

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Automazione

Tesi di Laurea Triennale

Realizzazione di una linea di confezionamento dolci mediante visione ottica e robot pick and place

RELATORE: Prof.ssa Maria Elena Valcher

LAUREANDO: Damiano Pasetto

Padova, 27 Novembre 2012

Un robot non può recare danno all'umanità,
né può permettere che,
a causa del suo mancato intervento,
l'umanità riceva danno.

(Legge Zero, Isaac Asimov)

Indice

1	Storia dei Robot industriali	1
1.1	Storia dell'ABB	5
1.2	Storia della Tech.PA S.p.A.	6
2	Descrizione generale dell'impianto di confezionamento	7
3	Studio e realizzazione della parte di visione	11
3.1	Scelta videocamera	13
3.2	Scelta illuminazione del tunnel	16
3.3	Elaborazione delle immagini	18
3.4	Gestione dei 4 robot delta	22
4	Messa in servizio dell'intero sistema Pick and Place	24
5	Descrizione del robot paletizzatore	28
5.1	Messa in servizio del robot paletizzatore	29
6	Conclusioni e sviluppi futuri	34
A	Appendice	35
A.1	Geometric PatMax	35
A.2	Blob	36
A.3	Calibrazione a scacchiera	36
A.4	Singularità	37
	Bibliografia	39

Introduzione

Nella presente tesi verrà illustrato un sistema di confezionamento prodotti realizzato tramite un sistema di visione ABB (pickmaster), 4 robot delta per la presa del prodotto ed un robot per la “paletizzazione” delle scatole confezionate.

Verranno prese in esame le difficoltà di realizzazione di un sistema di visione ottico idoneo per i vari formati dei prodotti e la difficoltà di gestione di un sistema a più robot.

Nel primo capitolo viene presentata la storia e l’evoluzione dei robot industriali, partendo dalle prime applicazioni a quelle attuali.

Successivamente viene fornita una breve descrizione dell’azienda ABB, fornitrice dei robot utilizzati e dell’azienda TECH.PA. S.p.A. sede del tirocinio.

Nel secondo capitolo viene descritta la logica di funzionamento dell’impianto realizzato, con degli approfondimenti sulle aree in cui sono stati effettuate le modifiche maggiori.

Nel terzo capitolo viene presentata la descrizione tecnica dell’impianto con i quattro robot, scelta della videocamera, tipo di illuminazione ecc. . .

Nel quarto capitolo vengono descritte le varie operazioni per la messa in servizio del sistema Pick and Place, con il dettaglio delle criticità riscontrate.

Nel quinto capitolo viene descritto il funzionamento del quinto robot antropomorfo a 6 assi e la gestione di alcuni movimenti critici.

Infine nel sesto capitolo trovano spazio le conclusioni e gli sviluppi futuri che si potrebbero attuare.

1 Storia dei Robot industriali

L'invenzione del robot industriale risale al 1954 quando George Devol deposita il brevetto di un "programmed article transfer".

Con la collaborazione di Joseph Engelberger, Devol fonda la prima società di robot, la Unimation.

Nel 1961 la Unimation mette in servizio il primo robot in un impianto della General Motors per l'estrazione di pezzi da una pressa. La maggior parte dei robot Unimation ad azionamento idraulico venduti nel corso degli anni seguenti serve per la movimentazione (spostamento) di pezzi e per la puntatura (saldatura) di carrozzerie. Entrambe le applicazioni hanno avuto successo perché i robot si sono dimostrati affidabili ed hanno garantito una qualità uniforme. Successivamente molte altre aziende hanno iniziato a sviluppare e produrre robot industriali. Ci sono voluti però molti anni prima che l'industria dei robot diventasse redditizia.

Nel 1969 Victor Scheiman, uno studente di ingegneria meccanica che lavorava negli Stanford Artificial Intelligence Laboratories (SAIL), disegna il primo braccio di un robot.

La particolarità di questo braccio è di avere 6 gradi di libertà (6-DOF) gestiti interamente da attuatori elettrici (e non idraulici come si usava di solito) e di poter essere controllato in modo facile da un computer standard, in questo caso un Digital Equipment PDP-6.

La configurazione cinematica del braccio è del tipo non antropomorfo (non umanoide) con 5 giunti rotazionali e 1 prismatico, configurati in modo da semplificare le equazioni matematiche per velocizzare i calcoli effettuati dal computer.

Il braccio consiste di:

- Motori a corrente continua per il movimento degli assi;
- Riduttori Harmonic Drive (compatti e a tolleranza zero) e riduttori cilindrici;
- Potenzimetri e tachimetri per il controllo di posizione e velocità;

- Freni elettromeccanici per bloccare i giunti e tenere il braccio in posizione.

Nel 1973 l'ASEA (ora ABB) introduce il primo robot industriale all-electric-drives technology, dove il motion control è gestito in modo totalmente elettrico attraverso un microprocessore e non in maniera pneumatica. Il robot, chiamato IRB-6, ha permesso un movimento continuo lungo il percorso, così da poter essere utilizzato per le saldature ad arco o di lavorazione. I robot hanno dimostrato un alto grado di affidabilità, tale che alcuni robot sono rimasti in servizio per più di 20 anni..

Nel 1978 Hiroshi Makino dell'università di Yamanashi, Giappone, inventa il selective compliance assembly robot arm (SCARA). L'innovativo quattro assi a basso costo di progettazione si rivela ideale per l'assemblaggio di piccole parti e grazie alla particolare cinematica del braccio permette movimenti veloci e uniformi. Il sistema di assemblaggio flessibile basato sui robot SCARA, in combinazione con la progettazione del prodotto compatibile per l'assemblaggio mediante robot, ha contribuito in modo significativo al boom mondiale nella produzione di elettronica e prodotti di consumo.

Le richieste in materia di velocità e di capacità di carico di un robot hanno portato a studi di nuove cinematiche e metodi di trasmissione. Sin dall'inizio la riduzione della massa e dell'inerzia della struttura del robot sono stati oggetto di primaria importanza nella ricerca, in cui è stato considerato il braccio umano come obiettivo finale, per il suo rapporto peso-carico di 1:1. Nel 2006 quest'obiettivo è stato raggiunto dalla KUKA col suo light robot, un braccio robotico compatto a 7-DOF con funzionalità avanzate di controllo di forza.

Un altro approccio verso strutture leggere e rigide è stato perseguito fin dal 1980 con lo sviluppo di macchine con cinematica parallela che collegano la base della macchina con l'attuatore posto all'estremità di 3 o 6 puntoni (bracetti) paralleli. Questi robot, detti paralleli, sono particolarmente adatti a raggiungere elevate velocità e precisione, e per la movimentazione di carichi di lavoro elevati. Tuttavia, lo spazio di lavoro tende ad essere più piccolo

rispetto ad altri tipi di robot di dimensioni paragonabili.

I robot cartesiani sono ideali per la copertura di aree di lavoro di grandi dimensioni. La struttura tradizionale usa 3 assi ortogonali per lo spostamento, e nel 1998 la Güdel introduce una variante dei robot cartesiani, chiamati *curved-track gantry*.

Il concetto permette a uno o più bracci robotici di muoversi lungo un percorso di trasferimento circolare chiuso. Pertanto l'area di lavoro del robot può aumentare secondo la richiesta, mantenendo velocità e precisione. Questo può essere particolarmente utile nella gestione logistica o per le *machine tending* (robot per il carico e lo scarico di materie prime dai macchinari per il processo produttivo).

Nel 2005 la MOTOMAN commercializza il primo robot con 2 bracci sincronizzati tra di loro, composti in totale da 13 assi, 6 per braccio più un asse per la rotazione della base del robot.

In parallelo ai robot industriali nascono gli *automated guided vehicles* (AGVs) e cioè veicoli a guida automatizzata. Questi robot mobili sono utilizzati per spostare pezzi o attrezzature da un punto all'altro. Inizialmente gli AGVs richiedevano dei magneti nel pavimento per l'orientamento del movimento. Ora il movimento si basa sulla scansione laser che provvede a creare una mappa bidimensionale dell'ambiente reale per la localizzazione di sé e per evitare gli ostacoli. La combinazione di sistemi AGVs e bracci robotici ha dato vita a macchine automatiche per il carico e lo scarico di merci in grado di gestirsi autonomamente.

Un altro problema che si è cercato di risolvere con numerosi studi fin dal 1980 è quello di riuscire a prelevare prodotti che arrivassero in modo random al robot e di fare in modo che il robot fosse in grado di prelevarli in modo opportuno e autonomo.

Questo metodo viene chiamato *bin-picking*.

Nel 2006 solo il 10 % dei robot industriali è equipaggiato con sensori per il *bin-picking*, ma si prevede che la percentuale aumenti significativamente.

Il metodo più utilizzato per il *bin-picking* è quello del *computer-aided design*

(CAD), che consiste nell'acquisire la scena (oggetto) attraverso un sensore (videocamera o scanner) e attraverso i punti rilevati viene creato e virtualizzato il modello CAD. Da qui viene creato un istogramma con i relativi dati e informazioni sulle angolazioni.

Ogni volta che viene richiesto il riconoscimento dell'oggetto viene generato un istogramma e confrontato con quello archiviato, se positivo vengono generate le traiettorie per procedere al prelievo. Nonostante negli ultimi anni si siano fatti dei notevoli passi avanti nell'industria dei robot industriali ci sono ancora ampi margini di ricerca e di sviluppo soprattutto nella continua ricerca di prestazioni sempre migliori, riducendo il peso e l'inerzia, cercando di aumentare la velocità di movimento e in particolar modo impiegando sistemi di visione sempre più avanzati [1].

1.1 Storia dell'ABB

ABB nasce nel 1988 dalla fusione di due importanti realtà industriali europee: la svedese ASEA e la svizzera BROWN BOVERI. L'ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget) fondata nel 1890 da Jonas Wenstrom (inventore del sistema trifase) e da Ludvig Fredholm si occupa della progettazione e realizzazione di linee di trasmissione trifase ad alto voltaggio.

Nel 1978 l'ASEA lancia sul mercato uno dei primi robot industriali.

La BROWN BOVERI (BBC) viene fondata nel 1891 in Svizzera da Charles E.L. Brown e Walter Boveri ed è la prima azienda a trasmettere potenza ad alto voltaggio. L'azienda si occupa della costruzione di turbine a vapore e rotor elettrici oltre a trasformatori ad alta potenza e linee di trasmissione al alto voltaggio.

Il 5 Gennaio 1988 l'ABB inizia l'attività operativa con sede a Zurigo, in Svizzera, e può contare su 160.000 dipendenti in tutto il mondo ed un fatturato di 17 miliardi di dollari.

Nel 1998 ABB immette sul mercato il FlexPicker, un robot delta (o parallel robot) progettato unicamente per l'industria del prelievo e imballaggio.

In quest ultimo decennio ABB si sta dedicando nella produzione di energia ecosostenibile, in particolar modo nell'energia eolica e solare, senza tralasciare il continuo sviluppo di robot e linee di trasmissione sempre più efficienti [2].

1.2 Storia della Tech.PA S.p.A.

Tech.PA S.p.A. (fino al 2000 chiamata FI.PA.) nasce nel 1990 a Verona con l'obiettivo di diventare un punto di riferimento per l'automazione industriale, principalmente nel settore alimentare.

Inizialmente si specializza nella realizzazione di impianti di formatura, cottura e confezionamento di prodotti alimentari, iniziando importanti collaborazioni con alcuni tra i leader italiani del settore.

Nel 2000 inizia a collaborare con ABB per l'installazione di robot antropomorfi e pick and place, espandendo le proprie competenze anche in questo campo.

Nel 2008 una sua applicazione viene scelta come rappresentate dell'Italia nella manifestazione organizzata in Svezia da ABB in cui vengono presentati tutti i progetti più innovativi a livello mondiale eseguiti con i loro robot.

Nel 2009 Tech.PA S.p.A. esegue due importanti acquisizioni: la prima è un'azienda specializzata nella realizzazione di alimentatori switching, interfacce passive e a relé, la seconda è un'azienda specializzata nella realizzazione di quadri a certificazione UL e quindi destinati al mercato del Nord America.

Nel 2011, proseguendo il suo obiettivo di un sempre miglior servizio al cliente, si certifica ISO 9001:2008.

Oggi può contare su 23 dipendenti, tra cui 6 ingegneri ed una sede produttiva di 1.000 mq.

2 Descrizione generale dell'impianto di confezionamento

In Figura 1 si può vedere il layout generale della prima parte dell'impianto di confezionamento merendine. Individuiamo 6 zone:

- A** : In esso sono posizionati i 4 robot delta ABB IRB360 FlexPicker insieme al tunnel di visione, al cui interno si trovano le luci e la videocamera per il controllo-posizionamento.
- B** : Qui si trovano le due flowpack dove i prodotti vengono confezionati singolarmente nelle buste di plastica.
- C** : Qui sono collocati i nastri trasportatori che portano il prodotto dalle flowpack ai robot.
- D** : Si trovano i tastatori per la verifica e il controllo di qualità dei pacchetti delle merendine appena confezionate dalle flowpack.
- E** : Qui le formatrici scatole formano le scatole in cartone che attraverso i nastri 3 e 4 arrivano in controflusso, quindi in senso contrario ai nastri dove si trovano le merendine, nei robot.
- F** : Attraverso il nastro 5 il prodotto inscatolato viene trasportato verso la confezionatrice.

In Figura 2 viene rappresentata la seconda parte dell'impianto di confezionamento che consiste:

- 6** : Nastro per l'arrivo delle scatole confezionate.
- 7** : Nastro per l'arrivo degli scatoloni vuoti.
- R** : Robot ABB IRB 4600.
- C** : Compattatore.
- T** : Tramoggia

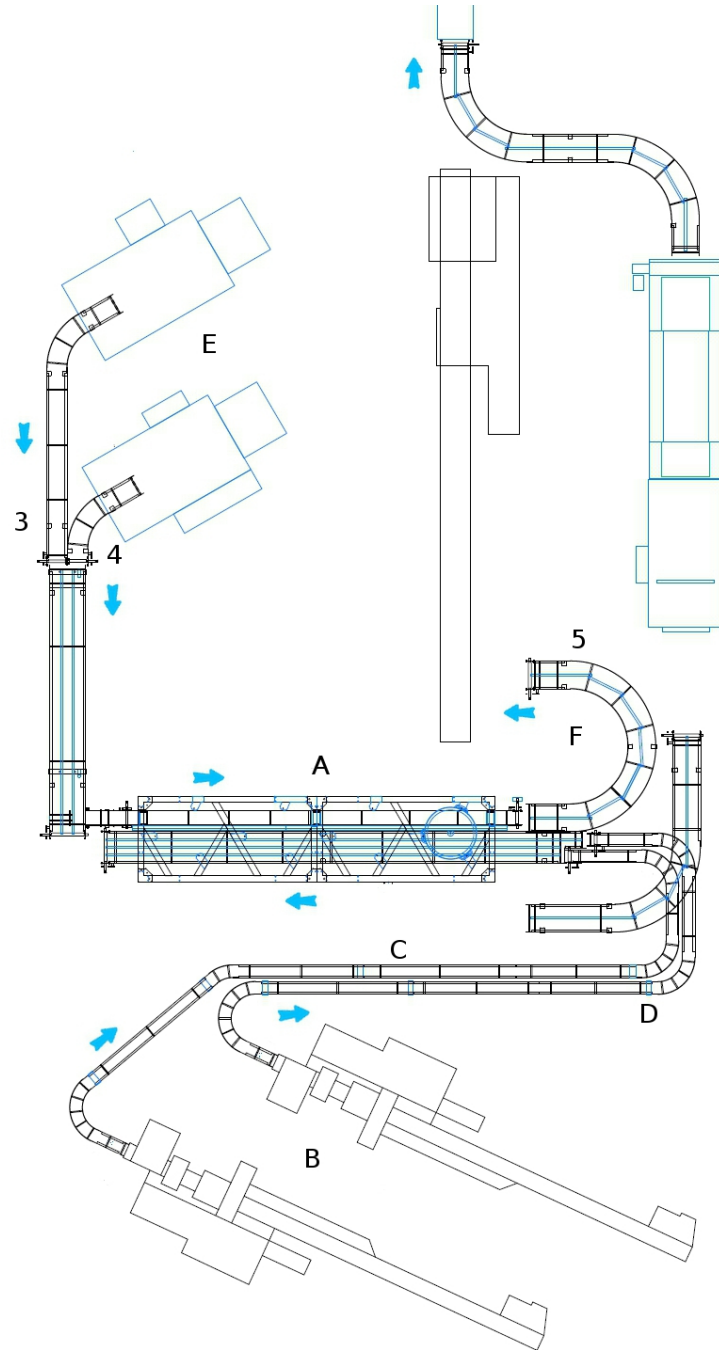


Figura 1: Layout 1

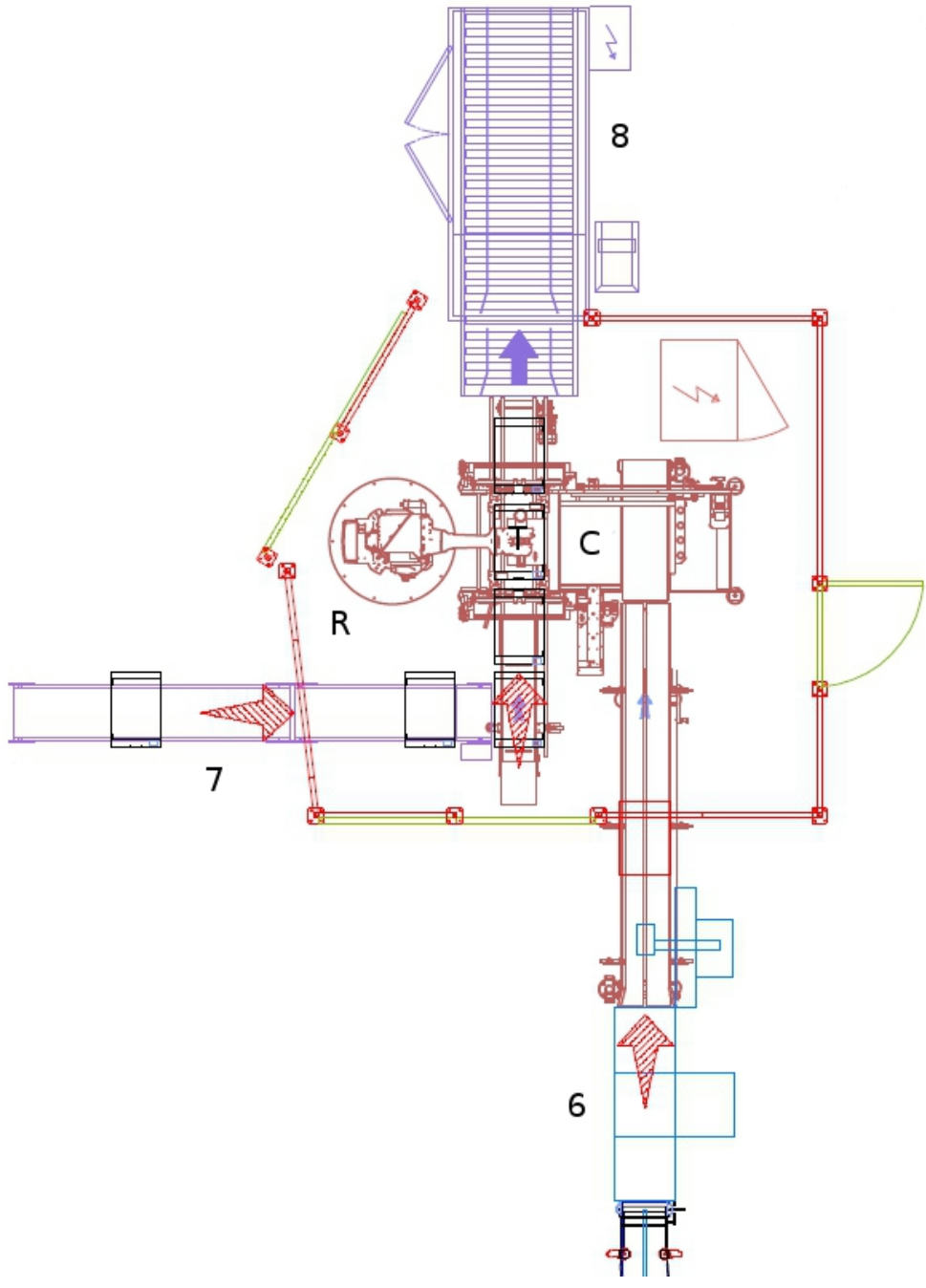


Figura 2: Layout 2

8 : Nastro per il trasporto degli scatoloni pieni verso il magazzino.

Il lavoro di automazione dell'impianto ha richiesto, quindi, le seguenti operazioni:

- Inserimento dei 4 robot delta e del sistema di visione per posizionamento;
- Posizionamento del robot ABB IRB4600 e della tramoggia per la palletizzazione delle scatole di confezionamento;
- Inserimento dei tastatori e dei nastri trasportatori.

3 Studio e realizzazione della parte di visione

La parte principale e più innovativa dell'intero impianto riguarda il sistema visione-robot.

In Figura 3 è rappresentato lo schema a blocchi del sistema visione-robot, composto da:

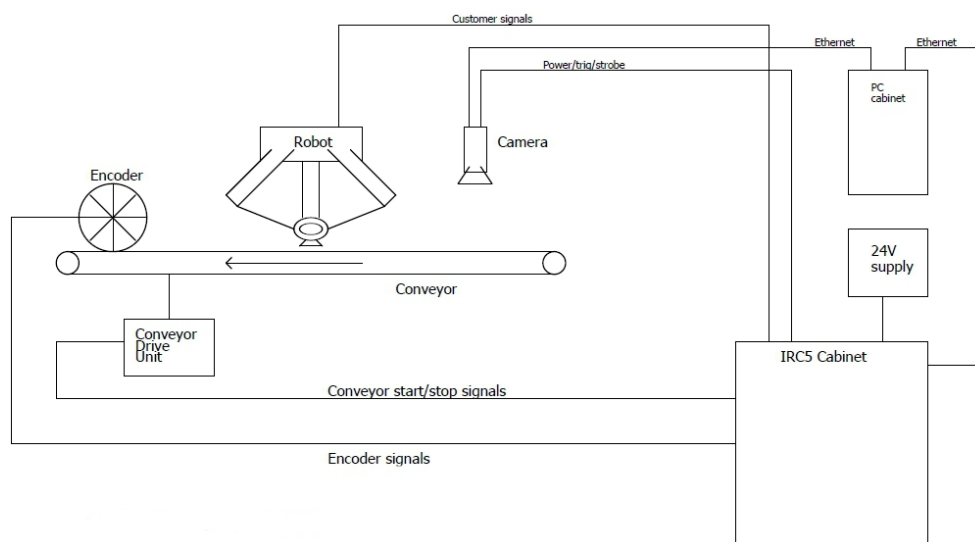


Figura 3: Schema a blocchi del sistema visione-robot

- Videocamera Basler Scout scA 1390-17gm/gc posizionata sopra al nastro trasportatore (conveyor 1) per l'individuazione del prodotto e del suo posizionamento. La videocamera scambia i dati tramite un cavo ethernet col PC e con un altro apposito cavo con l'IRC5 Cabinet. Al PC vengono passate le immagini acquisite, mentre con l'IRC5 vengono scambiati i segnali di trig e strobe (cioè il segnale di ingresso che ordina alla videocamera di acquisire un'immagine e il segnale di uscita che indica che la videocamera ha acquisito l'immagine).

- IRC5 Cabinet è il controller del robot. Ad ogni robot è associato un controller e i robot sono collegati tra di loro tramite un protocollo Ethernet/IP (dove IP stà per Industrial Protocol ed è un nuovo standard industriale per la comunicazione Ethernet).

Il controller è composto da una scheda I/O (Input/Output) per gestire gli ingressi e le uscite analogiche e digitali, due schede Tracking (1 per ogni conveyor) per gestire l'inseguimento del prodotto in prelievo e in deposito, e un microprocessore.

- Il PC permette, attraverso il programma ABB PickMaster, l'elaborazione delle immagini acquisite dalla videocamera e l'impostazione di tutti i parametri riguardanti videocamera e robot. Il PC e l'IRC5 comunicano tra di loro attraverso un cavo ethernet.

- Conveyor: Il conveyor 1 è il nastro trasportatore posizionato sotto i 4 robot delta sul quale passano i prodotti.

Per il trasportatore è stato scelto un nastro di colore bianco e liscio, detto a tappeto. Questo per far risaltare il prodotto quando passa sotto alla videocamera.

Il nastro trasportatore è azionato da un motore trifase comandato da un inverte Omron V1000, col quale è possibile modificare velocità e rampa di accelerazione e decelerazione. La comunicazione tra inverter e PLC avviene via MODBUS.

Sulla testa del motore è montato un encoder (o trasduttore di posizione angolare) relativo, detto anche incrementale, da 160 impulsi/giro.

L'encoder incrementale, attraverso gli impulsi elettrici d'uscita proporzionali allo spostamento del rotore rispetto al corpo, può fornire la velocità e l'accelerazione dell'asse del motore ma non la posizione istantanea. La posizione assoluta del rotore può essere ricavata mantenendo un costante conteggio dei segnali elettrici d'uscita, previa un'operazione iniziale di ricerca riferimento, la quale viene eseguita ad ogni fine corsa mediante un impulso apposito.

In questo modo il robot può sapere istante per istante la posizione del nastro, indispensabile per eseguire il tracking del prodotto.

Parallelo al conveyor 1 è posizionato un secondo nastro trasportatore (conveyor 2).

Il conveyor 2 serve per il trasporto delle scatole vuote pronte per essere riempite dai robot. Il conveyor 2 è gestito nello stesso modo del conveyor 1, le uniche differenze sono il nastro, che in questo caso è del tipo “a pioli” dovendo portare avanti le scatole e la direzione di marcia è opposta a quella del conveyor 1.

- Robot: Dopo la videocamera, sopra ai due conveyor, sono posizionati i 4 robot pick and place per il prelievo dei prodotti dal conveyor 1 ed il loro deposito nelle vaschette libere presenti nel conveyor 2. Per la presa dei prodotti si utilizzano delle ventose circolari, dove il vuoto viene creato da delle valvole venturi, chiamate così perché sfruttano l'effetto venturi.


3.1 Scelta videocamera

I due fattori che hanno determinato la scelta della videocamera sono stati:

1. Presenza di prodotto non uniforme, dove l'espressione prodotto non uniforme indica sia l'esistenza di diversi tipi di prodotti, come croissant bomboloni pandorini. . . , sia il fatto che la forma di ciascuno di essi non è mai omogenea e costante.
2. Necessità di distinguere in base al formato e non in base ai colori.

Si è quindi preferito scegliere un prodotto che garantisse buona risoluzione ed elevata velocità di riconoscimento ma monocromatica. Come interfaccia di comunicazione si è deciso l'utilizzo di ethernet essendo già stato impiegato nel resto dell'impianto, più veloce e facile da gestire.

La videocamera scelta è stata una Gigabit Ethernet Basler Scout, in particolare la scA1390-17gm-gc di cui in Figura 4 sono riportate le caratteristiche [4]. Per la scelta dell'obiettivo invece si è considerata l'importanza di offrire

Specifications GigE Vision 

Basler Scout	Resolution (HxV pixels)	Sensor	Sensor Technology	Sensor Size (optical)	Pixel Size (μm)	Frame Rate	Power Consumption (typical)	Weight (typical)
scA1390-17gm-gc	1392 x 1040	Sony ICX267	Progressive scan CCD	1/2"	4.65 x 4.65	17	3.5 W	160 g

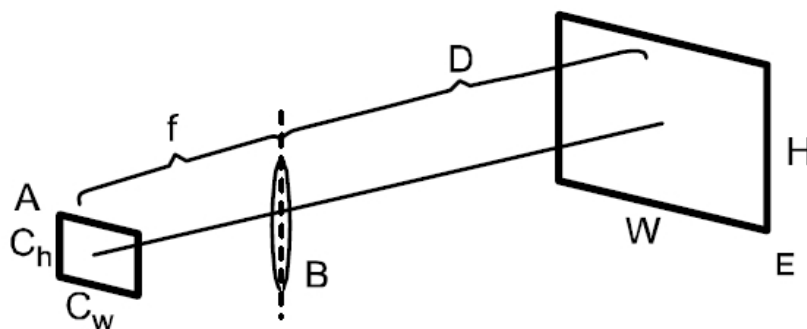
Figura 4: Caratteristiche videocamera Basler Scout

un campo visivo (FOV) adatto. Il FOV di una videocamera è determinato da 3 fattori:

- La distanza fra la videocamera e la scena;
- La distanza focale dell'obiettivo;
- La dimensione del chip sensore della videocamera (in genere uguale alla dimensione della diagonale del chip sensore, in pollici).

Lo schema in Figura 5 mostra la geometria dell'impostazione ottica. Per selezionare un obiettivo adatto bisogna considerare la distanza fra la videocamera e gli elementi (D), la dimensione dell'area dell'immagine (scena E) e la dimensione del sensore del chip (A). La dimensione A del sensore del chip è nota, essendo specificata nelle caratteristiche della videocamera in Figura 4, ed è di $1/2''$, mentre tramite la tabella di Figura 6 si possono ricavare C_w e C_h . La scena E invece rappresenta in questo caso il piano del nastro trasportatore dove sono posizionate le merendine ed esso ha una larghezza W di 420 mm.

Dato che la larghezza del trasportatore determina il FOV minimo, la distanza focale richiesta viene calcolata tramite la relazione (vera solo se è rispettata la condizione di montare la videocamera col lato C_w del chip sensore, concorde



A	Chip sensore
B	Obiettivo
C_h	Altezza chip (mm)
C_w	Larghezza chip (mm)
D	Distanza tra l'obiettivo e la scena (mm)
E	Scena
f	Distanza focale della videocamera (mm)
H	Altezza scena (mm)
W	Larghezza scena (mm)

Figura 5: Geometria dell'impostazione ottica

Dimensione chip sensore (pollici)	C_h (mm)	C_w (mm)
1/4"	2.4	3.2
1/3"	3.6	4.8
1/2"	4.8	6.4
2/3"	6.6	8.8

Figura 6: Dimensioni sensore chip

col lato W della scena)

$$f = \left(\frac{D}{W} \right) C_w \quad \Rightarrow \quad f = \left(\frac{400}{420} \right) 6.4 = 6.09 \text{ mm}, \quad (1)$$

avendo assunto una distanza D pari a 400 mm. In generale gli obiettivi sono disponibili in varie distanze focali standard. Si è quindi scelto un obiettivo da 6 mm, cioè con una distanza focale più corta del valore calcolato, in modo da essere sicuri di poter inquadrare l'intera scena.

3.2 Scelta illuminazione del tunnel

Un'illuminazione uniforme dell'area dell'immagine è molto importante al fine di ottenere risultati affidabili nel riconoscimento del prodotto. Per questo sono state effettuate diverse prove sul tipo di luce da usare e sulla posizione in cui mettere la sorgente luminosa. Per il tipo di luce si è preferito usare delle strisce di led per la loro alta luminosità, affidabilità e compattezza.

Nelle prime prove si è usata una configurazione come quella in Figura 7 dove la luce è diretta sul prodotto. Essendo il prodotto irregolare nella forma e



Figura 7: Prove del sistema di visione

inserito in una confezione molto lucida, questa esposizione diretta alla luce dall'alto creava delle ombre e dei riflessi che rovinavano la qualità dell'immagine e quindi causavano problemi nel riconoscimento del prodotto.

Per cercare di risolvere questo problema si è pensato di usare una "luce riflessa".

Si sono, quindi, posizionate le luci su delle strutture regolabili posizionate sui lati esterni del tunnel con la luce verso l'alto (vedi Figura 8).

In questo modo si è riusciti a sfruttare la riflessione e quindi ad avere un'illuminazione più uniforme sul prodotto.

Con questo metodo si sono ottenuti subito buoni risultati, eliminando gran parte delle ombre e dei riflessi. Per aggiustare il livello della luce si possono variare i gradi di inclinazione della struttura mobile.

Per non avere interferenze con altre fonti di luce che potrebbero causare dei problemi si è isolato l'intero sistema luce-videocamera all'interno di un tunnel "chiuso", come in Figura 8. Successivamente l'intera struttura è stata fissata

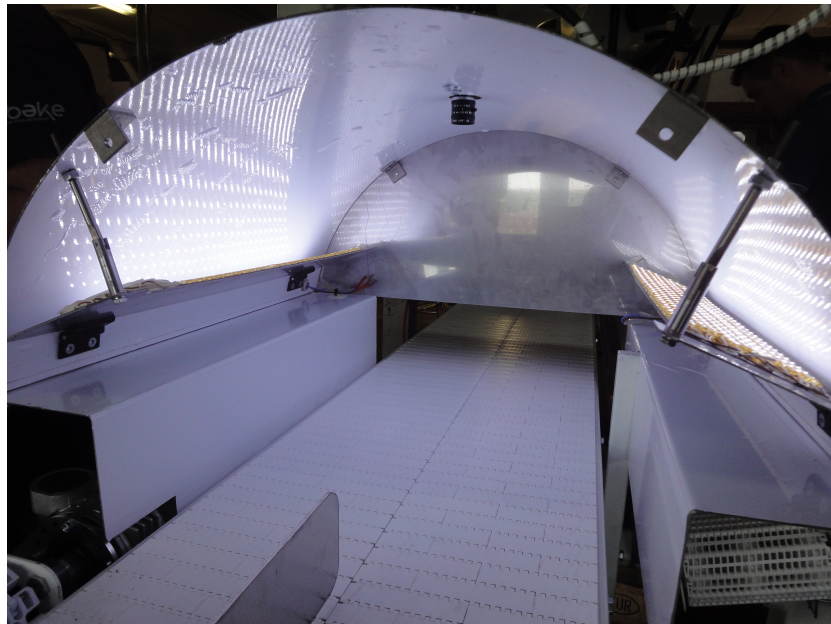


Figura 8: Tunnel del sistema di visione finito

a terra e staccata dalla struttura dei robot, così da non avere vibrazioni che

potrebbero dare problemi alla videocamera.

3.3 Elaborazione delle immagini

Per l'elaborazione delle immagini acquisite dalla videocamera e per la successiva gestione dei 4 robot delta ci si è affidati al programma PickMaster fornito dall'ABB.

Il programma prevede un'interfaccia grafica per la gestione dell'intera linea del sistema videocamera-robot.

In Figura 9 è rappresentata la struttura della linea utilizzata in questo progetto, composta dai 2 nastri trasportatori, dai 4 robot delta e dalla videocamera. Per l'elaborazione delle immagini e il successivo calcolo della posizione dell'e-

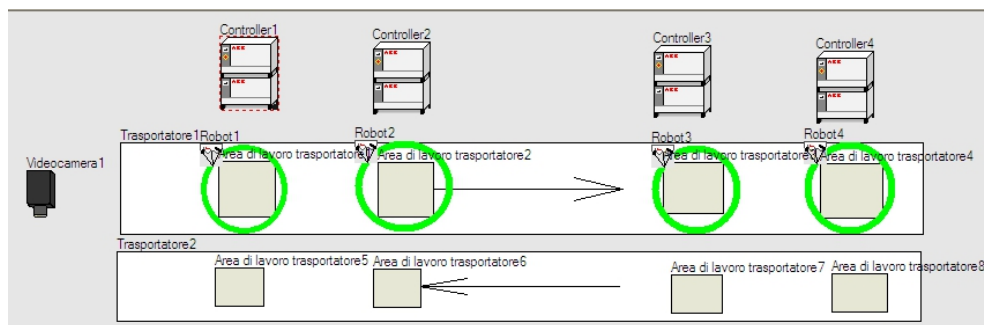


Figura 9: Vista della Linea nel programma PickMaster

lemento (prodotto), il programma PickMaster mette a disposizione 2 diversi strumenti:(in appendice sono riportate le definizioni)

- Geometric PatMax: geometric pattern-matching tecnologia
- Blob: binary large object detection

Le prime prove sono state effettuate col metodo Geometric PatMax, perché sembrava più indicato dovendo riconoscere forma ed angolazione del prodotto, che doveva essere successivamente posizionato correttamente nelle scatole. Si è quindi passati alla configurazione del programma che prevede la creazione di un modello, che successivamente verrà utilizzato per la ricerca del

prodotto.

Come si può vedere in Figura 10 la creazione del modello richiede dapprima l'acquisizione di un'immagine del prodotto e successivamente l'impostazione dei parametri di ricerca e dei filtri di ricerca, oltre a innumerevoli altri parametri avanzati. Questi parametri permettono di stabilire la qualità della

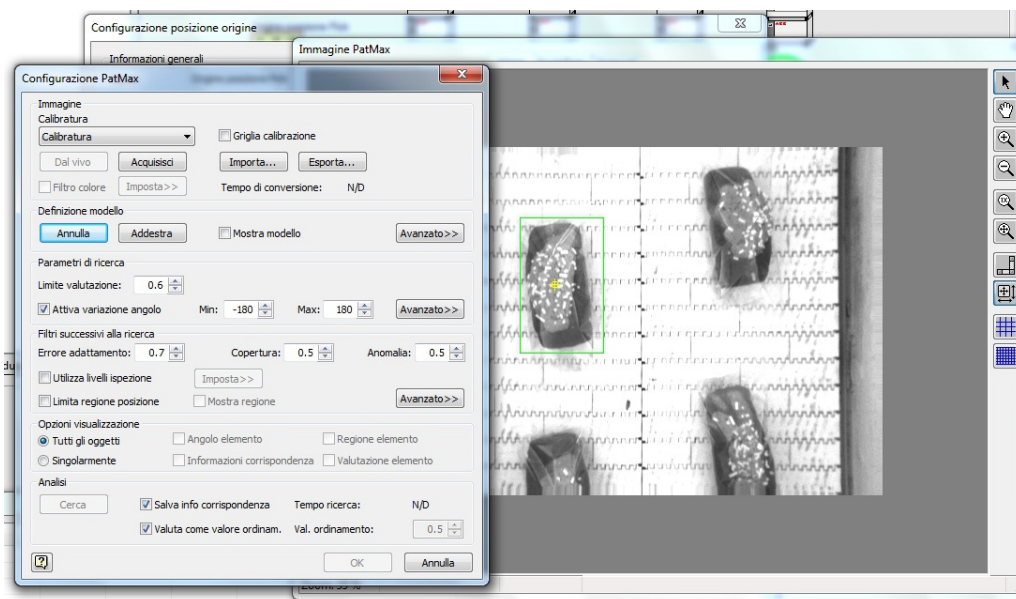


Figura 10: Impostazione del modello Geometric PatMax

ricerca, quindi una stima più grossolana o più fine dell'oggetto, per determinare la presenza del prodotto e se è accettabile o meno per il prelievo. Se accettato, vengono determinate le coordinate (x,y) e l'angolazione del prodotto da inviare al robot che calcola la traiettoria di prelievo.

Una volta configurato il modello si è passati alle prove di ricerca e riconoscimento del prodotto.

Le prove però hanno subito evidenziato dei problemi come:

1. Difficoltà nel tracciamento dei contorni del prodotto, causate dalla confezione trasparente e da "linee parassita" date dalle "pieghe" del sacchetto, le quali, variando di prodotto in prodotto, non facevano corrispondere l'immagine acquisita al modello creato in precedenza.

- Il tempo di ricerca variava tra i 30-40ms ed era abbastanza elevato, forse per colpa delle “linee parassite” che richiedevano calcoli e confronti maggiori del necessario.

Per risolvere il primo problema si sono cercati di variare i limiti di valutazione e l’esposizione alla luce, senza però ottenere buoni miglioramenti e senza ridurre il tempo di ricerca.

Non ottenendo buoni risultati col metodo PatMax si è passati al metodo Blob.

Come si vede in Figura 11, anche in questo caso bisogna creare un modello acquisendo un’immagine e successivamente impostando il tipo di blob, bianco se si considera come elemento da ricercare la parte rilevata bianca o nero se si vuole considerare come elemento da ricercare la parte rilevata nera, e i parametri di ricerca. Una volta creato e impostato il modello blob si è passati

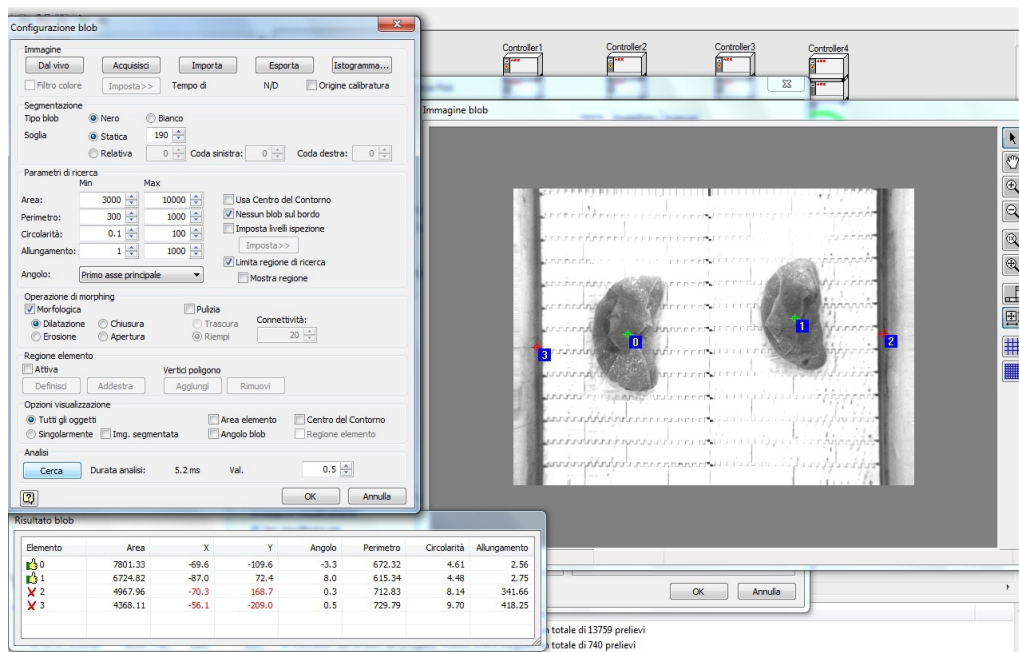


Figura 11: Impostazione modello Blob

alle prove di ricerca del prodotto e si sono visti subito notevoli miglioramenti rispetto al modello PatMax, sia in termini di velocità (4-7ms) sia in termini

prelievo.

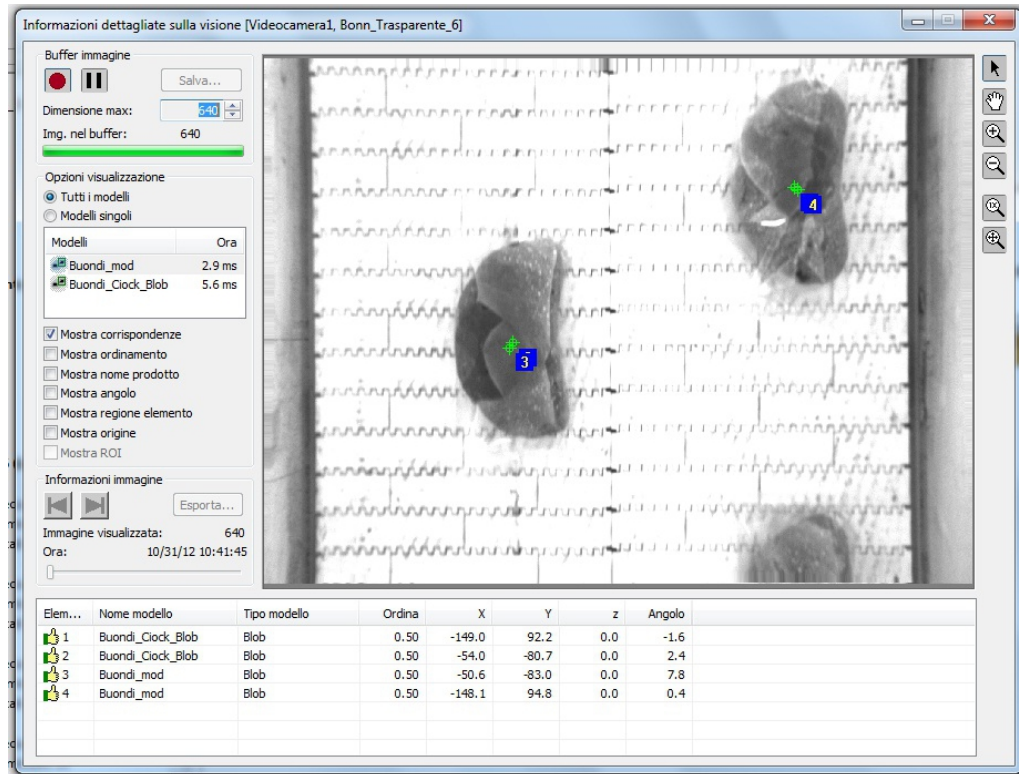


Figura 13: Fotogramma dell'acquisizione video della videocamera

Il metodo blob si è quindi dimostrato più efficace del metodo PatMax anche nelle prove dinamiche.

3.4 Gestione dei 4 robot delta

Come è già stato detto, il programma PickMaster rileva attraverso l'immagine passata dalla videocamera la posizione (coordinate) del prodotto presente sul nastro trasportatore e la invia al controller del robot che gestisce le traiettorie di tracking del prodotto per il prelievo e il deposito.

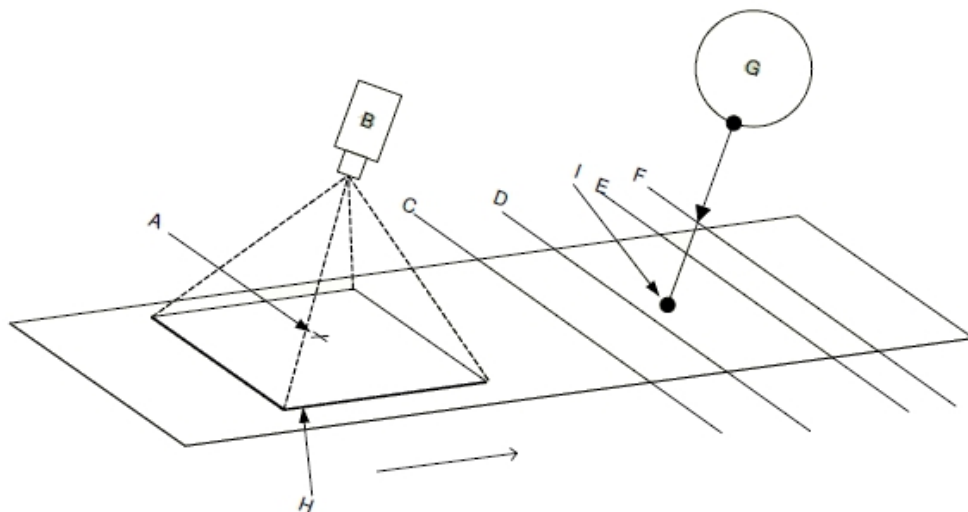
In questo progetto avendo 4 robot in serie bisogna gestire la distribuzione delle posizioni dei prodotti tra i robot.

ABB fornisce una nuova gestione di tipo Adaptive Task Completion (ATC) per la distribuzione delle posizioni, che prevede che il primo robot acceda

al maggior numero possibile di posizioni, mentre gli altri robot accedono a tutte le posizioni mancanti. In altre parole il primo robot preleva e deposita il maggior numero di prodotti che riesce, il secondo robot preleva e deposita il maggior numero di prodotti che riesce tra quelli rimanenti, e via dicendo per i robot 3 e 4.

Dal programma è possibile gestire anche le aree di lavoro dei 4 robot, sia per il prelievo che per il deposito.

In Figura 14 è rappresentato lo schema della gestione del trasportatore e delle aree di lavoro rispetto al sistema di visione e robot. I parametri liberi



A	Origine della videocamera e del sistema di coordinate di base.
B	Videocamera
C	Ingresso
D	Avvia
E	Arresta
F	Uscita
G	Robot
H	Frame immagine
I	Centro del robot

Figura 14: Schema di gestione del prelievo prodotto

da gestire sono:

INGRESSO (C): è la max distanza dalla quale il robot decide se prendersi carico del prelievo del prodotto o lasciarlo al robot successivo.

AVVIA (D): è il momento dal quale il robot può iniziare il prelievo del prodotto.

ARRESTA (E): è il limite fino al quale il robot può procedere col prelievo del prodotto assegnatogli, superato tale limite il prodotto viene lasciato al robot successivo.

USCITA (F): è il punto limite dove il robot decide di considerare “perso” il prodotto, e quindi lasciarlo al robot successivo.

Tutti i valori devono essere espressi in mm e si riferiscono dal centro del robot (punto I).

I valori di ingresso e uscita non devono essere troppo elevati perché altrimenti si potrebbero sovrapporre le aree di lavoro dei robot, come tra l’ingresso di un robot e l’uscita del robot precedente, creando problemi.

Per guadagnare velocità in termini di prelievi al minuto si è deciso di ridurre i valori di avvia e arresto. Riducendo tali valori il robot preleva solo i prodotti più vicini riducendo così al minimo la corsa dei braccetti del robot.

4 Messa in servizio dell’intero sistema Pick and Place

In Figura 15 è possibile vedere l’intera struttura dei 4 robot delta e del sistema di visione. Per effettuare la messa in servizio del sistema, e successivamente le prove, è stato necessario verificare il funzionamento degli encoder ed effettuare la calibrazione della videocamera e dei robot.

Per la verifica degli encoder è bastato selezionare un punto del nastro trasportatore (fissato come punto 0), fatto avanzare il nastro per circa un metro, e



Figura 15: Vista della struttura visione-robot

verificato che il conteggio dell'encoder corrispondesse ai mm di avanzamento del nastro trasportatore.

Verificato il funzionamento degli encoder si è passati alla calibrazione della videocamera e dei 4 robot.

Per effettuare la calibrazione della videocamera si è utilizzato il metodo a scacchiera (descritto in appendice) e per i 4 robot il metodo detto “a 4 punti”. In Figura 16 si può vedere la scacchiera utilizzata per la calibrazione, con i quadretti di grandezza 1cm x 1cm, posizionata sopra a un blocco di cartone per calibrare il base frame vicino all'altezza di presa dei prodotti. Questa scelta è stata fatta per evitare di introdurre successivamente degli offset.

Per la calibrazione della videocamera si è quindi posizionata la scacchiera sotto la videocamera, (Figura 17), e si è acquisita l'immagine per l'autocalibrazione. Calibrata la videocamera si è passati ai 4 robot. I robot prevedono prima una calibrazione interna dei propri assi e, se uniti a un sistema di visione, come in questo caso, richiedono anche la calibrazione rispetto alla

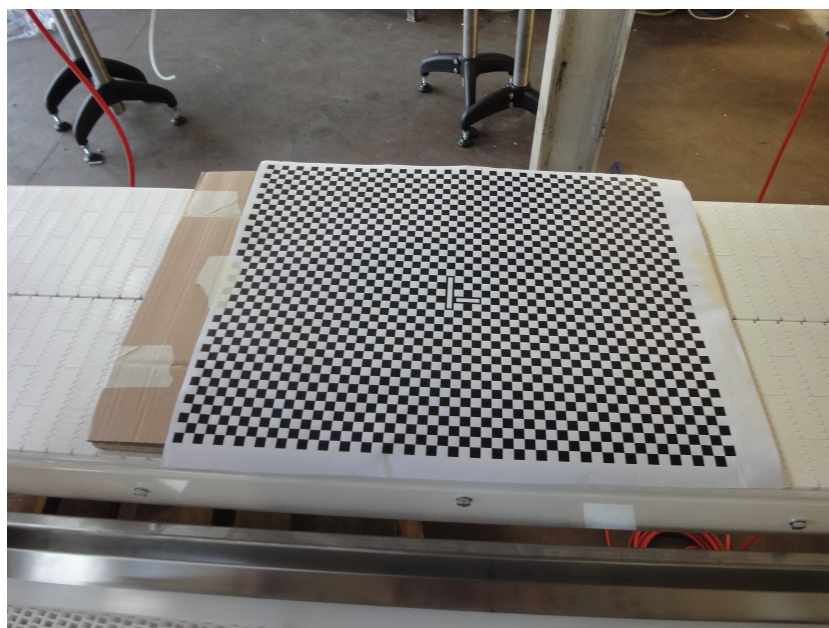


Figura 16: Scacchiera utilizzata per la calibrazione

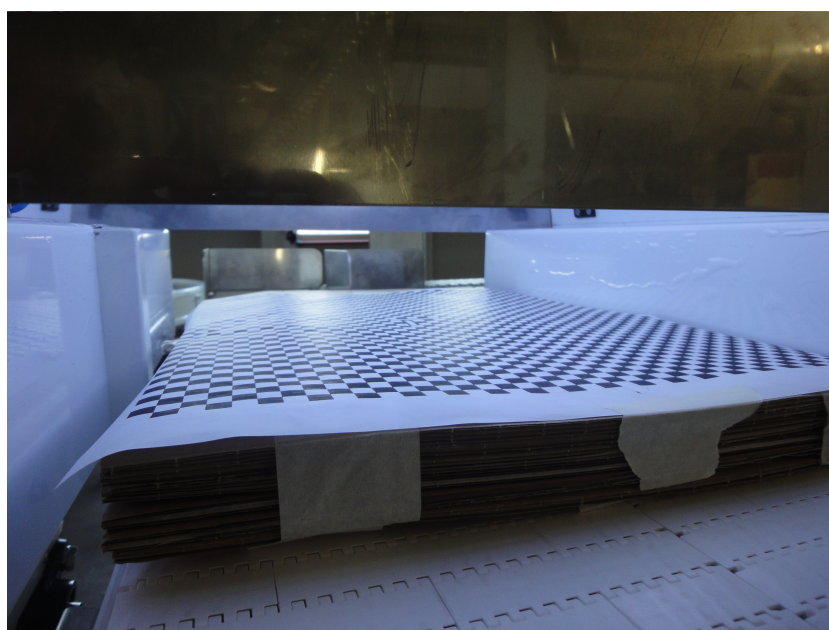


Figura 17: Una fase della calibrazione della videocamera mediante l'uso della scacchiera

videocamera.

Per la calibrazione interna è bastato portare in posizione (su delle tacche segnate) i 4 assi e calibrare; questa operazione è stata effettuata per ogni robot.

Per la calibrazione rispetto la videocamera i robot mettono a disposizione la calibrazione detta “a 4 punti”.

La calibrazione consiste nel far avanzare verso i robot il nastro trasportatore con posizionata sopra la scacchiera, posizionare manualmente il braccio del robot su un punto selezionato della scacchiera e registrare le coordinate di quel punto, far avanzare ancora il nastro e riposizionare nello stesso punto della scacchiera il robot e procedere così anche per gli altri due punti. La stessa procedura verrà ripetuta per tutti gli altri robot, senza mai staccare la scacchiera dal nastro trasportatore.

Questo passaggio è molto delicato perchè la calibrazione influirà molto sulle prestazioni e sulla precisione dell'intero sistema. La calibrazione dell'intero sistema infatti ha richiesto quasi 3 ore.

Calibrato il sistema si è passati alle prove della linea.

Durante le prove si sono aggiustati e regolati i parametri della videocamera e le quote di prelievo e di deposito.

Aumentando la velocità dei robot si è riscontrato il problema della perdita del prodotto, o più precisamente durante il percorso prelievo-deposito il prodotto si staccava dalla ventosa e quindi veniva perso.

Come prima soluzione si è provato a verificare il corretto funzionamento delle valvole venturi e la pressione di lavoro, ma senza riscontrare anomalie, anzi aumentando la pressione per il vuoto il risultato non cambiava. Si è quindi pensato di modificare la struttura della ventosa, passando da una rotonda a una rettangolare ed aggiungendo delle piccole “sponde” sui lati per limitare i movimenti laterali del prodotto nella fase di spostamento. In Figura 18 si può vedere la pinza che si è utilizzata con le modifiche apportate, questa soluzione ha portato ad ottimi risultati anche quando il robot è stato portato alla velocità massima (10000mm/s). Risolto questo problema l'intero siste-



Figura 18: Pinza modificata

ma visione-robot ha funzionato correttamente, lasciando comunque spazio ad affinamenti futuri.

5 Descrizione del robot paletizzatore

In Figura 19 sono rappresentate le varie sezioni (viste) del sistema di palletizzazione mediante il robot antropomorfo ABB IRB4600 a 6 assi. Il sistema può essere descritto nel seguente modo:

- dal nastro trasportatore 6 arrivano le scatole confezionate in precedenza dai 4 robot delta;
- proseguendo lungo il nastro trasportatore 6 le scatole confezionate arrivano al compattatore (C), il quale ordina e compatta le confezioni preparandole per la presa del robot;

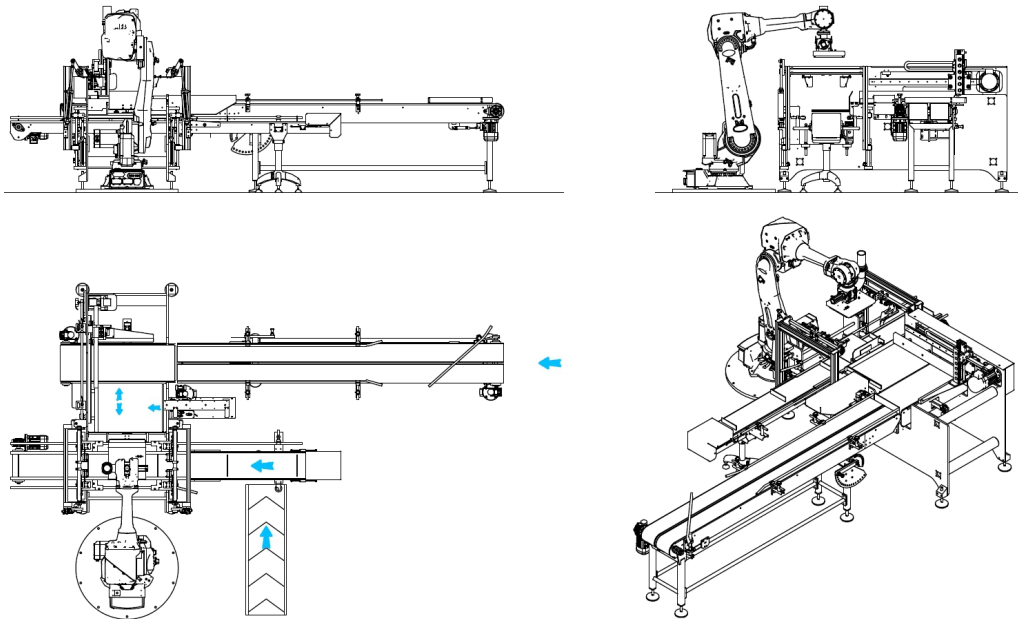


Figura 19: Vista delle sezioni del robot paletizzatore

- dal nastro 7 arrivano gli scatoloni vuoti, si fermano nella tramoggia (T) dove vengono bloccati e aperti i lembi superiori per facilitare il deposito delle scatole confezionate da parte del robot paletizzatore;
- il robot preleva le confezioni dalla zona (C) e le inserisce all'interno dello scatolone presente nella tramoggia (T);
- una volta che lo scatolone viene completato, attraverso il nastro 8 viene inviato al magazzino.

5.1 Messa in servizio del robot paletizzatore

Per la programmazione del robot ci si è affidati al programma (ambiente di sviluppo) ABB RobotStudio e al linguaggio di programmazione (di alto livello) Rapid.

Attraverso il programma RobotStudio è stato possibile effettuare la verifica del codice scritto e le simulazioni dei relativi movimenti del robot (Figura 20). Qui di seguito è riportato un pezzo del codice scritto per il prelievo e il

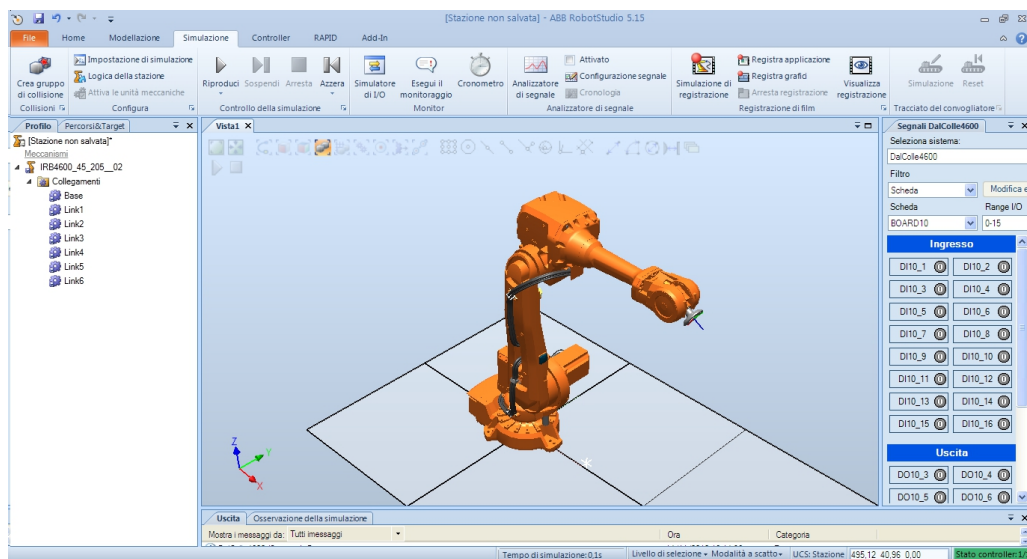


Figura 20: Simulatore RobotStudio

deposito:

```

1 PROC Prelievo()
  VAR robtarget prel;
3  VAR FormatType Formato_Corr;
  VAR BOOL TFlag:=false;
5  VAR BOOL TFlag2:=false;
  VAR BOOL TFlag3:=false;
7  VAR speeddata SpeedPrel:= [9000,500,5000,1000];
  VAR robtarget pStop;
9
  TriggIO tgOK_Prelievo, AnticipoOK_Prelievo\Start\DOp:=OUT_W1_04,1;
11 TriggIO tgOK_Deposito,10\DOp:=OUT_W1_11,1;
  TriggIO tgEVPresaON, AnticipoEVPresaON\DOp:=EVPresa,1;
13
  !orientamento punto prelievo ...polso a zero.
15
  RESET OUT_W1_04;!prelievo eseguito
17
  !SETGO OUT_PLC_FORMATO,0;

```

```

19  Confl\0n;
    ConfJ\0n;
21  SingArea \Off;
    !WaitDi IN_W1_09,1;
23
    !Fermo Alto Sopra Prelievo
25  pWait:
    WaitDi IN_W1_09,1 \MaxTime:=0.1 \TimeFlag:=TFlag2;

```

Anche per questo robot prima di effettuare le prove è stato necessario effettuare la calibrazione, sia dei 6 assi sia del base frame.

Per la calibrazione degli assi si è eseguito lo stesso procedimento che si è utilizzato per i robot delta e cioè portando i 6 assi in posizione di riferimento (segnati da delle tacche).

Per la calibrazione del base frame invece si è sempre usato il metodo a 4 punti, però in questo caso non essendoci né una videocamera né un nastro trasportatore è stato necessario utilizzare un procedimento differente.

In Figura 21 si possono vedere le varie fasi della calibrazione che consistono nel fissare un punto sul base frame (in questo caso quello di prelievo nel compattatore) e portare manualmente il robot in quel punto con 4 angolazioni differenti. Calibrato il robot si è caricato il programma nel controller del robot e si sono provati i movimenti e le traiettorie provate precedentemente nel simulatore.

La presa delle confezioni è stata affidata a una pinza che, tramite una pompa del vuoto, funziona da ventosa trattenendo le confezioni.

In Figura 22 sono riportati i vari formati richiesti, i quali non hanno dato particolari problemi se non il formato 4 che richiedeva il posizionamento di 3 confezioni in verticale e non orizzontale sul lato dello scatolone. Per fare questo il robot deve compiere una traiettoria e un movimento diverso che lo costringe a passare per il punto di singolarità (descritto in appendice), bloccandosi e facendo movimenti non conformi a quelli richiesti.

Per risolvere il problema si è deciso di aggiungere dei punti lungo la traiet-

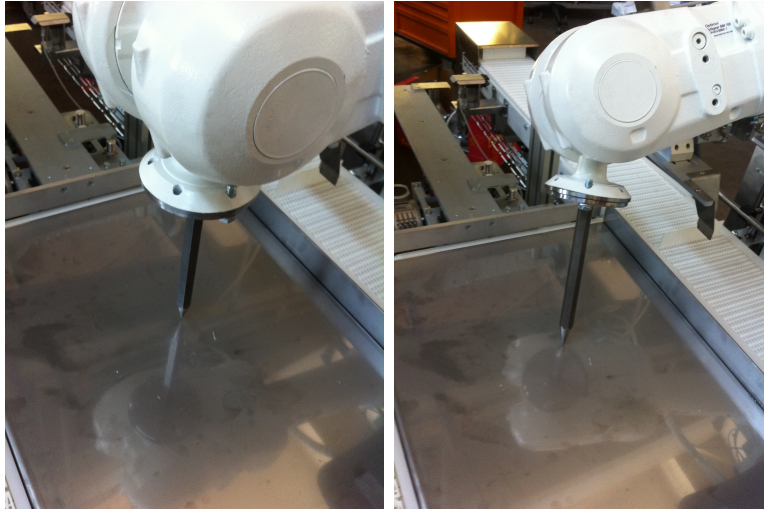


Figura 21: Fasi della calibrazione del base frame del robot IRB4600

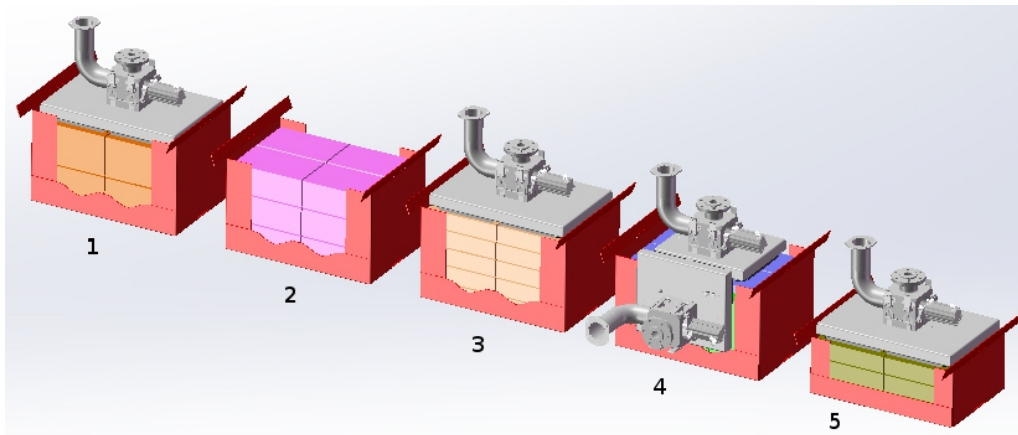


Figura 22: Rappresentazione dei formati richiesti

toria in modo da evitare il punto di singolarità.

Questo si è rivelato difficile, essendo lo spazio ristretto e i tempi tra un prelievo ed il successivo brevi.

Il problema di tempo del ciclo prelievo-deposito-prelievo si è verificato perchè impostando un'altra traiettoria, per evitare il punto di singolarità, non si passava più per quella ottimale.

Aggiustando i nuovi punti della traiettoria e raccordando il meccanismo del compattatore, si è riusciti a rimanere nel tempo necessario per non rallentare l'intera linea produttiva.

In Figura 23 si può vedere il robot IRB4600 concluso e in opera nella linea produttiva.



Figura 23: Robot paletizzatore IRB4600 in opera

6 Conclusioni e sviluppi futuri

Le specifiche richieste dal cliente sulla linea di produzione imponevano un controllo di qualità del prodotto e il confezionamento di 280-300 prodotti al minuto.

Dopo la messa in servizio dell'intero impianto e le prove effettuate, con i vari affinamenti lungo tutta la linea, si è riusciti a garantire una produzione di 300-320 prodotti al minuto, quindi abbondantemente in linea con le specifiche richieste dal cliente.

È stato possibile ottenere questo risultato grazie alle ottime performance dei robot delta ABB FlexPicker IRB360, arrivando ogni singolo robot fino a 85-87 prelievi al minuto.

Buone prestazioni sono state ottenute anche dal sistema di visione che ha fornito ai robot dati precisi sulla posizione dei prodotti per il prelievo.

L'impianto, pur funzionando in modo ottimale, lascia ancora molti margini di miglioramento e di sviluppo, in particolar modo la parte di visione artificiale.

In futuro si potrebbe sfruttare la tecnologia di visione 3D così da poter utilizzare un'auto-regolazione in altezza del robot durante la fase di prelievo del prodotto rendendolo un sistema molto più "robusto".

Un altro passo sarebbe quello di sviluppare un software apposito e personalizzato per l'elaborazione delle immagini e la gestione dei robot (a tal proposito ABB mette a disposizione delle librerie in .NET per lo sviluppo di un sensore esterno).

A Appendice

A.1 Geometric PatMax

Sistema brevettato nel 1997 dalla Cognex come prima tecnologia di precisione per la localizzazione di oggetti, ad alta velocità e alto rendimento, applicata alla visione industriale.

Più tecnicamente PatMax è una tecnologia per la ricerca della posizione-schema. Questo strumento misura:

- Posizione dello schema;
- Dimensione relativa allo schema appreso in origine;
- Inclinazione relativa allo schema appreso in origine.

Quindi PatMax utilizza la tecnologia avanzata di rilevamento delle strutture geometriche.

La tecnologia di rilevamento delle strutture dipende da un processo di analisi pixel-griglia comunemente noto come correlazione normalizzata. Questo metodo ricerca la somiglianza statistica tra un modello in scala di grigio (o immagine di riferimento) di un oggetto o porzioni dell'immagine per determinarne la posizione (x, y) dell'oggetto.

Sebbene efficace in talune situazioni, questo approccio limita da una parte la capacità di rilevamento degli oggetti e, dall'altra, la precisione del rilevamento a causa di condizioni di aspetto variabili comuni a tutte le linee produttive, come variazioni a livello di angolazione, dimensioni e ombreggiatura dell'oggetto.

Per far fronte a tali limitazioni, Cognex ha sviluppato la tecnologia di rilevamento delle strutture geometriche (PatMax). Questa tecnologia rileva la geometria di un oggetto mediante una serie di curve limite, non legate a una griglia in pixel, e ricerca forme simili nell'immagine senza basarsi su livelli di grigio specifici. Ne risulta uno straordinario miglioramento della capacità di rilevamento di precisione degli oggetti nonostante le variazioni a livello di angolazione, dimensioni e ombreggiatura [5].

A.2 Blob

Un “blob” in un’immagine binaria è un’area di pixel adiacenti che si trovano nel medesimo “stato logico” (0 o 255, bianco o nero), senza però poter assumere valori intermedi tra i due stati (che non sarebbero “colori” blob).

Lo stato dei pixel può essere definito di primo piano (foreground) e corrisponde agli oggetti, mentre gli altri pixel vengono definiti di sfondo (background) [6].

Per comprendere meglio come vengono identificati i blob può essere utile esporre la seguente procedura[7]:

```
Per ciascun pixel della matrice:
2 se il pixel e'un colore blob, etichettarlo 1
    altrimenti etichettarlo 0
4
vai al pixel successivo
6     se e'un colore blob
        e se e'adiacente a uno blob
8         etichettarlo 1
        altrimenti etichetta 2 (o successivo)
10
ripetere fino a quando tutti i pixel della matrice
12 non sono finiti
```

A.3 Calibrazione a scacchiera

L’operazione di calibrazione della videocamera consiste nell’estrarre la posizione del piano di terra (base frame) nel riferimento scelto ed una serie di parametri necessari alla successiva elaborazione.

Tali parametri vengono detti intrinseci e sono:

- lunghezza focale;
- centro dell’immagine;

- fattore di distorsione radiale;
- fattore di scala.

Un modo per calibrare la videocamera è quello di inquadrare una scacchiera di dimensioni note collocata sul piano di terra.

A partire dall'immagine catturata dalla videocamera si confrontano le proiezioni degli spigoli o dei vertici della scacchiera sul piano immagine con quanto si conosce a priori della scacchiera stessa (la dimensione dei quadretti oppure il numero di quadretti).

Quindi dal confronto tra la geometria della scacchiera (nota) e ciò che compare nell'immagine si possono estrarre i parametri intrinseci e la posizione del piano di terra [8].

A.4 Singolarità

È possibile ottenere alcune posizioni nell'area di lavoro utilizzando un numero infinito di configurazioni del robot per posizionare e orientare l'utensile. Queste posizioni, note come punti di singolarità, costituiscono un problema quando si devono calcolare gli angoli del braccio del robot in base alla posizione e all'orientamento dell'utensile.

In genere, un robot presenta due tipi di singolarità:

- singolarità del braccio;
- singolarità del polso.

Le singolarità del braccio sono rappresentate da tutte le configurazioni in cui il centro del polso (l'intersezione degli assi 4, 5 e 6) termina direttamente sull'asse 1 (Figura 24). Le singolarità del polso sono rappresentate dalle configurazioni in cui gli assi 4 e 6 si trovano sulla stessa linea, ad esempio l'asse 5 ha un angolo uguale a 0° [9] (Figura 25). Nel caso del robot palettizzatore la singolarità che si è riscontrata è stata quella del polso.

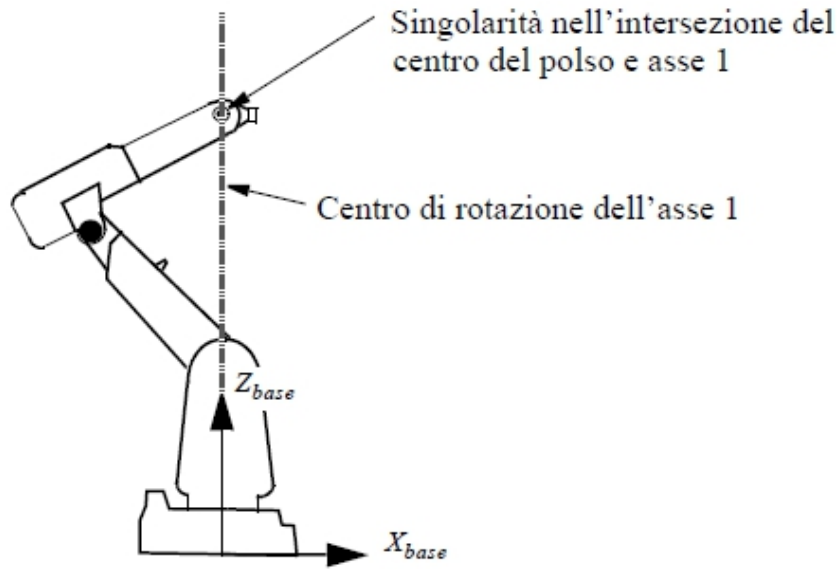


Figura 24: Schema della singolarità del braccio, intersecazione del centro del polso e dell'asse 1

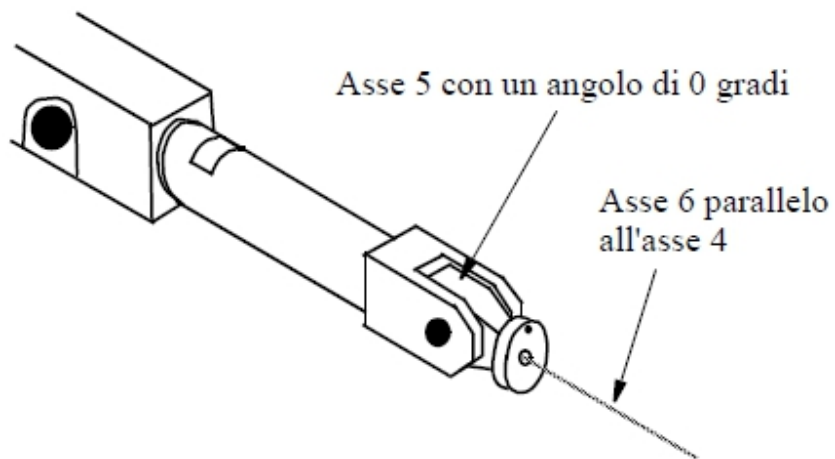


Figura 25: Schema della singolarità del polso, assi 4 e 6 si trovano sulla stessa linea

Riferimenti bibliografici

- [1] B.Siciliano,O.Khatib, *Handbook of Robotics*, Springer, pp. 963-969, Napoli and Stanford, Aprile 2008.
- [2] <http://www.abb.com/cawp/abbzh252/c2db8bbe34ab0961c1256aed003368b8.aspx>
- [3] ABB Robotics, *Manuale dell'applicazione PickMaster 3*, Revisione F, ABB, Luglio 2011
- [4] Basler Scout, *Basler Scout datasheet*, http://www.baslerweb.com/media/documents/BAS1210_scout_e_web.pdf
- [5] <http://www.cognex.com/pattern-matching-technology.aspx?langtype=1040&locale=it>
- [6] http://misure.mecc.polimi.it/homepage_corsi/MSI_Saggin/lab6_lucidi_immagini.pdf
- [7] http://www.societyofrobots.com/programming_computer_vision_tutorial_pt3.shtml
- [8] B.Siciliano,L.Sciavicco,L.Villani,G.Oriolo, *Robotics Modelling,Planning and Control*, Springer, pp.228-229 and 440-443, Napoli e Roma 2008.
- [9] ABB Robotics, *Manuale tecnico di riferimento Panoramica RAPID*, Revisione H, ABB, 2004 <http://www-lar.deis.unibo.it/people/rfalconi/Panoramica%20RAPID.pdf>

RINGRAZIAMENTI

I miei più grandi ringraziamenti vanno a tutta la mia famiglia, a papà Riccardo, mamma Giuseppina e alla sorella Ilenia per avermi sempre sostenuto e dato la fiducia necessaria per arrivare fino a questo traguardo. Un affettuoso ringraziamento per la mia ragazza Alessandra e un doveroso ringraziamento alla Professoressa Valcher che si è sempre dimostrata disponibile per ogni chiarimento o correzione.

Come non ricordare e ringraziare tutti i colleghi di corso e di studio (e non solo...)? Daniele, Davide, Alberto, Francesca, Mattia, Giulio, Luca, Matteo, Tiziano, Enrico, Giacomo, Roy, Red, Federica, Giulia, Viviana. Un grazie anche a tutti gli amici di Verona, Ketto, Roby, Gino, Kikko, Simone, Vangi, Pina, Gibo, Mattia, Stefano, Fabrizio, Giacomino, Francesca, Gloria, Vasco, Pier e Cate.

Un ringraziamento particolare invece va al mio amico Alessandro per tutti questi anni di amicizia.

Grazie a tutti per aver reso questi anni indimenticabili...!!

Damiano Pasetto