



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

**Studio di una linea
automatizzata per la produzione
di scambiatori di calore**

Study of an automated line for the
production of heat exchangers

Relatore:

Prof. Ing. Matteo Palpacelli

Tesi di laurea di:

Lobna Joualy

Anno Accademico 2020/2021

Alla mia famiglia

Ringraziamenti

Prima di procedere con la trattazione, vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi sono stati vicini in questo percorso di crescita personale e professionale.

Un sentito grazie al mio relatore Matteo Claudio Palpacelli per la sua disponibilità e tempestività ad ogni mia richiesta e per la pazienza con cui mi ha seguito nelle fasi del mio tirocinio. Inoltre, desidero ringraziare il gruppo di Meccanica delle Macchine presso cui ho svolto il tirocinio, e il professore Massimo Callegari, per avermi dato la possibilità di portare al termine questo lavoro.

Ringrazio i miei genitori senza i quali non sarei mai potuta arrivare fin qui. Grazie per esserci sempre stati nei momenti felici e in quelli di sconforto. Ringrazio mia sorella Nabila e mio fratello Walid. Entrambi hanno saputo sostenermi e gli sono riconoscente per tutto l'affetto dimostratomi. Ringrazio tutta la mia famiglia, anche quella lontana.

Ringrazio i miei amici per essermi stati accanto in questo periodo intenso e per gioire, insieme a me, dei traguardi raggiunti.

Grazie a tutti.

Ancona, ottobre 2021

Lobna Joualy

Sommario

1. Introduzione	1
1.1 Scopo della tesi	5
2. Tecnomatix Process Simulate.....	7
3. La linea	11
3.1 Stazione per l'assemblaggio dei distanziali.....	13
3.1.1 L'operatore Jack.....	18
3.1.2 Creazione operazione manuale.....	21
3.1.3 Creazione della cinematica della macchina.....	25
3.1.4 Creazione operazioni automatizzate	26
3.2 Stazione per il posizionamento del coperchio	27
3.2.1 Creazione della cinematica del robot	31
3.2.2 Creazione della cinematica della pinza	33
3.2.3 Creazione della cinematica della macchina.....	34
3.2.4 Creazione delle operazioni	35
3.3 Stazione per la chiusura con le clamp	36
3.3.1 Creazione della cinematica del robot	42
3.3.2 Creazione della cinematica della pinza	44
3.3.3 Creazione della cinematica della macchina.....	44
3.3.4 Creazione delle operazioni	45
3.4 Stazione per l'inserimento delle guarnizioni	47
3.4.1 Creazione della cinematica del robot	52
3.4.2 Creazione della cinematica dell'utensile.....	54
3.4.3 Creazione della cinematica della macchina.....	54
3.4.3 Creazione delle operazioni	55
3.5 Il nastro trasportatore	56
3.6 Analisi della linea	57

4.	Variante della linea	59
4.1	Il robot collaborativo	60
4.2	La pinza.....	61
5.	Modello cinematico e dinamico.....	63
5.1	Trasformazione di coordinate.....	63
5.2	Gli angoli pitch yaw roll	66
5.3	Modello cinematico: Denavit-Hartenberg.....	67
5.4	Analisi di posizione.....	71
	Analisi diretta.....	71
	Analisi inversa	72
5.5	Analisi di velocità	74
	Jacobiano.....	75
	Analisi diretta di velocità	75
	Analisi inversa di velocità.....	76
5.6	Matrici d'inerzia	76
5.7	Modello dinamico.....	78
5.6	Modellazione dell'UR10e.....	81
6.	Pianificazione della traiettoria.....	87
6.2	Modello Matlab.....	91
6.2	Confronto con Tecnomatix	99
6.3	Ottimizzazione.....	105
7.	Conclusioni.....	109
	Bibliografia	110

Capitolo 1

Introduzione

Questo lavoro di tesi è collocato all'interno del progetto *“Nuova piattaforma mecatronica per la progettazione e la produzione di scambiatori di calore eco-sostenibili”* realizzato da una collaborazione tra Valmex, CTF Automazioni, Fonderie PL, Saba Plast, l'Università Politecnica delle Marche e l'Università degli Studi di Parma.

L'esigenza di realizzare nuovi prodotti che facciano fronte alle crescenti esigenze dei propri clienti ha portato Valmex, tra i leader europei nella produzione di scambiatori di calore, a studiare nuove soluzioni che possano ampliare la propria offerta commerciale: la nuova gamma di prodotti dovrà offrire soluzioni scalabili entro un ampio range di taglia e potenza, a minor impatto ambientale e maggiore efficienza energetica per rispondere ai sempre più stringenti requisiti di compattezza e robustezza.

Tuttavia, la sola innovazione di prodotto non è sufficiente a garantire il livello di competitività richiesto dagli obiettivi stabiliti dall'azienda, con particolare riferimento all'ingresso nel mercato americano. È necessario, infatti, che contestualmente allo sviluppo delle nuove soluzioni tecniche, vengano riprogettati e realizzati processi produttivi e di certificazione della qualità che rispondano alle logiche del paradigma Industria 4.0, per sfruttare tutte le potenzialità della

tecnologia attualmente disponibile e mettere l'innovazione al centro dei cambiamenti delle aziende coinvolte.

L'obiettivo del progetto è quindi la creazione di una piattaforma di sviluppo che consenta di ampliare l'offerta progettando e realizzando un'intera gamma di scambiatori di calore radicalmente innovativi come concetto e prestazioni e le attrezzature e i processi necessari alla produzione dei loro componenti, all'assemblaggio e alla verifica della qualità. In particolare, la nuova serie dovrà soddisfare i requisiti di taglia, robustezza ed affidabilità richiesti ai *"wide water passage stainless steel heat exchanger"* che rappresentano la classificazione standard per gli scambiatori di calore distribuiti nel mercato americano, puntando inoltre sull'efficienza dello scambio energetico in modo da intercettare il programma di incentivazione adottato negli Stati Uniti.

Il risultato del progetto sarà lo studio e la progettazione dell'intera piattaforma e la realizzazione di un primo prodotto in forma prototipale, che sarà denominato *Circond 2.0*, che consentirà di validare sperimentalmente la validità e l'efficacia delle soluzioni prospettate.



Figura 1.1 Scambiatore "Circond"

La nuova gamma di scambiatori sarà composta da tre macro-componenti: un guscio cilindrico chiamato virola a cui viene vincolata la serpentina contenente il fluido-vettore (acqua), un fondo in plastica e un coperchio in lega di alluminio, su cui viene fissato il bruciatore.

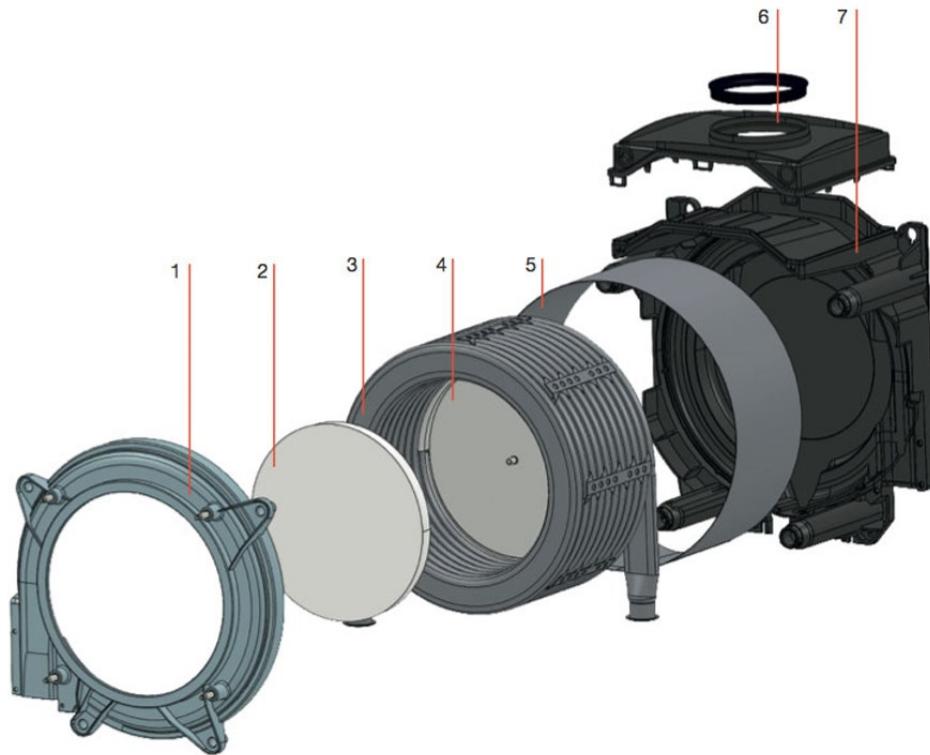


Figura 1.2 Componenti dello scambiatore di calore

<i>N°</i>	<i>Nome</i>
1	coperchio frontale
2	piastra di separazione isolante
3	serpentina
4	piastra di separazione
5	rivestimento della serpentina
6	parte superiore dell'involucro
7	involucro posteriore

Tabella 1.1 Componenti dello scambiatore di calore

I fumi caldi scaricati dal bruciatore investono la serpentina, trasferendo energia termica all'acqua che scorre al suo interno.

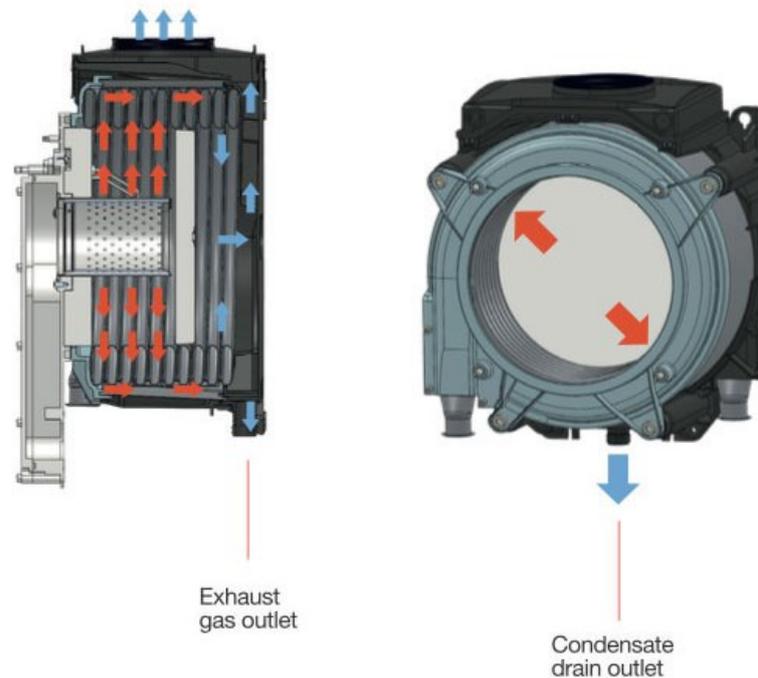


Figura 1.3 Modalità di funzionamento dello scambiatore di calore

Nei prodotti attualmente in produzione l'accoppiamento tra i vari componenti prevede la deposizione di un cordone siliconico nelle zone di tenuta. Come è noto, il silicone aderisce ai componenti e ne rende molto difficile la separazione per lo smaltimento. Pertanto, nella gamma Circond 2.0 si prevede di ridurre notevolmente il quantitativo di silicone utilizzato realizzando così un processo produttivo a minore impatto ambientale. Il silicone verrà ancora utilizzato nell'accoppiamento tra coperchio e serpentina e tra fondo e serpentina, ma il sigillante ossimico attualmente adoperato verrà sostituito con uno di tipo “*meco free*” riducendo ulteriormente l'impatto ambientale del prodotto. Negli accoppiamenti in cui è prevista l'eliminazione del silicone verrà introdotta un'opportuna guarnizione meccanica sostitutiva. La bontà della soluzione sviluppata verrà validata sperimentalmente eseguendo test di tenuta e di resistenza alle temperature di esercizio.

La validità delle soluzioni individuate sarà verificata tramite la realizzazione di un impianto pilota che implementerà l'automazione delle fasi più significative del processo di produzione di uno scambiatore, prototipo della gamma Circond 2.0. La

nuova linea nascerà da una stretta collaborazione tra Valmex e CTF Automazioni, che opereranno in sinergia utilizzando un approccio di progettazione partecipativa (co-design), al fine di migliorare l'affidabilità del fissaggio del coperchio, eliminando le giunzioni a vite e i frena filetti attualmente utilizzati e sostituendoli con fascette di serraggio per deformazione plastica (clamp).

1.1 Scopo della tesi

Grazie agli strumenti di prototipazione virtuale oggi è possibile effettuare degli studi di linee a partire dai CAD. Questi programmi permettono di avere informazioni riguardo al tempo ciclo di un'operazione, riguardo a possibili interferenze e urti; questo è facilitato nei sistemi grafici interattivi (es. Tecnomatix) che, grazie all'interfaccia visiva, permettono a chi li usa di avere una visualizzazione grafica dell'ambiente virtuale. Questo permette quindi, una compressione dei tempi di sviluppo ed una maggiore facilità di integrazione tra le attività progettuali e di condivisione dei risultati ottenuti.

Di seguito verrà analizzata una linea automatizzata per l'assemblaggio dello scambiatore di calore Circond 2.0 realizzata da CTF Automazioni per Valmex. La linea studiata è formata da quattro stazioni: la prima nella quale abbiamo anche un operatore umano e le altre tre completamente automatizzate.

In un primo momento si sono valutati i tempi ciclo e le possibili interferenze tra le macchine, i robot e gli oggetti in movimento; si sono dunque verificate le prestazioni della linea ed evidenziate eventuali criticità e si è prodotto un video della linea simulata. Il materiale necessario alle simulazioni, quali CAD e informazioni tecniche indispensabili per la ricostruzione puntuale delle stazioni della linea, è stato fornito da CTF.

In seguito, si è studiata una possibile ottimizzazione della prima stazione grazie all'introduzione di un robot collaborativo e si è valutata la convenienza della soluzione completamente automatizzata rispetto a quella manuale nella quale i distanziali vengono posizionati dall'operatore.

Per poter fare ciò a partire dai CAD si sono implementate le stazioni in Tecnomatix e si è analizzata la linea. Di seguito, è stata considerata la variante automatizzata della prima stazione, si è eseguita un'ottimizzazione del tempo ciclo dell'operazione della stazione in Matlab e infine si sono verificati e confrontati i risultati su Tecnomatix.

Capitolo 2

Tecnomatix Process Simulate

Tecnomatix Process Simulate fornisce un ambiente 3D avanzato in grado di emulare il comportamento realistico dei processi di produzione e l'ottimizzazione dei tempi di ciclo e di svolgimento del processo, facilita la simulazione dei processi di assemblaggio, delle operazioni umane e delle procedure meccaniche di strumenti, dispositivi e robot e permette agli utenti di verificare la fattibilità di un processo di assemblaggio, convalidando le caratteristiche di raggiungibilità, prossimità e collisioni, grazie alla simulazione globale dell'intero processo di assemblaggio del prodotto e degli strumenti.

La creazione automatica delle sequenze di assemblaggio consente di migliorare la produttività del processo di pianificazione. Strumenti quali sezioni, misurazioni e rilevazione delle collisioni permettono di verificare e ottimizzare in modo dettagliato le situazioni di assemblaggio. La documentazione dei processi finali di assemblaggio può avvalersi inoltre della funzione di gestione dei filmati, che integra le istruzioni di lavoro con l'aggiunta di video.

Process Simulate consente la verifica di diversi segmenti del processo di fabbricazione. È possibile simulare nello stesso ambiente processi di assemblaggio, operazioni umane, saldature, processi continui (come la saldatura laser e

l'incollaggio) e altri processi robotizzati, ottenendo una simulazione delle zone di produzione virtuali. La simulazione emula realisticamente il comportamento umano, i controller robotizzati e la logica PLC.

All'interno di Process Simulate si possono distinguere diversi ambienti integrati tra di loro:

- **Process Simulate Assembly:** consente agli utenti di verificare la fattibilità di un processo di assemblaggio, consentendo agli ingegneri di produzione di determinare la sequenza di montaggio più efficiente, di rispettare le distanze per evitare collisioni, e identificare il più breve tempo di ciclo possibile. Process Simulate Assembly fornisce la possibilità di scegliere lo strumento più adatto a un determinato processo, potendo cercarlo in una libreria di utensili classificati, e grazie a test virtuali di portata, analisi delle collisioni e simulazioni dell'intero processo di assemblaggio del prodotto e dell'utensile.

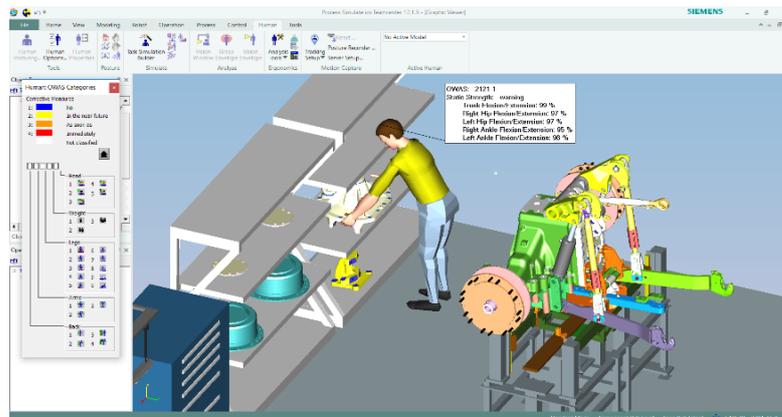


Figura 2.1 Process simulate assembly

- **Process Simulate Commissioning:** consente agli utenti di ottimizzare i dati di produzione e di ingegneria esistenti, dalla progettazione concettuale fino all'officina. Process Simulate Commissioning fornisce una piattaforma di integrazione comune per le varie discipline che partecipano all'effettiva messa in servizio di una zona/cella (meccanica ed elettrica) di produzione. Utilizzando Process Simulate Commissioning, gli utenti possono simulare l'effettivo codice PLC con l'hardware reale utilizzando OPC e i programmi

robot effettivi, ottenendo in tal modo l'ambiente di collaudo virtuale più realistico possibile.

- **Process Simulate Human:** consente agli utenti di verificare il design di una postazione di lavoro, garantendo che le parti del prodotto possano essere raggiunte, assemblate e mantenute. Process Simulate Human offre potenti capacità di analisi e ottimizzazione dell'ergonomia degli interventi umani, garantendo così un processo ergonomicamente sicuro secondo gli standard del settore. Utilizzando gli strumenti di simulazione umana, l'utente può eseguire una simulazione realistica delle attività umane e ottimizzare i tempi di ciclo di processo secondo le norme industriali standard sull'ergonomia.



Figura 2.2 Process simulate human

- **Process Simulate Spot Weld:** consente agli utenti di progettare e validare i processi di saldatura a punti in un ambiente di simulazione in grafica 3D, dalla fase di pianificazione iniziale a quelle di ingegneria dettagliata e di programmazione offline. Process Simulate Spot Weld facilita le attività di ingegneria di produzione come la distribuzione dei punti di saldatura alle stazioni, rispettando i vincoli geometrici e di tempo di ciclo, e come la selezione della pistola saldatrice più adatta da una libreria indicizzata, per riutilizzare utensili e pistole saldatrici già presenti.
- **Process Simulate Robotics:** permette agli utenti di progettare e simulare postazioni altamente complesse di produzione robotizzata. La sincronizzazione di zone con più robot - un compito molto complicato - è

semplificata da strumenti di Process Simulate come il valutatore di eventi ciclici e un controller emulato di robot specifici. Gli strumenti di simulazione robotica danno la possibilità di progettare un percorso senza collisioni per tutti i robot e di ottimizzare i loro tempi di ciclo.



Figura 2.3 Process simulate robotics

Process Simulate offre i seguenti vantaggi:

- Riduzione dei costi di cambiamento grazie a diagnosi precoce e comunicazione di problemi di progettazione del prodotto;
- Riduzione del numero di prototipi fisici con validazione virtuale in anticipo;
- Ottimizzazione dei tempi di ciclo attraverso la simulazione;
- Garanzia di processi sicuri ergonomicamente;
- Riduzione dei costi grazie al riutilizzo di utensili e funzioni standard;
- Minimizzazione dei rischi di produzione simulando diversi scenari produttivi;
- Validazione precoce dei processi di produzione meccanici ed elettrici integrati (PLC e robotica);
- Validazione precoce del collaudo in un ambiente virtuale;
- Aumento della qualità dei processi emulando processi realistici durante tutto il ciclo di vita del processo.

Capitolo 3

La linea

Della linea per l'assemblaggio di scambiatori di calore *Circond 2.0* descritta nel capitolo 1 si è studiata la parte dedicata all'assemblaggio della serpentina, dei distanziali, del coperchio, delle clamp per il serraggio e delle guarnizioni (fig. 3.1-3.5).

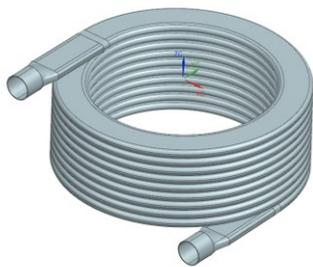


Figura 3.1 Serpentina

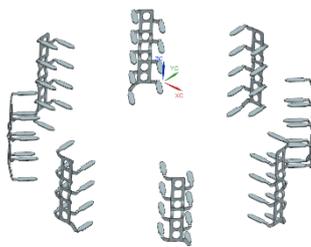


Figura 3.2 Distanziali

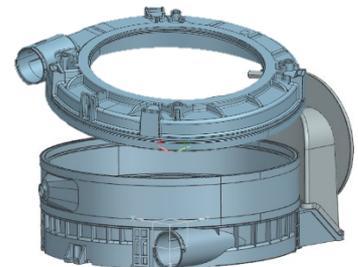


Figura 3.3 Coperchio

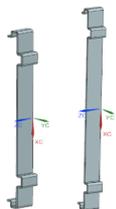


Figura 3.4 Clamp



Figura 3.5 Guarnizione

La linea studiata è formata da quattro stazioni:

- 1) **Stazione per l'assemblaggio dei distanziali e la serpentina:** un operatore posiziona manualmente gli 8 distanziali nella macchina dove poi vengono assemblati con la serpentina.

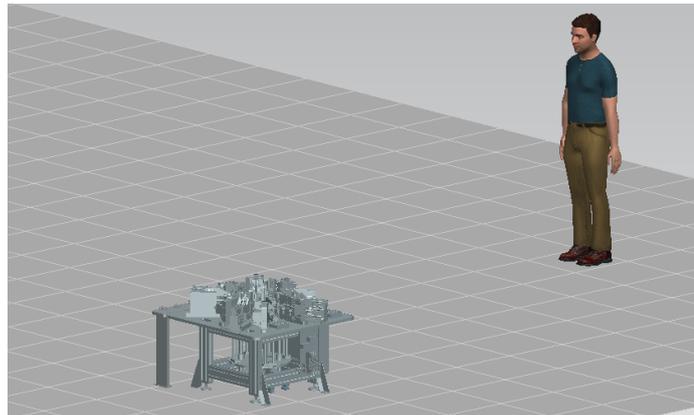


Figura 3.6 La prima stazione



Figura 3.7 Stazione centrale di posaggio

- 2) **Stazione per il posizionamento del coperchio:** la serpentina arriva qua già assemblata con la parte inferiore del coperchio e qua un robot con l'aiuto di una macchina posiziona il coperchio superiore.
- 3) **Stazione per la chiusura con clamp:** un robot posiziona le clamp che poi vengono chiuse dall'apposita macchina.
- 4) **Stazione per l'assemblaggio delle guarnizioni:** le guarnizioni vengono lubrificate dall'apposita macchina, poi vengono prelevate dal robot e assemblate allo scambiatore.

Tra la prima (fig. 3.6) e le altre stazioni (fig. 3.8) c'è un'altra parte di linea che non verrà studiata in questa tesi, non verrà quindi studiato come la serpentina va dalla prima alla seconda stazione. Per quanto riguarda le altre tre stazioni, invece, si ha un nastro trasportatore che movimentava lo scambiatore (montato su un pallet) tra le diverse stazioni.

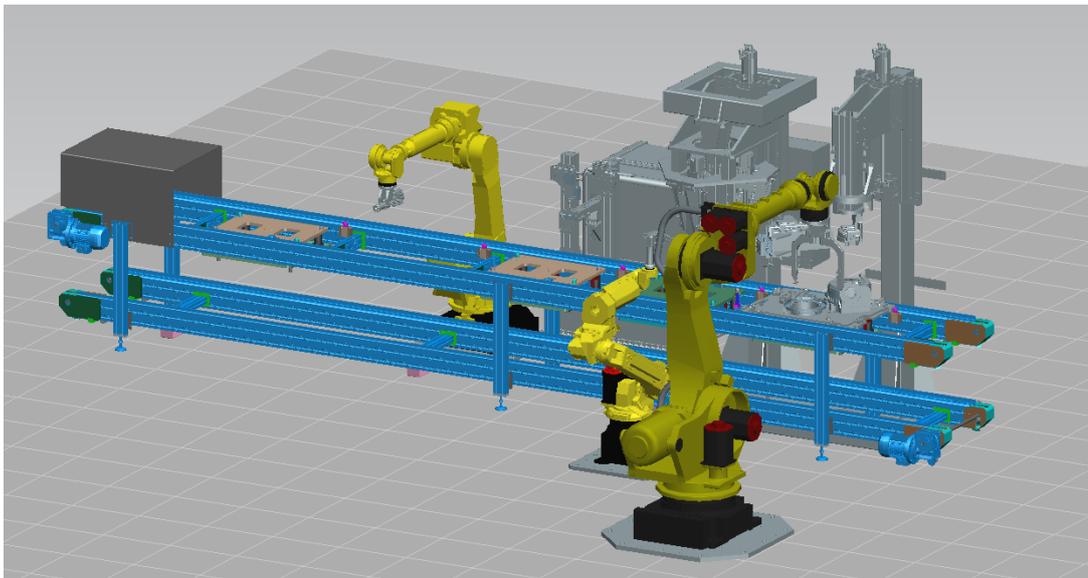


Figura 3.8 Le ultime tre stazioni

3.1 Stazione per l'assemblaggio dei distanziali

Nella prima stazione si uniscono i distanziali alla serpentina; questa stazione è in parte manuale, in parte automatizzata. Si possono distinguere le seguenti fasi:

- 1) L'operatore preleva i distanziali dal banco uno alla volta.

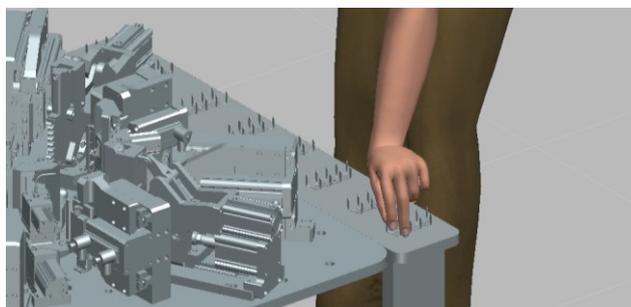


Figura 3.9 Presa del distanziale

- 2) L'operatore posiziona i distanziali nella macchina nell'apposito appoggio magnetico.



Figura 3.10 Distanziali posizionati sulla macchina



Figura 3.11 Dettaglio del posizionamento sull'appoggio magnetico

Le operazioni 1 e 2 vengono ripetute 8 volte, per posizionare tutti i distanziali.

- 3) La serpentina viene posizionata nella macchina; il posizionamento avviene in maniera automatizzata (in questa tesi non viene trattata la parte relativa al posizionamento della serpentina).

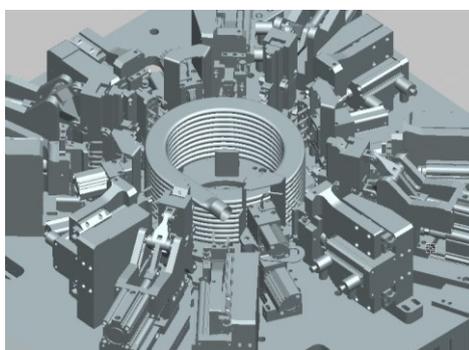


Figura 3.12 Serpentina posizionata

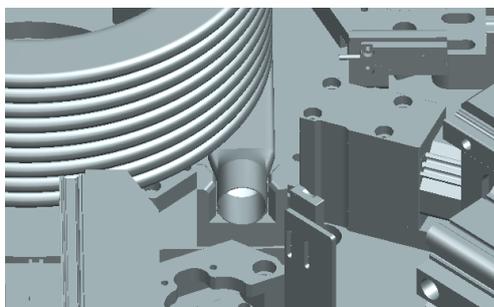


Figura 3.13 Dettaglio del posizionamento della serpentina sulla macchina

- 4) Si muovono 4 gruppi di unghiette (in arancione nelle fig. 3.14) che bloccano la serpentina dal basso.

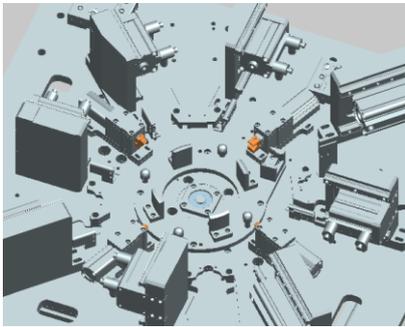


Figura 3.14 Gruppo per il bloccaggio della serpentina

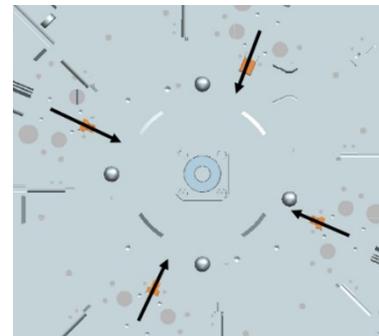


Figura 3.15 Movimento unghiette di bloccaggio

- 5) Si muovono 4 gruppi di unghiette (in giallo nella fig. 3.16) che bloccano la serpentina dall'alto; questo permetterà poi di stirare la serpentina per inserire i distanziali.

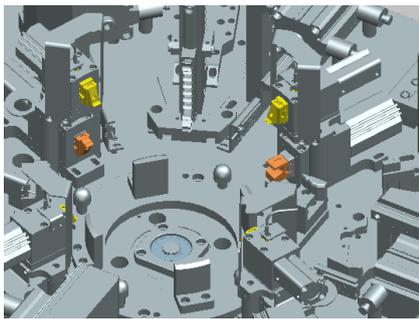


Figura 3.16 Gruppo superiore per il bloccaggio della serpentina

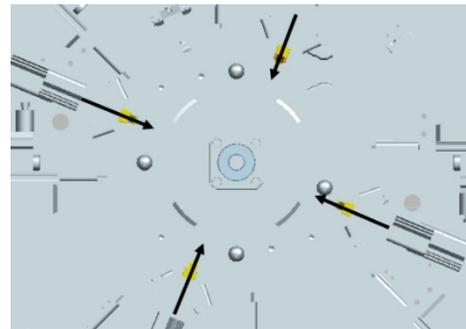


Figura 3.17 Movimento delle unghiette di bloccaggio superiori

- 6) Si alza il gruppo motorizzato superiore per il bloccaggio (vedi fig. 3.18) che quindi dilata la serpentina.

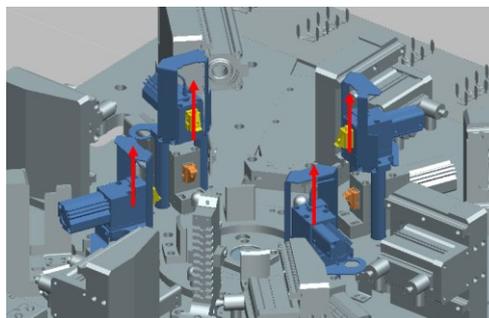


Figura 3.18 Movimento per l'estensione della serpentina

- 7) Si inseriscono le unghiette con la sagoma della serpentina per equi distanziare le spire (movimento nella figura 3.20); con un meccanismo a camma si fa in modo che si inseriscano prima le unghiette inferiori, poi quelle superiori.

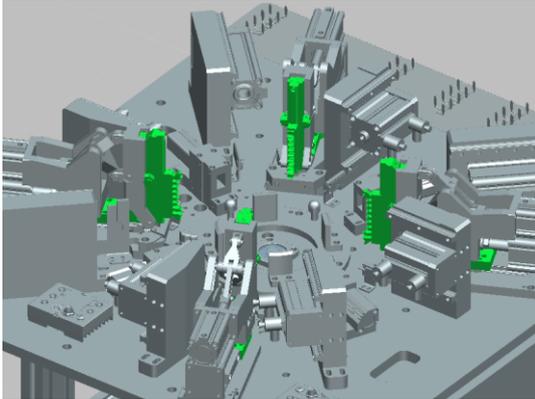


Figura 3.19 Gruppo per equi distanziare le spire

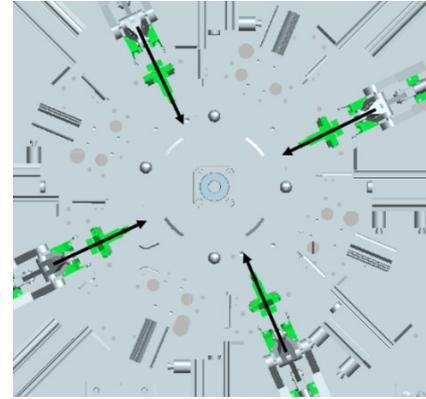


Figura 3.20 Movimento del meccanismo



Figura 3.21 Denti distanziatori ad attuazione pneumatica

- 8) Avanzano le otto slitte che uniscono i distanziali alla serpentina; i distanziali si staccano dai magneti e si uniscono alla serpentina. L'avanzamento delle slitte avviene in due gruppi da quattro.

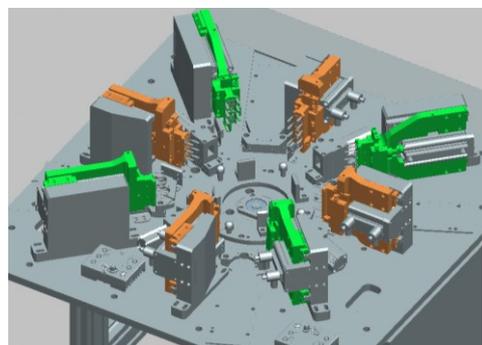


Figura 3.22 Gruppo per il posizionamento dei distanziali

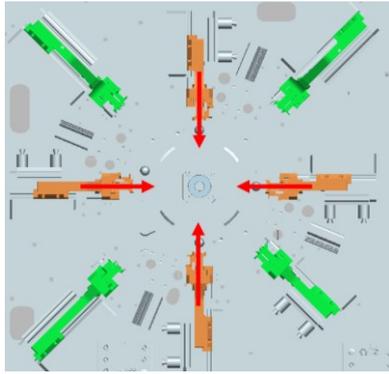


Figura 3.23 Movimento del primo gruppo di slitte

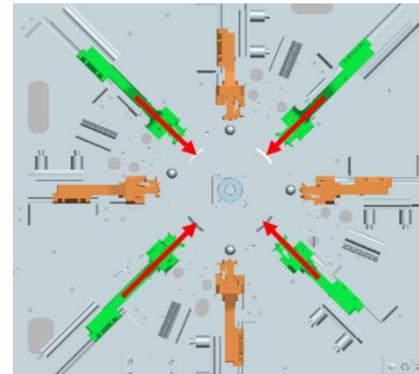


Figura 3.24 Movimento del secondo gruppo di slitte

- 9) Si tolgono i quattro gruppi per l'equi distanziamento inseriti nella fase 7.
- 10) Si abbassa il gruppo motorizzato superiore per il bloccaggio; si abbassano i motori e la serpentina non rimane più stirata.
- 11) Si tolgono le unghiette superiori inserite nella fase 5.
- 12) Arretra il gruppo di slitte per l'inserimento dei distanziali.
- 13) Si tolgono le unghiette superiori inserite nella fase 4.
- 14) La serpentina assemblata con i distanziali viene prelevata da un robot e posizionata nella stazione successiva.



Figura 3.25 Assemblato serpentina-distanziatori.

Per poter realizzare le operazioni su Tecnomatix si è usato l'operatore umano Jack, si è creata la cinematica della macchina e si sono definite le operazioni automatizzate e le operazioni manuali.

3.1.1 L'operatore Jack

Per modellare l'operatore in ambiente virtuale su Tecnomatix è stato utilizzato il manichino Jack. In Process Simulate è infatti possibile popolare l'ambiente virtuale con esseri umani simulati che hanno caratteristiche biomeccaniche, antropometriche ed ergonomiche adeguate. Gli esseri umani Jack hanno l'aspetto e agiscono come gli esseri umani reali. L'operatore virtuale può muoversi, camminare e sollevare oggetti. Inoltre, può esercitare forze e avvisa quando una determinata operazione richiede forze eccessive; se l'azione richiesta supera i limiti, Process Simulate suggerisce un'azione che non superi i limiti.

È possibile modellare uomini e donne di qualsiasi statura, sulla base di database antropometrici convalidati. Gli esseri umani di Process Simulate hanno gli stessi limiti articolari (gamma di movimento) di un tipico essere umano nel mondo reale.

Process Simulate Human facilita l'integrazione delle valutazioni ergonomiche nel processo di sviluppo, facilita l'accesso a livello aziendale alle valutazioni degli studi umani e l'accesso a livello aziendale alle valutazioni degli studi umani.

Process simulate human permette di:

- Eseguire studi sulla raggiungibilità, studi ergonomici e creare simulazioni di sequenze di compiti con figure umane o solo mani;
- Catturare il movimento del corpo e della mano;
- Definire la postura del corpo, le posture delle mani, il posizionamento, il raggiungimento, l'afferraggio, il trasporto, il camminare, il carico di forza e peso e la creazione di compiti (con il TSB), ecc.;
- Ottenere report ergonomici utilizzando diversi standard ergonomici.

Per dare una postura al Jack, in generale, è possibile utilizzare o il motion capture o gli strumenti all'interno di Process Simulate. Ci sono tre gruppi di strumenti all'interno di Process Simulation per il human posturing per fare una simulazione:

- Strumenti umani di base: si muovono i singoli giunti o si usano il posture library, il man jog o il human posturing. Generalmente questo tipo di

strumento si usa o per dare una prima postura di tentativo o per modificare le posture create con i 2 strumenti successivi.

- Strumenti per la creazione di operazioni: si definiscono afferraggi e operazioni critiche. Include auto grasp, place object e reach target. Questo strumento utilizza la cinematica inversa per trovare la postura umana in base alla posizione target (target location) e la postura può essere scelta o da una libreria o aggiustata manualmente.
- Strumenti per la creazione di simulazioni di attività di alto livello: Si definisce il compito da svolgere (basic task) e le operazioni vengono create automaticamente usando il Task Simulation Builder (TSB).

Per far muovere il modello umano si può procedere in 3 modi:

Metodo 1: Cambiare le pose memorizzate dei singoli giunti o saltare alle pose memorizzate.

Metodo 2: Selezionando una terna obiettivo (target frame) da raggiungere o verso cui camminare.

Metodo 3: Seguire un object flow path, un lift assist path o un device operation.

Il modello umano Jack ha 135 gradi di libertà, è un modello umano accurato che fornisce un grande grado di fedeltà, compresa una colonna vertebrale completamente segmentata, mani articolate e occhi indipendenti.

Un modello umano esistente nello studio può essere selezionato e i suoi parametri possono essere modificati. Questa tecnica può essere usata per creare il processo per un umano (per esempio il 5° percentile femminile), e poi eseguirlo di nuovo per un altro umano (per esempio il 95° percentile maschile). Una sequenza di operazioni create per un modello umano può essere assegnata a un altro modello umano da eseguire. In alcuni casi, solo un sottoinsieme specifico di umani disponibili viene utilizzato per tutti i test: per esempio il 5° percentile femminile e il 95° percentile maschile (dove specifiche "dimensioni chiave" sono state utilizzate per ogni modello). In questo caso, entrambi i modelli possono esistere nello studio. Il processo può essere progettato per un modello e poi successivamente assegnato all'altro modello per testare che anche lui possa farlo.

Si possono distinguere diverse terne di riferimento:

- CPHAR: center point hand right;
- CPHAL: center point hand left;
- GRHAL: grasp hand left;
- GRHAR: grasp hand right;
- CPFOR: center point foot right;
- CPFOL: center point foot left;
- CPPEL: center point pelvis right;
- CPERL: center point elbow right;
- CPLOOK: center point look;
- CPHEA: center point head.

Nella figura 3.26 è rappresentato il Jack con la posizione delle varie terne.

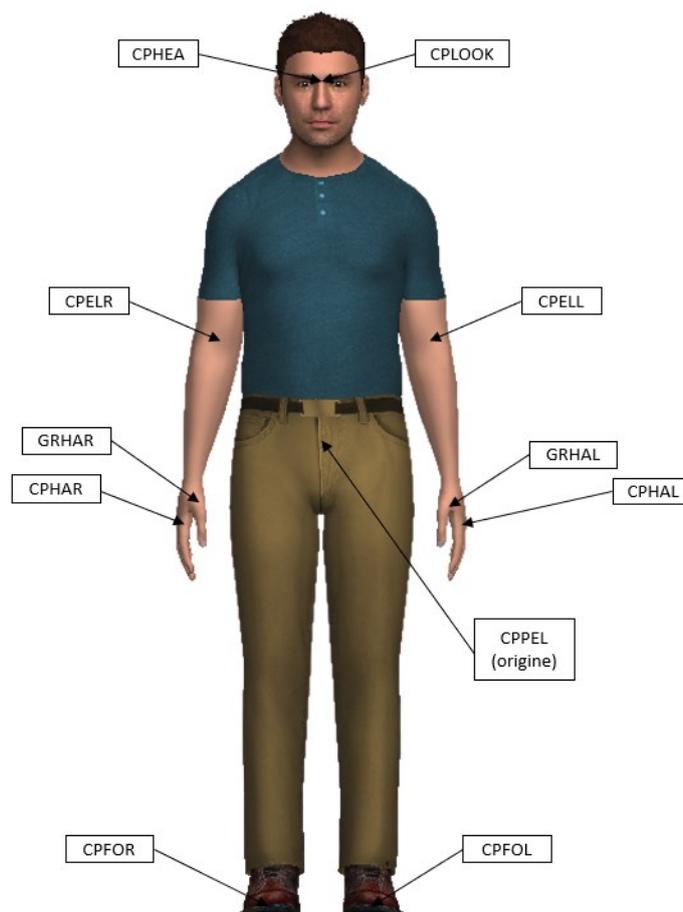


Figura 3.26 Manichino Jack e terne di riferimento

Per creare il manichino si è usato il comando “Create Human” che crea il manichino del genere che si vuole (maschio o femmina), impostando le misure antropometriche tra una vasta scelta di database disponibili (ANSUR, ANSUR_II, NHANES, NHANES_2011_2014, NA_AUTO, CDN_LF_97, CHINESE, ASIAN_INDIAN_NID97, GERMAN, JAPANESE_2006, KOREAN_2003, MEXICAN_JALISCO). Poi è possibile dettagliare tutte le misure (fig. 3.27).

The screenshot shows the 'Create Human' window with the following settings:

- Gender: Male Female
- Database: ANSUR
- Height: 50 % 1750,0 mm
- Weight: 50 % 79,0 kg
- Shoe sole height: 25,4 mm
- Age: 25 years

Body measurements (mm)

- Chest circumference: 1000,2
- Waist circumference: 850,0
- Hip circumference: 991,4
- Hip breadth: 343,7
- Hand: Length 193,4, Breadth 90,5, Depth 31,7
- Foot: 269,3, 100,8
- Sitting height: 912,0
- Elbow to wrist: 269,0
- Biacromial breadth: 397,1
- Bideltoid breadth: 494,5
- Knee height: 557,2

Figura 3.27 Pannello “Create Human”

In questa tesi è stato considerato un essere umano uomo, si è usato il database ANSUR e per l’altezza e il peso sono state considerate le dimensioni del 50° percentile. Non sono state fatte ulteriori modifiche a tali dimensioni.

3.1.2 Creazione operazione manuale

Una volta creato il Jack si è proceduti alla creazione delle operazioni. Per definire le operazioni che l’operatore deve svolgere si è usato il TSB (Task Simulation Builder).

In un primo momento si sono definite solo le operazioni che l'operatore deve svolgere (go, get, put, position) (interfaccia in fig. 3.28).

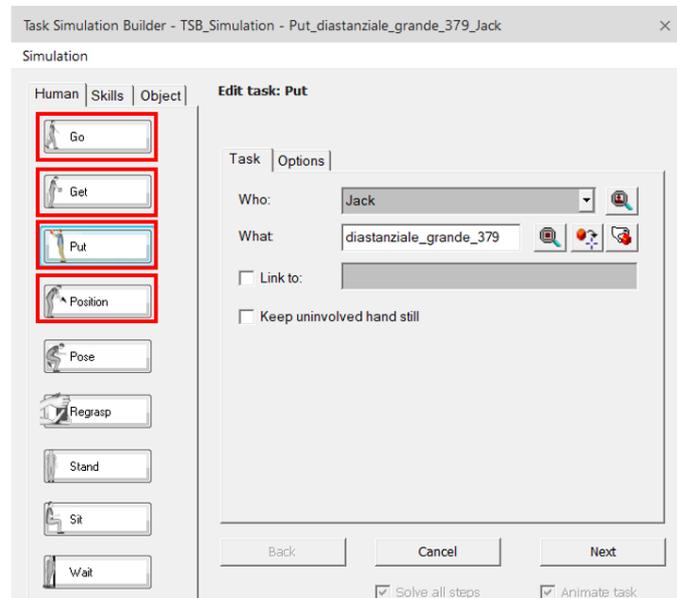


Figura 3.28 Pannello del TSB

La sola definizione delle operazioni elementari però non basta; essendo le posture create automaticamente in base al task assegnato l'operatore non vede gli altri corpi come ostacoli; quindi, passa al loro interno durante il movimento. Dalla figura 3.29 si può vedere come la mano dell'operatore entri all'interno del banco di lavoro e dalla figura 3.30 è possibile invece vedere come la gamba entri all'interno degli altri oggetti. Un altro problema della definizione del compito con il TSB è che le pose di presa e rilascio dell'oggetto non sono corrette. Occorre quindi modificare la postura del Jack in modo tale da avere una buona presa e un buon rilascio dell'oggetto e per non avere problemi di interferenza con gli altri oggetti presenti nell'ambiente.

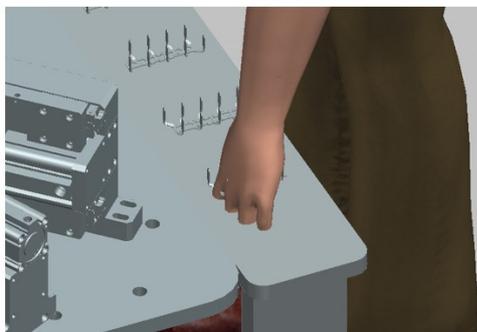


Figura 3.29 Interferenza del Jack il banco di lavoro durante la presa



Figura 3.30 Interferenza del Jack con il banco durante il movimento

Per evitare che la mano dell'operatore entrasse all'interno del banco (o della macchina) si sono modificate la pose di presa e posizione usando lo "human posturing" (fig. 3.31) che ci permette di muovere i giunti dell'operatore Jack.

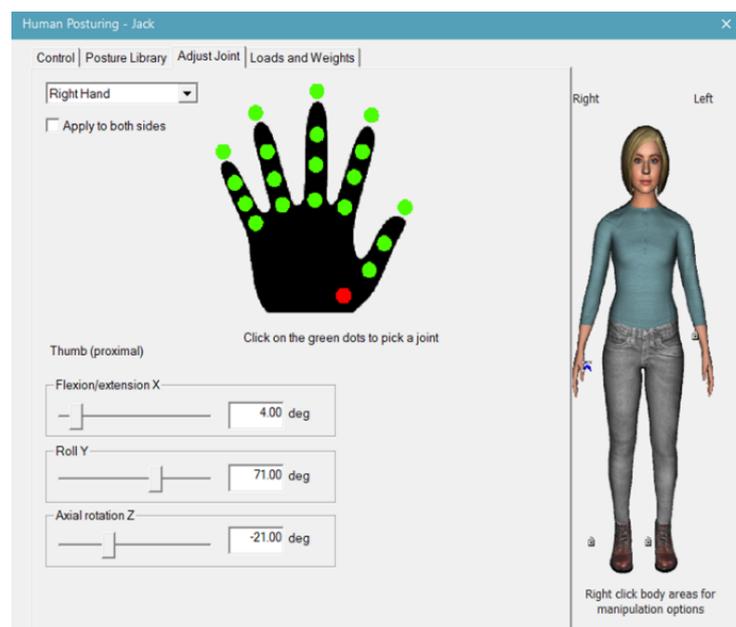


Figura 3.31 Interfaccia dello "human posturing"

Nella fig. 3.32 sono riportate le nuove posizioni di presa (a sinistra) e rilascio (a destra). Per evitare, invece, che l'operatore passasse all'interno degli altri corpi si sono aggiunti dei "via walk points" (posizioni attraverso le quali l'operatore deve passare prima di arrivare alla posizione finale) (fig. 3.33).

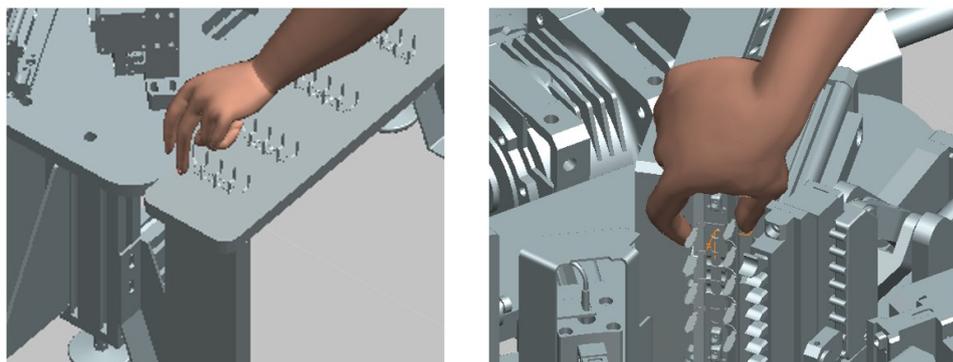


Figura 3.32 Nuova presa (a sinistra) e posizionamento (a destra) del distanziale

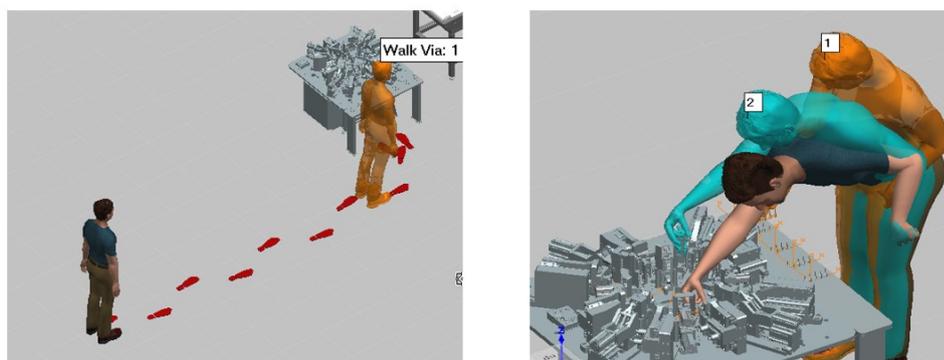


Figura 3.33 Via walk points

Di seguito è riportato il diagramma di Gantt delle operazioni svolte dall'operatore umano.

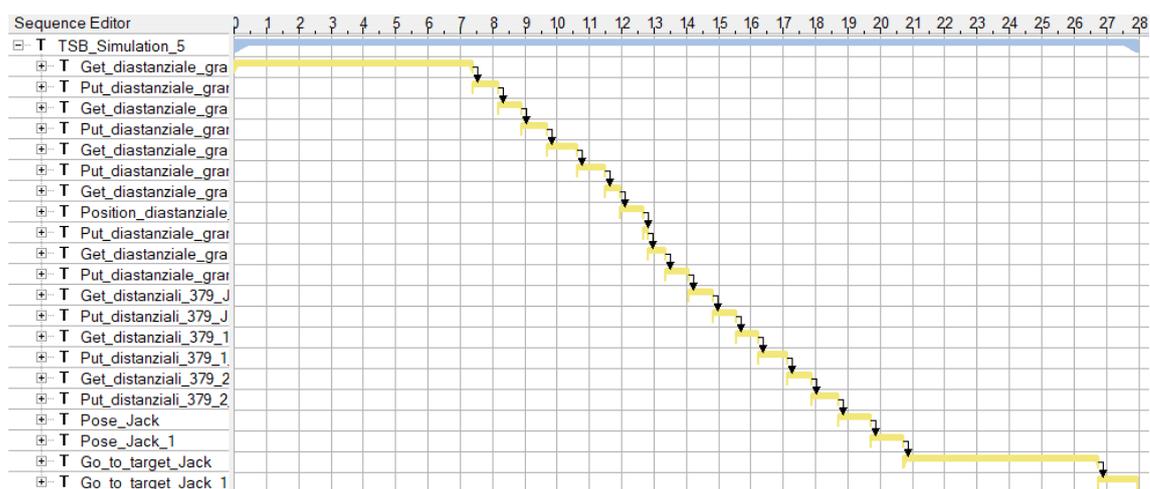


Figura 3.34 Diagramma di Gantt

3.1.3 Creazione della cinematica della macchina

Per la creazione della cinematica si possono distinguere i seguenti step:

- 1) Su **NX** si esporta il CAD in formato jt o step;
- 2) Su **Tecnomatix** si importa il file e lo si definisce:
 - come resource se è un robot, un tool o una stazione automatizzata;
 - come part negli altri casi (es. distanziali, serpentina);
- 3) Si apre una modellazione (set modeling scope) e si attribuisce una cinematica all'oggetto con il "kinematics editor":
 - Si seleziona "create link" e su "link properties" si selezionano tutte le parti che si vogliono includere nel gruppo; si ripete questa procedura per tutti i gruppi (i gruppi sono gli insiemi di parti in moto relativo l'una rispetto all'altra).
 - Una volta creati i gruppi si procede con la creazione della cinematica vera e propria. Si trascina il cursore dall'elemento padre all'elemento figlio, poi si apre la finestra "joint properties" e qua si definisce con due punti l'asse (di rotazione se si considera a un giunto rotoidale o asse di traslazione se si considera un giunto prismatico).
 - Se necessario, è possibile definire le dipendenze fra i giunti con "joint dependency".
 - Se necessario, è possibile definire anche i limiti superiori e inferiori di rotazione/traslazione dei giunti e le velocità e le accelerazioni massime ammissibili.

Nella figura 3.35 è riportata la cinematica della macchina realizzata con il "kinematics editor". Nella figura 3.36 è, invece, riportata la macchina per l'assemblaggio della serpentina e dei distanziali con evidenziati i diversi gruppi cinematici.

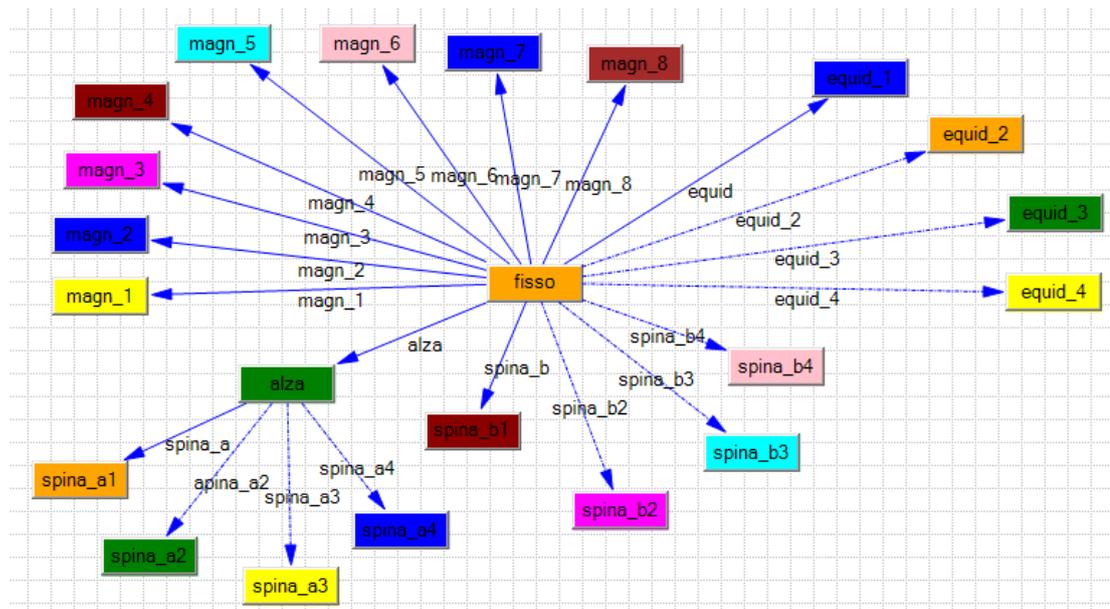


Figura 3.35 Cinematica della macchina realizzata con il “kinematics editor”

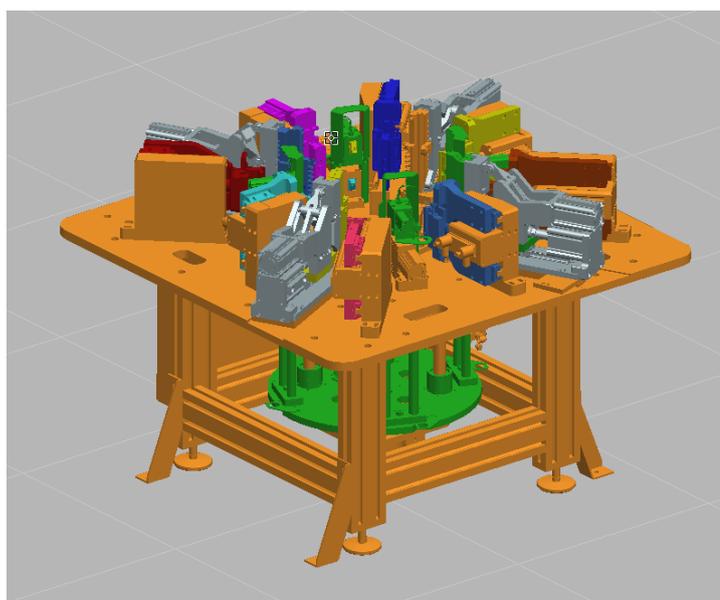


Figura 3.36 Macchina con i vari gruppi cinematica

3.1.4 Creazione operazioni automatizzate

Una volta creata la cinematica della macchina si sono potute creare le varie operazioni che la macchina deve eseguire.

Con il “pose editor” si sono definite le pose della macchina, ovvero le posizioni che deve assumere la macchina durante l’esecuzione dei compiti (viste all’inizio del capitolo 3.1).

Le operazioni sono state poi create con “device operation”; si sono definite per ogni operazione la posa di partenza e la posa destinazione e il tempo richiesto. Infine, dal sequence editor si sono sequenziate le operazioni (con “link”), di cui il diagramma di Gantt è riportato in figura 3.37.

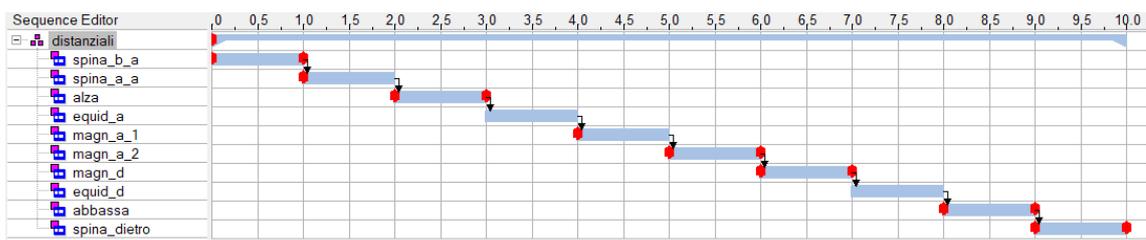


Figura 3.37 Diagramma di Gantt

3.2 Stazione per il posizionamento del coperchio

Nella seconda stazione un robot con l’aiuto di una macchina posiziona il coperchio sopra al bruciatore.



Figura 3.38 Seconda stazione di inserimento del coperchio dello scambiatore di calore

Si possono distinguere diverse fasi:

- 1) Il robot preleva il coperchio dal pallet (fig. 3.39) e lo posiziona in asse alla serpentina ad una distanza di circa 30 mm (fig. 3.40);

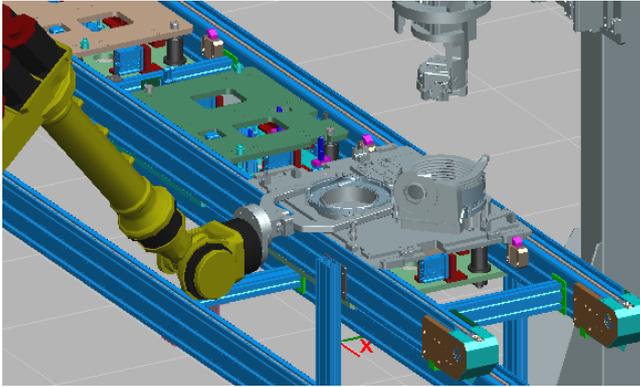


Figura 3.39 Prelievo del coperchio

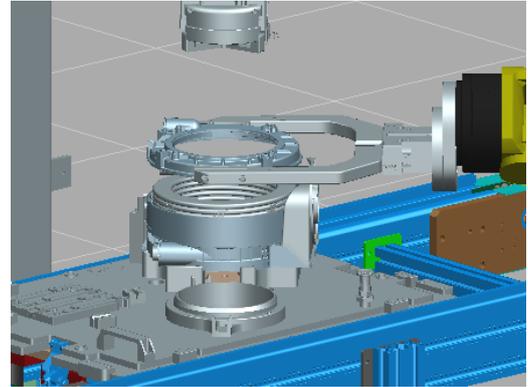


Figura 3.40 Posizionamento in asse

- 2) Si abbassa il carro motorizzato della macchina fino alla quota di inserimento del cuneo che servirà per alzare il terminale.

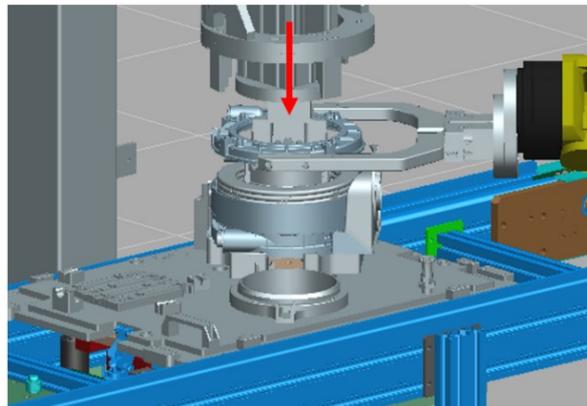


Figura 3.41 Abbassamento del carro motorizzato

- 3) Si aprono le griffe di centraggio (in arancione nella fig. 3.42) e il contrasto di bloccaggio (in verde nella fig. 3.42) che tengono fissa la serpentina; per motivi di visualizzazione nella figura 3.42 sono stati nascosti la serpentina e il coperchio.

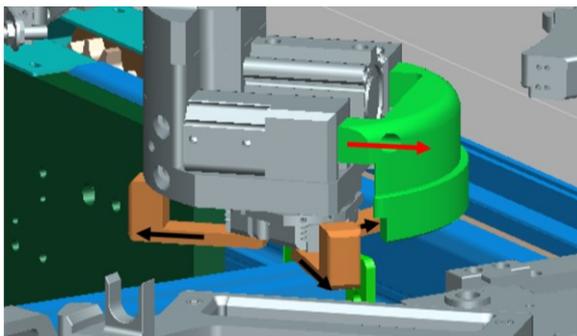


Figura 3.42 Sistema di bloccaggio e centraggio della serpentina

- 4) Si inserisce un'unghietta fra la penultima e l'ultima spira (fig. 3.43 (1)) e si alza il carro motorizzato (fig. 3.43 (2)); questo permette di sollevare il terminale per facilitare l'inserimento del coperchio.

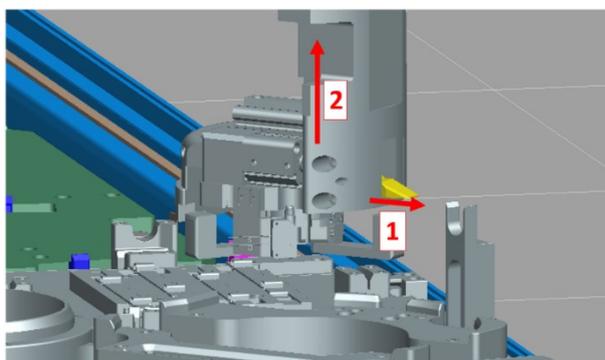


Figura 3.43 Apertura del cuneo (1) e sollevamento del carro motorizzato (2)

- 5) Il robot inserisce il coperchio; con un'opportuna rotazione il coperchio viene inserito in modo tale da non avere nessun'interferenza.

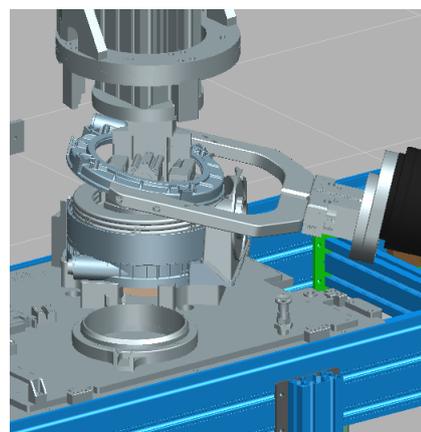
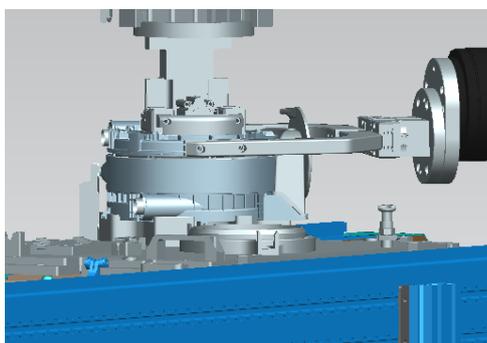


Figura 3.44 Coperchio inserito (a sinistra) e dettaglio della rotazione compiuta dal coperchio per l'inserimento (a destra)

- 6) Si rimuove il cuneo inserito nella fase 4.
- 7) Si rimuove il contrasto di bloccaggio inserito in fase 3.
- 8) Si abbassa il gruppo pneumatico fino ad arrivare a 5 mm dal coperchio, prima che il robot rilasci il coperchio.

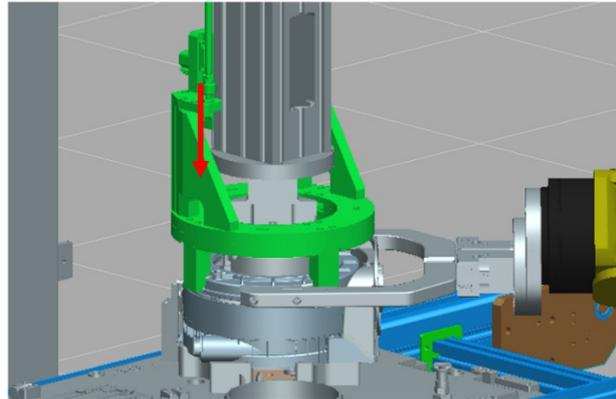


Figura 3.45 Abbassamento del gruppo pneumatico

- 9) Si apre la pinza che regge il coperchio che quindi viene rilasciato.
- 10) Avanza la spina che blocca il gruppo pneumatico al carro motorizzato, così il gruppo pneumatico si abbassa con il carro motorizzato. Questo permette un migliore serraggio del coperchio.

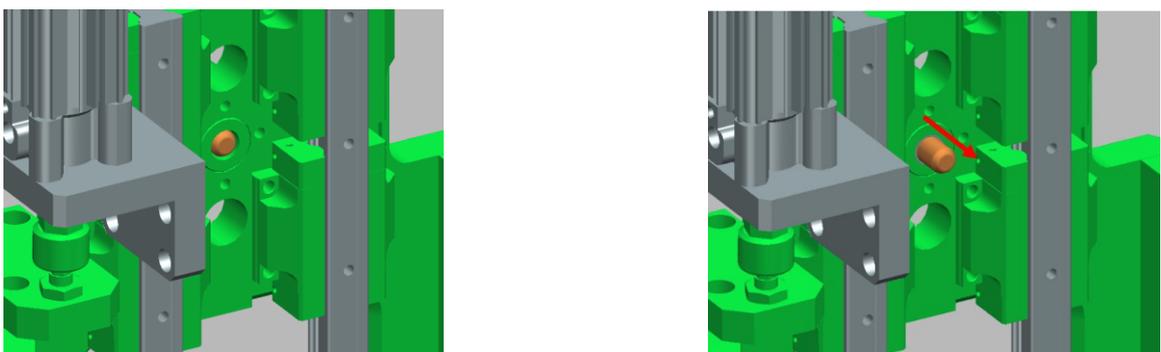


Figura 3.46 Spina in posizione di riposo (a sinistra) e spina avanzata (a destra)

- 11) Si abbassa il carro motorizzato (unito al gruppo pneumatico) che chiude il coperchio, ovvero assicura il contatto.

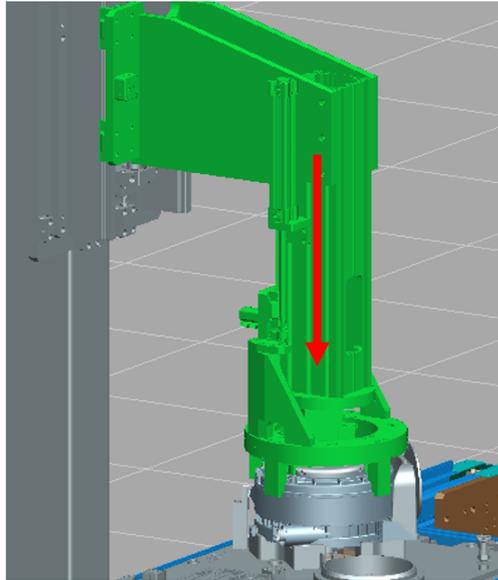


Figura 3.47 Abbassamento del carro motorizzato

12) Si rimuovono le griffe di centraggio inserite in fase 3.

13) Si alza il carro motorizzato.

Le operazioni vengono svolte tutte in maniera automatizzata da un robot FANUC R-2000iC/165F con l'apposita pinza e da una macchina anch'essa creata appositamente per la linea. Si sono dunque modellare le cinematiche di:

- il robot;
- la pinza;
- la macchina.

3.2.1 Creazione della cinematica del robot

Nella seconda stazione il prelievo e il posizionamento del coperchio vengono svolti da un FANUC R-2000iC/165F (vedi fig. 3.48).

Il FANUC R-2000iC/165F è un robot a 6 assi, con capacità di carico al polso di 165 kg e con uno sbraccio di 2655 mm.

Per creare la cinematica del robot si è seguita la procedura vista nel capitolo 3.1.3: si sono creati i gruppi, si sono creati i giunti e si sono definite le eventuali dipendenze fra i giunti. In questo caso si sono definiti anche i limiti superiori e

inferiori di rotazione dei giunti in base ai dati riportati sul catalogo del costruttore (tabella 3.1) e in base allo spazio di lavoro (fig. 3.49). Inoltre, basandosi sempre sui dati forniti dal costruttore si sono imposte le velocità massime ammissibili (tabella 3.2). La catena cinematica completa del robot è riportata nella figura 3.50.



Figura 3.48 FANUC R-2000iC/165F

Range di movimento [°]	
J1	360
J2	225
J3	440
J4	720
J5	250
J6	720

Tabella 3.1 Range di movimento [°] del FANUC R-2000iC/165F (da catalogo)

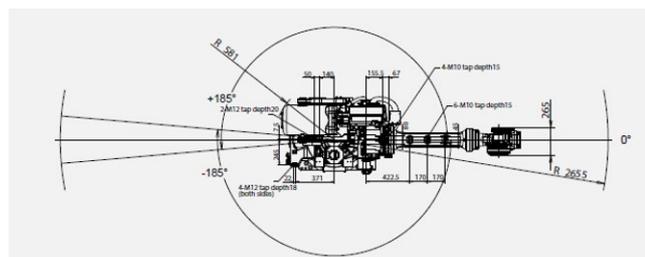


Figura 3.49 (a) Spazio di lavoro del FANUC R-2000iC/165F (da catalogo)

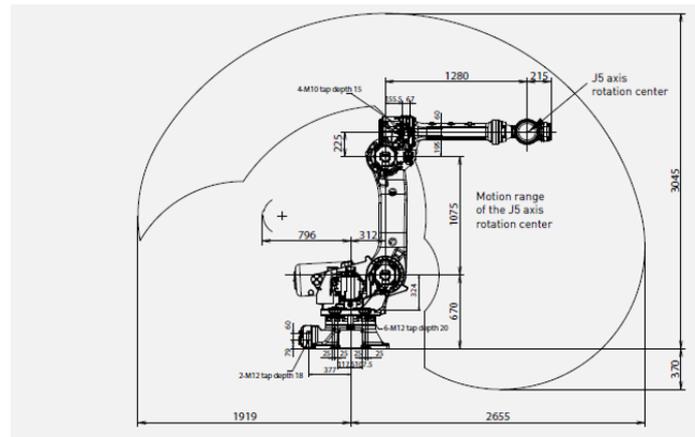


Figura 3.49 (b) Spazio di lavoro del FANUC R-2000iC/165F (da catalogo)

Massima velocità [$^{\circ}/s$]	
J1	175
J2	175
J3	175
J4	250
J5	250
J6	355

Tabella 3.2 Massima velocità [$^{\circ}/s$] per ogni giunto del FANUC R-2000iC/165F (da catalogo)

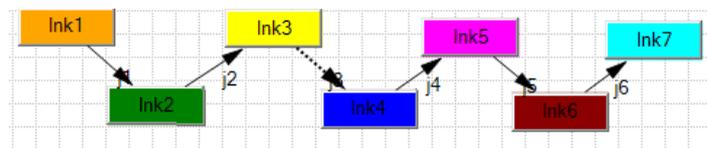


Figura 3.50 Cinematica del FANUC R-2000iC/165F

3.2.2 Creazione della cinematica della pinza

Per creare la cinematica della pinza si sono definiti tre gruppi: la parte fissa che si collega al robot e le due griffe. Sono stati poi creati dei giunti prismatici e si è definita la dipendenza del giunto j1 al giunto j2; in questo modo si ha un solo giunto da comandare (il giunto j1) per muovere entrambi i giunti.

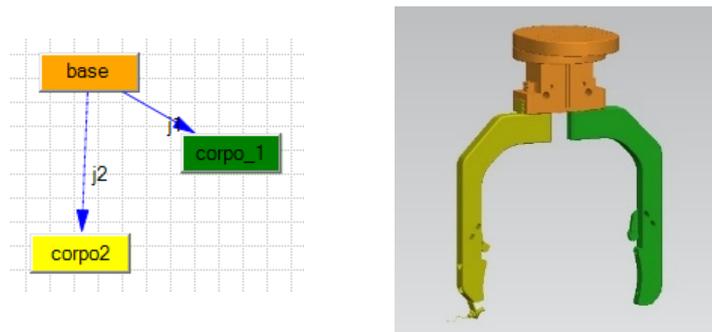


Figura 3.51 Cinematica della pinza (a sinistra) e gruppi cinematici (a destra)

In seguito, sono state definite le pose di open e close necessarie per definire il tool come pinza (gripper). Infine, si è definito il tool come gripper definendo il TCP frame, la terna base (base frame) e le gripping entities (fig. 3.52).

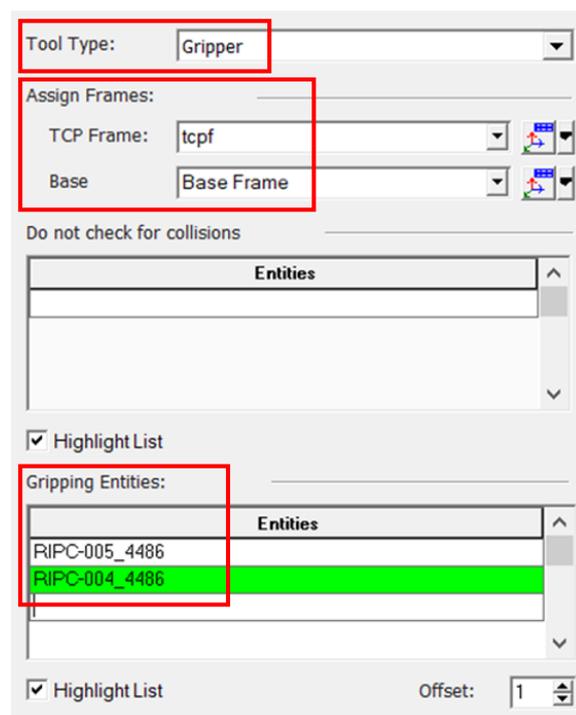


Figura 3.52 Interfaccia di definizione del tool

3.2.3 Creazione della cinematica della macchina

Per creare la cinematica della macchina sono stati creati i gruppi e i giunti che collegano i vari gruppi tra di loro.

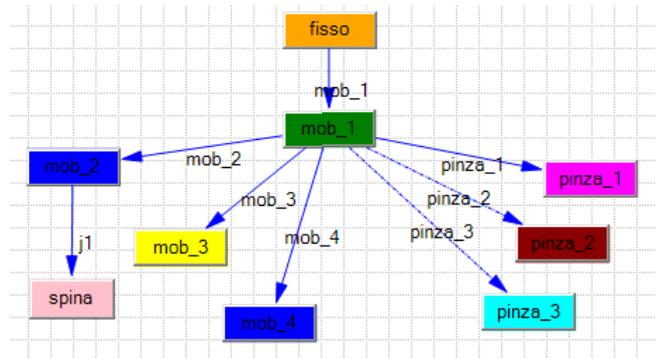


Figura 3.53 Cinematica della macchina realizzata con il “kinematics editor”

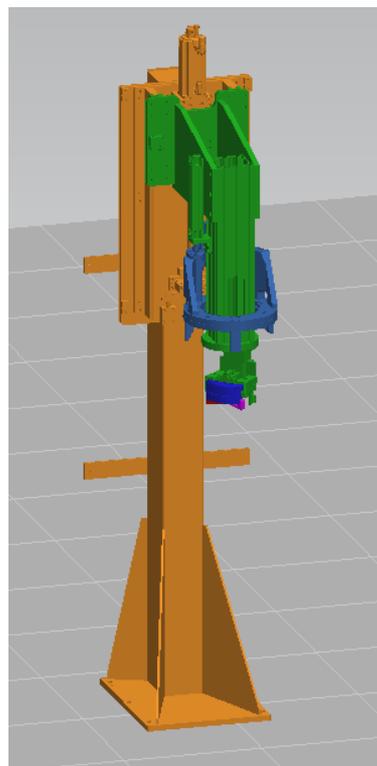


Figura 3.54 Macchina con evidenziati in diversi colori i vari gruppi cinematici

3.2.4 Creazione delle operazioni

Una volta create le cinematiche si è passati alla creazione delle operazioni.

Come prima cosa si è montata la pinza al robot con “mount tool” definendo le terne di montaggio del tool e del robot.

Per creare l’operazione eseguita dal robot in un primo momento è stata creata un’operazione di pick and place; quindi, sono state definite solo le posizioni di presa e di rilascio del coperchio, poi invece, con “add location before”, “add location after”

e “generic robot operation” si sono aggiunte le varie posizioni intermedie (via positions).

Per creare l’operazione eseguita dalla macchina si sono definite le varie posizioni che la macchina deve assumere (le “poses”) poi con “new device operation” si sono create delle operazioni che vanno da una posizione all’altra. Infine, dal sequence editor si sono sequenziate queste pose. Di seguito (figura 3.55) è riportato il diagramma di Gantt di tutte le operazioni eseguite in questa stazione.

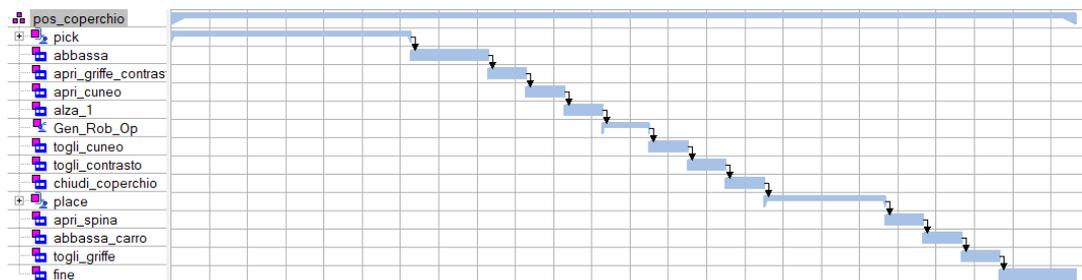


Figura 3.55 Diagramma di Gantt

3.3 Stazione per la chiusura con le clamp

Nella terza stazione lo scambiatore viene chiuso con delle clamp.



Figura 3.56 Terza stazione di ancoraggio del coperchio tramite griffe di tenuta

Un robot preleva le clamp dal pallet, le posiziona nella relativa posizione e un'apposita macchina chiude le clamp di serraggio. Si possono distinguere le seguenti fasi:

- 1) Per garantire la concentricità fra la serpentina e il coperchio, la macchina è andata a lavorare nella zona indicata nella fig. 3.57. Nella figura 3.58, invece, è riportata la sequenza di operazioni che la macchina deve eseguire.

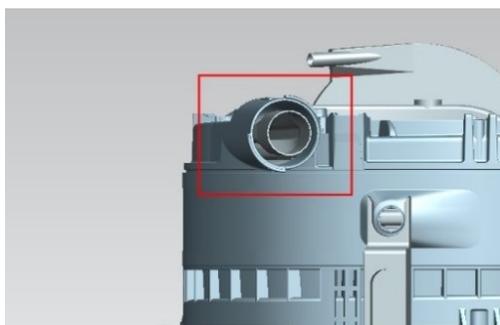


Figura 3.57 Zona di lavoro

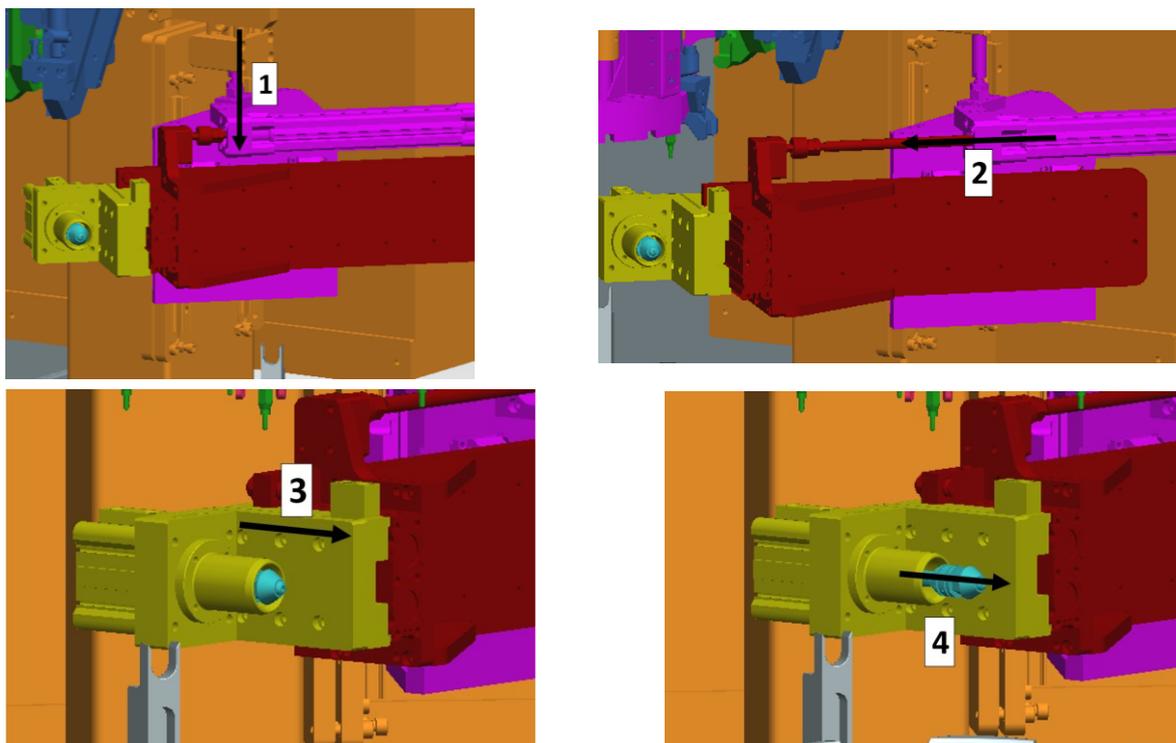


Figura 3.58 Sequenza di operazioni che la macchina esegue per garantire la concentricità fra la serpentina e il coperchio. Le operazioni vengono eseguite da 1 a 4, poi vengono rieseguite al contrario per tornare nella posizione di “home”

- 2) Si abbassa il gruppo centrale che, una volta che il robot posiziona le clamp nelle apposite posizioni, permetterà di bloccare le clamp insieme ai gruppetti pneumatici del nastro trasportatore; questo consentirà di mantenere bloccate le clamp per poterle poi deformare.

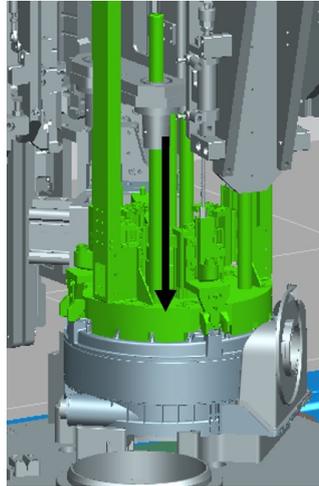


Figura 3.59 Abbassamento del gruppo centrale

- 3) Si alzano i quattro gruppetti pneumatici della macchina (in arancione nella figura 3.60).

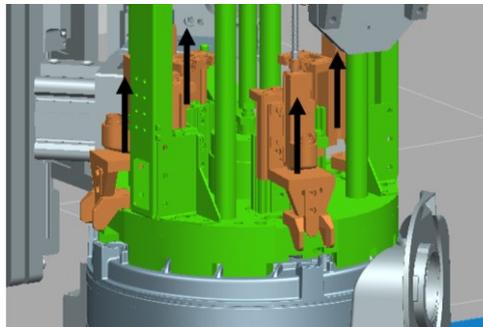


Figura 3.60 Movimento dei 4 gruppetti pneumatici (in arancione)

- 4) Il robot preleva le clamp una alla volta.

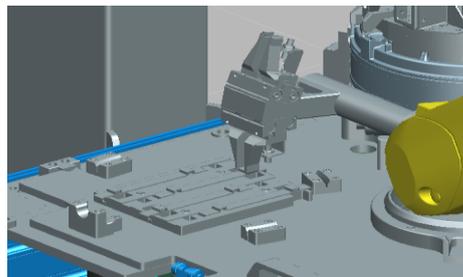


Figura 3.61 Pick della clamp

- 5) Il robot posiziona la clamp. La clamp viene posizionata con un movimento dal basso verso l'alto per non avere interferenze durante l'inserimento; contemporaneamente al place della clamp si alza il gruppo pneumatico del nastro trasportatore che serve a sorreggere la clamp.

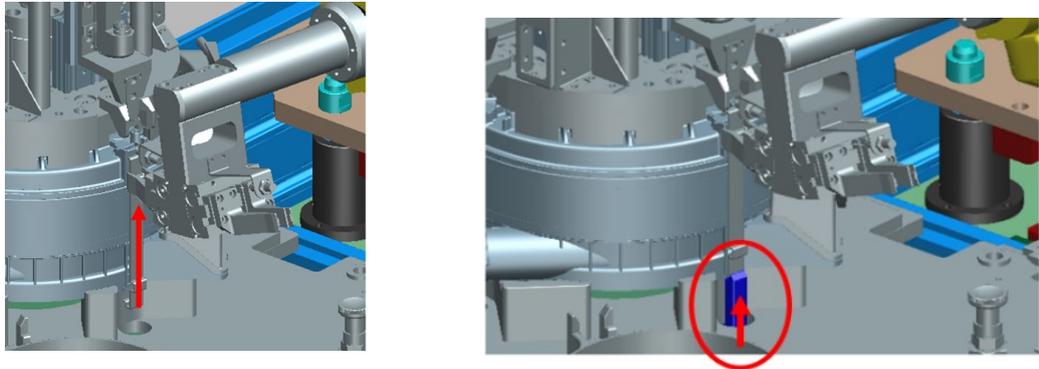


Figura 3.62 Movimento compiuto dal robot per inserire la clamp (a sinistra) e movimento compiuto dal gruppo pneumatico del nastro trasportatore (cerchiato a destra)

Le fasi 4 e 5 vengono ripetute quattro volte per posizionare tutte le clamp.

- 6) Si abbassano i quattro gruppi pneumatici della macchina che servono a tenere fissa la clamp.

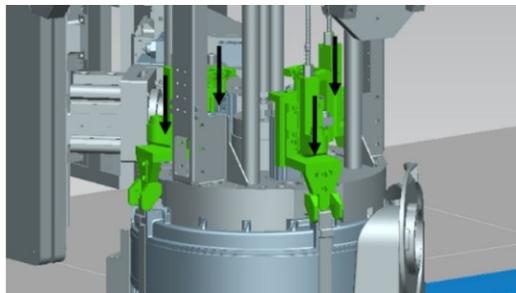


Figura 3.63 Movimento dei 4 gruppi pneumatici

- 7) Si abbassa il carro motorizzato con i punzoni inizialmente aperti al livello della deformazione in basso (fig. 3.64).

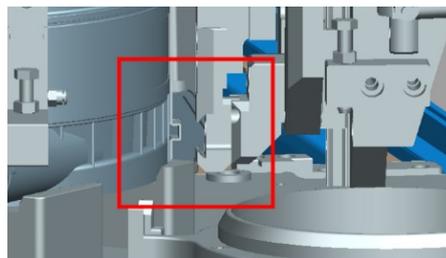


Figura 3.64 Dettaglio della posizione di arrivo dei punzoni

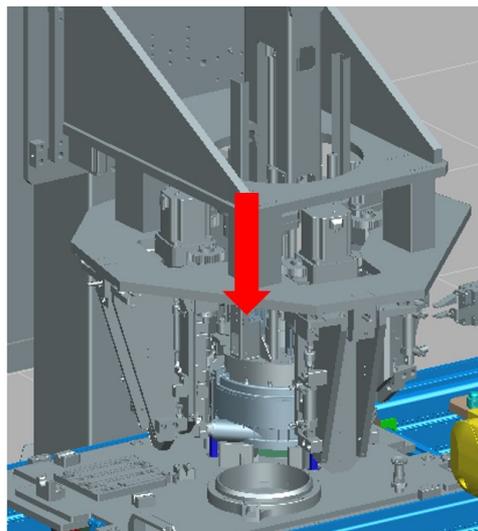


Figura 3.65 Abbassamento del carro motorizzato

- 8) I punzoni si avvicinano alla clamp (1), si chiudono deformando la clamp (2), si riaprono (3) e si riallontanano (4).

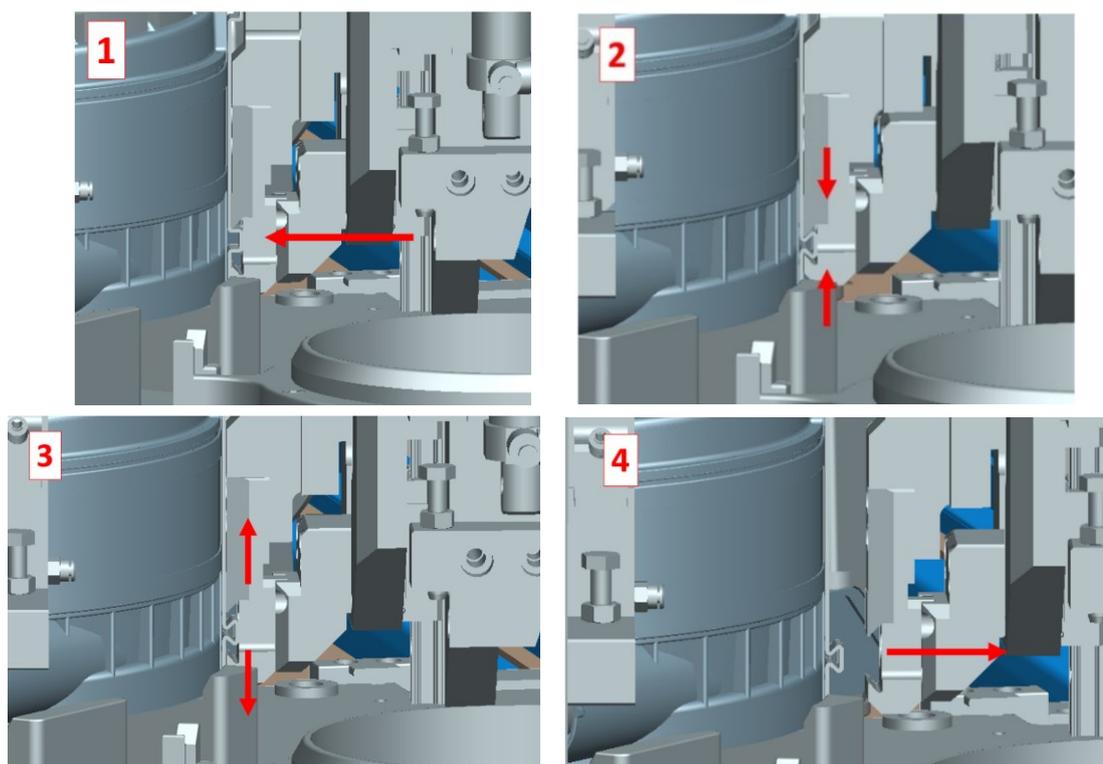


Figura 3.66 Sequenza di deformazione della clamp

9) Il carro motorizzato sale alla quota della seconda deformazione.

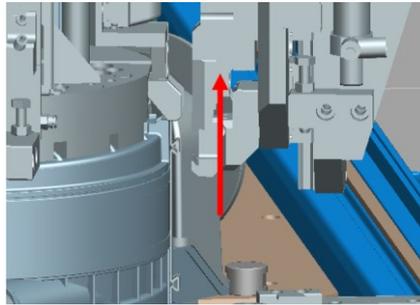


Figura 3.67 Movimento del carro motorizzato nella fase 9

10) La clamp viene deformata seguendo gli stessi step della fase 8 e ritorna alla sua posizione iniziale.

11) Si abbassano i gruppi pneumatici del nastro trasportatore che sorreggevano la clamp dal basso.

12) Sale la struttura interna che si era abbassata nella fase 2.

Si ottiene quindi lo scambiatore chiuso con le clamp (figura 3.68).

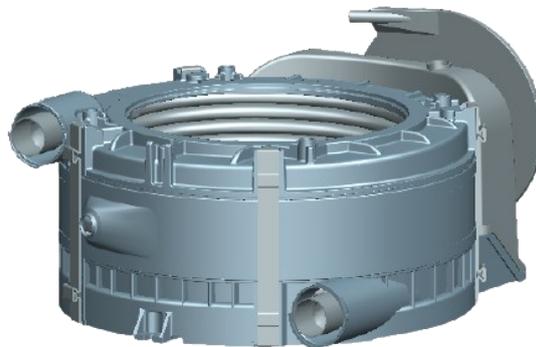


Figura 3.68 Scambiatore di calore

Le operazioni vengono svolte tutte in maniera automatizzata da un robot FANUC M-20iA/35M con l'apposita pinza a doppia presa e da una macchina creata appositamente per la chiusura della clamp. Si sono dunque modellare le cinematiche di:

- il robot;
- la pinza;
- la macchina.

3.3.1 Creazione della cinematica del robot

Il prelievo e il posizionamento delle clamp vengono svolti da un FANUC M-20iA/35M (fig.3.69).



Figura 3.69 FANUC M-20iA/35M

Il FANUC M-20iA/35M è un robot a 6 assi controllati, con capacità di carico al polso di 35 kg e con uno sbraccio di 1813 mm.

Per creare la cinematica del robot si è seguita la procedura vista nel capitolo 3.1.3: si sono creati i gruppi, si sono creati i giunti e si sono definite le eventuali dipendenze fra i giunti. In questo caso si sono definiti anche i limiti superiori e inferiori di rotazione dei giunti in base allo spazio di lavoro (fig. 3.70) e in base ai dati riportati sul catalogo del costruttore (tabella 3.3). Inoltre, basandosi sempre sui dati forniti dal costruttore si sono imposte le velocità massime ammissibili (tabella 3.4). La catena cinematica completa del robot è riportata nella figura 3.71.

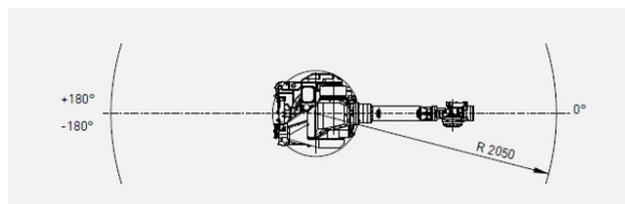


Figura 3.70 (a) Spazio di lavoro del FANUC M-20iA/35M (da catalogo)

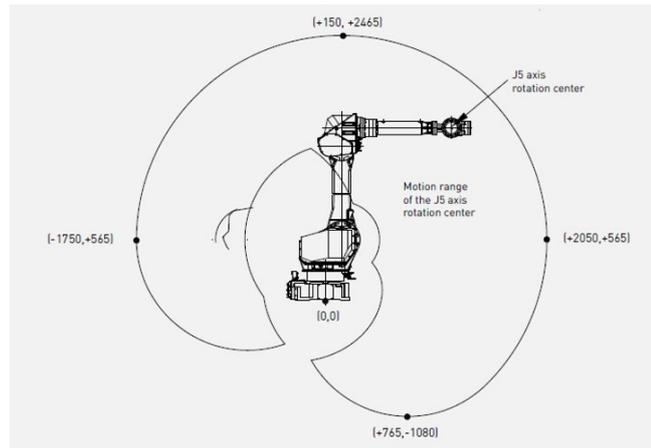


Figura 3.70 (b) Spazio di lavoro del FANUC M-20iA/35M (da catalogo)

Range di movimento [°]	
J1	370
J2	260
J3	461
J4	400
J5	280
J6	900

Tabella 3.3 Range di movimento [°] del FANUC M-20iA/35M (da catalogo)

Massima velocità [°/s]	
J1	180
J2	180
J3	200
J4	350
J5	350
J6	400

Tabella 3.4 Massima velocità [°/s] per ogni giunto del FANUC M-20iA/35M (da catalogo)

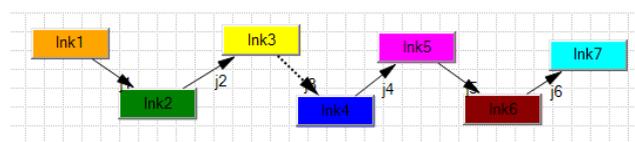


Figura 3.71 Cinematica del FANUC M-20iA/35M

3.3.2 Creazione della cinematica della pinza

Per creare la cinematica si sono definiti cinque gruppi: la parte fissa che si collega al robot e le quattro griffe (due per il pick and place da un lato e due dall'altro lato). Sono stati poi creati dei giunti prismatici e si è definita la dipendenza del giunto mob_1 al giunto mob_1_2 e del mob_2 al giunto mob_2_2; in questo modo si hanno solo due giunti da comandare (il giunto mob_1 e il giunto mob_2) per muovere entrambi i giunti.

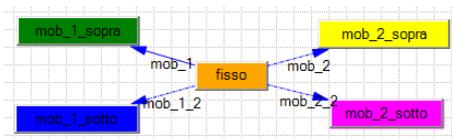


Figura 3.72 Cinematica della pinza realizzata con il "kinematics erditor"

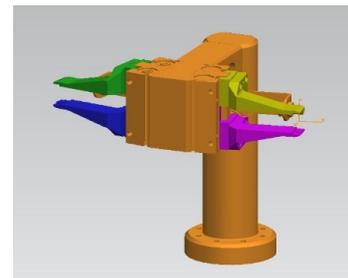


Figura 3.73 Gruppi cinematici della pinza

In seguito, sono state definite le pose di open e close necessarie per definire il tool come pinza (gripper). Infine, si è definito il tool come gripper definendo il TCP frame, la terna base (base frame) e le gripping entities (ovvero le griffe).

3.3.3 Creazione della cinematica della macchina

Per creare la cinematica della macchina sono stati creati i gruppi e i giunti che collegano i vari gruppi tra di loro (fig. 3.74).

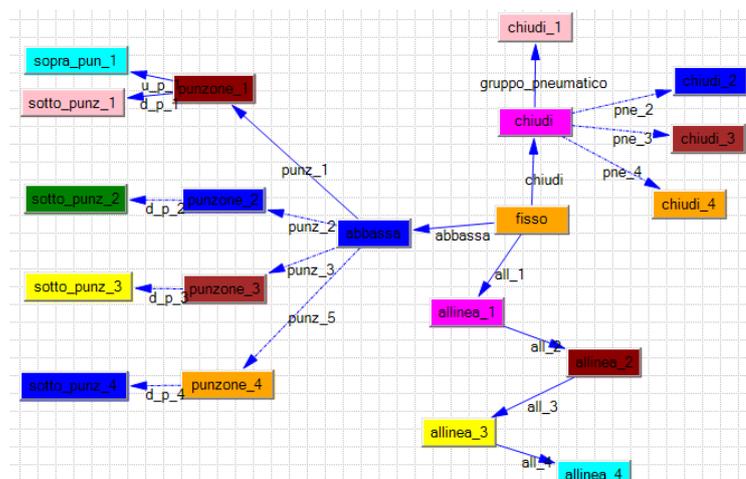


Figura 3.74 Cinematica della macchina realizzata con il "kinematics editor"

Di seguito è riportata la macchina con evidenziati in diversi colori i gruppi cinematici.

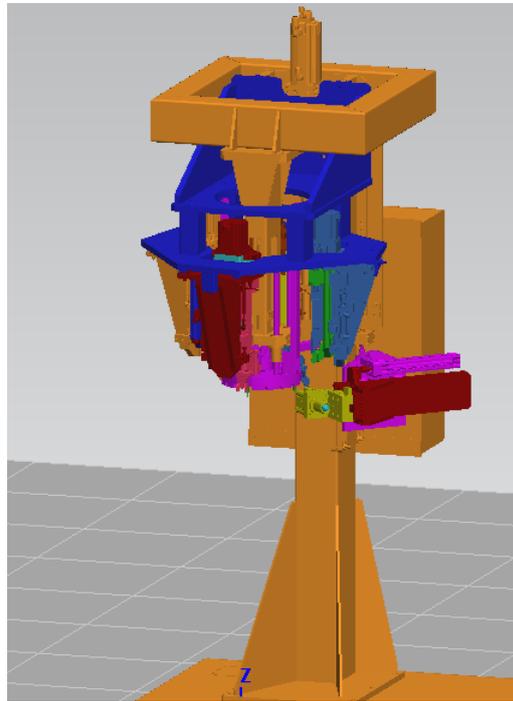


Figura 3.75 Macchina per la chiusura delle clamp con evidenziati i diversi gruppi cinematici

3.3.4 Creazione delle operazioni

Una volta create le cinematiche si è passati alla creazione delle operazioni. Come prima cosa si è montata la pinza al robot con “mount tool” definendo le terne di montaggio del tool e del robot.

Per creare le operazioni eseguite dal robot sono state create delle operazioni di pick and place delle clamp, definendo quindi la posizione di presa e rilascio della clamp, poi con “add location before”, “add location after” e “generic robot operation” si sono aggiunte le varie posizioni intermedie (via positions).

Durante la creazione delle operazioni di pick and place delle clamp è stata cruciale la scelta della posizione del robot, in quanto, a causa delle posizioni nelle quali vanno posizionate le clamp, si potevano avere delle interferenze con i vari oggetti dell’ambiente; nella figura 3.76 a sinistra si vede l’interferenza del robot con il pallet e nella figura 3.76 a destra si vede l’interferenza del robot con la macchina. Si è dunque dovuta trovare una posizione che non desse interferenze né con il pallet, né con la macchina (fig. 3.77).

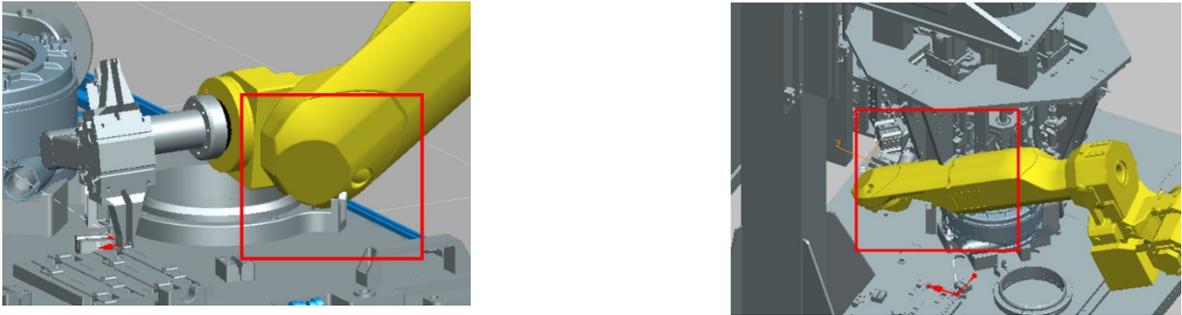


Figura 3.76 Interferenza con il pallet durante il prelievo della clamp (a sinistra) e interferenza con la macchina durante il posizionamento della clamp (a destra)

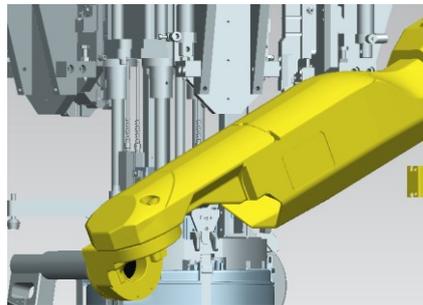


Figura 3.77 Distanza tra il robot e la macchina. La distanza tra la macchina e il robot rimane comunque molto piccola, ma è tale da non avere nessuna interferenza

Per creare l'operazione eseguita dalla macchina si sono definite le varie posizioni che la macchina deve assumere (le “poses”) poi con “new device operation” si sono create delle operazioni che vanno da una posizione all'altra. Infine, dal sequence editor si sono sequenziate queste pose e le operazioni eseguite dal robot.

Di seguito (figura 3.78) è riportato il diagramma di Gantt di tutte le operazioni eseguite in questa stazione.

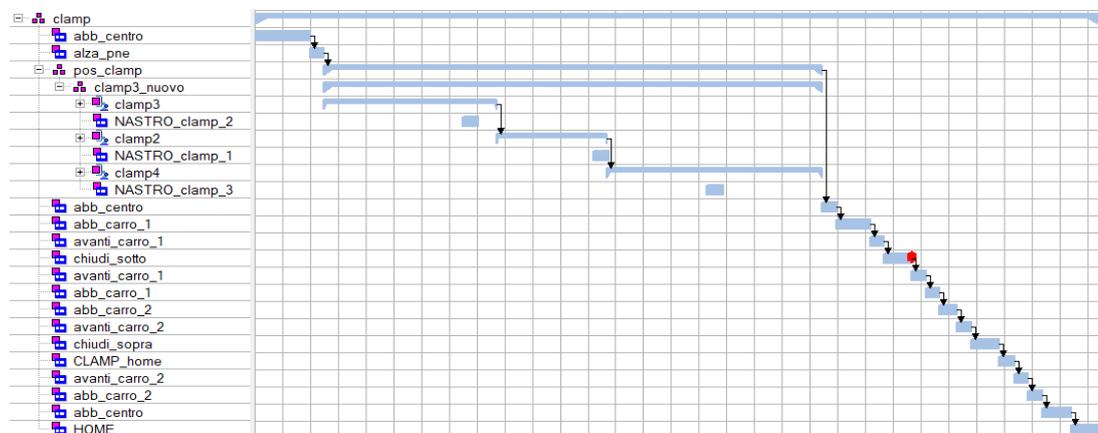


Figura 3.78 Diagramma di Gantt delle operazioni per il posizionamento e la chiusura delle clamp

3.4 Stazione per l'inserimento delle guarnizioni

Questa stazione è l'ultima della linea che si è andata a studiare; qua un'apposita macchina lubrifica internamente ed esternamente le guarnizioni che vengono poi prelevate da un robot e assemblate allo scambiatore.



Figura 3.79 Stazione di predisposizione delle guarnizioni e successivo assemblaggio sullo scambiatore

Si possono distinguere le seguenti fasi:

- 1) La guarnizione esce dalla macchina e avanza per essere lubrificata.

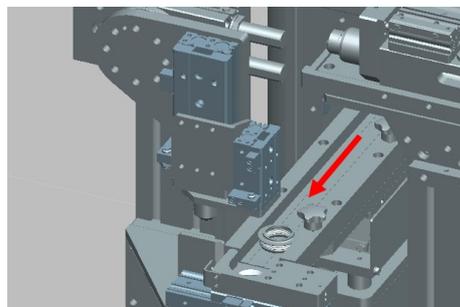


Figura 3.80 Movimento della guarnizione

- 2) La guarnizione viene spostata dall'attuatore scorrevole per poter essere poi prelevata.

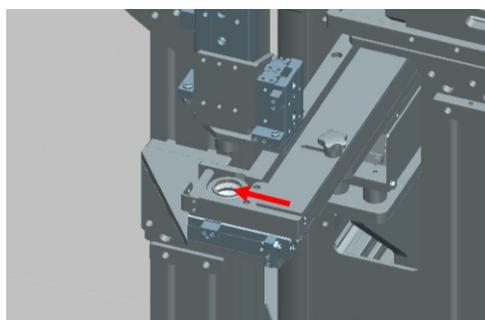


Figura 3.81 Spostamento della guarnizione

- 3) La guarnizione viene prelevata.

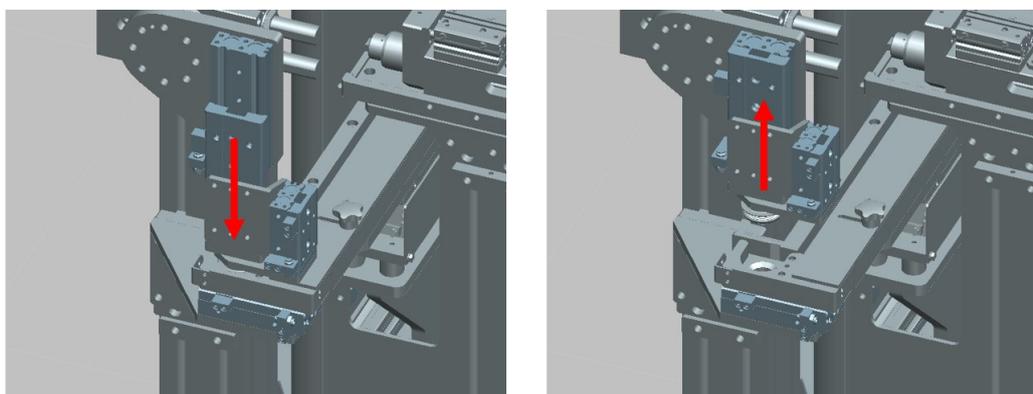


Figura 3.82 Prelievo della guarnizione

- 4) Ruota l'attuatore rotante collegato al gruppo che ha effettuato il prelievo della guarnizione.

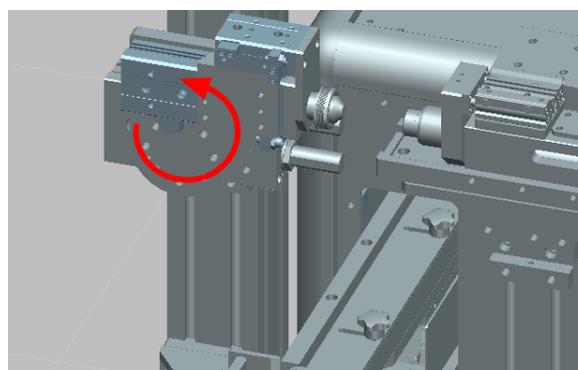


Figura 3.83 Rotazione del gruppo di prelievo della guarnizione

- 5) Scorre l'attuatore scorrevole che si mette in asse con il perno nel quale verrà posizionata la guarnizione per essere lubrificata (figura 3.84 - a sinistra), poi la guarnizione viene spinta sul perno (figura 3.84 - a destra).

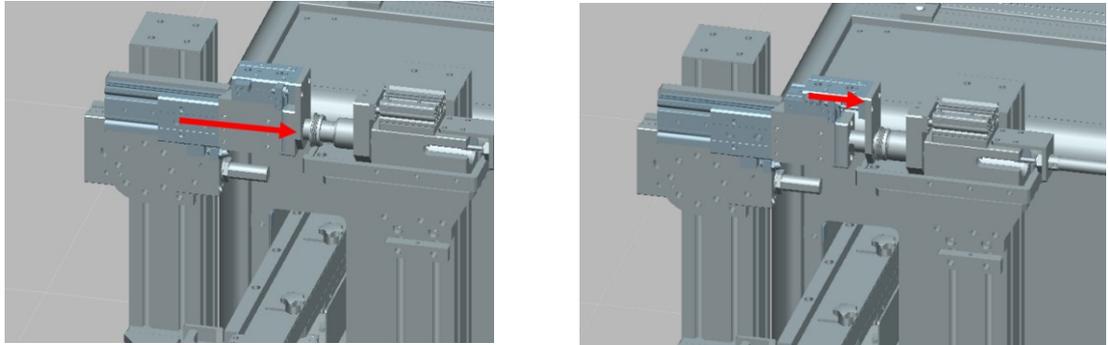


Figura 3.84 Traslazione degli attuatori – posizionamento in asse (a destra) e rilascio della guarnizione (a sinistra)

- 6) Avanza il gruppo lubrificante che lubrifica la guarnizione dall'esterno; l'interno viene lubrificato dal perno su cui era stata posizionata la guarnizione.

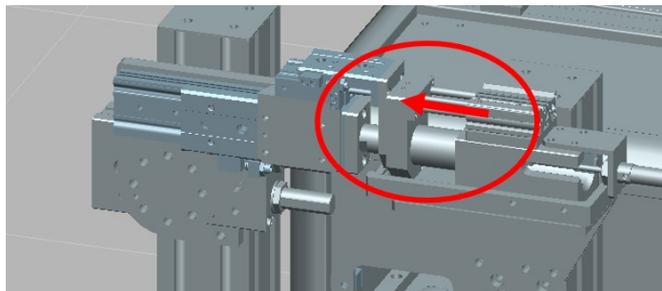


Figura 3.85 Movimento del gruppo lubrificante

- 7) Il gruppo di prelievo torna alla posizione di partenza per prelevare la seconda guarnizione e per lasciare al robot lo spazio necessario per la presa della prossima guarnizione.

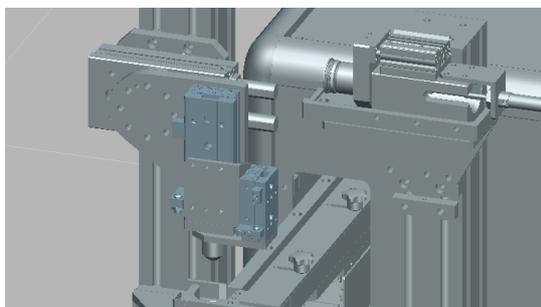


Figura 3.86 Posizione di home

- 8) Il robot preleva la guarnizione. Il perno dell'utensile collegato al robot avanza spostando indietro il perno su cui era posizionata la guarnizione; quest'ultima, di conseguenza, si sposta sul perno del tool.

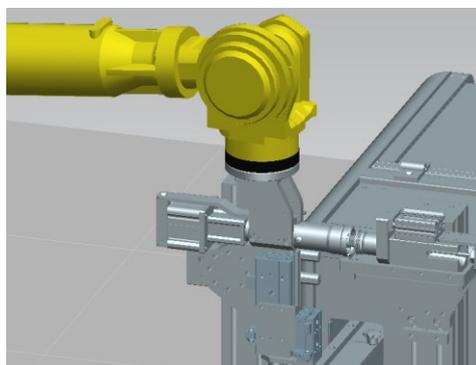


Figura 3.87 Prelievo della guarnizione

- 9) Il robot assembla la guarnizione allo scambiatore. Per il posizionamento compie un movimento di rotazione (fig. 3.88 – a sinistra), quando raggiunge la posizione finale (fig. 3.88 – a destra) il perno dell'utensile avanza e rilascia la guarnizione.

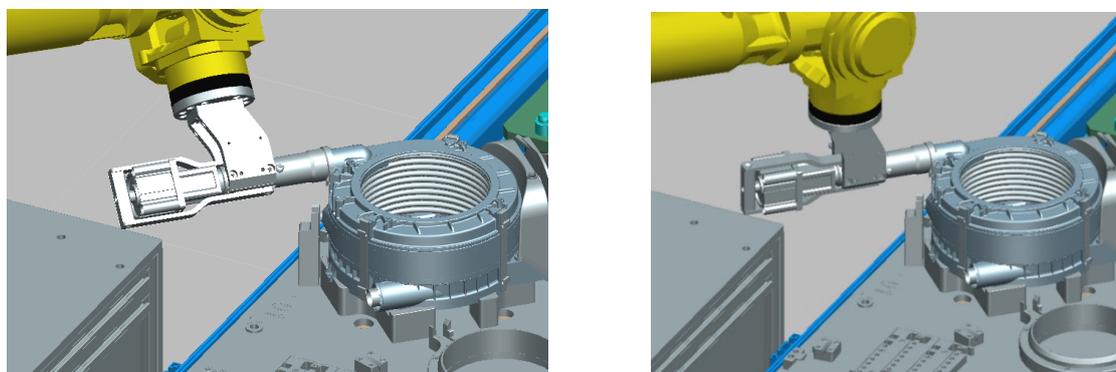


Figura 3.88 Assemblaggio della guarnizione allo scambiatore

- 10) La macchina preleva e lubrifica la seconda guarnizione ripetendo le fasi dalla 1 alla 7.
- 11) Il robot posiziona la seconda guarnizione in maniera analoga a come fatto per la prima.

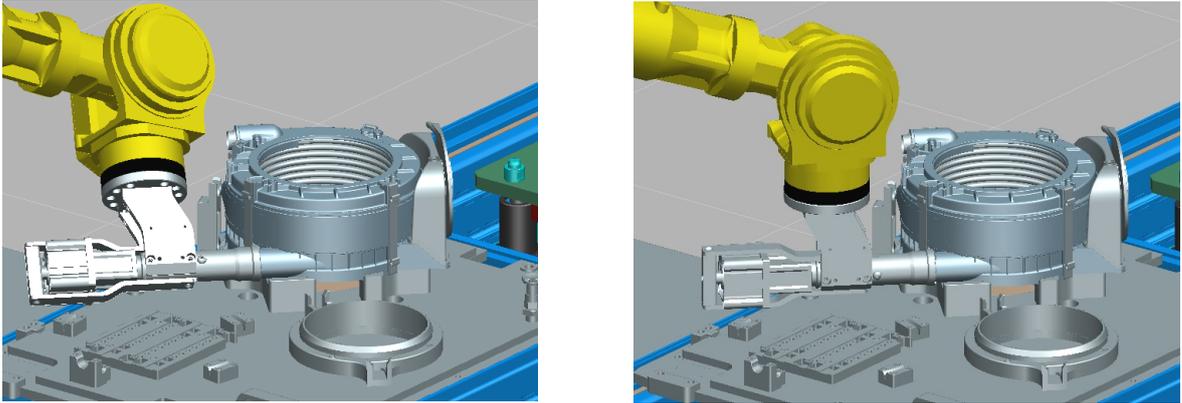


Figura 3.89 Assemblaggio della seconda guarnizione allo scambiatore di calore

12) Il robot torna nella posizione di home.

Si ottiene quindi lo scambiatore di calore completamente assemblato (figura 3.90).

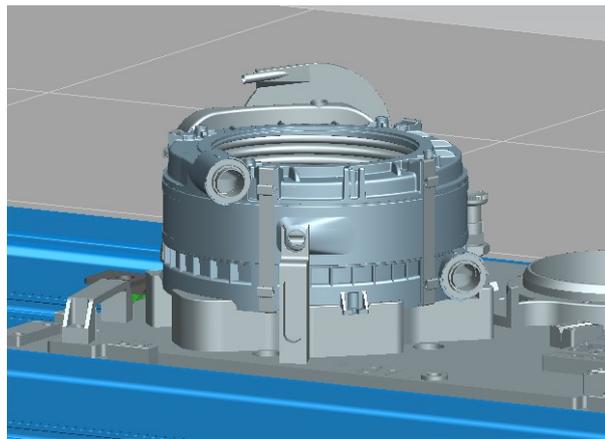


Figura 3.90 Scambiatore di calore completamente assemblato

Le operazioni vengono svolte tutte in maniera automatizzata da un robot FANUC M-710iC/50 con l'apposito utensile e da una macchina creata appositamente per la lubrificazione delle guarnizioni. Si sono dunque modellare le cinematiche di:

- il robot;
- l'utensile;
- la macchina.

3.4.1 Creazione della cinematica del robot

Il prelievo e l'assemblaggio delle guarnizioni allo scambiatore vengono svolti da un FANUC M-710iC/50 (fig. 3.91).



Figura 3.91 FANUC M-710iC/50

Il FANUC M-710iC/50 è un robot a 6 assi controllati, con capacità di carico al polso di 50 kg e con uno sbraccio di 2050 mm.

Per creare la cinematica del robot si è seguita la procedura vista nel capitolo 3.1.3: si sono creati i gruppi, si sono creati i giunti e si sono definite le eventuali dipendenze fra i giunti. In questo caso si sono definiti anche i limiti superiori e inferiori di rotazione dei giunti in base allo spazio di lavoro (fig. 3.92) e in base ai dati riportati sul catalogo del costruttore (tabella 3.5). Inoltre, basandosi sempre sui dati forniti dal costruttore si sono imposte le velocità massime ammissibili (tabella 3.6). La catena cinematica completa del robot è riportata nella figura 3.93.

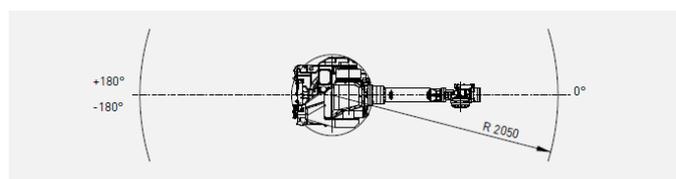


Figura 3.92 (a) Spazio di lavoro del FANUC M-710iC/50 (da catalogo)

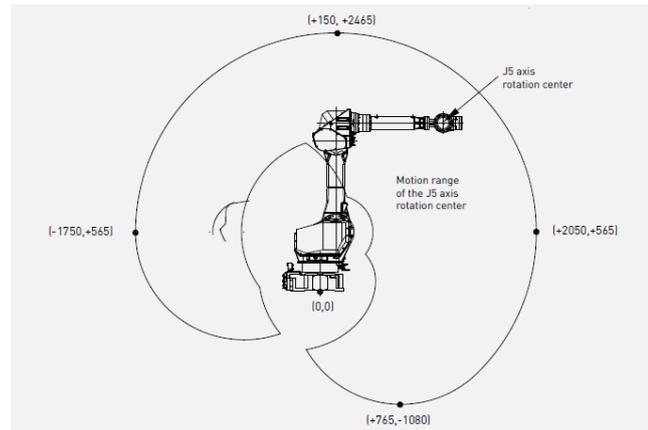


Figura 3.92 (b) Spazio di lavoro del FANUC M-710iC/50 (da catalogo)

Range di movimento [°]	
J1	360
J2	225
J3	440
J4	720
J5	250
J6	720

Tabella 3.5 Range di movimento [°] FANUC M-710iC/50 (da catalogo)

Massima velocità [°/s]	
J1	175
J2	175
J3	175
J4	250
J5	250
J6	355

Tabella 3.6 Massima velocità [°/s] per ogni giunto del FANUC M-710iC/50 (da catalogo)

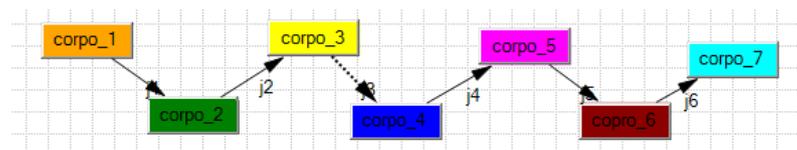


Figura 3.93 Cinematica del FANUC M-710iC/50

3.4.2 Creazione della cinematica dell'utensile

Per creare la cinematica si sono definiti i due gruppi: quello fisso che si collega al robot e quello mobile, ovvero il perno che preleva la guarnizione. È poi stato creato un giunto prismatico fra il corpo fisso e quello mobile. Infine, si è definito il tool come *gun* definendo il TCP frame e la terna base (base frame).

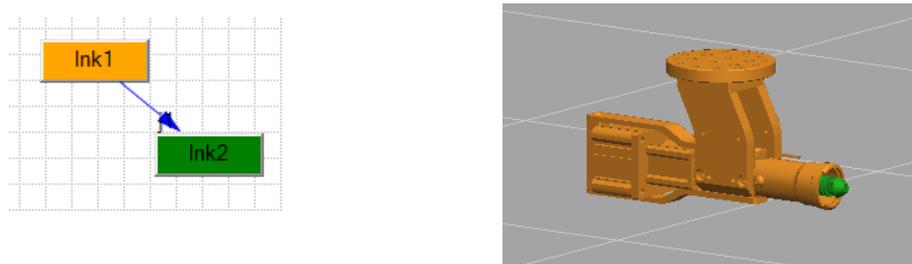


Figura 3.94 Cinematica dell'utensile realizzata con il "kinematics editor" (a sinistra) e gruppi cinematici (a destra)

3.4.3 Creazione della cinematica della macchina

Per creare la cinematica della macchina sono stati creati i gruppi e i giunti che collegano i vari gruppi tra di loro (fig. 3.95).

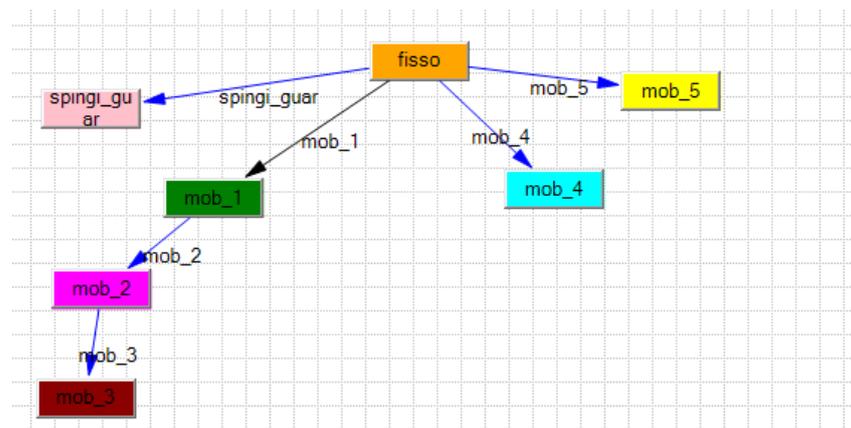


Figura 3.95 Cinematica della macchina realizzata con il "kinematics editor"

Di seguito è riportata la macchina con evidenziati in diversi colori i gruppi cinematici.

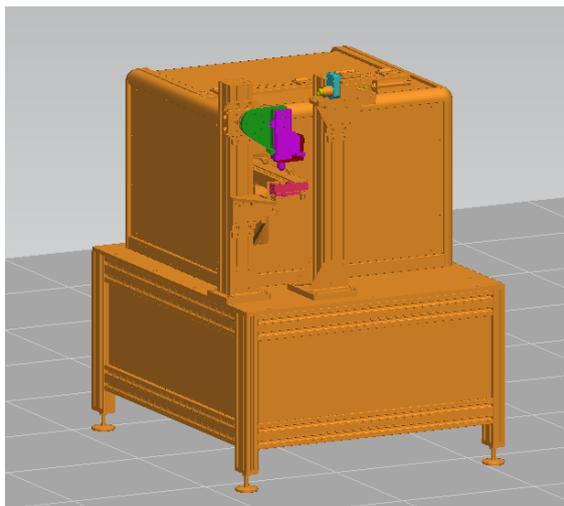


Figura 3.96 Macchina per la lubrificazione delle guarnizioni con evidenziati i diversi gruppi cinematici

3.4.3 Creazione delle operazioni

Una volta create le cinematiche si è passati alla creazione delle operazioni.

Come prima cosa si è montato l'utensile al robot con "mount tool" definendo le terne di montaggio del tool e del robot.

Per creare le operazioni eseguite dal robot sono state create delle "generic robot operation" per la definizione delle posizioni di presa e rilascio delle guarnizioni e delle "device operation" per la presa e il rilascio della guarnizione. Poi con "add location before", "add location after" e "generic robot operation" si sono aggiunte le varie posizioni intermedie (via positions).

Per creare l'operazione eseguita dalla macchina si sono definite le varie posizioni che la macchina deve assumere (le "poses") poi con "new device operation" si sono create delle operazioni che vanno da una posizione all'altra. Infine, dal sequence editor si sono sequenziate queste pose e le operazioni eseguite dal robot.

Di seguito (figura 3.97) è riportato il diagramma di Gantt di tutte le operazioni eseguite in questa stazione.

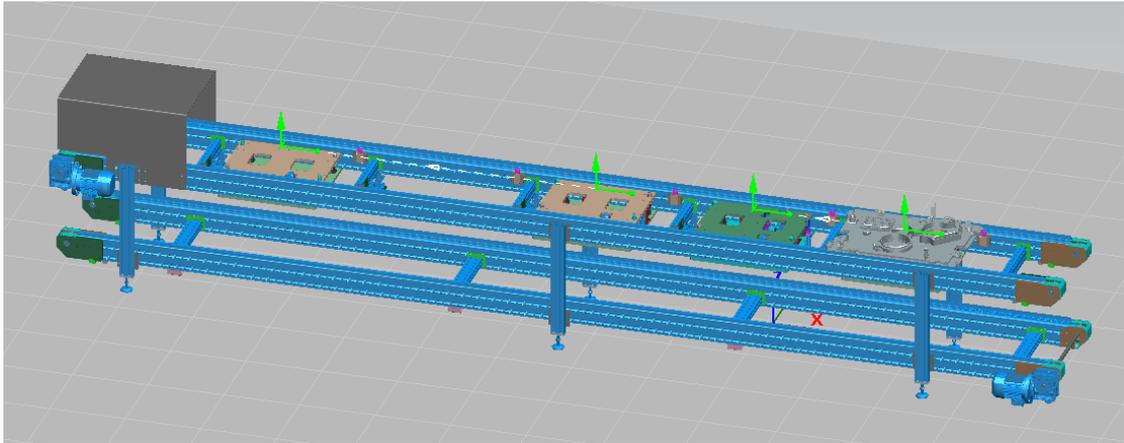


Figura 3.98 Nastro trasportatore con evidenziato il percorso seguito dal pallet e le posizioni di partenza e di arrivo

Per il movimento del gruppo pneumatico reggi clamp è stato, invece, necessario creare la cinematica; sono stati creati cinque gruppi: uno è il gruppo fisso del nastro trasportatore, gli altri quattro sono i gruppi pneumatici.

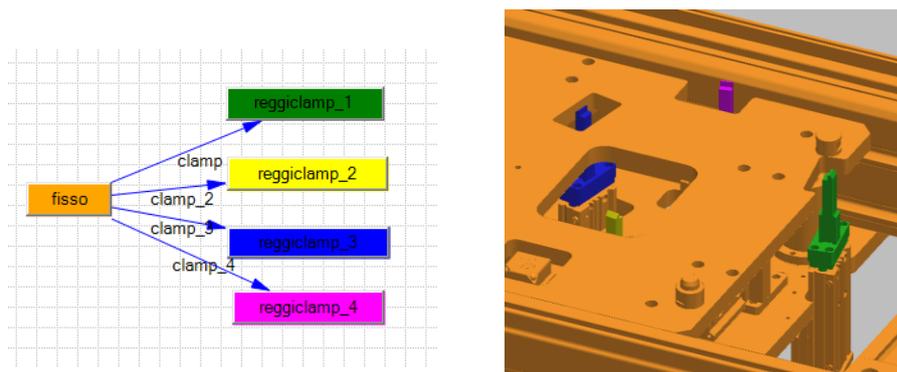


Figura 3.99 Cinematica del nastro trasportatore realizzata con il “kinematics editor” (a sinistra) e gruppi cinematici (a destra)

3.6 Analisi della linea

Una volta implementata la linea su Tecnomatix si hanno tutti gli strumenti necessari per lo studio del tempo ciclo.

Dall’osservazione del diagramma di Gantt dell’intero processo (fig. 3.100) risulta evidente come la stazione “collo di bottiglia” sia l’ultima stazione, ovvero la stazione per il posizionamento delle guarnizioni. Sarà dunque necessario focalizzarsi su questa

stazione per l'ottimizzazione del tempo ciclo. Una probabile prima soluzione per la riduzione dei tempi sarebbe quella di eseguire quanto più possibile le azioni in parallelo; quando il robot posiziona la guarnizione la macchina potrebbe lubrificare la guarnizione successiva. Ottimizzando il processo, quindi questa stazione potrebbe diventare più veloce della prima stazione (seconda in termini di tempo ciclo), dunque il “collo di bottiglia” diventerebbe la prima stazione. Ipotizzando quindi di avere uno scenario di questo tipo nei prossimi capitoli verrà valutata una variante automatizzata tramite robot collaborativo di tale stazione.

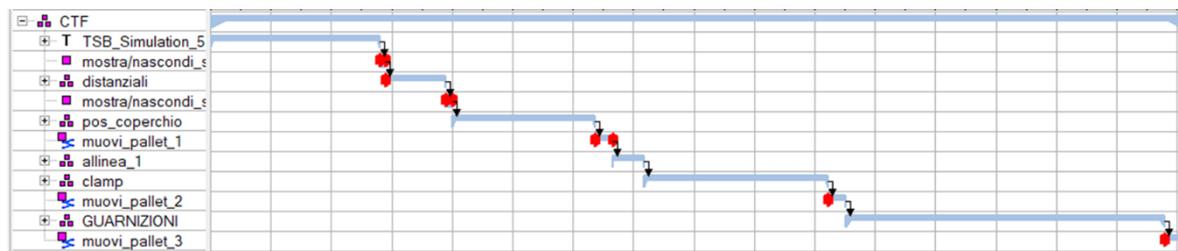


Figura 3.100 Diagramma di Gantt dell'intero processo

Capitolo 4

Variante della linea

La linea descritta e analizzata nel capitolo 3 è quella che CTF Automazioni ha realizzato per la Valmex. Di seguito si illustrerà una possibile variante della linea nella quale il posizionamento dei distanziali nella macchina viene effettuato da un robot collaborativo (fig. 4.1).

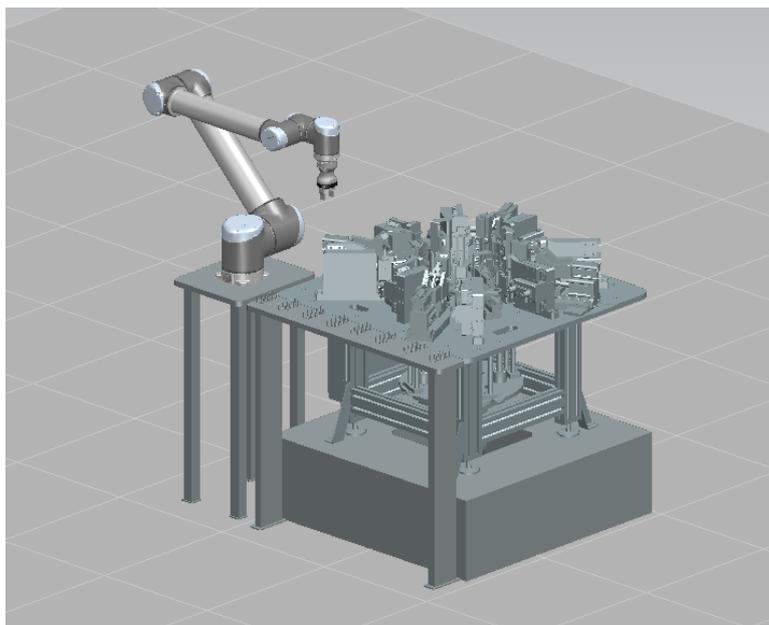


Figura 4.1 La prima stazione con il robot collaborativo

Questa variante della linea era stata inizialmente considerata dall'azienda, ma mai approfondita. In questo capitolo verranno descritti il robot e la pinza e nei capitoli 5 e 6, la stazione verrà studiata in maniera più approfondita in modo tale da valutare la convenienza della soluzione completamente automatizzata rispetto a quella manuale nella quale i distanziali vengono posizionati dall'operatore.

4.1 Il robot collaborativo

Il robot collaborativo utilizzato è un UR10e dell'Universal Robots (fig. 4.2). L'UR10e è un robot a 6 assi, con capacità massima di carico al polso di 10 kg e con una massima estensione del braccio di 1300 mm .



Figura 4.2 Robot UR10e dell'Universal Robots

Per creare la cinematica del robot si è seguita la procedura vista nel capitolo 3.1.3: si sono creati i gruppi, si sono creati i giunti e si sono definite le eventuali dipendenze fra i giunti. I limiti di rotazione dei giunti, come da catalogo sono stati posti pari a $\pm 360^\circ$ per tutti i giunti. Inoltre, basandosi sempre sui dati forniti dal produttore si sono imposte le velocità massime ammissibili (tabella 4.1).

<i>Giunto</i>	<i>Velocità massima [°/s]</i>
Base	120
Shoulder	120
Elbow	180
Wrist 1	180
Wrist 2	180
Wrist3	180

Tabella 4.1 Massima velocità [°/s] per ogni giunto dell'UR10e (da catalogo)

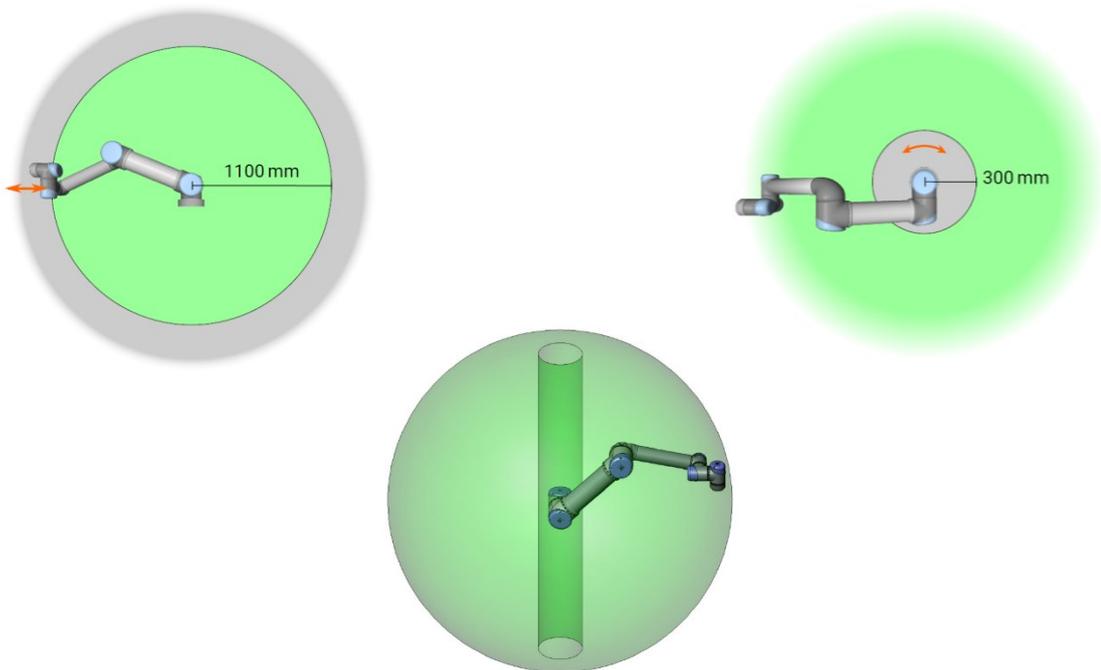


Figura 4.3 Spazio del lavoro dell'UR10e.

4.2 La pinza

Come pinza è stata scelta una pinza compatibile con l'UR10e e che avesse una corsa sufficiente per poter prelevare i distanziali, ma che non desse interferenze con la macchina durante il posizionamento; infatti, gli spazi per l'inserimento dei distanziali nella macchina sono molto stretti.

La pinza che è stata scelta è una “Pinza adattiva modello Hand-E” (fig. 4.4) della Robotiq; nella tabella 4.2 sono riportate le caratteristiche della pinza.



Figura 4.4 Pinza adattiva modello Hand-E della Robotiq.

<i>Specifiche</i>	
Corsa	50 mm
Forza di presa	da 20 a 185 N
Carico massimo	5 kg
Peso della pinza	1 kg
Velocità di chiusura	da 20 a 150 mm/s

Tabella 4.2 Specifiche della pinza adattiva modello Hand-E.

Per creare la cinematica della pinza si è seguita la stessa procedura riportata nel capitolo 3.2.2; si sono definiti tre gruppi: la parte fissa che si collega al robot e le due griffe. Sono stati poi creati dei giunti prismatici e si è definita la dipendenza del primo giunto rispetto al secondo; in questo modo si ha un solo giunto da comandare.

Capitolo 5

Modello cinematico e dinamico

5.1 Trasformazione di coordinate

È molto importante saper descrivere la posizione e l'orientamento di un corpo nello spazio in vari sistemi di riferimento differenti, a partire dall'informazione della loro localizzazione relativa.

Se due terne $\{A\}$ e $\{B\}$ sono puramente traslate e ${}^A P_{BORG}$ descrive la posizione dell'origine di $\{B\}$ relativamente ad $\{A\}$, allora la posizione di un generico punto P rispetto ad $\{A\}$ può essere calcolata a partire dalla sua espressione in $\{B\}$ tramite la seguente formula:

$${}^A P = {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (5.1)$$

Se le terne $\{A\}$ e $\{B\}$ sono puramente ruotate, la matrice ${}^A R_B$ descrive l'orientamento di $\{B\}$ relativamente ad $\{A\}$. Allora vale:

$${}^A P = {}^A R_B {}^B P \quad (5.2)$$

$$R_x(\theta_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\text{sen} \theta_x \\ 0 & \text{sen} \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix} \quad R_y(\theta_y) = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \text{sen} \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen} \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix}$$

$$R_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\text{sen} \theta_z & 0 \\ \text{sen} \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(5.3)

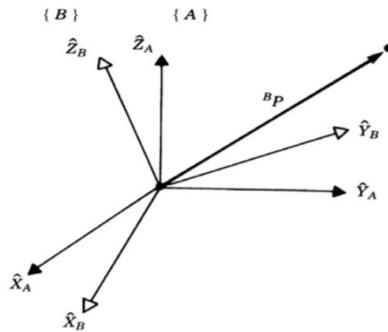


Figura 5.1 Schema per la rappresentazione della posizione del punto P rispetto alla terna {A} e alla terna {B} puramente ruotate tra di loro

Se la terna {C} è ruotata di ${}^B R$ rispetto alla {B} ed a sua volta quest'ultima è ruotata di ${}^A R$ rispetto alla terna {A}, è possibile calcolare l'orientamento finale ${}^A R$ di {C} relativamente ad {A}. Allora vale:

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

$${}^A R = {}^A R {}^B R$$

(5.4)

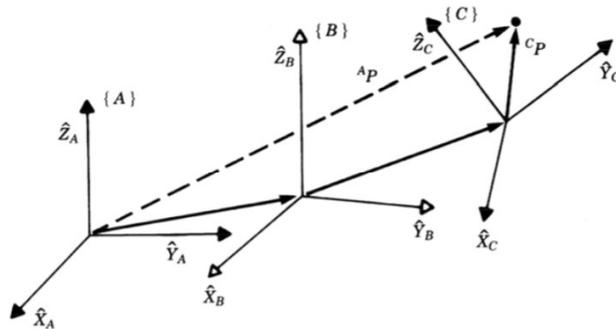


Figura 5.2 Schema per la rappresentazione della posizione del punto P rispetto alla terna {A}, alla terna {B} e alla terna {C} puramente ruotate tra di loro

Se le terne $\{A\}$ e $\{B\}$ sono traslate e ruotate, occorre disporre sia della matrice ${}^A_B R$ che del vettore ${}^A P_{BORG}$. In questo caso si può trovare la descrizione di P nel SR $\{A\}$, a partire da quella in $\{B\}$, calcolando:

$${}^A P = {}^A_B R {}^B P + {}^A P_{BORG} \quad (5.5)$$

Il caso precedente può essere trattato con più eleganza riscrivendo la relazione nella forma compatta:

$${}^A P = {}^A_B T {}^B P \quad (5.6)$$

A tal fine occorre utilizzare vettori posizione a 4 componenti e matrici di trasformazione 4x4, cosicché la relazione sopra scritta ha in realtà la seguente forma:

$$\begin{bmatrix} {}^A P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A_B R & {}^A P_{BORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Tale formalismo è detto notazione omogenea. Le trasformazioni omogenee costituiscono un gruppo rispetto all'operazione di composizione. Si dimostra facilmente che vale:

$${}^A_C T = {}^A_B T {}^B_C T \quad (5.8)$$

La matrice di rotazione R è un comodo strumento per descrivere l'orientamento di un corpo nello spazio, ma le 9 componenti che la definiscono non sono tra loro indipendenti, in quanto sono legati dalle seguenti relazioni:

- Modulo unitario: $|\hat{X}|=1, |\hat{Y}|=1, |\hat{Z}|=1$
- Mutua ortogonalità: $\hat{X} \cdot \hat{Y} = 0, \hat{X} \cdot \hat{Z} = 0, \hat{Y} \cdot \hat{Z} = 0$

Che possono essere scritte $e_i \cdot e_j = \delta_{ij}$ con i, j appartenenti all'insieme $\{1,2,3\}$.

Pertanto, è interessante cercare altre forme di rappresentazione dell'orientamento, tali che utilizzino solo 3 parametri (cioè l'insieme minimo). Le rotazioni (finite) nello spazio costituiscono un gruppo non commutativo, per cui non

basta riferirsi genericamente alle 3 rotazioni intorno agli assi principali, ma occorre anche specificare l'ordine delle stesse: per questo le rotazioni finite non possono essere trattate come vettori.

Si possono distinguere 2 tipologie di rotazioni: rotazioni attorno ad asse mobile o rotazione attorno ad asse fisso.

Ci sono in totale 12 combinazioni di rotazioni riferite agli assi del sistema di riferimento fisso, atte a determinare un orientamento generico di una terna nello spazio (si possono ripetere le rotazioni intorno ad uno stesso asse basta che non siano immediatamente successive).

5.2 Gli angoli pitch yaw roll

Per il robot studiato sono stati utilizzati gli angoli pitch yaw roll. Nel caso degli angoli **pitch yaw roll (PYR)** si parte con la terna {B} coincidente con un sistema di riferimento noto {A}. Dapprima 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 .

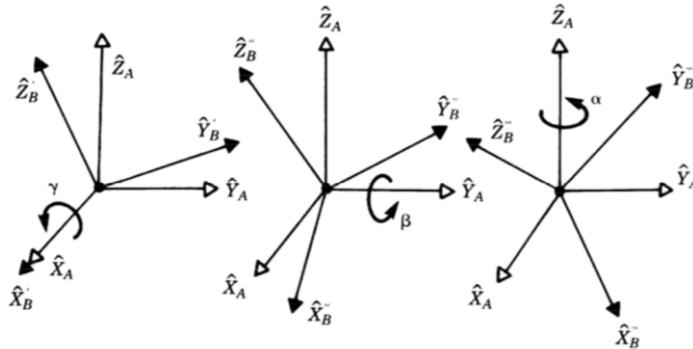


Figura 5.3 Angoli pitch yaw roll

$$\begin{aligned}
 {}^A R_{XYZ}(\gamma, \beta, \alpha) &= R_Z(\alpha)R_Y(\beta)R_X(\gamma) = \\
 &= \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ \beta = k\pi/2 & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (5.9)
 \end{aligned}$$

È anche esplicitabile la soluzione inversa, ovvero il calcolo degli angoli PYR a partire dalla conoscenza della matrice di rotazione:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

La soluzione inversa fornisce generalmente 2 soluzioni:

$$\begin{cases} \alpha_1 = \operatorname{atan} 2(r_{21}, r_{11}) & -\pi < \alpha_1 \leq \pi \\ \beta_1 = \operatorname{atan} 2(-r_{31}, \sqrt{r_{32}^2 + r_{33}^2}) & -\pi/2 < \beta_1 < \pi/2 \\ \gamma_1 = \operatorname{atan} 2(r_{32}, r_{33}) & -\pi < \gamma_1 \leq \pi \end{cases} \quad (5.11)$$

$$\begin{cases} \alpha_2 = -\alpha_1 & -\pi < \alpha_2 \leq \pi \\ \beta_2 = \pi - \beta_1 & -\pi/2 < \beta_2 < 3\pi/2 \\ \gamma_2 = -\gamma_1 & -\pi < \gamma_2 \leq \pi \end{cases} \quad (5.12)$$

Si ha una singolarità di rappresentazione, ovvero la a rappresentazione degenera quando $\cos \beta = 0$ ($\beta = k\pi/2$) in cui è possibile determinare solo la somma (se $\operatorname{sen} \beta = -1$) o la differenza (se $\operatorname{sen} \beta = 1$) degli altri 2 angoli.

5.3 Modello cinematico: Denavit-Hartenberg

I robot industriali sono spesso realizzati tramite la connessione di vari membri secondo una struttura seriale: ciò viene chiamato catena cinematica aperta; altrimenti si ha a che fare con robot a catena cinematica chiusa o robot paralleli. La trattazione sviluppata nel seguito farà sempre riferimento a robot in catena aperta.

I membri del robot sono numerati da “1” ad “n” a partire dal telaio, che viene convenzionalmente indicato come membro “0”; analogamente sono indicate le coppie cinematiche che uniscono i vari membri.

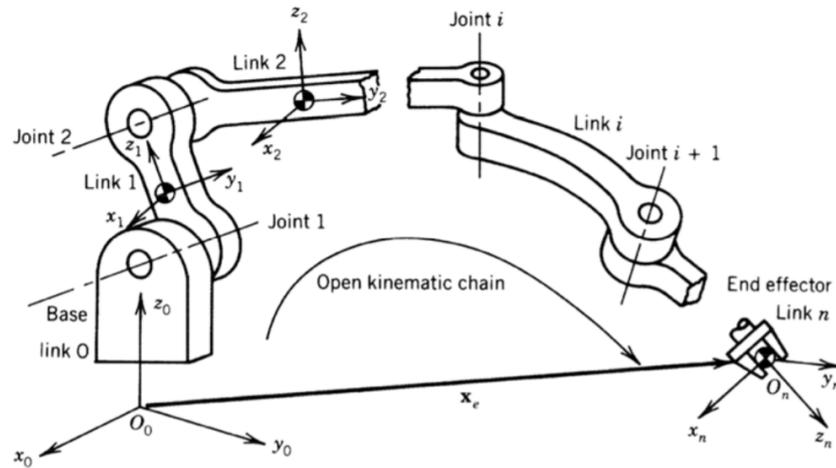


Figura 5.4 Catena cinematica aperta

Il moto relativo di due membri adiacenti è causato dal moto del giunto che lo connette. Un robot (in catena aperta) composto da “ $n+1$ ” membri ha “ n ” giunti, ognuno dei quali è azionato da un attuatore, per cui si dice che ha “ n ” mobilità o “ n ” assi; la posizione e l’orientamento del dispositivo terminale sono pertanto determinati dagli spostamenti dei vari giunti.

Per descrivere la posizione e l’orientamento del membro terminale rispetto alla base, si dota ogni membro della catena di un sistema di riferimento ad esso solidale e si operano le successive trasformazioni omogenee.

Per lo sviluppo del modello cinematico si è fatto riferimento alla rappresentazione di Denavit-Hartenberg. La rappresentazione di Denavit-Hartenberg è un metodo sistematico di descrivere attraverso 4 parametri la relazione cinematica tra una coppia di membri adiacenti connessi in modo seriale. Bisogna osservare che ci sono molte convenzioni che vanno sotto il nome di notazione di Denavit-Hartenberg, pur differendo per lievi dettagli l’una dall’altra.

La prima operazione è la definizione delle terne solidali ai membri: essa è illustrata nella figura 5.5, dove è indicata con $\{i\}$ la terna solidale al membro i -esimo.

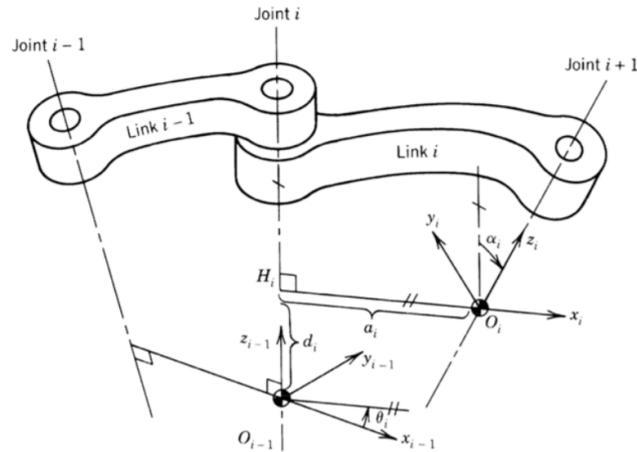


Figura 5.5 Schema per la rappresentazione di Denavit-Hartenberg

L'origine O_i di $\{i\}$ è determinata dall'intersezione dell'asse del giunto (i+1) -esimo con la normale comune tra l'asse stesso e l'asse del giunto precedente. L'asse X_i è scelto su tale normale, mentre l'asse Z_i giace sull'asse del giunto (i+1) -esimo; l'asse Y_i viene scelto in modo da disporre di una terna ortonormale destrorsa.

La localizzazione relativa di due terne consecutive è completamente determinata dai 4 parametri α_i , a_i , d_i , θ_i mostrati nella figura 5.6.

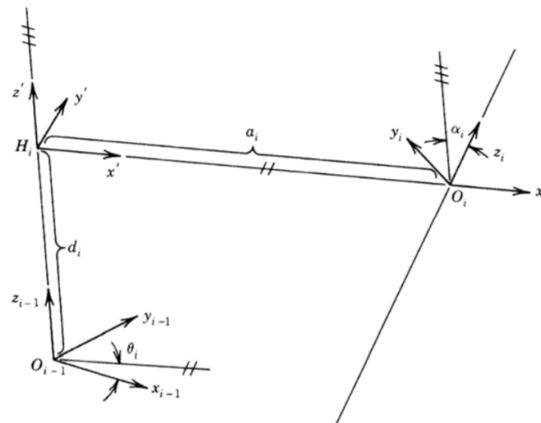


Figura 5.6 Schema per la rappresentazione di Denavit-Hartenberg

Nel caso il giunto "i" sia di tipo rotoidale, la rotazione relativa θ_i cambia mentre il giunto si muove, mentre il disassamento di resta costante; se "i", invece, è un giunto prismatico, il disassamento di varia mentre la rotazione θ_i è costante. In entrambi i casi, quindi, uno dei due parametri varia a causa del moto (e viene

chiamato variabile di giunto o variabile di coppia), mentre l'altro rimane costante. Oltre ai 2 sistemi di riferimento i e $i-1$ viene introdotto un sistema intermedio con origine nel punto H_i . Indichiamo con iX , ${}^{int}X$ e ${}^{i-1}X$ dei vettori posizione 4×1 nei sistemi i , intermedio e $i-1$ rispettivamente.

La trasformazione di coordinate che porta da ${}^{i-1}X$ a ${}^{int}X$ è:

$${}^{i-1}X = {}_{int}^{i-1}T {}^{int}X \quad (5.13)$$

Analogamente la trasformazione da ${}^{int}X$ a iX è data da:

$${}^{int}X = {}_i^{int}T {}^iX \quad (5.14)$$

$${}_{int}^{i-1}T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i & 0 & 0 \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}_i^{int}T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & \cos \alpha_i & -\text{sen} \alpha_i & 0 \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A questo punto possiamo scrivere la seguente equazione:

$${}^{i-1}X = {}_{int}^{i-1}T {}_i^{int}T {}^iX \quad (5.15)$$

$${}_{i-1}^i T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\text{sen} \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen} \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \text{sen} \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen} \alpha_i & a_i \text{sen} \theta_i \\ 0 & \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La matrice ${}_{i-1}^i T$ rappresenta la posizione e l'orientamento del sistema "i" relativamente al sistema "i-1"; la matrice inversa che passa da "i-1" ad "i" vale:

$${}_{i-1}^i T = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \text{sen} \theta_i & 0 & -a_i \\ -\text{sen} \theta_i \cos \alpha_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & \text{sen} \alpha_i & -d_i \text{sen} \alpha_i \\ \text{sen} \theta_i \text{sen} \alpha_i & -\cos \theta_i \text{sen} \alpha_i & \cos \alpha_i & -d_i \cos \alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Per quanto riguarda i membri 0 e n non esistono le normali comuni, in quanto abbiamo un solo asse di giunto; pertanto, le terne sono definite come segue:

- Per il telaio, l'origine della terna può essere scelta in un punto arbitrario sull'asse del giunto 1; l'unico vincolo consiste nel fatto che l'asse z_0 deve essere parallelo all'asse del giunto. (fig. 5.7 – a sinistra).
- Per l'ultimo membro, l'origine della terna può essere scelta in qualunque punto del terminale; l'unico vincolo consiste nel fatto che l'asse x_n interseca l'asse dell'ultimo giunto ad angolo retto (fig. 5.7 – a destra).

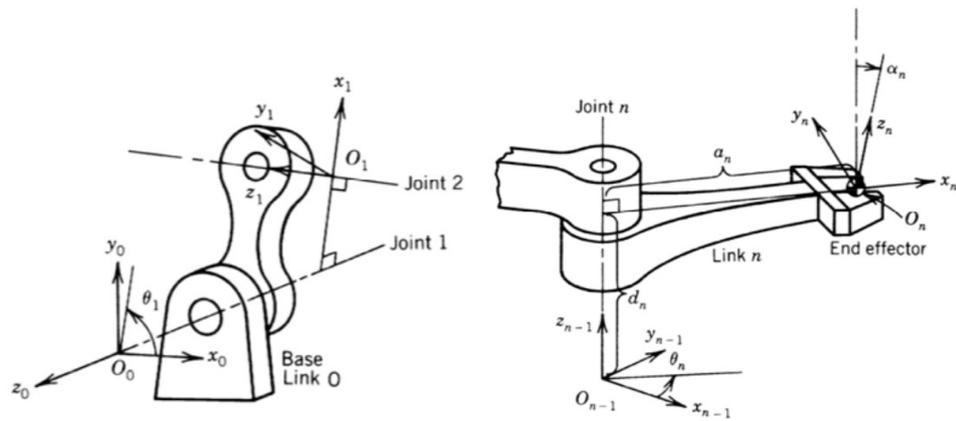


Figura 5.7 Schema per la rappresentazione di Denavit-Hartenberg per il telaio (a sinistra) e per il terminale (a destra)

5.4 Analisi di posizione

Analisi diretta

Il problema cinematico diretto (in termini di posizione) consiste nel determinare la posizione e l'orientamento del membro terminale del robot (o di qualunque altro punto della struttura) in funzione degli spostamenti (noti) dei giunti.

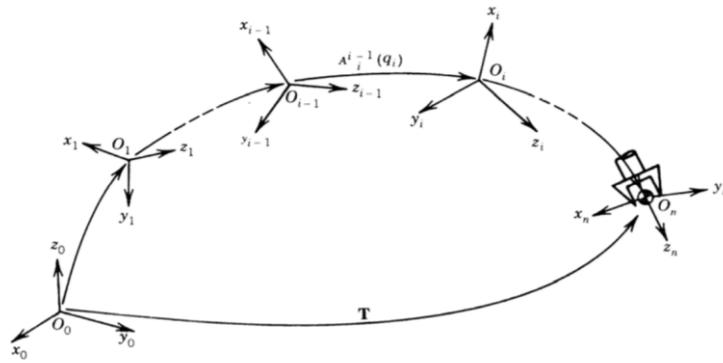


Figura 5.8 Schema di terne associate ad ogni membro del manipolatore

La matrice di trasformazione di ogni membro, quindi, può essere pensata come costruita a partire dalla conoscenza di 3 parametri costanti (che definiscono la geometria del membro e del suo accoppiamento) e da una variabile, ovvero la variabile di giunto q_i :

$${}^{i-1}T = {}^{i-1}T(q_i) \quad (5.17)$$

Dove:

$q_i = \theta_i$ per giunti rotoidali

$q_i = d_i$ per giunti prismatici

Se si ripercorre tutta la catena cinematica, si può esprimere la posizione ed orientamento del terminale in funzione degli spostamenti dei giunti intermedi:

$$T = {}^0_n T(q_1, \dots, q_n) = {}^0_1 T(q_1) {}^1_2 T(q_2) \dots {}^{i-1}_i T(q_i) \dots {}^{n-1}_n T(q_n) \quad (5.18)$$

Analisi inversa

Il problema cinematico inverso (in termini di posizione) consiste nel determinare l'insieme di spostamenti dei giunti che portano il terminale del robot in un assegnato punto con orientamento prefissato. Questo problema si risolve a partire dall'equazione 5.18, che dopo aver svolto le moltiplicazioni indicate può essere riscritta nella forma:

$$T = {}^0_n T(q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_n) \quad (5.19)$$

In questo caso il termine di sinistra è assegnato, mentre occorre calcolare le varie q_i a partire dalla loro espressione contenuta nel membro di destra; il problema è molto complesso dal punto di vista numerico.

Lo studio cinematico fin qui svolto può essere efficacemente descritto in termini di applicazioni tra due spazi vettoriali notevoli. L'insieme delle "n" variabili di giunto q_i può essere raccolto nel vettore delle coordinate interne q :

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_i \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

Lo spazio di tutti i vettori q è chiamato spazio dei giunti ed è uno spazio n -dimensionale. Ogni vettore q descrive una configurazione del manipolatore.

Analogamente la posizione e l'orientamento del dispositivo terminale possono essere raccolti anch'essi nel vettore delle coordinate esterne p :

$$p = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

Lo spazio di tutti i vettori p è chiamato spazio cartesiano o spazio di lavoro o spazio dei compiti ed è solitamente uno spazio a 6 dimensioni. Il vettore p viene spesso chiamato vettore posizione nello spazio di lavoro, in quanto consente di esprimere la posizione (e l'orientamento) del dispositivo terminale del robot e quindi anche di definirne il compito.

A differenza del caso diretto, in cui una soluzione esiste sempre, nello studio della cinematica inversa non è sempre garantita l'esistenza della soluzione o si potrebbero avere più soluzioni.

5.5 Analisi di velocità

Ai fini dello studio cinematico, è necessario saper calcolare le velocità lineari ed angolari dei membri del robot; a tal fine, pertanto, per velocità di un membro si intendono la velocità lineare dell'origine della terna associata al membro e la velocità angolare del membro stesso.

A causa della struttura dei manipolatori, è possibile calcolare la velocità dei vari membri partendo dalla base e spostandosi progressivamente verso il terminale, aggiungendo via via le nuove componenti di velocità che nascono nei giunti. Pertanto, è interessante ricavare delle formule iterative che consentano di esprimere la velocità del membro "i+1" in funzione della velocità del membro "i" e della mobilità del giunto interposto. Va distinta la trattazione in casi differenti a seconda che il giunto interposto "i+1" sia rotoidale o prismatico. In questa tesi si vedrà solo il caso di giunti rotoidali, dato che sono quelli che ha il robot.

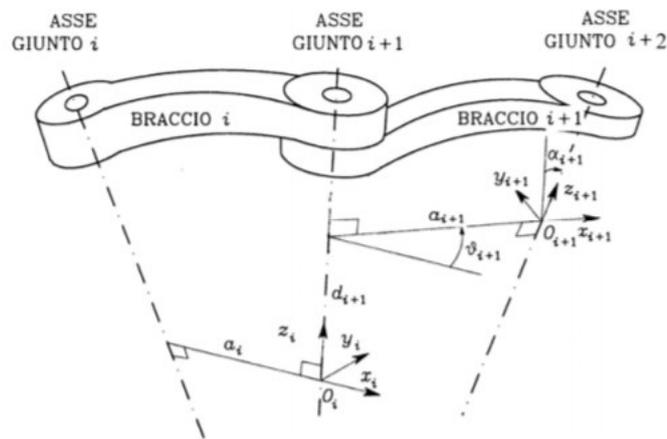


Figura 5.9 Schema della catena cinematica di due membri successivi

Nel caso in cui il giunto "i+1" sia rotoidale le velocità angolari possono essere sommate, purché espresse nello stesso sistema di riferimento:

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} \hat{Z}_i \quad (5.22)$$

$${}^{i+1}\omega_{i+1} = {}^{i+1}R({}^i\omega_i + \dot{\theta}_{i+1}\hat{Z}_i) \quad (5.22)$$

Le velocità lineari si trasportano in accordo con quanto mostrato sulle velocità relative:

$$\begin{aligned} v_{i+1} &= v_i + \omega_{i+1} \wedge {}^iP_{i+1} \\ {}^{i+1}v_{i+1} &= {}^{i+1}R^i v_i + {}^{i+1}\omega_{i+1} \wedge {}^{i+1}R^i P_{i+1} \end{aligned} \quad (5.23)$$

Jacobiano

Lo Jacobiano è una trasformazione lineare tra due spazi vettoriali. Se è definita la seguente funzione vettoriale di variabile vettoriale: $Y = F(X)$, allora la variazione di Y vale:

$$\delta Y = \frac{\partial F}{\partial X} \delta X = J(X) \delta X \quad (5.24)$$

Dividendo entrambi i membri per il differenziale del tempo "dt", si ottiene:

$$\dot{Y} = J(X) \dot{X} \quad (5.25)$$

In campo robotico, generalmente si considerano Jacobiani che mettono in relazione le velocità dei giunti con le velocità cartesiane del terminale del robot:

$$\dot{p}_0 = {}^0J(q) \dot{q} \quad (5.26)$$

Analisi diretta di velocità

Il problema cinematico diretto viene risolto dalla valutazione della:

$$\dot{X} = J(Q) \dot{Q} \quad (5.27)$$

Risulta evidente che la cinematica di velocità è espressa da una relazione lineare (a differenza, per esempio, della cinematica di posizione). Pertanto, se si ha a disposizione la matrice Jacobiana, il calcolo delle velocità cartesiane in funzione delle

velocità dei giunti risulta molto semplice. La relazione 5.27 è sempre definita, anche per Jacobiano singolare o non quadrato.

Analisi inversa di velocità

Il problema cinematico inverso consiste nel calcolare le velocità dei giunti che corrispondono ad assegnate velocità nello spazio di lavoro e si risolve sempre a partire dalla relazione:

$$\dot{p} = J(q)\dot{q} \quad (5.28)$$

Se la matrice Jacobiana è quadrata, il problema è risolto dall'inversione della matrice in questione:

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{p} \quad (5.29)$$

Affinché l'inversione indicata sia possibile, occorre che la matrice sia non singolare: le configurazioni per le quali il determinante dello Jacobiano si annulla sono dette singolarità del meccanismo o punti singolari. In tali punti il manipolatore perde uno o più gradi di libertà dal punto di vista dello spazio cartesiano e cioè esiste una direzione (o sottospazio) dello spazio cartesiano lungo la quale è impossibile muovere il dispositivo terminale del robot, qualunque sia l'insieme delle velocità dei giunti; d'altra parte, i moti in tutte le altre direzioni possono essere ottenuti in infiniti modi. Ai confini dello spazio di lavoro si trovano sempre punti singolari, ma molti manipolatori hanno singolarità anche all'interno dello spazio di lavoro, soprattutto quando due o più assi sono allineati.

5.6 Matrici d'inerzia

Per ricavare le equazioni della dinamica del robot bisogna conoscere le matrici d'inerzia di ogni corpo. Spesso non sono fornite dal produttore e devono essere quindi calcolate.

Nel caso generale di una distribuzione tridimensionale di massa la matrice d'inerzia ha una forma del tipo:

$$I = \begin{bmatrix} I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix} \quad (5.30)$$

Le espressioni dettagliate degli elementi della matrice sono:

$$\begin{aligned} I_{11} &= \iiint \rho(P)(y^2 + z^2) dV \\ I_{22} &= \iiint \rho(P)(x^2 + z^2) dV \\ I_{33} &= \iiint \rho(P)(x^2 + y^2) dV \\ I_{12} = I_{21} &= -\iiint \rho(P)xy dV \\ I_{13} = I_{31} &= -\iiint \rho(P)xz dV \\ I_{23} = I_{32} &= -\iiint \rho(P)yz dV \end{aligned} \quad (5.31)$$

Per semplicità si considereranno tutti i corpi come dei cilindri di densità costante. Si considera un cilindro omogeneo di altezza h , raggio di base R e massa m , come mostrato in figura 5.10.

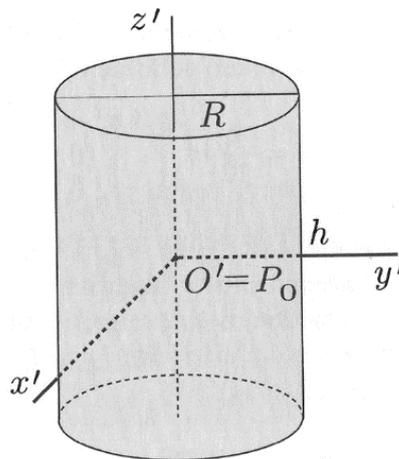


Figura 5.10 Cilindro omogeneo: sistema solidale con il cento di massa

La matrice d'inerzia del cilindro calcolata nel sistema di riferimento solidale con l'origine del centro di massa P_0 e con l'asse z' lungo l'asse di simmetria è pertanto:

$$I = \frac{1}{12} m \begin{bmatrix} 3R^2 + h^2 & 0 & 0 \\ 0 & 3R^2 + h^2 & 0 \\ 0 & 0 & 6R^2 \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

5.7 Modello dinamico

Le equazioni di Lagrange, per un sistema ad n gradi di libertà, ovvero per un insieme di coordinate generalizzate q_1, q_2, \dots, q_n , possono essere scritte nella forma:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_k} = Q_k \quad k = 1, \dots, n \quad (5.33)$$

$T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ è l'energia cinetica del sistema, q_k indica le coordinate libere corrispondenti ai gradi di libertà del sistema, Q_k indica le componenti di tutte le forze attive secondo le coordinate lagrangiane q_k .

Per comprendere il significato di Q_k si definisca $\delta \mathbf{r}_i$ come spostamento virtuale del punto di applicazione della generica forza attiva \mathbf{F}_i applicata al sistema. Tale spostamento in funzione delle variazioni virtuali delle coordinate libere δq_k è dato da:

$$\delta \mathbf{r}_i = \sum_{k=1}^n \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \delta q_k \quad (5.34)$$

Il lavoro virtuale eseguito dalle forze attive \mathbf{F}_i risulta:

$$\delta L = \sum_{i=1}^r \mathbf{F}_i \cdot \delta \mathbf{r}_i = \sum_{i=1}^r \mathbf{F}_i \cdot \sum_{k=1}^n \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \delta q_k \quad (5.35)$$

Il lavoro generico eseguito per gli spostamenti virtuali $\delta \mathbf{r}_i$ dovuti ad una variazione della sola coordinata libera k , cioè considerando non nullo il solo spostamento virtuale δq_k , risulta:

$$\delta L_k = \sum_{i=1}^r \mathbf{F}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \delta q_k = Q_k \delta q_k \quad (5.36)$$

Essendo:

$$Q_k = \sum_{i=1}^r \mathbf{F}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} = \sum_{i=1}^r \mathbf{F}_i \cdot \boldsymbol{\tau}_{i,k} \quad (5.37)$$

dove $\boldsymbol{\tau}_{i,k}$ è la derivata parziale dello spostamento del punto di applicazione della forza \mathbf{F}_i rispetto alla coordinata generalizzata q_k .

In genere le forze \mathbf{F}_i possono essere in parte posizionali e conservative e in parte no, secondo la relazione:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i^c + \mathbf{F}_i^{nc} \quad (5.38)$$

Per le forze posizionali e conservative si può determinare un potenziale U tale che:

$$Q_k^c = \frac{\partial U}{\partial q_k} \quad k = 1, \dots, n \quad (5.39)$$

Tale termine può essere raccolto nell'espressione delle equazioni di Lagrange tra i termini differenziali attraverso la funzione di Lagrange $L = T - V$, ricordando che $V = -U$ è l'energia potenziale delle componenti lagrangiane delle forze attive.

Per le forze non conservative si ha:

$$Q_k^{nc} = \sum_{i=1}^r \mathbf{F}_i^{nc} \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial q_k} \quad (5.40)$$

Segue quindi che l'espressione per le equazioni di Lagrange si può riscrivere come:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_k} = Q_k^{nc} \quad k = 1, \dots, n \quad (5.41)$$

con L funzione delle coordinate lagrangiane e delle relative derivate.

$$L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - V(\mathbf{q}) \quad (5.42)$$

Generalmente come coordinate generalizzate vengono considerati gli spostamenti q_k dei giunti del sistema meccanico (coordinate relative); in questo caso le forze generalizzate Q_k sono le corrispondenti forze/coppie sui giunti. Pertanto, se il peso del sistema viene considerato nel termine energia potenziale V , il vettore delle forze generalizzate ai giunti vale:

$$\mathbf{Q} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_e \quad (5.43)$$

che tiene conto anche dell'eventuale forza/momento applicato dall'esterno all'organo terminale. Questa espressione è tipica nelle applicazioni di robotica seriale.

Dallo studio dinamico si vuole ottenere:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{v}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (5.44)$$

dove:

- $\ddot{\mathbf{q}}$: vettore accelerazione dei giunti
- $\dot{\mathbf{q}}$: vettore velocità dei giunti
- \mathbf{q} : vettore spostamento dei giunti
- $\boldsymbol{\tau}$: coppie sui motori
- $\mathbf{M}(\mathbf{q})$: matrice di massa (o d'inerzia)
- $\mathbf{v}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$: vettore che raccoglie gli effetti di Coriolis e le forze centrifughe
- $\mathbf{G}(\mathbf{q})$: vettore che raccoglie gli effetti gravitazionali
- $\mathbf{D}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$: vettore che raccoglie gli effetti di resistenza
- \mathbf{J} : matrice jacobiana
- \mathbf{F} : vettore delle forze esterne

5.6 Modellazione dell'UR10e

Per la modellazione dell'UR10e su Matlab è stato utilizzato il *robot toolbox* di Peter Corke.

I parametri di Denavit - Hartenberg per l'UR10e sono ricavati secondo la metodologia riportata nel capitolo 5.3. Il primo passo è fare uno schizzo del manipolatore con i suoi giunti e collegamenti (figura 5.11). Le misure sono date dal produttore.

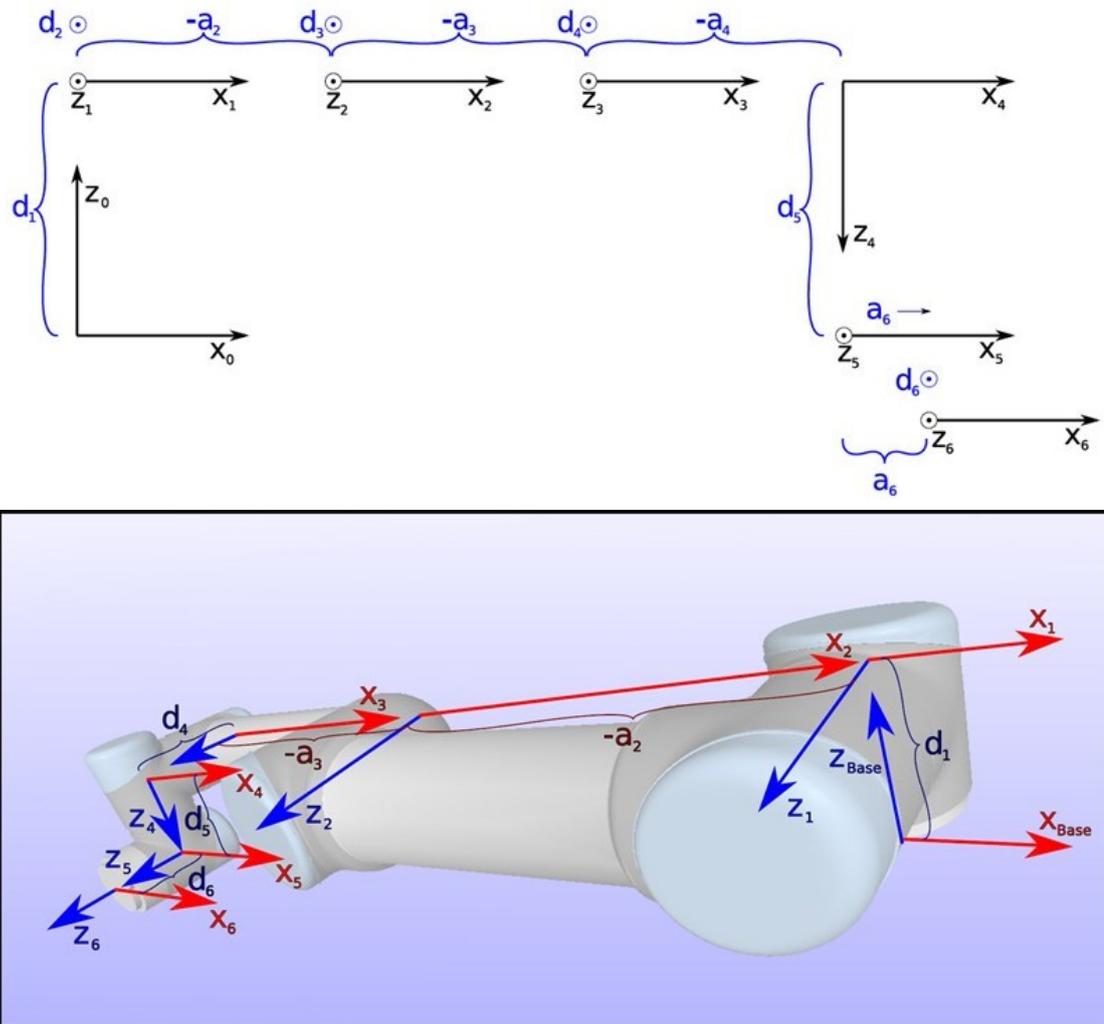


Figura 5.11 Parametri di Denavit-Hartenberg rappresentati per un robot UR

I parametri di Denavit - Hartenberg dell'UR10e sono riportati nella tabella 5.1. Il parametro θ_i non è riportato nella tabella in quanto, essendo i giunti rotoidali, θ_i risulta essere il parametro variabile.

	a [m]	d [m]	α [rad]
Giunto 1	0	0,1807	$\pi/2$
Giunto 2	-0,6127	0	0
Giunto 3	-0,57155	0	0
Giunto 4	0	0,17415	$\pi/2$
Giunto 5	0	0,11985	$-\pi/2$
Giunto 6	0	0,11655	0

Tabella 5.1 Parametri di Denavit–Hartenberg dell’UR10e forniti dall’Universal Robots

Per creare il robot su Matlab si è definita la matrice dei parametri di DH e si è utilizzata la funzione “SerialLink”:

```
dh = [0 0.1807 0 pi/2;
      0 0 -0.6127 0;
      0 0 -0.57155 0;
      0 0.17415 0 pi/2;
      0 0.11985 0 -pi/2;
      0 0.11655 0 0];
```

```
ur10e = SerialLink(dh);
```

Una volta definite le proprietà cinematiche sono state definite le proprietà dinamiche:

- Massa;
- Centro di massa;
- Matrici d’inerzia;
- Momento d’inerzia del motore.

La massa e la posizione del centro di massa sono state fornite dal produttore (tabella 5.2).

	<i>Massa</i> [kg]	<i>Centro di massa</i> [m]
Link 1	7,369	[0.021, 0.000, 0.027]
Link 2	13,051	[0.38, 0.000, 0.158]

Link 3	3,989	[0.24, 0.000, 0.068]
Link 4	2,100	[0.000, 0.007, 0.018]
Link 5	1,980	[0.000, 0.007, 0.018]
Link 6	0,615	[0, 0, -0.026]

Tabella 5.2 Parametri dinamici dell'UR10e forniti dall'Universal Robot

Le matrici d'inerzia di ogni corpo sono state invece calcolate, in quanto non fornite del produttore. È stata seguita la procedura riportata nel capitolo 5.6; si sono dunque approssimati i corpi come dei cilindri di densità costante (fig. 5.12). Le dimensioni dei cilindri (raggio e altezza) sono state ricavate in maniera approssimativa dai cad forniti dal produttore e sono riportati nella tabella 5.3.

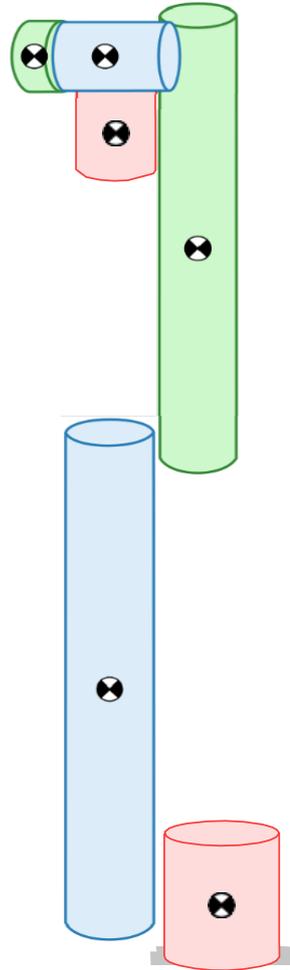


Figura 5.12 Approssimazione dell'UR10e con dei cilindri di densità costante

	<i>Raggio</i> [mm]	<i>Altezza</i> [mm]
Link 1	75	165
Link 2	60	745
Link 3	45	673
Link 4	45	123
Link 5	45	108
Link 6	45	55

Tabella 5.3 Dimensioni approssimate dei link dell'UR10e

Sono state dunque ottenute le seguenti matrici d'inerzia:

$$\begin{aligned}
 I_{link1} &= \begin{bmatrix} 0,0271 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0271 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0207 \end{bmatrix} & I_{link2} &= \begin{bmatrix} 0,6154 & 0 & 0 \\ 0 & 0,6154 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0235 \end{bmatrix} \\
 I_{link3} &= \begin{bmatrix} 0,1526 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1526 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0040 \end{bmatrix} & I_{link4} &= \begin{bmatrix} 0,0037 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0037 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0021 \end{bmatrix} & (5.45) \\
 I_{link5} &= \begin{bmatrix} 0,0029 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0029 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0020 \end{bmatrix} & I_{link6} &= \begin{bmatrix} 0,0005 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0005 & 0 \\ 0 & 0 & 0,0006 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

I motori dei robot dell'Universal Robots sono dei motori brushless realizzati su misura dalla Kollmorgen.

Non avendo informazioni riguardo a tali motori, per ricavare dei momenti d'inerzia di massima sono stati considerati dei KBM™ Series Brushless Motors, in particolare un KBM-35x03 per il primo e secondo giunto, un KBM-25x03 per il terzo giunto, un KBM-14x02 per il quarto giunto e un KBM-14x01 per il quinto e sesto giunto. Da catalogo si sono trovati dunque i seguenti momenti d'inerzia:

	$J_m [Kg \cdot m^2]$
Giunto 1	$3,04 \cdot 10^{-3}$
Giunto 2	$3,04 \cdot 10^{-3}$
Giunto 3	$7,66 \cdot 10^{-4}$
Giunto 4	$4,88 \cdot 10^{-5}$
Giunto 5	$2,41 \cdot 10^{-5}$
Giunto 6	$2,41 \cdot 10^{-5}$

Tabella 5.4 Momenti d'inerzia approssimati dei motori dell'UR10e



Figura 5.13 KBM™ Series Brushless Motors

Di seguito è riportata la definizione dei parametri dinamici su Matlab.

```
% Definisco le proprietà dinamiche
%Link1
ur10e.links(1, 1).m = 7.369;
ur10e.links(1, 1).r = [0.021 0 0.027];
ur10e.links(1, 1).I =
[0.027081075000000, 0, 0; 0, 0.027081075000000, 0; 0, 0, 0.0207253125
00000];
ur10e.links(1, 1).Jm = 3.04*10^-3;
```

```
%Link2
ur10e.links(1, 2).m = 13.051;
ur10e.links(1, 2).r = [0.38 0 0.158];
ur10e.links(1, 2).I =
[0.615381839583333,0,0;0,0.615381839583333,0;0,0,0.0234918000
00000];
ur10e.links(1, 2).Jm =3.04*10^-3;

%Link3
ur10e.links(1, 3).m = 3.989;
ur10e.links(1, 3).r = [0.24 0 0.068];
ur10e.links(1, 3).I =
[0.152580579666667,0,0;0,0.152580579666667,0;0,0,0.0040388625
00000];
ur10e.links(1, 3).Jm =7.66*10^-4;

%Link4
ur10e.links(1, 4).m = 2.1;
ur10e.links(1, 4).r = [0 0.007 0.018];
ur10e.links(1, 4).I =
[0.003710700000000,0,0;0,0.003710700000000,0;0,0,0.0021262500
00000];
ur10e.links(1, 4).Jm =4.88*10^-5;

%Link5
ur10e.links(1, 5).m = 1.98;
ur10e.links(1, 5).r = [0 0.007 0.018];
ur10e.links(1, 5).I =
[0.002926935000000,0,0;0,0.002926935000000,0;0,0,0.0020047500
00000];
ur10e.links(1, 5).Jm =2.41*10^-5;

%Link6
ur10e.links(1, 6).m = 0.615;
ur10e.links(1, 6).r = [0 0 -0.026];
ur10e.links(1, 6).I = [4.663750000000001e-
04,0,0;0,4.663750000000001e-04,0;0,0,6.226875000000001e-04];
ur10e.links(1, 6).Jm =2.41*10^-5;
```

Capitolo 6

Pianificazione della traiettoria

La pianificazione delle traiettorie può essere effettuata:

- nello spazio dei giunti. Si programmano in funzione del tempo tutte le variabili dei giunti e le loro prime 2 derivate;
- nello spazio cartesiano. Si programmano in funzione del tempo tutte le variabili che descrivono, posizione velocità e accelerazione della pinza o terminale del manipolatore e si proiettano i risultati nello spazio dei giunti.

Considerando una pianificazione nello spazio dei giunti le traiettorie possono essere ottenute attraverso i seguenti approcci: leggi polinomiali semplici o polinomi raccordati.

Nella pratica industriale si adotta spesso una particolare sequenza di profili polinomiali detta “*pianificazione a profilo trapezoidale di velocità*”, in cui si susseguono tre fasi:

- 1) Accelerazione
- 2) Velocità costante
- 3) Decelerazione.

La traiettoria che ne risulta è costituita da un tratto lineare raccordato da due tratti parabolici nell'intorno delle posizioni iniziale e finale.

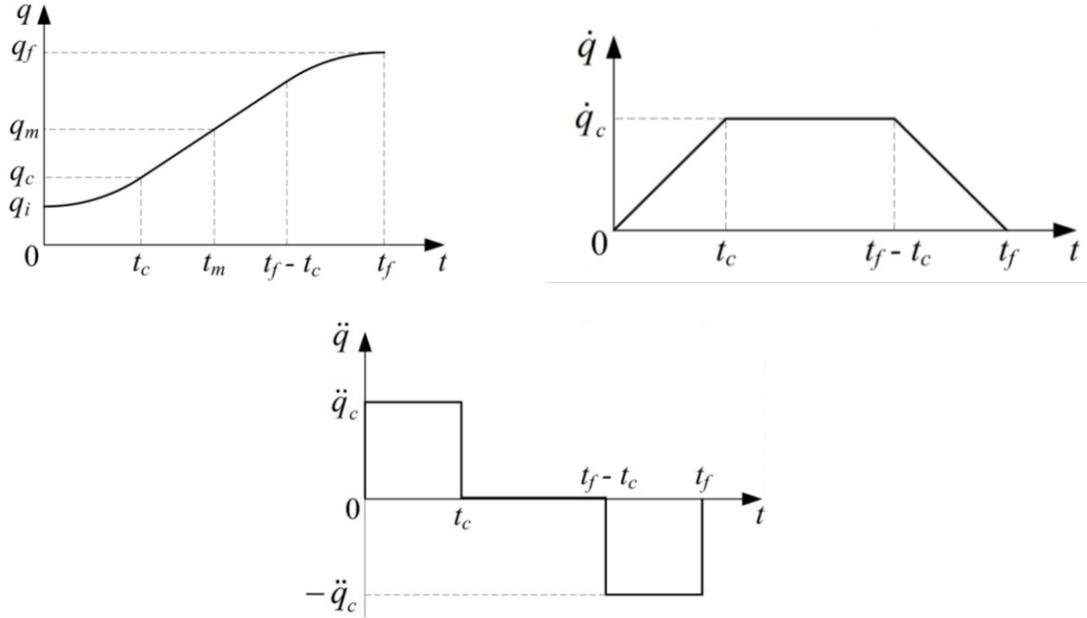


Figura 6.1 In ordine: profilo di posizione, profilo di velocità, profilo di accelerazione

Se si suppone che le velocità iniziale e finale richieste siano nulle e che i tratti di accelerazione costante abbiano durata uguale si ottiene un profilo di velocità simmetrico rispetto al tempo t_m al quale è associata la posizione q_m :

$$t_m = \frac{t_f}{2} \quad q_m = \frac{q_f + q_i}{2} \quad (6.1)$$

Assegnato il tempo complessivo t_f in cui la variabile di giunto deve passare da q_i a q_f devono essere rispettate le seguenti condizioni, dove con t_c e q_c si sono indicati il tempo in cui si esaurisce il tratto ad accelerazione costante e la relativa posizione.

Nel tratto a velocità costante, che va da t_c a $t_f - t_c$, vale la relazione:

$$\frac{q - q_c}{t - t_c} = \frac{q_m - q_c}{t_m - t_c} \quad (6.2)$$

Da cui:

$$q(t) = q_c - t_c \left(\frac{q_m - q_c}{t_m - t_c} \right) + \left(\frac{q_m - q_c}{t_m - t_c} \right) t \quad (6.3)$$

La velocità alla fine del tratto ad accelerazione costante deve essere uguale alla velocità costante del tratto lineare:

$$\dot{q} = \dot{q}_c = \frac{q_m - q_c}{t_m - t_c} \quad (6.4)$$

Nel tratto iniziale ad accelerazione costante si ha:

$$\ddot{q} = \ddot{q}_c = \text{cost} \Rightarrow \int_{\dot{q}(0)}^{\dot{q}(t)} d\dot{q} = \int_0^t \ddot{q}_c dt \Rightarrow \dot{q}(t) = \dot{q}_0 + \ddot{q}_c t = \ddot{q}_c t \quad (6.5)$$

Da quanto detto per le velocità dei due tratti parabolico e lineare si ha:

$$\ddot{q}_c t_c = \frac{q_m - q_c}{t_m - t_c} \quad (6.6)$$

Integrando l'espressione della velocità si ottiene l'espressione della posizione per il tratto iniziale ad accelerazione costante:

$$\dot{q}(t) = \ddot{q}_c t \Rightarrow \int_{q(0)}^{q(t)} dq = \int_0^t \ddot{q}_c t dt \Rightarrow q(t) = q_i + \frac{1}{2} \ddot{q}_c t^2 \quad (6.7)$$

Per $t = t_c$ segue:

$$q_c = q_i + \frac{1}{2} \ddot{q}_c t_c^2 \quad (6.8)$$

Combinando la (6.6) con la (6.8) e ricordando le espressioni per il punto medio si ottiene:

$$\ddot{q}_c t_c^2 - \ddot{q}_c t_f t_c + q_f - q_i = 0 \quad (6.9)$$

In genere viene assegnata l'accelerazione con il vincolo che:

$$\operatorname{sgn} \ddot{q}_c = \operatorname{sgn}(q_f - q_i) \quad (6.10)$$

Dati quindi t_f , q_i e q_f si ottiene dalla (6.9) il tempo t_c che verifica la condizione $t_c \leq \frac{t_f}{2}$:

$$t_c = \frac{t_f}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{t_f^2 - \frac{4(q_f - q_i)}{\ddot{q}_c}} \quad (6.11)$$

Perché il termine sotto radice sia ≥ 0 l'accelerazione deve rispettare la condizione:

$$|\ddot{q}_c| \geq \frac{4|q_f - q_i|}{t_f^2} \quad (6.12)$$

Quando vale l'uguaglianza il profilo diventa triangolare.

Per $0 \leq t \leq t_c$ si ha:

$$\begin{cases} \ddot{q}(t) = \ddot{q}_c \\ \dot{q}(t) = \ddot{q}_c t \\ q(t) = q_i + \ddot{q}_c \frac{t^2}{2} \end{cases} \quad (6.13)$$

Per $t_c < t \leq t_f - t_c$ si ha:

$$\begin{cases} \ddot{q}(t) = 0 \\ \dot{q}(t) = \dot{q}_c \\ q(t) = q_i + \dot{q}_c \left(t - \frac{t_c}{2} \right) \end{cases} \quad (6.14)$$

Per $t_f - t_c < t \leq t_f$ si ha:

$$\begin{cases} \ddot{q}(t) = -\ddot{q}_c \\ \dot{q}(t) = \dot{q}_c (t_f - t) \\ q(t) = q_f + \frac{1}{2} \ddot{q}_c (t_f - t)^2 \end{cases} \quad (6.15)$$

6.2 Modello Matlab

Per la pianificazione della traiettoria sono state considerate le posizioni che il terminale del robot percorre per il posizionamento del primo distanziale. Da Tecnomatix sono stati estratti gli angoli di giunto associati alla posizione di pick, di place e alle varie via positions attraverso le quali il cobot deve passare per non avere interferenze con gli altri corpi durante il moto (tabella 6.1). Sono stati dunque considerati 5 percorsi: da p1 a p2, da p2 a p3, da p3 a p4, da p4 a p5 e da p5 a p6.

Joints tree	Steering/Poses	Value	Lower Limit	Upper Limit
UR10e				
Base		-78,11	-360,00	360,00
Shoulder		-86,82	-360,00	360,00
Elbow		147,12	-360,00	360,00
Wrist1		-95,89	-360,00	360,00
Wrist2		-80,28	-360,00	360,00
Wrist3		6,89	-360,00	360,00
j1 (pinza_robotiq)		10,00	(None)	(None)



Figura 6.2 Esempio di estrazione degli angoli di giunto su Tecnomatix.

	<i>Base</i>	<i>Shoulder</i>	<i>Elbow</i>	<i>Wrist 1</i>	<i>Wrist 2</i>	<i>Wrist 3</i>
p1	0	-135	135	-90	-90	0
p2	-78,11	-86,82	147,12	-95,89	-80,28	6,89
p3	-45,63	-97,06	120,78	-68,14	-55,05	29,31
p4	4,3	-80,69	113,51	-128,94	-35,23	97,47
p5	22,98	-63,76	107,21	-148,73	-58,12	-62,64
p6	-45,63	-79,19	109,19	-254,42	55,05	-150,69

Tabella 6.1 Angoli di giunto (in gradi) associati alla posizione di pick, di place e alle via positions.

Le velocità angolari massime \dot{q}_c per ogni giunto sono state fornite dal produttore e sono riportate nella tabella 6.2.

<i>Giunto</i>	<i>Velocità massima \dot{q}_c [°/s]</i>
Base	120
Shoulder	120
Elbow	180
Wrist 1	180
Wrist 2	180
Wrist3	180

Tabella 6.2 Velocità angolari massime per ogni giunto.

I dati noti sono dunque la posizione iniziale q_i (ad esempio p1 nel percorso da p1 a p2), la posizione finale q_f (ad esempio p2 nel percorso da p1 a p2) e le velocità massime \dot{q}_c .

La traiettoria è stata discretizzata in $n=1000$ punti. Per ogni percorso è stato imposto il tempo finale t_f di primo tentativo unico per tutti i giunti; noto il t_f , il problema di pianificazione della traiettoria può essere completamente risolto. Per ogni punto in cui è stata discretizzata la traiettoria sono state dunque trovate la posizione, la velocità e l'accelerazione angolare.

Sul terminale del robot è stato considerato un carico pari al peso della pinza e del distanziale.

Note la posizione, la velocità e l'accelerazione angolare in ogni punto della traiettoria e noto il carico sul terminale è possibile calcolare le coppie che ogni motore deve erogare.

Le coppie che il motore deve erogare sono state calcolate con la formula 5.44, in particolare su Matlab è stata utilizzata la funzione *SerialLink/rne* di Peter Corke:

```
TAU = R.rne (Q, QD, QDD, 'fext', W)
```

Dove:

- Q = Posizione angolare;
- QD = Velocità angolare;
- QDD = Accelerazione angolare;

- $W =$ Vettore delle forze esterne: $\begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z & M_x & M_y & M_z \end{bmatrix}$.

Per ogni punto della traiettoria e per ogni giunto è stato calcolato il calore della coppia; questi valori di coppia sono stati confrontati con i valori delle massime coppie erogabili dai motori dei giunti (fornite dal costruttore – tabella 6.3). Se il valore di coppia non superava il valore di massima coppia erogabile per nessun punto della traiettoria e per nessun giunto allora era possibile ridurre il tempo finale t_f di primo tentativo imposto all’inizio del problema, altrimenti se almeno in un punto della traiettoria e almeno per un giunto la coppia superava la coppia massime erogabile allora bisognava aumentare il tempo finale t_f di primo tentativo imposto all’inizio del problema. Questo processo è stato ripetuto in maniera iterativa fino a trovare il tempo finale minimo ovvero il minimo tempo sotto al quale la coppia richiesta ai motori supera il valore massimo erogabile.

<i>Giunto</i>	<i>Coppia massima [Nm]</i>
Base	330
Shoulder	330
Elbow	150
Wrist 1	56
Wrist 2	56
Wrist3	56

Tabella 6.3 Coppia massima erogabile per ogni giunto.

Questa procedura è stata ripetuta per tutti e cinque i percorsi e ha permesso di trovare il tempo minimo di posizionamento del distanziale senza che si superino le coppie massime erogabili dai motori.

Di seguito è riportata la definizione del problema su Matlab:

```
%Dati
p1 = [0;-135;135;-90;-90;0]; %Posizione iniziale
p2 = [-78.11;-86.82;147.12;-95.89;-80.28;6.89]; %Posizione 2
(pick)
```

```

p3 = [-45.63;-97.06;120.78;-68.14;-55.05;29.31]; %Posizione 3
(via)
p4 = [4.3;-80.69;113.51;-128.94;-35.23;97.47]; %Posizione 4
(via)
p5 = [22.98;-63.76;107.21;-148.73;-58.12;-62.64]; %Posizione
5 (place)
p6 = [-45.63;-79.19;109.19;-254.42;55.05;-150.69]; %Posizione
6 (via)

qigradi = p1; %Posizione iniziale in gradi
qfgradi = p2; %Posizione finale in gradi
WCgradi = [120;120;180;180;180;180];
qi = qigradi*pi/180; %Posizione iniziale in radianti
qf = qfgradi*pi/180; %Posizione finale in radianti
WC = WCgradi*pi/180;
tf=0.67; %p1->p2
% tf=0.29; %p2->p3
% tf=0.45; %p3->p4
% tf=0.89; %p4->p5
% tf=0.63; %p5->p6
n=1000;

% Per tenero conto di Dq negativi
for (i=1:6)
if (qf(i,:)-qi(i,:) >= 0)
wc(i,:) = WC(i,:);
else
wc(i,:) = -WC(i,:);
end
tc(i,:) = tf-(qf(i,:)-qi(i,:))/wc(i,:);
ac(i,:) = wc(i,:)/tc(i,:);
end

% Se tc>tf/2
for i=1:6
if tc(i,:) >= tf/2
tc(i,)=tf/2;

```

```

end
wc(i,:) = -(qf(i,:) - qi(i,:))/(tc(i,:) - tf);
tc(i,:) = wc(i,+)/ac(i,);
if tc(i,:) >= tf/2
    tc(i,)=tf/2;
end
wc(i,:) = -(qf(i,:) - qi(i,:))/(tc(i,:) - tf);
tc(i,:) = wc(i,+)/ac(i,);
if tc(i,:) >= tf/2
    tc(i,)=tf/2;
end
wc(i,:) = -(qf(i,:) - qi(i,:))/(tc(i,:) - tf);
tc(i,:) = wc(i,+)/ac(i,);
if tc(i,:) >= tf/2
    tc(i,)=tf/2;
end
wc(i,:) = -(qf(i,:) - qi(i,:))/(tc(i,:) - tf);
tc(i,)=wc(i,+)/ac(i,);
end

%condizione da verificare : tf^2 >= 4*abs(qf(i,)-
qi(i,))/abs(ac(i,))
diff=[];
for i=1:6
diff0 = tf^2-4*abs(qf(i,)-qi(i,))/abs(ac(i,));
diff = [diff diff0];
end

for i=1:6
if diff(:,i)<0
    disp('tempo finale troppo basso')
end
end

for i=1:6
if tc(i,)<0
    disp('tempo finale troppo basso per tc')
end
end

```

```
end

a1=[];
w1=[];
q1=[];

for i=1:6
for t = linspace(0,tf,n)
if (t <= tc(i,:))
    a0(i,:) = ac(i,:);
    w0(i,:) = ac(i,:)*t;
    q0(i,:) = qi(i,+)/2*t^2;
elseif (tc(i,:) < t) && (t <= tf-tc(i,:))
    a0(i,:) = 0;
    w0(i,:) = wc(i,:);
    q0(i,:) = qi(i,+)/wc(i,)*(t-tc(i,+)/2);
else
    a0(i,:) = -ac(i,);
    w0(i,:) = ac(i,)*(tf-t);
    q0(i,:) = qf(i,)-ac(i,)/2*(tf-t)^2;
end
a1 = [a1 a0(i,1)];
w1 = [w1 w0(i,1)];
q1 = [q1 q0(i,1)];
end
end

a = [a1(1,1:n*1);
     a1(1,n*1+1:n*2);
     a1(1,n*2+1:n*3);
     a1(1,n*3+1:n*4);
     a1(1,n*4+1:n*5);
     a1(1,n*5+1:n*6)];

w = [w1(1,1:n*1);
     w1(1,n*1+1:n*2);
     w1(1,n*2+1:n*3);
     w1(1,n*3+1:n*4);
```

```

    w1(1,n*4+1:n*5);
    w1(1,n*5+1:n*6)];

q = [q1(1,1:n*1);
     q1(1,n*1+1:n*2);
     q1(1,n*2+1:n*3);
     q1(1,n*3+1:n*4);
     q1(1,n*4+1:n*5);
     q1(1,n*5+1:n*6)];

acc = (ac*180/pi)';

%Calcolo coppia
TAU = [];
for i=1:n
    TAU0(:,i) = ur10e.rne(q(:,i)',w(:,i)',a(:,i)', 'fext', [0 -
    (1+0.0113)*9.81 0 0 0 0]);
    TAU = [TAU TAU0(:,i)];
end

% Massime coppie

% Giunto 1
% Identificazione del valore massimo
modTAU1=abs(TAU(1,:)); %Metto in valore assoluto le coppie
del giunto
[max1,pos1]=max(modTAU1);
% Identificazione degli indici in termini di riga e colonna
del valore massimo
[riga1,colonna1]=ind2sub(size(modTAU1),pos1);

% Giunto 2
modTAU2=abs(TAU(2,:));
[max2,pos2]=max(modTAU2);
[riga2,colonna2]=ind2sub(size(modTAU2),pos2);

```

```
% Giunto 2
modTAU3=abs(TAU(3,:));
[max3,pos3]=max(modTAU3);
[riga3,colonna3]=ind2sub(size(modTAU3),pos3);

% Giunto 4
modTAU4=abs(TAU(4,:));
[max4,pos4]=max(modTAU4);
[riga4,colonna4]=ind2sub(size(modTAU4),pos4);

% Giunto 5
modTAU5=abs(TAU(5,:));
[max5,pos5]=max(modTAU5);
[riga5,colonna5]=ind2sub(size(modTAU5),pos5);
% Giunto 6
modTAU6=abs(TAU(6,:));
[max6,pos6]=max(modTAU6);
[riga6,colonna6]=ind2sub(size(modTAU6),pos6);

maxTAU = [max1 max2 max3 max4 max5 max6];

% Mi dice su quale giunto ho un valore di coppia più vicino
al valore massimo
TAUmaxUR10 = [330 330 150 56 56 56];
diff = TAUmaxUR10-maxTAU;
rapp = maxTAU./TAUmaxUR10;
[minimo,giunto] = min(diff);
MAX = maxTAU(1,giunto); % Quanto vale la coppia

for i=1:6
if rapp(:,i) > 1
    disp('coppie troppo alte')
end
end
```

6.2 Confronto con Tecnomatix

Da Matlab per ogni giunto sono stati ricavati i valori massimi di accelerazione; questi sono poi stati usati per la definizione delle proprietà del robot su Tecnomatix.

Tecnomatix per la pianificazione del moto non usa dei profili di velocità trapezoidali, per cui sono stati ottenuti dei risultati leggermente diversi da quelli ottenuti con Matlab.

Nella tabella 6.4 è riportato il confronto dei tempi ottenuti con Matlab e con Tecnomatix; come si può osservare si ha una differenza totale dei tempi di 0,27 s che è ritenuta accettabile.

	<i>Matlab</i>	<i>Tecnomatix</i>	<i>Differenza</i>
	0,67	0,78	0,11
	0,29	0,35	0,06
	0,45	0,48	0,03
	0,89	0,92	0,03
	0,63	0,67	0,04
t_{TOT}	2,93	3,2	0,27

Tabella 6.4 Confronto dei tempi [s] ottenuti con Matlab e Tecnomatix.

Di seguito è riportato invece il confronto tra i profili di posizione e velocità ottenuti con Matlab e Tecnomatix per ogni tratto del percorso eseguito dal robot per il prelievo e il posizionamento del distanziale.

- Tratto 1 (da p1 a p2):

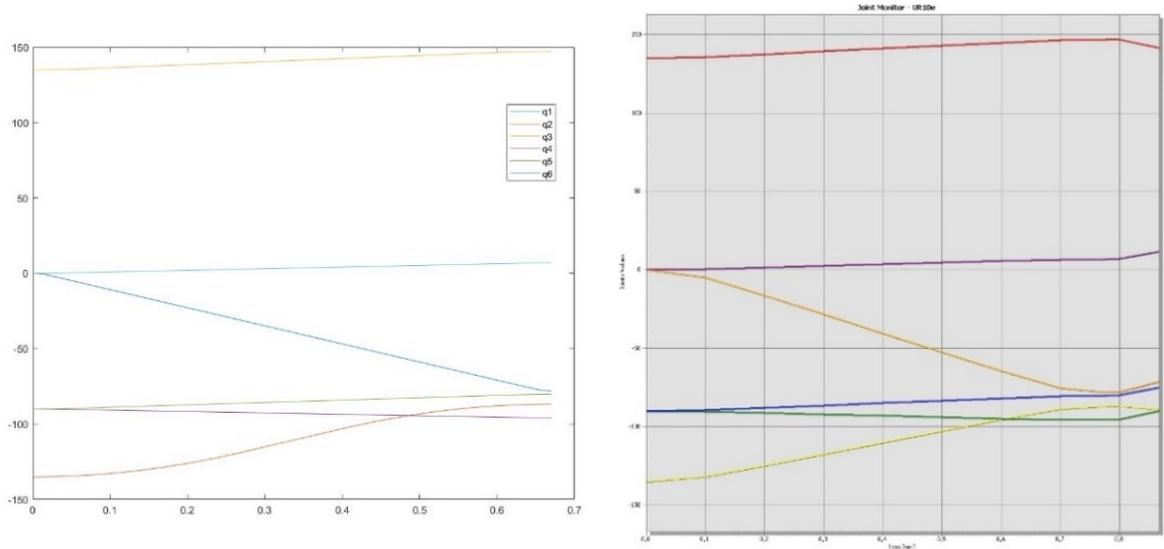


Figura 6.3 Confronto dell'andamento della posizione angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

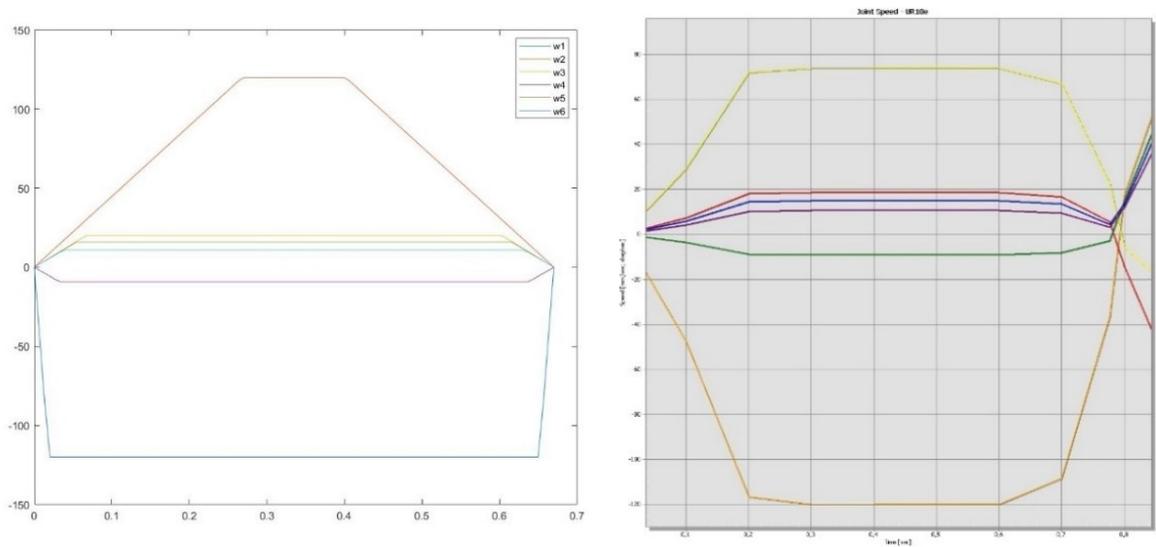


Figura 6.4 Confronto dell'andamento della velocità angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

- Tratto 2 (da p2 a p3):

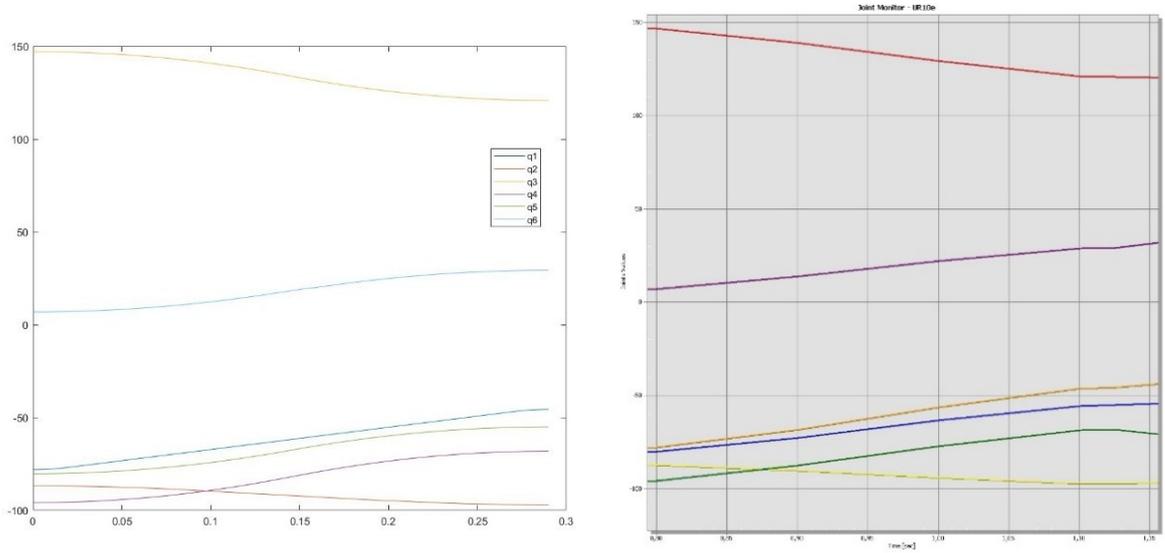


Figura 6.5 Confronto dell'andamento della posizione angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

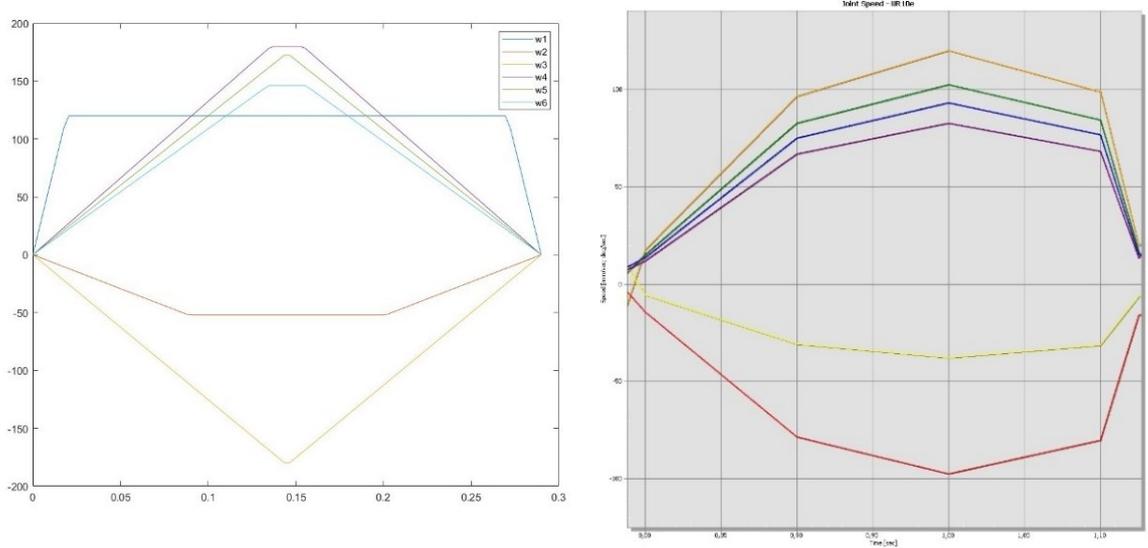


Figura 6.6 Confronto dell'andamento della velocità angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

- Tratto 3 (da p3 a p4):

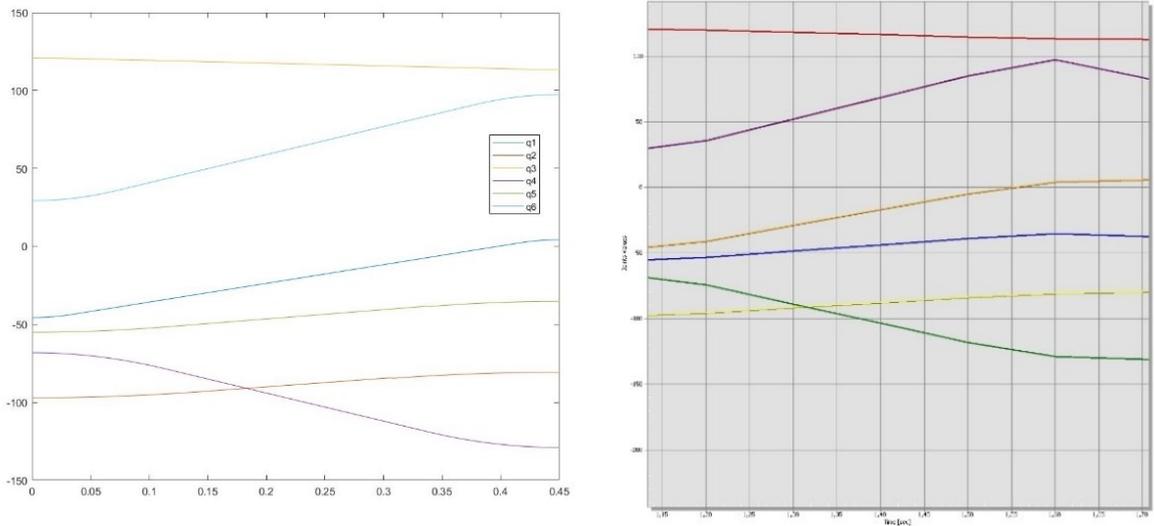


Figura 6.7 Confronto dell'andamento della posizione angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

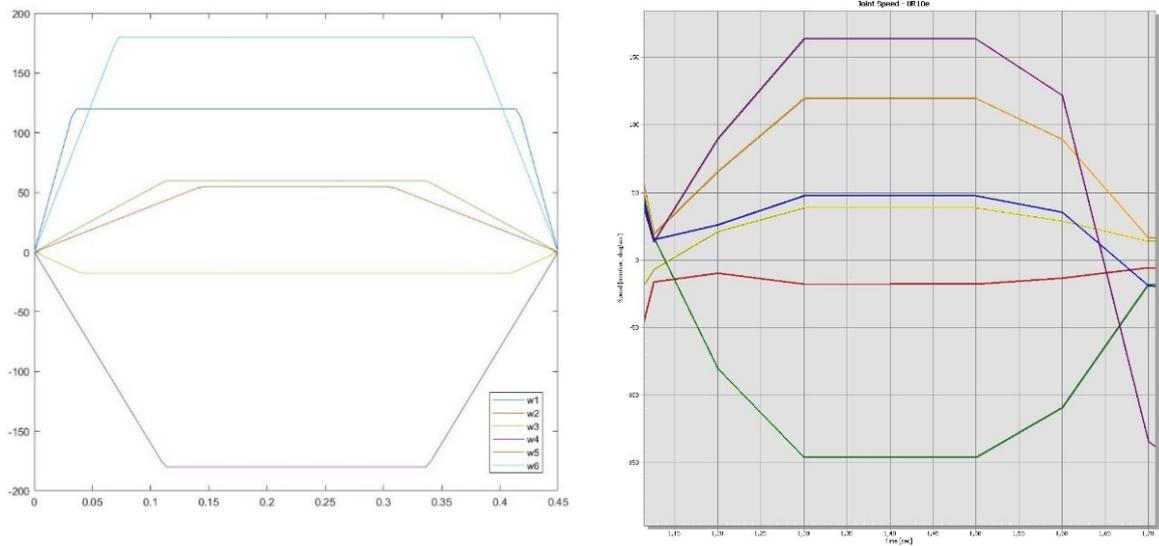


Figura 6.8 Confronto dell'andamento della velocità angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

- Tratto 4 (da p4 a p5):

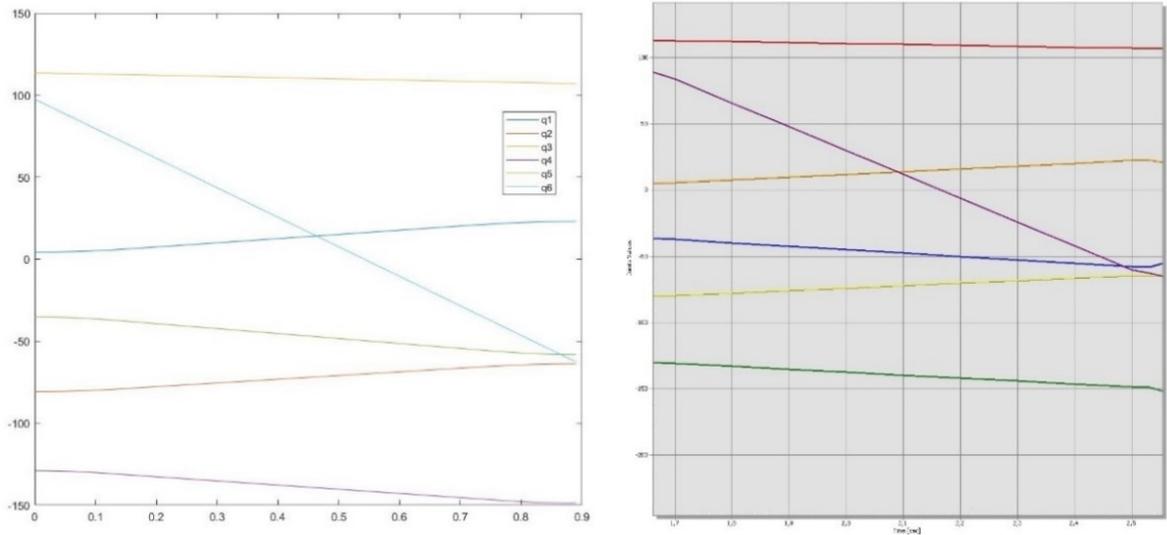


Figura 6.9 Confronto dell'andamento della posizione angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

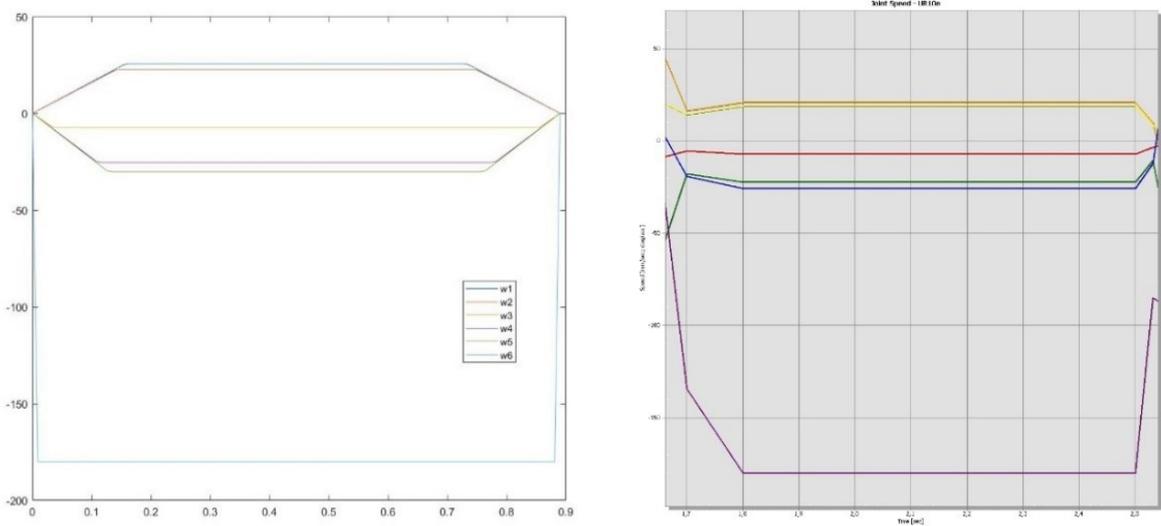


Figura 6.10 Confronto dell'andamento della velocità angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

- Tratto 5 (da p5 a p6):

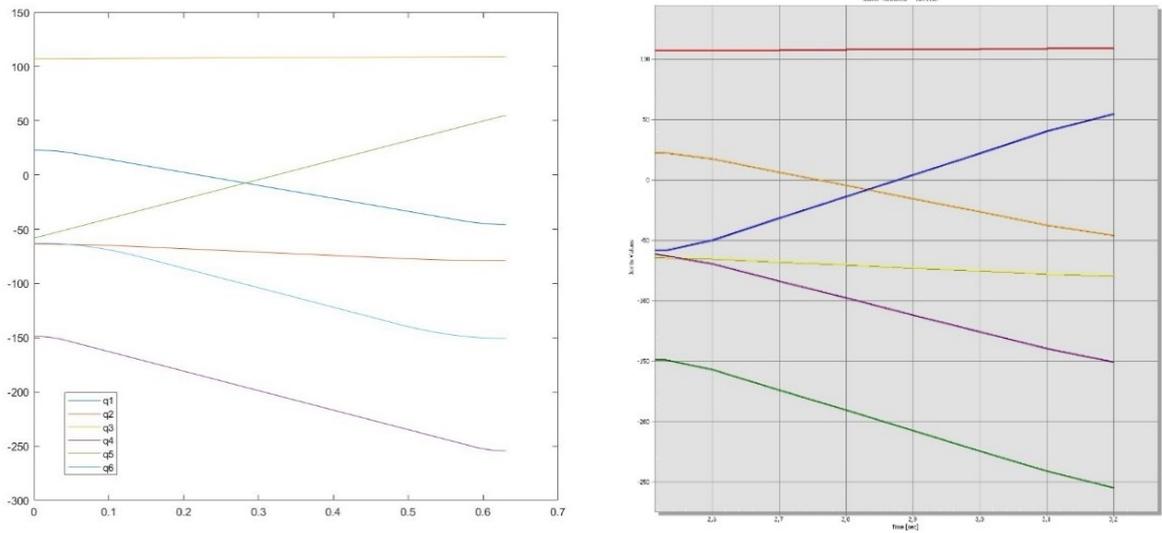


Figura 6.11 Confronto dell'andamento della posizione angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

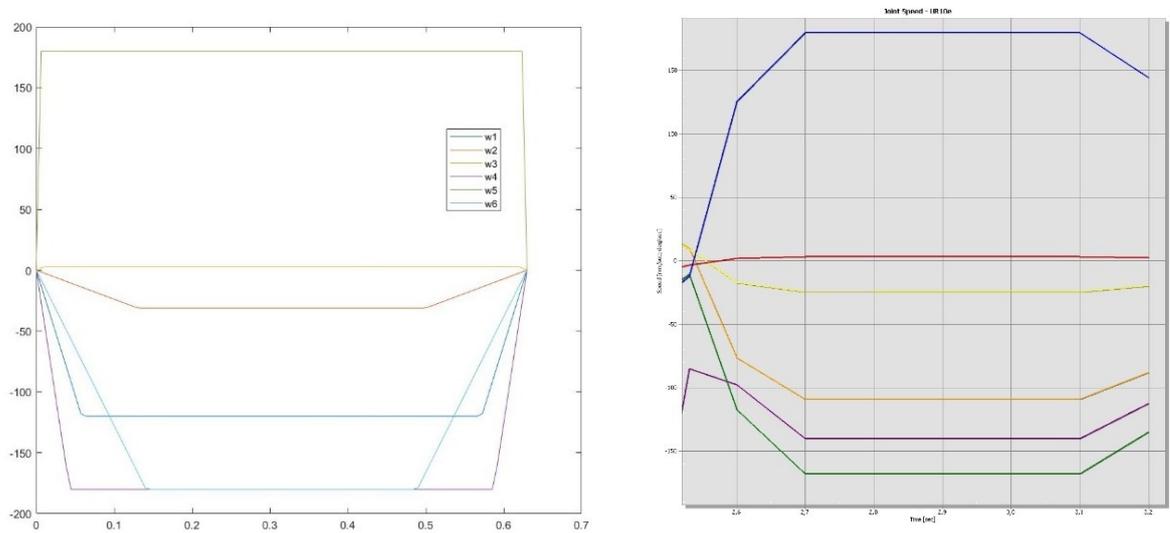


Figura 6.12 Confronto dell'andamento della velocità angolare; Matlab a sinistra e Tecnomatix a destra.

6.3 Ottimizzazione

Il robot collaborativo è stato introdotto per poter avere una riduzione dei tempi di posizionamento dei distanziali sulla macchina rispetto alla soluzione manuale.

Con la soluzione manuale si ha un tempo medio di posizionamento dei distanziali di 16,6 s. Con la soluzione automatizzata appena vista si ha invece un tempo complessivo di posizionamento dei distanziali di 26,11 s (tabella 6.5). È quindi evidente come la soluzione automatizzata così come appena vista non risulta ancora conveniente rispetto alla soluzione manuale.

	<i>Tempi [s]</i>
<i>distanziale 1</i>	3,48
<i>distanziale 2</i>	3,07
<i>distanziale 3</i>	4,3
<i>distanziale 4</i>	3,35
<i>distanziale 5</i>	2,58
<i>distanziale 6</i>	2,56
<i>distanziale 7</i>	3,63
<i>distanziale 8</i>	3,14
<i>t_{TOT}</i>	26,11

Tabella 6.5 Calcolo del tempo che il robot collaborativo impiega per posizionare i distanziali.

È stato quindi necessario pensare ad un'ulteriore ottimizzazione della soluzione con la robotica collaborativa. Non si sono cambiate le condizioni di funzionamento del robot, in quanto quest'ultimo come visto dai capitoli precedenti è stato fatto lavorare alle massime coppie. Si è quindi pensato di poter utilizzare una pinza che possa prelevare e posizionare più distanziali alla volta in questo modo si ha una riduzione dei tempi necessari per passare dalla posizione di posizionamento del distanziale nella macchina a quella di prelievo del distanziale successivo.

Di seguito verranno illustrate tre diverse soluzioni: una con una pinza doppia, una con una pinza tripla e un'ultima con una pinza quadrupla.

- **Pinza doppia:** 2 distanziali alla volta.

	<i>Tempo [s]</i>	<i>Azione compiuta</i>
	3,48	pick and place del primo distanziale
1° e 2° <i>distanziale</i>	0,14	pick del secondo distanziale
	0,33	spostamento
	0,14	place del secondo distanziale
	4,3	pick and place del terzo distanziale
3° e 4° <i>distanziale</i>	0,14	pick del quarto distanziale
	0,33	spostamento
	0,14	place del quarto distanziale
	2,58	pick and place del quinto distanziale
5° e 6° <i>distanziale</i>	0,14	pick del sesto distanziale
	0,33	spostamento
	0,14	place del sesto distanziale
	3,63	pick and place del settimo distanziale
7° e 8° <i>distanziale</i>	0,14	pick dell'ultimo distanziale
	0,33	spostamento
	0,14	place dell'ultimo distanziale
t_{TOT}	16,43	

Tabella 6.6 Calcolo del tempo necessario per il posizionamento degli 8 distanziali nel caso di pinza doppia.



Figura 6.13 Possibile soluzione con doppia pinza.

- **Pinza tripla:** 3 distanziali alla volta. I distanziali sono 8, quindi in uno dei prelievi vengono presi 2 distanziali piuttosto che 3.

	<i>Tempo [s]</i>
1° ,2° e 3°	4,3
<i>distanziale</i>	0,56
	0,66
4° ,5° e 6°	3,35
<i>distanziale</i>	0,56
	0,66
7° e 8°	3,63
<i>distanziale</i>	0,56
	0,66
<i>t_{TOT}</i>	14,94

Tabella 6.7 Calcolo del tempo necessario per il posizionamento degli 8 distanziali nel caso di pinza tripla.

- **Pinza quadrupla:** 4 distanziali alla volta. Questa soluzione è difficile da realizzare con una pinza meccanica (con le griffe) per cui in questo caso si potrebbe pensare di utilizzare una pinza magnetica.

	<i>Tempo [s]</i>
1° ,2°,3° e 4°	4,3
<i>distanziale</i>	0,84
	0,99
5° ,6°,7° e 8°	3,63
<i>distanziale</i>	0,84
	0,99
<i>t_{TOT}</i>	11,59

Tabella 6.8 Calcolo del tempo necessario per il posizionamento degli 8 distanziali nel caso di pinza quadrupla.

Dalle tre soluzioni descritte si può vedere come già con una pinza doppia l'operazione eseguita con la robotica collaborativa diventi competitiva con la soluzione manuale. Inoltre, è possibile osservare come con la soluzione con la pinza tripla si abbia una riduzione del tempo del 10% e come con la soluzione della pinza quadrupla si abbia una riduzione del tempo del 30% .

L'utensile di prelievo dei distanziali non è detto sia una pinza meccanica (a griffe), ma potrebbe ad esempio essere una pinza magnetica realizzata appositamente per il prelievo e il posizionamento dei distanziali nella macchina. Nella figura 6.14 è riportata una possibile soluzione con una pinza magnetica: si ha un sistema a scorrimento che movimentata i distanziali, i quali vengono poi prelevati dall'utensile magnetico montato al robot; l'utensile è poi in grado di ruotare attorno al proprio asse e prelevare più distanziali. Questa soluzione facilita il prelievo e il posizionamento dei distanziali comportando così una maggiore riduzione dei tempi.

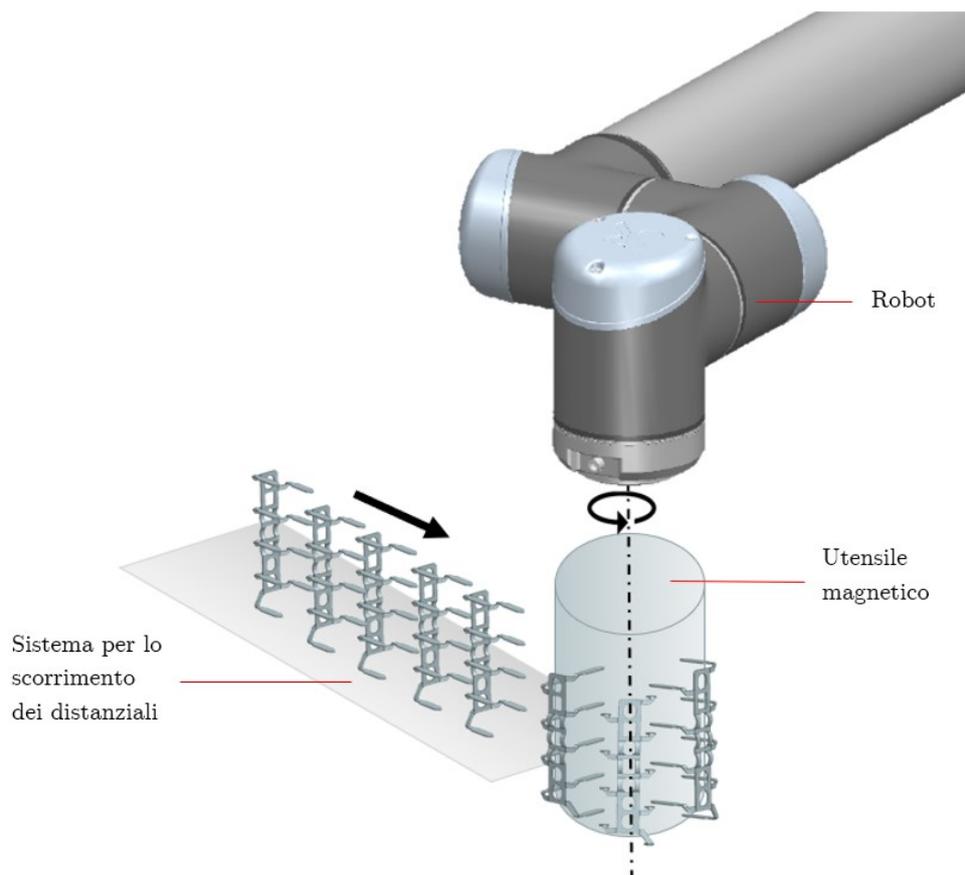


Figura 6.14 Possibile soluzione con pinza magnetica.

Capitolo 7

Conclusioni

Con questo lavoro di tesi si sono avute informazioni riguardo i tempi ciclo delle operazioni, questo ha permesso di determinare quale stazione costituisse il “collo di bottiglia”, poi si è andati ad agire su di essa ottimizzandola. Si sono inoltre avute informazioni riguardo a possibili interferenze e urti (nel posizionamento delle macchine in ambiente virtuale è stata valutata la posizione ottimale delle macchine che potesse evitare di incorrere in tali problemi). Questo ha permesso dunque una compressione dei tempi di sviluppo.

In seguito, si è studiata una possibile ottimizzazione della prima stazione grazie all'introduzione di un robot collaborativo e si è valutata la convenienza della soluzione completamente automatizzata rispetto a quella manuale nella quale i distanziali vengono posizionati dall'operatore e si è visto come già con una pinza doppia l'operazione eseguita con la robotica collaborativa diventi competitiva con la soluzione manuale.

Bibliografia

- [1] Massimo Callegari, Cinematica, *Dispense del corso di “Meccanica delle macchine automatiche” UNIVPM.*
- [2] Lucio Demeio, Elementi di meccanica classica per l'ingegneria – Capitolo 7 Geometria delle masse, *CittàStudi Edizioni*, 2016.
- [3] Matteo Claudio Palpacelli, Fondamenti di dinamica, *Dispense del corso di “Progettazione funzionale” UNIVPM.*
- [4] Matteo Claudio Palpacelli, Pianificazione di traiettorie, *Dispense del corso di “Progettazione funzionale” UNIVPM.*
- [5] Katharina Kufieta, Force Estimation in Robotic Manipulators: Modeling, Simulation and Experiments, The UR5 Manipulator as a Case Study, *Department of Engineering Cybernetics NTNU Norwegian University of Science and Technology*, Gennaio 2014.
- [6] Peter Corke. “Robotics, Vision & Control”, Fundamental algorithms in MATLAB: Second Edition, *Springer*, Giugno 2017.

- [7] Universal Robots e-Series, *User Manual: UR10e*