



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Corso di laurea magistrale in ingegneria meccanica

**SVILUPPO DI APPLICAZIONI DI ROBOTICA COLLABORATIVA
ASSISTITA DA VISIONE ARTIFICIALE**

**DEVELOPMENT OF COLLABORATIVE ROBOTICS APPLICATIONS
ASSISTED BY ARTIFICIAL VISION**

Relatore:

Prof. Giacomo Palmieri

Tesi di laurea di:

Federico Neri

Anno accademico 2020/2021

*Ad Alice, che mi ha sostenuto dall'inizio di questo percorso
Ai miei genitori, che mi hanno permesso di arrivare fin qui
Ai professori, per tutto quello che mi hanno trasmesso
Ai miei amici, per il supporto in questi 5 lunghi anni
Al professore Giacomo Palmieri, per il suo sostegno
A tutte le persone incontrate lungo il cammino
Alla Joytek, per l'opportunità di tirocinio
A me stesso, per esserci riuscito
Scrivo semplicemente
Grazie*

INDICE

1. INTRODUZIONE	6
2. ROBOT COLLABORATIVI	8
3. OMRON TM.....	10
4. OMRON TM5-900.....	20
4.1. CENTRO DI MASSA ED INERZIA.....	22
5. TELECAMERA 2D ROBOT	24
5.1 TMVISION	25
5.1.1 <i>TM Landmark</i>	26
5.1.2 <i>Servoazionamento visivo</i>	26
5.1.3 <i>Calibrazione basata su oggetti</i>	26
5.1.4 <i>Posizionamento fisso</i>	27
5.2 TM ROBOT VISION DESIGNER	28
5.2.1 <i>Migliora</i>	28
5.2.2 <i>Trova</i>	29
5.2.3 <i>Identifica</i>	30
6. BANCO DI LAVORO LAVAZZA.....	31
7. TOOL DEL ROBOT	34
7.1 TOOL VENTOSA.....	35
7.2 TOOL GANCIO.....	35
8. CONFIGURAZIONI E PROBLEMATICHE DI PROGETTO	36
8.1. CHIUSURA.....	36
8.2. APERTURA	44
8.3. EROGAZIONE	50
8.4. PRESA.....	59
9. RICONOSCIMENTO 2D CAPSULE	84
9.1. CAPSULE GIALLE/ROSSE	87
9.2. CAPSULE NERE	96
9.3. CAPSULE BLU	99
10. SICUREZZA.....	103

11. TELECAMERA 3D.....	108
12. VISIONE STEREOSCOPICA	111
13. ENSENSO X36	114
14. APPLICAZIONE DI BIN PICKING CON TELECAMERA 3D.....	115
14.1 SCELTA DELLE LENTI.....	116
14.2 POSSIBILI DISPOSIZIONI DELLE CAPSULE.....	118
15. PROGRAMMAZIONE CON HALCON.....	119
16. TRASFORMAZIONE DI COORDINATE.....	124
16.1. COMPOSIZIONE DI ROTAZIONI	126
16.2. ROTAZIONI INTORNO AGLI ASSI FISSI	128
16.3. ROTAZIONI INTORNO AGLI ASSI MOBILI	129
17. ELABORAZIONE DELLE COORDINATE DA FORNIRE AL ROBOT	130
17.1. TRASFERIMENTO DELLE COORDINATE ALLA BASE DEL ROBOT	131
17.2. IDENTIFICAZIONE DELLA CAPSULA DA PRELEVARE.....	133
17.3. DEFINIZIONE DELLE COORDINATE DEFINITIVE DA PASSARE AL ROBOT	135
17.4. SOTTOFUNZIONI RICORRENTI	138
17.5. SALVATAGGIO DELLE COORDINATE SU UN FILE	139
18. ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI DURANTE I TEST	140
19. COMUNICAZIONE CON LABVIEW.....	141
20. RICEZIONE DEI DATI E PROGRAMMAZIONE ROBOT	143
21. SIMULAZIONE CON ROBODK	145
22. ANALISI DI UN PROFILOMETRO	146
23. CONCLUSIONI.....	152
24. SITOGRAFIA.....	153
25. NORMATIVE	154
26. INDICE DELLE FIGURE	155

1. INTRODUZIONE

La robotica collaborativa sta diventando uno dei temi principali dell'Industria 4.0 e sta lentamente modificando le condizioni di lavoro, combinando l'aspetto legato alla produttività con quello della salute di lavoratori e utenti. La collaboratività si manifesta con l'accesso allo spazio di lavoro per compiere azioni funzionalmente legate e simultanee, senza il rischio di interferire con l'attività produttiva e tutelando l'incolumità fisica del lavoratore. Oggigiorno, sarebbe più adeguato estendere il termine, ovvero andare a definire delle vere e proprie applicazioni collaborative in cui non è sufficiente la presenza di un Cobot; la collaboratività deve comprendere anche il set di accessori, pinze, i sistemi di visione, le sicurezze ed i software che andranno a gestire l'intera attività svolta dal robot stesso. Le numerose sfaccettature di questa innovazione comprendono la cooperazione, l'assistenza e la compresenza dell'uomo. In breve, è collaborativa qualsiasi forma di interazione tra uomo e sistema che permetta di eseguire un compito senza le limitazioni e i rischi derivanti dall'uso di macchine, robot, utensili e sistemi di visione industriali; ovvero il cui unico scopo è massimizzare la produttività raggiungendo la massima velocità. Sicuramente la scelta della robotica collaborativa è sostenuta da motivazioni economiche, di salute occupazionale e di ottimizzazione dello spazio di fabbrica.

Come precedentemente accennato, alcuni strumenti di fondamentale importanza nelle applicazioni collaborative sono i sistemi di visione, tecnologie che simulano il comportamento di un operatore umano, nel visualizzare ed interpretare una scena, al fine di eseguire in modo automatico operazioni di controllo o automazione industriale. Per fare ciò esistono diversi sistemi di visioni che consentono ai robot, industriali o collaborativi, di misurare, rilevare, controllare, ed essere guidati.

Inizialmente, le telecamere industriali non erano così avanzate e la logica robotica era piuttosto inaffidabile, la maggior parte delle applicazioni non erano neanche realizzabili. Attualmente l'evoluzione della tecnologia dei sistemi di visione e il progresso delle "smart camera user-friendly" consentono di gestire progetti complessi e di inserire facilmente tali innovazioni all'interno di una cella robotica.

La maggior parte delle applicazioni di visione robotizzata si basa su applicazioni ben definite, con funzionalità già programmate e in cui è possibile applicare dei filtri alle immagini o rilevare un determinato pattern. Il vantaggio principale di un sistema di visione è la sua affidabilità; infatti, a differenza degli esseri umani se un sistema robotico è ben programmato, eseguirà il suo compito per lunghi periodi senza disattenzioni o calo di resa.

Esistono diverse metodologie che permettono di gestire i sistemi di visione in applicazioni robotizzate. Una delle più diffuse consiste nel posizionare le telecamere direttamente sul polso del robot. In questo modo è possibile acquisire le immagini da diverse posizioni nello spazio, senza le limitazioni di un punto fisso, e andando a rilevare oggetti in posizioni altrimenti irraggiungibili. Inoltre, è possibile verificare se l'oggetto è stato afferrato correttamente o, in caso contrario, applicare delle azioni correttive. La problematica principale di questa soluzione sta nel tempo ciclo che, comprendendo il posizionamento e l'acquisizione dell'immagine, risulta dilungato.

Un'altra metodologia molto diffusa, e che diminuisce notevolmente il tempo ciclo, utilizza una telecamera fissa e costantemente puntata in una determinata zona; tale espediente è maggiormente utilizzato con le telecamere 3D, in applicazioni di bin picking.

Come accennato, è possibile utilizzare sia telecamere 2D che 3D. I sistemi di visione bidimensionale hanno una qualità d'immagine migliore, sono semplici da usare ed economici, sia nell'acquisto che nella programmazione. Le telecamere 2D hanno però problemi con le ombre, causate da un'illuminazione del piano di lavoro non uniforme. Una soluzione consiste nell'utilizzo di flash o luci posizionate nello stesso orientamento della fotocamera. La visione tridimensionale, nonostante i pregi e le numerose attività che riuscirebbe a gestire, non è ancora diffusa nell'ambito industriale; ciò a causa della complessità di programmazione e della difficoltà di implementazione in una cella robotica. Inoltre, i costi sono ancora elevati e l'affidabilità non è delle migliori.

In questa tesi verranno presentate tre diverse applicazioni che prevedono l'uso di un robot collaborativo assistito da un sistema di visione:

1. Il primo progetto prevede l'uso di un cobot, il TM5-900 dell'Omron, e della telecamera 2D ad esso incorporata e posizionata sul polso. Il compito è quello di rilevare la presenza di alcune capsule del caffè, posizionate su un vassoio da un operatore, per poi prelevarle attraverso l'uso di una ventosa e posizzarle in un erogatore, precedentemente aperto. Lo scopo è quello di effettuare delle analisi di qualità di alcuni lotti di caffè selezionati e il tempo di completamento dei due vassoi presenti, se fossero pieni, sarebbe di 2/3 ore. Grazie a tale applicazione, l'operatore si limita a caricare i vassoi ogni qualche ora, potendo utilizzare il tempo a disposizione per altre attività.
2. La seconda applicazione descritta riguarda un progetto di ricerca e sviluppo che riprende l'attività precedente; in questo caso l'operatore non ha bisogno di caricare i vassoi in modo ordinato, dato che ciò impiegherebbe alcuni minuti, ma è sufficiente che depositi le capsule su un piano, senza preoccuparsi dell'orientamento da loro assunto. Per il rilevamento viene utilizzata una stereocamera 3D, fissata al di sopra del volume di lavoro, in grado di rilevare una mesh di punti e comunicare con il robot.
3. L'ultima attività descrive brevemente l'uso di un profilometro laser agganciato al polso di un cobot. Grazie all'utilizzo di tale strumentazione si doveva individuare la posizione e l'inclinazione di un foro all'interno di un altro foro posizionato su una superficie curva in modo da poter poi passare le coordinate spaziali e angolari ad un trapano avvitatore permettendogli di centrare la vite nell'asse del foro più interno.

2. ROBOT COLLABORATIVI

Un Cobot o Co-robot (derivante da "collaborative robot") è un robot pensato per lavorare a distanza ravvicinata con gli operatori. Essi si differiscono dalla maggior parte dei robot industriali, progettati per operare in maniera autonoma e protetti da barriere.

I robot collaborativi sono precisi e compatti; inoltre, si installano facilmente e possono essere re-impiegati velocemente su nuovi processi. La tecnologia utilizzata, essendo semplice, oltre che innovativa, consente anche a operatori senza esperienza di programmazione di configurarli e gestirli perfettamente. La maggior parte dei Cobot lavora a stretto contatto con il personale senza l'uso di protezioni di sicurezza, permettendo di ottimizzare gli spazi e soprattutto assistere gli operatori in mansioni pesanti, poco ergonomiche e in ambienti nocivi. Per di più non hanno i tradizionali costi aggiuntivi di programmazione, messa in servizio e, in alcuni casi, protezione delle celle di lavoro, rendendoli economicamente accessibili per aziende con cicli produttivi ridotti e diversificati.

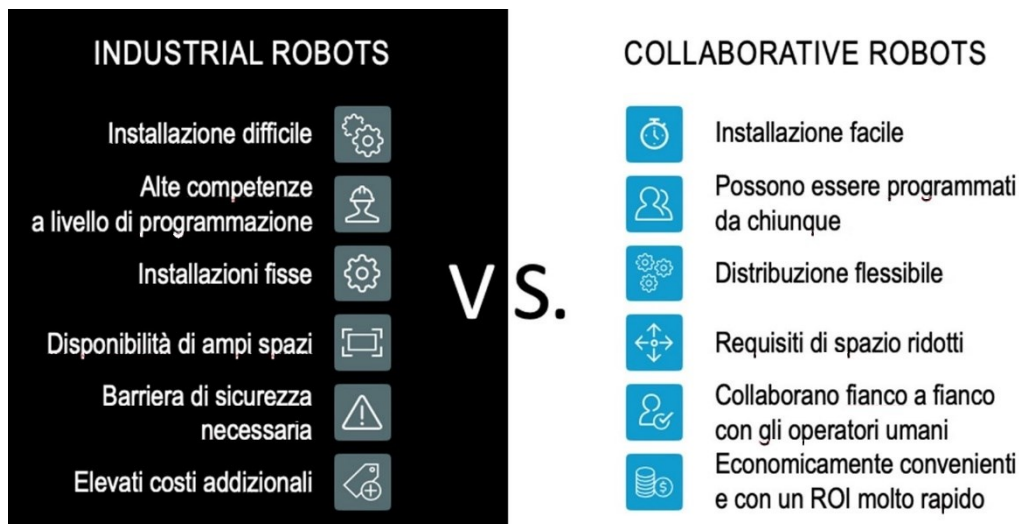


Figura 1 Confronto robot industriali e collaborativi

Questi tipi di robot, dunque, tendono a svolgere gli stessi ruoli delle macchine dell'industria pesante, apportando importanti benefici per gli operatori umani. La maggior parte delle attività che possono svolgere devono possedere due importanti requisiti:

- **Alta prevedibilità**, dove i movimenti tendono ad essere quasi sempre gli stessi con poche piccole variazioni, quali:
 - quando bisogna prelevare oggetti sempre nella stessa posizione oppure organizzati tutti allo stesso modo;
 - quando bisogna spostare oggetti con simili dimensioni, peso e forma;
 - quando bisogna spostare oggetti simili ma di forme irregolari.
- **Ripetibilità**:
 - operazioni coerenti tra oggetti dello stesso lotto o tra più lotti;
 - in operazioni a lungo termine;
 - domanda con alta frequenza.

Di seguito qualche esempio delle applicazioni più frequentemente gestite dai robot collaborativi:

- **Prelievo e posizionamento:** I robot collaborativi possono essere dotati di sistemi di visione che consentono di individuare in maniera automatica gli oggetti per poi eseguire il prelievo e il posizionamento, permettendo agli operatori di eseguire mansioni di maggior valore. L'elevata ripetibilità si appresta alla manipolazione rapida in ambienti di lavoro che necessitano di un ritmo sostenuto.
- **Pallettizzazione di precisione:** I Cobot risultano molto efficienti nei processi di pallettizzazione, poiché diminuiscono i costi e i cicli di lavorazione. Il vantaggio più evidente è la loro flessibilità: oltre a svolgere quasi ogni tipo di attività, i robot collaborativi possono essere riprogrammati facilmente per svolgere nuovi compiti o per integrarsi ad altri macchinari, adeguandosi in modo agile alle discontinue esigenze della produzione.
- **Assemblaggio industriale:** Con i robot collaborativi è possibile automatizzare le operazioni di assemblaggio e ottenere una maggior precisione e qualità durante la produzione. Inoltre, possono essere equipaggiati con avvitatori e altri accessori intercambiabili rendendo possibile la lavorazione di prodotti diversi in dimensioni e materiali.
- **Stampaggio a iniezione:** Data la possibilità di collegarsi direttamente alle macchine per lo stampaggio a iniezione, i Cobot possono gestire gli stampi a iniezione per la prototipazione e le piccole produzioni, anche senza la supervisione di un operatore.

Esistono principalmente 4 tipologie di operazioni collaborative che tenendo conto delle norme di sicurezza permettono al Cobot di poter collaborare con gli operatori. Le normative ISO 10218-1 e -2 definiscono i 4 diversi metodi per ottenere operazioni collaborative, mentre l'ISO / TS 15066 aggiunge le informazioni riguardo la Safety & Security e alcuni requisiti aggiuntivi.

1. **Arresto monitorato:** Un robot tradizionale viene utilizzato all'interno di una recinzione. L'operatore può entrare nell'area di lavoro attraverso un'apertura (interruttore della porta, barriera fotoelettrica o telecamera che rilevano l'entrata di una persona). All'ingresso del personale, il robot viene messo in pausa. Una funzione di arresto di sicurezza viene utilizzata mentre la persona entra e fa il suo lavoro, come il carico o scarico macchina. Quando la persona esce dall'area di lavoro, il robot può riprendere il funzionamento automatico. La condizione di collaboratività è data dal fatto che l'elettricità nei motori dei robot viene mantenuta mentre è presente una persona. La sicurezza dei Cobot è tale per cui non sono previste barriere protettive e la messa in pausa non deve essere programmata, perché avviene in automatico.

2. **Guida manuale:** La guida manuale rappresenta funzionamento di un robot che, di norma, esegue il compito che gli viene assegnato. Ciò non va confuso con la programmazione manuale nei robot collaborativi. Questo metodo utilizza un robot industriale all'interno di una recinzione. Una persona entra sistematicamente all'interno della cella per eseguire un compito come, ad esempio, avvitare alcune viti. Quando entra, i robot industriali passano in modalità collaborativa (velocità massima 100 mm/s). L'industria automobilistica utilizza questo metodo per posizionare i sedili all'interno delle vetture e per sostenere i paraurti durante l'avvitatura.
3. **Monitoraggio della velocità e della separazione:** Questo metodo è simile all'arresto monitorato ma, invece di mettere il robot in pausa, viene ridotta la velocità in base alla distanza con l'operatore. Per farlo è possibile utilizzare una telecamera che determina la distanza in modo sicuro. Un'altra modalità prevede l'uso di una pellicola sensorizzata integrata nel robot, la quale percepisce se una persona è vicina e blocca il robot prima del contatto. Il Cobot, essendo dotato di appositi sensori, si sposta mantenendo una distanza di sicurezza da oggetti e persone, arrestandosi e ripartendo da solo.
4. **Limitazione di potenza e forza:** Una particolarità dei Cobot è la possibilità di limitare potenza e forza. Queste macchine, infatti, rilevano il movimento e si fermano in caso di collisione con l'operatore. La regolazione della velocità, della forza e della pressione permettono di avere il pieno controllo sull'ambiente circostante.

3. OMRON TM

Omron è un fornitore che lavora nel mondo dell'automazione industriale, nella componentistica elettronica e nel settore sanitario. Nella serie TM introduce i Cobot progettati per funzionare sia con gli esseri umani che con le macchine. Sicuro e trasportabile, con visione integrata, questo robot consente di cambiare rapidamente la sua configurazione. Il suo software è intuitivo e consente una facile gestione per eseguire quasi tutte le attività in varie condizioni di lavoro permettendo di ridurre la manodopera da attività ripetitive e aumentando la produttività.



Figura 2, 3 Omron TM con tool agganciato

Il Cobot **OMRON TM** è dotato di un sistema di visione integrato con fotocamera da 5 megapixel. La telecamera è in grado di localizzare gli oggetti in un ampio campo visivo e la luce di miglioramento dell'immagine consente il riconoscimento degli oggetti in quasi tutte le condizioni. Inoltre, include funzioni come la corrispondenza dei modelli, la lettura dei codici a barre e la classificazione dei colori che consentono l'ispezione, le misurazioni e l'ordinamento.

TMFlow per Techman TM Robot è il software per la gestione del Cobot che consente una programmazione rapida e intuitiva grazie a dei diagrammi a blocchi, limitata però dal fatto che non esiste ancora un programma di simulazione che permette di poter verificare la funzionalità dei movimenti offline e successivamente eseguire il codice.

Oltre alla comunicazione TCP/IP esistente, è ora possibile integrare il robot TM nella soluzione di automazione utilizzando la comunicazione **Modbus TCP**. Agendo come un server Modbus TCP, è possibile leggere una serie di informazioni di stato e diagnostiche dal robot, inclusi giunto, coordinate di base e utensile, modalità operativa e utilizzo di corrente e potenza.

Nella libreria di comandi TMFlow è presente la funzione **Touch Stop** che utilizzando il controllo di precisione dei servi nel braccio del robot è in grado di apprendere la posizione di un oggetto utilizzando il feedback di coppia. La funzione può essere ampliata mediante l'uso di sensori esterni in applicazioni in cui il contatto fisico con l'oggetto non è desiderabile. Un'altra funzionalità esistente è la conformità che consente al braccio del robot di esercitare una forza definita in un vettore impostato.

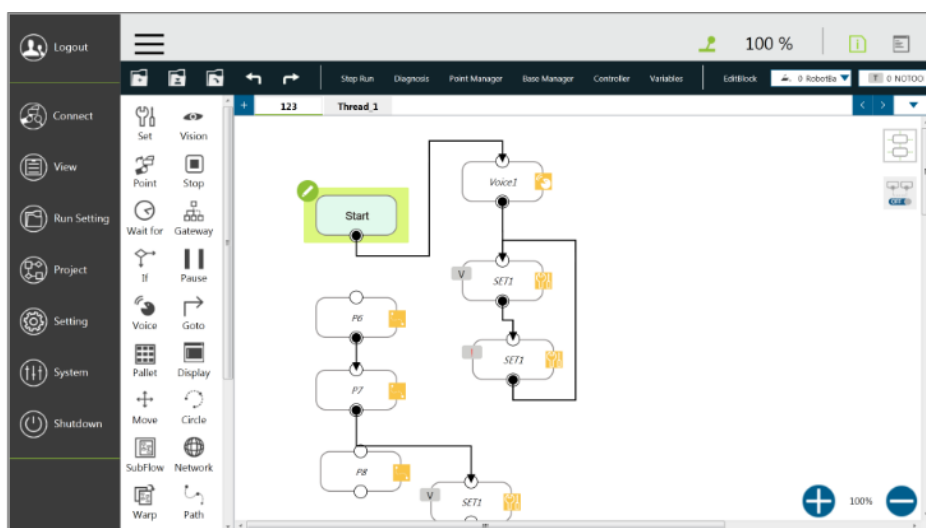


Figura 4 Schermata TMFlow

Nel software è anche possibile modificare le impostazioni di sicurezza per permettere al robot di limitare i propri movimenti in determinate aree di lavoro potenzialmente rischiose per l'operatore umano.



Figura 5 Impostazioni di sicurezza nel TMFlow

Il funzionamento del Safety Stop consente al robot di eseguire un arresto di categoria 2, cioè permette ai servi nel braccio del robot di rimanere attivi ma in uno stato sicuro per poi riprendere automaticamente al ripristino dell'ingresso di arresto di sicurezza. Oltre alla pressione del pulsante Riproduci/Pausa sul Robot Stick per riprendere il movimento. Le funzioni di sicurezza del TM robot sono implementate in conformità con ISO13849-1, ISO10218-1 e ISO/TS15066.

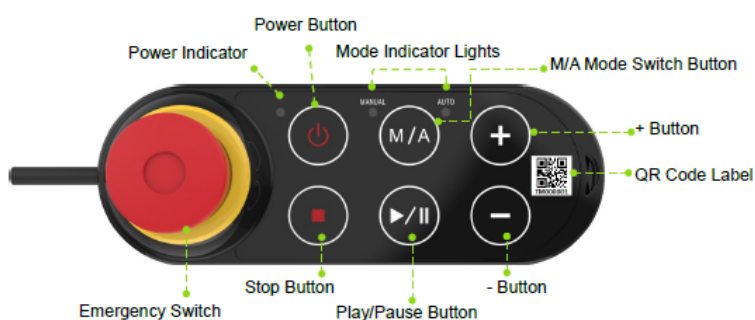


Figura 6 TM Robot Stick

Elementi	Funzione di base
Emergency Switch	Pulsante di emergenza predefinito per il robot
Power Button	Avvio dell'alimentazione (pressione singola) / Arresto (pressione lunga)
M/A Mode Switch Button	Attiva / disattiva modalità manuale / automatica (pressione singola).
Play/Pause Button	Riproduci / Pausa progetto (pressione singola)
Stop Button	Premere questo pulsante per interrompere qualsiasi progetto.
+ - Button	Regola la velocità del progetto (pressione singola) in modalità di esecuzione di prova manuale.

Power Indicator	Questo indicatore mostra lo stato di alimentazione del robot. Non acceso: spento Lampeggiante: avvio Costante: avvio completato
Mode Indicator Lights	Uno è la modalità manuale, l'altro è la modalità automatica. Mostrano la modalità operativa corrente del robot. Una volta completato l'avvio, solo uno sarà sempre attivo.
QR Code Label	Il contenuto dell'SSID è anche il nome del robot nella rete TCP/IP.

Techman TM Robot dispone nel suo catalogo 4 tipologie di Cobot suddivise in due macrogruppi in base al carico massimo che riescono a sopportare:

- Regular payload series
 - **TM5-700** può raggiungere una distanza di 700 mm e sopportare un carico utile di 6 kg, adatto per applicazioni ravvicinate che non richiedono carichi elevati.
 - **TM5-900** può raggiungere una distanza di 900 mm e sopportare un carico utile di 4 kg, adatto per applicazioni relativamente vicine con carichi molto bassi.
- Medium-Heavy payload series
 - **TM12** può raggiungere una distanza di 1300 mm e sopportare un carico utile di 12 kg, adatto per applicazioni che necessitano di un ampio spazio di lavoro e carichi relativamente elevati.
 - **TM14** può raggiungere una distanza di 1100 mm e sopportare un carico utile di 14 kg, a differenza del TM12 può raggiungere distanze minori ma sopporta carichi più elevati.

In generale si può dire che i TM5 (Regular payload series) sono più leggeri dei TM12 e TM14 (Medium-Heavy payload series) ma adatti solamente per applicazioni che non richiedono la movimentazione di pezzi pesanti o di raggiungere lunghe distanze. Per quanto riguarda la velocità raggiungibile entrambe le serie si aggirano sui 1.1 e 1.4 m/s. Invece se dobbiamo analizzare la ripetibilità delle azioni bisogna specificare che i TM5 sono molto più precisi (± 0.05 mm contro i ± 0.1 mm) della controparte. Di seguito è proposta la tabella con le caratteristiche dei vari modelli.

Model	TM5				TM12		TM14	
	TM5-700	TM5M-700	TM5-900	TM5M-900	TM12	TM12M	TM14	TM14M
Weight (kg)	22.1		22.6		33.3		32.6	
Max Payload (kg)	6		4		12		14	
Reach (mm)	700		900		1300		1100	
Max speed (m/s)	1.1		1.4		1.3		1.1	
Joint ranges	J1	±270°			±270°			
	J2, J4, J5	±180°			±180°			
	J3	±155°			±166°		±163°	
	J6	±270°			±270°			
Joint speeds	J1, J2	180°/s			120°/s			
	J3	180°/s			180°/s			
	J4, J5	225°/s			180°/s		150°/s	
	J6	225°/s			180°/s			
Repeatability (mm)	±0.05				±0.1			
IP (arm)	IP54							
Operating Temperature (°c)	0 to 50							
Power supply	100-240 VAC, 50-60 Hz	20-60 VDC	100-240 VAC, 50-60 Hz	20-60 VDC	100-240 VAC, 50-60 Hz	20-60 VDC	100-240 VAC, 50-60 Hz	20-60 VDC
Max power capacity (w)	1400	1500	1400	1500	2200	1500	2200	1500
I/O Ports	Control box/Tool							
	Digital in	16/4						
	Digital out	16/4						
	Analog in	2/1						
	Analog out	1/0						
I/O interface	3 X COM, 1 X HDMI, 3 X LAN, 4 X USB2.0, 2 X USB3.0							
Communication	3 X RS232, TCP/IP(Master), Modbus TCP/RTU (Master & Slave)							
Integrated Camera	5M pixels, color (AOI tasks: 5M; Others: 1.2M)							
I/O Power supply	24V 1.5A (Control box and Tool)							
Programming environment	TMFlow, flow chart based							
SEMI 52 certified	Yes, as an option							

Figura 7 Scheda tecnica TM robot

Di seguito vengono anche proposte le schede tecniche delle singole tipologie di robot della Omron; sono presenti sia le misure dei vari assi che le dimensioni dello spazio di lavoro.

TM5-700

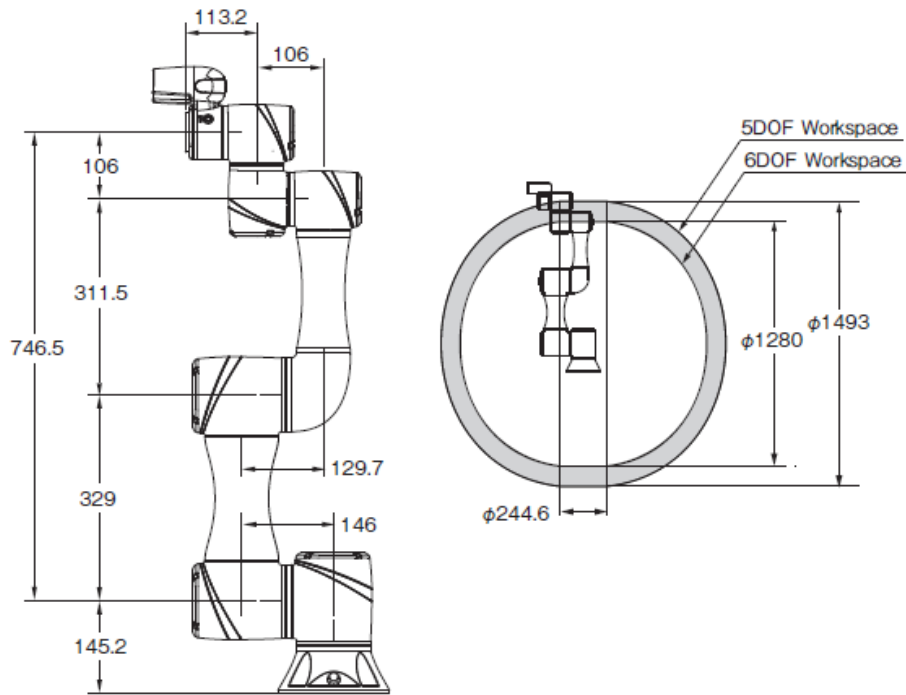


Figura 8 TM5-700

TM5-900

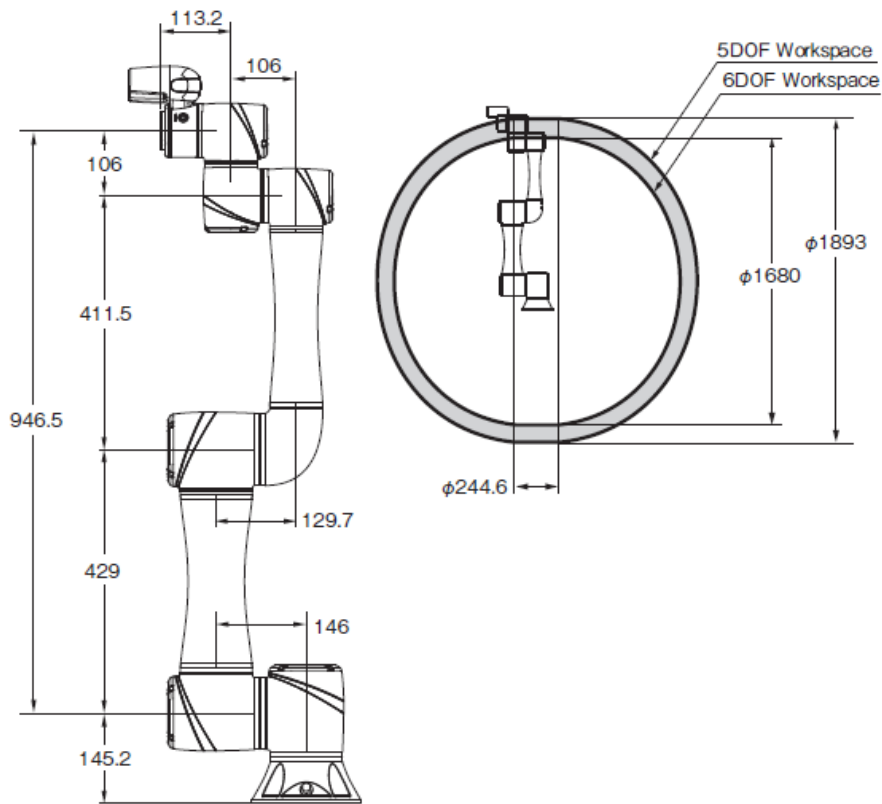


Figura 9 TM5-900

TM12

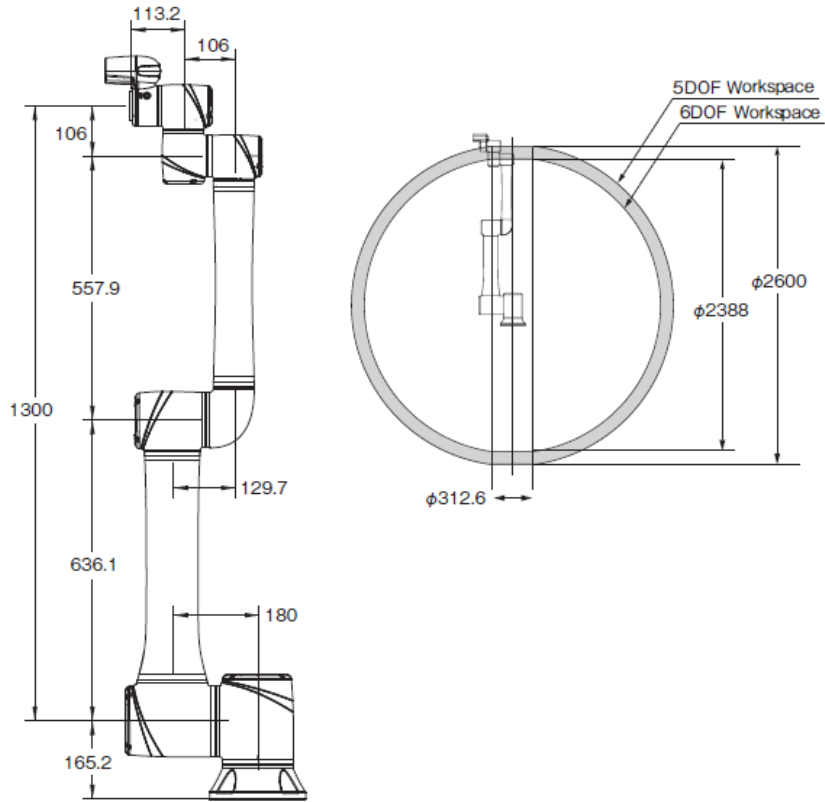


Figura 10 TM12

TM14

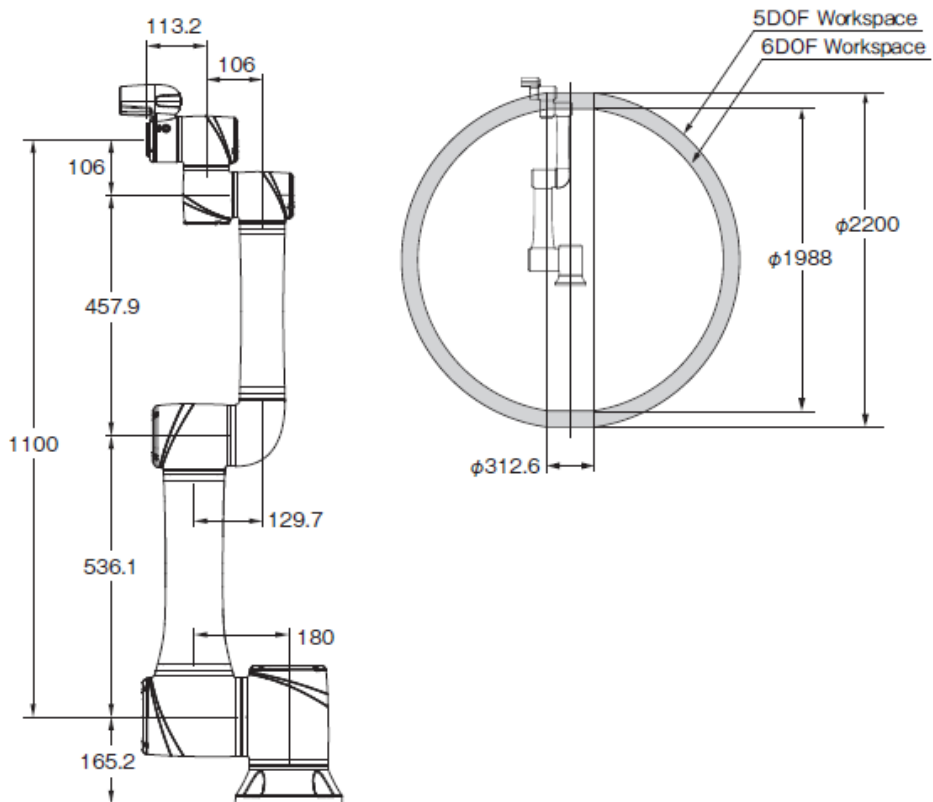


Figura 11 TM14

La struttura fisica dell'intero sistema oltre al robot comprende il case di controllo e tutta la rete di cavi di connessione. I componenti principali schematizzati nella figura sottostante sono i seguenti:

- teach pendant, o meglio uno schermo, dal quale è possibile programmare i movimenti del robot;
- controller in cui sono presenti la scheda ESD e tutti le porte per il collegamento dei cavi;
- TM robot fisico;
- cavetti di connessione.

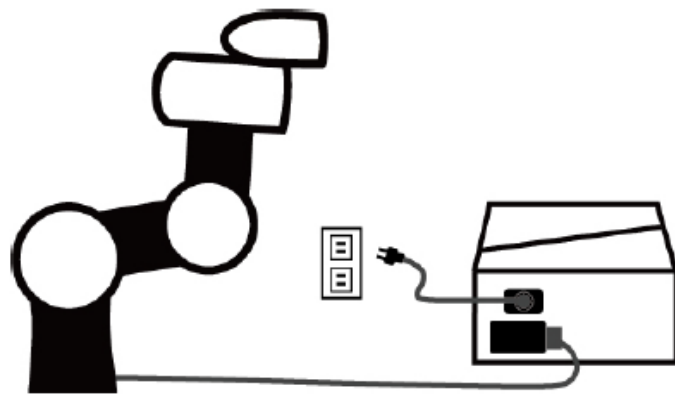


Figura 12, 13 Schema e immagine reale del sistema robot

Il controller del Cobot, un dispositivo hardware che serve ad interfacciare particolari tipi di dispositivi con la piastra madre, è mostrato nelle immagini sottostanti. È inoltre presente lo schema delle porte disponibili per i vari collegamenti.



Figura 14, 15, 16 Controller del robot

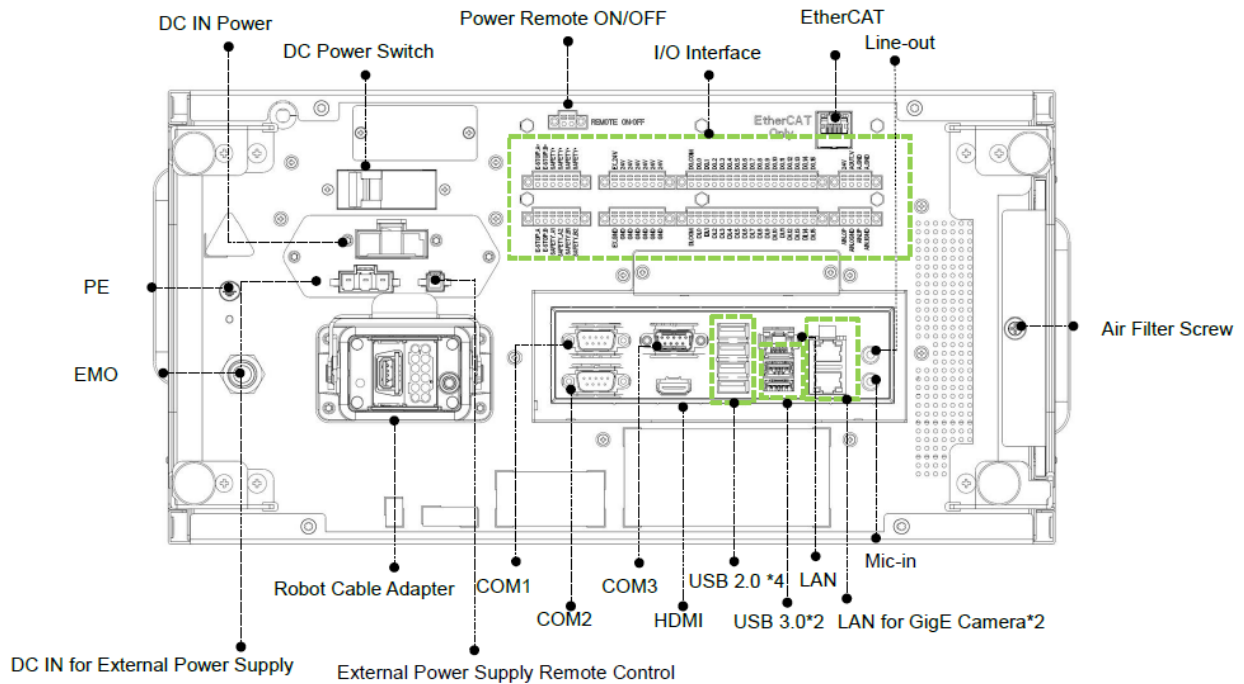
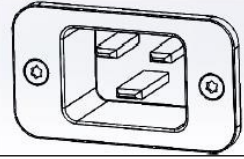
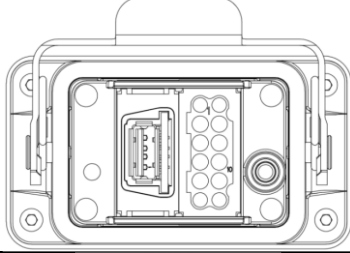
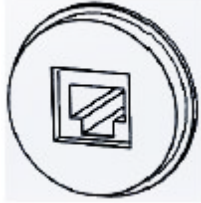



Figura 17 Schema collegamenti del controller

Per poter utilizzare il robot per prima cosa bisogna capire come montare i componenti. Bisogna collegare il teach pendant e il robot fisicamente al controller mediante i seguenti attacchi situati alla base del controller:

<p>Attacco IEC C20 per la connessione del sistema alla rete elettrica.</p>	
<p>Connettore per il collegamento del robot al sistema di controllo. (Da non scollegare mai durante il funzionamento del robot.)</p>	
<p>Collegamento per connessione ETHERNET utilizzata per i moduli di espansione I/O, per l'accesso e controllo a distanza (utilizzato nell'analisi per l'acquisizione dati)</p>	
<p>Ingresso HDMI per la connessione al controller del teach pendant.</p>	

4. OMRON TM5-900

Prendiamo come riferimento per l'analisi il Cobot TM5-900 che con le sue caratteristiche è molto adatto per operazioni di precisione in aree di lavoro ristrette. La limitazione rimane il carico che riesce a sorreggere, il quale non deve superare i 4 kg. La precisione di 0.5 mm gli permette di essere il robot perfetto per il Pick and Place di piccoli oggetti.

Il TM5 è un robot a sei assi in cui i primi tre costituiscono i gradi di libertà del braccio mentre gli ultimi tre del polso non sferico. Il braccio del Techman è costituito da tubi (con materiali come alluminio, plastica PP, acciaio) e giunti. I giunti sono indicati nella figura seguente con i loro nomi abituali. La Base è il supporto su cui è montato il robot, mentre all'altra estremità (Joint 6) è fissato l'utensile del robot (il punto centrale della flangia di collegamento sarà spesso indicato nel testo come tool o TCP). Coordinando il movimento di ciascuno dei giunti, il robot può muovere liberamente l'utensile.

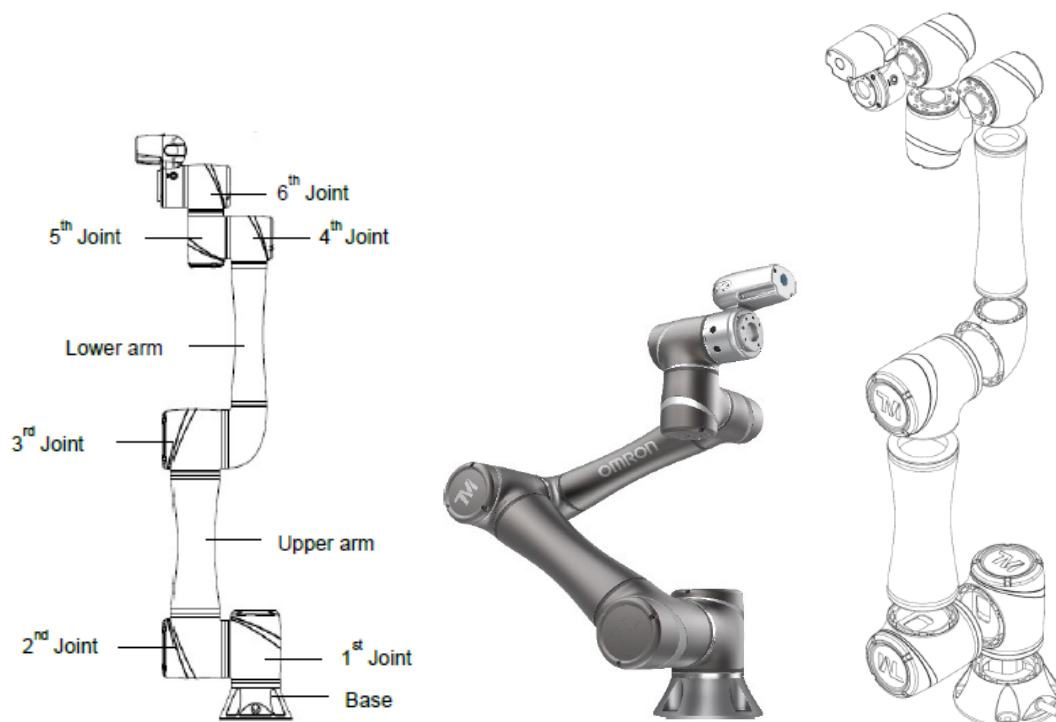


Figura 18 TM5-900

Il carico utile massimo consentito del braccio robot è correlato al suo offset del baricentro, che è definito come la distanza dal punto centrale della flangia dell'utensile al centro di gravità del carico utile. La figura seguente mostra la relazione tra il carico utile e lo scostamento del baricentro:

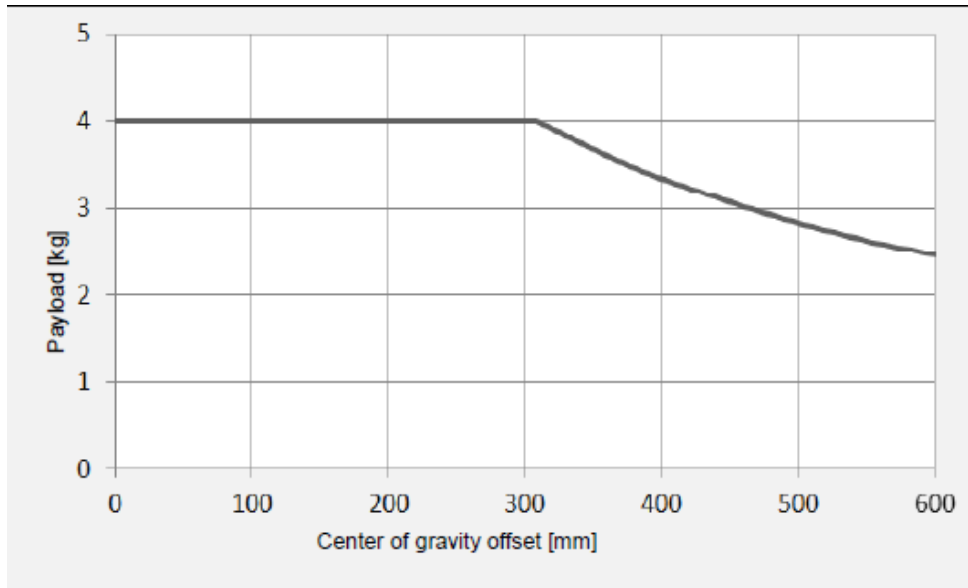
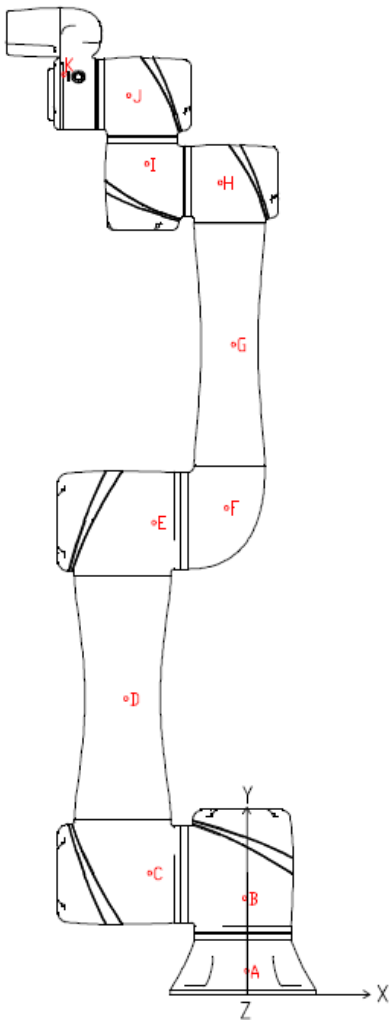


Figura 19 Grafico del massimo carico utile consentito

4.1. Centro di massa ed inerzia

Dal catalogo Omron del TM5-900 è possibile reperire i centri di massa dei vari elementi che compongono i robot e la relativa inerzia. Le parti vengono indicate con la lettere A...K e il sistema di riferimento pone l'asse y verticale alla base (il piano zx indica la base).



Elemento	Massa [kg]	Centro di massa [mm]
A	0.6	[0, 28, 0]
B	4.1	[-2.19, 113.0, 0]
C	4.1	[-114.67, 147.4, 0]
D	1.2	[-146, 359.7, 0]
E	4.1	[-114.67, 572.01, 0]
F	0.5	[-27.53, 590.96, 0]
G	0.6	[-16.3, 788.1, 0]
H	1.7	[-121.14, 1009.09, 0]
I	1.7	[-121.14, 1009.09, 0]
J	1.7	[-145.69, 1090.54, 0]
K	0.6	[-219.18, 1134.21, 0]

Figura 20 Schema TM5-900

Inerzia [kg mm²]

lxx	lxy	lxz
lyx	lyy	lyz
lzx	lzy	lzz

B [J1]		
9593.4943	1674.7216	0
1674.7216	8506.2275	0
0	0	10188.394

G [Arm2]		
7054.7526	0	0
0	772.22421	0
0	0	7053.1804

C [J2]		
8506.2275	1674.7216	0
1674.7216	9593.4943	0
0	0	10188.394

H [J4]		
1883.7782	132.08119	-0.550329
132.08119	3563.3795	-0.256964
-0.550329	-0.256964	3683.7027

D [Arm1]		
15659.064	0	0
0	2816.3752	0
0	0	15659.857

I [J5]		
3563.3795	132.08119	-0.256964
132.08119	1883.7782	-0.550329
-0.256964	-0.550329	3683.7027

E [J3]		
8506.2275	-1674.722	0
-1674.722	9593.4943	0
0	0	10188.394

J [J6]		
1883.7782	132.08119	-0.550329
132.08119	3563.3795	-0.256964
-0.550329	-0.256964	3683.7027

F [J-L]		
1128.7937	0	-104.3545
0	897.75049	0
-104.3545	0	824.42175

K [IO]		
1250.2703	275.89287	0
275.89287	727.85014	0
0	0	1508.8818

5. TELECAMERA 2D ROBOT

Il Cobot TM5 viene fornito con hardware di visione integrato e software di visione con interfaccia uomo macchina. Funzioni come la corrispondenza della forma, la lettura di codici a barre e QR, il riconoscimento del colore, l'OCR ecc. sono tutte facilmente configurabili dal toolbox di progettazione del robot.

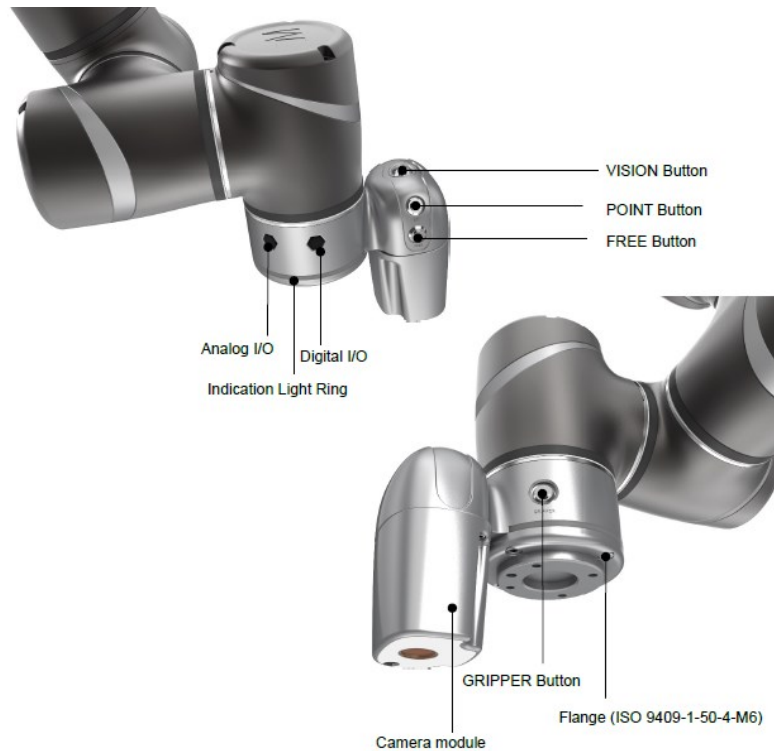
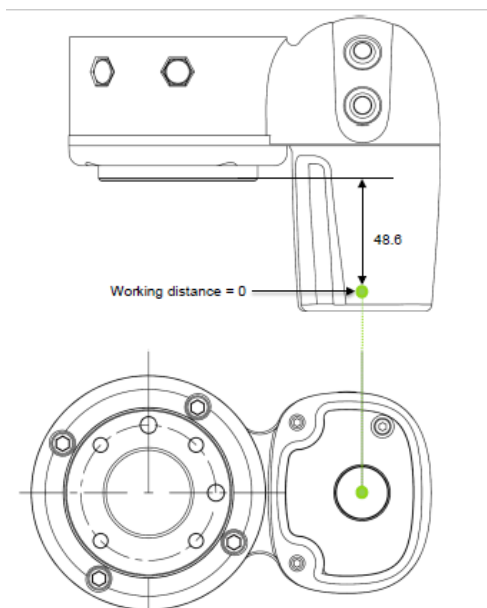


Figura 21 Sistema di visione TM5-900



Working distance (mm)	300	100
Field of view (mm)		
Width	281.8	96.9
Height	211.2	72.7

Figura 22 Schema camera 2D incorporata

Oltre la telecamera integrata è possibile acquistare separatamente il modulo di visione esterna (2D) per abilitare la connessione di TM Robot con telecamere esterne e implementare installazioni di visione avanzate, come le posizioni della telecamera Eye-to-Hand e Upward Looking. Oltre a ciò, è disponibile anche il modulo TM 3Dvision che aiuta il robot a eseguire il posizionamento su vari tipi di oggetti. Gli utenti possono anche utilizzare questo modulo per generare una nuvola di punti 3D, la quale può essere confrontata con un file CAD dell'oggetto per poter trovare una corrispondenza di somiglianza.

Per la calibrazione della telecamera 2D integrata nel robot si possono usare 2 piastre di calibrazione. La piastra grande ha dimensioni 40 cm x 30 cm ed è adatta per oggetti di medie/grandi dimensioni mentre la piastra piccola 25 cm x 15 cm e risulta molto precisa per distanze ravvicinate ed oggetti piccoli.

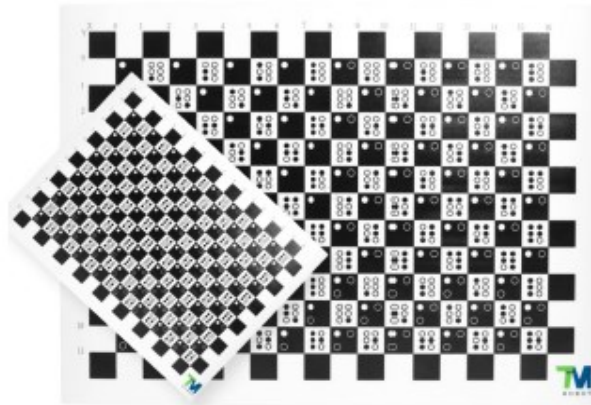


Figura 23 Sistema di calibrazione camera 2D

5.1 TMvision

TM Robot viene fornito con una telecamera 2D, un sistema di visione integrato che supporta il modello di posizionamento sulla base orientata agli oggetti o sulla base orientata all'allineamento del robot. Per il modello di posizionamento di base orientato agli oggetti gli utenti devono creare un'area di lavoro e assicurarsi che l'area di lavoro sia parallela all'oggetto. In caso contrario, si potrebbero verificare immagini distorte e errori di identificazione visiva. TMvision offre quattro metodi di posizionamento:

- TM Landmark
- Servoazionamento visivo
- Calibrazione basata su oggetti
- Punto fisso

5.1.1 TM Landmark

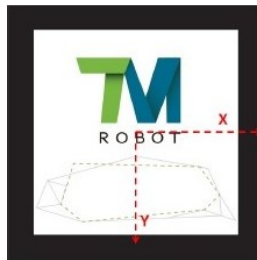


Figura 24 Landmark

TM Landmark è un piatto di plastica quadrato di 0.2 cm di spessore e lati di 5 cm come mostrato nella figura soprastante. La cattura del TM Landmark con TM Robot genererà le informazioni sulla posizione di sei gradi di libertà (X, Y, Z, RX, RY, RZ). Catturando e riconoscendo i bordi in bianco e nero e le caratteristiche grafiche centrali del TM Landmark tramite la fotocamera EIH del robot, il robot può creare il sistema di base al centro del bordo bianco e nero del Landmark. La precisione del posizionamento del punto di riferimento non è sufficiente per scopi di identificazione e allineamento; infatti, TM Landmark non è progettato per consentire agli utenti di far andare il robot direttamente sui singoli punti. È invece molto comodo per guidare il robot verso un punto visivo valido in cui verrà effettuato un nuovo rilevamento dell'oggetto. Questa limitazione è data dal fatto che TM Landmark genera un sistema di base con sei gradi di libertà e i dati nelle direzioni RX, RY e Z non sono facili da ottenere con precisione con la visione EIH 2D (ovvero i dati che permettono di capire se il piano della telecamera è parallelo all'oggetto e la distanza tra il piano della telecamera e l'oggetto).

5.1.2 Servoazionamento visivo

La funzione di servoassistenza serve agli utenti per definire le caratteristiche dell'oggetto. In ogni processo di servoassistenza, TMvision imposta automaticamente la posizione del robot in base all'oggetto definito per restituire la posizione della telecamera relativa all'oggetto.

5.1.3 Calibrazione basata su oggetti

Il principio della calibrazione basata su oggetti esegue la correzione dell'inclinazione senza l'uso della piastra di calibrazione per definire l'area di lavoro. Poiché la calibrazione viene utilizzata solo quando si definisce lo spazio di lavoro per la prima volta, il robot posizionerà il pezzo in lavorazione ai quattro angoli del campo visivo della telecamera per creare l'area di lavoro con quattro movimenti ed effettuare il calcolo del posizionamento a punto fisso con l'area di lavoro di conseguenza. Questo sfrutta la velocità di posizionamento fissa per il posizionamento e l'asservimento senza la piastra di calibrazione.

5.1.4 Posizionamento fisso

La funzione di posizionamento fisso è progettata per avere un'area di posizionamento degli oggetti preimpostata e un'altezza preimpostata per i lavori di visione. Gli utenti possono creare uno spazio di lavoro con la piastra di calibrazione TM. Quando si utilizza la piastra di calibrazione TM per l'allineamento a punto fisso, viene definita anche l'altezza relativa della telecamera dal piano di lavoro; inoltre bisogna assicurarsi che l'altezza assoluta della telecamera dall'oggetto sia uguale allo spazio di lavoro creato dalla piastra di calibrazione.

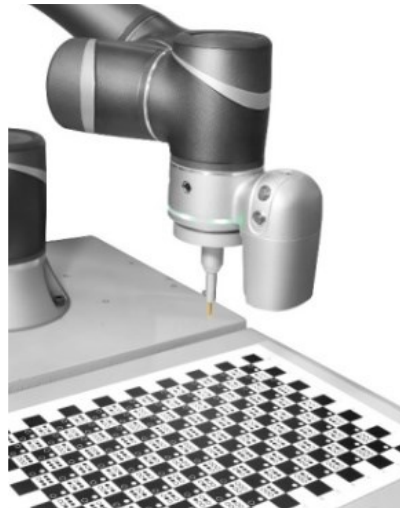


Figura 25 Calibrazione

Come mostrato nella figura seguente, per stabilire la relazione tra il movimento del robot e i componenti visivi, bisogna registrare il punto che si desidera raggiungere per effettuare la presa (P1) sul sistema di base della visione. Successivamente ci si potrà spostare rispetto il sistema di riferimento della base del robot per poter posizionare l'oggetto (P2).

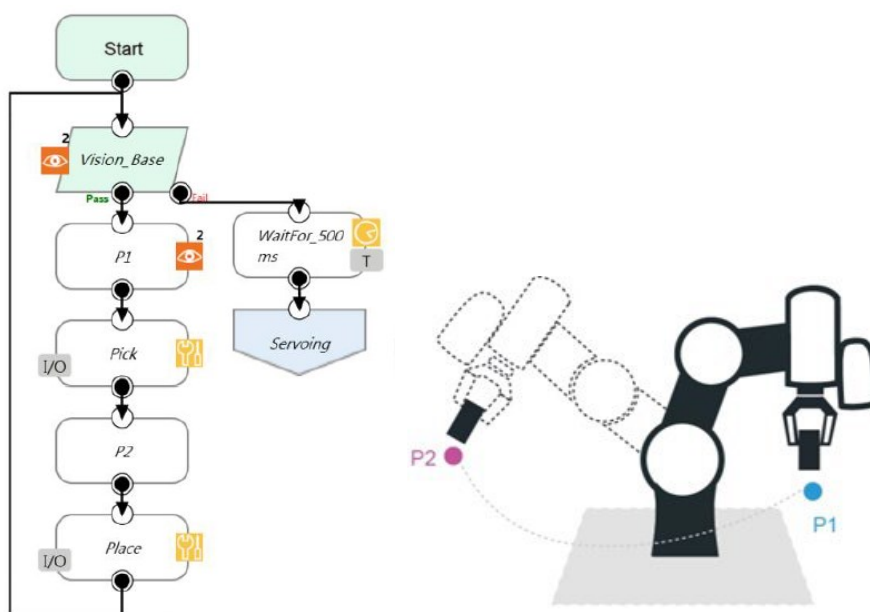







Figura 26 Il Flow di un Pick and Place

5.2 TM Robot Vision Designer

Questo sistema permette di utilizzare degli algoritmi per migliorare l'immagine, applicare dei filtri e identificare l'oggetto attraverso le funzioni di tre moduli: Migliora, trova e identifica.






5.2.1 Migliora

Il modulo di miglioramento delle immagini fornisce più funzioni per migliorare le caratteristiche dell'immagine e riuscire ad identificare meglio l'oggetto nello spazio di lavoro. Nella tabella sottostante vengono brevemente descritte le diverse funzionalità del modulo.

Funzioni	Descrizione
Contrast enhancement 	Regola il contrasto dell'immagine.
Color plane extraction 	Può ottenere colori specifici (come rosso, blu o verde) o saturazione.
Smoothing 	Quando la sorgente dell'immagine presenta disturbi, questo modulo può essere utilizzato per filtrare o eliminare il rumore e aumentare la risoluzione dell'immagine.
Thresholding 	Trasforma l'immagine grezza in una in bianco e nero.
Morphology 	Può erodere, dilatare, aggiustare o aprire l'immagine.




5.2.2 Trova

Il modulo di ricerca delle immagini "Find" fornisce più funzioni per ricercare l'oggetto all'interno dell'immagine, e di conseguenza dello spazio di lavoro, in base a caratteristiche di forma o colore. Viene inoltre fornita la possibilità di spostare le coordinate di riferimento dell'oggetto di una quantità prestabilita. Nella tabella sottostante vengono brevemente descritte le diverse funzionalità del modulo.

Funzioni	Descrizione
<p data-bbox="325 607 687 640">Pattern Matching (shape)</p> 	<p data-bbox="834 656 1342 770">Individua l'oggetto nell'immagine in base alle sue caratteristiche della forma.</p>
<p data-bbox="325 855 687 889">Pattern Matching (image)</p> 	<p data-bbox="834 904 1342 1019">Individua l'oggetto nell'immagine in base alle sue caratteristiche di distribuzione del valore dei pixel.</p>
<p data-bbox="339 1104 673 1137">Fiducial Mark Matching</p> 	<p data-bbox="820 1173 1356 1249">Usa due aree conosciute per allineare l'oggetto.</p>
<p data-bbox="304 1352 708 1386">Blob Detection / Blob Finder</p> 	<p data-bbox="829 1413 1347 1527">Identifica l'oggetto in primo piano in base alla differenza di colore tra l'oggetto e lo sfondo.</p>
<p data-bbox="453 1624 555 1657">Anchor</p> 	<p data-bbox="810 1671 1364 1785">Cambia le coordinate di riferimento dell'oggetto regolando manualmente il punto di ancoraggio.</p>

5.2.3 Identifica

Il modulo per l'identificazione fornisce due funzioni di base: codice a barre e identificazione del colore. Una volta identificato con successo viene fornito in output una stringa. Nella tabella sottostante vengono brevemente descritte le diverse funzionalità del modulo.

Funzioni	Descrizione
<p data-bbox="373 557 639 591">Barcode / QR code</p> 	<p data-bbox="890 620 1286 696">Legge il codice a barre, il 2D DataMatrix o il codice QR.</p>
<p data-bbox="402 792 611 826">Color classifier</p> 	<p data-bbox="927 884 1246 918">Classificatore di colori.</p>
<p data-bbox="413 1043 600 1077">String Match</p> 	<p data-bbox="908 1124 1265 1158">Comparatore di stringhe.</p>

6. BANCO DI LAVORO LAVAZZA

Il progetto del banco per l'erogazione delle capsule del caffè comprende una cella di sicurezza, un Cobot, 2 carrelli in cui andranno posizionate le cialde, una macchinetta del caffè e i sensori per testare la qualità del lotto di produzione. Come si può notare nell'immagine sottostante il robot è posizionato in una cella di sicurezza rialzata in modo da non interferire con l'operatore che dispone le capsule nei due carrelli. Per questa applicazione è stato scelto un robot collaborativo per la precisione necessaria a prendere e posizionare le capsule nel modo corretto; infatti, era richiesta una precisione di almeno 1 mm per poter prendere l'oggetto nella giusta angolazione e poi posizionarlo all'ingresso dell'erogatore senza danneggiare il materiale o bloccare il sistema. Oltre a ciò, può capitare nella fase di apertura e chiusura dei carrelli che l'operatore invada lo spazio di lavoro e sia necessaria una collaborazione in spazi stretti tra il robot e l'uomo. Per questa specifica applicazione è stato scelto il modello TM5-900 dell'Omron poiché era necessario uno sbraccio superiore a 700 mm e perché l'oggetto da movimentare aveva una massa molto ridotta. Il carico utile comprensivo di utensile e capsula è risultato molto inferiore al massimo consentito, non arrivando ad 1 kg.



Figura 27 Banco di lavoro Lavazza in costruzione

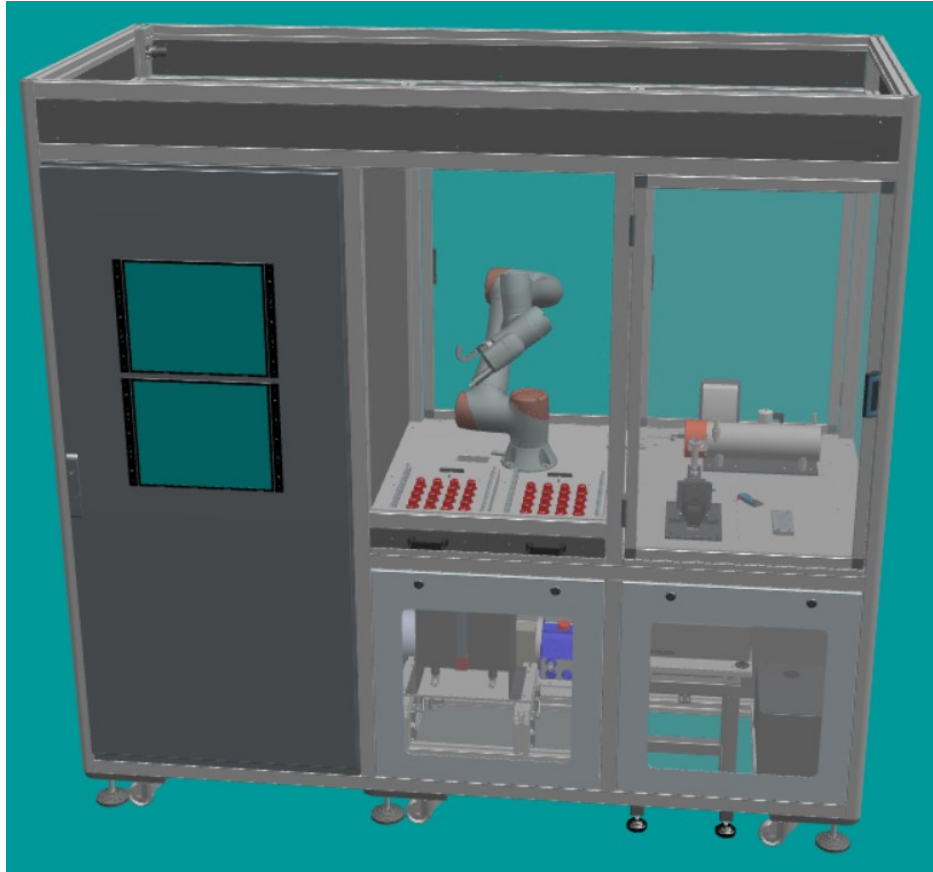


Figura 28 CAD banco di lavoro Lavazza

Le fasi principali per effettuare l'erogazione, non considerando le possibili soluzioni in caso di errore che devono essere implementate nel codice, sono descritte di seguito:

- Posizionamento del robot sul vassoio disponibile (viene inviato via Modbus un segnale pari a 0 non disponibile e 1 disponibile relativi al carrello destro o sinistro)
- Foto 2D per individuare la presenza ed il posizionamento delle capsule
- Presa della prima capsula disponibile
- Apertura (se necessario) dello sportello della macchinetta del caffè
- Posizionamento della capsula nel foro della macchinetta (attraverso il Touch Stop che calcola la forza impiegata dal tool in base alla coppia applicata dai giunti si individua se il posizionamento sta avvenendo correttamente o se si sta utilizzando troppa forza)
- Chiusura sportello della macchinetta
- Proseguimento delle varie operazioni sulla seconda capsula o posizionamento per la foto sul prossimo vassoio disponibile

Tutte le varie movimentazioni devono essere eseguite in sicurezza e rispettando i tempi necessari all'erogazione, i quali vanno da 30 secondi ad anche 1 minuto a seconda della tipologia di capsula analizzata.

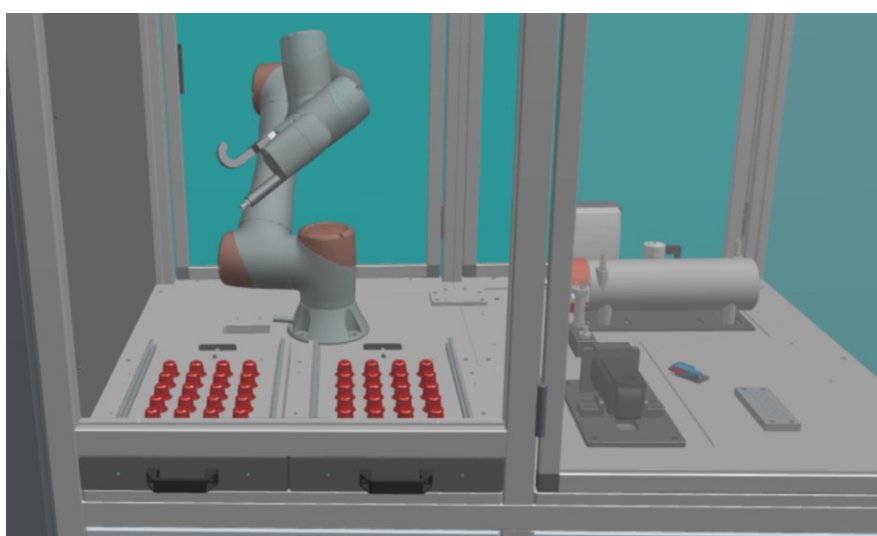
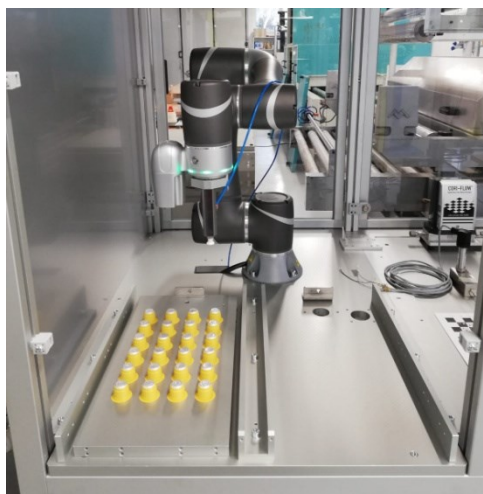


Figura 29, 30, 31 Dettagli del banco di lavoro Lavazza

7. TOOL DEL ROBOT

Il tool del robot è stato progettato per poter eseguire diversi compiti, tra cui la presa, la chiusura e l'apertura del gruppo di erogazione. Oltre al tool in questione era già presente sul polso del robot la telecamera 2D incorporata; inoltre è stata inserita successivamente una telecamera 3D per poter identificare l'inclinazione della capsula all'interno dell'erogatore e capire se l'inserimento è avvenuto correttamente. Può infatti capitare che la capsula venga inserita con un'inclinazione troppo elevata non permettendo la corretta chiusura dell'erogatore.; se così fosse viene inviato un segnale digitale al robot che provvede dando un colpetto alla capsula aggiustandone il posizionamento.

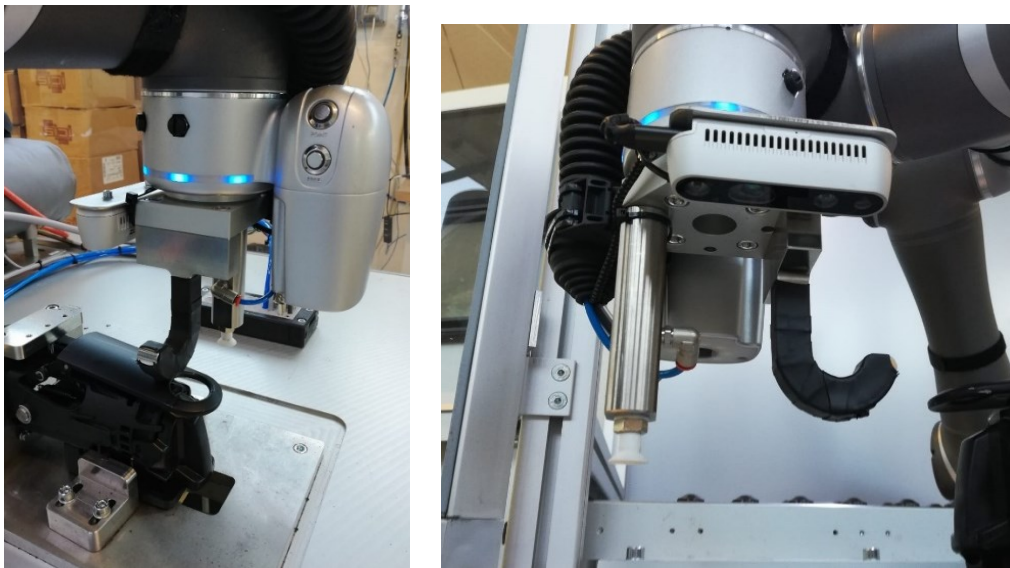


Figura 32, 33 Tool del robot

Nel programma del robot sono stati inseriti due TCP per poter gestire con precisione i movimenti del robot: l'estremo della ventosa e il punto più basso del gancio. I valori inseriti vengono considerati rispetto la convenzione utilizzata dal programma del robot, ovvero quella mostrata nell'immagine sottostante.

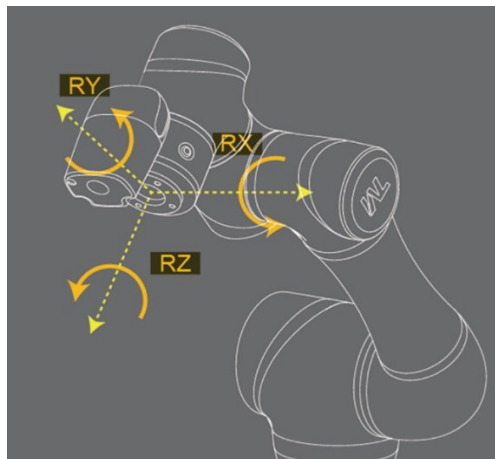


Figura 34 Convenzione sistema di riferimento del tool

7.1 Tool Ventosa

Per la ventosa sono stati inseriti i valori mostrati nell'immagine sottostante. I più importanti sono le coordinate dell'estremo della ventosa rispetto il sistema di riferimento mostrato in precedenza. Nel nostro caso risultano essere poco influenti i valori dell'inerzia e della massa dato che abbiamo a che fare con elementi relativamente leggeri. Il valore totale della massa, pari a 0.9 kg, considera la presenza di tutti i dispositivi terminali compresa la telecamera 3D ed il gancio. Per avere una maggior precisione durante i movimenti vengono comunque inseriti i valori del centro di massa e dell'inerzia.

Manual Input TCP Values Current File: ToolVentosa

X(mm):	<input type="text" value="31"/>	Y(mm):	<input type="text" value="0"/>	Z(mm):	<input type="text" value="122"/>
RX(deg):	<input type="text" value="0"/>	RY(deg):	<input type="text" value="0"/>	RZ(deg):	<input type="text" value="0"/>
Mass (kg):	<input type="text" value="0.9"/>				

Principal Moments of Inertia

lxx:	<input type="text" value="1000"/>	lyy:	<input type="text" value="1000"/>	lzz:	<input type="text" value="1000"/>
------	-----------------------------------	------	-----------------------------------	------	-----------------------------------

Mass center frame with principle axes w.r.t tool frame

X(mm):	<input type="text" value="-3.77"/>	Y(mm):	<input type="text" value="0.01"/>	Z(mm):	<input type="text" value="48.40"/>
RX(deg):	<input type="text" value="0"/>	RY(deg):	<input type="text" value="0"/>	RZ(deg):	<input type="text" value="0"/>

Figura 35 Valori relativi al tool ventosa

7.2 Tool Gancio

Per il gancio sono stati inseriti i valori mostrati nell'immagine sottostante.

Manual Input TCP Values Current File: ToolGancio

X(mm):	<input type="text" value="-54.5"/>	Y(mm):	<input type="text" value="0"/>	Z(mm):	<input type="text" value="102"/>
RX(deg):	<input type="text" value="0"/>	RY(deg):	<input type="text" value="0"/>	RZ(deg):	<input type="text" value="0"/>
Mass (kg):	<input type="text" value="0.9"/>				

Principal Moments of Inertia

lxx:	<input type="text" value="1000"/>	lyy:	<input type="text" value="1000"/>	lzz:	<input type="text" value="1000"/>
------	-----------------------------------	------	-----------------------------------	------	-----------------------------------

Mass center frame with principle axes w.r.t tool frame

X(mm):	<input type="text" value="-3.77"/>	Y(mm):	<input type="text" value="0.01"/>	Z(mm):	<input type="text" value="48.40"/>
RX(deg):	<input type="text" value="0"/>	RY(deg):	<input type="text" value="0"/>	RZ(deg):	<input type="text" value="0"/>

Figura 36 Valori relativi al tool gancio

8. CONFIGURAZIONI E PROBLEMATICHE DI PROGETTO

La realizzazione del banco di lavoro per la presa ed erogazione delle capsule ha presentato vari problemi sia dal punto di vista logistico che della programmazione. Tra le varie analisi che si sono dovute affrontare spicca tra tutte quella per trovare la migliore configurazione da far eseguire al Cobot per effettuare una presa precisa ed in sicurezza. Il problema principale è stato non danneggiare le altre capsule ancora presenti sul vassoio e non urtare le varie pareti della cella di lavoro, oltre ad eseguire un posizionamento preciso sulla macchinetta durante l'erogazione. Vengono di seguito proposti i principali punti in cui è stato necessario effettuare un'analisi delle configurazioni.

8.1. Chiusura

Per quanto riguarda la chiusura dello sportello per l'erogazione è stato creato un percorso apposito che tenesse conto dell'ingombro dei vari elementi, della sicurezza e dei tempi. Effettuare questo movimento è fondamentale per l'intero processo in quanto permette non solo di effettuare l'erogazione, serrando la capsula all'interno della macchinetta del caffè e di conseguenza consentendo all'acqua calda di scorrere dentro, ma anche di andare a temperatura. Solamente quando l'acqua sarà arrivata ad una temperatura di 98/99 °C si potrà procedere con l'erogazione; ciò è possibile solamente con lo sportelletto chiuso. Il fatto che durante il riscaldamento rimanga una capsula inserita non è un problema rilevante purché il processo di erogazione si sia concluso e la capsula non sia più utilizzabile (ciò viene determinato dai vari sensori di presenza e flussimetri). Per il percorso di chiusura si scelto di prendere come riferimento una serie di punti in modo da effettuare un movimento dolce ed efficace. Il primo punto è stato preso circa 20 centimetri sopra il foro di ingresso poiché bisognava uscire dal movimento precedente di introduzione della capsula e scavalcare lo sportello. Successivamente il robot si sposta in un target posizionato in alto dietro la macchinetta per poi abbassarsi e mettersi nella posizione esatta per poter effettuare la chiusura. Essa viene eseguita con il gancio posto sul tool girato in modo da avere la parte piatta della punta a contatto con lo sportello. Questi movimenti sono stati eseguiti linearmente con un po' di blending per addolcirli e visualizzare un movimento meno preciso ma più fluido; invece, i successivi movimenti necessitavano una precisione di almeno 5 mm per poter chiudere in maniera corretta lo sportello ed evitare una riapertura improvvisa (dovuta ad una molla presente per facilitare l'apertura). Infine, il robot pressa lo sportello verso il basso di 5 mm per forzare la chiusura ed avere un'ulteriore sicurezza e successivamente si alza per raggiungere una posizione intermedia per i passaggi successivi che sia sufficientemente distante dagli ingombri.

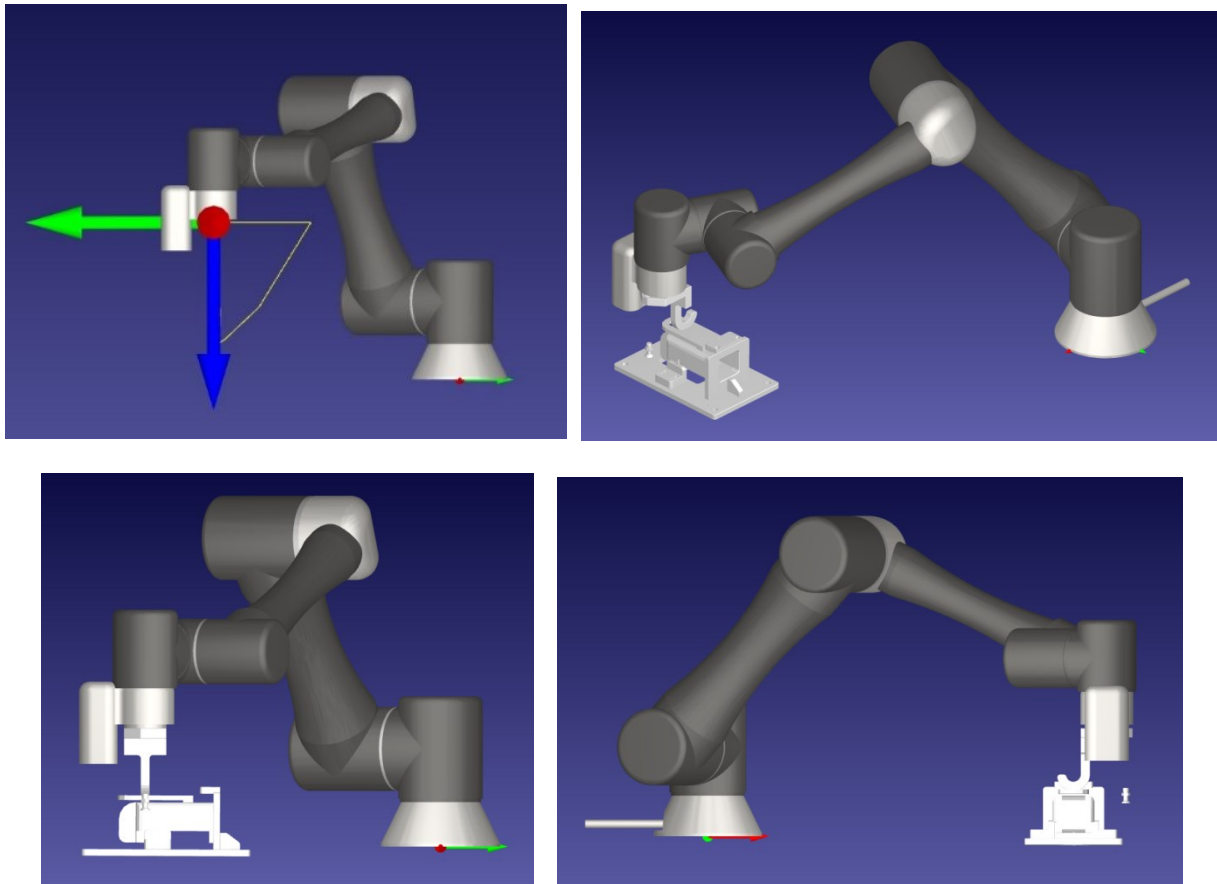


Figura 37, 38, 39, 40 Configurazione utilizzata per la chiusura

La vera e propria chiusura, derivante dalla linea che congiunge il punto di inizio contatto con la piastra e quello di totale abbassamento della suddetta, necessita di un ulteriore controllo di sicurezza per evitare di rompere il meccanismo in caso di un blocco istantaneo dovuto ad esempio alla capsula che potrebbe essere stata posizionata male e causare un inceppamento. Per evitare che questo accada è stata utilizzata l'opzione Touch Stop; essa consente di visualizzare la forza agente sul tool e più precisamente sul gancio. Prima di tutto è stato necessario inserire manualmente le misure dell'utensile da noi utilizzato e il centro di massa riferito al sistema di riferimento opportuno (con asse z coassiale al giunto 6). Per misurare la forza non sono necessari sensori (di solito si inserisce un anello nei giunti) poiché il Cobot ha integrato all'interno un sistema che tramite Modbus passa al software i valori di forza e velocità sia dei singoli giunti che direttamente del tool. Il robot riesce a ricavare tale valore dalla coppia fornita ai giunti per eseguire il movimento; la quale sarà maggiore o minore a seconda del fatto che esso stia utilizzando più o meno forza di quella prevista. Questo metodo permette di determinare tutte le componenti del vettore forza fornendo F_x , F_y , F_z e il modulo F_{3D} . Una volta ricavati questi valori si ha modo, tramite il Touch Stop, di bloccare il movimento nel caso si stia superando un determinato valore, risultato essere dopo numerose prove di circa 45/50 N. Si è notato che il modulo della forza (chiamato F_{3D}) per chiudere lo sportello è pari a 9 N se non è presente la capsula e circa 30/35 N se invece è inserita. Nel caso di inceppamento sale

vertiginosamente verso i 150/200 N e ciò causa un blocco forzato del robot, che necessita di una procedura di ripristino e soprattutto potrebbe danneggiare i componenti della macchinetta del caffè. Tutto questo viene evitato proprio grazie al controllo della forza e la seguente gestione degli errori, appositamente creata per ripristinare in modo efficace il processo (in questo caso si effettua un movimento verso l'alto per uscire dall'ingombro).

Grazie a questo metodo è anche possibile determinare la forza massima utilizzata per chiudere lo sportello ad ogni capsula inserita, permettendo di effettuare un confronto tra le varie capsule ed individuando ad esempio un eventuale errore nella produzione dell'elemento. Si può infatti distinguere tra due casi:

- La capsula si è bloccata perché non è stata inserita correttamente
- La capsula si è bloccata perché il suo profilo non è conforme alle specifiche

Tale differenza è confermata da una foto che viene effettuata subito dopo l'erogazione e, in caso di blocco, controllata dall'operatore per determinare la causa. Nell'ultimo caso proposto ovviamente va controllato l'intero lotto per individuare difetti di produzione. Il controllo potrebbe anche essere effettuato in automatico da un programma, individuando la posizione esatta della capsula; purtroppo, la casistica è troppo ampia e non permetterebbe di identificare in maniera esatta l'errore rendendo necessario l'intervento dell'operatore.

Nella foto sottostante è mostrato un blocco dovuto ad un inserimento non corretto. Tale evento si può verificare nel caso in cui la capsula non sia stata presa dalla ventosa nel punto previsto; ad esempio, ciò può avvenire se essa è saltata fuori dal foro in cui è collocata durante il pick o se il vuoto creato dalla ventosa non è stato sufficiente causandone uno scivolamento. Un'altra possibilità potrebbe essere dovuta al robot; nel caso in cui la matrice di inerzia del tool inserita nel programma non sia corretta il Cobot durante un movimento ad alta velocità potrebbe fermarsi leggermente dopo il punto stabilito causando delle problematiche. Ovviamente quest'ultima eventualità non può verificarsi essendo stato inserito ogni dato con precisione millimetrica. In generale per come sono state strutturate la presa e il posizionamento nell'erogatore questa tipologia di bloccaggio è molto rara e difficilmente verificabile. Un ultimo caso possibile è quello in cui il rilascio della capsula non sia avvenuto tempestivamente nel punto considerato ma, ad esempio, poco dopo la risalita. Questo evento è più probabile poiché non dipende direttamente dal robot ma più che altro dai sensori esterni inseriti e dai segnali che vengono inviati. Se l'errore persiste e non è casuale va assolutamente effettuato un controllo.



Figura 41 Problematica di chiusura

Nelle foto sottostanti è mostrato un caso di corretto posizionamento della capsula. Esso presuppone che il blocco dello sportello sia avvenuto per cause geometriche di forma e finitura superficiale; se esso si verifica l'intero lotto di produzione va analizzato per verificare se l'eventuale errore di produzione sia sistematico o casuale. Ovviamente per essere rilevante tale tipologia di bloccaggio deve ripetersi con percentuale alta per l'intero lotto di produzione.

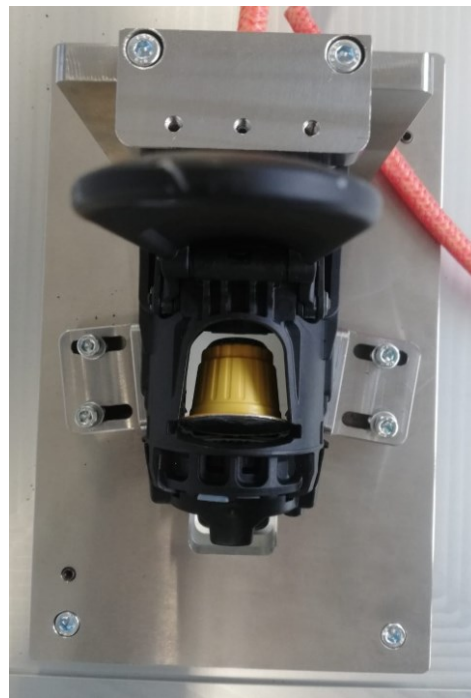


Figura 42, 43 Capsula inserita correttamente

Vengono visualizzati nell'immagine seguente i vari punti del processo di chiusura e il percorso eseguito dal robot, rappresentato dalla linea gialla e con punto di inizio il target 1 in alto a sinistra.

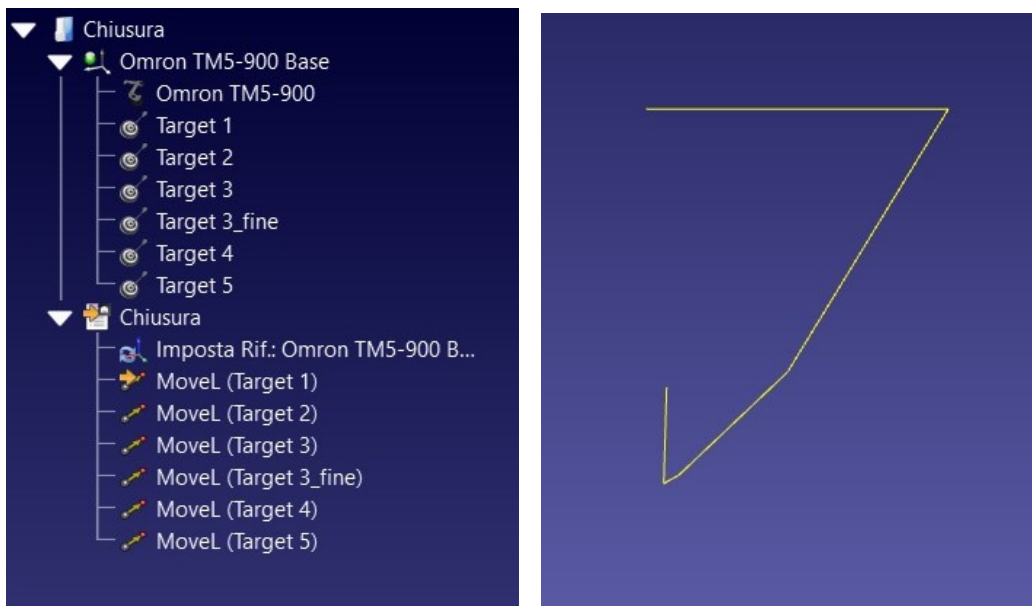


Figura 44, 45 Percorso per la chiusura

In generale per poter scegliere la migliore configurazione del robot che sarà utilizzata per la chiusura vengono studiati tutti i possibili posizionamenti dei giunti. Le rappresentazioni possibili risultano essere a volte molto numerose ma in quel caso alcune sono una ripetizione delle precedenti essendo semplicemente un giunto ruotato di 360° rispetto la principale. L'Id mostrato nella tabella sottostante assume valori da 0 a 7 e permette di identificare solo quelle che si differenziano per la posizione dei giunti nello spazio visualizzando se il robot è posizionato sopra, sotto, avanti o dietro il punto e se con Flip o senza.

Nel caso riguardante la chiusura, prendendo come riferimento il punto finale a contatto con la macchinetta, le configurazioni possibili sono 4, ma solamente una può essere implementata.

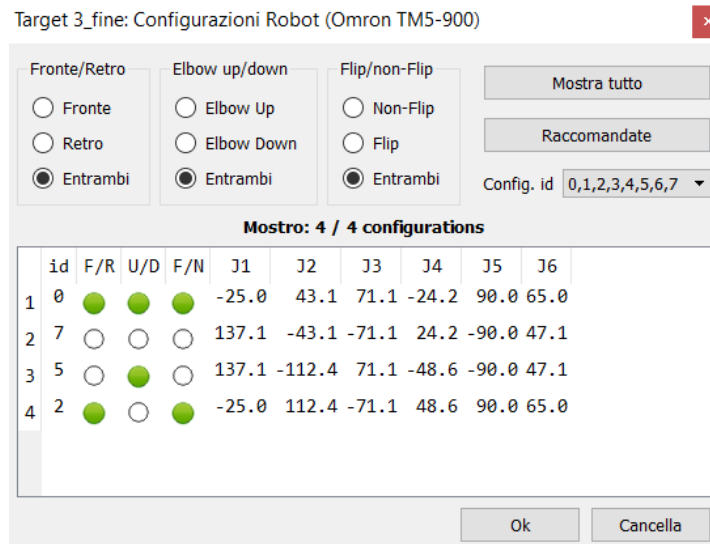


Figura 46 Configurazioni possibili per la chiusura

Dalla tabella le configurazioni con id 1, 3, 4, 6 non sono presenti e quindi raggiungibili dal robot. Si può notare come i 4 posizionamenti possibili sono divisi da due piani di simmetria; rispetto alla retta che congiunge la base del robot al punto preso come riferimento un piano è orizzontale e l'altro verticale.

Configurazione 0

Risulta essere la migliore tra le varie che verranno proposte sia in termini di efficacia del movimento che di ingombro; evita infatti di sbattere nelle varie pareti (il robot è posizionato in una cella rettangolare) e sulla macchinetta. Il robot è correttamente posizionato per poter raggiungere con facilità i punti nei quali effettuerà il movimento di pick per andare a prendere la capsula successiva. Un altro aspetto fondamentale da considerare è che da questa posizione non sono necessari punti intermedi per assestare i giunti del robot dato che è già pronto per l'operazione successiva; tale punto poteva risultare obbligatorio nel caso in cui il Cobot, nel tentativo di raggiungere il target, effettuava un qualche movimento particolare andando a collidere con le pareti o addirittura con se stesso.

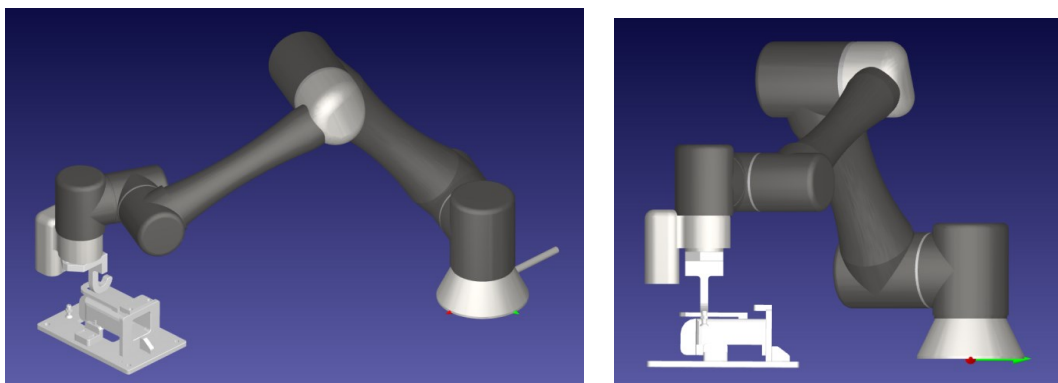


Figura 47, 48 Configurazione 0 per la chiusura

Configurazione 2

Non può essere presa come configurazione di progetto poiché il 3° giunto andrebbe a collidere con la parete sottostante il robot. Oltre a ciò, supponendo che esista un eventuale foro, il robot farebbe molta difficoltà nell'uscire da questa configurazione muovendosi verso l'alto principalmente per due motivi:

- La coppia fornita ai giunti per effettuare il movimento sarebbe molto alta, tenderebbe ad aumentare mentre il robot si alza e soprattutto tenderebbe all'infinito nel momento in cui si raggiunge la singolarità, ovvero tutti i bracci sono allineati. Supponendo che si riesca a raggiungere questa configurazione non si potrebbe procedere ulteriormente poiché il robot gestisce la singolarità come un errore e si ferma istantaneamente; per sbloccarlo è necessario muoverlo manualmente.
- Effettuando dei movimenti senza passare per la singolarità si rischia di dover effettuare un percorso articolato in cui il robot gira su se stesso ed utilizza una grande porzione dello spazio di lavoro disponibile. Ciò ovviamente non è possibile poiché il robot è posizionato in una cella contenente oltre al gruppo di erogazione vari sensori e un riscaldatore che non devono assolutamente essere urtati.

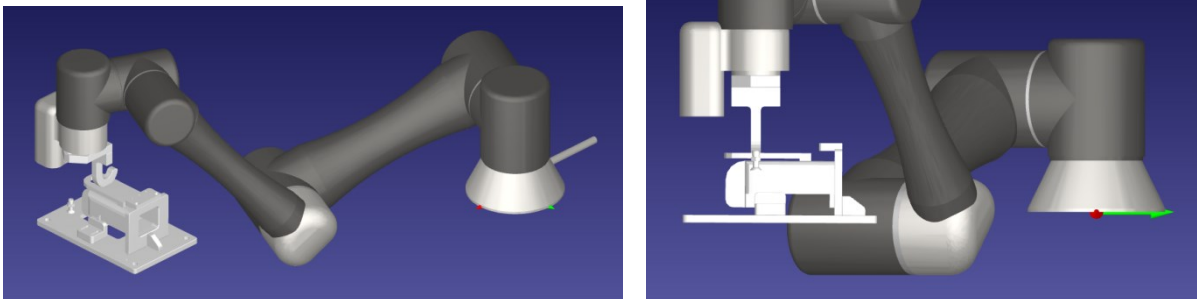


Figura 49, 50 Configurazione 2 per la chiusura

Configurazione 5

Ugualmente alla 3, la configurazione con id 5 andrebbe ad urtare la pavimentazione sottostante il robot e non può essere implementata nel progetto.

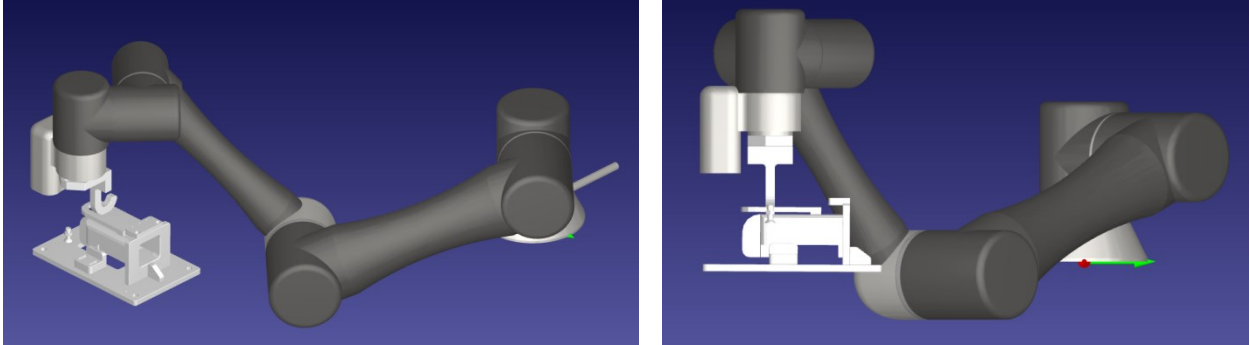


Figura 51, 52 Configurazione 5 per la chiusura

Configurazione 7

La configurazione 7, come la 0, andrebbe bene per il processo di chiusura perché non andrebbe a sbattere con nessun componente o parete. Il difetto di questo posizionamento sta nel fatto che il giunto 1 è ruotato di 180° e ciò va in conflitto con i movimenti precedenti.

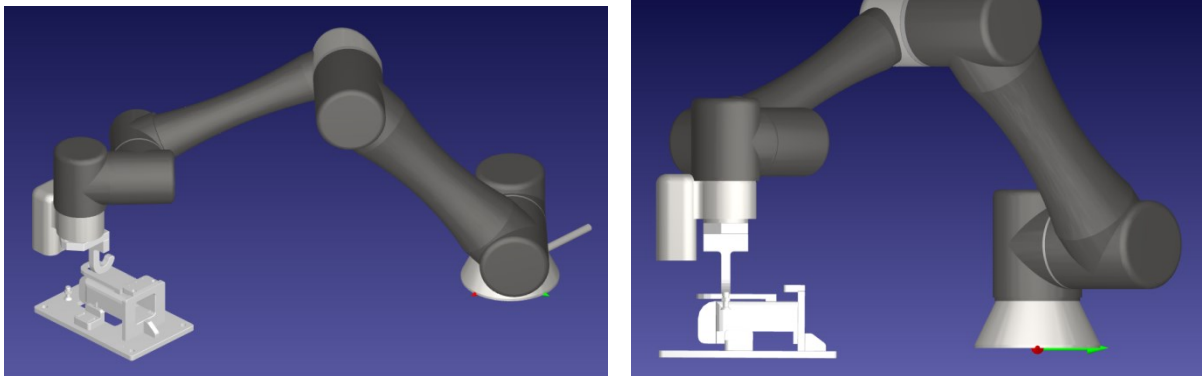


Figura 53, 54 Configurazione 7 per la chiusura

8.2. Apertura

Per l'apertura si è scelto di utilizzare il gancio del tool per compiere un movimento circolare ed aprire lo sportello del gruppo erogazione. Essa andrà fatta quasi sempre con una capsula agganciata alla ventosa, in quanto solamente dopo aver effettuato una nuova presa ci si dirige verso la macchina del caffè per aprirla e poi inserire la capsula. Si sarebbe potuta effettuare l'apertura anche dopo la chiusura senza prima andare a prendere una nuova capsula ma sarebbero sorte alcune problematiche, tra cui la più importante è quella riguardante la temperatura dell'acqua. Come detto per la chiusura è necessario che prima dell'erogazione l'acqua sia arrivata ad una temperatura alta, e ciò può avvenire solo con lo sportello chiuso. Se tra l'apertura e l'erogazione successiva si andasse ad effettuare una nuova presa si rischierebbe un raffreddamento, in quanto questo passaggio impiega circa 10/15 secondi, e di conseguenza una nuova attesa e dei rallentamenti. Invece andando prima a prendere una nuova capsula, con lo sportello chiuso, e successivamente ad aprire con la capsula agganciata alla ventosa non si rischierebbe questo raffreddamento di temperatura essendo i passaggi consecutivi.

Dopo un nuovo pick, per dirigersi verso l'apertura, è stato necessario inserire dei punti di passaggio intermedi in modo da non far cadere la capsula che è agganciata sulla ventosa o urtare le pareti. Il punto di passaggio è stato salvato con l'impostazione PTP; ovvero il target sarà raggiunto con una posizione dei giunti ben precisa evitando che la configurazione cambi durante il passaggio. Lo svantaggio sta nel fatto che il robot, per raggiungere il punto, sceglierà il percorso secondo lui più adatto, senza procedere linearmente. Ciò implica che, se la posizione di inizio movimento è molto lontana, il Cobot effettuerà un movimento circolare rischiando di collidere con le pareti o con gli oggetti del banco di lavoro. Per evitare questo problema si sono scelti più punti intermedi non molto distanti tra loro e soprattutto raggiungibili sia dal primo che dal secondo vassoio.

Una volta posizionato il gancio sopra la macchinetta è stato creato un percorso apposito in cui inizialmente ci si abbassa in un punto davanti la macchinetta facendo attenzione a non urtare la vetrata né con il robot né con la capsula. In questo punto si deve aspettare (Con uno Wait nel programma) un segnale che sarà inviato via Modbus, il quale indicherà il momento in cui i sensori rileveranno una temperatura dell'acqua accettabile. Se il segnale manderà un 1 si potrà proseguire con i movimenti poiché l'acqua sarà calda e pronta per una nuova erogazione.

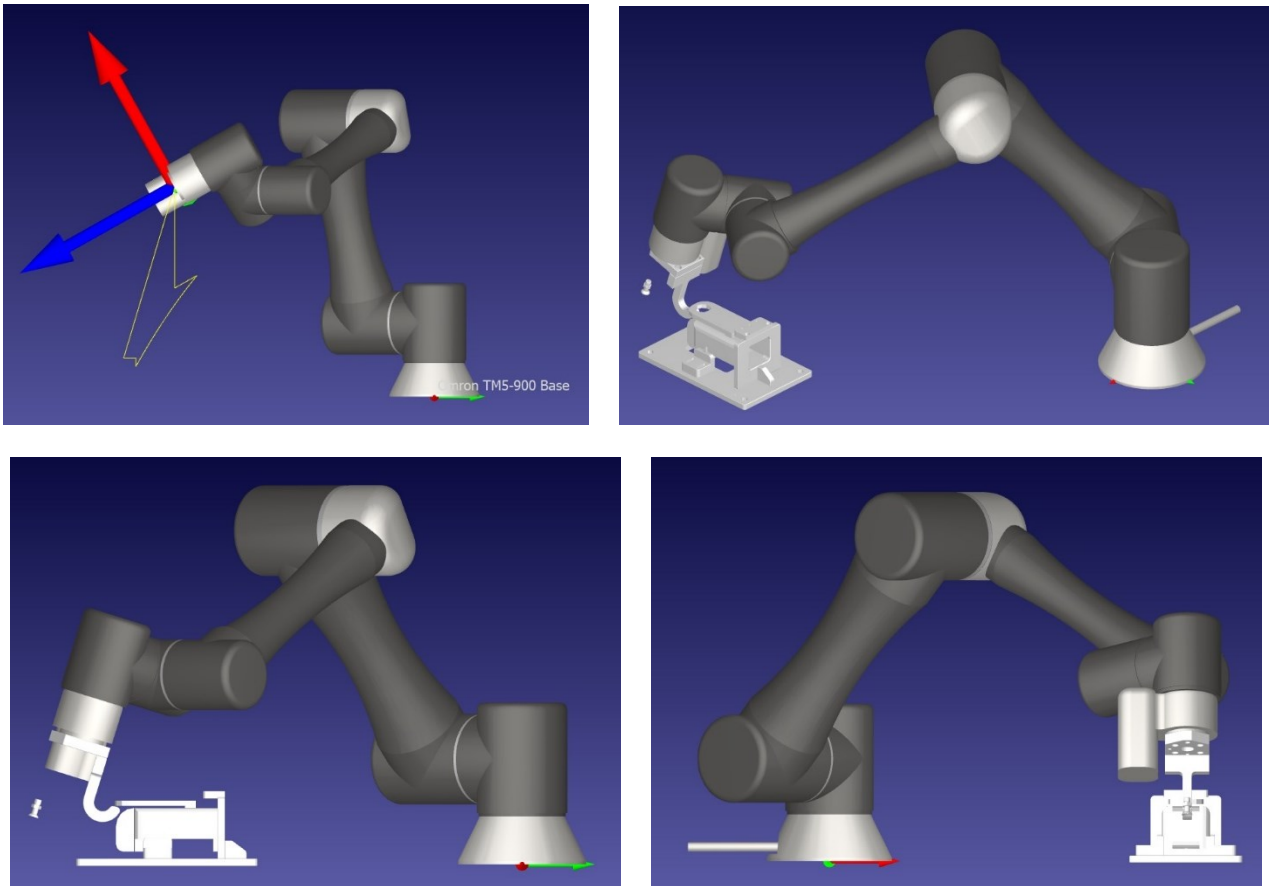


Figura 55, 56, 57, 58 Configurazione utilizzata per l'apertura

A questo punto il robot si collocherà sul target 2, molto vicino alla macchinetta, per poi ruotare e contemporaneamente scendere di qualche millimetro. Ci si trova ora nel punto 3 e il gancio è perfettamente inclinato per iniziare il movimento circolare. Tutti questi piccoli movimenti devono essere effettuati linearmente e con velocità ridotta non solo per evitare collisioni, ma soprattutto per non perdere la capsula. Da qui si può fare un movimento circolare di quasi 90° in modo da raggiungere il punto 4 di fine apertura, in cui il gancio è inserito nel foro appositamente creato.

Per evitare eventuali inceppamenti si è inserito un thread a parte in cui, una volta raggiunto il punto 3, parte un controllo della forza attraverso il Touch Stop. Esso è stato programmato per fermare il processo nel caso in cui sul tool la forza superi il valore di 45 N. Questo valore è stato ricavato con una serie di prove nelle quali si è visto che, per aprire lo sportello, è necessario applicare una forza di 30 N se è presente una capsula all'interno. Per rimanere in sicurezza si è scelto un valore abbastanza superiore a quello trovato ma che non causasse la rottura del meccanismo.

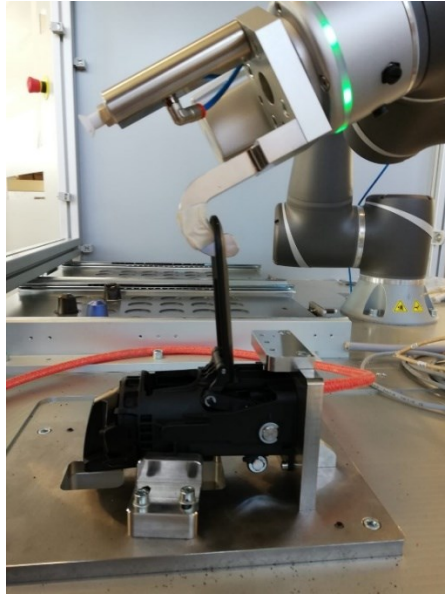


Figura 59 Dettaglio della posizione di apertura

Dopo aver finito il movimento di apertura, per far uscire il gancio dal foro, bisogna effettuare un movimento relativo in modo lineare. Per fare ciò l'unica soluzione è spostarsi di 50 mm lungo la z positiva del sistema di riferimento del tool. Ciò permette di staccarsi delicatamente dallo sportello della macchinetta senza impigliarsi, per poi poter procedere verso il target 5 muovendosi di 200 mm verso l'alto.

Da questa posizione il cobot andrà ad effettuare l'erogazione posizionando la capsula all'interno della macchinetta per poi chiudere lo sportello ed andare a prendere una nuova capsula.

Nelle immagini seguenti vengono mostrati i vari punti del processo di apertura e il percorso eseguito dal robot, rappresentato dalla linea gialla e con punto di inizio il target 1 in basso a sinistra.



Figura 60, 61 Percorso per l'apertura

Per lo studio delle configurazioni si è preso come riferimento il target 3 posto il più vicino possibile alla macchinetta. Le configurazioni possibili sono 8, ma come nel caso della chiusura solamente una è adatta a risolvere tutte le criticità.

Target 3: Configurazioni Robot (Omron TM5-900)

Fronte
 Retro
 Entrambi

Elbow Up
 Elbow Down
 Entrambi

Non-Flip
 Flip
 Entrambi

Mostra tutto

Raccomandate

Config. id

Mostro: 8 / 8 configurations

	id	F/R	U/D	F/N	J1	J2	J3	J4	J5	J6
1	0	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	-39.4	42.8	76.2	-40.1	76.8	-220.7
2	7	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	122.2	-43.4	-76.1	44.2	-99.1	121.0
3	0	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	-39.4	42.8	76.2	-40.1	76.8	139.3
4	2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	-39.4	117.0	-76.2	38.0	76.8	139.3
5	5	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	122.2	-117.5	76.1	-33.8	-99.1	-239.0
6	7	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	122.2	-43.4	-76.1	44.2	-99.1	-239.0
7	5	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	122.2	-117.5	76.1	-33.8	-99.1	121.0
8	2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	-39.4	117.0	-76.2	38.0	76.8	-220.7

Ok Cancell

Figura 62 Configurazioni possibili per l'apertura

Dalla tabella le configurazioni con id 1, 3, 4, 6 non sono presenti e quindi raggiungibili dal robot. Invece e varie possibilità che vengono di seguito mostrate sono divise da due piani di simmetria; rispetto alla retta che congiunge la base del robot al punto preso come riferimento un piano è orizzontale e l'altro verticale. Per ogni indice disponibile sono presentate 2 configurazioni che geometricamente sono identiche, ciò che cambia è a livello del sistema di riferimento dei giunti poiché alcune parti sono ruotate di 360°. Ad esempio, guardando la configurazione con id 0 si nota come tutti i giunti abbiano la stessa misura a parte il sesto che passa da -220.7 a 139.3 ruotando di 360°. Stessa cosa avviene anche per gli altri id sempre a causa della rotazione del giunto 6.

Configurazione 0

Risulta essere la migliore tra le varie proposte poiché evita di urtare le pareti, la macchinetta e di perdere la capsula agganciata alla ventosa. Durante i test ci si è verificato che durante la rotazione il giunto 4 abbassandosi non collida con la macchinetta del caffè, e soprattutto con un cassone rettangolare posto nella parte posteriore che ha il compito di coprire i vari sensori atti all'acquisizione dei dati ed il riscaldatore. Inoltre, è molto importante che il giunto 1 sia in questa posizione per riuscire a raggiungere i movimenti successivi con facilità.

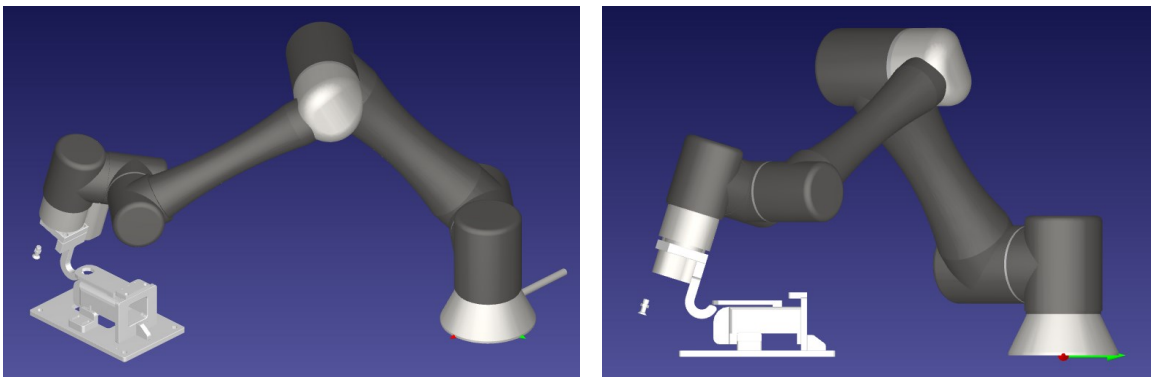


Figura 63, 64 Configurazione 0 per l'apertura

Configurazione 2

Tale configurazione non riesce a soddisfare i requisiti dell'applicazione poiché, come visto nel capitolo dedicato alla chiusura, il giunto 3 andrebbe a collidere sul piano di lavoro attraversandolo. Se anche non fosse presente questa limitazione non si riuscirebbe comunque ad implementare tale soluzione per il fatto che i bracci 2 e 3 alzandosi entrerebbero in singolarità essendo per un istante perfettamente allineati.

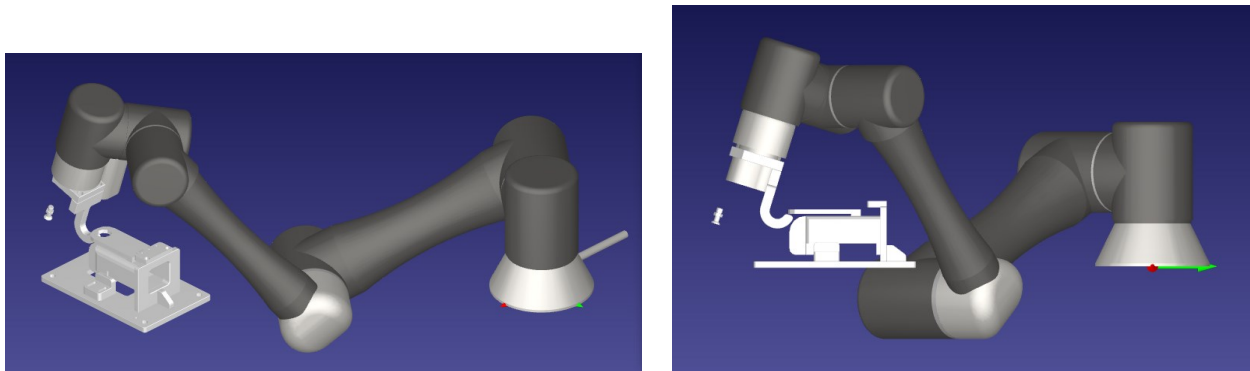


Figura 65, 66 Configurazione 2 per l'apertura

Configurazione 5

La configurazione con id 5 ha le stesse problematiche della 2 con in aggiunta un'errata orientazione del giunto 1, posizionato nella parte sbagliata del piano di simmetria.

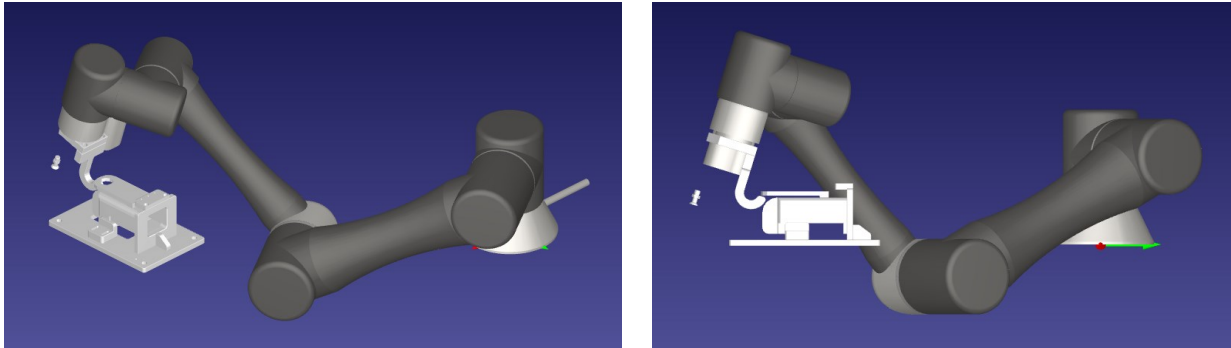


Figura 67, 68 Configurazione 5 per l'apertura

Configurazione 7

Questo posizionamento dei giunti potrebbe essere implementato se non fosse per il fatto che il giunto 1 pone il secondo braccio in una zona scomoda. Difatti in questo modo il rischio di collisione con gli elementi presenti nel piano di lavoro è elevato e soprattutto non risulta semplice effettuare i movimenti successivi.

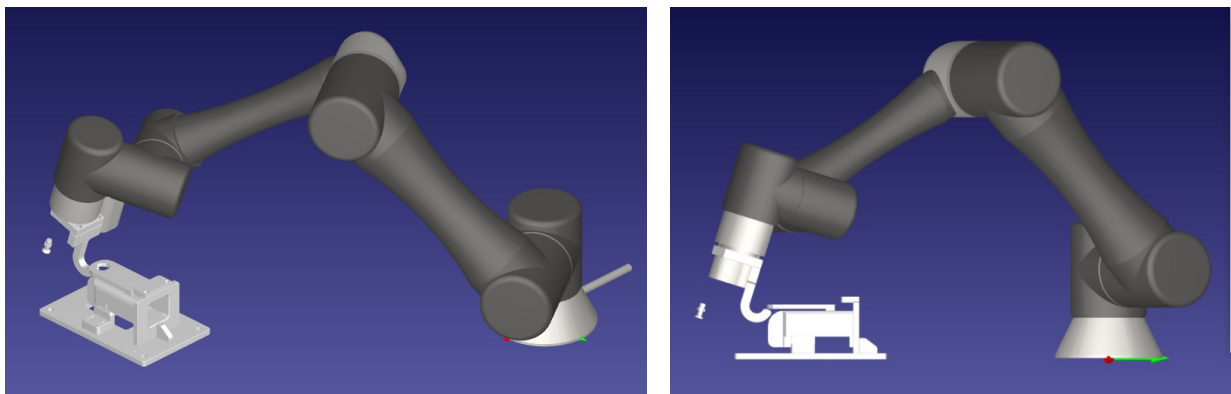


Figura 69, 70 Configurazione 7 per l'apertura

8.3. Erogazione

Un altro percorso che necessita di particolare attenzione per quanto riguarda lo studio delle configurazioni è l'erogazione, o più precisamente il movimento che permette di inserire la capsula all'interno della macchina del caffè. Tale movimentazione deve essere studiata in concomitanza con l'analisi della presa, dato che le due azioni si influenzano a vicenda. Dopo un attento studio si è notato che l'unica possibilità di presa fosse quella in cui la capsula ha la base rivolta in verso opposto sia al gancio che alla telecamera, per il fatto che durante l'abbassamento per avvicinare la ventosa alla capsula si deve evitare di urtare la base di appoggio. Presupponendo ciò si può definire l'orientamento del giunto 6 per far in modo, durante la discesa per inserire la capsula, di non collidere con la macchinetta. La soluzione conclusiva ha come valori rispetto alla base del tool:

- $R_x = 175.2^\circ$
- $R_y = 6.5^\circ$
- $R_z = -127.1^\circ$

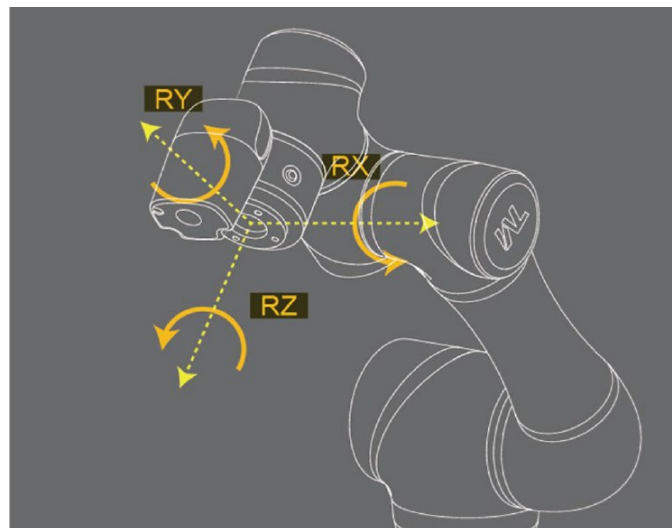


Figura 71 Convenzione sistema di riferimento del tool

Tale rotazione è caratterizzata dal fatto che lo sportelletto della macchina del caffè, durante la discesa del tool, deve essere inserito nella concavità posta tra la telecamera, il gancio e la ventosa senza che si verifichino urti. Si sarebbero potute adottare anche altre soluzioni, che avrebbero soddisfatto sia la presa che l'inserimento della capsula, ma non prive di rischi; difatti con tali configurazioni il gancio sarebbe stato troppo vicino allo sportello, con un alto rischio di impigliarsi durante la discesa o la risalita.

Solamente dopo queste considerazioni si può procedere a definire il percorso che porterà all'erogazione. Nella foto sottostante viene mostrato il punto scelto come inizio dell'abbassamento.

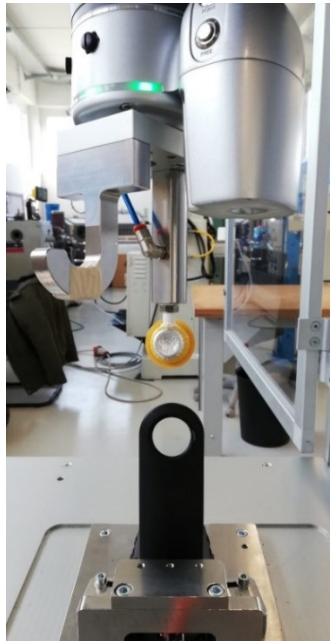


Figura 72 Punti d'inizio inserimento

Il percorso è stato definito con una serie di punti impostati per essere raggiunti linearmente, in modo da evitare che il robot effettui movimenti circolari e porti la capsula in collisione. Inoltre, il foro d'entrata è leggermente più grande della capsula ed è quindi stato necessario adottare una precisione millimetrica per l'inserimento; per questo motivo nei punti successivi al primo non è stato inserito nessun blending, che avrebbe permesso un movimento più fluido ma non accurato. Dopo il punto di partenza sono stati inseriti tre target di passaggio e uno finale di rilascio. I tre punti servono per guidare il tool verso la posizione desiderata senza che la telecamera e il gancio entrino in collisione con l'erogatore. Le coordinate spaziali dei punti creano un movimento lineare ma la ventosa, a cui è agganciata la capsula, ruota su se stessa in modo da raggiungere il foro d'ingresso.

Una volta che il robot ha raggiunto il punto 4 la capsula si trova esattamente all'entrata del foro, come si può vedere nella figura sottostante.



Figura 73 Punto intermedio d'inserimento

Da qui, con un ultimo movimento, si porta la capsula all'interno della cavità e si aspetta che arrivi attraverso il PLC un segnale che chiuda la valvola dell'aria, e di conseguenza permetta il rilascio della capsula. Nella foto mostrata qui di seguito si può notare l'esatta posizione di rilascio.



Figura 74 Punto di rilascio

Subito dopo aver effettuato il rilascio della capsula all'interno del foro, si effettua un movimento relativo del tool verso la sua coordinata z negativa di 100 mm in modo da allontanare in sicurezza le varie parti del robot dalla zona di erogazione. Ci si trova ora in un punto da cui si può accedere in sicurezza alle altre fasi del processo.

Di seguito è mostrato in giallo il percorso effettuato dal robot per raggiungere l'ingresso dell'erogatore. Alla sua sinistra è invece proposto lo schema dei punti utilizzati per effettuare tale movimento.

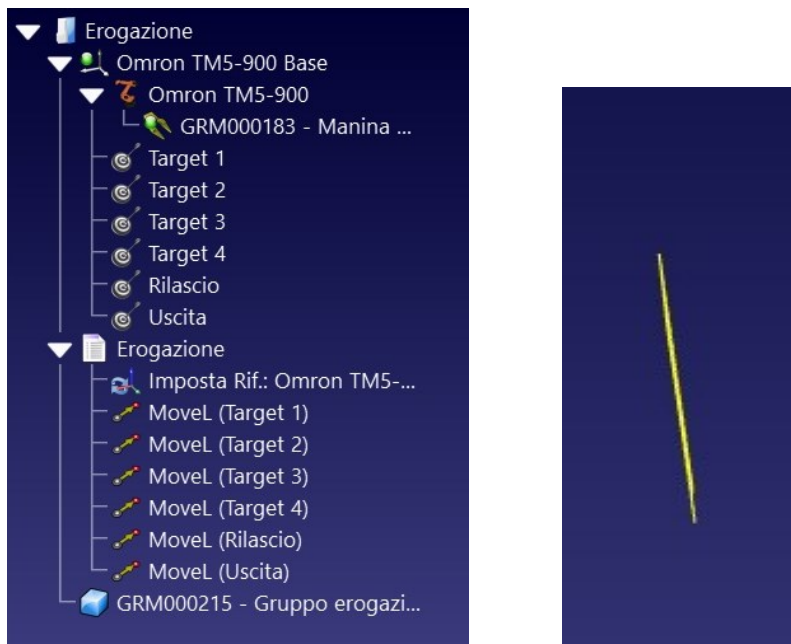


Figura 75, 76 Percorso per l'inserimento

Per quanto riguarda lo studio delle configurazioni si è preso come riferimento il target che a causa della sua vicinanza al gruppo d'erogazione e alla zona in cui sono posizionati i sensori crea più problematiche. Tale punto è quello di rilascio poiché costringe il robot ad abbassarsi molto e ad inserire lo sportello della macchina del caffè all'interno del triangolo formato da ventosa, telecamera e gancio.

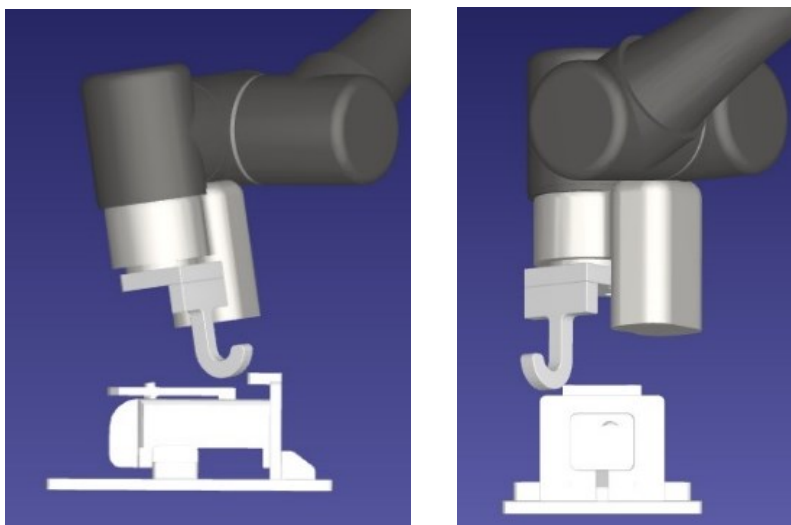


Figura 77, 78 Configurazione utilizzata per l'inserimento

Nella tabella sottostante vengono mostrate le diverse configurazioni possibili nel punto di rilascio. Si può notare come in totale sembrano apparentemente 10, in realtà quelle con id 0 e 2 vengono considerate due volte con il giunto 6 ruotato di 360°. Sono dunque 8 le combinazioni da studiare e tra cui scegliere la migliore.

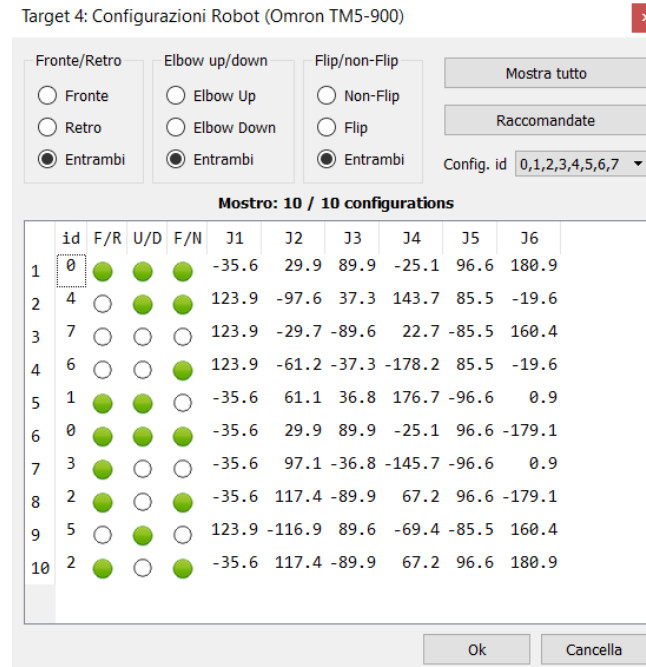


Figura 79 Configurazioni possibili per l'inserimento

Configurazione 0

Come già notato con la chiusura e l'apertura, la configurazione con id 0 è quella che più soddisfa i nostri requisiti. Questo perché questi movimenti agiscono sempre nella zona dell'erogatore, molto vicini gli uni dagli altri, e perché essi si susseguono spesso durante il ciclo. Il robot deve quindi passare facilmente da una posizione all'altra senza magari girare su se stesso per cambiare configurazione, soprattutto perché lo spazio è limitato e si rischierebbe di urtare qualcosa o di mandare in errore il Cobot.

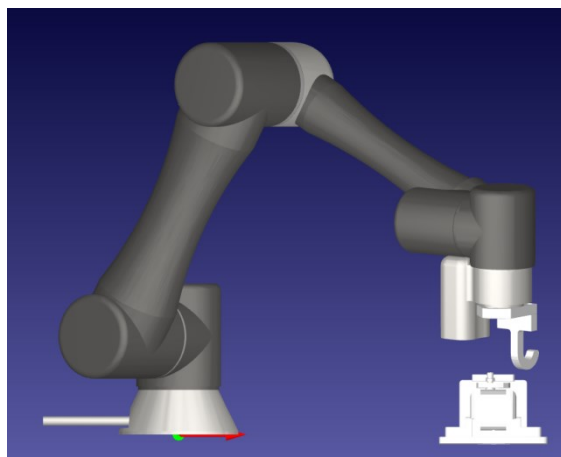
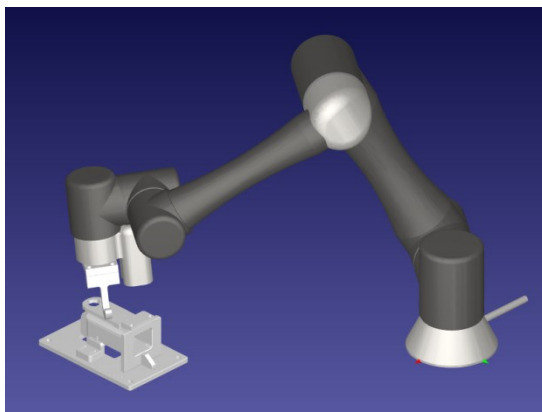


Figura 80, 81 Configurazione 0 per l'inserimento

Configurazione 1

Tale configurazione potrebbe tranquillamente essere adottata poiché non entra in collisione con nessuno oggetto. Il rischio è però molto alto, soprattutto per la presenza di una parete vetrata nella parte anteriore della macchinetta dove sporge il braccio 5. Oltre a ciò, bisogna considerare che i vari giunti compiono uno sforzo maggiore rispetto alla configurazione 0 e soprattutto che una volta rilasciata la capsula è molto difficile procedere verso l'alto senza entrare in singolarità. Se si riuscisse a concludere il movimento senza che il robot segnali un errore si verificherebbe un altro problema, ossia per raggiungere il successivo percorso di chiusura il robot sarebbe costretto a girare su se stesso compiendo un'ampia rotazione e sicuramente urtando un elemento del banco.

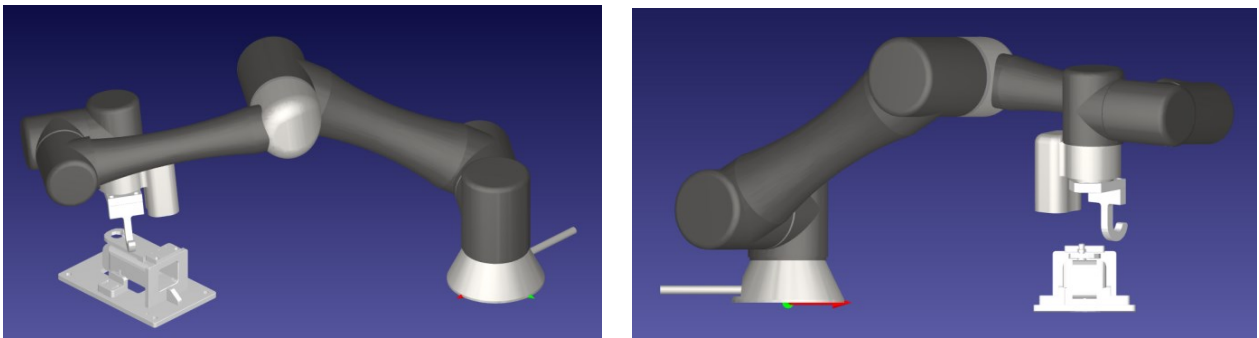


Figura 82, 83 Configurazione 1 per l'inserimento

Configurazione 2

La posizione dei giunti con id 2 si può subito scartare poiché, come spesso si notava nel caso della chiusura e dell'apertura, il giunto 3 entra in collisione con il piano inferiore ed inoltre il robot farebbe molta difficoltà ad uscire da questa configurazione per raggiungere ad esempio il primo punto della chiusura.

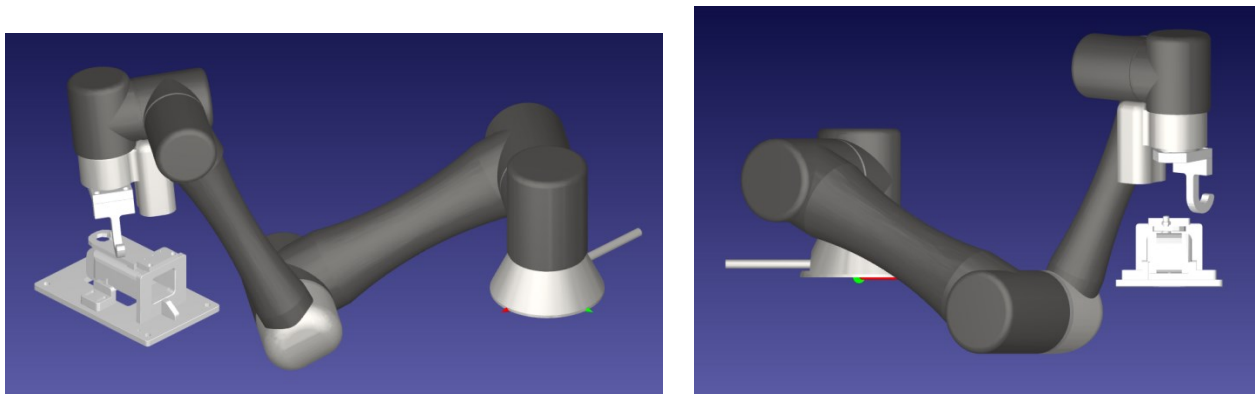


Figura 84, 85 Configurazione 2 per l'inserimento

Configurazione 3

La configurazione con id 3 è molto simile alla 1 a parte per il fatto che il giunto 3 è posto più in basso. Ciò ne complica l'uso poiché, anche se non va in collisione con il piano inferiore della cella come nel caso 2, passa molto vicino alle pareti e agli strumenti rendendo molto rischiosi i movimenti successivi. Oltre a ciò, perdura il rischio di collisione se si dovesse provare a raggiungere il primo punto della chiusura da questa posizione.

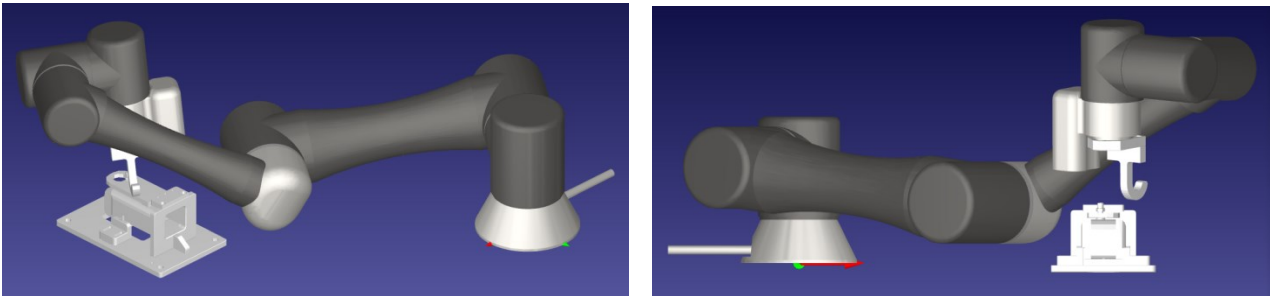


Figura 86, 87 Configurazione 3 per l'inserimento

Configurazione 4

Tale posizione dei giunti è identica a quella con id 3 ma simmetrica rispetto ai giunti 1 e 5, ciò non cambia le considerazioni già fatte per la posizione 3 se non per il fatto che stavolta la parte conclusiva del braccio 3 entra in collisione con la vetrata della cella. I numerosi problemi riscontrati non permettono di implementare tale soluzione nel punto studiato, e di conseguenza nel percorso che porta all'erogazione. Una complicazione aggiuntiva è data inoltre dal giunto 1 ruotato dalla parte errata che non permette di raggiungere correttamente i movimenti successivi.

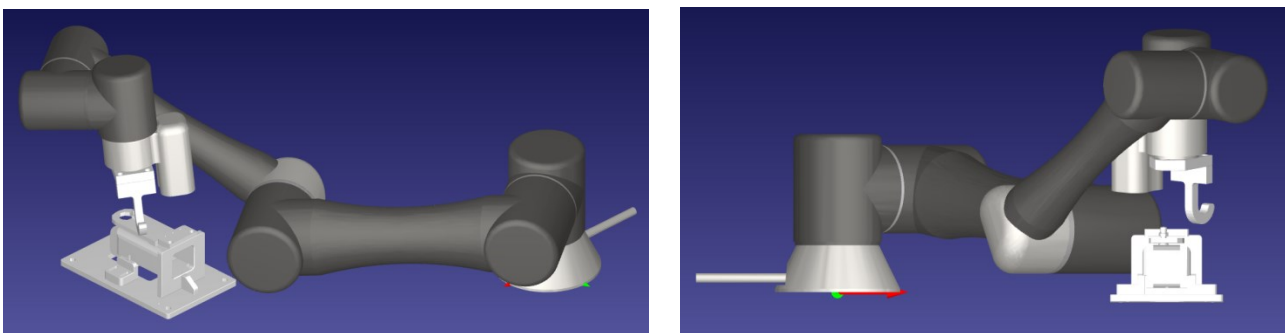


Figura 88, 89 Configurazione 4 per l'inserimento

Configurazione 5

La posizione con id 5 è la simmetrica rispetto ai giunti 1 e 5 della configurazione con id 2. I problemi principali sono due: Il giunto 3 posto sotto il piano d'appoggio e il giunto 1 ruotato dalla parte sbagliata. Il primo problema è il più grave e non risolvibile mentre il secondo potrebbe essere comunque preso in considerazione ma complicherebbe molto le movimentazioni successive.

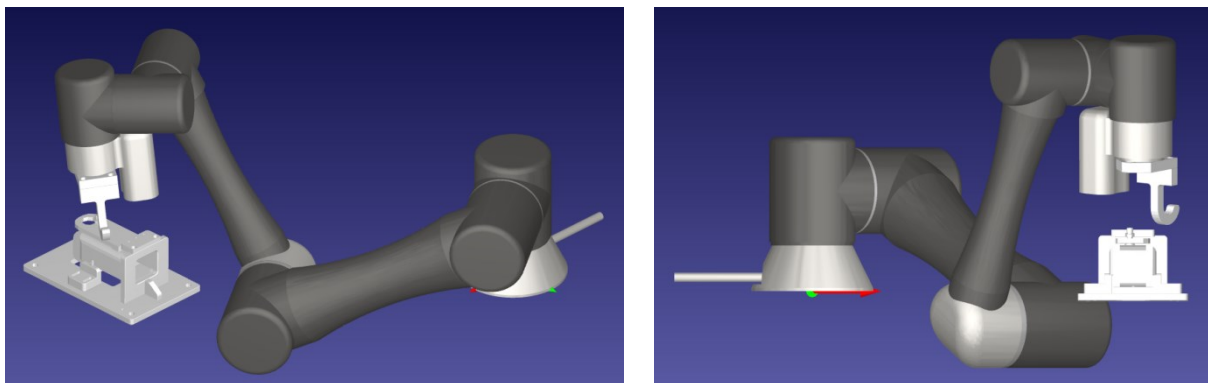


Figura 90, 91 Configurazione 5 per l'inserimento

Configurazione 6

La configurazione con id 6 è la simmetrica rispetto ai giunti 1 e 5 della posizione con id 1. Non risulta avere particolari problemi se non quelli già citati per l'id 1. Una complicazione aggiuntiva in questo caso è data dal giunto 1 ruotato dalla parte errata che non permette di raggiungere correttamente i movimenti successivi.

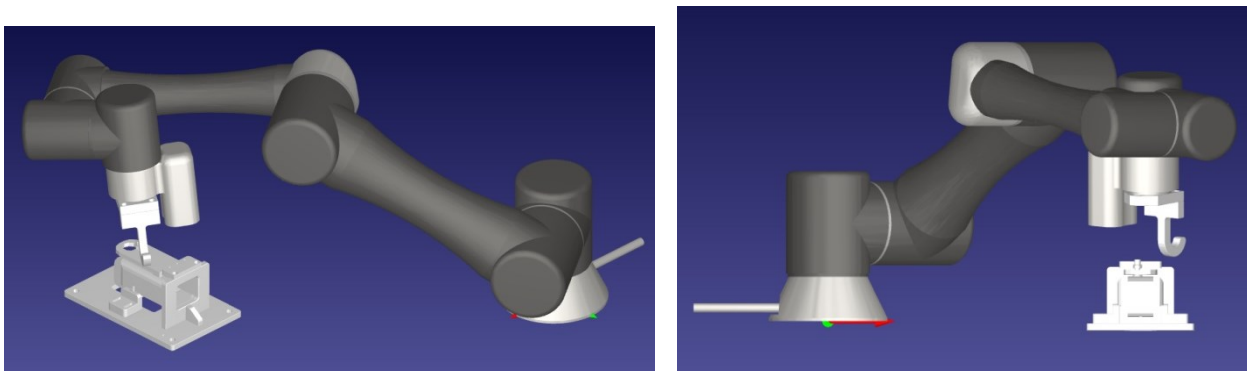


Figura 92, 93 Configurazione 6 per l'inserimento

Configurazione 7

L'id 7 è simmetrico rispetto ai giunti 1 e 5 alla configurazione con id 0. Tale configurazione non ha particolari difetti se non per il giunto 1 orientato in modo da rendere difficili le movimentazioni successive. Se non fosse per questo motivo sarebbe una soluzione perfettamente implementabile nel percorso. Per far sì che i vari passaggi tra un passaggio ed un altro siano compatibili e per rendere tutto il progetto conforme viene però scartata; difatti si è scelto fin dall'inizio di orientare il giunto 1 come nel caso con id 0 e tale scelta è stata portata avanti in tutto il progetto.

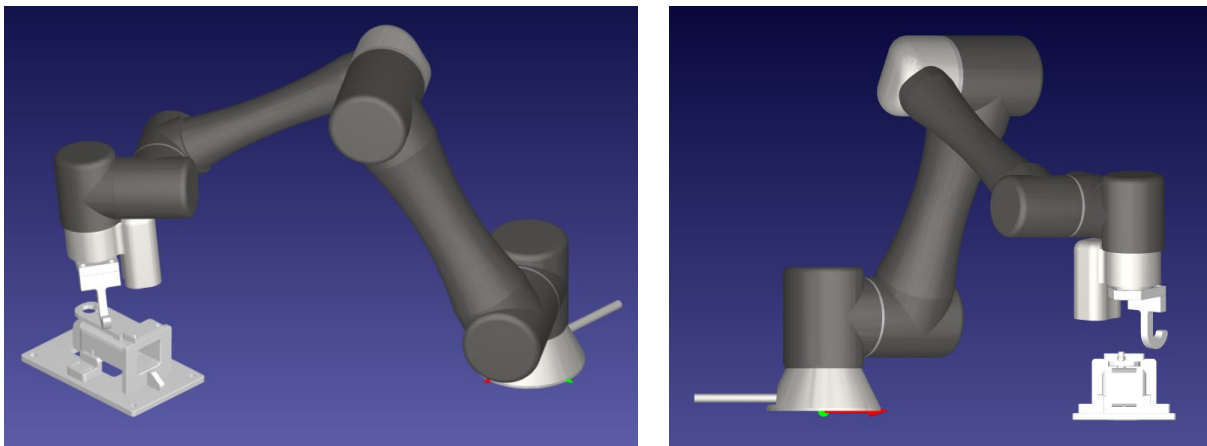


Figura 94, 95 Configurazione 7 per l'inserimento

8.4. Presa

Per quanto riguarda la presa bisogna prima di tutto descrivere come sono disposte le capsule nello spazio di lavoro. Il banco d'erogazione ha al suo interno due cassette scorrevoli con posizione di chiusura fissa e su di essi sono posti due vassoi forati per permettere all'operatore di inserire le capsule sempre nella stessa posizione. In totale sono disponibili 24 fori per ogni vassoio in modo da poter inserire contemporaneamente 48 capsule.

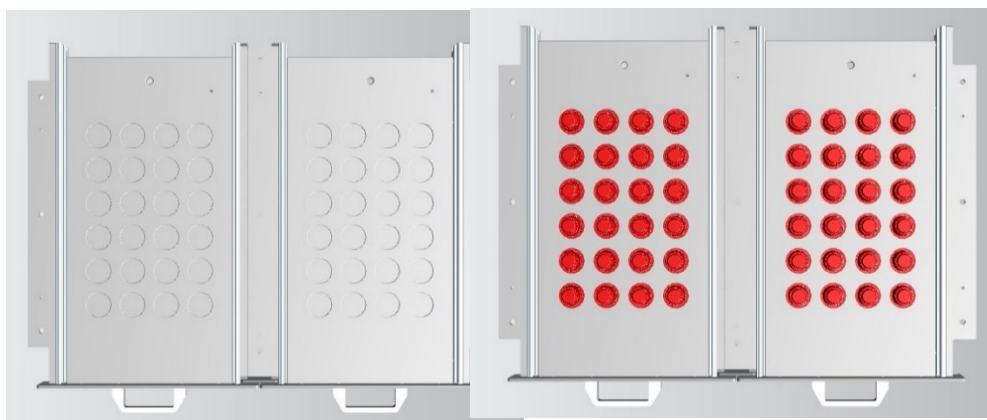
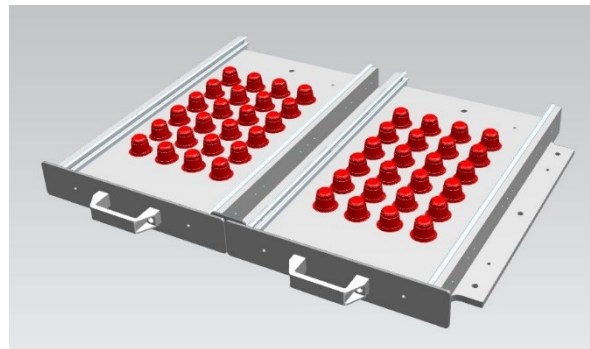
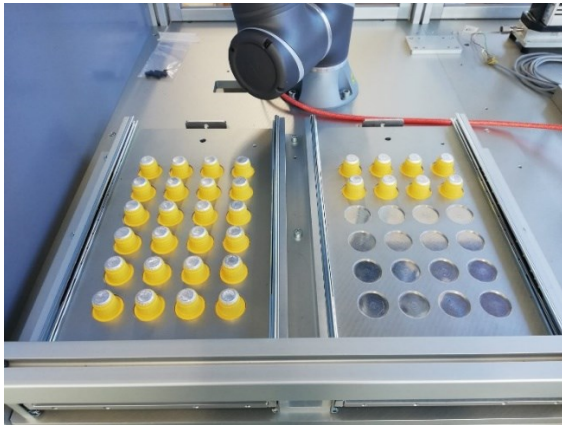


Figura 96, 97, 98, 99 Vassoi e relativo CAD con disposizione delle capsule

Va specificato che i vassoi erano inizialmente metallizzati e solo successivamente sono stati verniciati di un colore grigio opaco. Questa modifica è stata attuata per risolvere i problemi che l'illuminazione dava alla visione, dato che il metallo dei cassetti rifletteva molto la luce (esterna e della torcia integrata) e distorceva l'immagine.

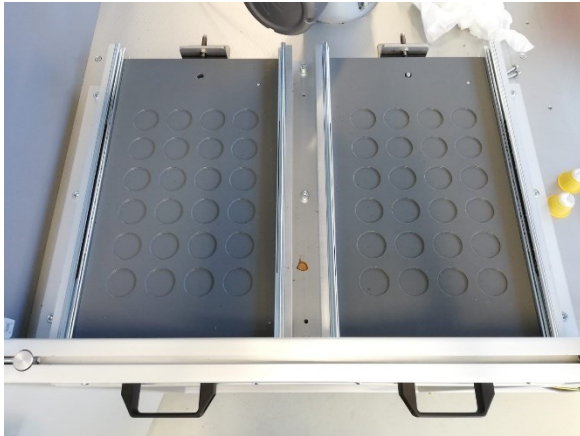


Figura 100, 101 Vassoi verniciati

Nell'applicazione pratica un programma software gestirà la ricetta delle capsule di ogni vassoio in modo da sapere in ogni istante quale varietà di caffè si sta erogando e a che lotto di produzione si riferiscono i dati misurati. Tutto ciò è gestito da un programma appositamente creato e dalle ricette inserite manualmente dall'operatore; il compito del robot è invece di comunicare in ogni istante se la capsula è stata rilevata (tramite il sistema di visione e di ricerca integrato), se è stata presa (tramite un controllo del vuoto), se è stata inserita (con un controllo di forza e comunicando via Modbus) e se è il momento di sbloccare i cassettei per inserire nuovamente le capsule (i cassettei sono bloccati durante l'esecuzione e viene data la possibilità di aprirli solamente una volta erogate tutte le capsule presenti). Tutto ciò viene comunicato via Modbus al software tramite delle variabili appositamente create ed aggiornate costantemente durante le varie fasi del programma.

Il blocco dei cassettei viene azionato automaticamente una volta che l'operatore effettua la chiusura grazie a dei sensori posti al di sotto dei vassoi. Dopo che è stato dato il segnale un pistone ad aria compressa fa salire un cono metallico auto-allineante che non permette di serrare le guide lineari. L'apertura è invece gestita dal robot che una volta presa l'ultima capsula del vassoio invia un segnale via Modbus al PLC consentendo lo sblocco. Nella foto sottostante si può notare il sensore per il blocco dei cassettei, il cono auto-allineante e un deceleratore a molla.



Figura 102 Sensori per il bloccaggio dei vassoi

Il singolo vassoio è forato in modo da creare un rettangolo, di base 4 ed altezza 6 fori, posizionato davanti il robot per essere raggiunto con facilità. La locazione delle capsule costringe però a suddividere il cassetto in due zone poiché la presa dovrà essere eseguita con due orientamenti diversi del tool a causa di tre problematiche:

- Per le capsule più vicine al robot il polso deve essere posizionato in modo da avere la capsula tra quest'ultimo e la base del robot. Ciò è dovuto principalmente al rischio di collisione del robot con se stesso durante l'abbassamento per la presa o la risalita.
- Per le capsule più lontane al robot il polso deve essere posizionato in modo da avere quest'ultimo tra la capsula e la base del robot. Ciò è dovuto principalmente al rischio di collisione del robot con la vetrata durante le movimentazioni che portano all'erogazione.
- Non è possibile trovare una posizione intermedia con la capsula alla stessa distanza del polso poiché l'inclinazione della ventosa necessaria alla presa della capsula porta il robot a collidere con le guide lineari che permettono al cassetto di aprirsi, costruite leggermente rialzate dal vassoio.

Viene per questo motivo separato il singolo cassetto in due zone, la prima in basso contenente 16 capsule (4 file da 4) e la seconda in alto contenente 8 capsule (2 file da 4). Tale scelta è stata effettuata anche in base alle dimensioni del cassetto e a varie prove effettuate; si è infatti visto che una divisione in 12 capsule per zona non consentiva una corretta riuscita della presa. Se così fosse stato nel secondo vassoio durante il movimento di abbassamento il gomito del robot sarebbe andato ad urtare sia la macchinetta del caffè che il carter contenente il riscaldatore e vari sensori. Non avendo ancora tutto il banco di lavoro montato si è dovuto ricorrere ad un simulatore per prevedere eventuali ingombri. Ovviamente si sarebbe potuto considerare in maniera diversa il primo ed il secondo vassoio ma ciò avrebbe comportato due pallettizzazioni distinte per ogni cassetto e complicato enormemente la ciclica allungando i tempi di realizzazione. Si è quindi scelto di adottare un'unica soluzione che permetta di risolvere tutte le problematiche di progetto.

Una volta definita la suddivisione delle zone nei due vassoi si procede allo studio delle configurazioni; per vari motivi che verranno specificati in seguito si è infatti dovuto distinguere tra destra e sinistra dal punto di vista degli angoli dei giunti. Nonostante la ciclica sia la stessa tra il primo ed il secondo vassoio sia per la pallettizzazione che per l'orientamento del tool, si sono dovute scegliere 4 configurazioni diverse degli assi del robot nei 4 punti di passaggio scelti.

Da questi punti di passaggio ci si sposta di -50 mm lungo x e di -80 mm lungo y per le prime 16 capsule dei due vassoi mentre non ci si sposta nelle ultime 8 capsule posizionate nei punti più vicini alla base del robot. Dopo ciò viene eseguita la pallettizzazione creata non con l'opzione disponibile nel software del robot ma con una serie di calcoli che spostano il punto di passaggio di 50 mm rispetto la base del robot lungo la base o l'altezza del vassoio, a seconda di quale foro (o per meglio dire capsula) si sta considerando.

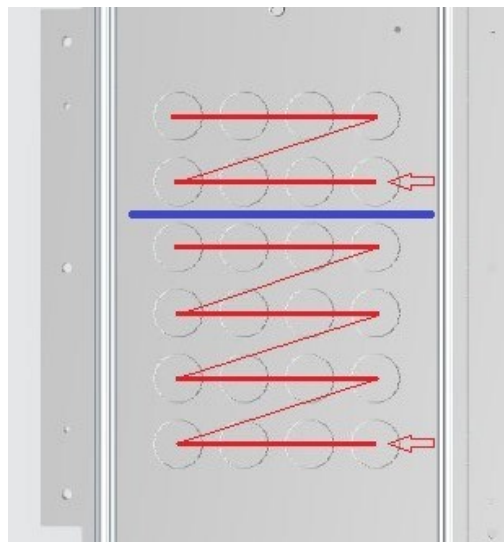


Figura 103 Ordine di presa delle capsule

Come si può notare dallo schema soprastante la pallettizzazione, come anche il conteggio delle capsule presenti, è stata effettuata da destra verso sinistra per non rischiare di schiacciare le altre capsule presenti nel vassoio. Infatti, durante il movimento discendente si arriva quasi a toccare il vassoio e non è stato possibile trovare un'altra posizione di presa dato che le misure di ingombro erano già state definite. Oltre a ciò, si è scelto di procedere dalla zona più vicina alla finestra a quella più vicina al robot. In questo caso oltre al fatto che tale sequenza era più funzionale, permettendo di non andare ad intaccare le altre capsule una volta definiti i movimenti, va considerata anche la motivazione estetica, essendo visivamente meglio erogare prima le capsule anteriori. La riga blu dell'immagine soprastante indica invece la linea di separazione tra la zona anteriore e posteriore poiché sono state gestite in maniera differente.

Nell'immagine sottostante viene invece visualizzata come è stata creata la pallettizzazione tramite il software TM flow integrato nel controller del cobot. Si possono riconoscere all'inizio i PassPoint delle 4 zone descritte in precedenza raggiunte in Joint, ovvero con il percorso che per il robot è più facile da effettuare e con la posizione finale basata sugli angoli dei giunti. Questo per fare in modo di trovarsi in quei punti con la configurazione adatta ad eseguire una presa efficiente; bisogna però specificare che questa modalità di movimento va studiata attentamente in quanto può capitare che, per raggiungere i punti, il robot effettui un movimento circolare molto ampio e vada a collidere con le pareti. Oltre a quanto detto è stato inserito anche un po' di blending per creare un movimento più fluido velocizzando i vari passaggi.

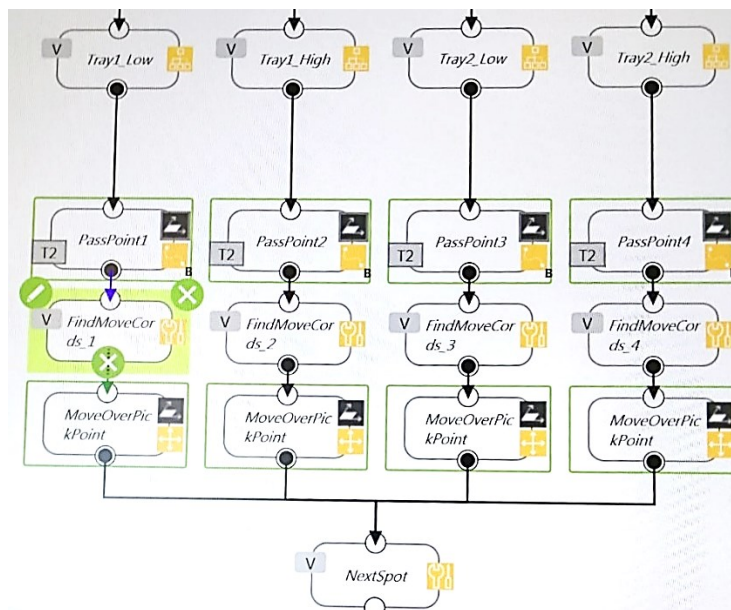


Figura 104 Programma di selezione delle capsule

Al di sotto dei PassPoint sono presenti i "Set" che permettono di caricare su una variabile il valore esatto della movimentazione da effettuare lungo gli assi x, y e z per raggiungere il secondo punto di passaggio, posizionato esattamente sopra la capsula della riga var_PalletRow e colonna var_PalletColumn. Le variabili di movimento sono definite var_MoveX, var_MoveY e var_MoveZ e di seguito descritte:

- Prime 16 capsule del vassoio a destra
 - $var_MoveX = -50 - 50 * var_PalletColumn$
 - $var_MoveY = -80 + 50 * var_PalletRow$
 - $var_MoveZ = 0$
- Ultime 8 capsule del vassoio a destra
 - $var_MoveX = -50 * var_PalletColumn$
 - $var_MoveY = +50 * (var_PalletRow - 4)$
 - $var_MoveZ = 0$

- Prime 16 capsule del vassoio a sinistra
 - $\text{var_MoveX} = -50 - 50 * \text{var_PalletColumn}$
 - $\text{var_MoveY} = -80 + 50 * \text{var_PalletRow}$
 - $\text{var_MoveZ} = 0$
- Ultime 8 capsule del vassoio a sinistra
 - $\text{var_MoveX} = -50 * \text{var_PalletColumn}$
 - $\text{var_MoveY} = +50 * (\text{var_PalletRow} - 4)$
 - $\text{var_MoveZ} = 0$

Nella “move” successiva, mostrata nell’immagine sottostante, vengono poi caricate tali variabili ed eseguito il movimento che posiziona la punta della ventosa al di sopra della capsula; poi da quel punto basterà eseguire due movimenti comuni a tutti i punti: abbassarsi e avanzare nella direzione positiva del tool.

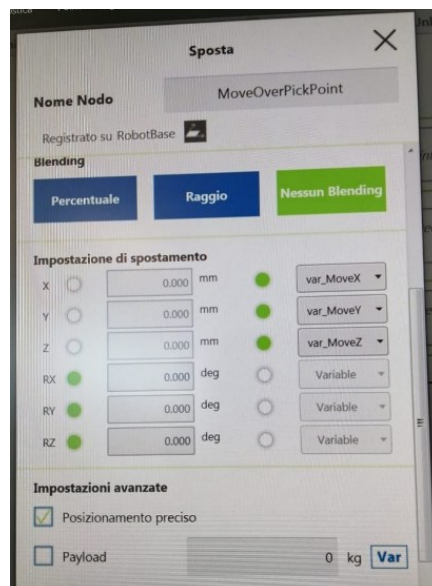


Figura 105 Impostazione “move” sul programma del robot

Una volta raggiunto questo secondo punto di passaggio si procede con una serie di “move” fissi per poter eseguire la presa:

- Abbassamento rispetto la base di 72 mm
 - In questo punto si setta una variabile via Modbus per comunicare la posizione raggiunta, così che il programma possa procedere ad attivare l’aria della ventosa. Successivamente con un “wait” si aspetta un segnale per poter procedere con i movimenti successivi.
- Movimento verso l’asse z positivo del tool di 9 mm per eseguire il Pick
- Salita rispetto la base di 150 mm
- Allontanamento dai punti critici posizionandosi nel punto di passaggio iniziale

Questi movimenti sono gli stessi per tutte e 4 le zone dei vassoi poiché per lo studio si è partiti dal punto di contatto con la capsula e si sono eseguiti i movimenti nel verso opposto rispetto a quanto specificato sopra. In questo modo si sono potuti adottare spostamenti con valori non variabili rispetto le 4 zone.

Per il Pick è stato scelto di muovere il tool lungo l'asse z di 9 mm poiché il banco doveva erogare diverse tipologie di capsule che si diversificavano oltre che per il colore anche per la forma. Alcune di esse avevano una circonferenza tale da necessitare un movimento del tool di 10 mm mentre altre di 8 mm; ciò ha costretto ad optare ad una soluzione intermedia per non diversificare la presa a seconda della tipologia di capsule. In particolare, le capsule Lavazza compatibili Nespresso Vivalto (blu) e Roma (nere) avevano una circonferenza maggiore e necessitavano di un movimento più delicato per non rovinarle mentre le Armonico (Rosse) e le Classique (gialle) potevano essere prese con un movimento più lungo. Vengono mostrate nell'immagine sottostante le 4 tipologie precedentemente nominate e che sono state utilizzate durante le prove di visione e presa.



Figura 106 Tipologie di capsule utilizzate

Per lo studio delle configurazioni si sono presi come riferimento 4 punti posizionati agli angoli inferiori delle 4 zone precedentemente specificate. Si è poi verificato che il movimento fosse ripetibile anche per le altre capsule. Gli ingombri principali erano dovuti alla macchinetta, anche se solamente per il vassoio destro, alla finestra e alle guide lineari dei cassettei, essendo quest'ultime leggermente rialzate. Nonostante appaiano relativamente simili queste 4 zone necessitano di configurazioni completamente diverse e soprattutto di punti di passaggio in PTP base Joint, ovvero con una configurazione specificata, dato che il robot per raggiungere i diversi punti in maniera lineare rischia di non posizionarsi correttamente.

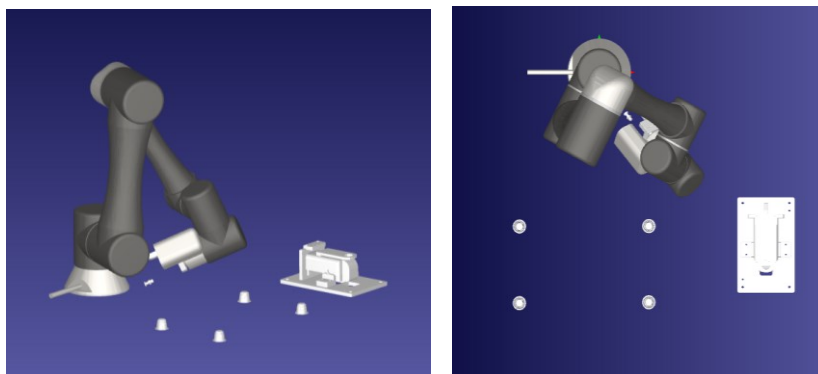


Figura 107, 108 Configurazione utilizzata per la presa

■ Zona 1 anteriore

La parte anteriore del vassoio sinistro è risultata essere quella più difficile da studiare dato che le limitazioni imposte dall'area di lavoro in quei punti erano molte. Innanzitutto, si è iniziato definendo l'orientamento del polso in grado di poter effettuare una presa laterale della capsula in un punto definito. Ovviamente la presa con la ventosa deve essere eseguita in un punto laterale per far sì che durante l'inserimento la capsula sia orientata correttamente. Tale punto è lo stesso in tutte le capsule ed è l'unico possibile per eseguire un corretto inserimento nella macchinetta. Come si può vedere dalle foto sottostanti tale punto è posto nella parte laterale della capsula ma comunque il più in alto possibile per non rischiare di collidere con le guide lineari poste ai lati del vassoio. D'altra parte, non si è potuto agganciare la capsula troppo in alto poiché la ventosa non avrebbe aderito bene, rischiando di perdere la capsula durante i vari movimenti.

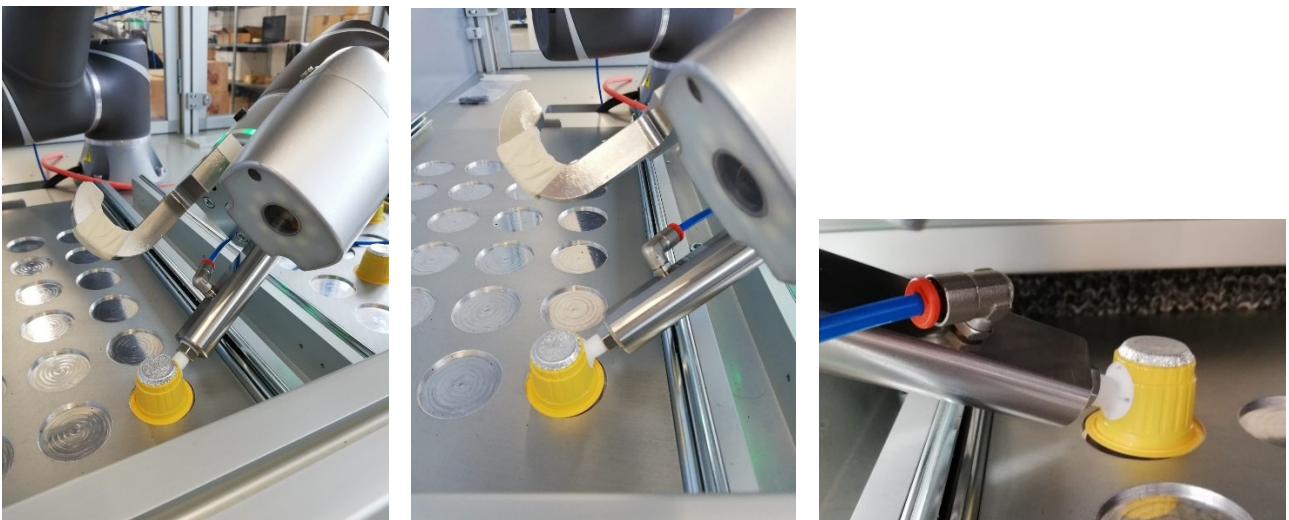


Figura 109, 110, 111 Dettagli della presa

Per quanto riguarda l'inclinazione scelta per il tool si è tenuto conto di varie problematiche:

- Una presa orizzontale avrebbe causato una collisione con le guide lineari, che come già detto sono leggermente rialzate rispetto al vassoio
- Un'eccessiva inclinazione non avrebbe permesso alla ventosa di aderire alla parete superficiale della capsula in modo adeguato
- Anche se l'inclinazione fosse esattamente quella desiderata va considerata una presa leggermente obliqua rispetto al piano dei vassoi per facilitare l'abbassamento, ma comunque non esagerata per non urtare le altre capsule

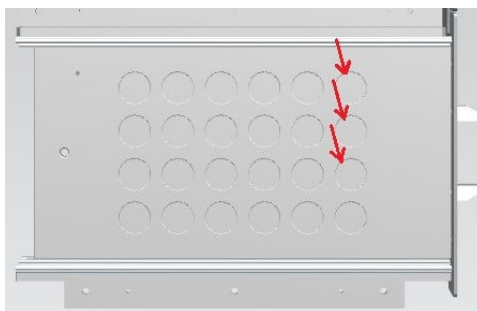


Figura 112 Direzione di presa zona 1 anteriore

L'orientamento finale è stato scelto con dei valori rispetto alla base del tool pari a:

- $R_x = 126.8^\circ$
- $R_y = 44.6^\circ$
- $R_z = -38.5^\circ$

Durante i test è stato considerato anche di eseguire una presa nella parte superiore della capsula, un posizionamento dell'oggetto in un punto intermedio e un ulteriore presa questa volta laterale. Ciò avrebbe facilitato molto la scelta delle configurazioni permettendo di eseguire gli stessi movimenti per le 4 zone senza rischiare di collidere con le pareti. Non è stato possibile implementare questa soluzione per via della delicatezza della parte superiore della capsula; veniva infatti specificato dal cliente che in nessun modo si doveva alterare la geometria della capsula, con particolare attenzione ai punti inferiori e superiori che vengono bucati durante l'erogazione per far scorrere l'acqua. Nella foto sottostante è mostrata in bianco l'area che non deve assolutamente essere toccata durante i movimenti di presa e subito sotto l'immagine originale delle capsule viste dall'alto.



Figura 113 Capsule con in bianco l'area da non toccare

Una volta definita la posizione e l'orientamento del punto di presa si è scelta la configurazione dei giunti che permetteva di rispettare i vincoli imposti.

Nella tabella sottostante vengono mostrate le diverse configurazioni possibili. Si può notare come in totale sembrano apparentemente 10, in realtà quelle con id 1 e 3 vengono considerate due volte con il giunto 6 ruotato di 360°. Sono dunque 8 le combinazioni da analizzare.

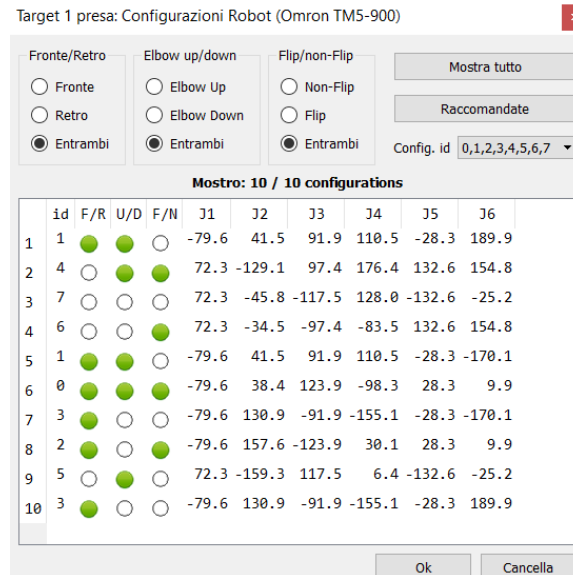


Figura 114 Configurazioni possibili per la presa nella zona 1 anteriore

Configurazione 0

Al contrario di quanto spesso avveniva negli studi effettuati in questo testo la soluzione con id 0 non risulta essere la migliore tra le varie che verranno proposte sia in termini di efficacia del movimento che di ingombro. Apparentemente il robot non sembra entrare in contatto né con le pareti né con gli oggetti di lavoro presenti nel banco; la posizione è molto comoda da raggiungere poiché anche senza l'ausilio dell'impostazione PTP per giunti il robot tende a sistemarsi in questa configurazione spontaneamente. Anche l'uscita avviene in modo semplice e veloce senza movimenti troppo complicati. Il motivo per cui questa configurazione non è applicabile risiede nel 4° asse che, durante la presa, è posto al di sotto della ventosa andando a collidere con il vassoio o con le guide lineari dei cassetti. Questa condizione peggiora andando a prendere le capsule più a sinistra dato che il 4° asse si abbassa sempre di più. Tale situazione ci costringe a considerare solo le configurazioni che pongono tale braccio nella parte superiore del tool.

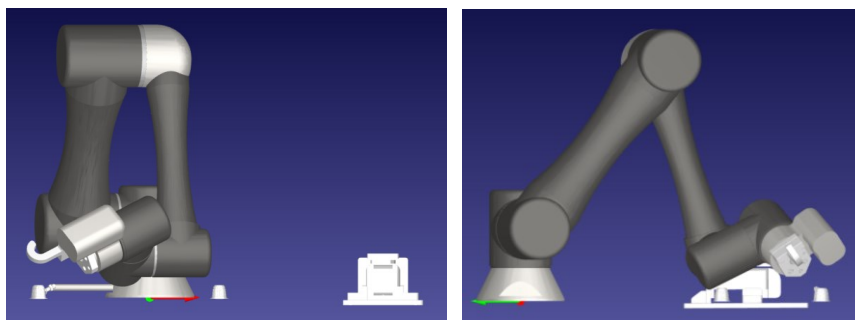


Figura 115, 116 Configurazione 0 per la presa nella zona 1 anteriore

Configurazione 1

Questa configurazione è quella che alla fine è stata applicata per la presa delle capsule anteriori del vassoio sinistro. Come precedentemente detto questa posizione è accettabile poiché pone il 4° asse al di sopra del tool consentendo di non collidere con il vassoio durante le movimentazioni. Il problema principale sta nei movimenti di arrivo e partenza dal punto nel momento che per uscire da questa configurazione e raggiungere la successiva il robot è costretto a compiere un percorso molto articolato andando a ruotare il polso su se stesso. Per questo motivo è stato necessario aggiungere dei punti di passaggio in PTP su giunto per consentire al robot di districarsi da tale posizione senza collidere con se stesso o con le pareti. Il movimento rimane comunque molto brutto da vedere poiché passa molto vicino alle pareti e sembra bloccarsi; nonostante ciò, è stato provato varie volte su ogni possibile capsula disponibile e si è preso atto della ripetibilità del movimento, senza che il robot vada mai ad urtare il piano di lavoro.

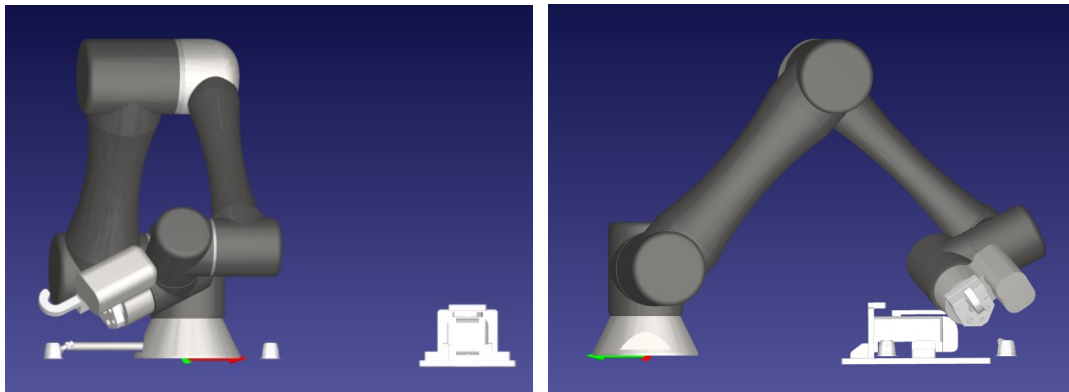


Figura 117, 118 Configurazione 1 per la presa nella zona 1 anteriore

Configurazione 2

La posizione dei giunti con id 2 si può subito scartare poiché, come spesso si notava nel caso della chiusura e dell'apertura, il giunto 3 entra in collisione con il piano inferiore ed inoltre il robot farebbe molta difficoltà ad uscire da questa configurazione per raggiungere ad esempio il primo punto dell'apertura. Oltre a ciò, il 4° asse è posto al di sotto del tool e come già detto questa situazione è fonte di scarto della configurazione.

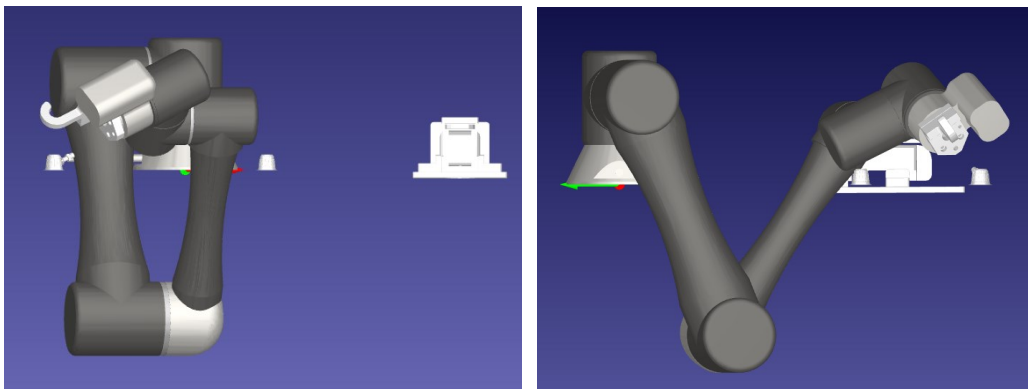


Figura 119, 120 Configurazione 2 per la presa nella zona 1 anteriore

Configurazione 3

Come per la configurazione con id 2 tale configurazione non può essere implementata dato che il robot ha una parte posta al di sotto del piano di lavoro.

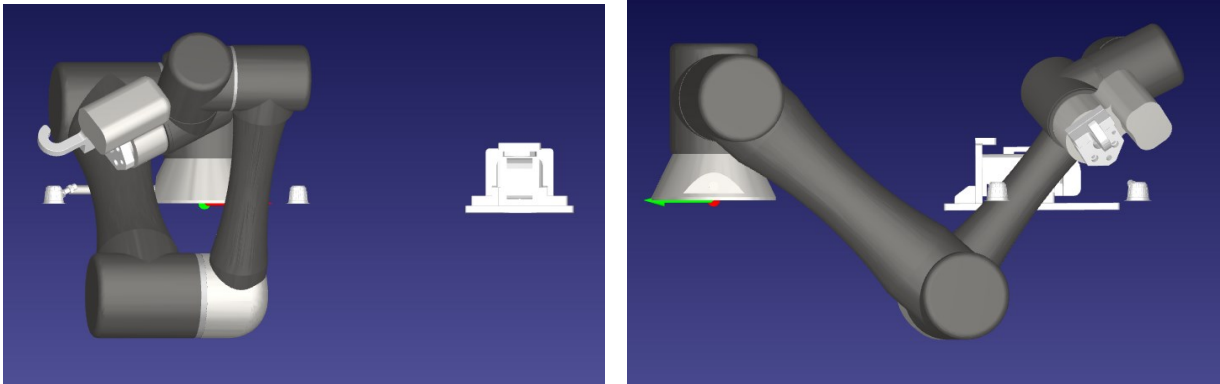


Figura 121, 122 Configurazione 3 per la presa nella zona 1 anteriore

Configurazione 4

Come per la configurazione con id 2 tale configurazione non può essere implementata dato che il robot ha una parte posta al di sotto del piano di lavoro. Inoltre, il 1° giunto è ruotato nella parte opposta rispetto a quella utilizzata nei vari punti del progetto.

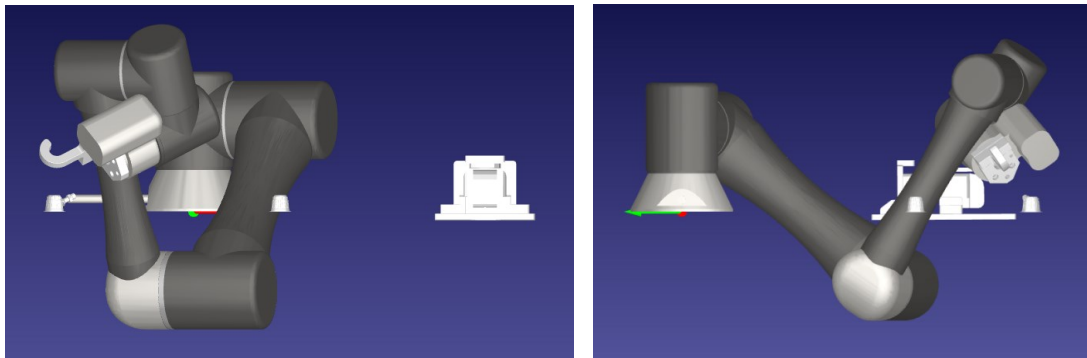


Figura 123, 124 Configurazione 4 per la presa nella zona 1 anteriore

Configurazione 5

Tale posizionamento dei giunti ha le stesse criticità dell'id 4, con in aggiunta il 4° asse posizionato al di sotto della ventosa.

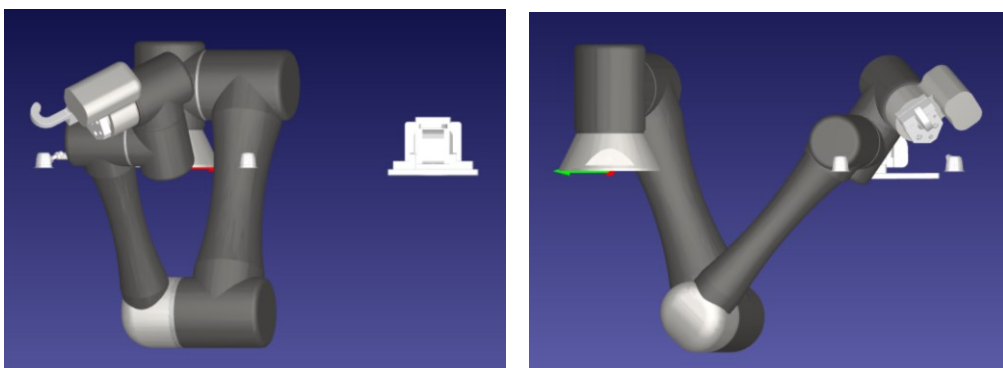


Figura 125, 126 Configurazione 5 per la presa nella zona 1 anteriore

Configurazione 6

Tale posizione dei giunti potrebbe essere implementata poiché non va a collidere con gli oggetti del banco e non rischia di schiacciare le capsule presenti sui vassoi. Non viene nel nostro caso utilizzata poiché come nel caso con id 5 il giunto 1 è posto nella parte opposta a quella utilizzata nel resto del programma.

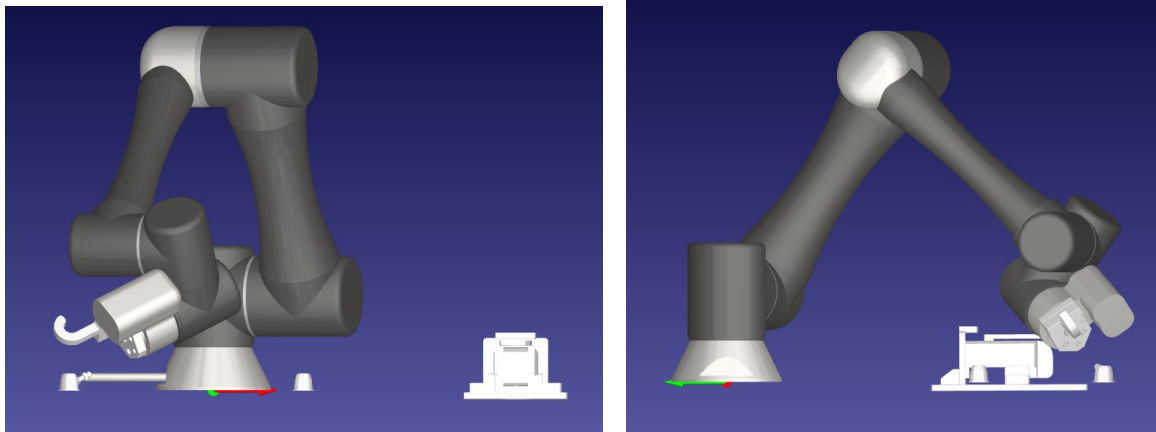


Figura 127, 128 Configurazione 6 per la presa nella zona 1 anteriore

Configurazione 7

Come per la posizione con id 0 questa configurazione non può essere considerata, risulta infatti avere le stesse problematiche. Inoltre, il 1° giunto è ruotato nella parte opposta rispetto a quella utilizzata nei vari punti del progetto.

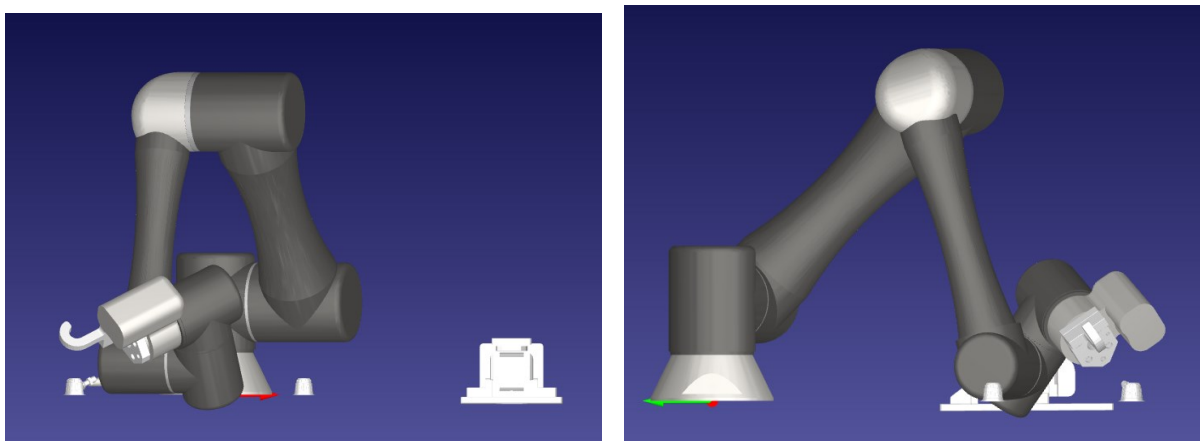


Figura 129, 130 Configurazione 7 per la presa nella zona 1 anteriore

■ Zona 1 posteriore

La parte posteriore del vassoio sinistro necessita di uno studio diverso dalla zona precedentemente descritta. Innanzitutto, l'orientamento del polso deve poter effettuare la presa laterale della capsula nello stesso punto e con la stessa inclinazione di quella anteriore. Anche se l'inclinazione è la stessa va considerata una presa leggermente obliqua rispetto al piano dei vassoi ma con un'angolazione diversa da quella utilizzata per le capsule anteriori. Nella foto sottostante si può visualizzare l'angolazione utilizzata per la presa delle capsule posteriori al vassoio.

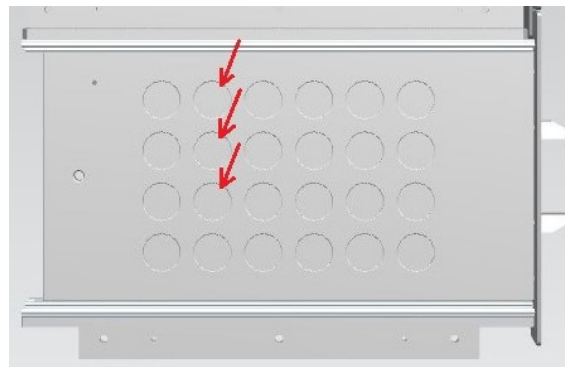


Figura 131 Direzione di presa zona 1 posteriore

Questa volta, a differenza della zona anteriore, si può utilizzare una linea più obliqua dato che non si rischia di schiacciare le capsule sul vassoio; questo poiché si presuppone che le capsule poste nella zona anteriore siano già state prese ed erogate visto che per la presa si segue un ordine prestabilito (dalla riga più lontana dal robot alla più vicina).

L'orientamento finale è stato scelto con dei valori rispetto alla base del tool pari a:

- $R_x = 128.2^\circ$
- $R_y = 49.3^\circ$
- $R_z = -108.9^\circ$

Si può notare come i valori di R_x e R_y siano molto simili a quelli utilizzati per la presa anteriore, mentre R_z vari molto. Questo è dovuto al fatto che l'angolo di presa della capsula debba essere lo stesso per un corretto inserimento nell'erogatore. Per risolvere i problemi di ingombro si è ruotato esclusivamente l'angolo rispetto alla base R_z .

Una volta definita la posizione e l'orientamento del punto di presa si è scelta la configurazione dei giunti che permetteva di rispettare i vincoli imposti. Nella tabella sottostante vengono mostrate le diverse configurazioni possibili. Si può notare come in totale sembrano apparentemente 10, in realtà quelle con id 4 e 6 vengono considerate due volte con il giunto 6 ruotato di 360° . Sono dunque 8 le combinazioni da analizzare.

Target 2 presa: Configurazioni Robot (Omron TM5-900)

Fronte/Retro: Fronte Retro Entrambi

Elbow up/down: Elbow Up Elbow Down Entrambi

Flip/non-Flip: Non-Flip Flip Entrambi

Mostra tutto

Raccomandate

Config. id 0,1,2,3,4,5,6,7

Mostro: 10 / 10 configurations

id	F/R	U/D	F/N	J1	J2	J3	J4	J5	J6
1	0	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	-84.1	29.9	105.7	16.2	58.9	108.6
2	4	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	70.9	-139.3	83.1	97.1	141.9	-90.3
3	7	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	70.9	-29.4	-109.3	-0.3	-141.9	89.7
4	6	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	70.9	-58.3	-83.1	-177.6	141.9	-90.3
5	1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	-84.1	58.2	86.6	-172.9	-58.9	-71.4
6	5	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	70.9	-135.3	109.3	-113.1	-141.9	89.7
7	3	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	-84.1	142.5	-86.6	-84.1	-58.9	-71.4
8	2	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	-84.1	132.4	-105.7	125.2	58.9	108.6
9	4	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	70.9	-139.3	83.1	97.1	141.9	269.7
10	6	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	70.9	-58.3	-83.1	-177.6	141.9	269.7

Ok Cancell

Figura 132 Configurazioni possibili per la presa nella zona 1 posteriore

In questo paragrafo non verranno analizzare le configurazioni con id 4, 5, 6 e 7 poiché come spesso ripetuto in questo testo il 1° giunto è ruotato nella parte opposta rispetto a quella utilizzata nei vari punti del progetto. Anche le configurazioni con id 2 e 3 non verranno analizzate nel dettaglio poiché entrambe posizionano una parte del robot al di sotto del piano di lavoro e se esse fossero prese in considerazione il robot andrebbe a collidere con i vassoi.

Configurazione 0

Questa configurazione permette di eseguire un movimento di presa sicuro, senza il rischio di collidere con una delle pareti o con il robot stesso. Ciò è reso possibile soprattutto dal giunto 4 che è posizionato nella parte alta, al di sopra del tool. Anche i movimenti di entrata e uscita dal punto possono essere eseguiti facilmente senza che i bracci del robot compiano movimenti articolati. Una problematica è l'estrema vicinanza di alcune capsule con la base del robot, ma grazie a numerose prove si è visto che con questo posizionamento non si rischiano di urtare gli oggetti del banco.

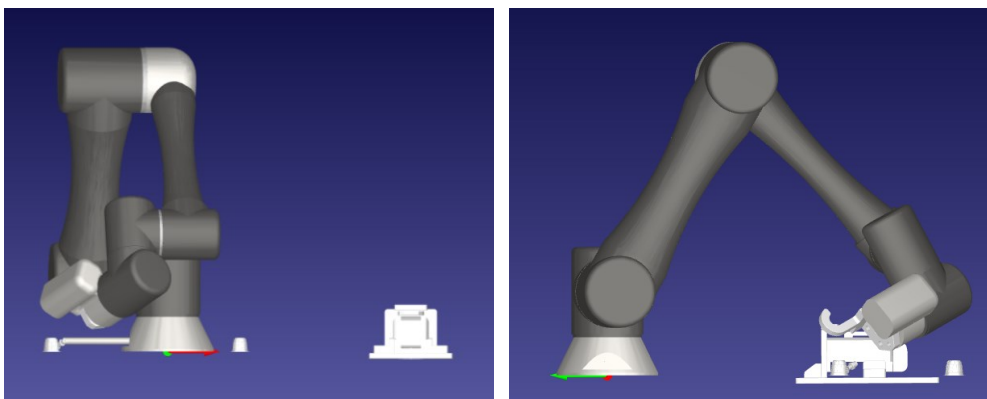


Figura 133, 134 Configurazione 0 per la presa nella zona 1 posteriore

Configurazione 1

A differenza della configurazione precedente il 4° asse è posizionato al di sotto del punto di presa facendo sì che, durante l'abbassamento, il robot vada a collidere con i vassoi o con le guide lineari dei cassetti. Tale configurazione non può essere presa in considerazione per questa applicazione.

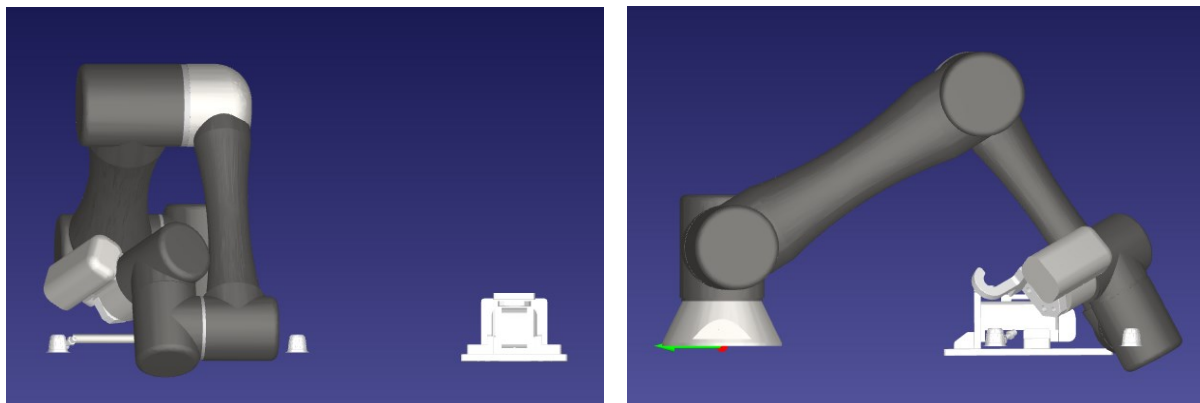


Figura 135, 136 Configurazione 1 per la presa nella zona 1 posteriore

Configurazione 2

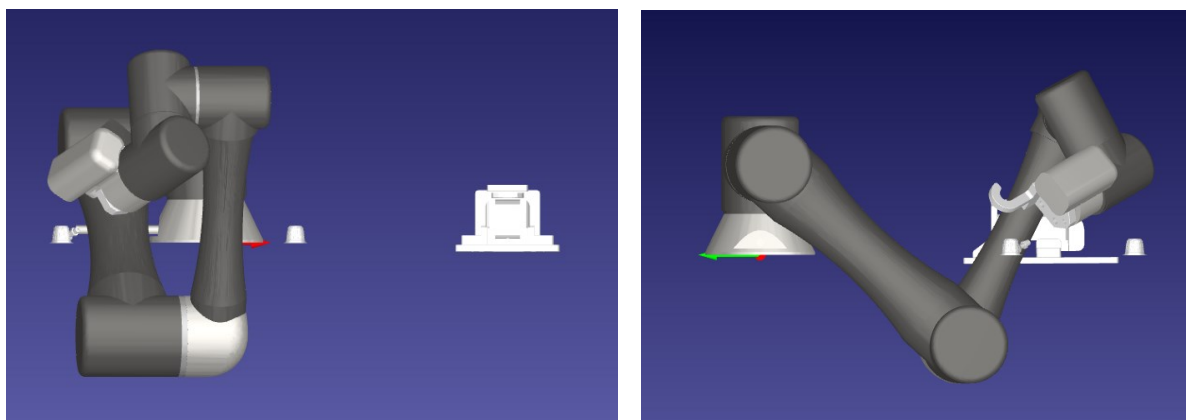


Figura 137, 138 Configurazione 2 per la presa nella zona 1 posteriore

Configurazione 3

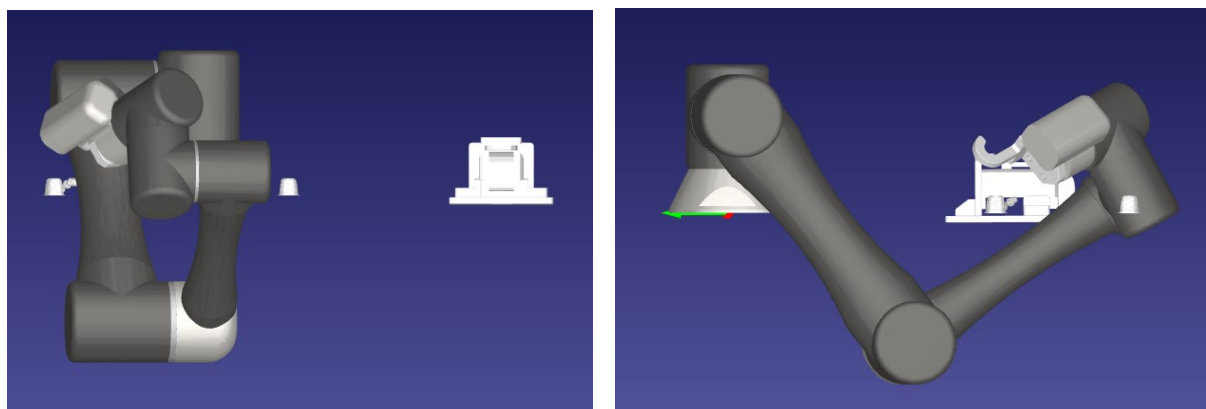


Figura 139, 140 Configurazione 3 per la presa nella zona 1 posteriore

Configurazione 4

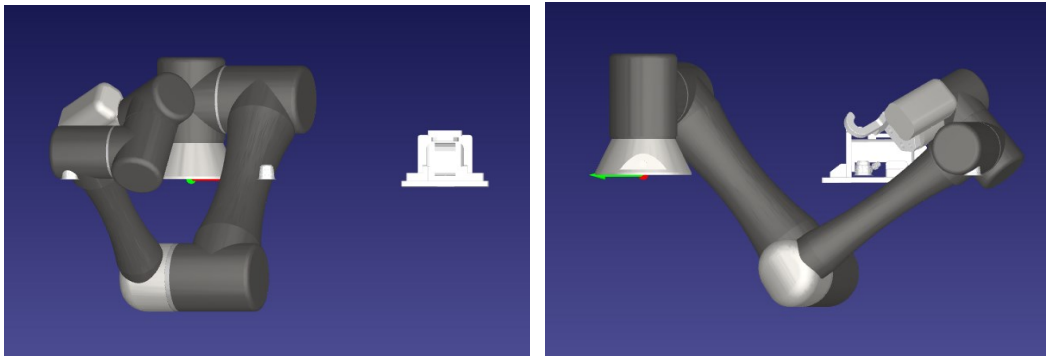


Figura 141, 142 Configurazione 4 per la presa nella zona 1 posteriore

Configurazione 5

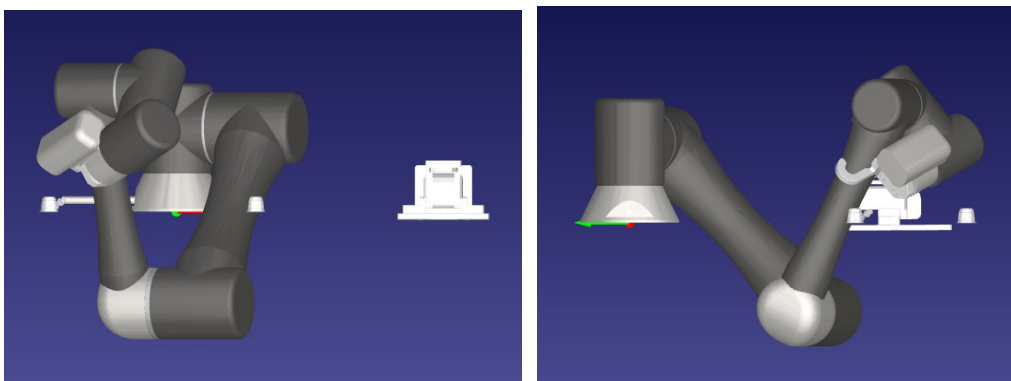


Figura 143, 144 Configurazione 5 per la presa nella zona 1 posteriore

Configurazione 6

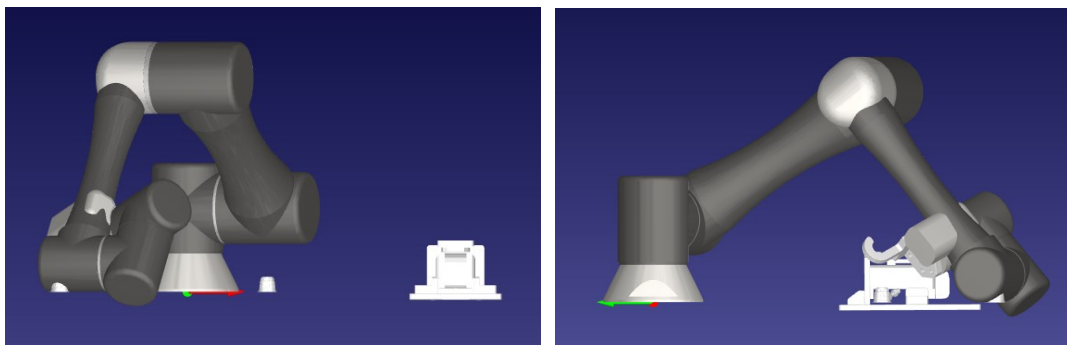


Figura 145, 146 Configurazione 6 per la presa nella zona 1 posteriore

Configurazione 7

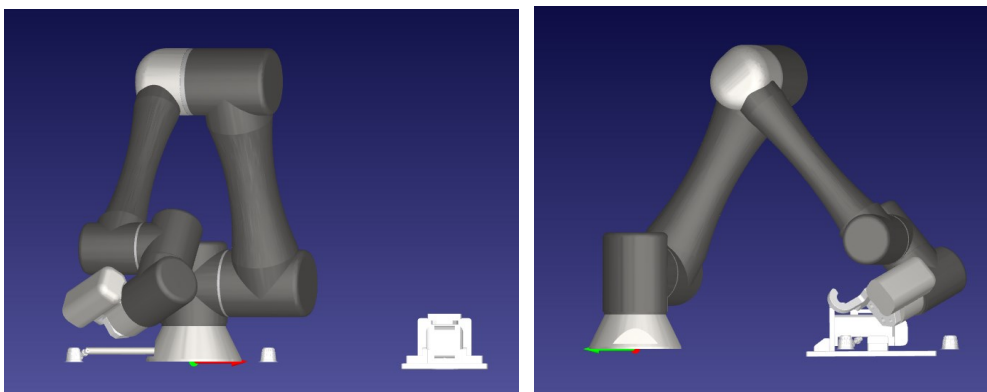


Figura 147, 148 Configurazione 7 per la presa nella zona 1 posteriore

■ Zona 2 anteriore

La parte anteriore del vassoio destro necessita di uno studio diverso da quello sinistro in quanto ci si allontana dalla base del robot e cambiano gli oggetti con cui si rischia di collidere, ad esempio in questo caso si è molto vicini alla macchinetta del caffè. Per quanto riguarda l'orientamento del tool e l'inclinazione lungo il piano del vassoio si è semplicemente ripreso quello utilizzato per il vassoio sinistro dato che le condizioni di presa erano praticamente le stesse. Si è invece fatta particolare attenzione alla configurazione da implementare.

Una volta definita la posizione e l'orientamento del punto di presa si è scelta la configurazione dei giunti che permettesse di rispettare i vincoli imposti. Nella tabella sottostante vengono mostrate le diverse configurazioni possibili. Si può notare come in totale sembrano apparentemente 12, in realtà quelle con id 1, 3, 4 e 6 vengono considerate due volte con il giunto 6 ruotato di 360°. Sono dunque 8 le combinazioni da analizzare.

Target 3 presa: Configurazioni Robot (Omron TM5-900)

Fronte/Retro

Fronte

Retro

Entrambi

Elbow up/down

Elbow Up

Elbow Down

Entrambi

Flip/non-Flip

Non-Flip

Flip

Entrambi

Mostra tutto

Raccomandate

Config. id

Mostro: 12 / 12 configurations

	id	F/R	U/D	F/N	J1	J2	J3	J4	J5	J6
1	0	●	●	●	-47.6	33.8	98.6	-3.4	41.9	82.5
2	4	○	●	●	110.3	-119.9	59.6	138.4	148.0	-131.1
3	7	○	○	○	110.3	-36.2	-103.3	37.5	-148.0	48.9
4	6	○	○	●	110.3	-61.7	-59.6	-160.6	148.0	-131.1
5	1	●	●	○	-47.6	62.9	64.7	-178.5	-41.9	-97.5
6	5	○	●	○	110.3	-136.3	103.3	-68.8	-148.0	48.9
7	3	●	○	○	-47.6	126.0	-64.7	-112.2	-41.9	-97.5
8	2	●	○	●	-47.6	129.6	-98.6	98.1	41.9	82.5
9	4	○	●	●	110.3	-119.9	59.6	138.4	148.0	228.9
10	6	○	○	●	110.3	-61.7	-59.6	-160.6	148.0	228.9
11	1	●	●	○	-47.6	62.9	64.7	-178.5	-41.9	262.5
12	3	●	○	○	-47.6	126.0	-64.7	-112.2	-41.9	262.5

Ok

Cancel

Figura 149 Configurazioni possibili per la presa nella zona 2 anteriore

In questo paragrafo non verranno analizzare le configurazioni con id 4, 5, 6 e 7 poiché come spesso ripetuto in questo testo il 1° giunto è ruotato nella parte opposta rispetto a quella utilizzata nei vari punti del progetto. Anche le configurazioni con id 2 e 3 non verranno analizzate nel dettaglio poiché entrambe posizionano una parte del robot al di sotto del piano di lavoro e se esse fossero prese in considerazione il robot andrebbe a collidere con i vassoi.

Configurazione 0

Questa configurazione è quella che alla fine è stata applicata per la presa delle capsule anteriori del vassoio destro. Come precedentemente detto questa posizione è accettabile poiché pone il 4° asse al di sopra del tool consentendo di non collidere con il vassoio durante le movimentazioni. La macchinetta del caffè nonostante sia molto vicina al braccio del robot non dà particolare fastidio alle movimentazioni; difatti sia durante l'avvicinamento alla presa sia durante l'allontanamento si rimane sempre ad una distanza adeguata. Ovviamente gli altri punti di passaggio sono stati scelti considerando tutte le possibilità di movimento e in caso adattati per evitare eventuali urti.

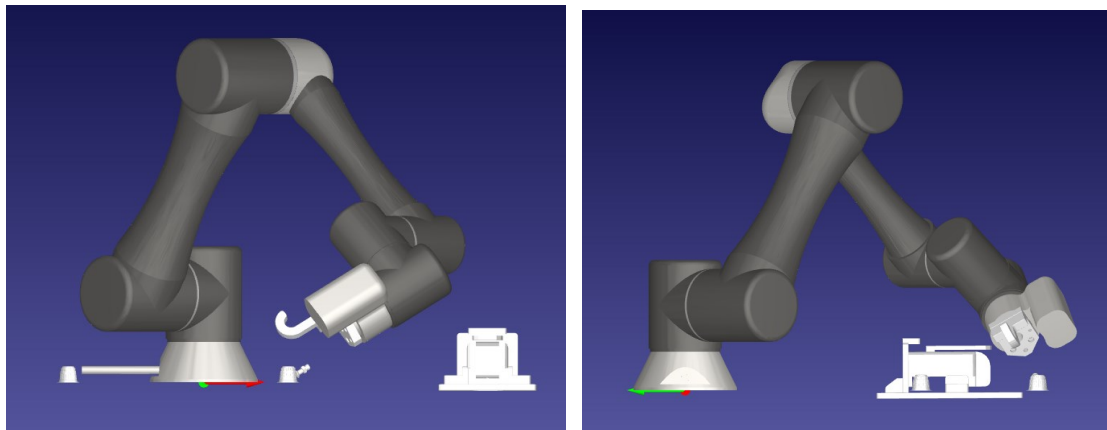


Figura 150, 151 Configurazione 0 per la presa nella zona 2 anteriore

Configurazione 1

Tale posizionamento dei giunti poteva essere implementato poiché non rischia di collidere con i vassoi e, anche se si avvicina molto, non tocca con le pareti. Il motivo per cui viene scartato è la presenza della macchinetta del caffè; come si può vedere dalle immagini sottostanti, in questa particolare configurazione tutto il polso del robot rimane molto basso e va a collidere con la macchinetta. Una soluzione poteva essere quella di far spostare l'erogatore di almeno 20 cm ma poi il robot avrebbe fatto molta fatica a raggiungere la posizione di chiusura ed apertura.

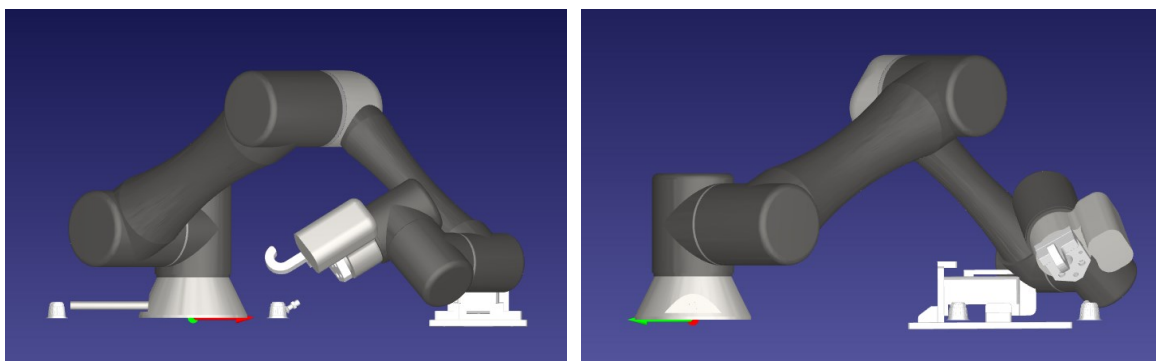


Figura 152, 153 Configurazione 1 per la presa nella zona 2 anteriore

Configurazione 2

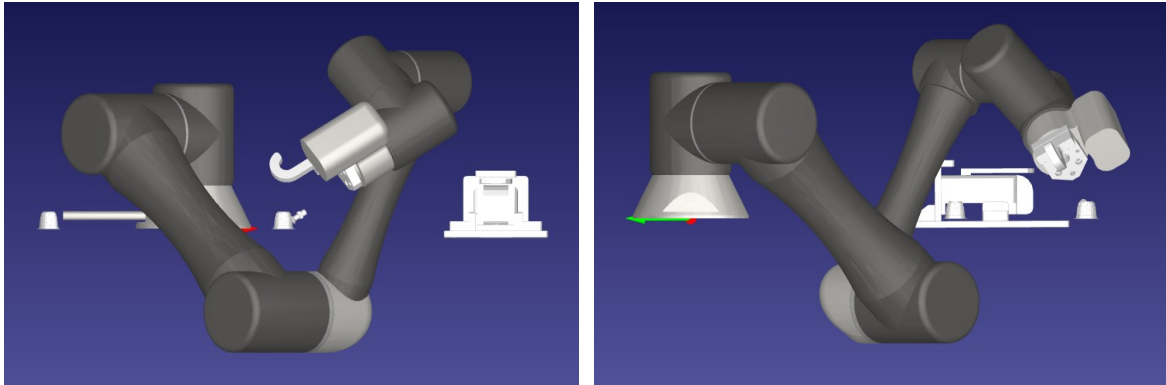


Figura 154, 155 Configurazione 2 per la presa nella zona 2 anteriore

Configurazione 3

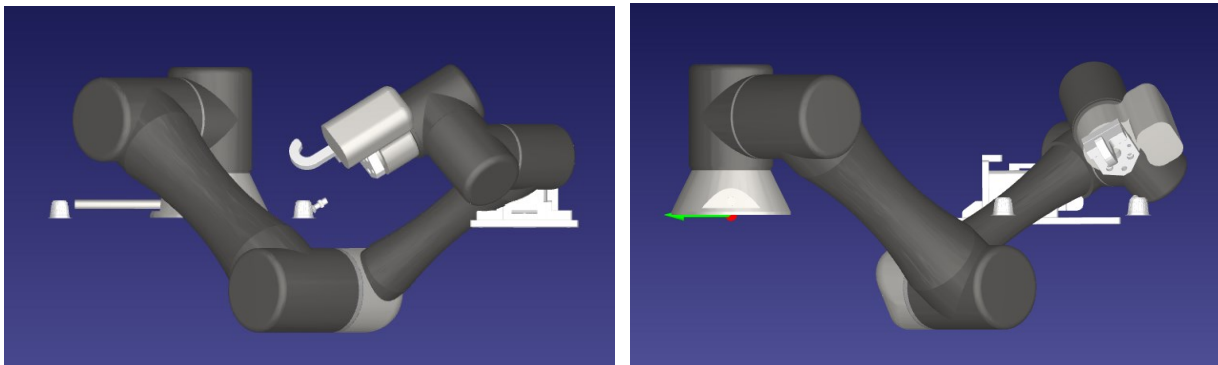


Figura 156, 157 Configurazione 3 per la presa nella zona 2 anteriore

Configurazione 4

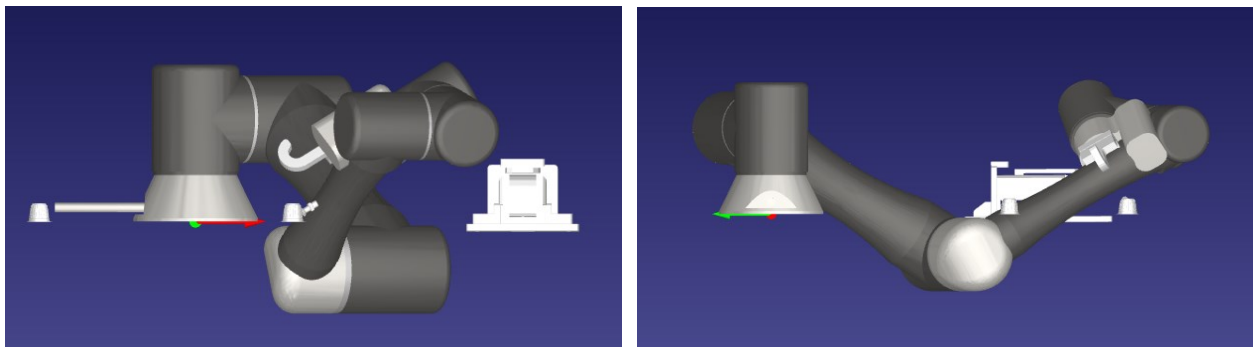


Figura 158, 159 Configurazione 4 per la presa nella zona 2 anteriore

Configurazione 5

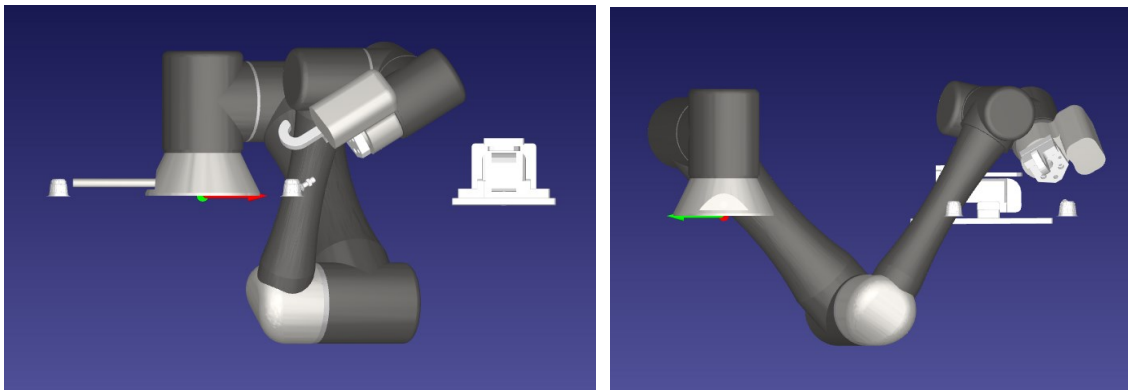


Figura 160, 161 Configurazione 5 per la presa nella zona 2 anteriore

Configurazione 6

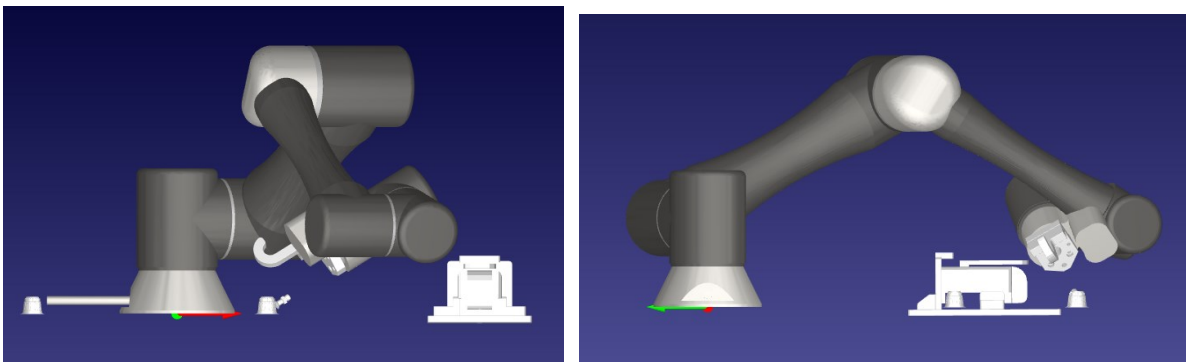


Figura 162, 163 Configurazione 6 per la presa nella zona 2 anteriore

Configurazione 7

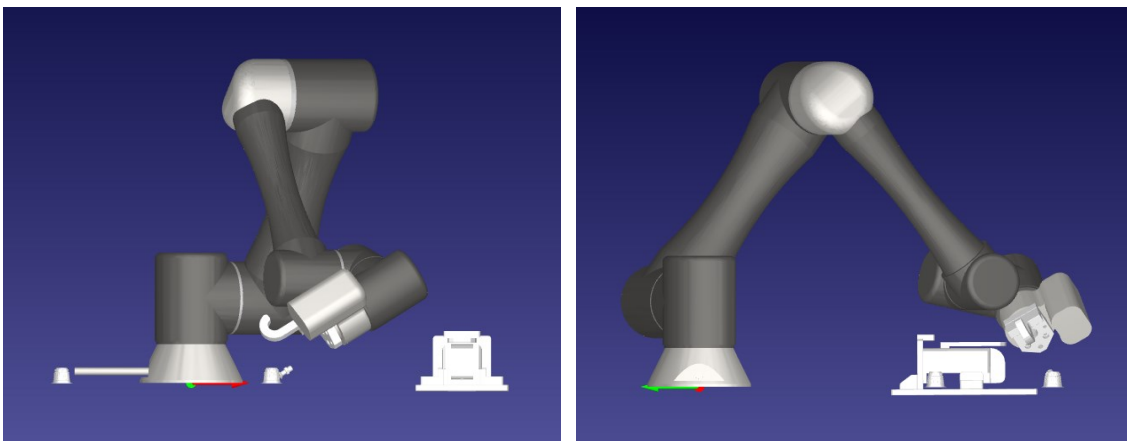


Figura 164, 165 Configurazione 7 per la presa nella zona 2 anteriore

■ Zona 2 posteriore

La parte posteriore del vassoio destro è stata trattata praticamente allo stesso modo della sua controparte sinistra facendo però più attenzione alla presenza della macchinetta del caffè. Per quanto riguarda l'orientamento del tool e l'inclinazione lungo il piano del vassoio si è semplicemente ripreso quello utilizzato per il vassoio sinistro dato che le condizioni di presa erano praticamente le stesse.

Una volta definita la posizione e l'orientamento del punto di presa si è scelta la configurazione dei giunti che permetteva di rispettare i vincoli imposti. Nella tabella sottostante vengono mostrate le diverse configurazioni possibili. Si può notare come siano 8 le combinazioni da analizzare.

Target 4 presa: Configurazioni Robot (Omron TM5-900)

Fronte/Retro

Fronte

Retro

Entrambi

Elbow up/down

Elbow Up

Elbow Down

Entrambi

Flip/non-Flip

Non-Flip

Flip

Entrambi

Mostra tutto

Raccomandate

Config. id

Mostro: 8 / 8 configurations

id	F/R	U/D	F/N	J1	J2	J3	J4	J5	J6
1	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	106.9	-126.9	92.2	-119.6	-111.3	114.1
2	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	106.9	-134.7	72.2	88.2	111.3	-65.9
3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	106.9	-37.3	-92.2	-24.8	-111.3	114.1
4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	106.9	-64.3	-72.2	162.2	111.3	-65.9
5	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	-50.9	64.1	72.8	-160.8	-88.9	-56.4
6	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	-50.9	37.5	91.5	27.1	88.9	123.6
7	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	-50.9	135.2	-72.8	-86.2	-88.9	-56.4
8	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	-50.9	126.5	-91.5	121.2	88.9	123.6

Ok
Cancella

Figura 166 Configurazioni possibili per la presa nella zona 2 posteriore

In questo paragrafo non verranno analizzare le configurazioni con id 4, 5, 6 e 7 poiché come spesso ripetuto in questo testo il 1° giunto è ruotato nella parte opposta rispetto a quella utilizzata nei vari punti del progetto. Anche le configurazioni con id 2 e 3 non verranno analizzate nel dettaglio poiché entrambe posizionano una parte del robot al di sotto del piano di lavoro e se esse fossero prese in considerazione il robot andrebbe a collidere con i vassoi.

Configurazione 0

Questa configurazione permette di eseguire un movimento di presa sicuro, senza il rischio di collidere con una delle pareti o con il robot stesso. Ciò è reso possibile soprattutto dal giunto 4 che è posizionato nella parte alta, al di sopra del tool. Anche i movimenti di entrata e uscita dal punto possono essere eseguiti facilmente senza che i bracci del robot compiano movimenti articolati. Una problematica è la presenza della macchinetta del caffè che non viene però urtata in nessun modo durante i movimenti.

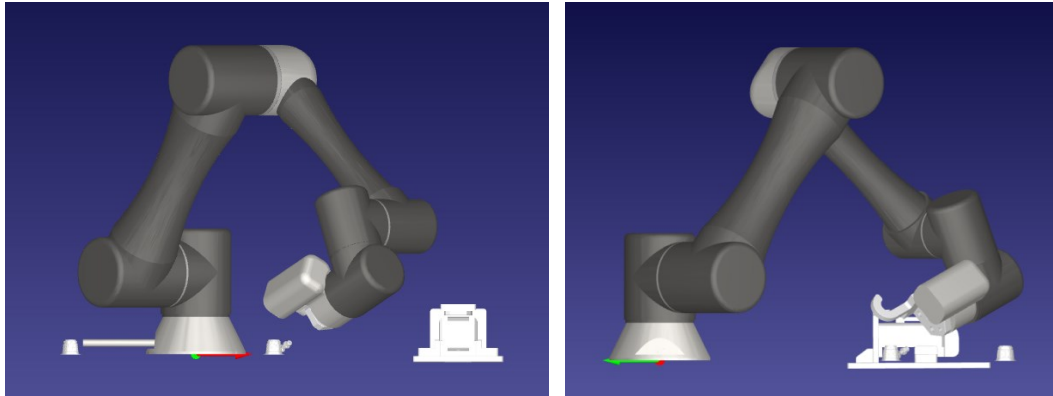


Figura 167, 168 Configurazione 0 per la presa nella zona 2 posteriore

Configurazione 1

A differenza della configurazione precedente il 4° asse è posizionato al di sotto del punto di presa facendo sì che, durante l'abbassamento, il robot vada a collidere con i vassoi o con le guide lineari dei cassetti. Ancora più importante è il fatto che, essendo tutto il polso molto in basso, il robot va ad urtare la macchinetta, come si può anche vedere dalle immagini sottostanti. Tale configurazione non può essere presa in considerazione per questa applicazione.

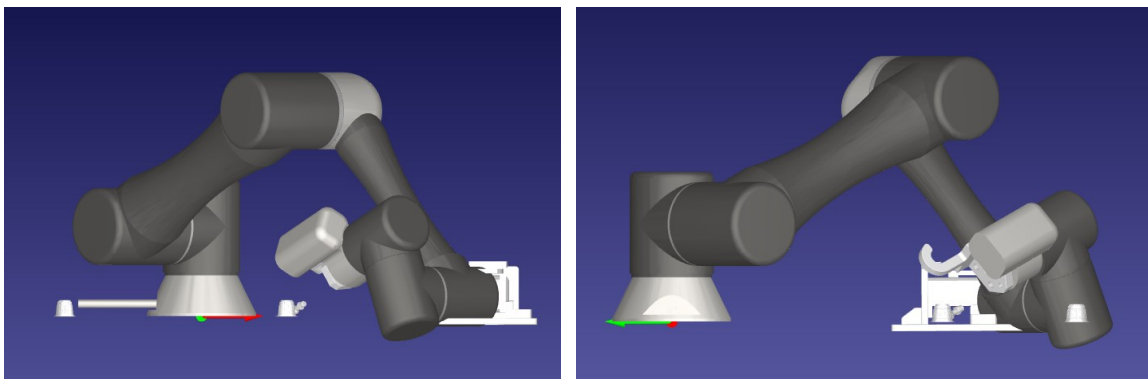


Figura 169, 170 Configurazione 1 per la presa nella zona 2 posteriore

Configurazione 2

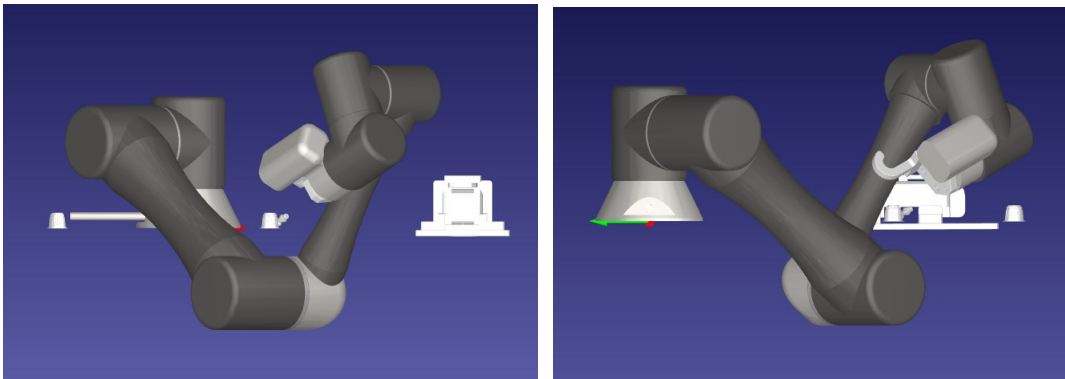


Figura 171, 172 Configurazione 2 per la presa nella zona 2 posteriore

Configurazione 3

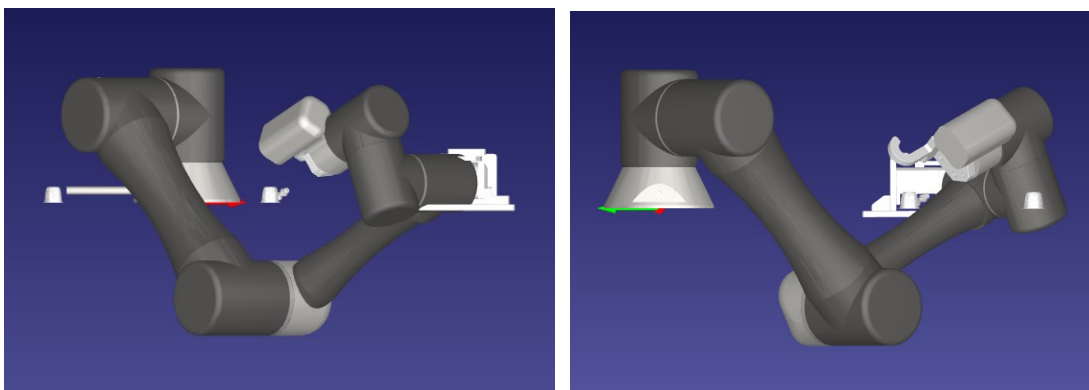


Figura 173, 174 Configurazione 3 per la presa nella zona 2 posteriore

Configurazione 4

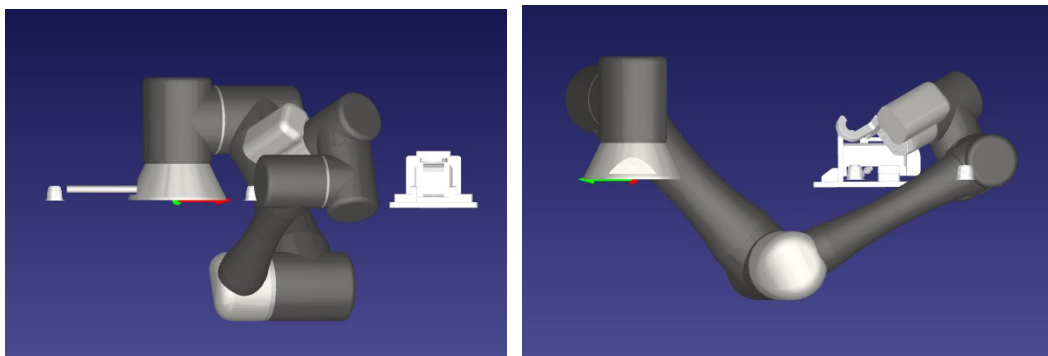


Figura 175, 176 Configurazione 4 per la presa nella zona 2 posteriore

Configurazione 5

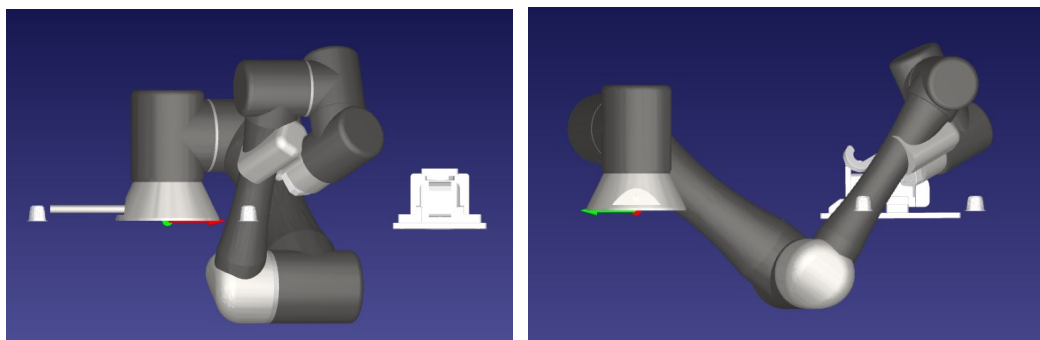


Figura 177, 178 Configurazione 5 per la presa nella zona 2 posteriore

Configurazione 6

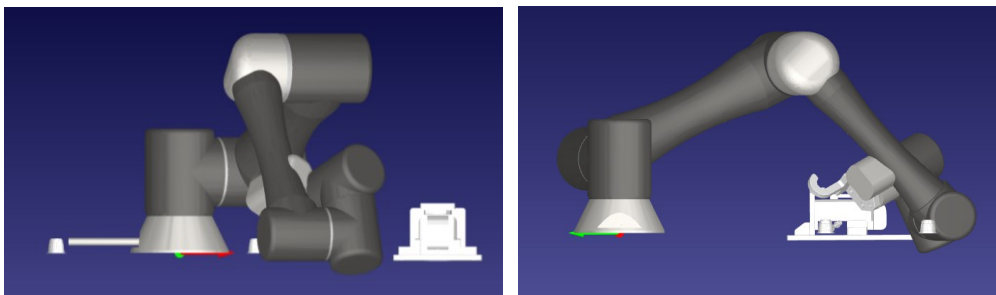


Figura 179, 180 Configurazione 6 per la presa nella zona 2 posteriore

Configurazione 7

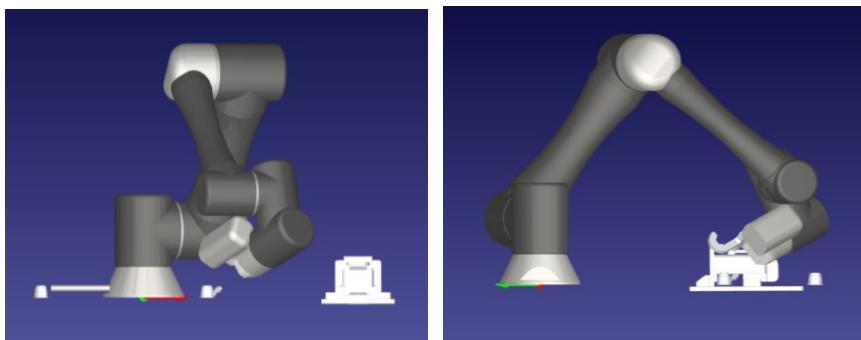


Figura 181, 182 Configurazione 7 per la presa nella zona 2 posteriore

■ Configurazioni definitive di presa

Riassumendo le 4 configurazioni scelte per il programma di presa sono praticamente le stesse per quanto riguarda le zone posteriori dei vassoi mentre si è dovuto differenziare notevolmente tra zona anteriore sinistra e destra con particolare attenzione ai punti di passaggio.

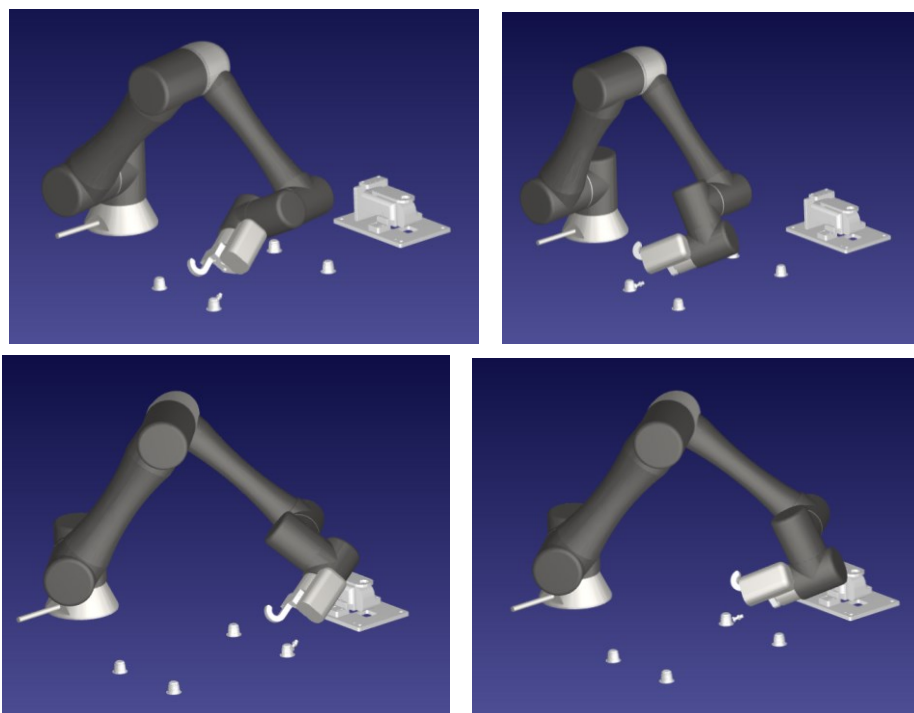


Figura 183, 184, 185, 186 Configurazioni definitive scelte per la presa (sopra: 1 anteriore e posteriore, sotto: 2 anteriore e posteriore)

9. RICONOSCIMENTO 2D CAPSULE

Per il riconoscimento delle capsule si è deciso di utilizzare la telecamera 2D integrata nel Cobot. Essa è dotata di un software in cui è possibile modificare l'immagine acquisita tramite dei filtri ed effettuare una ricerca in una zona specificata in base a forma e colore; ultimato l'algoritmo è possibile ricevere in output delle variabili come le coordinate dell'oggetto individuato (x , y , Rz) e il numero di oggetti trovati. Quest'ultima caratteristica è stata utilizzata per individuare le capsule presenti sul vassoio. Esistono comunque alcune limitazioni per cui si è dovuto ricorrere ad una suddivisione in zone. Innanzitutto, non è possibile ricercare un numero elevato di oggetti o ricercare il singolo oggetto in più di tre zone. Non è inoltre possibile applicare una stessa tipologia di filtro per più volte nello stesso algoritmo. Infine, il numero totale di filtri utilizzati non può essere superiore a cinque. Detto ciò, per avere un'elevata precisione ed individuare la presenza delle 24 capsule disposte sul vassoio, si è deciso di suddividere l'area di scansione in tre parti. Nell'immagine sottostante si può notare come è stato suddiviso il vassoio.

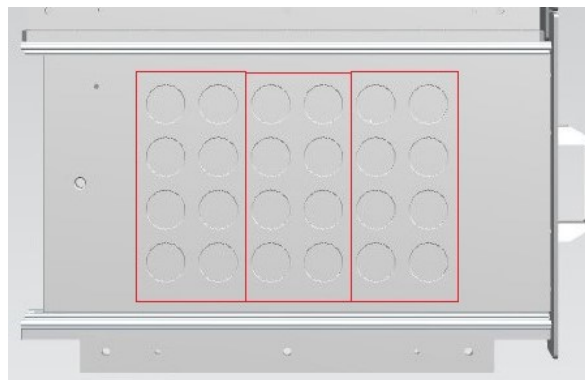


Figura 187 Divisione del vassoio in zone

Questa decisione è principalmente dovuta al fatto che per scattare un'unica foto di tutto il vassoio è necessario posizionarsi ad un'altezza notevole ed i bordi dell'immagine acquisita risultano distorti, non permettendo una ricerca accurata. Nell'immagine sottostante è possibile notare come, ai bordi, il cerchio superiore della capsula non sia allineato con il bordo inferiore. Il caso peggiore si ha nei quattro vertici del vassoio.



Figura 188 Distorsione dell'immagine rilevata dalla camera 2D

Una volta posizionato il robot in posizione ed acquisito l'immagine di una singola zona non è comunque possibile determinare con precisione la presenza della singola capsula poiché l'algoritmo prevede la possibilità di effettuare una ricerca di massimo 3 elementi (nel nostro caso sono invece 8). Una soluzione è quella di individuare gli elementi e trasmettere come output direttamente le coordinate x e y invece che il solo dato che ne conferma (1) o meno (0) la presenza. Ciò sarebbe possibile con tutti gli 8 oggetti ma non sarebbe possibile sapere con precisione dove non è stata posizionata la capsula (ciò è fondamentale per il programma di grafica che permette di comunicare all'operatore l'esatta posizione delle capsule). Inoltre, le coordinate individuate risultano essere precise solamente lungo la perpendicolare all'occhio della telecamera e peggiorano andando verso i bordi; nonostante l'errore sia di qualche millimetro non permette di effettuare una presa precisa dell'oggetto.

Dato che le capsule sono posizionate su delle posizioni fisse è stato scelto di effettuare una ricerca della singola capsula nella singola zona. Si è quindi suddivisa ulteriormente la singola zona per poter effettuare 3 scatti consecutivi, senza però cambiare la posizione d'acquisizione. Nell'immagine sottostante si può notare come sono state divise le zone prendendo come esempio il primo blocco a sinistra. Per gli altri due blocchi si è usata la stessa configurazione ed inoltre gli stessi algoritmi di visione dato che nel programma è stato creato un ciclo che compie tre scatti da tre posizioni diverse per un totale di 9 immagini acquisite.

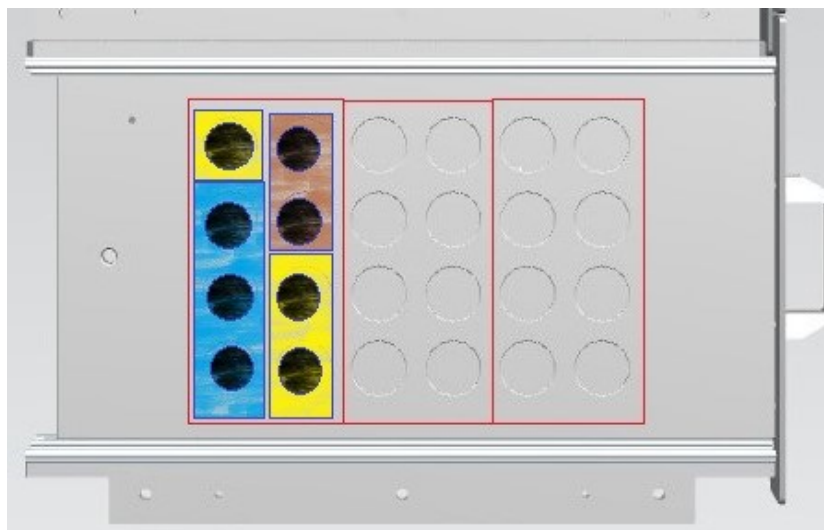


Figura 189 Suddivisione della singola zona

La prima zona colorata in blu permette di individuare le prime tre capsule, la seconda in giallo le successive tre e l'ultima in marrone le ultime due. Gli algoritmi di visione per le tre zone applicano gli stessi filtri e le stesse impostazioni di base. Per l'analisi dei filtri utilizzati verrà preso come riferimento la zona blu del primo blocco a sinistra.

Un'altra limitazione questa volta pratica è data dalle tipologie di capsule utilizzate che risultano essere diverse tra di loro in forma e colore. Non è quindi possibile definire un unico algoritmo di visione che permetta di individuare ogni genere di capsula. In un singolo lotto è presente un'unica tipologia e quindi le 24 capsule presenti contemporaneamente sul vassoio saranno identiche; questa è una semplificazione al programma poiché non è necessario effettuare tutti gli algoritmi durante lo stesso lotto di produzione ma sarà l'operatore ad inserire manualmente la tipologia di capsula studiata. È comunque necessario salvare all'interno del programma tutti gli algoritmi di visione che verranno poi selezionati tramite una variabile inviata tramite modbus dal PLC.

Sono state studiate 4 tipologie di capsule che si possono notare nell'immagine sottostante:



Figura 190 Tipologie di capsule utilizzate

- Gialle/Rosse → Queste due tipologie sono state individuate tramite lo stesso algoritmo poiché hanno la stessa forma e un colore chiaro facilmente gestibile.
- Nere → Per questa tipologia sono stati utilizzati dei filtri completamente diversi dai precedenti poiché il colore analizzato è molto scuro e la forma completamente diversa.
- Blu → Questa tipologia di capsule è stata individuata tramite un algoritmo molto simile a quello del nero dato che la forma è la stessa ed il colore simile, la differenza principale è data dai valori impostati ai filtri che permettono di estrarre il blu e trasformarlo in nero.

9.1. Capsule gialle/rosse

Per la tipologia di capsule gialle e rosse si è usata la funzione di posizionamento fisso. Essa è progettata per avere un'area di posizionamento degli oggetti ed un'altezza preimpostata. Innanzitutto, è stata effettuata la calibrazione ponendo la piastra di calibrazione TM alla stessa altezza a cui successivamente saranno posti gli oggetti da individuare. Per fare ciò è necessario mettere a fuoco l'obiettivo della telecamera in modo da individuare al meglio i vari indicatori dalla piastra e ottenere un'elevata precisione. Una volta avviata la procedura il robot inizia a muoversi in modo da raggiungere con la telecamera tutti i punti della piastra. Nelle condizioni utilizzate l'accuratezza ottenuta è risultata pari a 0.05 mm.

Il passo successivo alla calibrazione consiste nell'inizializzare la telecamera. Vengono quindi inseriti i valori ottimali di illuminazione, chiusura dell'otturatore, guadagno, bilanciamento del bianco e messa a fuoco.

Per l'**illuminazione** è presente una torcia sul polso del robot coassiale alla telecamera integrata. È possibile variare l'illuminazione in una scala che va da 1 (nero) a 200 (illuminazione massima). Nel nostro caso le condizioni ambientali estremamente variabili non permettono di avere un'illuminazione costante. Durante le ore del giorno si può avere una luce diretta molto elevata (naturale o artificiale) o una lieve luce diffusa. Ciò dipende principalmente dal luogo in cui verrà deciso di montare il banco di lavoro in cui non si può escludere la presenza di vetrate, che permettano alle condizioni ambientali di influenzare la visione, o di luce interna molto intensa, come spesso avviene nei magazzini industriali. Per evitare ogni tipo di situazione non prevista, e valutando tale opzione dopo molte prove non soddisfacenti, si è deciso di accendere la torcia al massimo ponendo il valore di illuminazione a 200.

Tale espediente ha comunque degli svantaggi quali un elevato riflesso sul vassoio metallico che tende a creare un alone di luce sull'immagine. Va sottolineato che tale situazione si è presentata anche a luce spenta con Sole diretto proveniente dalla finestra del magazzino. Per ovviare a tale fenomeno si è scelto di far verniciare i vassoi di un colore grigio opaco che avrebbe facilitato l'analisi delle immagini. Si è così ottenuta un'immagine molto più pulita ma che necessitava comunque di alcune accortezze per ottimizzare il tutto.

Un altro parametro che si è deciso di variare è quello relativo al **tempo di apertura dell'otturatore**. Qualsiasi macchina fotografica si basa sul principio fondamentale di consentire il passaggio controllato della luce che va a colpire un elemento fotosensibile, la pellicola oppure il sensore, creando così una copia dell'immagine inquadrata dall'obiettivo. Tale controllo è affidato a un dispositivo meccanico oppure elettronico denominato otturatore che blocca il passaggio della luce fino al momento dello scatto e lo abilita per un periodo di tempo ben definito, che dipende dalla quantità di luce disponibile e dalla

sensibilità del sensore. Il periodo di apertura dell'otturatore prende il nome di "tempo di posa" e la sua lunghezza è direttamente proporzionale alla quantità di luce che colpisce il sensore. Un tempo doppio ci darà il doppio della luce e perciò un'immagine molto più chiara, viceversa per un tempo di posa dimezzato. Qualunque sia il sistema adottato, quando premiamo il tasto di scatto, stiamo comandando l'apertura dell'otturatore che si richiude automaticamente dopo aver lasciato trascorrere un tempo brevissimo, calcolato dalla fotocamera oppure impostabile manualmente. La corretta combinazione tra quantità di luce e tempo di posa produce un'immagine naturale, dove i colori e le loro densità sono vicine all'originale visibile a occhio nudo. Il tempo di posa è perciò essenziale per controllare l'esposizione (la quantità di luce che arriva al sensore), oltre che per catturare oggetti in movimento. I valori che si trovano sulla maggior parte delle fotocamere in circolazione vanno da 1/250 di secondo a 1/15 di secondo. Tuttavia, per bloccare alcune azioni particolarmente rapide, è necessario spingersi fino al millesimo di secondo e oltre; mentre nelle foto notturne può capitare di fissare la posa per diversi secondi. Poiché è difficile visualizzare le frazioni sul display delle fotocamere si riporta solamente il denominatore (vale a dire 8 per indicare 1/8 di secondo).

Nel nostro caso è stato impostato un valore pari a 5000 (1/5000 s), ovvero una condizione in cui l'otturatore rimane aperto per un tempo molto breve permettendo l'entrata di una piccola quantità di luce.

Proseguendo con i parametri disponibili si è scelto di impostare la **messa a fuoco** a 7, ovvero lo stesso valore utilizzato per la calibrazione. Tale valore è stato scelto automaticamente dal software, regolando la distanza tra le lenti dell'obiettivo e il sensore della fotocamera in modo che il soggetto prescelto risulti ben nitido sul sensore, ed è risultato adatto alla nostra applicazione.

Sempre nell'inizializzazione è presente l'opzione per modificare il **bilanciamento del bianco**. Esso è il processo grazie al quale è possibile correggere eventuali dominanti di colore di una fotografia in modo da rendere più corretta possibile la riproduzione delle tonalità catturate dal sensore della fotocamera digitale. Una fotocamera con un bilanciamento del bianco non correttamente impostato interpreterà il colore in modo diverso in base alla "temperatura" della luce che lo illumina. Una luce con un'elevata temperatura del colore è una luce tendente al blu (luce fredda), mentre una luce con una bassa temperatura del colore sarà tendente al rosso e di conseguenza verrà chiamata "calda". La luce neutra (sulla quale si basa la scala) è quella che troviamo solitamente durante una giornata soleggiata che ha una temperatura di circa 5000 gradi Kelvin. Nel programma della telecamera integrata è possibile modificare tre valori che non vengono però descritti dal manuale. Attraverso varie prove si è visto che la foto appariva più realistica nelle tonalità impostando come valori 70, 1 e 77.

Un altro valore modificato è il guadagno. Durante la digitalizzazione il segnale viene moltiplicato/diviso per un certo coefficiente detto **guadagno della camera (G)** e misurato in elettroni (e-) per ADU. Quindi il numero di ADU in uscita dalla nostra camera andrà da 0 a N/G . Ovviamente $G < 1$ significa che il segnale viene amplificato mentre $G > 1$ ridotto. Nei sistemi fotografici digitali è possibile variare il guadagno elettronico del sensore al fine di avere un diverso rapporto fra l'esposizione alla luce e la luminosità definitiva dell'immagine risultante. Questo guadagno non è direttamente proporzionale alla sensibilità del sensore. Su una fotocamera digitali, impostare una sensibilità e di conseguenza l'esposizione, con l'aiuto di un esposimetro, farà risultare una foto correttamente bilanciata allo stesso modo che nelle fotocamere a pellicola. Nel nostro caso si è scelto di impostare un valore pari a 20 che è risultato adatto alla nostra applicazione.

Nell'immagine sottostante si può osservare il risultato dell'inizializzazione. Purtroppo, l'immagine è un leggermente rovinata poiché riferita allo schermo del controller ma rende comunque l'idea delle condizioni con cui si è operato.



Figura 191, 192 Inizializzazione della camera 2D

Questa prima parte è rimasta invariata per le analisi effettuate sulle altre tipologie di capsule, mentre si sono andati a modificare i valori e le tipologie di filtri utilizzati.

Il primo filtro che si è deciso di inserire è il **Color Plane**. Esso permette di estrarre colori specifici (come rosso, blu o verde) oppure effettuare una saturazione. Nel nostro caso si è applicata una "tonalità" che corrisponde ad una "desaturazione".

Nella teoria dei colori e in discipline correlate come la fotografia, la saturazione o purezza è l'intensità di una specifica tonalità. Una tinta molto satura ha un colore vivido e squillante (forte); al diminuire della saturazione, il colore diventa più tenue e tende al grigio (debole). Se la saturazione viene completamente annullata il colore si trasforma in una tonalità di grigio. Di conseguenza, per esempio, la desaturazione di una fotografia digitalizzata è una delle tecniche con cui si può trasformare un'immagine a colori in una in scala di grigi (spesso impropriamente detta "in bianco e nero"). Nell'immagine sottostante si può osservare il risultato finale.

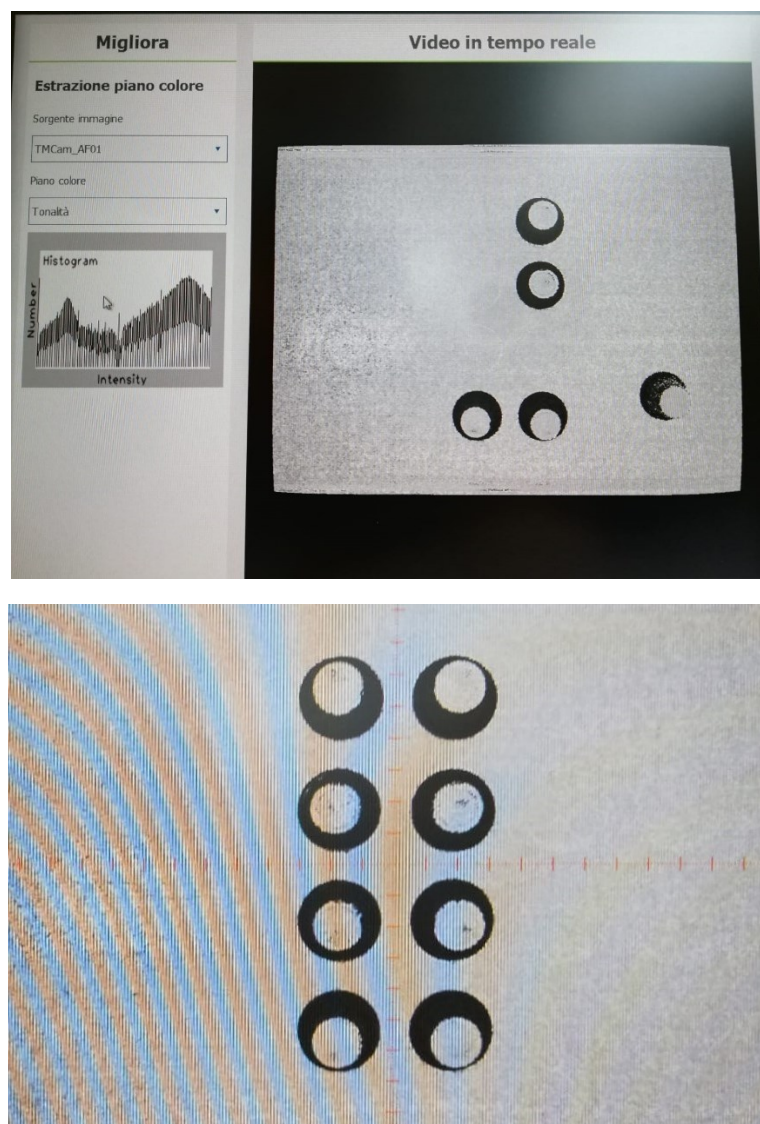


Figura 193, 194 Applicazione del filtro color plane

Il secondo filtro è il **Morphology**, molto utile per modificare la forma e la dimensione dei Pixel utilizzati. È infatti fondamentale riuscire ad ingrandire i neri per poter definire meglio i contorni; nelle capsule posizionate più lontane dal centro dell'obbiettivo si può infatti notare che i bordi sono rappresentati da una linea sottile e a volte assente. Per fare ciò sono disponibili nel programma diverse funzioni: è possibile applicare un'erosione, una dilatazione oppure una combinazione delle due (apertura o chiusura). Nell'elaborazione digitale delle immagini, la chiusura è, insieme all'apertura, un segnale basilico di rimozione morfologica. L'apertura rimuove piccoli oggetti, mentre la chiusura rimuove piccoli buchi.

Per il nostro scopo è stato sufficiente applicare una "erosione". La forma utilizzata è l'ellisse poiché permette di seguire le linee della capsula; le dimensioni scelte sono 3 per l'altezza e 3 per la larghezza, il numero di iterazioni è invece 2. In contrasto con lo scopo principale verrà però esaltato il rumore e sarà quindi necessario eliminare tali difetti.

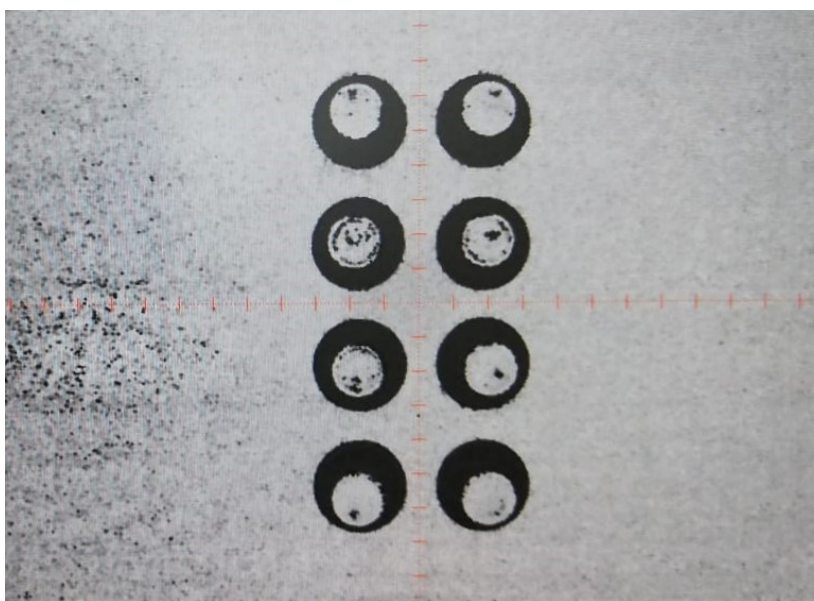
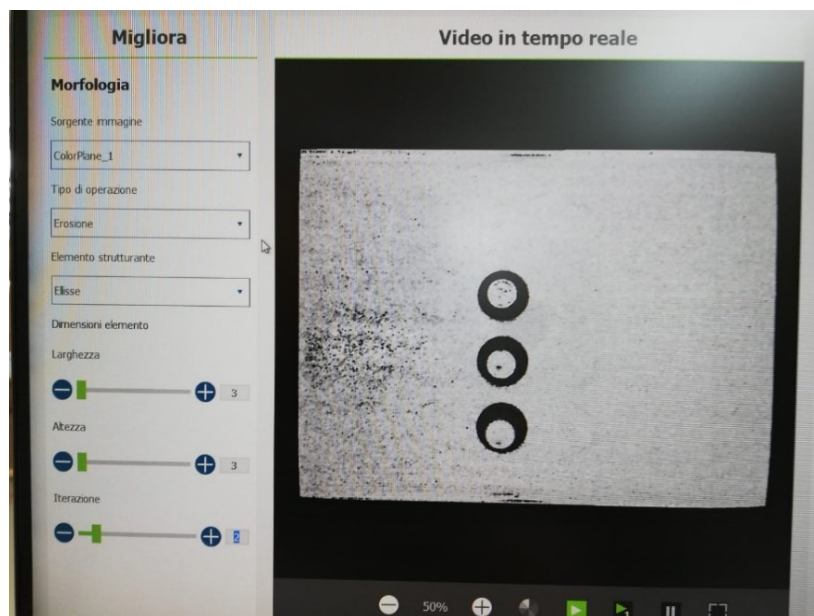


Figura 195, 196 Applicazione del filtro morphology

Successivamente è stato applicato il filtro **Smoothing**. Esso permette di togliere i disturbi con un “filtro mediano” che prende i pixel e li media con quelli che lo circondano. Si è notato che con una larghezza pari a 19 è possibile togliere tutto il rumore (i punti isolati). Nell’immagine sottostante è possibile osservare il risultato.

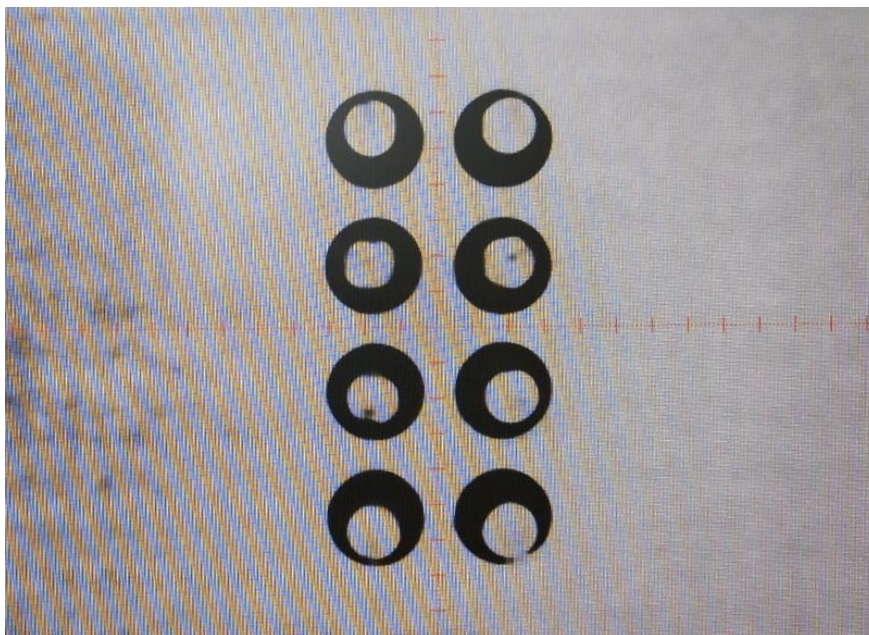
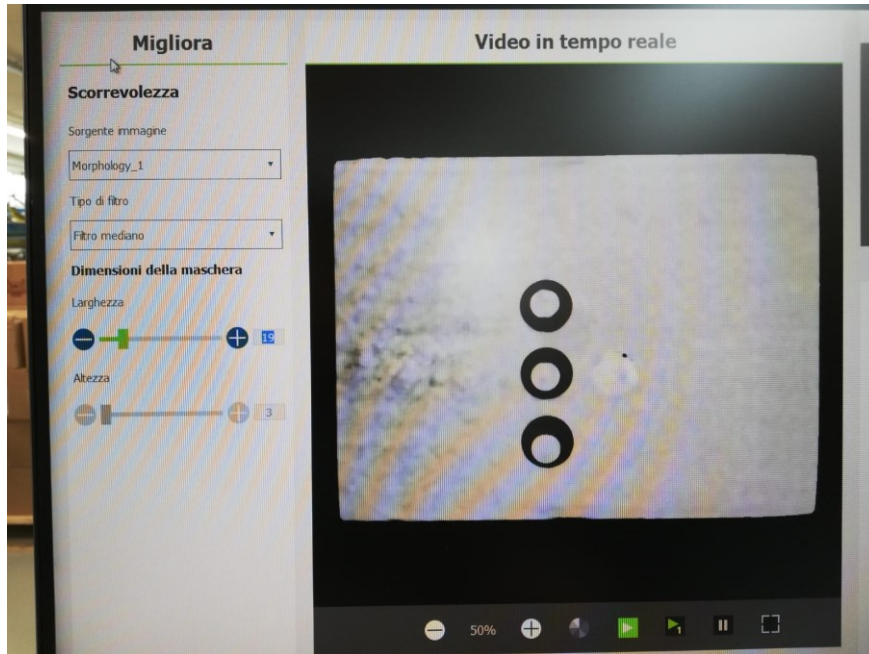


Figura 197, 198 Applicazione del filtro smoothing

L'ultimo filtro utilizzato è il **Tresholding** in cui è stato impostato "binario" per poter identificare solo il bianco e il nero. Molto importante è la soglia che viene impostata ad un valore pari a 106 per poter prendere la lunghezza d'onda adeguata. Di seguito viene presentato il risultato finale che permette di riconoscere facilmente le capsule presenti sul vassoio.

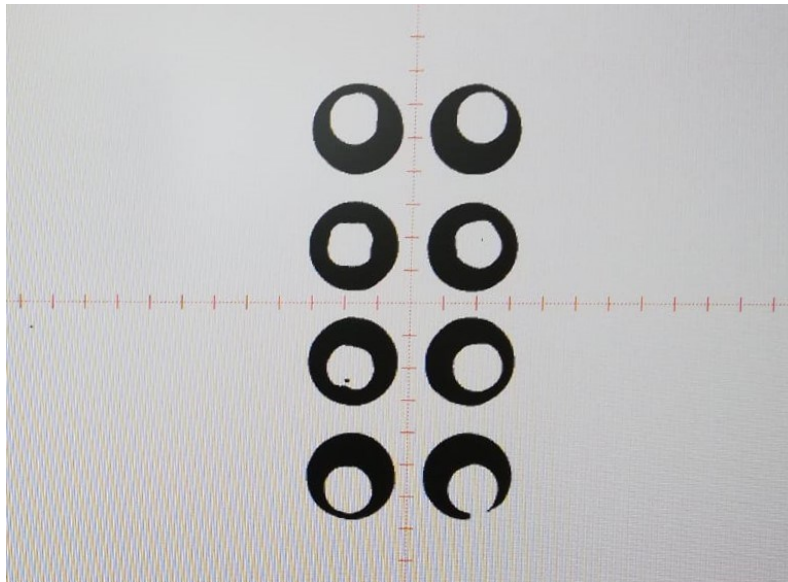


Figura 199 Applicazione del filtro tresholding

Per valutare la presenza delle capsule sul vassoio il programma fornisce diversi metodi, tra cui lo **Shape Pattern**. Con questa opzione è possibile definire la forma da cercare; ciò può essere fatto manualmente disegnando la forma o con una ricerca automatica. Si è deciso di identificare il bordo esterno della capsula poiché possiede una forma che rimane invariata, a differenza di quello interno che varia leggermente in base alle condizioni di luce.



Figura 200 Curva selezionata con lo shape pattern

Oltre alla forma è necessario identificare la zona in cui effettuare la ricerca per evitare di trovare dei falsi positivi. Per semplificare l'analisi ed evitare errori si è deciso di effettuare una ricerca in ogni punto che potrebbe contenere una capsula ed è stata impostata una tolleranza del 10 % sulla forma utilizzata per la ricerca.

Viene presentata nell'immagine seguente la zona di ricerca del singolo elemento.

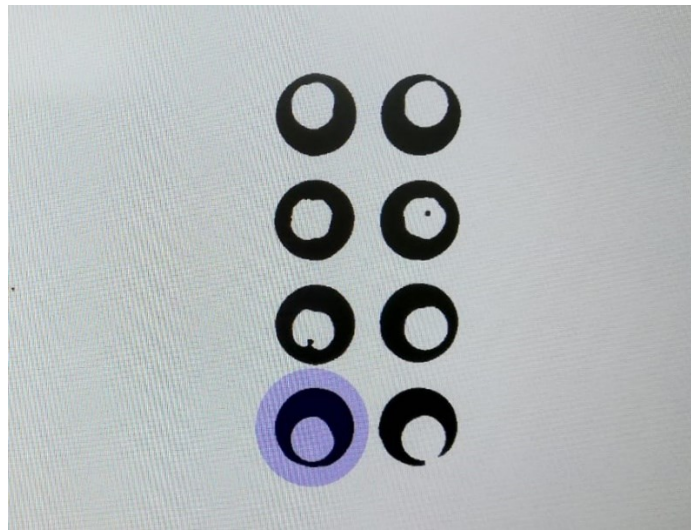


Figura 201 Zona di ricerca

Per la ricerca sono stati impostati 2 strati di piramide poiché sufficienti ad avere un elevata percentuale di successo. La soglia di valutazione minima è stata impostata al 40 % in modo tale da poter identificare anche i casi più particolari (specialmente ai bordi dell'immagine) e contemporaneamente evitare falsi positivi. Viene di seguito mostrato il risultato finale della ricerca in cui vengono individuate le prime 3 capsule in basso a sinistra.

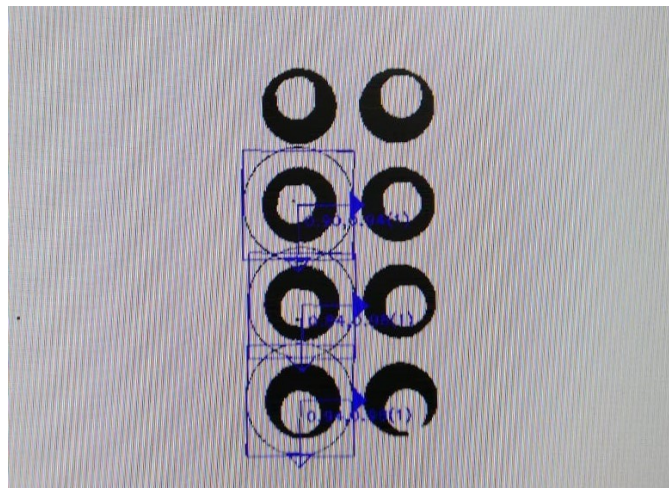


Figura 202 Risultato della ricerca con shape pattern

L'impostazione appena presentata è stata utilizzata per un elevato periodo di tempo e sotto varie condizioni di luce fornendo sempre un risultato corretto. Anche con le capsule di colore rosso tale procedura poteva essere considerata ottimale ma si è deciso di effettuare delle modifiche per migliorare l'identificazione ed annullare gli errori. Si è quindi deciso di utilizzare le stesse impostazioni sia per le capsule gialle che per le rosse inserendo alcune modifiche. In particolare, è stato inserito un **Contrast** pari a -1 con luminosità 0 e gamma 1 tra l'Inizializzazione e il Color plane, per separare meglio le capsule presenti con

lo sfondo. In questo caso per il **Color plane** è stata sostituita la tonalità con la saturazione dato che il contrasto ha valore negativo e il risultato ottenuto è l'inverso di quanto ottenuto in precedenza. Per la **Morphology** è stata sostituita l'erosione con l'apertura e infine sullo **Smoothing** la larghezza del filtro mediano è stata impostata su 9. Tali modifiche sono state necessarie per evitare l'insorgere di errori in condizioni di luminosità estreme raramente ottenibili. Il risultato ottenuto è identico a quanto mostrato nelle precedenti immagini e quindi non viene riproposto.

Oltre a quanto detto è stata necessaria la modifica di un ulteriore parametro. Si è notato che se sul vassoio è presente un'unica capsula l'immagine presenta un'elevata quantità di rumore; tale condizione fa sì che l'intera immagine diventi nera causando quindi la comparsa di numerosi falsi positivi. Se invece sono presenti due o più capsule ciò non accade. Nell'immagine seguente viene presentato tale difetto posizionando sul vassoio in momenti separati una e due capsule.



Figura 203, 204 A sinistra immagine pulita, a destra immagine con presenza di rumore

Per ovviare è stata modificata la soglia del **Thresholding** inserendo un valore pari a 94 (leggermente più basso del precedente 106) che taglia le elevate intensità. Un valore troppo basso avrebbe eliminato anche le stesse capsule fornendo un'immagine completamente bianca. Di seguito viene mostrato l'istogramma.

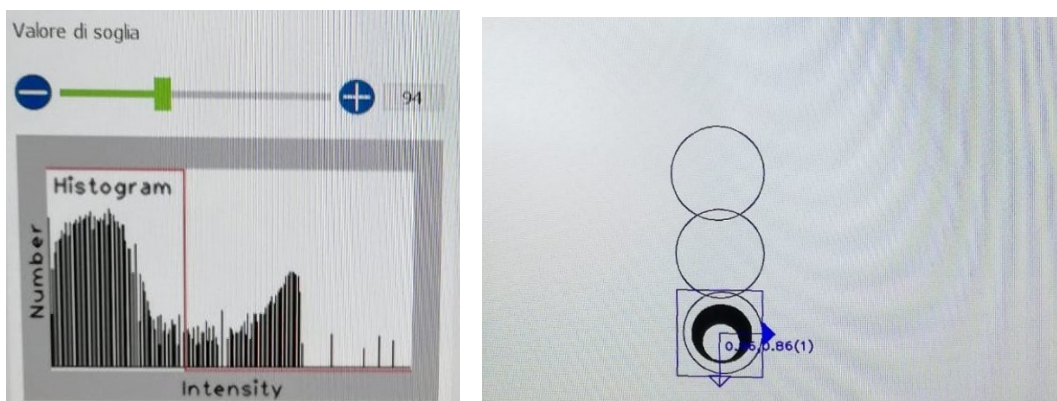


Figura 205, 206 Modifica applicata alla soglia del thresholding

9.2. Capsule nere

Per la tipologia di capsule nere si è utilizzata la funzione di posizionamento fisso. Per la calibrazione e per l'inizializzazione si sono mantenuti i valori usati con le capsule gialle dato che permettevano di risolvere i problemi di luminosità già descritti in precedenza e consentivano di ottenere un'immagine pulita. Contrariamente, si è deciso di inserire dei filtri completamente diversi dai precedenti poiché il colore analizzato è molto scuro e la forma delle capsule completamente diversa. Nell'immagine sottostante si può osservare il risultato dell'inizializzazione. Per valutare l'effetto di tale soluzione per l'analisi delle capsule gialle sono state disposte sul vassoio sia le nere che le gialle.



Figura 207, 208 Inizializzazione della camera 2D

Il primo filtro che si è deciso di inserire è lo **Smoothing**. Con l'impostazione "filtro mediano" si sono potuti togliere i disturbi prendendo i singoli pixel e mediandoli con quelli che sono presenti nel loro intorno. Si è notato che con una larghezza pari a 47 (ovvero un valore relativamente elevato) è possibile ottenere un'immagine che metta in risalto le capsule nere, separandole dallo sfondo. Nell'immagine seguente è possibile osservare il risultato.

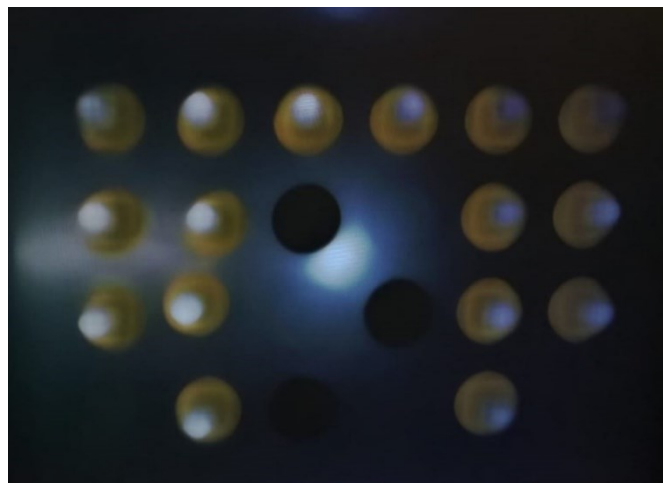


Figura 209, 210 Applicazione del filtro smoothing

Come secondo filtro è stato inserito il **Contrast** con intensità pari a 0.80, luminosità 0 e gamma 1. Ciò permette di pulire l'immagine separando lo sfondo dalle capsule presenti. Dall'immagine sembra che il risultato rimanga inalterato rispetto la precedente analisi; in realtà questo passaggio è risultato fondamentale per evitare l'insorgere dei problemi relativi all'illuminazione.



Figura 211, 212 Applicazione del filtro contrast

L'ultimo filtro che si è deciso di inserire è il **Color Plane**. Nel nostro caso si è applicata una "tonalità" che corrisponde ad una "desaturazione" con cui si può trasformare un'immagine a colori in una in scala di grigi (detta "in bianco e nero"). Nell'immagine sottostante si può osservare il risultato finale e il relativo istogramma delle tonalità.

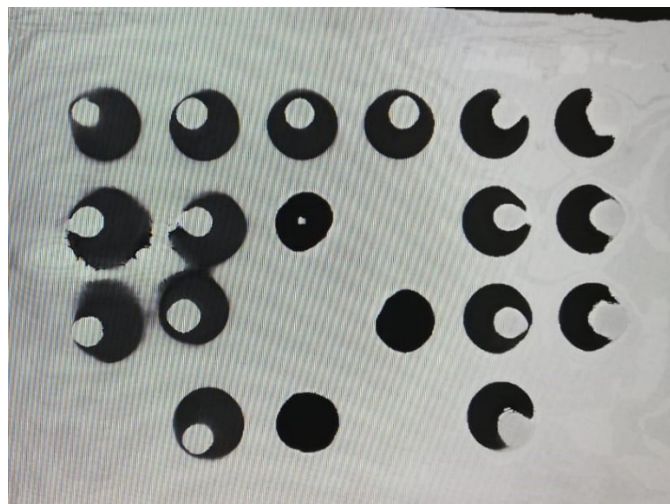


Figura 213, 214 Applicazione del filtro color plane e relativo istogramma delle tonalità

Per valutare la presenza delle capsule sul vassoio, tra i vari metodi proposti, è stato scelto il **Blob**. Nella visione artificiale, il Rilevamento Blob, o riconoscimento di regioni, è una tecnica che ha come obiettivo quello di rilevare punti o regioni di una immagine che differiscono in proprietà come luminosità e colore. Un approccio naturale per rilevare blob è di associare un blob luminoso (o scuro) con ogni massimo locale nell'intensità del paesaggio. Proprio quest'ultimo è stato utilizzato per rilevare, in zone preimpostate, la presenza di blob scuri con un livello di grigio nullo (nero). Nel software della telecamera è anche possibile impostare una tolleranza sulla dimensione del blob da ricercare; nel nostro caso si è lasciato un margine molto alto per evitare possibili errori dovuti alle condizioni di luminosità. Infatti, se è presente un'elevata fonte luminosa, può capitare che le aree nere che identificano le capsule sono ridotte al minimo (comunque sempre presenti). I valori impostati vanno da un minimo di pixel pari a 500 ad un massimo di 15000 (Le macchie presenti nell'immagine sottostante sono pari a 9000 pixel). Va inoltre sottolineato che tale metodo potrebbe apparentemente risultare efficace anche per le capsule di colore giallo; in realtà non tutte le condizioni di luminosità sono consone a tale rilevamento.

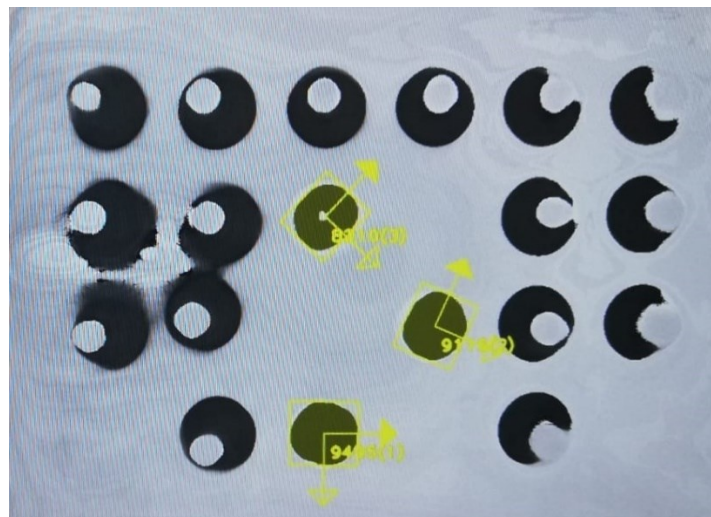


Figura 215 Ricerca con il blob

9.3. Capsule blu

Per la tipologia di capsule blu, come per le nere, si è utilizzata la funzione di posizionamento fisso. Per la calibrazione e per l'inizializzazione si sono mantenuti i valori usati con le capsule gialle dato che permettevano di risolvere i problemi di luminosità già descritti in precedenza e consentivano di ottenere un'immagine pulita. Contrariamente, si è deciso di inserire dei filtri completamente diversi dai precedenti poiché il colore analizzato è più scuro e la forma delle capsule completamente diversa. Nell'immagine sottostante si può osservare il risultato dell'inizializzazione. Per valutare l'effetto di tale soluzione per l'analisi delle capsule gialle sono state disposte sul vassoio sia le blu che le gialle.

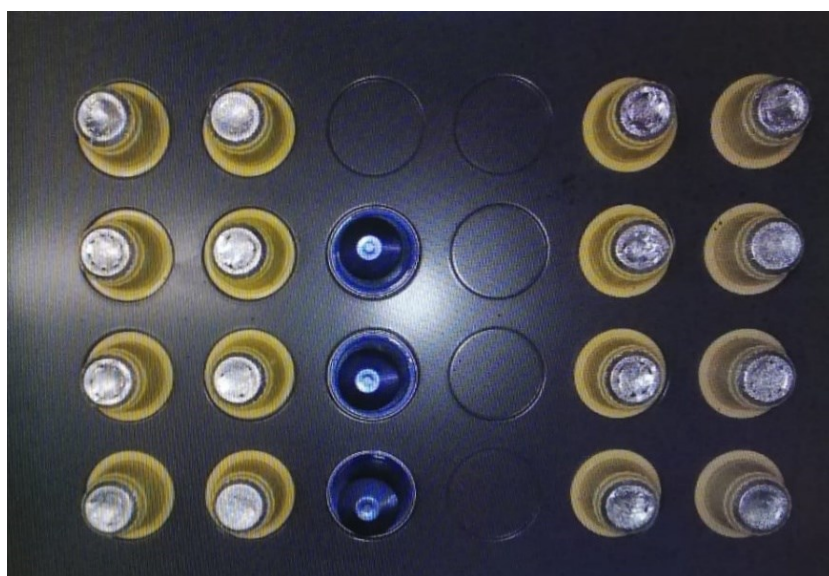


Figura 216 Inizializzazione della camera 2D

Come primo filtro si è scelto il **Morphology**, molto utile per modificare la forma e la dimensione dei Pixel utilizzati. È infatti fondamentale riuscire ad ingrandire i colori più scuri per poter definire meglio la struttura delle capsule. Per fare ciò si è scelta l'apertura, un segnale basico di rimozione morfologica che consente di rimuovere piccoli oggetti (al contrario della chiusura che rimuove piccoli buchi). La forma utilizzata è l'ellisse poiché permette di seguire le linee della capsula; le dimensioni scelte sono 3 per l'altezza e 3 per la larghezza, il numero di iterazioni è invece 6. Tale soluzione permette di ottenere un'immagine più sfuocata ma con aree aventi un colore comune, come si può notare dall'immagine seguente.

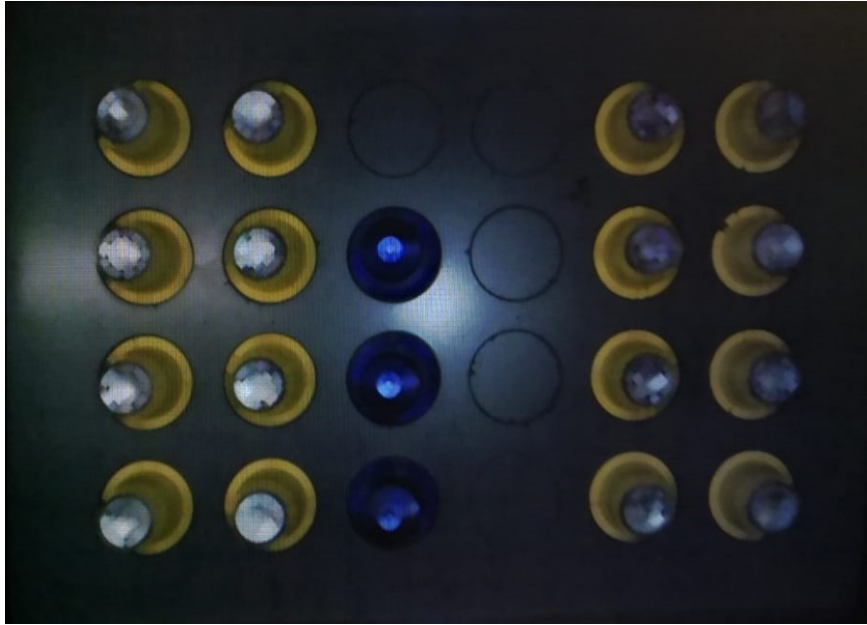


Figura 217 Applicazione del filtro morphology

Il secondo filtro che si è deciso di inserire è il **Color Plane**. Esso permette di estrarre colori specifici (come rosso, blu o verde) oppure effettuare una saturazione. Quest'ultima è risultata la più adatta per i nostri scopi. Nella teoria dei colori la saturazione è l'intensità di una specifica tonalità. Una tinta molto satura ha un colore vivido e squillante (forte); al diminuire della saturazione, il colore diventa più tenue e tende al grigio (debole). Per questo motivo l'immagine si modifica in modo tale che i colori più scuri vadano a colorarsi di bianco o grigio chiaro, mentre i colori più chiari vengono espressi come tonalità scure. Nell'immagine sottostante si può osservare il risultato finale e il relativo istogramma.

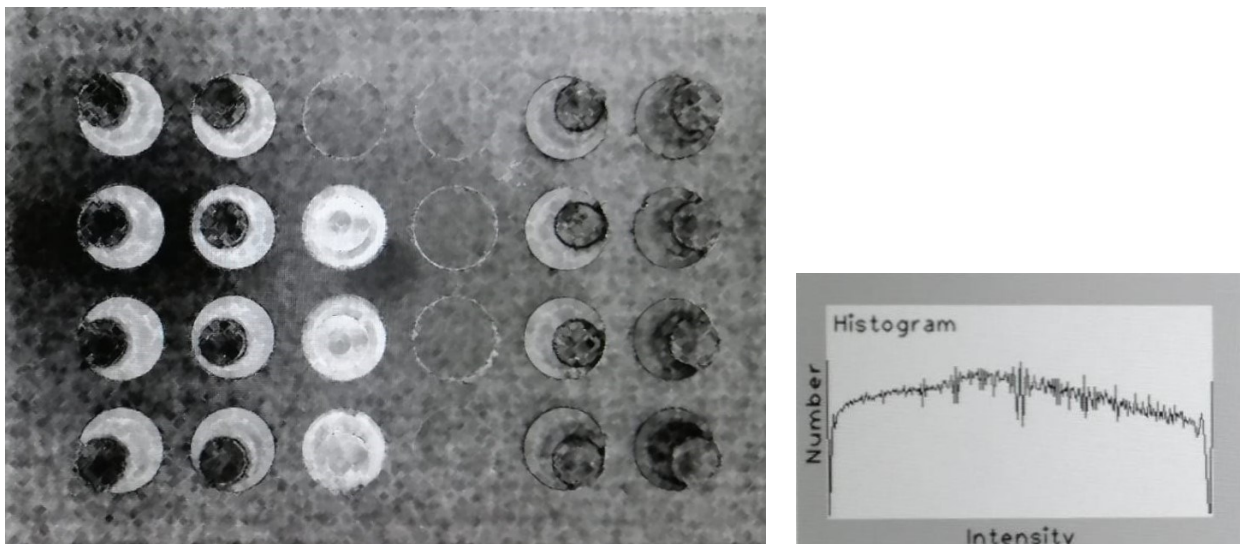


Figura 218, 219 Applicazione del filtro color plane

Il successivo filtro che si è deciso di inserire è lo **Smoothing** impostato su “filtro mediano”. In questo modo si sono potuti togliere i disturbi mediando i pixel con quelli presenti nel loro intorno. Si è notato che con una larghezza pari a 45 (ovvero un valore relativamente elevato) è possibile ottenere un’immagine che metta in risalto le capsule blu, rendendole praticamente bianche e separandole dallo sfondo. Nell’immagine seguente è possibile osservare il risultato.

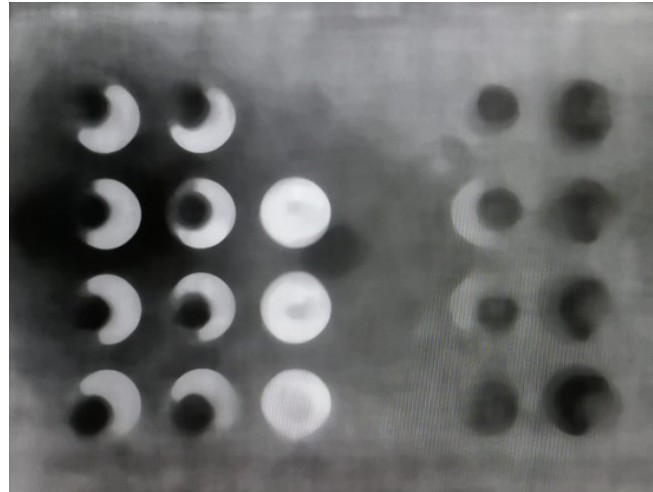


Figura 220 Applicazione del filtro smoothing

L’ultimo filtro utilizzato è il **Tresholding** in cui è stato impostato “binario invertito” per poter identificare solo il bianco e il nero, ma invertito rispetto il tradizionale binario. In questo modo i colori molto chiari, corrispondenti alle capsule blu nel nostro caso, diventano neri; mentre i colori molto scuri diventano completamente bianchi. Molto importante è la soglia che viene impostata ad un valore pari a 237 per poter prendere la lunghezza d’onda adeguata. Un valore eccessivamente elevato o eccessivamente basso farebbe sì che l’intera immagine diventi bianca, oppure ingrandirebbe eccessivamente il nero. Di seguito viene presentato il risultato finale che permette di riconoscere facilmente le capsule presenti sul vassoio.

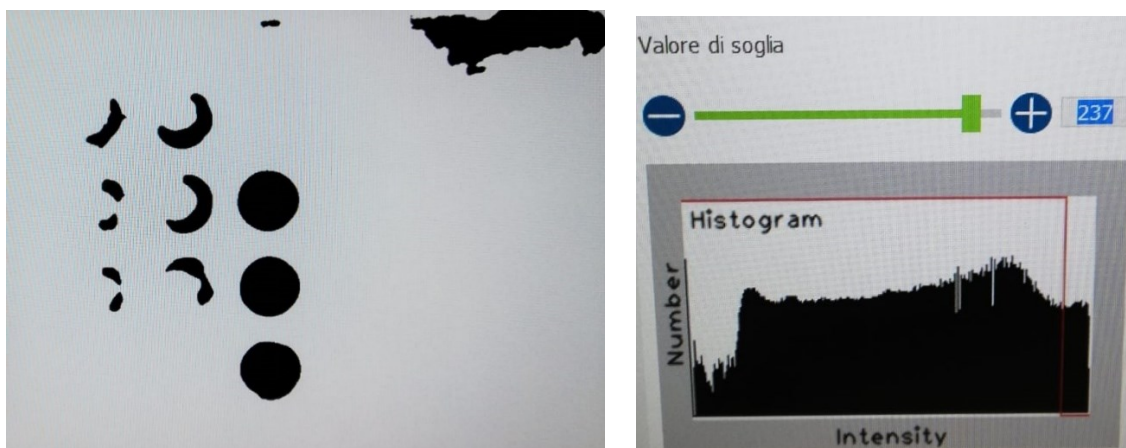


Figura 221, 222 Applicazione del filtro tresholding

Per valutare la presenza delle capsule blu sul vassoio, tra i vari metodi proposti, è stato scelto il **Blob**, come per le capsule nere. In questo modo è stato possibile rilevare la presenza di zone scure con un livello di grigio nullo (nero). Nel software della telecamera è anche possibile impostare una tolleranza sulla dimensione del blob da ricercare; nel nostro caso si è lasciato un margine molto alto per evitare possibili errori dovuti alle condizioni di luminosità. I valori impostati vanno da un minimo di pixel pari a 500 ad un massimo di 15000 (Le macchie presenti nell'immagine sottostante sono pari a 12000 pixel). Va inoltre sottolineato che tale metodo potrebbe apparentemente risultare efficace anche per le capsule di colore giallo; in realtà non tutte le condizioni di luminosità sono consone a tale rilevamento. Nell'immagine sottostante sono presenti le capsule blu, perfettamente riconoscibili poiché rappresentate da un cerchio nero, e le gialle, identificate da piccole porzioni nere ma non sempre presenti. È inoltre presente un po' di rumore nello spigolo in alto a destra; esso non dà però fastidio poiché limitato ad una piccola porzione di spazio che non interagisce con la zona di ricerca.

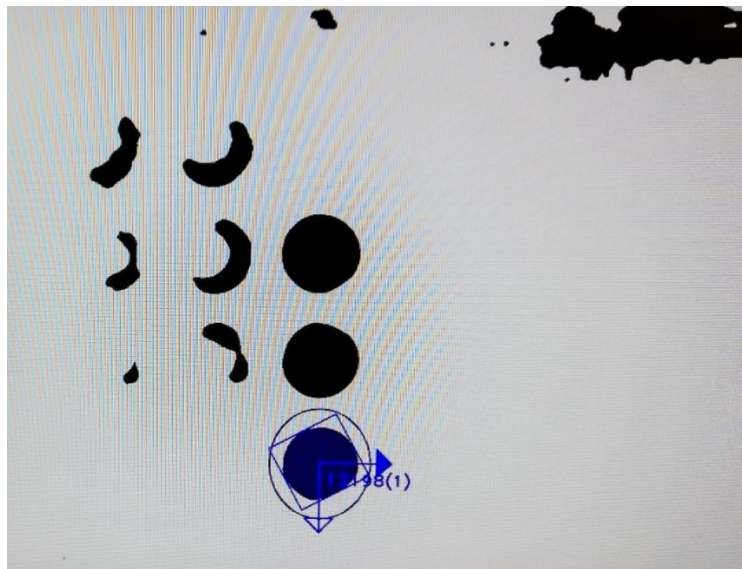


Figura 223 Ricerca con il blob

10. SICUREZZA

Le modalità collaborative comprendono la possibilità di accesso continuo allo spazio di lavoro in assenza di contatti pericolosi e la possibilità di interazione fisica con il sistema robotizzato con contatti volontari o accidentali. L'analisi dei rischi deve inoltre considerare tutto il sistema robotizzato, compresi gli organi terminali, il layout di cella e il comportamento dell'operatore. Nuove opportunità e maggiore flessibilità di utilizzo determinano una nuova classe di rischi dovuti alla compresenza uomo-robot.

La Specifica Tecnica ISO/TS 15066 è dedicata ai requisiti di sicurezza delle modalità collaborative previste dalla Norma Tecnica UNI EN ISO 10218-2:2011 armonizzata alla Direttiva Macchine 2006/42/EC.

Lo standard viene incluso nella nuova edizione con 2 importanti standard sui robot:

- **ISO 10218-1:** Robotica - Requisiti di sicurezza per i sistemi robotizzati in ambiente industriale – Robot
- **ISO 10218-2:** Robotica - Requisiti di sicurezza per i sistemi robotizzati in ambiente industriale - Sistemi robotizzati e loro integrazione

Esistono **quattro importanti funzioni** che un robot deve avere per essere adatto ad applicazioni collaborative:

- 1- **Arresto monitorato di sicurezza:** Richiede un software o un dispositivo per mettere in pausa la funzione del robot quando il lavoratore si avvicina, con lo scopo di prevenire movimenti pericolosi. La funzione viene chiamata "arresto monitorato" e fa sì che il robot venga arrestato con la potenza dell'azionamento attiva. L'arresto monitorato equivale alla definizione di "arresto di sicurezza 2" (SS2) come definito nella norma IEC 61800-5-2.
- 2- **Guida manuale:** Il metodo consiste nel permettere all'operatore di muovere il robot mediante un dispositivo manuale per trasmettere comandi di movimento. Le guide manuali devono avere un pulsante di arresto di emergenza.
- 3- **Monitoraggio di velocità e distanza:** Il terzo metodo è il monitoraggio della velocità e della distanza, che aumenta la sicurezza specificando la distanza minima di protezione tra un robot e un operatore nell'area di lavoro collaborativo. Questa funzione può essere implementata utilizzando diversi metodi. Ad esempio, un sistema di sensori esterno fornisce al controllore del robot i dati di posizione e velocità dell'operatore per il calcolo interno di un piano di movimento per mantenere la distanza di separazione.
- 4- **Limitazione di potenza e forza:** Il quarto metodo consente il contatto tra l'operatore e un robot, ma il requisito è il controllo della quantità di moto del robot per evitare lesioni e dolori. La realizzazione delle funzioni, definite PFL (dall'inglese Power and Force Limiting), può avvenire mediante un progetto intrinsecamente di

sicurezza che può essere stabilito, non regolabile o configurabile, oppure mediante funzioni di sicurezza che possono essere regolate o configurate. Per i robot con funzioni di sicurezza PFL regolabili o configurabili, il superamento di qualsiasi parametro limite deve causare un "arresto di protezione".

Nonostante il TM5-900, utilizzato nell'applicazione precedentemente descritta, appartenga alla famiglia dei robot collaborativi si è deciso di disporre l'intera applicazione all'interno di una cella. Questa soluzione permette di proteggere l'operatore sia dal robot che dai vari elementi presenti nel banco, i quali possono raggiungere temperature molto elevate. Ovviamente è anche presente una copertura per i tubi e per il riscaldatore, ma è consigliato l'utilizzo di una cella per via delle elevate pressioni raggiunte (sopra 20 bar) congiuntamente alle elevate temperature (100 °C). Si può notare dell'immagine seguente il dettaglio della protezione.

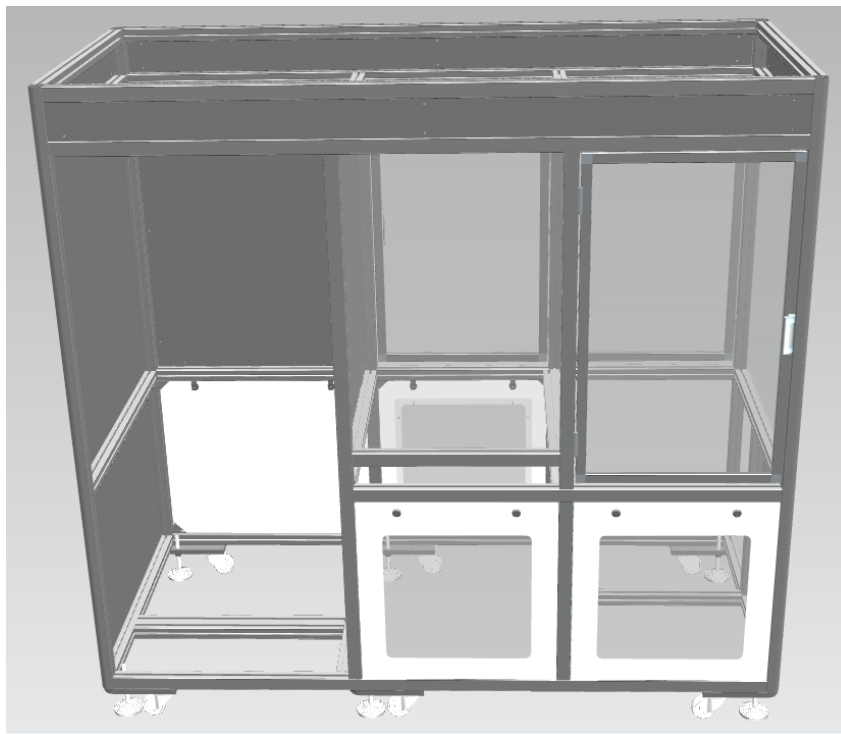


Figura 224 Modello CAD della cella di sicurezza

Il fatto che il robot sia collaborativo risulta essere comunque fondamentale poiché un eventuale intervento dell'operatore non deve causare l'arresto forzato dell'applicazione, che necessiterebbe di un riavvio e di una gestione degli errori, ma dare la possibilità di agire e poi riprendere la normale attività, riducendo anche il tempo di ripresa. Per fare ciò è stato necessario impostare il TM5 in modalità collaborativa, disattivando l'impostazione di default in cui le velocità risultano essere più elevate e non è possibile interagire in nessun modo con il cobot. Tale operazione può essere effettuata scollegando il ponte tra due terminali del controller, mostrato nell'immagine seguente.

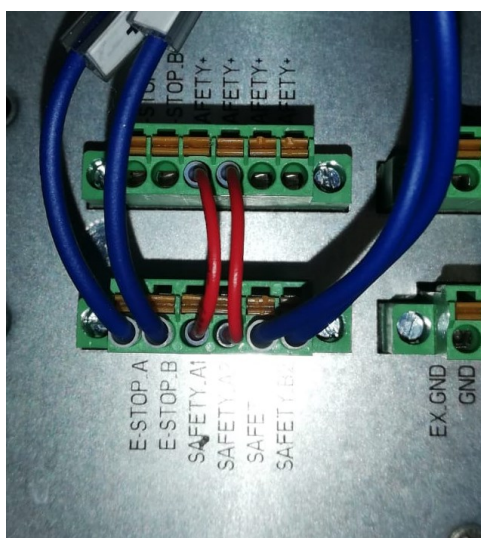


Figura 225 Safety conn del robot

Il Safety Conn fornisce i terminali per arresto di emergenza (ESTOP) e arresto di sicurezza. ESTOP è un contatto N.C. (Normalmente chiuso). Quando ESTOP SW è APERTO, il braccio del robot entra nello stato di ARRESTO di emergenza. Safety A&B sono ugualmente dei contatti N.C. (Normalmente chiuso). Quando il SW di sicurezza è APERTO, il braccio del robot entra nello stato di pausa.

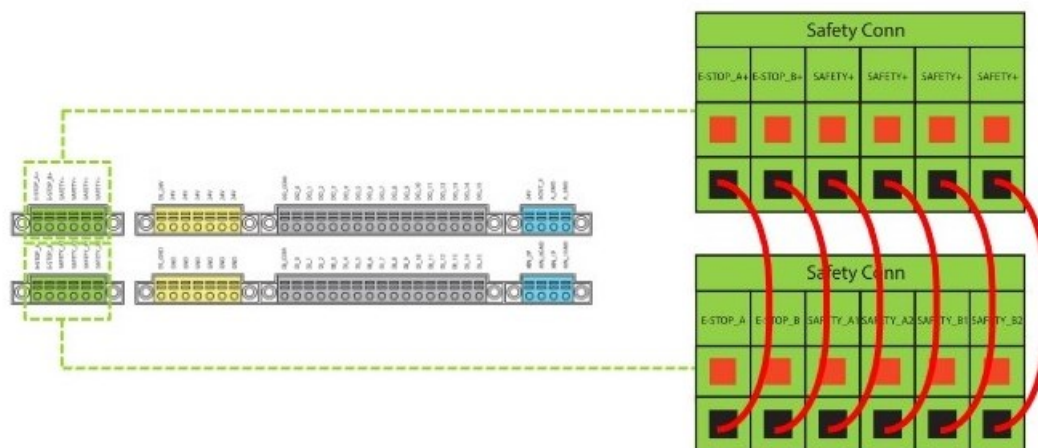


Figura 226 Schema collegamenti safety conn

I terminali sono stati collegati ai sensori delle portelle. In questo modo la modalità collaborativa viene attivata appena l'operatore apre le porte permettendo al robot di rallentare e fermarsi in una pausa di sicurezza, in attesa che esse vengano richiuse. Con tale soluzione è possibile far ripartire il cobot a seguito della chiusura senza dover avviare una sessione di ripristino. Un altro motivo per cui è stato essenziale utilizzare questa impostazione riguarda l'eventualità in cui, una volta aperte le portelle, sia necessario spostare il robot manualmente; se non si impostasse la modalità collaborativa non sarebbe

possibile muovere in nessun modo i vari giunti, anche se il robot fosse fermo in pausa, si dovrebbe invece accedere alle impostazioni del controller e passare in manuale applicando la password di sicurezza. Vengono proposte le immagini dei sensori relativi alle portelle (ON/OFF), in particolare si può notare nell'immagine a sinistra la luce verde che identifica la situazione di sicurezza e nell'immagine a destra la luce rossa del segnale di emergenza.



Figura 227, 228 Sensori d'apertura portelle

Oltre a quanto detto, per rispettare le normative sulla sicurezza è necessaria la presenza, in ogni punto di rapido accesso, del pulsante (fungo) di emergenza. Esso permette di arrestare completamente il banco di lavoro togliendo l'alimentazione e attivando i freni di emergenza del robot. Sono stati posizionati tre pulsanti: 2 nei punti in cui l'operatore lavora e 1 nel retro del banco. Vengono proposte a seguito le immagini dei pulsanti con a destra un dettaglio relativo alla struttura interna (posizionata in una zona in cui non è possibile l'accesso). In quest'ultima si può notare la presenza di un doppio circuito per garantire il funzionamento anche in caso di parziale guasto.

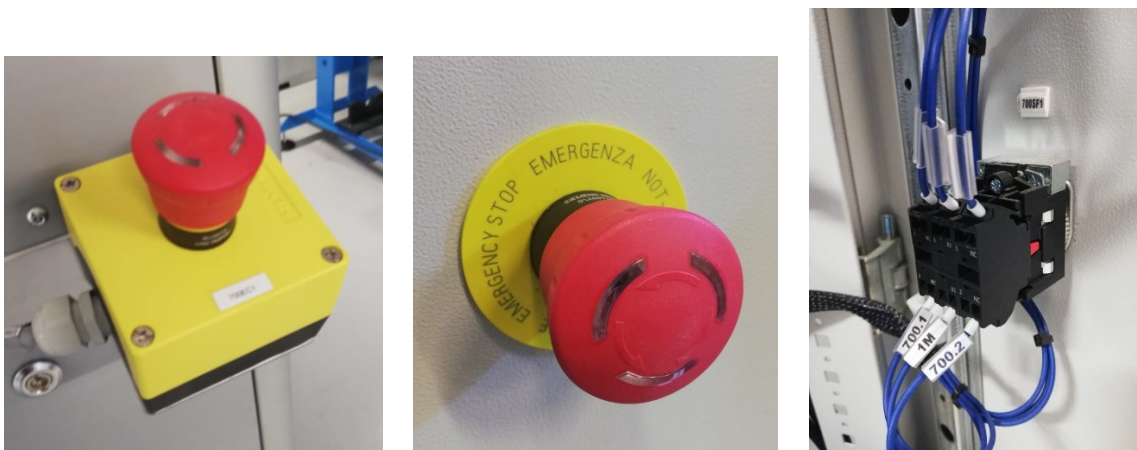


Figura 229, 230, 231 Pulsante d'emergenza

Al di sotto dei monitor sono presenti anche due interruttori in grado di accendere e spegnere l'alimentazione sia del banco che dell'UPS.



Figura 232 Interruttori di sicurezza

Gli elementi principali del banco di lavoro, come il quadro elettrico e il controller del robot, sono stati posizionati in una zona in cui l'operatore non è in grado di accedere a meno che non sia provvisto delle chiavi di accesso. Oltre a ciò, sono state inserite delle password e dei codici nel software per evitare che il programma e le impostazioni del robot possano essere modificate.

Infine, al di sopra del banco è stato posizionato un indicatore luminoso e acustico in grado di trasmettere un segnale visivo e audio all'operatore, o a chi si trova nelle vicinanze, per comunicare lo stato dell'applicazione. In particolare, il segnale verde non provvisto di suono in uscita sta ad indicare il corretto svolgimento dell'attività. In opposizione il segnale rosso lampeggiante e accompagnato da fonte sonora comunica lo stato di emergenza e inattività del banco, che potrebbe derivare dall'azionamento del pulsante di emergenza, da un blocco del robot o da una situazione che necessita dell'intervento umano.



Figura 233 Indicatore luminoso di sicurezza

11. TELECAMERA 3D

I metodi che permettono di acquisire informazioni in formato digitale di superfici e oggetti tridimensionali sono numerosi stanno assumendo negli ultimi anni un'importanza sempre più rilevante. Le applicazioni sono le più svariate: controllo dimensionale e di qualità, automazione, settore legale, prototipazione rapida, reverse engineering, ricostruzione tridimensionale, virtualizzazione, architettura, tutela di beni artistici, medicina, ecc.

Tra i vari metodi, quelle che implicano l'uso di sensori ottici, tipicamente non invasivi (senza contatto diretto), sono quelle che si sono maggiormente sviluppate; infatti, il tempo di acquisizione, rispetto alle soluzioni con sonde "a contatto", è notevolmente minore. Inoltre, vengono evitati l'usura e l'eventuale danneggiamento dello strumento e della superficie in analisi.

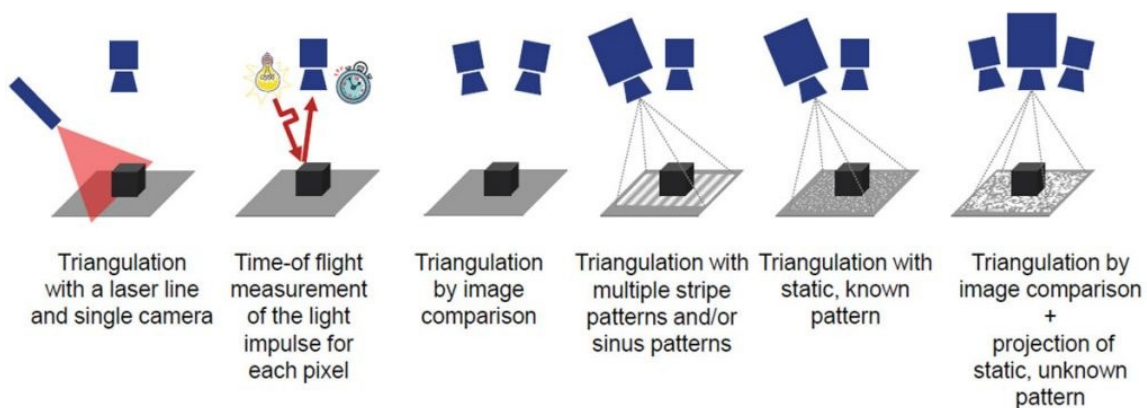


Figura 234 Tecniche ottiche

Le metodologie ottiche possono essere distinte in due macro-gruppi: tecniche passive e tecniche attive. Con i metodi **passivi** non è necessario un controllo sulla sorgente di luce: il più grosso svantaggio è rappresentato dal notevole aggravio computazionale per l'elaborazione dei dati e l'ottenimento dell'informazione di profondità. Nei metodi **attivi**, invece, l'uso di luce strutturata (con un preciso pattern) semplifica di molto questo problema.

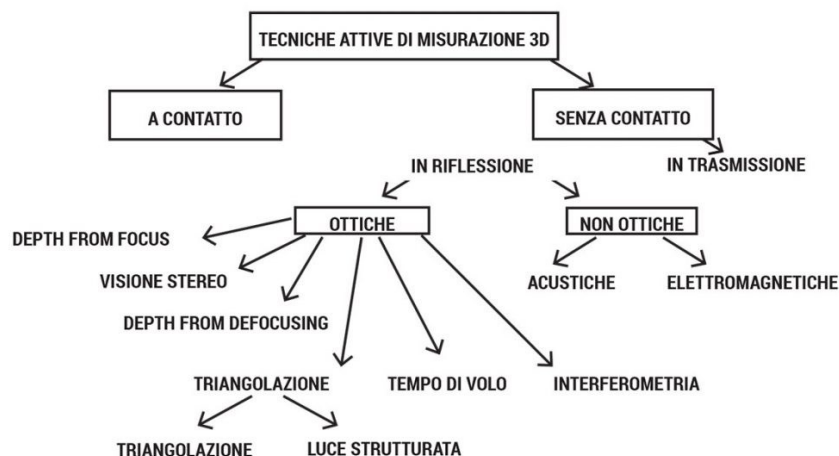


Figura 235 Classificazione tecniche di misurazione 3D

I principali sistemi che permettono alla videocamera di funzionare sono:

- Telecamere 2D che forniscono informazioni aggiuntive spaziali non ottiche: un esempio sono le apparecchiature cosiddette "Time Of Flight" (TOF) che basano il loro funzionamento sull'uso di una sorgente luminosa complementare (normalmente un laser) che illumina il target da riprendere. In pratica il sistema telecamera-sorgente luminosa misura il tempo di volo della radiazione luminosa, ovvero il tempo che la luce impiega per raggiungere l'oggetto presente nella scena e per tornare indietro, riflessa, verso l'obiettivo della telecamera. Il tempo misurato è proporzionale alla distanza percorsa dalla luce; quindi, più lontano è il bersaglio più lungo sarà il tempo misurato. La sorgente luminosa e l'acquisizione dell'immagine sono sincronizzate, in modo tale da poter estrarre e calcolare le distanze a partire dai dati dell'immagine.
- Doppie telecamere 2D che ricreano artificialmente il fenomeno della visione umana: due riprese della stessa scena realizzate da due telecamere complanari poste a distanza fissa fra loro forniscono due immagini leggermente diverse che il software provvede a integrare per ricavare immagini 3D; questo tipo di telecamere hanno il vantaggio di funzionare correttamente con qualsiasi condizione di luce anche se molto intensa. Purtroppo, la loro capacità di ricostruire le informazioni 3D è fortemente influenzata dalla distanza tra i due obiettivi: ad esempio con una distanza di dieci centimetri un sistema di questo tipo può agevolmente realizzare misure di profondità a corto raggio, con distanze di misurazione fino a 0,5 metri mentre con differenza di venti-trenta centimetri si possono rilevare distanze fino a 5 - 10 metri.
- sistemi telecamera-laser a triangolazione: in base a questa metodologia il calcolo della distanza tra l'obiettivo e l'oggetto osservato viene effettuato utilizzando una telecamera ed un illuminatore complanari in cui è nota la distanza fra obiettivo e sorgente luminosa; un sistema di questo tipo valuta gli angoli di partenza del raggio luminoso e di incidenza sull'obiettivo del raggio riflesso consentendo, tramite calcoli trigonometrici, di risalire alla distanza dell'oggetto.

I sistemi descritti si basano sull'uso di telecamere mono o stereoscopiche; il grande vantaggio di questi sistemi è quello di essere molto aperti e suscettibili di essere personalizzati (ad esempio con la focale dell'obiettivo) in funzione del tipo di applicazione; il punto fermo per tutti è però la risoluzione che, nel caso di sistemi 3D è un po' più complessa da definire rispetto a normali sistemi 2D.

Per esempio, nel caso di sistemi a scansione, la risoluzione deve tenere conto non solo del numero di pixel con cui una singola immagine è definita, ma anche del numero di profili di immagine che definiscono la terza dimensione dell'oggetto tridimensionale.

Oltre la risoluzione, un altro punto critico è la rapidità di elaborazione del sistema che genera le immagini 3D: è evidente la necessità di GPU (Graphic Process Unit) iperveloci in grado di lavorare su un flusso dati continuo sincrono con il laser di scansione e di CPU in grado di convertire rapidamente in ordini di movimento le informazioni tridimensionali; le caratteristiche di velocità sono più o meno importanti a seconda del tipo di applicazione: in un sistema di pallettizzazione robotizzato la funzionalità principale è quella di riconoscere posizione, forma ed orientamento di un oggetto nello spazio al fine di afferrarlo e posizionarlo correttamente mentre in un sistema di controllo qualità devono probabilmente essere rilevate forma, misure, colore, aspetto superficiale, ecc. In questo secondo caso la maggiore velocità di elaborazione richiesta è dovuta alla probabile maggiore risoluzione necessaria per l'analisi.

Anche il frame-rate, che nelle applicazioni di guida robotica assume importanza per la manipolazione di oggetti in rapido movimento, è una caratteristica qualificante di un sistema di ripresa 3D: è intuitivo che per oggetti non statici è necessario un frame-rate tanto più elevato quanto maggiore è la velocità di movimento dei soggetti da riprendere.

12. VISIONE STEREOSCOPICA

Le videocamere 3D permettono la triangolazione e la visione stereoscopica dell'immagine, riproducendo un l'oggetto e le sue componenti sui tre assi cartesiani, e rappresentando non solo la lunghezza e la larghezza dell'oggetto stesso, ma anche la sua altezza. Rileva, in altri termini, la tridimensionalità di un oggetto o di una scena. Il dispositivo in oggetto illumina la precitata scena mediante una fonte luminosa ad infrarossi, e determina la distanza a seconda della luce riflessa dalla superficie. La tecnologia in questione viene adoperata in vari settori come, ad esempio, la tecnica di imballaggio, immagazzinamento e movimentazione, la robotica o il controllo di individui e locali.

Il funzionamento di una videocamera 3D rispecchia il comportamento dell'occhio umano. Le persone vedono gli oggetti adoperando in maniera separata l'occhio sinistro e quello destro. La parallasse (apparente spostamento angolare di un oggetto, quando l'osservazione avviene da due punti di vista differenti) fa percepire al cervello umano un senso di profondità delle immagini. La videocamera "individua" i soggetti servendosi di due obiettivi, così come fanno i nostri occhi, registrandoli in 3D.

Visual pathway to the brain (from underneath)

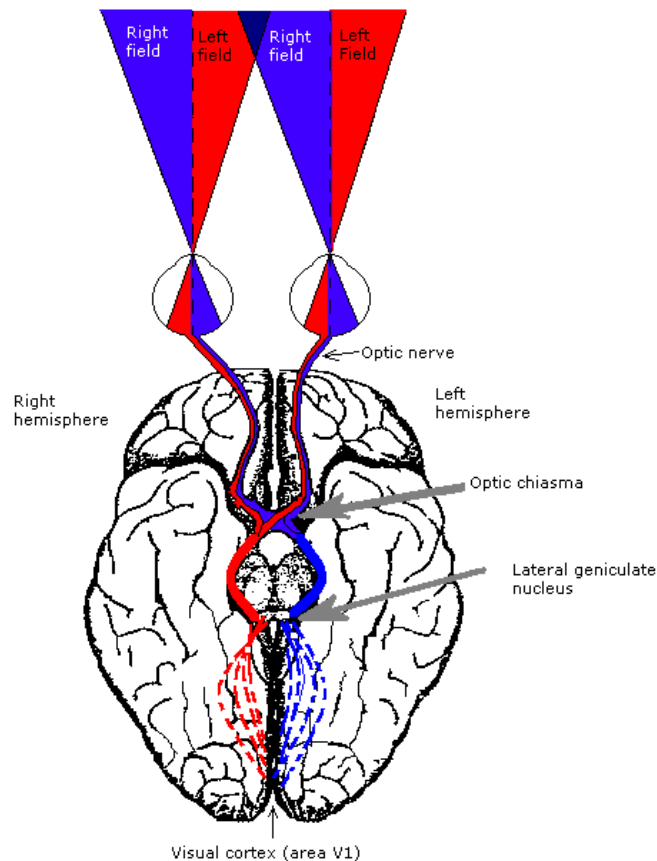


Figura 236 La visione binoculare negli esseri umani

L'individuazione dei punti omologhi, problema noto in letteratura come il problema della corrispondenza (correspondence problem o matching stereo), consente di ottenere una grandezza denominata disparità (disparity), che rappresenta la differenza di posizione dei due punti omologhi nelle due immagini, mediante la quale, conoscendo opportuni parametri del sistema stereoscopico, è possibile risalire alla posizione 3D del punto considerato.

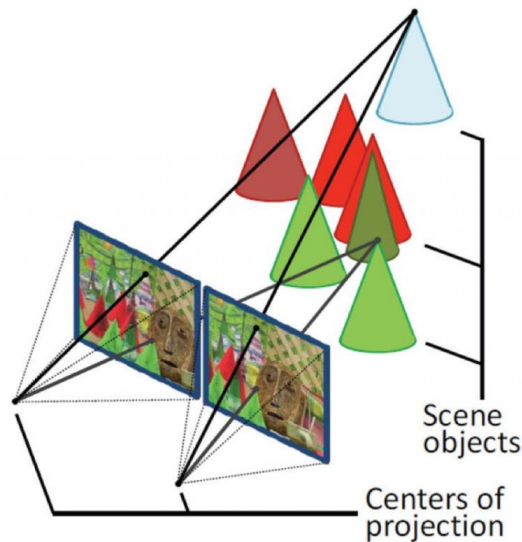


Figura 237 Problema della corrispondenza

I problemi da affrontare in un sistema basato sulla visione stereo sono:

1. Riduzione significativa della similarità nella scena osservata dalle due o più telecamere:

Distorsioni fotometriche → Punti corrispondenti avranno luminosità differente a causa del differente punto di vista. Differenze nei parametri che caratterizzano la risposta delle due telecamere. Rumore.

Distorsioni prospettiche → A causa della differente prospettiva regioni corrispondenti possono apparire di dimensioni differenti nelle due immagini.

2. Occlusioni: a causa della diversa posizione delle telecamere che compongono un sistema di visione stereoscopico nello spazio è possibile che un punto non risulti proiettato su tutti i piani immagini delle telecamere. In tal caso il problema delle corrispondenze non ha soluzione e non è possibile determinare la distanza del punto esaminato dalle telecamere e quindi se i punti non bastano sarà necessario utilizzare una metodologia differente. Ad esempio, è possibile l'utilizzo di più telecamere in grado di acquisire la stessa scena da più punti di vista e la combinazione delle diverse nuvole di punti ottenute in un unico modello 3D finale.
3. Regioni con poca texture e pattern periodici: se la scena non presenta differenze che si possono discriminare è necessario, ad esempio, generare texture addizionali sulla superficie dei campioni tramite l'ausilio di proiettori integrati o esterni al dispositivo.

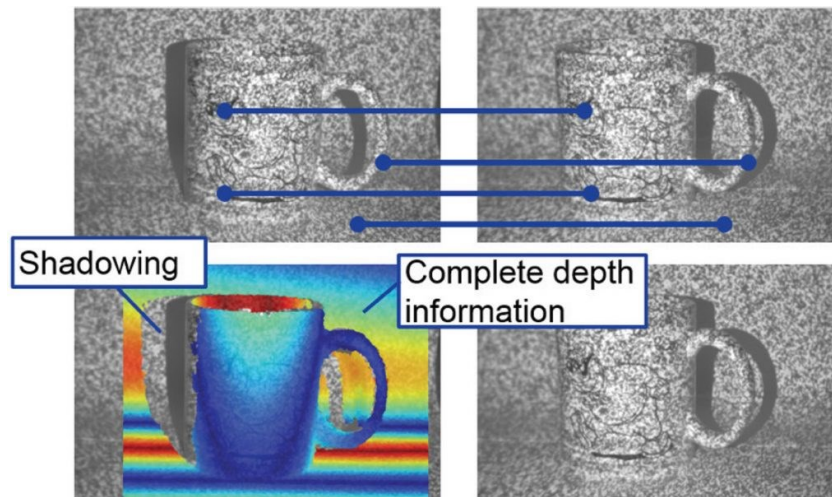


Figura 238 Esempio stereovisione con difetti

I **vantaggi** principali nell'utilizzo della stereovisione è la possibilità di controllare il costo del sensore scegliendo ed utilizzando telecamere standard disponibili sul mercato. Questo tipo di tecnica prevede l'utilizzo di sensori passivi, quindi può sfruttare l'illuminazione dell'ambiente. Inoltre, non prevede l'utilizzo di parti meccaniche in movimento riducendo i costi di realizzazione del sistema.

Gli **svantaggi** maggiori di questa tecnologia sono la necessità di sincronizzare l'acquisizione delle immagini tra tutte le telecamere del sistema e quella di calcolare i punti omologhi, che risulta essere un'operazione complessa e quindi non utilizzabile per applicazioni real-time. Inoltre, i risultati forniti da questi sensori dipendono dalla tessitura delle immagini utilizzata nel calcolo dei punti omologhi, ad esempio uno sfondo uniforme è difficilmente individuabile. Pertanto, questi sensori, oltre ad avere un range di misura limitato, offrono un'accuratezza solitamente limitata, una risoluzione variabile, una precisione bassa della misura e un tempo di risposta medio.

Le applicazioni che meglio si adattano a questa tecnica sono la localizzazione, identificazione nonché ispezione e misura.

13. ENSENSO X36

Per l'applicazione è stato usato il sistema di visione 3D denominato **Ensenso X36** con tecnologia FlexView2. Esso è costituito da un proiettore, due telecamere con sensori da 1,3 MP o 5 MP (CMOS, monocromatici), staffe di montaggio e angoli di regolazione. La tecnologia FlexView2 garantisce una migliore risoluzione spaziale nonché un'elevatissima robustezza del sistema per superfici scure o riflettenti. Le staffe di montaggio della telecamera sono disponibili in una gamma di larghezze per consentire l'implementazione di linee di base con dimensioni diverse. Oltre a ciò, è possibile configurare l'angolo di campo della fotocamera e scegliere tra vari obiettivi con diverse lunghezze focali. Questa flessibilità consente un'ampia gamma di distanze di lavoro, consentendo di catturare oggetti con un campo visivo ancora più ampio e un livello di dettaglio molto elevato.



Figura 239, 240 Stereocamera Ensenso X36

La tecnologia **FlexView** può migliorare ulteriormente il livello di dettaglio della mappa di disparità delle scene statiche. La posizione della maschera del pattern nei raggi di proiezione può essere tradotta a piccoli passi da un sistema meccanico che utilizza un attuatore piezoelettrico. Il risultato è una trama variabile sulla superficie dell'oggetto. L'acquisizione di più coppie di immagini con trame diverse della stessa scena dell'oggetto produce molti più punti immagine. La risoluzione aumenta e l'algoritmo di corrispondenza calcola mappe di disparità notevolmente migliorate utilizzando tutte le coppie di immagini acquisite. Come conseguenza dello spostamento della trama che produce informazioni aggiuntive sulla struttura su superfici lucide, scure o riflettenti, la risoluzione e anche la robustezza dei dati risultanti aumenteranno. Molti algoritmi di elaborazione beneficiano della maggiore risoluzione e del minor rumore. FlexView permette quindi di ridurre le fasi di post-elaborazione della nuvola di punti e dei tempi di elaborazione 3D.

I vantaggi rispetto ad altri modelli di telecamera 3D sono:

- Possibilità di regolare l'angolazione degli obiettivi e di cambiare le lenti
- Disponibilità di prolunghe laterali
- Flex View

Gli svantaggi rispetto ad altri modelli di telecamera 3D sono:

- Costo elevato
- Calibrazione e regolazione lenti non automatica

14. APPLICAZIONE DI BIN PICKING CON TELECAMERA 3D

Successivamente alla programmazione del robot all'interno della cella, si è scelto di studiare un metodo per riuscire a prelevare le capsule del caffè se fossero state posizionate con orientamento casuale all'interno di una determinata area. Ciò permette di svincolare l'operatore dal posizionare le capsule con un orientamento specifico all'interno dei fori sul vassoio. Come descritto nei capitoli precedenti, quest'ultima è stata la soluzione adottata per la cella di lavoro in modo da rispettare i tempi e i costi della commessa; nonostante ciò, si è dedicato del tempo allo studio e alla realizzazione di una soluzione per utilizzi futuri il più generale possibile.

Per realizzare questa applicazione, che può essere assimilata alla tecnica del bin picking molto diffusa nell'automazione, è necessaria una telecamera 3D montata su un supporto fisso per poter individuare l'oggetto che deve essere prelevato. Successivamente al collocamento delle capsule, con posizione e orientamento casuale, la telecamera acquisisce un'immagine o una serie di immagini estrapolando una mesh di punti con cui può effettuare una ricerca per comparazione, usufruendo del modello CAD originale delle capsule del caffè. Le informazioni ottenute permettono di identificare la posa dell'oggetto, ovvero la posizione (compresa l'altezza dal terreno) e l'orientamento. Tramite questi dati si può effettuare un'analisi e ricavare, attraverso dei calcoli matriciali, le coordinate da passare tramite Modbus al robot, che proseguirà andando a prelevare correttamente l'oggetto.

Nell'immagine sottostante si può notare la telecamera 3D posizionata su un supporto e sulla pavimentazione le capsule che sono state utilizzate per i test. Il modello di stereocamera utilizzato per i test è l'**Ensenso X36**.



Figura 241 Posizionamento attrezzatura per test

14.1 Scelta delle lenti

In base alle dimensioni dell'area di lavoro è possibile scegliere le lenti e le impostazioni da definire sulla stereocamera X36 dell'Ensensio in modo tale da migliorare la risoluzione. Per la nostra applicazione il piano di lavoro deve avere un'area di almeno 500 x 500 mm, affinché il robot abbia lo spazio necessario per eseguire le manovre e sia possibile contenere un numero elevato di oggetti al suo interno. Oltre a ciò, la mesh di punti che verrà rilevata deve almeno corrispondere all'altezza delle capsule con in aggiunta uno spessore di sicurezza; viene quindi impostato un valore pari a 150 mm per la profondità del volume di lavoro. Infine, è possibile impostare un quarto valore, corrispondente alla distanza tra la parte superiore del volume di lavoro e l'obiettivo della stereocamera. Per praticità definiamo la distanza tra il piano di lavoro e l'obiettivo della stereocamera, dato che risulta più facile da misurare, e lo poniamo pari a 1075 mm. Tale valore deve essere sufficientemente elevato da poter permettere alla X36 di stare ad un'altezza superiore al robot, senza interferire con i suoi movimenti. Da questo valore, andando a sottrarre l'altezza del volume di lavoro (150 mm), è possibile ricavare il valore che andrà impostato sul software online dell'Ensensio, ovvero 925 mm. Nell'immagine sottostante è possibile visualizzare a cosa corrispondono i valori a, b, c, d della quaterna necessaria per la scelta delle lenti.

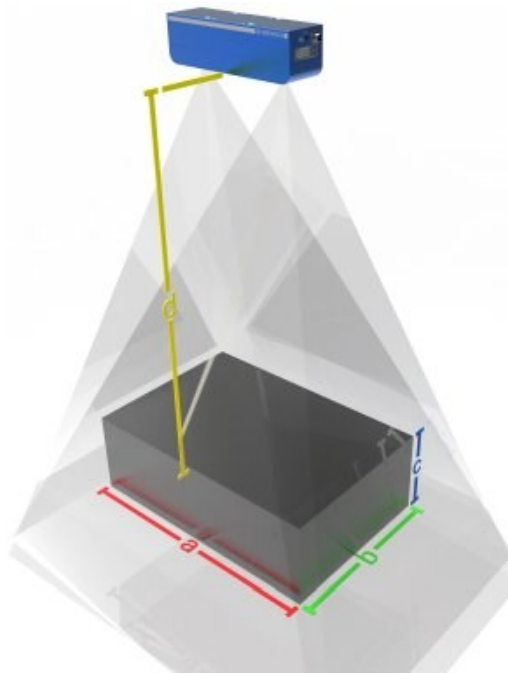


Figura 242 Volume di lavoro

Riassumendo, viene impostata una dimensione del volume di lavoro per la nostra applicazione pari a 500 x 500 x 150 x 925 mm (a x b x c x d).

Analizzando i risultati ottenuti, mostrati nell'immagine sottostante, si può osservare come la migliore soluzione proposta sia quella che utilizza delle **lenti di 12 mm**. In questo modo il volume di lavoro a cui è possibile accedere rispetta le dimensioni di altezza prefissate, ovvero $c = 151$ mm e $d = 925$ mm ed ha un'area di lavoro $a \times b$ perfino più grande, pari a 582×502 mm.

Model	Vergence ⓘ	$a \times b \times c$ [mm]	d [mm]	Disparity Settings ⓘ (Min / Num)
<input type="checkbox"/> X36-5CP-12/26/1000-400/1000	11.3°	582 x 502 x 151	925	-299 / 230

Figura 243 Volume di lavoro e lenti selezionate

Una volta individuate le lenti necessarie per la nostra applicazione si possono fare delle considerazioni relative all'accuratezza. Le coordinate dei punti che verranno rilevati dalla stereocamera avranno un errore di ± 0.25 mm su x e y , mentre di ± 0.08 mm sulla z . Nelle immagini sottostanti si possono osservare i grafici relativi alle varie accurattezze.

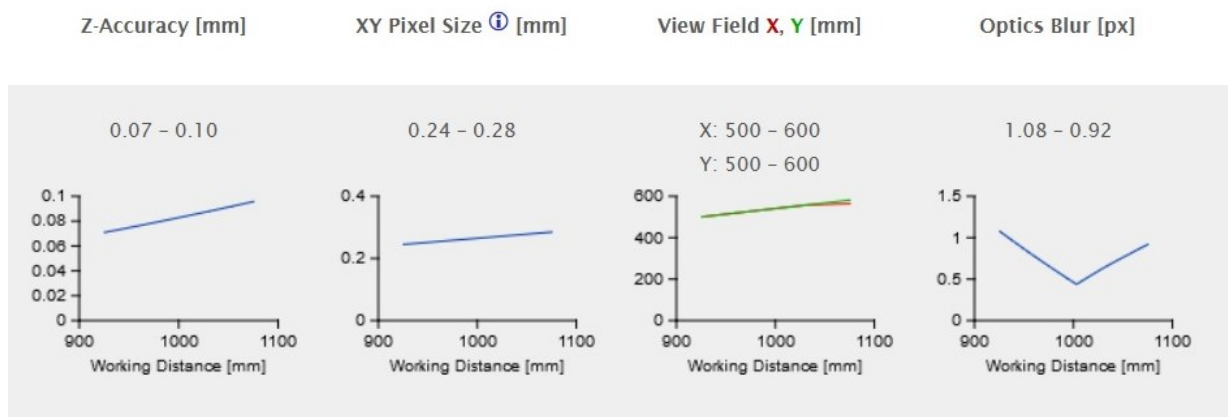


Figura 244 Grafici relativi all'accuratezza

14.2 Possibili disposizioni delle capsule

Valutando le varie possibilità con cui le capsule avrebbero potuto posizionarsi una volta depositate a terra, si è visto che i casi di interesse possono essere ricondotti a due. Le capsule, quando vengono lasciate cadere dall'operatore, tendono a stabilizzarsi nelle due configurazioni riportate nelle immagini sottostanti.

Il primo caso analizzato mostra la capsula posizionata con orientazione semi-orizzontale; difatti l'asse y che ne identifica la di simmetria principale è posto quasi orizzontalmente al terreno. Nell'immagine sottostante si può notare come tale posizione sia molto comoda per eseguire una presa senza andare ad interferire con gli altri elementi presenti nella postazione (altre capsule sul terreno) e dunque sia consigliato prendere tali capsule prima delle altre. La difficoltà principale sta nel criterio di analisi delle coordinate dato che bisogna selezionare con molta cura le trasformazioni necessarie per trasformare i dati di partenza (posa dell'oggetto) in output da passare al robot (R_x , R_y , R_z del polso).

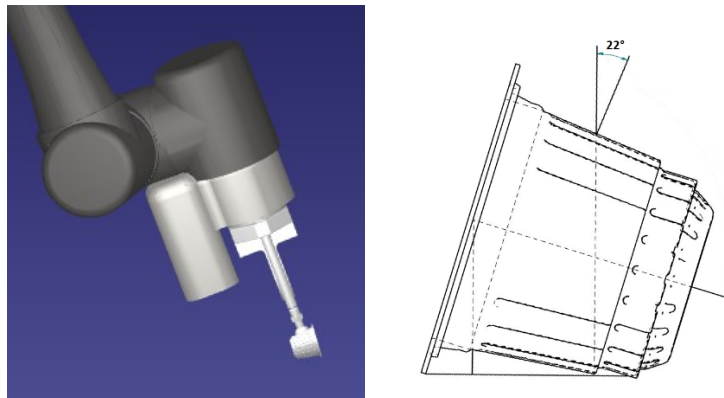


Figura 245, 246 Disposizione della capsula in orizzontale (destra) e relativa presa (sinistra)

Nel secondo caso in esame si può invece notare la capsula disposta verticalmente, ovvero con la base a contatto con il terreno. Tale situazione semplifica notevolmente i calcoli matriciali da eseguire per la trasformazione di coordinate, dato che sarebbe possibile andare a prelevare l'oggetto con una posizione fissa del polso del robot. Ciò è dovuto al fatto che la capsula è assialsimmetrica e qualunque sia l'orientamento dell'asse y non cambia la sua configurazione. Nonostante ciò, la presa risulta essere complicata e molto ingombrante per via della posizione abbassata del polso, che rischia di andare a contatto con il terreno e con le altre capsule presenti. Tale configurazione dell'oggetto deve essere prelevata alla fine.

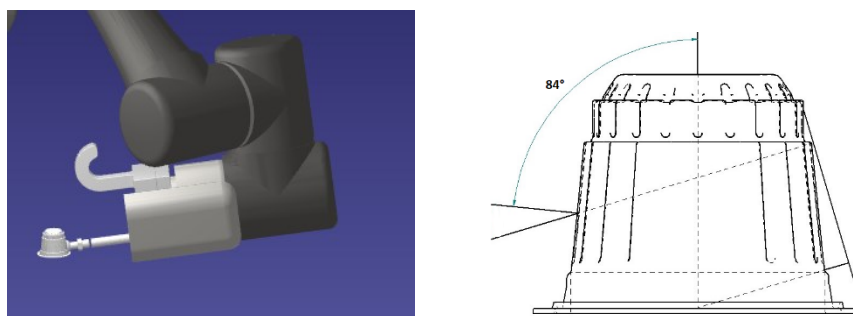


Figura 247, 248 Disposizione della capsula in verticale (destra) e relativa presa (sinistra)

15. PROGRAMMAZIONE CON HALCON

Il programma usato per gestire la telecamera 3D è **Halcon**. Attraverso varie righe di codice, che verranno descritte in questo capitolo, è stato possibile identificare un oggetto a partire dal suo modello CAD originale. Il programma, una volta identificato l'oggetto con una comparazione della nuvola di punti, fornisce in output le pose della base di riferimento degli oggetti rilevati.

MVTEC HALCON è un software per la visione artificiale con un ambiente di sviluppo integrato (HDevelop) che offre un supporto completo di piattaforme multicore e una libreria che copre tutte le aree dell'imaging come analisi dei blob, morfologia, corrispondenza, misurazione e identificazione. Inoltre, offre la possibilità di gestire le più recenti tecnologie di visione artificiale, come la visione 3D e gli algoritmi di deep learning.

Nella parte iniziale del programma si procede con il caricamento del file CAD relativo all'oggetto che vogliamo rilevare, nel nostro caso il file .STL della capsula del caffè. Per fare ciò si procede con la riga di codice sotto presentata.

```
read_object_model_3d(ObjectModelPath,'mm', 'invert_normals', 'true', ObjectModel3D, Status1)
```

Successivamente si passa all'inizializzazione della stereocamera, ovvero vengono inseriti i parametri che permettono ai punti visualizzati nella mesh di ricomporre l'immagine nel modo più corretto possibile, risolvendo eventuali problematiche relative alla non uniformità della fonte luminosa. Nelle immagini sottostanti si può osservare come si presenta il piano di lavoro dopo l'inizializzazione. Analizzando l'immagine a sinistra si può notare come le zone con colorazione tendente al rosso esprimono la massima lontananza dall'obiettivo, ovvero la zona del piano su cui poggiano gli oggetti; invece, le zone con colori più freddi si riferiscono ai punti più vicini. Si possono notare anche delle aree con colorazione grigiastra, in cui sono presenti delle zone d'ombra, o dei riflessi che non permettono l'individuazione di alcun punto. Nell'immagine a destra è invece raffigurato un dettaglio della mesh di punti individuata.

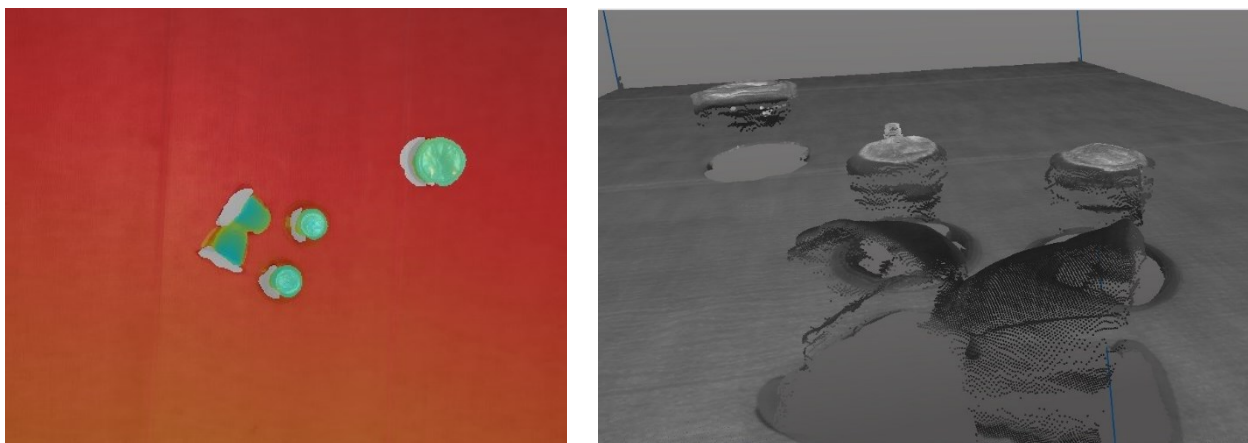


Figura 249, 250 Esempio visualizzazione mesh di punti

Come rappresentato dallo schema sottostante, la stereocamera prende le due immagini 2D e confrontandole con un pattern ricrea una nuvola di punti con coordinate x, y e z.

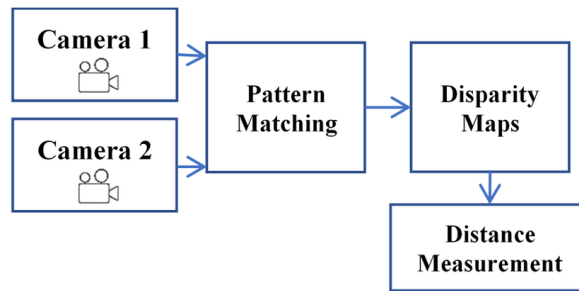


Figura 251 Schema relativo all'acquisizione della misura distanza con una stereocamera

Un esempio delle immagini 2D che vengono analizzate è presente nell'immagine seguente.

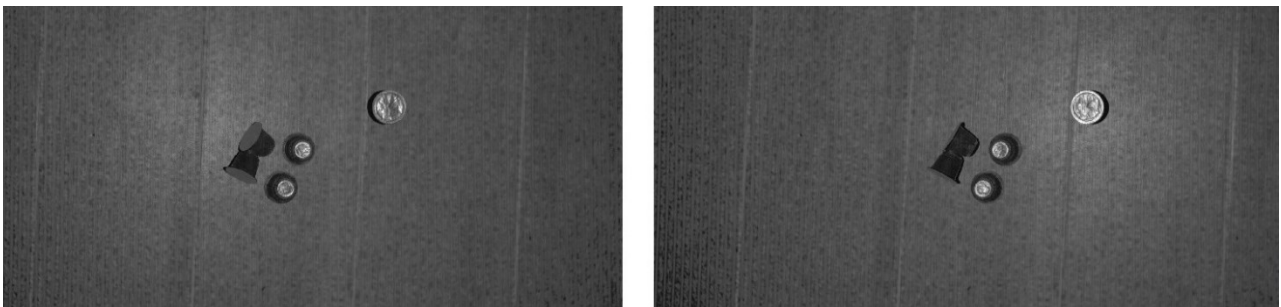


Figura 252, 253 Immagini 2D sinistra e destra della stessa acquisizione a confronto

Per richiamare i parametri precedentemente individuati e salvati su un file .json si utilizza la procedura seguente.

```

open_framegrabber ('Ensenso-NxLib', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 'default', 0, 'Raw', -1, 'false', 'Item', '/', 0, 0, NxLib)
open_framegrabber ('Ensenso-NxLib', 0, 0, 0, 0, 0, 0, 'default', 0, 'Raw', -1, 'false', 'Stereo', CameraCode, 0, 0, Camera)
set_framegrabber_param (Camera, 'auto_grab_data', 'false')
get_framegrabber_param(NxLib, 'file://LargeCamp.json', params)
set_framegrabber_param (NxLib, 'tmp', ['apply', params])
get_framegrabber_param (NxLib, 'tmp/Parameters', ParameterSubItem)
set_framegrabber_param (Camera, 'Parameters', ['apply', ParameterSubItem])
set_framegrabber_param (Camera, 'grab_data_items', ['Images/PointMap'])
set_framegrabber_param (NxLib, 'Execute/Default/Parameters/Timeout', '30000')
set_framegrabber_param (NxLib, 'do_execute', 'Capture')
set_framegrabber_param (NxLib, 'do_execute', 'ComputeDisparityMap')
set_framegrabber_param (NxLib, 'do_execute', 'ComputePointMap')
  
```

In seguito, si procede con l'acquisizione delle immagini e alla creazione della mesh di punti. Per fare ciò si utilizzano le righe di codice qui presentate.

```
set_framegrabber_param (NxLib, 'Execute/Default/Parameters/Timeout', '30000')
set_framegrabber_param (NxLib, 'do_execute', 'Capture')
set_framegrabber_param (NxLib, 'do_execute', 'ComputeDisparityMap')
set_framegrabber_param (NxLib, 'do_execute', 'ComputePointMap')
grab_data(Images, Regions, Contours, Camera, Data)
grab_image(GImage, Camera)
```

Con la relativa scomposizione in tre canali X, Y, Z.

```
scale_image(Images, Images, 0.001, 0)
access_channel(Images, X, 1)
access_channel(Images, Y, 2)
access_channel(Images, Z, 3)
dev_display (Z)
GData := Z
```

Per visualizzare al meglio i vari passaggi del programma vengono qui riportate le immagini ricavate durante un test. Lo scopo della prova riguardava l'acquisizione di 5 capsule del caffè di colore diverso (giallo e rosso) posizionate con vari orientamenti. La prima immagine proposta mostra la reale disposizione delle capsule; la successiva riguarda invece la ricostruzione della mesh una volta acquisiti i dati. La diversa distanza z relativa ai punti viene rappresentata con diverse tonalità di grigio (le zone nere esprimono le aree non rilevate).



Figura 254, 255 Immagine reale (sinistra) e mesh di punti acquisita (destra)

Come si può osservare, l'immagine presenta una variazione di colore quasi inesistente; infatti, lo sfondo tende a confondersi con la parte superiore delle capsule.

Ciò è dovuto al dominio considerato, che risulta essere troppo grande rispetto la dimensione degli oggetti rilevati. Per migliorare i risultati dell'acquisizione si procede tagliando il volume di lavoro in cui non sono presenti gli oggetti, ovvero la parte più vicina all'obbiettivo. Nell'immagine sottostante è possibile osservare il volume di lavoro se si riduce la z, andando a considerare solo i punti compresi tra una distanza 1.02 e 1.05 m dall'obbiettivo.

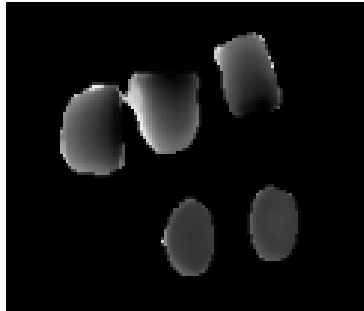


Figura 256 Riduzione spazio di lavoro in base all'altezza

Il codice utilizzato per questa procedura è il seguente.

```
get_image_size(Z, Width, Height)
gen_rectangle1 (ROI_0, 0, 0, Height-1, Width-1)
reduce_domain(Z, ROI_0, ZReduced)
xyz_to_object_model_3d (X, Y, ZReduced, FullScene)
threshold (ZReduced, FullROI, 1.02, 1.05)
```

Successivamente si procede eliminando i punti singoli, ovvero con un'area molto ridotta, e le aree troppo grandi, che potrebbero corrispondere allo sfondo. Per fare ciò si prendono in considerazione solamente le zone in cui i punti sono abbastanza vicini da formare un'unica area con una superficie compresa tra 100 e 200000. Nell'immagine sottostante si può notare la suddivisione in aree, anche se nel caso in analisi non è necessaria alcuna riduzione.

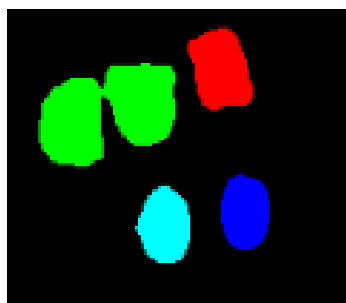


Figura 257 Riduzione spazio di lavoro in base all'area

Il codice utilizzato per tale applicazione è il seguente.

```
connection (FullROI, ConnectedRegions)
select_shape(ConnectedRegions, SelectedRegions, 'area', 'and', 100, 200000)
```

L'ultima modifica necessaria per ottenere dei risultati facilmente analizzabili riguarda l'unione delle singole area in cui è stata precedentemente suddivisa e la trasformazione della mesh di punti da una superficie orientata a un file 3D utilizzabile per un confronto con il file CAD precedentemente inserito. Il risultato è visibile nell'immagine seguente e nel caso in esame non presenta variazioni rilevanti.

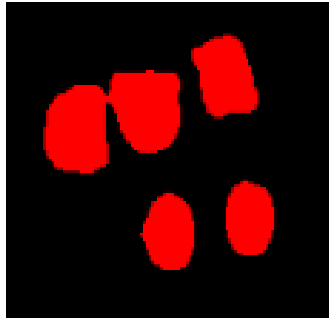


Figura 258 Unione delle zone selezionate

Il codice utilizzato per tale applicazione viene mostrato di seguito.

```
union1(SelectedRegions, RegionUnion)
reduce_domain (ZReduced, RegionUnion, ZReduced)
xyz_to_object_model_3d (X, Y, ZReduced, SceneObject1)
surface_normals_object_model_3d (SceneObject1, 'mls', ['mls_force_inwards'], ['false'],
SceneObjectNormals)
clear_object_model_3d(SceneObject1)
```

Infine, viene effettuato un confronto tra i punti acquisiti e il file .STL caricato in modo tale da trovare uno score di corrispondenza pari almeno a 0.10 (ovvero 10 %). Nell'immagine seguente è presente una ricostruzione di quanto rilevato dalla stereocamera in modo tale da verificare la correttezza dei risultati rispetto l'immagine reale inizialmente mostrata.

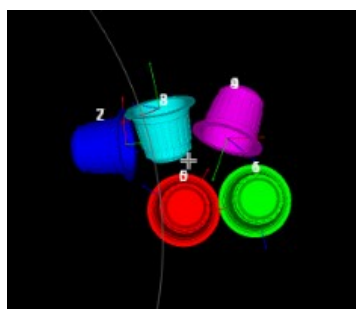


Figura 259 Immagine ricostruita per sovrapposizione

Il codice utilizzato per la ricerca delle capsule e l'ottenimento delle pose è il seguente.

```
find_surface_model (SMF, SceneObjectNormals, 0.03, 1, Score, 'true',
['num_matches','pose_ref_scoring_dist_rel','max_overlap_dist_rel','pose_ref_num_steps'], [12,0.2,0.9,20],
Poses, Scores, SurfaceMatchingResultID)
```

16. TRASFORMAZIONE DI COORDINATE

I sistemi di coordinate omogenee consentono di trasformare sistemi di coordinate mediante una singola trasformazione matriciale.

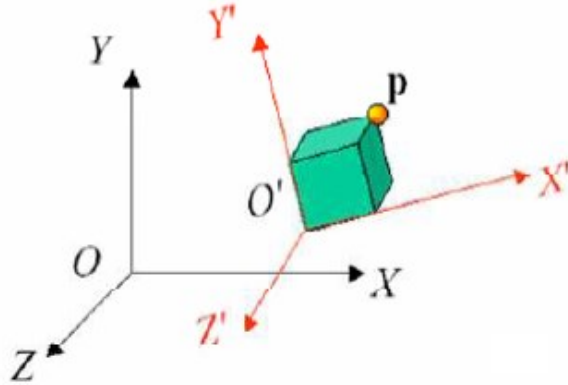


Figura 260 Sistema OXYZ e O'X'Y'Z' relativo al punto P

Un corpo rigido nello spazio è completamente descritto dalla sua posizione e orientazione rispetto ad un dato sistema di coordinate (posa). Sia OXYZ il sistema di coordinate ortonormale e siano X, Y, Z i vettori unitari orientati lungo gli assi. La posizione di un punto o' in OXYZ è data da:

$$o' = o'_x X + o'_y Y + o'_z Z$$

Per determinare la posizione e l'orientazione di un oggetto bisogna considerare un ulteriore sistema di coordinate O'XYZ solidale con l'oggetto. La posa dell'oggetto è definita dalla posa del sistema di coordinate dell'oggetto; occorre quindi determinare la posa di O'XYZ in OXYZ, cioè come OXYZ è ruotato e traslato per ottenere O'XYZ.

La **traslazione** è semplicemente il vettore $o' = O' - O$

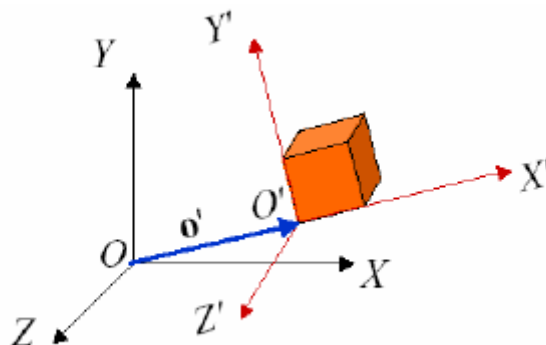


Figura 261 Traslazione sistema di riferimento

La **rotazione** è descritta mediante matrici di rotazione che vengono utilizzate per ruotare rispetto agli assi. Le 3 rotazioni elementari in 3D sono:

- $R(\theta)_x =$ rotazione rispetto all'asse X $\rightarrow \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

- $R(\theta)_y =$ rotazione rispetto all'asse Y $\rightarrow \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

- $R(\theta)_z =$ rotazione rispetto all'asse Z $\rightarrow \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Considerando il generico vettore traslazione t e la generica matrice di rotazione R , la trasformazione tra due qualsiasi sistemi di coordinate è data da: $p = Rp' + t$

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} p_{x'} \\ p_{y'} \\ p_{z'} \end{bmatrix} + t$$

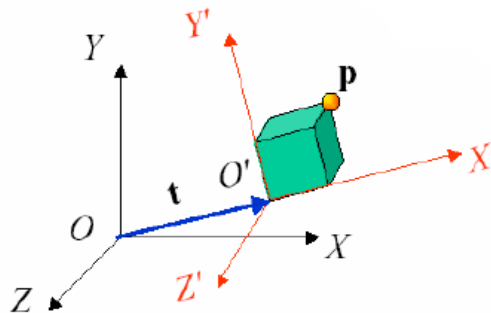


Figura 262 Traslazione di un sistema di riferimento del vettore t

Questo può essere implementato come singola moltiplicazione usando la notazione in coordinate omogenee: $p = Tp'$ dove T è la matrice di trasformazione omogenea 4x4.

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & t_x \\ & R & & t_y \\ & & & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{x'} \\ p_{y'} \\ p_{z'} \\ 1 \end{bmatrix}$$

La matrice di rotazione del sistema $\{B\}$ rispetto ad $\{A\}$ può essere indicata con ${}^A_B R$ e composta nei seguenti modi:

- le colonne sono costituite dai versori di $\{B\}$ espressi in $\{A\}$
- le righe sono costituite dai versori di $\{A\}$ espressi in $\{B\}$

16.1. Composizione di rotazioni

Le matrici di rotazione fondamentali possono essere composte tra loro per costruire nuove matrici di rotazione che consentano la rappresentazione di relazioni più complesse tra sistemi di coordinate. Ad esempio, se la terna {C} è ruotata di ${}^B C R$ rispetto alla {B} ed a sua volta quest'ultima è ruotata di ${}^A B R$ rispetto alla terna {A}, è possibile calcolare l'orientamento finale ${}^A C R$ di {C} relativamente ad {A}. Vale quindi:

$${}^A P = {}^A B R {}^B P = {}^A B R ({}^B C R {}^C P) = {}^A C R {}^C P$$

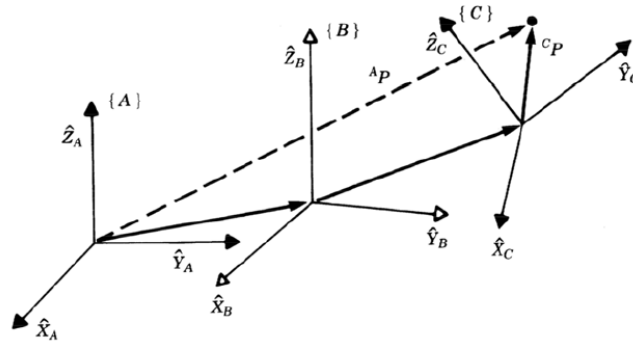


Figura 263 Composizione di rotazioni

Le rotazioni finite non possono essere trattate come vettori. Infatti, se ruotiamo un parallelepipedo prima intorno all'asse X di 90° e poi intorno a Y ancora di 90°, l'orientamento risultante è dato dalla prima posizione della figura sottostante. Se le rotazioni consecutive sono eseguite in ordine opposto, allora otteniamo il parallelepipedo messo come nella seconda posizione, che è completamente differente dalla prima.

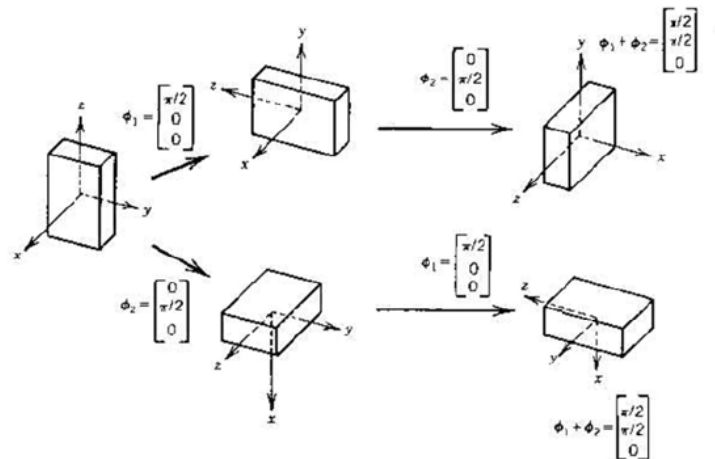


Figura 264 Esempio composizione di rotazioni ruotata con ordini differenti

Le rotazioni rigide di un corpo si compongono per **pre-moltiplicazione** delle matrici di rotazione scritte in assi fissi, cioè in termini della terna iniziale. ${}^A C R = {}^B C R {}^A B R$

A volte è utile esprimere le singole rotazioni riferendosi non alla terna iniziale, ma alle terne via via incontrate lungo l'esecuzione del moto. Si dice in questo caso che le rotazioni sono espresse in termini di terna corrente. Le rotazioni rigide di un corpo espresse in terna corrente si compongono per **post-moltiplicazione**. ${}^A C R = {}^A B R {}^B C R$

Come per le matrici di rotazione, anche per le matrici di trasformazione omogenea si possono dare diverse interpretazioni. In particolare, una matrice

$$T = \begin{bmatrix} & & & t_x \\ & R & & t_y \\ & & & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

può rappresentare rispettivamente:

- $T = {}^0T^{(1 \leftarrow 0)}$ l'operatore che porta punti e vettori di un corpo da una configurazione {0} in una nuova configurazione {1} ruotata di R e traslata di t (con coordinate espresse nel sistema di partenza);

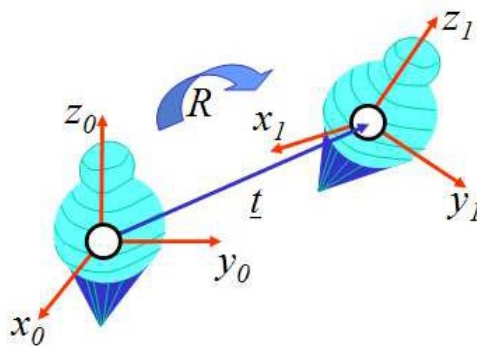


Figura 265 Rappresentazione operatore T su un corpo

- $T = {}^0T_1$ l'operatore che trasforma le coordinate di un punto inizialmente descritto da un osservatore posto in {1} in quelle descritte da un osservatore posto in un riferimento {0}, rispetto al quale il sistema {1} ha origine in t e versori dati dalle colonne di R.

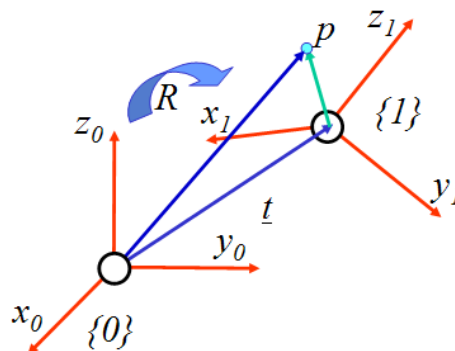


Figura 266 Rappresentazione operatore T su un punto

- La descrizione di una terna

La composizione di matrici di trasformazione omogenee si effettua utilizzando il prodotto matriciale secondo le stesse leggi viste per la composizione di rotazioni, cioè:

- Per pre-moltiplicazione di matrici espresse rispetto a una terna fissa;
- Per post-moltiplicazione di matrici espresse rispetto alla terna corrente.

16.2. Rotazioni intorno agli assi fissi

Per descrivere l'orientamento della terna {B} ci si può riferire a successive rotazioni intorno agli assi del sistema di riferimento fisso. Ovvero, inizialmente la terna {B} coincide con un sistema di riferimento noto {A}. Si ruota {B} intorno ad \hat{X}_A di un angolo γ , poi si ruota intorno ad \hat{Y}_A di un angolo β ed infine intorno a \hat{Z}_A di un angolo α .

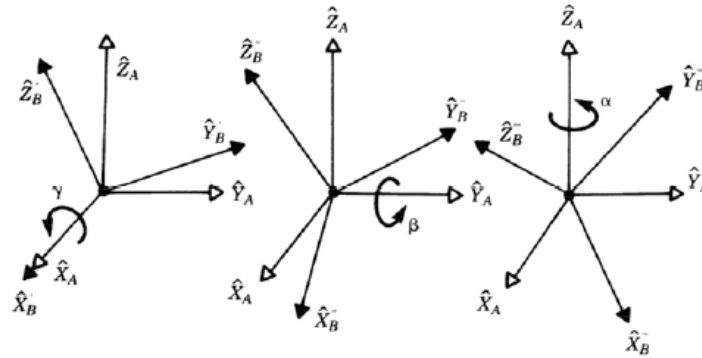


Figura 267 Esempio rotazione intorno agli assi fissi

Gli angoli introdotti sono spesso chiamati angoli aeronautici o pitch, yaw, roll (beccheggio, imbardata e rollio). Come visto precedentemente rotazioni successive intorno agli assi della terna fissa si compongono pre-moltiplicando le relative matrici di rotazione. Per esempio, nel caso degli angoli sopra introdotti essa vale:

$${}^A_B R = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) = \begin{bmatrix} cac\beta & cas\beta s\gamma - sac\gamma & cas\beta c\gamma + sas\gamma \\ sac\beta & sas\beta s\gamma + cac\gamma & sas\beta c\gamma - cas\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix}$$

È inoltre possibile esplicitare la soluzione inversa, conoscendo la matrice di rotazione

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$$

La soluzione inversa fornisce generalmente 2 soluzioni:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) & -\pi < \alpha_1 \leq \pi \\ \beta_1 = \text{atan2}(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}) & -\pi/2 < \beta_1 < \pi/2 \\ \gamma_1 = \text{atan2}(r_{32}, r_{33}) & -\pi < \gamma_1 \leq \pi \end{cases}$$

$$\begin{cases} \alpha_2 = -\alpha_1 & -\pi < \alpha_2 \leq \pi \\ \beta_2 = \pi - \beta_1 & \pi/2 < \beta_2 < 3\pi/2 \\ \gamma_2 = -\gamma_1 & -\pi < \gamma_2 \leq \pi \end{cases}$$

16.3. Rotazioni intorno agli assi mobili

Per descrivere l'orientamento della terna {B} ci si può riferire a successive rotazioni intorno agli assi del sistema di riferimento mobile. Ovvero, inizialmente la terna {B} coincide con un sistema di riferimento noto {A}. Si ruota {B} intorno a \hat{Z}_B di un angolo α , poi si ruota intorno ad \hat{Y}_B di un angolo β ed infine intorno ad \hat{X}_B di un angolo γ .

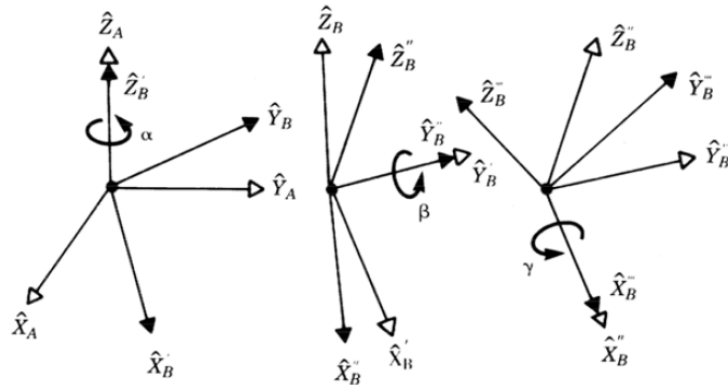


Figura 268 Esempio rotazione intorno agli assi mobili

Come visto precedentemente rotazioni successive intorno agli assi della terna mobile si compongono post-moltiplicando le relative matrici di rotazione. Per esempio, nel caso degli angoli sopra introdotti essa vale:

$${}^A_B R = R_X(\alpha)R_Y(\beta)R_Z(\gamma) = \begin{bmatrix} c\beta c\gamma & -c\beta s\gamma & s\beta \\ sas\beta c\gamma + cas\gamma & -sas\beta s\gamma + cac\gamma & -sac\beta \\ -cas\beta c\gamma + sas\gamma & cas\beta s\gamma + sac\gamma & cac\beta \end{bmatrix}$$

In generale si può affermare che tre rotazioni attorno agli assi della terna mobile forniscono lo stesso orientamento finale delle stesse tre rotazioni prese in ordine opposto intorno agli assi fissi. Ovvero:

$${}^A_B R = R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) = [R_X(-\gamma)R_Y(-\beta)R_Z(-\alpha)]^{-1} = [{}^B_A R]^{-1}$$

17. ELABORAZIONE DELLE COORDINATE DA FORNIRE AL ROBOT

Il programma usato per gestire la telecamera 3D è **Halcon**. Attraverso varie righe di codice, che sono state approfondite nei capitoli precedenti, è stato possibile identificare un oggetto a partire dal suo modello CAD originale. Il programma, una volta identificato l'oggetto con una comparazione della nuvola di punti, fornisce in output le pose della base di riferimento degli oggetti rilevati.

Un estratto del file CAD utilizzato viene proposto nell'immagine sottostante per poter visualizzare la base utilizzata per lo studio delle coordinate. L'assialsimmetria della capsula è data dal vettore Y, uscente dall'oggetto.

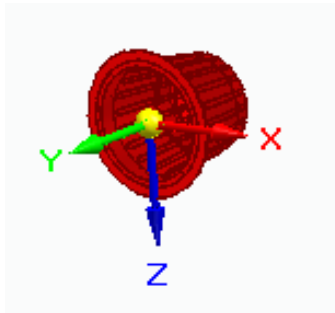


Figura 269 Modello CAD della capsula e relativo sistema di riferimento

La posa 3D creata viene restituita in **"Pose"** che è una tupla di lunghezza sette. I primi tre elementi contengono i parametri di traslazione TransX, TransY e TransZ, seguiti dai parametri di rotazione RotX, RotY e RotZ. L'ultimo elemento codifica il tipo di rappresentazione della posa selezionata con i parametri OrderOfTransform, OrderOfRotation e ViewOfTransform. La tabella seguente elenca le possibili combinazioni. I più utilizzati sono i tipi di rappresentazione con OrderOfTransform = 'Rp+T' e ViewOfTransform = 'point' (codici 0, 2 e 4).

<i>OrderOfTransform</i>	<i>OrderOfRotation</i>	<i>ViewOfTransform</i>	Code
'Rp+T'	'gba'	'point'	0
'Rp+T'	'abg'	'point'	2
'Rp+T'	'rodriguez'	'point'	4
'Rp+T'	'gba'	'coordinate_system'	1
'Rp+T'	'abg'	'coordinate_system'	3
'Rp+T'	'rodriguez'	'coordinate_system'	5
'R(p-T)'	'gba'	'point'	8
'R(p-T)'	'abg'	'point'	10
'R(p-T)'	'rodriguez'	'point'	12
'R(p-T)'	'gba'	'coordinate_system'	9
'R(p-T)'	'abg'	'coordinate_system'	11
'R(p-T)'	'rodriguez'	'coordinate_system'	13

È possibile convertire le pose in altri tipi di rappresentazione usando il comando **convert_pose_type**. Inoltre, per identificare la tipologia di rappresentazione utilizzata si può usare **get_pose_type**, il quale restituisce in output OrderOfTransform, OrderOfRotation e ViewOfTransform.

Le pose rilevate vengono poi convertite in una matrice di trasformazione omogenea per poter eseguire più facilmente le operazioni matriciali necessarie. Per far ciò viene utilizzato il comando **pose_to_hom_mat3d** che prende in input la posa (Pose) e restituisce in output la matrice (HomMat3D).

A seguito dell'identificazione di più oggetti, il programma restituisce un vettore composto da pose concatenate, una di seguito all'altra. Per identificare una singola posa vengono estrapolati 7 elementi attraverso un ciclo "for". All'interno del ciclo è possibile eseguire delle operazioni per le singole pose per poi riformare un vettore con le pose concatenate (Se non è necessario estrapolarle definitivamente). Nello specifico la procedura utilizzata è la seguente, con SavedPoses come vettore di pose concatenate e NumResults il numero di pose di cui è composto (ovvero il numero di oggetti trovati):

```
ModelPoses := []
for Index1 := 0 to NumResults - 1 by 1
    ModelPose1 := SavedPoses[Index1*7:Index1*7+6]
    ModelPoses := [ModelPoses, ModelPose1]
endfor
SavedPoses := [ModelPoses]
```

17.1. Trasferimento delle coordinate alla base del robot

Le coordinate individuate sono riferite alla base della telecamera (con la z rivolta verso il basso) e con una rappresentazione non consona per i calcoli che bisogna effettuare. Per questo motivo è necessario trasferire le coordinate alla base del robot (con la z rivolta verso l'alto e il piano xy ruotato) e modificarne la tipologia. Ogni posa individuata viene quindi convertita nella matrice di trasformazione omogenea, ruotata rispetto la y della terna fissa di 180°, riconvertita in posa e infine viene cambiata la tipologia in 'Rp+T', 'abg', 'point'. Di seguito viene proposto il codice utilizzato per la sequenza:

```
ModelPoses := []
for Index1 := 0 to NumResults - 1 by 1
    ModelPose1 := SavedPoses[Index1*7:Index1*7+6]
    pose_to_hom_mat3d(ModelPose1, ThisHomMat3D)
    hom_mat3d_rotate(ThisHomMat3D, rad(180), 'y', 0, 0, 0, ThisHomMat3D)
    hom_mat3d_to_pose(ThisHomMat3D, ThisModelPose)
    convert_pose_type(ThisModelPose, 'Rp+T', 'abg', 'point', ThisModelPose)
    ModelPoses := [ModelPoses, ThisModelPose]
```

```
endfor
```

```
SavedPoses := [ModelPoses]
```

Nel test effettuato si è deciso di posizionare il robot in modo tale che la distanza tra le origini della telecamera e della base del robot sia $X = 0$ m; $Y = -0.4$ m; $Z = 1.056$ m (Vengono indicate le coordinate dell'origine della base del robot rispetto la base della telecamera). In generale una volta posizionato il robot dietro la telecamera bisognerà inserire nell'algoritmo su X, Y le coordinate rispetto l'obbiettivo e su Z l'altezza.

L'orientamento del polso del robot utilizzato per la nostra applicazione, e che risulta in ogni caso il più consono per ottenere il miglior risultato senza che la struttura del TM vada a sbattere su se stessa, deve essere $R_x = -180$; $R_y = 0$; $R_z = 0$. Da questa posizione il robot riesce a raggiungere le capsule con meno movimenti possibili in qualunque posizione si trovino.

Una volta individuati i valori relativi tra telecamera e robot sarà necessario effettuare una traslazione delle coordinate ottenute per poterle riferire al robot. Di seguito viene proposto il codice utilizzato per la sequenza:

```
X:=0
```

```
Y:=-0.400
```

```
Z:=1.056
```

```
ModelPoses := []
```

```
for Index1 := 0 to NumResults - 1 by 1
```

```
    ModelPosel := SavedPoses[Index1*7:Index1*7+6]
```

```
    ModelPosel[0]:=ModelPosel[0]+X
```

```
    ModelPosel[1]:=ModelPosel[1]+Y
```

```
    ModelPosel[2]:=ModelPosel[2]+Z
```

```
    ModelPoses := [ModelPoses, ModelPosel]
```

```
endfor
```

```
SavedPoses := [ModelPoses]
```

17.2. Identificazione della capsula da prelevare

Le capsule che risultano essere più veloci da prendere, e con una posizione del polso del robot che non rischi di urtare gli altri oggetti, sono quelle precedentemente identificate come disposte **orizzontalmente**. Nell'immagine a destra si può notare come tale posizione sia molto comoda per eseguire una presa senza andare ad interferire con gli altri elementi presenti nella postazione (altre capsule sul terreno) e dunque sia consigliato prendere tali capsule prima delle altre.

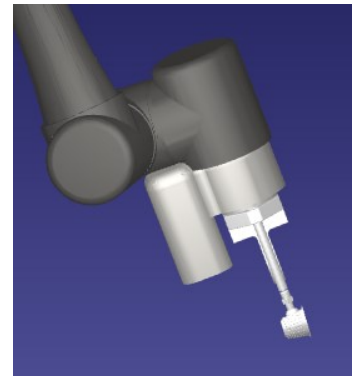


Figura 270 Presa per capsula orizzontale

Le capsule che sono state classificate come disposte **verticalmente** risultano essere molto scomode da prendere. Come si può vedere dall'immagine a destra l'orientamento del polso è molto ingombrante e rischia di schiacciare gli altri oggetti nelle vicinanze; per questo motivo è preferibile selezionare queste capsule solamente come dopo aver parzialmente sgombrato l'area.

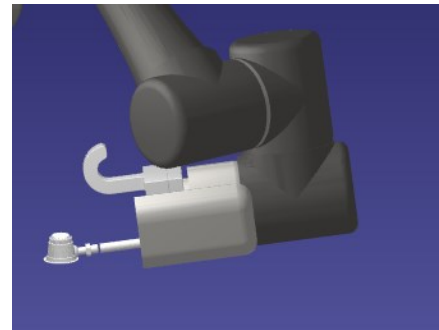


Figura 271 Presa per capsula verticale

Il seguente codice permette di separare in due tuple distinte le due tipologie di posizionamento. Per effettuare tale distinzione si prende come riferimento la Z dell'asse Y (ovvero il nono valore della matrice HomMat3D), la quale sarà uguale a 1 (o comunque superiore a 0.8 per un margine d'errore) se la capsula è posizionata verticalmente.

```
ModelPosesOriz := []
ModelPosesVert := []
CountOriz:=0
CountVert:=0
for Index1 := 0 to NumResults - 1 by 1
    ModelPose1 := SavedPoses[Index1*7:Index1*7+6]
    pose_to_hom_mat3d(ModelPose1, HomMat3D)
    Value:=HomMat3D[9]
    tuple_abs(Value, Value)
    if (Value < 0.8)
        ModelPosesOriz := [ModelPosesOriz, ModelPose1]
        CountOriz:=CountOriz+1
    else
        ModelPosesVert := [ModelPosesVert, ModelPose1]
        CountVert:=CountVert+1
```

```

        endif
    endfor
    Count:=0
    tuple_length(ModelPosesOriz, Length)
    if (Length > 0)
        SavedPoses := [ModelPosesOriz]
        Count:=CountOriz
    else
        SavedPoses := [ModelPosesVert]
        Count:=CountVert
    endif

```

Le capsule sono disposte all'interno di un'area quadrata delimitata da uno spessore relativamente alto per non rischiare che gli oggetti, una volta posizionati, fuoriescano dall'area. Per semplificare la procedura e velocizzare i movimenti del robot è consigliato iniziare il prelievo degli oggetti dal centro dell'area analizzata. Per fare ciò, può usare la seguente formulazione, che punta a selezionare la capsula più centrale; ovvero quella che risulta avere il modulo della distanza dal centro (Radius) più piccola.

```

ModelPoses := []
ThisRadius := 10000000
for Index1 := 0 to Count - 1 by 1
    ModelPosel := SavedPoses[Index1*7:Index1*7+6]
    Radius:= sqrt(pow((ModelPosel[0]-X),2) + pow((ModelPosel[1]-Y),2))
    Radius:=abs(Radius)
    if (Radius<ThisRadius)
        ThisRadius:=Radius
        ModelPoses := [ModelPosel]
    endif
endfor
SavedPoses := [ModelPoses]

```

17.3. Definizione delle coordinate definitive da passare al robot

Le coordinate da passare al robot vengono rielaborate attraverso la funzione `ROBOT_POSE` che prende in ingresso il vettore "SavedPoses" ricavato precedentemente e restituisce il vettore "Coordinate", oltre un eventuale "Exception" se l'elaborazione non fornisce risultati.

Robot_Pose (SavedPoses, Exception, Coordinate)

Inizialmente vengono definite le coordinate Xbase, Ybase, Zbase che vanno a identificare la posizione del tool del robot, in questo modo si conosce la posizione esatta da cui il robot partirà per eseguire il movimento di presa. Ciò è di fondamentale importanza al fine di determinare le Xmove, Ymove, Zmove, le quali verranno inviate via Modbus all'interfaccia di gestione che eseguirà il movimento. Oltre alla traslazione vanno definiti i valori di Rx, Ry, Rz che identificano l'orientamento. Per il calcolo delle rotazioni relative si parte dai valori di ingresso SavedPoses[3], SavedPoses[4], SavedPoses[5], presi in input dalla funzione.

```
try
```

```
Xbase:=349
```

```
Ybase:=0
```

```
Zbase:=249
```

```
Xpunto:=SavedPoses[0]*1000
```

```
Ypunto:=SavedPoses[1]*1000
```

```
Zpunto:=SavedPoses[2]*1000
```

```
X:=Xpunto
```

```
Y:=Ypunto
```

```
Z:=Zpunto
```

```
thetax1DEG := SavedPoses[3]
```

```
thetay1DEG := SavedPoses[4]
```

```
thetaz1DEG := SavedPoses[5]
```

```
Xmove := Xpunto-Xbase
```

```
Ymove := Ypunto-Ybase
```

```
Zmove := Zpunto-Zbase
```

```
thetax1 := rad(thetax1DEG)
```

```
thetay1 := rad(thetay1DEG)
```

```
thetaz1 := rad(thetaz1DEG)
```

```
create_matrix(4, 4, [1, 0, 0, X, 0, 1, 0, Y, 0, 0, 1, Z, 0, 0, 0, 1], Traslazione)
```

```
create_matrix(4, 4, [1, 0, 0, 0, 0, 0, cos(thetax1), -sin(thetax1), 0, 0, sin(thetax1), cos(thetax1), 0, 0, 0, 0, 1],  
Rotazione_x1)
```



```
create_matrix(4, 4, [cos(thetay1), 0, sin(thetay1), 0, 0, 1, 0, 0, -sin(thetay1), 0, cos(thetay1), 0, 0, 0, 0, 1],  
Rotazione_y1)
```

```
create_matrix(4, 4, [cos(thetaz1), -sin(thetaz1), 0, 0, sin(thetaz1), cos(thetaz1), 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1],  
Rotazione_z1)
```

```
mult_matrix(Traslazione, Rotazione_z1, 'AB', Tfixa)
```

```
mult_matrix(Tfixa, Rotazione_y1, 'AB', Tfixa)
```

```
mult_matrix(Tfixa, Rotazione_x1, 'AB', Tfixa)
```

```
get_full_matrix(Tfixa, IFvector)
```

A partire dalla matrice Tfixa, che identifica il sistema di riferimento della capsula selezionata, si effettuano delle rotazioni attorno agli assi per definire le coordinate da passare al robot. A seconda della tipologia di capsula individuata si seguirà una procedura diversa sintetizzata di seguito.

Capsula verticale:

- Ruoto rispetto l'asse Y fino a quando la Y dell'asse X non è nulla e la Y dell'asse Z non è pari a 1
- Ruoto rispetto Y di 45° o -45° a seconda se la capsula è posizionata nella zona destra ($X > 0$) o sinistra ($X < 0$)
- Ruoto rispetto X di -90°
- Ruoto rispetto Y di 84°
- Ruoto rispetto Z di -180°

Capsula obliqua:

- Ruoto rispetto Y fino a quando la Z dell'asse X non è nulla e la Z dell'asse Z non è positiva
- Ruoto rispetto X fino a quando la Z dell'asse Y non è nulla, la Z dell'asse X non è nulla e la Z dell'asse Z non è pari a -1
- Ruoto rispetto X di 22°

Infine, si effettua una traslazione rispetto la base mobile per identificare il punto esatto in cui il tool del robot si posizionerà:

- Per spostare il sistema di riferimento lungo la superficie della capsula in posizione verticale muovo (X, Y, Z) di (-15, 0, -50)
- Per spostare il sistema di riferimento lungo la superficie della capsula in posizione obliqua muovo (X, Y, Z) di (0, 15, -50)

Ovviamente è anche esplicitabile la soluzione inversa, ovvero il calcolo degli angoli aeronautici a partire dalla conoscenza della matrice di rotazione, che corrisponderanno alle coordinate angolari Rx, Ry, Rz da passare al robot. La soluzione inversa fornisce generalmente 2 soluzioni e attraverso un confronto è possibile identificare quale delle due rappresenta con maggiore precisione la matrice iniziale. Di seguito è proposta la parte del programma in cui vengono calcolate le coordinate finali.

```

get_full_matrix(F, Fvector)
Rx1RAD:=atan2(Fvector[9],Fvector[10])
Ry1RAD:=atan2(-Fvector[8],sqrt(pow(Fvector[9],2)+pow(Fvector[10],2)))
Rz1RAD:=atan2(Fvector[4],Fvector[0])
Rx1 := deg(Rx1RAD)
Ry1 := deg(Ry1RAD)
Rz1 := deg(Rz1RAD)
Rx2:=-Rx1
Ry2:=90-Ry1
Rz2:=-Rz1
RotazioneFinale(Fvector[3],Fvector[7],Fvector[11],Rx1,Ry1,Rz1,R1)
RotazioneFinale(Fvector[3],Fvector[7],Fvector[11],Rx2,Ry2,Rz2,R2)
get_full_matrix(R1, R1vector)
if (abs(100*Fvector[0])-abs(100*R1vector[0])<1 and abs(100*Fvector[1])-abs(100*R1vector[1])<1 and
abs(100*Fvector[2])-abs(100*R1vector[2])<1 and abs(100*Fvector[4])-abs(100*R1vector[4])<1 and
abs(100*Fvector[5])-abs(100*R1vector[5])<1 and abs(100*Fvector[6])-abs(100*R1vector[6])<1 and
abs(100*Fvector[8])-abs(100*R1vector[8])<1 and abs(100*Fvector[9])-abs(100*R1vector[9])<1 and
abs(100*Fvector[10])-abs(100*R1vector[10])<1)
    R:=R1
    Rx:=Rx1
    Ry:=Ry1
    Rz:=Rz1
else
    R:=R2
    Rx:=Rx2
    Ry:=Ry2
    Rz:=Rz2
endif

```

Viene infine riempito il vettore “Coordinate” ponendo nei primi tre elementi i valori di posizione Xmove, Ymove, Zmove e nei successivi le rotazioni Rx+180 (poiché il polso del robot ha la terna ruotata verso il basso), Ry, Rz. Nell’ultimo elemento viene inserito il valore 1 per precisare che l’identificazione ha avuto successo.

```
Coordinate := [Xmove, Ymove, Zmove, Rx+180, Ry, Rz, 1]
```

17.4. Sottofunzioni ricorrenti

All'interno del programma vengono richiamate delle sottofunzioni di seguito esplicitate.

- **ROTAZIONE_RX**

```
thetax := rad(thetaxDEG)

create_matrix(4, 4, [1, 0, 0, 0, 0, cos(thetax), -sin(thetax), 0, 0, sin(thetax), cos(thetax), 0, 0, 0, 0, 1], Rotazione_x)

mult_matrix(Tfissa, Rotazione_x, 'AB', Truotato)

return ()
```

- **ROTAZIONE_RY**

```
thetay := rad(thetayDEG)

create_matrix(4, 4, [cos(thetay), 0, sin(thetay), 0, 0, 1, 0, 0, -sin(thetay), 0, cos(thetay), 0, 0, 0, 0, 1], Rotazione_y)

mult_matrix(Tfissa, Rotazione_y, 'AB', Truotato)

return ()
```

- **ROTAZIONE_RZ**

```
thetaz := rad(thetazDEG)

create_matrix(4, 4, [cos(thetaz), -sin(thetaz), 0, 0, sin(thetaz), cos(thetaz), 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1], Rotazione_z)

mult_matrix(Tfissa, Rotazione_z, 'AB', Truotato)

return ()
```

- **ROTAZIONE_FINALE**

```
thetax1 := rad(Rx)

thetay1 := rad(Ry)

thetaz1 := rad(Rz)

create_matrix(4, 4, [1, 0, 0, X, 0, 1, 0, Y, 0, 0, 1, Z, 0, 0, 0, 1], Traslazione)

create_matrix(4, 4, [1, 0, 0, 0, 0, cos(thetax1), -sin(thetax1), 0, 0, sin(thetax1), cos(thetax1), 0, 0, 0, 0, 1], Rotazione_x1)

create_matrix(4, 4, [cos(thetay1), 0, sin(thetay1), 0, 0, 1, 0, 0, -sin(thetay1), 0, cos(thetay1), 0, 0, 0, 0, 1], Rotazione_y1)

create_matrix(4, 4, [cos(thetaz1), -sin(thetaz1), 0, 0, sin(thetaz1), cos(thetaz1), 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1], Rotazione_z1)

mult_matrix(Traslazione, Rotazione_z1, 'AB', Tfissa)

mult_matrix(Tfissa, Rotazione_y1, 'AB', Tfissa)

mult_matrix(Tfissa, Rotazione_x1, 'AB', Tfissa)

return ()
```

17.5. Salvataggio delle coordinate su un file

Una volta calcolate le coordinate definitive si procede al salvataggio dei dati su un apposito file .txt in modo tale che un altro programma possa leggerle e passarle al robot. Nel nostro caso il passaggio successivo è stato eseguito con Labview ma altri software rendono tale passaggio superfluo andando a prelevare i dati direttamente da Halcon. Nell'ultima riga viene indicato un codice (2) per comunicare che la ricerca ha prodotto risultati. La procedura utilizzata è la seguente.

```
open_file('C:/Users/feden/Desktop/ProgrammaPresaCompleto/ComunicazioneRobot/CoordinateHalcon.txt
','output',FileHandle)
fwrite_string(FileHandle,'Coordinate')
fnew_line(FileHandle)5
for Index:=0 to 5 by 1
    fwrite_string(FileHandle,Coordinate[Index])
    fnew_line(FileHandle)
endfor
fwrite_string(FileHandle,'2')
fnew_line(FileHandle)
```

Nel caso in cui non sia stata trovata nessuna capsula si procede scrivendo nelle varie righe tutti 0, compreso nel codice nell'ultima riga.

```
open_file('C:/Users/feden/Desktop/ProgrammaPresaCompleto/ComunicazioneRobot/CoordinateHalcon.txt
','output',FileHandle)
fwrite_string(FileHandle,'Coordinate')
fnew_line(FileHandle)
for Index:=0 to 5 by 1
    fwrite_string(FileHandle,'0')
    fnew_line(FileHandle)
endfor
fwrite_string(FileHandle,'1')
fnew_line(FileHandle)
close_file(FileHandle)
```

18. ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI DURANTE I TEST

Durante la programmazione della telecamera 3D e lo studio delle coordinate sono stati eseguiti numerosi test in modo tale da poter validare i risultati e rilevare eventuali problematiche nascoste. Durante i test si è potuto innanzitutto verificare che le coordinate rilevate rispecchiassero il più possibile la realtà. Come mostrato dalle immagini seguenti è stato possibile sovrapporre alle coordinate rilevate sul software Halcon i file STL degli stessi in modo tale da avere un riscontro diretto con la realtà. Andando a confrontare le coordinate di posizione e orientamento reali con quelle acquisite si può notare che la mesh di punti viene rilevata in modo corretto e la sovrapposizione è quasi perfetta. Esiste comunque un margine d'errore dovuto principalmente all'illuminazione, la quale deve essere il più uniforme possibile per non interferire con l'acquisizione dei punti del pattern.

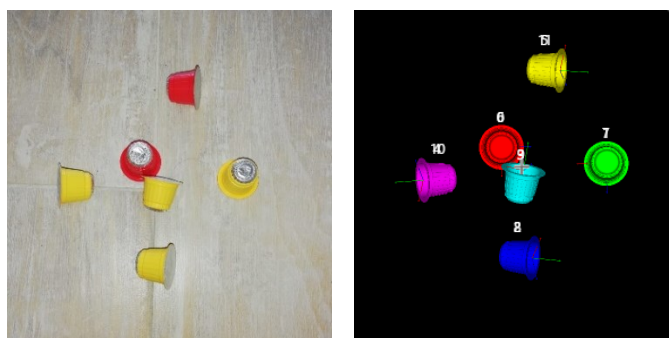


Figura 272, 273 Confronto immagine reale e ricostruita

Successivamente sono state calcolate le coordinate da passare al robot per ogni capsula identificata. Nella tabella sottostante vengono mostrati i risultati di un test, eseguito sulle capsule disposte come visto nelle due immagini soprastanti. Il primo dato (Posizione Capsula) si riferisce alle coordinate della capsula rilevate dalla telecamera, il secondo (Posizione Robot) definisce le coordinate a cui verrà posizionato il tool del robot per la presa. Va inoltre sottolineato che il programma richiede molto tempo per scattare l'immagine e rielaborarla, tale problema è comunque risolvibile velocizzando alcuni passaggi da PLC.

Capsula 1	X	Y	Z	Rx	Ry	Rz
Posizione Capsula	-78	-504	0	-91	1	-69
Posizione Robot	-78	-504	0	173,813	85,293	-51,15
Capsula 2	X	Y	Z	Rx	Ry	Rz
Posizione Capsula	-165	-491	0	-89	0	18
Posizione Robot	-165	-491	0	-174,915	84,87	-39,939
Capsula 3	X	Y	Z	Rx	Ry	Rz
Posizione Capsula	-104	-412	0	116	68	-159
Posizione Robot	-104	-412	0	-158,024	-0,053	83,235
Capsula 4	X	Y	Z	Rx	Ry	Rz
Posizione Capsula	-96	-484	0	162	14	-14
Posizione Robot	-96	-484	0	-158,052	0,009	170,497
Capsula 5	X	Y	Z	Rx	Ry	Rz
Posizione Capsula	50	-481	0	156	-40	100
Posizione Robot	50	-481	0	-158,045	-0,03	-95,98
Capsula 6	X	Y	Z	Rx	Ry	Rz
Posizione Capsula	-87	-569	0	49	-38	54
Posizione Robot	-87	-569	0	-158,007	-0,016	89,319

Figura 274 Tabella coordinate acquisite e calcolate

19. COMUNICAZIONE CON LABVIEW

Una volta calcolate le coordinate da passare al robot, e dopo averle salvate su un file .txt, si procede con la creazione di un'interfaccia per la comunicazione dei dati. Per l'applicazione in questione è stato scelto il software Labview che al suo interno possiede il modulo Modbus per l'invio e la ricezione di dati.

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench) è il software per la progettazione di sistemi integrato per il linguaggio di programmazione di National Instruments. Il linguaggio di programmazione usato si distingue dai linguaggi tradizionali perché la sua sintassi non è scritta ma grafica. I programmi realizzati con questo software vengono denominati VI (Virtual Instrument), mentre programmi più complessi sono organizzati in sottolibrerie chiamate sub-VI.

La definizione di strutture dati ed algoritmi avviene con icone e altri oggetti grafici, ognuno dei quali incapsula funzioni diverse, uniti da linee di collegamento (wire), in modo da formare una sorta di diagramma di flusso. Questo tipo di linguaggio viene definito dataflow (flusso di dati) in quanto la sequenza di esecuzione è definita e rappresentata dal flusso dei dati stessi attraverso i fili monodirezionali che collegano i blocchi funzionali.

Nell'ambiente di sviluppo, i VI sono composti da tre parti principali:

- Il **pannello frontale (front panel)**: rappresenta l'interfaccia utente e comprende i controlli (controls) che permettono di introdurre e modificare variabili, e gli indicatori (indicators) che consentono la lettura della variabile in uscita.
- Lo **schema a blocchi (block diagram)**: attraverso delle linee di collegamento creano dei diagrammi di flusso per gestire le diverse funzioni disponibili.
- Le **icone**: compaiono nella parte superiore destra del front panel e rappresentano una VI o una sub-VI. Gli oggetti dello schema a blocchi comprendono: terminali, funzioni, costanti, strutture, chiamate ad altri VI (sub-VI), fili di collegamento, commenti testuali.

Lo schema a blocchi può essere reso visibile anche durante l'esecuzione, cosa molto utile in fase di debug, in quanto esiste la possibilità di visualizzare con un'animazione al rallentatore il movimento dei dati lungo i fili e il loro valore momentaneo.

Il block diagram creato per l'applicazione descritta è semplice e compatto e si limita ad avviare il software Halcon per l'acquisizione e l'analisi delle immagini, a prelevare i dati dal file testo e ad inviare i dati al robot. Inizialmente viene inizializzato il file testo inserendo il valore 0 alle prime 9 righe. In contemporanea accedendo al "System Exec.vi" si apre il programma per l'acquisizione e si avvia. Con un controllo ciclico si controlla se il valore dell'8 riga risulta essere pari a 0, 1 o 2. Se il risultato fornisce 1 o 2 si arresta la procedura e si procede con l'ultima fase che apre il collegamento modbus e invia le coordinate X, Y, Z, Rx, Ry, Rz (ovvero i valori presenti dalla riga 2 alla 7) al canale 9100 del software TMFlow del robot.

Nel programma è stata inserita una flat sequence structure, al cui interno avvengono in sequenza le varie fasi precedentemente descritte. Nell'immagine sottostante viene mostrato l'intero block diagram e a seguire un dettaglio del "System Exec.vi", del controllo ciclico e del modulo Modbus.

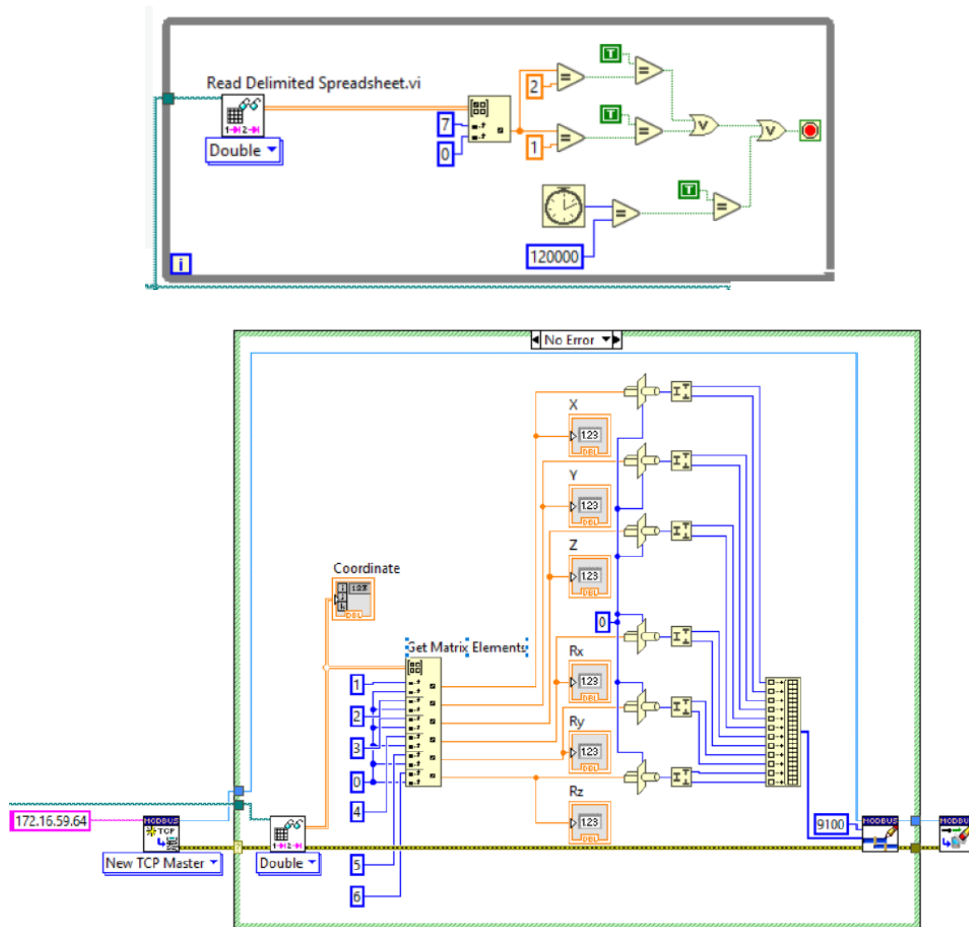
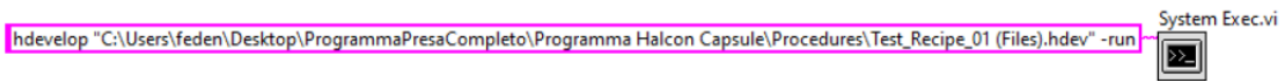
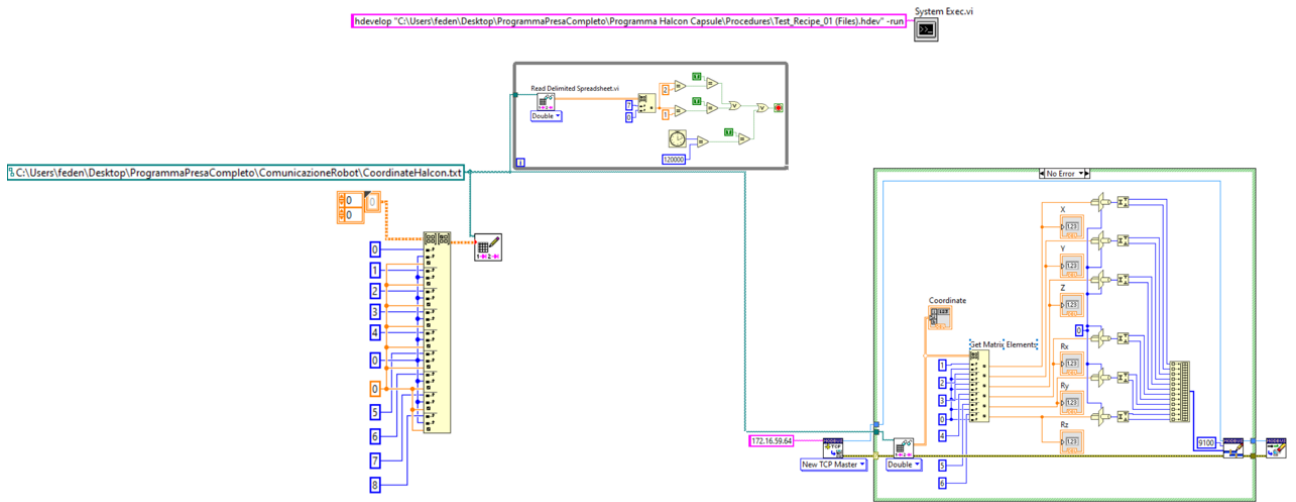


Figura 275, 276, 277, 278 Flat sequence structure del programma per la comunicazione e relativi dettagli

20. RICEZIONE DEI DATI E PROGRAMMAZIONE ROBOT

La ricezione dei dati avviene tramite una comunicazione **Modbus**, un protocollo di comunicazione Open Source e royalty-free creato per mettere in comunicazione i propri controllori logici programmabili (PLC) su una architettura master/slave o client/server. Lo scopo principale è quello di facilitare una comunicazione affidabile e veloce tra dispositivo di campo e d'automazione.

Per la trasmissione dei dati possono essere definite le seguenti modalità operative:

- MODBUS TCP: comunicazione ETHERNET TCP/IP basata sul modello client/server
- MODBUS RTU: trasmissione seriale asincrona via RS-232 o RS-485
- MODBUS ASCII: simile al protocollo RTU eccetto che per un differente formato dei dati, usato raramente

La modalità scelta per la nostra applicazione è Modbus TCP, poiché incorporata nel robot dell'Omron. Nel programma del TM vengono impostati i parametri di input, specificando che le variabili X, Y, Z, Rx, Ry, Rz vengono caricate come "Register Output" di tipo "double" sul canale 9100 (nelle posizioni 9100, 9102, ..., 9110). Tali valori vengono poi per praticità inseriti in delle variabili float denominate var_X, var_Y, var_Z, var_Rx, var_Ry, var_Rz. Nelle immagini sottostanti si può osservare come quanto descritto viene visualizzato su TMFlow.

RO	preset_X	9100	float	var_X	=	modbus_read ("localhost","preset_X")
RO	preset_Y	9102	float	var_Y	=	modbus_read ("localhost","preset_Y")
RO	preset_Z	9104	float	var_Z	=	modbus_read ("localhost","preset_Z")
RO	preset_Rx	9106	float	var_Rx	=	modbus_read ("localhost","preset_Rx")
RO	preset_Ry	9108	float	var_Ry	=	modbus_read ("localhost","preset_Ry")
RO	preset_Rz	9110	float	var_Rz	=	modbus_read ("localhost","preset_Rz")

Figura 279, 280 Impostazioni modbus (sinistra) e variabili implementate (destra)

Successivamente all'acquisizione dei dati si passa alla definizione del punto di partenza da cui verranno effettuati i movimenti. Come descritto nei capitoli precedenti le coordinate X, Y, Z, Rx, Ry, Rz del tool del robot sono state impostate su 350, 0, 250, -180, 0, 0 (StartPoint); ovvero con un orientamento tale da poter effettuare un movimento rapido e senza il rischio di collidere con gli ostacoli circostanti. Per il movimento successivo, denominato "MoveToCaps", è stata presa come base di riferimento 350, 0, 250, 0, 0, 0 in modo tale da far coincidere i calcoli effettuati su Halcon con il reale posizionamento del robot; inoltre, per le impostazioni di spostamento sono state definite le variabili prese in input via Modbus.

Nelle immagini sottostanti vengono presentate le diverse impostazioni di TMFlow precedentemente descritte. In particolare, a sinistra è presente lo schema semplificato utilizzato per le prove in laboratorio che dovrà essere ampliato della fase di controllo, presa finale ed estrazione del tool se lo si volesse utilizzare in un caso reale. In questa fase di simulazione e test non sono stati implementati poiché non necessari per descrivere il processo.

Nell'immagine centrale viene visualizzato lo StartPoint utilizzato per l'inizio della sequenza di presa, mentre a destra si può osservare il MoveToCaps necessario per avvicinarsi alla capsula da prelevare con un orientamento corretto.

The figure consists of three screenshots from a TMFlow software interface:

- Left (Flowchart):** A vertical sequence of nodes: 'Start' (green), 'WaitFor5s' (yellow, 5s), 'StartPoint' (yellow, T0), 'MoveToCaps' (yellow, 2), 'StartPoint' (yellow, T0), and 'Pause' (green, II).
- Center (Point Manager):** A dialog box titled 'Point Manager' with a yellow warning banner: 'Attenzione: Tutte le modifiche apportate qui si applicano a ogni nodo che utilizza lo stesso punto.' It shows 'Nome punto: StartPoint' and 'Registrato su: T0'. Under 'Posizione', 'Coordinate cartesiane' is selected, showing X: 350.029, Y: -0.006, Z: 249.981 and Rx: -179.983, Ry: 0.004, Rz: 0.000. Buttons include 'Modifica punto', 'Controller', 'Sovrascrivi nuova posizione su ques', 'Registra di nuovo su un'altra base', 'Registra di nuovo su un altro TCP', 'Salva come', and 'Elimina questo punto'.
- Right (Sposta):** A dialog box titled 'Sposta' with a close button (X). It shows 'Nome Nodo: MoveToCaps' and 'Registrato su base1: 2'. Under 'Blending', 'Nessun Blending' is selected. Under 'Impostazione di spostamento', X, Y, Z, RX, RY, and RZ are all set to 0.000 with units (mm or deg) and dropdown menus for variables (var_X, var_Y, var_Z, var_Rx, var_Ry, var_Rz). Under 'Impostazioni avanzate', 'Posizionamento preciso' is checked.

Figura 281, 282, 283 Programma per la presa (sinistra), definizione Start Point (centro) e MoveToCaps (destra)

21. SIMULAZIONE CON ROBODK

Per verificare l'effettivo funzionamento dell'applicazione precedentemente descritta è stato utilizzato un software di simulazione che permette di inserire vari robot, tra cui il TM5-900, e dei file STL. L'utilizzo di un software di simulazione è stato necessario fin dalle prime fasi di sviluppo, in quanto non si aveva la piena disponibilità del robot e soprattutto non era possibile posizionare la telecamera 3D in un supporto fisso che andasse ad affiancare i robot. La simulazione ha permesso di ricostruire il tavolo di lavoro in cui sarebbe stata eseguita la presa, fedelmente a quanto descritto nei capitoli precedenti. Il programma riprende quindi lo StartPoint e il MoveToCaps per poter eseguire i movimenti necessari e legge come variabili d'ingresso X, Y, Z, Rx, Ry, Rz quelle ottenute da una precedente acquisizione, eseguita durante una prova. Vengono proposte alcune immagini della simulazione per mostrare l'effettivo funzionamento dell'applicazione; le ultime due in fondo mostrano le configurazioni di presa utilizzate per il prelievo.

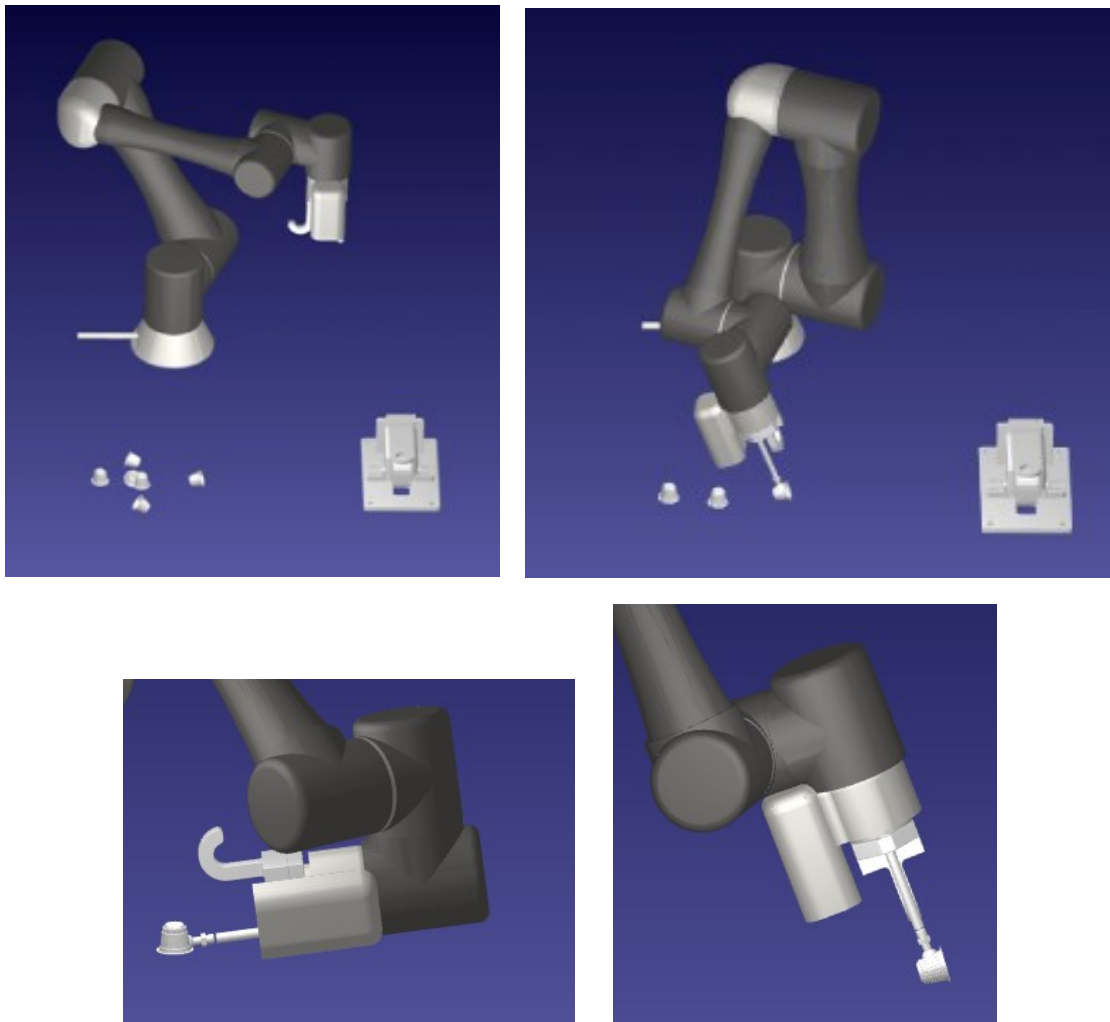


Figura 284, 285, 286, 287 Dettagli simulazione RoboDK

22. ANALISI DI UN PROFILOMETRO

Durante le varie prove di studio dei diversi metodi per la rilevazione di punti nello spazio sulla base di componenti 3D si è avuta la possibilità di analizzare un profilometro laser in un'applicazione con robot e pinza incorporata. Grazie all'utilizzo di tale strumentazione si doveva individuare la posizione e l'inclinazione di un foro all'interno di un altro foro posizionato su una superficie curva in modo da poter poi passare le coordinate spaziali e angolari ad un trapano avvitatore permettendogli di centrare la vite nell'asse del foro più interno.

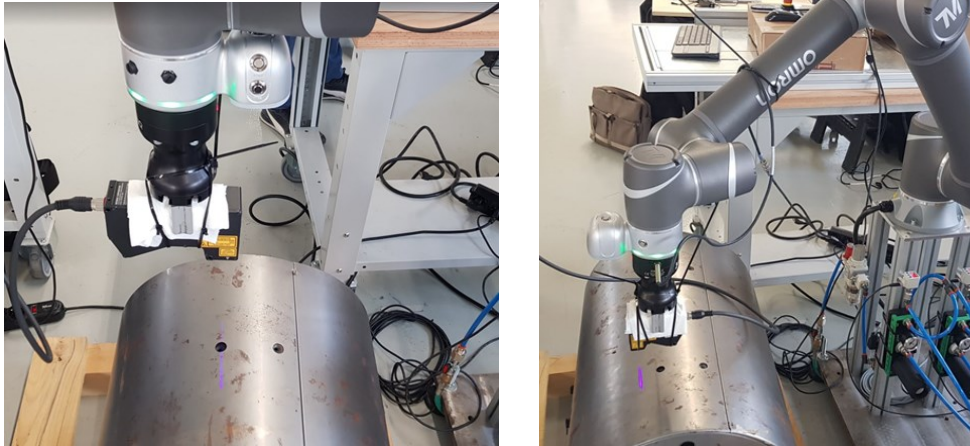


Figura 288, 289 Prove con il profilometro agganciato al robot

Il foro più piccolo ed interno è separato di qualche millimetro dal foro più grande ed esterno creando ombre e complicandone l'individuazione. Inoltre, i due fori nella maggior parte dei casi non sono concentrici e per di più quello interno viene a volte leggermente coperto da quello esterno.

In generale un profilometro ottico lavora con un metodo senza contatto e permette di ottenere le stesse informazioni di un profilometro a stilo con numerosi vantaggi pratici. Esistono diverse tecniche come la triangolazione laser, il microscopio confocale (usato per la profilazione di oggetti molto piccoli) e l'olografia digitale. I vantaggi di questi strumenti di misura risiedono in tre principali caratteristiche:

- **Velocità:** Non toccando la superficie, la velocità di scansione dipende solo dalla velocità di riflessione della luce sulla superficie e dalla velocità di acquisizione dell'elettronica dello strumento.
- **Affidabilità:** i profilometri ottici non toccano le superfici e non possono danneggiarle, sono più sicuri. Molti profilometri senza contatto hanno bisogno di poca manutenzione.
- **Dimensioni del raggio:** Le dimensioni del raggio, o risoluzione laterale, è in un intervallo di pochi micrometri fino a meno di un micrometro.

Per vari motivi si è preferito usare un profilometro laser invece che una telecamera 3D per tale applicazione. Primo fra tutti va sottolineata la ridotta dimensione dei fori e la presenza di numerose ombre che rendono complicato l'utilizzo del pattern di punti della telecamera.

Un altro aspetto fondamentale è il tempo ciclo molto ridotto che può essere rispettato solamente grazie al profilometro.

Entrando più nello specifico vengono mostrati nell'immagine sottostante due esempi di scansione con telecamera 3D sulla sinistra e profilometro laser LJ-V della Keyence sulla destra.

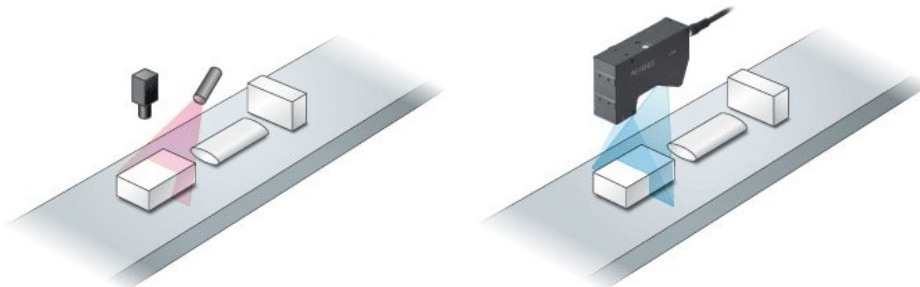


Figura 290, 291 Esempi scansione con telecamera 3D (sinistra) e profilometro Keyence (destra)

Quando si utilizza una telecamera 3D, la sorgente di luce laser e il ricevitore (telecamera) sono indipendenti l'una dall'altro, per cui l'installazione e la regolazione sul sito sono molto dispendiose in termini sia di tempo che di impegno. Con la LJ-V, invece, la sorgente di luce laser e il ricevitore sono contenuti in un corpo unico, eliminando la necessità di regolazioni sul sito e anche la perdita di allineamento conseguente all'uso.

Oltre a ciò, quando si utilizza una telecamera 3D, l'altezza dei singoli pixel e i dati della larghezza divergono a causa del rapporto tra la posizione della sorgente di luce laser e del ricevitore rendendoli inutilizzabili. Ogni volta che ciò accade, occorre eseguire la correzione della linearizzazione. Con il profilometro laser vengono emessi dati che sono già stati elaborati con la correzione della linearizzazione, per cui non occorre procedere a nessuna regolazione. Nell'immagine sottostante viene mostrato un esempio di quanto affermato.

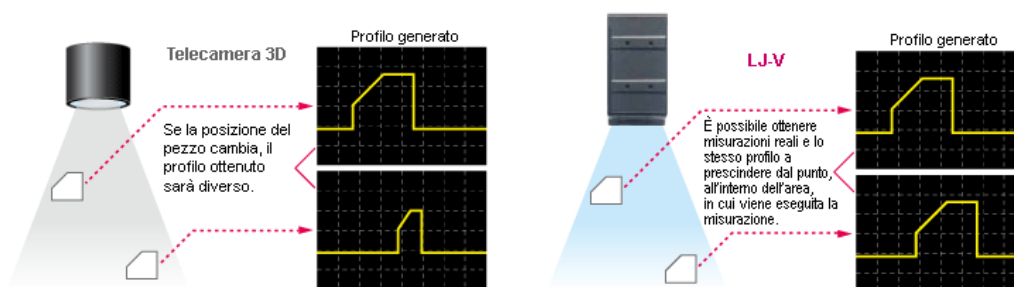


Figura 292, 293 Esempio generazione dati con telecamera 3D (sinistra) e profilometro Keyence (destra)

Inoltre, il profilometro è un vero e proprio “dispositivo di misurazione” che garantisce quindi la precisione. Sono possibili misurazioni e ispezioni in piena sicurezza e affidabilità, con un alto grado di ripetibilità.

Nella nostra applicazione abbiamo provato 2 profilometri che permettono di lavorare a distanze differenti:

- LJ-V7080: distanza di lavoro 80mm \pm 23mm (prove fatte a 80mm);
- LJ-V7300: distanza di lavoro 300mm \pm 145mm (prove fatte a 400mm);

Il profilometro LJ-V7080 è stato montato sulla pinza del cobot ed è stato deciso di spostarlo lungo l'asse X, in quanto l'ampiezza del fascio del laser arriva al massimo a 32mm.

Invece il profilometro LJ-V7300, che può lavorare ad altezze superiori e permette di avere un fascio più ampio (massimo 180mm), è stato spostato lungo l'asse Y.

L'asse X rappresenta la dimensione diametrale del boiler cilindrico su cui sono disposti i fori mentre l'asse Y è diretto lungo la dimensione assiale.

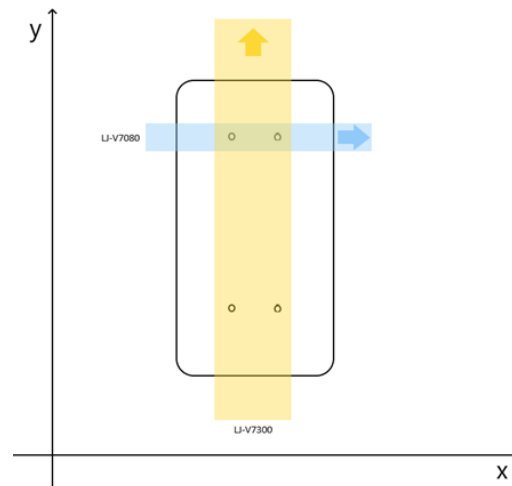


Figura 294 Rappresentazione dell'utilizzo dei due profilometri LJ-V7080 (blu, lungo x) e LJ-V7300 (giallo, lungo y)

Inizialmente le prove sono state fatte muovendo il **profilometro LJ-V7080** a **40 mm/s**. I risultati ottenuti con entrambi i modelli sono stati discreti. In entrambi i casi quando il foro interno è molto decentrato rispetto al foro esterno, perdiamo dei dati relativi al foro interno a causa di ombre causate dalla lamiera. Di seguito un esempio della condizione che si verifica.

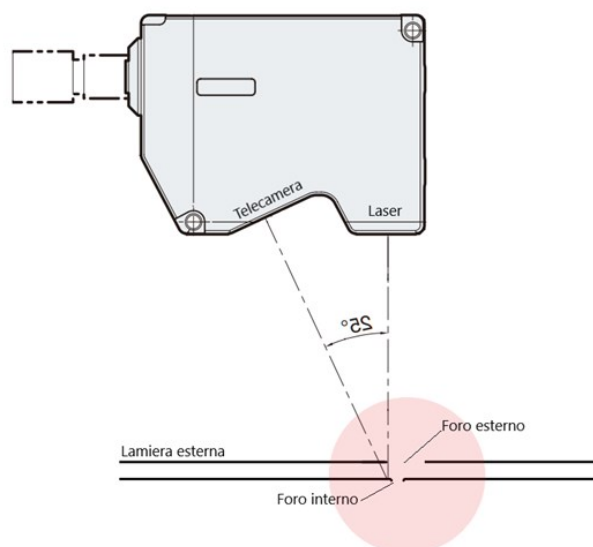


Figura 295 Rappresentazione della perdita di dati in condizioni di foro decentrato

Come si può notare dall'immagine soprastante, nel momento in cui il laser viene proiettato sul foro interno, la visuale della telecamera è coperta dalla lamiera.

Nelle immagini sottostanti si possono notare a sinistra la mesh di punti rilevata dal laser vista lateralmente e a destra la stessa immagine mostrata dall'alto. In rosso sono evidenziati i punti persi, a causa dei quali non si riesce a ricostruire completamente il foro interno. La ricostruzione viene effettuata dopo la scansione con un algoritmo implementato nel programma dello strumento di misura che permette di individuare delle ellissi e comunica esternamente le coordinate del centro rispetto la base impostata sul profilometro.

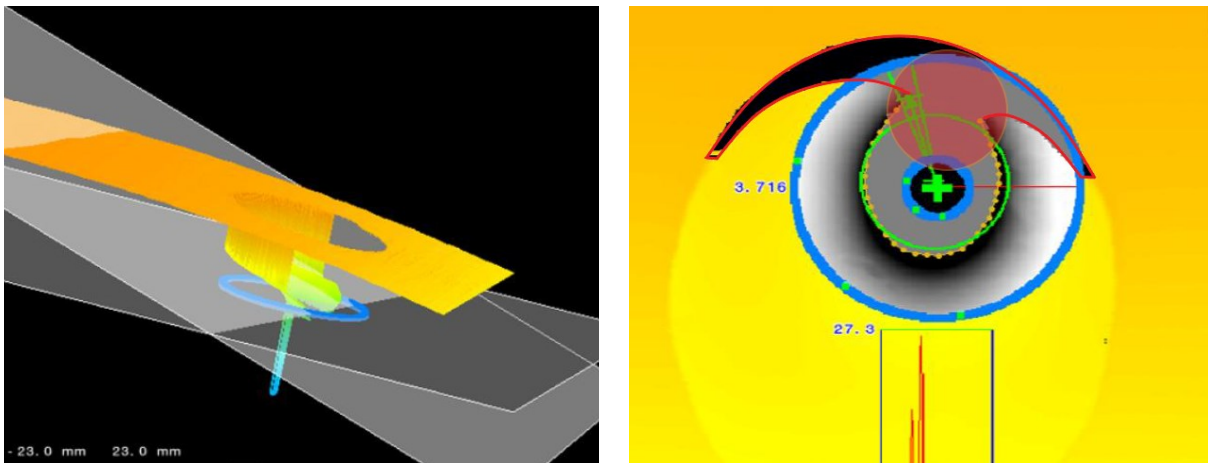


Figura 296, 297 Mesh di punti ricavata da un'acquisizione e analisi dei fori

Per risolvere questo problema, Keyence ha proposto di utilizzare una configurazione composta da due profilometri posizionati come nell'immagine seguente.

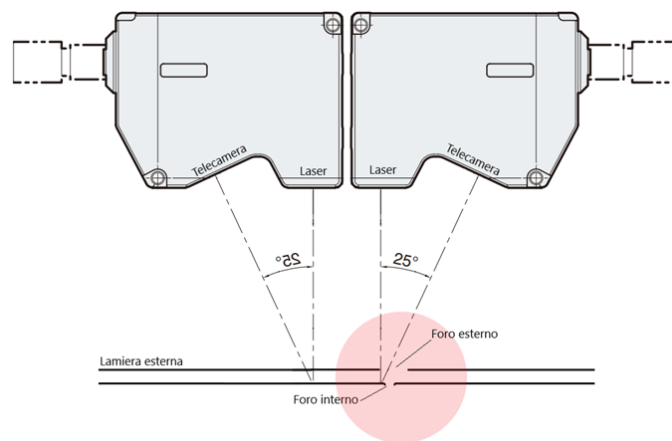


Figura 298 Raffigurazione che mostra l'utilizzo di due profilometri collegati in serie



Figura 299 Profilometri Keyence collegati in serie

Il controllore CV-X480F implementa una funzione che permette di unire le nuvole dei punti restituite da ogni profilometro per ottenere un'unica nuvola di punti completa. Riprendendo l'esempio precedente, i punti persi dal profilometro a sinistra verranno acquisiti dal profilometro a destra e viceversa.

Nel caso del **profilometro LJ-V7300** il problema è maggiore in quanto a causa della distanza di lavoro vengono persi molti punti anche lateralmente. Questo problema non può essere risolto nemmeno con una testa aggiuntiva.

In seguito, abbiamo fatto le prove aumentando la velocità di scansione a **80mm/s** per tentare di ridurre il più possibile il tempo ciclo, indispensabile per la catena di produzione in cui deve essere implementato il profilometro. A quella velocità sembravano perdersi alcuni profili e nonostante l'aiuto del tecnico della Keyence non siamo riusciti a migliorare l'acquisizione. Una soluzione a questo problema potrebbe essere l'utilizzo di un encoder che, se integrato al profilometro, permetterebbe di acquisire i profili in base agli impulsi.

Un'alternativa al profilometro della Keyence potrebbe essere il **Gocator** della LMI poiché anche a velocità di scansione pari a 100mm/s permette di ricostruire senza grossi problemi dettagli di un paio di millimetri senza l'utilizzo di un encoder.

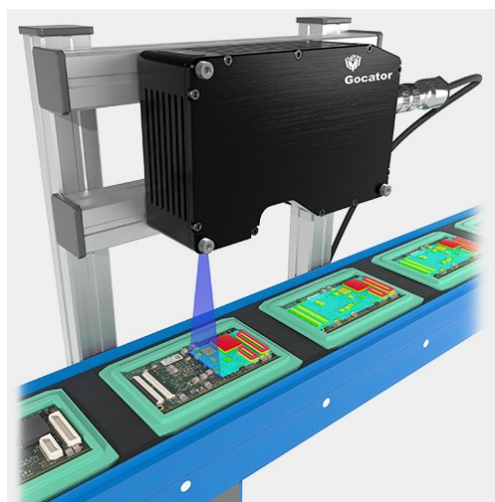


Figura 300 Scansione con Gocator

Inoltre, il Gocator permette di eseguire l'analisi a bordo senza aver bisogno di un controllore esterno. Per citare un esempio il Gocator 2130d permette di lavorare ad una distanza di 90-170mm con un'ampiezza del fascio laser di 47-85mm. Di seguito vengono visualizzati alcuni modelli disponibili sul mercato e a seguire le loro specifiche.

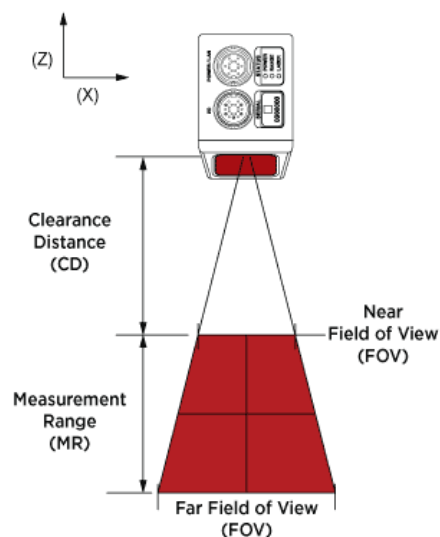
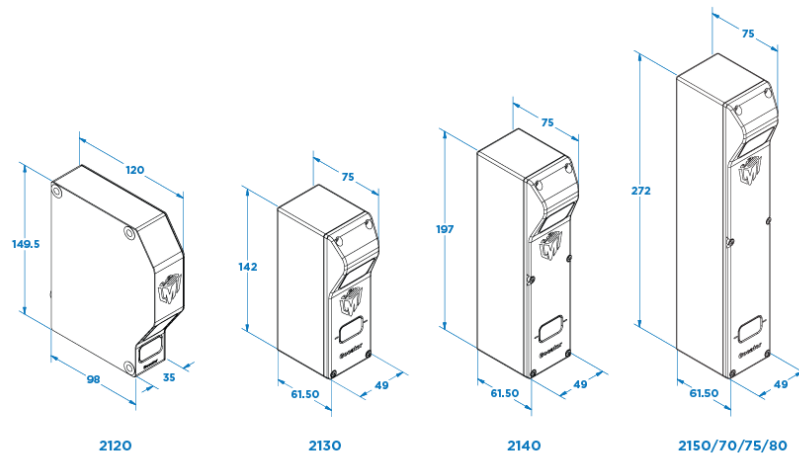


Figura 301, 302 Caratteristiche di vari Gocator in commercio (in alto) e relativo campo visivo (in basso)

Model	2120	2130	2140	2150	2170	2175	2180
Resolution X (mm)	0.028	0.088	0.19	0.3	0.55	0.51	0.75
Resolution Z (mm)	0.0018	0.006	0.013	0.019	0.055	0.175	0.092
Field of View (mm)	18-26	47-85	96-194	158-365	308-687	324-1010	390-1260
Clearance Distance (mm)	40	90	190	300	400	650	350
Measurement Range (mm)	25	80	210	400	500	1350	800

23. CONCLUSIONI

Per concludere vengono riassunti in breve i risultati delle varie applicazioni, con precisazioni sull'attuale posizionamento e funzionamento dei tre progetti descritti in questo testo.

Il banco di lavoro per l'erogazione del caffè, in cui è presente il cobot TM5-900, è stato installato presso la sede francese dell'azienda Lavazza nel marzo del 2021, e sta funzionando correttamente. Rimarrà in funzione e periodicamente verranno analizzati i dati acquisiti per studiare le caratteristiche delle capsule dei vari lotti. Nel periodo successivo all'installazione sono state effettuate varie modifiche al programma e alla struttura del banco, per questo motivo l'attuale condizione del banco potrebbe non corrispondere totalmente a quanto descritto in questo testo. In particolare, si è migliorata la qualità dei risultati ottenuti, posizionando nel migliore modo possibile le valvole e i vari misuratori presenti nell'impianto di gestione dell'acqua. Inoltre, per quanto riguarda la sicurezza del robot, sono state apportate delle leggere modifiche al programma per velocizzare il flusso e l'elaborazione dei dati, soprattutto per quanto riguarda la telecamera 2D incorporata. Per quanto riguarda l'apertura si è optato per cambiare la configurazione e il percorso di aggancio, in quanto nel lungo periodo andava ad usurare la parte superiore dell'erogatore. Inoltre, sono stati aggiunti vari sensori per il rilevamento di situazioni particolari che potrebbero causare il bloccaggio del banco o fornire dati non corretti durante il controllo di qualità delle capsule.

Nel caso lo si desiderasse sarebbe possibile implementare il progetto di ricerca e sviluppo per far sì che l'operatore impieghi il suo tempo in altre mansioni. Infatti, le capsule possono essere depositate con orientamenti casuali, senza la necessità di posizionarle negli appositi spazi sui vassoi. Tale applicazione prevede una stereocamera 3D per il rilevamento della mesh di punti, l'analisi dei dati e l'invio delle coordinate al robot. I principali difetti di tale applicazione rimangono comunque l'elevato costo e la difficoltà di programmazione, nonché di implementazione nella cella robotizzata. Infatti, il programma utilizzato per il banco di lavoro dovrebbe essere completamente riscritto.

Per l'ultimo caso preso in esame in cui veniva implementato un profilometro laser per eseguire l'analisi di alcuni fori presenti su un boiler, in modo tale da individuare la posizione e l'inclinazione del foro più interno e passare le coordinate ad un trapano avvitatore, l'azienda ha valutato le varie opzioni proposte basandosi su quanto descritto in questo testo e da quanto richiesto dalla realtà aziendale.

Per concludere, realizzare i progetti descritti in questo testo ha permesso di affacciarsi nel mondo della robotica collaborativa e di analizzare i principali metodi di visione artificiale. Come gli occhi per gli esseri umani, i sistemi di visione permettono ai robot di affacciarsi sul mondo esterno e sono diventati, oggi, di fondamentale importanza in una realtà industriale che si sta dirigendo sempre più velocemente verso l'automazione, l'industria 4.0 ma soprattutto la collaboratività.

24. SITOGRAFIA

<https://www.tenenga.it/robot-collaborativi-cobot-modelli-applicazioni-vantaggi/>

<https://industrial.omron.it/it/products/collaborative-robots>

<https://it.wikipedia.org/wiki/Cobot>

<https://www.tenenga.it/cobot-significato-cosa-sono-servono/>

https://www.hoberger-robotica.com/?gclid=Cj0KCQiAkuP9BRCKARIsAKGLE8UW0vExPQkK-nNAGIstcyoU7I8IIkR-TPz8gfYbK-HGbPrq_qY0F5QaAiZ8EALw_wcB

<http://www.ia.omron.com/>

<https://www.tm-robot.com/en/tm-add-on/>

<https://www.keyence.it/products/measure/laser-2d/lj-v/features/feature-04.jsp>

<https://www.gt-engineering.it/appfondimenti/sicurezza-nella-robotica-collaborativa>

<https://www.certifico.com/newsletter/archive/view/listid-5-cem4-it/mailid-14191-robot-collaborativi-la-nuova-specifica-tecnica-iso-ts-15066-2016>

<https://migliorevideocamera.it/articoli/caratteristiche-e-funzioni-delle-videocamere-3d/>

<https://www.automazione news.it/3d-la-visione-completa-del-mondo/>

<https://www.imagesspa.it/sistemi-3d/>

<https://en.ids-imaging.com/ensenso-x36-cp.html>

25. NORMATIVE

Norma Tecnica **UNI EN ISO 10218-2:2011** armonizzata alla Direttiva Macchine 2006/42/EC.

ISO/TS 15066:2016 *“Robots and robotic devices - Collaborative robots”* applies to industrial robot systems as described in ISO 10218-1 and ISO 10218-2. It does not apply to non-industrial robots, although the safety principles presented can be useful to other areas of robotics.

ISO 10218-1: *“Robotica - Requisiti di sicurezza per i sistemi robotizzati in ambiente industriale – Robot”*

ISO 10218-2: *“Robotica - Requisiti di sicurezza per i sistemi robotizzati in ambiente industriale - Sistemi robotizzati e loro integrazione”*

26. INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Confronto robot industriali e collaborativi	8
Figura 2, 3 Omron TM con tool agganciato	10
Figura 4 Schermata TMFlow	11
Figura 5 Impostazioni di sicurezza nel TMFlow	12
Figura 6 TM Robot Stick.....	12
Figura 7 Scheda tecnica TM robot	14
Figura 8 TM5-700.....	15
Figura 9 TM5-900.....	15
Figura 10 TM12.....	16
Figura 11 TM14.....	16
Figura 12, 13 Schema e immagine reale del sistema robot	17
Figura 14, 15, 16 Controller del robot	18
Figura 17 Schema collegamenti del controller	18
Figura 18 TM5-900	20
Figura 19 Grafico del massimo carico utile consentito	21
Figura 20 Schema TM5-900.....	22
Figura 21 Sistema di visione TM5-900.....	24
Figura 22 Schema camera 2D incorporata	24
Figura 23 Sistema di calibrazione camera 2D.....	25
Figura 24 Landmark	26
Figura 25 Calibrazione	27
Figura 26 Il Flow di un Pick and Place.....	27
Figura 27 Banco di lavoro Lavazza in costruzione	31
Figura 28 CAD banco di lavoro Lavazza	32
Figura 29, 30, 31 Dettagli del banco di lavoro Lavazza.....	33
Figura 32, 33 Tool del robot	34
Figura 34 Convenzione sistema di riferimento del tool	34
Figura 35 Valori relativi al tool ventosa.....	35
Figura 36 Valori relativi al tool gancio	35
Figura 37, 38, 39, 40 Configurazione utilizzata per la chiusura.....	37
Figura 41 Problematica di chiusura	39
Figura 42, 43 Capsula inserita correttamente.....	39
Figura 44, 45 Percorso per la chiusura	40
Figura 46 Configurazioni possibili per la chiusura	41
Figura 47, 48 Configurazione 0 per la chiusura	41
Figura 49, 50 Configurazione 2 per la chiusura	42
Figura 51, 52 Configurazione 5 per la chiusura	43
Figura 53, 54 Configurazione 7 per la chiusura	43
Figura 55, 56, 57, 58 Configurazione utilizzata per l'apertura	45
Figura 59 Dettaglio della posizione di apertura	46
Figura 60, 61 Percorso per l'apertura.....	46
Figura 62 Configurazioni possibili per l'apertura.....	47
Figura 63, 64 Configurazione 0 per l'apertura.....	48
Figura 65, 66 Configurazione 2 per l'apertura.....	48

Figura 67, 68 Configurazione 5 per l'apertura.....	49
Figura 69, 70 Configurazione 7 per l'apertura.....	49
Figura 71 Convenzione sistema di riferimento del tool	50
Figura 72 Punti d'inizio inserimento.....	51
Figura 73 Punto intermedio d'inserimento	52
Figura 74 Punto di rilascio	52
Figura 75, 76 Percorso per l'inserimento	53
Figura 77, 78 Configurazione utilizzata per l'inserimento.....	53
Figura 79 Configurazioni possibili per l'inserimento	54
Figura 80, 81 Configurazione 0 per l'inserimento	54
Figura 82, 83 Configurazione 1 per l'inserimento	55
Figura 84, 85 Configurazione 2 per l'inserimento	55
Figura 86, 87 Configurazione 3 per l'inserimento	56
Figura 88, 89 Configurazione 4 per l'inserimento	56
Figura 90, 91 Configurazione 5 per l'inserimento	57
Figura 92, 93 Configurazione 6 per l'inserimento	57
Figura 94, 95 Configurazione 7 per l'inserimento	58
Figura 96, 97, 98, 99 Vassoi e relativo CAD con disposizione delle capsule.....	59
Figura 100, 101 Vassoi verniciati	60
Figura 102 Sensori per il bloccaggio dei vassoi	61
Figura 103 Ordine di presa delle capsule	62
Figura 104 Programma di selezione delle capsule	63
Figura 105 Impostazione "move" sul programma del robot.....	64
Figura 106 Tipologie di capsule utilizzate.....	65
Figura 107, 108 Configurazione utilizzata per la presa	65
Figura 109, 110, 111 Dettagli della presa.....	66
Figura 112 Direzione di presa zona 1 anteriore	67
Figura 113 Capsule con in bianco l'area da non toccare.....	67
Figura 114 Configurazioni possibili per la presa nella zona 1 anteriore.....	68
Figura 115, 116 Configurazione 0 per la presa nella zona 1 anteriore.....	68
Figura 117, 118 Configurazione 1 per la presa nella zona 1 anteriore.....	69
Figura 119, 120 Configurazione 2 per la presa nella zona 1 anteriore.....	69
Figura 121, 122 Configurazione 3 per la presa nella zona 1 anteriore.....	70
Figura 123, 124 Configurazione 4 per la presa nella zona 1 anteriore.....	70
Figura 125, 126 Configurazione 5 per la presa nella zona 1 anteriore.....	70
Figura 127, 128 Configurazione 6 per la presa nella zona 1 anteriore.....	71
Figura 129, 130 Configurazione 7 per la presa nella zona 1 anteriore.....	71
Figura 131 Direzione di presa zona 1 posteriore.....	72
Figura 132 Configurazioni possibili per la presa nella zona 1 posteriore.....	73
Figura 133, 134 Configurazione 0 per la presa nella zona 1 posteriore	73
Figura 135, 136 Configurazione 1 per la presa nella zona 1 posteriore	74
Figura 137, 138 Configurazione 2 per la presa nella zona 1 posteriore	74
Figura 139, 140 Configurazione 3 per la presa nella zona 1 posteriore	74
Figura 141, 142 Configurazione 4 per la presa nella zona 1 posteriore	75
Figura 143, 144 Configurazione 5 per la presa nella zona 1 posteriore	75
Figura 145, 146 Configurazione 6 per la presa nella zona 1 posteriore	75

Figura 147, 148 Configurazione 7 per la presa nella zona 1 posteriore	75
Figura 149 Configurazioni possibili per la presa nella zona 2 anteriore.....	76
Figura 150, 151 Configurazione 0 per la presa nella zona 2 anteriore.....	77
Figura 152, 153 Configurazione 1 per la presa nella zona 2 anteriore.....	77
Figura 154, 155 Configurazione 2 per la presa nella zona 2 anteriore.....	78
Figura 156, 157 Configurazione 3 per la presa nella zona 2 anteriore.....	78
Figura 158, 159 Configurazione 4 per la presa nella zona 2 anteriore.....	78
Figura 160, 161 Configurazione 5 per la presa nella zona 2 anteriore.....	79
Figura 162, 163 Configurazione 6 per la presa nella zona 2 anteriore.....	79
Figura 164, 165 Configurazione 7 per la presa nella zona 2 anteriore.....	79
Figura 166 Configurazioni possibili per la presa nella zona 2 posteriore	80
Figura 167, 168 Configurazione 0 per la presa nella zona 2 posteriore	81
Figura 169, 170 Configurazione 1 per la presa nella zona 2 posteriore	81
Figura 171, 172 Configurazione 2 per la presa nella zona 2 posteriore	82
Figura 173, 174 Configurazione 3 per la presa nella zona 2 posteriore	82
Figura 175, 176 Configurazione 4 per la presa nella zona 2 posteriore	82
Figura 177, 178 Configurazione 5 per la presa nella zona 2 posteriore	82
Figura 179, 180 Configurazione 6 per la presa nella zona 2 posteriore	83
Figura 181, 182 Configurazione 7 per la presa nella zona 2 posteriore	83
Figura 183, 184, 185, 186 Configurazioni definitive scelte per la presa (sopra: 1 anteriore e posteriore, sotto: 2 anteriore e posteriore).....	83
Figura 187 Divisione del vassoio in zone	84
Figura 188 Distorsione dell'immagine rilevata dalla camera 2D.....	84
Figura 189 Suddivisione della singola zona	85
Figura 190 Tipologie di capsule utilizzate.....	86
Figura 191, 192 Inizializzazione della camera 2D	89
Figura 193, 194 Applicazione del filtro color plane	90
Figura 195, 196 Applicazione del filtro morphology	91
Figura 197, 198 Applicazione del filtro smoothing.....	92
Figura 199 Applicazione del filtro tresholding.....	93
Figura 200 Curva selezionata con lo shape pattern	93
Figura 201 Zona di ricerca	94
Figura 202 Risultato della ricerca con shape pattern.....	94
Figura 203, 204 A sinistra immagine pulita, a destra immagine con presenza di rumore	95
Figura 205, 206 Modifica applicata alla soglia del tresholding	95
Figura 207, 208 Inizializzazione della camera 2D	96
Figura 209, 210 Applicazione del filtro smoothing.....	96
Figura 211, 212 Applicazione del filtro contrast.....	97
Figura 213, 214 Applicazione del filtro color plane e relativo istogramma delle tonalità	97
Figura 215 Ricerca con il blob.....	98
Figura 216 Inizializzazione della camera 2D	99
Figura 217 Applicazione del filtro morphology	100
Figura 218, 219 Applicazione del filtro color plane	100
Figura 220 Applicazione del filtro smoothing.....	101
Figura 221, 222 Applicazione del filtro tresholding.....	101
Figura 223 Ricerca con il blob.....	102

Figura 224 Modello CAD della cella di sicurezza	104
Figura 225 Safety conn del robot	105
Figura 226 Schema collegamenti safety conn	105
Figura 227, 228 Sensori d'apertura portelle.....	106
Figura 229, 230, 231 Pulsante d'emergenza	106
Figura 232 Interruttori di sicurezza	107
Figura 233 Indicatore luminoso di sicurezza	107
Figura 234 Tecniche ottiche	108
Figura 235 Classificazione tecniche di misurazione 3D	108
Figura 236 La visione binoculare negli esseri umani	111
Figura 237 Problema della corrispondenza	112
Figura 238 Esempio stereovisione con difetti	113
Figura 239, 240 Stereocamera Ensenso X36	114
Figura 241 Posizionamento attrezzatura per test	115
Figura 242 Volume di lavoro.....	116
Figura 243 Volume di lavoro e lenti selezionate	117
Figura 244 Grafici relativi all'accuratezza	117
Figura 245, 246 Disposizione della capsula in orizzontale (destra) e relativa presa (sinistra)	118
Figura 247, 248 Disposizione della capsula in verticale (destra) e relativa presa (sinistra)	118
Figura 249, 250 Esempio visualizzazione mesh di punti.....	119
Figura 251 Schema relativo all'acquisizione della misura distanza con una stereocamera.....	120
Figura 252, 253 Immagini 2D sinistra e destra della stessa acquisizione a confronto	120
Figura 254, 255 Immagine reale (sinistra) e mesh di punti acquisita (destra)	121
Figura 256 Riduzione spazio di lavoro in base all'altezza	122
Figura 257 Riduzione spazio di lavoro in base all'area	122
Figura 258 Unione delle zone selezionate.....	123
Figura 259 Immagine ricostruita per sovrapposizione	123
Figura 260 Sistema OXYZ e O'X'Y'Z' relativo al punto P	124
Figura 261 Traslazione sistema di riferimento	124
Figura 262 Traslazione di un sistema di riferimento del vettore t	125
Figura 263 Composizione di rotazioni	126
Figura 264 Esempio composizione di rotazioni ruotata con ordini differenti.....	126
Figura 265 Rappresentazione operatore T su un corpo	127
Figura 266 Rappresentazione operatore T su un punto.....	127
Figura 267 Esempio rotazione intorno agli assi fissi.....	128
Figura 268 Esempio rotazione intorno agli assi mobili.....	129
Figura 269 Modello CAD della capsula e relativo sistema di riferimento	130
Figura 270 Presa per capsula orizzontale	133
Figura 271 Presa per capsula verticale	133
Figura 272, 273 Confronto immagine reale e ricostruita	140
Figura 274 Tabella coordinate acquisite e calcolate	140
Figura 275, 276, 277, 278 Flat sequence structure del programma per la comunicazione e relativi dettagli	142
Figura 279, 280 Impostazioni modbus (sinistra) e variabili implementate (destra)	143
Figura 281, 282, 283 Programma per la presa (sinistra), definizione Start Point (centro) e MoveToCaps (destra)	144

Figura 284, 285, 286, 287 Dettagli simulazione RoboDK	145
Figura 288, 289 Prove con il profilometro agganciato al robot.....	146
Figura 290, 291 Esempi scansione con telecamera 3D (sinistra) e profilometro Keyence (destra).....	147
Figura 292, 293 Esempio generazione dati con telecamera 3D (sinistra) e profilometro Keyence (destra)	147
Figura 294 Rappresentazione dell'utilizzo dei due profilometri LJ-V7080 (blu, lungo x) e LJ-V7300 (giallo, lungo y)	148
Figura 295 Rappresentazione della perdita di dati in condizioni di foro decentrato.....	148
Figura 296, 297 Mesh di punti ricavata da un'acquisizione e analisi dei fori.....	149
Figura 298 Raffigurazione che mostra l'utilizzo di due profilometri collegati in serie.....	149
Figura 299 Profilometri Keyence collegati in serie	150
Figura 300 Scansione con Gocator	150
Figura 301, 302 Caratteristiche di vari Gocator in commercio (in alto) e relativo campo visivo (in basso)..	151