

**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 DI LINEA LASER, WIRELESS E  
PORTATILE PER IL CONTROLLO QUALITÀ IN LINEA DI  
PRODUZIONE**

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

Relatore:  
**Prof. Nicola Paone**

Candidato:  
**Fiorani Matteo**

Correlatore:  
**Nisi Matteo**

Anno accademico 2023/2024

<b>1</b>	<b>LE TECNOLOGIE OGGETTO DI QUESTO LAVORO.....</b>	<b>6</b>
1.1	VISIONE ARTIFICIALE.....	6
1.2	SISTEMI DI VISIONE.....	8
1.3	ILLUMINAZIONE.....	12
1.4	CLASSIFICAZIONE IN BASE ALLA GEOMETRIA .....	14
1.5	EQUAZIONE DELLE LENTI SOTTILI .....	24
1.6	COMPORAMENTI REALI DELLE LENTI: LE ABERRAZIONI .....	26
1.7	DIFFRAZIONE .....	30
1.8	TELECAMERA .....	32
1.9	SENSORE.....	33
1.10	PROCESSO DI CONVERSIONE DA LUCE A FENOMENO ELETTRICO .....	34
1.11	SENSORI CCD E CMOS .....	36
1.12	ELABORAZIONE DELL'IMMAGINE .....	40
1.13	TRIANGOLAZIONE LASER.....	42
1.13.1	<i>Profilometria laser</i> .....	44
1.14	GAP & FLUSH .....	45
1.15	G3F E COMPETITORS.....	47
1.16	IL MERCATO DEGLI STRUMENTI PORTATILI PER LA MISURA DI GAP & FLUSH .....	52
<b>2</b>	<b>SENSORE COLORE A BORDO DEL G3F: OTTIMIZZAZIONE DEL SUO UTILIZZO NELL'AMBITO DEL PROGETTO OPENZDM</b>	<b>58</b>
2.1	OTTIMIZZAZIONE LINEA LASER .....	59
2.1.1	<i>Duty Cycle</i> .....	60
2.1.2	<i>Tempo di esposizione (exposure time)</i> .....	62
2.1.3	<i>Influenza del Duty Cycle e del tempo di esposizione sulla qualità della linea laser</i> .....	66
2.2	DETERMINAZIONE DELLE CLASSI COLORE.....	69
2.3	IL SENSORE COLORE:.....	71
2.3.1	<i>Analisi dei dati provenienti dal sensore colore:</i> .....	74
2.3.2	<i>Elaborazione del segnale acquisito dal sensore colore:</i> .....	76
2.3.3	<i>Plot parametro di clusterizzazione "p" e calcolo delle soglie:</i> .....	77
2.3.4	<i>Processo acquisizione con automazione della scelta della classe colore:</i> .....	79
<b>3</b>	<b>TARATURA DEL DISPOSITIVO G3F .....</b>	<b>80</b>
3.1	TARATURA DIRETTA.....	82
3.1.1	<i>Banco di taratura</i> .....	83
3.1.2	<i>La griglia di taratura</i> .....	85
3.1.3	<i>Incertezza del target di taratura</i> .....	86
3.2	PROCESSO DI TARATURA .....	87
3.3	SOFTWARE DI TARATURA.....	89
3.4	RISULTATI DELLA TARATURA.....	91
3.4.1	<i>Stima dell'incertezza di taratura e dello strumento:</i> .....	93
3.5	CONFRONTO TARATURE DI DISPOSITIVI DIVERSI.....	95
3.5.1	<i>Griglia fittizia di punti elaborata tramite file di taratura</i> .....	96
3.5.2	<i>Risultati analisi</i> .....	97
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONE E SVILUPPI FUTURI .....</b>	<b>99</b>

## INTRODUZIONE

Una misurazione dimensionale corretta è un fattore determinante in un sistema produttivo.

L'esecuzione di misurazioni corrette permette infatti di creare prodotti perfettamente conformi al progetto e di garantirne la qualità desiderata.

La forte concorrenza e l'elevata domanda impongono un costante aumento della qualità dei prodotti fabbricati, incentivando lo sviluppo di reparti di controllo qualità e l'applicazione di strumenti di misura sempre più avanzati ed interconnessi che svolgano diagnosi sulla base di osservazioni fatte sul 100% della produzione.

Un'ispezione coerente ed affidabile delle parti e dei prodotti può aiutare i produttori a identificare potenziali criticità già dalle prime fasi del processo di produzione, riducendo al minimo lo spreco di tempo e materie prime.

Anche gli errori più piccoli infatti, se trascurati, possono portare a situazioni critiche lungo la filiera produttiva.

L'interconnessione dei dispositivi che effettuano le misure inoltre consente di condividere e raccogliere i dati con un intervento umano minimo in modo tale da registrare, monitorare e analizzare gli stessi per utilizzarli, nell'ottica di un miglioramento continuo, negli ambiti più disparati.

L'efficientamento dei processi produttivi è quindi strettamente correlato al miglioramento dei metodi e degli strumenti di misura.

A tal proposito giocano spesso un ruolo importante gli strumenti che effettuano misurazioni senza contatto, che includono tra gli altri, i sensori ottici.

Questi ultimi vengono utilizzati quando il contatto con la superficie misurata è difficile, impossibile o indesiderato.

Tuttavia, i controlli di qualità, implicano spesso l'analisi di target impegnativi per strumenti di tipo ottico: oggetti riflettenti, estremamente scuri, trasparenti e con vernici multistrato restituiscono una risposta spesso di difficile comprensione che incide negativamente sulla qualità e l'affidabilità del dato misurato.

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 della qualità in linea di produzione nell'industria automobilistica e non solo, che sia in grado di rilevare il cosiddetto gap & flush in modo affidabile indipendentemente dalle tonalità cromatiche e dal materiale della parte misurata.

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 spinoff U-Sense.it [**Error! Reference source not found.**] 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 target.

Come ben sappiamo, la qualità dei dati raccolti dipende necessariamente dall'incertezza di misura del dispositivo, dall'incertezza associata al processo di misurazione e 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 prossime a quelle ideali: Nel capitolo 1 viene descritto lo strumento G3F e viene fatta una rassegna dei principali concorrenti dello stesso, nel capitolo 2 viene descritto il flusso tramite il quale è stata ottenuta la funzione di riconoscimento automatico del colore del target.

Nel capitolo 3 si affronta il tema della taratura e nell'ultimo capitolo vengono tratte le conclusioni del lavoro.

# 1 LE TECNOLOGIE OGGETTO DI QUESTO LAVORO

## 1.1 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 sempre più maturo ma con ampie potenzialità di sviluppo grazie all'Intelligenza Artificiale.

I sistemi di visione oggi, grazie allo sviluppo di Industria 4.0 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 sia nella valutazione dei prodotti che nella ricerca di difetti, fornendo informazioni utili per la gestione e l'efficientamento 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 ottenuti 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 con il conseguente aumento dei costi e degli sprechi.

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.

## 1.2 SISTEMI DI VISIONE

I sistemi di visione sono largamente utilizzati in vari ambiti industriali.

Gran parte delle applicazioni più avanzate in campo tridimensionale appartengono alla robotica, dal momento che, la visione dell'ambiente circostante, è fondamentale per l'interazione con il mondo esterno.

Il crescente utilizzo in campo industriale è stato propiziato dalla crescente diffusione di automazione flessibile e reso accessibile dalla disponibilità di hardware (processori, memorie, ecc.) a costi competitivi.

Scegliere il giusto sistema di visione è essenziale per soddisfare le esigenze specifiche di una applicazione particolare.



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.

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.

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 dalla variazione della posizione del laser rispetto all'oggetto o viceversa.

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.

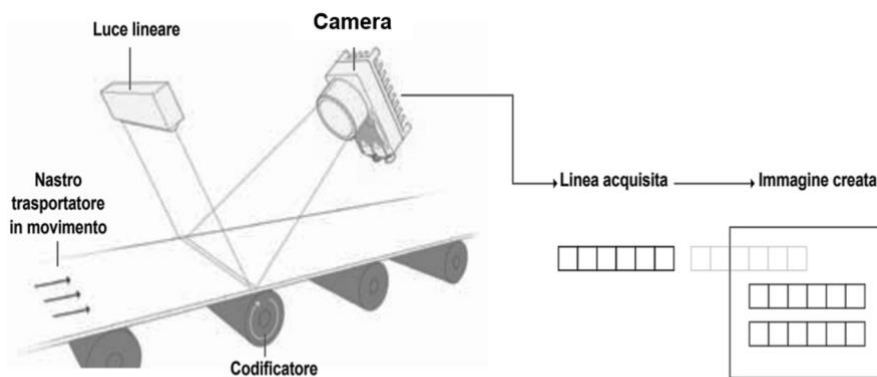


Figura 1-Sistemi di visione 2D tratta da [Error! Reference source not found.]

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 che vogliamo analizzare 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 estraggono le informazioni richieste, svolgono l'analisi 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.

### 1.3 Illuminazione

L'illuminazione è fondamentale per ottenere buoni risultati dalla visione industriale.

Questi sistemi creano immagini analizzando la luce riflessa di un oggetto senza agire sull'oggetto stesso in maniera invasiva.

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).

## 1.4 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 generale, 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.

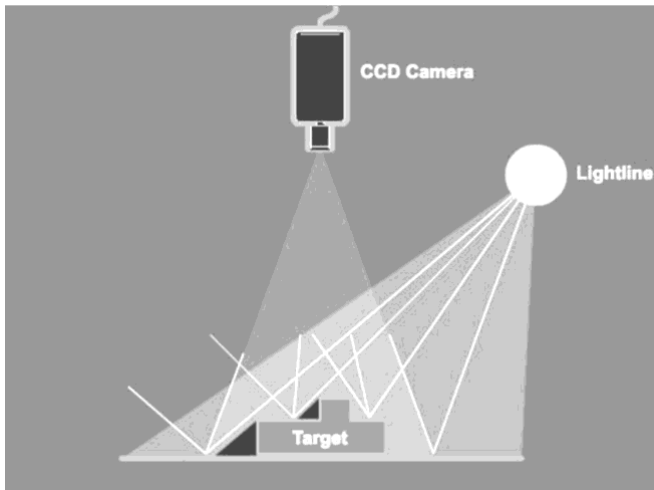


Figura 3-Illuminazione diretta tratta da [3]

## Illuminazione coassiale:

Un fascio di luce viene proiettato orizzontalmente su uno specchio semi-trasparente e viene deviato di  $90^\circ$  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 provenienti dalle superfici piane, più intenso rispetto a quello diffuso 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.

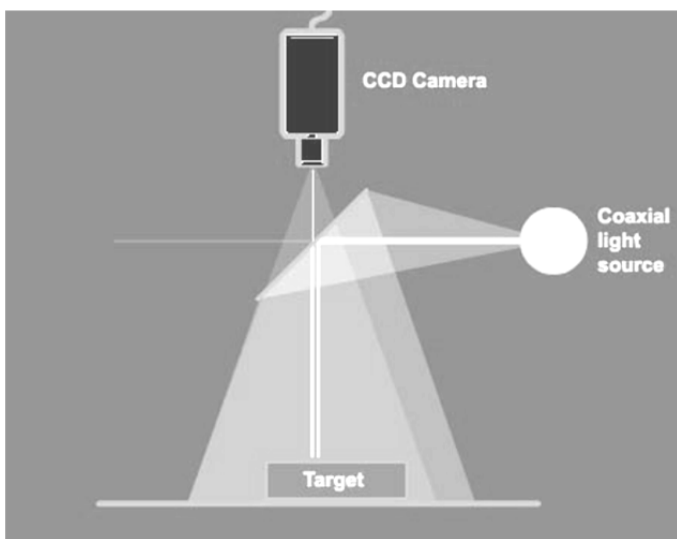
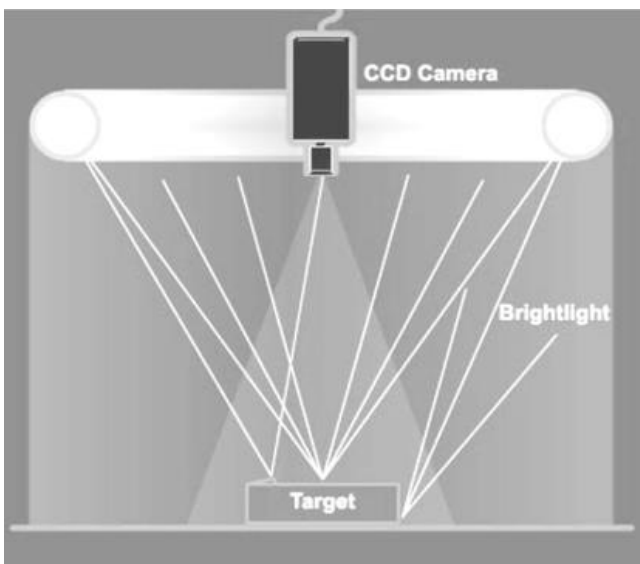


Figura 4-Illuminazione coassiale tratta da [3]



- **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 e dei materiali.

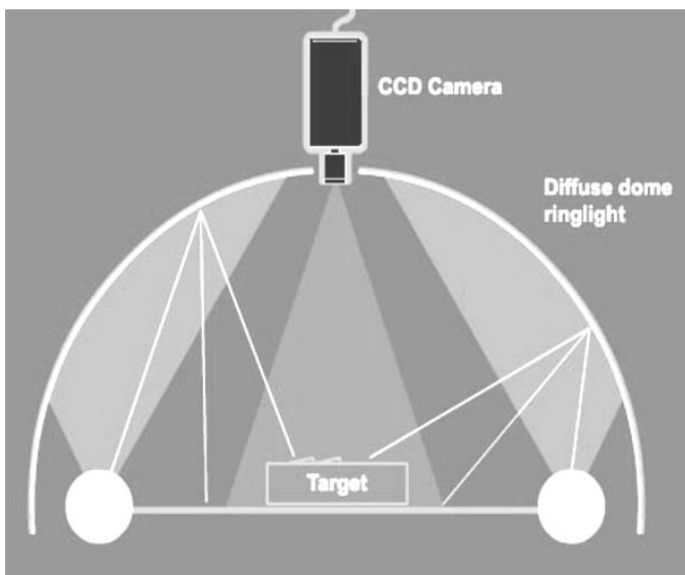


*Figura 5-Illuminazione anulare tratta da [3]*

- **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:

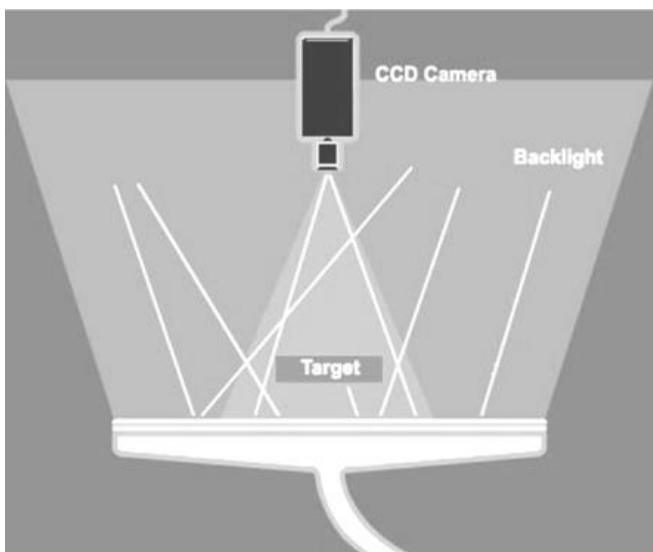
- a cupola;
- a tubo.



*Figura 6-Illuminazione diffusa tratta da [3]*

- **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/qualità di eventuali fori.



*Figura 7-Illuminazione in retroproiezione tratta da [3]*

Una lente è un elemento trasparente rifrangente in cui almeno una superficie è curva.

Inoltre, è 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 entrano 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:** deviano i raggi che incidono su di essa parallelamente all'asse ottico e li fanno convergere in un punto sull'asse ottico, detto fuoco F;
- **lenti divergenti:** deviano 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.

In Figura 8 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 8 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.

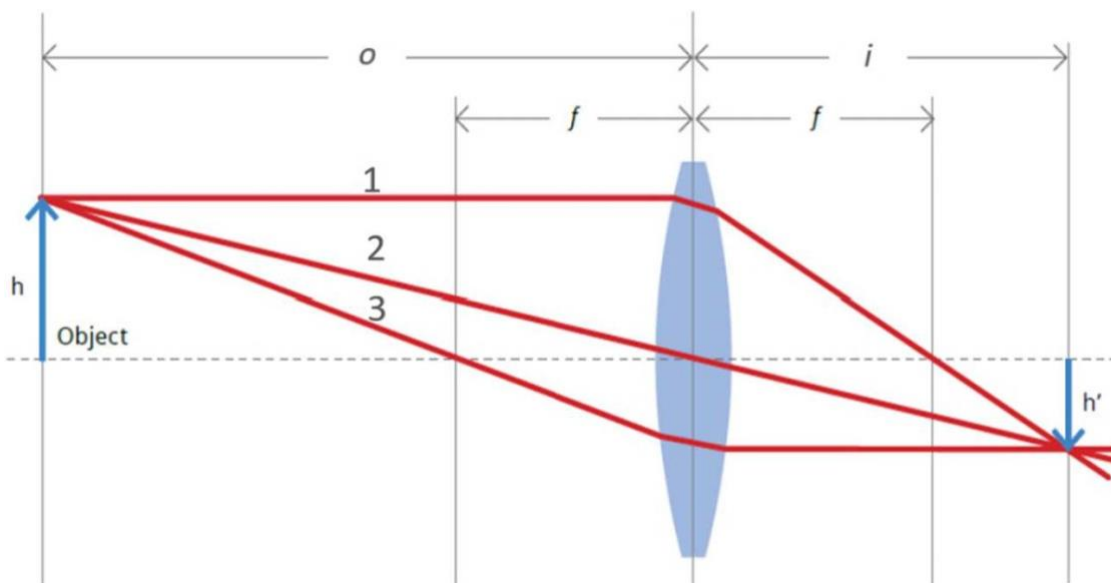


Figura 8-Passaggio dei raggi attraverso una lente tratta da [4]

## 1.5 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.



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  $f$ .

## 1.6 Comportamenti reali delle lenti: le ABERRAZIONI

Analizzando le immagini formate da una singola lente osserviamo che non sono quelle che ci si aspetterebbe dalle valutazioni teoriche, ma presentano dei difetti e delle deformazioni, dette aberrazioni, più o meno complesse.

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.

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:

- 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.

## Aberrazione cromatica

Difetto legato principalmente alla presenza di luce costituita da raggi a diversa lunghezza d'onda, come ad esempio la 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.

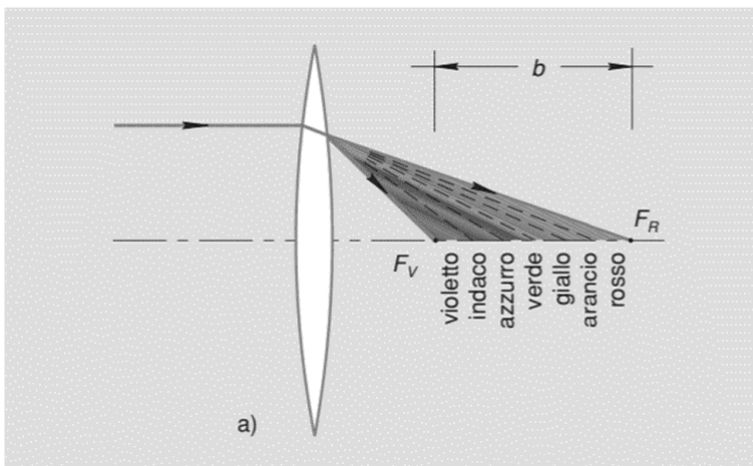


Figura 9-Aberrazione cromatica tratta da [Error! Reference source not found.]

## Distorsione

Difetto che provoca una deformazione dell'immagine dell'oggetto.

Se si considera come oggetto un quadrato col centro sull'asse cardinale e giacente su di un piano normale all'asse, l'immagine corrispondente, non è un altro quadrato, ma una figura deformata come quella della Figura 10 (a) se la deformazione è a cuscino, o secondo la Figura 10 (b), se la deformazione è a barile.

Per correggere questo grave difetto, si 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.

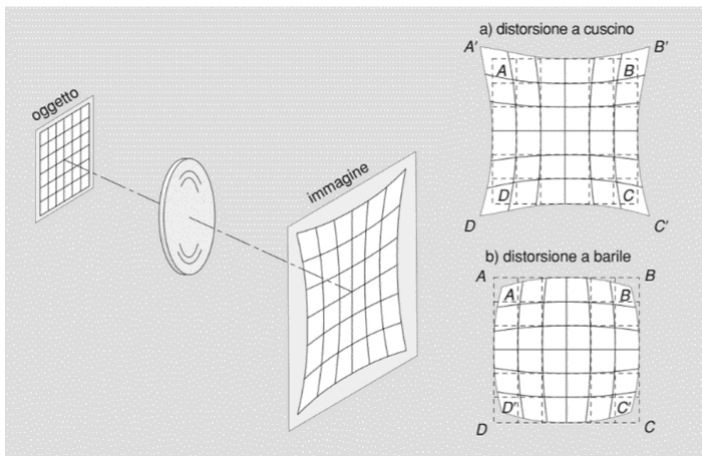


Figura 10-Distorsione ottica tratta da [Error! Reference source not found.]

## 1.7 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.

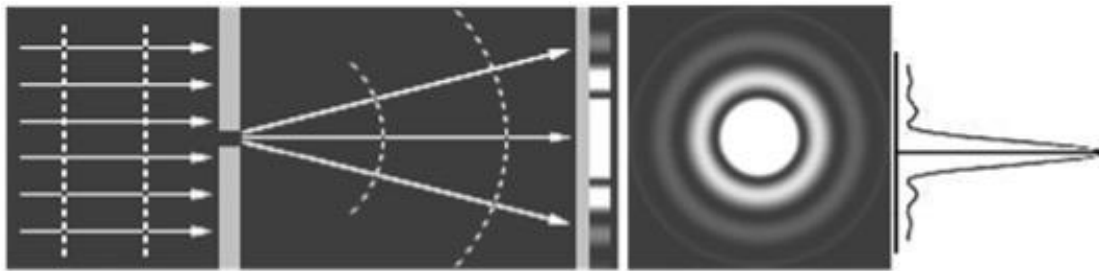
Per un'apertura circolare, l'immagine non è più un punto di dimensioni infinitesime ma un disco, detto disco di Airy, caratterizzato da un punto centrale luminoso, circondato da anelli meno luminosi.

Il raggio del disco  $r$  è direttamente proporzionale alla lunghezza d'onda della luce  $\lambda$  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 11-Fenomeno della diffrazione tratta da [5]*

## 1.8 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 analizzare effettuando, ad esempio, delle misure.

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.



## 1.9 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.

La scelta del sensore è influenzata 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.

La sua risoluzione massima è quindi pari alla dimensione del pixel il che vuol dire che il dettaglio del mondo reale più piccolo che riesco a "risolvere" è della 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 luminosit  nella scala dei grigi.

## 1.10 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 12 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 ( $\text{SiO}_2$ ) 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 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 è arrivato a saturazione.

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.

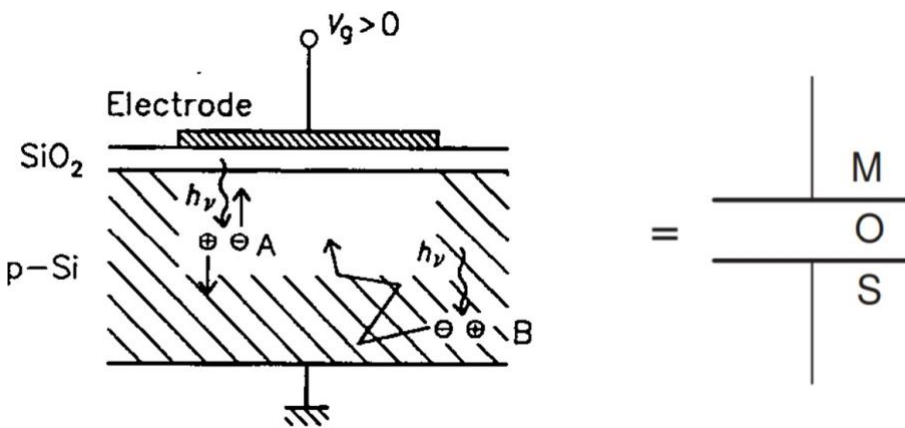


Figura 12-Disegno schematico di un elemento MOS tratto da [Error! Reference source not found.]

## 1.11 Sensori CCD e CMOS

I sensori CCD e CMOS, questi ultimi detti anche Active Pixel Sensor (APS), sono due differenti tipi di sensori d'immagine che si prefiggono lo stesso fine, ossia trasformare un segnale luminoso in un segnale elettronico analogico o digitale che quindi permetta di ricostruire, elaborare e memorizzare l'immagine inquadrata. Questi due tipi di sensori sono tra i più diffusi nel XXI secolo e trovano applicazioni negli ambiti più disparati come l'astronomia e la microscopia, senza dimenticare gli utilizzi in ambito commerciale e consumistico nelle macchine fotografiche digitali, telecamere varie, fotocamere di cellulari e webcam.

Tuttavia, si può affermare che gli APS hanno una storia molto più recente rispetto ai CCD, infatti solo i recenti progressi di miniaturizzazione nella costruzione dei circuiti integrati e i continui lavori di ricerca, hanno permesso ai sensori CMOS di diventare competitivi sia dal punto di vista commerciale che da quello prestazionale rispetto ai CCD.

Il principio di funzionamento dei due tipi di sensori è essenzialmente lo stesso: un certo numero di siti fotosensibili sono distribuiti in righe e colonne, formando un array bidimensionale. L'intero insieme di siti costituisce il sensore vero e proprio.

La differenza tra i due tipi di sensore consiste nella modalità di esecuzione del processo di "readout", ossia la conversione della carica elettrica in tensione elettrica e della conseguente elaborazione di tale tensione per la produzione del segnale.

In ogni sito di un sensore CCD è presente un condensatore in grado di immagazzinare la carica prodotta durante l'esposizione del sensore alla luce. La quantità di carica immagazzinata è proporzionale all'intensità luminosa che raggiunge ogni sito. Inoltre, ogni sito è accoppiato a quello vicino, da cui il nome del dispositivo.

Al termine dell'esposizione, un circuito di controllo permette ad ogni condensatore di una riga di trasferire la quantità di carica immagazzinata al condensatore successivo. L'ultimo condensatore della riga trasferisce quindi la carica totale ad un amplificatore che converte la carica in tensione elettrica. Ripetendo l'intero processo per tutte le righe che compongono l'array bidimensionale, il circuito di controllo converte l'intero contenuto dell'array in una serie di tensioni. Queste tensioni vengono poi rielaborate per generare un segnale analogico o un file digitale che contiene le informazioni relative all'immagine.

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 pixel 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  $\mu\text{s}$  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.

Nei sensori IT, ogni elemento fotosensibile è adiacente ad una regione oscurata (Figura 13a), 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 13b). 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 13c).

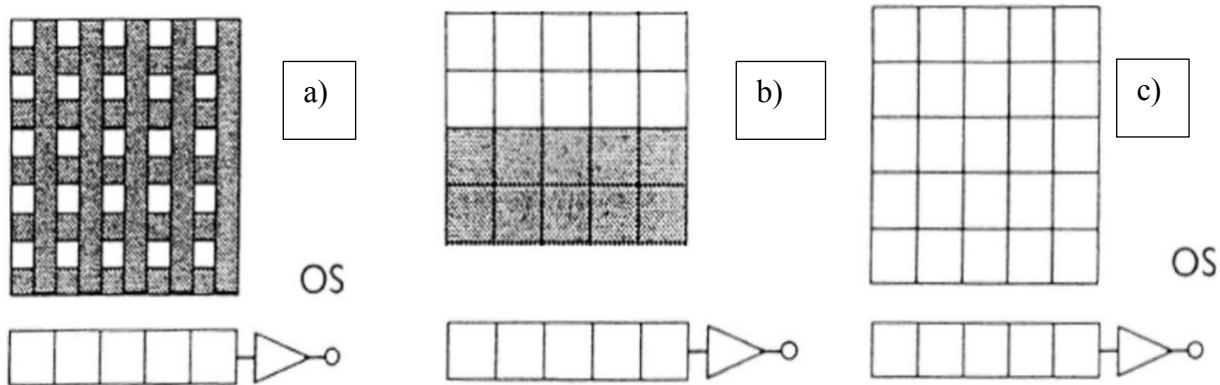


Figura 13-Tipologie sensori CCD tratta da [5]

Dopo l'esposizione, l'informazione dell'immagine viene spostata riga per riga in un registro orizzontale e da lì 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 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.

## 1.12 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.

### 1.13 Triangolazione laser

Il principio di funzionamento di un sistema di acquisizione basato su triangolazione laser è mostrato in Figura 14.

Il fascio dell'illuminatore laser viene proiettato sul target in una determinata posizione, mentre un sensore rileva la componente riflessa.

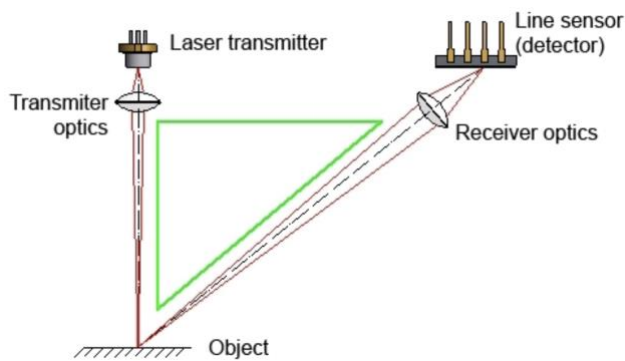


Figura 14-Triangolazione laser tratta da [19]

In funzione della distanza tra il sensore e la superficie, i raggi riflessi vengono proiettati in un punto preciso del ricevitore. In questo modo è possibile calcolare, attraverso il principio matematico della triangolazione, la distanza tra il sensore e il target.

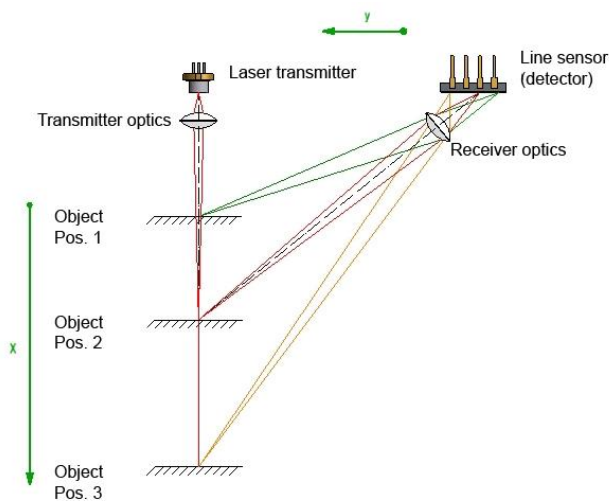


Figura 15-Triangolazione laser con movimento target lungo x tratta da [19]

L'illuminazione del laser si può controllare, da questo derivano i seguenti vantaggi:

- un laser ad una frequenza nota può essere comparato con un filtro spettrale alla stessa frequenza per riconoscere la luce del laser in presenza di altre sorgenti luminose, in modo tale da far comparire nell'immagine la sola luce del laser;
- il fascio laser può essere riflesso da una lente o uno specchio per creare un insieme di fasci laser che permettono di fare misurazioni di più punti nel piano o nello spazio;
- i raggi laser possono essere orientati, in modo controllato, da specchi. Questo può essere necessario per concentrare il fascio del laser in una determinata area, illuminare un determinato oggetto oppure un determinato ostacolo.

Sono presenti anche alcuni svantaggi:

- ci sono potenziali rischi per l'occhio umano, dipendenti dalla classe del laser utilizzato;
- vi è una dipendenza delle prestazioni dal tipo di materiale illuminato.

Le riflessioni speculari di oggetti metallici, per esempio, possono creare un disturbo e degradare le prestazioni del sistema.

### 1.13.1 Profilometria laser

I profilometri laser sono sensori di spostamento laser che raccolgono dati di altezza su una linea laser anziché in un singolo punto, realizzando quindi la misura di un profilo. Questo consente di eseguire misurazioni 2D quali differenza di altezza o angolo, con un unico sensore.

Nelle applicazioni di misura con triangolazione laser, un fascio laser viene fatto passare attraverso un opportuno sistema di lenti per ottenere una linea.

La linea viene proiettata sulla parte del target di cui si vuole misurare il profilo; la linea laser definisce la direzione  $x$ , mentre il sensore misura la distanza  $z$  lungo  $x$ , ovvero il profilo  $z(x)$ , dove la direzione  $z$  è lungo l'asse ottico del laser.

La linea laser viene quindi riflessa dal target ed acquisita da una telecamera posta al di sopra dell'oggetto, inclinata di un determinato angolo.

Dalla forma dell'immagine della linea laser acquisita dal sensore di immagini è possibile ricavare e misurare il profilo dell'oggetto.

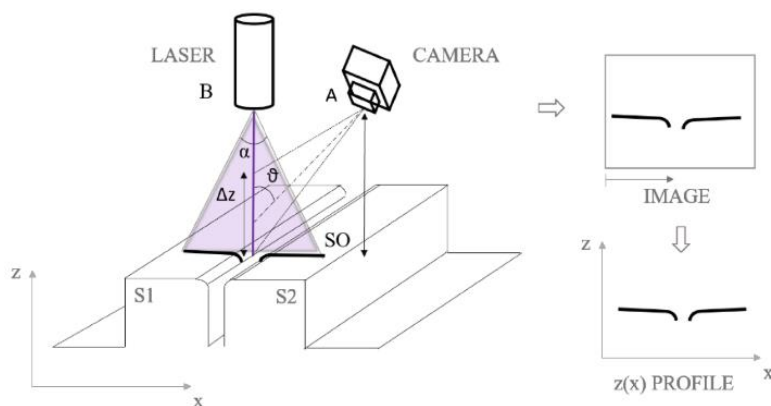


Figura 16-Profilometro laser tratta da [10]

## 1.14 Gap & Flush

In settori esigenti dal punto di vista della qualità, come ad esempio quello automobilistico ed aeronautico, è molto importante monitorare la misura di gap e flush e la sua variabilità (in uno o più punti) all'interno del flusso di produzione.

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.

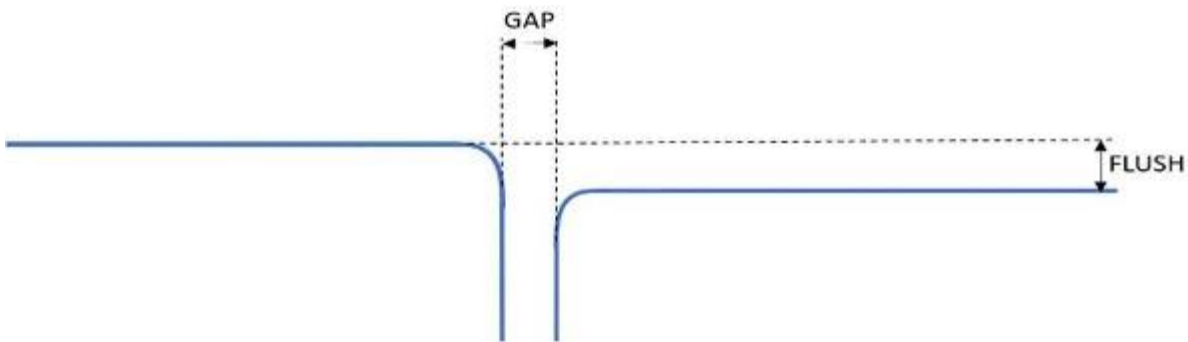


Figura 17-Gap&Flush tratta da [7]

L'eccessivo scostamento di una delle due misure dai loro rispettivi valori nominali infatti può essere la causa della non conformità di un prodotto, sia per quanto riguarda gli aspetti aerodinamici, sia per le esigenze di funzionalità ed estetica.

Tipicamente questo tipo di ispezioni dimensionali vengono eseguite a campione alla fine della linea di assemblaggio mediante spessimetri manuali, ma ora per soddisfare le richieste del mercato odierno,

occorre passare a un'ispezione al 100% sposando in pieno la filosofia dello Zero Defect Manufacturing (ZDM), paradigma dell'industria 4.0 e quindi nasce la necessità di digitalizzare tali misure in modo di renderle disponibili per le elaborazioni successive.

Molti articoli e siti commerciali di sensori ([16],[17],[17]) parlano della triangolazione come della tecnica principale da utilizzare per la misurazione di gap e flush tra superfici a causa dei notevoli vantaggi che si riscontrano rispetto agli altri metodi:

- Funzionano in modo più rapido e più preciso rispetto agli spessimetri e ai calibri e, a differenza di questi ultimi, possono essere utilizzati per misurare entrambe le grandezze.
- Questi strumenti possono essere montati su telai o robot dando la possibilità di ispezionare il 100% del prodotto in maniera automatica.
- Non hanno bisogno di toccare la superficie del target con il pericolo di modificare le proprietà fisiche del prodotto.
- Offrono la possibilità di archiviare automaticamente i dati in un database e di valutare la correlazione tra i dati misurati e i valori nominali per correggerli man mano che si presentano, nell'ottica di un monitoraggio e di una correzione in tempo reale.

## 1.15 G3F e competitors

Durante il progetto GOODMAN co-finanziato dalla Commissione Europea, l'Università Politecnica delle Marche per rispondere alle esigenze del partner industriale del progetto VolksWagen AutoEuropa, ha sviluppato un nuovo prototipo di laser a triangolazione basato su un cellulare. Il prototipo ha portato anche alla stesura di un brevetto italiano [13].



*Figura 18-Prototipo G3F*

Come risultato del progetto, il prototipo sviluppato è stato inizialmente validato in linea di produzione e ha soddisfatto i primi requisiti del partner industriale, che però ne ha richiesto una versione industriale con un Technology Readness Level (TRL) più elevato. Per portare il prototipo ad un TRL più alto è stata quindi fondata nel 2020 lo spin off U-SENSE.IT srl.

U-SENSE.IT è una start up innovativa che si rivolge al mercato dei sensori ottici per il controllo qualità in linea di produzione e la sua missione è quella di sviluppare strumenti di misura intelligenti, portatili e wireless per gli operatori che eseguono il controllo di qualità in linea di produzione. Un approccio Human-Centric alle fabbriche digitali, ovvero strumenti intelligenti per operatori di linea al fine di aumentare la loro produttività, qualità, prestazioni, soddisfazione e sicurezza.



*Figura 19-G3F*



Il G3F oggi, si presenta come un sensore a triangolazione laser, wireless, ergonomico, intelligente e senza contatto per l'operatore che esegue operazioni di assemblaggio e controllo qualità.

L'ergonomia e le funzionalità intelligenti del G3F consentono agli operatori di eseguire in modo affidabile il controllo di qualità del Gap & Flush in linea così da essere completamente integrati nella fabbrica digitale in ogni operazione e controllo da loro fatto.

I settori di applicazione sono molteplici, quali ad esempio: Automotive, Elettrodomestici, Aeronautica e Arredamento.

Le caratteristiche principali del G3F sono:

- Design portatile ed ergonomico: può stare facilmente in tasca;
- Misure veloci: meno di 1 s per una singola misurazione;
- Un laser, più superfici: il particolare laser utilizzato consente di misurare in modo efficiente su diverse superfici, inclusi materiali trasparenti e riflettenti;
- Sicurezza degli occhi: G3F garantisce la sicurezza dell'operatore, accendendo/spegnendo condizionalmente il raggio laser;
- Algoritmi di Intelligenza Artificiale G3F esegue algoritmi AI brevettati per la gestione manuale dell'incertezza di misura.



*Figura 20-Render G3F*

Laser	405 nm
Working range X (lateral)	20 mm @ 12 mm
Working range Z (axial)	0 to 12 mm
Uncertainty X (Gap)	< 25 $\mu\text{m}$
Uncertainty Z (Flush)	< 20 $\mu\text{m}$
Measurement time	< 1 s
Display	1" integrated display
Dimensions	45 x 45 x 120 mm
Weight	300 g
Battery life	$\approx$ 8 h

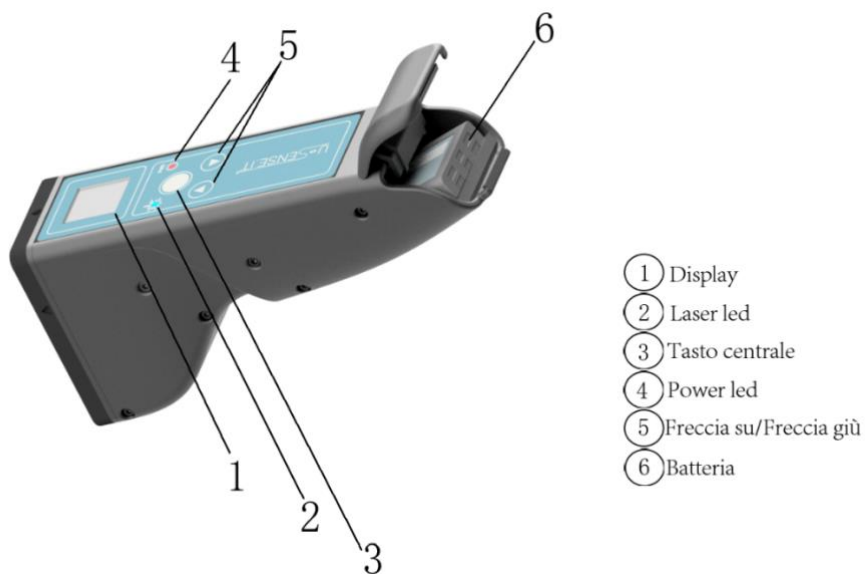


Figura 21-Render G3F con didascalia

## **1.16 Il mercato degli strumenti portatili per la misura di GAP & FLUSH**

In un mercato esigente come l'industria automobilistica, i prodotti devono soddisfare severi requisiti in termini di qualità.

Per questo, i sensori laser, sono divenuti un elemento centrale del sistema di verifica e un fattore di primaria importanza nel processo di ottimizzazione delle differenti fasi produttive.

La parte finale della linea di assemblaggio della carrozzeria è costituita da una serie di operazioni manuali, complesse e molto diversificate, che non rendono vantaggioso l'impiego di macchine automatizzate.

Vengono infatti assemblati manualmente sportelli, cofano, portellone posteriore, fanali ed elementi estetici vari con specifiche stringenti sull'allineamento delle parti adiacenti.

La misura del gap & flush deve essere fatta quindi 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 senza contatto come i sensori a laser.

Sempre più aziende però tendono ad assumere un modello di produzione simile quello definito dall'Industria 4.0, in cui occorre acquisire dati da ogni singolo processo in modo da monitorarlo.

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 le misurazioni.

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  $\mu\text{m}$ . 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 quattro ore.



*Figura 22- GapGun Pro2 tratta da [9]*

### **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 e 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 23- Calipri c14 tratta da [10]*

### **LaserGauge HS763 (LMI Corporation):**

Il profilometro laser DSP LaserGauge HS è un sensore di scansione portatile che offre misurazioni rapide, flessibili e accurate.

I sensori DSP LaserGauge sono totalmente autonomi e consentono scansioni a striscia singola, Cross-Hatch o Cross-Vector con velocità e flessibilità molto elevate.

Inoltre, è in grado di scansionare un'ampia varietà di superfici, tra cui metallo, vernice, plastica/gomma, fari, fanali posteriori, vetri per finestre, compositi, superfici cromate e molte altre.

È possibile collegarlo ad un computer via USB o via wireless e, in caso di condizioni fuori specifica, gli operatori vengono avvisati con avvisi sia visivi che sonori.



*Figura 24- LaserGauge HS763 tratta da [11]*



Confrontando i valori dei datasheet, si nota che il G3F ha caratteristiche metrologiche leggermente inferiori rispetto ai prodotti concorrenti.

Tuttavia, questo è dovuto a scelte progettuali mirate ad ottimizzare il dispositivo per un utilizzo in linea.

Il G3F è infatti superiore ai suoi concorrenti in termini di ergonomia (dimensioni e peso sono ridotte rispetto ai competitors) e facilità di utilizzo.

Inoltre, l'utilizzo di algoritmi brevettati, che sfruttano l'intelligenza artificiale, lo rende unico nel panorama dei sensori a triangolazione ad utilizzo automotive in quanto gli permette di misurare, con la precisione e ripetibilità richiesta, su superfici normalmente molto ostiche come ad esempio i fanali.






					
	Manual feeler gauges	LaserGauge	GapGun - Third Dimension	Calipri - Next Sense	U-Sense.IT - G3F
Laboratory	✗	✗	✗	✓	✗
Inline	✓	✓	✓	✓	✓
Non contact	✗	✓	✓	Need additional stick	✓
Real time data	✗	✓	✓	✓	✓
Surface recognition	✗	✗	✗	✗	✓
Operator Uncertainty management	✗	✗	✗	✗	✓
Ergonomics	✓	✓	✓	✓ (two-hands operations)	✓

Figura 25-Competitors

## **2 Sensore colore a bordo del G3F: ottimizzazione del suo utilizzo nell'ambito del progetto openZDM**

Ottimizzando il G3F per l'utilizzo in una linea di produzione di uno dei partner industriali del progetto openZDM, in un'ottica di ottimizzazione del processo di misura, si è resa necessaria l'implementazione di una funzione per il riconoscimento automatico del colore delle autovetture.

Il colore del target incide in maniera determinante sulla quantità di luce riflessa dallo stesso e poi acquisita dal sensore; quindi, influisce sul rapporto segnale rumore del sistema G3F.

L'obiettivo è quello di automatizzare il caricamento dei parametri di laser e camera in modo da avere una linea laser ben contrastata e mai saturata su tutti i colori delle autovetture (palette) presenti in listino.

## 2.1 Ottimizzazione linea laser

Poiché per ottenere una misura accurata di gap e flush, è necessario che l'immagine acquisita sia ben contrastata e soprattutto non saturata, a seconda della tonalità, si agirà sui parametri di laser e sensore in modo tale da ottenere una condizione di ottimo su tutti i colori della palette.

In particolare, si agirà:

- Sul laser: definendo un valore di Duty Cycle adeguato;
- Sulla camera: definendo un valore del tempo di esposizione adeguato

### 2.1.1 Duty Cycle

Il Duty Cycle è una modalità di emissione di energia (laser).

In particolare, è una modalità pulsata; ciò significa che i periodi di emissione della luce ON laser sono alternati a periodi di interruzione di emissione OFF.

Poiché, la distribuzione di intensità nei fasci laser è di tipo gaussiana, ovvero massima al centro e minima ai bordi, acquisendo delle immagini della linea, è possibile trovarsi in presenza di saturazione che causa perdita di informazioni sulla scena.

Per evitare problemi di questo tipo è possibile regolare la durata del periodo ON in funzione alla superficie da esaminare.

Si consideri un'onda quadra: il Duty Cycle è il rapporto che c'è tra il periodo in cui c'è il segnale ON ed il periodo di pausa OFF.

Può essere espresso con un valore percentuale oppure con un valore frazionario.

Se il Duty Cycle è al 50% (oppure  $1/2$ ) significa che il segnale energetico dura tanto quanto il periodo di pausa.

Se il Duty Cycle è al 20% ( $20/100$ ) significa che il segnale è al 20%, mentre il periodo di pausa è pari all'80%.

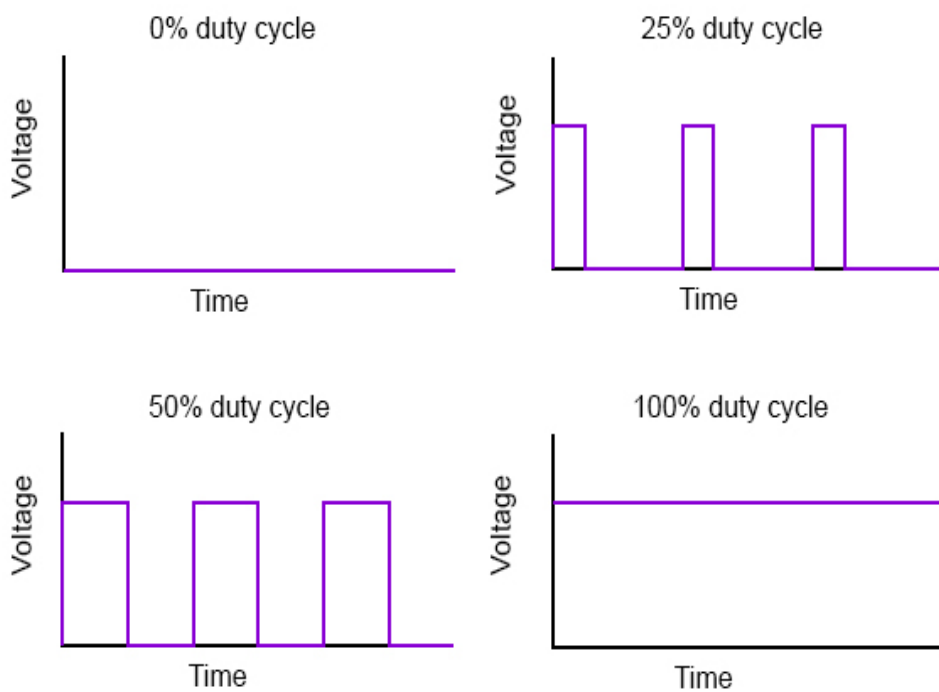


Figura 26-Duty Cycle tratta da [12]

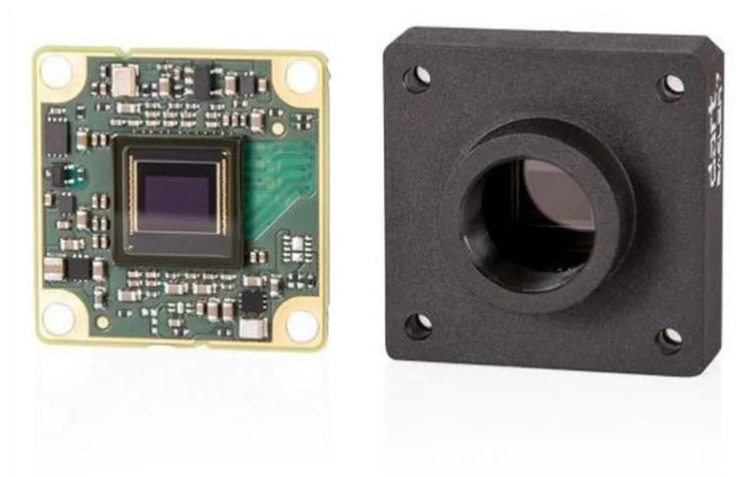
### 2.1.2 Tempo di esposizione (exposure time)

Il tempo di esposizione, detto anche tempo di scatto è, in fotografia, il tempo durante il quale l'otturatore della macchina fotografica rimane aperto per permettere alla luce di raggiungere la pellicola o, come in questo caso, il sensore.

In combinazione col diaframma, il tempo di esposizione regola la giusta quantità di luce per acquisire un'immagine ben esposta.

Facendo un parallelo con l'occhio umano, mentre la pupilla rappresenta il diaframma, la palpebra dà un'idea dell'otturatore.

La fotocamera che è stata installata nel G3F (Basler da A2500 – 60 mci) ha un tempo di esposizione compreso tra  $43 \mu\text{s}$  e 1.4 s. Questa telecamera non ha un otturatore e opera con un otturatore elettronico in modalità “global shutter”, che garantisce la simultaneità temporale della esposizione di tutti i pixel.



*Figura 27- Basler da A2500 – 60 mci tratta da [13]*

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 fornita dall'ambiente circostante.

Ad esempio, per le superfici bianche opache è richiesta un'esposizione bassa (es. 3000  $\mu$ s) altrimenti l'immagine acquisita, a causa dell'ingente quantità di luce riflessa, risulterebbe saturata mentre al contrario, per superfici scure, è necessario aumentare il tempo di esposizione (es. 0.1 s) al fine di ottenere un'immagine con un segnale accettabile.

Il valore del parametro del tempo di esposizione deve essere inoltre scelto in funzione della portante del laser.

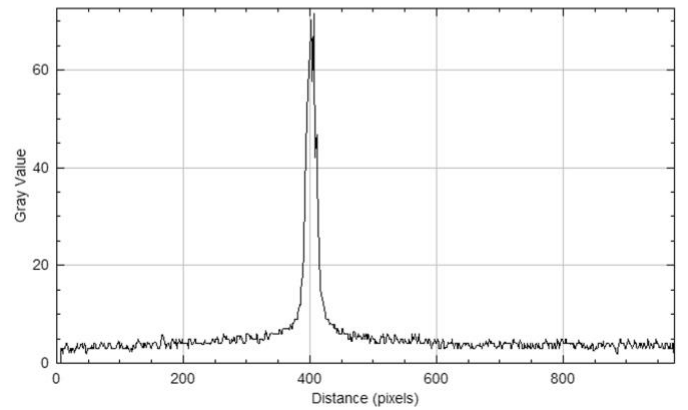
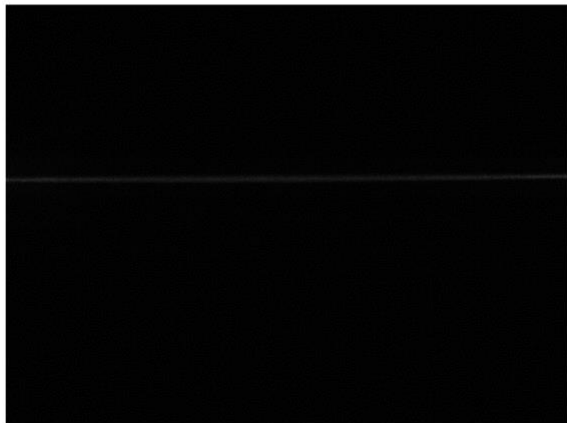
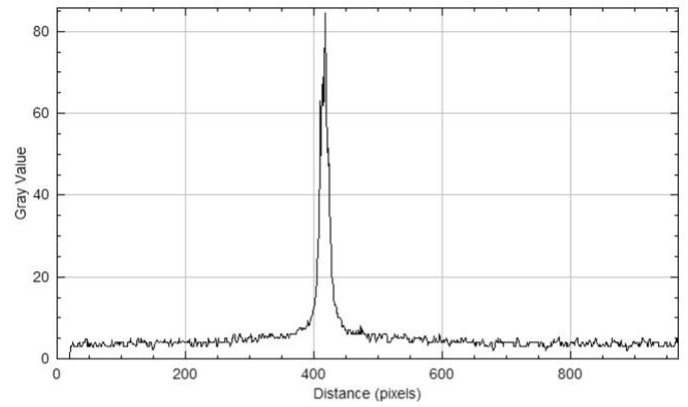
L'exposure time deve essere infatti un multiplo intero, con un fattore maggiore di uno, del periodo della portante in modo che nell'acquisizione, indipendentemente dal duty cycle, venga acquisita una linea laser originata da un numero intero di onde quadre costante.

Se il tempo di esposizione è molto grande pur non essendo un multiplo intero del periodo della portante non si osservano particolari variazioni di intensità.

Mentre, prendendo un tempo di esposizione confrontabile con il periodo della portante ma non multiplo intero di quest'ultimo, acquisendo immagini successive a parità di condizione, si osserva una variazione dell'intensità della linea (Figura 28).



Questa variabilità di intensità, ovviamente indesiderata, è dovuta proprio al differente numero di onde quadre che vengono acquisite dal sensore durante il tempo di esposizione in due acquisizioni successive.



*Figura 28-Acquisizioni con tempo di esposizione non multiplo intero della portante*

### 2.1.3 Influenza del Duty Cycle e del tempo di esposizione sulla qualità della linea laser

Per capire l'influenza del Duty Cycle e del tempo di esposizione sulla qualità della linea laser è stata fatta un'analisi preliminare mirata ad osservare lo sviluppo della stessa a valori crescenti di duty cycle con tempo di esposizione fissato e viceversa.

Nel primo caso, per valori di duty cycle crescenti non si osserva un aumento tangibile né dell'intensità della linea laser né del contrasto.

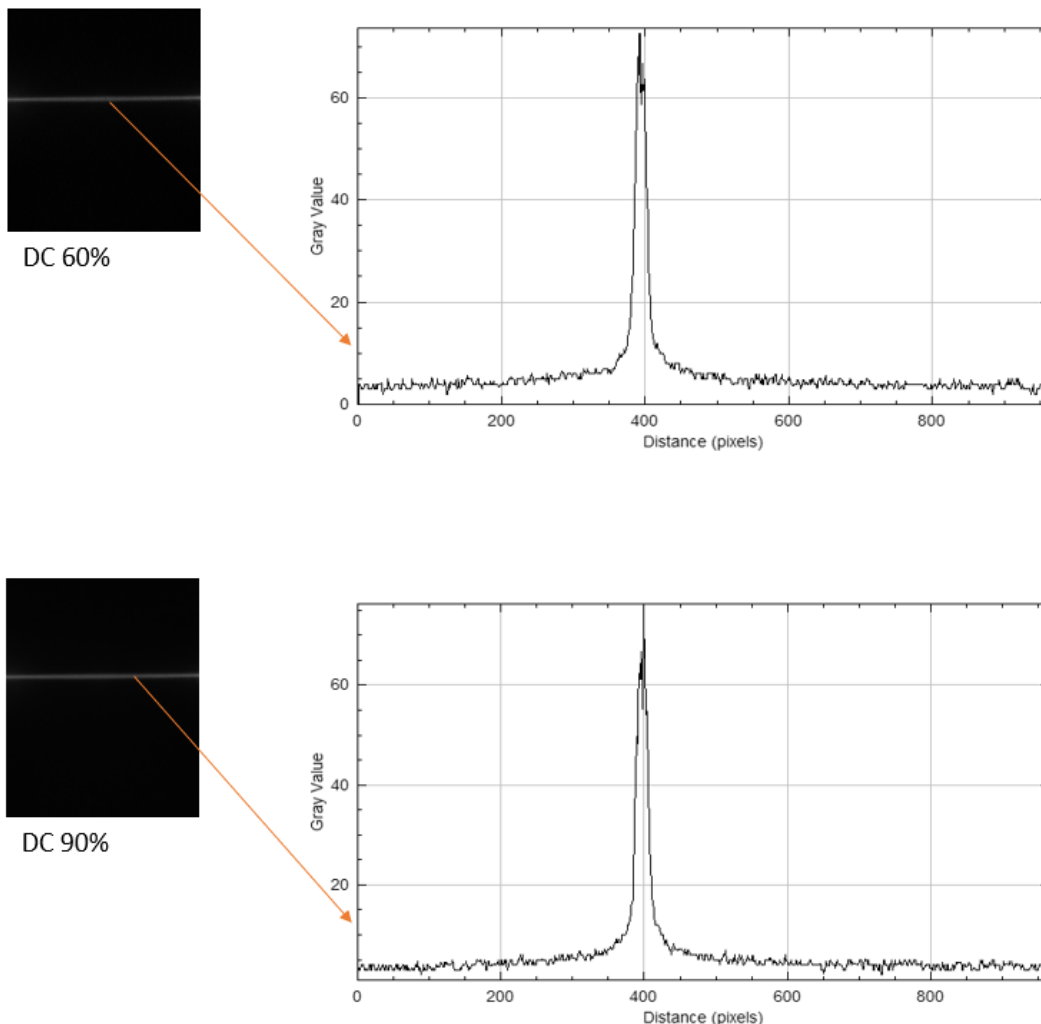
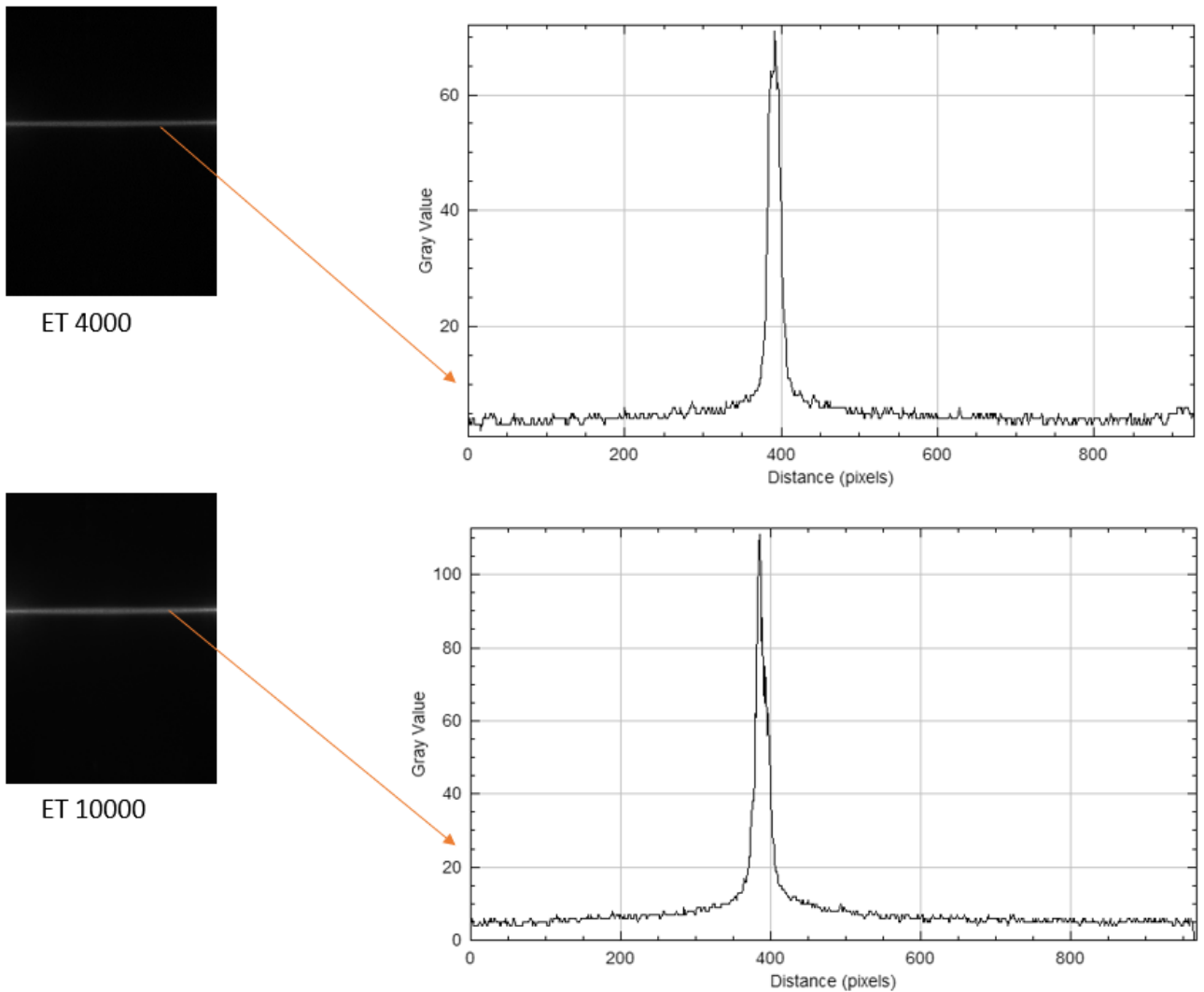


Figura 29-Confronto duty cycle crescente

Nel secondo caso invece per valori del tempo di esposizione crescenti si osserva un aumento di intensità fino ad arrivare a saturazione.

A differenza del duty cycle quindi ad un aumento del tempo di esposizione (con duty cycle fissato) corrisponde un aumento apprezzabile di intensità luminosa.



*Figura 30-confronto tempo di esposizione crescente*

La Figura 31 seguente ci mostra inoltre come a fronte di una intensità di picco maggiore, a tempi di esposizione crescenti, si abbia anche un inspessimento della linea.

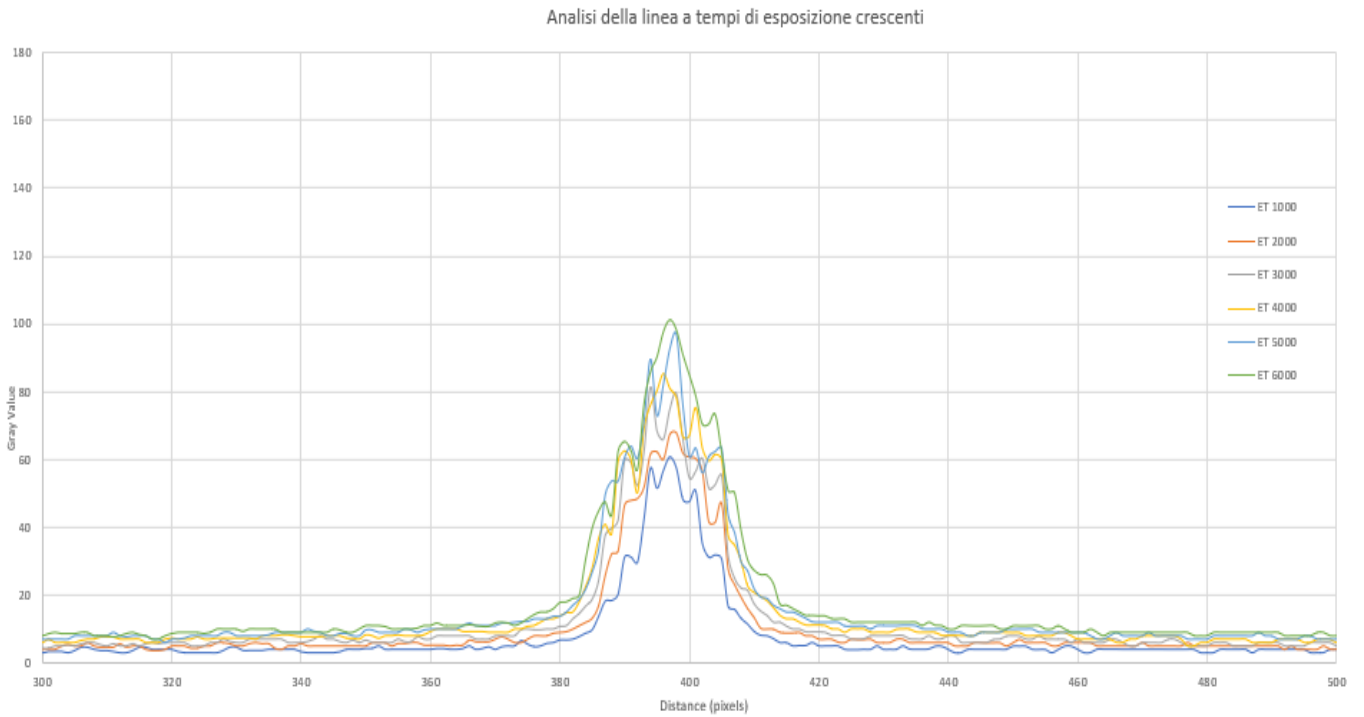


Figura 31-Confronto tempo di esposizione crescente

## 2.2 Determinazione delle Classi Colore

Al fine di implementare una funzione, per il riconoscimento automatico del colore del target, il primo passo è stato quello di ottimizzare la linea laser per tutti i colori della palette trovando i valori di duty cycle e tempo di esposizione che massimizzassero la qualità della linea.

Ovvero, per ogni tonalità, sono stati variati i valori di camera e laser fino ad ottenere il contrasto e il picco di intensità desiderati.

---

### COLORI PALETTE:

**PureWhite**

**WhiteSilver**

**Pyramid Gold**

**Moonstone Silver**

**Atlantic Blue**

**Hudson Bay Blue**

**Energetic Orange**

**Kurkuma**

**Red**

**Indium Grey**

**Ravenna Blue**

**Creamson Red**

**Blackoak**

**Deep Black**

---

Non essendo possibile caricare parametri specifici per ogni colore ma solo sei coppie di parametri (DutyCycle ed Exposure), le tonalità con parametri di ottimo simili sono state clusterizzate trovando il giusto trade off degli stessi.

In questo modo tutti i colori della palette sono stati racchiusi in sei cluster (ognuno descritto da una sola coppia di parametri) chiamati: “Classi Colore”.

```

"DutyCycle": 600000,
"Exposure": 2000,
"Name": "Colour01"

"DutyCycle": 800000,
"Exposure": 6000.0,
"Name": "Colour02"

"DutyCycle": 600000,
"Exposure": 17000.0,
"Name": "Colour03"

"DutyCycle": 700000,
"Exposure": 42000.0,
"Name": "Colour04"

"DutyCycle": 900000,
"Exposure": 42000.0,
"Name": "Colour05"

"DutyCycle": 990000,
"Exposure": 87000.0,
"Name": "Colour06"

```

PureWhite	Classe Colore 1
WhiteSilver	
Pyramid Gold	Classe Colore 2
Moonstone Silver	
Indium Grey	Classe Colore 3
Ravenna Blue	
Atlantic Blue	Classe Colore 4
Energetic Orange	
Hudson Bay Blue	
Kurkuma	
Red	
Blackoak	Classe Colore 5
Creamson Red	
Deep Black	Classe Colore 6

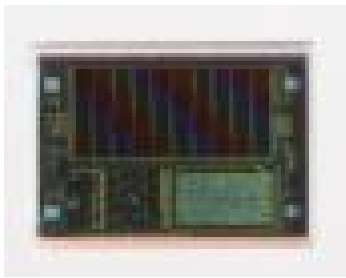
Figura 32-Classi colore

Osservando la clusterizzazione ottenuta si nota come non sia la tonalità del colore a discriminare i componenti della palette nelle varie “Classi Colore” bensì altri fattori.

## 2.3 Il sensore colore:

Il caricamento automatizzato dei parametri di laser e camera a seconda del colore del target passa dall'elaborazione dei dati acquisiti dal sensore colore presente a bordo del G3F.

Il sensore in questione è il S13683-02WT ed è un sensore di colore che restituisce i risultati rilevati come numeri binari a 16 bit.



*Figura 33- S13683-02WT tratta da [15]*

Il sensore di colore generalmente riconosce il colore di un materiale in modello RGB (red, green, blue), filtrando le componenti infrarosse e ultraviolette non volute.

Tipicamente, come in questo caso, comprende anche dei LED bianchi ad alta intensità, che proiettano della luce modulata sul target.

La luce bianca è infatti formata dall'unione dei tre colori primari, aventi differenti lunghezze d'onda.

Quando essa incide su una superficie, in base alle proprietà del materiale, alcune lunghezze d'onda vengono assorbite e altre riflesse.

L'occhio umano, così come il sensore di colore, recepisce quindi le componenti riflesse dalla superficie.

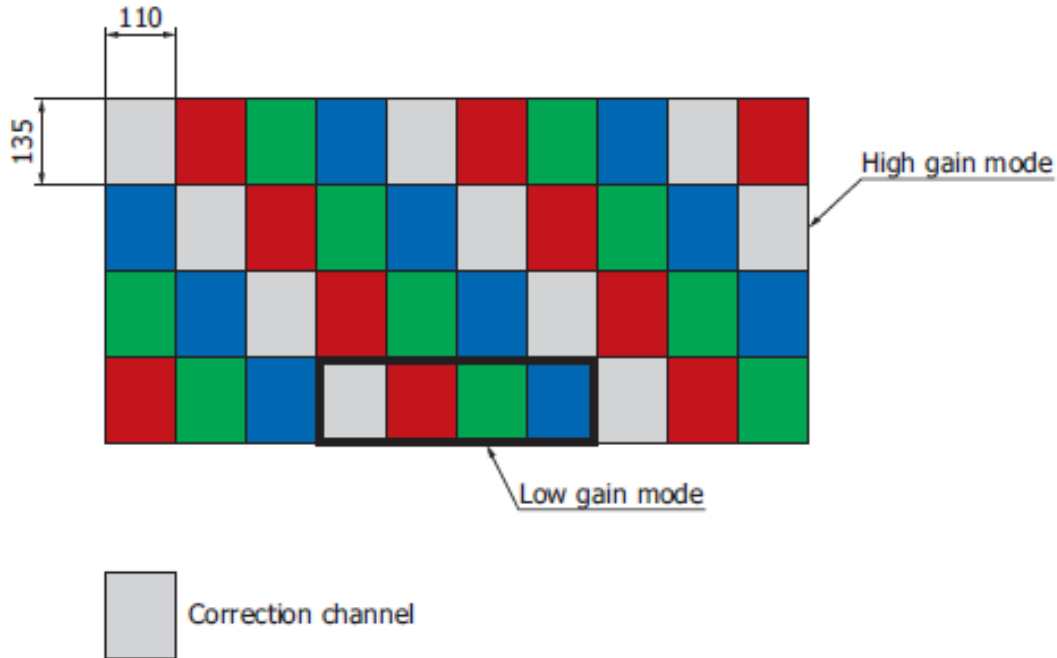


Figura 34- S13683-02WT tratta da [15]

In particolare, i canali di output del sensore in questione sono i seguenti:

- RED: originato dalla componente fotosensibile che riceve solo la componente rossa della luce incidente;
- GREEN: originato dalla componente fotosensibile che riceve solo la componente verde della luce incidente;
- BLU: originato dalla componente fotosensibile che riceve solo la componente blu della luce incidente;
- Correction Channel: originato dalla componente fotosensibile che riceve lo spettro completo della luce incidente.



Per attenuare il rumore presente negli output fornitici dal sensore sono state effettuate tre misure su ogni colore della palette.

Viene fatta quindi la media, la deviazione standard e la deviazione standard percentuale per ogni canale di output.

COLORI VW	OUTPUT	N MISURAZIONI			MEDIA	DEV. STD.	DEV. STD. %
		1	2	3			
PureWhite	red	9061	9076	9079	9072,00	9,64	0,11
	green	10853	10888	10898	10879,67	23,63	0,22
	blue	7832	7854	7856	7847,33	13,32	0,17
	correction	1407	1409	1410	1408,67	1,53	0,11
WhiteSilver	red	6969	6959	6967	6965,00	5,29	0,08
	green	7995	7974	7990	7986,33	10,97	0,14
	blue	5914	5901	5909	5908,00	6,56	0,11
	correction	1092	1091	1093	1092,00	1,00	0,09
Kurkuma	red	6064	6085	6002	6050,33	43,15	0,71
	green	5375	5392	5293	5353,33	52,94	0,99
	blue	2362	2365	2324	2350,33	22,85	0,97
	correction	799	800	791	796,67	4,93	0,62
Energetic Orange	red	5380	5380	5396	5385,33	9,24	0,17
	green	3584	3583	3595	3587,33	6,66	0,19
	blue	2007	2004	2014	2008,33	5,13	0,26
	correction	708	708	710	708,67	1,15	0,16
Pyramid Gold	red	5007	5018	5041	5022,00	17,35	0,35
	green	4712	4739	4761	4737,33	24,54	0,52
	blue	3073	3101	3106	3093,33	17,79	0,57
	correction	749	751	752	750,67	1,53	0,20
Red	red	6633	6712	6696	6680,33	41,77	0,63
	green	3186	3208	3200	3198,00	11,14	0,35
	blue	1904	1915	1907	1908,67	5,69	0,30
	correction	812	818	817	815,67	3,21	0,39
Moonstone Silver	red	5461	5461	5462	5461,33	0,58	0,01
	green	5559	5557	5565	5560,33	4,16	0,07
	blue	4280	4267	4277	4274,67	6,81	0,16
	correction	855	854	855	854,67	0,58	0,07
Indium Grey	red	3828	3829	3803	3820,00	14,73	0,39
	green	3347	3342	3316	3335,00	16,64	0,50
	blue	2300	2289	2272	2287,00	14,11	0,62
	correction	608	608	604	606,67	2,31	0,38
Blackoak	red	3537	3563	3539	3546,33	14,47	0,41
	green	2912	2946	2919	2925,67	17,95	0,61
	blue	1928	1960	1927	1938,33	18,77	0,97
	correction	563	567	563	564,33	2,31	0,41
Creamson Red	red	3437	3446	3414	3432,33	16,50	0,48
	green	2688	2698	2663	2683,00	18,03	0,67
	blue	1793	1803	1770	1788,67	16,92	0,95
	correction	547	548	545	546,67	1,53	0,28
Hudson Bay Blue	red	3511	3530	3514	3518,33	10,21	0,29
	green	3094	3131	3117	3114,00	18,68	0,60
	blue	2341	2376	2358	2358,33	17,50	0,74
	correction	586	588	587	587,00	1,00	0,17
Ravenna Blue	red	3463	3467	3481	3470,33	9,45	0,27
	green	3240	3251	3277	3256,00	19,00	0,58
	blue	3074	3096	3115	3095,00	20,52	0,66
	correction	625	626	627	626,00	1,00	0,16
Atlantic Blue	red	3278	3277	3278	3277,67	0,58	0,02
	green	2666	2664	2655	2661,67	5,86	0,22
	blue	1940	1941	1940	1940,33	0,58	0,03
	correction	544	544	545	544,33	0,58	0,11
Deep Black	red	3277	3256	3270	3267,67	10,69	0,33
	green	2612	2589	2606	2602,33	11,93	0,46
	blue	1757	1735	1753	1748,33	11,72	0,67
	correction	532	530	532	531,33	1,15	0,22

Figura 35-Raccolta dati sensore colore

### 2.3.1 Analisi dei dati provenienti dal sensore colore:

A partire dagli output del sensore colore si vuole ottenere un parametro che possa ordinare i colori della palette secondo le “Classi Colore” definite in precedenza.

In questo modo tramite opportune soglie sarà possibile associare ad ogni colore la sua “Classe Colore”.

La Figura 36 rappresenta come si distribuiscono i colori della palette se ad ognuno di loro si associa il valore della media dei canali R, G e B acquisiti dal sensore colore, su ciascuno di essi.

I valori della media dei canali R, G, e B, ottenuti a partire da ciascuna tonalità (asse delle ascisse), non dispongono le stesse per “Classi Colore” rendendo impossibile l’ottenimento di soglie.

Questo conferma come, per ottenere le “Classi Colore”, i colori della palette, non siano stati discriminati in base alla loro tonalità.

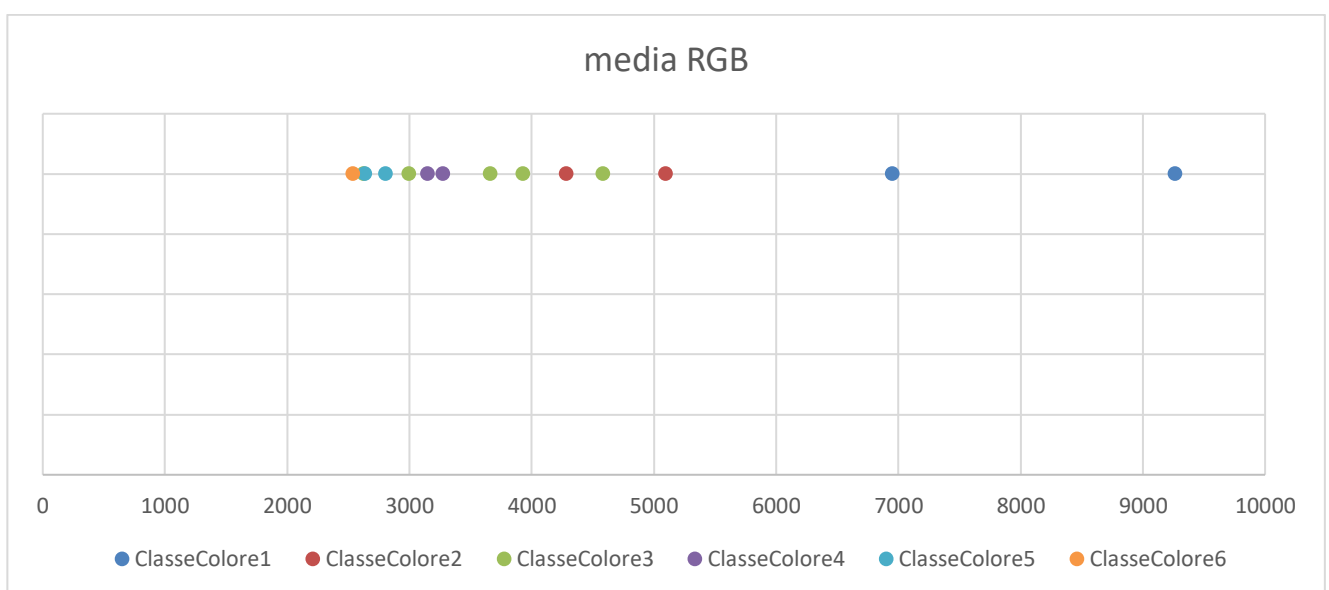


Figura 36-Media RGB

I fattori che fanno ricadere una tonalità in una “Classe Colore” piuttosto che in un’altra sono principalmente due:

- La finitura della vernice (metallizzato, opaco ecc.) che determina una diversa intensità della luce riflessa dal target;
- La componente di violetto presente nella tonalità.

Quest’ultimo è giustificato dalla lunghezza d’onda del laser presente nel G3F di colore violetto ( $\lambda=405$  nm) e dal filtro interferenziale a bordo della camera.

L’intensità luminosa della linea laser acquisita dal sensore sarà quindi molto elevata nel caso di tonalità con una presenza importante di blu-violetto e bassa o moderata in tonalità con una presenza esigua dello stesso.

### 2.3.2 Elaborazione del segnale acquisito dal sensore colore:

Al netto delle osservazioni fatte precedentemente, a partire dai canali di output del sensore colore, si vuole trovare un parametro che “sogliato” faccia ricadere ogni colore della palette nella “Classe Colore” di appartenenza.

Tra i canali di output del sensore colore, quello che discrimina maggiormente le tonalità associandole alle “Classi Colore” opportune, è il canale Blu che contiene il violetto 405 nm usato dal sensore.

Quest’ultimo viene normalizzato rapportandolo all’intensità luminosa “I” in modo da utilizzarlo al netto della brillantezza o ombrosità della tonalità del target.

$$I = \sqrt{(R^2 + G^2 + B^2)}$$

Sommando il rapporto B/I percentuale al segnale del canale di correzione e facendone il logaritmo otteniamo il parametro di clusterizzazione “p”:

$$p = \log\left[\left(\frac{Blue}{I}\right)\% + CorrectionChannel\right]$$

### 2.3.3 Plot parametro di clusterizzazione “p” e calcolo delle soglie:

Dal plot dei parametri di clusterizzazione, derivanti da ciascun colore della palette, osserviamo come questi ultimi si dispongano per “Classi Colore” consentendoci di definire delle soglie.

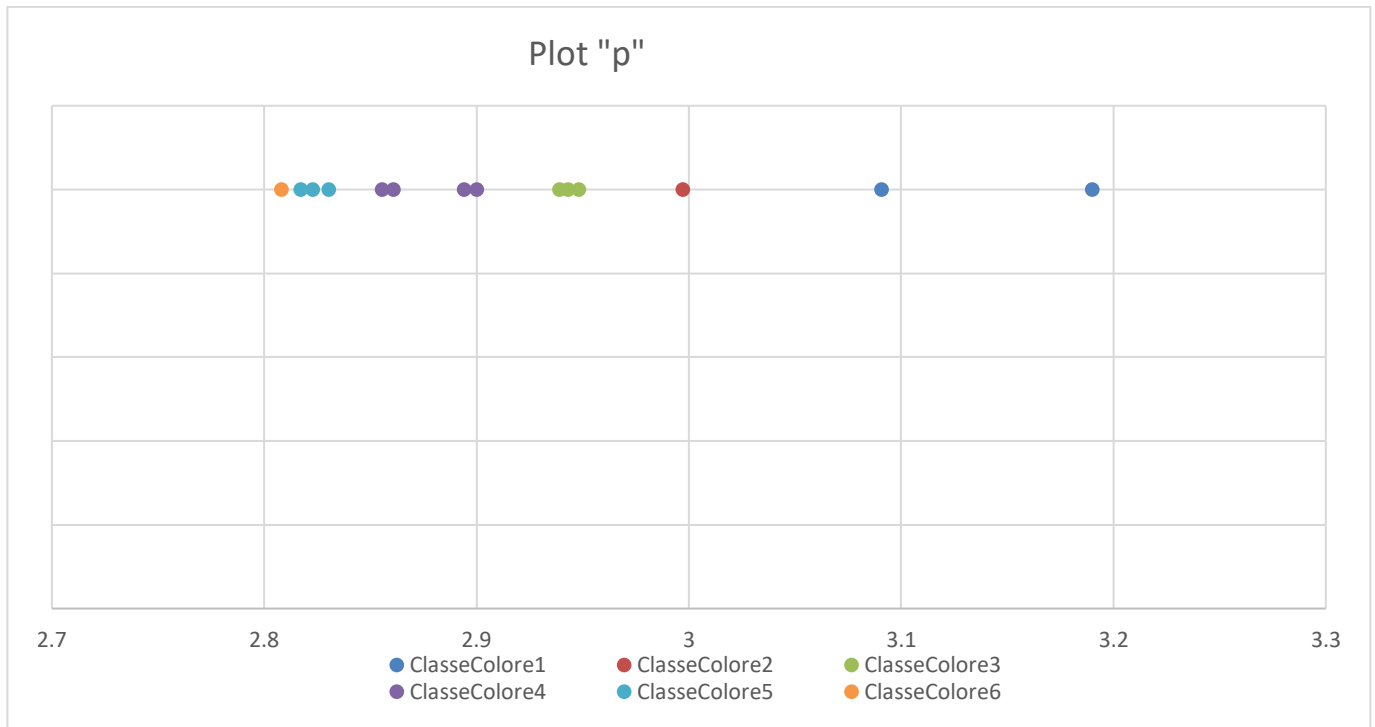


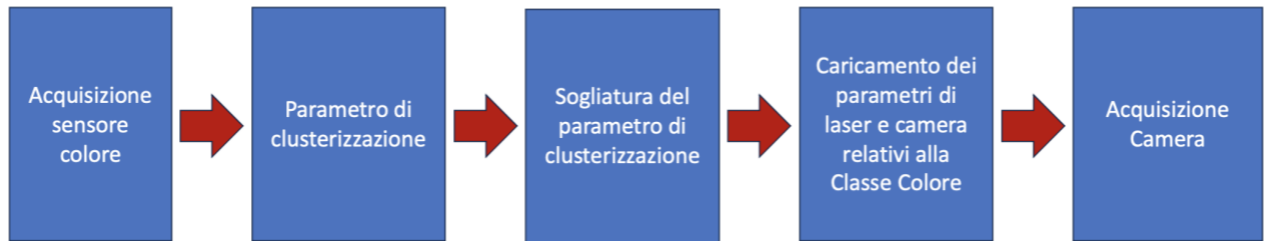
Figura 37-Parametro “p” graficato

Sogliando il parametro di clusterizzazione “p” si potranno discriminare i vari colori associandoli alla “Classe Colore” più opportuna.

Le soglie permetteranno quindi, al dispositivo G3F, di caricare gli opportuni parametri di duty cycle e tempo di esposizione, in modo da ottenere una linea non saturata e ben contrastata per qualsiasi tonalità del target.

	soglia
ClasseColore5-6	2,81
ClasseColore4-5	2,84
ClasseColore3-4	2,91
ClasseColore2-3	2,97
ClasseColore1-2	3,04

### 2.3.4 Processo acquisizione con automazione della scelta della classe colore:



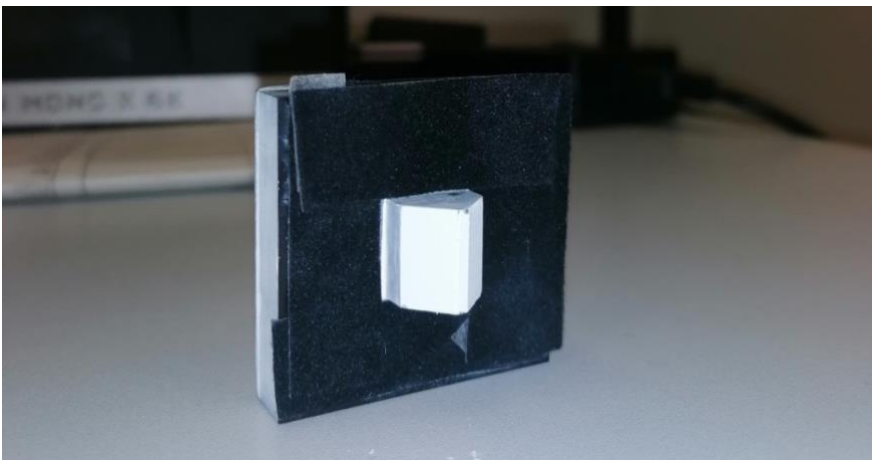
*Figura 38-flusso del processo di acquisizione*

### 3 Taratura del dispositivo G3F

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

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 diretta: la corrispondenza tra le coordinate dei punti dell'immagine  $(i, j)$  e le loro coordinate nello spazio oggetto  $(x, z)$  viene costruita partendo dal target di taratura, costituito da un riferimento prismatico di forma trapezoidale ottenuto tramite additive manufacturing (Figura 39).

Di seguito l'artefatto di riferimento:



*Figura 39-Artefatto di riferimento*



Le coordinate di un qualsiasi punto nello spazio possono essere ottenute per interpolazione a partire dai punti noti.

I punti noti nello spazio  $(X, Z)$  sono i vertici del trapezio di riferimento.

Il risultato della misurazione, inoltre, non è sensibile ai parametri intermedi della taratura.

In letteratura esistono vari metodi di taratura [23] e possono essere classificati in:

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

### **3.1 Taratura diretta**

Durante l'uso del G3F, il passaggio dai pixel  $(i, j)$  alle coordinate del mondo reale  $(X, Z)$  richiede la disponibilità di una funzione di taratura del dispositivo di triangolazione G3F.

A tal fine è stato scelto il metodo della taratura diretta 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 di regressione di dati sperimentali ottenuti durante la procedura di taratura statica.

### 3.1.1 Banco di taratura

L'artefatto di riferimento è un corpo trapezoidale; esso fornisce due punti noti, i vertici agli estremi della sua base minore. Per disporre di più punti, sia lungo X che lungo Z, è necessario traslare di quantità note l'artefatto di taratura; questo viene fatto mediante slitte di precisione.

Per movimentare il target di taratura è stato creato un banco ad hoc formato da una tavola ottica, che fornisce una base stabile, sulla quale sono installate due slitte motorizzate [24], montate ortogonalmente una sull'altra; esse sono allineate nella direzione x e z e servono a movimentare l'artefatto trapezoidale.

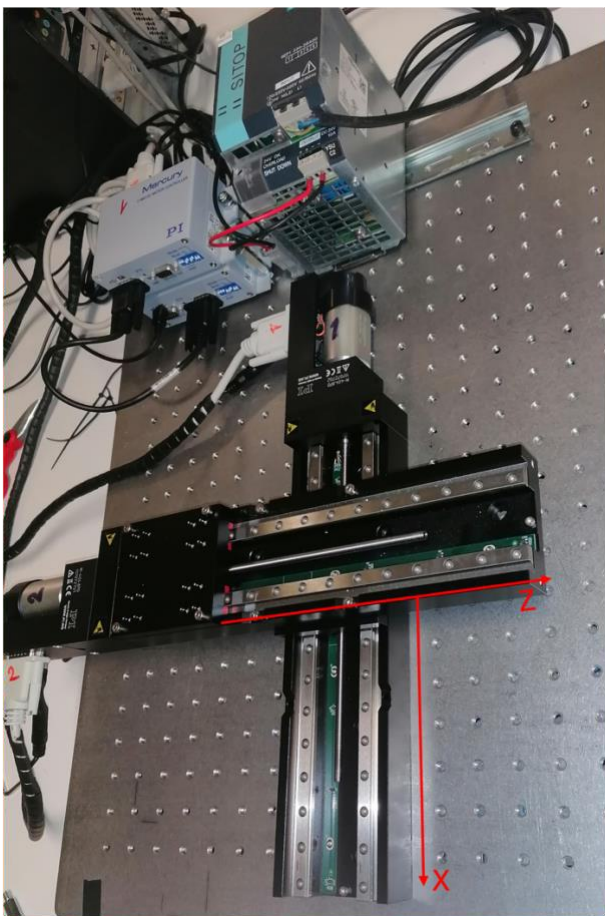
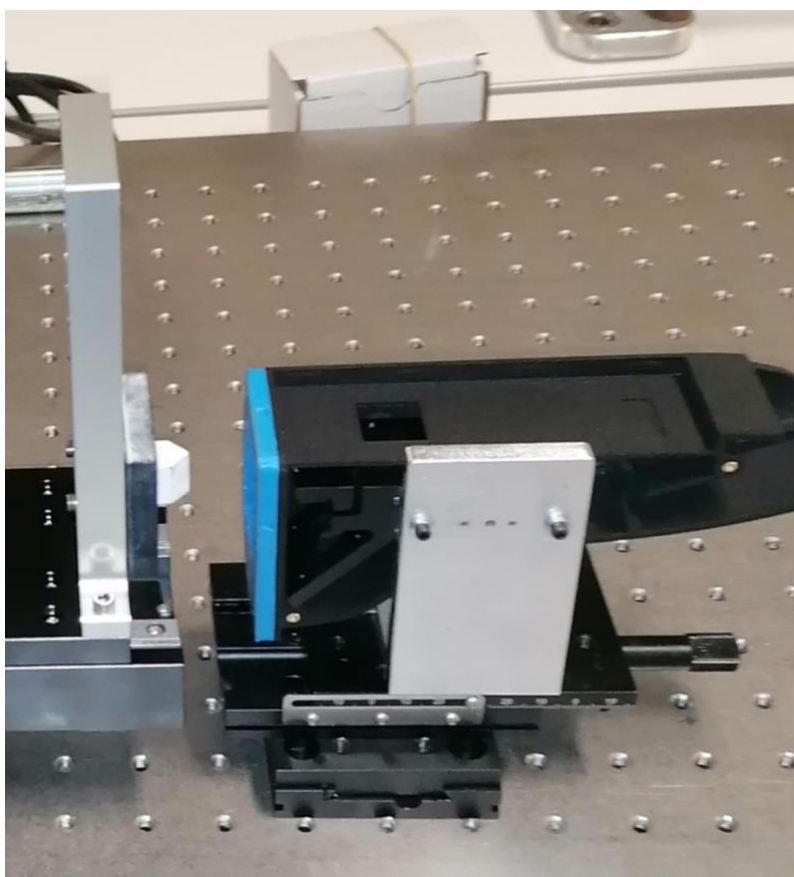


Figura 40-Banco di taratura

Sulla piattaforma della slitta responsabile del movimento del target lungo l'asse Z (Figura 40) è stato fissato un sostegno in alluminio, una squadra a 90°, a cui, a sua volta, è stato vincolato il target di taratura.

Con il fine di allinearlo correttamente al target, il dispositivo G3F è stato infine fissato ad un supporto e reso solidale a due slitte micrometriche.



*Figura 41-Set up target di taratura e dispositivo*

### 3.1.2 La griglia di taratura

La sequenza e il numero di posizioni da far assumere al target, all'interno del campo di vista del sensore, sono state scelte cercando di riempire il più possibile di punti noti la parte centrale del campo di misura dello stesso.

Nella parte più periferica invece, poiché la misura del gap & flush dei profili avviene di norma nella parte centrale, è stata definita una densità spaziale di punti minore.

Infine, tramite Python è stato creato un algoritmo che, movimentando le slitte, fa assumere al target tutte le posizioni definite nella griglia di taratura.

### 3.1.3 Incertezza del target di taratura

L'incertezza del target di taratura ha due componenti principali al suo interno:

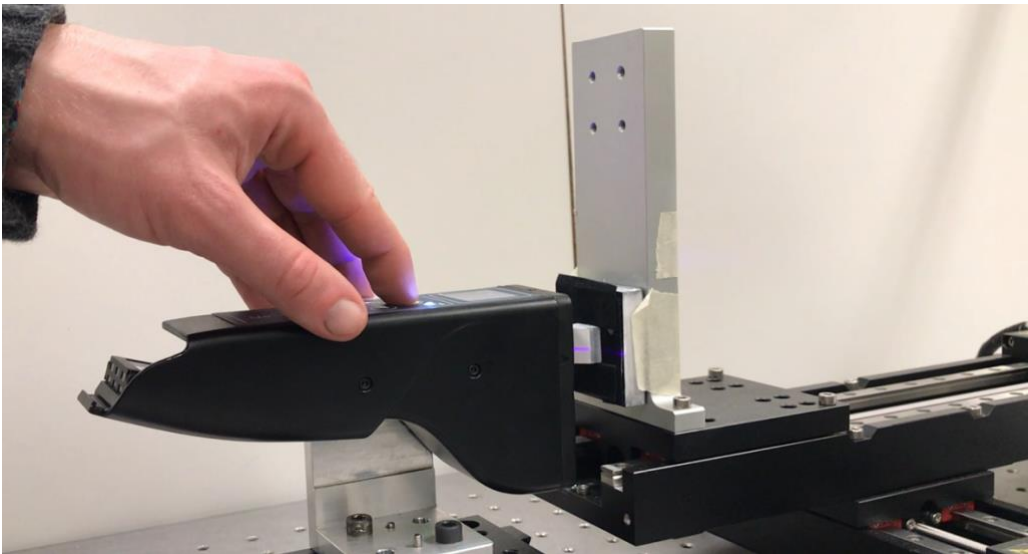
- Incertezza data dalle tolleranze della stampa in additive manufacturing del target stesso;
- Incertezza di posizionamento dovuta alla risoluzione delle slitte. Questa è dell'ordine dei micrometri, come si evince dai dati di risoluzione (ripetibilità 1  $\mu\text{m}$ ) e di giochi meccanici (backlash 2  $\mu\text{m}$ ). Tuttavia, il fornitore non fornisce informazioni su come siano stimati questi valori, né che si tratti di una o più deviazioni standard. Pertanto, in accordo con la ISO-GUM [25], che indica di usare la incertezza espansa con fattore di copertura 2, e considerato che è meglio sovrastimare l'incertezza del riferimento, questa viene ritenute dell'ordine di  $\pm 0.003$  mm. Una tale incertezza è ritenuta adeguata a tarare un sensore la cui incertezza attesa è dell'ordine dei  $\pm 0.01$  mm.

Positioning	M-404.xDG	Tolerance
System resolution in X	11.6494 nm	
Unidirectional repeatability in X	1 $\mu\text{m}$	Typ.
Minimum incremental motion in X	0.1 $\mu\text{m}$	Typ.
Backlash in X	2 $\mu\text{m}$	Typ.
Integrated sensor	Incremental rotary encoder	
Sensor signal	A/B quadrature, RS-422	
Sensor resolution	2000 cts/rev	
Reference Switch	Hall effect	
Reference switch repeatability	1 $\mu\text{m}$	
Limit switch	Hall effect	

Figura 42-Datasheet slitte motorizzate tratta da [21]

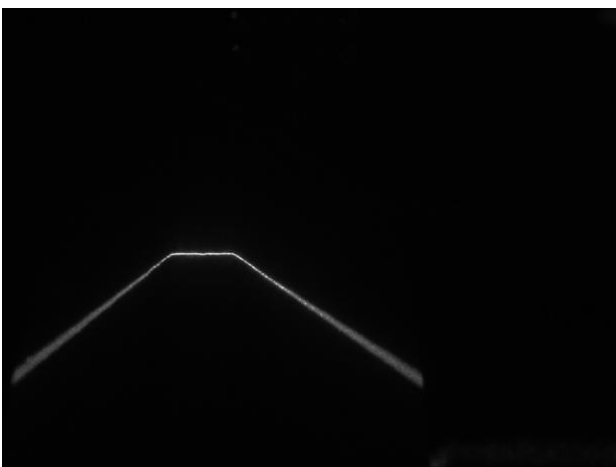
## 3.2 Processo di taratura

Lo strumento è vincolato al supporto, tramite spine e viti, ed allineato al target in modo che la linea laser sia ortogonale alla superficie del target. Viene acquisita un'immagine per ogni posizione definita nella griglia di taratura, ottenendo così più di duecento immagini. Ogni immagine fornirà quindi, due punti noti per la taratura.



*Figura 43-Taratura con slitte motorizzate*

Una volta controllata la bontà delle immagini acquisite, queste vengono scaricate da Mobaxterm e salvate.



*Figura 44-Immagine tipo, acquisita nel processo di taratura*

L'operazione di taratura sostanzialmente consente di legare le informazioni contenute nelle immagini sottoforma di coordinate  $(i,j)$  dei punti di taratura, alle grandezze del mondo reale, ovvero alla distanza  $Z$  tra target e sensore e alla posizione laterale  $X$  dei medesimi punti.

Trattandosi di un sistema che misura in uno spazio bidimensionale, lo spazio  $(X, Z)$ , i dati vengono rappresentati come nuvole di punti  $X(i,j)$  e  $Z(i,j)$ , dove "i" e "j" rappresentano le coordinate dei pixel nell'immagine.

La funzione di taratura si ottiene da queste nuvole di punti mediante interpolazione dei dati sperimentali con due superfici polinomiali,  $H_x(i,j)$  e  $H_z(i,j)$ , che rappresentano appunto le superfici di taratura. Tali funzioni sono ottenute col metodo dei minimi quadrati.



### 3.3 Software di taratura

Le immagini acquisite vengono elaborate da una successione di algoritmi.

Nel primo calcolo vengono identificati i profili sfruttando l'algoritmo di Steger [22].

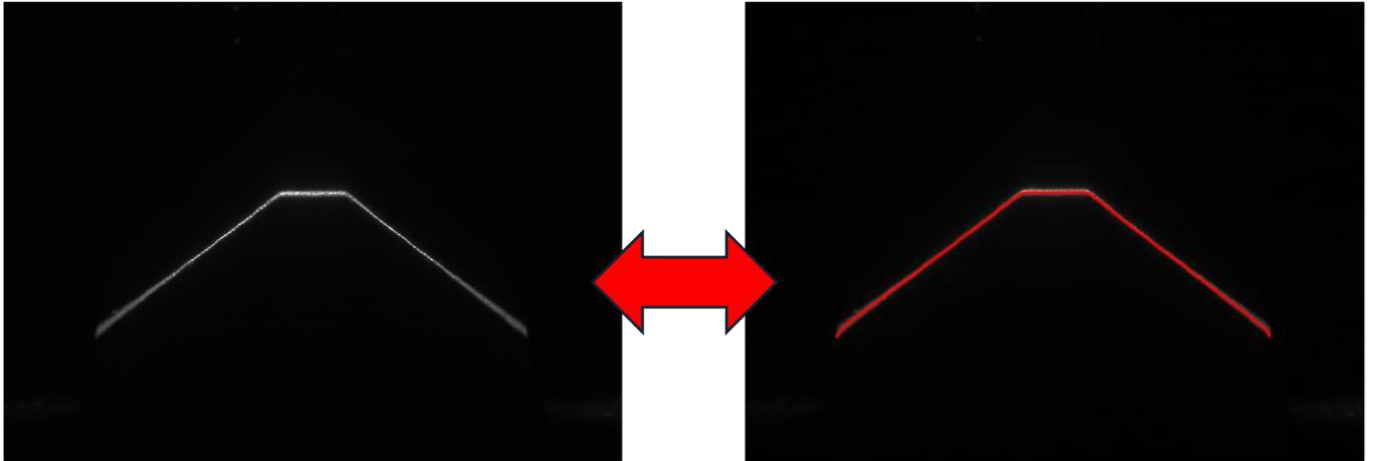


Figura 45-Identificazione profili tramite algoritmo

Quindi, il profilo estratto dall'algoritmo di Steger viene elaborato da un altro algoritmo per trovare i due vertici del trapezio, di distanza nota, che mapperanno quindi il campo di vista del sensore. Ciò si fa interpolando i fianchi e la base minore del trapezio con tre rette e cercando la loro intersezione, cioè i vertici del trapezio di riferimento.

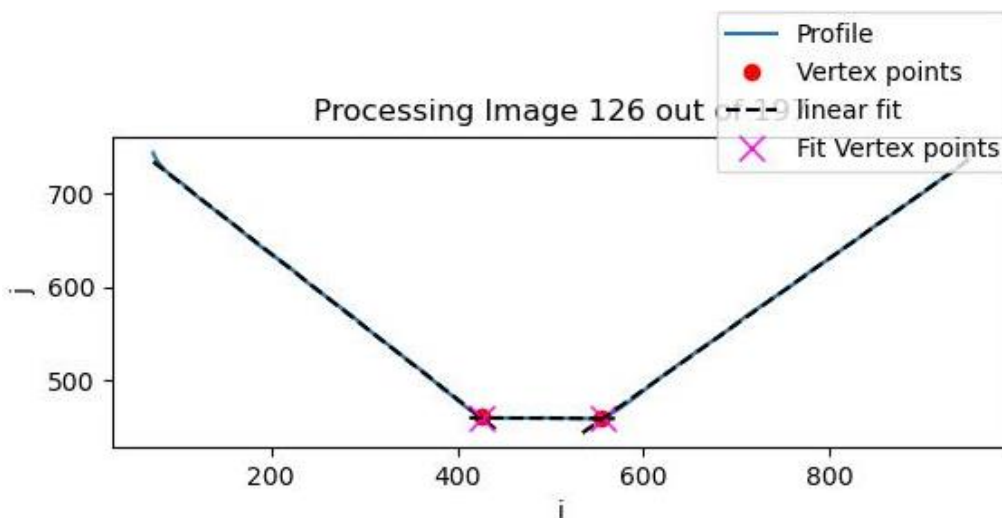


Figura 46-Vertici trapezio

I vertici, ricavati da tutte le immagini acquisite, vengono infine plottati nello spazio  $(i, j)$  permettendo di vedere la distribuzione dei punti che saranno utilizzati per la taratura del G3F.

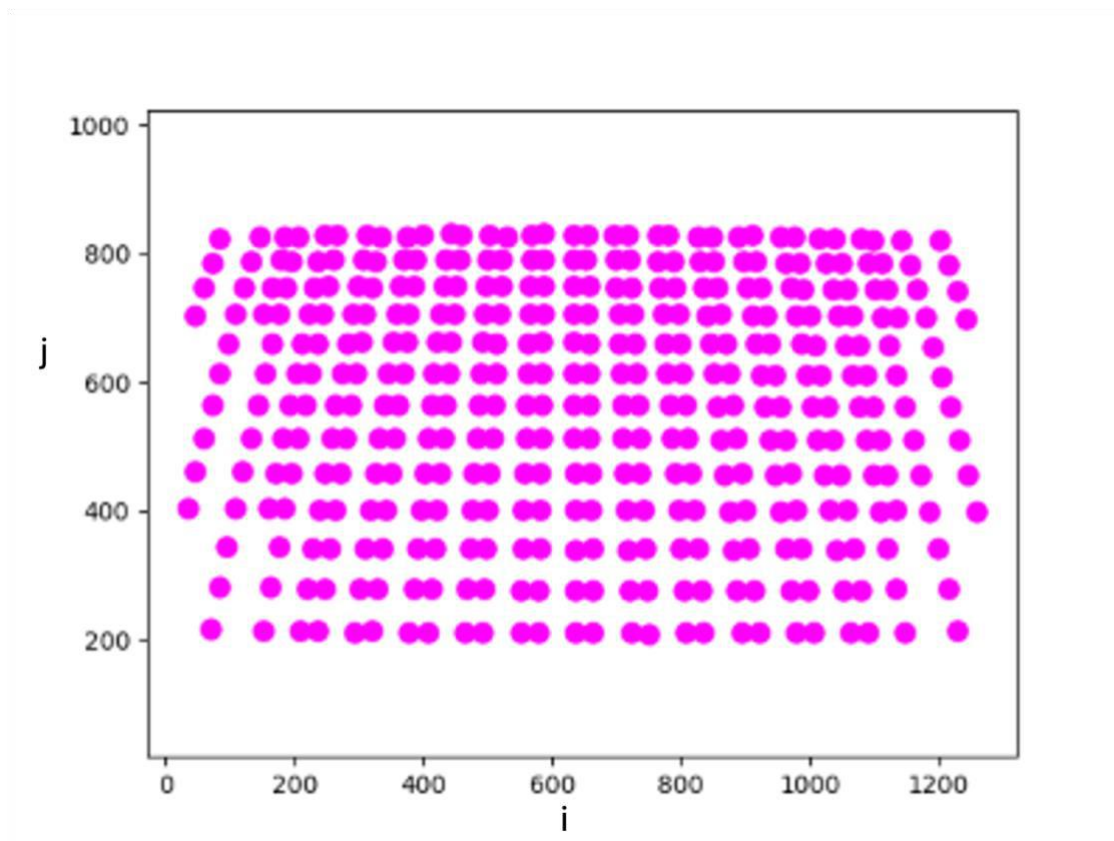


Figura 47-Griglia punti taratura

### 3.4 Risultati della taratura

Come è stato già detto, la taratura mappa le coordinate X e Z del mondo reale in funzione delle coordinate in pixel  $i, j$  e utilizza come modello di taratura una polinomiale del quinto ordine per quanto riguarda la coordinata X e di quart'ordine per quanto riguarda la coordinata Z.

Questo approccio tiene conto intrinsecamente di tutte le componenti di incertezza, distorsione ottica, geometria della triangolazione e i parametri della fotocamera.

La Figura 48 e la Figura 49 riportano le nuvole di punti dei dati  $X(i,j)$  e  $Z(i,j)$  acquisiti nel processo di taratura del G3F e interpolate dalle superfici di adattamento polinomiali.

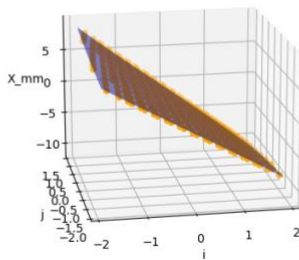


Figura 48-Fitting piano coordinata X

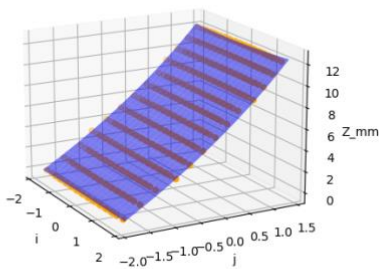


Figura 49-Fitting piano coordinata Z

Per verificare che il grado del polinomio scelto permetta un fitting corretto, nell'algoritmo è stata implementata una funzione che rappresenta i residui in X attraverso un istogramma.

I residui, infatti, danno la misura di quanto la superficie di adattamento polinomiale approssimi correttamente la nuvola di punti.

Se il grado del polinomio è corretto la distribuzione dei residui sarà casuale e tale da permettere il fitting con una curva gaussiana (Figura 50), mentre con un grado del polinomio non corretto la distribuzione dei residui non sarà assimilabile ad una gaussiana (Figura 51).

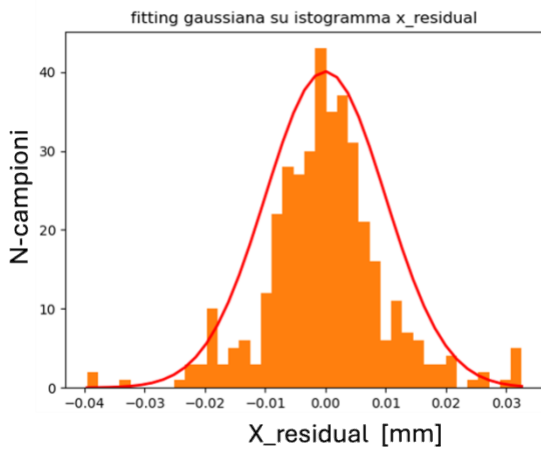


Figura 50-Fitting corretto

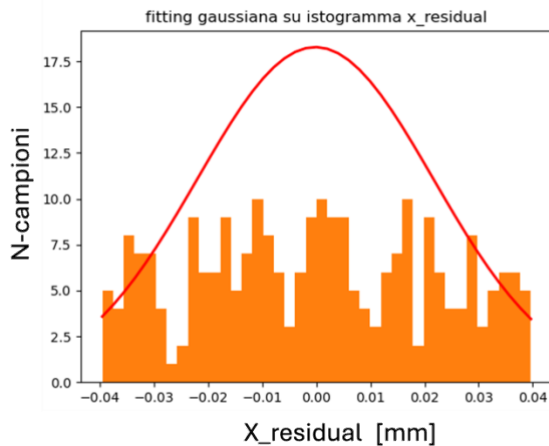


Figura 51-Fitting non corretto

### 3.4.1 Stima dell'incertezza di taratura e dello strumento:

L'incertezza di taratura  $U_{taratura}$  è fondamentale per quantificare l'incertezza dello strumento  $U_{strumento}$ :

$$U_{strumento} = \sqrt{U_{taratura}^2 + U_{riferimento}^2}$$

Nel caso del dispositivo G3F,  $U_{taratura}$ , è stata calcolata stimando la dispersione statistica dei residui in X e in Z.

All'interno dell'algoritmo attraverso cui si ottengono i parametri di taratura, infatti, viene calcolata la deviazione standard dei residui (in mm).

```
SOMMA RESIDUI X : 3.7474167465553347
SOMMA RESIDUI Z : 3.012473842123242
MEDIA RESIDUI X : 0.009511210016637905
MEDIA RESIDUI Z : 0.007645872695744272
SIGMA_X : 0.0305636224417333
SIGMA_Z : 0.010797994373421679
```

Figura 52-Deviazione standard dei residui

Considerando una distribuzione di probabilità normale (con fattore di copertura  $k=2$ ) avremo che l'intervallo di confidenza dell'incertezza di taratura  $U_{Taratura}$  sarà esprimibile come:

$$U_{Taratura} = \pm 2\sigma$$

dove  $\sigma$  è la deviazione standard dei residui.

Discriminando per la coordinata X e per la Z avremo:

$$U_{Taratura_x} = \pm 2\sigma_x$$

$$U_{Taratura_z} = \pm 2\sigma_z$$

Poiché il target di taratura è stato prodotto internamente è impossibile quantificare la  $U_{riferimento}$  ovvero il contributo sull'incertezza dato dal target di taratura. Tuttavia, poiché solitamente  $U_{riferimento}$  è molto più piccola della  $U_{Taratura}$ , possiamo con buona approssimazione trascurarla.

Così facendo avremo che l'incertezza dello strumento si potrà confondere con l'incertezza di taratura.

$$U_{Strumento} = U_{Taratura} = \pm 2\sigma$$

### **3.5 Confronto tarature di dispositivi diversi**

In una produzione industriale di serie, se la produzione fosse ripetibile, si potrebbe evitare di tarare ogni sensore prodotto e si potrebbe invece applicare a tutti la medesima taratura.

Ciò abbatterebbe i costi di produzione per la quota parte inerente alla taratura.

Tuttavia, va valutato se questo approccio sia possibile.

Pertanto, avendo effettuato tarature su diversi dispositivi G3F è stato effettuato un confronto tra le varie funzioni di taratura per capire se c'è o no sufficiente ripetibilità.

### 3.5.1 Griglia fittizia di punti elaborata tramite file di taratura

È stata definita una griglia fittizia di punti (i,j) che coprisse uniformemente l'estensione del campo di misura del sensore.

La griglia è stata poi elaborata utilizzando i parametri di taratura dei diversi dispositivi per ottenere, sempre in maniera fittizia, gli stessi punti ma con coordinate (X, Z).

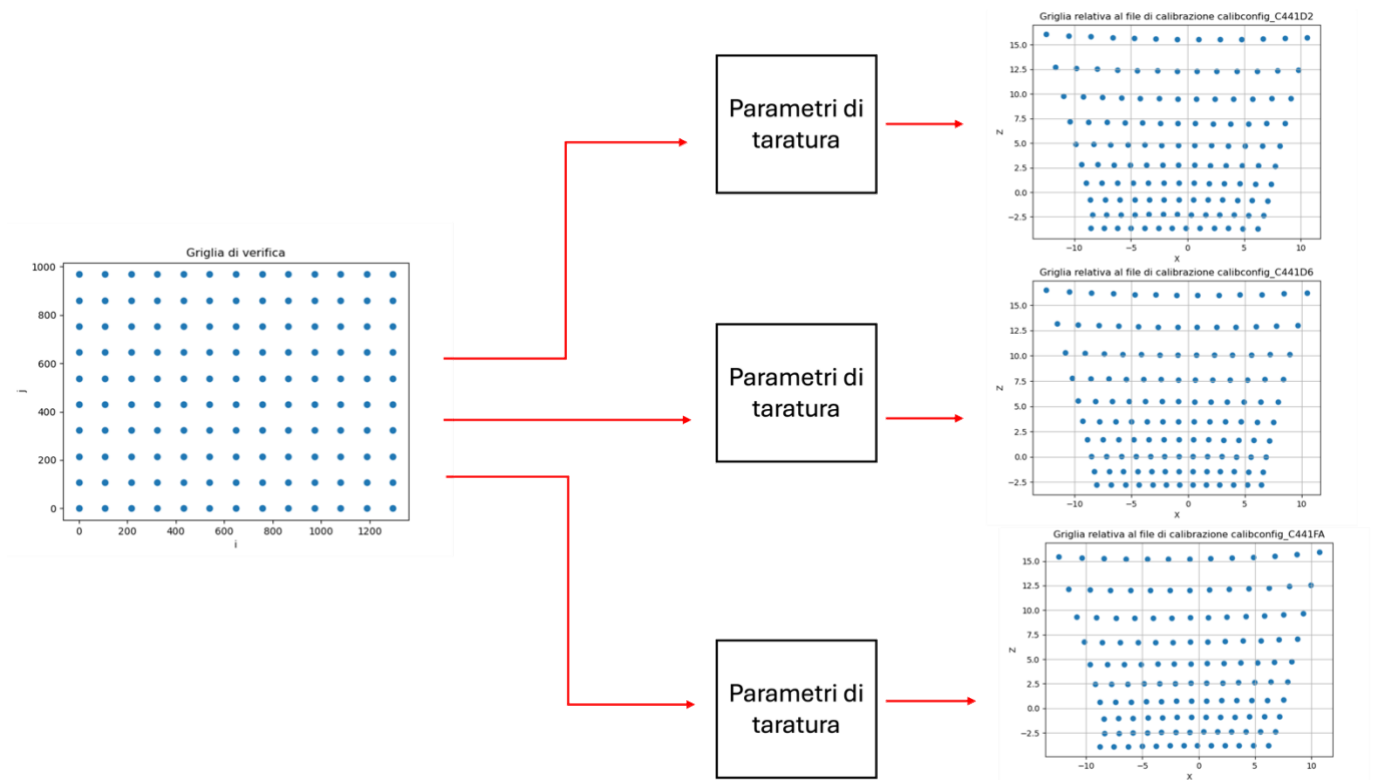


Figura 53-Confronto tarature



### 3.5.2 Risultati analisi

Dal plot sovrapposto in Figura 54 si osserva come i punti dopo l'elaborazione abbiano coordinate simili, che permettono di clusterizzarli, ma comunque troppo diverse per poter affermare che la stessa taratura, possa essere utilizzata indifferente per tutti i dispositivi G3F.

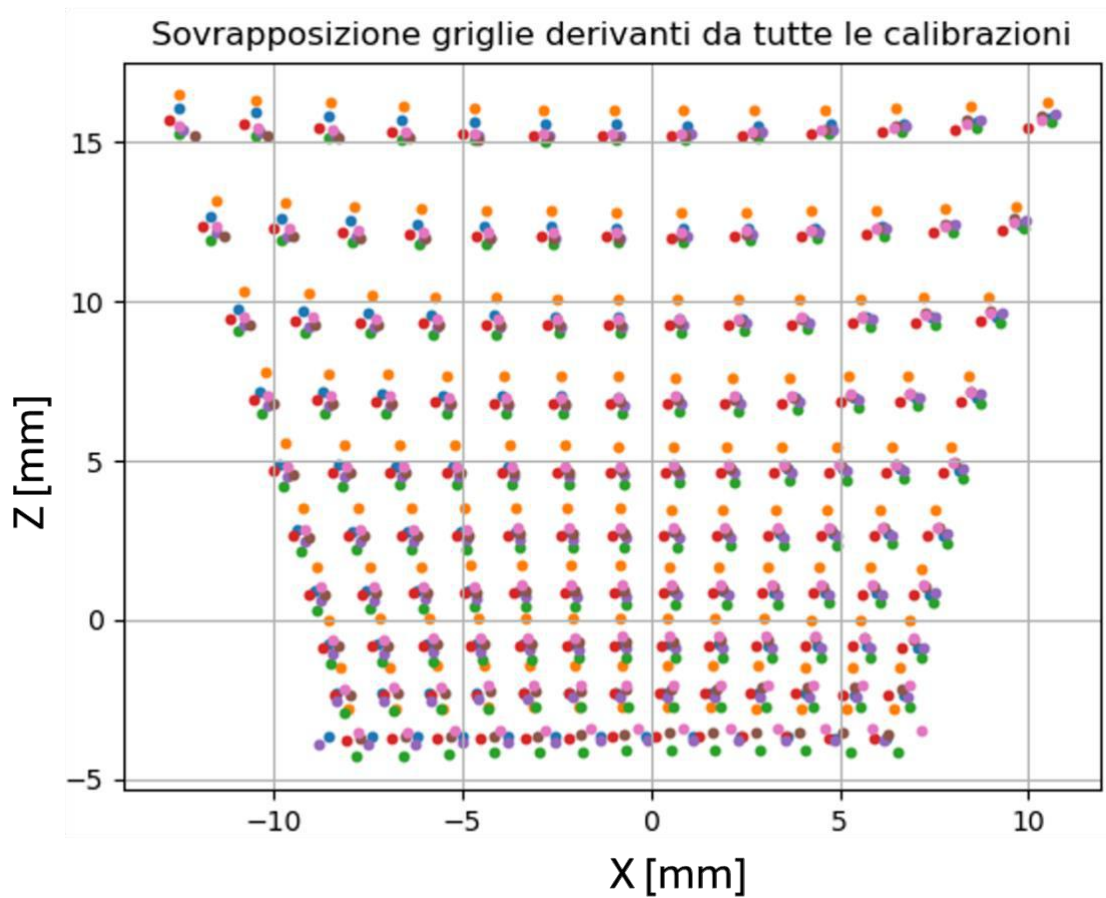


Figura 54-Tarature sovrapposte

Di seguito viene fatto uno zoom, su un solo cluster, per stimarne la dispersione in X e Z.

La dispersione in X e Z esprime di fatto quanto sarebbe più incerto il sistema se non venisse tarato individualmente.

Come mostrato in Figura 55 si ha:

- Dispersione in X = 0.7 mm;
- Dispersione in Z = 1.3 mm.

È chiaro quindi che la dispersione, sia in X che in Z, sia troppo elevata per poter utilizzare la stessa taratura per tutti i dispositivi G3F.

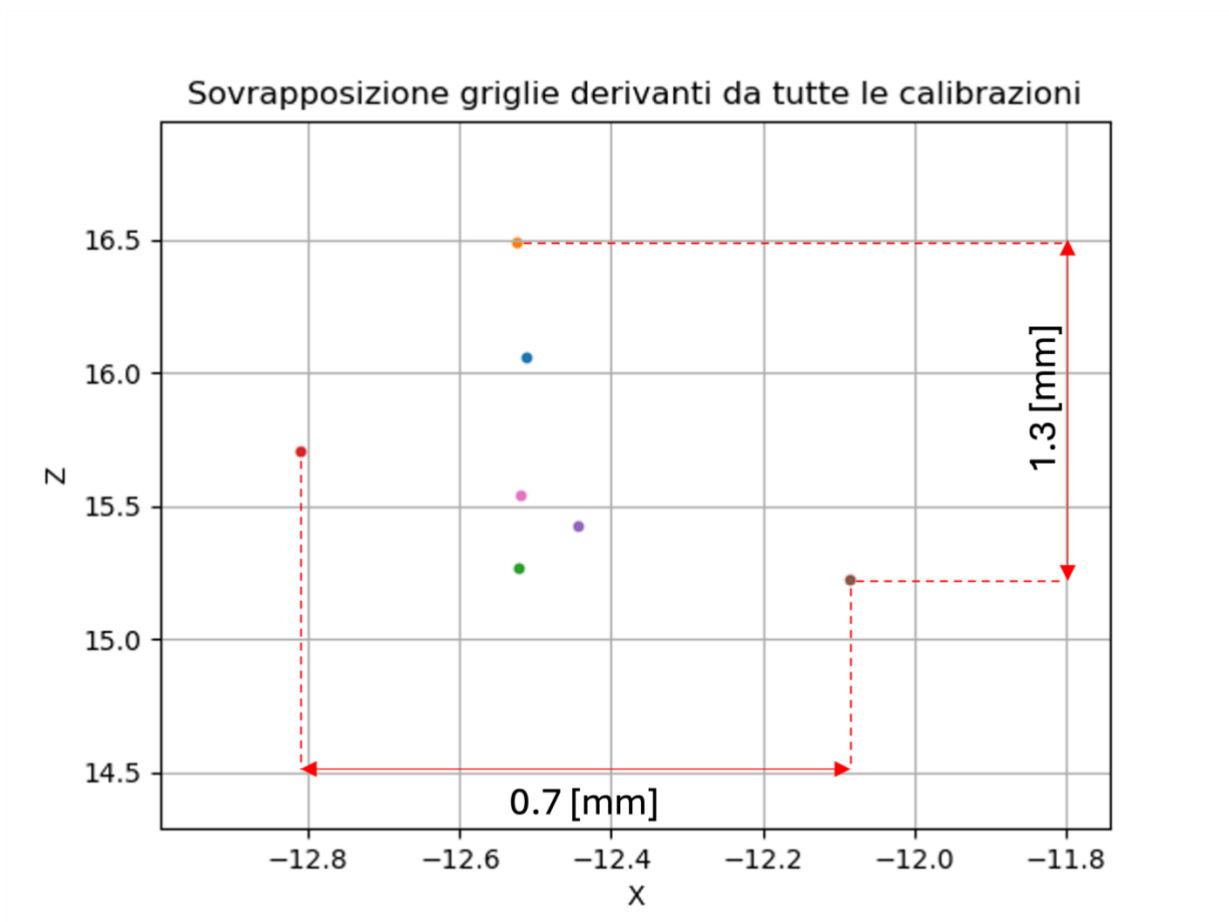


Figura 55-Dispersione cluster tarature differenti

## 4 Conclusione e sviluppi futuri

L'obiettivo generale della mia tesi è l'analisi e il miglioramento delle prestazioni metrologiche di un sensore a triangolazione di linea laser portatile wireless, il dispositivo IoT denominato G3F progettato e prodotto dalla start-up U-Sense.it srl per la misura in linea di produzione di profili geometrici e dell'allineamento di parti (gap&flush).

Gli obiettivi specifici che ho perseguito sono stati:

- l'ottimizzazione delle prestazioni in relazione alle caratteristiche (colore) della superficie oggetto della misura; si è in particolare agito, cambiando in maniera automatizzata i parametri di intensità del laser e di esposizione della camera;
- l'automatizzazione della procedura di taratura dello strumento;
- l'analisi comparativa della ripetibilità delle tarature di diversi esemplari dello strumento.

La prima operazione eseguita è stata quella di trovare, variando i parametri di Exposure Time e Duty Cycle, la condizione di ottimo su tutti i colori di una palette fornita da un partner industriale del progetto OpenZDM.

A quel punto i colori della palette con una condizione di ottimo, derivante da parametri simili di laser e camera, sono stati aggregati all'interno dello stesso insieme chiamato "Classe Colore".

Per ogni "Classe Colore" è stato trovato il giusto trade-off dei parametri che permettesse l'ottenimento di un'immagine ben definita e non saturata su tutti i colori facenti parte dell'insieme.

Sono state così definite sei “Classi Colore” che contenessero tutti i colori della palette.

Successivamente, elaborando i dati acquisiti dal sensore colore, è stato ricavato un parametro “p” che calcolato per ogni colore della palette e ordinato, clusterizzasse le varie tonalità secondo le “Classi Colore” precedentemente definite.

Successivamente mi sono occupato della procedura di taratura del dispositivo.

La taratura è stata eseguita utilizzando il metodo diretto ed un banco con slitte motorizzate che movimentano un artefatto di forma trapezoidale nello spazio di lavoro lungo gli assi X e Z. La sequenza dei dati acquisiti è stata processata mediante regressione lineare verificando che i coefficienti associati alla funzione interpolante permettessero di convertire con una precisione accettabile le coordinate (i,j) espresse in pixel in coordinate (x,z) del mondo reale, espresse in millimetri.

La taratura è risultata efficace utilizzando una funzione polinomiale di quinto ordine per quanto riguarda X e di quarto ordine per quanto riguarda la Z. La deviazione standard dei residui in X risulta essere 0.03 mm, mentre quella dei residui in Z 0,01 mm.

Infine, sono state comparate tarature fatte su diversi dispositivi G3F per capire se una stessa taratura potesse andare bene per tutti, in modo da abbattere i costi di produzione per la quota parte inerente alla taratura.

Quest’ultima analisi ha dato, tuttavia, esito negativo poiché utilizzando la stessa taratura, in molti casi, il sistema sarebbe diventato troppo incerto.

Dunque, si può concludere che il metodo di taratura implementato consente di calcolare valori di gap e flush attendibili, con un'incertezza di 0,06 mm lungo X e 0,02 mm lungo Z.

L'incertezza dello strumento è stata ricavata trascurando il contributo di incertezza del riferimento usato in taratura.

Per sviluppi futuri, nell'ottica di quantificare in maniera più accurata l'incertezza dello strumento, si potrebbe realizzare l'artefatto di taratura per asportazione di truciolo in modo da poter considerare il contributo dell'incertezza dello stesso sull'incertezza totale dello strumento.

## Bibliografia:

1. Chiariotti Paolo, Giulietti Nicola, Paone Nicola, Castellini Paolo. [EP4341642 \(A1\) - APPARATUS, METHOD AND COMPUTER PROGRAM FOR MEASURING A SPACE AND / OR AN ALIGNMENT AND / OR AN ANGLE OF MISALIGNMENT BETWEEN A FIRST SURFACE AND A SECOND SURFACE, 2022-11-24;](#)
2. Cognex, [Introduzione alla visione industriale](#). Guide per principianti, febbraio 2018.;
3. Tesi: Jun Li Zheng, [CARATTERIZZAZIONE E TARATURA DI UN SISTEMA A TRIANGOLAZIONE LASER WIRELESS PORTATILE PER IL CONTROLLO QUALITÀ IN LINEA DI PRODUZIONE;](#)
4. <https://it.m.wikipedia.org/wiki/File:Lens3.svg>;
5. <https://www.buecherundbilder.de/photolexikon/b.html>;
6. <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/ccd-sensor-architectures>;
7. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3300>;
8. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/11/3300>;
9. <https://www.qfp-service.it/gapgun-pro>;
10. <https://trends.directindustry.com/nextsense-gmbh/project-197244-187442.html>;
11. <https://www.asidatamyte.it/profilometro-laser-gauge/>;
12. <https://www.gophotonics.com/community/what-is-the-duty-cycle-of-a-laser>;

13. <https://www.nxp.com/design/design-center/development-boards-and-designs/i-mx-evaluation-and-development-boards/4k-dart-bcon-for-mipi-camera-module-for-i-mx-8m-plus-applications-processor:MIPI-CAMERA>;
14. Paone Nicola, Castellini Paolo, Chiariotti Paolo, Minnetti Elisa. [SYSTEM FOR MEASURING GAP AND FLUSH 2019-09-06](#);
15. [https://hamamatsu.su/files/uploads/pdf/2\\_фотодиоды\\_и\\_ф\\_д\\_линейки/кремниевые\\_фотодиоды\\_%28si%29/цветовые\\_детекторы/s13683-02wt.pdf](https://hamamatsu.su/files/uploads/pdf/2_фотодиоды_и_ф_д_линейки/кремниевые_фотодиоды_%28si%29/цветовые_детекторы/s13683-02wt.pdf);
16. [www.lmi3d.com](http://www.lmi3d.com);
17. <https://www.nextsense-worldwide.com/en/industries/automotive/automated-gap-and-flush-in-line.html>;
18. <https://www.cognex.com/it-it/industries/automotive/chassis-systems/gap-and-flush-inspection>;
19. <https://www.sensorinstruments.de/whatiswhat.php?subpage=15&language=it>;
20. JCGM 104:2009, Evaluation of measurement data, [An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents](#);
21. <https://www.physikinstrumente.com/en/?type=5600&downloadUId=1216&downloadFileUId=1970>;
22. [Steger, C. An unbiased detector of curvilinear structures.1998, 113–125](#);

23. Julieta Tiscareño, José A. Albajez, Jorge Santolaria, [Analysis of different camera calibration methods on a camera-projector measuring system](#), [Procedia Manufacturing](#), 2019, Pages 539-546;
24. <https://www.physikinstrumente.com/en/?type=5600&downloadUid=1216&downloadFileUid=1970>;
25. ISO-GUM DOI: <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>;