.3a si può osservare che il punto A^1 , sul piano di una sola fotografia con centro di presa O_1 , non è l'omologo del solo punto A sul terreno (oggetto), ma lo è anche per tutti gli infiniti punti A_1, A_2, \dots che si trovano sul raggio proiettante r_1 , rendendo il problema indeterminato.

Utilizzando due fotografie che riprendono lo stesso oggetto osservato da due differenti punti di presa O_1 e O_2 è possibile andare a definire univocamente il punto A sul terreno.

In questo contesto al punto A del terreno corrisponde il punto omologo A^1 sulla prima fotografia e il punto A^2 sulla seconda fotografia. Conoscendo con precisione la posizione dei punti omologhi A^1 e A^2 sulle due fotografie, e la posizione spaziale delle due lastre e dei due punti di presa O_1 e O_2 , il punto A rimane geometricamente definito, in quanto punto di intersezione dei due raggi proiettanti r_1 e r_2 che congiungono i due punti omologhi con i centri di presa corrispondenti.

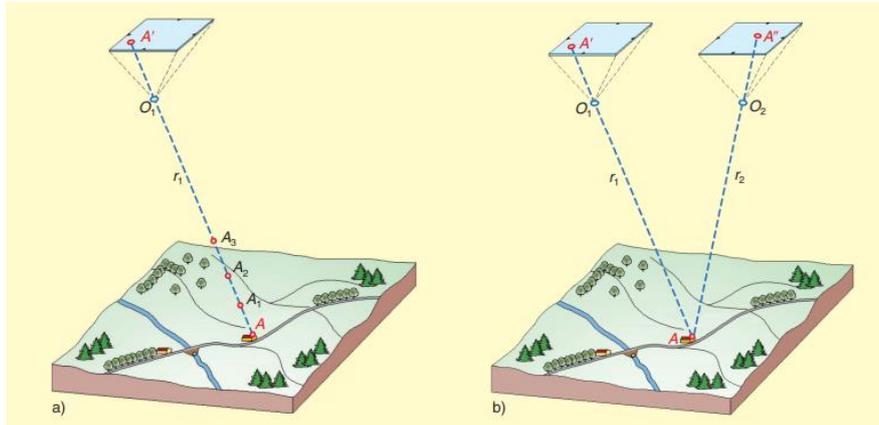


Fig. 2.3: principio della fotogrammetria

Oggi il problema fotogrammetrico viene risolto ottenendo le coordinate dell'intersezione nello spazio delle rette r_1 e r_2 con la risoluzione di un sistema di equazioni (dette di collinearità) ottenute da relazioni di geometria analitica (fotogrammetria analitica), mentre in passato le stesse operazioni venivano effettuate con strumenti meccanici (o ottici) di tipo analogico, che permettevano di stabilire la posizione del generico punto A nell'ambito di uno spazio oggetto ricostruito in scala ridotta detto modello (fotogrammetria analogica).

2.2.1 Modello matematico della fotocamera

Il modello matematico della fotocamera descrive la relazione che c'è tra i punti 3D dello spazio e la loro proiezione nello spazio bidimensionale di una fotografia. Questa relazione è funzione dei parametri tecnici, posizione e orientamento della fotocamera.

Le coordinate di un generico punto $X_j \equiv (x_j; y_j; z_j)$ nello spazio 3D sono correlate alle coordinate 2D del corrispondente punto nell'immagine $u_{i,j} \equiv (u_{i,j}; v_{i,j})$ espresse in pixel nella i -esima fotocamera attraverso la cosiddetta "equazione di collinearità":

$$\begin{bmatrix} u_{i,j} \\ v_{i,j} \\ 1 \end{bmatrix} = \mu_i \mathbf{K}_i \mathbf{W}_i \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{P}_i \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \\ 1 \end{bmatrix}$$

dove:

- μ_i è un fattore di scala diverso da zero,
- K_i è la matrice dei parametri interni della fotocamera (ossia le coordinate del centro dell'immagine $(u_0 \ v_0)$ e i componenti relativi alla lunghezza focale della fotocamera $(u_f \ v_f)$ espressi in pixel)

$$K_i = \begin{bmatrix} u_f & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & v_f & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

- W_i la matrice dei parametri esterni (ossia le coordinate x_c, y_c, z_c del centro di proiezione della fotocamera, e gli angoli di orientamento della fotocamera $\omega_i, \varphi_i, \kappa_i$ nel sistema di riferimento dello spazio F_{WCS}).

$$W_i = \begin{bmatrix} & & -x'_c \\ R_i & & -y'_c \\ & & -z'_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dove $(x'_c \ y'_c \ z'_c)$ sono le coordinate del centro di proiezione della camera nel sistema di riferimento locale della camera F_{CCS} e R_i è la matrice di rotazione che relaziona il sistema di riferimento dello spazio F_{WCS} con quello locale della camera F_{CCS} , come mostrato in Fig. 2.3.

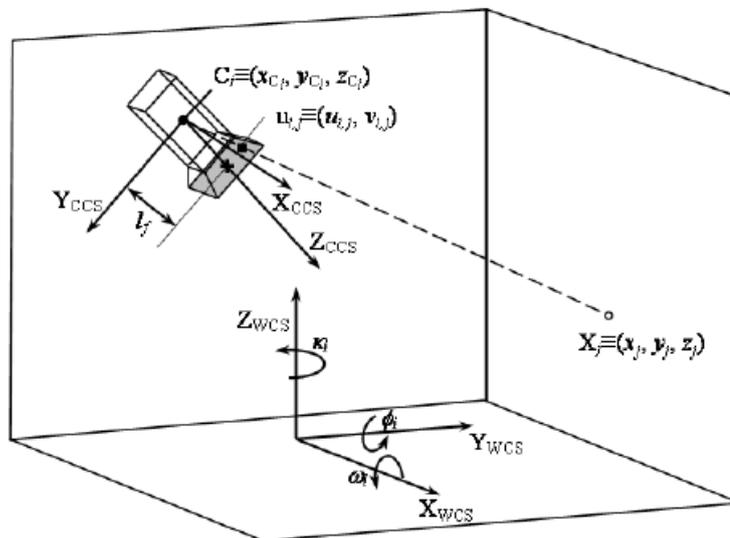


Fig. 2.3: tipico problema di localizzazione

Si ottiene così la matrice P_i , nota come matrice di proiezione della camera.

Se la matrice P_i è nota, la localizzazione consiste nel determinare le coordinate 3D di un punto $X_j \equiv (x_j; y_j; z_j)$ in base alla vista di differenti fotocamere. Con riferimento all'equazione di collinearità, la localizzazione può essere ottenuta solo se uno stesso punto è visto da almeno due differenti fotocamere.

Il modello riportato in realtà è solo un'approssimazione di quello reale poiché ci sono degli errori nelle immagini causati dalla distorsione delle lenti che possono influenzare considerevolmente l'accuratezza della localizzazione. Per risolvere questo problema vengono applicate delle correzioni. Secondo la letteratura scientifica (Mikhail et al 2001) gli errori nelle immagini sono connessi alla distorsione radiale, tangenziale e asimmetrica. La correzione della distorsione può essere introdotta nell'equazione di collinearità:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{i,j} \\ \tilde{v}_{i,j} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta u_{R_{i,j}} + \delta u_{T_{i,j}} + \delta u_{S_{i,j}} \\ 0 & 1 & \delta v_{R_{i,j}} + \delta v_{T_{i,j}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{i,j} \\ v_{i,j} \\ 1 \end{bmatrix}$$

dove $\delta u_{R_{i,j}}$ e $\delta v_{R_{i,j}}$ rappresentano la distorsione radiale; $\delta u_{T_{i,j}}$ e $\delta v_{T_{i,j}}$ quella tangenziale e infine $\delta u_{S_{i,j}}$ quella asimmetrica.

2.2.2 Workflow

In un processo fotogrammetrico si identificano sempre le seguenti tre fasi:

1. *Acquisizione*: questa fase comprende operazioni riguardanti la presa delle immagini fotografiche, effettuate con opportune macchine fotografiche, dette camere, e opportune tecniche. Si stabiliscono, qui, due tipologie di parametri: l'oggetto del rilievo (X, Y, Z) e la fotocamera (posizione e tipo di fotocamera).

2. *Orientamento*: in questa fase vengono effettuate operazioni preliminari per la determinazione dei parametri che consentono di posizionare i centri di presa e le immagini con la stessa posizione nello spazio che avevano al momento della presa. Conoscendo questi parametri è possibile ricostruire la forma e le dimensioni dell'oggetto ripreso.

L'orientamento fotogrammetrico si divide in *interno* ed *esterno*. L'orientamento interno ha l'obiettivo di determinare l'insieme di parametri che consentono di ricostruire la metrica della proiezione centrale, quindi dei raggi proiettanti. Essi sono uguali per tutti i fotogrammi del rilievo, in quanto legati alla camera utilizzata nella fase di acquisizione e vengono forniti dal costruttore della camera in appositi documenti.

L'orientamento esterno si suddivide a sua volta in orientamento *relativo* e *assoluto*. Con l'orientamento relativo si determina la posizione relativa di due fotogrammi (dunque del modello tridimensionale), realizzando l'intersezione dei raggi proiettanti, ma con una scala e un sistema di riferimento arbitrario. Durante l'orientamento assoluto, invece, il modello ricavato nella fase precedente viene roto-traslato e scalato, in modo da riferirlo al sistema di riferimento assoluto e dimensionarlo alla scala desiderata.

3. *Restituzione*: nell'ultimo vengono eseguite operazioni che consentono di effettuare misure sul modello dell'oggetto ricostruito, utilizzando strumenti,

detti restitutori, in grado di produrre, come risultato finale, un disegno, un insieme numerico di coordinate o una immagine raddrizzata.

2.2.3. Confronto con laser scanning

Il laser scanning è una tecnologia alternativa alla fotogrammetria per la digitalizzazione di un oggetto reale. Questi sistemi, come mostrato in Fig. 2.4, si basano sulla triangolazione laser e sono costituiti da un laser ed una telecamera posti a breve distanza tra di loro in modo da vedere l'oggetto da due differenti angolazioni. Il raggio laser è focalizzato in una striscia che, proiettata sull'oggetto in esame, viene distorta dalla geometria. Tramite appositi algoritmi basati sulla triangolazione l'immagine della linea distorta, catturata dalla telecamera, viene convertita in coordinate.

Tale sistema richiede che i pezzi caratterizzati da superfici nere o riflettenti siano trattati con appositi spray opacizzanti.

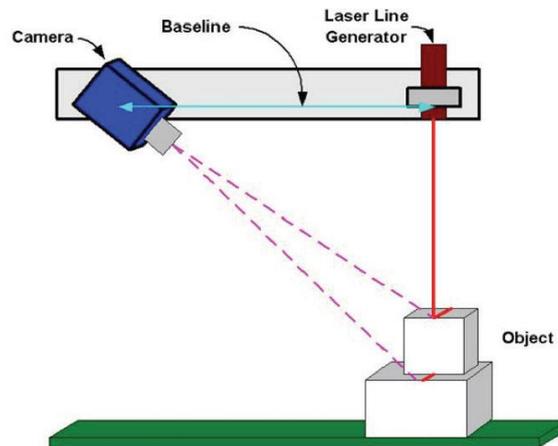


Fig. 2.4: schema di un laser scanner

I sensori laser scanner presentano un'ottima accuratezza dei dati acquisiti con un'elevata velocità di acquisizione in relazione alla quantità dei dati. Mentre per la fotogrammetria, per avere precisioni equiparabili rispetto ad un'acquisizione laser scanner e una densità di punti maggiore, bisogna scattare numerose fotografie che però vanno ad allungare significativamente i tempi di elaborazione.

Tuttavia, la scansione laser non può essere utilizzata per oggetti in rapido movimento e confrontata con la fotogrammetria essa presenta un costo della strumentazione elevato e ha bisogno di una competenza tecnica elevata per avere un controllo totale dei dati. Infatti, per utilizzare la fotogrammetria è necessario avere soltanto una fotocamera per l'acquisizione dei dati e un software di elaborazione dei dati, che può essere scaricato gratuitamente dal web.

2.3 Fotogrammetria digitale

Uno degli sviluppi fondamentali nella storia della fotogrammetria è stato il passaggio dalla fotogrammetria analitica a quella digitale. Questo è stato realizzato nei primi anni 90 attraverso le stazioni di lavoro fotogrammetriche digitali (DPW).

La fotogrammetria è definita digitale quando è possibile gestire tutte le fasi di elaborazione delle immagini tramite un computer.

Le immagini per la fotogrammetria, come mostrato in Fig. 2. digitale possono essere:

1. immagini analogiche scansionate e poi convertite in immagini digitali con alta risoluzione;
2. immagini digitali acquisite direttamente in formato digitale.

Uno dei motivi interessanti che hanno portato all'utilizzo della fotogrammetria digitale è la capacità di applicare l'automazione. Attraverso l'automazione molte fasi della fotogrammetria tradizionale possono essere eseguite molto più velocemente e con maggiore precisione.

2.3.1 Immagini digitali

Un'immagine digitale è rappresentata da una matrice bidimensionale di dati. Per tradurre l'immagine in numeri, questa è suddivisa in piccole aree chiamate pixel.

Per ogni pixel, il dispositivo di imaging registra un numero intero positivo, detto digital number (DN), che rappresenta il valore radiometrico della porzione di immagine contenuta all'interno del pixel.

Ogni pixel può essere visto come elemento di una matrice, ed è quindi individuato univocamente da due numeri interi, che rappresentano la posizione del pixel all'interno della matrice: l'indice di riga e di colonna.

$$g(i,j) = \begin{bmatrix} g(0,0) & g(0,1) & \cdots & g(0,C-1) \\ g(1,0) & g(1,1) & \cdots & g(1,C-1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g(R-1,0) & g(R-1,1) & \cdots & g(R-1,C-1) \end{bmatrix}$$

Dove:

i = indice di riga;

j = indice di colonna;

R = numero massimo di righe;

C = numero massimo di colonne;

$g(i,j)$ = valori radiometrici.

Tutte le immagini digitali sono il risultato di un processo di acquisizione che comprende sempre nelle sue diverse fasi un'operazione di campionamento e una di quantizzazione che sono legate rispettivamente alla risoluzione geometrica e radiometrica.

2.3.1.1 Risoluzione geometrica

La risoluzione geometrica è collegata alla discretizzazione spaziale dell'immagine e quindi alla dimensione del pixel. La discretizzazione da l'informazione sul numero di righe e colonne della matrice che rappresenta l'immagine e quindi del numero totali di pixel. Ad esempio, un'immagine 64×64 sarà composta da una matrice di 64 righe per 64 colonne, per un totale di 4096 pixel.

Ad un'elevata risoluzione geometrica corrisponde una matrice con elevato numero di righe e colonne e conseguentemente una dimensione del pixel piccola.

La risoluzione geometrica viene espressa con il parametro DPI (dots per inch) che indica il numero di pixel contenuti in un pollice.

$$DPI = \frac{n^{\circ} \text{ pixel}}{\text{pollice}}$$

Poiché un pollice è pari a 2,54 cm la relazione che permette di calcolare la dimensione del pixel corrispondente è:

$$d_{\text{pixel}}[\mu\text{m}] = \frac{25400}{DPI}$$

La risoluzione geometrica influisce sulla possibilità di vedere maggiori dettagli della scena. Minore è la dimensione del pixel, maggiore sarà il livello di dettaglio dell'immagine.

2.3.1.2 Risoluzione radiometrica

Una volta definita la discretizzazione spaziale, per definire completamente un'immagine digitale occorre attribuire a ciascun pixel un dato numerico, ovvero il digital number. Quest'ultimo è un numero binario e maggiore è il numero di bit utilizzati, maggiore sarà il numero di valori diversi codificabili. In pratica, avendo n bit è possibile codificare 2^n valori e, quindi, 2^n livelli di grigio.

Per le immagini a scala di grigio, dato 1 solo bit, avremo quindi un'immagine in bianco o nero senza gradazioni intermedie. Invece, le immagini a 8 bit presentano 256 livelli cromatici. I 256 livelli vanno dallo 0 che corrisponde al nero al 255 che invece rappresenta il bianco, i valori intermedi determinano le gradazioni di grigio (immagini a livelli di grigio), come mostrato in Fig. 2.5

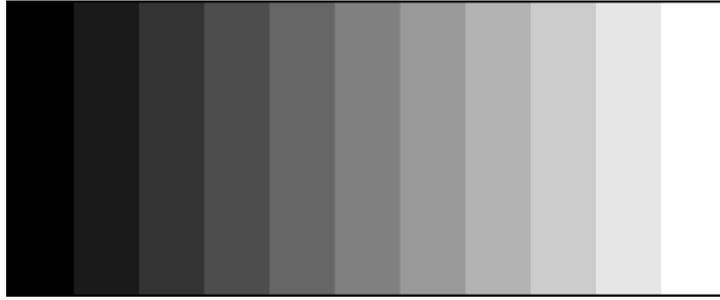


Fig. 2.5: esempio scala di grigi

Per quanto riguarda la rappresentazione digitale di immagini a colori si avrà una quantizzazione dei valori dei pixel con la possibilità di rappresentare i diversi colori e, eventualmente, di combinarli tra loro. La codifica dei colori maggiormente utilizzata è la RGB. Con la codifica RGB il valore del pixel è espresso in questo caso da tre numeri che rappresentano la quantità di rosso, verde e blu che, addizionati, formano il colore risultante. Per ognuno dei tre colori primari si hanno 256 possibili livelli, per cui sono necessari 8 bit a colore per un totale di 24 bit.

2.3.2 Stazioni di lavoro fotogrammetriche digitali

I requisiti di base di un sistema per l'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali variano a seconda del tipo di applicazione. Ad esempio, requisiti per la cartografia topografica in gran parte derivano dalla necessità di una continua acquisizione di dati e dalla necessità di poter avere una visuale completa dello spazio. Dall'altra mano, per i lavori fotogrammetrici a distanza ravvicinata, la criticità risiede nell'avere una misurazione puntuale e immagini più piccole e accurate.

In generale, le caratteristiche che una stazione di lavoro per fotogrammetria digitale (DPW) sono:

- la capacità di archiviare, gestire e manipolare file di immagini di grandi dimensioni;
- la capacità di eseguire attività di elaborazione delle immagini impegnative dal punto di vista computazionale;
- supportare lo zoom a varie risoluzioni;
- supportare monitor di grandi dimensioni e display stereoscopici; e
- supportare l'acquisizione e la modifica di dati tridimensionali.

2.3.1.1 Requisiti hardware

La Fig. 2.6 mostra uno schema di una stazione di lavoro per fotogrammetria digitale con i principali componenti hardware.

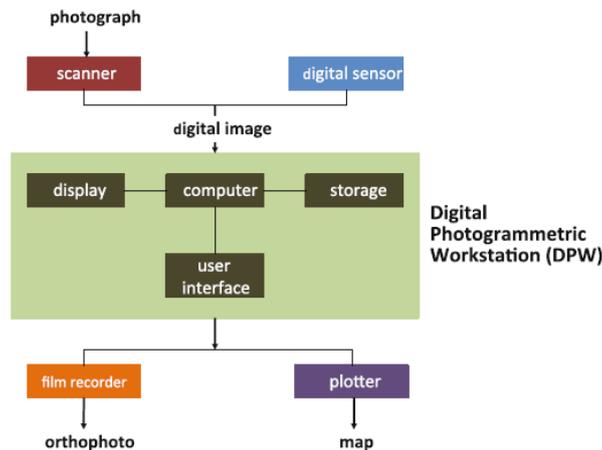


Fig. 2.6: schema di un DPW

Generalmente una stazione di lavoro per fotogrammetria digitale deve possedere i seguenti componenti hardware:

- *Unità centrale di elaborazione (CPU)*: questa deve essere ragionevolmente veloce considerando la quantità di calcoli che devono essere eseguiti;
- *Sistema operativo (OS)*: il sistema operativo deve avere una configurazione minima a 64 bit e deve essere adatto per l'elaborazione in tempo reale;
- *Memoria principale*: a causa della grande quantità di dati che devono essere elaborati vi è bisogno di memoria sufficiente, ad esempio una RAM di almeno 6 GB;
- *Sistema di archiviazione*: questo deve permettere l'archiviazione efficiente di più immagini e dovrebbe consistere sia in dispositivi di archiviazione ad accesso rapido che in supporti di archiviazione di massa;
- *Sistema grafico*: ha lo scopo di recuperare dati, ad esempio immagini digitali o dati vettoriali (GIS), elaborarli e salvarli nella memoria del display e aggiornare il monitor;
- *Sistema di visione 3D*: ciò consente la visualizzazione del modello fotogrammetrico;
- *Strumento di misura 3D*: viene utilizzato dall'operatore per effettuare misurazioni;
- *Rete*: un moderno DPW difficilmente funziona autonomamente, di solito è collegato al sistema di scansione e/o altre postazioni di lavoro;
- *Interfaccia utente*: può essere costituita da componenti hardware come tastiera, mouse e altri dispositivi ausiliari.

2.3.1.2 Requisiti software

Il software in una stazione di lavoro per fotogrammetria digitale deve coprire i normali requisiti fotogrammetrici quali la determinazione delle coordinate e dell'orientamento, oltre ai requisiti speciali del sistema. I requisiti software standard includono:

- *Gestione la visualizzazione dell'immagine*: il software deve permettere la visualizzazione dell'intera immagine o di una parte di essa oltre che la manipolazione dell'immagine;
- *Misurazione per registrare le coordinate dei pixel*;
- *Determinazione dell'orientamento*: riguarderà l'orientamento interno, l'applicazione di parametri di calibrazione; l'orientamento relativo e assoluto e il bundle adjustment;
- *Trasformazione*: il software deve permettere la trasformazione delle coordinate bidimensionali dei pixel in coordinate tridimensionali del modello;
- *Image matching*: necessario per l'estrazione delle caratteristiche contenute nelle immagini;
- *Rettifica digitale*: necessaria per la generazione delle ortofoto;
- *Visualizzazione*.

2.3.3. Image matching

L'Image matching è il processo di base attorno al quale ruota l'automazione della fotogrammetria digitale. Principalmente, si tratta del processo di identificazione automatica di punti corrispondenti su due o più immagini.

Si possono distinguere due metodi di base per effettuare l'Image matching:

1. *Area-based matching*: è la tecnica di image matching più diffusa ed è particolarmente adatta alle immagini con caratteristiche abbastanza continue. In questo metodo, viene determinato un pattern di ricerca per la caratteristica che si vuole accoppiare. Questo viene, poi, posizionato su una finestra di ricerca all'interno dell'immagine coniugata, con l'obiettivo di identificare i pixel con una composizione digitale simile a quella del modello di ricerca, come mostrato nella Fig. 2.7. In particolare, viene confrontata la correlazione incrociata tra il modello di ricerca e le finestre di ricerca iterative. Si ottiene un match quando si raggiunge il massimo coefficiente di correlazione incrociata che si avvicina al valore 1. Nella matrice del pattern di ricerca, l'errore standard nella variazione del livello di grigio è dato da:

$$\sigma' = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \sum (d'_{ij} - d'^2)}$$

dove d' è la variazione media del livello di grigio: $d' = \sum_1^n d'_{ij}$

Per la finestra di ricerca, analogamente, l'errore standard nella disparità dei livelli di grigio è dato da:

$$\sigma'' = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1}\right) \sum (d''_{ij} - d''^2)}$$

dove d'' è la variazione media del livello di grigio: $d'' = \sum_1^n d''_{ij}$

Il coefficiente di correlazione è dato da:

$$Covr_{ij} = \frac{1}{n} \sum d'_{ij} \cdot d''_{ij}$$

E infine, il coefficiente di correlazione incrociata è dato:

$$r_{ij} = \frac{Covr_{ij}}{\sigma' \cdot \sigma''}$$

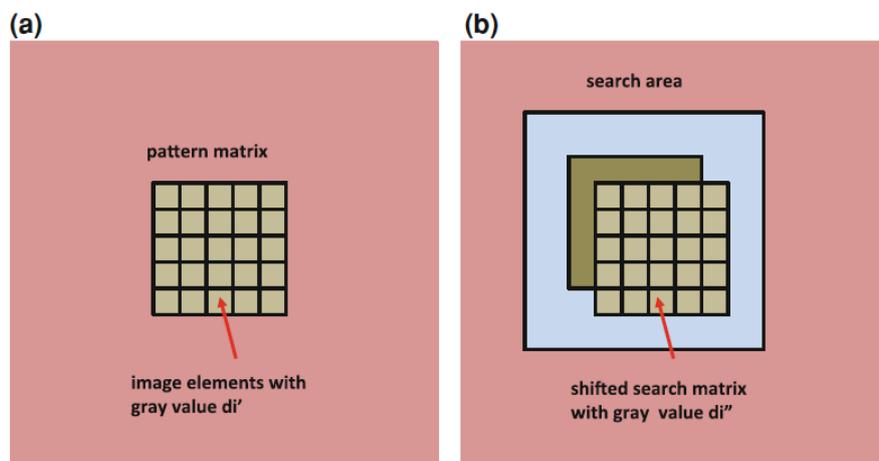


Fig. 2.7: area-based matching. (a) pattern di ricerca. (b) finestra di ricerca

2. *Feature-based matching*: questa soluzione è adatta alle immagini con molti elementi discontinui, come fiumi, strade, ecc. Come suggerisce il nome, il matching basato sulle caratteristiche si basa sul rilevamento e sull'identificazione di caratteristiche dell'immagine che possiedono caratteristiche di valore di grigio distinte, sia individualmente che collettivamente. Queste possono includere caratteristiche che comprendono primitive notevoli, come punti, segmenti di linea, ecc. e/o punti di interesse con un'elevata varianza del valore di grigio, come punti luminosi, angoli acuti, ecc.

2.4 Fotogrammetria a distanza ravvicinata

In questo paragrafo si vuole riassumere gli sviluppi e le applicazioni della fotogrammetria digitale nella misurazione industriale.

La fotogrammetria a distanza ravvicinata si è affermata nell'industria a metà degli anni '80, con una prima svolta nelle misurazioni 3D automatizzate e ad alta precisione (Luhmann 2010); infatti, essa offriva il potenziale di una precisione di misura di 1:500000 rispetto alla dimensione maggiore dell'oggetto. Soprattutto per oggetti di grande volume aventi un elevato numero di punti da acquisire, la fotogrammetria aveva il potenziale di

superare le prestazioni dei teodoliti e diventare un metodo standard per le misurazioni in 3D.

La disponibilità di videocamere e fotocamere digitali in combinazione con l'accesso diretto ai dati delle immagini digitali ha generato nuove applicazioni per la fotogrammetria a distanza ravvicinata.

I sistemi di fotogrammetria a distanza ravvicinata si dividono in sistemi off-line e on-line, come mostrato in Fig. 2.8

I sistemi di fotogrammetria off-line utilizzano fotocamere SLR (reflex a obiettivo singolo) ad alta risoluzione con lenti grandangolari e obiettivi per oggetti retroriflettenti e consentono di effettuare misurazioni in pochi minuti con un robusto bundle adjustment, includendo l'auto calibrazione della fotocamera.

I sistemi più recenti, ad esempio quelli delle aziende GSI, AICON e GOM sono in pratica completamente automatizzati e quindi possono essere utilizzati anche da personale non specializzato. In questi sistemi, l'acquisizione e l'elaborazione possono essere eseguite in luoghi diversi, in tempi diversi e da persone diverse (Fig. 2.8)

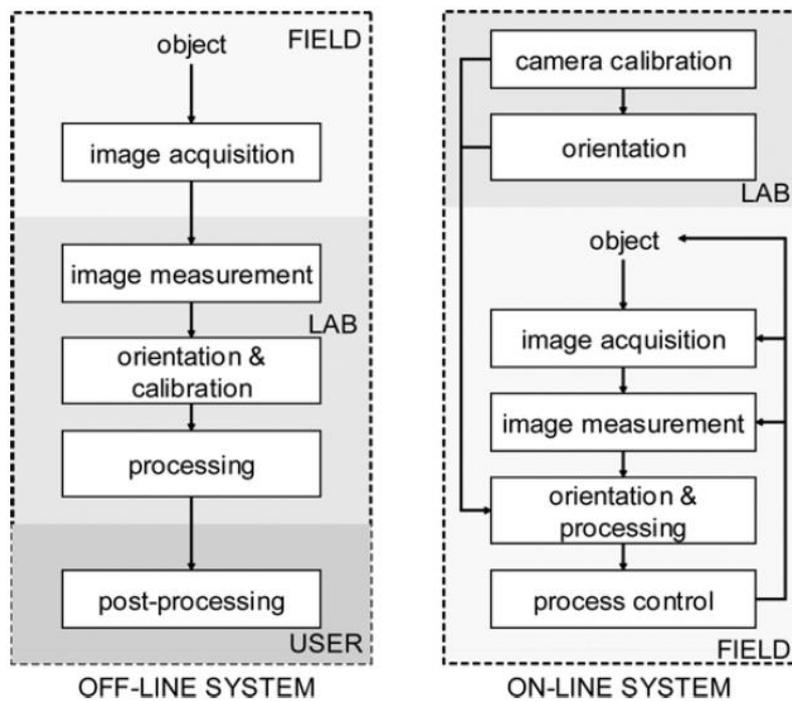


Fig. 2.8: fasi tipiche dei sistemi off-line e on-line

I sistemi digitali off-line possono essere considerati strumenti di misura 3D pienamente accettati e applicati in molte aree industriali, tra cui:

- *industria automobilistica*, per la misurazione della carrozzeria, il controllo dei componenti dei fornitori, la regolazione di attrezzature e impianti, ecc.;
- *l'industria aerospaziale*, per la misurazione e la regolazione di impianti di montaggio, la misura di antenne, ecc.;
- *sistemi di energia eolica*, per la misurazione delle deformazioni e il controllo della produzione; e
- *ingegneria e costruzioni*, per la misurazione di dighe, serbatoi, impianti, ecc.

I sistemi di fotogrammetria off-line offrono i più alti livelli di precisione e accuratezza. La precisione della misurazione dei punti dell'immagine può raggiungere i 1/50 di pixel, con una precisione di misurazione tipica sull'oggetto compresa tra 1:100000 e 1:200000, corrispondente a 0,1 mm per un oggetto di 10 m. L'accuratezza assoluta delle misure di lunghezza è generalmente 2-3 volte inferiore rispetto alla precisione dei punti dell'oggetto, che esprime l'accuratezza relativa della ricostruzione 3D.

I sistemi di fotogrammetria on-line forniscono misure in una catena chiusa di dati, quindi in tempo reale e con un collegamento diretto con i processi esterni (Fig. 2.u). In genere, un sistema on-line è costituito da due o più telecamere calibrate e orientate rivolte verso un determinato volume. Le informazioni 3D relative a punti, contorni o superfici vengono generate istantaneamente per controllare un processo connesso, come una linea di produzione o il posizionamento di un oggetto rispetto ad un riferimento esterno. Esempi di applicazioni dei sistemi on-line sono:

- *tastatura tattile*, in cui un dispositivo di tastatura portatile con punti di riferimento locali calibrati viene tracciato nello spazio 3D al fine di fornire le coordinate della punta del tastatore;
- *calibrazione del robot*, in cui un corpo di riferimento locale che rappresenta il punto centrale dell'utensile del robot viene osservato da una o più telecamere per determinare la traiettoria del robot nello spazio;
- *navigazione con sensori*, in cui un dispositivo di misurazione 2D o 3D (ad esempio sensore di profilo laser) viene seguito da un sistema di telecamere nello spazio tridimensionale.

L'accuratezza dei sistemi on-line è solitamente inferiore rispetto a quella dei sistemi off-line a causa del numero limitato di immagini che comportano una calibrazione e un orientamento non ottimali delle telecamere. I valori tipici di accuratezza sono dell'ordine di 0,2-0,5 mm su una distanza di 2 m.

2.4.1 Tecnologie dei sensori

La tecnologia dei sensori per l'acquisizione di immagini è la caratteristica principale di un sistema di fotogrammetria industriale. La scelta del sensore appropriato è dettata dai requisiti di accuratezza, risoluzione, velocità di acquisizione, frequenza dei fotogrammi, sincronizzazione, quantità di dati, informazioni spettrali, campo visivo, scala dell'immagine, interfacce digitali e costo. In generale, è auspicabile utilizzare telecamere con la massima risoluzione, velocità di acquisizione delle immagini e precisione più elevate, al fine di fornire la massima efficienza e produttività, rispettando il ritorno sull'investimento.

Al giorno d'oggi la gamma di telecamere e sensori di imaging disponibili è enorme. Essi possono essere basati sulla tecnologia CCD o CMOS e sono disponibili sensori con risoluzioni molto elevate (>60 Megapixel), frame rate molto elevati (>2000 Hz) e dimensioni dei pixel variabili tra circa 1,4 e 15 μm .

2.4.1.1 Reflex a obiettivo singolo (SLR)

Le fotocamere reflex digitali ad alta risoluzione sono progettate per lavori fotografici (semi)professionali con una gamma di obiettivi intercambiabili, dispositivi di memoria ad alta capacità e batterie potenti. La loro stabilità meccanica è solitamente scarsa per quanto riguarda i requisiti fotogrammetrici di alta precisione, e quindi la calibrazione delle fotocamere è una fase importante del processo completo. A seconda dei requisiti di requisiti di accuratezza assoluta, queste fotocamere possono essere considerate parzialmente metriche con un orientamento interno variabile anche da un'immagine all'altra. Le fotocamere reflex sono utilizzate principalmente per applicazioni off-line, cioè per la misurazione di oggetti statici. Le fotocamere nel classico formato (35mmSLR) sono offerte da aziende come Nikon, Canon e Sony. In Fig. 2.9 è mostrato un esempio di fotocamera.



Fig. 2.9: Nikon D3x (6048 × 4032 pixels).

2.4.1.2 Fotocamere ad alta velocità

I processi dinamici possono essere osservati fotocamere digitali con una frequenza di fotogrammi più elevata, come ad esempio le videocamere o le fotocamere ad alta velocità. Queste sono controllate attraverso un'interfaccia computer veloce e tipicamente presentano sensori con più di 1500×1000 pixel e frame rate di 2000 Hz, che consentono di effettuare fotogrammetria dinamica ad alta velocità.

Esse sono utilizzate in vari di applicazioni di sistemi fotogrammetrici online, come ad esempio l'ispezione di tubi e la guida di robot. Le fotocamere digitali ad alta velocità sono di solito dotate di sensori CMOS che consentono un accesso rapido ai dati, un campo visivo programmabile e tempi di esposizione estremamente brevi.

Una speciale fotocamera ad alta velocità per le misurazioni fotogrammetriche è stata sviluppata dalla società AICON. Questa fotocamera, illustrata nella Fig. 2.10, è basata su un sensore CMOS da 1,3 Megapixel e incorpora un processore FPGA in grado di localizzare e misurare fino a 10.000 target in tempo reale, con una frequenza di frame fino a 500 Hz. La telecamera, che memorizza solo le coordinate dell'immagine e non i singoli fotogrammi, è stata progettata per misurazioni nello spazio tridimensionale, come

ad esempio la registrazione della posizione e della rotazione delle ruote di un'auto rispetto alla carrozzeria.



Fig. 2.10: fotocamera ad alta velocità per riconoscimento dei target (AICON)

2.4.1.3 Camere fotogrammetriche

Le camere fotogrammetriche, o metriche, sono fotocamere progettate specificamente per applicazioni fotogrammetriche a distanza ravvicinata. Esse sono caratterizzate un orientamento interno stabile che però richiede un elevato sforzo in termini di progettazione. Il loro vantaggio principale appunto è la loro stabilità che comporta una minore necessità di calibrazione periodica, ad esempio nelle applicazioni in cui è richiesta un'elevata precisione senza la possibilità di calibrare simultaneamente la fotocamera. Tuttavia, anche le camere metriche devono essere calibrate sul posto di lavoro in base alla precisione desiderata.



Fig. 2.11: fotocamera metrica INCA 3

In Fig 2.11 è mostrata la camera fotogrammetrica INCA 3, progettata per la metrologia industriale ad alta precisione. Essa presenta un obiettivo fisso e un processore integrato che le consentono di effettuare misure 3D sia in modalità on-line che off-line.

Sono stati progettati anche sistemi multi-sensore che comprendono due o più camere metriche con la quale si possono effettuare misure 3D senza alcuno sforzo aggiuntivo per

la calibrazione e l'orientamento. Questi sistemi possono fornire un'accuratezza di misura di circa 0,05 mm su una distanza di 2 m.

2.5 Taratura della fotocamera

La taratura della fotocamera è una fase essenziale dei sistemi fotogrammetrici nelle applicazioni industriali, poiché l'accuratezza delle misure è, di solito, direttamente correlata alla qualità del sensore e alla corretta modellazione dell'orientamento interno. Lo scopo della taratura è quello di stimare i parametri interni della fotocamera, ovvero la posizione 3D del centro prospettico nello spazio immagine, i parametri di correzione e il fattore di scala. Questi ultimi parametri, caratteristici della camera da presa utilizzata, vengono desunti dal certificato di taratura, e quindi forniti dalla ditta che ha eseguito la ripresa, oppure si possono calcolare con opportune procedure di taratura. In un modello ideale, il punto oggetto, il centro di presa e il punto immagine corrispondente sul fotogramma, come detto, devono essere allineati, cioè devono appartenere alla stessa retta immaginaria ed essere, appunto, collineari (da qui il concetto delle equazioni di collinearità alla base della fotogrammetria analitica). Solitamente nel processo fotogrammetrico le coordinate immagine sono note grazie all'utilizzo di alcuni punti d'appoggio e da queste si vuole ricavare le coordinate oggetto di ogni singolo punto P ma nel processo di taratura di una camera si va in un certo senso a compiere il processo inverso; conoscendo la geometria reale del target di calibrazione e le sue coordinate oggetto, si ricavano le coordinate immagine. Con la tecnica della self-calibration l'operazione viene svolta, generalmente, posizionando una scacchiera analogica di dimensioni note sul piano di riferimento e fotografandola da posizioni e con inclinazioni diverse.

2.5.1 Taratura dei sistemi off-line

La taratura delle fotocamere per i sistemi off-line si basa su una configurazione a più immagini che viene registrata per il campo di prova o per l'oggetto che si deve misurare. Il principio utilizzato è la resezione spaziale che prevede la determinazione della posizione e dell'orientamento spaziale di una foto in base alle misure dei punti prefissati che appaiono nella foto. Quindi, è necessario fornire un numero minimo di punti di vincolo (tie points) e opzionalmente possono essere introdotti punti di controllo o vincoli di distanza. Se l'instabilità meccanica della fotocamera è peggiore del livello di precisione richiesto, la fotocamera può essere calibrata in base all'immagine ottenendo parametri interni per ogni fotografia. Di solito i valori di distorsione vengono mantenuti costanti per tutte le immagini mentre la posizione del centro prospettico viene regolata per ogni immagine. Questo porta a significativi miglioramenti dell'accuratezza, nel caso in cui il numero di immagini nel set di calibrazione sia sufficiente.

La precisione della taratura può essere misurata in base alla precisione dei punti dell'immagine e dell'oggetto o alle deviazioni standard dei parametri della fotocamera. Inoltre, una valutazione affidabile e rigorosa dell'accuratezza è possibile solo se i controlli sono effettuati rispetto a punti di controllo o distanze già tarate in precedenza.

2.5.2 Taratura dei sistemi on-line

La taratura della fotocamera per i sistemi on-line, dove la posizione della fotocamera è fissa, può essere risolta con il bundle adjustment (regolazione del fascio) di immagini multiple solo se un oggetto di prova o di riferimento può essere spostato all'interno del volume di misura. In questo caso è possibile registrare una configurazione multimmagine appropriata, utilizzabile per l'autocalibrazione.

Nei casi in cui non è previsto un corpo di taratura aggiuntivo, le telecamere devono essere calibrate in anticipo. La calibrazione dei sistemi on-line con posizione fissa della telecamera può essere eseguita anche misurando una barra graduata aggiuntiva che viene spostata davanti alla fotocamera. Quest'ultimo metodo è facile da gestire e fornisce informazioni sulla scala in tutto il volume di misura, e quindi è vantaggioso per le valutazioni di accuratezza basate su misure di distanza.

2.6 Misurazioni

2.6.1 Misurazione di un singolo punto

La misurazione di un singolo punto di un oggetto è un compito comune quando il sistema fotogrammetrico viene utilizzato come macchina di misura a coordinate ottica (CMM). In questo caso si utilizza una sonda tattile per individuare un punto sulla superficie di un oggetto, mentre la posizione e l'orientamento (6DOF) sono determinati dal sistema fotogrammetrico. La sonda è costituita da punti di controllo locali e da una punta di tastatura con coordinate 3D note. La sonda può essere azionata manualmente o da un sistema mobile, ad esempio un robot. La misura dei valori nello spazio tridimensionale può essere eseguita da una singola fotocamera, da fotocamere stereo o da un setup di più fotocamere. Di solito l'accuratezza della misurazione del punto di punti aumenta con il numero di telecamere che osservano la sonda contemporaneamente.

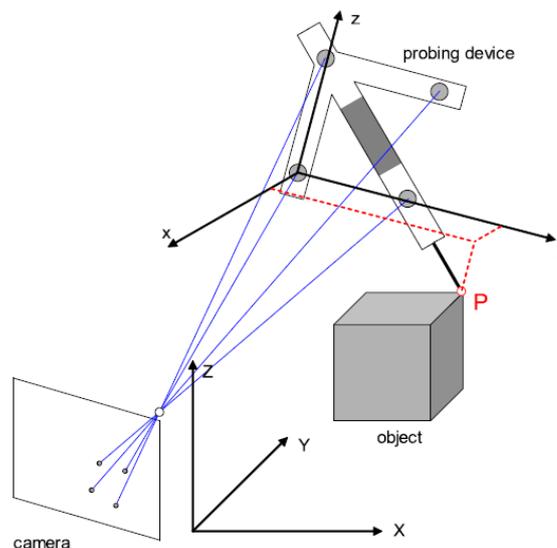


Fig. 2.12: principio di un sistema a camera singola con sonda tattile

La Fig. 2.12 descrive il principio della misurazione a fotocamera singola. La posizione della sonda viene calcolata mediante resezione spaziale inversa rispetto a quattro punti di controllo. L'accuratezza tipica dei sistemi di tastatura a telecamera singola è dell'ordine di 0,5 mm su una distanza di circa 1-2 m.

Se il principio viene esteso a due o più telecamere, il compito di misurare le coordinate 3D è risolto dall'intersezione spaziale dei punti di controllo della sonda.

2.6.2 Misurazione di punti multipli

La misurazione di un gran numero di punti oggetto è probabilmente l'applicazione più adatta alla fotogrammetria. Il caso standard per la misurazione di più punti è l'approccio off-line che utilizza una singola fotocamera digitale ad alta risoluzione, punti oggetto prefissati e autocalibrazione con bundle adjustment.

In questa modalità, viene creato un set di fotografie dell'oggetto che si vuole misurare. Dal momento in cui ogni punto oggetto è contenuto in numerose immagini vi è un'elevata ridondanza e di conseguenza un'alta affidabilità della determinazione delle coordinate, dell'orientamento della telecamera e della calibrazione.

2.6.3 Misurazione di superfici

I metodi fotogrammetrici per la misurazione delle superfici utilizzano almeno due immagini e approcci di image matching per la determinazione delle coordinate 3D dei punti dell'oggetto. Come prerequisito, la superficie deve presentare una texture sufficiente a consentire il rilevamento e la corrispondenza dei punti corrispondenti. Le texture possono essere formate dalla struttura naturale della superficie o generate da modelli artificiali incollati o proiettati sulla superficie. Di solito la texture deve fornire un numero sufficiente di gradienti di colore o di grigio a diverse scale di risoluzione, cioè deve essere utile per le piramidi di immagini.

Il principale vantaggio del matching è la possibilità di osservare scene dinamiche. Nel caso di sensori di immagine in movimento e/o di oggetti che si muovono o si deformano, è possibile acquisire immagini sincronizzate che consentono la ricostruzione di superfici anche in circostanze altamente dinamiche.

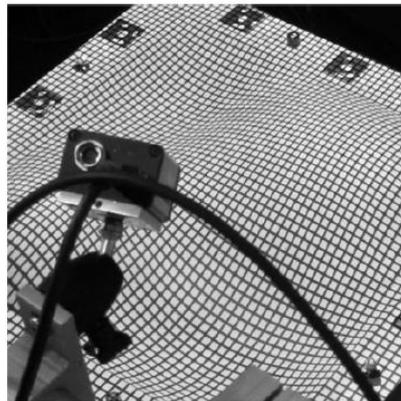


Fig. 2.13: sistema fotogrammetrico per la misurazione di superfici

Se per la testurizzazione della superficie si utilizzano schemi simili a griglie, è possibile rilevare e misurare punti di superficie discreti ben definiti mediante intersezione spaziale, come mostrato nella Fig. 2.13 per il sistema di fotogrammetria basato su griglie.

2.6.4 Structure for motion (fotogrammetria multimmagine)

La Structure from motion o SfM è una tecnica di range imaging della computer vision e della percezione visiva che consente di stimare strutture tridimensionali da un insieme di immagini bidimensionali. Nella visione biologica la SfM fa riferimento al fenomeno per cui gli esseri umani possono ricostruire strutture 3D da un campo in movimento in proiezione 2D di un oggetto o di una scena in movimento.

A differenza della stereoscopia, che utilizza due viste di un'area acquisita da diverse angolazioni per ricavare informazioni 3D di essa, la SfM è in grado di ricostruire un modello 3D di un'area sulla base di più immagini sovrapposte scattate con la stessa fotocamera da angolazioni diverse.

La SfM ha rapidamente rivoluzionato il campo della fotogrammetria perché presenta due principali vantaggi rispetto alla stereoscopia. Innanzitutto, a differenza di quanto avviene per la fotogrammetria tradizionale, con la SfM la ricostruzione della scena con il posizionamento e l'orientamento della telecamera vengono risolti automaticamente dal software utilizzato. Non vi è, quindi, la necessità di specificare a priori target o punti notevoli presenti nelle immagini acquisite. Questi vengono individuati e risolti automaticamente dal software che una procedura di bundle adjustment altamente ridondante e iterativa, basata su un database di caratteristiche estratte automaticamente da un insieme di immagini sovrapposte.

In secondo luogo, la stereoscopia tradizionale (a due immagini) richiede che la geometria interna della fotocamera sia ben caratterizzata. Sebbene ci siano processi consolidati definire i parametri interni della fotocamera questi richiedono un livello moderato di esperienza e richiedono all'utente di esaminare e "calibrare" effettivamente la fotocamera. La SfM esegue questa calibrazione della fotocamera utilizzando le stesse immagini utilizzate per mappare l'area di interesse.

2.6.4.1 Processo SfM

Come accennato in precedenza, SfM utilizza più foto sovrapposte per produrre un modello 3D dell'area rappresentata nelle foto. Questo viene fatto in una serie di passaggi come descritto di seguito:

1. *Feature extraction*: la prima operazione consiste nell'identificare e nell'estrarre dei punti notevoli presenti in ogni fotografia scattata. Ciò avviene mediante l'utilizzo di un algoritmo implementato da D. Lowe nel 2004 definito SIFT. Attraverso questo algoritmo vengono dapprima individuati i punti omologhi presenti negli scatti mediante operatori di interesse, successivamente, mediante l'utilizzo di descrittori di immagine, saranno scelti, fra i punti omologhi individuati, quelli che si discostano meno l'uno dall'altro. Questi punti sono in genere quelli che si distinguono dall'ambiente circostante, come angoli o bordi, o oggetti che sono più scuri o più luminosi dell'ambiente circostante. Mentre molte

di queste caratteristiche sono facili da identificare per gli esseri umani, e altre no, l'algoritmo SIFT è specificamente progettato per consentire l'identificazione delle stesse caratteristiche nonostante le circostanze descritte sopra. Il numero di punti chiave in un'immagine dipende principalmente dalla struttura e dalla risoluzione dell'immagine, per cui le immagini complesse ad alta risoluzione daranno il maggior numero di risultati. La densità, la nitidezza e la risoluzione del set di fotografie, combinate con la texture della scena determineranno, in prima istanza, la qualità dei dati delle nuvole di punti in uscita.

2. *Matching*: dopo l'identificazione dei punti chiave, viene utilizzato il sistema di bundle adjustment Bundler per stimare la posizione delle fotocamere ed estrarre una nuvola di punti a bassa densità o "sparsa".

Si consideri l'esempio in Fig. 2.14 dove vengono illustrate tre immagini in cui sono stati identificati gli stessi molteplici punti (mostrati come punti colorati). Sapendo che il punto rosso in P1 è lo stesso punto rosso in P2 e P3 e in tutte le altre immagini coinvolte, e similmente per gli altri punti, è possibile ricavare la posizione relativa dei punti e le posizioni e gli orientamenti delle camere. In altre parole, l'algoritmo ha definito la posizione di ciascuna caratteristica e telecamera in un sistema di coordinate tridimensionale arbitrario.

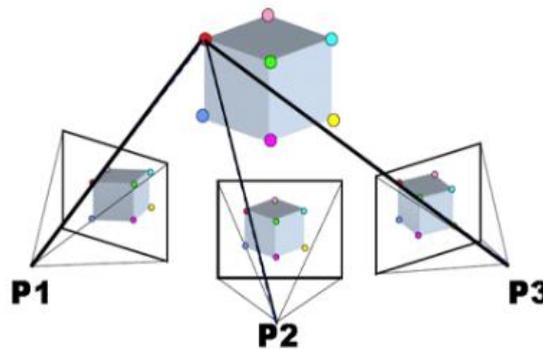


Fig. 2.14: esempio di bundle adjustment

I punti chiave di più immagini vengono, poi, collegati attraverso l'algoritmo K-NN (k-nearest neighbors) o RANSAC (Random Sample Consensus) costituendo "tracce" che collegano punti chiave specifici in una serie di immagini. Per la ricostruzione della nuvola di punti vengono utilizzate solo le tracce che comprendano un minimo di due punti chiave e tre immagini. Utilizzando questo metodo, vengono rimosse automaticamente caratteristiche involontariamente catturate nel set di foto in ingresso prima che inizi la ricostruzione 3D.

Le corrispondenze dei punti chiave impongono vincoli sull'orientamento e sulla posizione della fotocamera, mentre la minimizzazione degli errori è ottenuta con un metodo non lineare dei minimi quadrati.

3. *Ricostruzione 3D*: Infine, viene utilizzata la triangolazione per stimare le posizioni 3D dei punti e ricostruire in modo incrementale la geometria della scena in un

sistema di coordinate relativo. Il bundle adjustment utilizzato in Bundler produce nuvole di punti sparse. Per ottenere una nuvola di punti con maggiore densità sono stati implementati gli algoritmi Clustering View for Multi-view Stereo (CMVS) e Patch-based Multi-view Stereo (PMVS2), dove le posizioni delle telecamere derivate da Bundler sono utilizzate come input. Nello specifico, CMVS decompone le immagini di input in sottoinsiemi o cluster di dimensioni gestibili, mentre PMVS2 ricostruisce in modo indipendente le coordinate 3D da questi singoli cluster. Il risultato di questa elaborazione aggiuntiva è un aumento significativo della densità di punti, che in genere si avvicina o supera i due ordini di grandezza. La nuvola di punti così ottenuta non risulta essere georeferenziata ma rappresentata in un sistema locale. Occorre, quindi, passare da un sistema di coordinate spaziali ad un sistema di coordinate assolute. Ciò avviene individuando un numero congruo di punti di controllo di coordinate note e riconducibili all'interno della nuvola ottenuta attraverso la ricostruzione SfM.

La completa automazione di questo processo, dall'estrazione dei punti chiave alla ricostruzione accurata della geometria della scena, è un chiaro vantaggio del metodo SfM rispetto agli approcci fotogrammetrici digitali tradizionali.

3 DEFINIZIONE DI CONCETTI DI METROLOGIA INDUSTRIALE

In questo capitolo vengono forniti i concetti generali che sono alla base della caratterizzazione metrologica in quanto il sistema che si vuole realizzare è un vero e proprio strumento di misura e come tutti gli strumenti di misura possiede delle caratteristiche metrologiche.

3.1 Caratteristiche metrologiche

Le principali caratteristiche metrologiche sono:

- Risoluzione;
- Sensibilità;
- Stabilità;
- Precisione;
- Giustezza;
- Accuratezza;
- Incertezza.

Queste caratteristiche non sono legate al solo strumento di misura ma devono essere attribuite all'intero complesso di misura che comprende: strumento, operatore, condizioni ambientali e misurando.

3.1.1 Risoluzione

Il VIM (International Vocabulary of Metrology) definisce la risoluzione come: *'la più piccola variazione di una grandezza misurata che provoca una variazione percepibile della corrispondente indicazione'*.

La definizione di risoluzione ha un'accezione diversa in base alla tipologia di strumento di misura che può essere analogico o digitale.

Nel caso di scala analogica, la risoluzione è definita come $1/2$, $1/5$ o $1/10$ (spessore del puntatore) della dimensione della divisione elementare che corrisponde all'unità di formato dello strumento.

Invece, nel caso di scala digitale, la risoluzione è identificata come il valore massimo degli incrementi, ovvero la differenza tra due indicazioni successive riportate in ordine crescente.

3.1.2 Sensibilità

La sensibilità di un sistema di misura, secondo la definizione del VIM, è il quoziente tra la variazione di un'indicazione di un sistema di misura e la corrispondente variazione del valore di una grandezza da misurare.

Il concetto di sensibilità deve essere preso in considerazione per gli strumenti con diverse unità di misura ingresso-uscita. Per gli strumenti a lettura diretta, invece, la sensibilità è sempre pari a 1.

Per esempio, nel caso di una cella di carico, in ingresso si ha la forza (misurata in Newton) e in uscita si ha la tensione elettrica (misurata in microvolt). Per le celle di carico, quindi, si può calcolare la sensibilità.

3.1.3 Stabilità

La stabilità è una proprietà di uno strumento di misura secondo cui le sue proprietà metrologiche rimangono costanti nel tempo. La stabilità può essere quantificata in diversi modi:

1. in termini di un intervallo di tempo in cui una proprietà metrologica cambia di una determinata quantità;
2. in termini di una variazione di una proprietà in un determinato intervallo di tempo.

Per esempio, nel caso delle bilance, il comportamento dello strumento può essere influenzato dall'instabilità dello zero, che varia nel tempo. L'effetto dell'instabilità dello zero può essere valutato non mettendo alcun peso sulla bilancia o mettendo un peso di riferimento costante nel tempo. L'instabilità dello zero può essere superata ripristinando la condizione di zero.

3.1.4 Precisione

La precisione di misura è definita dal VIM come grado di concordanza tra indicazioni o valori di grandezze misurate ottenute da misurazioni replicate sullo stesso oggetto o su oggetti simili in condizioni specifiche.

La precisione di misura è solitamente espressa numericamente tramite deviazione standard, varianza o coefficiente di variazione nelle condizioni di misura specificate. Nello specifico le condizioni di misura specificate possono essere, ad esempio, condizioni di ripetibilità o di riproducibilità della misura.

- Con la *ripetibilità* si valuta la dispersione dei risultati ottenuti replicando più volte le misure nelle stesse condizioni, evitando il più possibile i disturbi. La condizione di ripetibilità di misura prevede la stessa procedura di misura, gli stessi operatori, lo stesso sistema di misura, le stesse condizioni operative e lo stesso luogo; pertanto, la ripetibilità rappresenta soltanto una condizione ideale.
- La *riproducibilità*, invece, rappresenta meglio le condizioni di lavoro reali rispetto alla ripetibilità. Infatti, questa prevede la replicazione delle misure su oggetti simili o uguali con sistema di misura, luoghi e operatori differenti. Quindi, per determinare la riproducibilità si ripete più volte la misura dello stesso misurando in condizioni diverse.

3.1.5 Giustizia

La giustizia della misura è definita dal VIM come il grado di concordanza tra la media di un numero infinito di valori di quantità misurate replicate e un valore di quantità di riferimento. La giustizia della misura non è una quantità e quindi non può essere espressa numericamente, ma le misure del grado di concordanza sono indicate nella norma ISO 5725. Tuttavia, la giustizia può essere stimata confrontando la media dei risultati di misurazione di uno strumento con uno standard nazionale ed è indicata numericamente dall'errore sistematico dovuto alla differenza dello standard nazionale, che è chiamato bias.

3.1.6 Accuratezza

L'accuratezza è definita come il grado di concordanza tra il valore di una grandezza misurata il valore reale della quantità del misurando.

Il concetto di accuratezza di misura non è una quantità e non gli viene attribuito un valore numerico; una misura si dice più accurata quando offre un errore di misura minore.

3.1.7 Incertezza

L'incertezza di misura è un parametro non negativo che caratterizza la dispersione dei valori di quantità attribuiti al misurando, sulla base delle informazioni utilizzate.

L'incertezza di misura include diversi contributi derivanti da effetti sistematici, come quelli associati alle correzioni, alla riferibilità e accuratezza, proveniente da operazioni di taratura rispetto a valori di quantità assegnati dagli standard di misura, nonché altri fattori di influenza e caratteristiche metrologiche sopra citate.

L'incertezza, quindi, è funzione di più contributi e per calcolarne il valore si fa uso della legge della composizione della varianza o incertezza.

In generale, una quantità Y (variabile dipendente) che vuole essere misurata funzione di più quantità x_j (variabili indipendenti):

$$Y = f(x_1, \dots, x_j)$$

Questa relazione tra variabili implica una relazione simile anche fra i valori di misura delle variabili come i valori medi delle variabili. Si ha quindi che il valor medio della variabile dipendente \bar{y} è funzione dei valori medi delle variabili indipendenti \bar{x}_j .

$$\bar{y} = f(\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_j)$$

Nella maggior parte dei casi, le funzioni coinvolte sono abbastanza regolari da poter essere rappresentate in un intervallo adeguato intorno ai valori medi con un'espansione di Taylor limitata al primo ordine. Pertanto, quando le variabili indipendenti x_j subiscono piccole variazioni δx_j , la variabile dipendente subisce la variazione δy data dalla formula:

$$\delta y = \left(\frac{\delta f}{\delta x_1} \right)_{\bar{x}_1} \cdot \delta x_1 + \dots + \left(\frac{\delta f}{\delta x_j} \right)_{\bar{x}_j} \cdot \delta x_j$$

dove il fattore $\left(\frac{\delta f}{\delta x_j} \right)_{\bar{x}_j}$ è la derivata parziale della funzione f rispetto alla variabile x_j calcolato in corrispondenza del valor medio \bar{x}_j . Questo fattore quantifica quanto la variabile dipendente Y sia sensibile alla variazione della variabile indipendente x_j , per cui è chiamato ‘coefficiente di sensibilità’. Espandendo questo concetto generale alla varianza o all’incertezza si ottiene che:

$$s^2(y) = \sum_{j=1}^q \left(\frac{\delta f}{\delta x_j} \right)^2 \cdot s^2(x_j)$$

che rappresenta la formula generale della legge della composizione della varianza. L’incertezza deve coprire un intervallo significativo, quindi almeno al 95%. Essa viene calcolata come:

$$U = k \cdot u$$

dove k è il fattore di copertura, solitamente pari a 2, e u è l’incertezza tipo, che è equivalente allo scarto tipo, ma permette di comporre i diversi contributi.

La guida GUM (Guide to the expression of uncertainty in measurement) fornisce uno schema basato su due diversi tipi di valutazione dell’incertezza:

- una valutazione basata su metodi statistici, che consentono di quantificare i contributi di incertezza di ‘Tipo A’;
- una valutazione basata su metodi non statistici, cioè basati sull’esperienza specifica nel campo in cui avviene la misurazione, che consentono di quantificare i contributi di incertezza di ‘Tipo B’.

In entrambi i casi, l’obiettivo è trovare il valore della varianza (e quindi della deviazione standard) relativa a ciascun fattore.

3.1.8 Taratura

Una volta definite le principali caratteristiche metrologiche di uno strumento di misura, si può comprendere al meglio il concetto di taratura. La taratura è una tipologia di caratterizzazione che ha come scopo la definizione delle caratteristiche metrologiche di uno strumento di misura. Questo avviene tramite un confronto di misure con uno strumento di riferimento, definito campione. Secondo la definizione data dal VIM, la taratura è un’operazione che, sotto determinate condizioni, stabilisce una relazione tra i valori delle quantità con le incertezze di misura fornite dagli standard di misura e le indicazioni corrispondenti con le incertezze di misura associate. Successivamente vengono utilizzate queste informazioni per ottenere un risultato di misura da un’indicazione.

4 PROGETTAZIONE SISTEMA

In questo capitolo viene descritto il sistema fisico realizzato in laboratorio per effettuare misurazioni su nuvole di punti o mesh ottenute tramite la tecnica della fotogrammetria.

Il sistema si compone dei seguenti componenti:

- Fotocamera con relativo supporto;
- Tavola rotante;
- Sistema di riferimento;
- Software per la ricostruzione fotogrammetrica;
- Software per la misurazione di geometrie su mesh 3D.

4.1 Fotocamera

La fotocamera utilizzata è una Basler ace acA2500-14uc.

Basler è un produttore leader di telecamere digitali e accessori di alta qualità per l'industria, la medicina, e molti altri mercati, con oltre trenta anni di esperienza nella computer vision. Le fotocamere Basler possono essere facilmente interfacciate con il PC tramite USB e l'applicativo software Pylon Viewer. Quest'ultimo è uno strumento centrale per l'impostazione e la valutazione delle telecamere. Esso offre una ricca serie di funzioni per l'impostazione delle telecamere Basler, come la correzione della vignettatura, l'indicatore di nitidezza, il gestore della larghezza di banda e molte altre. Inoltre, consente di esplorare facilmente le caratteristiche della telecamera e come esse possano essere utilizzate.

Uno dei vantaggi principali delle fotocamere Basler è la possibilità di programmare la sequenza di attività, come la presa degli scatti o l'esecuzione di un video, in maniera automatica con l'utilizzo di un Software Development Kit (SDK) indipendente. In particolare, gli SDK di Pylon forniscono interfacce di programmazione facili da apprendere che aiutano ad aumentare la produttività e la stabilità delle applicazioni. Ogni SDK è corredato da numerosi esempi di codice per tutti i tipi di funzionalità e include una documentazione completa per gli sviluppatori. Gli SDK di Pylon sono disponibili per diversi linguaggi di programmazione come C++, .Net/C#, C e Java.



Fig. 4.1: Fotocamera Basler

Il prezzo di listino della fotocamera utilizzata è di circa 400,00 € e in Fig. 4.2 vengono mostrate le sue caratteristiche principali.

Sensor Vendor	onsemi
Sensor	MT9P031
Shutter	Rolling Shutter
Sensor Format	1/2.5"
Sensor Type	CMOS
Sensor Size	5.7 mm x 4.3 mm
Resolution (HxV)	2590 px x 1942 px
Resolution	5 MP
Pixel Size (H x V)	2.2 μm x 2.2 μm
Frame Rate	14 fps
Mono/Color	Color

Fig. 4.2: Caratteristiche fotocamera

In laboratorio, la fotocamera è stata fissata su treppiedi tradizionale in modo tale da determinare la sua posizione nello spazio e tenerla stabile per eliminare possibili errori nelle foto.

4.2 Tavola rotante

La tavola rotante è una parte fisica del sistema che permette di appoggiare e far ruotare il pezzo da esaminare e ricostruire. Come detto nel paragrafo precedente, la fotocamera viene tenuta in una posizione fissa, quindi, per ottenere foto dell'oggetto in tutte le sue angolazioni sarà opportuno farlo ruotare di 360°; da qui nasce la necessità di una tavola rotante. In particolare, la tavola rotante utilizzata in laboratorio consta esclusivamente di due parti: un rotondimetro e una tavola piana in acciaio.

Il rotondimetro è uno strumento di misura con la quale si possono misurare con semplicità le caratteristiche di un pezzo cilindrico come concentricità, planarità, cilindricità, conicità, diametro, ecc.

Nel sistema ideato, però, il rotondimetro è stato utilizzato per un'altra funzione diversa da quelle convenzionali; in particolare, esso è stato impiegato esclusivamente per impartire il moto rotatorio alla tavola. Esso deve essere azionato manualmente e viene ruotato di un determinato angolo in base al numero di fotografie che si vogliono scattare. Per esempio, se si vogliono catturare 36 foto di un oggetto, il rotondimetro verrà ruotato di 10° tra una foto e l'altra.

L'altra parte, ovvero la tavola piana in acciaio, ha la funzione di sostenere il pezzo da analizzare. Essa è stata realizzata in officina a partire da un pezzo grezzo e presenta un perno che permette il fissaggio con il rotondimetro.

In Fig. 4.3 viene mostrata la tavola rotante realizzata.



Fig. 4.3: tavola rotante

4.3 Markers

I markers sono dei punti con coordinate note all'interno della scena e permettono la creazione di un sistema di coordinate, l'ottimizzazione dell'allineamento delle fotografie e quindi la misurazione di distanze e volumi all'interno della scena.

Nel sistema realizzato vengono utilizzati dei target codificati che presentano un anello diviso in segmenti in bianco e nero intorno ad un cerchio centrale.

I target codificati hanno il vantaggio principale di poter essere rilevati automaticamente dal software per la ricostruzione fotogrammetrica, ovvero Agisoft Metashape, il che permette di beneficiare, nella realizzazione del progetto, di un risparmio di tempo evitando il collocamento manuale del marker. Inoltre, con il posizionamento automatico dei marker il suo rilevamento è più preciso rispetto al rilevamento di un posizionamento manuale del marker. I marker sono fondamentali per andare a riferire il progetto ed in particolare per andare a creare un sistema di riferimento vi è bisogno almeno delle coordinate di tre marker e di due distanze tra gli stessi marker.

Nel sistema realizzato, per avere più flessibilità, sono stati utilizzati sei target codificati che sono stati posizionati direttamente sulla tavola rotante come mostrato in Fig. 4.4, ed inoltre sono state calcolate tutte le distanze tra essi.

I target codificati sono scelti in maniera randomica a partire da un file messo a disposizione dal software stesso ed in particolare sono stati selezionati i target numero 4,

6, 7, 11, 14, 15. Il software, poi, tramite il tool 'Detect markers' è in grado di riconoscere il punto centrale dei target assegnando ad esso anche il numero di appartenenza. Quest'ultima funzionalità risulta essere di fondamentale importanza perché permette una completa automazione del processo in quanto i target vengono riconosciuti univocamente e questo permette l'assegnazione automatica delle coordinate note.

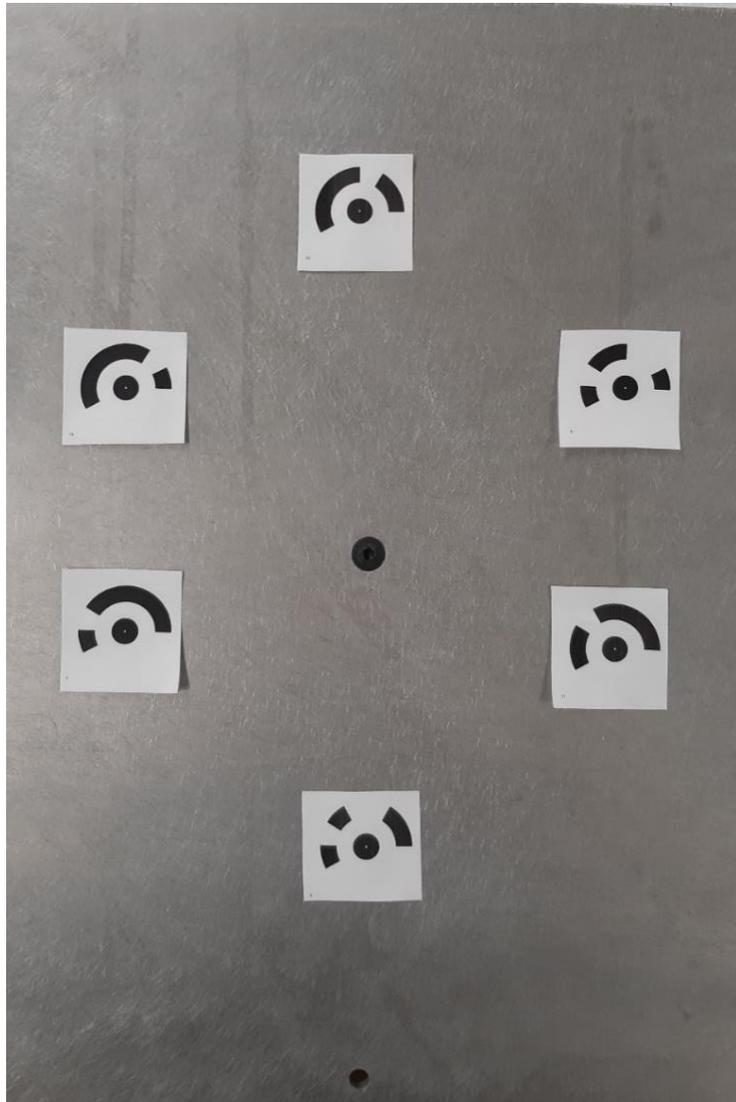


Fig. 4.4: posizione dei target sulla tavola

4.3.1 Coordinate dei marker

Le coordinate esatte dei target sono state misurate con l'utilizzo di una macchina di misura a coordinate (CMM), ripetendo l'operazione dieci volte in modo tale da aumentare la precisione delle misure.

4.3.1.1 Target 4

In tabella 4.1 vengono riportate le misure ottenute alla CMM del target 4.

	Punto 4		
	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Replicazione 1	150,327	307,139	-654,512
Replicazione 2	150,503	306,774	-654,531
Replicazione 3	150,289	306,843	-654,550
Replicazione 4	150,312	306,994	-654,554
Replicazione 5	150,285	307,210	-654,563
Replicazione 6	150,310	306,901	-654,571
Replicazione 7	150,404	307,134	-654,580
Replicazione 8	150,463	307,121	-654,589
Replicazione 9	150,343	306,988	-654,593
Replicazione 10	150,364	307,012	-654,600

Tab. 4.1: repliche CMM target 4

Per definire la misura reale delle tre coordinate viene calcolata la media delle dieci repliche. In particolare, la media è definita come:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

dove n è il numero di repliche.

Le coordinate risultanti per il target 4 sono:

$$target\ 4 = (150.360; 307.012; -654,564)$$

Viene poi definita anche la deviazione standard delle singole misure, attraverso la seguente formula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Ne risulta:

$$s_x = 0,074\ mm$$

$$s_y = 0,142\ mm$$

$$s_z = 0,028\ mm$$

In seguito, è stato eseguito un test sulla normalità, tramite il software Minitab, il cui risultato è mostrato in Fig. 4.5.

In statistica, i test di normalità consentono di verificare se i dati reali seguono o meno una distribuzione normale. Nello specifico, l'ipotesi nulla (H_0) e l'ipotesi alternativa (H_1) sono:

$$H_0: i\ valori\ hanno\ una\ distribuzione\ normale$$

H_1 : i valori non hanno una distribuzione normale

Per verificare l'ipotesi si va ad osservare il p-value. Nei test di verifica d'ipotesi, il valore p, o anche livello di significatività osservato, è la probabilità, per una ipotesi supposta vera (detta ipotesi nulla), di ottenere risultati ugualmente o meno compatibili, di quelli osservati durante il test, con la suddetta ipotesi. In altri termini, il p-value aiuta a capire se la differenza tra il risultato osservato e quello ipotizzato è dovuta alla casualità introdotta dal campionamento, oppure se tale differenza è statisticamente significativa, cioè difficilmente spiegabile mediante la casualità dovuta al campionamento.

Calcolato il p-value relativo ai dati osservati è possibile comportarsi come segue:

- se $p\text{-value} > \alpha$ l'evidenza empirica non è sufficientemente contraria all'ipotesi nulla che quindi non può essere rifiutata;
- se $p\text{-value} \leq \alpha$ l'evidenza empirica è fortemente contraria all'ipotesi nulla che quindi va rifiutata.

Dove α è il livello di significatività del test, o rischio di prima specie, ed è la probabilità di respingere l'ipotesi nulla H_0 . Per convenzione si utilizza un valore di α pari a 0,05.

Dai risultati, si nota che per tutte e tre le variabili (4_x , 4_y , 4_z) si ha un valore del p-value superiore a 0,05 che non permette di rifiutare l'ipotesi nulla H_0 che i dati reali siano distribuiti normalmente.

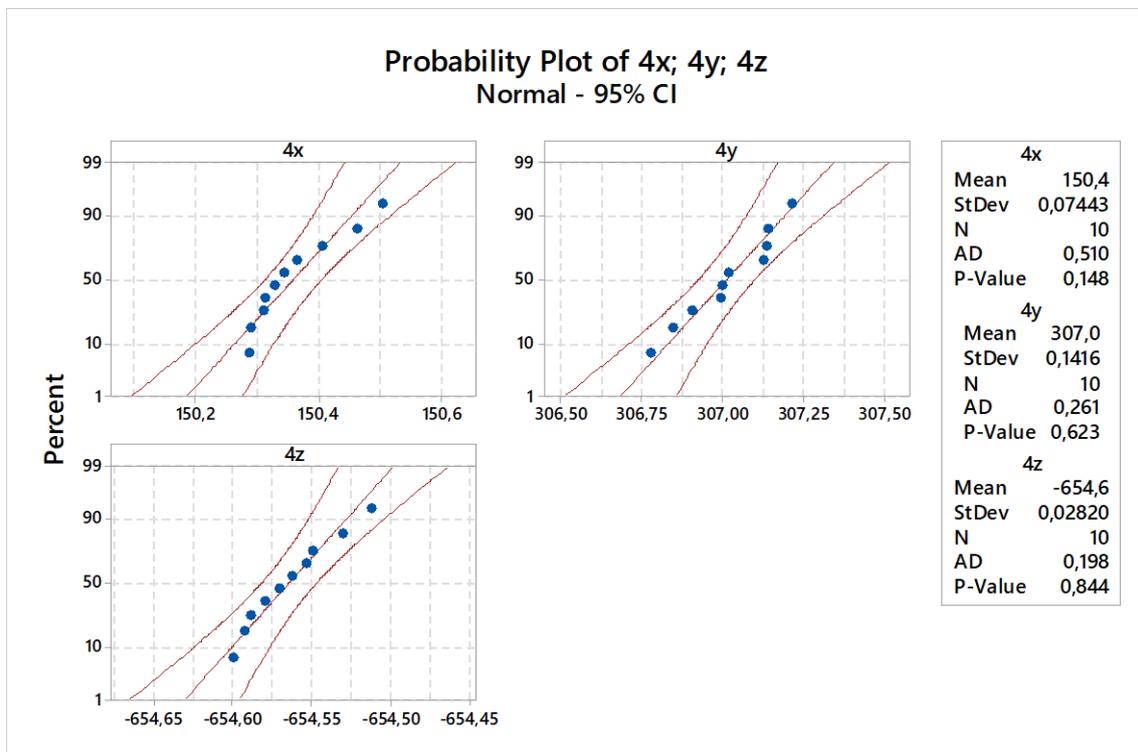


Fig. 4.5: Test di normalità del target 4

4.3.1.2 Target 6

Le misure ottenute alla CMM per il target 6 sono riportate nella seguente tabella:

	Punto 6		
	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Replicazione 1	61,806	144,990	-654,112
Replicazione 2	61,860	144,939	-654,112
Replicazione 3	61,835	144,872	-654,135
Replicazione 4	61,933	144,775	-654,147
Replicazione 5	61,934	144,895	-654,162
Replicazione 6	62,134	145,181	-654,131
Replicazione 7	61,946	144,833	-654,158
Replicazione 8	61,816	144,929	-654,169
Replicazione 9	61,851	144,763	-654,183
Replicazione 10	61,964	145,014	-654,186

Tab 4.2: repliche CMM target 6

Dalle seguenti misure risultano coordinate e deviazioni standard pari a:

$$target\ 6 = (61,908; 144,919; -654,150)$$

$$s_x = 0,098\ mm$$

$$s_y = 0,124\ mm$$

$$s_z = 0,027\ mm$$

Il test di normalità è mostrato in Fig. 4.6.

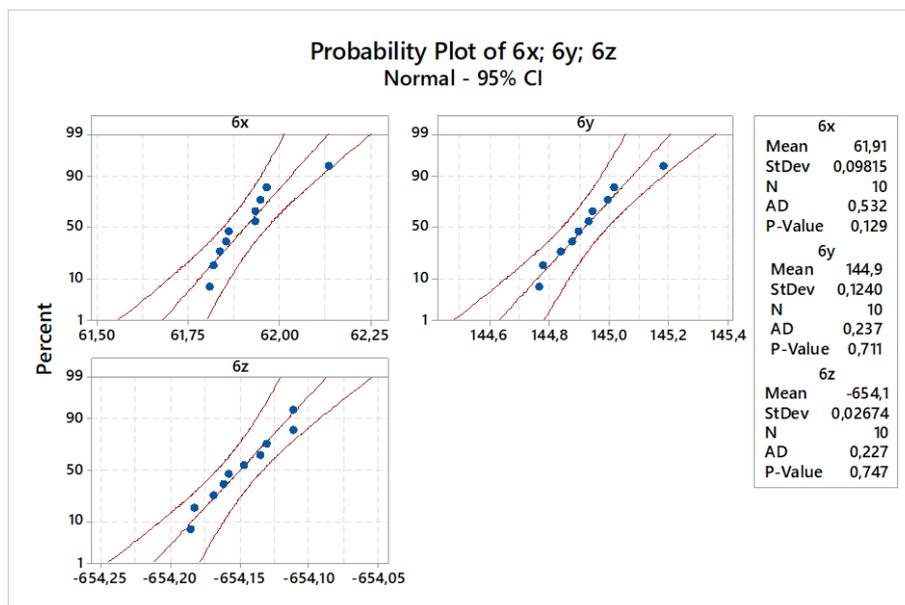


Fig. 4.6: test di normalità target 6

Dal test si ottiene un valore di p-value superiore a 0.05 per tutte e tre le coordinate; quindi, non si può rifiutare l'ipotesi nulla per tutti e tre i casi.

4.3.1.3 Target 7

Le misure in mm ottenute alla CMM per il target 7 sono riportate in Tab. 4.3.

	Target 7		
	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Replicazione 1	235,447	234,110	-654,270
Replicazione 2	235,578	234,377	-654,279
Replicazione 3	235,526	234,353	-654,296
Replicazione 4	235,497	234,356	-654,303
Replicazione 5	235,560	234,227	-654,317
Replicazione 6	235,381	234,213	-654,312
Replicazione 7	235,507	233,261	-654,316
Replicazione 8	235,454	234,248	-654,330
Replicazione 9	235,412	234,491	-654,351
Replicazione 10	235,462	234,445	-654,334

Tab. 4.3: repliche CMM target 7

Le coordinate e le deviazioni standard risultanti sono:

$$target\ 7 = (235,482; 234,208; -654,331)$$

$$s_x = 0,063\ mm$$

$$s_y = 0,352\ mm$$

$$s_z = 0,025\ mm$$

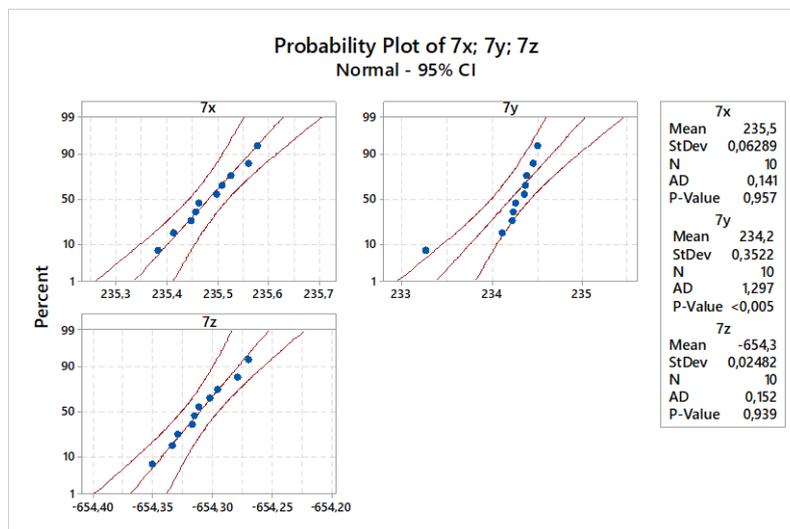


Fig. 4.7: test di normalità target 7

Il test di normalità per il target 7 è mostrato in Fig. 4.7.

In questo caso, dai risultati, si nota che per la variabile 7y si ha un p-value inferiore a 0,05 quindi per la coordinata y dobbiamo rifiutare l'ipotesi che i dati siano distribuiti normalmente. Per le coordinate x e z, invece, si ottiene un p-value superiore a 0,05 e quindi possiamo assumere che i dati siano distribuiti secondo una distribuzione normale.

4.3.1.4 Target 11

Le misure in mm ottenute alla CMM per il target 11 sono riportate in Tab. 4.4.

	Punto 11		
	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Replicazione 1	64,640	237,377	-654,330
Replicazione 2	64,839	237,520	-654,353
Replicazione 3	64,671	237,481	-654,361
Replicazione 4	64,715	237,317	-654,366
Replicazione 5	64,703	237,425	-654,372
Replicazione 6	64,533	237,453	-654,386
Replicazione 7	64,594	237,370	-654,385
Replicazione 8	64,623	237,337	-654,399
Replicazione 9	64,748	237,408	-654,401
Replicazione 10	64,658	237,360	-654,400

Tab. 4.4: repliche CMM target 11

Le coordinate e le deviazioni standard risultanti sono:

$$target\ 11 = (64,672; 237,405; -654,375)$$

$$s_x = 0,085\ mm$$

$$s_y = 0,065\ mm$$

$$s_z = 0,023\ mm$$

Il test di normalità per il target 11 è mostrato in Fig. 4.8.

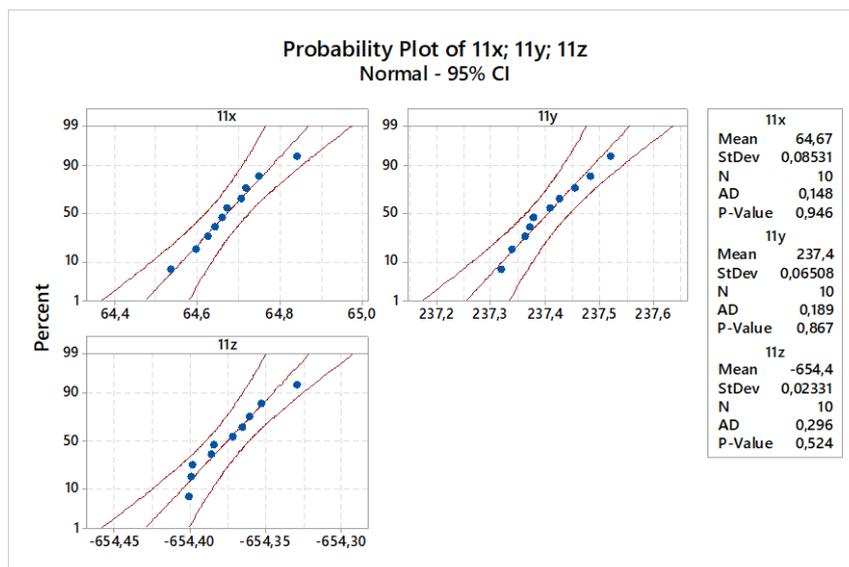


Fig 4.8: test di normalità target 11

Come si evince dal grafico, per tutte e tre le coordinate il valore del p-value è superiore a 0,05 e quindi si può assumere che in tutti e tre i casi i dati siano distribuiti normalmente.

4.3.1.5 Target 14

Le misure in mm ottenute alla CMM per il target 14 sono riportate in Tab. 4.5.

	Punto 14		
	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Replicazione 1	157,424	83,854	-653,894
Replicazione 2	157,062	83,834	-653,910
Replicazione 3	157,318	83,879	-653,927
Replicazione 4	157,273	83,833	-653,937
Replicazione 5	157,318	83,921	-653,947
Replicazione 6	157,726	83,825	-653,938
Replicazione 7	157,288	83,935	-653,974
Replicazione 8	157,324	83,847	-653,979
Replicazione 9	157,358	83,950	-653,962
Replicazione 10	157,428	83,940	-653,974

Tab. 4.5: repliche CMM target 14

Le coordinate e le deviazioni standard risultanti sono:

$$target\ 14 = (157,352; 83,882; -653,994)$$

$$s_x = 0,166\ mm$$

$$s_y = 0,050\ mm$$

$$s_z = 0,029\ mm$$

Il test di normalità per il target 14 è mostrato in Fig. 4.9.

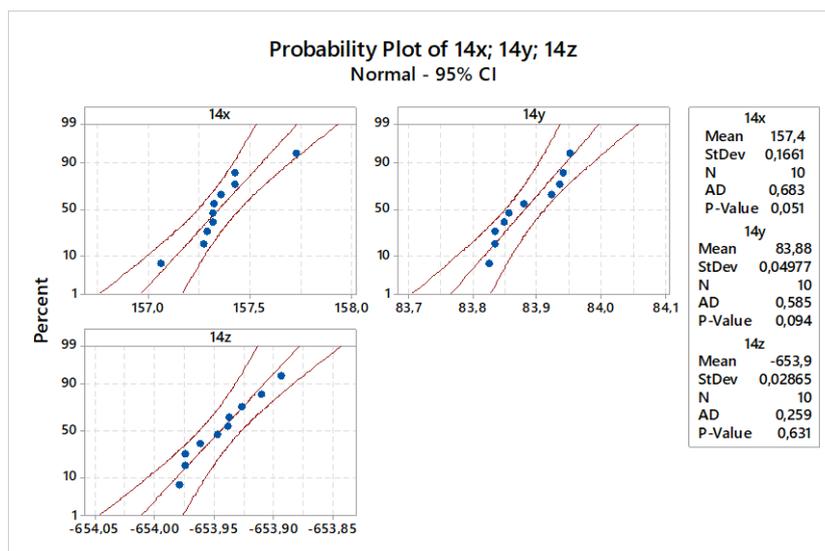


Fig. 4.9: test di normalità target 14

Dai risultati ottenuti dal test possiamo ritenere che per tutte e tre le coordinate i dati sono distribuiti normalmente in quanto il valore del p-value è superiore a 0,05. Tuttavia, per la coordinata x e y ci troviamo in prossimità del valore soglia.

4.3.1.6 Target 15

Le misure in mm ottenute alla CMM per il target 15 sono riportate in Tab. 4.6.

	Punto 15		
	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Replicazione 1	237,905	148,774	-654,190
Replicazione 2	237,928	148,887	-654,198
Replicazione 3	237,887	149,046	-654,211
Replicazione 4	237,914	148,932	-654,218
Replicazione 5	237,886	148,950	-654,221
Replicazione 6	238,082	148,892	-654,230
Replicazione 7	237,969	148,969	-654,237
Replicazione 8	237,900	148,813	-654,251
Replicazione 9	238,013	149,005	-654,255
Replicazione 10	237,885	148,905	-654,243

Tab. 4.6: repliche CMM target 15

Le coordinate e le deviazioni standard risultanti sono:

$$target\ 15 = (237,937; 148,917; -654,225)$$

$$s_x = 0,166\ mm$$

$$s_y = 0,050\ mm$$

$$s_z = 0,029\ mm$$

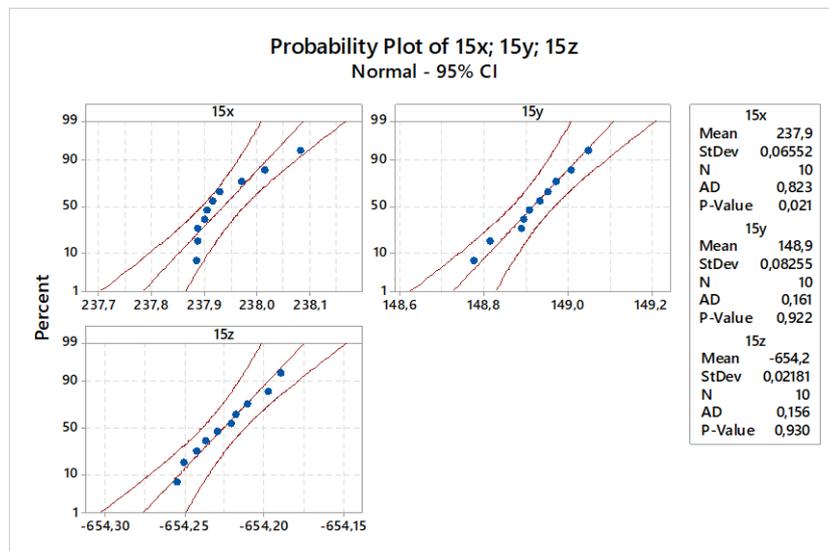


Fig. 4.10: test di normalità target 10

Il test di normalità per il target 15 è mostrato in Fig. 4.10

Dai risultati, si nota che per la variabile 15x si ha un p-value inferiore a 0,05 e quindi per la coordinata x dobbiamo rifiutare l'ipotesi che i dati siano distribuiti normalmente. Per

le coordinate y e z, invece, si ottiene un p-value superiore a 0,05 e quindi, in questo caso, non si può rigettare l'ipotesi nulla H_0 .

In Tab 4.7 sono state sintetizzate le coordinate medie dei sei target.

Coordinate CMM			
	x [mm]	y [mm]	z [mm]
punto 4	150,360	307,012	-654,564
punto 7	235,482	234,208	-654,311
punto 15	237,937	148,917	-654,225
punto 14	157,352	83,882	-653,944
punto 6	61,908	144,919	-654,150
punto 11	64,672	237,405	-654,375

Tab 4.7: coordinate dei marker

Successivamente queste coordinate sono state normalizzate rispetto al loro baricentro G , in modo tale da avere l'origine degli assi in un punto interno ai sei marker.

Le coordinate $(G_x; G_y; G_z)$ del baricentro sono state definite come la media delle coordinate x, y e z dei sei marker.

$$G_x = \frac{\sum_{i=1}^6 x_i}{6} = 151,285 \text{ mm}$$

$$G_y = \frac{\sum_{i=1}^6 y_i}{6} = 192,724 \text{ mm}$$

$$G_z = \frac{\sum_{i=1}^6 z_i}{6} = -654,262 \text{ mm}$$

Note le coordinate del baricentro, si vanno a calcolare le nuove coordinate dei marker andando a sottrarre alle coordinate iniziali le coordinate del baricentro, in questo modo:

$$(x'_i; y'_i; z'_i) = (x_i - G_x; y_i - G_y; z_i - G_z)$$

Le nuove coordinate normalizzate sono riportate in Tab. 4.8.

Coordinate normalizzate			
	x [mm]	y [mm]	z [mm]
Target 4	-0,925	114,288	-0,303
Target 7	84,197	41,484	-0,049
Target 15	86,652	-43,806	0,036
Target 14	6,067	-108,842	0,317
Target 6	-89,377	-47,805	0,112
Target 11	-86,613	44,681	-0,114

Tab. 4.8: coordinate normalizzate dei marker

4.3.2 Distanze tra i marker

Come detto in precedenza, per la creazione di un sistema di riferimento all'interno del software, oltre a conoscere la posizione di almeno tre marker è necessario conoscere anche due distanze tra i marker.

Per calcolare la distanza tra due marker, conoscendo le loro coordinate tridimensionali, è possibile utilizzare la formula della distanza tra due punti nello spazio. La distanza tra due generici punti $A \equiv (a_x; a_y; a_z)$ e $B \equiv (b_x; b_y; b_z)$ risulta essere:

$$\overline{AB} = \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2 + (a_z - b_z)^2}$$

Andando ad applicare la seguente formula per tutte le possibili coppie di marker si ottengono 15 distanze in mm che sono riportate nella seguente Tab. 4.9.

Distanze [mm]						
	4	7	15	14	6	11
4	0,000					
7	112,010	0,000				
15	180,731	85,326	0,000			
14	223,240	169,418	103,555	0,000		
6	184,656	195,194	176,074	113,292	0,000	
11	110,397	170,840	194,552	179,329	92,527	0,000

Tab. 4.9: distanze in mm tra i marker

Successivamente, è stato calcolato l'incertezza standard delle distanze.

In primo luogo, viene calcolata l'incertezza standard combinata della distanza utilizzando la legge della composizione della varianza. Questo è un contributo di tipo A in quanto viene valutato con metodi statistici e la varianza delle singole coordinate è stata calcolata replicando le misurazioni.

La distanza d tra due punti A e B è funzione delle coordinate degli stessi punti, come riportate nella formula precedente.

$$dist = f(x_A, y_A, z_A, x_B, y_B, z_B)$$

Assumendo che le variabili dipendenti, ovvero le coordinate dei punti, non siano correlate tra loro si può calcolare la varianza della distanza partendo dalle varianze delle singole variabili, in questo modo:

$$Var(dist) = \sum_i \left(\frac{df}{di} \right)^2 \cdot var_i$$

Le varianze delle coordinate dei singoli marker sono riportati nella seguente Tab. 4.10:

VAR [mm ²]			
	x	y	z
punto 4	0,006	0,020	0,001
punto 7	0,004	0,124	0,001
punto 15	0,004	0,007	0,000
punto 14	0,028	0,002	0,001
punto 6	0,010	0,015	0,001
punto 11	0,007	0,004	0,001

Tab. 4.10: varianze dei marker

Per determinare l'incertezza delle distanze bisogna andare a considerare anche dei contributi di incertezza apportati dallo strumento di misura, ovvero dalla CMM. In particolare, bisogna includere altri due fattori che sono l'errore massimo permessibile (E_{max}), anche indicato come MPE, e l'incertezza di misura ($U(E)$).

Questi due fattori sono esplicitati nel certificato di taratura della macchina di misura a coordinate. Il contributo dell'MPE è di tipo B poiché, sebbene riportato su certificato di taratura, è necessario stimare secondo metodo PUMA la distribuzione statistica. Il contributo dell'incertezza di misura è invece di tipo A, in quanto il certificato riporta il fattore di copertura, ovvero $k=2$.

L'errore massimo assoluto è espresso in μm e dipende dalla lunghezza elementi. Nello specifico, considerando le distanze tra i marker possiamo avere due valori di errore assoluto massimo:

$$E_{max} = \begin{cases} 0,8 \mu m & \text{se } dist < 150 \text{ mm} \\ 1,3 \mu m & \text{se } dist > 150 \text{ mm} \end{cases}$$

Per valutare l'incertezza di tipo B si dovrebbe calcolare la varianza equivalente, ovvero la varianza della distribuzione del fattore esaminato all'interno dell'intervallo di variabilità. Se si tiene conto dell'approssimazione con cui si determina l'incertezza, si considerano solo tre tipi di distribuzione (uniforme, arcoseno e triangolare).

Per valutare l'incertezza dell'errore massimo assoluto viene utilizzata una distribuzione uniforme. Questa, in particolare, viene adottata quando non si conosce il comportamento del fattore di incertezza all'interno del suo campo di variabilità. In questo caso, noti i limiti $\pm E_{max}$ del campo di variabilità, la varianza è:

$$u^2 = \frac{(E_{max})^2}{3}$$

Per quanto riguarda l'incertezza di misura $U(E)$, dal certificato di taratura e considerando il valore delle distanze, si ha un unico valore fisso pari a

$$U(E) = 0,3 \mu m$$

Per valutare l'incertezza di test viene utilizzata una distribuzione normale e si passa dall'incertezza estesa alla varianza, tramite la definizione:

$$u^2 = \left(\frac{U(E)}{k}\right)^2 = \left(\frac{U(E)}{2}\right)^2$$

La varianza delle distanze può essere espressa come somma di questi tre fattori e in particolare si ha:

$$\text{Var}(dist) = \sum_i \left(\frac{df}{di}\right)^2 \cdot var_i + \frac{(E_{max})^2}{3} + \frac{(U(E))^2}{2}$$

I risultati finali sono riportati nella seguente Tab. 4.11:

Var [mm ²]						
Target	4	7	15	14	6	11
4	0,000					
7	0,265	0,000				
15	0,091	0,523	0,000			
14	0,090	0,425	0,092	0,000		
6	0,123	0,160	0,056	0,126	0,000	
11	0,070	0,045	0,046	0,057	0,078	0,000

Tab. 4.11: varianza delle distanze

s [mm]						
Target	4	7	15	14	6	11
4	0,000					
7	0,515	0,000				
15	0,302	0,723	0,000			
14	0,300	0,652	0,303	0,000		
6	0,351	0,400	0,236	0,356	0,000	
11	0,264	0,212	0,214	0,239	0,280	0,000

Tab. 4.12: scarto tipo delle distanze

Note le varianze delle distanze è possibile andare a calcolare anche lo scarto tipo, in quanto:

$$s = \sqrt{var}$$

In Tab. 4.12 sono riportati gli scarti tipo delle distanze.

4.4 Software per fotogrammetria: Agisoft Metashape

Il software utilizzare per la ricostruzione fotogrammetrica, a partire da un set di fotografie, è Agisoft Metashape. Agisoft Metashape è un software indipendente per la modellazione

3D basata su immagini, finalizzata alla creazione di contenuti 3D, come nuvole di punti o mesh texturizzate, di qualità professionale da immagini fisse. Esso è basato sulla più recente tecnologia di ricostruzione 3D multi-view, opera con immagini arbitrarie ed è efficiente sia in condizioni controllate che non controllate. Il vantaggio principale di questo software è che sia l'allineamento delle immagini che la ricostruzione del modello 3D sono completamente automatizzati.

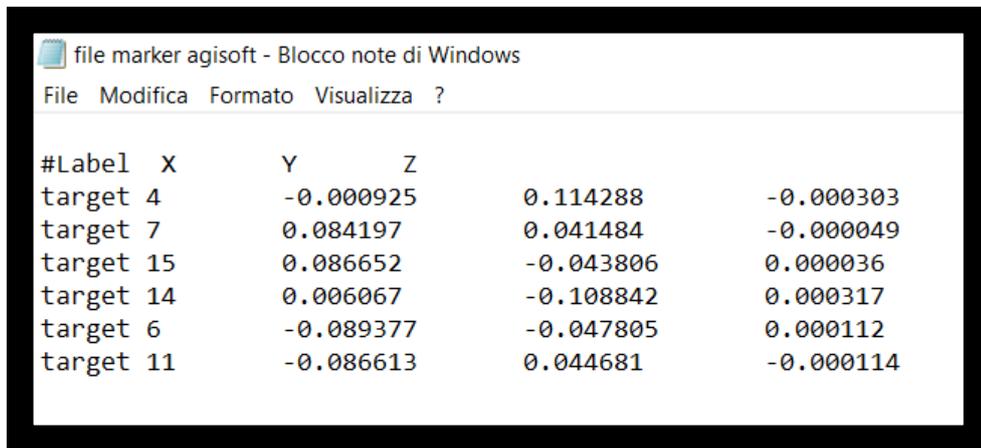
4.4.1 Flusso di lavoro

Per eseguire una ricostruzione tridimensionale all'interno del software, una volta aperto un nuovo progetto, bisogna eseguire determinati passaggi in maniera sequenziale e nel seguente ordine:

1. *Aggiungere le foto.* Prima di iniziare qualsiasi operazione è necessario precisare quali foto verranno utilizzate come fonte per la ricostruzione 3D. Per aggiungere nuove fotografie nel software bisognerà selezionare il comando 'Add photos' oppure 'Add folder', se si vuole aggiungere un'intera cartella di immagini, dal menù Workflow. Dalla finestra di dialogo che si apre è possibile selezionare la foto o la cartella di foto che si vuole processare. Metashape è in grado di elaborare i seguenti formati di foto: JPEG, TIFF, DNG, PNG, OpenEXR, BMP, TARGA, PPM, PGM, SEQ, ARA (thermal images) and JPEG Multi-Picture Format (MPO).
2. *Allineare le foto.* Una volta caricate in Metashape, le foto devono essere allineate. In questa fase Metashape trova la posizione e l'orientamento della fotocamera per ogni foto e costruisce una nuvola di punti sparsa. Per allineare le foto bisognerà selezionare il comando 'Align photos' dal menù Workflow. Successivamente bisognerà selezionare le opzioni desiderate per l'allineamento. Tra i parametri più importanti troviamo: 'accuracy' (una precisione più elevata consente di ottenere stime più accurate delle posizioni della telecamera mentre una precisione più bassa può essere utilizzata se si vogliono ottenere posizioni delle telecamere più approssimate ma in minor tempo; 'key point limit' (il numero indica il limite massimo di punti caratteristici da prendere in considerazione su ogni immagine) e 'tie point limit' (il numero indica il limite superiore dei punti di accoppiamento da considerare per ogni immagine).
3. *Rilevare i marker.* In questa fase vengono rilevati i marker codificati che sono stati stampati sulla tavola rotante. Per eseguire questa fase bisognerà selezionare il comando 'Detect markers' dal sottomenù 'Markers' presente nel menù principale 'Tools'. Successivamente selezionare 'Circular 12 bit' come Marker type e impostare un livello di tolleranza adeguato in modo tale da riconoscere tutti i marker codificati presenti sulla scena. Alla fine di questa fase all'interno della nuvola di punti verranno individuati i marker presenti nella scena (non necessariamente tutti) con il loro numero identificativo.

4. *Caricare le coordinate dei marker.* Per caricare all'interno del software le coordinate dei marker è possibile caricare un file di testo con le informazioni necessarie strutturato come in Fig. 4.11.

Per caricare il file di testo bisognerà spostarsi nel pannello 'Reference' selezionare il comando 'Import' ed infine scegliere il file di testo desiderato.



#Label	X	Y	Z
target 4	-0.000925	0.114288	-0.000303
target 7	0.084197	0.041484	-0.000049
target 15	0.086652	-0.043806	0.000036
target 14	0.006067	-0.108842	0.000317
target 6	-0.089377	-0.047805	0.000112
target 11	-0.086613	0.044681	-0.000114

Fig. 4.11: file di testo delle coordinate dei marker

5. *Creare le scale-bar.* Una scale bar rappresenta una distanza nota all'interno della scena e queste permettono di scalare il modello. Le distanze note nel nostro caso sono le distanze tra i marker. Per creare una scale bar partendo da due marker, dal pannello Reference bisognerà selezionare i due marker di interesse e selezionare il comando 'Create scale bar'.
6. *Ottimizzare l'allineamento delle camere.* Una volta scalato il modello con la definizione delle coordinate dei marker e delle distanze fra di essi è possibile andare ad ottimizzare i parametri interni ed esterni delle camere in modo tale da ottenere una nuvola sparsa più accurata in modo tale da avere un risultato migliore. Per far ciò bisognerà selezionare il comando 'Optimize camera' presente nel pannello Reference.
7. *Creare la nuvola densa.* In base alle posizioni stimate delle telecamere, il software è in grado di calcolare le informazioni sulla profondità di ogni fotografia e li combina in un'unica nuvola di punti densa. Per effettuare ulteriori analisi la nuvola di punti può essere esportata in software esterni. Per creare la nuvola di punti densa bisognerà selezionare il comando 'Build Dense Cloud' dal menù Workflow. Successivamente bisognerà indicare i parametri per la costruzione della nuvola. Tra i parametri più importanti troviamo 'quality' (maggiore è la qualità maggiore saranno i dettagli e la precisione della geometria).
8. *Creare la mesh.* Una mesh è un reticolo che definisce un oggetto nello spazio, composto da vertici, spigoli e facce. Essa rappresenta un'oggetto tridimensionale e deriva da un'approssimazione dei punti della nuvola in tante piccole superfici triangolari. Per costruire la mesh bisognerà selezionare il

comando 'Build Mesh' dal menù Workflow. Fra i parametri più importanti da specificare in questa fase abbiamo: 'face count' (che indica il numero massimo di superfici da generare per la costruzione della mesh, maggiore è il numero di superfici maggiore sarà il dettaglio della mesh) e 'interpolation' (se è disabilitata vengono ricostruiti solo le aree in cui ci sono punti della nuvola; se abilitata Metashape interpola alcune aree della superficie all'interno di un cerchio di un certo raggio; mentre con la funzione 'extrapolated' il programma genera un modello senza buchi con una geometria estrapolata).

9. *Salvare il modello*

Questa intera procedura è stata automatizzata creando un codice in Python. Agisoft Metashape, infatti, supporta l'API di Python. Tramite questa funzionalità è stato possibile generare uno script che contenesse tutti i passaggi sopra descritti, andando a specificare anche i parametri di costruzione di tutti i modelli, che ha permesso di limitare al minimo le interazioni dell'uomo con il software. Per avviare uno script all'interno del software sarà necessario selezionare il comando 'Run script' dal menu Tools.

4.5 Software per la misurazione delle mesh: Atos Professional 2020

Per effettuare misurazioni sulla mesh ottenuta con Agisoft Metashape, questa viene caricata all'interno del software Atos Professional 2020.

Atos Professional è una soluzione software affidabile per il controllo degli scanner 3D Atos e la produzione di dati accurati rispetto alle superfici 3D, con una gamma completa di funzioni di analisi e reportistica in un unico pacchetto software. ATOS Professional è quindi un software completo di analisi e misura parametriche e tracciabili per analisi dimensionali.

5 CARATTERIZZAZIONE METROLOGICA DEL SISTEMA DI MISURA

5.1 Metodologia

Per valutare le caratteristiche metrologiche ed in particolare l'incertezza della misura associata al sistema idealizzato sono state effettuate delle misurazioni su diversi artefatti di riferimento.

In primo luogo, l'artefatto viene misurato con uno strumento tarato e con performance metrologiche elevate. Successivamente, l'oggetto in esame viene misurato anche con il sistema fotogrammetrico sviluppato, facendo misure ripetute e calcolando anche le caratteristiche metrologiche e l'incertezza come da definizioni date in precedenza nel capitolo 3. Infine, per controllare che le misure effettuate con i due diversi sistemi siano statisticamente compatibili vengono effettuati dei test d'ipotesi.

5.2 Caso studio Ball-bar

In questo caso studio l'oggetto di prova è una ball-bar, ovvero una barra in metallo che presenta alle estremità due sfere ed è raffigurata in Fig. 5.1. Su questo artefatto sono state prese tre misure:

1. Diametro sfera di destra (D_1);
2. Diametro sfera di sinistra (D_2) e
3. Distanza tra i centri delle due sfere (d).



Fig. 5.1: ball-bar

5.2.1 Misurazioni GOM

Le misurazioni della ball-bar effettuate sul sistema a luce strutturata GOM hanno l'obiettivo di andare a definire il 'valore reale' del misurando che risulta necessario per definire l'accuratezza del sistema e successivamente per fare ulteriori analisi con opportuni test d'ipotesi.

In particolare, sono state effettuate cinque misurazioni e i risultati sono riportati in Tab. 5.1.

Misurazioni GOM [mm]			
	D ₁	D ₂	Dist
1	37,86	37,9	99,34
2	37,88	37,9	99,33
3	37,86	37,94	99,36
4	37,86	37,89	99,32
5	37,85	37,9	99,33

Tab. 5.1: Misurazioni ball-bar al GOM

Il valore reale del misurando viene, poi, calcolato come media aritmetica dei valori delle cinque misurazioni. Risulta:

$$D_1 = 37,862 \text{ mm}$$

$$D_2 = 37,906 \text{ mm}$$

$$Dist = 99,336 \text{ mm}$$

Successivamente, è stata calcolata l'incertezza relative a tutte e tre le misure.

In particolare, l'incertezza della misura è composta da quattro contributi: riproducibilità, risoluzione, tracciabilità e MPE (maximum permissible error) del sistema di misura a luce strutturata. Il contributo dovuto alla riproducibilità corrisponde alla deviazione standard delle misurazioni riportate in Tab. 5.1. Si ha quindi:

$$Ripr_{D_1} = 0,0110 \text{ mm}$$

$$Ripr_{D_2} = 0,0195 \text{ mm}$$

$$Ripr_{Dist} = 0,0152 \text{ mm}$$

La risoluzione è un parametro intrinseco del sistema di misura ed è uguale per tutte e tre le misure. Nello specifico, la risoluzione del sistema GOM è pari:

$$Resol = 0,0006 \text{ m}$$

Abbiamo, poi, un contributo dovuto alla tracciabilità. Quello di riferibilità metrologica, è il concetto fondamentale delle misure moderne. Esso garantisce la comparabilità dei risultati di misura a livello globale ed è richiesto da standard come ISO 9001, USP, ISO 17025 e molti altri ancora.

Anche in questo, caso, il contributo è uguale per tutte e tre le misure ed è pari:

$$U \text{ trac} = 0,001 \text{ mm}$$

Infine, si ha un contributo legato all'errore massimo ammissibile (MPE) del sistema di misura. Questo dipende dal tipo di misurazione e in particolare abbiamo:

$$MPE_{D_1} = 0,009 \text{ mm}$$

$$MPE_{D_2} = 0,009 \text{ mm}$$

$$MPE_{Dist} = 0,019 \text{ mm}$$

L'incertezza totale delle misure si ottiene andando a propagare i vari contributi:

$$u_R = \sqrt{(Ripr)^2 + \frac{(MPE)^2}{3} + \left(\frac{U \text{ trac}}{2}\right)^2 + \frac{\left(\frac{Resol}{2}\right)^2}{3}}$$

In Tab. 5.2 vengono riportati i valori delle incertezze standard ottenuti per tutte e tre le misure:

u _R [mm]		
D ₁	D ₂	Dist
0,012	0,020	0,019

Tab. 5.2: incertezze delle misure

5.2.2 Misurazioni sistema fotogrammetrico

La ricostruzione di un oggetto 3D con il sistema ideato e di conseguenza la misurazione dell'oggetto stesso è influenzata da più fattori, che possono alterare il valore della misura.

5.2.2.1 Progettazione dell'esperimento

La qualità e il livello di dettaglio di una mesh 3D ottenuta tramite il processo fotogrammetrico dipende sostanzialmente da due fattori:

1. il numero di fotografie (Foto);
2. il livello del parametro di qualità impostato nel software Agisoft Metashape (Qualità).

Si è condotto quindi un Design of Experiment (DoE) per andare a descrivere e valutare le variazioni che si hanno sulle misure al variare dei fattori. Per far ciò è necessario andare a ripetere l'esperimento con tutte le possibili combinazioni dei livelli dei fattori. Si ipotizza generalmente che la modifica di una o più variabili indipendenti determini una modifica di una o più variabili dipendenti, dette anche "variabili di output" o "variabili di risposta". L'effetto di un fattore è definito come la variazione della risposta prodotta da una variazione del livello del fattore. Ad esempio, si consideri il semplice esperimento della Figura 5.2. Si tratta di un piano fattoriale a due fattori con entrambi i fattori di progetto a due livelli. I livelli sono stati chiamati "basso" e "alto" e sono stati indicati rispettivamente con "+" e "-".

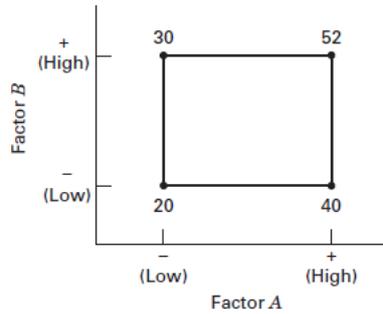


Fig. 5.2: esperimento a due fattori

L'effetto principale del fattore A in questo disegno a due livelli può essere considerato come la differenza tra la risposta media al livello basso di A e la risposta media al livello alto di A. Numericamente, questo equivale:

$$A = \frac{40 + 52}{2} - \frac{20 + 30}{2} = 21$$

In altri termini, l'aumento del fattore A dal livello basso a quello alto provoca un aumento medio della risposta di 21 unità. Analogamente, l'effetto principale di B è

$$B = \frac{30 + 52}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 11$$

In alcuni esperimenti, si può avere che la differenza di risposta tra i livelli di un fattore non è la stessa a tutti i livelli degli altri fattori. Se ciò accade, vuol dire che c'è un'interazione tra i fattori. Ad esempio, si consideri l'esperimento a due fattori mostrato nella Figura 5.3. Al livello basso del fattore B, l'effetto di A è:

$$A = 50 - 20 = 30$$

e al livello alto del fattore B, l'effetto di A è:

$$A = 12 - 40 = -28$$

Poiché l'effetto di A dipende dal livello scelto per il fattore B, vediamo che esiste un'interazione tra A e B. L'entità dell'effetto di interazione è la differenza media di questi due effetti di A:

$$AB = \frac{-28 - 30}{2} = -29$$

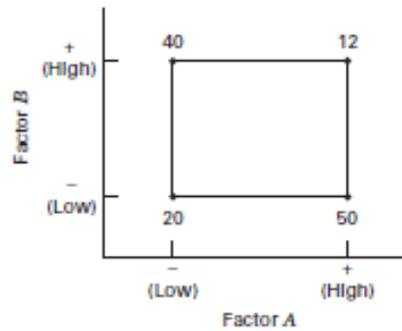


Fig. 5.3: esperimento a due fattori con interazione

Questo concetto può essere illustrato anche graficamente. La Figura 5.4 mostra i dati della Figura 5.2 rispetto al fattore A per entrambi i livelli del fattore B. Poiché le linee B^- e B^+ sono tra di loro approssimativamente parallele non c'è interazione tra i fattori. Similmente, la Figura 5.5 mostra i dati della Figura 5.3. In questo caso si nota che le due rette si intersecano e questo indica un'interazione tra i fattori.

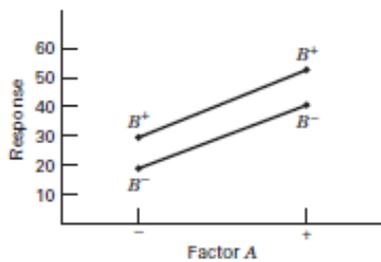


Fig. 5.4: un esperimento senza interazione

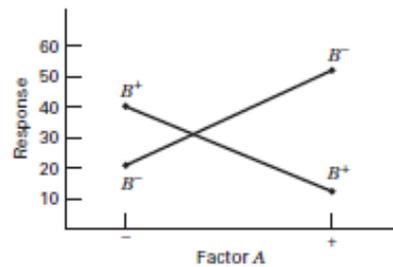


Fig. 5.5: un esperimento con interazione

Nell'esperimento in questione, sono stati assegnati due livelli per ciascun fattore. Nello specifico, si sono considerati i fattori "numero di foto" e "qualità di ricostruzione" e si è deciso di ripetere il processo con 24 o 36 foto con qualità 'High' o 'Ultra'. Si hanno quindi, quattro possibili combinazioni di ricostruzione.

Per ottenere più misurazioni, poi, si è deciso di scattare cinque set di immagini diverse andando a modificare l'orientamento della ball-bar rispetto alla tavola rotante. Ogni set di immagini è composto da 72 fotografie (ottenute ruotando il rotondimetro di 5° tra una foto e l'altra) e da queste vengono creati gli insiemi di immagini da 24 e 36 selezionando le foto con frequenza rispettivamente di 15° e 10° .

In totale sono state effettuate 20 ricostruzioni, quattro per ogni set di immagini. I risultati ottenuti sono mostrati in Tabella 5.3 mentre in Figura 5.6 viene mostrata una misurazione effettuata sul software ATOS Professional.

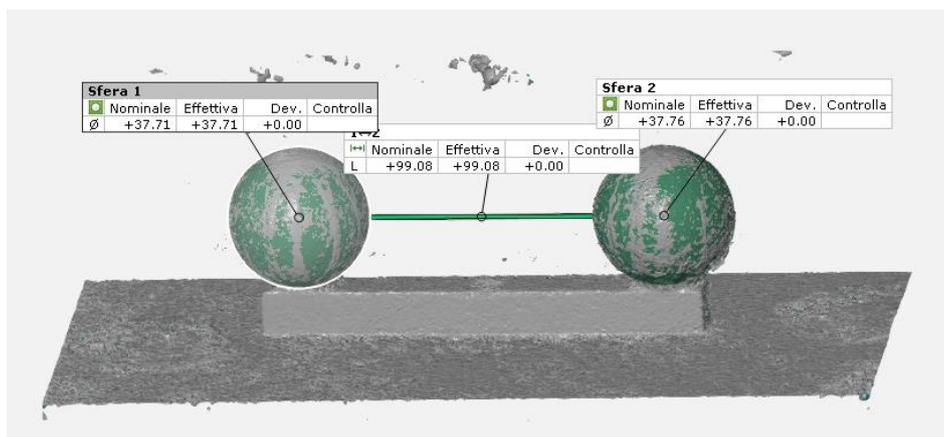


Fig. 5.6: misurazione ball-bar

Misurazioni						
SET	Qualità	Foto	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	d[mm]	Tempo [min]
1	Ultra	36	38,037	38,099	99,823	15,43
1	High	36	37,94	37,984	99,595	5,28
1	Ultra	24	37,286	37,308	98,432	5,73
1	High	24	37,228	37,315	98,513	2,42
2	Ultra	36	37,675	37,758	99,131	47,78
2	High	36	37,672	37,72	99,151	13,18
2	Ultra	24	37,575	37,636	98,888	9,03
2	High	24	37,58	37,625	98,925	3,62
3	Ultra	36	37,616	37,678	99,01	61,68
3	High	36	37,583	37,637	99,035	18,03
3	Ultra	24	37,688	37,724	99,154	23,65
3	High	24	37,691	37,694	99,167	6,62
4	Ultra	36	37,716	37,761	99,082	19,52
4	High	36	37,703	37,709	99,111	11,27
4	Ultra	24	37,824	37,767	99,261	8,08
4	High	24	37,827	37,724	99,292	3,07
5	Ultra	36	37,991	37,994	99,694	20,53
5	High	36	38,019	37,962	99,67	16,38
5	Ultra	24	37,699	37,693	99,105	8,28
5	High	24	37,7	37,663	99,109	4,20

Tab. 5.3: Misurazioni con il sistema fotogrammetrico

Si nota che nei risultati dei tempi è presente un outlier (61,68 min). Questo è stato, successivamente sostituito con la mediana dei valori ottenuti con la combinazione 36-High, ovvero 20,53 min.

Le statistiche generali delle variabili dipendenti (D₁, D₂, d, Tempo) sono riportate in Figura 5.7.

Statistics

Variable	Foto	N	N*	Mean	SE Mean	StDev	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum
D1[mm]	24	10	0	37,610	0,0645	0,204	37,228	37,503	37,690	37,731	37,827
	36	10	0	37,795	0,0567	0,179	37,583	37,658	37,710	37,998	38,037
D2[mm]	24	10	0	37,615	0,0523	0,165	37,308	37,547	37,678	37,724	37,767
	36	10	0	37,830	0,0514	0,162	37,637	37,701	37,760	37,986	38,099
Dist[mm]	24	10	0	98,985	0,0945	0,299	98,432	98,794	99,107	99,190	99,292
	36	10	0	99,330	0,102	0,322	99,010	99,070	99,141	99,676	99,823
Tempo [min]_1	24	10	0	7,47	1,94	6,14	2,42	3,48	6,18	8,47	23,65
	36	10	0	16,07	1,58	4,99	5,28	12,70	17,21	20,53	20,53

Fig. 5.7: statistiche generali delle variabili

Con questi dati, poi, è stata fatta un'analisi grafica degli effetti principali dei fattori 'Foto' e 'Qualità' sulle variabili dipendenti, grazie all'ausilio del software Minitab e i risultati sono riportati nelle seguenti Figure.

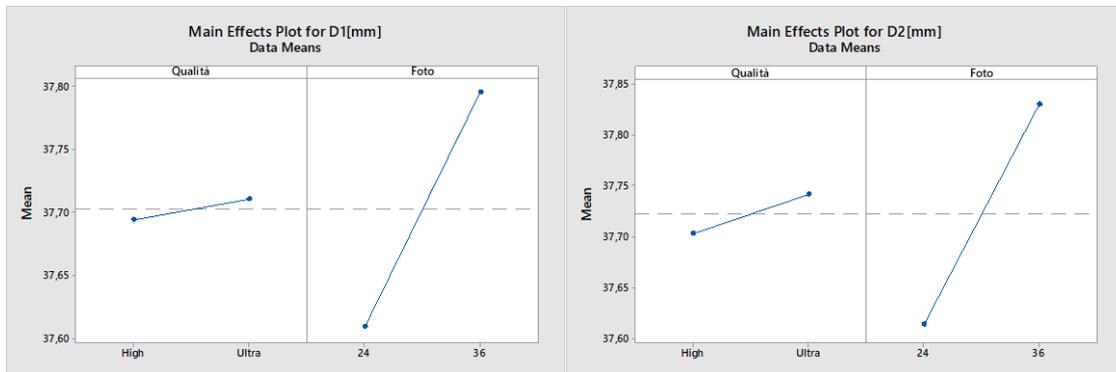


Fig. 5.8: effetti principali su D₁

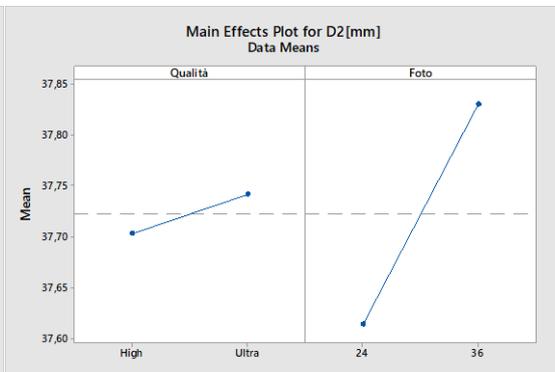


Fig. 5.9: effetti principali su D₂

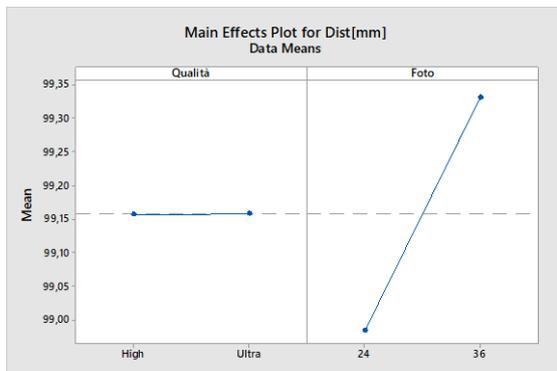


Fig. 5.10: effetti principali su Dist

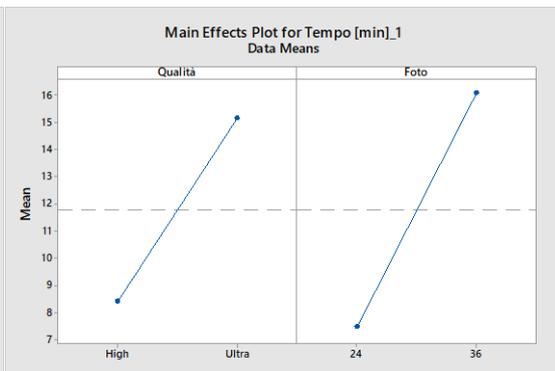


Fig. 5.11: effetti principali su Tempo

Da una prima analisi qualitativa si nota che per D₁, D₂ e Dist la qualità della ricostruzione non impatta sulle medie, mentre il numero di fotografie ha un impatto che potrebbe essere significativo. Per i tempi come prevedibile, sia qualità che numero di fotografie generano una significativa differenza della media.

Successivamente viene fatta un'ulteriore analisi per verificare se ci sia interazione tra i due fattori 'Foto' e 'Qualità'. I risultati sono riportati nelle seguenti Figure.

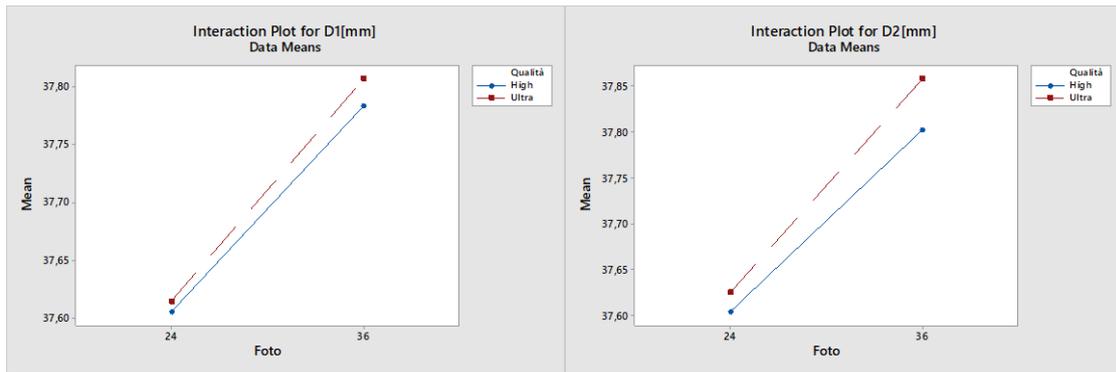


Fig. 5.12: grafico interazione D₁

Fig. 5.13: grafico interazione D₂

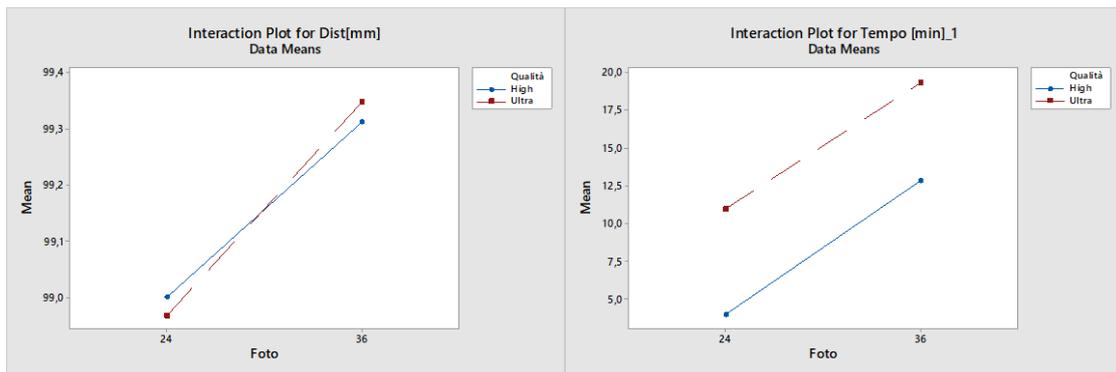


Fig. 5.14: grafico interazione Dist

Fig. 5.15: grafico interazione Tempo

Dai risultati si nota che per le variabili D₁, D₂ e Tempo non vi è interazione fra i fattori categoriali, in quanto le rette non si intersecano tra di loro, mentre sembrerebbe ci sia interazione per la variabile Dist poiché le due rette si intersecano.

Infine, è stata eseguita un'analisi quantitativa della varianza ANOVA (Analysis of Variance) per verificare se c'è una differenza significativa tra le medie dei livelli dei fattori categoriali 'Foto' e 'Qualità' per tutte e quattro le variabili dipendenti (D₁, D₂, Dist e Tempo) e se vi è un effetto di correlazione tra i due fattori.

5.2.2.2 ANOVA

Per eseguire un'analisi ANOVA risulta utile descrivere le osservazioni di un esperimento con un modello:

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

dove y_{ij} è la ij -esima osservazione, μ_i è la media dell' i -esimo livello del fattore, ε_{ij} è un errore casuale che incorpora al suo interno tutte le altre fonti di variabilità dell'esperimento, a è il numero di livelli (treatments) e n è il numero di osservazioni per livello. Il modello descritto è detto 'means model'.

Questo modello può essere scritto in maniera alternativa andando a definire

$$\mu_i = \mu + \tau_i \quad i = 1, 2, \dots, a$$

il modello quindi diventa:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

In questa forma del modello, μ è un parametro comune a tutti i livelli del fattore chiamato ‘overall mean’ e τ_i è un parametro unico dell’ i -esimo livello detto ‘treatment effect’. Il modello così strutturato è di solito chiamato ‘effects model’.

I modelli descritti sono anche conosciuti come modello dell’analisi della varianza a una via, ovvero ANOVA, in quanto viene considerato un singolo fattore.

L’obiettivo principale dell’ANOVA è quello di testare ipotesi sulle medie dei livelli dei fattori.

Per ipotesi, si assume che l’errore ε sia distribuito normalmente con media nulla e varianza σ^2 . Inoltre, si assume che la varianza σ^2 sia costante per tutti i livelli del fattore. Questo implica che la singola osservazione y_{ij} sia distribuita normalmente con media $\mu + \tau_i$ e varianza σ^2 e che le osservazioni siano mutualmente indipendenti.

$$y_{ij} \sim N(\mu + \tau_i, \sigma^2)$$

Di seguito viene illustrato il modello ad effetti fissi, che viene utilizzato quando i livelli sono stati scelti in maniera esplicita.

Con questo modello si testano le ipotesi sulle medie dei livelli scelti e le conclusioni vengono applicate ai soli livelli considerati.

Innanzitutto, definiamo $y_{i.}$ come la somma totale delle osservazioni con l’ i -esimo livello e $\bar{y}_{i.}$ come la media delle osservazioni con l’ i -esimo livello. Analogamente $y_{..}$ la somma di tutte le osservazioni dell’esperimento e $\bar{y}_{..}$ la media di tutte le osservazioni. Simbolicamente:

$$y_{i.} = \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \bar{y}_{i.} = y_{i.}/n$$

$$y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad \bar{y}_{..} = y_{..}/N$$

dove $N = an$ è il numero totale di osservazioni.

Il nostro interesse è verificare se le medie degli a trattamenti siano uguali. Le ipotesi del test sono:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ per almeno una coppia } (i, j)$$

Nel modello degli effetti si scompone l’ i -esima media μ_i in due componenti $\mu_i = \mu + \tau_i$

$$\mu = \frac{\sum_i^a \mu_i}{a}$$

Questa definizione implica che

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0$$

Di conseguenza, si può scrivere il test d'ipotesi in termini di effetti dei livelli τ_i

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ per almeno un livello } i$$

La procedura appropriata per testare l'uguaglianza delle medie dei livelli di un fattore è l'analisi della varianza.

Con l'analisi della varianza si va a suddividere la variabilità totale in componenti che è misurata attraverso la somma dei quadrati

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2 = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2 + \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2$$

Questa è l'equazione fondamentale dell'ANOVA. Essa afferma che la variabilità totale dei dati può essere suddivisa in una somma dei quadrati delle differenze tra le medie dei trattamenti e la media generale più una somma dei quadrati delle differenze delle osservazioni all'interno dei trattamenti rispetto alla media dei trattamenti. In particolare, la differenza tra le medie osservate dei trattamenti e la media generale è una misura delle differenze tra le medie dei trattamenti, mentre le differenze delle osservazioni all'interno di un trattamento rispetto alla media del trattamento è dovuta ad un errore casuale. Quindi possiamo riscrivere simbolicamente l'equazione

$$SS_T = SS_{Treatments} + SS_E$$

Ci sono N totali osservazioni; quindi SS_T ha $N - 1$ gradi di libertà. Ci sono a livelli di un fattore; quindi $SS_{Treatments}$ ha $a - 1$ gradi di libertà. Di conseguenza, SS_E ha $N - a$ gradi di libertà.

Le quantità

$$MS_{Treatments} = \frac{SS_{Treatments}}{a - 1}$$

e

$$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$$

sono dette 'quadrati medi' e sono una stima della varianza σ^2 se le medie dei livelli sono uguali. L'equazione ANOVA, quindi, ci da due stime di σ^2 , una basata sulla variabilità

all'interno dei livelli e l'altra tra i livelli stessi e se non ci sono differenze tra le medie dei trattamenti queste due stime dovrebbero essere simili tra di loro. Quindi il test d'ipotesi sulla differenza tra le medie può essere fatto confrontando $MS_{Treatments}$ e MS_E .

Innanzitutto, poiché abbiamo assunto che l'errore ε_{ij} è normalmente distribuito con media nulla e varianza σ^2 , le osservazioni y_{ij} sono distribuite normalmente con media $\mu + \tau_i$ e varianza σ^2 . Quindi, SS_T è una somma di quadrati con variabili normalmente distribuite e di conseguenza è dimostrato che SS_T/σ^2 è distribuito con una Chi-quadro con $N - 1$ gradi di libertà.

Inoltre, si può dimostrare che SS_E/σ^2 è una Chi-quadro con $N - a$ gradi di libertà e che $SS_{Treatments}/\sigma^2$ è una Chi-quadro con $a - 1$ gradi di libertà se l'ipotesi nulla $H_0: \tau_i = 0$ è vera. In aggiunta, il teorema di Cochran implica che SS_E/σ^2 e $SS_{Treatments}/\sigma^2$ sono indipendenti. Dunque, se l'ipotesi nulla è vera, il rapporto

$$F_0 = \frac{SS_{Treatments}/(a - 1)}{SS_E/(N - a)} = \frac{MS_{Treatments}}{MS_E}$$

è distribuito con una F con $a - 1$ e $N - a$ gradi di libertà. L'equazione riportata rappresenta il test statistico per l'ipotesi dell'uguaglianza tra le medie.

L'ipotesi nulla deve essere rifiutata se

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$$

L'analisi della varianza, nel nostro caso, è stata effettuata tramite il software Minitab e i risultati sono riportati in Figura 5.16.

Dai risultati si può notare che la differenza delle medie tra i livelli dal fattore 'Foto' è significativa sia per D₁, D₂ e Dist (p value basso), mentre la differenza delle medie dei livelli del fattore 'Qualità' non è significativa (p value alto) così come l'interazione 'Qualità*Foto' per tutte e tre le variabili dipendenti.

Da ciò si può dedurre che la 'Qualità' della ricostruzione non impatta sul risultato finale della misura, almeno per i livelli High e Ultra mentre al variare del numero di fotografie sia ha una variazione significativa dei risultati. In conclusione, alla luce dei risultati dell'ANOVA, è possibile raggruppare le misure con qualità Ultra e High e fare un'unica distinzione in base al numero di fotografie.

Per la variabile Tempo, come prevedibile, c'è una differenza significativa tra le medie dei livelli di entrambi i fattori ma non si nota un'interazione tra di loro.

ANOVA: D1[mm]; D2[mm]; Dist[mm]; Tempo [min]_1 ... s Qualità; Foto

Factor Information

Factor	Type	Levels	Values
Qualità	Fixed	2	High; Ultra
Foto	Fixed	2	24; 36

Analysis of Variance for D1[mm]

Source	DF	SS	MS	F	P
Qualità	1	0,001345	0,001345	0,03	0,859
Foto	1	0,171866	0,171866	4,15	0,058
Qualità*Foto	1	0,000259	0,000259	0,01	0,938
Error	16	0,662371	0,041398		
Total	19	0,835841			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
0,203465	20,75%	5,90%

Analysis of Variance for D2[mm]

Source	DF	SS	MS	F	P
Qualità	1	0,007411	0,007411	0,25	0,624
Foto	1	0,231770	0,231770	7,81	0,013
Qualità*Foto	1	0,001462	0,001462	0,05	0,827
Error	16	0,474847	0,029678		
Total	19	0,715491			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
0,172273	33,63%	21,19%

Analysis of Variance for Dist[mm]

Source	DF	SS	MS	F	P
Qualità	1	0,00001	0,000007	0,00	0,994
Foto	1	0,59720	0,597197	5,52	0,032
Qualità*Foto	1	0,00592	0,005917	0,05	0,818
Error	16	1,72946	0,108091		
Total	19	2,33258			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
0,328773	25,86%	11,95%

Analysis of Variance for Tempo [min]_1

Source	DF	SS	MS	F	P
Qualità	1	226,195	226,195	10,75	0,005
Foto	1	369,743	369,743	17,57	0,001
Qualità*Foto	1	0,306	0,306	0,01	0,906
Error	16	336,683	21,043		
Total	19	932,927			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
4,58723	63,91%	57,14%

Fig. 5.16: Analisi ANOVA

In Tabella 5.4 e 5.5 sono riportati i valori di media e varianza dovuta alla riproducibilità (s^2_x) ottenuti andando a differenziare le misurazioni solo in base al fattore 'Foto'.

24			
	D ₁	D ₂	Dist
Media [mm]	37,610	37,615	98,985
s^2_{ripr} [mm ²]	0,042	0,027	0,089

Tab. 5.4: statistiche '24'

36			
	D ₁	D ₂	Dist
Media [mm]	37,795	37,830	99,330
s ² _{ripr} [mm ²]	0,032	0,026	0,104

Tab. 5.5: statistiche '36'

5.2.2.3 Valutazione incertezza

Per la valutazione dell'incertezza delle misurazioni dobbiamo andare a considerare, oltre al contributo dato dalla riproducibilità, anche il contributo dato dalla risoluzione e dalla giustezza.

Per definire la risoluzione, è stata valutata la più piccola variazione delle coordinate, in tutti e tre gli assi, dei punti appartenenti alla nuvola di punti densa. Ciò è stato fatto, in primo luogo salvando le coordinate dei punti sotto forma di file .txt e poi tramite l'ausilio di Matlab si è potuto semplicemente calcolare la più piccola differenza tra le coordinate in x, y e z. Si è scoperto che il software Agisoft Metashape ha una risoluzione pari a:

$$Ris = 10^{-6} \text{ mm}$$

Per valutare il contributo della risoluzione viene utilizzata una distribuzione uniforme, da cui si ottiene una varianza pari a:

$$u_{ris}^2 = \frac{Ris^2}{12}$$

Per quanto riguarda la giustezza, essa è espressa come la differenza tra il valore di una grandezza misurata e il suo valore di riferimento e può essere valutata tramite l'accuratezza.

$$Giust = X - R$$

La grandezza misurata X è distribuita normalmente con media m_x e varianza s_x^2 che corrisponde alla varianza dovuta alla riproducibilità.

$$X \sim N(m_x, s_x^2)$$

Anche il riferimento R è distribuito secondo una distribuzione normale con media m_R e varianza u_R^2 che corrispondono alla media e alla varianza delle misure ottenute con il sistema a luce strutturata ATOS.

$$R \sim N(m_R, u_R^2)$$

Di conseguenza, la giustezza sarà distribuita normalmente con media $m_x - m_R$ e varianza $s_x^2 + u_R^2$:

$$Giust \sim N(m_x - m_R, s_x^2 + u_R^2)$$

La differenza $m_x - m_R$ può essere vista come un ‘bias’ ovvero la stima di un errore di misura sistematico che può essere propagato. Il bias, indicato con e_a , è definito come l’errore massimo tra le misure ottenute con il sistema fotogrammetrico e la misura vera.

$$e_a = \max\{|x_i - R|\}$$

Si assume, poi, che il bias abbia una distribuzione uniforme. Quindi, si ha un contributo aggiuntivo in termini di varianza pari a:

$$u_{acc} = \frac{(e_a)^2}{3}$$

La varianza totale delle misurazioni è quindi formata da quattro contributi: riproducibilità, riferimento, risoluzione e bias.

$$u_x = \sqrt{s_x^2 + u_R^2 + \frac{Ris^2}{12} + \frac{(e_a)^2}{3}}$$

In tabella 5.5 e 5.6 sono riportati i valori ottenuti di incertezza per le misurazioni con 36 e 24 fotografie.

24			
	D ₁	D ₂	Dist
u ² [mm ²]	0,176	0,147	0,362
u [mm]	0,419	0,383	0,602

Tab. 5.5: incertezza ‘24’

36			
	D ₁	D ₂	Dist
u ² [mm ²]	0,058	0,051	0,183
u [mm]	0,241	0,226	0,428

Tab. 5.6: incertezza ‘36’

5.2.3 Test d’ipotesi

In questo paragrafo vengono condotti dei test d’ipotesi per verificare se medie delle varie misure ottenute con i due sistemi si possano ritenere uguali.

5.2.3.1 Test F sulle varianze

In primo luogo, vengono condotti dei test F per verificare se le varianze delle misure ottenute con il sistema fotogrammetrico possano ritenersi uguali. In particolare, vengono testate le varianze delle misure D_1 e D_2 ottenute con 36 e 24 fotografie e anche le due varianze delle tre misure D_1 , D_2 e $Dist$.

Per questi test si è utilizzato un livello di significatività del 95%, con $\alpha = 0,05$.

Le ipotesi da verificare sono:

$$H_0: s_1^2 = s_2^2$$

$$H_1: s_1^2 \neq s_2^2$$

Poiché per ogni gruppo di misure sono state effettuate dieci misurazioni, $n = 10$. Di conseguenza, si ha un numero di gradi di libertà

$$v = n - 1 = 9$$

Il valore della statistica su cui si basa la decisione F_0 è pari

$$F_0 = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

H_0 viene rifiutata se $F_0 < F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ oppure se $F_0 > F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$, dove $F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ e $F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1}$ sono i limiti di accettazione della distribuzione di Fischer. I due limiti sono legati tramite la seguente relazione:

$$F_{1-\alpha, v_1, v_2} = \frac{1}{F_{\alpha, v_1, v_2}}$$

Essendo $\alpha = 0,05$ e $v_1 = v_2 = 9$, dalle tabelle si ha che:

$$F_{\frac{\alpha}{2}, n_1-1, n_2-1} = 4,03$$

$$F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1} = 0,25$$

In Tabella 5.7 vengono riportati i valori di F_0 per tutti i test svolti prendendo come valori delle varianze quelli riportati in Tab. 5.5 e 5.6.

Test Fischer			
Test	s_1^2	s_2^2	F_0
$D_1(36)$ e $D_2(36)$	0,058	0,051	1,144
$D_1(24)$ e $D_2(24)$	0,176	0,147	1,196
$D_1(36)$ e $D_1(24)$	0,058	0,176	0,331
$D_2(36)$ e $D_2(24)$	0,051	0,147	0,346
$Dist(36)$ e $Dist(24)$	0,183	0,362	0,505

Tab. 5.7: Test Fischer

Dai risultati ottenuti di F_0 si nota che tutti i valori sono compresi tra 0,25 e 4,03, che sono i limiti di accettazione del test. Quindi non si può rifiutare l'ipotesi che le varianze siano uguali per tutti i test svolti.

5.2.3.2 Test t sulle medie

Una volta accertatosi che tutte le coppie di varianze possono ritenersi uguali, si procede con il test sulle media quando le varianze della popolazione non note ma possono ritenersi uguali.

In questo test le ipotesi sono:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

La statistica t_0 è pari a:

$$t_0 = \frac{\mu_1 - \mu_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

dove S_p^2 è una stima della varianza comune ed è pari:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}$$

L'ipotesi nulla H_0 viene rifiutata se $|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_2-2}$

Essendo $\alpha = 0,05$ e $n_1 + n_2 - 2 = 18$, dalle tabelle si ha che:

$$t_{\frac{\alpha}{2}, n_1+n_2-2} = 2,101$$

In Tabella 5.7 vengono riportati i valori t_0 per tutti i test svolti.

Test t				
Test	s_1^2	s_2^2	$ \mu_1 - \mu_2 $	$ t_0 $
D ₁ (36) e D ₂ (36)	0,058	0,051	0,035	0,335
D ₁ (24) e D ₂ (24)	0,176	0,147	0,0051	0,028
D ₁ (36) e D ₁ (24)	0,058	0,176	0,1854	1,212
D ₂ (36) e D ₂ (24)	0,051	0,147	0,2153	1,531
Dist(36) e Dist(24)	0,183	0,362	0,3456	1,480

Tab. 5.7: test t sulle medie

Dai risultati in tabella si nota che per tutti i test svolti il valore di $|t_0|$ non è mai superiore a 2,101, quindi per tutti i casi non si può rifiutare l'ipotesi nulla H_0 e quindi per tutte le coppie di misure si assumono medie uguali.

5.2.3.3 Test con le misure di riferimento

Una volta testato che non ci sono differenze tra le misure con 24 e 36 fotografie, è possibile raggruppare i due set di misure ottenendo così un unico insieme di 20 misure per D_1 , D_2 e Dist. La media, lo scarto tipo e l'incertezza estesa dei nuovi gruppi sono calcolati andando a fare una media aritmetica tra i valori con 24 e 36 foto.

In Tabella 4.8 vengono riportati i nuovi valori delle misure.

Misure			
	D_1	D_2	Dist
Media [mm]	37,703	37,723	99,157
u [mm]	0,342	0,315	0,522
U [mm]	0,684	0,630	1,044
n	20	20	20

Tab. 5.8: statistiche misure raggruppate

Si vuole, ora, testare se queste misure possono ritenersi uguali a quelle vere ottenute con il sistema a luce strutturata che sono riportate in Tabella 5.9.

Riferimento			
	D_1	D_2	Dist
Media [mm]	37,862	37,906	99,336
u_R [mm]	0,012	0,020	0,019
n	5	5	5

Tab. 5.9: statistiche misure riferimento

Si nota intuitivamente che le varianze delle due misure hanno ordini di grandezza diversi; quindi, si ritengono diverse senza effettuare il test di ipotesi F per le varianze.

Si procede pertanto con un test di ipotesi sulle medie quando le varianze non sono note e sono diverse. Le ipotesi del test sono:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

La statistica t_0 è pari a:

$$t_0 = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}}$$

In questo caso, poiché è di nostro interesse soltanto la misura singola $n_1 = n_2 = 1$ Per questo tipo di test è necessario calcolare il numero di gradi di libertà tramite la formula di Welch-Satterthwaite. In particolare, si ha:

$$v = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$$

L'ipotesi nulla H_0 viene rifiutata se $|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2},v}$ con $\alpha = 0,05$.

In tabella 5.10 vengono riportati i risultati dei test d'ipotesi.

test t							
Test	s_1^2	s_2^2	v	$ \mu_1 - \mu_2 $	s^*	$ t_0 $	$t_{\alpha/2,v}$
D ₁ (mis) e D ₁ (rif)	0,117	0,00015	19	0,1595	0,342	0,466	2,093
D ₂ (mis) e D ₂ (rif)	0,099	0,00041	19	0,1835	0,315	0,582	2,093
Dist(mis) e Dist(rif)	0,272	0,0035	19	0,1786	0,522	0,342	2,093

Tab. 5.10: test d'ipotesi misure e riferimento

Dai risultati si nota che per tutte e tre le dimensioni D₁, D₂ e Dist $|t_0| < t_{\frac{\alpha}{2},v}$ e quindi, non si può rifiutare l'ipotesi nulla e le due medie si ritengono uguali.

5.3 Caso studio: saldatura laser

Per verificare il funzionamento del sistema fotogrammetrico si è deciso di ripetere le misurazioni su un altro artefatto. In questo caso studio sono prese le dimensioni principali di una saldatura laser, mostrata in Figura 5.1. Nello specifico sono state misurate tre dimensioni:

1. Picco della saldatura (S_p);
2. Raggio della saldatura (R) e
3. Lunghezza della saldatura (L).

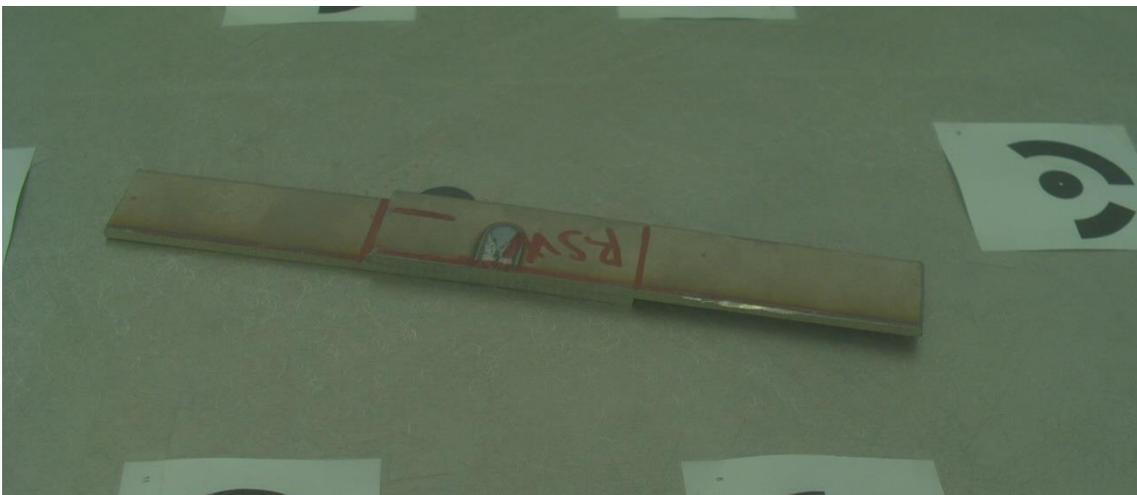


Fig. 5.1: saldatura laser

Come al solito, per effettuare le opportune analisi sono state prese misura sia con il sistema fotogrammetrico sia con un sistema convenzionale, in questo caso un microscopio, per determinare il valore vero delle misure.

5.3.1 Misurazioni al microscopio

Per ottenere i valori veri delle misure è stato un microscopio Zygo NewView 9000. Tramite questo microscopio è stato possibile ottenere una ricostruzione 3D della saldatura, mostrata in Figura 5.2, dalla quale è stato possibile ricavare le misure.

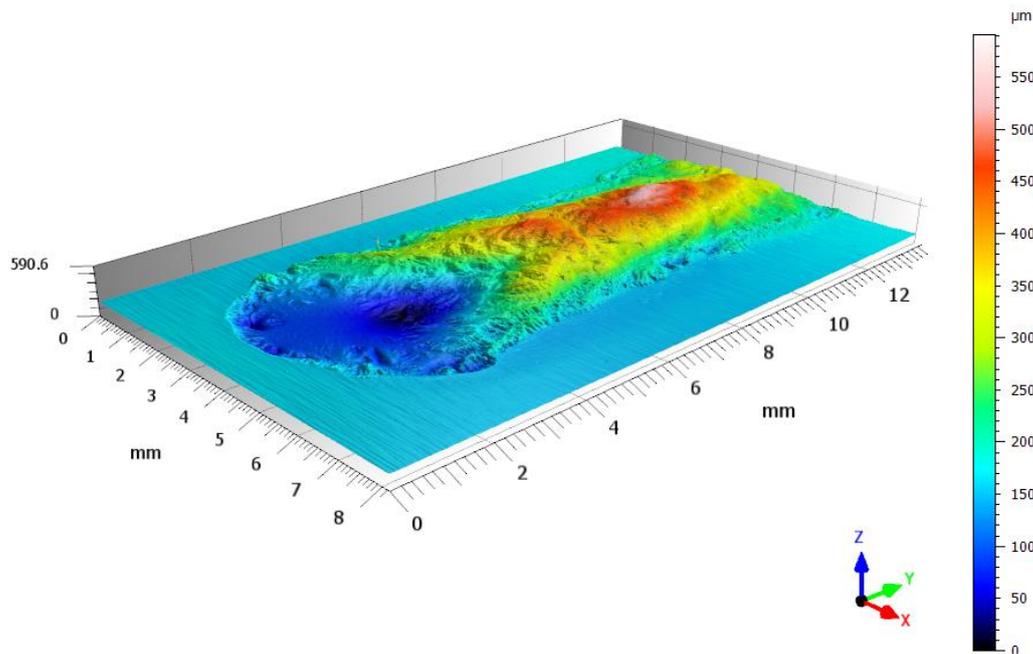


Fig. 5.2: ricostruzione al microscopio della saldatura

Per calcolare poi le dimensioni in esame sono stati utilizzati due software. In particolare, per misurare il picco della saldatura S_p è stato utilizzato il software MountainsLab, ovvero un software specifico di analisi di immagine e metrologia di superficie per la microscopia. I risultati ottenuti dalle analisi effettuate sono mostrati in Figura 5.3. Il parametro di nostro interesse è S_p e risulta pari a:

$$S_p = 0,386 \text{ mm}$$

ISO 25178 - Superficie primaria		
F: Nessuno		
Filtro S(As): Nessuno		
Parametri di altezza		
Sp	386.2	µm
Sv	204.3	µm
Sz	590.6	µm
Informazioni		
Lo studiabile contiene punti non misurati. I risultati sono calcolati sol...		

MountainsLab® Premium 9.2.10042

Fig. 6.3: parametri altezza saldatura

Per le altre due dimensioni si è deciso di utilizzare lo stesso software utilizzato per il sistema fotogrammetrico, ovvero Atos Professional 2020, in modo tale da ottenere risultati compatibili con quelli ricavati con il sistema da noi sviluppato.

Così facendo si ottiene:

$$R = 2,867 \text{ mm}$$

$$L = 13,025 \text{ mm}$$

Le incertezze di tali misure u_{rif} al microscopio sono calcolate in uno studio condotto da Maculotti et al. e sono riportate in Tabella 5.1.

u_{rif}		
R	S_p	L
0,000908	0,00001	0,000908

Tab. 5.1: incertezza misure riferimento

5.3.2 Misurazioni sistema fotogrammetrico

Per la ricostruzione 3D della saldatura laser, poiché è necessario ottenere un livello di dettaglio maggiore, sono state utilizzate 72 fotografie. In particolare, le foto sono state scattate da due prospettive diverse, 36 posizionando la fotocamera in alto e 36 posizionandola più in basso. Inoltre, poiché risulta necessario ricostruire soltanto la vista frontale e la vista dall'alto della saldatura, le foto sono state scattate ruotando la tavola soltanto di mezza circonferenza con un intervallo di 5° . Nello specifico, si è deciso di creare sei set di fotografie in modo tale da ricostruire sei volte l'oggetto e di conseguenza ottenere sei misure differenti delle dimensioni in modo tale da avere un valore medio più significativo. Nelle Figure 5.4 e 5.5 viene mostrato come sono state ottenute le misure sul software Atos Professional 2020.

Per ottenere la misura del picco S_p , in primo luogo è stato selezionato il punto più alto della mesh 3D; successivamente, si è creato un piano in corrispondenza della superficie piana dell'oggetto e infine tramite il tool di misura del software si è potuto calcolare la distanza del punto più alto con il piano in modo tale da ottenere un valore coerente del picco S_p . Mentre, per la misura del raggio R viene prima creata una circonferenza passante per tre punti presi sulla parte esterna della saldatura e poi da questa viene calcolato il raggio, tramite il tool di misura. Infine, per prendere la misura della lunghezza L si è banalmente calcolata la distanza tra i due punti più esterni della saldatura.

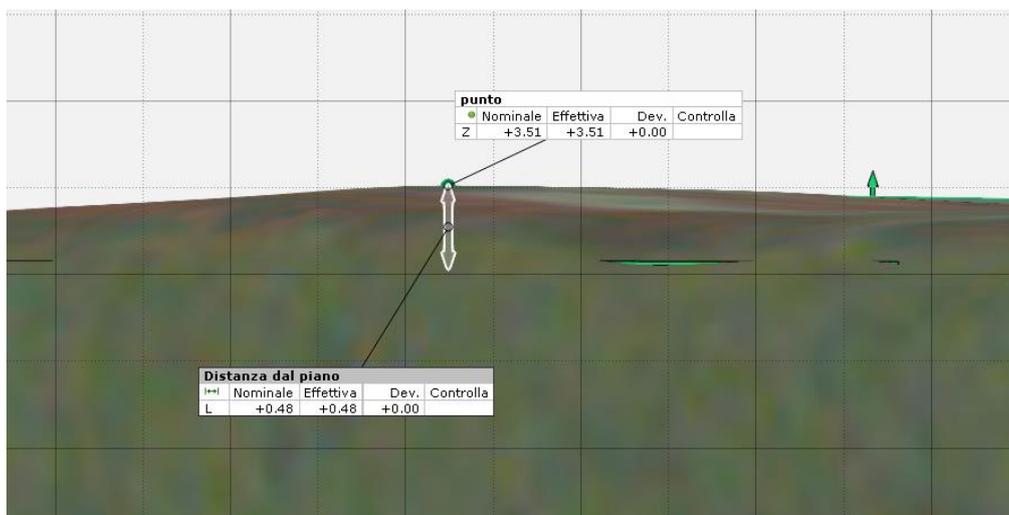


Fig. 5.4: rilevazione del picco S_p della saldatura

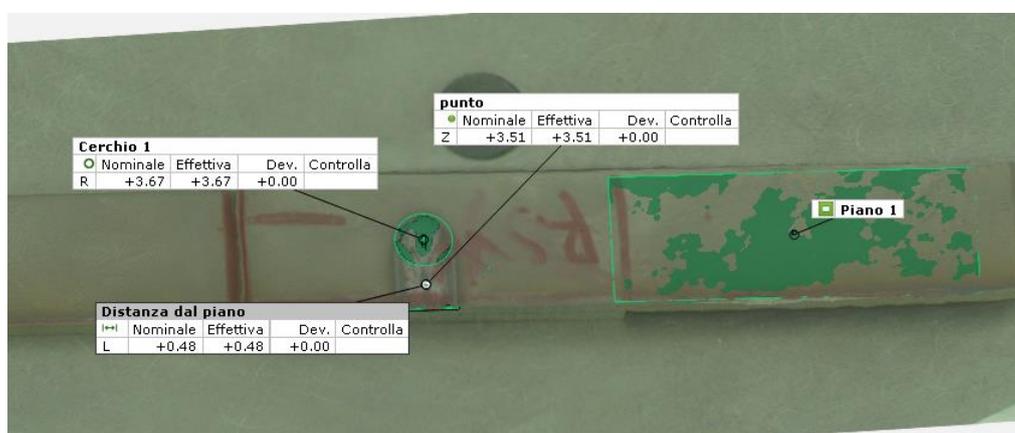


Fig. 5.5: misure della saldatura sul software Atos

I risultati delle sei misurazioni sono riportati in Tabella 5.2.

Saldatura laser			
Prova	R [mm]	S_p [mm]	L [mm]
1	3,747	0,565	13,095
2	3,574	0,557	13,049
3	3,652	0,694	13,045
4	3,662	0,348	13,054
5	3,668	0,476	13,065
6	3,813	0,493	13,106
Media	3,686	0,522	13,069
s_x^2	0,00689	0,01318	0,00065

Tab. 5.2: misure saldatura laser

Successivamente, come nel precedente caso studio, sono state calcolate le incertezze di tali misure.

La varianza totale delle misurazioni è formata, anche in questo caso da quattro contributi: riproducibilità, riferimento, risoluzione e bias.

$$u_x = \sqrt{s_x^2 + u_R^2 + \frac{Ris^2}{12} + \frac{(e_a)^2}{3}}$$

Dove s_x^2 è la varianza delle misurazioni dovuta alla riproducibilità; u_R^2 è la varianza della misura di riferimento presa al microscopio, Ris è la risoluzione dello strumento di misura che è pari a 10^{-6} ed infine e_a è il bias definito come l'errore massimo tra le misure ottenute con il sistema fotogrammetrico e il valore vero della misura.

In Tabella 5.3 sono riportati i valori ottenuti delle incertezze.

u _x [mm]		
R	S _p	L
0,5524	0,2117	0,0533

Tab. 5.3: incertezza misure

5.3.3 Test d'ipotesi

Calcolare le incertezze delle misure è possibile condurre dei test di ipotesi per verificare se le misure ottenute con il sistema fotogrammetrico e le misure ottenute con il microscopio si possano ritenere uguali.

Si nota subito che le incertezze delle due tipologie di misure hanno diversi ordini di grandezza di differenza e quindi si possono ritenere diverse senza effettuare il test d'ipotesi F. Si procede pertanto con un test di ipotesi t sulle medie quando le varianze non sono note e sono diverse.

Le ipotesi del test sono:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

La statistica t_0 è pari a:

$$t_0 = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}}$$

dove $n_1 = n_2 = 1$, in quanto si va a considerare la singola misura.

I gradi di libertà sono calcolati tramite la formula di Welch-Satterthwaite, ponendo per la misura al microscopio $n = 30$ e per le misure al sistema fotogrammetrico $n = 6$.

L'ipotesi nulla H_0 viene rifiutata se $|t_0| > t_{\frac{\alpha}{2}, \nu}$ con $\alpha = 0,05$.

In tabella 5.4 vengono riportati i risultati dei test d'ipotesi.

test t					
Test	v	$ \mu_1 - \mu_2 $	s*	$ t_0 $	$t_{\alpha/2,v}$
R	5	0,819	0,552	1,48	2,57
S _p	5	0,136	0,212	0,64	2,57
L	5	0,044	0,053	0,83	2,57

Tab. 5.4: test d'ipotesi misure e riferimento

Dai risultati si nota che per tutte e tre le dimensioni R, S_p e L $|t_0| < t_{\alpha/2,v}$ e quindi, non si può rifiutare l'ipotesi nulla e le due medie si ritengono uguali.

6 ULTERIORI MISURAZIONI

Per andare a testare ulteriormente il funzionamento di tale sistema di misure si è deciso di ricostruire e misurare le dimensioni di altri due artefatti, ovvero un circuito stampato (PCB) e un tagliente utilizzato in officina. In questo caso però, non viene effettuata un'analisi delle misure confrontandole con una misura di riferimento ma ci si limita a prendere le dimensioni degli oggetti di interesse.

6.1 Circuito stampato

Per la ricostruzione del circuito stampato sono state utilizzate 72 fotografie scattate a 360° in modo tale da ottenere una mesh 3D il più completa e dettagliata possibile.

Si è voluto, poi, misurare le dimensioni dei vari microchip sul circuito e la distanza tra di essi. In Figura 6.1 è illustrata la ricostruzione 3D del circuito PCB e le misurazioni effettuate su di esso con l'ausilio del software Atos.

In primo luogo, si osserva che il risultato tridimensionale offre un buon livello di dettaglio e quindi questo può essere utilizzato anche per il riconoscimento di elementi sulla scheda. Le misure ottenute sono riportate in Tabella 6.1.

Circuito stampato			
Dimensione	Chip medio [mm]	Chip grande[mm]	Chip piccolo[mm]
Lunghezza	4,721	11,147	5,484
Larghezza	4,363	10,283	3,691
Altezza	0,464	0,454	0,769
Distanza dal cip adiacente	19,064	26,677	25,815

Tab. 6.1: misure PCB

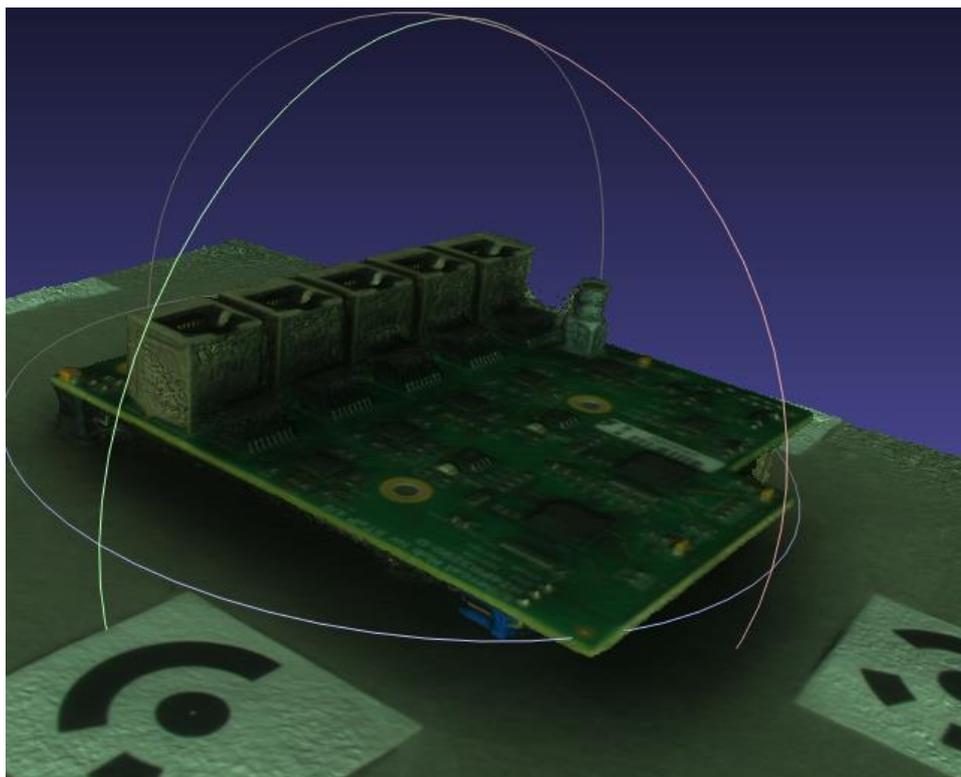


Fig. 6.1: ricostruzione 3D del circuito stampato

6.2 Tagliente

Sul tagliente si è voluto misurare la dimensione degli angoli di taglio. Per far ciò è necessario ricostruire l'oggetto in esame con un elevato livello di dettaglio, in modo tale da riconoscere tutti i piani del tagliente. Quindi, per la ricostruzione 3D con Agisoft Metashape sono state utilizzate ben 144 fotografie che riprendono il tagliente a 360° da più prospettive.

Il tempo di ricostruzione è stato di circa 2 ore e risultato finale è mostrato in Figura 6.2, dalla quale si possono individuare anche i quattro angoli presi in esame.

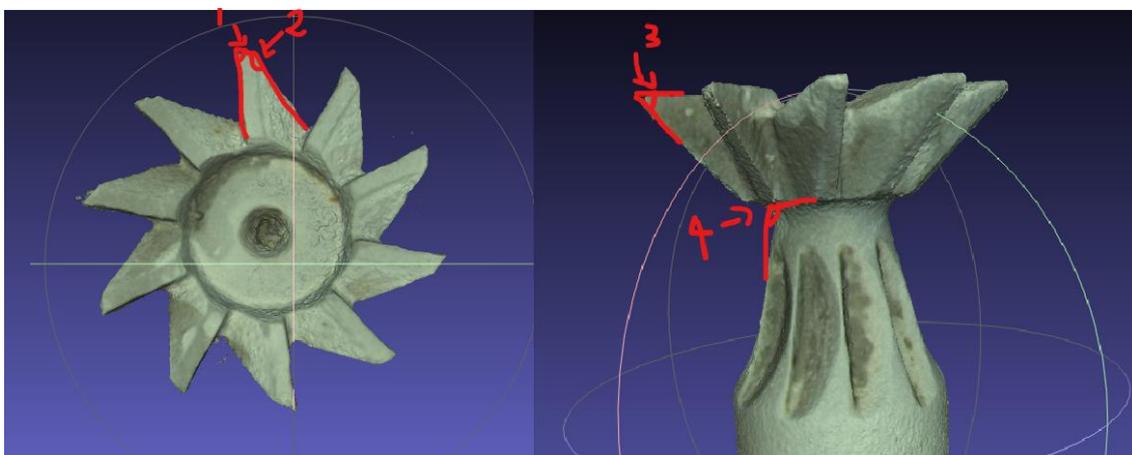


Fig. 6.2: ricostruzione tagliente con angoli

Sono state prese le misure degli angoli di due denti della fresa e i risultati sono riportati in Tabella 6.2 mentre il processo di misurazione e di costruzione dei piani sul software è mostrato in Figura 6.3.

Tagliente			
Angolo 1	Angolo 2	Angolo 3	Angolo 4
71,03°	124,52°	45,41°	73,72°
73,76°	134,1°	45,85°	77,67°

Tab. 6.2: misure angoli fresa

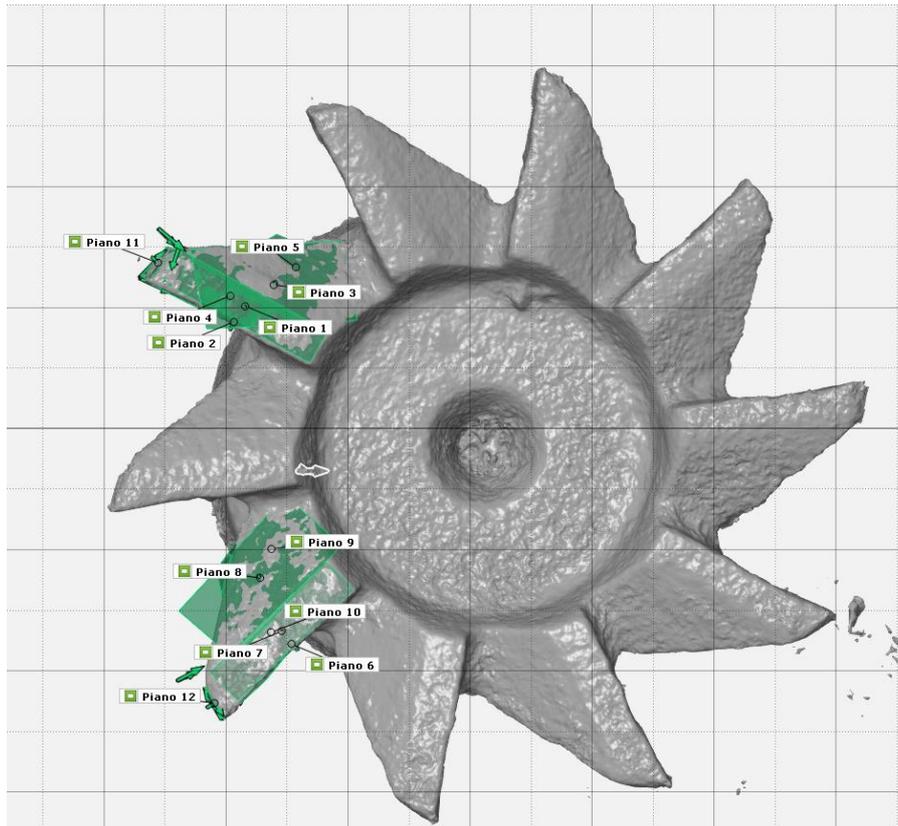


Fig. 6.3: misurazione angoli tagliente

7 CONCLUSIONI

Tramite questo lavoro di tesi, si è dimostrato come sia stato possibile realizzare un sistema di misurazione e di ispezione visiva automatizzata basato sulla fotogrammetria. Il sistema è stato tarato ottenendo un'incertezza estesa sulla misura della distanza 1,044 mm e sulla forma (diametro) di 0,684 mm. Inoltre, è stato validato su applicazioni di rilevanza industriale, quali circuiti stampati, tracce di saldatura e taglienti di utensili, per i quali la letteratura riporta un esteso uso di ispezioni visive.

Come visto nei capitoli precedenti, il costo di questo sistema si limita essenzialmente a quello della fotocamera che è di gran lunga inferiore a quello dei sistemi convenzionali, come il sistema a luce strutturata. Questo rappresenta il vantaggio principale di questo sistema considerando che i tempi di ricostruzione risultano essere simili e anche inferiori, impostando un livello di qualità intermedio, rispetto a quelli che si hanno con i sistemi convenzionali più affermati.

Inoltre, dalla analisi effettuate sulle misure prese sia sulla ball-bar che sulla saldatura laser si nota che la maggior parte di esse possono essere considerate uguali a quelle ottenute con i metodi classici.

I risultati ottenuti sono di grande importanza perché ci permettono di considerare il sistema realizzato come un valido sistema di misura che può essere riutilizzato in futuro per eseguire ulteriori esperimenti ed analisi. In particolare, il sistema realizzato e tarato permetterà lo sviluppo di sistemi automatizzati per le ispezioni visive quantitative inerentemente sfruttando misure 3D, attività oggi scarsamente riportata in letteratura.

BIBLIOGRAFIA

Awange, J., & Kiema, J. (2019). *Environmental geoinformatics*. Springer International Publishing.

Bahlmann, C., Heidermann, G., & Ritter, H. (1999). Artificial neural networks for automated quality control of textile seams. *Pattern Recognition*, 32(6), 1049–1060.

Bai, O., Franceschini, F., Galetto, M., Mastrogiacomo, L., & Maisano, D. A. (2014). A comparison of two different approaches to camera calibration in LSDM photogrammetric systems. In *ASME 2014 12th biennial conference on engineering systems design and analysis*. American Society of Mechanical Engineers.

Baltsavias, E. P. (1999, 1 gennaio). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2-3), 83–94.

Beyerer, J., Leon, F. P., & Frese, C. (2015). *Machine vision: Automated visual inspection: Theory, practice and applications*. Springer Berlin Heidelberg.

Bhowmik, D., & Appiah, K. (2018). Embedded vision systems: A review of the literature. *Lecture Notes in Computer Science*, 10824 LNCS, 204–216.

Cannarozzo, S. (2012). *Principi e strumenti della fotogrammetria*.
https://online.scuola.zanichelli.it/cannarozzomisure-5ed-files/Zanichelli_Cannarozzo_Principi_e_strumenti_fotogrammetria.pdf

Chin, R. T. (1982). Automated visual inspection: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-4(6), 557–573.

Chin, R. T. (1988). Automated visual inspection: 1981 to 1987. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 41 (3), 346–381.

Cootes, T. F., Page, G. J., Jackson, C. B., & Taylor, C. J. (1996). Statistical grey-level models for object location and identification. *Image and Vision Computing*, 14(8), 533–540.

Galetto, M., Genta, G., Maculotti, G. (2022) Materiale didattico del corso Experimental Statistics and Mechanical Measurement, Politecnico di Torino.

Golnabi, H., & Asadpour, A. (2007). Design and application of industrial machine vision systems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6), 630–637.

Gomasasca, M. A. (2009). *Basics of geomatics*. Springer.

Habibullah, A., & Prabuwno, A. S. (2008). The design and development of automated visual inspection system for press part sorting. *Proceedings of the International Conference on Computer Science and Information Technology*, 683–686.

Kim, T. H., Cho, T. H., Moon, Y. S. & Park, Y. S. (1999). Visual inspection system for the classification of solder joints. *Pattern Recognition*, 32(4), 565–575

Linder, W. (2009). *Digital photogrammetry*. Springer Berlin Heidelberg.

Liu, Z., Ukida, H., Ramuhalli, P., & Niel, K. (2015). *Integrated imaging and vision techniques for industrial inspection: Advances and applications*. Springer.

Luhmann, T. (2010). Close range photogrammetry for industrial applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6), 558–569.

Maculotti, G., Goti, E., Genta, G., Mazza, L., & Galetto, M. (2022). Uncertainty-based comparison of conventional and surface topography-based methods for wear volume evaluation in pin-on-disc tribological test. *Tribology International*, 165.

Malamas, E. N., Petrakis, E. G. M., Zervakis, M., Petit, L., & Legat, J. D. (2003). A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image and Vision Computing*, 21(2), 171–188.

Mikhail, E.M., Bethel, J.S., Mcglone, J.C. (2001). *Introduction to Modern Photogrammetry*, John Wiley & Sons, New York.

Mital, A., Govindaraju, M., & Subramani, B. (1998). A comparison between manual and hybrid methods in parts inspection. *Integrated Manufacturing Systems*, 9(6), 344–349.

Montgomery, D. C. (2004). *Design analysis experiments* (5^a ed.). John Wiley & Sons Inc.

Mullany, B., Savio, E., Haitjema, H., & Leach, R. (2022). The implication and evaluation of geometrical imperfections on manufactured surfaces. *CIRP Annals*.

Newman, T. S. (1995). Survey of automated visual inspection. *Computer Vision and Image Understanding*, 61(2), 231-262.

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012, 15 dicembre). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314.