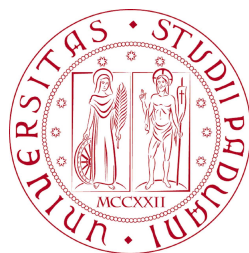


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



Finito di scrivere il giorno 11 ottobre 2012 utilizzando L^AT_EX 2_ε

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

—
DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

—
TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
DELL'AUTOMAZIONE

SISTEMA DI MISURA 3D PER COMPONENTI DELLA CALZATURA

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

LAUREANDO: BRUNO MILANI

ANNO ACCADEMICO 2011-2012

*alla mia famiglia,
che nonostante tutto è sempre l'asse portante di vita,
della mia vita*

“ Follia è fare sempre la stessa cosa aspettandosi risultati diversi ”

ALBERT EINSTEIN

Indice

Sommario	XI
Introduzione	XIII
1 L'automazione nel settore calzaturiero	1
1.1 Aree d'intervento nel processo produttivo	2
1.2 Idea di progetto	5
2 Visione Artificiale	9
2.1 Sistema di Visione	10
2.1.1 L'ottica	12
2.1.2 Il sensore	18
2.1.3 Tipi di sensori	20
2.1.4 La telecamera digitale	21
2.1.5 Il sistema di illuminazione	25
2.2 La triangolazione laser	29
2.2.1 I metodi di proiezione	30
3 Il simulatore	35
3.1 I file IGES e Nurbs	36
3.2 Guida al simulatore	39
3.3 Alcune considerazioni	42
4 Apparato Hardware	43
4.1 Accenni sulla struttura meccanica	43
4.2 Progettazione del sistema di visione	44

4.3	Il laser	47
4.3.1	Tipi di laser	47
4.4	Telecamera e ottica	50
4.5	Fase di calibrazione	54
4.5.1	Focale e distanza	56
4.5.2	Relazione tra Z ed y	56
4.5.3	Definizione del piano laser	58
4.6	Il controllo	59
4.6.1	Introduzione ai microcontrollori	59
4.6.2	Il dsPIC30F4011	60
5	Software del sistema di visione	65
5.1	Coordinate pixel e spaziali	65
5.2	Acquisizione con MATLAB	67
5.3	Elaborazione dell'immagine con Matlab	67
5.3.1	Calcolo dello scostamento	68
5.3.2	Confronto della nuvola di punti	73
5.4	Alcuni risultati finali	76
	Conclusioni	79
A	Il modello della telecamera	83
A.0.1	Il sistema di riferimento	85
A.0.2	La trasformazione prospettica	87
B	Architetture DSP e microcontrollori	89
B.1	Architettura Von Neumann e Harvard	89
C	La funzione Regionprops	93
D	Applicazioni laser	95
	Bibliografia	97

Sommario

L'oggetto di questa tesi è lo studio di fattibilità di un sistema automatico per il settore calzaturiero dell'alta moda. La funzione che deve svolgere è quella di eseguire un controllo sui componenti in ingresso, provenienti dai fornitori, e scartare eventuali elementi non conformi alle specifiche richieste. In questo lavoro l'attenzione è stata posta in particolare sulle forme in materiale polimerico, e attorno ad esse si è sviluppata una ricerca sulle modalità di misurazione e confronto. Per fare questo ci si è serviti di un sistema di visione composto da due laser e di una telecamera le cui immagini sono state acquisite attraverso rotazioni successive della forma. Lo scopo è quello di rilevare ben definite grandezze e confrontarle con quelle archiviate in un database, per consentirne il riconoscimento e valutarne l'idoneità o meno.

Introduzione

L'automazione, fin dalla sua introduzione nell'ambito industriale, si pone come obiettivo quello di ridurre al minimo l'intervento dell'uomo all'interno dei processi produttivi. I vantaggi legati alla sostituzione dell'operatore umano con un sistema di lavoro automatizzato si esprimono in termini di maggior velocità di lavorazione, maggior affidabilità e ripetibilità nei compiti assegnati. Tutto ciò si traduce in minori costi per l'impresa nel corso dell'esercizio produttivo ed un elevato e costante standard qualitativo dei prodotti finiti. Il ricorso all'automazione consente inoltre di portare a termine compiti altrimenti impossibili per gli esseri umani, come la gestione di carichi pesanti, l'interazione con sostanze pericolose o lavorazioni per le quali è richiesta un'elevata precisione.

Con l'avanzare dello sviluppo tecnologico, si allarga di conseguenza anche il campo dei processi industriali candidati alla conversione in senso automatizzato: avviene così che lavorazioni ritenute finora esclusivamente manuali divengano oggetto di studio, aprendo così nuove opportunità di ottimizzazione per le relative catene produttive. L'utilizzo dei sistemi di visione artificiale e di altri sistemi di percezione consentono di aumentare la versatilità e la sfera di applicazione dei sistemi automatizzati, permettendo a queste macchine di interagire con l'ambiente che le circonda in modo intelligente.

Il lavoro di tesi che viene presentato nelle pagine seguenti si inserisce nel contesto del progetto che ha come obiettivo finale l'introduzione nel ciclo produttivo delle calzature un sistema con il più alto livello di automazione possibile, in modo da ridurre gli interventi umani, che risultano comunque pur sempre necessari in diverse operazioni lungo il processo.

Come è ben noto infatti la sostituzione dell'operatore umano con un sistema automatico comporta notevoli vantaggi in termini di costo, tempo, ripetibilità e affidabilità delle operazioni. È altrettanto vero che in un settore come quello della calzatura d'alta moda, dove molti passaggi sono ancora svolti manualmente e affidati all'esperienza dell'operatore e il prodotto gode di una certa flessibilità sia materiale che produttiva, risulta difficoltoso andare ad effettuare questo passaggio.

L'idea di base inizialmente è quella di creare un prototipo di sistema di visione in modo da poter, mediante triangolazione laser, ricostruire gli oggetti scansionati con una nuvola di punti per poter successivamente andare a visionarne eventuali difetti (e se così fosse poter scartare l'oggetto all'inizio della catena produttiva). In particolare gli oggetti specifici da scansionare riguardano alcune forme in resina sintetica in ingresso nelle aziende che sono degli ausili per la realizzazione delle calzature. Si tratta quindi di un vero e proprio controllo di qualità.

Si è svolto dunque uno studio di fattibilità di un sistema automatico che mediante dispositivi di visione e di movimentazione, consente la misurazione, il confronto con le specifiche richieste e la selezione degli oggetti idonei.

Il **primo capitolo** vuol essere una breve introduzione al settore calzaturiero dell'alta moda, con particolare attenzione al Distretto Calzaturiero della Riviera del Brenta. Importante in questa sede focalizzarsi sulla aree di intervento del processo produttivo al fine così di definire il linee di progetto che verrà documentato in questa tesi.

Nel **secondo capitolo** vengono introdotte alcune nozioni sulla visione artificiale, con i vari elementi che la compongono (ottica, sensore, telecamera, sistemi di illuminazione) con uno sguardo alle molteplici applicazioni che riveste nell'industria.

Il **terzo capitolo** vede una leggera spiegazione su cosa sono i file igs, Nurbs e Nuvola di punti, concetti che affiorano durante la spiegazione del simulatore sviluppato ad hoc per lo studio essenzialmente della configurazione migliore del sistema di visione.

Il **quarto capitolo** è un'analisi dettagliata dei vari componenti, dove sono illustrate le motivazioni di determinate scelte, in più sono presenti le caratteristiche tecniche, i dimensionamenti e le verifiche effettuate per giungere al progetto finale. Attraverso questo capitolo si ha la possibilità di conoscere più nel dettaglio le strutture che compongono il sistema di visione.

Infine nel **quinto capitolo** si fa riferimento alla sola parte software del sistema di visione. Algoritmi principali di acquisizione ed elaborazione, controllo segnali di trigger e di sensori induttivi.

Capitolo 1

L'automazione nel settore calzaturiero

Questo progetto nasce dalla collaborazione con il *Politecnico Calzaturiero scarl* e con l'azienda *B.Z.Moda S.r.l.* specializzata nella produzione di calzature d'alta moda.

La collaborazione è nata con l'intento di introdurre una fetta sempre più consistente di automazione nel processo produttivo e nei macchinari impiegati in questo settore. La cosa risulta di più difficile applicazione rispetto ad altri settori industriali in quanto questa realtà presente nel territorio Veneto è nata dalle piccole botteghe artigianali e tutt'oggi è ancora basata su diverse lavorazioni di tipo artigianale; si aggiunga a ciò la difficoltà di utilizzare componenti e semilavorati tutt'altro che rigidi, e quindi difficili da gestire, e sui quali vengono eseguite delle operazioni e valutazioni che necessitano dell'esperienza di personale qualificato. Bisogna perciò cercare di far convivere tradizione e innovazione, antichi saperi e tecniche all'avanguardia per fornire una risposta adeguata in termini di competitività ai ritmi crescenti imposti dal mercato mondiale.

Nel settore delle calzature, ampi sforzi in questa direzione sono già stati fatti per la produzione di scarpe con suola in gomma: esistono infatti molti esempi di linee produttive automatiche o semi-automatiche nelle quali sono impiegate con profitto delle celle robotizzate, al pari di quanto accade nelle linee di assemblaggio del settore automobilistico.

Più problematica si presenta invece la ricerca di soluzioni automatizzate da introdurre nelle linee produttive delle calzature per l'alta moda (settore in cui si inseriscono la maggior parte dei calzaturifici del Distretto Calzaturiero Veneto) poiché le richieste in termini di precisione, accuratezza e qualità del prodotto finito sono molto più stringenti rispetto a quelle tipiche della produzione di massa.

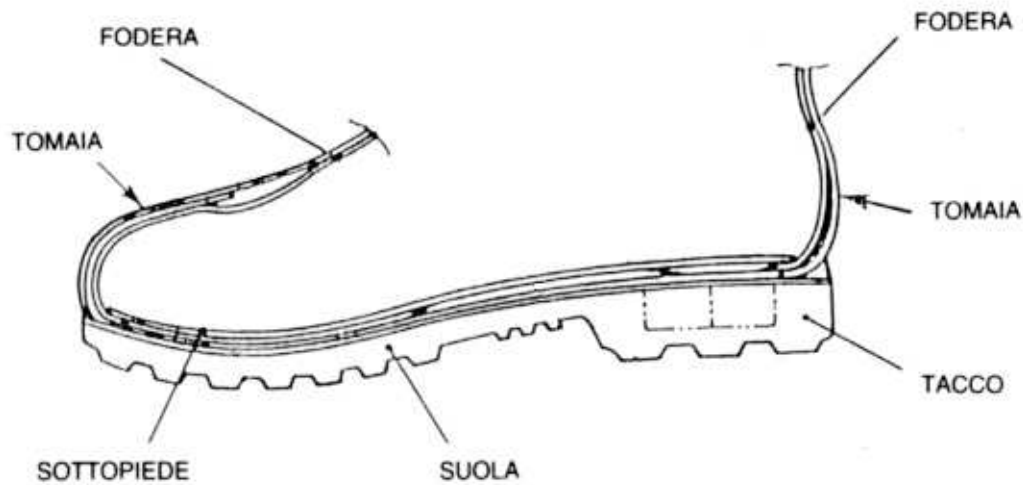


Figura 1.1: Disegno schematico di una sezione di una scarpa: le parti principali sono la suola (costituita a sua volta dal tacco, e dalla soletta) e la tomaia che presenta la parte superiore della calzatura (anch'essa costituita a sua volta dalla mascherina, puntina, i riporti e la fodera)

1.1 Aree d'intervento nel processo produttivo

Il flusso delle attività del sistema produttivo delle aziende calzaturiere (vedi 1.3) difficilmente si svolge completamente all'interno di una sola azienda. La costruzione di una calzatura rappresenta infatti una complessa operazione di montaggio e di assemblaggio di tutta una serie di componenti semilavorati¹.

La maggior parte delle aziende dunque si avvale di una serie di realtà produttive, principalmente strutturate in piccole dimensioni, che si dedicano alla

¹Per una descrizione più dettagliata del processo produttivo si rimanda alla lettura di [1]



Figura 1.2: Sullo sfondo un esempio di manovia costituita da una giostra multilivello. Poi una serie di lavorazioni standard quali (partendo da in alto a destra) applicazione del sottopiede, inserimento del puntale e contrafforte, premonta e monta, montafianchi, monta boetta, levachiodi ribattitura dei chiodi fissati in fasi precedenti e tracciatura

realizzazione dei singoli componenti quali tomaifici, solettifici, tacchifici, formifici, ecc. Inoltre un'altra peculiarità del comparto calzaturiero rispetto alle altre produzioni industriali è la diffusione del lavoro a domicilio per alcune specifiche fasi di lavorazione, come ad esempio la realizzazione della tomaia.

Lungo tutto il processo che vede la nascita e la produzione di una calzatura sono presenti sia macchine automatiche che semi-automatiche, ovvero che richiedono comunque la presenza di un operatore per svolgere l'azione richiesta, nonché vi è l'utilizzo sempre più diffuso di calcolatori e software che accelerano i tempi di progettazione del prodotto.

Nonostante ciò la spinta a migliorare in termini di produttività crescente, preservando la qualità del prodotto, deve necessariamente essere sinonimo di un'ulteriore evoluzione tecnologica che coinvolga tanto la fase di creazione quanto quella di produzione. Mentre nella prima l'ulteriore passo avanti dev'essere fat-

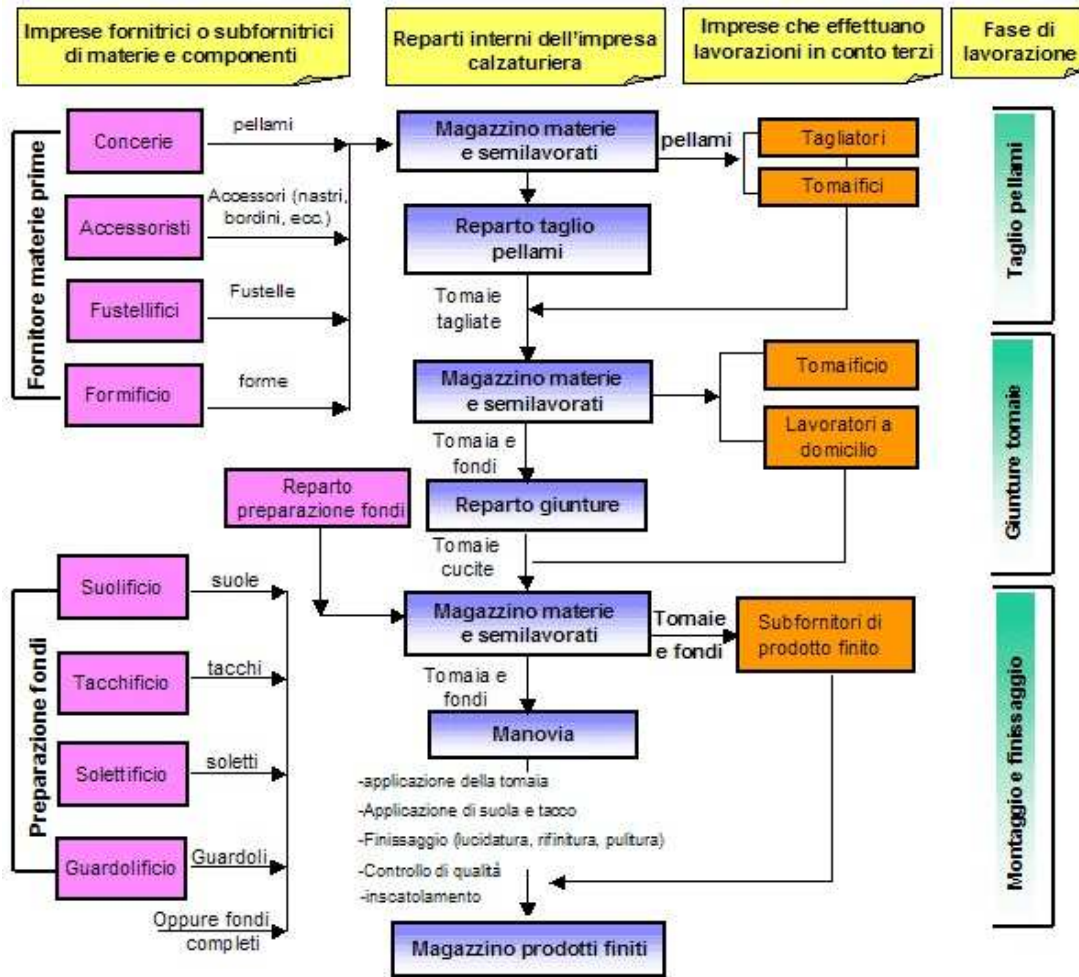


Figura 1.3: Schema del ciclo produttivo della calzatura

to prevalentemente in termini di software, nella seconda è lo sviluppo di nuove tecniche innovative che può dare una spinta in più; ed è proprio a quest'ultima parte che presteremo la nostra attenzione.

Di tutte le fasi di cui si compone il processo emerge che la più gravosa in termini di tempo e costo è proprio l'operazione di cucitura e orlatura, che tutt'oggi si svolge interamente a mano. La necessità sarebbe quindi quella di introdurre una certa automazione durante questa fase di lavorazione, ma essa comprende operazioni non standard e sempre diverse, ed è quindi molto difficile che nel breve periodo si riescano a trovare delle soluzioni automatizzate che siano concorrenziali a livello economico e tempistico rispetto ai metodi di lavorazione attuali.

Maggiori spazi di intervento si trovano invece nella linea di montaggio delle cal-

zature, considerando sia la manovra che i sistemi di gestione dei magazzini. In particolare si possono individuare tre filoni principali da seguire per migliorare il processo produttivo:

1. ottimizzazione e razionalizzazione del layout dell'impianto e riorganizzazione dei flussi di materiali e semilavorati;
2. intervento sui singoli macchinari utilizzati nella produzione;
3. controllo di qualità dei semilavorati in ingresso ai calzaturifici allo scopo di introdurre nella linea di montaggio solo componenti esenti da difetti e avviamento di controlli di qualità lungo le fasi della produzione al fine di rendere tracciabile il prodotto.

Tralasciando l'approfondimento dell'aspetto gestionale e dello sviluppo attuabile sulle singole macchine, in questa sede ci si focalizzerà invece sul terzo punto citato.

1.2 Idea di progetto

Il controllo della qualità del prodotto rappresenta una parte fondamentale nella produzione della scarpa d'alta moda.

Ogni singola parte generalmente viene controllata dagli operatori durante la fase di lavorazione, ma il controllo viene eseguito solo saltuariamente, per i tempi d'esecuzione del prodotto che devono essere rapidi e concludersi in tempi ben determinati. Ma altrettanto importante è attuare una verifica di conformità sui semilavorati provenienti dalle aziende fornitrici, in quanto ciò eviterebbe di eseguire lavorazioni su prodotti che presentano difetti e che comunque porterebbero a scartare la calzatura quando viene eseguito il controllo



Figura 1.4: Alcune forme scansionate nel banco prova

finale prima dell'imballaggio per la sua spedizione. Attualmente tale operazione è affidata ad un operatore che svolge un controllo sui lotti in modo manuale.

L'idea è quindi quella di automatizzare proprio questa parte iniziale del processo, realizzando un sistema che sia in grado di discernere autonomamente tra i semilavorati idonei da mandare in produzione e quelli invece da scartare, e possa quindi eventualmente farlo sui lotti interi anziché su un campione limitato, effettuando pertanto un controllo qualità al 100%. Alcune specifiche di partenza di carattere generale discusse con l'azienda in questione dovranno essere:

- *precisione*: il massimo errore di misura concesso al dispositivo deve essere minore o uguale al decimo di millimetro. Questo comporta la progettazione di un sistema molto rigido e compatto al fine di minimizzare possibili vibrazioni indotte dal movimento dei vari componenti.
- *flessibilità*: il sistema deve essere in grado di valutare le forme in molteplici taglie, il che si traduce in un sistema molto flessibile capace di adattarsi rapidamente con poche modifiche hardware da parte dell'operatore.
- *rapidità*: il tempo di analisi da svolgere inizialmente off-line dovrà essere il più breve possibile per agevolare l'ingresso dei materiali all'interno della catena produttiva senza inutili code dovute alla verifica della conformità.

Sulla base di quanto detto si è giunti ad un primo prototipo di sistema di visione riportato nella figura seguente per il controllo di vari tipi di forme.

In questa sede verrà analizzata essenzialmente la sola parte di visione in ogni sua parte (analisi di fattibilità, scelta dei componenti, sviluppo software) mentre per approfondire meglio la progettazione della parte meccanica (struttura della cella, e movimentazione dell'oggetto da visionare) si rimanda alla lettura di [2]. Nei prossimi capitoli verrà esposto le varie tappe di studio che hanno portato a creare la cella di misura come riportata in figura 1.5. In primis verrà comunque presentato le caratteristiche di un sistema di visione.



Figura 1.5: Prototipo della cella di misura

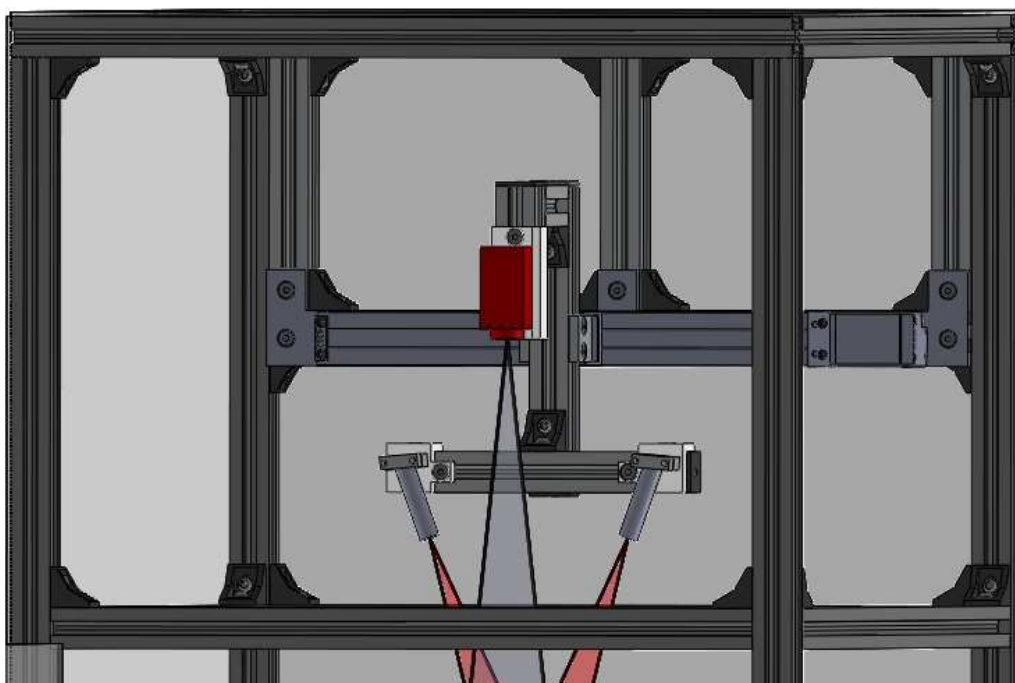


Figura 1.6: Particolare della cella nel quale si evidenzia l'asse lineare.

Capitolo 2

Visione Artificiale

Per sistema di visione si intende un insieme di componenti hardware e software capaci di acquisire dal mondo circostante delle informazioni sfruttando fenomeni di tipo ottico. L'hardware è in genere costituito da un sistema di illuminazione dell'ambiente di lavoro, da una o più telecamere per la ripresa delle immagini, da un'elettronica per la loro acquisizione e da un elaboratore per il loro trattamento. Il software è formato dai programmi che elaborano l'immagine per ricavarne le informazioni desiderate che possono avere varie finalità: di controllo, classificazione, selezione, ecc.

Le grandi potenzialità applicative dei sistemi di visione ed i benefici che la loro introduzione in azienda porta in termini di miglioramento della qualità del prodotto finito, aumento della flessibilità produttiva e diminuzione dei costi di produzione si traducono in un complessivo aumento della capacità competitiva dell'impresa.



2.1 Sistema di Visione

A seconda del tipo di applicazione per cui è impiegato un sistema di misurazione 3D può essere realizzato con diverse tecniche. Il nostro interesse ricade senza dubbio sulla tecnica visiva, con la quale possiamo assolvere a molteplici problemi. Vediamone alcuni [3]:

- *riconoscimento e classificazione* di un oggetto in base a particolari caratteristiche desunte dalla sua immagine. Esso prevede una fase di apprendimento propedeutica alla fase di riconoscimento vera e propria. Esistono applicazioni caratterizzate da crescenti livelli di complessità che vanno dalla semplice corrispondenza di profili di oggetti meccanici fino al riconoscimento della fisionomia umana
- *lettura codici a barre* con i quali vengono utilizzati tipicamente lettori ottici dedicati con tecnologia laser o *CCD* e vi è la necessità di eseguire altre verifiche o controlli, come ad esempio la verifica delle date di scadenza di un prodotto
- *misurazioni di oggetti* dove si utilizzano altri componenti hardware di tipo meccanico, ad ultrasuoni, laser. Si distinguono in genere misure ad una o due dimensioni (diametri, lunghezze ed altezze) che possono essere effettuate in modo relativamente semplice per mezzo di una telecamera accoppiata ad un sistema di rilevazione della distanza dell'oggetto. L'utilizzo di tale sistema risulta particolarmente indicato per misurare oggetti fragili, difficili da raggiungere, contenuti in altri oggetti, a temperature elevate ad esempio bolle di sapone o bollicine di spumante, acciaio fuso, ecc. Un vantaggio della visione artificiale consiste anche nella possibilità di effettuare misure non convenzionali e superiori a quelle fatte con i sistemi tradizionali, ad esempio misurando aree di forme complesse.
- *verifica presenza/assenza* utilizzando algoritmi di riconoscimento in modo da verificare la mancanza di parti di un oggetto o il loro errato posizionamento permettendo così di adattare la modalità di esecuzione del processo

ad un insieme molto vasto di disposizioni di parti non note a priori. Il sistema visivo può diventare in questi casi la guida di un robot, in grado di definirne orientamento e posizione in un ambiente mutevole.

- *verifica di colori e tonalità* per definire la qualità di una stampa, oppure alla verifica del funzionamento e taratura automatica di monitor televisivi, o del colore delle pietre preziose

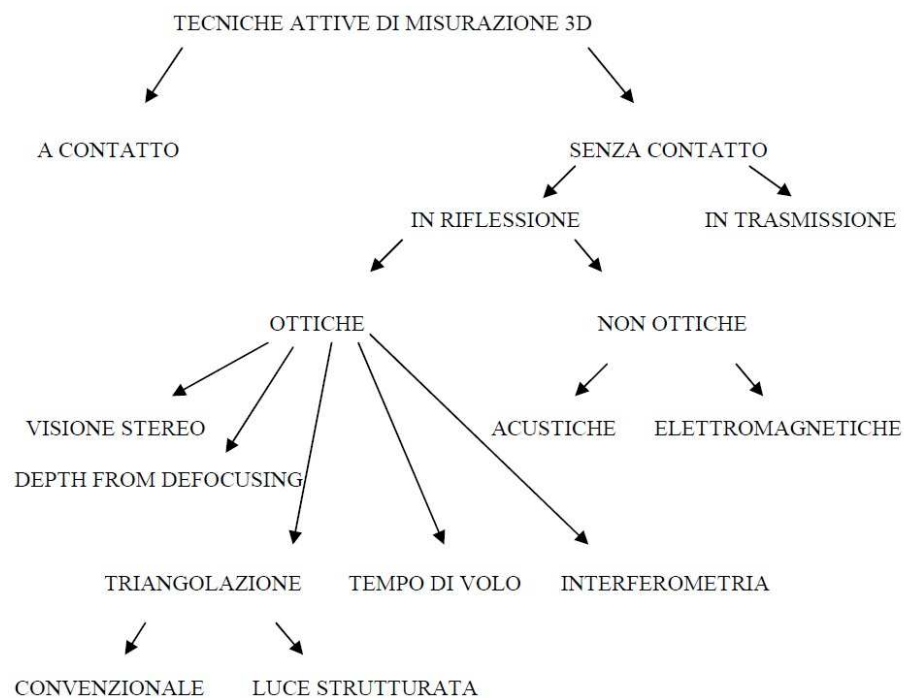


Figura 2.1: Varietà delle tecniche di misurazione 3D attualmente possibili

Focalizzando la nostra attenzione ai sistemi *ottici*, possiamo generalmente evidenziare la presenza di alcuni componenti essenziali che ne caratterizzano il funzionamento:

- l'ottica e la telecamera
- un sistema di illuminazione
- un sistema di acquisizione e di elaborazione delle immagini
- interfaccia uomo-macchina

- l'oggetto da esaminare

2.1.1 L'ottica

La funzione dell'obiettivo di una telecamera è quello di ricevere la luce proveniente dall'ambiente esterno e concentrarla sul sensore della telecamera che lo convertirà in un segnale video. Per poter fare questo, l'obiettivo ha al suo interno una lente convessa, che devia tutti i raggi di luce che la attraversano e li fa convergere verso un punto poco oltre la lente stessa. La scelta del tipo di ottica da utilizzare è condizionata in massima parte dalla struttura e dalle dimensioni dell'area su cui il sistema di visione deve operare: ad esempio possono esistere vincoli sulla distanza massima/minima tra telecamera e piano di lavoro, sull'area minima da inquadrare, ecc. La funzione del sistema ottico è quella di focalizzare l'immagine dell'oggetto da esaminare sul sensore della telecamera. Le caratteristiche della lente (obiettivo della telecamera) influiscono profondamente sull'immagine che verrà acquisita.

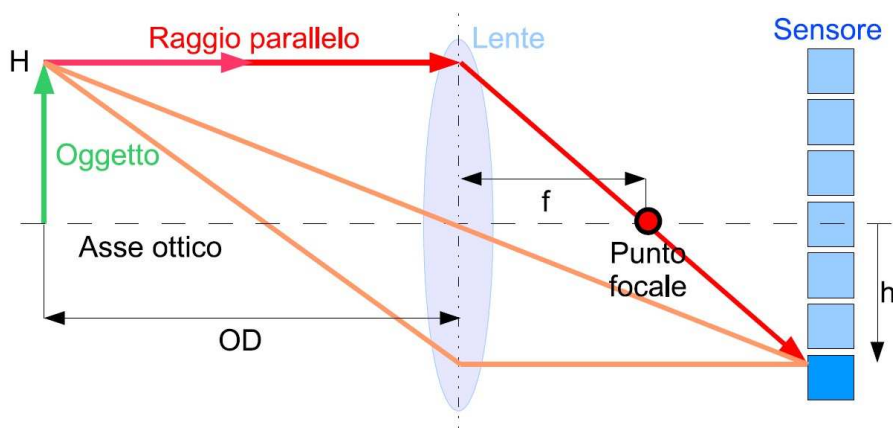


Figura 2.2: Schema di funzionamento di un'ottica

Semplificando, il comportamento di un generico obiettivo può essere assimilato a quello di una lente sottile, che sfruttando il fenomeno della rifrazione, fa deviare un raggio luminoso incidente e parallelo all'asse ottico verso un punto (**focale**) posto su tale asse oltre la lente. La distanza di questo punto dalla lente prende il nome di **lunghezza focale** (f) ed è comunemente espressa in mm

(Figura 2.2)[1]. Pertanto la focale risulta essere la distanza dalla lente alla quale è messo a fuoco un punto all'infinito. **Piano focale** (o retrofocale) viene invece chiamato il piano perpendicolare all'asse ottico che passa per il punto focale.

L'ottica e i suoi parametri sono pertanto responsabili della formazione di un'immagine dell'oggetto oltre il punto focale, precisamente sul piano immagine che ospita il sensore. Se il piano immagine è posizionato alla corretta distanza dal piano focale, l'immagine dell'oggetto che si origina risulta *a fuoco*, cioè nitida. Diversamente i raggi luminosi che partono dai punti dell'oggetto non convergono in altrettanti punti sul piano immagine ma bensì su di un'area dando così luogo ad un'immagine sfocata. La regolazione del fuoco, fondamentale per una valutazione nitida della scena inquadrata, è ottenuta, nei sistemi a regolazione manuale, tramite una ghiera posta sul corpo dell'obiettivo ruotando la quale si varia la distanza tra il piano focale e l'oggetto inquadrato mettendo così a fuoco l'immagine.

Il valore della lunghezza focale determina, unitamente alla distanza dell'oggetto dall'obiettivo, il grado di dettaglio dell'oggetto che l'immagine offre. Alti valori di focale diminuiscono l'angolo di ripresa offrendo un maggior dettaglio, viceversa focali più corte allargano il campo ripreso e riducono il dettaglio.

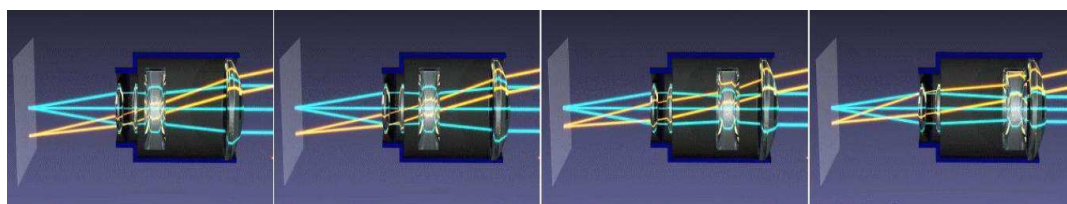


Figura 2.3: Sequenza zoom. Immagine reperibile nell'animazione del sito[4]

Il principale parametro che descrive le proprietà di un'ottica è quindi il valore di focale: questo parametro suddivide le ottiche a focale fissa in obiettivi **normali** ($35\text{mm} < f < 70\text{mm}$), obiettivi **grandangolari** ($f < 35\text{mm}$) e **teleobiettivi** ($f > 70\text{mm}$). Gli obiettivi zoom a focale variabile danno invece la possibilità di spostare relativamente le lenti nel gruppo ottico, consentendo quindi angoli di ripresa variabili. I parametri di altezza dell'oggetto da inquadrare (**H**), distanza

dell'oggetto (OD), focale e altezza dell'immagine sul sensore (h), possono essere messi in relazione dalla seguente equazione:

$$f = \frac{h \cdot OD}{H} = \frac{l \cdot OD}{L} \quad (2.1)$$

grazie alla quale è possibile stabilire la focale (e quindi l'ottica) che consente di riprendere l'oggetto alla distanza OD , utilizzando la porzione h sul sensore per averne un'immagine nel suo complesso¹.

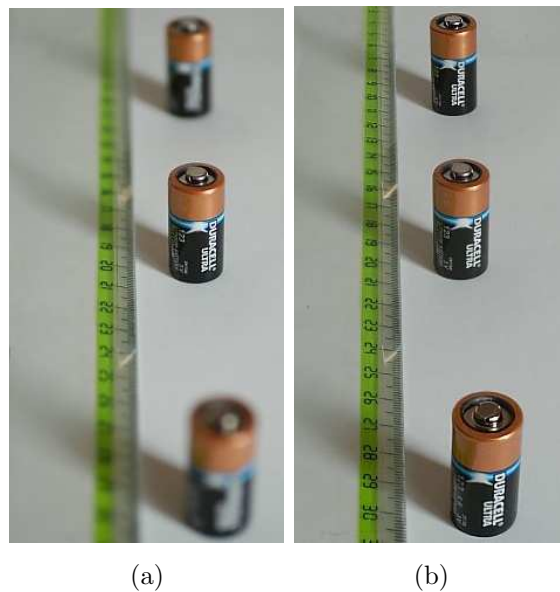


Figura 2.4: Stessa immagine acquisita con differenti profondità di campo: più ristretta a sx, più estesa a dx.

Altro elemento dell'ottica è il **diaframma**, un foro a diametro variabile che regola la quantità di luce che entra nell'obiettivo. Normalmente il diaframma è posto all'interno degli obiettivi ed ha lo scopo di regolare la dimensione del varco attraverso il quale entra la luce che andrà a colpire il piano immagine. La luminosità di un obiettivo viene valutata dal rapporto esistente tra la focale e il diametro di apertura del diaframma: all'aumentare del rapporto focale diminuisce la luminosità dell'obiettivo ma al tempo stesso aumenta l'ingrandimento dell'immagine

¹La seconda uguaglianza in 2.1 è la relazione che intercorre invece se considero la larghezza del sensore (l) e la larghezza del campo inquadrato (L). Graficamente la relazione si può esprimere allo stesso modo della figura 2.2 dove però il piano di riferimento sarà $OD-L$

ottenuta.

Molto importante inoltre per la messa a fuoco dell'oggetto è inoltre la **profondità di campo**, ovvero l'intervallo di distanza dall'obiettivo in cui un oggetto risulta ancora a fuoco. Nella realtà le ottiche dei sistemi di visione sono composte da più lenti, le ghiera di messa a fuoco cambiano la distanza tra queste lenti e permettono di mettere a fuoco oggetti a distanza diverse.

Nella maggior parte dei sistemi industriali, non è possibile cambiare continuamente la messa a fuoco ma bisogna fissarla al momento dell'installazione. Da qui si capisce l'importanza della profondità di campo per la valutazione dell'utilizzo di un sistema di visione. La profondità di campo dipende dall'apertura del diaframma, in particolare tanto più il diaframma è chiuso e tanto maggiore è la profondità di campo. In linea di principio questo effetto si può spiegare nel seguente modo: si consideri la figura. 2.5 di sinistra, si noti come nel piano immagine si stia formando un'immagine sfuocata (il punto non viene convertito dalla lente in un altro punto sul piano immagine, ma in un'area più estesa: da qui si ha la sfocatura), chiudendo il diaframma si riducono le direzioni da cui possono arrivare i raggi e quindi le dimensioni dell'immagine sfuocata (figura 2.5 a destra).

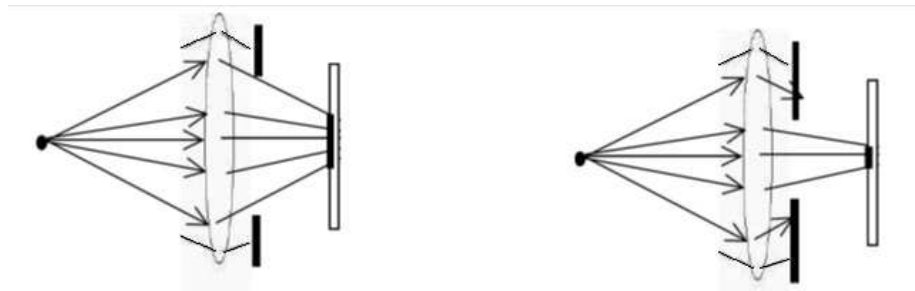


Figura 2.5: Influenza del diaframma sulla profondità di campo

Problematiche dell'ottica

Particolare attenzione meritano le problematiche relative all'acquisizione di oggetti tridimensionali dovute all'errore prospettico detto **parallasse**: il motivo per cui oggetti lontani sembrano più piccoli di quelli vicini. Il problema nasce dal fatto che in un'ottica tradizionale i raggi luminosi entrano con inclinazioni diverse

a seconda delle dimensioni e della distanza dell'oggetto dall'obiettivo. Al variare della distanza dalla lente le dimensioni dell'oggetto inquadrato aumentano o diminuiscono, specialmente in presenza di oggetti alti. Sono da tenere presenti inoltre gli effetti di **distorsione** introdotti dall'ottica stessa da cui nessun obiettivo è realmente immune. Tali distorsioni derivano dall'utilizzo di lenti sferiche che provocano una focalizzazione diversa da quella teorica per i raggi incidenti più distanti dall'asse ottico. Le principali distorsioni ottiche riscontrabili sono l'effetto a barilotto e a cuscino.

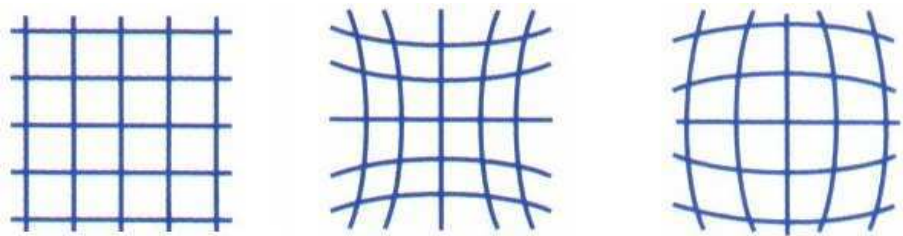


Figura 2.6: Distorsioni ottiche presenti in un obiettivo: nessuna distorsione (a sinistra), distorsione a cuscino (centrale) e distorsione a barilotto (destra)

Le distorsioni ottiche, comprese quelle legate al parallasse, possono essere compensate attraverso un'opportuna procedura di calibrazione della telecamera. In alternativa per annullare l'effetto prospettico una soluzione classica nel campo della visione per applicazioni di misura accurata è rappresentata dall'utilizzo di ottiche **telecentriche**, dotate di un sistema di lenti tale da portare il fuoco dell'ottica virtualmente all'infinito. Così tali ottiche, a differenza di quelle comuni, hanno la proprietà di far convergere sul sensore solamente i raggi dell'oggetto paralleli all'asse ottico, deviando tutti gli altri.

In questo modo la rappresentazione di un oggetto sul sensore di acquisizione non varia in dimensione al variare della sua distanza dall'obiettivo e non risente dell'effetto prospettico; questo consente misurazioni estremamente precise. In figura 2.7 viene presentato l'esempio di un cilindro metallico ripreso con un'ottica tradizionale ed un'ottica telecentrica. L'uso di lenti telecentriche riduce inoltre anche il problema della riflessione sul bordo degli oggetti: i raggi arrivando paralleli all'asse ottico hanno molte meno possibilità di riflettersi, formando perciò



Figura 2.7: Confronto tra ottica standard entocentrica ed ottica telecentrica

un bordo più nitido. Da ultimo va detto che le ottiche telecentriche sono molto meno sensibili al problema della distorsione rispetto alle ottiche tradizionali. Purtroppo il principale svantaggio delle ottiche telecentriche sta proprio nella loro capacità discriminante sui raggi incidenti: accettando solamente raggi paralleli, l'area inquadrabile è limitata superiormente dalle dimensioni dell'obiettivo stesso e possono pertanto essere analizzati solamente oggetti che vi stiano direttamente davanti (o sotto). Possono inoltre essere montati sull'obiettivo alcuni filtri per discriminare la luce in ingresso in base alla sua lunghezza d'onda (filtri *UV*, *IR*) o alla sua polarizzazione (filtri polarizzatori).

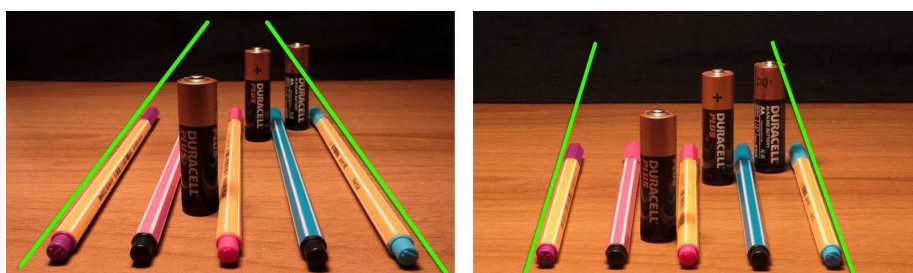


Figura 2.8: Confronto tra due inquadrature nella stessa situazione per mettere in risalto le linee prospettiche. La distorsione aumenta o diminuisce a seconda se ci avviciniamo o allontaniamo dalla scena.

2.1.2 Il sensore

Il sensore rappresenta il cuore della telecamera, dove avviene la cattura della scena inquadrata in un'immagine discretizzata. È posizionato nel corpo della macchina dietro il gruppo ottico, sul piano di formazione dell'immagine. Un generico sensore al silicio impiegato nelle attuali telecamere digitali è costituito da un fitto reticolo di fotositi collegato in colonne gli uni dagli altri.

Il *fotosito* può essere definito come il luogo di cattura del più piccolo dettaglio dell'immagine. Fisicamente è il più piccolo elemento sensibile che caratterizza un sensore ed è costituito da una microlente che fa convergere la quantità di luce ricevuta verso un fotodiodo posto sotto di essa. Quest'ultimo, realizzato a semiconduttore, sfruttando l'effetto fotoelettrico è in grado di generare una carica elettrica ogni volta che viene colpito da un fotone. Ogni cella, restando esposta alla luce per un certo periodo, accumula un numero di cariche elettriche proporzionale alla quantità di luce che l'ha colpita. L'intervallo di tempo nel quale il sensore accumula cariche viene definito **tempo di integrazione**, e corrisponde in pratica al lasso di tempo in cui rimane aperto l'otturatore (è detto anche *tempo di esposizione*). Una volta bloccato il processo di accumulo di cariche, quelle accumulate vengono trasferite all'elettronica di lettura. Il segnale elettrico relativo a questa carica, opportunamente amplificato e trattato, andrà a costituire il valore scritto nel pixel, la più piccola unità di informazione visiva. Questa informazione può essere utilizzata direttamente nella sua forma analogica, oppure può essere convertita in formato digitale.

La distinzione fondamentale tra i sensori è fatta in base alla disposizione delle celle fotosensibili, e caratterizza di conseguenza il tipo di telecamera:

- **lineare**: le celle sono disposte su una sola riga;
- **matriciale**: costituito da una matrice bidimensionale di celle;

In entrambi i casi il sensore può essere immaginato come una matrice di celle, rispettivamente $N \times 1$ e $N \times M$, ciascuna delle quali misura la quantità di luce che la colpisce durante il tempo di esposizione e traduce tale quantità in un segnale elettrico.

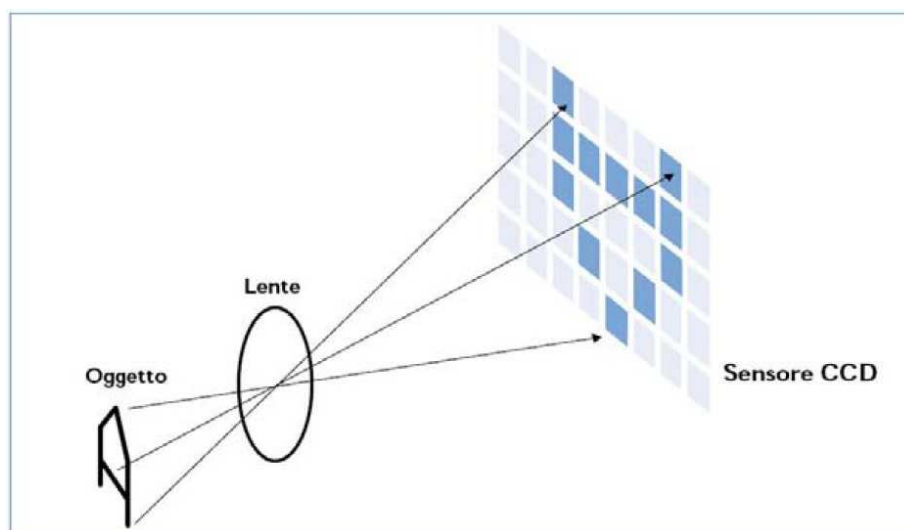


Figura 2.9: Formazione dell'immagine sulla griglia di un sensore

Nelle telecamere lineari l'immagine completa viene costruita come risultante del movimento dell'oggetto da riprendere nel campo visivo: occorre quindi che l'oggetto si muova linearmente nel campo di ripresa della telecamera così da permettere l'acquisizione delle varie righe e la ricostruire della matrice di pixel $N \times M$.

Nei sensori in bianco e nero l'intensità del segnale elettrico in una cella costituisce il livello di grigio dell'immagine in quel punto. Un punto molto scuro avrà un basso livello di grigio, viceversa per i punti molto chiari. Il sensore per l'acquisizione del colore funziona in base allo stesso principio, ma ogni elemento della griglia è diviso in tre celle: una sensibile ai toni rossi, una sensibile ai toni verdi e una sensibile ai toni blu. In pratica la luce viene separata nelle tre componenti principali per mezzo di un prisma dicroico e l'intensità delle componenti di colore in ciascun punto dell'immagine viene misurata e salvata in un sensore diverso, per un totale di tre sensori. In questo modo l'informazione sul colore risulta molto precisa. Alternativamente per acquisire l'informazione relativa al colore si può utilizzare un unico sensore con maschera di *Bayer*. Va detto comunque che nelle applicazioni industriali si preferiscono normalmente le telecamere a scala di grigio, a meno che l'informazione sul colore sia rilevante per il tipo di analisi effettuata.

Il numero e la dimensione fisica dei pixel determina la **risoluzione** effettiva della telecamera, cioè la dimensione del più piccolo particolare distinguibile. Per avere un'elevata risoluzione sono necessari dunque molti pixel, ma ridurre la dimensione dei pixel ne riduce anche la capacità di raccogliere la luce e quindi la sensibilità. Risoluzione e sensibilità sono perciò caratteristiche correlate e contrastanti, il compromesso migliore dipende dalle condizioni applicative.

2.1.3 Tipi di sensori

Generalmente, al giorno d'oggi, le telecamere possono montare due tipi di sensori: *CCD* (*ChargeCoupledDevice* - dispositivi ad accoppiamento di carica) o *CMOS* (*ComplementaryMetal – Oxide – Semiconductor*).

Nel caso del sensore *CCD* la carica elettrica viene convertita in voltaggio ed esce dal sensore come segnale analogico, perciò tutti i fotodiodi sono dedicati esclusivamente alla lettura della luce e l'uniformità del segnale generato è alta - si tratta di una caratteristica importantissima ai fini della qualità dell'immagine.



Figura 2.10: (a) sensore lineare; (b) sensore matriciale

In un sensore *CMOS* ogni fotodiodo è accompagnato da un convertitore che trasforma l'energia luminosa in voltaggio, e spesso anche amplificatori di segnale, riduttori di rumore e circuiti di digitalizzazione, cosicché il segnale in uscita dal sensore è in formato digitale. Questi altri circuiti intorno al fotodiodo riducono lo spazio dedicato alla cattura della luce. Inoltre, quando ogni fotodiodo effettua la

propria conversione, l'uniformità del segnale è minore. Ognuna delle due tecnologie ha quindi punti di forza e di debolezza che le rendono più adatte per certe applicazioni e non altre. Le differenze principali possono essere così riassunte:

- il *CCD* crea un'immagine di alta qualità e basso livello di rumore, mentre il *CMOS* è più suscettibile al rumore;
- il *CCD* consuma una grande quantità di energia, mentre il *CMOS* è molto più economico;
- i sensori di tipo *CCD* sono più costosi da produrre dei *CMOS*.

Bisogna anche dire tuttavia che mentre fino a qualche anno fa c'era una netta divisione di ambiti fra i sensori *CMOS* e *CCD*, e quest'ultimo rappresentava il punto di riferimento per le prestazioni in applicazioni industriali che richiedevano la massima qualità dell'immagine possibile, ora non è più così. Gli sforzi dei progettisti di *CMOS* sono stati direzionati a raggiungere una più alta qualità dell'immagine, mentre i realizzatori di *CCD* hanno lavorato per ridurre il consumo energetico e i costi di produzione, cosicché i due dispositivi ora si stanno imponendo entrambi nei vari campi di applicazione.

2.1.4 La telecamera digitale

La telecamera è il dispositivo che comprende l'ottica e il sensore appena descritti, nonché in certi casi anche l'elettronica necessaria a tradurre l'immagine dell'oggetto in un segnale video con certe caratteristiche. Esistono diverse tipologie di telecamere che si contraddistinguono per le caratteristiche che presentano:

- forma del sensore: lineare o matriciale;
- tipo di sensore: CCD o CMOS;
- risoluzione
- sensibilità del sensore: colore, B/N, infrarosso, UV, raggi X;
- tipo di segnale in uscita: analogiche o digitali;

- interfaccia: usb, firewire, camera link, gigabit ethernet;

Mentre i primi punti sono già stati discussi ampiamente, della parte relativa al trasferimento dei segnali occorre spendere alcune parole.

L'immagine proiettata dall'ottica sul sensore viene tradotta in una serie discreta di valori elettrici, che si presta ad una descrizione matematica dell'immagine come funzione a due valori $f(x,y)$. Il segnale video in uscita dalle telecamere è un segnale analogico o digitale che contiene il segnale elettrico corrispondente all'informazione dei singoli punti dell'immagine. Per venire compreso da un sistema di elaborazione, il segnale deve essere convertito in forma numerica ed essere memorizzato. La successione dei valori elettrici deve essere estratta dal sensore, convertita, memorizzata ed elaborata.

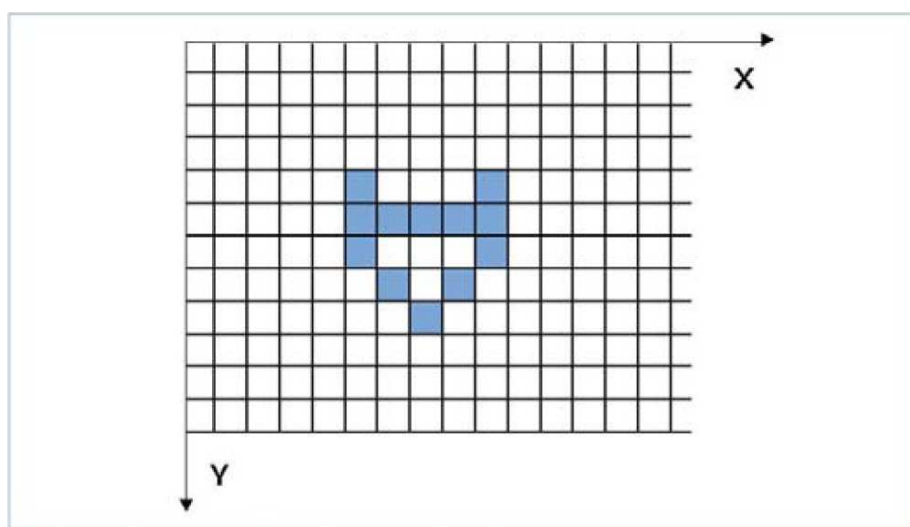


Figura 2.11: Descrizione dell'immagine come griglia $f(x,y)$

Il circuito di trattamento del segnale si occupa di amplificare il segnale elettrico relativo all'informazione del pixel, quindi della sua conversione analogico digitale ed eventuali altri trattamenti, come correzione della luminosità, filtraggio del rumore, sotto-campionamento dell'immagine, ecc.

In molte telecamere le operazioni di conversione e pre-elaborazione del segnale non vengono eseguite da circuiti interni alla telecamera stessa ma da una scheda di acquisizione inserita nell'elaboratore dedicata alla gestione del flusso di immagini. Tale scheda, comunemente nota come scheda **framegrabber**, è lo strumento

che trasforma il segnale video analogico prodotto da una telecamera in un segnale digitale utilizzabile da un computer. Un suo vantaggio consiste nella possibilità di essere collegata a numerose telecamere, consentendo al computer di gestire flussi video provenienti da diverse sorgenti.

L'ultima parte di queste operazioni di conversione e pre-elaborazione del segnale dipendono dal tipo di interfaccia utilizzata per la connessione della telecamera all'unità di elaborazione. Ad oggi esistono quattro standard principali per tali interfacce, con diversi livelli di diffusione e orientati ad applicazioni spesso differenti: *Camera Link*, *Firewire*, *USB* e *Gigabit Ethernet*, le cui caratteristiche sono riassunte nella tabella seguente

	Camera Link	IEEE1394 a/b	USB 2.0	GigE
<i>Massima velocità teorica</i>	2,38 Gbit/s	400Mbit /s (a) 800Mbit/s (b)	480 Mbit/s	1 Gbit/s
<i>Massima distanza</i>	10 m	4,5 m (a) 100 m (b)	5 m	100 m
<i>Trasmis. isocrona</i>	si	si	si	no
<i>Num. max telecamere</i>	1 per interf.	fino a 63	fino a 127	illimitato

Camera Link

Interfaccia parallela che sfrutta per la conversione e trasmissione dell'immagine una scheda di acquisizione dedicata, detta frame grabber. Questo tipo di interfaccia consente di raggiungere un'elevata velocità di trasferimento dati, e si presta perciò bene per applicazioni di tipo real-time in cui sia necessario acquisire molti frame al secondo. Esistono tuttavia diverse limitazioni che rendono il Camera Link poco appetibile. Innanzi tutto la velocità di acquisizione finale dipende dalla velocità di acquisizione della telecamera, che spesso fa da collo di bottiglia. Inoltre il frame grabber e il cavo di collegamento sono molto costosi e non standardizzati tra i vari produttori in quanto il Camera Link manca di un protocollo di comunicazione standard.

Firewire

Si sta imponendo sempre più nel mercato dei sistemi di visione, sia per l'alto grado di standardizzazione nell'hardware e nelle interfacce software, sia per i costi nettamente inferiori al Camera Link. I cavi hanno un costo minimo, non c'è bisogno di frame grabber e molti PC hanno ormai una scheda Firewire integrata. La standardizzazione dell'interfaccia software (DCAM) inoltre permette di eliminare gran parte dei problemi di integrazione tipici del Camera Link, rendendo di fatto il sistema plug & play: ogni telecamera può essere gestita da un qualsiasi driver compatibile. L'unico limite dell'interfaccia Firewire è dettato dalla velocità di trasferimento non troppo elevata, che la rende poco adatta ad applicazioni real-time veloci.

USB 2.0

è uno standard relativamente nuovo e poco diffuso nell'ambito dei sistemi di visione. Il più grande vantaggio di questa interfaccia è la sua enorme diffusione: quasi tutti i computer hanno almeno una porta USB. Esistono tuttavia una serie di svantaggi, anche piuttosto pesanti, dettate dal fatto che tale interfaccia usa parte delle risorse della CPU per lavorare al meglio, riducendo le performance del computer. Per quanto riguarda l'interfacciamento con le telecamere non esiste ancora uno standard, per cui sono possibili problemi di integrazione con il sistema di elaborazione. infine i limiti piuttosto stringenti alla massima alimentazione erogabile dal bus tramite la porta USB fa sì che possano essere interfacciate solo telecamere a basso consumo o limitate in velocità di acquisizione, a meno di ricorrere a una fonte di alimentazione esterna.

GigE

è uno standard di rete seriale caratterizzato da un'elevata banda e costi hardware piuttosto contenuti, data la buona diffusione nell'ambito dell'hardware di rete. Il nuovo standard *GigE Vision* sta emergendo come standard per le telecamere ad alte prestazioni. Oltre all'alta capacità di trasmissione dati, un grande vantaggio di questa tecnologia è dovuto alla notevole lunghezza che possono raggiungere i

cavi di collegamento (fino a 100 m).

Infine una telecamera di tipo industriale non deve avere obiettivi integrati ma deve fornire la possibilità di montare un'ottica specifica per l'applicazione richiesta. L'ottica montata deve altresì dare la possibilità di impostare manualmente il fuoco sull'immagine e consentire la regolazione dell'apertura del diaframma. Il sistema di acquisizione delle immagini della telecamera, per poter essere facilmente integrato in un processo industriale, deve poter essere controllato tramite un segnale di trigger esterno che faccia scattare l'acquisizione. Tale segnale può essere inviato alla telecamera dall'elaboratore a cui è collegata o da un dispositivo (encoder o altro sensore) che invia il segnale di trigger in corrispondenza del verificarsi di un determinato evento.

2.1.5 Il sistema di illuminazione

Nella struttura[5] di un generico sistema di visione l'apparato di illuminazione dell'oggetto da esaminare risulta essere di cruciale importanza. Diversamente dall'apparato visivo umano infatti un elaboratore elettronico collegato ad una telecamera non è adattabile a qualsiasi situazione di luce, pertanto la sua efficienza analitica è legata a precise condizioni di illuminazione della scena. Un sistema d'illuminazione ben progettato permette d'illuminare la scena in modo che la complessità dell'immagine risultante sia ridotta al minimo, aumentando le informazioni utilizzabili per la ricerca e l'individuazione dell'immagine mettendo in risalto le caratteristiche di interesse dell'oggetto (*feature*) che si vuole analizzare e filtrando tutte le altre informazioni inutili. Operando in questo modo l'elaboratore elettronico viene messo nella migliore condizione per identificare, riconoscere e misurare gli oggetti di interesse all'interno della scena.

Le principali tecniche d'illuminazione utilizzate nei sistemi di visione, che si differenziano per la diversa posizione della fonte d'illuminazione rispetto all'oggetto, sono le seguenti:

- **illuminazione direzionale:** una qualunque sorgente abbastanza compatta rispetto alla distanza dalla quale è posta dall'oggetto fornisce una illuminazione direzionale. Tanto più piccola è la sorgente e tanto maggiore è la sua distanza dall'oggetto, tanto più il campo luminoso che investe l'oggetto sarà piano ed uniforme. Questo tipo di illuminazione è adatto a mettere in evidenza, con un elevato grado di contrasto, la superficie (texture) di superfici opache. Un caso particolare è quello della luce radente che permette di evidenziare al massimo particolari superficiali come fratture o protuberanze. In generale la luce direzionale è adatta all'illuminazione di superfici piane, poiché su superfici curve darebbe luogo a intensità di illuminazione non uniformi che possono tradursi in immagini difficili da analizzare. Nel caso di oggetti riflettenti può dare luogo a riflessi che a seconda dell'applicazione possono essere desiderati o da evitare. Fra le sorgenti più utilizzate per una buona illuminazione direzionale figurano le lampade alogene con o senza riflettore. Una sorgente direzionale per eccellenza è il Laser.

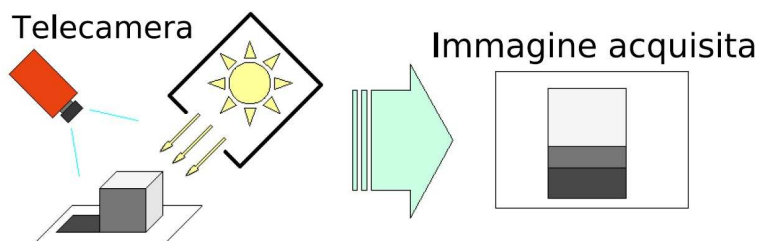


Figura 2.12: Illuminazione direzionale

- **illuminazione diffusa:** adatta per gli oggetti riflettenti. Un qualunque sistema di illuminazione per luce diffusa deve cercare di riprodurre la condizione di un cielo nuvoloso (che è la soluzione migliore). Una buona approssimazione può essere ottenuta da una semisfera traslucida uniformemente illuminata dall'esterno. Si tratta di una soluzione particolarmente complessa anche perché occorre forare la calotta per riprendere l'oggetto.
- **illuminazione coassiale:** in questa tecnica la sorgente (tipicamente una lampada circolare a fluorescenza) è posta intorno all'obiettivo della tele-

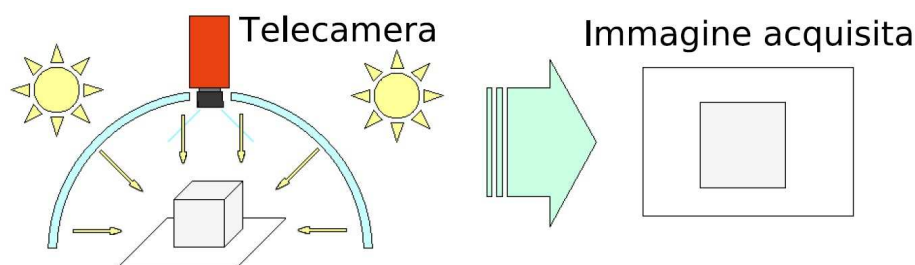


Figura 2.13: Illuminazione diffusa

camera. Facendo un paragone con le tecniche fotografiche, questa illuminazione è equiparabile all'uso del flash. Le immagini ottenute sono prive di ombre e appaiono quindi poco contrastate. Questa tecnica è adatta ad oggetti sfaccettati e riflettenti.

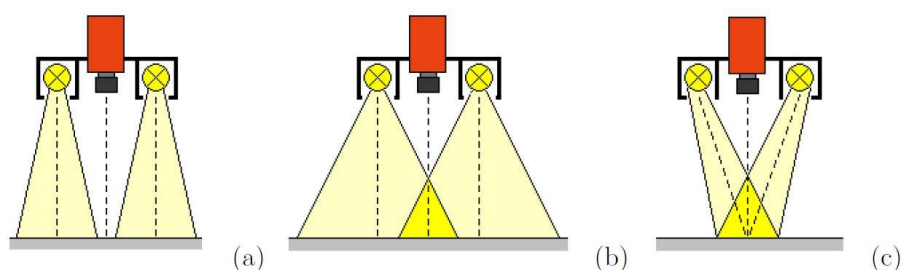


Figura 2.14: Illuminazione coassiale con lampade ad anello: a)emissione diretta, b)emissione diffusa, c)emissione focalizzata

- **illuminazione redente:** questo tipo d'illuminazione è utile soprattutto per esaminare le superfici degli oggetti. I difetti sulla superficie, quali buchi e scalfitture, possono essere trovati utilizzando un raggio di luce fortemente direzionale, per esempio un raggio laser, misurando l'entità della dispersione. Per le superfici che non presentano difetti viene dispersa poca luce verso la telecamera, viceversa in presenza di un difetto l'entità della luce diffusa verso la telecamera aumenta , facilitando così l'individuazione dei difetti
- **retroilluminazione** l'oggetto viene posto fra la telecamera ed uno sfondo luminoso che costituisce la sorgente. Questo sistema è particolarmente adatto per misurazioni sui profili di pezzi metallici e per individuare difetti

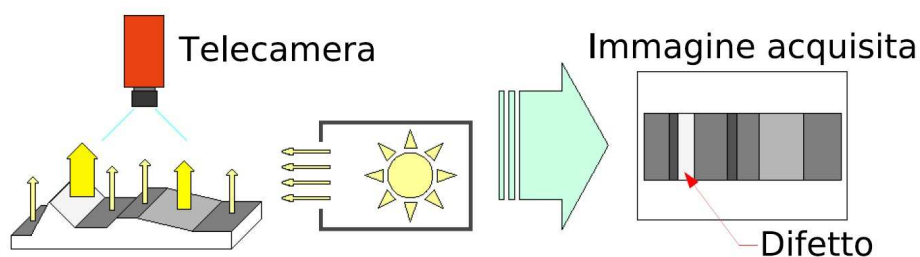


Figura 2.15: Illuminazione radente

in oggetti trasparenti. Gli oggetti metallici appaiono neri su di uno sfondo chiaro. Ciò permette di eseguire misurazioni $2D$ con la massima affidabilità.

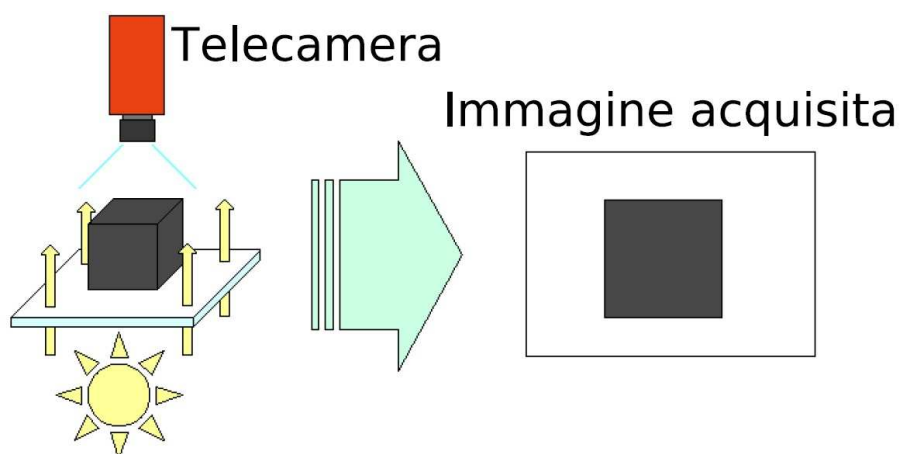


Figura 2.16: Retroilluminazione

- **illuminazione strutturata:** si intende l'utilizzo di un campo luminoso con caratteristiche geometriche ben definite. Una tipica applicazione che fa uso di luce strutturata è il rilievo tridimensionale di una superficie. Per questo problema si utilizzano le cosiddette lame di luce: l'oggetto passa attraverso la lama di luce e integrando la forma della curva luminosa che si forma sulla superficie dell'oggetto se ne ricava la forma della superficie. Una lama di luce è costituita da un fascio laser espanso con una lente cilindrica o con altri sistemi. Per le sue caratteristiche di brillantezza e coerenza, il laser è la sorgente luminosa più impiegata per generare luce strutturata.

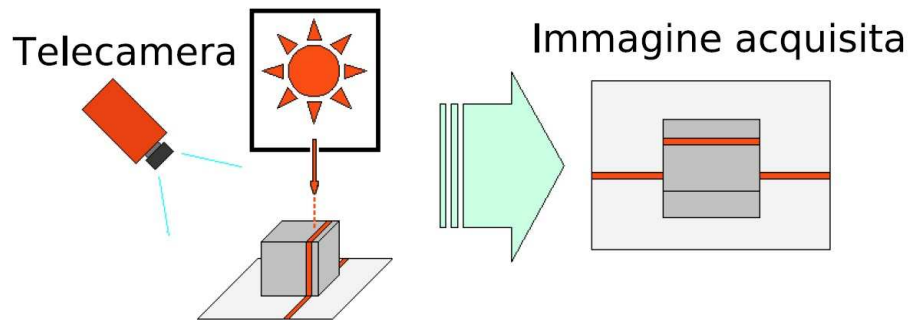


Figura 2.17: Esempio di illuminazione strutturata

Quest'ultima tecnica di illuminazione risulta essere molto interessante per lo sviluppo del progetto. Una delle tecniche più utilizzate si basa sul principio di triangolazione².

2.2 La triangolazione laser

La tecnica che utilizza una *illuminazione strutturata con configurazione triangolare* sembra presentare le caratteristiche ideali per sviluppare il nostro progetto. Una tipica configurazione di un sistema di rilevazione tramite triangolazione prevede un fascio laser proiettato sull'oggetto che si sposta su quest'ultimo evidenziandone le diverse zone secondo una scansione regolare. La radiazione riflessa viene focalizzata da una lente in un sensore posto ad una distanza prefissata rispetto al punto da cui il laser viene inviato all'oggetto. Relazioni trigonometriche permettono di risalire alle coordinate X e Z . La deviazione standard della misura di profondità Z è inversamente proporzionale alla distanza d tra il laser ed il *CCD* e alla distanza tra lente e sensore f_0 , mentre è direttamente proporzionale al quadrato della profondità.

Sarebbe desiderabile aumentare sia f_0 che d , ma si devono considerare le dimensioni della camera e dell'immagine finale: un'elevata f_0 comporterebbe o un

²Un'altra tecnica molto diffusa di triangolazione nel settore della computer vision è la **stereovisione** con la quale si può effettuare una ricostruzione 3D mediante triangolazione di 2 (o anche più) telecamere che inquadrano la stessa scena. Si rimanda ad altri testi specifici per un approfondimento della tecnica

grande sensore o un elevato campo visivo. È necessario poi mantenere piccolo d per limitare l'effetto delle ombre: uno svantaggio intrinseco a tutti i metodi di triangolazione che ne limita l'applicabilità nei casi in cui le superfici presentino repentine variazioni di profondità (gole, fessure, cambi di pendenza).

Da ciò risulta che in un tale sistema di rilevazione è necessario arrivare a dei compromessi tra campo visivo, incertezza nella misura di profondità ed effetti ombra. Un sistema laser[6] a scansione fornisce quindi come risultato diretto della sessione di misura un insieme di coordinate tridimensionali. Tali coordinate individuano un numero elevatissimo di punti (**nuvola di punti**) che caratterizzano la superficie esterna dell'oggetto scansionato.

2.2.1 I metodi di proiezione

I metodi di proiezione utilizzati nelle applicazioni si avvalgono essenzialmente di almeno una sorgente laser (si possono utilizzare anche più sorgenti oppure deflettere il raggio attraverso opportuni specchi). In generale, i pattern di luce sono di differenti forme, costituiti di linee, di punti o altri tipi di codifica. Possono essere proiettati staticamente sulla scena o cambiare dinamicamente posizione, orientamento od anche disegno. I risultati ottenibili con l'approccio a luce strutturata sono fortemente influenzati dal preciso rilevamento del pattern proiettato nell'immagine acquisita. Se le geometrie di proiezione e di acquisizione sono note, le coordinate tridimensionali possono essere estratte con un'opportuna triangolazione. In tale caso, però, la complessità computazionale è mediamente elevata portando, d'altro canto, a maggiori volumi rilevabili rispetto alla tecnica di triangolazione semplice.

Le misurazioni e la ricostruzione della superficie sono ottenute dallo spostamento, a causa della presenza dell'oggetto in analisi, tra le linee osservate ed il *pattern iniziale di riferimento* e dalla conoscenza della geometria del sistema stesso di triangolazione.

Proiezione di un punto

La proiezione di un singolo punto luce è il metodo più semplice (e anche più intuitivo) per misurare la distanza in uno spazio tridimensionale tra il sensore e la superficie in analisi. Il punto è generato da una sorgente laser il cui fascio è collimato da un sistema opportuno di lenti. L'intersezione di tale raggio con il corrispondente raggio di acquisizione della telecamera identifica univocamente il punto nelle tre dimensioni.

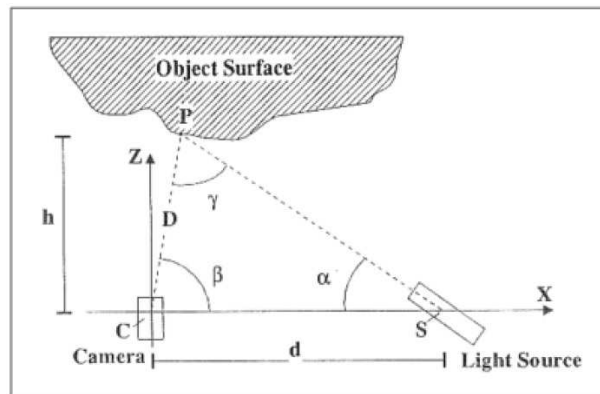


Figura 2.18: Triangolazione con pattern a singolo punto per semplificarne il funzionamento successivo

Si considerino, come semplificazione, le sole due dimensioni (figura 2.18), ossia la dimensione di profondità ed una sola di quelle appartenenti al piano sensore, nel nostro caso l'asse orizzontale X . I raggi SP (*SourcetoPoint*) e CP (*CameratoPoint*) giacciono nel piano XZ . La distanza d tra la camera C e la sorgente S è assunta come nota e costante. L'angolo β , sotto cui vengono visti i punti oggetto rispetto all'asse ottico della camera, è definito dalla geometria del sistema. L'angolo α , direzione del fascio laser, è determinato in fase di calibrazione e può essere controllato da opportuni sistemi a specchio. La distanza D tra la camera ed il punto oggetto P è ricavata da:

$$D = \frac{d \sin(\alpha)}{\sin \gamma} = \frac{d \sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2.2)$$

Il sistema di coordinate cartesiano è centrato in C con l'asse Z coincidente con l'asse ottico della camera e l'asse X come estensione del segmento CS . La posizione del punto P di coordinate (X_0, Z_0) è data da:

$$X_0 = D \cos(\beta) \quad (2.3)$$

$$Y_0 = D \sin(\beta) = h \quad (2.4)$$

L'accuratezza del risultato finale nell'individuazione del punto dipende sia dalle procedure di calibrazione in cui si determinano i parametri D , α e β , sia dalla precisione con cui si determina la posizione del punto luce nell'immagine acquisita. *La procedura di calibrazione può essere notevolmente facilitata e velocizzata con una tecnica basata sul piano di riferimento. Quando si deve effettuare una misura, per primo viene analizzato lo spazio senza l'oggetto di cui se ne prendono i riferimenti; successivamente si posiziona l'oggetto sulla scena e la procedura di misurazione viene ripetuta. Le informazioni di profondità vengono ricavate sfruttando entrambe le informazioni e più precisamente dallo spostamento che il pattern ha subito a causa della presenza dell'oggetto.*

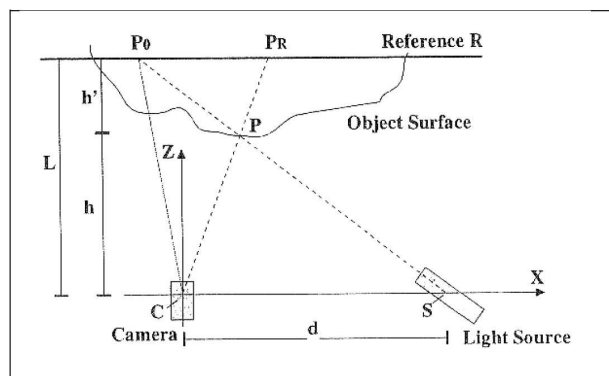


Figura 2.19: Triangolazione successiva

Il piano di riferimento R è posto ad una distanza L dal segmento CS e ad esso parallelo (ortogonale all'asse Z). Quando non è presente alcun oggetto, il raggio di luce proiettato dalla sorgente incontra il piano di riferimento nel punto P_0 e la sua posizione è rilevata dalla camera. In presenza dell'oggetto, il raggio SP_0 viene riflesso dal punto P e rilevato dalla camera in una posizione diversa rispetto

a prima. La posizione di tale punto corrisponde al punto virtuale P_r nel piano di riferimento, che giace nella stessa semiretta passante per P . In definitiva, dal punto di vista della camera, la presenza dell'oggetto ha avuto l'effetto di spostare la posizione del punto immagine da P_0 a P_r . Questo spostamento è calcolato in proporzione allo spostamento nel piano immagine del sensore all'interno della camera. L'informazione di profondità h è ricavata notando che i triangoli CPS e P_rPP_0 sono simili e dunque vale la relazione

$$\frac{CS}{P_0P_r} = \frac{h}{h'} \quad (2.5)$$

Andando ad evidenziare d e S_r con semplici passaggi si può esprimere la profondità di un punto mediante

$$h' = \frac{LS_r}{S_r + d} \quad (2.6)$$

La misurazione dell'intero oggetto avviene, seguendo lo stesso principio, facendo scorrere il raggio laser sulla sua superficie tramite un sistema a specchi per deviarne il fascio. La necessaria introduzione anche della coordinata verticale Y complica inevitabilmente i calcoli geometrici, ma il ragionamento di base resta lo stesso.

Proiezione di una linea di luce

L'evoluzione più immediata del singolo punto, ottenuto con un raggio di luce, è la **proiezione di una linea ottenuta con un piano di luce**. L'intersezione del piano di luce con la superficie dell'oggetto è utilizzata al fine di rivelarne il profilo. In questo modo è possibile calcolare simultaneamente i valori di profondità di un più ampio insieme di punti da una singola immagine, velocizzando ulteriormente il processo di acquisizione rispetto alla semplice proiezione di un unico punto.

Ovviamente le sorgenti laser, che producono luce coerente, sono quelle che forniscono sull'oggetto una linea molto luminosa e ben marcata, anche in ambienti con una certa illuminazione di fondo, il che porta ad una sua più semplice individuazione nell'immagine acquisita ed quindi ad una maggiore risoluzione in profondità rispetto ai metodi che prevedono l'utilizzo di diverso tipo di sorgente.

Utilizzando infatti una sorgente di luce diffusa sarebbe necessario aumentare la larghezza della riga per poter far arrivare sull'oggetto una sufficiente quantità di

energia ottica, in modo che la linea sia abbastanza luminosa e quindi ben riconoscibile nell'immagine acquisita. *Una riga più spessa si traduce inevitabilmente in una minore risoluzione*. La geometria e, conseguentemente, il modello matematico che descrive il sistema risultano più complicati della tecnica a singolo punto ma, come facilmente intuibile, non ne sono altro che un'estensione dei calcoli visti in precedenza.

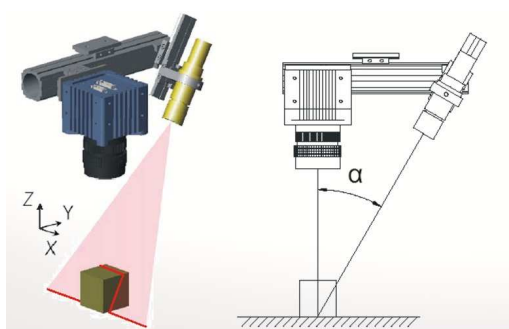


Figura 2.20: Telecamera verticale e laser inclinato. La relazione che lega il sistema di riferimento con l'angolo di inclinazione è $\delta Z = \delta(X) \tan(\alpha)$

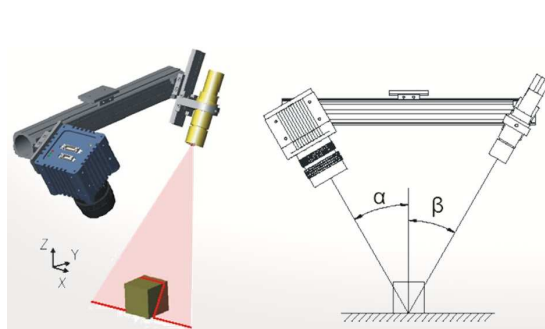


Figura 2.21: Altra configurazione dove la relazione è $\delta Z = \frac{\delta(X) \cos(\beta)}{\sin(\alpha+\beta)}$.

Capitolo 3

Il simulatore

Chiaramente per poter ottenere la cella presentata nel primo capitolo si sono effettuate inizialmente delle analisi di fattibilità sul progetto realizzando un simulatore mediante il software *Matlab*. L'obiettivo è quello di definire tipologia e disposizione dei componenti per l'acquisizione di misure tridimensionali andando a valutare varie possibili configurazioni e definendo:

- numero e orientazione della telecamera (se inclinata o posizionarla in modo verticale)
- numero e orientazione delle sorgenti d'illuminazione
- eventuali movimentazioni dei componenti
- eventuale utilizzo di specchi per acquisire più parti contemporaneamente nella stessa immagine

Tale strumento di simulazione deve comunque contemplare la possibilità di:

- importare file *CAD* della forma da misurare.
- impostare la posizione relativa dei componenti del sistema (telecamera, laser, oggetto, eventuale asse di rotazione)
- poter misurare le altezze dei componenti rispetto al piano di riferimento e la distanza dal fuoco (per quanto concerne la telecamera)

- poter eventualmente graficare sia i risultati in funzione dell'angolo di rotazione dell'oggetto sia le scannerizzazioni 3D (complete o parziali di singole sezioni) della forma

Dalle prove eseguite è stato possibile fornire delle indicazioni chiare su quale fosse la configurazione da utilizzare nonché l'hardware necessario per realizzarlo¹. Inoltre si è potuto ricavare anche una indicazione sulle caratteristiche meccaniche necessarie per la movimentazione dei vari componenti relativamente ad accelerazioni, velocità e posizione².

Dopo numerose simulazioni si è giunti alla configurazione visibile nella Figura 3.1 che poi risulta essere come quella presentata in figura 1.5

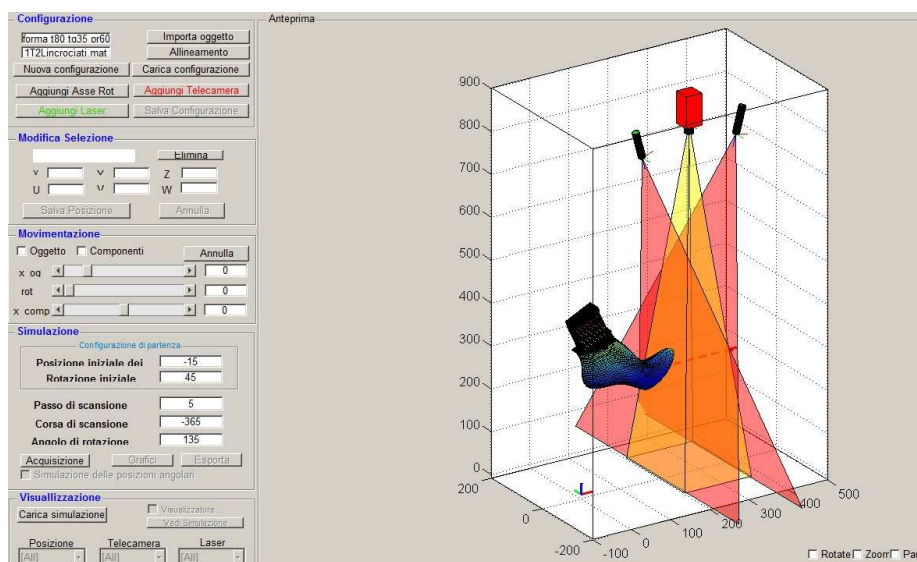


Figura 3.1: Interfaccia utente del simulatore realizzato mediante software Matlab

3.1 I file IGES e Nurbs

Il passo iniziale per utilizzare questa interfaccia utente per la scannerizzazione virtuale è quello di **importare** il file *CAD* della forma in formato *iges*.

¹che verrà descritto nel capitolo successivo

²informazioni utili per la realizzazione della parte meccanica sviluppata si trova in [2]

Initial Graphics Exchange Specification (IGES) definisce un formato dati neutrale che consente lo scambio di dati, file grafici e informazioni tra sistemi *CAD*. Usando *IGES*, gli utilizzatori di programmi *CAD* possono scambiarsi i dati del modello prodotto in forma di diagramma, modelli liberi di superfici, modelli solidi in *3D* o rappresentazioni arti grafiche. Le applicazioni supportate da *IGES* includono i tradizionali *CAD*, *CAM*, *CAE* e modelli per l'analisi. Nella progettazione e nella fabbricazione molti sistemi sono usati per gestire i dati tecnici dei prodotti. Ogni sistema ha i suoi propri formati di dati, cosicché la stessa informazione deve essere introdotta numerose volte in molteplici sistemi, portando ad eccessi e ad errori.



Figura 3.2: Logo del progetto *IGES*

Un file *IGES* è composto da 80 – caratteri *ASCII* per riga, una lunghezza derivata dall'era delle schede perforate. Le stringhe di testo sono rappresentate in formato *Hollerith*: numero di caratteri nella stringa, seguito dalla lettera *H*, seguito dalla stringa di testo, per esempio: *4HSLOT* (Questo è il formato stringa di testo usato nelle prime versioni del linguaggio Fortran). I primi traduttori *IGES* avevano problemi con i mainframe computer di *IBM* perché i mainframes utilizzano la codifica *EBCDIC* per il testo, e qualche traduttore *EBCDIC – ASCII* ha l'effetto o di sostituire il carattere errato, o di sostituire non correttamente il bit di parità, causando errori di lettura.



Figura 3.3: Semplice disegno *CAD*.

```

1H, 1H, 4HSLOT, 37H14SDH2: [IGESLIB.DDRAFT.E21]SLOT.IGS,          S 1
17HBeave3 BeaveRAFT, 31HBeave3->IGES V3.002 [02-Oct-87], 32, 38, 6, 38, 15, G 1
4HSLOT, 1., 1, 4HINCH, 8, 0.08, 13H871006.192927, 1, E-06, 6., G 3
31H. A. Harrod, Tel. 313/995-6333, 24HAPPLICON - Ann Arbor, MI, 4, 0; G 4
116 1 0 1 0 0 0 0 0 0 1D 1
116 1 5 1 0 0 0 0 0 0 0D 2
116 2 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1D 3
116 1 5 1 0 0 0 0 0 0 0 0D 4
100 3 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1D 5
100 1 2 1 0 0 0 0 0 0 0 0D 6
100 4 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1D 7
100 1 2 1 0 0 0 0 0 0 0 0D 8
110 5 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1D 9
110 1 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0D 10
110 6 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1D 11
110 1 3 1 0 0 0 0 0 0 0 0D 12
116,0.,0.,0.,0,0,0,0; 1F 1
116,S.,0.,0.,0,0,0; 3P 2
100,0.,0.,0.,0.,1.,0.,,-1.,0,0; 5P 3
100,0.,5.,0.,S.,-1.,S.,1.,0,0; 7P 4
110,0.,-1.,0.,S.,-1.,0.,0,0; 9P 5
110,0.,1.,0.,S.,1.,0.,0,0; 11P 6
S 10 4D 12P 6
    
```

Figura 3.4: Esempio di file *IGES* della figura a lato.

Quello di figura 3.4 è un esempio di piccolissimo file *IGES*, contenente soltanto due entità *POINT* (*Type* 116), due *CIRCULAR ARC* (*Type* 100), e due *LINE* (*Type* 110). Esso rappresenta una figura (potrebbe essere un foro) con i punti centrali dei due semicerchi che formano l'estremità della scanalatura, e le due linee che formano i lati. Il file è diviso in 5 sezioni, indicate dai caratteri (*S, G, D, P, or T*) in colonna 73. Le caratteristiche e le informazioni geometriche per ogni entità sono divise tra due parti; una in due record, in formato di lunghezza fissa (la *DirectoryEntry*, o *DESection*), l'altra in record multipli, in formato delimitato da virgola (il *ParameterData*, o *PDSection*).

<i>SectionnameCol.</i>	<i>73 LetterCode</i>
<i>Start</i>	<i>S</i>
<i>Global</i>	<i>G</i>
<i>DirectoryEntry</i>	<i>D</i>
<i>ParameterData</i>	<i>P</i>
<i>Terminate</i>	<i>T</i>

Il programma *read-iges*, sviluppato in lavori di tesi precedenti, si occupa di scorporare il file *IGES*, dividendolo nelle varie sezioni ed estraendo le diverse entità. E' possibile, mediante particolari funzioni software scorporare il file *IGES* e dividere le varie sezioni. In ambiente *Matlab* è possibile infatti estrarre le entità di interesse che sono poi identificate da numeri diversi e differenti parametri (raggio, asse, ecc.), più alcune funzioni ausiliarie come il colore. Un altro esempio di oggetto caricato da un file *IGES* è quello di figura 3.5 con la quale è possibile estrarre come entità geometrica la superficie superiore della forma, che è denominata *Nurbs* e come per le altre sue componenti, è stato possibile caricarla in ambiente *Matlab*. In questo modo è possibile lavorare sui punti di tale superficie con una risoluzione a piacere ed eventualmente modificarla agendo sui punti di controllo. Per ulteriori approfondimenti a riguardo si rimanda alla lettura di [7].

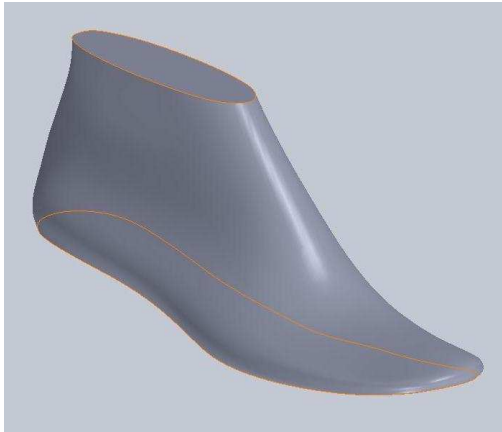


Figura 3.5: Esempio di una forma per calzatura di alta moda (misura 37, tacco 20 mm) ottenuta con un programma CAD.

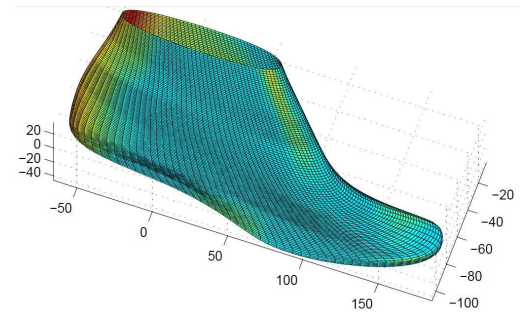


Figura 3.6: Esempio di superficie *Nurbs* in *Matlab* che descrive la parte superiore di una forma per calzature, caricata da file *IGES*.

3.2 Guida al simulatore

Una volta importato il file *IGES* desiderato è possibile assegnargli un'asse di rotazione in modo da poterlo ruotare e scansionare ogni sua parte. Terminata questa fase iniziale di caricamento, si può procedere all'inserimento dei componenti (creati come strutture oggetto con ognuno un sistema di riferimento proprio) di visione (telecamera/e e laser). Vengono selezionate effettivamente le coordinate rispetto al sistema di riferimento mondo dell'ambiente di lavoro del simulatore. È possibile inoltre visualizzare sempre sia il piano del fascio laser che l'area inquadrata dalla telecamera.

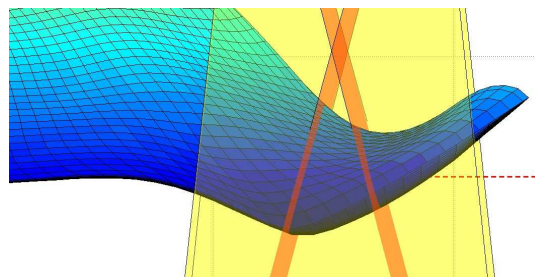


Figura 3.7: Particolare che evidenzia l'intersezione della forma con i piani dei due laser (rosso) e l'aria inquadrata dalla telecamera (giallo)

A questo punto, una volta salvata tutta la configurazione, è possibile effettuare una movimentazione preliminare dei singoli componenti o della forma in modo da avere un primo riscontro sulle spline che si possono ottenere. Nel pannello **simulazione** è possibile quindi configurare la vera e propria scansione della forma: posizione iniziale dei componenti rispetto al sistema di riferimento, rotazione iniziale dell'oggetto, passo e corsa di scansione sono i parametri essenziali da inserire preliminarmente. L'idea di fondo è quella di scansionare la forma operando varie passate con angolature differenti.

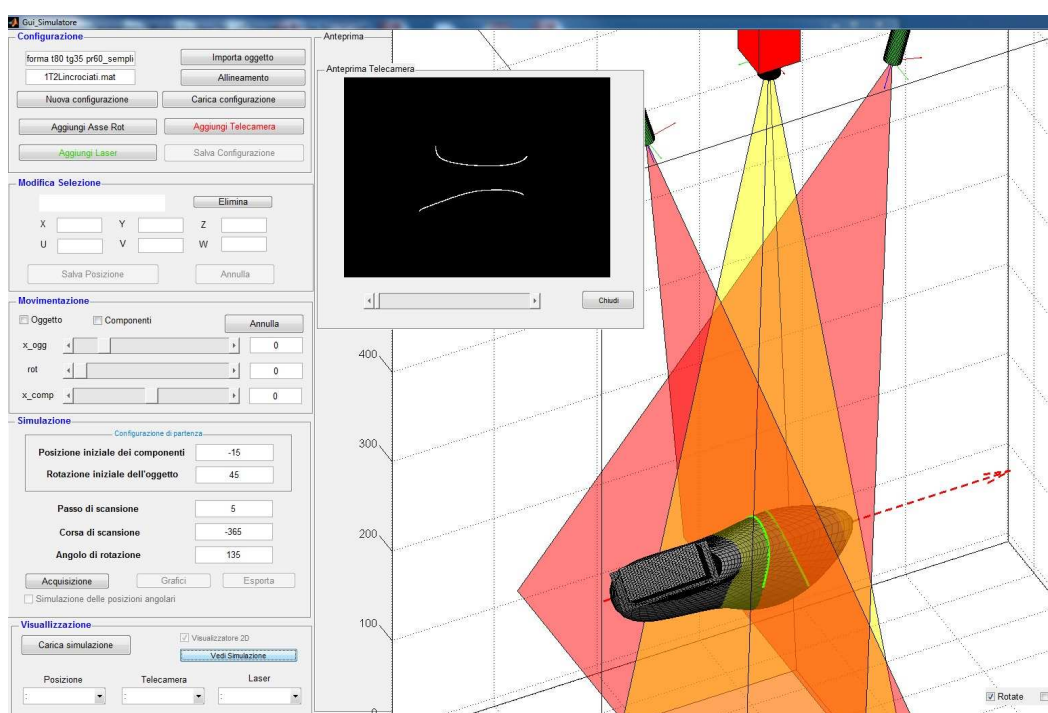


Figura 3.8: Visualizzazione dal punto di vista della telecamera di due spline create dall'intersezione del piano laser con l'oggetto forma

In pratica ogni qualvolta che un piano laser interseca la superficie della forma (*nurbs*) visualizzata viene determinata una sezione. Tale sezione è costituita da un'insieme di punti che però non tutti sono visibili dalla telecamera (vedi ad esempio la parte inferiore come riportato in figura 3.8). Quindi l'algoritmo effettua importanti verifiche:

- confronta la normale alla superficie di ogni punto rispetto la normale di riferimento della telecamera che inquadra la scena

- dei punti trovati confronta la normale alla superficie rispetto la normale del laser interessato

E' chiaro che dover effettuare questo procedimento per una scansione intera della forma (circa 25 cm con una elaborazione di punti dell'ordine di 400 mila unità) sommando poi l'eventuale possibilità di ruotare l'oggetto ogni volta terminata una passata, richiede operazioni di calcolo onerosi (con associato lungo tempo di attesa per svolgerli). Grazie comunque a svariate tecniche computazionali ed avvalendoci di funzioni compilate in linguaggio *C* si è riusciti ad abbattere significativamente questo problema tanto che una scansione completa di una forma (equivalente ad esempio di 3 passate con orientazioni 45° , 180° e -45°) avviene nell'ordine dei 3 minuti.

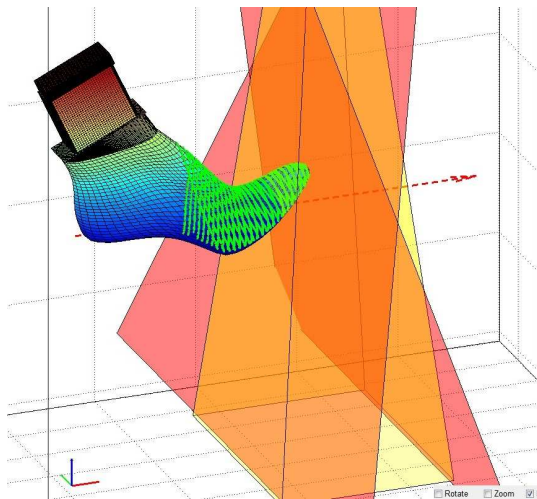


Figura 3.9: Risultato di una scansione parziale con passo di pari a 5 mm

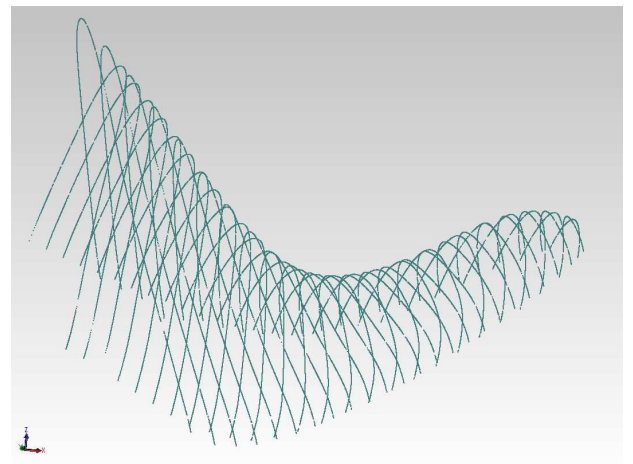


Figura 3.10: Nuvola di punti risultante della scansione parziale realizzata come riportato nella 3.9 visualizzata mediante SolidWorks

Una volta effettuata la scansione desiderata è possibile salvare tutta la *nuvola di punti* per utilizzarla successivamente in programmi di grafica 3D quali *Geomagic* (come nell'esempio riportato in figura 3.9) e confrontarla con il file originale in formato *IGES*. Il confronto di strutture di questo tipo viene effettuato mediante tecniche di **matching** che non sono oggetto di studio specifico di questo progetto (si rimanda alla lettura di [7]).

3.3 Alcune considerazioni

Alla luce dei risultati ottenuti operando alcune prove al simulatore si è giunti alla conclusione di operare due laser inclinati uno a 25° , l'altro a 30° (la distanza ancora dall'oggetto ancora non può essere ancora definita con le sole prove simulative in quanto nella pratica subentrano problemi di profondità di campo e messa a fuoco della lama laser). In questo modo anche le zone che possono sembrare più in ombra (come ad esempio il tallone) risultano sicuramente visibili.

Il *ciclo di lavoro* quindi dovrebbe comprendere con questa nostra configurazione 3 rotazioni dell'oggetto, in particolare una prima passata (a 45°) in avanti con un solo laser funzionante, una seconda passata all'indietro invertendo il funzionamento dei laser. A questo punto si ripeterà l'operazione per altre due posizioni angolari (180° e -45°).

Al momento comunque si lavorerà solo con un laser per questioni di semplicità concentrandoci più sul funzionamento e affidabilità del sistema di visione.

Capitolo 4

Apparato Hardware

In questo capitolo verrà presentato e descritto l'hardware utilizzato in laboratorio per la realizzazione del prototipo per la ricostruzione 3D di forme per la calzatura. Il sistema completo si può dividere essenzialmente in due parti: il sistema di visione vero e proprio e un sistema inerente la parte meccanica (quest'ultima parte è oggetto di studio in un'altra tesi, quindi verranno fatte solo alcune brevi analisi introduttive).

4.1 Accenni sulla struttura meccanica

La struttura portante della cella è stata pensata per essere realizzata in maniera modulare, in modo da renderla flessibile a possibili cambiamenti in corso d'opera. Si è scelto di utilizzare prodotti standardizzati della Robotunits, la quale mette a disposizione dei profilati estrusi in alluminio di più dimensioni che tagliati della giusta lunghezza permettono la creazione di infinite soluzioni. Sono componenti molto leggeri e resistenti e grazie ad un'ampia scelta di sistemi di collegamento e accessori facilita notevolmente la progettazione permettendo di ottenere rapidamente le soluzioni desiderate.

La struttura doveva essere in grado di ospitare oltre che all'oggetto da misurare e tutti i sistemi di movimentazione ed acquisizione anche un computer per permettere di elaborare tutte le informazioni raccolte. Con l'ottica di creare un



Figura 4.1: Disegno di un profilo di profilato Robotunits.

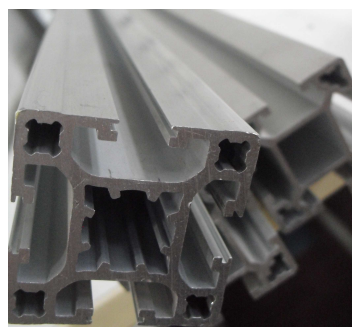


Figura 4.2: Esempio profilati utilizzati in laboratorio.

sistema che raccogliesse tutti questi componenti si è deciso di utilizzare come layout di struttura quella di un bancone industriale che avrebbe dato la possibilità ad un operatore di interfacciarsi con la cella in maniera ergonomica e comoda. Sulla sommità della struttura è stata inserita la vera e propria cella di misura composta principalmente da quattro montanti per contenere *i supporti per l'asse rotativo ed uno lineare, la telecamera per l'acquisizione, i due laser inclinabili e ovviamente l'oggetto da visionare.*

4.2 Progettazione del sistema di visione

Di seguito viene riportato la lista dei componenti utilizzati:

- telecamera *Pike*
- laser ottico
- guida lineare *FESTO* con elettrovalvole di controllo
- encoder *SIKO MSK5000* con striscia magnetica *MB500* e sensori induttivi
- controllore *dsPIC*
- circuito elettrico di alimentazione

Lo schema di principio è riportato schematicamente in figura 4.3. La telecamera e il laser sono montati su di una piastra che scorre su di una guida lineare

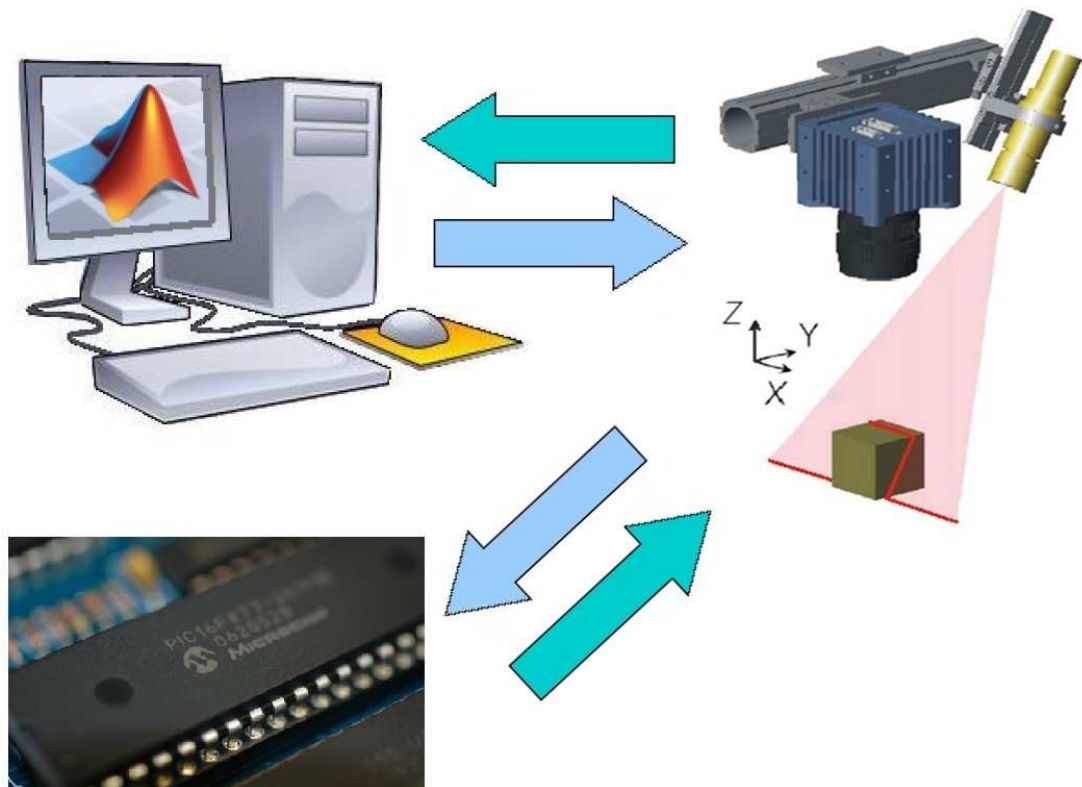


Figura 4.3: Schema intuitivo del come è composto il sistema di visione. Attraverso matlab si acquisisce le immagini della scansione. Il segnale di trigger e quello dell'encoder viene gestito dal dsPIC su cui è implementato un semplice algoritmo scritto appositamente in C.

pneumatica della *FESTO* (*DGPL – KF*), sotto la quale è fissata una banda magnetica su cui agisce un encoder lineare incrementativo anch'esso fissato alla telecamera e laser. L'encoder è estremamente utilizzato per applicazioni di misure di lunghezza o spessore, angoli e velocità. Vengono comunemente impiegati in ambito industriale sulle macchine automatiche proprio in abbinamento a sistemi di conteggio, visualizzazione e controllo per realizzare posizionamenti a programma, avanzamenti a passi determinati o più semplicemente visualizzare misure fisiche. Alle estremità della guida sono presenti dei sensori induttivi per attivare e disattivare l'acquisizione delle immagini. I segnali dell'encoder e del trigger sono gestiti da un microcontrollore dsPIC fissato su di una breadboard. Il tutto viene alimentato a 12V o 5V a seconda delle caratteristiche tecniche di ogni componente.

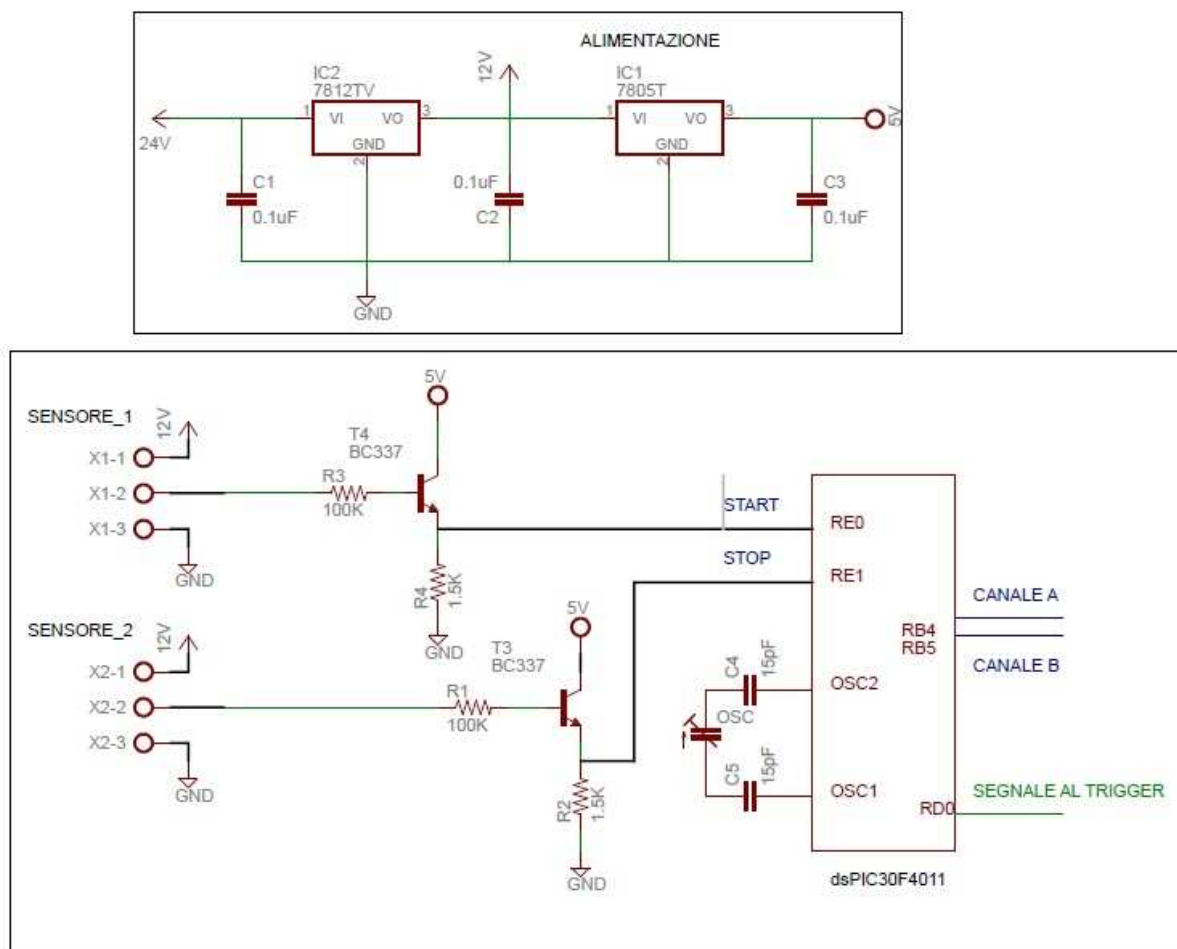


Figura 4.4: Schema elettrico del circuito montato sulla breadboard. I segnali dei sensori induttivi pilotano dei transistor che entrano in zona di saturazione e attivano le porte di ingresso del controllore.

Vediamo le caratteristiche dei singoli componenti utilizzati.

4.3 Il laser

Lo spettro visibile è quella parte dello spettro elettromagnetico che cade tra il rosso e il violetto includendo tutti i colori percepibili dall'occhio umano. La lunghezza d'onda varia indicativamente dai 380nm ai 760nm. Laser è l'acronimo di **Light Amplification** by the **Stimulated Emission** of **Radiation**. Queste sorgenti sono in grado di emettere un fascio di luce coerente e altamente monocromatico concentrato in un raggio direzionale rettilineo estremamente collimato con una elevata concentrazione di energia in un'area molto piccola.

La luminosità delle sorgenti laser è molto elevata e non è paragonabile alle altre sorgenti luminose. Queste tre proprietà: coerenza, monocromaticità e alta brillantezza sono alla base delle applicazioni con il laser. L'*elevatissima brillantezza*, data dal concentramento di una grande potenza in un'area molto piccola, permette di lavorare con pochi milliwatt ottenendo una buona luminosità nel sensore della telecamera. La *monocromaticità* e coerenza lo rende un ottimo strumento di misura di distanze, spostamenti e velocità anche piccolissimi, dell'ordine del millesimo di millimetro.

La luce monocromatica prodotta può essere sfruttata per ottenere un sistema d'illuminazione insensibile agli effetti della luminosità dell'ambiente. Infatti un oggetto illuminato con un laser e osservato attraverso un filtro passa banda centrato sulla frequenza della sorgente darà una immagine formata dal solo contributo della sorgente stessa, essendo la componente di luce ambientale quasi totalmente assorbita dal filtro.



Figura 4.5: Laser utilizzato: Lasiris SNF-701L

4.3.1 Tipi di laser

Le principali famiglie di laser sono: a *cristallo* (ad es. rubino, neodimio), a *gas* (ad es. elio-neon, argon, anidride carbonica), a *semiconduttore* (diodi laser). Nei laser a cristallo i livelli energetici sono dovuti ad impurezze presenti nel cristallo ed il pompaggio avviene per illuminamento con lampade, LED o per mezzo di

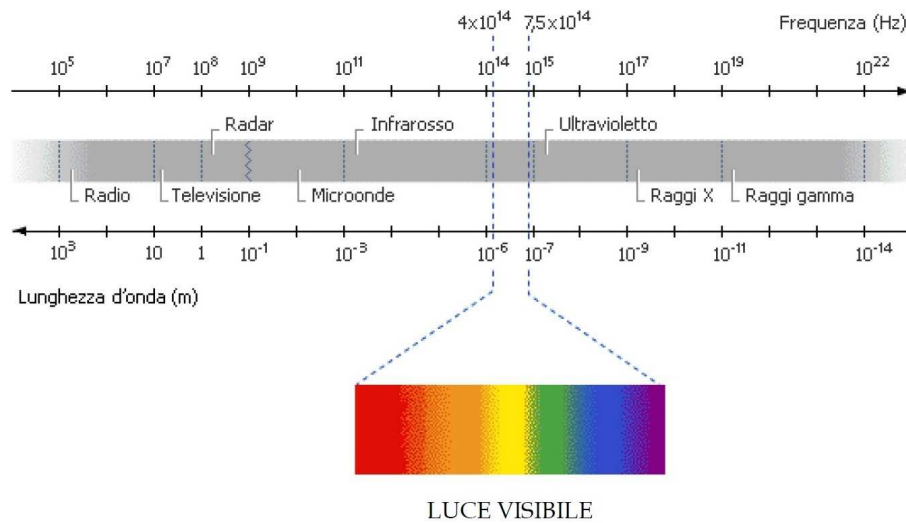


Figura 4.6: Classificazione delle varie lunghezze d'onda

altro laser. Nei laser a gas, in genere il sistema è complesso, coinvolge più di tre livelli energetici e diversi gas di cui solo uno provvede a emettere la radiazione e gli altri hanno ruoli diversi nel meccanismo di inversione di popolazione; l'energia di pompaggio è fornita da una scarica elettrica che attraversa la miscela di gas. I laser a semiconduttore sono una evoluzione dei diodi LED, dove i livelli energetici sono determinati dal drogaggio del semiconduttore ed il pompaggio è dovuto alla corrente che attraversa la giunzione p-n. A differenza degli altri tipi di laser, la cavità risonante non è costituita da due specchi, bensì dall'interfaccia semiconduttore-aria che, pur avendo una riflettività di solo il 70%, è sufficiente per innescare l'oscillazione dato l'elevatissimo guadagno del mezzo attivo.

Il laser viene spesso utilizzato per le applicazioni di analisi 3D (come nel nostro caso), per la verifica di dimensioni, allineamento, controllo della planarità e negli ambienti in cui sia difficile schermare la sorgente migliore per la tecnica d'illuminazione strutturata. Vantaggi:

- consente la realizzazione di differenti e speciali forme di luce;
- le emissioni sono quasi perfettamente parallele;
- elevata intensità

Svantaggi:

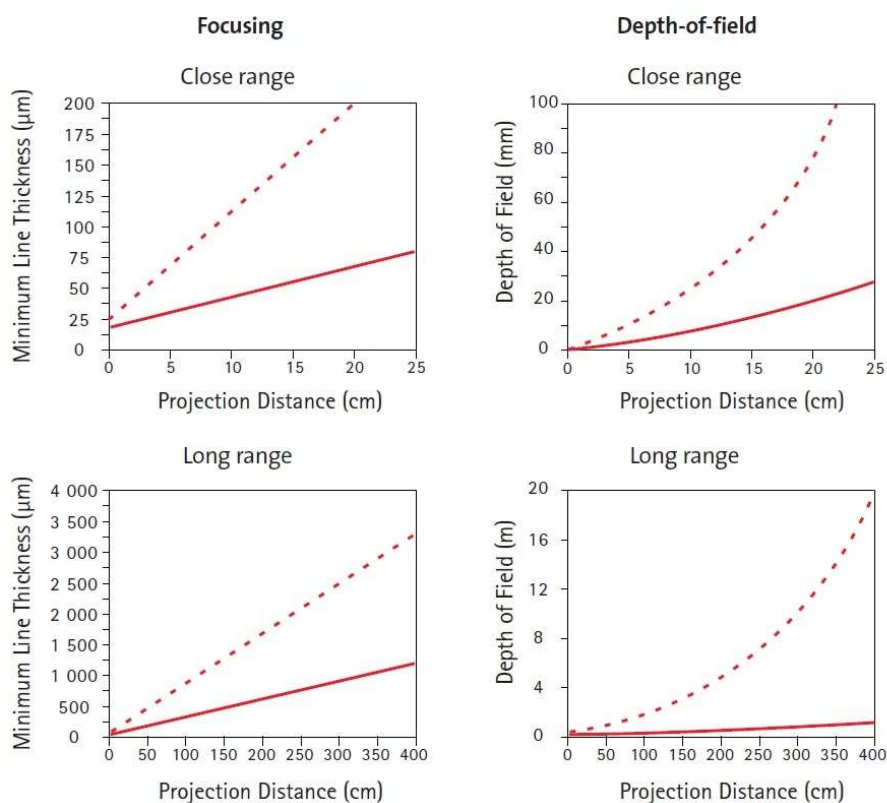


Figura 4.7: Sono riportate le proprietà di messa a fuoco (spessore minimo della linea in rapporto alla distanza) e della profondità di campo all'aumentare della distanza da un oggetto. Si confronta il laser 501L (linea continua) con quello utilizzato: 701L (linea tratteggiata)[8]

- necessita di misure di protezione perché il suo utilizzo può risultare dannoso per l'uomo, in particolare per gli occhi;
- illuminazione non omogenea causata dal speckles patter.

A lato pratico si sono riscontrate anche problematiche riguardo alla messa a fuoco della lama di luce (nonché la sua profondità di campo). Attualmente la messa a fuoco è stata regolata a mano in modo da poter posizionare il laser ad una altezza di 450 mm dalla piano base, distante 150 mm dall'asse verticale della telecamere e inclinato all'incirca di 25° gradi rispetto allo stesso.

	Pike F-032	USB 2 uEye
Interfaccia	FireWire IEEE 1394b	USB 2
Risoluzione	640 x 480	1600 x 1200
Sensore	CCD Kodak	CCD Sony
Grandezza sensore	1/3' 4.800mm x 3.600mm	1/1.8' 7.176mm x 5.319mm
Lenti Supportate	C-mount	C-mount
Velocità max	208 fps	12 fps

Tabella 4.1: Caratteristiche principali delle due telecamere di prova

4.4 Telecamera e ottica

Per quanto concerne l'utilizzo della telecamera la scelta ricadeva su due possibili candidate aventi differenti proprietà tecniche alcune delle più importanti riportate nella tabella 4.1

Una telecamera deve essere associata ad un componente ottico (la possibilità di scelta ricadeva su tre tipi disponibili in laboratorio: un *Canon Lens VF 25 mm 1:1.4f*, un *VSTec Lens 25 mm 1:1.4f* oppure un *VSTec Lens 35 mm 1:2f*). Chiaramente non è possibile effettuare una scelta indipendente di uno e dell'altro componente, quindi, avvalendoci anche delle prove effettuate con il simulatore (sono state provate tutte le possibili combinazioni) si è riusciti, per i nostri obiettivi di progetto, a raggiungere un giusto compromesso tra *risoluzione*, *velocità di acquisizione* e *lunghezza focale*.

Volendo acquisire l'immagine di una scena di lunghezza L ed altezza H , la variabile fondamentale da determinare al fine di soddisfare le specifiche di progetto è il rapporto **pixel/mm** dell'immagine. Quindi fissata l'area inquadrata in larghezza RIS_l di 135 mm (in modo tale da poter inquadrare la forma in ogni sua parte) ricaviamo

$$PixelMm_l = \frac{RIS_l}{L} = \frac{640}{135} = 4.74 [pixel/mm] \quad (4.1)$$



Figura 4.8: Telecamera a matrice AVT Pike F-032 utilizzata per il nostro sistema di visione

riguardanti la *Pike*, mentre per la *uEye* otteniamo i seguenti valori

$$PixelMm_l = \frac{RIS_l}{L} = \frac{1600}{135} = 11.85 \text{ [pixel/mm]} \quad (4.2)$$

A questo coefficiente di risoluzione dell'immagine è legata la sensibilità σ del sistema di visione, ottenuta come

$$\sigma = \frac{1}{2} PixelMm^{-1} \quad (4.3)$$

e che indica la distanza minima sul piano di analisi tra due punti affinché il sistema di visione sia in grado di distinguerli. Innanzitutto, per determinare la sensibilità minima necessaria a soddisfare le specifiche di progetto riguardanti la precisione della scansione del decimo di millimetro ($0,1 \text{ mm}$) dovremmo poter ottenere un rapporto **pixel/mm** dell'ordine di 10 [*pixel/mm*]. Sfruttando la relazione 2.1

$$OD = \frac{L}{RIS_l} f$$

possiamo ricavare la distanza dell'oggetto dal piano sensore, ottenendo per le due telecamere i risultati seguenti in funzione delle focali utilizzabili:

	<i>Pike</i>	<i>uEye</i>
$f = 25mm$	712mm	470mm
$f = 35mm$	1142mm	658mm

(4.4)

A questo punto quindi c'è da scegliere la focale, e valutando tali distanze ottenute e le risoluzioni riportate in 4.1 e 4.2 la scelta sembra ricadere sull'ottica **VSTec Lens 25 mm 1:1.4f** (la lente con focale da 35 mm avrebbe significato alzare troppo la telecamera e l'ingombro del piano di lavoro sarebbe decisamente aumentato).

In un primo momento si è deciso di utilizzare la telecamera *uEye* con la quale si ottiene una risoluzione molto soddisfacente, ma il grosso problema riguarda la sua ridottissima velocità di acquisizione¹. Quindi al momento, per questo banco di prova, ci si è focalizzati sull'utilizzo della telecamera *Pike* che offre una velocità molto elevata (e quindi ridurre al minimo i tempi di scansione), con il compromesso però di dover perdere quasi la metà della risoluzione. In conclusione la sensibilità del sistema di visione risulta essere

$$\sigma = \frac{1}{2} PixelMm^{-1} = \frac{1}{2}(4.74)^{-1} = 0.105 [mm/pixel] \quad (4.5)$$

Per completezza, girando la formula 2.1 possiamo ottenere l'area inquadrata in altezza, che corrisponde a:

$$H = OD \frac{RIS_h}{f} = 135mm \frac{3.6mm}{25mm} = 102.52 mm \quad (4.6)$$

La *Pike* presenta altresì la possibilità di una memoria interna di tipo *FIFO* di circa 100 frames, e inoltre prevede la possibilità di acquisire immagini in corrispondenza di **segnali di trigger esterni** attraverso un connettore *HIROSE* a 12-pin che può gestire i segnali di I/O. Il protocollo di trasmissione dati *IEEE1394b* consente una velocità di trasmissione prossima agli $800Mbit/s$.

¹le prime acquisizioni effettuate infatti non hanno portato a risultati esaurienti

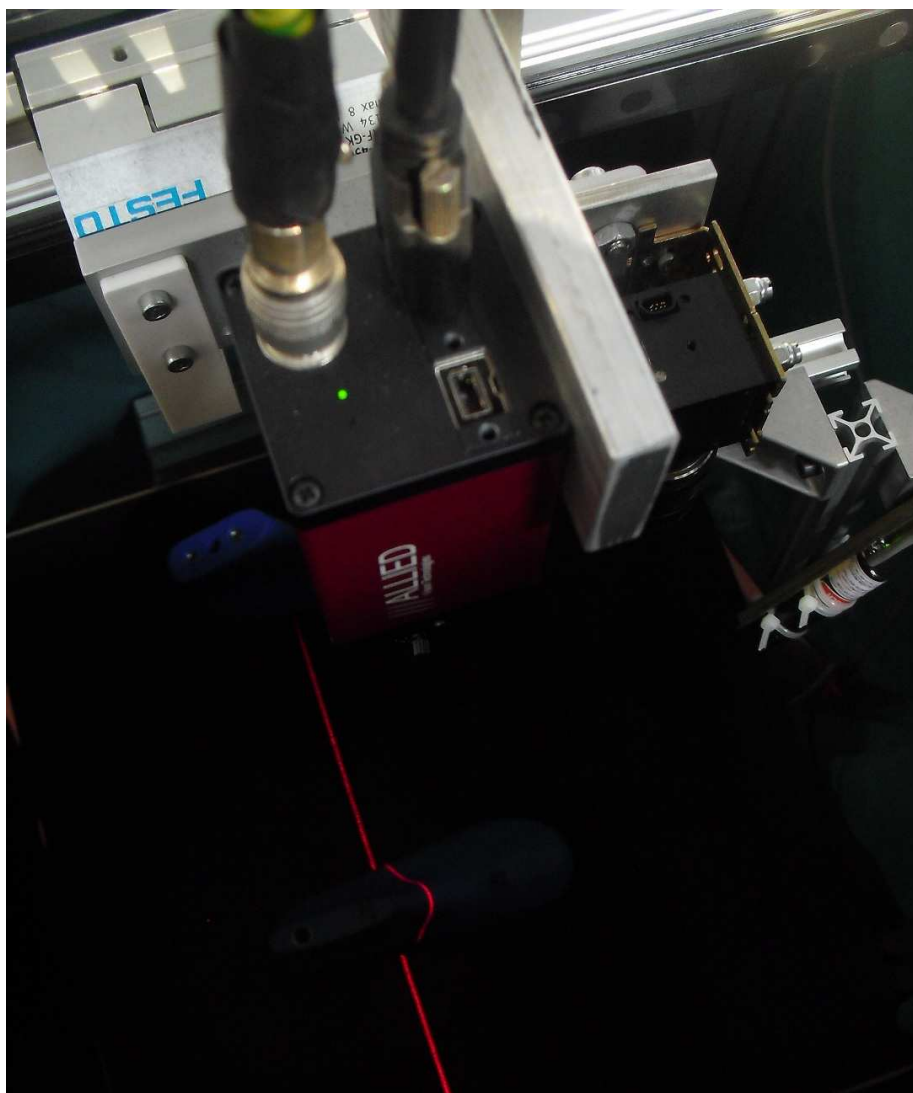


Figura 4.9: Particolare del sistema (visto dall'alto). La struttura è protetta da dei teli per evitare che altre luci interferiscano con l'acquisizione. Infatti è importante cercare di mantenere le condizioni ambientali più omogenee possibili considerato il fatto che al momento non si dispone di un filtro che possa proteggere la lente da dominanti indesiderate

L'interfaccia *Firewire* invece consente una comunicazione bidirezionale tra l'elaboratore e la telecamera: il primo può impostare i parametri di acquisizione dell'immagine (velocità dell'otturatore, settaggio del guadagno, definizione di una *ROI* (region of interest), ecc...) inviando opportuni comandi alla camera, mentre la seconda, una volta acquisite, bufferizzate e trattate le immagini provvede ad

inviarle all'elaboratore.

L'utilizzo di questa telecamera è compatibile con l'**Image Acquisition Toolbox** di Matlab, previa installazione di uno specifico driver, che consente al software di interfacciarsi e comunicare con essa.



Figura 4.10: Particolare del sistema di visione per evidenziare la posizione dell'encoder lineare.



Figura 4.11: Particolare del carrello guida in prossimità di uno dei due sensori induttivi.

La movimentazione di questi componenti avviene su di una guida lineare della *FESTO* alimentata ad una pressione di circa 2 bar (con 2 strozzatori nella camera di uscita) con controllo mediante una elettrovalvola.

4.5 Fase di calibrazione

Come già detto il principio dello scanner laser permette di risalire ad un insieme di coordinate tridimensionali tramite il metodo della triangolazione ottica, partendo dall'immagine della lama di luce. Per fare questo è però fondamentale conoscere in maniera precisa la configurazione del sistema, le distanze e gli angoli esistenti tra i vari elementi che lo compongono. Per quanto preciso possa essere il montaggio la struttura finita non presenterà perfettamente le indicazioni di

progetto e le piccole imprecisioni tra un angolo dichiarato e quello reale possono pesare sul calcolo delle coordinate dei punti finali.

Come sempre, in questi casi, si procede dunque ad effettuare una **calibrazione del sistema**, in maniera da ricavare delle relazioni che leghino direttamente i vari parametri dipendenti dalla configurazione. In letteratura sono presenti diversi metodi (Zhang, Camera Calibration Toolbox) che prevedono una prima fase di calibrazione dei **parametri intrinseci ed estrinseci della telecamera** mediante diverse tecniche e una seconda parte di **definizione del piano laser**. Si è però preferito in questa sede adottare un approccio differente, basato non sulla rilevazione di tutti i parametri della telecamera, quanto sull'effettiva correlazione intercorrente tra deflessione della lama di luce e coordinata Z (altezza dal piano base dove poggia la forma).

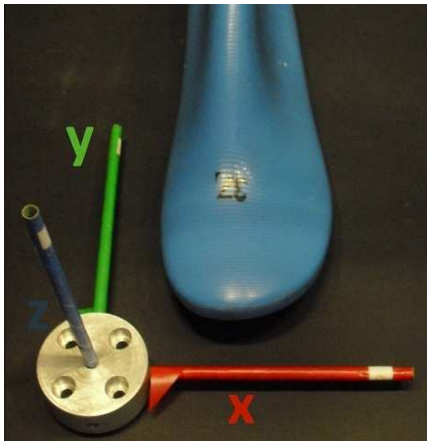


Figura 4.12: Posizionamento del sistema di riferimento mondo.

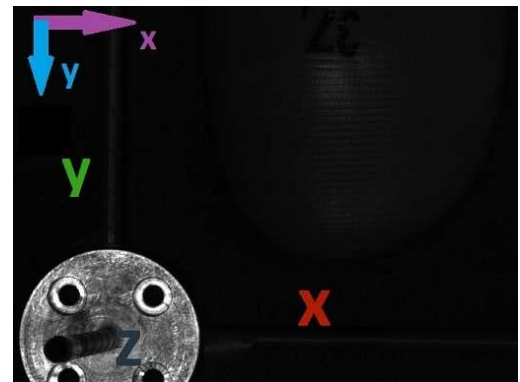


Figura 4.13: Coordinate immagine rispetto al sistema di riferimento mondo.

Sono dunque state studiate delle apposite procedure che permettano di ottenere, secondo le nostre esigenze, i seguenti parametri e relazioni:

- valore reale della **focale** della telecamera e **distanza** del corpo lenti da un piano base preso a riferimento e corrispondente alla coordinata $Z = 0$;
- relazione che espliciti il legame tra la posizione della linea laser nell'immagine e l'altezza Z reale a cui essa corrisponde;
- definizione del piano laser

Per una migliore comprensione nel proseguo si farà riferimento alle **coordinate spaziali del sistema** (X, Y, Z) indicandole con lettera maiuscola, mentre le **coordinate immagine** (x, y) verranno indicate con lettera minuscola.

4.5.1 Focale e distanza

Si utilizza in questa sede una sottile piastrina di alluminio forata, come quella di dove l'interasse tra i due fori è noto ed eseguito con elevata precisione. Acquisendo una serie di fotogrammi di tale oggetto posizionato in varie maniere sul piano di riferimento, si sono elaborate adeguatamente le immagini in modo da localizzare i due centri dei fori e ricavare una media, in pixel, della loro distanza. La prassi viene interamente ripetuta con la piastrina posizionata ad altezze diverse. I valori dell'interasse ottenuti per ogni gruppo d'immagini consentono di risalire alle diverse risoluzioni **pixel/mm** presenti alle varie quote di misura.

Ad ognuna di esse, note anche le dimensioni del sensore della telecamera, è possibile applicare la relazione della focale riportata in 2.1 per risolvere un sistema lineare di n equazioni in 2 incognite (con $n \geq 2$ e pari alle altezze di posizionamento della piastrina). Le due incognite a cui si risale sono dunque il valore reale della focale f e la *distanza* del corpo lenti dal piano preso come riferimento OD , i quali ci consentiranno nell'elaborazione dei dati di conoscere la risoluzione presente ad ogni quota Z , vincolo necessario per calcolare poi correttamente la coordinata X .



Figura 4.14: Piastrina di alluminio forata

4.5.2 Relazione tra Z ed y

L'idea è quella di ricavare un relazione che leghi direttamente la coordinata y dell'immagine acquisita alla corrispondente coordinata Z misurata, con un'equazione del tipo

$$Z = f(x, y) \tag{4.7}$$

includendo nel computo anche la x in modo da cercare di compensare la distorsione. L'oggetto di calibrazione utilizzato a tale scopo e visibile in figura 4.15 presenta una serie di gradini a diverse altezze note a priori. L'intersezione della linea laser trasversalmente ai gradini ci fornisce, dopo l'elaborazione dell'immagine, una sequenza di pixel più o meno lineari per ogni gradino. Associando ad ogni tratto la sua altezza reale Z e operando un fitting su tali dati si ricavano i coefficienti di un polinomio di secondo grado

$$Z = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3y + a_4y^2 \quad (4.8)$$

il cui andamento evidenzia come la coordinata Z vari in maniera parabolica lungo y . Per tener conto anche della distorsione non è però sufficiente elaborare una sola immagine, bensì bisogna che i dati da fittare ricoprano l'intera larghezza del fotogramma e ciò si ottiene acquisendo più immagini della piramide a gradini spostata in diverse posizioni lungo la coordinata x . La validità di tale procedura è stata testata su oggetti noti e il risultato finale della scansione ha messo in evidenza una buona attendibilità per quanto riguarda i punti che ricadono nella parte centrale dei frame, ma anche una notevole deviazione ai lati, imputabile ad una maggior difficoltà nel compensare la distorsione in quella zona.

Una **soluzione più efficace** è stata trovata con una variante del metodo descritto, dove la piramide a gradini è stata sostituita con degli oggetti noti ognuno di altezza diversa e tali che loro lunghezza potesse comparire almeno nell'intera inquadratura dell'immagine. È stato dunque proiettato il fascio laser sul lato superiore di ognuno di essi ottenendo dopo l'elaborazione una serie di linee (teoricamente rette ma in realtà curve perché distorte) Allo stesso modo di prima si associano tali linee e relative altezze (conosciute) e si va ad eseguire il fitting polinomiale, **utilizzando però un polinomio di terzo grado con componenti miste**

$$Z = f(x, x^2, x^3, y, y^2, y^3, xy, xy^2, xy^3, x^2y, \dots, x^3y^3) \quad (4.9)$$

che dalle prove effettuate ha dimostrato di approssimare al meglio la relazione cercata.

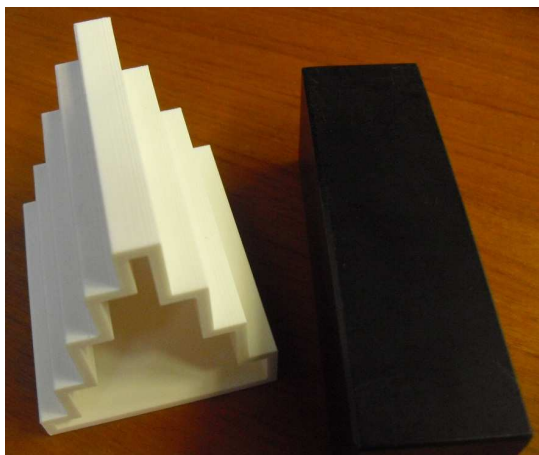


Figura 4.15: Oggetto a gradini e un lineare utilizzati per la calibrazione.

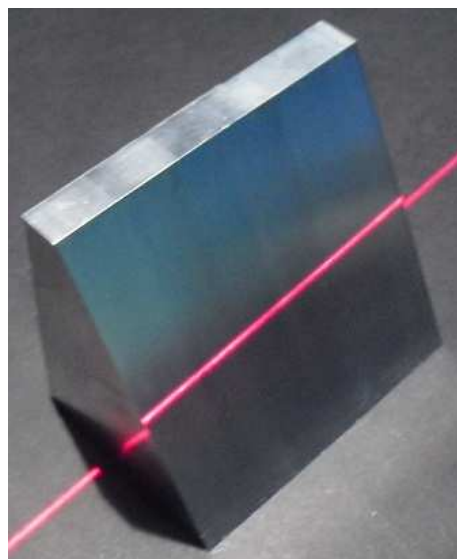


Figura 4.16: Cuneo utilizzato per la seconda fase della calibrazione e rilevare il piano laser.

4.5.3 Definizione del piano laser

Per venire a conoscenza della reale inclinazione del piano laser è necessario acquisire almeno 3 punti toccati dalla lama di luce e di cui siano note le coordinate spaziali, ed infine tracciare il piano passante per essi. Per mettere in atto questo procedimento ci si serve di un cuneo appositamente costruito, il cui lato più inclinato presenta un angolo di 65° rispetto la base. Si effettua quindi una scansione completa di tale oggetto disposto come in figura 4.16. Dalla successiva elaborazione si ottiene la nuvola di punti del piano inclinato di cui, per ogni punto sono note le 3 coordinate spaziali: X e Z facilmente calcolabili dalle precedenti fasi di calibrazione e la Y derivante invece dall'avanzamento tra due immagini successive e dall'inclinazione del piano dell'oggetto che ci è appunto nota. Il riferimento per quest'ultima coordinata potrà comunque essere arbitrario in quanto del piano laser ci interessa solamente la sua angolazione. Dall'insieme di coordinate spaziali ottenute si ricava infine, tramite fitting, l'equazione che definisce il piano laser all'interno del nostro sistema. In pratica l'equazione canonica del piano è

$$aX + bY + cZ + d = 0 \quad (4.10)$$

dove, utilizzando il cuneo come detto, la X e la Z sono conosciute dalle calibrizioni precedenti mentre la Y è ricavata dalla conoscenza dell'inclinazione dell'oggetto. Si possono quindi determinare i coefficienti utili successivamente per il calcolo inverso dalle coordinate immagine alle coordinate de sistema di riferimento mondo.

4.6 Il controllo

Come detto precedentemente si è utilizzato un microcontrollore come dispositivo di controllo e di conteggio del segnale di trigger. È utile fare un breve accenno sulle caratteristiche generali di tali dispositivi.

4.6.1 Introduzione ai microcontrollori

Al giorno d'oggi, troviamo i microcontrollori impiegati sulla maggior parte delle schede elettroniche, dalle più semplici alle più complesse, dove probabilmente ne troviamo due o più, sono l'ideale per applicazione a *basso consumo* e a *basso costo*, che da più di qualche anno a questa parte stanno spopolando.

In commercio ce ne sono di tantissime marche, ognuna ha i suoi punti di forza e fra i più conosciuti vi sono i *PIC Microchip*[9], sono ampiamente utilizzati sia da hobbisti che da industrie del settore. Questi PIC si dividono in diverse famiglie, da quella base PIC10 segue la PIC16, PIC24, PIC32 e dsPIC. In base alla famiglia abbiamo a disposizione architetture a 8,16 o 32 bit.

I **dsPIC Digital Signal Controller (DSC)** di Microchip sono delle potenti macchine **RISC** a 16 bit modificati secondo l'architettura Harvard in modo da unire i vantaggi e le altre prestazioni di un microcontrollore a 16 bit (**MCU**) con l'alta velocità di calcolo di un *processore di segnali digitali DSP*. Tutto questo in un unico chip con un unico set di istruzioni. I dsPIC hanno velocità di calcolo superiori a 30 **MIPS**, un efficiente set di istruzioni nato per il compilatore C, memoria di programma Flash, memoria dati *EEPROM* e *SRAM*, potenti periferiche e una vasta gamma di librerie software, rendendoli così i prodotti migliori per applicazioni embedded.

Microcontrollore:

- Microprocessore
- Linee I/O
- Memoria Flash
- Convertitore A/D
- Timer
- USART
- SPI
- PWM
- ...

Microprocessore:

- Unità di calcolo
- Unità di controllo
- Memoria istruzioni e calcolo

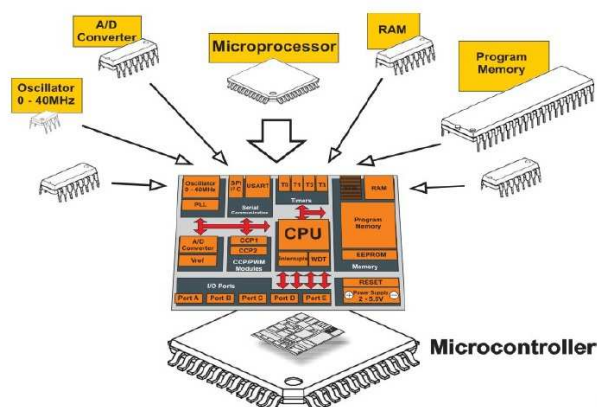


Figura 4.17: Ecco evidenziato in modo schematico le differenze tra un microcontrollore e un microprocessore. Un microcontrollore è predisposto generalmente per svolgere sempre i stessi compiti in modo rapido ed efficiente per cui anche la sua struttura è diversa da quella di un microprocessore che lavora all'interno di una calcolatore (vedi in Appendice B).

4.6.2 Il dsPIC30F4011

Per gestire i vari segnali provenienti dai sensori (di inizio e fine acquisizione) e dall'encoder si è utilizzato un microcontrollore *dsPIC30F4011*. In tabella 4.2 sono riportati alcune delle sue caratteristiche principali. In particolare, la scelta di utilizzare questo microcontrollore ricade sul fatto che presenta un modulo molto utile per i nostri scopi: il modulo QEI che nasce come misuratore di velocità e posizione per tipiche applicazioni di controllo. Un modulo questo, molto semplice da utilizzare infatti nello specifico presenta 2 registri da 16 bit ciascuno per la configurazione dello stesso (tra le quali la possibilità di effettuare il conteggio in quadratura o meno) e di un registro **Maximum Count** sul quale salvare il valore massimo di conteggio dei segnali provenienti dall'encoder (canale A e canale B). Utilizzando un modulo in quadratura (cioè il conteggio riguarda tutti i fronti dei

Parametro	Valore
<i>Architettura</i>	16 bit
<i>Velocità CPU</i>	30 MIPS
<i>Tipo di memoria</i>	Flash
<i>Memoria programmabile</i>	48 KB
<i>Oscillatore interno</i>	7.35 MHz - 512 KHz
<i>Time Register</i>	5
<i>Porte I/O</i>	5
Modulo PWM per il controllo motore	
Modulo QEI (Quadrature Encoder Interface)	
Modulo Captura Input/Output	
Convertitore analogico/digitale	

Tabella 4.2: Caratteristiche principali del microcontrollore dsPIC30F4011.

canali in questione) si è impostato un valore del **Maximum Count** pari a 125 in modo da ottenere un numero di segnali di trigger pari a 336, ovvero una foto ogni millimetro percorso.

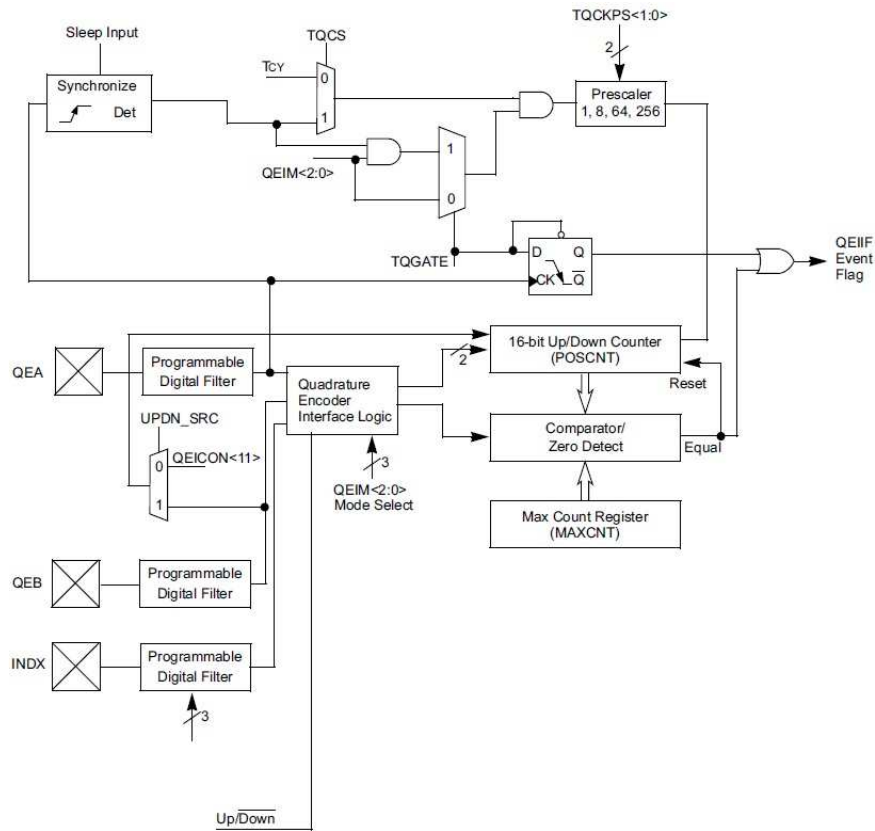


Figura 4.18: Schema interno di come è composto il modulo QEI del dsPIC

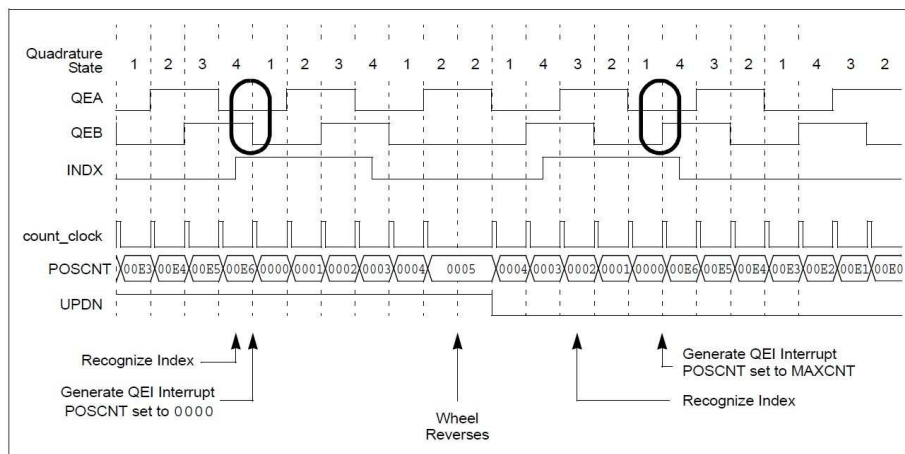


Figura 4.19: Il registro *POSCNT* incrementa o decrementa a seconda se il canale A è in anticipo o ritardo rispetto al canale B. Quando giunge allo stesso valore del *MAXCNT* viene generata una interruzione con la quale, mediante l'uscita di una porta, si manda il segnale di trigger alla telecamera.

Magnetic Sensor MSK5000Incremental, digital interface, resolution 1 μm **Profile**

- Max. resolution up to 1 μm
- Repeat accuracy ± 0.01 mm
- Status LED display
- Works with magnetic band MB500
- Reading distance up to 2 mm

Travel speed

Resolution (mm)	Travel speed V_{max} (m/s)										
	0.001	0.005	0.010	0.025	0.050	0.100	0.20	0.25	0.50	1.00	2.50
0.001	4.00	3.20	1.60	0.80	0.32	0.20	0.10	0.05	0.03	0.01	
0.005	20.00	16.00	8.00	4.00	1.60	1.00	0.50	0.25	0.13	0.06	
0.010	25.00	25.00	16.00	8.00	3.20	2.00	1.00	0.50	0.25	0.12	
0.025	25.00	25.00	25.00	20.00	8.00	5.00	2.50	1.25	0.63	0.30	
0.050	25.00	25.00	25.00	25.00	16.00	10.00	5.00	2.50	1.25	0.61	
0.100	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00	20.00	10.00	5.00	2.50	1.21	
Pulse interval (μs)	0.20	0.25	0.50	1.00	2.50	4.00	8.00	16.00	32.00	66.00	
Counting frequency (kHz)	1250.00	1000.00	500.00	250.00	100.00	62.50	31.25	15.63	7.81	3.79	

Figura 4.20: Data sheet sensore lineare *SIKO MSK5000* per misura di spostamenti lineari. La misura di posizione avviene attraverso la lettura del sensore di una banda magnetica lineare (*MB500*) applicata a bordo macchina con supporto biadesivo. Novità significativa, rispetto agli encoder precedenti della stessa famiglia, è la possibilità di programmare liberamente i parametri di funzionamento di risoluzione (fino a 0,001mm), velocità di misura (fino a 25 m/sec), ampiezza impulso di zero. La presenza di 4 led facilita la messa in servizio grazie ad una immediata diagnostica su uscita segnali.

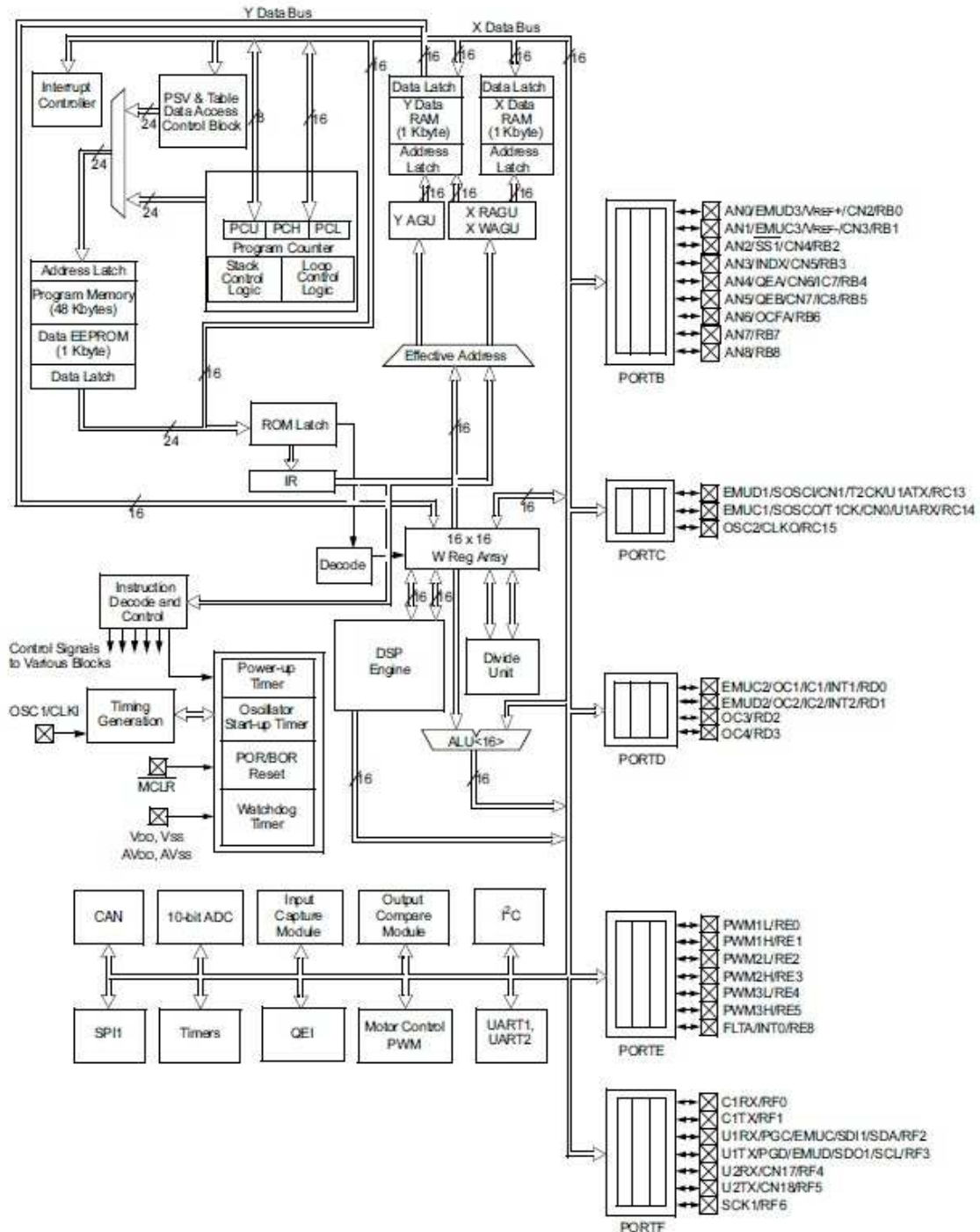


Figura 4.21: Schema dell'organizzazione interna del controllore dsPIC

Capitolo 5

Software del sistema di visione

La parte software del progetto, programmi di acquisizione ed elaborazione delle immagini del sistema di visione sono stati sviluppati sulla piattaforma MATLAB con l'aiuto di file mex pre-compilati in linguaggio C. La scelta di MATLAB come ambiente di sviluppo del software di elaborazione è stata dettata dalla grande versatilità e potenza di questo software, nonché dalla disponibilità di appositi toolbox per l'acquisizione e l'elaborazione di immagini dotati di numerose funzionalità.

5.1 Coordinate pixel e spaziali

Vediamo innanzi una breve introduzione sulla struttura di una immagine. In generale, il metodo più conveniente per esprimere il posizionamento dei pixel in un immagine, usa le *coordinate dei pixel*. In questo sistema di coordinate, l'immagine viene vista come una griglia di elementi discreti, ordinati dall'alto verso il basso e da sinistra verso destra.

Questo tipo di coordinate sono formate da due componenti, la prima, r rappresenta la riga mentre la seconda c , rappresenta la colonna e i numeri in questione appartengono alla famiglia degli interi. Individuato l'elemento corrispondente alle coordinate, si ha a disposizione il valore d'intensità del pixel, quest'ultimo può essere un numero reale o complesso. Va ricordato inoltre, che esiste un legame biunivoco tra la matrice e l'immagine, per cui ad ogni elemento matriciale viene collegato uno e un solo pixel. Comunque, essendo questi unità discrete, identifica-

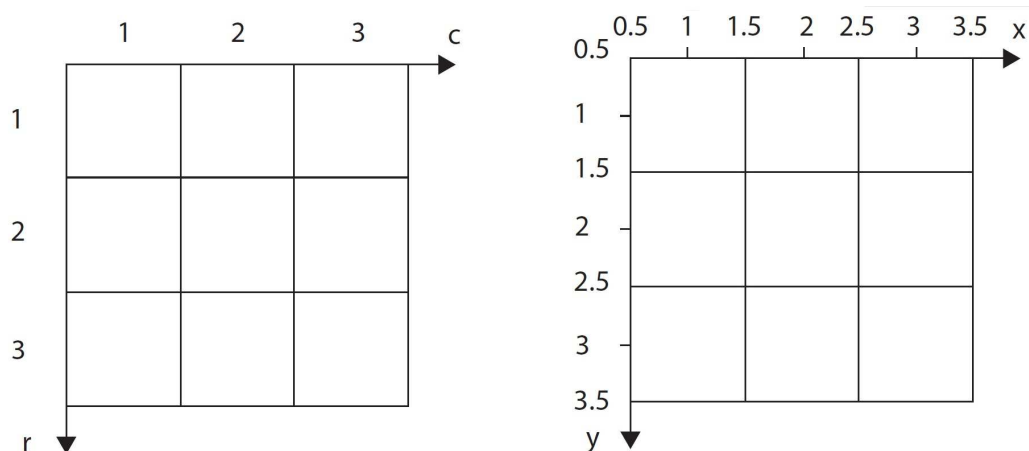


Figura 5.1: Immagine con coordinate pixel (a sinistra) e coordinate spaziali (a destra)

te senza alcun equivoco da una singola coppia di coordinate. In questo caso però una scrittura come $(6.2,9.5)$ non individua alcun punto. Se invece pensiamo al pixel come una toppe quadrata dell'intera figura, la coordinata descritta avrà un significato ben preciso. Questo tipo di coordinate si basa su un sistema continuo, formato dalla coppia (x,y) , dove la prima componente indica l'ascissa mentre la seconda l'ordinata (vedi figura 5.4 a destra).

Le *coordinate spaziali* hanno diverse cose in comune con il sistema visto in precedenza. Per esempio, con sistema a coordinate spaziali, gli indici per individuare il centro di ciascun pixel, corrispondono alle stesse coordinate del primo sistema sopracitato. In ogni caso però ci sono delle sostanziali differenze. Con le coordinate dei pixel l'angolo in alto a sinistra dell'immagine è sempre $(1,1)$, mentre con le coordinate spaziali questo punto è localizzato da $(0.5,0.5)$. Questa differenza dovuta al fatto che un sistema di coordinate è discreto mentre l'altro è di tipo continuo (c. spaziali). Se si vuole far combaciare le coordinate per il medesimo punto è possibile specificare un origine diversa per il sistema spaziale. Questo espediente permette di riciclare alcuni programmi validi per il sistema in coordinate dei pixel, e utilizzarli per i sistemi in coordinate spaziali. Un'altra diversità, che può indurre all'errore, è l'ordine con qui compaiono gli indici. Le componenti orizzontali e verticali risultano essere rovesciate. Le coordinate dei pixel sono indicate con (r,c) , $r = \text{righe}$ e $c = \text{colonne}$, mentre per le coordinate spaziali si ha

(x,y), già note con i diagrammi cartesiani.

5.2 Acquisizione con MATLAB

Per l'acquisizione dell'immagine si è fatto uso delle funzioni dell'Image Acquisition Toolbox di MATLAB[10] . Questo toolbox permette la creazione di un oggetto speciale di tipo *videoinput* attraverso il quale controllare l'acquisizione dei frame forniti dalla telecamera. É possibile inoltre impostare tutta una serie di parametri nell'oggetto video: selezionare la sorgente di provenienza del trigger, il numero di frame da acquisire, il formato di acquisizione dell'immagine, ecc. Una volta acquisiti i frame di interesse questi possono essere visualizzati su schermo oppure salvati su disco ed analizzati.

Tramite l'Image Acquisition Toolbox MATLAB è in grado di interfacciarsi a vari tipi di dispositivi di acquisizione video attraverso una serie di Hardware Driver Adaptor (dcam, coreco, winvideo, ecc.) specifici per ogni tipologia di telecamera. Gli standard supportati per ora dall'Image Acquisition Toolbox comprendono USB, IEEE 1394 (connessione Firewire) e PCI (schede frame grabber). Il frame di un'immagine acquisita con una telecamera monocromatica con una profondità di 8 bit, quindi con 256 diversi livelli di luminosità si presenta come una matrice di dimensioni pari alla risoluzione del formato di acquisizione nella quale **il livello di luce di ogni pixel viene rappresentato da un numero intero compreso tra 0** (assenza di luce, nero) **e 255** (luce saturata, bianco).

5.3 Elaborazione dell'immagine con Matlab

Come detto precedentemente l'intersezione del piano di luce laser con la superficie dell'oggetto è utilizzata al fine di rivelarne il profilo. Quindi in pratica l'operazione da fare possono essere due

- seguendo quanto detto nel paragrafo 2.2 si calcola lo scostamento che c'è tra la linea laser osservata in presenza dell'oggetto ed il **pattern iniziale di riferimento** (il fascio laser privo della forma)

- calcolare in modo analogo lo scostamento della linea laser osservata ma in questo caso elaborare i dati ottenuti mediante i polinomi ottenuti in fase di calibrazione descritti in 4.5.2 e 4.5.3

Concettualmente i due approcci sono simili, ma dato che le nostre calibrazioni tengono conto anche della distorsione dell'ottica, in seguita si farà riferimento proprio a questa seconda tecnica.

Una volta completata la fase di calibrazione della linea base si può procedere alla scansione della forma desiderata con successiva elaborazione off-line. Si è scelto di operare inizialmente in questo modo per semplicità, ma l'obiettivo futuro sarà sicuramente quello di effettuare l'elaborazione on-line¹. L'idea che sta alla base dell'algoritmo di elaborazione per il calcolo dello scostamento della linea deformata si basa essenzialmente su tre concetti:

- estrarre una *ROI* (*region of interest*) dinamica in modo da poter elaborare immagini di dimensioni inferiori all'originale²
- analizzare l'istogramma di ogni colonna per ricavarne il baricentro in funzione del livello di luminosità di ogni pixel
- trasformare le coordinate pixel ricavate in coordinate descritte dal sistema di riferimento mondo (X,Y,Z)

5.3.1 Calcolo dello scostamento

In una fase di *pre-elaborazione* abbastanza breve l'algoritmo ricerca le prime due immagini dove lo scostamento rispetto la linea base è visibile. Per far questo si effettua inizialmente una sogliatura (mediante la funzione *roicolor*) e successivamente una ricerca dei pixel bianchi con il comando *find* sull'intera immagine privata della base che ne conosciamo ora il posizionamento (anche se con un certo errore). In questo modo, similmente al descrittore *boudingbox* si ricavano le due *ROI* (un vettore di 4 elementi con le coordinate del punto in alto a sinistra e le

¹Poter acquisire mediante file mex compilati in C ed elaborare le immagini con *Matlab*

²Chiaramente elaborare matrici di dimensioni notevolmente ridotte è un notevole vantaggio per quanto riguarda la velocità dell'intero algoritmo

```

FOR  ogni colonna di  $image_{roi}$ 
    vett  estraggo i pixel di valore  $> 50$  della colonna(i)
    IF    vett non vuoto
        IF    grandezza di vett  $> 5$  unità
             $PIXEL_{MED} =$  media ponderata
            su tutta la colonna i-esima;
        ELSE
            creo un intorno sui pixel bianchi;
            conformità con i bordi di  $image_{roi}$ ;
             $PIXEL_{MED} =$  media ponderata
            sull'intorno i-esimo;
        END
    END
ELSE
     $PIXEL_{MED} = -1;$ 
END
END

```

Tabella 5.1: Algoritmo in pseudo codice per la selezione del pixel che viene intersecato del fascio laser

dimensioni in larghezza e altezza) delle immagini.

A questo punto si può partire con la prima parte dell'algoritmo che riportiamo in tabella 5.1 sotto forma di pseudo-codice.

L'idea, come annunciato all'inizio, è quella di scorrere una per una le colonne dell'immagine ritagliata ed estrarre il pixel su cui cade il fascio laser calcolando la media ponderata del vettore colonna rispetto ai valori (che ricordo variano da 0 a 255) che hanno i corrispondenti pixel della colonna stessa (figure 5.2 e 5.3).

Il problema nell'utilizzare tale tecnica è quella relativa ai bordi della forma dove vi è una caduta di intensità del laser e di conseguenza una diminuzione del valore di luminosità dei pixel interessati. Molto spesso i valori ottenuti non erano congrui al valore atteso o persino mancavano. Per questo motivo si è pensato di introdurre un intorno più piccolo in prossimità dei pixel interessati ed effettuare

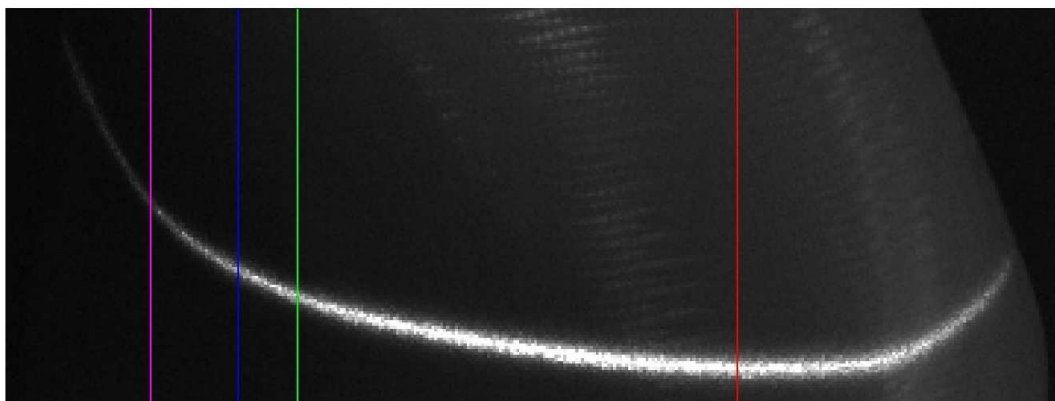


Figura 5.2: Esempio di *ROI* ottenuta in fase di elaborazione

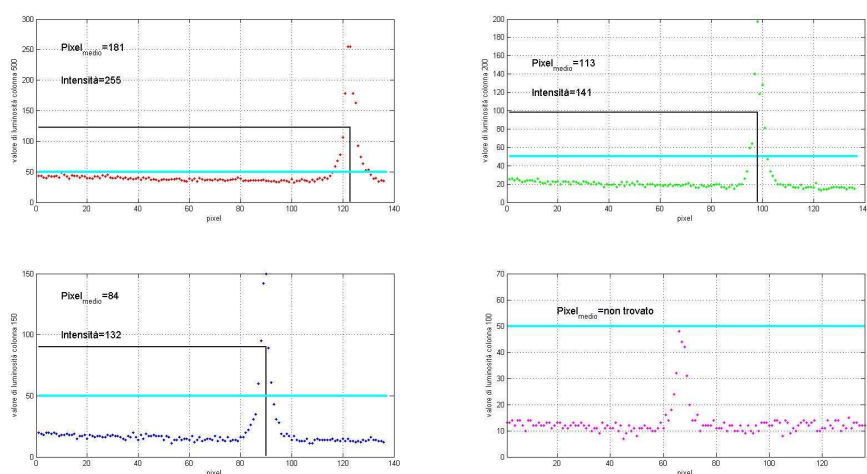


Figura 5.3: Grafici del calcolo del baricentro di varie colonne estratte dalla *ROI* riportata in figura 5.2

il calcolo del baricentro solo per questi valori (vedi figura 5.4).

Il **secondo passo** dell'algoritmo è quello relativo all'aggiornamento della *ROI* utile per l'acquisizione successiva. Per effettuare questo passaggio si valutano va a rapportare i *confini* della linea di pixel (quella dell'immagine attuale e quella precedente) con le rispettive dimensioni delle *ROI*.

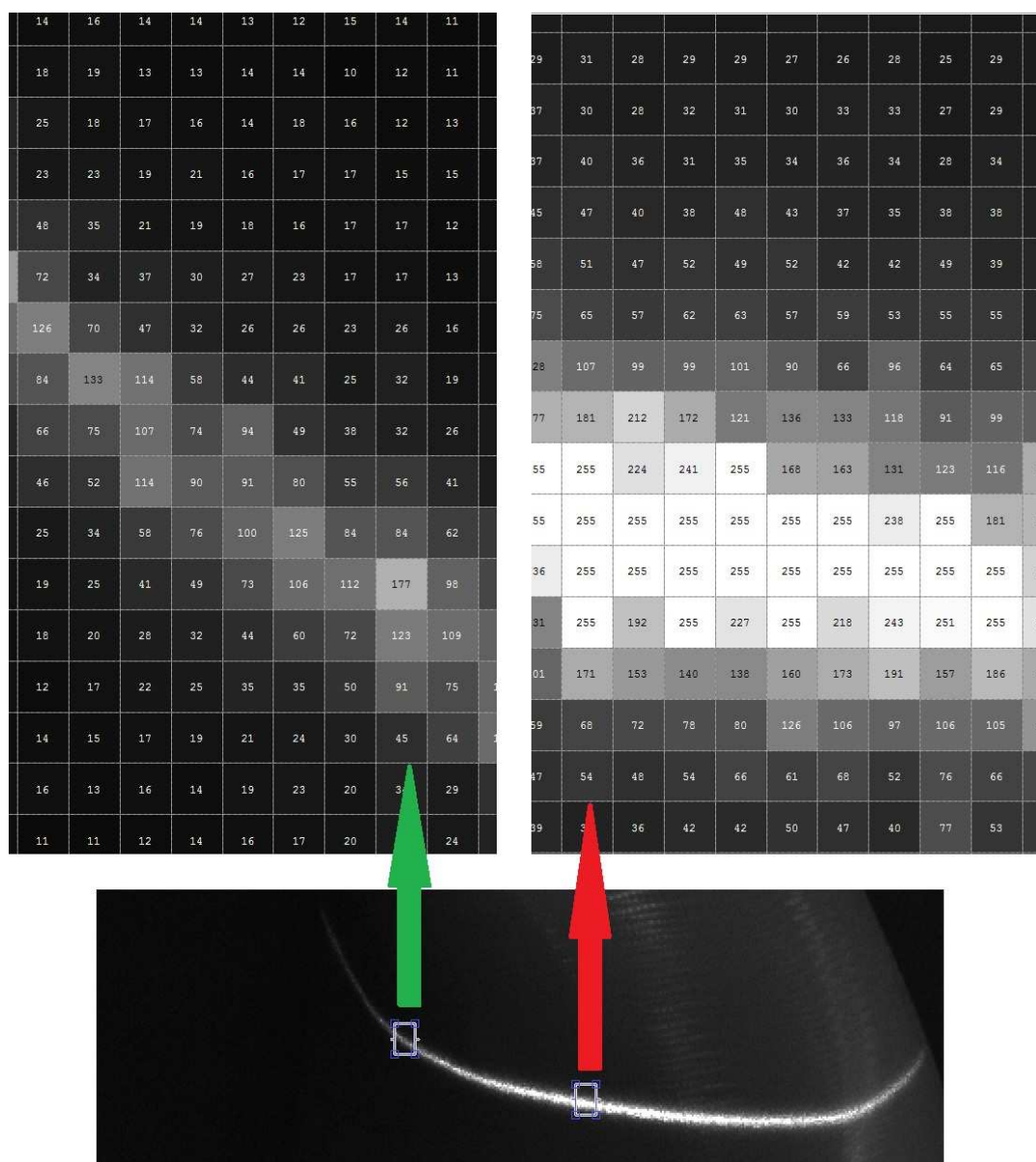


Figura 5.4: La roi selezionata (figura in basso) mostra due particolari zoomati. Quello rosso è una zona dove il pixel medio è determinabile in modo facile e abbastanza preciso, mentre l'ingrandimento in verde è più problematico in quanto è preponderante la presenza di pixel neri (o comunque di un valore di intensità bassi - minori di 60,70) rispetto ai pochi (o all'unico) pixel interessati dal fascio laser. Poter restringer quindi il range su cui si effettua la media ponderata risulta fondamentale, in tal modo i pixel con più luminosità incideranno maggiormente.

In altri termini, riferendoci alla figura 5.5 si calcola, per il lato destro,

$$\frac{r_{right}(i) - w_{right}(i)}{r_{right}(i-1) - w_{right}(i-1)} \quad (5.1)$$

mentre per il lato sinistro

$$\frac{r_{left}(i) - w_{left}(i)}{r_{left}(i-1) - w_{left}(i-1)} \quad (5.2)$$

dove per $i-1$ indichiamo l'immagine precedente rispetto all'iterazione attuale i del ciclo. I casi quindi sono:

- se 5.1 è maggiore di 1 allora allargo il bordo destro della successiva *ROI* altrimenti lo restringo
- se 5.2 è maggiore di 1 allora restringo il bordo della *ROI* altrimenti lo allargo

Se i rapporti invece coincidono la *ROI* rimane invariata (questo caso però si verifica molto di rado in quanto le immagini differiscono sempre di qualche pixel per via del movimento). Per quanto riguarda invece l'aggiornamento del bordo superiore e inferiore ci si limita ad estrarre solamente il valore massimo e minimo del vettore w (riferito in figura 5.5) sommando un certo offset.

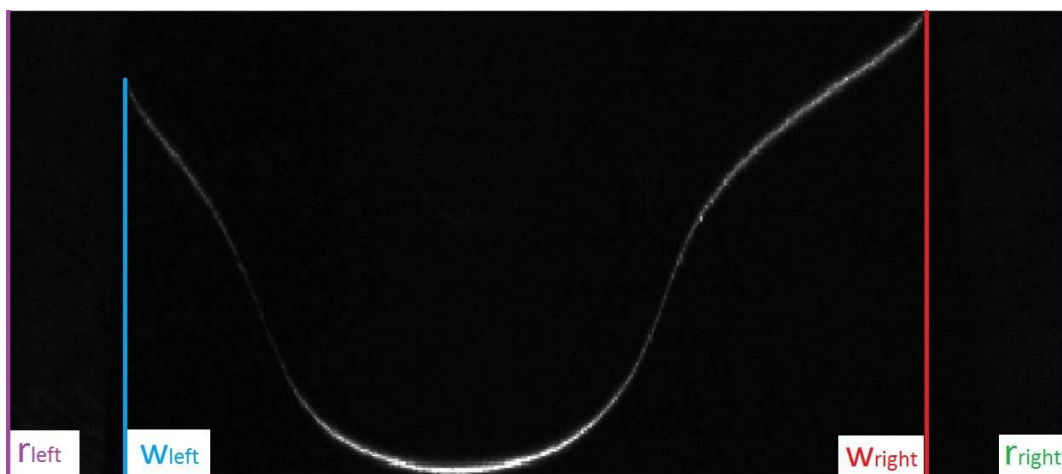


Figura 5.5: Esempio di una *ROI* dove si evidenziano i 4 elementi principali utilizzati per l'aggiornamento.

L'incremento (o il decremento) attualmente è di un valore costante dell'ordine di 5 pixel, in quanto comunque, la distanza in termini di lunghezza reale tra una foto e l'altra è di $1mm$ e quindi la variazione in termini di pixel tra di loro sarà al massimo di 5 pixel (dettata dalla risoluzione che abbiamo). Nulla comunque vieta in futuro di poter fare una stima della variazione inserendo un offset variabile.

Ottenuti dunque tutti i valori medi delle varie immagini non resta che ricavare le rispettive coordinate nel sistema di riferimento mondo. Ci si avvale delle stesse equazioni utilizzate in fase di calibrazione, con la differenza che in questo caso conosciamo le coordinate in pixel e i coefficienti che le legano alle coordinate mondo.

Mediante 4.9 ci ricaviamo la coordinata Z , successivamente la risoluzione a tale altezza. La X è ottenuta girando la formula 2.1 e infine la Y è ottenuta dell'equazione del piano laser (ora conosciuto) tenuto conto anche dello spostamento tra una immagine all'altra.

5.3.2 Confronto della nuvola di punti

Una volta ottenuta l'intera nuvola di punti dalla forma scansionata si può effettuare l'ultimo passaggio che completa il ciclo di lavoro per cui è finalizzata la cella. Tale operazione prevede il confronto della rilevazione effettuata con il *CAD 3D* della forma in questione. Quest'ultima analisi tuttavia non viene condotta nello spazio tridimensionale valutando gli scostamenti della prima dalla superficie teorica esatta, bensì si esegue un confronto bidimensionale, mirato a **controllare solo alcune specifiche sezioni identificate e ritenute rilevanti** dall'azienda ai fini del controllo. Ciò prevede innanzitutto il sezionamento della superficie *CAD* con un piano, cosa di per sé immediata se eseguita in ambiente *CAD*, ma non altrettanto banale da ricavarsi esternamente a partire dalle *NURBS* che compongono la forma stessa. In particolare, vista la loro struttura matematica, non è possibile ricavare analiticamente la loro intersezione con un'altra entità geometrica, ma bisogna ricorrere ad un *algoritmo di ricerca* per rintracciare una serie di punti in cui il piano tagli le *NURBS*, e in un secondo momento approssimare quest'ultimi con delle *spline*. È stato sviluppato appositamente uno script che esegue quanto detto, partendo dalla struttura dati della forma importata in

Matlab come descritto nel capitolo 2 e l'equazione canonica del piano di sezione

$$ax + by + cz + d = 0$$

. In particolare si calcola dapprima per ogni superficie *NURBS* una griglia di punti ad essa appartenenti, successivamente il prodotto scalare tra le loro coordinate e il vettore (a, b, c) fornisce come termine noto d la loro distanza dal piano in questione. Trasformando la distanza positiva e negativa del termine d in una griglia di valori binarizzati e sfruttando a questo punto una serie di funzioni proprie dell'elaborazione delle immagini, si risale alla linea di taglio del piano sulla superficie. Quest'ultimo è approssimativamente noto tramite l'insieme di punti più vicini all'intersezione vera e propria tra quelli calcolati della griglia. Per ottenere però una maggior precisione si procede ulteriormente ad affinare quei quadranti della griglia stessa che ricadono a cavallo di tale intersezione. Si procede dunque cercando tra i nuovi punti della griglia più fitta e localizzata quelli ancora più a ridosso della linea di sezione, che presentino il termine d più basso, entro una precisione determinata a priori.

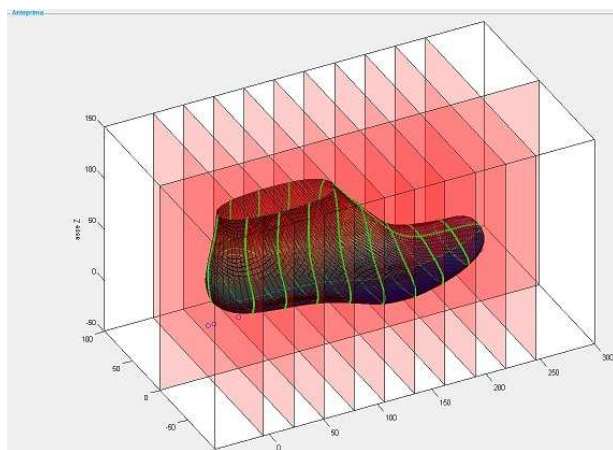


Figura 5.6: Gui sviluppata in *Matlab* per il calcolo delle intersezioni tra vari piani e la struttura *NURBS* importata da un file *igs*.

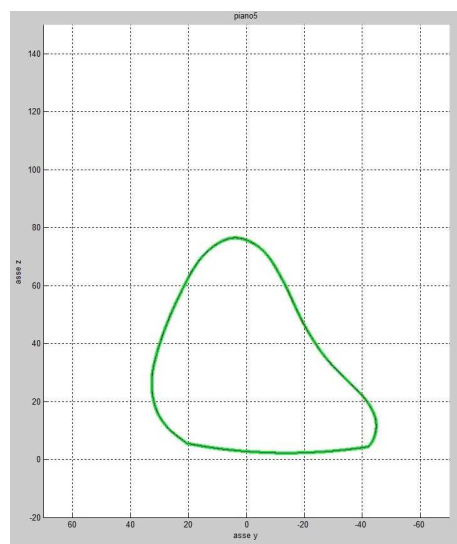


Figura 5.7: Esempio 2D ottenuto dall'intersezione di un piano con la struttura *NURBS*.

In tal modo si può ottenere infine un insieme di punti che ben delineano la sezione voluta, come mostrato in figura 5.7. Da questi viene quindi ricavato il baricentro della sagoma e le coordinate polari (rho, θ) di ogni punto rispetto ad esso. L'ultimo passaggio è l'approssimazione di ogni parte di superficie interessata dalla sezione con una spline del tipo

$$(x, y) = f(\theta) \quad (5.3)$$

Passando invece alla nuvola di punti ottenuta dalla scansione, si procede a calcolare per ogni tripletta di coordinate la distanza d , come già descritto sopra. Quindi vengono considerati adatti come elementi per l'approssimazione tutti quei punti con il valore assoluto di d inferiore ad un certo valore prefissato, il che corrisponde idealmente a prendere quella parte di nuvola contenuta tra due piani paralleli a quello di sezione e distanti d da quest'ultimo. Successivamente si proiettano i punti spaziali sul piano di sezione e si approssimano con le medesime spline utilizzate in precedenza. A questo punto il confronto è eseguito tra le due spline, quella derivante dal modello *CAD* e quella ottenuta dalla scansione, se la misura è conforme alle tolleranze dovranno sovrapporsi e al massimo presentare uno scostamento inferiore a quello consentito.

5.4 Alcuni risultati finali

Riportiamo in questa sezione conclusiva alcuni risultati finali delle scansioni eseguite. Tutte le *nuvole di punti* ottenute dalle singole scansioni sono poi state importate in programmi di modellazione 3D (in questo caso abbiamo utilizzato *Geomagic*) per l'allineamento e il confronto con i *CAD* originali forniteci dall'azienda.

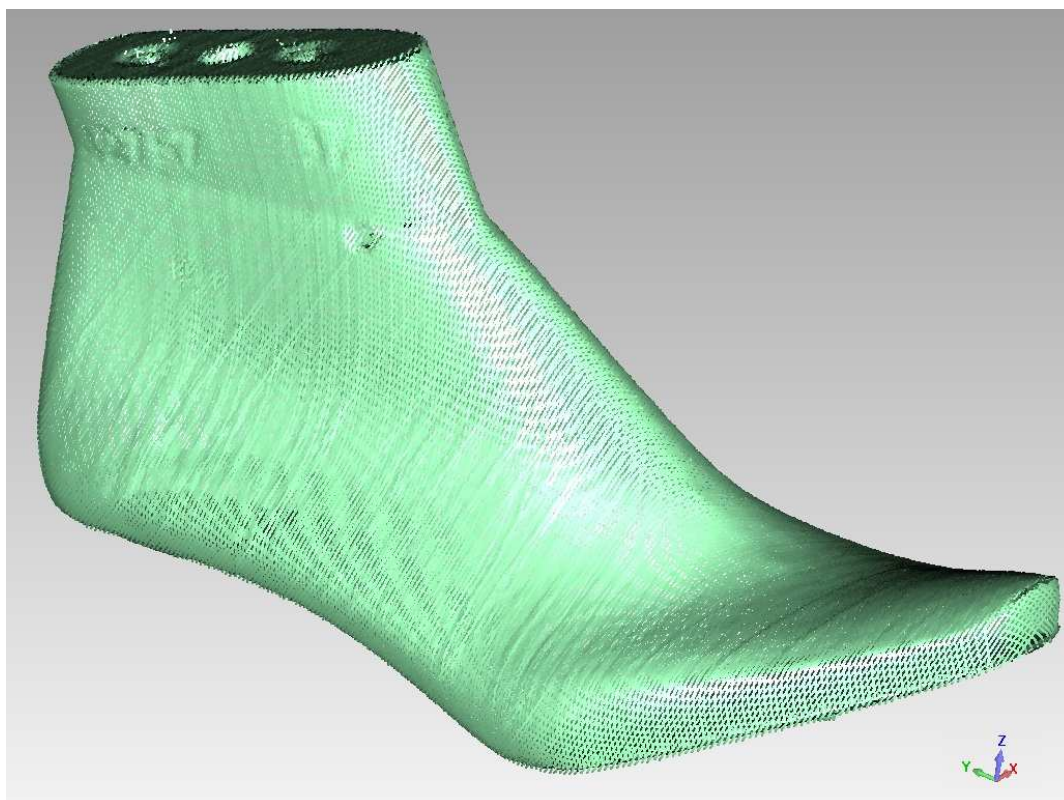


Figura 5.8: La ricostruzione 3D è composta da 6 nuvole di punti ottenute dalle varie scansioni seguendo il procedimento descritto nei capitoli precedenti³.

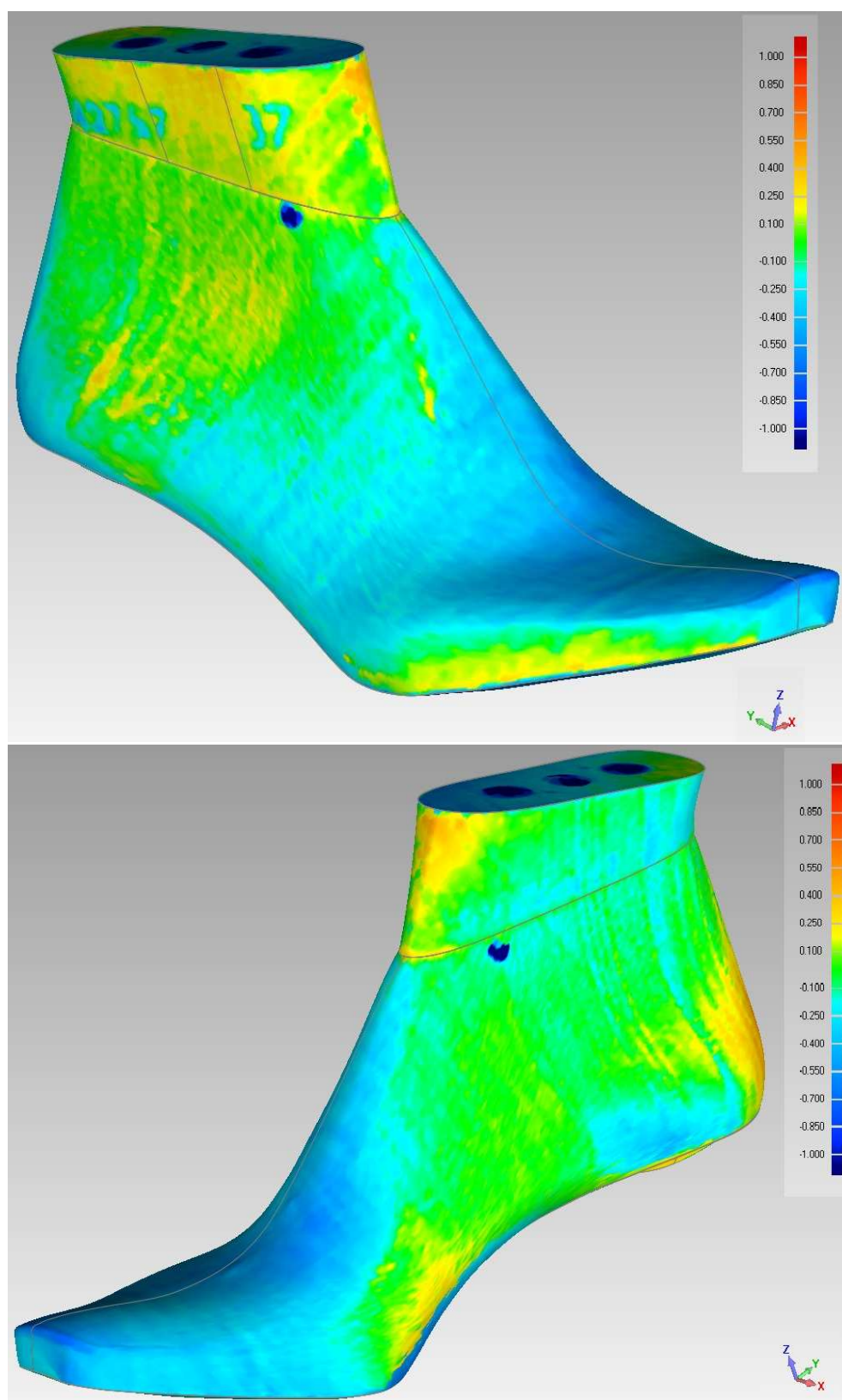


Figura 5.9: Una prima ricostruzione completa della forma. Le zone in verde hanno un errore in modulo minore di 0.1 mm

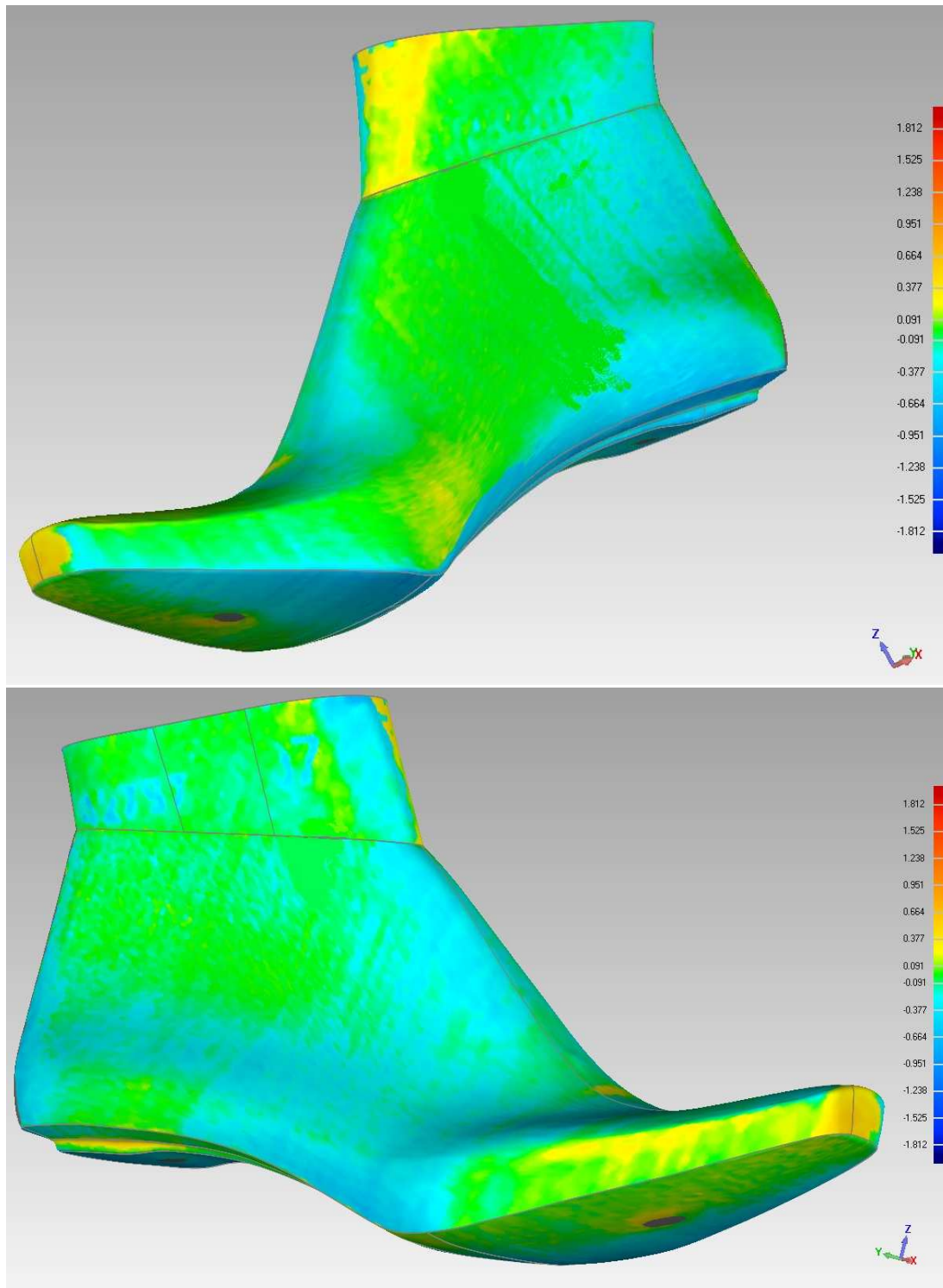


Figura 5.10: Una seconda ricostruzione 3D

Conclusioni

Lo scopo della ricostruzione $3D$ è quello di rilevare la geometria $3D$ di un oggetto. I controlli qualità in $3D$ sono di tipologia simile a quelli $2D$, ossia presenza/assenza, misure, corretto montaggio ed altro, ma si avvantaggiano delle informazioni di profondità che un sistema $2D$ non può dare. Queste informazioni possono portare un valore aggiunto in alcuni casi in cui è difficile distinguere l'oggetto da analizzare dal suo sfondo o in cui l'informazione utile è la profondità dell'oggetto. Per realizzare un controllo qualità $3D$ si deve inizialmente progettare un sistema di acquisizione di immagini $3D$, in cui ogni pixel rappresenta una distanza e non più un colore o una luminanza come nelle immagini standard. Le mappe di profondità, anche denominate come *depth map* o *range image*, possono essere generate con varie tecniche.

La luce strutturata è la categoria più generale in cui vi è anche la tecnica della linea laser. Per luce strutturata si intende un sistema telecamera più proiettore di luce, che proietta griglie, righe o altri tipi di pattern al fine di intercettare l'oggetto e ricostruirlo. La ricostruzione con linea laser è probabilmente la più conosciuta e per questo motivo esistono vari modelli di telecamere che implementano questo algoritmo a bordo. Questa tecnica consiste nel calcolare la posizione $3D$ della riga laser proiettata sull'oggetto poiché la posizione di telecamera e laser sono conosciute (calibrate).

In particolare in questo lavoro di tesi si sono effettuate delle prove di scansione e ricostruzione di oggetti per la calzatura. Componenti questi che sono soggetti a controlli di qualità da parte degli operatori durante l'inizio della catena produttiva, ma che, per ragioni di tempistiche aziendali, vengono effettuati solo saltuariamente. Ecco la necessità di sviluppare un sistema di misurazione.

Si è cercato quindi di realizzare un sistema di visione utilizzando la tecnica della triangolazione laser, analizzando dapprima le richieste dell'azienda (flessibilità, rapidità e precisione) e andando quindi a proporre una configurazione consona a tali direttive. Per le prove si sono utilizzati i componenti fra quelli presenti in laboratori cercando comunque sempre di analizzare pregi e difetti di ognuno.

Si sono riscontrati problemi riguardante la riflessione di qualche materiale per via di luci esterne indesiderate risolte, per il momento, con il ricoprimento della cella con dei teli. La possibilità in un futuro di utilizzare un filtro applicato all'ottica e utilizzando dei pannelli oscuranti potrebbero migliorare sicuramente questo problema.

Altro problema riguarda la guida lineare pneumatica: per le nostre prove in laboratorio si è rivelata di semplice installazione, ma di poca affidabilità per un sistema di visione atto ad essere veduto in quanto lo scorrimento non è del tutto lineare. Molto più affidabile sarebbe sicuramente l'utilizzo di un carrellino guidato da motore elettrico controllato mediante ad esempio un profilo di velocità.

Infine per l'utilizzo della telecamera la scelta potrebbe ricadere ad esempio su di una *PikeF* – 145 che presenta sia una risoluzione doppia e sia un sensore più grande rispetto a quella utilizzata in questo progetto di tesi, senza penalizzare troppo la velocità di acquisizione.

Tutti questi suggerimenti potrebbero essere di aiuto per un successivo lavoro che potrà prevedere sicuramente la costruzione dell'intera cella comprendente anche la parte meccanica per la rotazione della forma nonché l'utilizzo del simulatore anche per interfaccia utente per realizzare un sistema di misura completo ed efficiente in ogni sua parte.

Appendice A

Il modello della telecamera

È molto importante, soprattutto quando si necessita di una buona precisione, conoscere l'entità delle distorsioni (non solo quelle relative agli errori costruttivi del CCD, ma anche quelle geometriche) e ricavarne un modello correttivo al fine di poter elaborare le immagini distorte ottenendo delle immagini rettificate. La stima dei parametri necessari a correggere l'errore di distorsione si ottiene per mezzo di un procedimento detto **calibrazione** della telecamera; tale procedimento, come si vedrà più avanti, si basa sul rilevamento di un insieme di punti immagine le cui coordinate di riferimento siano note mediante l'utilizzo di oggetti calibrati di cui cioè conosciamo perfettamente le dimensioni. La calibrazione permette inoltre di determinare parametri come la **lunghezza focale** e la posizione della telecamera nello spazio usando la telecamera stessa come sistema di misurazione: ciò garantisce una precisione maggiore rispetto a una misura manuale e risulta molto comodo nel caso in cui la telecamera venga mossa di frequente.

In particolare si dicono **parametri intrinseci** tutti i parametri che dipendono dalla telecamera o dalle sue componenti (**lunghezza focale, punto principale, distorsione**); questi parametri generalmente non cambiano nel tempo, a meno di sostituire alcuni componenti (ad esempio l'ottica) o di variare le regolazioni della telecamera stessa (zoom, apertura del diaframma, ecc). Con il termine **parametri estrinseci** si indicano invece **le matrici di rotazione e i vettori di traslazione che definiscono la posizione della telecamera** rispetto a un punto fisso dello spazio (ad esempio un punto del piano di lavoro). Al contrario

di quelli intrinseci i parametri estrinseci vanno ricalcolati ogni volta che la telecamera viene spostata. Per capire come una telecamera elabora le proprie immagini occorre fare riferimento a un modello matematico della stessa. In letteratura[11] esistono molti modelli di funzionamento validi, ma il più utilizzato è il modello pin-hole, sia per la sua semplicità che per la discreta precisione che offre.

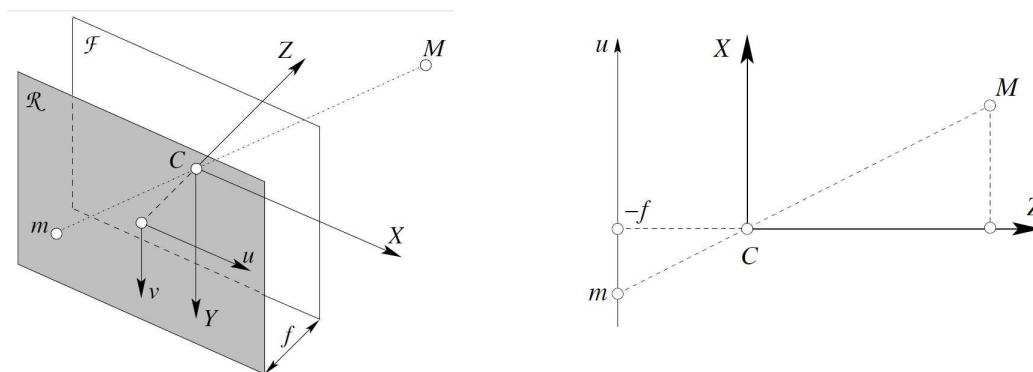


Figura A.1: Schema intuitivo del come è composto il sistema di visione

Il modello pin-hole approssima la telecamera con una scatola chiusa, su una delle cui facce è stato praticato un foro (il pin-hole, o foro di spillo), detto anche **centro ottico** o centro di proiezione. Il piano che giace sulla faccia dove è stato praticato il foro si dice **piano focale**. Si prenda un oggetto qualunque e lo si metta di fronte al piano focale. Dall'oggetto partono dei raggi luminosi per emissione riflessa alcuni dei quali entrano nel foro e vanno a colpire la superficie opposta della scatola, detta **piano immagine**. La distanza f tra il piano focale e il piano immagine prende il nome di distanza focale. Viene detta **asse ottico** la retta normale al piano focale passante per il foro, mentre è detto **punto principale** l'intersezione tra l'asse ottico ed il piano immagine. Si fissi un *sistema di riferimento* cartesiano tridimensionale XYZ con origine nel centro ottico C e si scelga un generico punto della scena di coordinate $P=(X, Y, Z)$. Sia $P'=(X', Y', Z')$ il corrispondente punto sul piano immagine. Da considerazioni

geometriche e sfruttando la similitudine tra i triangoli segue che:

$$\begin{aligned} X' &= -\frac{f}{Z}X \\ Y' &= -\frac{f}{Z}Y \\ Z' &= -f \end{aligned} \tag{A.1}$$

Si noti che l'immagine è invertita rispetto alla scena, sia destra-sinistra che sopra-sotto, come indicato dal segno meno. Queste equazioni definiscono il processo di formazione dell'immagine che prende il nome di proiezione prospettica. Equivalentemente possiamo modellare la proiezione prospettica ponendo il piano immagine davanti al centro di proiezione, eliminando così il segno negativo. Chiaramente le equazioni sopra riportate sono le più semplici possibili e non tengono di certo conto delle possibili problematiche (accennate nel capitolo 2) riscontrabili nelle reali ottiche.

A.0.1 Il sistema di riferimento

Le equazioni che descrivono la proiezione prospettica ricavate al paragrafo precedente presuppongono che il sistema di riferimento mondo sia centrato nel centro ottico C. Tale punto è anche l'origine del sistema di riferimento standard della telecamera. In generale non è affatto detto che questi due sistemi siano coincidenti, anzi nella pratica questo non avviene praticamente mai. Si ha dunque bisogno di introdurre tre diversi sistemi di riferimento (vedi figura A.2):

- il sistema di riferimento 3D detto anche sistema mondo
- il sistema di riferimento standard 3D della telecamera centrato in C
- il sistema di riferimento 2D dell'immagine

Dato un qualunque punto P della scena, esso potrà essere individuato in ognuno di questi tre diversi sistemi; in particolare si indicheranno con

- $\mathbf{X}=(X,Y,Z)$ le coordinate del punto P nel sistema mondo,
- $X_c=(X_c,Y_c,Z_c)$ le coordinate del punto P nel sistema della telecamera
- $\mathbf{x}=(x,y)$ le coordinate del punto P nel sistema immagine e

- $\mathbf{w}=(u,v)$ le coordinate del punto P nel sistema dell'immagine digitale¹.

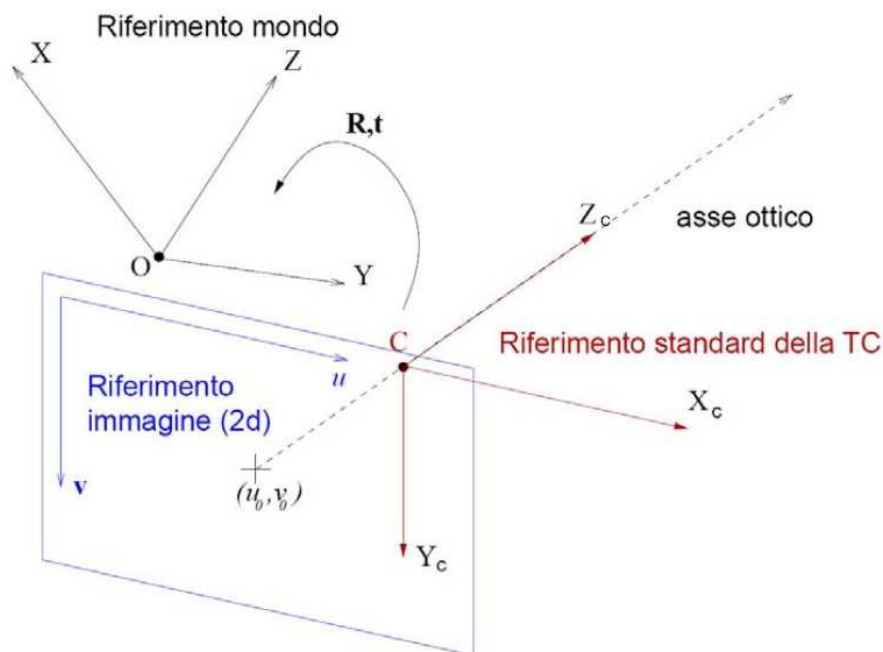


Figura A.2: I diversi sistemi di riferimento evidenziati

Il sistema mondo e il sistema della telecamera sono legati tra loro da una trasformazione isometrica. In particolare tale trasformazione risulta essere composta da una traslazione t e da una rotazione R non noti. Dato che in genere queste elaborazioni vengono fatte con l'aiuto del calcolatore, è conveniente esprimere tali trasformazioni in forma matriciale. Per semplificare ulteriormente si ricorre all'uso delle coordinate omogenee. In questo modo le operazioni risultano essere lineari e tutto il modello ne acquista in leggibilità. La relazione che lega sistema mondo e sistema della telecamera, in coordinate omogenee, si esprime con la seguente:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

¹quest'ultima è stata inserita per tenere conto della discretizzazione fatta durante la conversione dell'immagine da analogica a digitale

Detta P_R la matrice di **rototraslazione**, la A.2 si può scrivere come:

$$\hat{X}_c = P_R \hat{X} \quad (\text{A.3})$$

A.0.2 La trasformazione prospettica

Si 'e visto che la proiezione prospettica mette in relazione il sistema di riferimento camera con quello dell'immagine secondo le A.1. In forma matriciale, sempre usando le coordinate omogenee, si ottiene:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-f}{Z_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-f}{Z_c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

Moltiplicando ambo i membri della (A.4) per un fattore arbitrario di scala s e ponendo, ad esempio $s = Z_c$ la relazione diventa:

$$\begin{bmatrix} sx \\ sy \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

o equivalentemente

$$\hat{x} = P_P \hat{X} \quad (\text{A.6})$$

Appendice B

Architetture DSP e microcontrollori

B.1 Architettura Von Neumann e Harvard

I microprocessori programmabili per l'elaborazione digitali dei segnali possono essere raggruppati nelle seguenti categorie: microprocessori general-purpose, microcontrollori, processori specializzati all'elaborazione dei segnali (*DSP*).

- **microprocessori general-purpose**: questi microprocessori devono supportare le più disparate applicazioni, quindi la loro architettura viene progettata per l'ottimizzazione della gestione della memoria anche se le loro prestazioni nell'elaborazione digitale dei segnali risultano tuttavia mediocri.
- **microcontrollori** sono strumenti che implementano singole parti di un elaboratore, ad esempio apparecchi per l'input-output, memorie RAM e ROM; l'architettura è generalmente funzionale all'ottimizzazione delle caratteristiche input-output.
- **processori specializzati all'elaborazione dei segnali (DSP)**: questi microprocessori sono appositamente studiati per ottimizzare le prestazioni nell'elaborazione dei segnali. Poiché gli algoritmi per la simulazione di sistemi per segnali consistono spesso nella iterazione di sequenze di semplici operazioni aritmetiche, grande attenzione è posta nell'ottimizzazione

dell'unità aritmetico-logica (**ALU**). I primi DSP sono addirittura stati motivati dalla necessità di accelerare l'esecuzione dell'operazione di moltiplicazione, rispetto agli usuali microprocessori. La necessità di grande velocità di elaborazione imposte dalle applicazioni in tempo-reale richiede inoltre l'introduzione di architetture che sfruttino l'inherente parallelismo di alcune funzionalità, pur sacrificando la semplicità realizzativi e la flessibilità rispetto alle applicazioni.

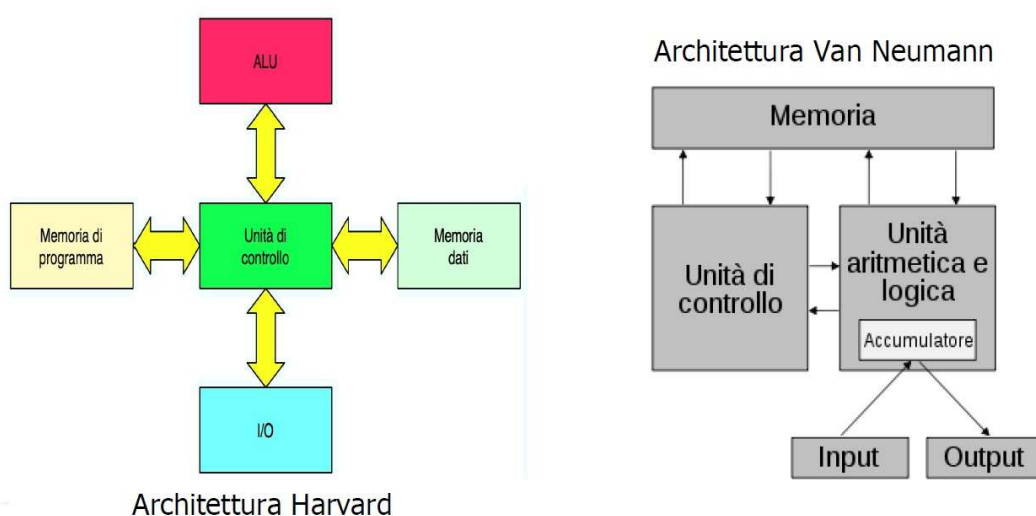


Figura B.1: Differenza tra l'architettura di Harvard e quella di Von Neumann

Per quanto detto, i DSP richiedono architetture di calcolo piuttosto differenti rispetto agli usuali microprocessori general-purpose: discutiamo brevemente qui le principali diversità. Un elaboratore programmabile riceve in ingresso dati di due diversi tipi: istruzioni per il programma e dati veri e propri. La maggior parte dei microprocessori general-purpose è basata sull'architettura proposta da Von Neumann e realizzata per la prima volta nel 1951 in cui dati e programmi vengono memorizzati nella stessa area di memoria. Come si può osservare nella precedente figura, esiste un'unica area di memoria per dati e programmi, ed il processore usa gli stessi bus dati e indirizzi per accedervi. Le unità basilari sono l'unità aritmetico-logica (ALU che permette l'esecuzione di operazioni aritmetiche) e l'unità di input-output (IO che gestisce il flusso di dati esterni alla macchina).

Per questo tipo di macchina, i programmi sono sequenze di istruzioni e la singola istruzione generalmente contiene un comando di operazione e l'indirizzo del dato su cui il comando deve essere eseguito.

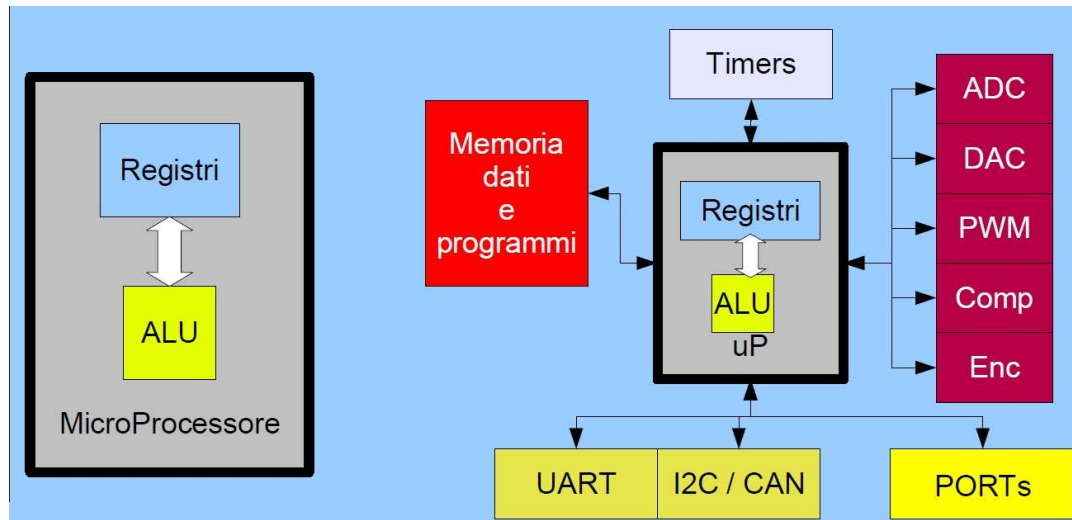


Figura B.2: Schematico disegno per evidenziare i blocchi principali che compongono un comune controllore

Un'architettura alternativa che permette un aumento di velocità, come richiesto dalle applicazioni concernenti l'elaborazione dei segnali, è l'**architettura di Harvard**, proposta negli anni trenta da Howard Aiken all'università di Harvard e realizzata negli anni quaranta (Mark IV ed Eniac). Questa architettura prevede due spazi di memoria, uno per i dati, l'altro per i programmi, e corrispondentemente diversi bus dati e bus indirizzi per accedervi. Questa architettura permette di accedere contemporaneamente sia ai dati che alle istruzioni, ottenendo migliori prestazioni in velocità.

Appendice C

La funzione Regionprops

Viene riportata di seguito una breve illustrazione dei descrittori forniti da `regionprops` (presente nell'Image Processing Toolbox) utilizzati nei vari script, perché ritenuti validi ai fini del riconoscimento o fondamentali nel raggiungimento di altri scopi.

Area

Si tratta di uno scalare che rappresenta il numero di pixel di cui è composta la regione.

Bounding Box

Rappresenta il più piccolo rettangolo con i lati paralleli agli assi immagine, contenente la regione. Fornisce un vettore $1 \times (Q*2)$, dove Q indica la dimensione dell'immagine in ingresso, e in particolare:

- le coordinate dell'angolo in alto a sinistra, date dalle componenti $[1:Q]$;
- le lunghezze dei lati del rettangolo, con le restanti componenti $[Q+1:2Q]$.

Centroid

Restituisce il baricentro della regione sottoforma di un vettore di coordinate $1 \times Q$, dove la prima componente indica la coordinata orizzontale x , la seconda la coordinata verticale y e così via per le altre dimensioni.

Eccentricity

Scalare che indica l'eccentricità dell'ellisse che ha gli stessi momenti d'inerzia di

superficie della regione; l'eccentricità è il rapporto tra la distanza dei due fuochi dell'ellisse e la lunghezza dell'asse maggiore d'inerzia. Quando il suo valore tende a 1 l'oggetto ha una forma molto allungata, viceversa più si avvicina allo zero, più i due assi sono comparabili e l'oggetto è compatto. L'eccentricità è un descrittore adimensionale.

MajorAxisLength e MinorAxisLength

Sono due scalari che indicano la lunghezza in pixel degli assi principali d'inerzia dell'ellisse che ha gli stessi momenti d'inerzia di secondo ordine della regione.

Orientation

Esprime l'angolo, in un intervallo compreso tra -90° e 90° , tra l'asse delle x e l'asse maggiore dell'ellisse che ha gli stessi momenti secondi della regione, misurato in senso antiorario.

Perimeter

È il numero di pixel che compongono il contorno dell'oggetto; nel calcolo ai pixel che fungono da angoli viene associata la misura $\sqrt{2}$ piuttosto che il classico valore unitario.

Solidity

Descrittore adimensionale che indica la percentuale di pixel del *ConvexHull* che appartengono alla regione; calcolato come rapporto $Area/ConvexArea$, dove *ConvexArea* è il numero di pixel che compongono il suddetto *ConvexHull*, quest'ultimo tradotto significa "involucro convesso", ovvero è il più piccolo insieme convesso che contiene la regione di pixel.

Altri descrittori legati strettamente all'intensità dei pixel ma non utilizzati direttamente per la fase di riconoscimento, bensì nei vari algoritmi creati per essa, sono **PixelValue** e **PixelList** che forniscono rispettivamente un vettore con tutti i valori d'intensità dei pixel e una matrice con le loro coordinate nel sistema immagine.

Appendice D

Applicazioni laser

La possibilità del laser di generare un numero enorme (non vi è un limite superiore teorico) di fotoni identici tra loro in frequenza, in fase e direzione, conferisce a tale fascio elettromagnetico proprietà uniche che hanno aperto prospettive di applicazioni tecnologiche e scientifiche altrimenti impensabili ed in continua evoluzione. La monocromaticità, cioè la capacità di emettere fotoni aventi (entro un piccolissimo intervallo) la stessa frequenza (colore), abbinata all'accordabilità, ovvero la possibilità di variare (entro un determinato intervallo che dipende dal tipo di laser) tale frequenza, rende il laser uno strumento ormai insostituibile nel campo della spettroscopia in quanto permette di osservare con una risoluzione ed una accuratezza altrimenti impensabili gli spettri di assorbimento degli atomi e delle molecole. Monocromaticità e accordabilità sono anche fondamentali nel campo delle comunicazioni in fibra ottica dove in ogni fibra vengono convogliati contemporaneamente fasci di diversa frequenza recante ognuno una enorme quantità di informazioni. L'elevatissima densità di energia ottenibile con un fascio laser è utilizzata in applicazioni in cui sia necessario un riscaldamento localizzato di un tessuto organico o altro materiale. Un esempio comune è l'uso del laser in oftalmica per la correzione dei difetti della vista: in questo caso un fascio di luce ultravioletta viene focalizzato sulla cornea e causa l'evaporazione di una minuscola porzione di tessuto; l'operazione ripetuta milioni di volte permette di rimodellare ad hoc la superficie della cornea.

Bibliografia

- [1] J. Berton, “Sistema per la misura delle caratteristiche dimensionali di componenti di calzature,” Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2011.
- [2] D. Tabacchi, “Progetto di sistema automatico di misura 3d,” Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2012.
- [3] F. Scattolin, “Riconoscimento di componentistica dell’occhiale mediante sistema di visione,” Tesi di Laurea in Ingegneria Informatica, Università degli Studi di Padova, 2006.
- [4] www.wikipedia.it.
- [5] I. Tessarolo, “Sistema di visione per cella robotizzata,” Tesi di Laurea in Ingegneria dell’Automazione, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [6] S. Guggia, “Scanner laser 3d per applicazioni biomediche,” Tesi di Laurea in Ingegneria Biomedica, Università degli Studi di Padova, 2010.
- [7] D. Zammuner, “Elaborazione di geometrie 3d per l’automazione nel settore della calzatura,” Tesi di Laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, 2012.
- [8] www.imagesrl.it.
- [9] www.microchip.com.
- [10] www.mathworks.it/products/matlab/.
- [11] A. Fusiello, *Visione Computazionale. Appunti delle lezioni*, 2008.

Ringraziamenti

Credo nelle rovesciate di Bonimba....Credo che per credere, certi momenti, ti serva molta energia. Così avevo lasciato la triennale, e da allora in effetti molta energia è stata consumata. Energie fisiche e mentali, ma alla fine, anche con un pizzico di sorpresa, sono giunto alla fine di questa lunga avventura.

Rivolgendo lo sguardo al passato non posso non dimenticare i molti momenti importanti e significativi che ho condiviso con molte persone in questo percorso. Persone che non conoscevo e che sono entrate nella mia vita, altre hanno preso strade diverse per i motivi più disparati, altre ancora invece non se ne sono mai andate. Grazie a chi ha potato pazienza, a chi aveva fiducia in me quando io invece non ne avevo di me stesso, a chi ha avuto il coraggio di darmi dei consigli, a chi si è divertito nei momenti di festa, grazie a chi, oggi, è presente per condividere questo traguardo con me tanto (in)atteso quanto sudato.

Ognuno di Voi, Amici, è parte di me.

Un ringraziamento doveroso e sincero al Prof. Rosati per avermi dato l'opportunità di sviluppare questo progetto di tesi che mi ha permesso di aumentare le mie capacità tecniche e allo stesso tempo di avere più fiducia nei miei mezzi.

Grazie anche a Jessica, Simone, Christian e Fabio per l'aiuto e la disponibilità dimostrata in questi ultimi mesi nei momenti in cui le idee e le soluzioni venivano completamente a mancare.

Ora sono pronto ad affrontare una nuova avventura, quale sia non lo so ancora, ma avrò quella determinazione e quella consapevolezza che mi faranno dire...

il meglio deve ancora venire.