

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria Meccanica



Tesi di laurea

**CARATTERIZZAZIONE E TARATURA DI UN SISTEMA A TRIANGOLAZIONE
LASER WIRELESS PORTATILE PER IL CONTROLLO QUALITÀ IN LINEA DI
PRODUZIONE**

**Characterization and calibration of a portable wireless laser triangulation system for
in-line quality control**

Relatore:

Prof. Nicola Paone

Candidato:

Jun Li Zheng

Anno accademico 2020/2021

Dedico questa tesi ai miei genitori che mi hanno dato la possibilità di studiare ed arrivare a questo grande traguardo sostenendomi tutti i giorni.

Ringrazio tutte le persone che mi sono state vicine in questi anni e che hanno creduto in me, in particolare Matheus Ugolini.

Un ringraziamento speciale va al mio relatore, il professor Nicola Paone e al mio tutor aziendale, l'ingegner Cristina Cristalli per la loro disponibilità durante questo periodo di tesi.

Indice

Introduzione	1
1. Visione artificiale	4
1.1 Sistemi di visione	5
1.2 Componenti di un sistema di visione	7
1.2.1 Illuminazione	7
a. Classificazione in base alla geometria	8
1.2.2 Lenti ottiche	11
a. Immagini formate da una lente convergente	12
b. Equazione delle lenti sottili	13
c. Comportamenti reali delle lenti: aberrazioni	14
d. Diffrazione	18
1.2.3 Telecamera	19
a. Sensore	20
b. Processo di conversione da luce a fenomeno elettrico	21
c. Sensori CCD e CMOS	22
d. Elaborazione dell'immagine	24
e. Comunicazione	25
2. Sensori a triangolazione laser	26
2.1 Controllo di qualità nelle linee di assemblaggio automobilistico	26
2.2 Il mercato dei sensori a triangolazione laser	27
2.3 Principio di funzionamento di un laser	31
2.4 Principio della triangolazione laser	34
2.4.1 Geometrie del sistema a triangolazione laser	36
3. Sistema di misura portatile G3F	39
3.1 Concept design	39
3.2 Architettura del G3F	40
3.3 Software	43

3.4 Procedura di allineamento della linea laser.....	46
3.5 Scelta dei parametri della fotocamera.....	49
4. Valutazione delle caratteristiche metrologiche del G3F	57
4.1 Profondità di campo.....	57
4.2 Campo di misura	63
4.3 Risoluzione spaziale laterale della fotocamera.....	65
4.4 Risoluzione spaziale laterale del sensore.....	68
5. Taratura del sistema di misura G3F	71
5.1 Taratura diretta del G3F.....	71
5.2 Verifica della taratura	77
Conclusione	80

Introduzione

La base per lo sviluppo della scienza e della tecnologia è la ricerca e quindi, in senso lato, anche la misurazione, ovvero la possibilità di accedere a informazioni affidabili sul mondo circostante. La forte concorrenza e l'elevata domanda da parte dei clienti impongono un costante aumento della qualità dei prodotti fabbricati. Questo a sua volta, comporta lo sviluppo di reparti di controllo qualità e l'applicazione di strumenti di misura sempre più accurati e avanzati, volti a verificare la conformità di quanto viene realizzato ed effettuare diagnosi di difetti sulla base delle osservazioni fatte sul 100% della produzione.

In produzione difetti ed errori possono avere un impatto negativo sui processi a valle, sull'efficienza, sulla qualità del prodotto. Un'ispezione coerente e affidabile di parti e componenti può aiutare i produttori a identificare potenziali criticità già dalle prime fasi del processo di produzione, riducendo al minimo le perdite di costosi prodotti e i tempi di produzione. Infatti, anche gli errori più piccoli possono portare a situazioni di alta criticità lungo la filiera produttiva.

Lo sviluppo dei processi di produzione è strettamente correlato al miglioramento dei metodi e degli strumenti di misura per il controllo dei componenti realizzati. In questo caso, giocano un ruolo importante gli strumenti che effettuano misurazioni senza contatto, che includono tra gli altri, i sensori ottici. Quest'ultimi vengono utilizzati, soprattutto, quando il contatto con la superficie misurata sia difficile, impossibile o indesiderabile. Inoltre, i controlli di qualità spesso implicano l'ispezione di target impegnativi per strumenti di tipo ottico: esempi sono oggetti riflettenti, quelli estremamente scuri su uno sfondo scuro oppure multicolori con diverse transizioni di colore.

Lo scopo di questa tesi è quello di caratterizzare uno strumento portatile per misure senza contatto di tipo ottico, connesso in modalità wireless alla rete di fabbrica, per il controllo qualità in linea di produzione nell'industria automobilistica, che sia in grado di rilevare il cosiddetto gap & flush in modo affidabile indipendentemente dalle tonalità cromatiche dei pezzi. Lo strumento è stato pensato anche per aumentare la capacità di azione dell'operatore al fine di promuovere il ruolo di quest'ultimo all'interno di un ambiente di produzione. Grazie alla sua capacità di interconnessione con altri dispositivi, esso rappresenta un nodo di rete intelligente coerente con i principi di Industria 4.0.

In particolare, è stata sviluppata la versione 2.0 del G3F, un dispositivo brevettato dallo spin-off *U-Sense.it* per facilitare le attività di controllo degli operatori nella misurazione dei gap e dei flush nei processi di assemblaggio di parti di automobili e compensare eventuali errori commessi lungo le stazioni di lavoro che possono influire sulla robustezza e sulla qualità dei dati acquisiti.

Il dispositivo G3F sfrutta il principio della triangolazione laser: una linea laser viene proiettata su una superficie target mentre una telecamera, inquadrando la scena da una certa angolazione, rileva la luce diffusa dalla superficie del bersaglio. Anche se uno scanner laser è in grado di ricostruire la forma 3D di un oggetto, nel presente lavoro viene affrontato il tema della misurazione di gap e flush.

Come ben sappiamo, la qualità dei dati raccolti dipende necessariamente dall'incertezza di misura del dispositivo, dall'incertezza associata al processo di misurazione dovuto agli operatori umani quando il dispositivo viene utilizzato lungo la linea di assemblaggio o da condizioni ambientali (es. illuminazione). Il presente lavoro ha lo scopo di contribuire allo sviluppo di un dispositivo che sia in grado di tenere in considerazione questi fattori e fornire in uscita informazioni prossimi a quelli ideali: il primo capitolo discute di sistemi di visioni

e dei suoi componenti in linea generale. Nel capitolo 2 viene fatta una rassegna dei principali concorrenti dello strumento G3F e una breve descrizione del principio di funzionamento di un laser. Il capitolo 3 descrive l'architettura dello strumento di misura e le soluzioni hardware e software adottate a riguardo. I capitoli 4 e 5 affrontano il tema della taratura e delle caratteristiche metrologiche dello strumento in condizioni di laboratorio. Nell'ultimo capitolo vengono tratte le conclusioni del lavoro.

Capitolo 1

VISIONE ARTIFICIALE

La Visione Artificiale ha attraversato nell'ultimo decennio una fase di crescita ed evoluzione sia nell'industria che nei servizi, divenendo un settore maturo ma con ampie potenzialità di sviluppo grazie all'Intelligenza Artificiale. I sistemi e i sensori di visione stanno oggi vivendo una nuova primavera grazie allo sviluppo di Industria 4.0 in cui, svolgono un ruolo decisivo in numerosi ambiti. I dispositivi di visione sono, infatti, componenti essenziali dei sistemi di automazione evoluti. Tali sistemi sono molto utili nella valutazione dei prodotti e nella ricerca di difetti fornendo informazioni utili alla gestione e all'ottimizzazione della produttività dei robot e dell'intera linea di produzione. A differenza dei semplici sensori, i sistemi di visione sono in grado di generare grandi quantità di dati estratti dalle immagini tramite opportuni algoritmi di elaborazione. I dati estratti si utilizzano per identificare e contrassegnare prodotti difettosi, effettuando così un controllo di qualità che evita di far procedere sulla linea prodotti o componenti non conformi.

La visione artificiale è un insieme dei processi che mira a creare un modello approssimato del mondo reale partendo da immagini bidimensionali. Un sistema di visione è costituito dall'integrazione di componenti ottiche, elettroniche e meccaniche che permettono di acquisire, registrare ed elaborare immagini sia nello spettro della luce visibile che al di fuori di essa (infrarosso, ultravioletto, raggi X, ...). Il risultato dell'elaborazione è il riconoscimento di determinate caratteristiche dell'immagine per varie finalità di controllo, classificazione e selezione.

1.1 SISTEMI DI VISIONE

I sistemi di visione interessano una vasta tipologia di applicazioni industriali. Gran parte delle applicazioni più avanzate in campo tridimensionale appartengono alla robotica, dal momento che il senso della vista fornisce, anche ad un robot oltre che all'uomo, la stragrande maggioranza delle informazioni necessarie per la navigazione e per l'interazione con il mondo esterno. Tuttavia, le medesime esigenze riguardano sempre di più il campo industriale data la crescente diffusione di automazione flessibile e la disponibilità di hardware (processori, memorie, ecc.) a costi competitivi. Scegliere il giusto sistema di visione è essenziale per soddisfare le esigenze delle specifiche applicazioni divisione. In senso ampio, i diversi tipi di sistemi di visione includono:

- *sistemi di visione 1D*. La visione 1D analizza un segnale digitale una linea per volta anziché considerando tutto l'insieme, ad esempio valutando la variazione tra il gruppo più recente di dieci linee acquisite con il gruppo precedente. Questa tecnica rileva e classifica i difetti sui materiali prodotti in continuo, come carta, metalli, plastica e altri fogli non tessuti o rotoli.
- *sistemi di visione 2D*. Le telecamere di ispezione più comuni eseguono la scansione dell'area catturando istantanee in 2D in diverse risoluzioni. Un altro tipo di visione industriale bidimensionale, la scansione lineare, forma un'immagine in 2D linea per linea (figura 2). In alcune applicazioni, i sistemi di scansione lineare hanno specifici vantaggi rispetto a quelli di area, soprattutto quando è richiesta l'ispezione di componenti rotondi o cilindrici in cui possono essere richieste più telecamere di scansione dell'area per coprire tutta la superficie. In questi casi, è sufficiente far

ruotare il pezzo di fronte ad un unico sensore laser di linea per ricostruire l'immagine di tutta la superficie del pezzo.

- *sistemi di visione 3D*. I sistemi di visione 3D solitamente comprendono più telecamere montate in diverse posizioni per fornire ai robot informazioni sull'orientamento dei componenti. D'altra parte, esistono sensori laser in grado di produrre risultati tridimensionali con una sola telecamera e la mappatura in altezza viene generata dallo spostamento della posizione del laser rispetto all'oggetto o viceversa (figura 1.1).

Esistono 4 tecniche per realizzare un sistema di visione 3D: triangolazione laser, visione stereoscopica, tempo di traiettoria e la luce strutturata. Di seguito andremo a trattare solo la tecnica a triangolazione laser, poiché rappresenta il principio di funzionamento del sensore G3F.

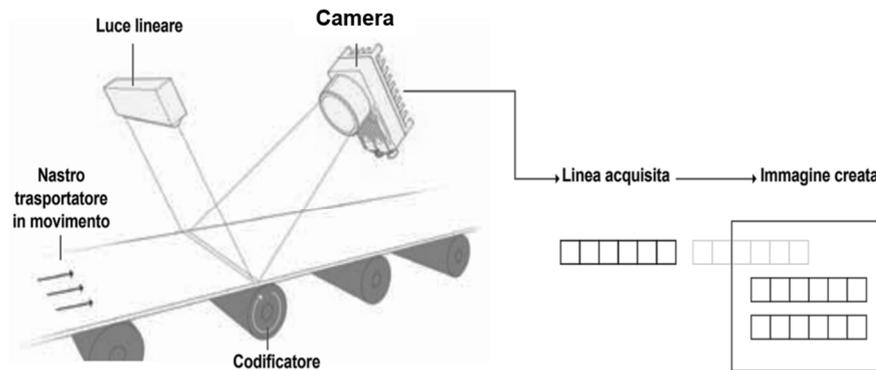


Figura 1.1 - sistema di visione con linea laser

1.2 COMPONENTI DI UN SISTEMA DI VISIONE

Sia che si tratti di un sistema di visione 1D, 2D o 3D, le capacità e le prestazioni di queste tecnologie dipendono in modo diretto dai seguenti componenti principali:

- illuminazione
- lenti
- telecamera (sensore digitale)
- software di elaborazione immagini
- interfaccia di comunicazione

L'illuminazione serve a mettere in risalto le caratteristiche del pezzo affinché siano viste con chiarezza dalla telecamera. La lente cattura le immagini e le presenta al sensore sotto forma di luce. Il sensore converte la luce in un'immagine digitale che è poi inviata al processore per l'analisi.

L'elaborazione attraverso la visione consiste in algoritmi che rivedono l'immagine ed estraggono le informazioni richieste, svolgono l'ispezione necessaria e prendono una decisione. Infine, la comunicazione è solitamente effettuata tramite un segnale discreto I/O o dati inviati su connessione seriale ad un dispositivo che carica o utilizza le informazioni.

1.2.1 Illuminazione

L'illuminazione è fondamentale per ottenere buoni risultati dalla visione industriale. Questi sistemi creano immagini analizzando la luce riflessa di un oggetto e non analizzando l'oggetto stesso. La tecnica di illuminazione prevede una fonte luminosa e il suo posizionamento rispetto all'oggetto e la telecamera. Una particolare disposizione dell'illuminatore può modificare l'aspetto dell'immagine, nascondendo alcune

caratteristiche o accentuandone altre, ad esempio evidenziando il profilo di un componente e oscurando i suoi dettagli superficiali per consentire di misurarne i bordi.

Per poter scegliere il tipo di illuminazione più vantaggioso vanno considerati:

- tipo di immagine che si vuole ottenere (in bianco e nero o colori);
- area e forma da illuminare;
- caratteristiche dell'oggetto (colore, rugosità, ecc.)
- velocità di acquisizione dell'immagine;
- presenza di dettagli particolari da evidenziare;
- durata del sistema di illuminazione.

L'illuminazione può essere classificata in base al tipo di sorgente utilizzato (lampade alogene, fluorescenti, LED o Laser) o in base alla sua geometria (illuminazione diretta e direzionale, angolare, radente, indiretta e diffusa, coassiale, anulare, diffusa a cupola, in retroproiezione).

a. Classificazione in base alla geometria

- *Illuminazione diretta e direzionale.* È la proiezione di un tipo di luce (piana, a griglia o di forma più complessa) con un determinato angolo su un oggetto. I raggi illuminano le superfici in profondità da un lato e generano delle ombre nette dall'altro. Infatti, questo sistema è adatto per visualizzare in profondità alcune zone di interesse di un oggetto.

Un'illuminazione direzionale può risultare particolarmente utile per ispezionare una superficie indipendentemente dal contrasto. In genere, si utilizza una sorgente in campo chiaro per applicazioni che richiedono un elevato contrasto, mentre si utilizza un'illuminazione in campo scuro per applicazioni che richiedono un contrasto basso.

Questa tecnica è utilizzata per evidenziare i difetti sulla superficie di un oggetto, ed è particolarmente adatta per oggetti riflettenti. In assenza di difetti, la luce viene riflessa al di fuori del campo di vista della videocamera che perciò restituisce un'immagine dell'oggetto come se non fosse illuminato. Quando però sulla superficie c'è una difettosità, la luce viene deviata in più direzioni e quindi parte di essa arriva all'obiettivo, evidenziando così l'anomalia che risulta illuminata su un fondo scuro.

- *Illuminazione coassiale.* Un fascio di luce viene proiettato orizzontalmente su uno specchio semi-trasparente e viene deviato di 90° sulla superficie dell'oggetto. La luce viene riflessa indietro sullo stesso asse dell'obiettivo verso le telecamere, producendo un'immagine con forti contrasti dovuti al ritorno intenso dei raggi proveniente dalle superfici piane, più intenso rispetto a quello diffusi dalle superfici inclinate. Tale sistema è molto adatto per visualizzare incisioni di oggetti metallici: un'illuminazione a raggi paralleli fa sì che la luce venga riflessa direttamente sul sensore della telecamera tranne nel punto in cui vi è un'imperfezione, dove i raggi si diffondono in più direzioni e quindi nell'immagine appaiono come delle macchie scure.
- *Illuminazione anulare (o conica).* L'illuminazione è fornita da una fonte luminosa predisposta ad anello attorno all'obiettivo. La visione dell'oggetto attraverso l'obiettivo crea un'immagine poco contrastata e priva di ombre poiché i raggi vengono riflessi da tutte le direzioni. Questo tipo di illuminazione è molto diffuso in quanto si adatta alla maggior parte delle superfici di differenti materiali.

- *Illuminazione diffusa.* È la tipologia che meglio si adatta agli oggetti riflettenti e di geometria complessa. Se questi venissero illuminati con una luce diretta si potrebbero creare ampie zone d'ombra e/o riflessi. Esistono principalmente due tipologie di illuminatori diffusivi:
 - a cupola;
 - a tubo.
- *Illuminazione in retroproiezione.* La retroilluminazione si realizza posizionando la sorgente luminosa dietro all'oggetto. L'immagine appare come un'ombra, infatti si usa questo tipo di illuminazione per evidenziare la forma 2D di un oggetto o la presenza di fori passanti.

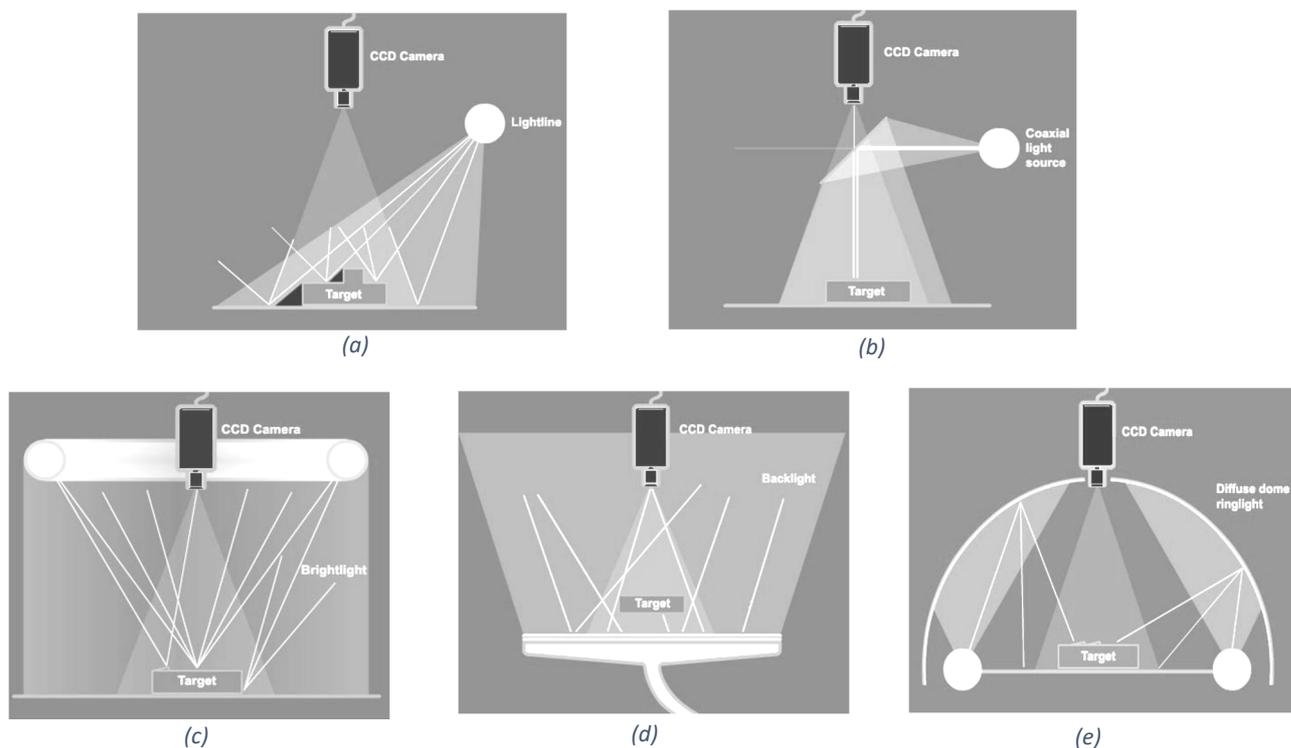


Figura 1.2 –(a) Illuminazione diretta e direzionale, (b) Illuminazione coassiale, (c) Illuminazione anulare, (d) Illuminazione diffusa, (e) Illuminazione in retroproiezione

1.2.2 Lenti ottiche

Una lente è un elemento trasparente rifrangente in cui almeno una superficie è curva, caratterizzata da un asse ottico, asse che unisce i centri di curvatura e costituisce una linea di riferimento per l'intero sistema ottico. Indipendentemente dal tipo di lente, la funzione del sistema ottico è quella di focalizzare l'immagine dell'oggetto da esaminare sul sensore della telecamera.

Le caratteristiche di una lente (obiettivo della telecamera) influiscono profondamente sull'immagine che verrà acquisita dalla telecamera e sono:

- *lunghezza focale f* . È la distanza tra la lente e il piano su cui si forma il punto focale di un fascio di raggi paralleli all'asse ottico. Da essa dipendono parametri quali le dimensioni dell'immagine e la distanza tra la telecamera e oggetto da esaminare.
- *rapporto focale o apertura*. È il rapporto tra la lunghezza focale e il diametro utile della lente. Tanto più è piccolo tanto maggiore sarà la luminosità e la risoluzione dell'immagine ottenuta.
- *profondità di campo*. È l'intervallo spaziale entro il quale l'immagine dell'oggetto inquadrato sarà a fuoco.

Le caratteristiche appena elencate possono essere calcolate con pochi parametri, purché si accetti qualche approssimazione, cioè vengano presi in considerazione solo i raggi che entrino nel sistema ottico a piccoli angoli rispetto all'asse ottico. Tali approssimazioni sono tipiche delle *lenti sottili*, cioè quelle lenti che hanno uno spessore molto più piccolo dei raggi delle superfici sferiche che le ha generate. In tal modo è possibile ignorare gli effetti ottici dovuti allo spessore reale della lente. Per semplicità viene considerato un oggetto bidimensionale (contenuto in un piano) posto ad una distanza o dalla lente. I raggi provenienti da un punto dell'oggetto vengono raccolti dalla lente e fatti convergere in un

punto del sensore. La corrispondenza biunivoca tra tutti i punti dell'oggetto e i punti sul sensore determina la formazione dell'immagine dell'oggetto stesso.

Esistono principalmente due categorie di lenti sottili:

- lenti convergenti. Devia i raggi che incidono su di essa parallelamente all'asse ottico e li fa convergere in un punto sull'asse ottico, detto *fuoco* F ;
- lenti divergenti. Devia i raggi che incidono su di essa parallelamente all'asse ottico e li fa divergere come se provenissero dal punto focale della lente.

La distanza tra il fuoco e il centro di una lente è chiamata *distanza focale* f della lente.

Le lenti convergenti e divergenti possono avere varie forme. In generale, le lenti convergenti sono più spesse al centro che ai bordi, mentre le lenti divergenti sono più sottili al centro che ai bordi. In genere, le ottiche utilizzate nelle applicazioni di visioni artificiale sono positive, cioè focalizzano la luce sul piano del sensore.

a. Immagini formate da una lente convergente

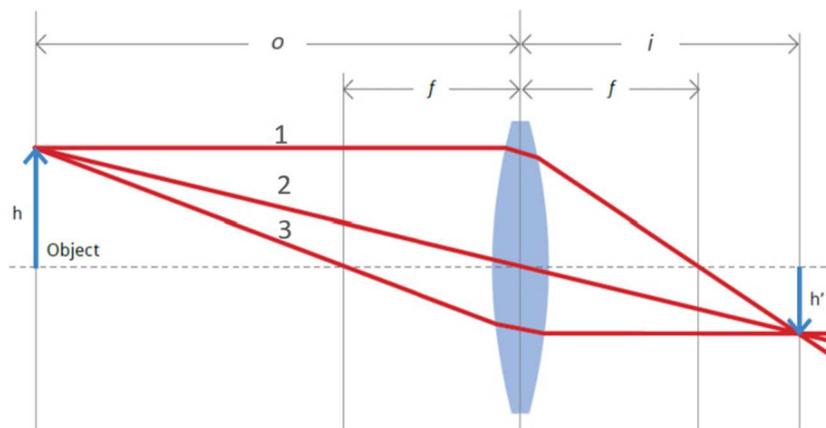


Figura 1.3 - caratteristiche di un sistema ottico

Nella figura 1.3 l'oggetto si trova a una distanza o da una lente convergente (maggiore del doppio della distanza focale f). Per trovare l'immagine si possono disegnare tre raggi 1, 2 e 3 che partono dal punto superiore dell'oggetto. Il punto a destra della lente in cui si intersecano i tre raggi rifratti è l'immagine del punto da cui i raggi provengono. Il diagramma dei raggi mostra che l'immagine dell'oggetto è reale, capovolta e rimpicciolita rispetto all'oggetto. La disposizione illustrata in figura 5 rappresenta il principio di funzionamento di una macchina fotografica, in cui una superficie sensibile alla luce, posta nella parte posteriore della macchina, raccoglie i raggi provenienti dalla lente (l'obiettivo) e registra l'immagine dell'oggetto.

b. Equazione delle lenti sottili

Per determinare con precisione le caratteristiche dell'immagine di un oggetto formata da una lente sottile è possibile utilizzare l'equazione delle lenti sottili:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o}$$

dove:

o è la distanza di lavoro

i è la distanza tra l'immagine e la lente

f è la distanza focale

Per i sistemi ottici utilizzati nella visione artificiale, in cui i raggi riflessi da un oggetto lontano vengono focalizzati sul piano del sensore, la lunghezza focale f può essere vista

come una misura di quanta area viene ripresa sul sensore, detto *campo di vista* (Field of View – FoV): maggiore è la lunghezza focale, minore è il FoV e viceversa.

Un'altra grandezza caratterizzante delle lenti è l'ingrandimento lineare M , pari al rapporto tra l'altezza dell'immagine h' e la dimensione dell'oggetto h :

$$M = \frac{h'}{h}$$

Data una dimensione del sensore fissa, se si aumenta l'ingrandimento M , il campo visivo dell'oggetto diminuisce e viceversa. Si può dimostrare che l'ingrandimento lineare è anche pari al rapporto tra la distanza tra la lente e l'immagine i e la distanza dell'oggetto rispetto

alla lente o :
$$M = \frac{h'}{h} = \frac{i}{o}$$

Le equazioni precedenti consentono la realizzazione di un progetto di un sistema ottico: date le dimensioni del sensore h' , le dimensioni dell'oggetto da riprendere h e la distanza di lavoro o , è possibile calcolare la lunghezza focale richiesta f .

c. Comportamenti reali delle lenti: aberrazioni

Le immagini formate da una singola lente non sono quelle che ci si aspetterebbe dalle valutazioni teoriche, ma presentano dei difetti e delle deformazioni, dette *aberrazioni*, più o meno complesse, a seconda dei casi. Le aberrazioni sono inevitabili se si usa una singola lente, mentre si possono ridurre sostanzialmente adottando opportuni sistemi di lenti come avviene nelle macchine fotografiche. I difetti più comuni prodotti dalle lenti reali sono:

- *Aberrazione sferica*. Difetto per il quale i raggi di luce paralleli all'asse che passano per zone diverse di una lente sono focalizzati in punti diversi, anziché venire concentrati in un solo punto. Avviene, cioè, che i raggi marginali siano rifratti maggiormente di quelli prossimi all'asse ottico, e quindi siano focalizzati più vicino

alla lente (figura 1.4 a). Ne risulta che essi, in corrispondenza dell'asse ottico, sono dispersi lungo un tratto di asse di lunghezza l , a partire dal fuoco F e nella direzione della lente. La grandezza l dà un'idea dell'entità dell'aberrazione di sfericità di cui è affetta la lente. Se una lente fosse priva di aberrazioni di sfericità, dovrebbe essere $l = 0$. Questo fenomeno diventa sempre più significativo via via che aumentano lo spessore della lente e il suo diametro. L'effetto pratico di questa aberrazione consiste in un'immagine nitida solo nella parte centrale, mentre nelle zone periferiche la stessa immagine appare poco nitida e confusa (sfuocata).

Le soluzioni per ottenere un'immagine più nitida, quindi per ridurre l'aberrazione sferica, sono sostanzialmente due (figura 1.4b):

- realizzare la lente con un piccolo diametro, accontentandosi di un'immagine meno luminosa;
- anteporre alla lente un disco opaco con un foro centrale, detto diaframma, che permetta solo ai raggi luminosi prossimi all'asse ottico di raggiungere la lente, impedendo il passaggio di quelli periferici.

Generalmente si usa la seconda soluzione, perché negli strumenti moderni si devono impiegare lenti di notevole diametro per far entrare nello strumento una grande quantità di luce; questa condizione è necessaria per ottenere un'immagine chiara e nitida di oggetti posti anche a grandi distanze dallo strumento. Altri criteri per attenuare le aberrazioni di sfericità consistono nell'utilizzare lenti convergenti con i due raggi di curvatura molto diversi fra loro, oppure nell'accoppiare lenti convergenti con lenti divergenti, come si vedrà in seguito nel caso della riduzione delle aberrazioni cromatiche.

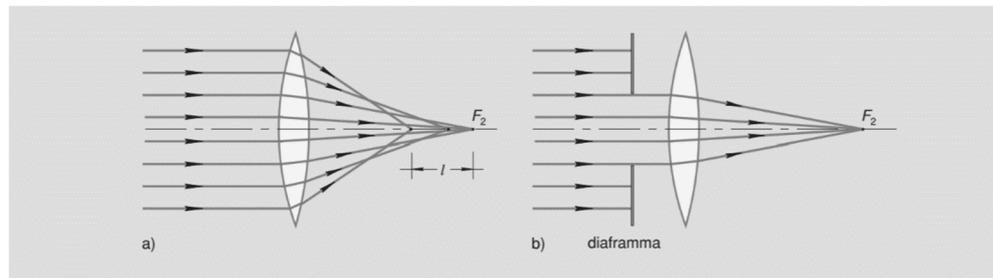


Figura 1.4 – (a) aberrazione sferica prodotta quando i raggi paralleli all'asse non convergono sul fuoco; b) inserimento di un diaframma per ridurre il difetto

- *Aberrazione cromatica.* Difetto legato principalmente a quelle fasce luminose costituite da diversi colori (luce solare).

Sappiamo che la distanza focale f di una lente dipende dai raggi di curvatura e dall'indice di rifrazione del vetro di cui la lente è costituita. Però, l'indice di rifrazione di un materiale trasparente varia al variare delle radiazioni che compongono la luce, quindi, ad ogni radiazione monocromatica corrisponderà un fuoco diverso. Il raggio rosso è quello che ha il fuoco più lontano, mentre i raggi violetti sono i più convergenti. La distanza b fra i due fuochi estremi (fuoco dei raggi rossi e fuoco dei raggi violetti) dà la misura di questo nuovo difetto detto aberrazione cromatica. Il rosso e il violetto sono i colori estremi dello spettro quindi, i fuochi relativi ai colori intermedi saranno compresi fra i fuochi estremi (figura 1.5). L'effetto pratico di questa aberrazione, a causa della dispersione della luce provocata dalla rifrazione, è quello di produrre, per ogni oggetto, più immagini colorate di differenti dimensioni. Ciò provoca, in chi osserva, la sensazione di una sola immagine a contorni iridescenti, perché solo nella parte centrale i colori, sovrapponendosi, riproducono la luce di provenienza. La ricomposizione non può

effettuarsi nelle parti estreme, donde il persistere delle colorazioni, sfumanti dal violetto al rosso.

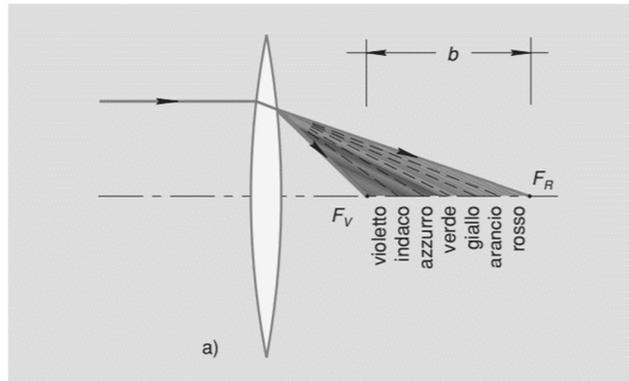


Figura 5 – Aberrazione cromatica genera diversi fuochi per diversi colori della luce

- **Distorsione.** Provoca una deformazione dell'immagine dell'oggetto. Se si considera come oggetto un quadrato col centro sull'asse cardinale e giacente sopra un piano normale all'asse, l'immagine corrispondente, non è un altro quadrato, ma una figura deformata come quella della (figura 1.6a) se la deformazione è a cuscino, o secondo la (figura 1.6b), se la deformazione è a barile. Per correggere questo grave difetto, si

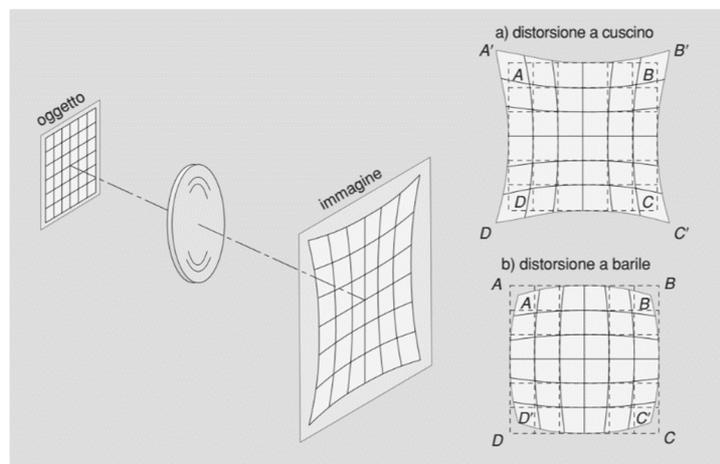


Figura 1.6 – Deformazioni dell'immagini prodotte dalla distorsione a cuscino (a) e a barile (b).

usano speciali accoppiamenti di lenti chiamati sistemi ortoscopici. La distorsione è particolarmente grave per gli obiettivi fotografici, soprattutto se questi devono servire per rilievi fotogrammetrici.

In uno strumento ottico non è possibile eliminare contemporaneamente tutte le aberrazioni, cioè non può esistere un sistema ottico, anche complesso, del tutto esente da aberrazioni. A seconda dell'uso cui lo strumento è destinato si cercherà di eliminare quelle aberrazioni che maggiormente ne pregiudicano il funzionamento.

d. Diffrazione

La diffrazione è un fenomeno fisico associato alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde quando queste incontrano un ostacolo (obiettivo) sul loro cammino. La distribuzione dell'intensità luminosa sul sensore, per una sorgente puntiforme, dipende da dimensione e forma dell'apertura. Dal momento che il fenomeno della diffrazione viene originato dall'incontro tra un fascio luminoso e un ostacolo, la forma di quest'ultimo influenzerà la figura formata dalle frange su uno schermo lontano. Per un'apertura circolare, l'immagine non è più un punto di dimensioni infinitesime ma un disco, detto *disco di Airy*, caratterizzato da un punto centrale luminoso, circondato da anelli meno luminosi (figura 1.7). Il raggio del disco r è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda della luce λ e alla lunghezza focale della lente f , mentre è inversamente proporzionale al diametro D dell'apertura circolare:

$$r = 1,22\lambda \frac{f}{D}$$

Il fenomeno della diffrazione limita dunque la capacità di messa a fuoco di una lente, ovvero la capacità di distinguere immagini di oggetti tra loro vicini. Infatti, maggiore è la dimensione del disco di Airy, minore è la capacità risolutiva della fotocamera.

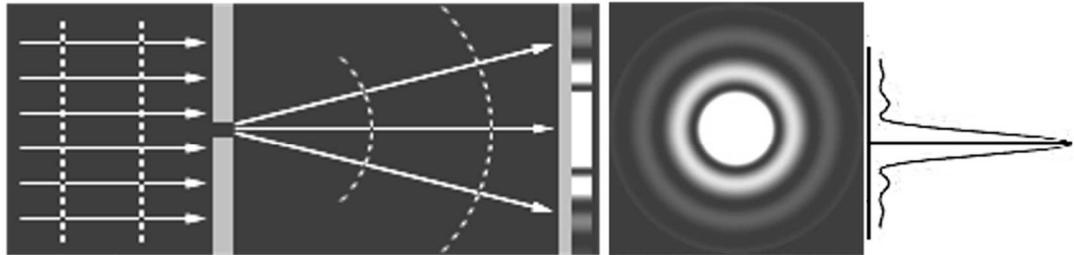


Figura 1.7 - Schema del fenomeno di diffrazione (sinistra) e disco di Airy e la relativa intensità (destra)

1.2.3 Telecamera

La funzione delle telecamere industriali è quella di catturare l'immagine proiettata sul sensore, attraverso una lente, per poterla trasferire attraverso un'interfaccia di comunicazione ad un PC e poterla quindi visualizzare, memorizzare o per effettuare su di essa delle misure o delle analisi. Le telecamere hanno avuto una rapida evoluzione negli anni, dalle prime telecamere basate su tubi Vidicon fino alle più moderne telecamere provviste di sensori CCD (Charge Coupled Device) e CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor).

Le telecamere utilizzate nella visione industriale richiedono un completo controllo del tempo di esposizione, ovvero l'istante in cui l'illuminatore produce il flash luminoso deve essere sincronizzato con la fase di acquisizione dell'immagine da parte della camera.

Una telecamera può essere schematizzata in tre macro-blocchi:

- Sensore

- Elettronica di pilotaggio e di eventuale conversione
- Interfaccia di comunicazione

La combinazione di diversi sensori e di diverse interfacce contribuisce a creare il vasto mondo delle telecamere nei sistemi di visione.

a. Sensore

Il sensore è un insieme di elementi fotosensibili in grado di accumulare luce (fotoni) e di convertirla in un segnale elettrico (elettroni). La disposizione di questi elementi fotosensibili in una matrice o lungo una singola linea definisce una prima distinzione tra telecamere matriciali e lineari.

Il ruolo del sensore è essenzialmente quello di catturare la luce e convertirla in un'immagine digitale bilanciando disturbi, sensibilità e dinamica. La sensibilità degli elementi fotosensibili al completo spettro visibile o a determinate bande, come ad esempio al rosso, verde e blu, definisce camere monocromatiche o a colori. Vengono usati sensori CCD o CMO in funzione della lunghezza d'onda che la telecamera deve acquisire.

Un'immagine continua $I(x, y)$ quando viene campionata dal sensore diventa discreta $I(i, j)$ perdendo così di dettaglio; infatti, la sua risoluzione massima è pari alla dimensione del pixel. Successivamente l'immagine viene quantizzata $Q(i, j)$, cioè ad ogni pixel viene fatto corrispondere un numero da 0 a 255, nel caso a 8 bit, che rappresenta la sua intensità luminosa nella scala dei grigi.

b. Processo di conversione da luce a fenomeno elettrico

Per comprendere al meglio il fenomeno della conversione luce-tensione elettrica, si considera dapprima l'elemento principale dei sensori: la struttura *metallo-ossido-semiconduttore*, denominata condensatore MOS. Infatti, qualsiasi tipo di sensore è costituito da un numero elevato di questi condensatori disposti in forma di matrice $n \times m$.

In figura 1.8 è riportato un disegno schematico di un elemento MOS, ottenuto partendo da una placca di silicio monocristallino, al di sopra della quale viene depositato uno strato di materiale isolante (SiO_2) molto sottile, la cui funzione è quella di isolare il semiconduttore dall'elettrodo metallico, depositato sopra lo strato di ossido. La struttura MOS si comporta come un condensatore a facce piane parallele, in cui l'armatura superiore è metallica e l'armatura inferiore è di materiale semiconduttore.

Una volta che il fotone attraversa elettrodo-isolante e arriva sulla placca di silicio, esso viene assorbito da quest'ultima: avviene una cessione di energia dal fotone agli atomi di silicio. Una tensione positiva applicata all'armatura superiore provoca una polarizzazione del condensatore e si osserva una concentrazione di elettroni liberi in corrispondenza della superficie di separazione tra ossido e semiconduttore drogato. L'accumulo di cariche è

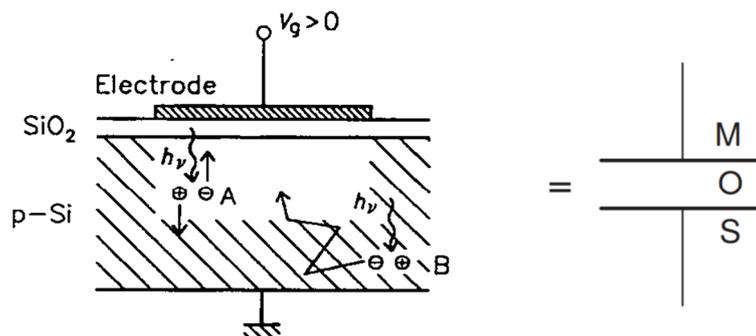


Figura 1.8 – Condensatore MOS

proporzionale all'intensità di luce incidente sul condensatore stesso, ovvero al numero di

fotoni. Si arriva ad un certo punto in cui il condensatore non è più in grado di accumulare cariche negative e si dice che il pixel ha saturato.

Analizzando le caratteristiche di un sensore a semiconduttore, si nota che la capacità di raccogliere fotoni dipende strettamente dal tipo di architettura utilizzata. Per quantificare la sensibilità di un sensore alla luce è stato introdotto il concetto di *pixel fill factor* (FF) ed è espresso come il rapporto percentuale tra l'area fotosensibile e quella dei pixel. Il FF è quindi tanto maggiore quanto più estesa è la superficie sensibile del sensore.

c. Sensori CCD e CMOS

I dispositivi CCD o CMOS utilizzati per il rilevamento dei fotoni sono una matrice organizzata di foto-rilevatori che forniscono un segnale elettrico correlato alla quantità di luce che incidono sulla superficie del pixel durante il tempo di integrazione. La lettura della matrice contenente l'immagine discretizzata e quantizzata $Q(i, j)$ viene fatta in maniera sequenziale.

Nell'approccio CCD, i fotoni vengono trasportati nel dominio di carica attraverso registri a scorrimento verticale o orizzontale in un singolo nodo di lettura in cui viene eseguita la conversione da carica a tensione mediante la tecnica di *floating diffusion*. Di norma, i pixel nei sensori sono costituiti da condensatori MOS (*metal oxide semiconductor*) nei quali sono immagazzinati gli elettroni e generati dall'assorbimento dei fotoni durante l'esposizione. Il numero massimo di fotoelettroni (*well*) N che possono essere accumulati in un pixel (elemento fotosensibile) prima che raggiunga la saturazione, rappresenta la capacità del pozzo FWC (*full well capacity*). Sia nei sensori *interline transfer* (IT) che in quelli *frame transfer* (FT), al termine del tempo di esposizione, gli elettroni vengono spostati in celle di

immagazzinamento attraverso delle regioni oscurate non fotosensibili. Il trasferimento dura diversi μs per i sensori IT e circa 1 ms per i sensori FT. Infine, i pixel vengono spostati nel nodo di lettura con capacità C, dove vengono convertiti in una tensione di uscita $U = Ne / C$. Nei sensori IT, ogni elemento fotosensibile è adiacente ad una regione oscurata. (figura 1.9 a) Ciò significa che le cariche liberate dai fotoni incidenti possono essere immediatamente spostate su un percorso oscurato, detto registro di trasferimento, senza dover passare sotto altri elettrodi fotosensibili, evitando così di subire alterazioni della distribuzione luminosa dell'immagine originaria.

I sensori FT sono costituiti da tanti pixel oscurati quanti sono quelli sensibili (figura 1.9 b). Infatti, questi sono adatti per il trasferimento di scene poco luminose perché avendo gli elementi fotosensibili tutti vicini, un elevato di fotoni potrebbe liberare nuovi elettroni alterando così la reale distribuzione di luce.

I sensori *full frame transfer* (FFT) non hanno regioni oscurate per il trasporto delle cariche (figura 1.9 c). Dopo l'esposizione, l'informazione dell'immagine viene spostata riga per riga

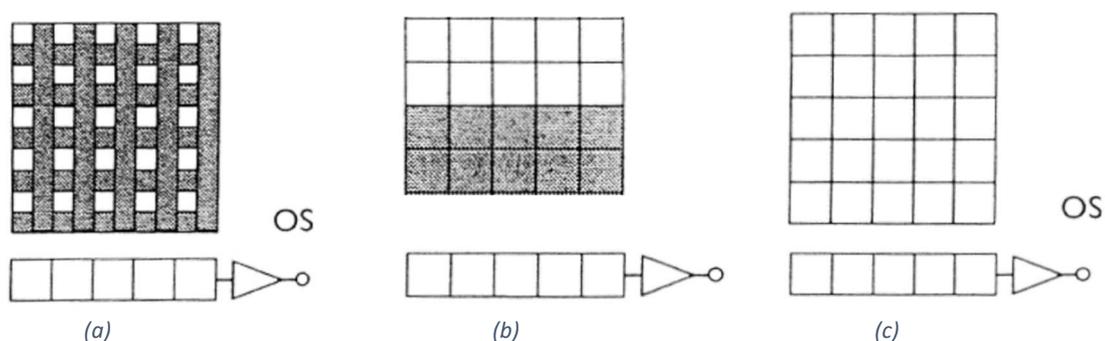


Figura 1.9 – (a) sensore interline transfer IT; (b) sensore frame transfer FT; (c) sensore full frame FF

in un registro orizzontale e da lì pixel per pixel al nodo di rilevamento. L'esposizione di una nuova immagine può essere avviata solo dopo la lettura dell'ultima riga dell'immagine precedente. Pertanto, il frame rate di tali sensori è basso.

I sensori CMOS rappresentano un'altra famiglia di sensori allo stato solido, oltre a quelli CCD. Le due tipologie di sensori hanno un'architettura molto simile ma completamente diverso è il loro modo in cui vengono spostate le cariche.

I sensori CMOS dispongono di due multiplexer, ovvero due registri con tante connessioni quante sono le righe o colonne del sensore. Tali registri sono collegati fisicamente ad ogni pixel e sono in grado di fornire in uscita il valore in tensione dell'elemento (i,j). Quindi, i sensori CMOS non prevedono più uno spostamento di cariche, bensì una lettura diretta della tensione di interesse. Infatti, all'interno di ogni pixel è posto un amplificatore operazionale che ha la funzione di trasformare la carica in tensione.

In questo caso, i pixel possono essere esposti tutti contemporaneamente oppure, grazie all'accesso casuale ai singoli pixel, è possibile leggere una specifica area di interesse (ROI): tanto più piccola è la ROI tanto più veloce sarà la lettura del frame. Inoltre, avendo l'elettronica sul pixel, è possibile gestire l'amplificazione locale in maniera indipendente, consentendo di rendere, ad esempio, più visibile una parte della scena rispetto ad un'altra.

A differenza dei sensori CCD dove l'area sensibile coincide con il pixel stesso (ad eccezione degli Interline Transfer), nei sensori CMOS parte dell'area è occupata dall'elettronica, infatti, i pixel risultano essere meno sensibili alla luce. Tale problema può essere risolto utilizzando delle microlenti poste sopra gli elettrodi, le quale sono in grado di deviare parte della luce che altrimenti verrebbe persa.

d. Elaborazione dell'immagine

Un sistema di visione può essere implementato utilizzando diverse architetture hardware. L'estrazione delle informazioni da un'immagine digitale può avvenire esternamente in un sistema basato su PC, oppure internamente in un sistema di visione autonomo integrato nella

telecamera (smart camera). I sistemi basati su smart camera sono generalmente utilizzati per applicazioni poco complesse, che richiedono basso sforzo computazionale. Mentre i sistemi basati su PC offrono prestazioni e flessibilità maggiori rispetto ai primi e sono la scelta più indicata quando c'è bisogno di maggiore potere computazionale. In un sistema di visione il computer è quel componente che riceve i dati e gli input in ingresso, esegue i calcoli e le istruzioni impartite dal software di visione e genera dati in uscita.

L'elaborazione è eseguita da un software e segue diverse fasi. Dapprima si acquisisce l'immagine dal sensore. In alcuni casi può rendersi necessaria una pre-elaborazione per ottimizzare l'immagine e assicurare che appaiano tutte le caratteristiche necessarie. Successivamente, il software identifica le caratteristiche specifiche, svolge le misurazioni e le confronta con le specifiche. Infine, viene presa una decisione e vengono comunicati i risultati.

Dovendo trattare flussi continui di immagini il computer utilizzato per applicazioni di visione industriale deve garantire ottime prestazioni in tutte le sue principali componenti: bus di comunicazione, memoria RAM, Hard disk e scheda grafica.

e. Comunicazione

Nelle applicazioni industriali, i sistemi di visione vengono inseriti all'interno del processo produttivo. Pertanto, questi devono essere in grado di connettersi in modo rapido e semplice agli elementi della macchina. Solitamente, ciò viene effettuato tramite un segnale discreto I/O o con l'invio dei dati su connessione seriale ad un dispositivo che carica, o utilizza le informazioni. Le comunicazioni dei dati con una connessione seriale possono avvenire sotto forma di un'uscita seriale RS – 232 convenzionale o Ethernet.

Capitolo 2

SENSORI A TRIANGOLAZIONE LASER

2.1 CONTROLLO DI QUALITÀ NELLE LINEE DI ASSEMBLAGGIO AUTOMOBILISTICO

In un mercato esigente come l'industria automobilistica, i prodotti devono soddisfare severi requisiti in termini di qualità, a tal fine i sensori laser sono divenuti un elemento centrale del sistema di verifica e un fattore di primaria importanza del processo di ottimizzazione delle differenti fasi produttive.

La parte finale della linea di assemblaggio della carrozzeria è costituita da una serie di operazioni manuali, poiché le operazioni sono complesse e molto diversificate, così da rendere non economico l'impiego di macchine automatizzate. Pertanto, vengono assemblati manualmente sportelli, cofano, portellone posteriore, fanali ed elementi estetici vari. L'assemblaggio di questi componenti prevede specifiche stringenti sull'allineamento delle parti adiacenti. Si definisce:

- *gap*, lo spazio tra due superfici adiacenti, misurato lungo il piano tangente alle superfici in esame;
- *flush*, la distanza tra le superfici misurata in direzione ortogonale al piano tangente alle superfici in esame.

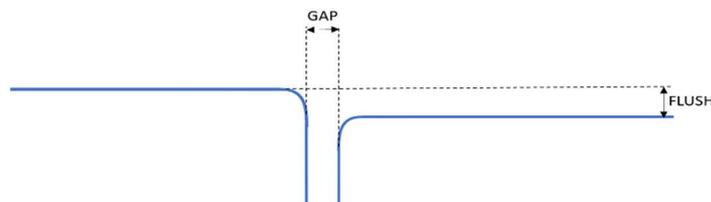


Figura 2.1 – Definizione di gap e flush

La misura del gap & flush deve essere fatta dall'operatore durante l'assemblaggio per verificare la corretta esecuzione delle operazioni ed evitare costi aggiuntivi dovuti al riallineamento a fine linea. Attualmente si usano sia gli strumenti di misurazione a contatto (spessimetri o calibri a mano), che quelli meno invasivi come i sensori a laser.

Sempre più aziende tendono ad assumere un modello di produzione simile quello definito dall'Industria 4.0, in cui occorre avere dati acquisiti da ogni singolo processo. Gli spessimetri e i calibri non permettono di soddisfare tale esigenza, dunque, sono richiesti dispositivi digitali in grado di comunicare con la rete di fabbrica. A tal fine, gli strumenti laser portatili rappresentano la miglior soluzione in quanto consentono di registrare e trasmettere tutti i dati che vengono acquisiti durante la misurazione. In commercio i prodotti di questo genere sono limitati, la maggior parte di quelli presenti sono ingombranti, pesanti (generalmente vengono fissati su un braccio robot), talvolta con il cavo e incerti su superfici riflettenti e scure. Pertanto, si sta sviluppando il G3F: uno strumento innovativo in grado superare queste problematiche e rendere il controllo qualità una fase più interconnessa con le altre.

2.2 IL MERCATO DEGLI STRUMENTI PORTATILI PER LA MISURA DI GAP & FLUSH

I dispositivi laser, grazie alle loro capacità di emettere un fascio di luce coerente, monocromatica ed estremamente collimato, hanno avuto e continuano ad avere un vasto ventaglio di applicazioni nei campi più disparati: industria, architettura, tutela di beni artistici, medicina, ecc. Per quanto riguarda l'industria automobilistica, tali sensori vengono utilizzati prevalentemente per il controllo qualità. Di seguito viene fatto un confronto delle caratteristiche del G3F con i principali sensori wireless e portatili presenti sul mercato per la misurazione di gap & flush sulla linea di assemblaggio:

- *GapGun Pro2 (Third Dimension)*. Può misurare qualsiasi tipo di superficie, dalla fibra di carbonio alla vernice nera lucida, fino alle cromature. I modelli più performanti utilizzano oltre 4000 punti come dati per la misurazione e assicurano una ripetibilità di 10 µm. Inoltre, dispongono di un display touchscreen in cui mostrano i risultati della misura ma anche come e dove misurare. Una bussola grafica guida il posizionamento rispetto alla parte, segnali acustici e vibrazioni emessi dal sistema avvisano gli operatori se sono nel corretto campo di misura.

I dispositivi GapGun sono in grado di memorizzare i dati internamente mentre effettua la misurazione e di trasferire automaticamente alla rete aziendale tramite wi-fi oppure scaricarli mediante la porta USB o con una connessione Ethernet. Inoltre, possono funzionare in completa autonomia per circa 4 ore (figura 2.2a).

- *Calipri c14 (NextSense)*. Il sistema è in grado di compensare automaticamente le inclinazioni e le oscillazioni e restituisce in modo riproducibile il valore reale del gap o flush. Esiste sia il modello collegato alla rete di fabbrica con cavi che quello wireless. A differenza del prodotto precedente, in questo caso i risultati delle misurazioni vengono visualizzati su uno o più monitor e non direttamente sul display del sensore. Il sistema brevettato Calipri è in grado di correggere automaticamente le inclinazioni e i rollii, eliminando così possibili disallineamenti del sensore. La misurazione viene eseguita con un movimento di rotazione del sensore che va a registrare il contorno delle diverse prospettive (figura 2.2b).

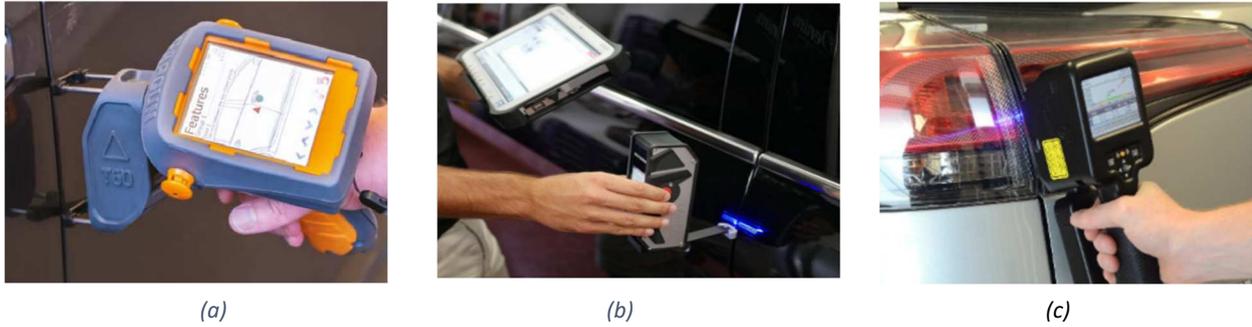


Figura 2.2 – (a) GapGun; (b) Calipri; (c) LaserGauge.

- LaserGauge HS763 (LMI Corporation)*: rispetto al principio di funzionamento tradizionale, i sensori laser cross-vector HS763 utilizzano due laser inclinati verso i bordi interni del gap e incrociati al centro come mostrato nella figura 2.3. Ciò consente al sensore di vedere i punti di superficie intorno ai bordi del raggio fino alla tangente verticale, fornendo una misurazione più precisa del gap e un profilo completo delle superfici. Inoltre, le impostazioni possono essere configurate per ogni singolo punto stabilito lungo il percorso di ispezione, in cui viene mostrata un'immagine dell'oggetto da ispezionare con una freccia che indica la posizione per la misurazione successiva. In caso di condizioni fuori specifica, gli operatori vengono avvisati con avvisi sia visivi che sonori (figura 2.2c).

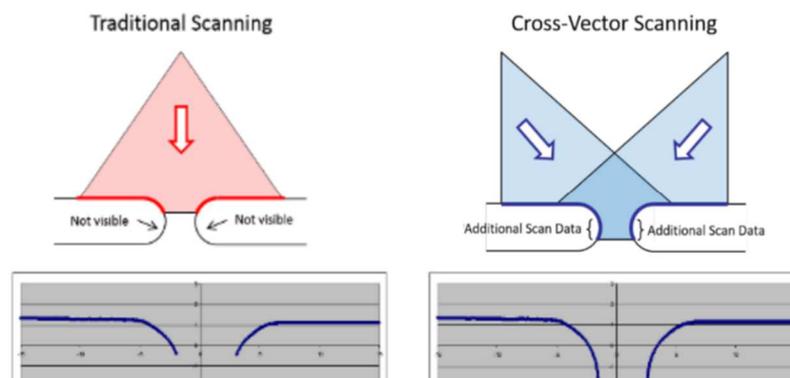


Figura 2.3 – principio di scansione tradizionale (sinistra); principio di scansione Cross Vector brevettato da LMI Corporation (destra).

	Third	NextSense	LMI Corporation	U-sense.it
	Dimension			
Modello	GapGun Pro2	Calipri c14	LaserGauge HS763	G3F v.2.0
Sorgente laser	1 lama laser	3 lame laser	2 lame laser	1 lama laser
Velocità di misura	1 s	2-3 s	0,5 s	2-3 s
Incertezza	10 µm	20 µm	25 µm	130 µm
Ripetibilità	Non dichiarata	±15 µm	Non dichiarata	100 µm
Interfaccia operatore	Display 3,8” integrato	Display 2,4” integrato	Display 3,5” integrato	Display 1” integrato
Capacità di autoadattamento alla superficie di misura	Adattamento dell'intensità del laser	Non dichiarata	Ottimizzazione automatica del guadagno su diversi colori e finiture	Auto adattamento esposizione e intensità del laser
Peso	460 g	590g	1000 g	300g
Batteria	8 h	5h	3 h	-

Tabella 2. 1 – Prestazioni dei competitors a confronto con quelle del G3F.

La tabella 2.1 riassume le principali caratteristiche dei 4 modelli.

Confrontando i valori si nota che il G3F ha le caratteristiche metrologiche leggermente inferiori rispetto ai prodotti concorrenti, però ha un peso più ridotto rispetto a loro e questo rappresenta un vantaggio in quanto non provoca affaticamento all'operatore che magari lo deve usare per diverse ore. Inoltre, il G3F ha la capacità di auto regolazione del tempo di esposizione in base al materiale (plastica-metallo o metallo- metallo) e al colore delle parti da misurare.

2.3 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DI UN LASER

Il *laser* è un fascio di luce amplificato tramite l'emissione stimolata della radiazione, infatti, è l'acronimo di *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

Una sorgente laser è in grado di emettere una luce:

- *monocromatica*, cioè tutte le onde hanno la stessa la lunghezza d'onda e quindi un solo colore caratteristico del mezzo attivo che l'ha prodotto;
- *coerente*, cioè tutte le onde hanno la stessa fase nello spazio e nel tempo, a differenza della luce ordinaria in cui i fotoni si muovono in modo casuale.
- *collimata*, cioè tutte le onde viaggiano nella stessa direzione e si diffondono con un angolo di divergenza molto piccolo.

Il funzionamento del laser può essere spiegato con il fenomeno fisico dell'assorbimento e dell'emissione dei fotoni: un elettrone in un atomo può essere eccitato da un livello energetico E_1 a un livello energetico superiore E_2 mediante l'assorbimento di un fotone di energia $E_{ph} = h\nu = E_2 - E_1$ (figura 2.4a). Quando un elettrone a livello di energia superiore transita verso uno di energia inferiore non occupato, emette un fotone. Ci sono essenzialmente due possibilità per il processo di emissione: l'elettrone subisce da solo la transizione verso il basso in modo spontaneo oppure può essere indotto a farlo da un altro fotone.

Nell'*emissione spontanea*, l'elettrone cade da un livello di energia E_2 a E_1 ed emette un fotone di energia $h\nu = E_2 - E_1$ in una direzione casuale (figura 2.4b). La transizione è spontanea purché lo stato energetico E_1 sia vuoto, cioè non già occupato da un altro elettrone. L'elettrone oscilla con una frequenza ν durante la transizione da E_2 a E_1 .

Nell'*emissione stimolata*, un fotone di energia $h\nu = E_2 - E_1$ stimola l'intero processo di emissione inducendo l'elettrone in E_2 a transitare fino a E_1 . Il fotone emesso ha la stessa

energia $h\nu$, stessa fase, stessa direzione e stessa polarizzazione del fotone in arrivo (figura 2.4c).

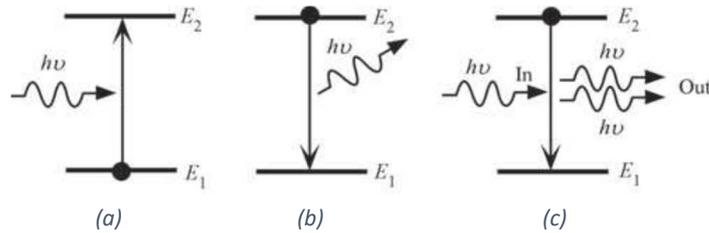


Figura 2.4 –Rappresentazione schematica dei tre fenomeni: (a) assorbimento; (b) emissione spontanea; (c) emissione stimolata

In realtà per produrre un'emissione laser è necessaria la presenza di almeno tre livelli energetici (E_1, E_2, E_3) dove il sistema di pompaggio crea un'eccitazione nel passaggio dallo stato fondamentale E_1 al livello energetico E_3 dal momento che il decadimento da E_2 allo stato fondamentale risulta particolarmente veloce; il passaggio E_3-E_2 è invece uno stato metastabile di lunga durata.

Un laser è composto principalmente da 3 parti:

- un mezzo attivo (gas, cristallo o liquido) che emette la luce;
- un sistema di pompaggio che fornisce energia al mezzo attivo;
- una cavità ottica che permette l'amplificazione dei fotoni.

Il processo di amplificazione dei fotoni è reso possibile grazie al fatto che un dispositivo esterno fornisce energia al materiale attivo presente nella cavità, portando la maggior parte degli atomi in uno stato eccitato. Altrimenti l'energia fornita dai fotoni verrebbe assorbita dagli atomi allo stato energetico di base per eccitarsi anziché per amplificare il numero di fotoni stessi. Quindi per avere un'emissione stimolata continua è necessario mantenere la

maggior parte degli atomi in uno stato energetico non stabile, attuando un'*inversione di popolazione*. La luce laser si realizza dunque, eccitando un materiale attivo contenuto in una

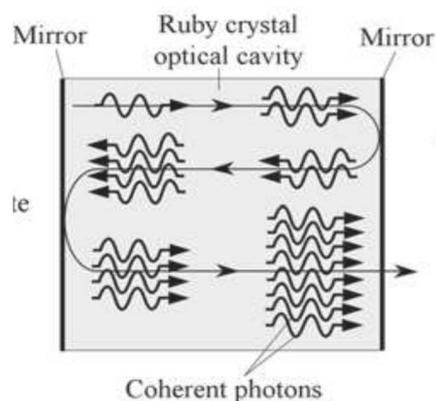


Figura 2.5 – Cavità in cui la radiazione viene riflessa avanti e indietro.

cavità allungata alle cui estremità sono posti due specchi perpendicolari all'asse del cilindro stesso (figura 2.5): un atomo eccitato viene destabilizzato da un fotone incidente e torna allo stato energetico di base, ciò determina il decadimento dell'elettrone eccitato e l'emissione di un fotone uguale. I raggi vengono riflessi all'interno del materiale nel momento in cui incontrano gli specchi e generano altri due fotoni quando incontrano due nuovi elettroni eccitati. I fotoni rimbalzano più volte sugli specchi, dunque da n elettroni eccitati si ottengono $2n$ fotoni. L'emissione stimolata è la base per ottenere il fenomeno di amplificazione dei fotoni, il quale consente di ottenere un fascio di luce molto intenso lungo l'asse e meno intenso lontano da esso.

I laser possono emettere energia in due differenti modalità:

- continua, quando il raggio è emesso senza interruzioni, mantenendo la potenza ad un livello costante nel tempo cosicché potenza di picco e potenza media coincidono (figura 2.6a);

- pulsata, quando la potenza varia da zero ad un valore costante per un certo tempo. Ciò significa che i periodi di emissione della luce laser sono alternati a periodi di interruzione dell'emissione. Il rapporto tra periodo di lavoro e periodo di pausa è chiamato *duty cycle*. Al diminuire della durata degli impulsi, l'energia emessa si concentra in un intervallo di tempo più breve e quindi la sua intensità risulta essere estremamente elevata. La distribuzione di intensità nei fasci laser è di tipo gaussiana, ovvero massima al centro e minima ai bordi. Tale comportamento può causare saturazione nelle immagini acquisite e quindi perdita di alcune informazioni. Per evitare problemi di questo tipo si potrebbe regolare la durata del sistema di illuminazione in funzione alla superficie da esaminare (figura 2.6b).

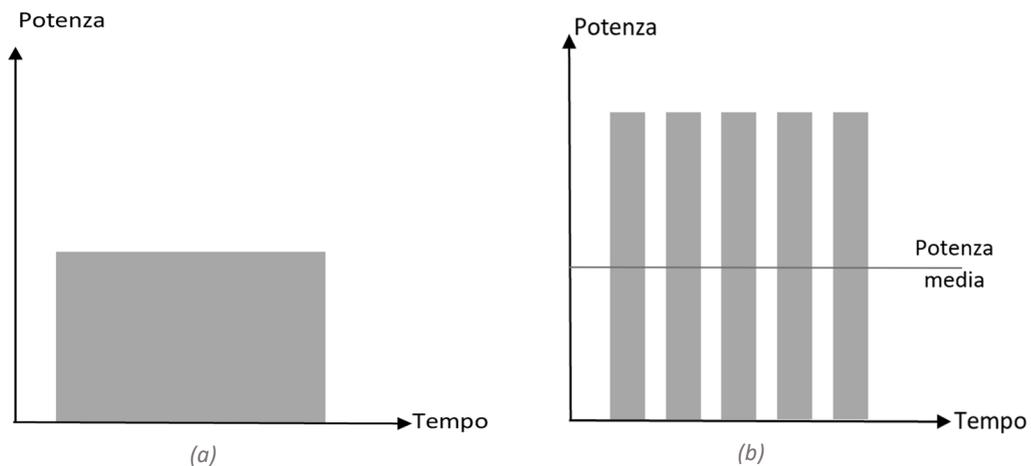


Figura 2.6 – (a) emissione continua, (b) emissione pulsata

2.4 PRINCIPIO DELLA TRIANGOLAZIONE LASER

I sistemi di visione basati sulla luce laser sfruttano il *principio della triangolazione laser* per misurare spostamenti, distanze e posizioni, senza entrare in contatto con il target. Con questo principio di misurazione la sorgente luminosa (laser), la superficie da misurare e la

fotocamera sono disposti in modo tale da formare un triangolo. In un sensore a triangolazione laser, un diodo (trasmettitore) proietta un fascio di luce laser direttamente sul target. Questa luce viene riflessa in varie direzioni e parte dei raggi riflessi vengono indirizzati, attraverso una serie di lenti, verso il sensore dell'immagine, detto anche ricevitore. A seconda della distanza del target, i raggi riflessi vengono proiettati verso un punto preciso della superficie del ricevitore; in questo modo è possibile calcolare, attraverso il principio matematico di triangolazione, la distanza tra il trasmettitore e il target (figura 2.7). Dunque, la posizione dei punti laser sul ricevitore dipende dalla posizione degli oggetti.

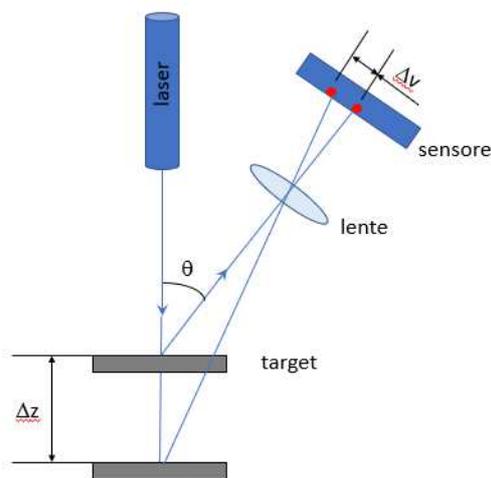


Figura 2.7 – Principio di funzionamento della triangolazione laser a singolo punto

La precisione di misura dipende dalla luce diffusa dalle superfici illuminate (intensità e distribuzione spaziale) che a sua volta dipende da:

- tipo di sorgente utilizzato (intensità e spettro) e dalla sua direzione rispetto all'oggetto e telecamera;

- tipo di materiale dell'oggetto (rugosità superficiale).

Superfici del target troppo riflettenti tendono a incidere negativamente sulla qualità dell'immagine.

La configurazione più semplice del laser è quello a singolo punto, ottenuto con un raggio laser e la sua evoluzione più immediata, è la proiezione di una linea, ottenuta con un piano di luce: l'intersezione di quest'ultimo con la superficie dell'oggetto viene utilizzata al fine di rilevarne il profilo dei target e calcolare, mediante opportuni algoritmi i valori di gap e flush. Dunque, la proiezione della linea permette di calcolare simultaneamente i valori di profondità o distanza laterale di un più ampio insieme di punti da una singola immagine (soluzione adottata nel G3F), velocizzando il processo di acquisizione rispetto alla proiezione di un unico punto.

2.4.1 Geometrie del sistema a triangolazione laser

Ogni configurazione sorgente luminosa - telecamera consente di evidenziare specifiche caratteristiche dell'immagine dell'oggetto sottoposto all'osservazione. Di seguito sono riportate le disposizioni più comuni adottate nel mondo industriale (figura 2.8):

- *Ordinary*. La camera è montata verticalmente sopra all'oggetto da scansionare, perpendicolare alla direzione di movimento, mentre il laser è inclinato rispetto all'oggetto stesso. Questa geometria permette di ottenere la maggiore risoluzione possibile per la misura in altezza.
- *Reversed ordinary*. Il laser è posizionato in verticale sopra all'oggetto, mentre la camera è inclinata. Con questa geometria si possono ottenere misure con risoluzione leggermente inferiore rispetto alla Ordinary, ma ha il vantaggio di permettere di acquisire immagini non distorte e più semplici da calibrare, poiché le misure vengono

effettuare nel piano del laser, che in questo caso coincide con la Z “mondo”. Per questo motivo questa è la geometria più utilizzata.

- *Specular*. Camera e laser sono montati entrambi inclinati rispetto alla normale alla direzione del moto, ciascuno su un lato dell’oggetto. Questa geometria è vantaggiosa quando è necessario scansionare superfici molto scure o opache, perché richiede una potenza inferiore del laser (in questo caso la riflessione speculare dell’oggetto viene intercettata dal sensore della camera, mentre nelle altre geometrie la camera vede principalmente solo la luce diffusa dall’oggetto).
- *Look-away*. Camera e laser sono montati entrambi inclinati e dalla stessa parte rispetto alla normale alla direzione del moto. Questa geometria può essere utile per evitare riflessi indesiderati ma richiede una maggiore potenza del laser rispetto agli altri metodi e permette di ottenere risoluzioni inferiori.

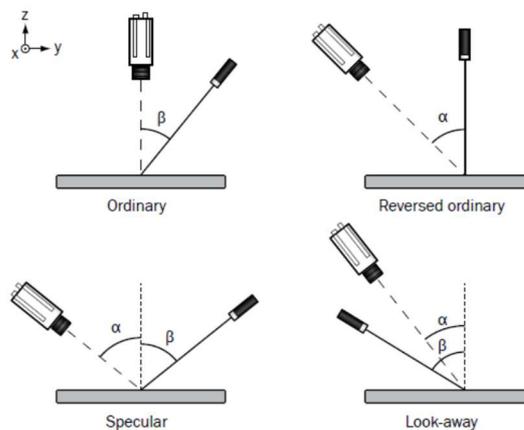


Figura 2.8 – geometrie del sistema a triangolazione laser

Indipendentemente dalla geometria scelta, le misure vengono sempre effettuate nel piano del laser. Questo significa che se il piano del laser del sistema di visione e l’asse Z del sistema di coordinate “mondo” non sono paralleli (come avviene per le geometrie Ordinary, Specular e Look-away), le coordinate Y di ogni valore di range misurato per un dato profilo dipendono

dall'altezza. Questa dipendenza rende più complessa la calibrazione dell'immagine 3D, pertanto, la geometria che viene più comunemente utilizzata è la Reverse Ordinary, nella quale il laser è posizionato ortogonale alla direzione del moto e le altezze Z misurate nel sistema di coordinate della camera coincidono con quelle del sistema "mondo".

Per ottenere delle immagini di qualità da un sistema a triangolazione laser, oltre a scegliere una opportuna geometria per il sistema, è anche necessario tenere in considerazione i seguenti aspetti:

- la linea laser deve essere ortogonale alla direzione di movimento dell'oggetto e, se possibile, anche allineata alle righe di pixel del sensore della camera;
- l'apertura dell'ottica deve essere scelta in modo da ottenere un'immagine a fuoco in tutto il range di altezze coperto dal sistema (quindi la linea del laser deve risultare sottile nell'immagine 2D sia nella parte alta che in quella bassa del sensore);
- il laser deve essere a fuoco, in modo che disegni una linea sottile sull'oggetto e che tale linea occupi solo poche righe del sensore nell'immagine 2D.

Capitolo 3

SISTEMA DI MISURA PORTATILE G3F

3.1 CONCEPT DESIGN

Il dispositivo di misura che è stato sviluppato si chiama G3F, dove G sta per gap e F sta per flush ma anche per flessibilità, velocità e funzionalità (*flexible-fast-functional*), infatti durante il progetto sono stati tenuti in considerazione i seguenti fattori principali per il suo corretto funzionamento:

- *sensore basato sulla triangolazione*: una fotocamera con caratteristiche ottiche adeguate (es. in termini di risoluzione, campo di vista, sensibilità ecc.) e un laser con requisiti standard di sicurezza per uso industriale e lunghezza d'onda adeguata.

Il campo di misura è stato pensato per le classiche applicazioni automobilistiche; i gap tipicamente sono in un range compreso tra 0 mm e 20 mm, mentre, i flush sono compresi tra 0 mm e 12 mm. Questi range sono stati usati per dimensionare il sistema ottico (piano laser, sensore di immagini, obiettivo). Inoltre, il sensore a triangolazione deve essere in grado di misurare superfici non solo metalliche ma anche parti in plastica o vetro delle automobili e questo ha portato alla scelta di una lunghezza d'onda di 405 nm (violetto); infatti, radiazioni di lunghezza d'onda corta vengono diffuse meglio da superfici lisce, rispetto a quanto avvenga per radiazioni di lunghezza d'onda maggiore.

- *ergonomia del dispositivo*: quando gli operatori misurano gap e flush nella catena di montaggio hanno un intervallo di tempo per farlo (solitamente 1-5 s per punto); inoltre gli operatori eseguono manualmente sia operazioni di assemblaggio, che di

misura pertanto, lo strumento di misura deve essere maneggiabile e veloce nell'eseguire la misura. Correlato all'ergonomia è la dimensione e il peso del dispositivo. Infine, sarebbe utile che, gli operatori potessero essere in grado di metterlo in una tasca o in un fodero quando non è in uso. Si è riusciti ad ottenere un dispositivo sufficientemente compatto con dimensioni 120 x 40 x 40 mm, in modo tale che sia tenuto facilmente in mano e un peso di 300 g.

- *dispositivo smart*: uno strumento di ispezione intelligente non è solo un sensore per misurare la distanza, ma deve avere anche comportamenti intelligenti che aiutano a misurare in modo corretto, ad esempio che abbia la capacità di autoregolazione dei parametri della fotocamera in base al tipo di superficie in osservazione.
- *incertezza di misura del sistema*: il dispositivo deve essere ripetibile e riproducibile indipendentemente dall'operatore che lo utilizza.

3.2 ARCHITETTURA del G3F

La triangolazione laser è una tecnologia ben nota; tuttavia, quasi nessun dispositivo disponibile in commercio oggi offre una serie di caratteristiche come portabilità, connettività di rete wireless, alimentazione a batteria, interfaccia uomo-macchina e la possibilità di autoregolazione, il tutto integrato in un unico dispositivo di misura compatto e leggero. Si tratta quindi, di uno strumento innovativo perfettamente in linea con le caratteristiche richieste dall'industria 4.0



Figura 3.1 – prototipo semi-definitivo del G3F v 2.0

La figura 3.1 mostra una fotografia del prototipo concepito, esso è dotato di:

- un interruttore on/off per l'accensione e spegnimento;
- un display con le varie opzioni che possono essere selezionate dall'operatore in base all'esigenza di misura e comunica la percentuale di carica del dispositivo;
- una tastiera con alcuni semplici comandi (frecche su e giù, tasto enter) e alcune spie LED (laser acceso, dispositivo ON);
- una maschera di protezione in gomma all'estremità del dispositivo per consentire all'operatore di effettuare misurazioni con o senza contatto con le superfici delle parti da misurare; in caso di contatto, l'utilizzo della maschera avrebbe un duplice vantaggio, ossia quello di impedire l'influenza della luce ambientale sui risultati di misura e quello di evitare i graffi sulla superficie dell'oggetto;
- un ingresso laterale per il caricabatterie;
- un vetrino frontale per proteggere i componenti ottici ed evitare che si sporchino durante l'utilizzo;

La custodia esterna è realizzata in materie plastiche mediante la tecnologia additiva; la particolare forma della parte anteriore del dispositivo è stata pensata per alloggiare il sistema di triangolazione laser: la sorgente luminosa è stata montata in modo che proietti un fascio di luce ortogonale alla superficie dell'oggetto e allo spazio da misurare, mentre la telecamera è inclinata di un angolo ϑ rispetto alla linea laser come mostrato in figura 3.2. Il fascio di luce ha un angolo di apertura $\alpha = 60^\circ$ mentre l'asse ottico forma un angolo $\vartheta = 45^\circ$ rispetto alla linea laser. È stata scelta questa configurazione geometrica (Reversed ordinary), nonostante comporti una perdita di sensibilità in direzione z rispetto alla soluzione inversa (asse ottico perpendicolare al target e asse della luce laser inclinato rispetto alla telecamera), in quanto offre prestazioni migliori su superfici che vanno dal comportamento ottico diffusivo (es. parti metalliche) a quelle altamente riflettenti (es. parti cromate). Infatti, se si

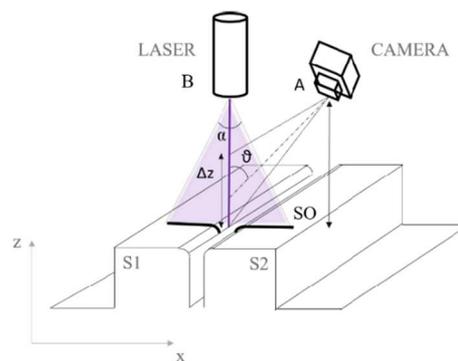


Figura 3.2 – schema di funzionamento del G3F nella misurazione di un gap.

adottasse la soluzione con laser inclinato, la quantità di luce diffusa che arriva al sensore sarebbe troppo bassa, diminuendo così il rapporto segnale – rumore sull'immagine e aumentando l'incertezza di misura. Il sistema è stato progettato per funzionare in un intervallo di $\Delta z = 12\text{mm}$, all'interno di questo range le immagini acquisite sono sufficientemente a fuoco.

La telecamera installata nel G3F è una Basler daA2500 - 60 mci di tipo RGB: questa scelta consente di implementare strategie per il riconoscimento del colore della superficie del target e adattare l'esposizione della fotocamera in funzione di esso.

Nella tabella 3.1 sono riportati i parametri di progetto del sistema ottico del G3F che poi successivamente verranno convalidati mediante l'analisi delle immagini acquisite nel capitolo 4.

Lunghezza focale	Apertura numerica F#	Profondità di campo DoF	Linea laser	Dimensioni sensore	Distanza di lavoro
[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[pixel]	[mm]
6	12,03	11,62	18,23	2592 x 1944	22

Tabella 3.1 – parametri di progetto del sistema ottico del G3F.

3.4 SOFTWARE

Lo strumento di misura G3F viene pilotato da remoto mediante il software *MobaXterm* una volta stabilita la connessione wireless tra il client e il server. Il programma rappresenta l'interfaccia con cui gestire le acquisizioni e salvare i dati: la sezione di sinistra mostra il contenuto della cartella di lavoro e le immagini acquisite mediante il G3F (figura 3.3 a), mentre a destra vi è il prompt da cui è possibile digitare gli input che il dispositivo deve eseguire, ad esempio, con il comando *vi camera.pfs* si apre la scheda per modificare le impostazioni della fotocamera (figura 3.3 b). In questo file, i parametri principali da tenere in considerazione sono:

- *Exposure time*. Specifica il tempo in cui il sensore è esposto alla luce durante l'acquisizione dell'immagine. La fotocamera che è stata installata nel G3F (Basler daA

2500 – 60 mci) ha un tempo di esposizione compreso tra 43 μ s e 1.4 s: per ottenere un'immagine di qualità è necessario variare tale parametro in funzione delle caratteristiche superficiali del target (in particolare del colore) e della quantità di luce dell'ambiente circostante. Ad esempio, per le superfici bianche opache è richiesta un'esposizione bassa (es.3000 μ s) altrimenti, l'immagine acquisita risulta essere saturata mentre, per le superfici scure e riflettenti è necessario aumentare il tempo di esposizione (es.0.1 s) al fine di ottenere un'immagine con un segnale accettabile.

- *Acquisition frame rate.* Consente di impostare un limite superiore per la frequenza dei fotogrammi della fotocamera. Ciò è utile se si desidera utilizzare la fotocamera ad una frequenza di fotogramma costante durante l'acquisizione di immagini in modo

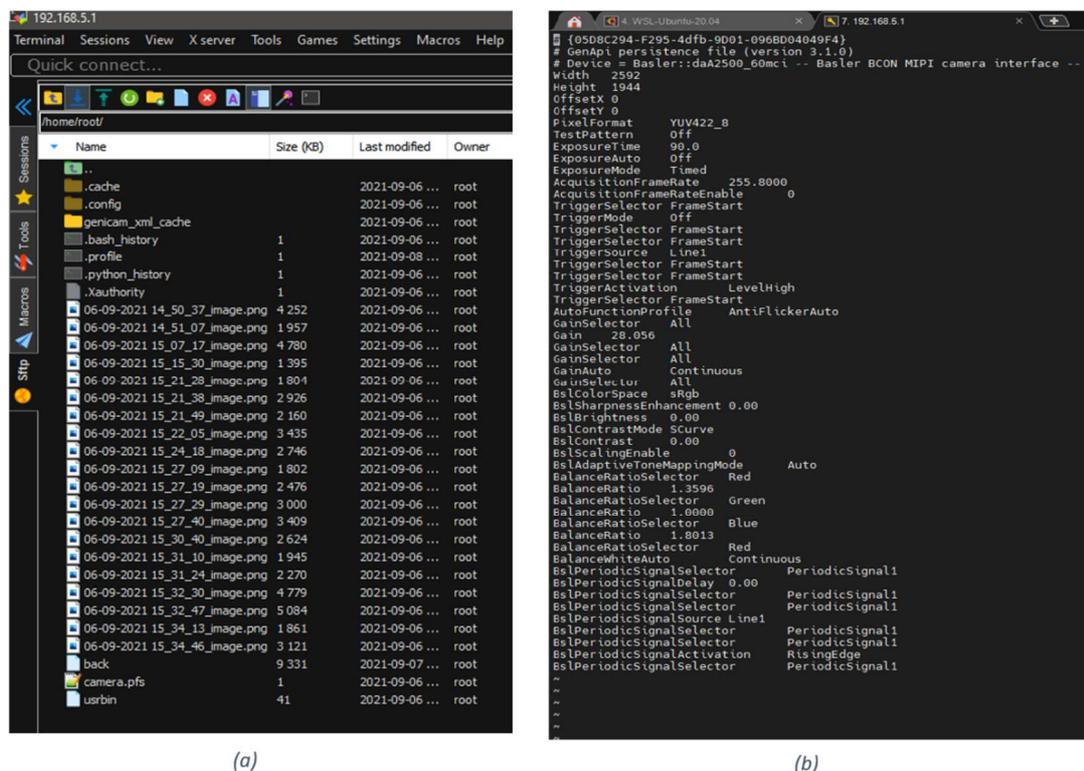


Figura 3.3 – (a) directory di MobaXterm; (b) prompt di comando che consente di modificare le impostazioni della telecamera

da garantire la ripetibilità alla fotocamera. Nel presente lavoro, è stato fissato 10 frames per secondo (fps).

- *Gain*. La funzione guadagno deve essere utilizzata con cura in quanto consente di aumentare la luminosità delle immagini ma nello stesso tempo va ad aumentare il rumore di una scena. Il range della fotocamera Basler daA 2500 – 60 mci è compreso tra 0 e 34 dB.

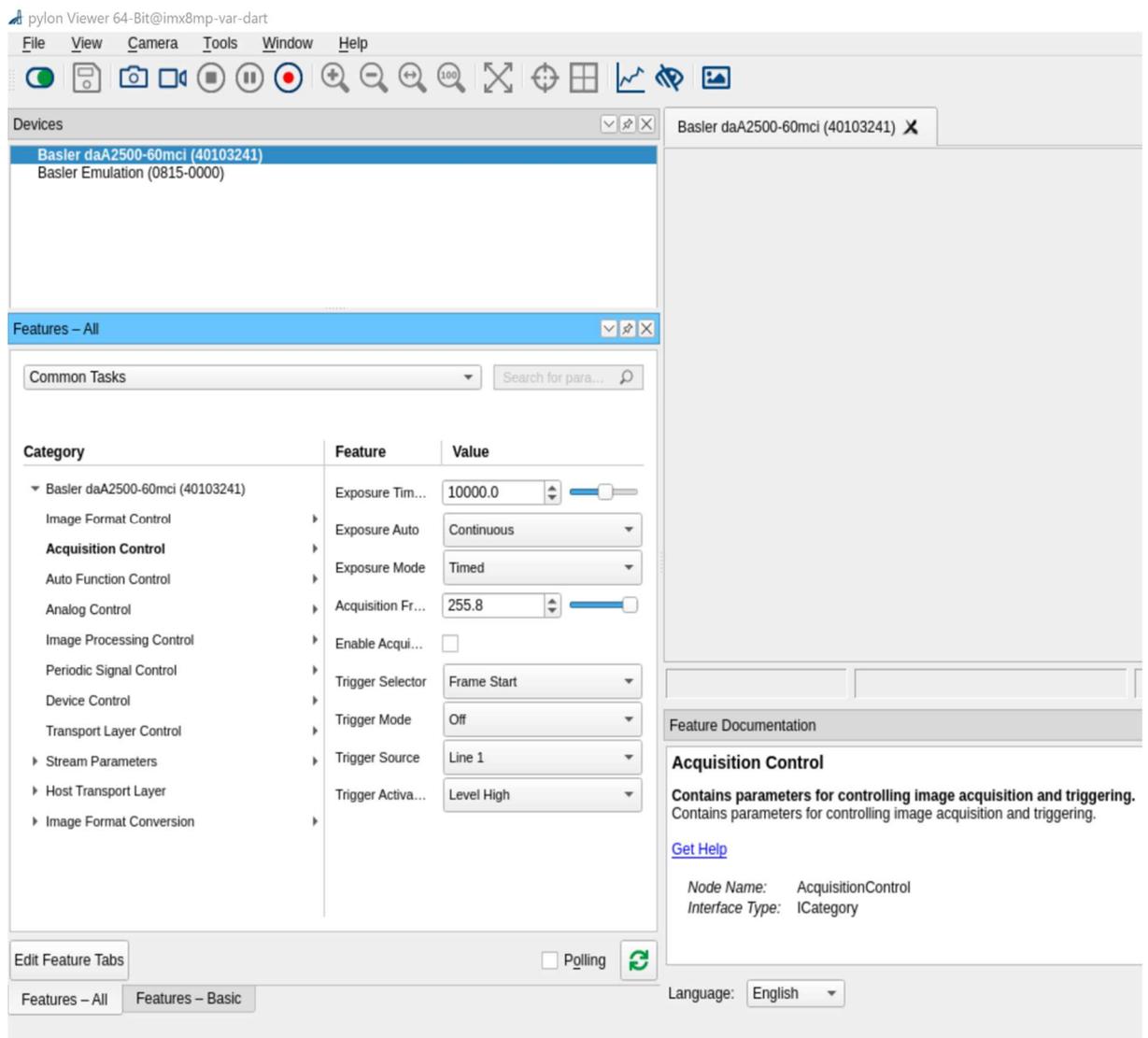


Figura 3.4 – Interfaccia Pylon

Variando i valori delle grandezze sopra elencate è possibile ottenere un'immagine della qualità desiderata. Per la corretta esposizione è utile osservare l'istogramma dei livelli di grigio dell'immagine.

La configurazione dei parametri (es. tempo di esposizione, guadagno, frame rate, ecc.) può essere fatta anche digitando *Pylon* dal prompt di MobaXterm. Questo software consente di testare e valutare le telecamere Basler in diretta per regolare ad esempio la messa a fuoco, l'intensità di luce in funzione del target da inquadrare oppure per raddrizzare la linea laser mediante la funzione griglia (figura 3.4).

Una volta acquisita, l'immagine RGB viene salvata all'interno della memoria del dispositivo e inviata mediante la rete wireless al computer per essere elaborata e analizzata. A tal fine, è stato utilizzato il software *Vision Assistant* per processare ed estrarre le informazioni necessarie per caratterizzare il dispositivo G3F. Nel capitolo successivo vengono mostrate le caratteristiche metrologiche dello strumento di misura, ottenute mediante l'analisi delle immagini acquisite con il G3F su diversi target.

3.4 PROCEDURA DI ALLINEAMENTO DELLA LINEA LASER

Prima di poter iniziare ad acquisire le immagini per la misura di gap & flush è stato necessario aggiustare la linea laser in modo da avere un'intensità luminosa uniforme su tutta la distribuzione spaziale. La figura 3.7a mostra il comportamento della linea laser prima di apportare le modifiche e si vede in modo evidente che è disomogenea, soprattutto sulla parte di destra dell'immagine.

La linea laser si forma tramite:

1. un pin-hole con fessura, che agisce come diaframma di campo e riduce il diametro del fascio;

- una lente cilindrica per espandere il fascio in un piano di luce laser.

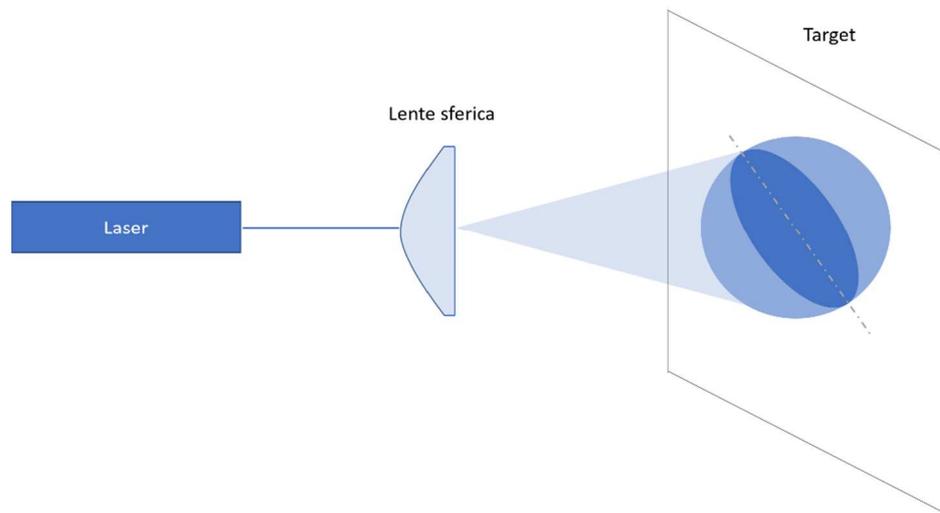


Figura 3.5 – schema rappresentativo del procedimento di allineamento

Per garantire una distribuzione di intensità luminosa su tutto il campo di misura sono stati fatti alcuni aggiustamenti. Innanzitutto, è stato smontato il pin-hole (un piccolo cilindro con una fessura rettangolare posto davanti alla luce laser che consente di ottenere la linea laser) ed è stato proiettato il raggio laser attraverso una lente cilindrica in modo da aver una linea laser su una superficie bianca: si è osservato che la sua distribuzione spaziale era sufficientemente omogenea. Successivamente il raggio di luce è stato proiettato attraverso



Figura 3.6 – distribuzione reale del laser

una lente sferica al fine di poter osservare da più vicino l'effettiva distribuzione spaziale della luce: si è notato che la luce non presenta un picco di luminosità circolare al centro della sezione bensì una distribuzione ellittica come mostrato in figura 3.5.

L'effettiva distribuzione del laser (figura 3.6) è stata ripresa mediante la fotocamera di uno smartphone mentre il fascio di luce incide sul target bianco. Una volta compreso il comportamento reale della sorgente luminosa, si è proceduto a rimontare la lente del pin-hole in modo che l'asse della fessura sia coincidente con quello del laser. Infine, è stato necessario disporre la linea laser parallela al sensore della fotocamera. Per fare ciò, è stata accesa la fotocamera del G3F attraverso Pylon e sfruttando la funzione griglia presente all'interno del programma, il pin-hole e il laser sono stati ruotati solidalmente fino a quando la linea non è risultata parallela ad una delle righe virtuali. La figura 3.7 b mostra la linea laser in seguito alle modifiche descritte sopra, in cui sono stati cambiati anche i parametri interni della telecamera.

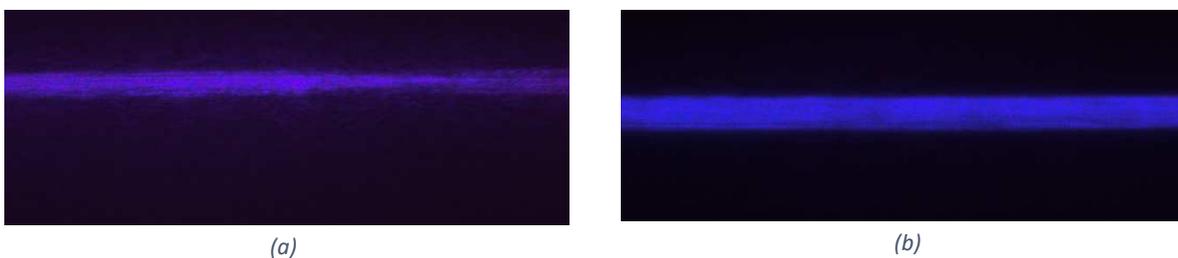


Figura 3.7 - (a) linea laser prima delle modifiche, (b) linea laser dopo le modifiche

In sintesi, le procedure da seguire per l'allineamento del laser sono:

1. proiettare il laser senza pin-hole attraverso una lente cilindrica su una superficie bianca;
2. controllare che la distribuzione spaziale della linea laser sia uniforme;

3. se il punto precedente è verificato, procedere nel controllo della forma del picco di intensità luminosa proiettando il laser attraverso una lente sferica su una superficie bianca;
4. controllare la reale forma del picco luminoso, nel caso non fosse circolare (come atteso) ma ellittica, individuare il suo semiasse maggiore;
5. a questo punto ruotare il corpo cilindrico del laser fino ad ottenere l'asse maggiore coincidente col piano laser;
6. rimontare il pin-hole facendo in modo che la fessura sia coincidente con il semiasse maggiore del picco luminoso. Per trovare la giusta posizione angolare tra il laser e la fessura sono state fatte una serie di prove iterative: per ogni minima rotazione si è andati a valutare la qualità della linea laser proiettata su una superficie bianca. In particolare, la funzione *line profile* di Vision ha permesso di verificare l'uniformità della distribuzione luminosa di ogni linea. Il pin-hole è stato ruotato fino a quando la distribuzione spaziale della linea laser non è risultata sufficientemente uniforme.

3.5 SCELTA DEI PARAMETRI DELLA FOTOCAMERA

Una volta assicurati che il laser sia disposto in modo opportuno, è stato possibile procedere con la modifica dei parametri della fotocamera al fine di renderla ripetibile e di ottenere delle immagini con un segnale alto ma non saturato; per fare ciò, innanzitutto, sono state disattivate tutte le funzioni automatiche della fotocamera (*Exposure auto*, *Auto fuction profile*, *Gain auto*, *Adapative tone mapping mode*, *Balance white auto*) attraverso i comandi di Pylon mentre il frame rate è stato fissato a 10 Hz.

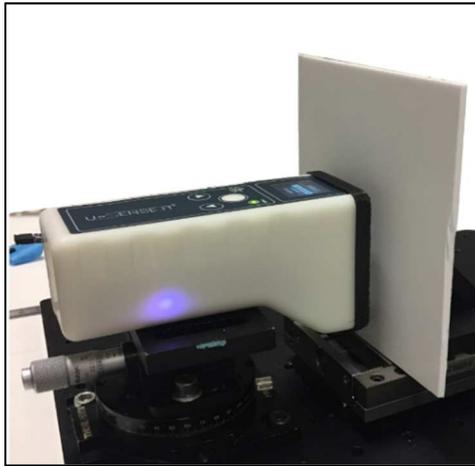
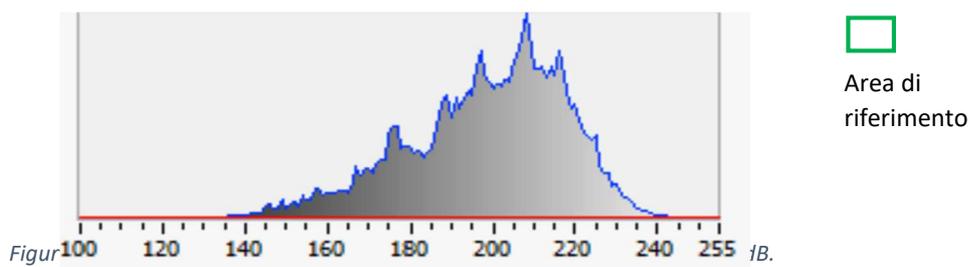


Figura 3.8 – disposizione sistema di visione per la valutazione dei parametri della fotocamera al variare del colore della superficie del target.

Per determinare il valore degli altri due parametri che più influenzano il comportamento della fotocamera (*Exposure time* e *Gain*), le immagini sono state acquisite in condizioni ideali, cioè con l'asse della luce laser perpendicolare ad una superficie bianca opaca, posta ad una distanza di 6 mm dal sensore (distanza a cui la fotocamera è stata messa a fuoco) come mostrato in figura 3.8.

Successivamente sono state effettuate tre acquisizioni variando i valori di *exposure time* (*et*) e *gain* (*g*). Le immagini sono state poi caricate all'interno dell'ambiente *Vision* e andando a valutare la distribuzione della scala dei grigi in corrispondenza di una specifica regione di interesse (area che delimita la linea laser) mediante l'istogramma (figura 3.9) e su una linea di pixel mediante la funzione *line profile*; per ognuna di esse è stato possibile calcolare la percentuale di pixel saturati sull'intera area di riferimento.



Nella tabella 3.2 sono riportati i dati elaborati su ognuna delle tre immagini acquisite fissando l'exposure time a 2000 o a 3000 μ s e il gain a 8 o a 10 dB. Ovviamente, i valori dei due parametri devono essere valutati su un'area di riferimento uguale per tutte le immagini che, in questo caso è pari a 173664 pixel. Andando a conteggiare il numero di pixel la cui intensità luminosa è pari a 255 e confrontando le percentuali saturate riportate nell'ultima colonna, si può affermare che, nel caso in cui il target abbia una superficie bianca diffusiva, è conveniente settare l'esposizione a 2000 μ s e il guadagno a 8 dB, in corrispondenza di questi valori l'immagine ha una saturazione trascurabile (0,0035%). Infatti, la maggior parte dei pixel è compresa tra 140 e 240 della scala dei grigi, con un picco intorno a 210: si può dire che il segnale dell'immagine è sufficientemente alto.

Immagine	Exposure time [μ s]	Gain [dB]	N.pixel totale	N.pixel saturati	Percentuale di pixel saturati [%]
1	2000	8	173664	6	0,0035
2	2000	10	173664	3257	1,88
3	3000	8	173664	99669	57,39

Tabella 3.2 – valutazione dei parametri della fotocamera (esposizione e guadagno) da settare in modo da avere un'immagine non saturata e con un segnale alto.

Confrontando, invece, il profilo del valore di grigio lungo una linea di riferimento è possibile valutare l'uniformità della distribuzione luminosa del piano di luce laser: nel caso ideale la luce laser ha lo stesso livello di intensità per tutti i 2592 pixel mentre nella figura 3.10 è riportato l'andamento reale della distribuzione luminosa dei tre piani di luce (rosso, verde, blu) che risulta essere abbastanza uniforme lungo l'intera linea laser e ciò costituisce un altro

parametro con cui valutare la bontà dell'acquisizione. Inoltre, si nota che il piano di blu ha valori di intensità molto più alti rispetto a quelli di rosso e verde, dovuto al fatto che il laser

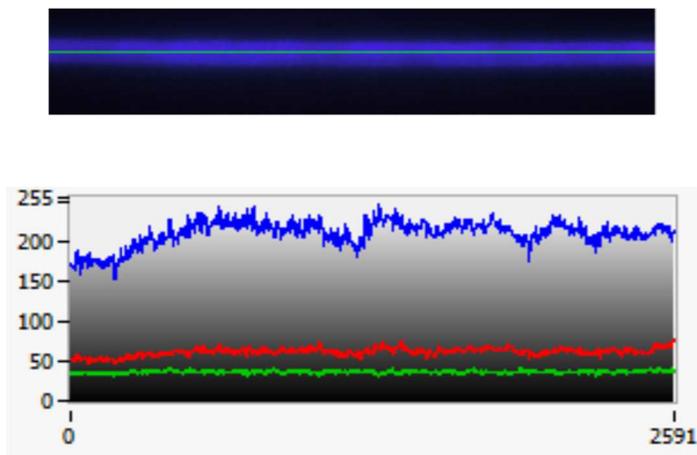


Figura 3.10 – profilo di intensità luminosa lungo la linea di riferimento per valutare l'uniformità spaziale della linea laser

emette un fascio di luce con una lunghezza d'onda pari a 405 nm, ovvero nel campo del violetto-blu.

Determinati i valori di exposure time e gain per una superficie bianca opaca, si è passati alla valutazione dei due parametri sopra citati anche per altre tipologie di superfici, a tale scopo sono state prese in considerazione nove superfici verniciate con colori diversi.

In un primo tentativo è stata fatta una prova con alcuni colori utilizzando gli stessi valori scelti per la superficie bianca, si è visto che le immagini ottenute erano quasi prive di informazioni. Successivamente si è deciso di portare il tempo di esposizione a 150000 μ s e lasciando gli altri parametri invariati e sono state ottenute le immagini riportate in figura 3.11.

Osservando le scene riportate in figura 3.11 si comprende immediatamente che il valore di ET scelto non è adatto per tutti i colori. Al fine di effettuare una valutazione più approfondita

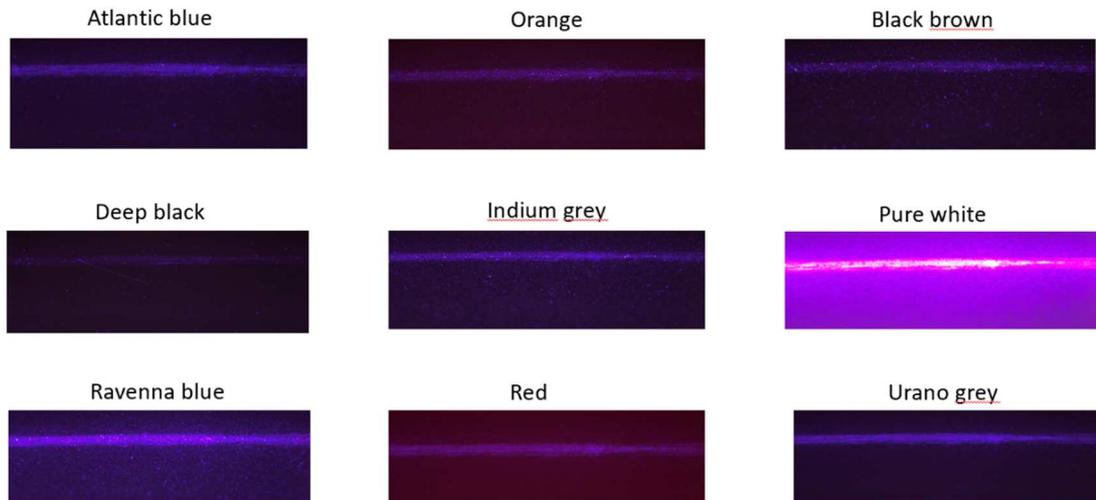


Figura 3.11 – colori utilizzati per valutare il tempo di esposizione opportuno per ognuno di essi.

dell'inadeguatezza del valore scelto per tutte le tipologie di target, per ogni immagine associata ad un colore diverso è stato calcolato il rapporto segnale-rumore (*Signal to Noise Ratio SNR*): una grandezza numerica che mette in relazione la potenza del segnale utile rispetto a quella del rumore in una scena ed è pari a:

$$SNR = 20 * \log\left(\frac{S}{N}\right)$$

dove S è la potenza del segnale utile e N è la potenza del rumore.

Innanzitutto, per ogni immagine è stata fatta l'estrazione del piano di blu in *Vision Assitant* in modo da applicare la funzione *Line profile* su una linea tracciata in direzione perpendicolare al laser in una scena monocromatica (figura 3.12). I dati relativi alla distribuzione di intensità relativi a tutti i colori sono stati esportati in un file Excel e plottati in un unico grafico, si osserva perfettamente che il tempo di esposizione scelto non è adatto

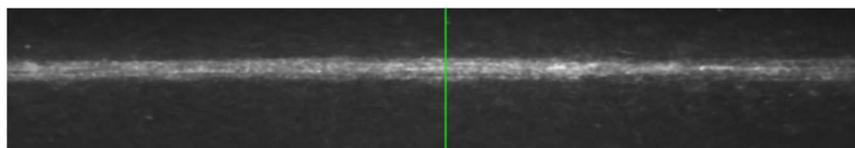


Figura 3.12 – line profile su un'immagine monocromatica

per tutti i colori, in quanto, per alcuni il livello di intensità tende alla saturazione mentre per altri il segnale risulta essere estremamente basso. Nel grafico di figura 3.13 sono riportati alcuni dei colori analizzati (per una maggiore comprensione grafica) e si osserva che a parità del tempo di esposizione (150000 μ s) il bianco ha raggiunto la saturazione mentre il nero fornisce un segnale ancora molto basso.

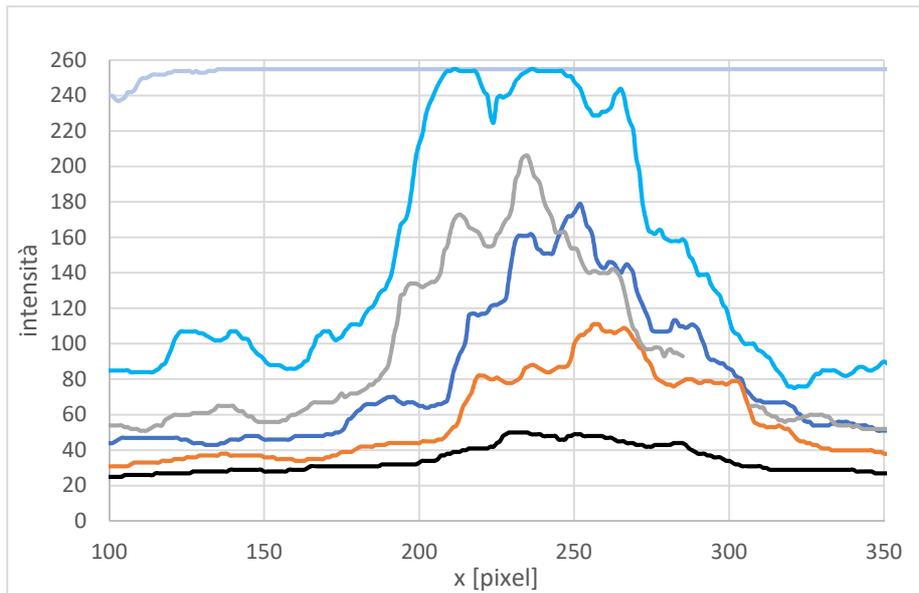


Figura 3.13 – profili di intensità ottenuti dai target di diversi colori (il colore del profilo coincide con quello del target utilizzato)

Una volta ottenuti i profili di intensità, è stato possibile determinare il segnale massimo e la media dei rumori, ottenuta tracciando una retta orizzontale interpolante alla base di ogni curva (l'intersezione della retta con l'asse delle ordinate fornisce il valore medio del rumore) e applicando la formula di SNR sopra riportata è stato possibile determinare il rapporto segnale – rumore per ogni colore (tabella 3.3).

Colore	Segnale	Rumore	S/R	SNR [dB]
Atlantic blue	180	50	3,60	11,13
Orange	110	35	3,14	9,95
Black brown	128	45	2,84	9,08
Deep black	50	25	2,00	6,02
Indium grey	185	55	3,36	10,54
Pure white	255	255	1,00	0
Ravenna blue	255	90	2,83	9,05
Red	142	38	3,74	11,45
Urano grey	210	58	3,62	11,18

Tabella 3.3 – Rapporto segnale – rumore dei target di diversi colori a parità del tempo di esposizione.

I valori riportati nella penultima colonna della tabella 3.3 esprimono un rapporto segnale - rumore lineare mentre nell'ultima colonna sono espressi in scala logaritmica. Confrontando quest'ultimi si può dire che:

- i colori con $SNR > 10$ dB possono essere ritenuti opportunatamente esposti;
- i colori con $SNR \leq 10$ non possono essere esposti a 150000 μs , in quanto il segnale dell'immagine non risulta abbastanza altro, ad eccezione del *pure white* in cui non si ha nessuna informazione a causa della saturazione dell'immagine.

Dai risultati precedenti si deduce che è necessario determinare un valore del tempo di esposizione diverso per ognuno di essi. Di seguito viene riportato il valore di ET ideale per alcuni dei colori prima analizzati, ottenuto andando a modificare iterativamente il parametro

Duty cycle 500000 ms							
Colore	Exposure time ET [μ s]	Gain G [dB]	z [mm]	Segnale	Rumore	S/R	SNR [dB]
Pure white	3000	8	5	242	20	12,10	21,66
Red	150000	8	5	245	30	8,17	18,24
Yellow	60000	6	5	210	20	10,50	20,42
Ravenna blue	15000	10	5	220	20	11,00	20,83
Urano grey	70000	8	5	220	20	11,00	20,83
Deep black	200000	8	5	150	38	3,95	11,93

Tabella 3.4 – Tempo di esposizione consigliato al variare del colore del target.

in Pylon fino a quando non si è ottenuto un'immagine discretamente accettabile, ovvero con un valore di SNR > 10 dB. In realtà, per alcuni colori è stato necessario variare leggermente anche il guadagno G per ottenere delle immagini sufficientemente esposte.

Dalla tabella 3.4 si nota che il tempo di esposizione varia sensibilmente al variare del colore della superficie osservata (da 3000 μ s a 200000 μ s) passando dal bianco al nero.

I valori di ET determinati sperimentalmente verranno poi tenuti in considerazione dall'algoritmo di calcolo del G3F in modo tale che sia in grado di settare questi parametri automaticamente ogni volta che in input gli viene detto il colore del target da misurare.

Capitolo 4

VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE

METROLOGICHE DEL G3F

Le caratteristiche metrologiche comprendono tutte quelle proprietà intrinseche di uno strumento di misura e definiscono i limiti entro i quali è possibile fare una misurazione, in altre parole definiscono la precisione di misura di uno strumento.

Di seguito vengono presentati i risultati sperimentali della misura delle caratteristiche statiche del sensore a triangolazione laser G3F. Innanzitutto, si è andati a determinare il campo di misura e la profondità di campo dello strumento in quanto da questi dipende la possibilità di eseguire delle misure. Successivamente si vanno a definire tutte quelle caratteristiche che possono contribuire nella definizione dell'incertezza di misura del sistema e dunque, la sua precisione.

4.1 PROFONDITÀ DI CAMPO

In questo paragrafo si va a valutare la profondità di campo effettiva del sensore G3F, cioè l'intervallo di distanze in cui gli oggetti appaiono ancora nitidi, nonostante il piano di fuoco sia in corrispondenza di una precisa posizione. Per determinare tale grandezza è stata effettuata un'analisi del profilo di intensità delle immagini acquisite su una superficie bianca disposta in direzione perpendicolare rispetto all'asse del laser (figura 4.1). In questa analisi

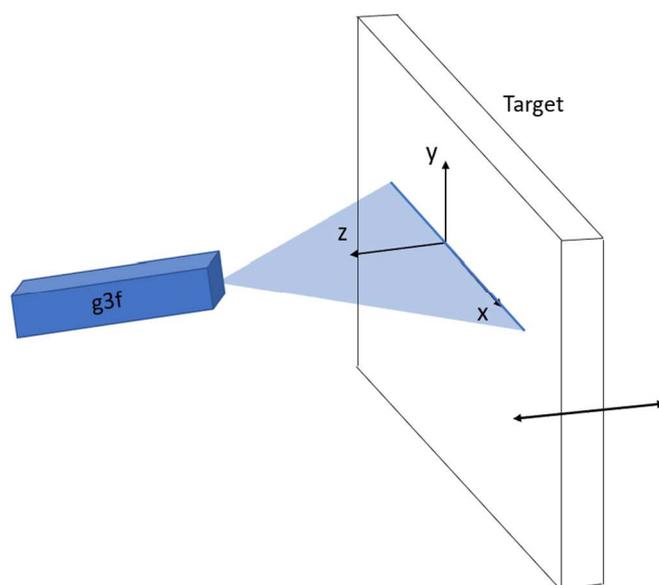


Figura 4.1 – rappresentazione schematica della disposizione sensore – target.

la fotocamera è stata messa a fuoco “a distanza zero”, cioè con il G3F e la superficie della lastra a battuta. Le immagini sono state ottenute spostando il target ogni 3 mm lungo l’asse z a partire dalla posizione di contatto. Nella tabella 4.1 sono riportate le posizioni in cui queste sono state acquisite.

	Image 1	Image 2	Image 3	Image 4	Image 5	Image 6
Z [mm]	0	3	6	9	12	15

Tabella 4.1 – posizioni in cui sono state prese le immagini.

Ogni immagine poi, è stata analizzata tramite il programma *Vision* da cui è stato possibile estrarre mediante un file *Excel* la distribuzione di intensità lungo una linea tracciata perpendicolarmente a quella del laser (linea verde riportata in figura 4.2): per ogni riga di pixel il software fornisce un valore della scala di grigi. I dati delle sei immagini sono stati

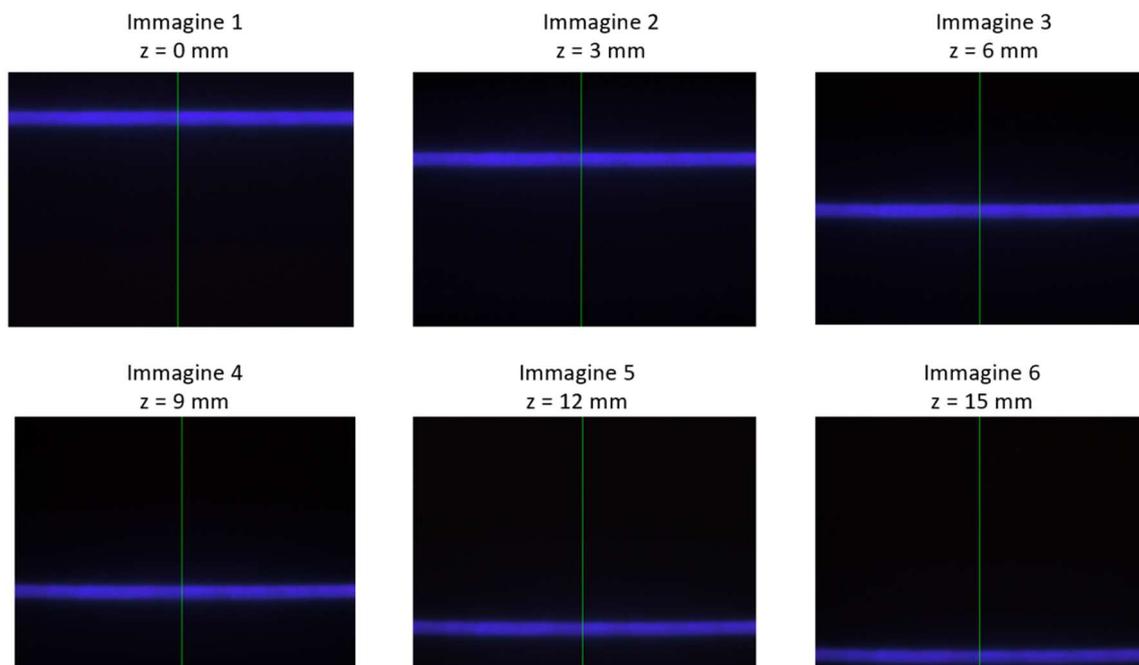


Figura 4.2 – linea laser acquisita dal g3f in corrispondenza di varie posizioni del target

successivamente plottati in un unico grafico in cui esprime il livello di intensità in funzione della posizione (espressa in pixel) nell'immagine.

Dall'andamento del grafico (figura 4.3) si può dedurre che il profilo di intensità della luce laser è inversamente proporzionale alla distanza rispetto al target, infatti, la retta che interpola i massimi ha un andamento decrescente.

In realtà sarebbe proporzionale all'inverso del quadrato della distanza ma poiché le distanze sono piccole, (dell'ordine di millimetri) è lecito approssimare l'andamento con una funzione lineare. In altre parole, il segnale è massimo quando il sensore e l'oggetto sono a contatto e minimo quando sono lontani. Confrontando i dati raccolti relativi all'immagine acquisita in corrispondenza di $z = 15$ mm con quelli ottenuti nelle posizioni più vicine, si nota che il valore di intensità luminosa è relativamente basso e l'immagine è poco nitida a parità di lunghezza focale della fotocamera, dunque, la profondità di campo del G3F può essere

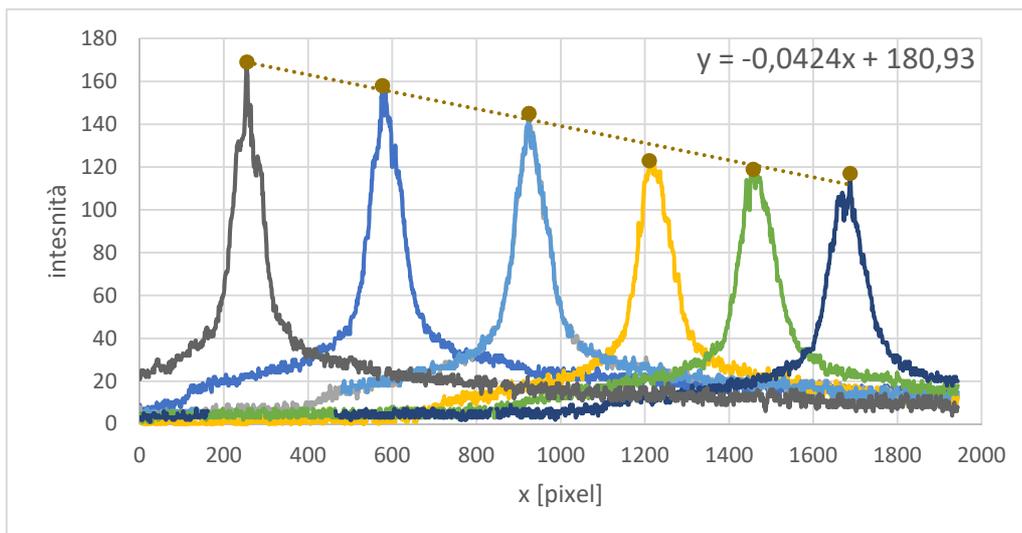


Figura 4.3 – profili di intensità al variare della distanza z con fuoco a z = 0 mm.

approssimata a 12 mm, valore in linea con quello determinato analiticamente in fase di progettazione.

Il grafico in figura 4.3 è stato ottenuto prima di effettuare gli aggiustamenti del sensore G3F, in cui il segnale più alto era pari a circa 170 (quando $z = 0$ mm), da ciò è stato dedotto che fosse necessario modificare i parametri della fotocamera in modo da aumentare la qualità delle immagini. Infatti, per garantire delle immagini sufficientemente nitide per tutte le posizioni della profondità di campo, la fotocamera è stata messa a fuoco alla distanza di 6 mm, in modo da avere lo stesso “sfocamento” in entrambe le direzioni rispetto al piano focale. Tale correzione non consente solo di bilanciare la distribuzione di fuoco indipendentemente dal verso di spostamento ma anche di aumentare il livello di intensità delle immagini acquisite nel range compreso tra la posizione di contatto e quella del piano focale. In questo caso, il segnale delle immagini risulta essere alto e più o meno costante in un range della profondità di campo, in particolare nell’intervallo compreso tra 0 e 6 mm, a differenza del caso precedente in cui il picco si ha solo in corrispondenza del piano focale ($z = 0$ mm). Oltre il piano focale, il livello di intensità delle immagini inizia a diminuire con un

andamento lineare. Il comportamento appena descritto è illustrato nella figura 4.4. Inoltre, si nota che ogni singolo profilo di intensità può essere approssimato maggiormente con la curva

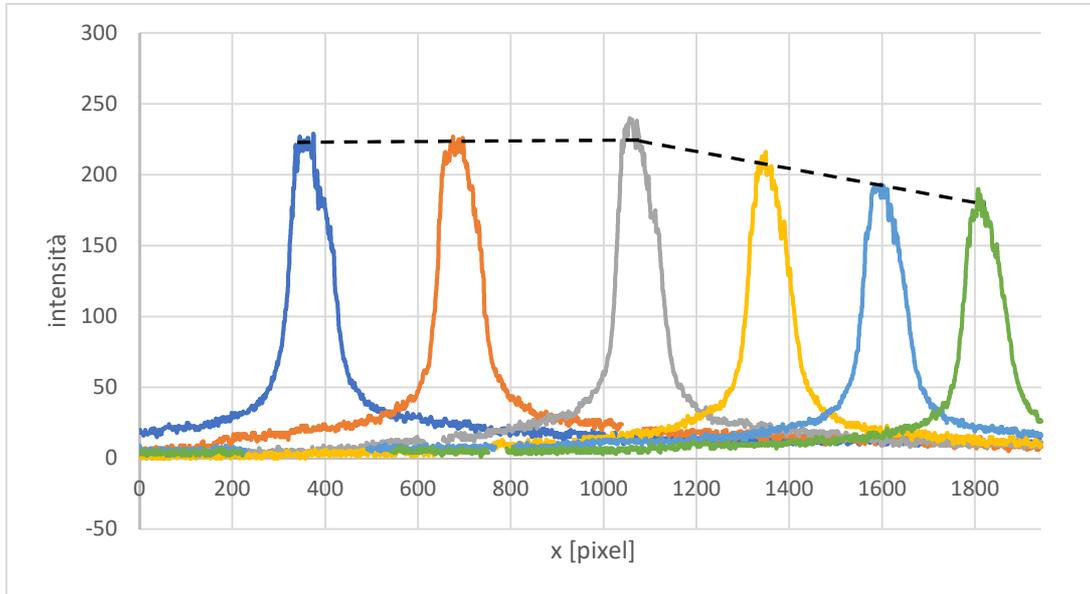


Figura 4.4 – profili di intensità al variare della distanza z con fuoco a $z = 6$ mm.

di Gauss che è quella che solitamente viene considerata per effettuare le stime sulle caratteristiche dell'immagine acquisita.

L'andamento frastagliato delle curve riportate di sopra (figura 4.4) è dovuto ad un fenomeno chiamato *pattern speckle*: si ottiene quando una luce laser incide su una superficie rugosa e la sua diffusione determina la sovrapposizione di molte onde tra loro coerenti ma con fase casuale. In alcune direzioni si produce un effetto di interferenza costruttiva e in altre un effetto di interferenza distruttiva creando così una figura fatta di puntini luminosi e di puntini scuri. Per ridurre i picchi di intensità nelle immagini acquisite e quindi, avere dei profili di intensità con un andamento che assomigli il più possibile a quello gaussiano, è stata calcolata innanzitutto la media di tre profili di intensità di una regione molto ristretta dell'immagine (figura 4.5); tale operazione ha consentito di eliminare parzialmente i rumori presenti sulla

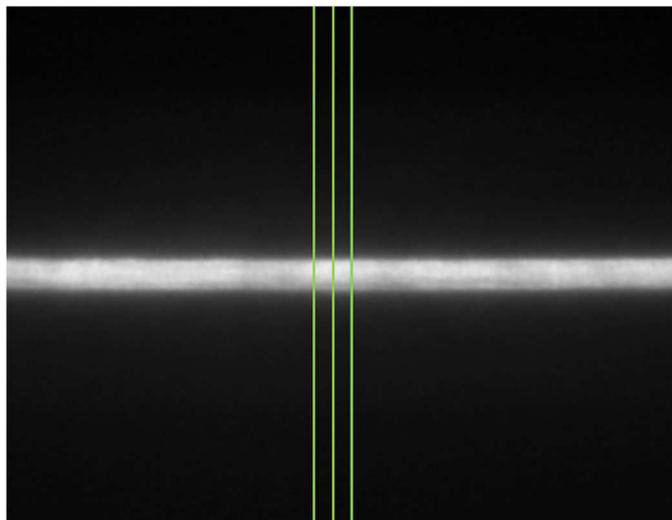


Figura 4.5 – profili su cui è stata calcolata la media di intensità luminosa

scena. Al fine di uniformare ulteriormente la distribuzione luminosa, è stato applicato in *Vision* un filtro spaziale passa basso, in particolare il filtro mediano, il quale tende ad allisciare l'immagine andando ad eliminare i dettagli. Infatti, questo strumento deve essere utilizzato con cautela perché da un lato permette di ottenere delle immagini più uniformi in termini di distribuzione spaziale, dall'altro però va a ridurre il potere risolutivo del sensore e quindi la capacità di riconoscere oggetti sufficientemente piccoli, sapendo che la

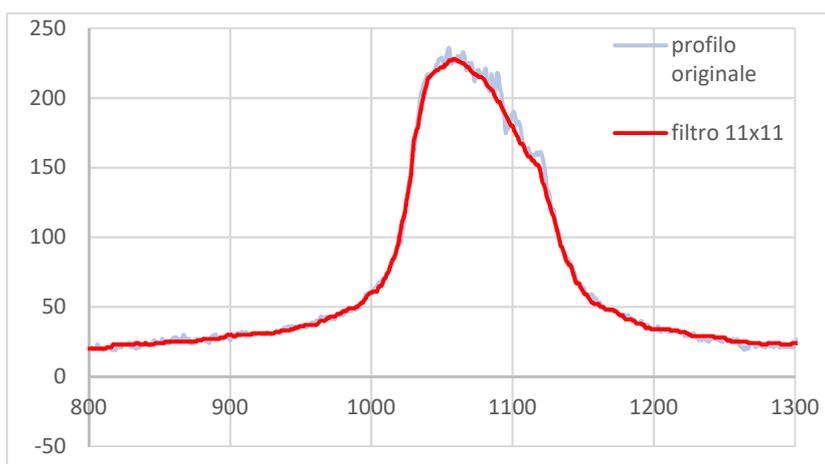


Figura 4.6 – profilo di intensità luminosa originale (curva grigia) e filtrato con un kernel 11 x 11

dimensione dello speckle è un importante fattore di influenza per l'accuratezza della misurazione di gap&flush con il metodo di ispezione basato sull'immagine digitale.

In questo caso è stato applicato un kernel 11 x 11, ciò significa che il valore di intensità luminosa di ogni pixel è la somma pesata degli altri 120 pixel adiacenti. L'effetto risultante è riportato in figura 4.6, in cui si osserva perfettamente la riduzione del rumore rispetto al profilo originale.

4.2 CAMPO DI MISURA

Nota la profondità di campo, è possibile legare questa grandezza con il range laterale di misura dello strumento, ovvero con il *campo di misura*: un insieme di range in cui in uno strumento può effettuare una misura. Per determinare questo parametro, il G3F è stato fissato su un supporto, successivamente è stato posizionato un target davanti al sensore, ortogonale all'asse del laser. Sulla superficie della lastra è stata incollata una carta millimetrata, che costituisce il riferimento fisico su cui andare a leggere la larghezza della linea laser in corrispondenza delle varie posizioni, ottenute spostando il target mediante una slitta micrometrica (figura 4.7): le immagini sono state acquisite partendo dalla posizione di

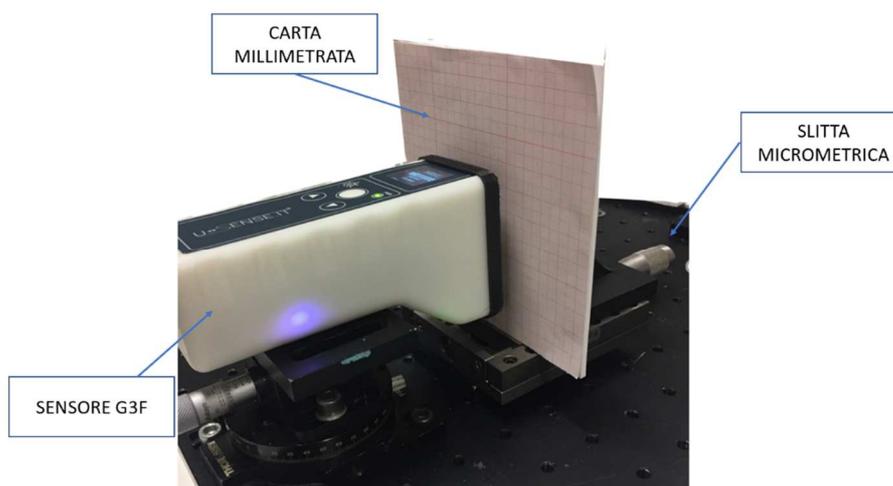


Figura 4.7 – disposizione sensore – target per determinare il campo di misura del g3f.

contatto e poi il target è stato traslato ogni 3 mm fino ad arrivare alla distanza di 12 mm (distanza limite in cui il G3F è in grado di fornire delle immagini sufficientemente a fuoco). Per ogni posizione si è andati a contare nell'immagine acquisita il numero di quadratini millimetrici occupati dalla linea laser che appunto rappresenta la larghezza x del fascio di luce ad una determinata distanza z dal sensore. I valori sono riportati nella tabella 4.2.

z [mm]	x [mm]
0	15,5
3	17
6	18,5
9	20
12	21,5

Tabella 4.2 – larghezza della linea laser per ogni posizione del laser

Plottando i valori ottenuti su grafico $x(z)$ si ricava un trapezio simmetrico rispetto all'asse delle ascisse, come riportato in figura 4.8:

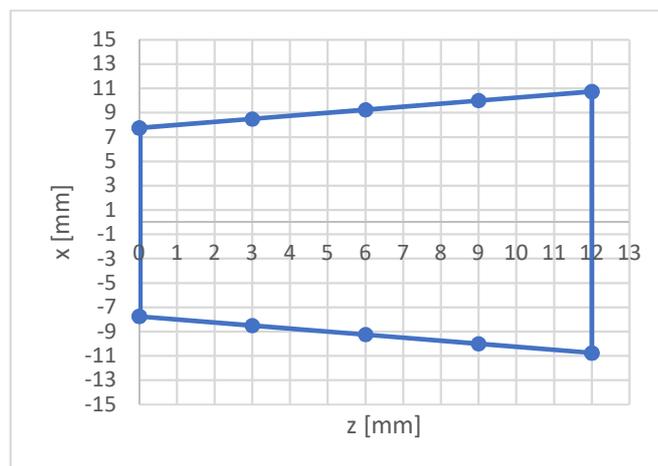


Figura 4.8 – campo di misura del sistema g3f.

4.3 RISOLUZIONE SPAZIALE LATERALE DELLA FOTOCAMERA

La risoluzione è la capacità di un sistema di imaging di distinguere dettagli sempre più piccoli di un oggetto ed è espresso in termini di coppie di linee per millimetro (lp/mm) o cicli per pixel (cycles/pixel), inteso come numero di coppie di linee bianche-neri contenute in un pixel. Esistono diversi metodi per caratterizzare la risoluzione spaziale laterale di un sistema ottico: nel presente lavoro viene utilizzato il *metodo del bordo inclinato* che consiste nel riprendere con la telecamera una scena idealmente bianca e nera con il bordo inclinato di circa 10° rispetto alla verticale (figura 4.10) in modo da ottenere dei risultati affidabili per la caratterizzazione del G3F. Una grandezza molto importante per caratterizzare le prestazioni ottiche di una fotocamera, in particolare la sua risoluzione spaziale, è la funzione di trasferimento della modulazione MTF. Innanzitutto, è stato necessario preparare il banco per l'acquisizione della scena (figura 4.9): davanti alla fotocamera del G3F è stato posizionato pezzo di plexiglass trasparente su cui è stata incollata una lametta verniciata di nero e con un bordo sufficientemente liscio in modo da garantire una linea netta

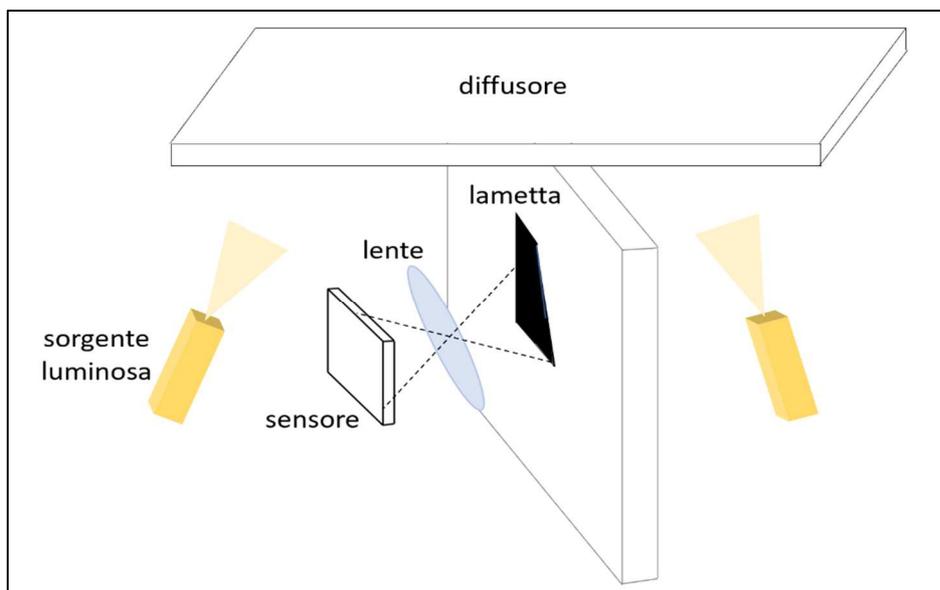


Figura 4.9 – schema del setup realizzato per acquisire un'immagine bianca – nera con una linea inclinata in mezzo.

nell'immagine. Sopra ad esso, è stato posizionato un pannello bianco e due sorgenti luminose rivolte verso l'alto al fine di avere una luce diffusa che illumini il target e quindi una scena con un buon livello di contrasto. Una volta preparato il setup fisico, si è passati al software Pylon per impostare i parametri della fotocamera opportuni, in particolare è stato attivato il bilanciamento del bianco e settato il tempo di esposizione a 20000 μ s. La combinazione di questi due fattori ha permesso di ottenere un'immagine non troppo buia ma nemmeno saturata. La scena, catturata mediante il comando *single shot* di Pylon, è stata prima salvata nella memoria del G3F e poi scaricata nel computer dall'ambiente Mobaxterm.

Prima di procedere all'elaborazione dell'immagine, è stato necessario salvare il plugin *SE_MTF 2xNyquist.jar*¹ all'interno di ImageJ, a questo punto il software elabora l'immagine caricata e ricava come prima cosa la *Edge Spread Function (ESF)*, ovvero il profilo di

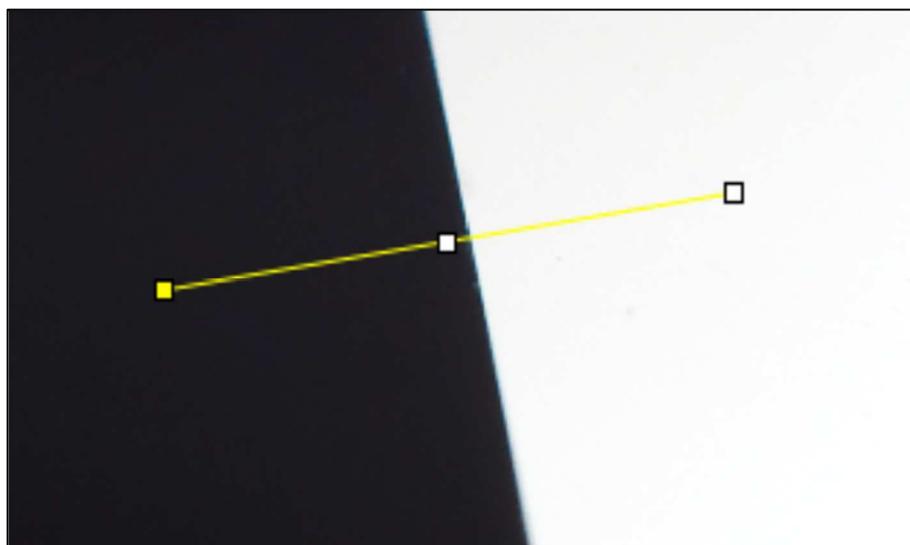


Figura 4.10 – Immagine del bordo inclinato acquisita in Pylon. La linea gialla rappresenta il profilo utilizzato in ImageJ per ricavare la curva caratteristica del sistema ottico.

¹ Il plugin ImageJ SE_MTF 2xNyquist è stato sviluppato da Carles Mitja, Jaune Escofet, Aura Tacho e Raquel Revuelta presso l'Image Quality Laboratory nel centro di Immagine e tecnologia multimediale dell'Università Politecnica della Catalogna, Spagna.

intensità della linea gialla tracciata nella figura 4.10. L'andamento dell'ESF dovrebbe essere un gradino netto ma a causa del limite risolutivo del sistema ottico, presenta una pendenza finita. Poi, il software deriva la ESF rispetto a x e fornisce la curva *Line Spread Function* (*LSF*) e infine applica la trasformata di Fourier all'LSF e ricava la *Modulation Transfer Function* (*MTF*): una metrica che fornisce informazioni sull'abilità di un sistema ottico di trasferire una scena reale su un piano immagine. Le curve ESF, LSF e MTF inerenti al bordo inclinato di figura 4.10 sono riportate nella figura 4.11.

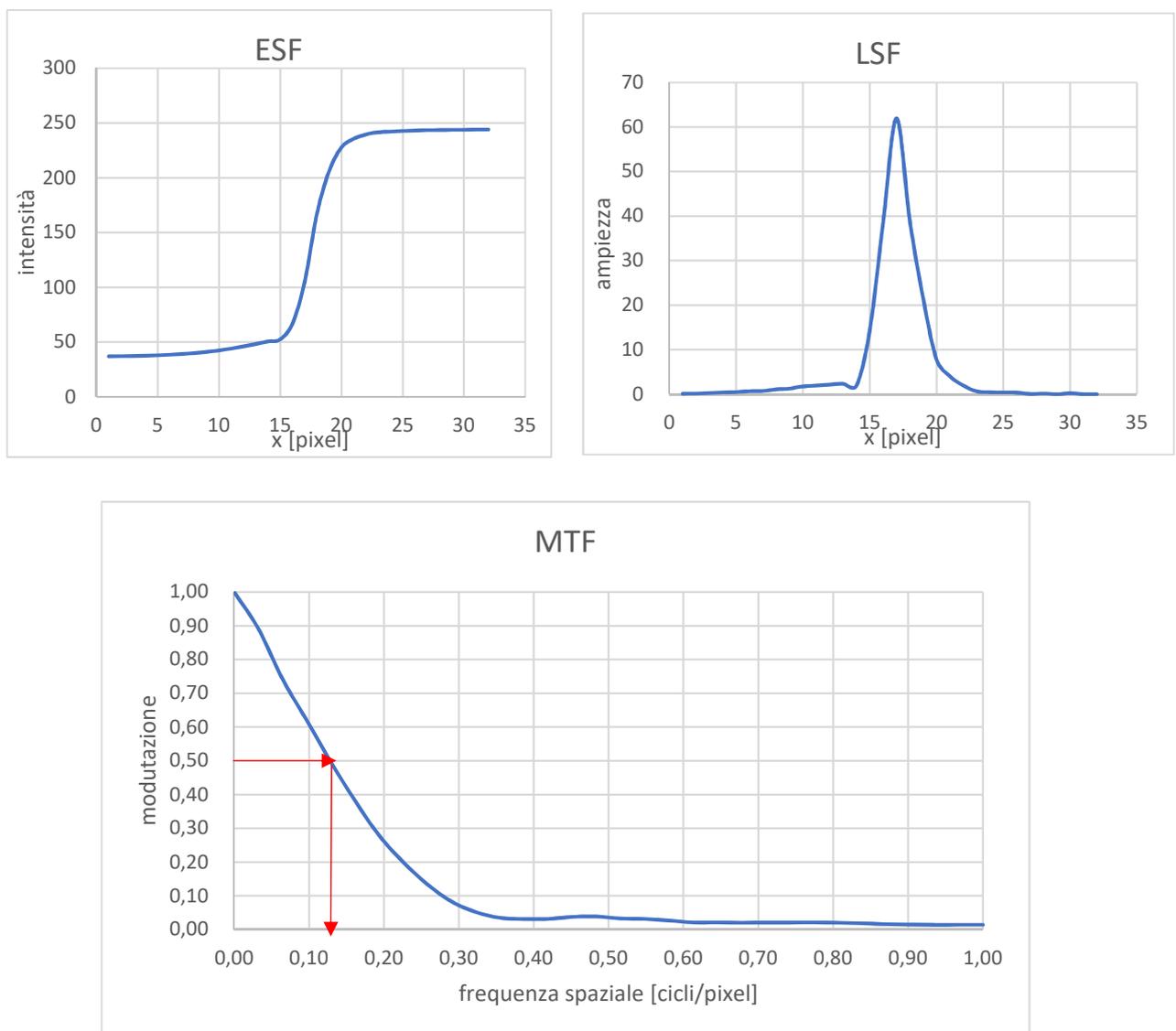


Figura 4.11 – grafici di ESF, LSF e MTF ricavati da imageI.

Per determinare la risoluzione spaziale del sistema ottico, è necessario conoscere innanzitutto la dimensione del pixel: sapendo che il campo di vista massimo del sensore è pari a 22 mm e ogni riga contiene 2591 pixel, allora la dimensione di ogni singolo pixel è pari a circa 8,5 μm .

In genere si considera la risoluzione spaziale di una fotocamera pari al 50% del MTF, che in questo caso corrisponde ad una frequenza spaziale di circa 0,13 cicli/pixel e dunque, una risoluzione di 7,7 pixel (è pari all'inverso della frequenza) che convertita in unità fisica è pari circa a 65 μm .

Il valore appena determinato rappresenta solo la risoluzione spaziale della fotocamera. In realtà, la risoluzione spaziale laterale di un sistema di visione non dipende solo dalla telecamera, ma dall'architettura complessiva del sistema stesso (piano laser, angoli di apertura del piano, angolo tra piano laser e fotocamera).

4.4 RISOLUZIONE SPAZIALE LATERALE DEL SENSORE

Per risoluzione spaziale laterale del sensore si intende la capacità di discriminare una variazione di distanza lungo l'asse x. Per determinarla occorre fornire in ingresso al gradino

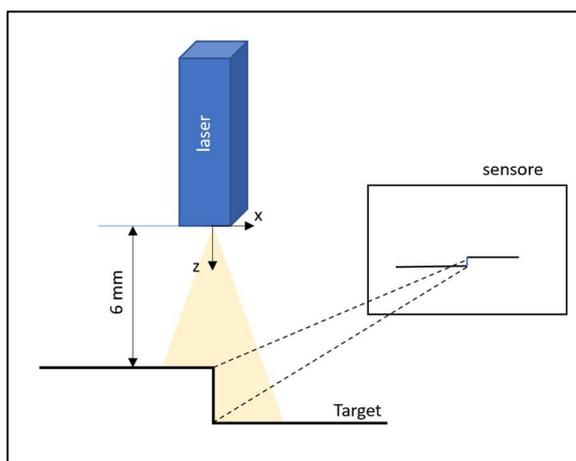


Figura 4.12 – schema rappresentativo della scena allestita per il calcolo della risoluzione spaziale laterale del sensore del G3F.

$z(x)$ noto e osservare la risposta del sensore, che varierà al variare della posizione in x lungo la linea laser. Ai fini della determinazione della risoluzione spaziale laterale del sensore è stato costruito un gradino (incollando due superfici una sopra l'altra) di altezza nota (3 mm). Successivamente l'oggetto è stato posto in direzione perpendicolare rispetto all'asse del laser ad una distanza di 6 mm tra la maschera del sensore e la superficie più sporgente del target (figura 4.12). Essendo due superfici bianche, il tempo di esposizione è stato settato a 2000 μs e il guadagno a 8 dB come spiegato nel paragrafo 3.5.

Il gradino del mondo reale coincide con il disallineamento di due tratti di linea laser nel piano immagine in cui la fine del primo dovrebbe coincidere con l'inizio del secondo ma nella realtà ciò non avviene a causa dell'incapacità del sensore di distinguere tale confine come un tratto rettilineo: la larghezza in x della retta che unisce i due tratti nel piano immagine rappresenta la risoluzione del sensore. Per determinare tale valore, l'immagine di



Figura 4.13 – gradino del mondo reale nel piano immagine

figura 4.13 è stata analizzata in *Vision Assistant* su cui sono state tracciate due linee in corrispondenza dei tratti luminosi. I profili di intensità così ottenuti sono stati successivamente esportati in unico file Excel e mediante i coefficienti della calibrazione del G3F, che verranno spiegati nel capitolo 5, si è andati a costruire una funzione polinomiale di secondo ordine, la quale ha consentito di calcolare la coordinata z del mondo reale e quindi la distanza tra le superfici del target. Il dislivello del gradino è rappresentato dai due segmenti non coincidenti nel grafico $z(x)$ e unendo i due punti interni con una retta si ricava la risoluzione spaziale del sensore che è pari alla larghezza di questa retta: $\Delta x = 56$ pixels.

Sapendo che ogni pixel corrisponde a circa $8,5 \mu\text{m}$, allora si può dedurre subito che la risoluzione spaziale del sensore è pari a $0,48 \text{ mm}$. Il valore non è trascurabile ma è giustificato dal fatto il gradino si trova in una posizione laterale rispetto al centro del sensore.

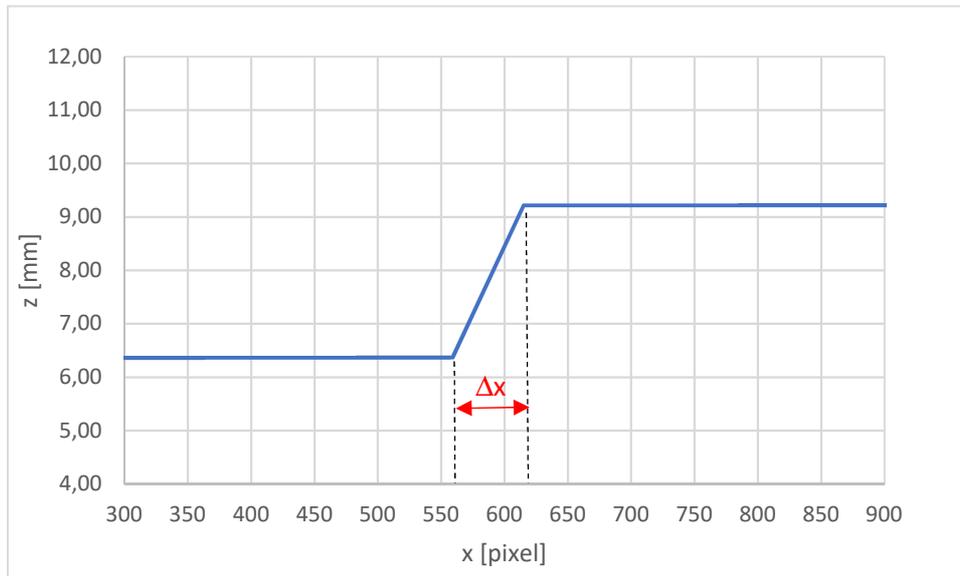


Figura 4.14 – Andamento reale del target a gradino.

In questo caso la bassa capacità risolutiva del sensore è dovuta all'ombra generata dal gradino stesso. In teoria se il gradino si trovasse esattamente al centro del sensore, il Δx sarebbe nullo. Si può, quindi, concludere che la risoluzione spaziale laterale del sensore varia al variare della posizione del dislivello rispetto al suo centro.

Nella direzione z si è osservato che nel campo di misura ammissibile, il sensore è in grado di rilevare spostamenti di 1 mm del target. Dunque, si può solo dire che la risoluzione spaziale del sensore in z è minore di 1 mm , in quanto la slitta micrometrica utilizzata non consente di scendere sotto questa quantità.

Capitolo 5

TARATURA DEL SISTEMA DI MISURA G3F

Questo capitolo mira a descrivere in dettaglio una metodologia completa per tarare lo strumento di misura G3F basato sulla triangolazione laser e valutarne l'incertezza di misura.

Il metodo utilizzato nel presente lavoro non richiede la taratura dei parametri intrinseci ed estrinseci della fotocamera, né quelli sistematici della luce strutturata, infatti, è noto come il *metodo della taratura diretto*: la corrispondenza tra i punti dell'immagine e le loro coordinate nello spazio viene costruita partendo dal target di taratura, costituito da un riferimento cartaceo. Le coordinate di un qualsiasi punto nello spazio possono essere ottenute per interpolazione a partire dai punti noti. La taratura diretta rappresenta un metodo facile e diretto da realizzare e il risultato della misurazione non è sensibile ai parametri intermedi della taratura.

In letteratura esistono vari metodi di calibrazione e possono essere classificati in:

- metodi di taratura classici;
- metodi di taratura diretti.

5.1 TARATURA DIRETTA DEL G3F

Il passaggio dai pixel alle coordinate del mondo reale richiede una taratura del dispositivo di triangolazione. A tal fine è stato considerato il *metodo della taratura diretto* che consiste nel mappare la distanza z e la posizione laterale x del target in funzione delle coordinate (i, j) del sensore attraverso alcuni algoritmi. In pratica il target di taratura viene fatto spostare di 1 mm alla volta su una slitta micrometrica a partire dalla distanza di contatto fino a 12 mm lungo l'asse z . Il target è costituito da strisce parallele bianche e nere equidistanti,

ognuna larga 1,5 mm, ottenute stampando su un foglio di carta e successivamente incollato su un pannello rigido, come mostro in figura 5.1. Dunque, l'incertezza del riferimento è legata alla risoluzione di stampa, pari a 1200 dpi, ovvero a 0,02 mm per i valori di gap in direzione x e y. Mentre l'incertezza in direzione z è limitata dal passo della slitta micrometrica che è pari a 0,01 mm.

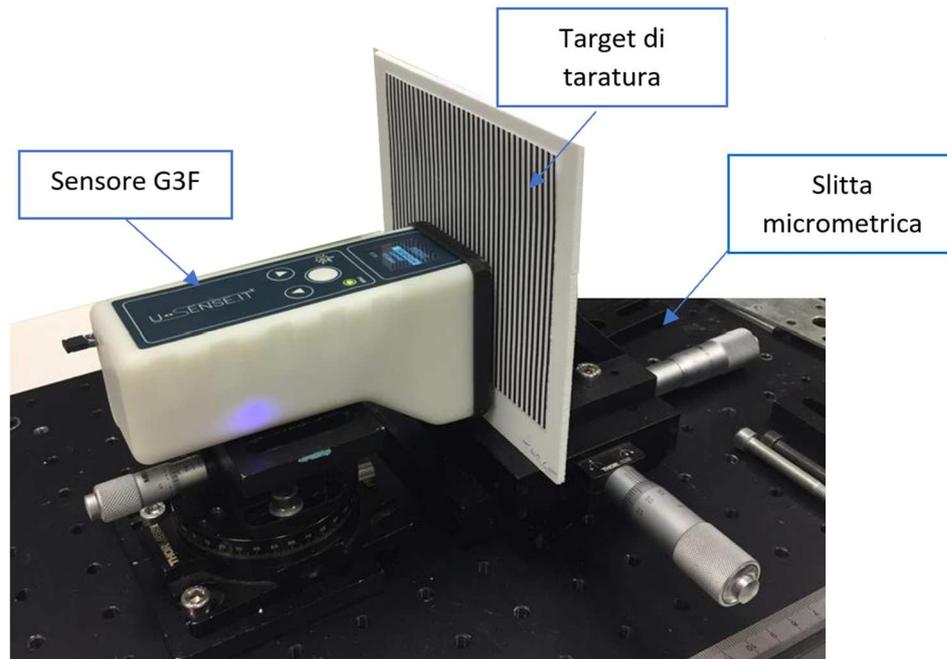


Figura 5.1 – banco di taratura.

Durante la taratura, lo strumento è fissato su un supporto in modo che la linea laser sia ortogonale alla superficie del target e viene acquisita un'immagine per ogni spostamento micrometrico fatto dal target all'interno della profondità di campo precedente determinato, ottenendo così tredici immagini. Una volta controllato la bontà delle immagini acquisite, ovvero assenza di saturazioni e strisce bianche e nere ben distinte, queste vengono scaricate da Mobaxterm e salvate nella cartella in cui è presente il codice Matlab per la taratura.

L'operazione di taratura sostanzialmente consente di legare le informazioni contenute nelle immagini (sottoforma di intensità luminose) alle grandezze del mondo reale, ovvero alla

distanza z tra target e sensore e alla posizione laterale x . In particolare i dati vengono tracciati come nuvole di punti $x(i,j)$ e $z(i,j)$, dove i,j rappresentano le coordinate dei pixel nell'immagine. Con la taratura queste nuvole di punti vengono interpolate mediante due superfici polinomiali $H_x(i,j)$ e $H_z(i,j)$ che appunto rappresentano le superfici di taratura.

In Matlab, il software va a cercare le immagini (png o jpg) nel percorso indicato. Una volta definiti i valori soglia normalizzati delle intensità luminose, inizia il processamento, in cui per ogni riga calcola il valore medio di intensità e crea un unico vettore della scala dei grigi; successivamente applica a quest'ultimo la funzione soglia, ovvero taglia tutti gli elementi del vettore il cui valore è inferiore a quello inizialmente definito.

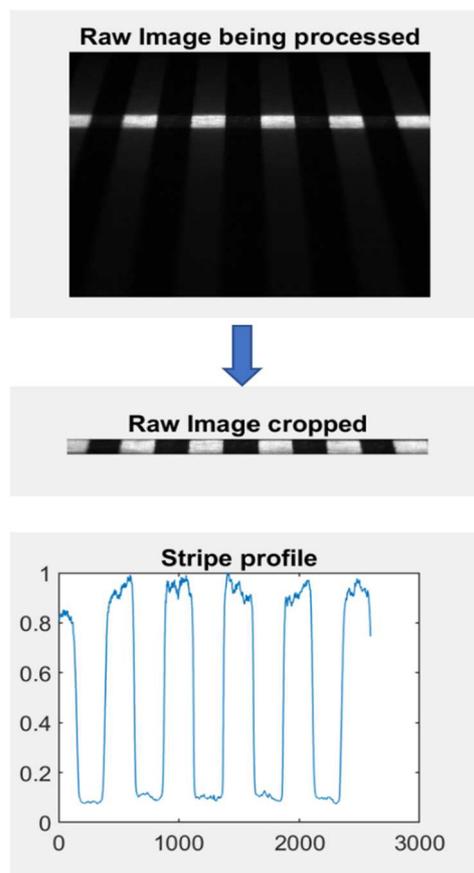


Figura 5.2 – operazione di soglia eseguita dall'algoritmo di taratura in Matlab.

La figura 5.2 mostra l'immagine tagliata e il grafico delle intensità luminose della regione di interesse, normalizzate rispetto al valore massimo.

I punti rossi (asterisco e cerchio) segnati nel diagramma normalizzato delle intensità luminose (figura 5.3) rappresentano il livello in corrispondenza del quale viene effettuata l'operazione di taglio (fissato a 0,3); inoltre individuano l'inizio (trail) e la fine (lead) di ogni striscia. Solo le strisce che hanno il trail e lead accoppiati vengono tenuti in considerazione durante il processo di taratura, quelle disaccoppiate vengono eliminate nel conteggio.

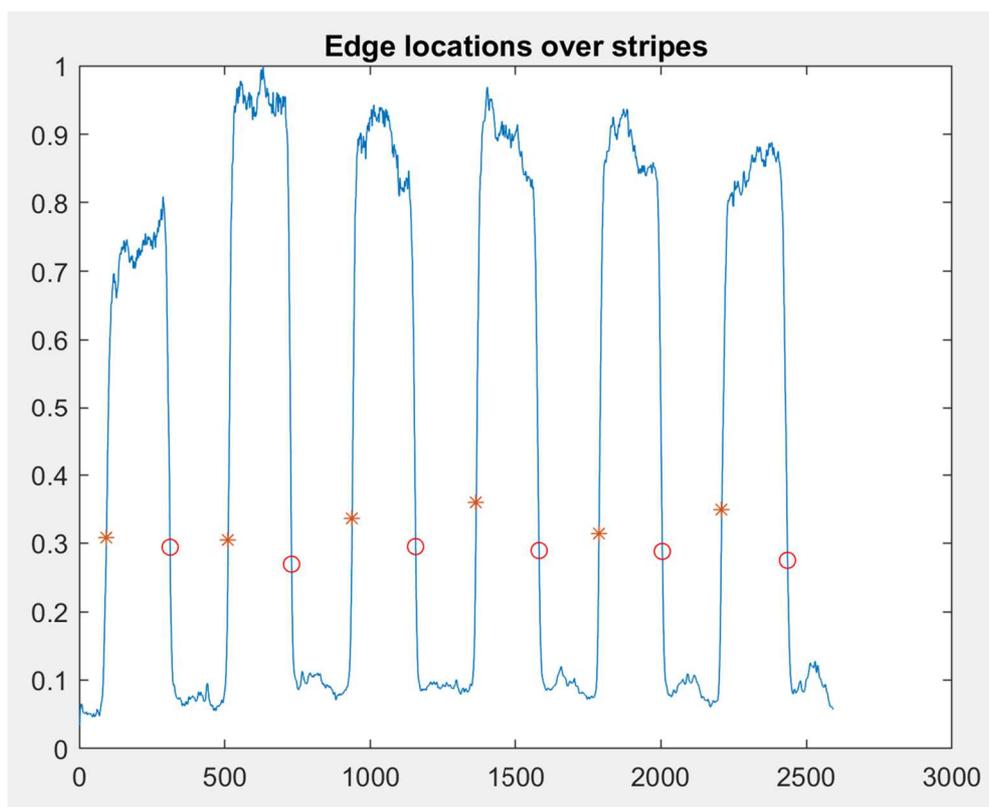


Figura 5.3 – trail e lead utilizzati per il calcolo della larghezza della striscia.

Una volta individuati i trail e i lead, l'algoritmo procede nel calcolo della larghezza di ogni striscia.

L'operazione viene fatta per alleggerire il carico computazionale di ogni immagine e quindi fornire risultati in minor tempo poiché il codice deve essere applicato tante volte quante sono le immagini caricate.

Nella figura 5.4 viene mostrata un'immagine acquisita durante la taratura e le coordinate iniziali e finali di ogni segmento di luce nell'immagine corrispondono ad una determinata posizione x e z nel mondo reale.

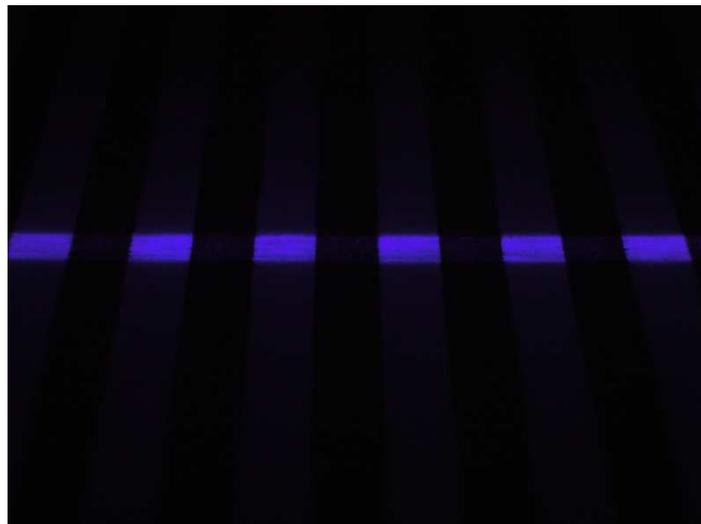


Figura 5.4 – esempio di immagine acquisita per la taratura.

Come è stato già detto, la taratura mappa le coordinate x e z del mondo reale in funzione delle coordinate pixel e utilizza come modello di taratura una polinomiale del secondo ordine. Questo approccio tiene conto intrinsecamente di tutte le componenti di incertezza, distorsione ottica, geometria della triangolazione e i parametri della fotocamera.

Le figure 5.5 e 5.6 riportano le nuvole di punti dei dati $x(i,j)$ e $z(i,j)$ acquisiti nel processo di taratura del G3F e interpolate da superfici di adattamento polinomiali.

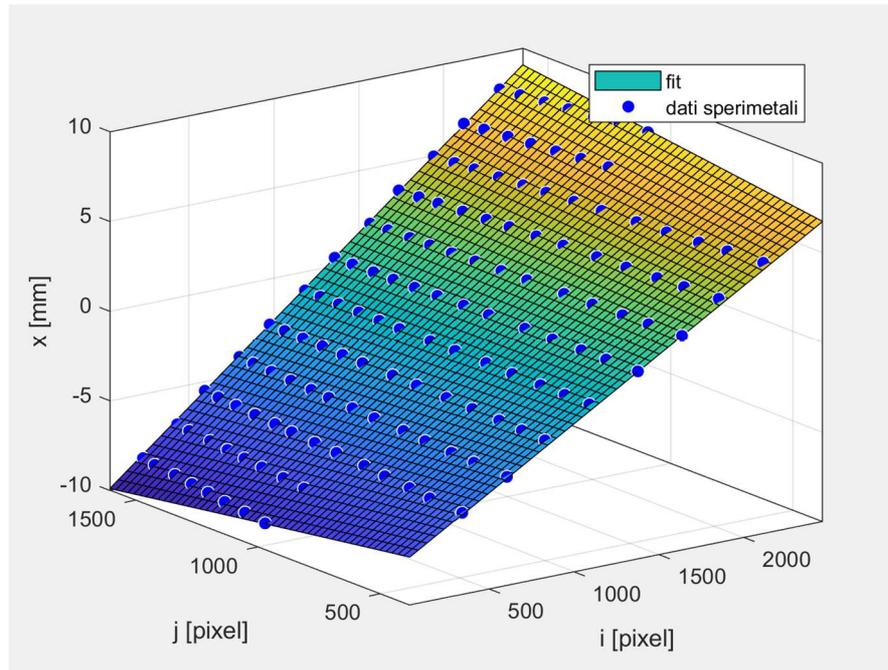


Figura 5.5 – superficie di taratura $H_x(i,j)$ interpolante la nuvola di punti $x(i,j)$

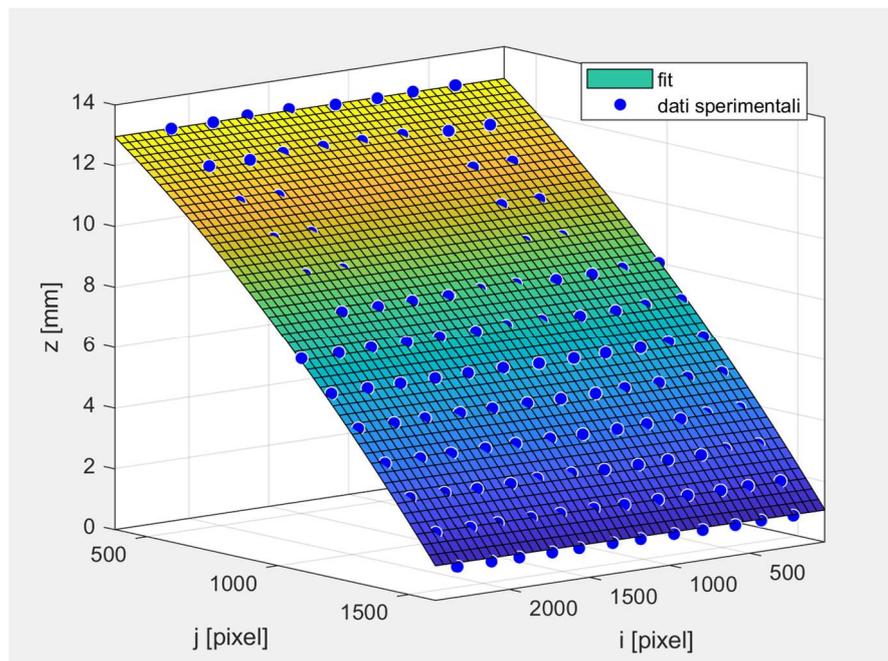


Figura 5.6 – superficie di taratura $H_z(i,j)$ interpolante la nuvola di punti $z(i,j)$

Le superficie di taratura così ottenute possono essere pensate come un insieme di infinite curve di taratura dei sensori a triangolazione a singolo punto in cui l'uscita è funzione di una

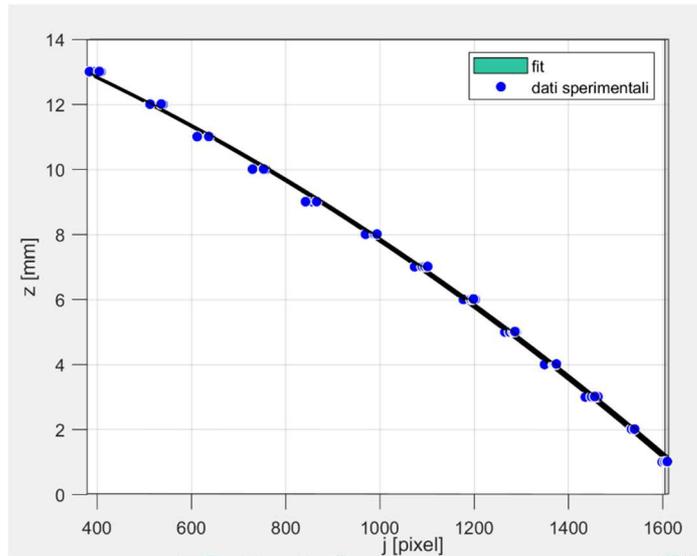


Figura 5.7 – profilo della superficie di taratura analogo a quello di un sensore a triangolazione laser a singolo punto.

grandezza di ingresso unidimensionale (figura 5.7) mentre, nel caso in esame, l'output (coordinate x e z) è funzione di una coppia di coordinate (i,j) . Per questo motivo la curva di taratura è una superficie nello spazio tridimensionale. La figura 5.7 mostra la curva di taratura del sensore esattamente come quello che si otterrebbe da un sensore a triangolazione a singolo punto.

5.2 VERIFICA DI TARATURA

In seguito all'operazione di taratura dello strumento G3F, è stata effettuata una verifica dell'attendibilità del metodo utilizzato. A tal fine è stato realizzato un target con un gap di 2,5 mm e un flush di 1,5 mm, ottenuto disponendo due superfici bianche su due piani diversi lungo z (flush) e distanti 2,5 mm lungo x (gap). I valori reali sono stati poi confrontati con quelli calcolati mediante i coefficienti di taratura.

La figura 5.8 riporta uno schema rappresentativo della scena allestita per l'acquisizione di gap e flush, in cui il dispositivo G3F è stato fissato su un supporto posizionato davanti al

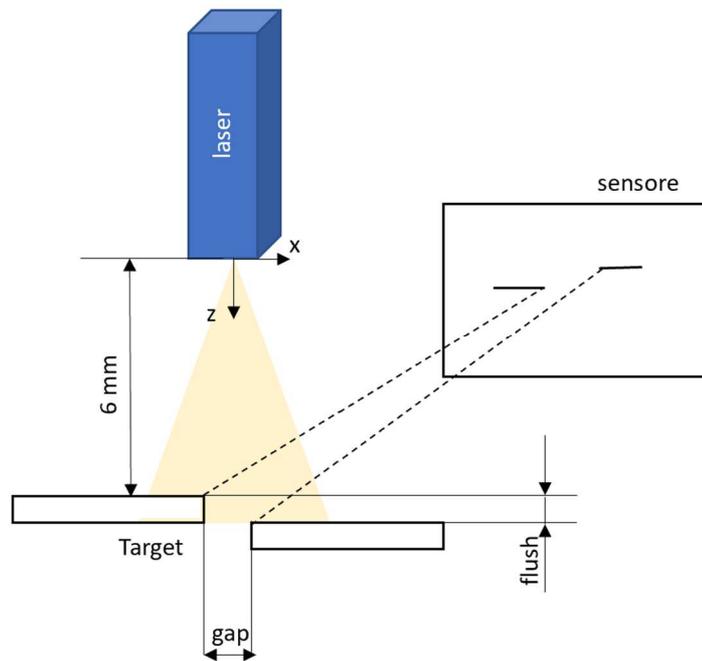


Figura 5.8- acquisizione di gap e flush.

target, mentre i valori di gap e flush sono stati ottenuti spostando le lastre in direzione x e z mediante una slitta micrometrica motorizzata. L'immagine così ottenuta è stata analizzata in Vision Assistant mediante la funzione *line profile* e in corrispondenza della linea laser è stata tracciata una spezzata la cui posizione viene identificata dalle coordinate immagine espresse in pixel. Successivamente, le coordinate (i,j) della linea sono state esportate in un file Excel e normalizzate rispetto alla media e deviazione standard ricavati dalla taratura. Una volta ottenuto i valori di i e j normalizzati è stato possibile convertirli in coordinate mondo (x e z) mediante il polinomio di secondo grado, al cui interno contiene i coefficienti di taratura (tabella 5.1).

	Gap			flush	
	x	y		x	y
p00	-0,3892		p00	6,6930	
p10	4,6260		p10	0,0161	
p01	-0,04721		p01	-3,7750	

p11	0,403		p11	0,0072	
p02	-0,00509		p02	-0,3074	
Mean	1242	1109	Mean	1242	1109
Std	661,7	370,7	Std	661,7	370,7

Tabella 5.1 – coefficienti della superficie interpolante i punti di taratura.

Note le coordinate mondo, è stato possibile calcolare i valori di gap e flush delle due lastre che in questo caso sono pari rispettivamente a 2,4 mm e 1,3 mm, come mostrato in figura 5.6.

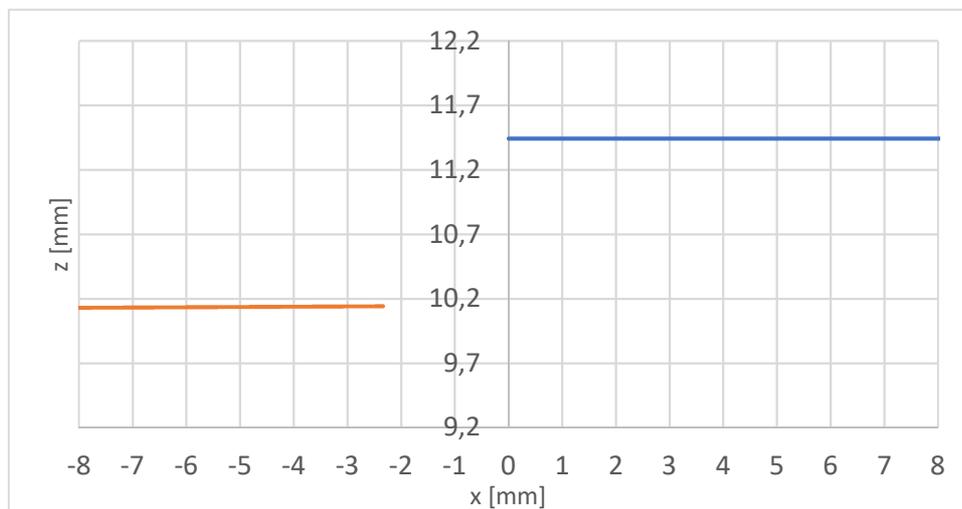


Figura 5.6 – gap e flush ricavati analiticamente.

CONCLUSIONE

L'obiettivo di questa tesi è stato caratterizzare il funzionamento dello strumento di misura a triangolazione laser G3F al variare delle caratteristiche delle superfici dei target e migliorare la qualità della linea laser attraverso una serie di prove sperimentali, volte a massimizzare il rapporto segnale rumore. Inoltre, è stata effettuata la valutazione delle caratteristiche metrologiche del sensore e la taratura dello strumento stesso.

La prima operazione eseguita prima di procedere all'acquisizione delle immagini è stata quella di assicurare la corretta disposizione del laser rispetto alla fessura del pin-hole in modo da garantire una distribuzione spaziale uniforme della luce. Solo a quel punto si è passati a determinare i valori dei parametri della fotocamera ideali per ogni tipo di superficie: innanzitutto, le grandezze sono state valutate in condizioni di funzionamento ideali, ovvero considerando una superficie bianca diffusiva e in assenza di disturbi ambientali (luce dell'ambiente circostante). Successivamente si è passati alla valutazione delle superfici colorate e riflettenti e, per alcune di queste sono stati trovati valori ideali di funzionamento della fotocamera. Affinché il sensore G3F abbia la capacità di auto settaggio dei parametri della fotocamera al momento di utilizzo, le quantità trovate devono essere tenute in considerazione nella fase di programmazione del sensore stesso.

Per quanto riguarda le caratteristiche metrologiche dello strumento, in particolare la profondità di campo e il campo di misura, si può dire che i valori ottenuti sperimentalmente, andando ad analizzare le immagini, sono simili a quelli ricavati analiticamente in fase di progettazione, dunque, si può dire che lo strumento opera in un range di 12 mm lungo z (profondità di campo) e al variare della posizione del target in questo intervallo, la linea laser descrive un trapezio simmetrico (campo di misura). Nei paragrafi successivi si è andati a

determinare la risoluzione spaziale della fotocamera e del sensore: si può dire che in base ai valori ottenuti, il G3F ha una capacità risolutiva sufficiente per le applicazioni nel campo automobilistico.

Infine, è stata eseguita la taratura utilizzando il metodo diretto e si è verificato che i coefficienti associati alla funzione interpolante permettono di convertire con una precisione accettabile le coordinate (i,j) espresse in pixel in coordinate (x,z) del mondo reale, espresse in millimetri. Dunque, si può concludere che il metodo di taratura implementato consente di calcolare valori di gap e flush abbastanza attendibili, con un'incertezza di 0,1 mm lungo x e 0,2 mm lungo z.

Bibliografia

- [1]. Natalia Swojak, Michał Wieczorowski, Michał Jakubowicz. *Assessment of selected metrological properties of laser triangulation sensors. Measurement*, 2021; 176.
- [2]. ANIE Automazione, giugno 2019. *Guida sui sistemi di visione industriale*. Pubblicazioni tecniche.
- [3]. Silvio De Benedetti, 2020. Più qualità in automatico. *Automazione Oggi*, 426, pagine 58-59.
- [4]. Carla Valeri, 2020. *Con precisione micrometrica*. *Automazione Oggi*, 426, pagine 64-65.
- [5]. Cognex, febbraio 2018. *Introduzione alla visione industriale*. Guide per principianti.
- [6]. R. Cannarozzo, L. Cucchiari, W. Meschieri, 2012. *Misure, rilievo e progetto*. Bologna: Zanichelli S.p.A.
- [7]. H. Helmers, M. Schellenberg. November 2003. CMOS vs. CCD sensors in speckle interferometry. *Optics & Laser Technology*, volume 25 pag. 587-595.
- [8]. Tesi: Elisa Minnetti. *Intelligent devices for process and quality control in a zero-defect production approach*. Edizione XXXII.
- [9]. www.origintech.com
- [10]. Peter Lasch, Dieter Naumann, luglio 2006. Spatial resolution in infrared microspectroscopic imaging of tissues. *Biochimica et Biophysica Acta*, volume 1758, n. 7, pagine 814-829.
- [11]. E. Minnetti, P. Chiariotti, N. Paone, G. Garcia, H. Vicente, L. Violini, P. Castellini, Giugno 2020. *A smartphone integrated hand-held gap and flush measurement system for in line quality control of car body assembly*. *Sensors*, volume 20, numero 11.