







UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

---

# **Progettazione di una stazione robotizzata collaborativa per la lucidatura di calzature**

**Design of a collaborative robotic station for shoe polishing**

Tesi di Laurea di:  
**Marco Gallucci**

Relatore:  
**Prof. Ing. Giacomo Palmieri**

A.A. - 2020/2021





UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA MECCANICA

---

# **Progettazione di una stazione robotizzata collaborativa per la lucidatura di calzature**

**Design of a collaborative robotic station for shoe polishing**

Tesi di Laurea di:  
**Marco Gallucci**

Relatore:  
**Prof. Ing. Giacomo Palmieri**

A.A. - 2020/2021

---

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Via Brecce Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy







# Ringraziamenti

*Per prima cosa vorrei ringraziare il professor Palmieri e Giorgia per avermi costantemente seguito in questo percorso di tesi, mostrandosi sempre disponibili nei miei confronti.*

*Ringrazio tutti i miei familiari per avermi sempre appoggiato nella scelta del mio percorso di studi.*

*Ringrazio i miei amici Giacomo, Fabio, Daniele e Dario per aver condiviso con me questa esperienza. Senza di voi non ce l'avrei mai fatta.*

*Infine grazie a te Maria, per avermi supportato e sopportato in questi anni passati insieme. Grazie per essermi stata sempre accanto.*

,

Marco Gallucci



# Abstract

*In the industrial automation field, collaborative robotics represents a very important topic involved in an increasing number of production processes. Collaborative robots, also known as cobots, offer many advantages in terms of flexibility, productivity and safety, that make them ideal for the automation of processes in which normal industrial robots are unable to intervene. This technology makes it possible to enhance the respective strengths of humans and robots in the execution of tasks. Hence the possibility of increasing the level of automation also in those sectors, such as the footwear, in which the quality standards and the level of craftsmanship do not allow the exclusion of an expert operator from the most delicate phases of the process. The following thesis shows the activities carried out during the internship period at the Department of Industrial Engineering and Mathematical Sciences (DIISM) of the Polytechnic University of Marche. The internship consisted in the participation in the preliminary phases of a project, the purpose of which is the implementation of a collaborative cell dedicated to polishing for a well-known footwear company. After an initial introductory part, we proceed with a brief overview of the tool used to perform the various analyzes and simulations, a specific software for the design of robotic stations. Subsequently, the setup of the cell is analyzed, then the elements that compose it, the positioning criteria of the collaborative robot and all the safety aspects regarding the human-robot interaction for which it was also necessary to perform an ergonomic analysis. The next chapter deals with the preliminary design of the polishing end effector, thus starting with the analysis of the manual processing to be emulated, the choice of the appropriate kinematics and the related actuation system, and then dealing with the CAD modeling of the device and its components. After the prototyping of the tool, it was necessary to validate it within the simulation environment, by programming specific processes to verify the reachability of the robot in the execution of the trajectories.*



# Sommario

*Nell'ambito dell'automazione industriale, la robotica collaborativa rappresenta un tema molto importante che sta trovando sempre più applicazione nei processi produttivi. I robot collaborativi, detti anche cobot, offrono numerosi vantaggi in termini di flessibilità, produttività e sicurezza, che li rendono ideali per l'automatizzazione di processi in cui i normali robot industriali non sono in grado di intervenire. Questa tecnologia permette infatti di valorizzare i rispettivi punti di forza di umani e robot nell'esecuzione dei compiti. Nasce quindi la possibilità di aumentare il livello di automazione anche in quei settori, come l'ambito calzaturiero, in cui gli standard di qualità e il livello di artigianalità non permettono l'esclusione di un operatore esperto dalle fasi più delicate del processo. Nella seguente tesi sono mostrate le attività svolte durante il periodo di tirocinio presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche. Il tirocinio è consistito nella partecipazione alle fasi preliminari di un progetto, il cui scopo è l'implementazione di una cella collaborativa dedicata alla lucidatura per una nota azienda calzaturiera. Dopo una prima parte introduttiva si procede con una breve panoramica sullo strumento utilizzato per eseguire le varie analisi e simulazioni, un software specifico per la progettazione di stazioni robotizzate. Successivamente viene analizzato il setup della cella, quindi gli elementi che la compongono, i criteri di posizionamento del robot collaborativo e tutti gli aspetti di sicurezza riguardo all'interazione umano-robot per cui è stato necessario eseguire anche un'analisi ergonomica. Nel capitolo successivo si affronta la progettazione preliminare del terminale di lucidatura, partendo quindi con l'analisi della lavorazione manuale da emulare, la scelta dell'opportuno cinematismo e del relativo sistema di attuazione, per poi trattare la modellazione CAD del dispositivo e dei suoi componenti. Dopo la prototipazione del tool è stato necessario validarlo all'interno dell'ambiente di simulazione, programmando delle lavorazioni apposite per verificare la raggiungibilità del robot nell'esecuzione delle traiettorie.*



# Indice

<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Sommario</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1. Robotica collaborativa . . . . .	1
1.1.1. Standard per operazioni collaborative . . . . .	3
1.1.2. Universal Robots . . . . .	4
1.2. Robotica nell'ambito calzaturiero . . . . .	7
1.2.1. Processo di incollaggio robotizzato . . . . .	7
1.2.2. Lucidatura robotizzata . . . . .	9
1.3. Obiettivo della tesi . . . . .	10
<b>2. Strumenti di simulazione grafica</b>	<b>11</b>
2.1. Metodi di programmazione . . . . .	11
2.1.1. Sistemi grafici computerizzati . . . . .	12
2.2. Tecnomatix Process Simulate . . . . .	14
2.2.1. Costruzione della stazione . . . . .	14
2.2.2. Definizione della cinematica . . . . .	15
2.2.3. Operazioni . . . . .	15
2.2.4. Controllo della stazione . . . . .	18
2.2.5. Analisi ergonomiche . . . . .	18
<b>3. Studio di fattibilità</b>	<b>21</b>
3.1. Setup della stazione . . . . .	21
3.1.1. End-effector . . . . .	23
3.1.2. Struttura di sostegno . . . . .	23
3.1.3. Tavolo di lavoro . . . . .	24
3.1.4. Piedistallo per il posizionamento della calzatura . . . . .	24
3.1.5. Scarpe . . . . .	25
3.2. Operazioni simulate . . . . .	25
3.2.1. Operazioni del robot . . . . .	26
3.2.2. Operazioni dell'uomo . . . . .	27

<b>4. Progettazione preliminare del terminale</b>	<b>31</b>
4.1. Analisi della lavorazione manuale . . . . .	31
4.2. Scelta del cinematismo . . . . .	32
4.3. Scelta del motore elettrico . . . . .	35
4.4. Requisiti generali del dispositivo . . . . .	38
4.4.1. Interfaccia meccanica del robot . . . . .	38
4.5. Modello CAD . . . . .	39
4.5.1. Assieme finale . . . . .	39
4.5.2. Flangia . . . . .	40
4.5.3. Copertura esterna . . . . .	42
4.5.4. Ingranaggio epicicloidale . . . . .	44
<b>5. Simulazioni</b>	<b>47</b>
5.1. Importazione del terminale . . . . .	47
5.2. Test di raggiungibilità . . . . .	49
5.3. Lavorazione generata tramite CAM . . . . .	52
5.4. Risultati . . . . .	55
<b>6. Conclusioni</b>	<b>57</b>
<b>A. Disegni tecnici</b>	<b>59</b>



# Elenco delle figure

1.1. Human-Robot Collaboration . . . . .	2
1.2. Procedura base della valutazione dei rischi (EN ISO 12100) . . . . .	3
1.3. Quattro classi di operazioni collaborative secondo la ISO/TS 15066:2016 . . . . .	4
1.4. Universal Robots e-series . . . . .	5
1.5. Giunti di UR5e . . . . .	6
1.6. Kit SGC (SHUNK) . . . . .	6
1.7. Cella ad estrusore mobile . . . . .	8
1.8. Cella ad estrusore fisso . . . . .	8
1.9. Stazione di lucidatura robotizzata . . . . .	9
1.10. Ridondanza cinematica dovuta alla forma circolare della spazzola . . . . .	10
2.1. Terminale di programmazione (Teach Pendant) . . . . .	12
2.2. Interfaccia di Robot Studio (ABB) . . . . .	13
2.3. Interfaccia di DELMIA Robotics . . . . .	13
2.4. Simulazione in Process Simulate per applicazione automotive . . . . .	14
2.5. Editor cinematico di una pinza per saldature a punti . . . . .	15
2.6. Generica operazione di un robot con tre punti di passaggio . . . . .	16
2.7. Esempio di operazione continua in traiettoria (verniciatura) . . . . .	17
2.8. Pannello di controllo dello Smart place . . . . .	17
2.9. Finestra di creazione del manichino virtuale . . . . .	18
2.10. Simulazione con manichino virtuale . . . . .	19
3.1. Setup della stazione . . . . .	22
3.2. Terminale di prova montato sul robot . . . . .	23
3.3. Struttura di sostegno . . . . .	23
3.4. Flangia base del robot . . . . .	24
3.5. Tavolo di lavoro . . . . .	24
3.6. Piedistallo per il bloccaggio . . . . .	25
3.7. Calzature . . . . .	25
3.8. Operazioni del robot simulate nel software . . . . .	27
3.9. Misure antropometriche di riferimento per il manichino virtuale . . . . .	27
3.10. Criticità nell'interazione con l'operatrice . . . . .	28
3.11. Aree di lavoro del tavolo . . . . .	29
3.12. Simulazione della stazione . . . . .	29

## Elenco delle figure

4.1. Lucidatura eseguita dall'operatore . . . . .	32
4.2. Cinematismo epicicloidale per traiettoria ellittica . . . . .	33
4.3. Applicazione della formula di Willis al caso in esame . . . . .	34
4.4. Anello a dentatura interna e ruota dentata . . . . .	34
4.5. Traiettoria ellittica definita dalle dimensioni degli ingranaggi . . . . .	35
4.6. Motore e riduttore . . . . .	36
4.7. Dimensioni del motore-riduttore . . . . .	37
4.8. Curve caratteristiche ridotte al motore . . . . .	37
4.9. Interfaccia meccanica di UR5e . . . . .	38
4.10. Assieme del tool di lucidatura . . . . .	39
4.11. Tool installato sul robot . . . . .	39
4.12. Vista in sezione parziale del dispositivo . . . . .	40
4.13. Flangia di collegamento . . . . .	41
4.14. Copertura esterna . . . . .	42
4.15. Parti della copertura esterna . . . . .	43
4.16. componenti del meccanismo . . . . .	44
4.17. Albero di uscita del riduttore . . . . .	45
4.18. Accoppiamento albero-disco . . . . .	45
4.19. disco portatreno . . . . .	45
4.20. cuscinetto in tecnopolimero . . . . .	46
4.21. Distanziale . . . . .	46
5.1. Editor cinematico del tool . . . . .	48
5.2. Definizione del dispositivo come tool . . . . .	48
5.3. Setup della stazione . . . . .	49
5.4. Operation tree . . . . .	50
5.5. Lavorazione sulla parte superiore . . . . .	50
5.6. Lavorazione ad altezza intermedia . . . . .	51
5.7. Lavorazione vicino al fondo . . . . .	51
5.8. CAM in NX . . . . .	52
5.9. Prototipo di piedistallo di sostegno della scarpa . . . . .	53
5.10. Stazione di lucidatura . . . . .	54
5.11. Elenco delle operazioni della simulazione . . . . .	54
5.12. Simulazione della lucidatura . . . . .	55
A.1. Copertura esterna A . . . . .	59
A.2. Copertura esterna B . . . . .	60
A.3. Copertura esterna C . . . . .	60
A.4. Copertura esterna D . . . . .	61
A.5. Flangia di collegamento al robot UR5e . . . . .	62

# Elenco delle tabelle

4.1. Parametri qualitativi della lavorazione manuale . . . . .	31
4.2. Ingranaggi scelti da catalogo . . . . .	34
4.3. Parametri calcolati . . . . .	36
4.4. Copertura esterna . . . . .	42



# Capitolo 1.

## Introduzione

Negli ultimi anni, con la necessità di rendere sempre più efficienti le linee produttive, la robotica sta sempre trovando un più ampio utilizzo. Questa tecnologia diffusa ormai da qualche decennio, si sta evolvendo, e un grande passo in questa direzione è stato fatto con l'introduzione della robotica collaborativa, uno dei temi più importanti dell'"industry 4.0". Questa tecnologia offre molteplici possibilità in campo produttivo, perciò crescono sempre di più le applicazioni per la realizzazione di diverse tipologie di prodotti, e quindi aumentare il grado di automazione anche per quei processi in cui i robot industriali "tradizionali" non sono in grado di operare, anche per motivi di sicurezza.

### 1.1. Robotica collaborativa

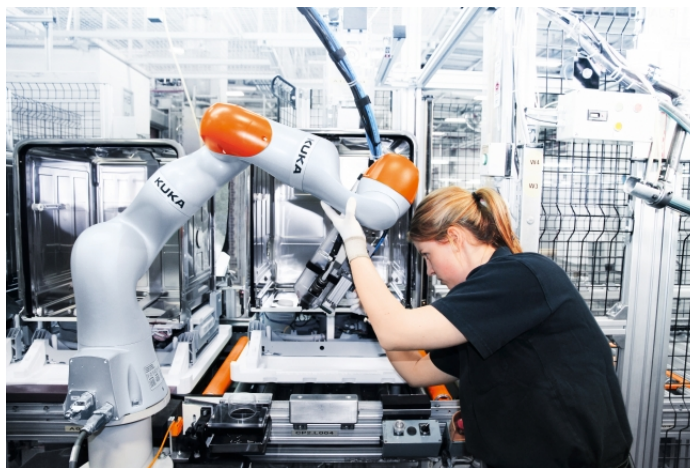
Il termine "Industria 4.0" è diventato noto al pubblico nel 2011, quando un'iniziativa denominata "Industry 4.0" in cui un'associazione di rappresentanti del mondo degli affari, della politica e del mondo accademico promuove l'idea come approccio per rafforzare la competitività dell'industria manifatturiera tedesca [1]. L'industria 4.0 è presentata come una nuova struttura emergente in cui i sistemi di produzione e logistica sotto forma di Cyber-Physical Production Systems (CPPS) utilizzano intensamente la rete di comunicazione disponibile a livello globale per uno scambio di informazioni ampiamente automatizzato e in cui i processi di produzione e aziendali sono collegati tra di loro. Un aspetto essenziale dell'Industria 4.0 sono i metodi di produzione autonomi che utilizzano robot in grado di completare le attività in modo intelligente, con particolare attenzione alla sicurezza, alla flessibilità, alla versatilità e alla collaborazione. Senza la necessità di isolare la sua area di lavoro, la sua integrazione negli spazi di lavoro umani diventa più economica e produttiva e apre molte possibili applicazioni nelle industrie. Nell'Industria 4.0, robot e umani lavorano mano nella mano, per così dire, utilizzando interfacce uomo-macchina intelligenti sensoristicamente avanzate. I robot collaborativi, detti anche cobot, introducono quindi il tema della collaborazione uomo-robot, abbreviato nell'acronimo HRC (Human-Robot Collaboration) [2], che è una possibilità di combinare i rispettivi punti di forza di esseri umani e robot nell'esecuzione di un compito comune. Gli umani con le loro capacità cognitive sono in grado ad esempio di rilevare componenti difettosi, modificare parametri di parti e processi. I vantaggi dei robot sono l'accuratezza, la ripetibilità, la movimentazione di carichi elevati e la resistenza. Alcuni dei vantaggi che possono portare i robot collaborativi sono i seguenti:

## Capitolo 1. Introduzione

- Aumento della produttività e del costo unitario di produzione mantenendo un livello alto di qualità
- Flessibilità del sistema produttivo con costi di investimento contenuti
- Supporto e assistenza agli operatori nelle attività non ergonomiche, limitando anche le operazioni stressanti e ripetitive
- Interfaccia semplice ed intuitiva

Per garantire la sicurezza i robot collaborativi sono dotati delle seguenti caratteristiche:

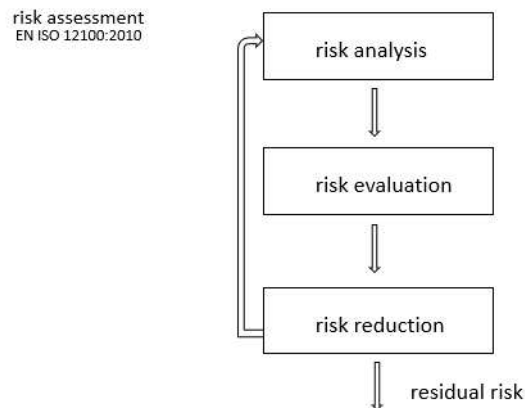
- Ridondanza (di sensori, dispositivi, controllo, etc.)
- Sensori di forza e di coppia
- pelle capacitiva o sensori di prossimità
- limitazioni di forza e di velocità
- Sensori specifici (Sistemi di visione, laser, etc.)
- Membri leggeri e giunti arrotondati o plastificati per la protezione degli operatori in caso di urti
- Assenza di motori, cavi, componenti meccanici o elettronici esposti



**Figura 1.1.:** Human-Robot Collaboration

### 1.1.1. Standard per operazioni collaborative

Per realizzare sistemi produttivi basate sulla HRC, sono necessari opportuni sistemi di sicurezza. Indipendentemente dall'utilizzo o meno della HRC, La realizzazione delle stazioni robotizzate devono seguire gli standard della Direttiva Macchine (2006/42/EC), una direttiva comunitaria di prodotto le cui norme generali sono contenute nella EN ISO 12100, mentre norme più dettagliate sono contenute nella EN ISO 10218-1, per i costruttori dei robot, e nella EN ISO 10218-2, per gli integratori di sistema [2]. La normativa fornisce le linee guida per la valutazione dei rischi (figura 1.2), che comprende una fase iniziale di analisi dei rischi in cui bisogna valutare tutti i possibili comportamenti del robot e degli umani. All'analisi segue la valutazione dei rischi calcolando la probabilità di accadimento di un danno. Infine si esegue la riduzione dei rischi ottenibile mediante la riprogettazione della cella, l'introduzione di misure protettive adeguate e, nel caso fossero ancora presenti rischi residui, la formazione del personale.



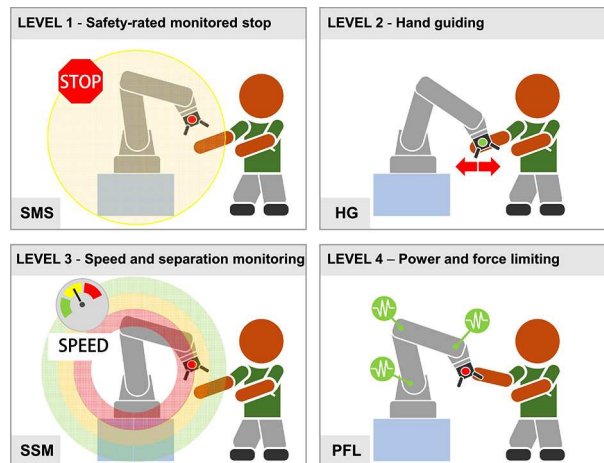
**Figura 1.2.:** Procedura base della valutazione dei rischi (EN ISO 12100)

Riguardo invece all'utilizzo specifico di robot collaborativi, è necessario far riferimento alla ISO/TS 15066. La normativa definisce quattro classi di operazioni collaborative [3]:

- Guida manuale (Hand Guiding): In questo caso l'operatore controlla direttamente il movimento del robot, facendogli percorrere la traiettoria da seguire che viene poi memorizzata dal robot
- Arresto di sicurezza controllato (Safety-Rated Monitored Stop): rappresenta la forma più semplice di HRC, si ha in questo caso che il robot lavora prevalentemente in autonomia ma occasionalmente un operatore umano può entrare nel suo spazio di lavoro, situazione nella quale il robot si arresta temporaneamente fino all'allontanamento dell'operatore
- Monitoraggio della velocità: In questo caso l'ambiente circostante è monitorato da laser o sistemi di visione al fine di tracciare la posizione dei lavoratori. Le zone di sicurezza sono graduate in modo che il robot possa reagire in modo diverso in base alla posizione

dell'operatore. Se un umano entra in una predeterminata zona di sicurezza il robot risponde diminuendo la velocità o fermandosi

- Limitazione di forza e potenza: I robot collaborativi sono in grado di percepire forze applicate alla loro struttura e sono programmati per fermarsi non appena registrano un valore eccessivo di coppia ai giunti, inoltre sono progettati per dissipare la forza in caso di impatto

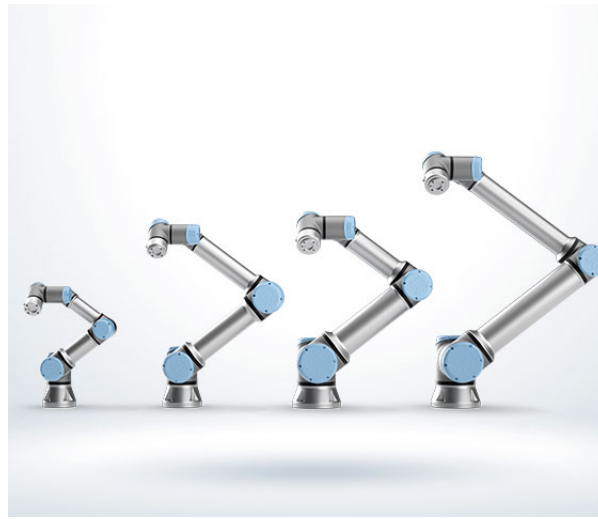


**Figura 1.3.:** Quattro classi di operazioni collaborative secondo la ISO/TS 15066:2016

### 1.1.2. Universal Robots

Universal Robots è un costruttore di robot collaborativi flessibili, facili da programmare e relativamente economici. L'azienda, fondata nel 2005, ha lanciato sul mercato nel corso degli anni tre modelli di robot collaborativi: UR3, UR5 e UR10. Recentemente ha aggiornato i propri prodotti introducendo la serie e (UR3e, UR5e, UR10e, UR16e), dotati di una serie di componenti aggiuntivi che li rendono più versatili, ancora più intuitivi da programmare e con maggiori funzionalità di sicurezza. Nonostante ciò l'architettura e le specifiche tecniche dei robot dell'ultima gamma rimangono le stesse della precedente. Il numero presente nel nome di ogni modello di UR, rappresenta il carico nominale espresso in kg. UR3e è infatti il più piccolo della gamma, si presta perciò per assemblaggi leggeri o comunque di elevata precisione. Viceversa UR10e e UR16e sono più adatti per la manipolazione di utensili o pezzi più pesanti. L'UR5e, presenta le caratteristiche più bilanciate in termini di dimensioni e potenza. Possiede quindi un'elevata versatilità, con un carico nominale di 5 kg e una portata calcolata dal giunto base di 850 mm. Il robot, mostrato in figura 1.5, è un seriale a 6 gradi di libertà, composto dai corpi in alluminio e 6 giunti (base, spalla, gomito e tre giunti del polso PRY). Il cobot ha una massa di 20.6 kg, ogni giunto è caratterizzato da range di posizione angolare di  $\pm 360^\circ$  con una velocità massima sviluppabile di  $180^\circ/\text{s}$  in valore assoluto. La ripetibilità è di  $\pm 0.03\text{mm}$  e il robot può lavorare in un intervallo di temperatura di  $0-50^\circ\text{C}$  [4]. Il robot può essere programmato tramite l'interfaccia Polyscope del teach pendant,



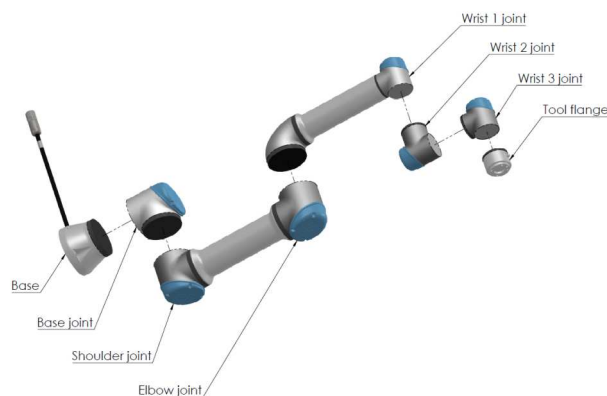


**Figura 1.4.:** Universal Robots e-series

oppure utilizzando l'apposito linguaggio UR script del costruttore. Si può anche programmare in Java, Python, Visual Basic, C++. Tra le varie modalità di apprendimento on-line invece, UR5e può essere movimentato manualmente dall'operatore lungo la traiettoria da eseguire in modo da essere memorizzata dal controllore del robot. Per operazioni collaborative il robot dispone di opportune funzioni di sicurezza per permettere la condivisione degli spazi e l'interazione con gli umani. Le impostazioni di configurazione di sicurezza consentono di configurare tali feature e sono fondamentali per eliminare rischi specifici riportati nella valutazione del rischio effettuata dall'integratore:

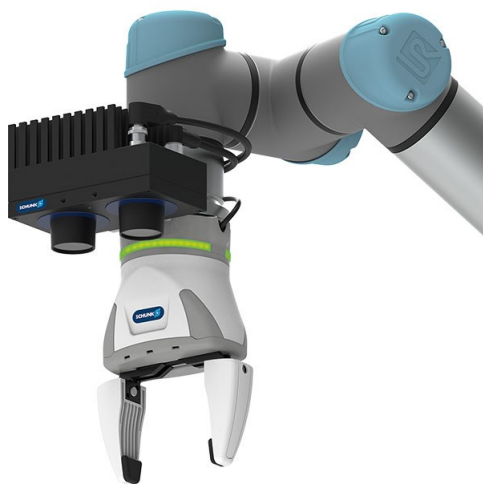
- Limitazione di forza: consente la riduzione di forze di bloccaggio e pressioni esercitate dal robot nella direzione di movimento, in caso di collisione fra robot e operatore.
- Limitazione della quantità di moto: consente la riduzione di elevate energie transienti e forze di impatto in caso di collisione fra operatore e robot, riducendo la velocità di quest'ultimo.
- Limitazione della posizione del giunto, del gomito e dell'utensile/attuatore finale: consente la riduzione di rischi associati a determinate parti del corpo.
- Limitazione dell'orientamento dell'utensile/attuatore finale: utile in particolare per ridurre i rischi associati a determinate aree e caratteristiche di utensili/attuatori finali e pezzi in lavorazione.
- Limitazione della velocità: particolarmente utile per garantire una velocità ridotta del braccio robotico.

Ulteriori funzioni di sicurezza impostabili sono i limiti di posizione dei giunti, i piani di sicurezza, il limite di potenza, il tempo e la distanza limite di arresto. Per l'applicazione del cobot ai vari



**Figura 1.5.:** Giunti di UR5e

processi industriali sono disponibili diversi kit di accessori e periferiche specifici per gli UR, tipo la pinza adattiva ROBOTIQ 2F-85, il kit SGC della SHUNK (figura 1.6), che integra alla pinza un sistema di visione artificiale per il riconoscimento di oggetti, oppure il sistema di avvitatura con alimentazione automatica DEPRAG PLUS.



**Figura 1.6.:** Kit SGC (SHUNK)

## 1.2. Robotica nell'ambito calzaturiero

Per il settore della produzione di calzature, l'industria 4.0 potrebbe significare una maggiore flessibilità ed efficacia nel rispondere al mercato, grazie alla possibilità di accedere ad una grande quantità di informazioni e dati di processo che possono aiutare ad aumentare l'efficienza. Significa anche trovare il giusto equilibrio, grazie alle tecnologie di Industria 4.0, tra conoscenza, abilità artigianali e automazione in nuovi contesti produttivi, che permetterebbe anche alle aziende di riportare nel territorio le fasi di produzione che sono state trasferite all'estero molto tempo fa e un accorciamento della catena produttiva attraverso un ritorno della produzione delocalizzata. L'intera catena del settore manifatturiero della calzatura, dai produttori ai loro fornitori, dai produttori di macchinari e sviluppatori di tecnologie di processo, ai consumatori finali. Grazie alla diffusione della trasformazione digitale che Industria 4.0 sta portando alla vendita al dettaglio, i consumatori potranno avere prodotti più mirati alle loro esigenze, o persino personalizzati, che saranno acquistati in punti vendita che diventeranno sempre più ambienti emozionali, alimentati da nuove tecnologie. Quanto più pervasiva e omogenea diventa questa trasformazione, tanto maggiore sarà il suo impatto sulla catena del valore del settore calzaturiero. In questa sezione vengono mostrati alcuni studi presenti in letteratura scientifica riguardanti l'integrazione di sistemi robotizzati per lo svolgimento di alcune fasi della produzione di calzature. Lo scopo è quello di evidenziare le criticità nell'automatizzare questi tipi di operazioni.

### 1.2.1. Processo di incollaggio robotizzato

In letteratura è presente uno studio riguardante la realizzazione di una cella robotizzata per l'operazione di incollaggio, una delle ultime fasi della produzione e che influisce criticamente sulla qualità del prodotto [5]. In questo caso l'operazione da automatizzare è la deposizione di un'opportuna colla sul bordo della superficie della parte superiore della scarpa. Il materiale adesivo, inizialmente sotto forma di filamento solido, deve essere fuso e depositato tramite un sistema di estrusione di tipologia simile a quella utilizzata nella produzione additiva. Il robot perciò deve seguire un'opportuna traiettoria per l'applicazione della colla su tutta la superficie interessata, generando inoltre una determinata forza di contatto tra i due elementi. Sono stati presi in esame due possibili layout della cella:

- Cella a estrusore mobile: La forma che sorregge la scarpa internamente è fissata alla struttura mentre il robot muove l'estrusore per la deposizione (figura 1.7)
- Cella ad estrusore fisso: L'estrusore è fisso e il robot movimentata forma inserita nella scarpa (figura 1.8)

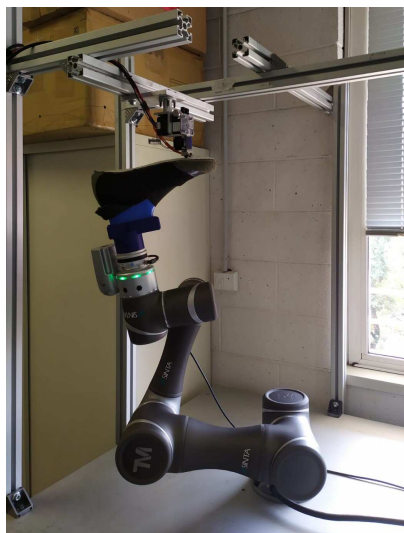
Nel secondo caso il robot potrebbe essere in grado di eseguire altre operazioni oltre a quella di incollaggio, tenendo la scarpa. Il sistema di controllo deve opportunamente controllare la velocità del motore passo-passo che alimenta il filo e la temperatura dell'ugello dell'estrusore, in funzione della velocità di percorrimento della traiettoria da parte del robot. La forza deve essere applicata in direzione normale alla superficie e controllata tramite una cella di carico. La traiettoria è definita

## Capitolo 1. Introduzione

da un numero discreto di punti a cui è associato il vettore di sei componenti che identifica la posizione e l'orientamento del terminale. Una volta definito il percorso nello spazio cartesiano bisogna definirlo nello spazio dei giunti del robot, tenendo conto del suo spazio di lavoro, delle possibili collisioni e dei cablaggi del terminale.



**Figura 1.7.:** Cella ad estrusore mobile

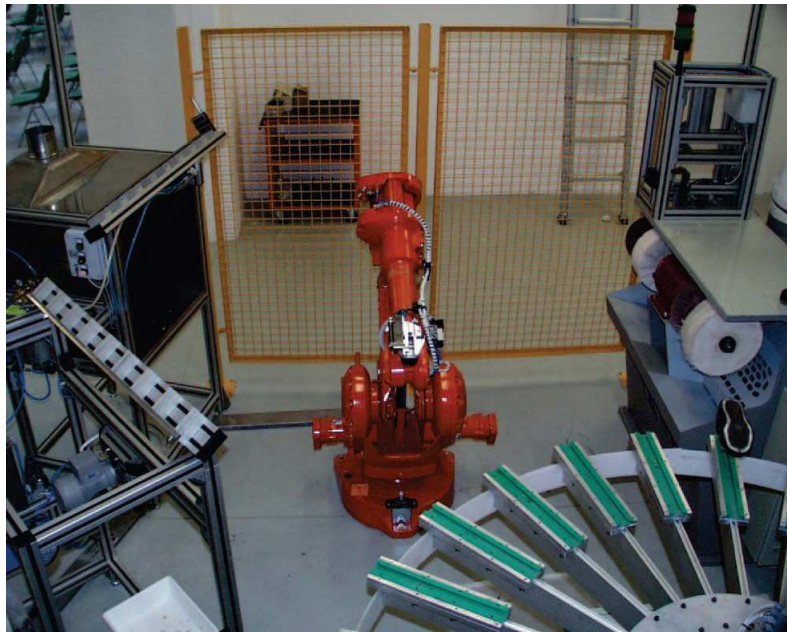


**Figura 1.8.:** Cella ad estrusore fisso

### 1.2.2. Lucidatura robotizzata

in questo studio viene affrontato lo sviluppo di una stazione per la lucidatura, è uno dei pochi presenti in letteratura scientifica [6]. La lucidatura fa parte delle operazioni di finitura e rappresenta l'operazione più complessa da eseguire, la cui esecuzione può variare di molto da produttore a produttore. Automatizzare tale processo presenta notevoli difficoltà, soprattutto perchè la scarpa necessita di ispezione e di ritocchi. D'altra parte i rischi di salute per l'operatore dovuti al contatto diretto con i prodotti chimici necessari, induce alla ricerca di metodi per l'automatizzazione anche di questa fase. Il setup di questa stazione è costituito da:

- Macchina per applicazione del lucido
- Macchina spazzolatrice con unità di applicazione della cera
- Cabina di spruzzaggio dei solventi
- Unità di stoccaggio delle calzature durante il tempo di assorbimento dei prodotti
- Robot industriale ABB 2400/16



**Figura 1.9.:** Stazione di lucidatura robotizzata

La prima operazione eseguita è l'applicazione del lucido, che avviene all'interno dell'apposita macchina in cui una spazzola morbida rotante dotata di un sistema di dosaggio distribuisce il prodotto sulla superficie interessata. Dopo una prima asciugatura di dieci minuti si esegue una prima spazzolatura, il robot quindi movimentata la scarpa mettendola in contatto con la spazzola rotante

applicando una opportuna forza. In seguito la scarpa viene posizionata nella cabina di spruzzaggio e poi fatta asciugare per altri dieci minuti. Infine la calzatura viene lucidata nuovamente ma con una spazzola morbida, per conferire l'aspetto finale. L'operazione di spazzolatura presenta un grado di ridondanza per un robot a 6 assi, dovuto alla forma circolare della spazzola (figura 1.10), ciò introduce la necessità di eseguire un'ottimizzazione della traiettoria.

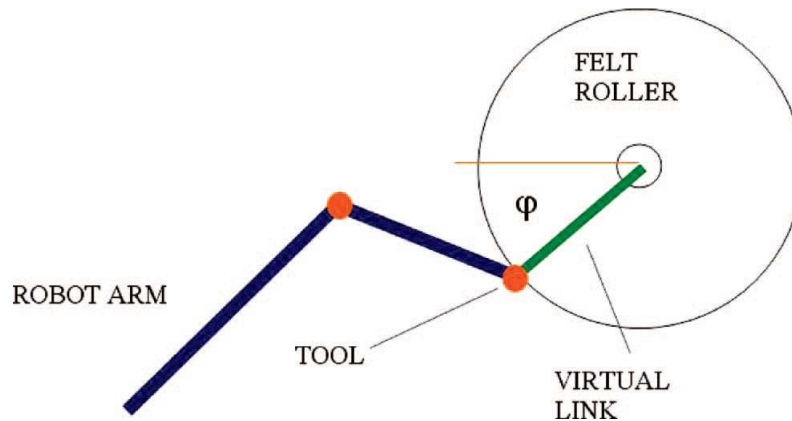


Figura 1.10.: Ridondanza cinematica dovuta alla forma circolare della spazzola

### 1.3. Obiettivo della tesi

Il tirocinio ha consistito nella partecipazione alle fasi iniziali di un progetto, che riguarda lo sviluppo di una cella collaborativa per la lucidatura per una nota azienda nell'ambito calzaturiero. Quest'azienda, che produce calzature di fascia medio alta, sta attuando un processo interno di modernizzazione della produzione nell'ottica dell'industria 4.0. Aumentare il livello di automazione rappresenta sicuramente una sfida per un'azienda del genere, in cui è essenziale mantenere ad un livello elevato la qualità dei prodotti. Questo obiettivo è ancora più difficile da raggiungere se il processo in questione conferisce l'aspetto finale al prodotto e quindi influenza di molto la qualità percepita dal cliente. Le attività descritte in questa tesi riguardano un primo studio di fattibilità tecnica della cella, quindi la scelta di un possibile layout generale, il posizionamento ottimale del robot e la scelta delle soluzioni per garantire nella collaborazione umano-robot. Successivamente si è passati ad una progettazione preliminare del terminale del robot, fino ad una validazione del tool tramite strumenti di simulazione grafica.

## Capitolo 2.

# Strumenti di simulazione grafica

In questo capitolo si vuole offrire una panoramica riguardo al sistema grafico computerizzato utilizzato ampiamente nelle attività di tirocinio. Verrà fatta perciò una breve introduzione sulla natura e sull'applicazione di questo tipo di strumenti, per poi andare più nel dettaglio sulle varie funzionalità utili alla prototipazione virtuale di stazioni robotizzate.

### 2.1. Metodi di programmazione

I principali metodi di programmazione dei robot vengono classificati a seconda che vengano realizzati direttamente sulla macchina o meno. Si distinguono:

- Metodi on-line: Si opera direttamente sul controllore. Il robot viene portato manualmente, o attraverso terminale di programmazione, nelle pose di comando che vengono registrate e utilizzate per la scrittura del programma
- Metodi off-line: Il programma viene generato su un sistema esterno e viene caricato sul controllore solo in un secondo momento; si utilizzano dei linguaggi di programmazione dedicati o degli strumenti di simulazione per la generazione del codice eseguibile
- Programmazione combinata: La programmazione viene spesso ottenuta da una combinazione di procedure on-line (per insegnare pose nello spazio) e off-line (per definire il compito come sequenza di operazioni)

Tra i vantaggi dei metodi on-line si ha la semplicità e il fatto che questo approccio sfrutta la ripetibilità del robot. Di contro si ha un necessario arresto della produzione durante la programmazione, la difficile incorporazione dei dati provenienti dai sensori e la difficile programmazione di operazioni cooperanti. Il punto di forza principale del metodo off-line è la parallelizzazione di programmazione e produzione, richiede però personale specializzato e una fase di testing del programma sul robot reale. La programmazione off-line può essere svolta a sua volta tramite più strumenti:

- Linguaggio macchina
- Linguaggio dello specifico costruttore
- Linguaggio da computer

- Sistema grafico computerizzato



**Figura 2.1.:** Terminale di programmazione (Teach Pendant)

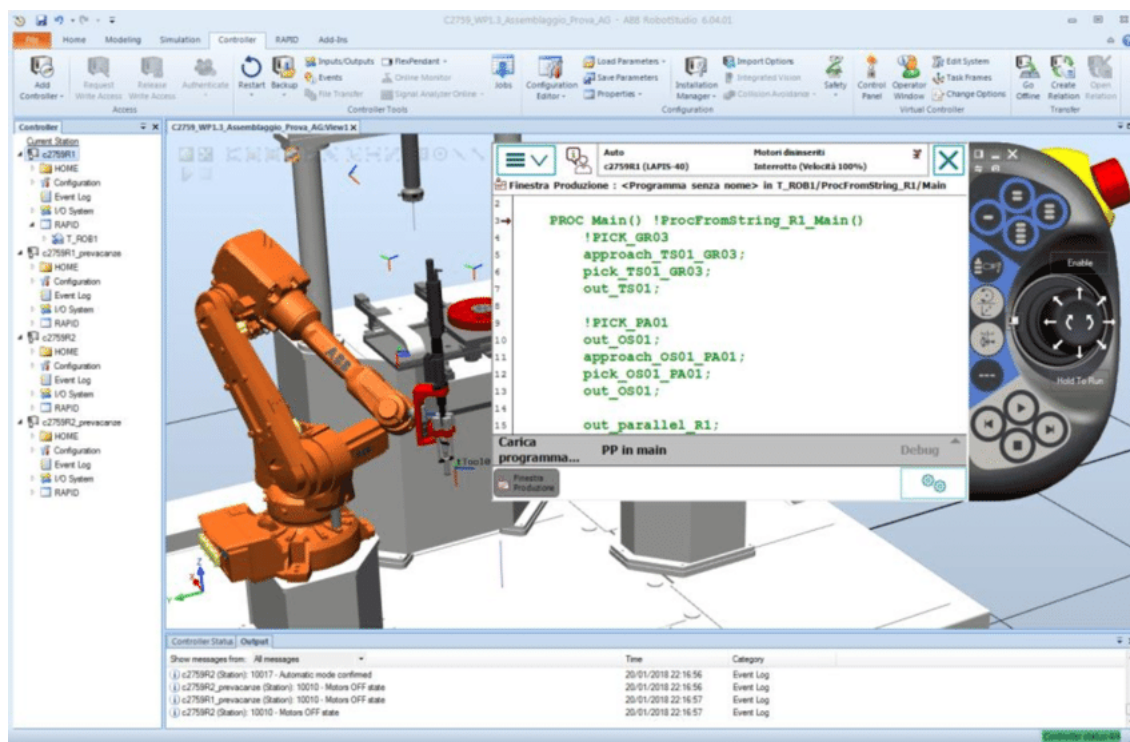
### 2.1.1. Sistemi grafici computerizzati

Questi tipi di software, forniscono un'interfaccia grafica interattiva in cui è possibile costruire virtualmente la stazione, importando i vari elementi dagli ambienti CAD. Una volta scelto e posizionato opportunamente anche il robot, si procede con l'inserimento delle varie pose e traiettorie di comando, verificando inoltre la raggiungibilità, le eventuali collisioni e l'assenza di singolarità cinematiche. Attraverso la logica della stazione è possibile coordinare i movimenti del robot con gli altri elementi della cella, ad esempio con l'apertura o la chiusura della pinza del robot, il movimento di un convogliatore, oppure con gli altri robot eventualmente presenti. Al termine del lavoro su questo tipo di piattaforma, è possibile generare in modo automatico il codice caricabile direttamente sul controllore del robot, che viene poi testato. Si possono citare alcuni software per la simulazione di operazioni robotizzate industriali:

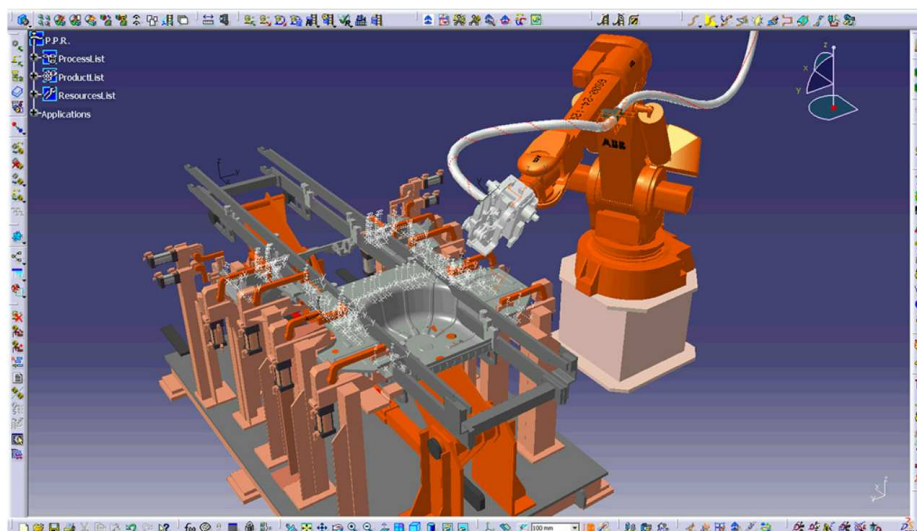
- Robot Studio (ABB)
- DELMIA Robotics (Dassault Systems)
- Tecnomatix Process simulate (Siemens)
- Gazebo (open source)



## 2.1. Metodi di programmazione



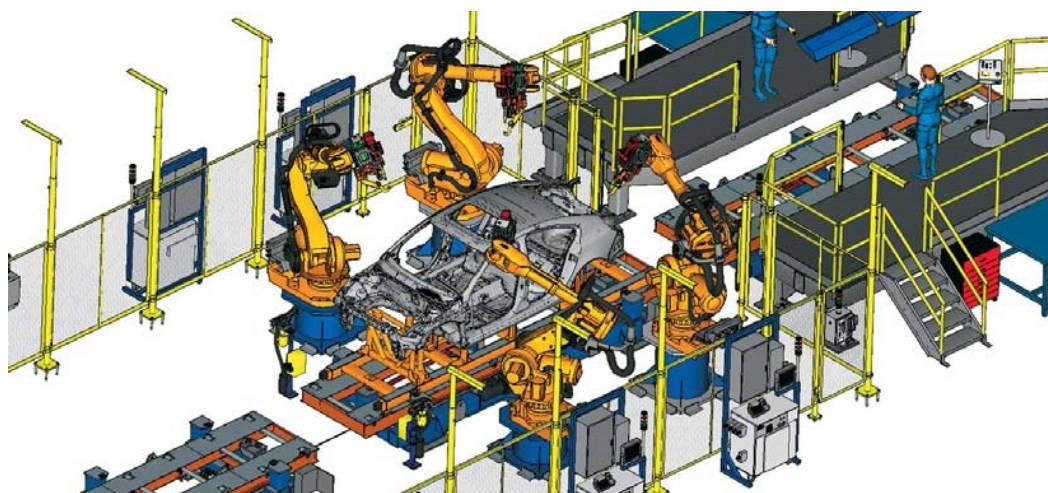
**Figura 2.2.:** Interfaccia di Robot Studio (ABB)



**Figura 2.3.:** Interfaccia di DELMIA Robotics

## 2.2. Tecnomatix Process Simulate

Questo software è il sistema grafico della Siemens utilizzato nelle attività di questa tesi. Si distingue dagli altri ambienti dello stesso genere per il maggior numero di funzionalità, non è infatti semplicemente uno strumento per le applicazioni robotizzate ma si presta per la simulazione di molteplici processi produttivi di elevata complessità. Verranno descritte in questa sezione le principali funzionalità di questo ambiente.



**Figura 2.4.:** Simulazione in Process Simulate per applicazione automotive

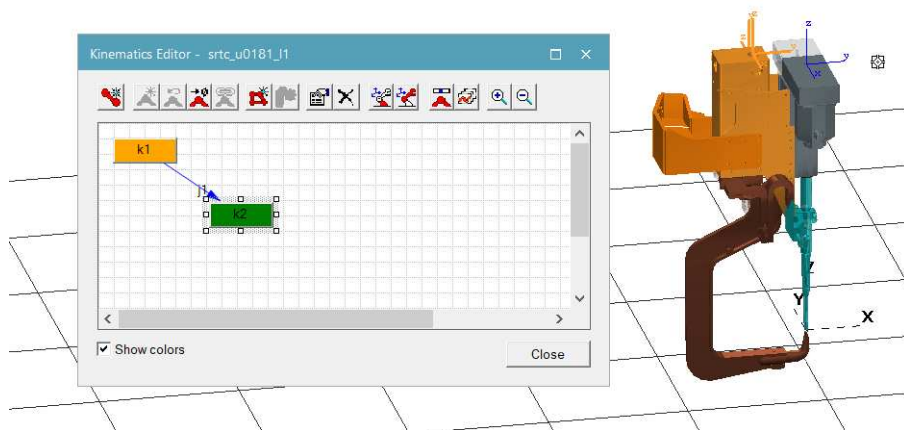
### 2.2.1. Costruzione della stazione

Come prima cosa è necessario inserire nella simulazione tutti gli elementi necessari. Si possono utilizzare modelli CAD creati in ambienti esterni, utilizzando un opportuno convertitore, oppure è possibile modellare oggetti di geometria semplice direttamente in questo ambiente utilizzando appositi strumenti di modellazione. Il software inoltre mette a disposizione una libreria in cui è presente una grande varietà di componenti da poter aggiungere alla stazione. Si prendono infatti dalla libreria elementi come i robot e gli end-effector che il programma mette a disposizione, la cui cinematica è già definita. Un vantaggio di Process Simulate è che in libreria sono presenti i robot dei principali costruttori, a differenza dei programmi degli specifici costruttori che dispongono solo dei propri robot. Il questo programma gli oggetti vengono classificati in due categorie:

- Risorse: Oggetti che servono per il funzionamento della stazione (robot, end-effector, strutture di sostegno, attrezzature, etc.)
- Parti: Elementi che sono l'oggetto della produzione (componenti da assemblare o da lavorare)

### 2.2.2. Definizione della cinematica

Per alcune risorse, può essere necessario definire una cinematica attraverso lo strumento "Kinematics Editor". Si tratta di specificare i movimenti relativi possibili tra i componenti di uno stesso oggetto. Si procede innanzitutto definendo i vari membri (Link) costituiti da uno o più componenti, per poi creare dei giunti (Joint) prismatici o rotoidali. Il giunto è definito dall'asse di rotazione o di traslazione, eventualmente è possibile specificare i limiti di giunto e la dipendenza dal valore di un altro giunto, esprimibile tramite una funzione matematica. Una volta create le relazioni cinematiche, può essere utile creare delle pose, ovvero particolari configurazioni del cinematismo individuate da specifici valori di giunto. Ad esempio per una pinza di un robot, generalmente si definiscono le due pose di apertura e di chiusura.



**Figura 2.5.:** Editor cinematico di una pinza per saldature a punti

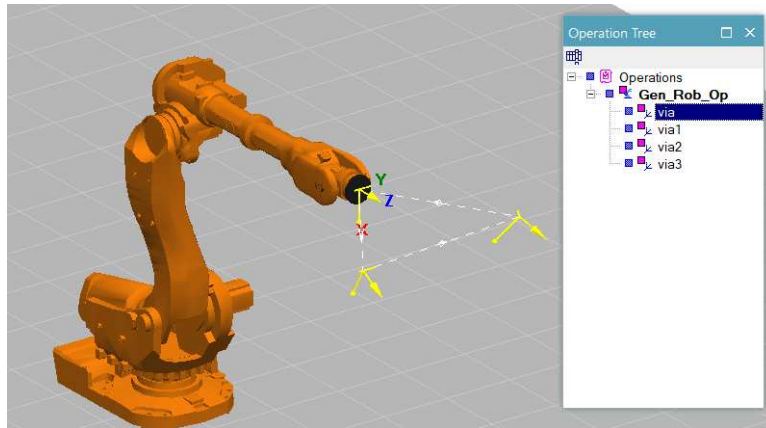
### 2.2.3. Operazioni

Le simulazioni della stazione possono essere eseguite solo creando delle opportune operazioni. Le operazioni possono essere effettuate dai robot, dai manichini virtuali oppure da qualsiasi dispositivo a cui è definita la cinematica. Il software permette di creare differenti tipologie di operazioni per i robot:

- Generic robot operation: Adatta per definire punti di passaggio intermedi tra diverse operazioni
- Weld operation: Specifica per simulare le saldature a punti
- Pick and place operation: Semplice operazione di presa e rilascio di un oggetto, in questo caso il tool del robot deve essere una pinza
- Continuous feature operation: Per operazioni continue in traiettorie, come nel caso della saldatura ad arco o nella verniciatura

- Concurrent robotic operation: Per il coordinamento di due o più robot

Una volta creata l'operazione è necessario creare i punti che deve raggiungere il Tool Center Point (TCP) del robot, le cosiddette "location", identificate ognuna dai 6 valori di posizione e orientamento nello spazio cartesiano. Definendo la corretta sequenza delle location e delle varie operazioni di cui fanno parte, è possibile avviare la simulazione.

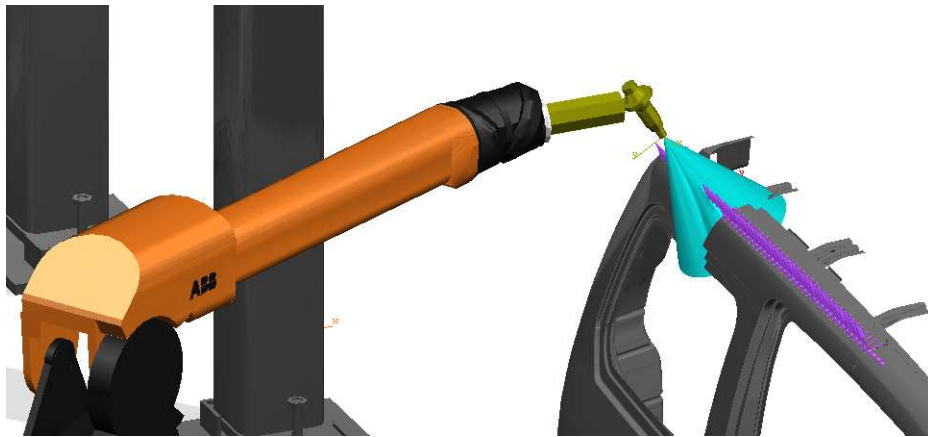


**Figura 2.6.:** Generica operazione di un robot con tre punti di passaggio

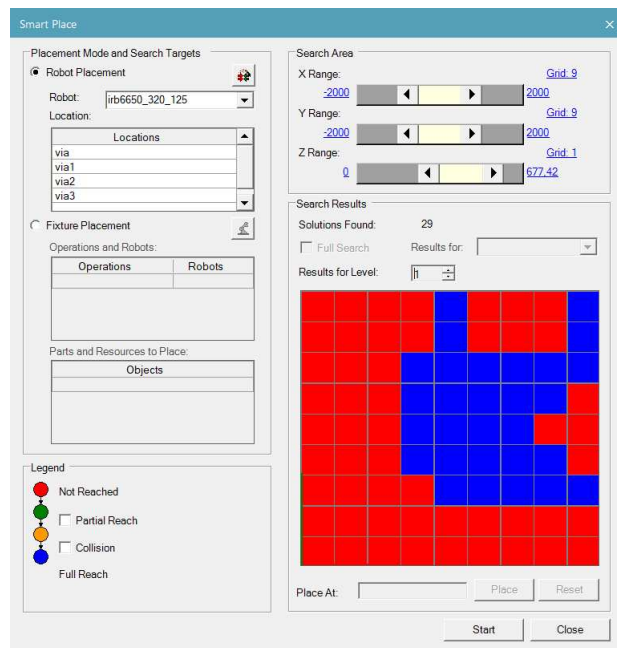
Per le simulazioni utilizzate in questa tesi è stato necessario creare principalmente operazioni di controllo del movimento continuo in traiettoria. La creazione e in modo particolare la verifica della corretta esecuzione di questo tipo di operazioni risulta complicato. Come primo step bisogna definire il percorso che il TCP deve percorrere, si può utilizzare a questo scopo il bordo di un oggetto, una superficie da coprire oppure una curva modellata appositamente sulla superficie di un oggetto. Una volta definita la traiettoria, questa va discretizzata in un numero elevato di punti di passaggio, ovvero di location che il robot deve raggiungere con un determinato orientamento, interpolate da traiettorie lineari. Per determinare l'orientamento delle varie location, è necessario definire quale asse della terna associata deve essere posto in direzione normale alla superficie e quale nella direzione di avanzamento. Il numero dei punti con cui discretizzare la curva deve essere scelto opportunamente, tenendo conto del fatto che un numero troppo esiguo di location può non interpolare correttamente la traiettoria, mentre un numero troppo elevato può creare difficoltà al robot nel raggiungere tutti i punti specificati. Generalmente è facile imbattersi in problemi di singolarità cinematica o di portata del robot, soprattutto nella simulazione di operazioni complesse. Per la risoluzione di questi inconvenienti, bisogna intervenire operando sul posizionamento delle location, sul posizionamento spaziale del robot oppure scegliendo tra le possibili pose del robot. Questo software dispone di alcuni toolbox per la risoluzione di tali problematiche. Una funzionalità molto semplice ma efficace è il "Reach test", che fornisce informazioni sulla raggiungibilità di una location da parte del robot senza dover avviare la simulazione, ciò riduce notevolmente il numero di tentativi di esecuzione del programma senza successo. Uno strumento più avanzato è quello denominato "Smart place" (figura 2.8), il quale determina l'insieme delle posizioni del robot che

## 2.2. Tecnomatix Process Simulate

permettono la corretta esecuzione delle operazioni specificate, all'interno di uno spazio definito. Il computer verifica la qualità del posizionamento del robot per un numero finito di punti appartenenti a questo spazio, il cui livello di discretizzazione viene definito dall'utente.



**Figura 2.7.:** Esempio di operazione continua in traiettoria (verniciatura)



**Figura 2.8.:** Pannello di controllo dello Smart place



### 2.2.4. Controllo della stazione

Precess Simulate, come gli altri software di questo genere, dispone di apposite funzionalità per il coordinamento dei vari dispositivi. Permette ad esempio di creare dei segnali di tipo booleano generati da sensori che, elaborati da opportune operazioni logiche, generano ulteriori segnali che comandano la movimentazione di un convogliatore. Per le applicazioni collaborative si può utilizzare un sensore fotoelettrico in grado di rilevare il passaggio di un operatore e, di conseguenza, mettere in pausa temporanea il robot.

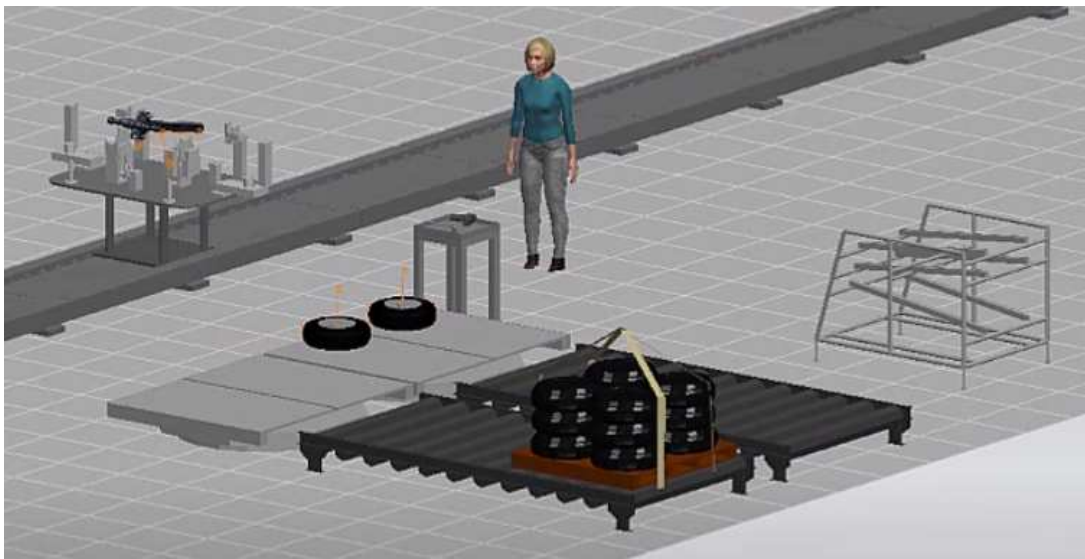
### 2.2.5. Analisi ergonomiche

E' possibile inserire nelle simulazioni dei manichini virtuali, ovvero dei modelli tridimensionali del corpo umano capaci di riprodurre le caratteristiche biomeccaniche e di interagire con l'ambiente virtuale circostante. Nella creazione del manichino, (figura 2.9), è possibile scegliere le caratteristiche antropometriche da vari database messi a disposizione. Selezionando infatti il genere, l'età e i valori percentili di peso e altezza, il software genera un modello con quelle caratteristiche relativo al database di riferimento. In alternativa si può inserire manualmente le misure antropometriche del manichino.

Figura 2.9.: Finestra di creazione del manichino virtuale

## 2.2. Tecnomatix Process Simulate

Il manichino può assumere qualsiasi posa congruente con la sua biomeccanica. Le operazioni che il modello può eseguire sono molteplici, dato che può camminare, afferrare e posare oggetti e manipolare utensili. Impostare correttamente una simulazione non risulta però semplice, a causa del numero elevato di gradi di libertà del corpo umano e della necessità di evitare posture critiche. Si possono inoltre applicare carichi concentrati in specifici punti del manichino, per simulare ad esempio il peso di un oggetto. Il programma è in grado di eseguire autonomamente diverse analisi ergonomiche, riferite sia a posizioni statiche che allo svolgimento di un'operazione, è possibile per esempio generare in output un documento con i risultati dell'analisi RULA, per la postura, o dell'analisi NIOSH, riguardante il sollevamento dei carichi.



**Figura 2.10.:** Simulazione con manichino virtuale





## Capitolo 3.

### Studio di fattibilità

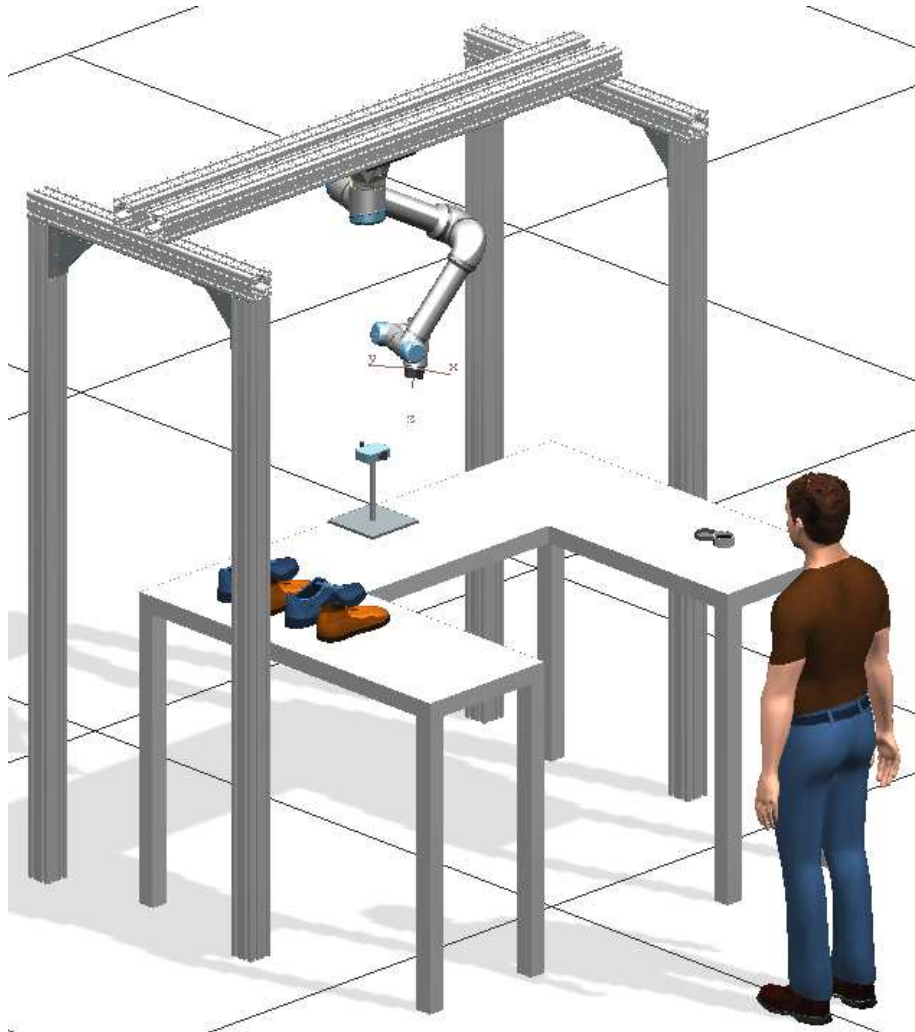
Come prima fase del lavoro è stato eseguito lo studio di fattibilità tecnica della cella collaborativa attraverso l'utilizzo dell'ambiente Process Simulate di Tecnomatix. La seguente trattazione mostra la scelta del setup della simulazione svolta, i dettagli delle operazioni simulate ed esamina il tema della sicurezza nell'interazione uomo-robot.

#### 3.1. Setup della stazione

La stazione di lavoro è composta da:

- Robot UR5e
- Struttura di sostegno del robot costituita da profilati BOSCH
- Tavolo di lavoro
- Piedistallo per il posizionamento della calzatura
- Lucido
- Scarpe

Il layout della cella collaborativa è mostrato in Figura 3.1



**Figura 3.1.:** Setup della stazione

### 3.1.1. End-effector

Un primo modello del terminale del robot utilizzato nella simulazione è riportato in Figura 3.2, con lo scopo di simulare il suo ingombro e contemporaneamente verificare la raggiungibilità del robot sull'intera superficie della scarpa. Il Tool Center Point (TCP) è posto perpendicolarmente alla superficie della scarpa durante l'intera lavorazione.



**Figura 3.2.:** Terminale di prova montato sul robot

### 3.1.2. Struttura di sostegno

La struttura in Figura 3.3 è stata modellata in un ambiente CAD utilizzando dei profilati in alluminio Bosch 90X90L.



**Figura 3.3.:** Struttura di sostegno

Il portale deve contenere una piastra per il montaggio della flangia base del robot (figura 3.4) che va fissata con quattro viti M8 8.8 con una coppia di serraggio di 20 Nm [4]. Nel manuale del robot viene inoltre specificato di montare il robot su una superficie solida e priva di vibrazioni in grado di sopportare almeno dieci volte la coppia piena sviluppata dal giunto di base (150 Nm) ed almeno cinque volte il peso del braccio robotico.

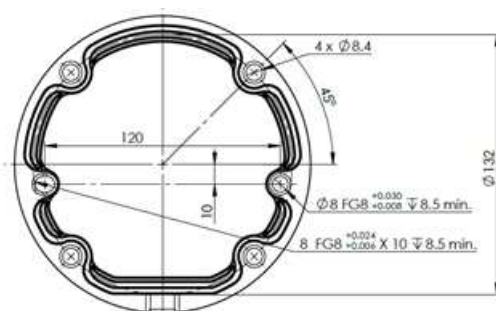


Figura 3.4.: Flangia base del robot

### 3.1.3. Tavolo di lavoro

Il tavolo di lavoro, mostrato in Figura 4, è stato pensato con una cavità per garantire una maggior sicurezza dell'operatore durante l'intera durata della lavorazione. Si è pensato, inoltre, di inserire delle apposite fotocellule all'ingresso della cavità in grado di rilevare la presenza dell'operatore e istantaneamente ordinare lo stop momentaneo del robot. In questo modo, quando l'operatore è dentro la zona interessata il robot è in pausa. Questo riprenderà il lavoro solo quando l'operatore sarà fuori dall'area coinvolta dalle fotocellule. Il tavolo di lavoro è 1050 mm x 1800 mm x 1300 mm (a x l x p). La concavità ha una forma quadrata di dimensioni 1050 mm x 800 mm x 800 mm (a x l x p), ma potrebbe avere anche una forma più arrotondata.

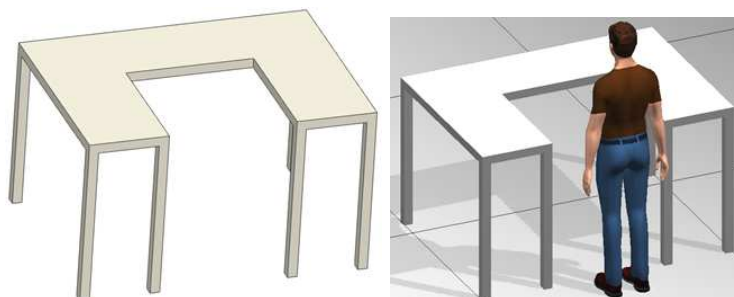
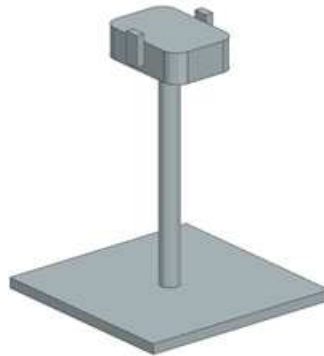


Figura 3.5.: Tavolo di lavoro

### 3.1.4. Piedistallo per il posizionamento della calzatura

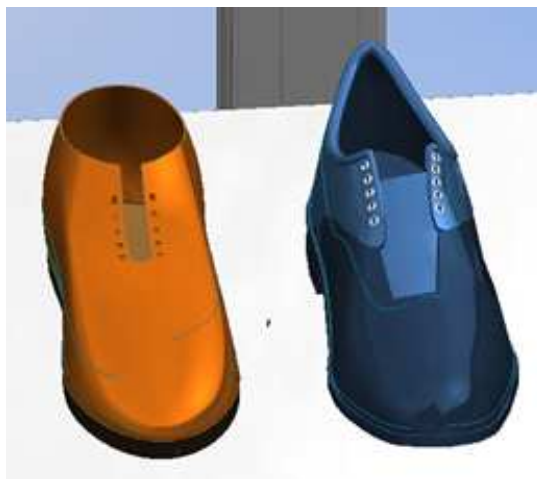
Il piedistallo mostrato in Figura 3.6 è un modello utilizzato esclusivamente per la simulazione. In esso non è stato realizzato alcuno studio sulla sua efficacia di presa. L'unica osservazione fatta per il piedistallo è stata quella di calcolare una distanza ottimale tra la sua superficie superiore e l'end-effector (1000mm) per permettere il raggiungimento del TCP in tutti i punti d'interesse della calzatura senza che il robot stia in posizione anomala. Questo elemento è stato anche provvisto di un sistema di chiusura ideale per mantenere ferma la scarpa.



**Figura 3.6.:** Piedistallo per il bloccaggio

### 3.1.5. Scarpe

Sono stati utilizzati due generici modelli differenti di calzatura per le simulazioni, uno di taglia media e uno di taglia grande non Santoni. (Figura 3.7).



**Figura 3.7.:** Calzature

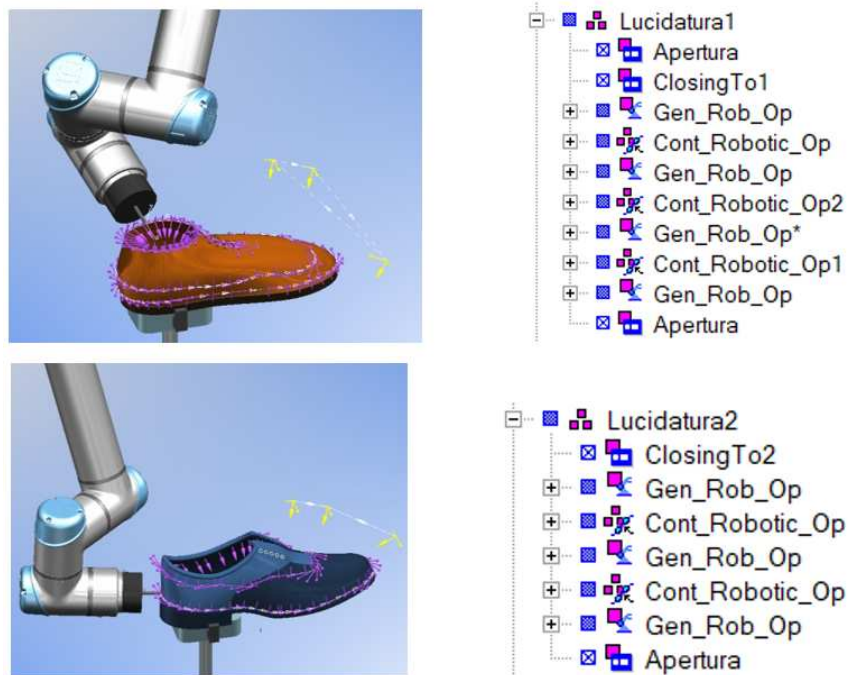
## 3.2. Operazioni simulate

Il software ha permesso la simulazione della stazione di lucidatura illustrata in precedenza. Sono state perciò programmate delle operazioni, in parte eseguite dal robot e in parte da un operatore virtuale, appropriatamente sequenziate per simulare la lavorazione di due esemplari per ogni modello di scarpa (quattro parti in totale). L'operatore ha il compito di posizionare una alla volta le scarpe sul piedistallo in modo da poter essere lavorate dal robot. Mentre l'UR5e esegue

l'operazione l'operatore lucida manualmente un'altra calzatura. A fine simulazione si ha che due scarpe sono state lavorate dal robot e due dall'operatore. In seguito sono riportati i dettagli dei path del robot e delle operazioni dell'uomo.

### 3.2.1. Operazioni del robot

Il robot esegue la lucidatura facendo dei percorsi che coprano l'intera superficie della calzatura interessata alla lavorazione, deve seguire perciò dei path che facciano in modo che il Tool Center Point dell'utensile sia in continuo contatto con la scarpa. Il robot deve perciò eseguire un sufficiente numero di traiettorie curvilinee per poter lavorare la zona interessata. Allo scopo di facilitare la movimentazione del robot e la programmazione, che deve essere specifica per ogni prodotto, è stato pensato di suddividere la lavorazione in una serie di traiettorie ricavate da delle curve chiuse. Queste curve sono giacenti su piani paralleli al tavolo, la lavorazione complessiva perciò è segmentata in più percorsi a differenti livelli di altezza. In questo modo il robot esegue ogni path girando attorno alla scarpa, ciò rende semplice l'esecuzione della traiettoria. Ovviamente tra una traiettoria e la successiva il robot passa per dei target di passaggio, opportunamente posizionati nei pressi dei punti di inizio/fine lavorazione. Per creare i path appena descritti nel software, è bastato semplicemente ricavare delle opportune curve sulla superficie delle calzature che sono servite da input per la generazione di una lavorazione continua per ognuna di esse. Essendo le curve considerate dal software come qualcosa di appartenente alla scarpa, fa sì che anche le traiettorie generate fanno parte di essa, operando in questo modo quindi ogni path è specifico per ogni calzatura. In questa fase dello studio non sono state generate tutte le traiettorie necessarie per la lavorazione, ma solamente quella relativa alla parte superiore e alla parte inferiore del prodotto. La corretta esecuzione di questi path garantisce anche l'eseguibilità delle traiettorie poste ad altezza intermedia tra queste due. Questa scelta è stata fatta per ridurre il tempo di simulazione. In figura 3.8 sono mostrati i path delle lavorazioni per i modelli di scarpe e i vari target di passaggio, per il primo modello è stata inserita anche una traiettoria ad altezza intermedia. Come si può vedere il programma discretizza la lavorazione continua con un elevato numero di percorsi lineari individuati da target intermedi, orientati in modo da mantenere l'asse z del TCP perpendicolare alla superficie.



**Figura 3.8.:** Operazioni del robot simulate nel software

### 3.2.2. Operazioni dell'uomo

Per valutare il livello di sicurezza e di ergonomia delle operazioni da eseguire, inizialmente sono stati presi in considerazione nella simulazione più operatori con diverse caratteristiche fisionomiche, in particolare il genere, l'altezza e il peso. I dati utilizzati in questa fase sono quelli esposti in figura (3.9). Sono stati presi in considerazione solamente uomini e donne di provenienza CENTRO-NORD, di età compresa tra i 35 e i 49 anni con combinazioni di altezza e peso di 50 e 95 percentile. Questo studio è stato fatto inizialmente utilizzando un tavolo di lavoro rettangolare, e ponendo

1. PESO				1. STATURA (ALTEZZA CORPOREA)			
definizione: massa totale (peso del corpo in Kg)				definizione: distanza verticale dal pavimento al vertice del capo (mm)			
		Età				Età	
		18-34	35-49			18-34	35-49
Percentile				Percentile			
50*	Uomini	72	75	50*	Uomini	1755	1725
	Donne	55	59		Donne	1630	1601
95*	Uomini	89	93	95*	Uomini	1872	1839
	Donne	67	65		Donne	1728	1695

**Figura 3.9.:** Misure antropometriche di riferimento per il manichino virtuale

uno alla volta i vari operatori vicino ad esso. È stato notato che in questo modo il braccio del

robot passa molto vicino agli operatori rischiando una pericolosa collisione. Non è stato possibile risolvere questo problema semplicemente allargando il tavolo poiché nel fare ciò si va a limitare di molto l'ergonomia nell'operazione di posizionamento della scarpa sul piedistallo, soprattutto per un'operatrice di altezza 50 percentile (figura 3.10). Questa considerazione ha portato ad adottare la geometria del tavolo illustrato in precedenza e il sistema di sicurezza per mettere in pausa il programma del robot quando l'operatore entra nella zona di ingresso. Per la simulazione definitiva



**Figura 3.10.:** Criticità nell'interazione con l'operatrice

dello studio di fattibilità è stato utilizzato solamente un manichino di 50 percentile di altezza e di peso. La sequenza delle operazioni eseguite dall'operatore è la seguente:

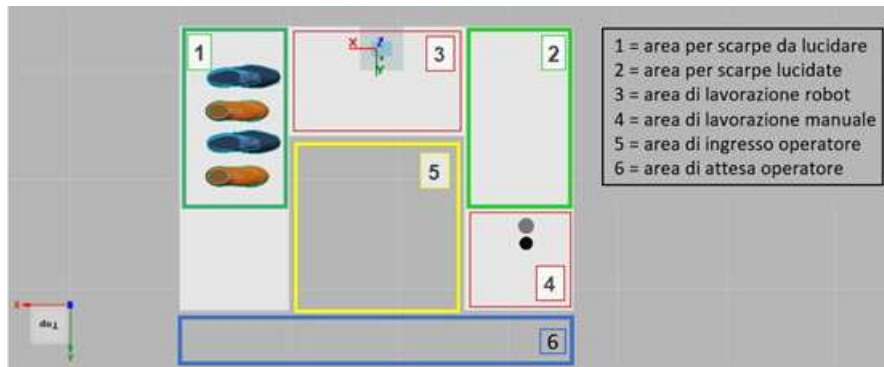
1. L'operatore entra nell'area 5 e posiziona la scarpa da lucidare sul piedistallo nella zona 3
2. Il robot esegue una prima lucidatura mentre l'operatore attende nella area 6
3. Quando l'operatore è soddisfatto della lucidatura entra nella zona 5, preleva la scarpa dal piedistallo e la sostituisce con una da lucidare
4. L'operatore esce dall'area 5 e si posiziona nell'area 4 per ultimare la lucidatura manualmente
5. L'operatore poggia la scarpa lucidata nella zona 2 e torna nella zona 6 attendendo la fine del lavoro robotico

Queste operazioni si ripetono ciclicamente fino al termine delle calzature da lucidare.



### 3.2. Operazioni simulate

In figura 3.11 sono visibili le diverse aree di lavoro.



**Figura 3.11.:** Aree di lavoro del tavolo

Come impostato nel software, quando l'operatore entra nella zona d'ingresso del tavolo, ad esempio per posizionare nell'area predisposta una scarpa lucidata da lui o dal robot, l'UR5e viene messo in pausa dal segnale proveniente dal sensore fino all'uscita dalla zona. In figura 3.12 sono visibili alcune immagini relative alla simulazione della stazione.



**Figura 3.12.:** Simulazione della stazione



## Capitolo 4.

### Progettazione preliminare del terminale

In questo capitolo sono riportati i dettagli della progettazione funzionale dell'end-effector da dover collegare al robot, in particolare riguarda come sono state eseguite le fasi preliminari dello sviluppo del dispositivo partendo dai vincoli di spaziali e di processo. Si è partiti perciò da un'analisi di tipo visivo del processo eseguito manualmente per poi scegliere il cinematismo opportuno per emulare l'operazione, il tipo di attuatore elettrico da adottare ed infine è stata eseguita una modellazione CAD del dispositivo. Il seguente studio ha l'obiettivo di individuare gli step chiave per una prima progettazione, in modo da ottenere un prototipo che tenga conto dei vari requisiti funzionali del dispositivo e che rappresenta la base di partenza per una progettazione più dettagliata.

#### 4.1. Analisi della lavorazione manuale

Il primo passo è stato quello di analizzare il processo di lucidatura eseguita manualmente dall'operatore (figura 4.1). Nella lucidatura manuale, l'operatore inizialmente avvolge una o due dita in un panno di cotone e preleva una certa quantità di lucido, dopodiché esegue la lavorazione vera e propria cioè l'applicazione del lucido alla superficie della scarpa. La distribuzione del prodotto viene eseguita con movimenti di forma approssimativamente ellittica con la punta del dito, applicando una certa pressione alla scarpa. Dall'analisi visiva della lavorazione manuale è stato possibile dare una stima ai valori dei parametri di processo (Tabella 4.1).

**Tabella 4.1.:** Parametri qualitativi della lavorazione manuale

Asse maggiore dell'ellissa [mm]	30÷50
Frequenza [Hz]	3.5
Forza normale alla scarpa [N]	4.9

Questi parametri sono stati di fondamentale importanza per la scelta del cinematismo e del relativo attuatore. Anche se sono solo dei valori stimati e approssimativi, sono una base di partenza per un calcolo ingegneristicamente accettabile delle varie grandezze in gioco.



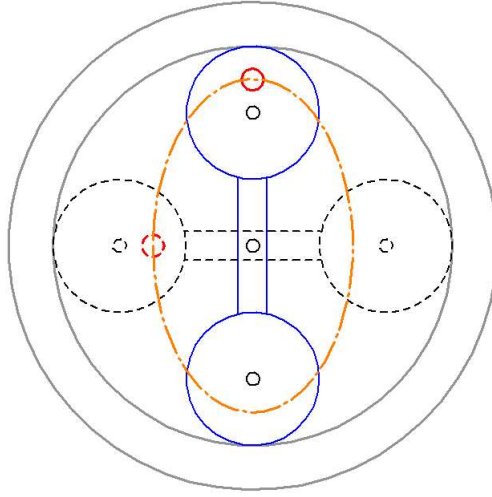
**Figura 4.1.:** Lucidatura eseguita dall'operatore

## 4.2. Scelta del cinematismo

Note le caratteristiche del processo da simulare, il passo successivo è stato quello di scegliere un opportuno meccanismo per emulare l'operazione manuale. L'idea è stata quella di movimentare un'asta con una testina all'estremità, che assume lo stesso ruolo del dito dell'operatore, facendole compiere una traiettoria ellittica sulla superficie della scarpa. Il cinematismo deve essere ad un grado di libertà e deve convertire il movimento rotatorio di un motore elettrico in un movimento ellittico. Tra le varie soluzioni possibili è stato scelto di adottare un meccanismo ad ingranaggio epicicloidale, per la relativa semplicità realizzativa e per il fatto che questa soluzione garantisce un migliore bilanciamento statico del meccanismo. In figura 1 sono mostrati i vari componenti di questo cinematismo che sono in particolare:

- Anello esterno
- Portatreno
- Satelliti
- Testina

In questo caso il portatreno è il movente, quindi il corpo movimentato dal motore. La testina, posizionata su uno dei due satelliti, descriverà una determinata traiettoria nel piano normale all'asse di rotazione del portatreno, la cui forma dipende dal punto di posizionamento della testina sulla faccia frontale della ruota satellite e dai rapporti di trasmissione del meccanismo. Una schematizzazione della traiettoria che si vuole ottenere è visibile in figura 4.2. Per dimensionare



**Figura 4.2.:** Cinematismo epicicloidale per traiettoria ellittica

il meccanismo è stato necessario calcolare l'opportuno rapporto di trasmissione tramite la formula di Willis [1], la cui espressione generale è la 4.1.

$$\tau = \frac{z_1}{z_2} = \frac{\omega_2 r}{\omega_1 r} = \frac{\omega_2 - \omega_p}{\omega_1 - \omega_p} \quad (4.1)$$

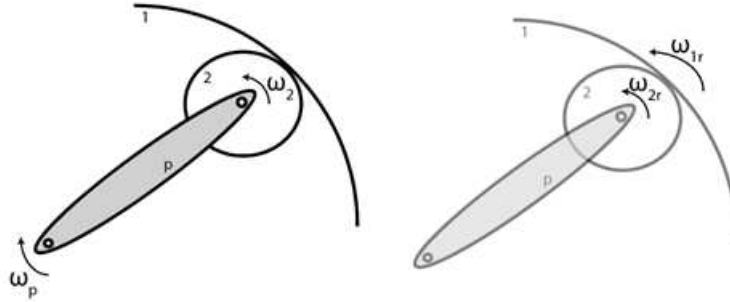
Dove:

- $\tau$  = Rapporto di trasmissione
- $z_1$  = numero di denti dell'anello esterno
- $z_2$  = numero di denti della ruota satellite
- $\omega_1$  = velocità angolare assoluta dell'anello esterno
- $\omega_2$  = velocità angolare assoluta della ruota satellite
- $\omega_p$  = velocità angolare assoluta del portatreno
- $\omega_1 r$  = velocità angolare relativa dell'anello esterno
- $\omega_2 r$  = velocità angolare relativa della ruota satellite

Nel caso in esame  $\omega_1 = 0$  poiché l'anello esterno è fisso. La 4.1 diventa quindi la 4.2:

$$\omega_p = \omega_2 \frac{1}{1 - \frac{z_1}{z_2}} \quad (4.2)$$

Ponendo  $\omega_p = -\omega_2$  (condizione necessaria per il moto ellittico), è possibile ricavare il rapporto di trasmissione  $\tau = 2$ .



**Figura 4.3.:** Applicazione della formula di Willis al caso in esame

Tenendo conto dell'intervallo di valori ammissibili per la dimensione dell'asse maggiore dell'ellisse, sono stati scelti l'anello a dentatura interna e le ruote dentate da catalogo (tabella 4.2).

**Tabella 4.2.:** Ingranaggi scelti da catalogo

componente	produttore	m [mm]	Z [denti]	D primitivo [mm]
Anello dentato	KHK Gears	0.5	80	40
Ruota dentata	Ct Meca	0.5	40	20

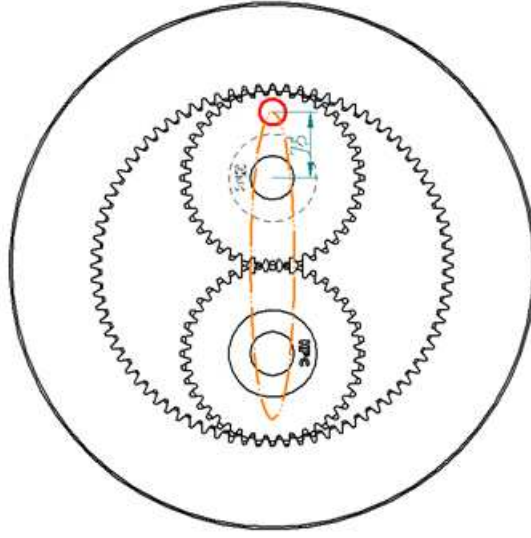


**Figura 4.4.:** Anello a dentatura interna e ruota dentata

È stata infine scelta la posizione della testina su uno dei due satelliti, cioè la distanza fra il centro della testina e l'asse della ruota dentata, questa decisione determina le dimensioni dei semiassi dell'ellisse:

- $a = 17.5$  [mm] (Semiasse maggiore)
- $b = 2.5$  [mm] (Semiasse minore)

In figura 4.5 viene mostrata la vista frontale della disposizione di questi primi tre elementi che fanno parte del cinematismo. A causa del rapporto di trasmissione, i due satelliti non sono allineati ma è presente un offset di pochi millimetri tra di essi per evitare di entrare in contatto.



**Figura 4.5.:** Traiettoria ellittica definita dalle dimensioni degli ingranaggi

### 4.3. Scelta del motore elettrico

Noti i parametri di processo e la geometria della traiettoria da eseguire, è stato possibile eseguire la scelta da catalogo dell'attuatore elettrico necessario per la movimentazione del cinematismo. I dati necessari per la scelta del motore dal catalogo del produttore scelto, cioè Faulhaber, sono la coppia di carico e la velocità angolare. In seguito sono riportati i passaggi necessari al calcolo di queste due grandezze. Il perimetro dell'ellisse è stato calcolato utilizzando l'equazione 4.3

$$L = 2\pi\sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} \quad (4.3)$$

In cui  $L$ ,  $a$  e  $b$  sono rispettivamente il perimetro, il semiasse maggiore e il semiasse minore. A questo punto è possibile calcolare la potenza media dissipata dalla forza d'attrito che si sviluppa nel contatto della testina con la superficie della calzatura, attraverso l'equazione 4.4:

$$P = v_m F \mu = L f F \mu \quad (4.4)$$

Dove  $v_m$  è la velocità media di percorrenza della traiettoria ellittica,  $F$  la forza normale applicata alla scarpa,  $f$  la frequenza di percorrenza dell'intero perimetro e  $\mu$  il coefficiente d'attrito ipotizzato inizialmente pari a 0.4. I valori della velocità angolare e della coppia resistente sviluppata

dal tool sono calcolabili rispettivamente attraverso la 4.5 e la 4.6:

$$\omega_t = 2\pi f 60 \quad (4.5)$$

$$C_t = \frac{P}{\omega_t} 10^3 \quad (4.6)$$

I valori calcolati sono riportati in tabella 4.3: I valori di coppia e velocità calcolati, unitamente

**Tabella 4.3.:** Parametri calcolati

Perimetro [mm]	78,54
Potenza [W]	0,539
Velocità angolare [rad/s]	21,29
Coppia resistente [Nmm]	24,525

alla necessità di ingombri spaziali ridotti, hanno portato della scelta della seguente coppia motore-riduttore:

- Motore c.c. brushless: 2214X024BXTTH (6W)
- Riduttore: 22GPT 20:1



**Figura 4.6.:** Motore e riduttore

Il motore è di tipo Flat, una particolare categoria caratterizzata da un ridotto ingombro assiale. Le curve caratteristiche sono mostrate in figura 4.8, insieme al punto di funzionamento in questa particolare condizione di carico. È stato possibile avere a disposizione la geometria CAD di questi due componenti e della flangia di collegamento interposta tra di essi.



### 4.3. Scelta del motore elettrico

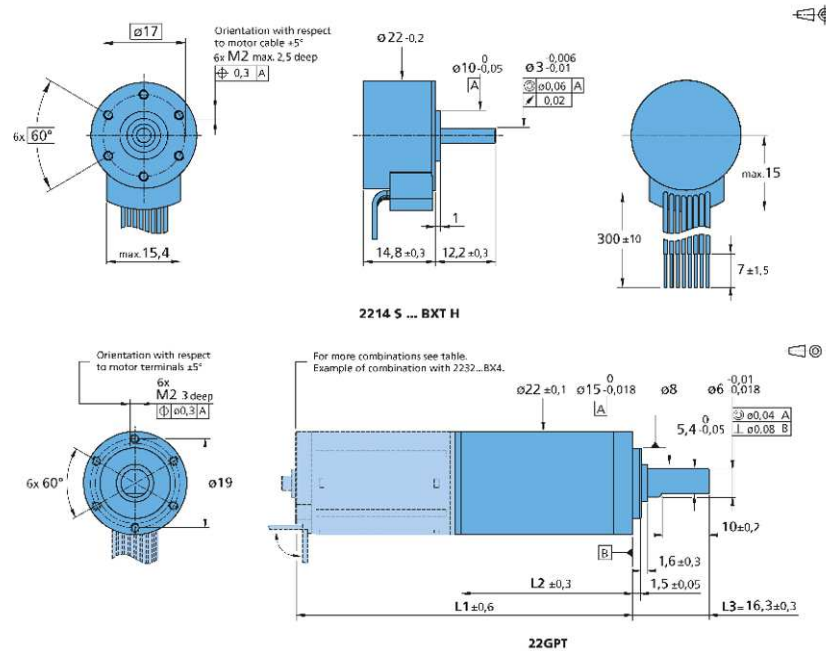


Figura 4.7.: Dimensioni del motore-riduttore

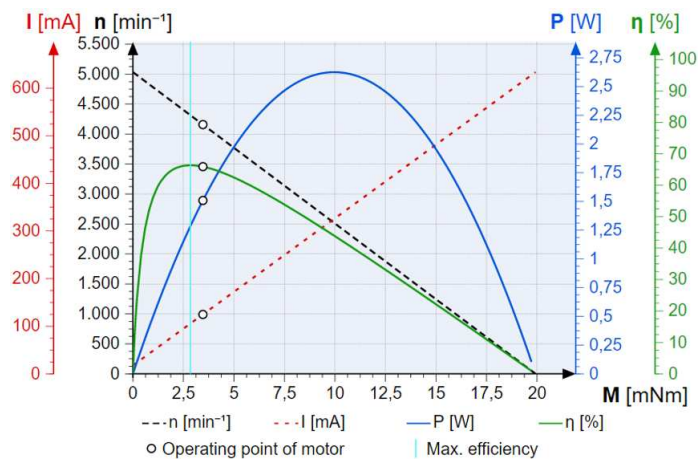


Figura 4.8.: Curve caratteristiche ridotte al motore

## 4.4. Requisiti generali del dispositivo

Il terminale del robot deve possedere i seguenti requisiti di carattere generale:

- Lunghezza massima pari a 120 mm e un diametro massimo pari a 75 mm
- Una flangia per il montaggio sul robot UR5e
- Alloggiamento per il sistema motore-riduttore
- Punto di uscita per i cavi del motore elettrico
- Presenza di un maggior numero possibile di parti presenti nel mercato (viti, cuscinetti, etc.)
- Geometria delle parti non da catalogo il più semplice possibile e ottenibile mediante i comuni processi tecnologici di formatura
- Centraggio tra motore e cinematismo
- Facilità di assemblaggio e disassemblaggio

### 4.4.1. Interfaccia meccanica del robot

Il robot UR5e presenta l'interfaccia meccanica mostrata in figura 4.9 [4]. Il collegamento deve avvenire tramite quattro viti M6 mentre per garantire il centraggio tra utensile ed ultimo asse del robot, è necessario dotare il terminale di una protuberanza cilindrica di diametro 31.5 mm che va a inserirsi nello scavo apposito presente sulla flangia del robot.

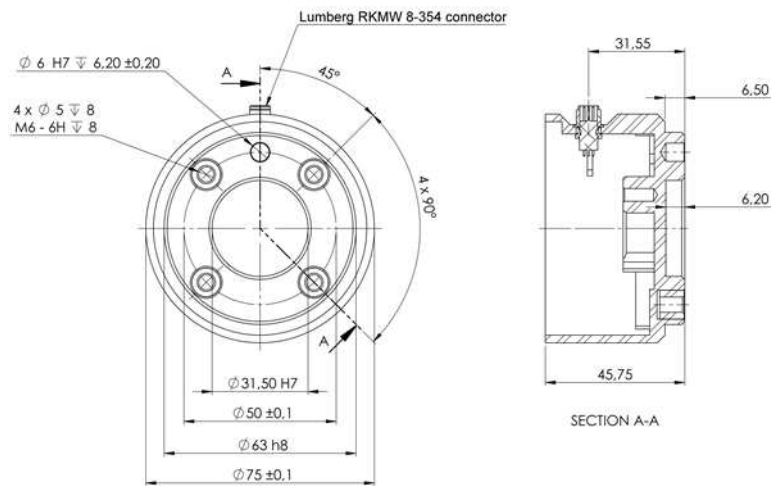


Figura 4.9.: Interfaccia meccanica di UR5e

## 4.5. Modello CAD

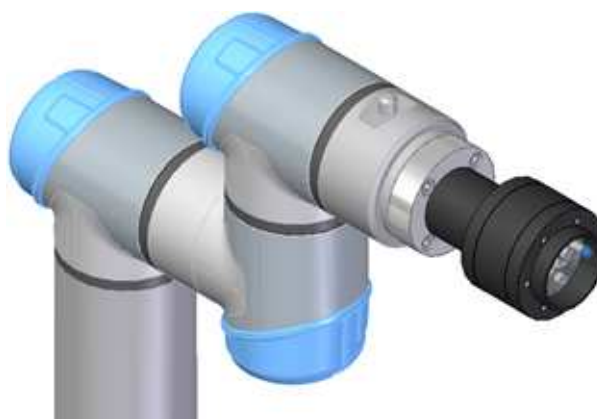
La modellazione CAD del dispositivo e quindi di tutte le parti che lo compongono, è stata eseguita utilizzando il software SOLIDE EDGE sviluppato da SIEMENS. In questa sezione viene prima analizzato l'assieme finale per poi analizzare dettagliatamente ogni componente modellato.

### 4.5.1. Assieme finale

In figura 4.10 si può vedere l'assieme finale dell'utensile, mentre in figura 4.11 è mostrato l'utensile installato sul robot. La lunghezza complessiva del terminale (esclusa la testina) è pari a 106.8 mm, mentre il diametro massimo è di 64 mm. In figura 4.12 è mostrata una vista a sezione parziale



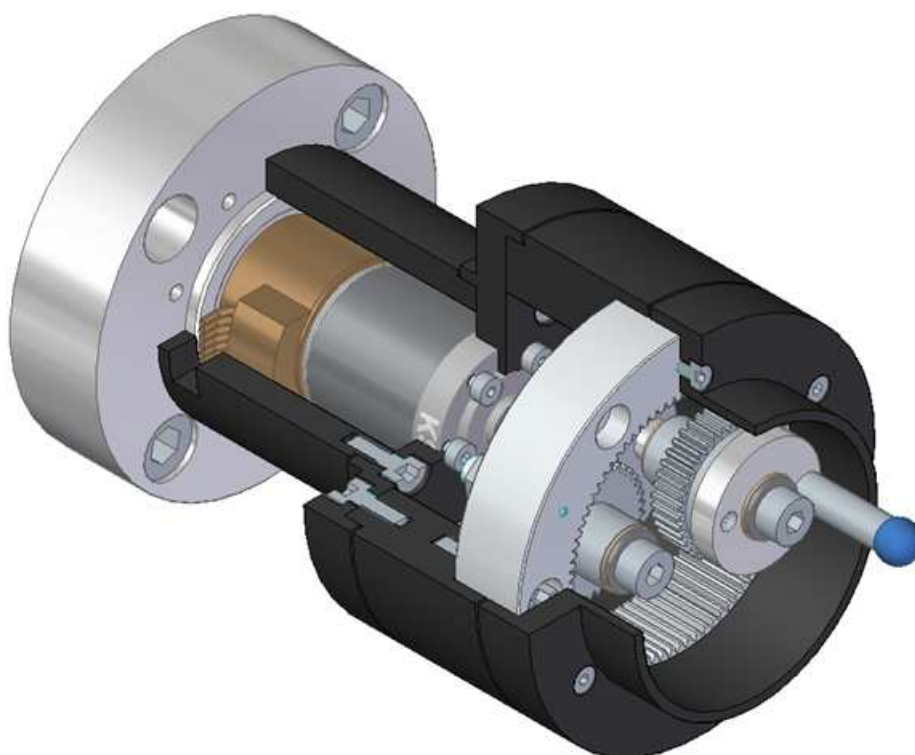
**Figura 4.10.:** Assieme del tool di lucidatura



**Figura 4.11.:** Tool installato sul robot

dell'assieme in cui si intravedono i componenti interni del dispositivo. È possibile distinguere quattro elementi principali:

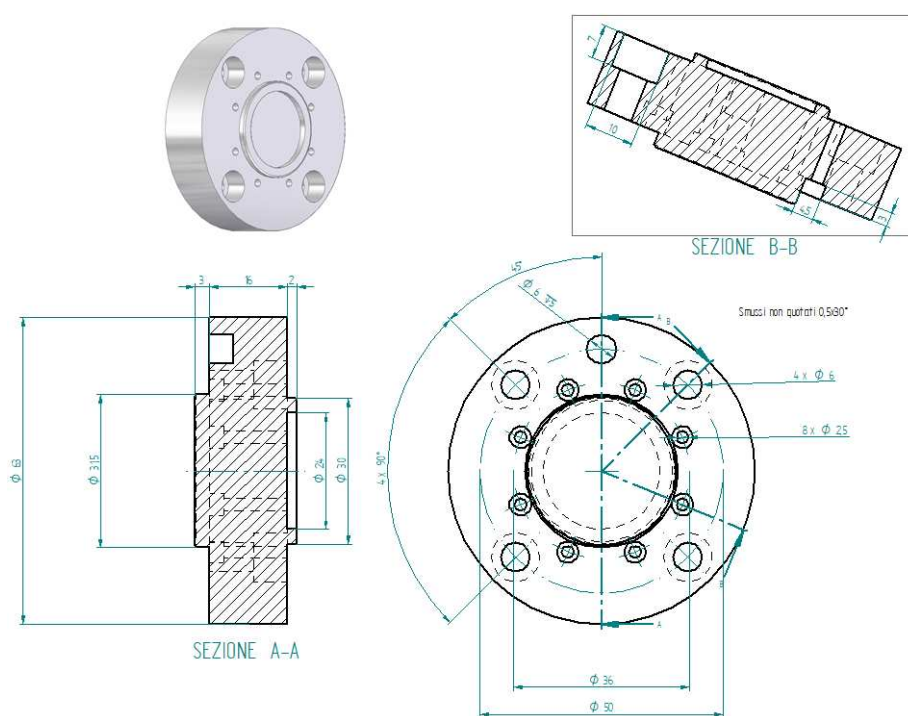
- Flangia per attacco con il robot
- Copertura esterna, divisa in quattro parti
- Motore-riduttore
- Cinematismo epicicloidale



**Figura 4.12.:** Vista in sezione parziale del dispositivo

#### 4.5.2. Flangia

In figura 4.13 è mostrata la messa in tavola del componente. Il collegamento con il robot avviene mediante l'utilizzo di quattro viti M6, cilindriche come tutte le viti presenti nell'assieme, mentre per il collegamento con la prima parte del coperchio esterno si utilizzano otto viti M2.5. Il centraggio rispetto all'ultimo asse del robot viene trasmesso al coperchio esterno mediante la protuberanza cilindrica di diametro 31,5 mm e quella di diametro 30 mm. È inoltre presente il foro per la spina di diametro 6 mm che serve a montare il terminale con il giusto orientamento.



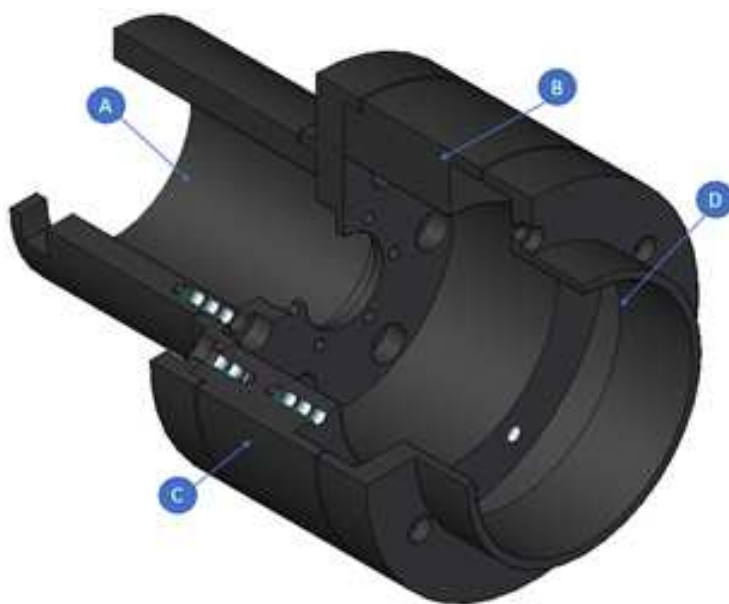
**Figura 4.13.:** Flangia di collegamento

### 4.5.3. Copertura esterna

La copertura esterna è composta da quattro parti (figura 4.14, figura 4.15). Tale suddivisione è stata eseguita per facilitare sia la produzione dei componenti sia l'assemblaggio dell'intero dispositivo. Come si può notare ogni parte presenta delle scanalature sulle estremità di interconnessione tra le stesse per trasmettere il centraggio.

**Tabella 4.4.:** Copertura esterna

Nome componente	funzione
A	contenimento motore-riduttore
B	fissaggio riduttore
C	contenimento ingranaggi
D	copertura frontale



**Figura 4.14.:** Copertura esterna



**Figura 4.15.:** Parti della copertura esterna

#### 4.5.4. Ingranaggio epicicloidale

In figura 4.16 è mostrata la possibile realizzazione del meccanismo di cui si è parlato in precedenza. L'albero d'uscita del riduttore mette in rotazione il disco portatreno e quindi movimentata le due viti su cui sono calettate le ruote dentate. Quest'ultime possono ruotare relativamente alle viti per la presenza dei cuscinetti radenti, perciò ingranano con l'anello esterno dentato internamente. Il disco "j" è solidale alla ruota dentata a contatto esso grazie alla presenza di una spina di diametro 3 mm. La testina è stata modellata come una semplice sfera di diametro ... al fine di avere una prima composizione del tool.

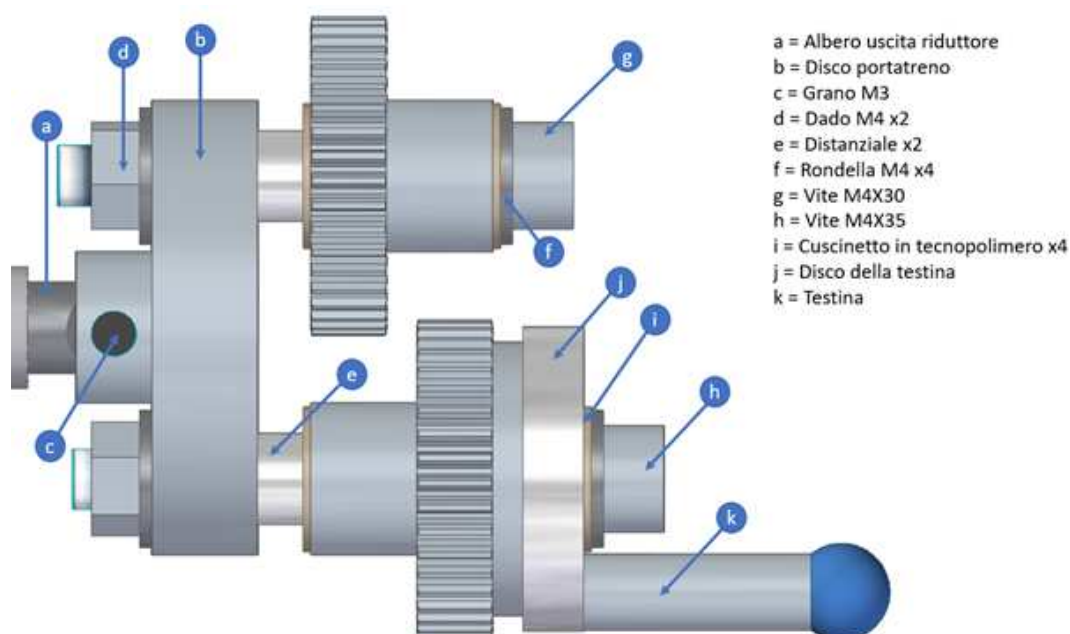
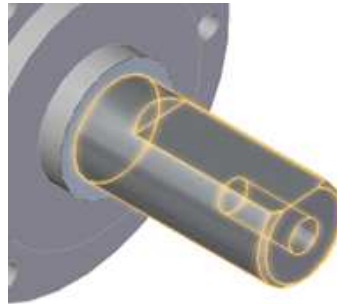


Figura 4.16.: componenti del meccanismo

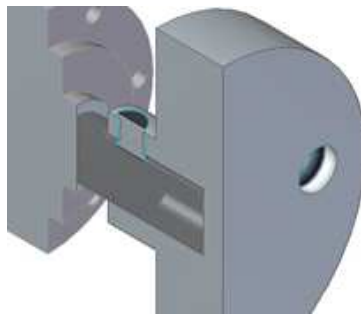
#### Collegamento albero-disco portatreno

In figura 4.17 è mostrato l'albero di uscita del riduttore e in figura 4.18 l'accoppiamento con il disco portatreno, il quale avviene per la presenza di un grano M3 che si inserisce nel foro filettato presente sul disco, in modo da esercitare pressione sulla faccia piana dell'albero. Questa soluzione garantisce il bloccaggio della rotazione relativa e dello scorrimento assiale relativo tra le due parti.





**Figura 4.17.:** Albero di uscita del riduttore



**Figura 4.18.:** Accoppiamento albero-disco



**Figura 4.19.:** disco portatreno

### Distanziali e cuscinetti

Sono stati scelti i cuscinetti radenti in tecnopolimero GFM-0405-06 della IGUS (figura 4.20), perché sono economici e non richiedono nessun tipo di manutenzione. Essi vanno accoppiati per interferenza sul loro diametro esterno e quindi in questo caso sono solidali alle ruote dentate. La geometria dei distanziali è mostrata in figura 4.21, la loro funzione è quella di evitare il contatto tra le flange dei cuscinetti e il disco portatreno.

igus



**Figura 4.20.:** cuscinetto in tecnopolimero



**Figura 4.21.:** Distanziale

# Capitolo 5.

## Simulazioni

In questo capitolo sono presenti i dettagli delle simulazioni svolte come ultima parte del lavoro di tirocinio, eseguite con lo scopo di implementare il terminale, la cui progettazione è stata esaminata nel capitolo precedente, nella cella collaborativa creata nella fase di studio di fattibilità. A seguito di una prima analisi per verificare che le dimensioni del nuovo tool non diano luogo a problemi di esecuzione della lavorazione, viene descritta un secondo test in cui il percorso del TCP è stato importato da un ambiente di tipo CAM (Computer Aided Manufacturing).

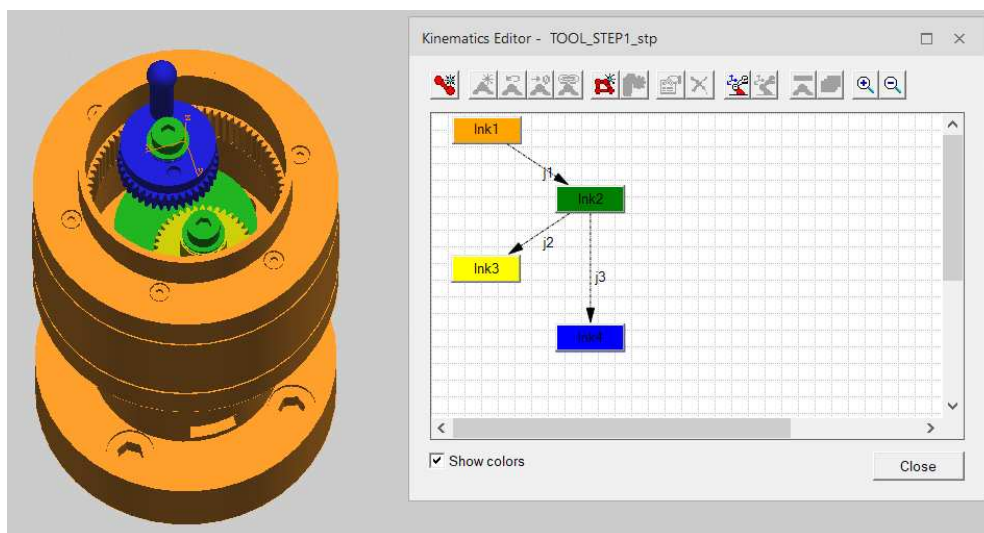
### 5.1. Importazione del terminale

Il primo step è stato quello di importare l'end-effector prototipato nell'ambiente CAD di Solid Edge nel software Process Simulate. Per simulare il movimento della testina del tool è necessario definire la cinematica del dispositivo, definendo nel software i corpi e i giunti che permettono il moto relativo tra essi. I membri nell'editor cinematico (figura 5.1) sono stati definiti nel seguente modo:

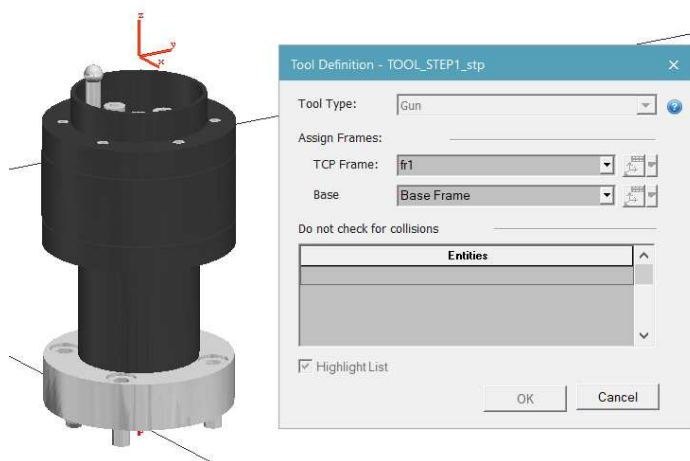
- Link1: Elementi solidali al robot (flangia, motore, riduttore, copertura esterna, anello dentato, etc.)
- Link2: Componenti del portatreno (disco portatreno, viti M4, etc.)
- Link3: Primo satellite (ruota dentata e cuscinetti)
- Link4: Secondo satellite (ruota dentata, cuscinetti e disco della testina)

Nella definizione dei giunti, ne è stato creato uno per permettere la rotazione del portatreno ( $j_1$ ) e due per permettere la rotazione dei satelliti attorno al proprio asse ( $j_2$ ,  $j_3$ ). Al fine di simulare il corretto comportamento dell'ingranaggio si è utilizzato il tool "Joint Dependency", esprimendo il valore dei giunti  $j_2$  e  $j_3$  pari al doppio di  $j_1$  (portatreno) e moltiplicato per -1 (inversione di rotazione). In questo modo il cinematismo così definito possiede un unico grado di libertà, e la testina segue correttamente la traiettoria ellittica. Per azionare il meccanismo durante le simulazioni è stato necessario creare una "Device Operation", che movimentata il portatreno a velocità costante.

Il montaggio del terminale sul robot richiede la definizione del dispositivo come tool (figura 5.2, procedura che consiste nella creazione del Tool Center Point e del sistema di riferimento per posizionarlo correttamente rispetto alla flangia del robot. Il TCP è stato posizionato al centro della traiettoria ellittica, all'altezza dell'estremità della testina.



**Figura 5.1.:** Editor cinematico del tool



**Figura 5.2.:** Definizione del dispositivo come tool

## 5.2. Test di raggiungibilità

Nel setup della cella per questa simulazione (figura 5.3) è presente il tavolo, l'UR5e e la struttura di sostegno come nella stazione trattata nel capitolo 3, è assente però il manichino virtuale, mentre la scarpa sottoposta alla lavorazione è un modello Santoni. Lo scopo dell'analisi è quello di verificare la corretta esecuzione dei movimenti da parte del robot, su cui è montato il terminale prototipo. Sono stati perciò generati tre percorsi curvilinei sulla superficie della scarpa, ognuno ad una differente altezza rispetto alla superficie di appoggio. L'orientazione delle location che compongono le traiettorie, è posta in modo tale da mantenere il tool perpendicolare alla superficie per tutta la durata della lavorazione. Anche in questo caso è stato necessario inserire diversi punti di passaggio per il corretto approccio ai vari path da parte del robot.

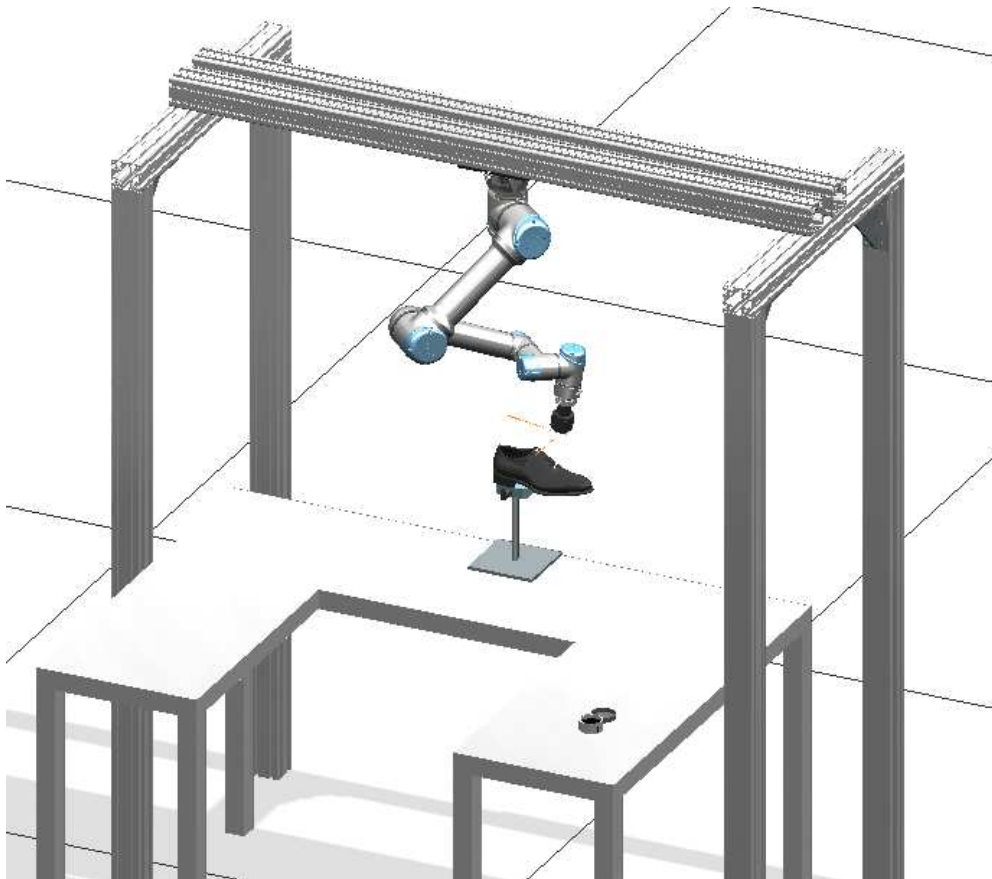
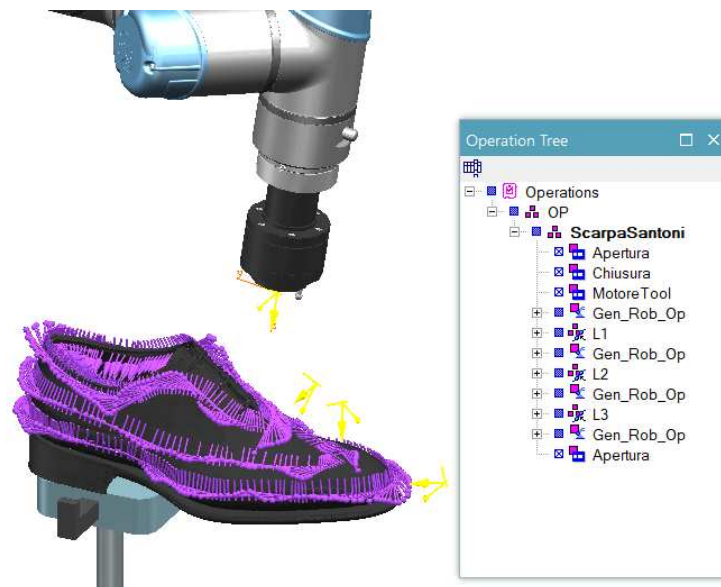
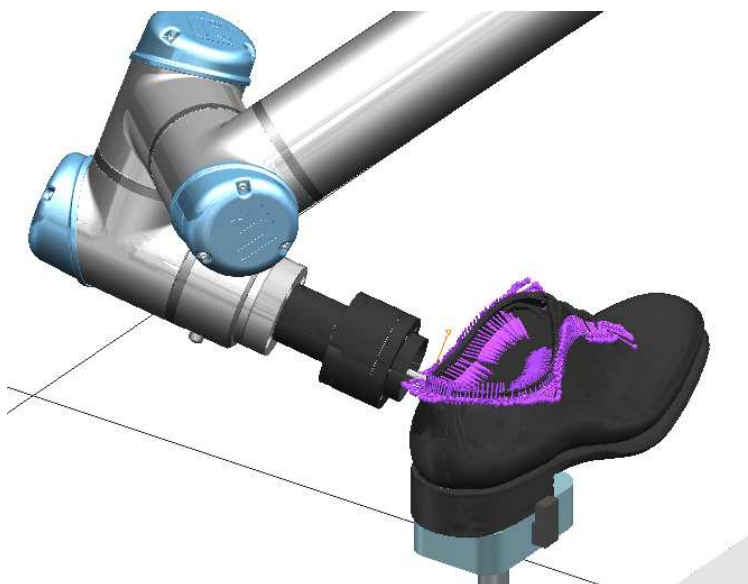


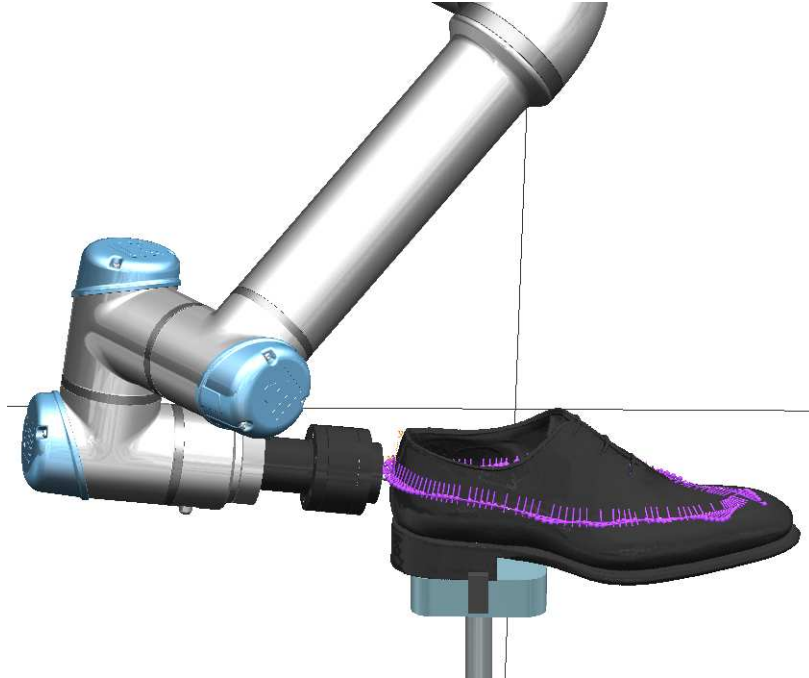
Figura 5.3.: Setup della stazione



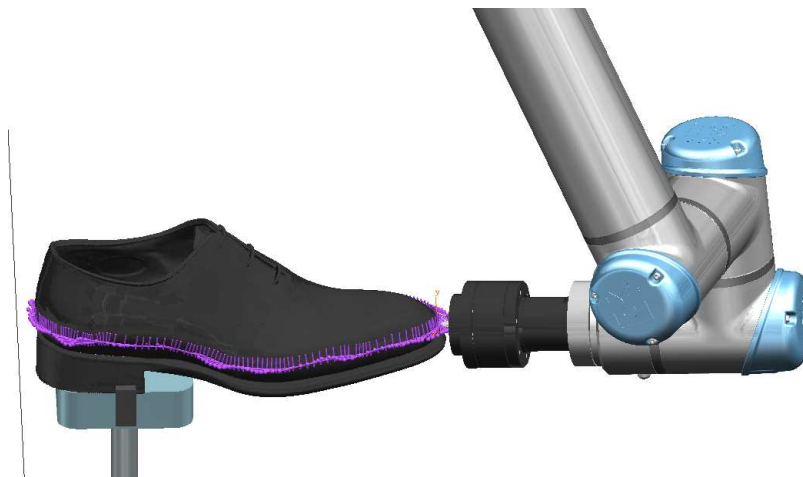
**Figura 5.4.:** Operation tree



**Figura 5.5.:** Lavorazione sulla parte superiore



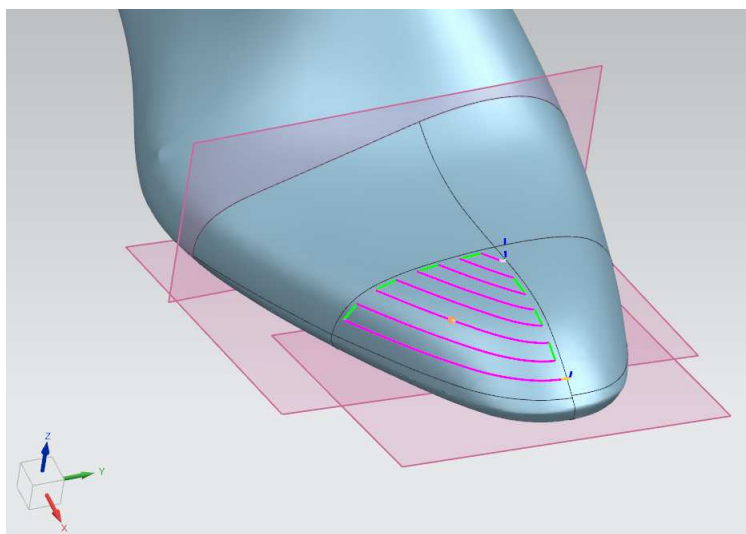
**Figura 5.6.:** Lavorazione ad altezza intermedia



**Figura 5.7.:** Lavorazione vicino al fondo

### 5.3. Lavorazione generata tramite CAM

Il processo di lucidatura robotizzata deve essere specifico per ogni modello di calzatura, poichè la traiettoria che il robot deve eseguire dipende dalla forma della scarpa. Inoltre è variabile anche il numero delle applicazioni del lucido da eseguire per ogni prodotto. Per rendere la cella una soluzione applicabile è conveniente utilizzare un approccio di tipo CAM, che consiste nel generare la lavorazione in un apposito ambiente di programmazione utilizzando come input il modello CAD della scarpa. Una volta generato il processo virtualmente, è possibile convertire l'output del CAM in un programma caricabile sul controllore del robot contenente le istruzioni per l'esecuzione della lavorazione. Per conferire un'ulteriore flessibilità al sistema produttivo, non è conveniente generare un percorso utensile nell'ambiente CAM che lavora l'intera superficie della calzatura, ma più lavorazioni relative alle diverse aree che la compongono. L'adozione di questo approccio di tipo modulare permette di eseguire oltre alla lucidatura dell'intera superficie, applicazioni del lucido successive in zone specifiche per eseguire sotto comando dell'operatore ritocchi in zone in cui magari l'operazione non è stata eseguita correttamente. In figura 5.8 è mostrato il percorso utensile relativo alla lavorazione di una zona sulla punta della scarpa, nell'ambiente CAM di NX (Siemens).

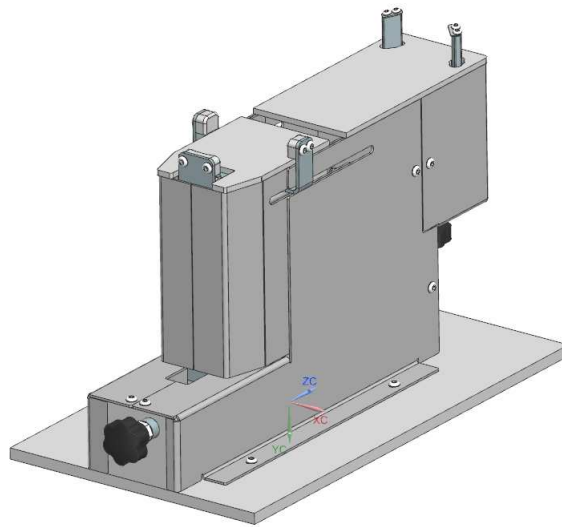


**Figura 5.8.:** CAM in NX

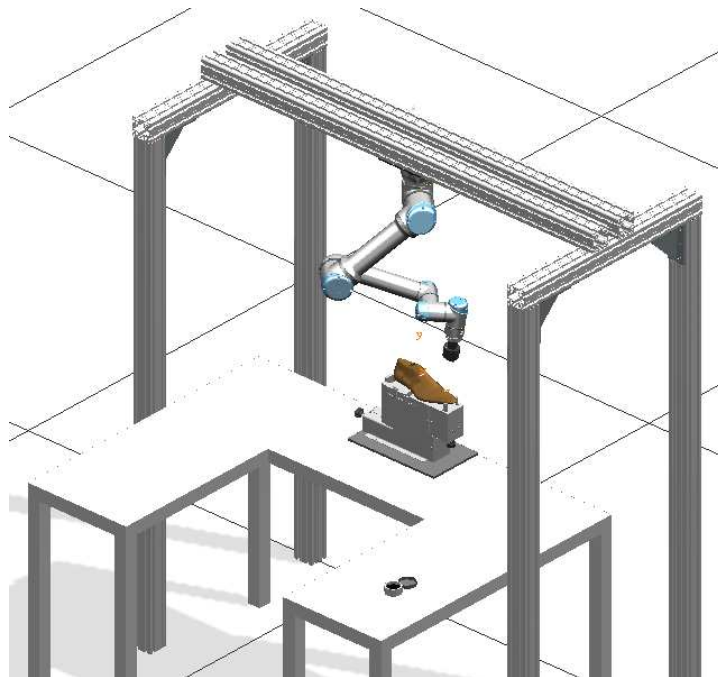
La simulazione nel sistema grafico di Tecnomatix dell'operazione eseguita dal robot, risulta utile per validare il percorso, precedentemente realizzato nel programma CAM, prima di trasferire le istruzioni al controllore del robot, in modo da ridurre la fase di testing online poichè, come già detto, i path nello spazio cartesiano possono risultare incompatibili con le possibilità di movimento del robot. In questo particolare caso il percorso utensile è stato esportato sotto forma di file di tipo .cls da NX e, grazie ad un'apposita funzionalità, importato in Process Simulate sotto forma di operazione continua. Ovviamente il modello CAD della parte sottoposta alla lavorazione deve



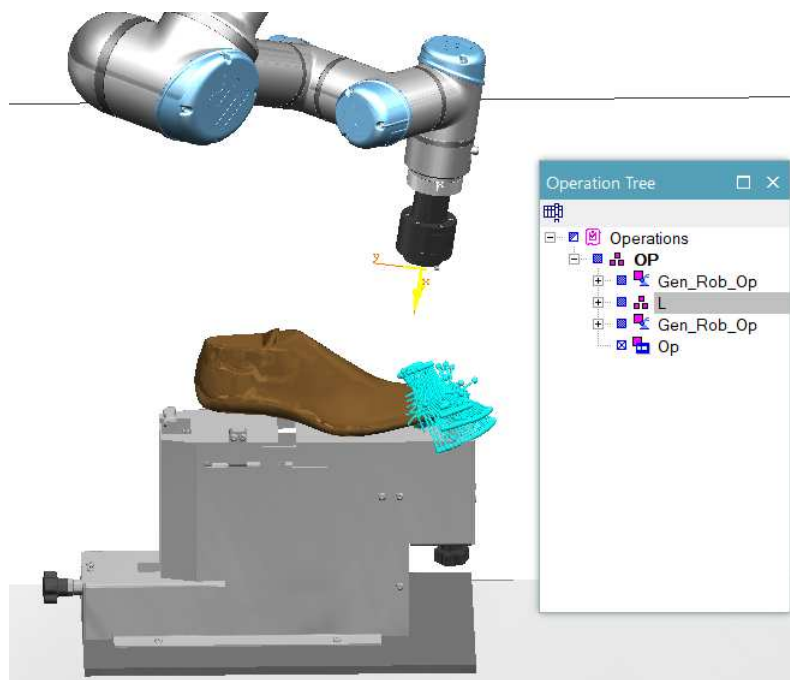
essere lo stesso. Un importante accorgimento è quello di verificare il corretto orientamento delle location che compongono la traiettoria, bisogna infatti fare in modo che il tool sia perpendicolare alla superficie della scarpa e che la direzione di avanzamento sia parallela all'asse maggiore dell'ellisse descritto dal movimento della testina. A questo scopo basta semplicemente eseguire contemporaneamente delle rotazioni a tutte le terne relative ad ogni location per ottenere la giusta orientazione. Anche in questo caso vanno programmate le istruzioni di movimento per avvicinare correttamente la lavorazione partendo dalla posizione iniziale del robot. Tutta la procedura appena descritta è stata eseguita per simulare la lavorazione mostrata in figura 5.8. Nella cella utilizzata in questo caso, è da notare il prototipo virtuale di piedistallo (figura 5.9) realizzato un'azienda che partecipa a questo progetto parallelamente a questa attività di tirocinio. Esso presenta tre staffe di bloccaggio posteriori e due anteriori che fermano la scarpa nella parte inferiore non interessata alla lavorazione. Dei piccoli attuatori pneumatici comandano l'azionamento delle staffe. In figura 5.11 è visibile la sequenza delle operazioni della stazione, mentre in figura 5.12 l'esecuzione della lucidatura su quella porzione di superficie.



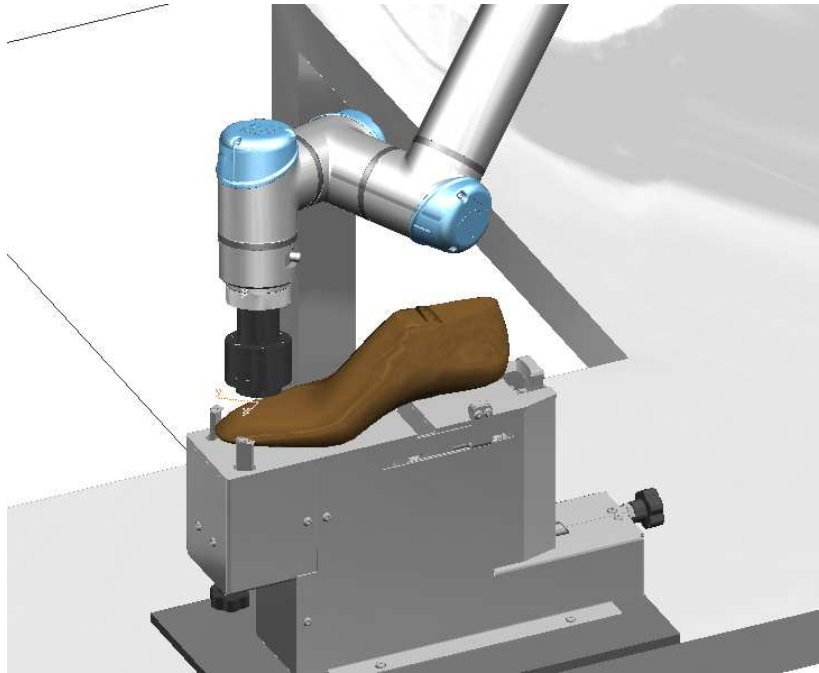
**Figura 5.9.:** Prototipo di piedistallo di sostegno della scarpa



**Figura 5.10.:** Stazione di lucidatura



**Figura 5.11.:** Elenco delle operazioni della simulazione



**Figura 5.12.:** Simulazione della lucidatura

## 5.4. Risultati

Entrambe le simulazioni hanno avuto esito positivo, la presenza del terminale infatti non ha dato luogo a problemi di movimentazione del robot, neanche nell'esecuzione della traiettoria più complessa del secondo caso. Resta però essenziale programmare correttamente le istruzioni di movimento relative all'avvicinamento dell'utensile alla superficie e scegliere, quando necessario, le opportune configurazioni del robot tra le possibili, poichè alcune di esse possono dar luogo a collisioni o a problemi di esecuzione. Nonostante ciò non sono state riscontrate eccessive criticità nella fase di ottimizzazione delle istruzioni.



## Capitolo 6.

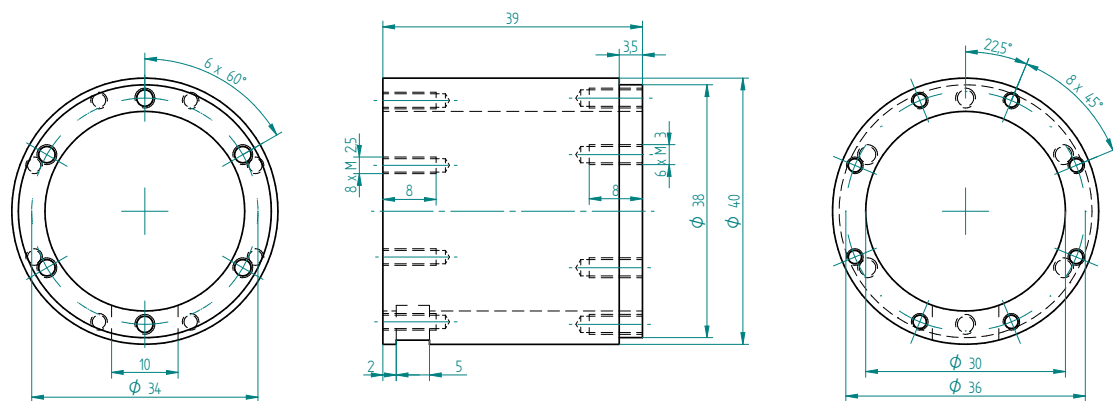
### Conclusioni

Automatizzare un processo manuale come quello trattato in questa tesi non risulta sicuramente semplice da realizzare. L'elevato numero di parametri da tenere in considerazione, la scarsa presenza di applicazioni da prendere come riferimento, la complessità delle operazioni e l'elevata variabilità del risultato finale, rendono necessaria l'introduzione di soluzioni tecniche innovative e un approccio di tipo collaborativo nell'automatizzazione, per progettare una cella che porti un valore aggiunto alla produzione in questo settore. Il lavoro presentato in questa tesi ha permesso di concretizzare maggiormente questo progetto, attraverso la definizione di un primo layout della stazione e la progettazione preliminare del terminale del robot apposito per la lavorazione. Per quanto riguarda la progettazione della cella, è stato infatti trovato un posizionamento ottimale del robot UR5e, ovvero con la flangia base installata sulla struttura di sostegno ad un'altezza specifica. Questa posizione permette la fattibilità dei movimenti necessari ad eseguire la lavorazione. La geometria generale del portale di sostegno è sicuramente ottimale, è necessario però una progettazione dettagliata riguardo ai vari elementi di collegamento tra i profilati e il fissaggio al pavimento. Anche riguardo agli aspetti relativi all'interazione umano-robot è necessario un ulteriore sviluppo, eseguendo l'analisi dei rischi, scegliendo gli opportuni dispositivi di sicurezza (sensori, barriere, etc.), consultando le normative di riferimento. Per proseguire con la progettazione del tool di lucidatura, è necessario progettare la testina (forma, materiale, dimensioni) e un opportuno sistema di cedevolezza della stessa. Va effettuata inoltre una verifica meccanica dei vari componenti prima di procedere alla realizzazione di un prototipo fisico. Oltre al terminale devono essere sviluppati altri dispositivi per rendere possibile l'automazione del processo. un sistema di dispensazione del lucido è necessario per applicare il prodotto sulla testina che lo distribuisce sulla superficie della scarpa. E' indispensabile anche un dispositivo da inserire all'interno della calzatura per limitare al minimo la deformazione sotto l'azione della forza agente sulla superficie, un'idea molto promettente è quella di utilizzare una camera d'aria da gonfiare con l'aria compressa una volta inserita dentro la scarpa. Dopo la costruzione dei primi prototipi dovrà necessariamente seguire una lunga fase di sperimentazione, si pensa già di testare in laboratorio il tool e il sistema di applicazione del prodotto su dei campioni piani di pelle, con l'obiettivo di determinare i valori ottimali della forza di contatto, della quantità di lucido, della velocità del motore del terminale e della velocità di avanzamento. Successivamente potranno essere eseguiti i test su dei modelli di scarpa.



## Appendice A.

### Disegni tecnici



**Figura A.1.:** Copertura esterna A

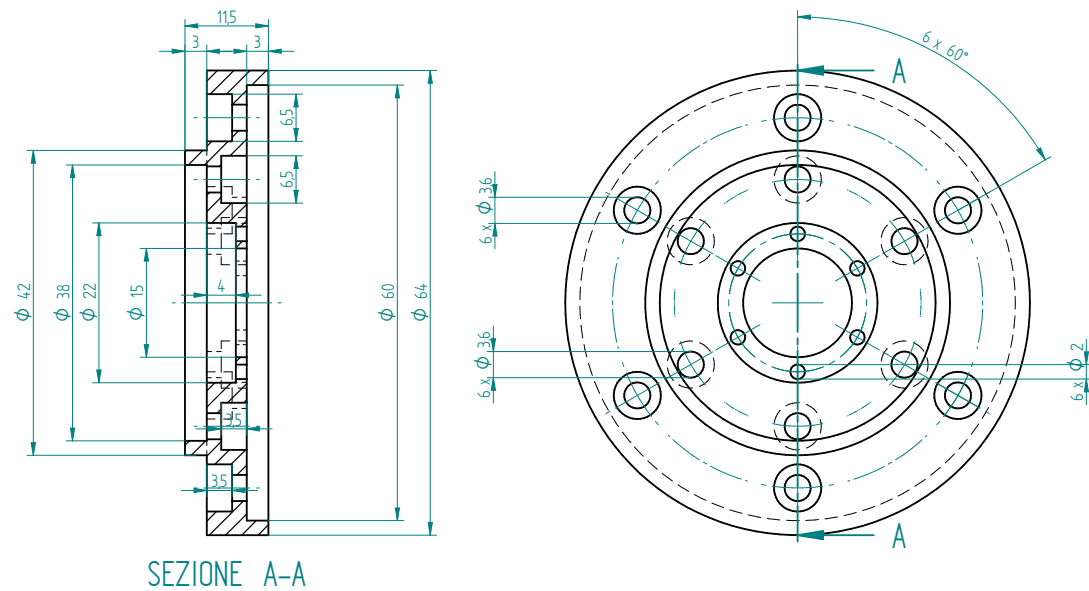


Figura A.2.: Copertura esterna B

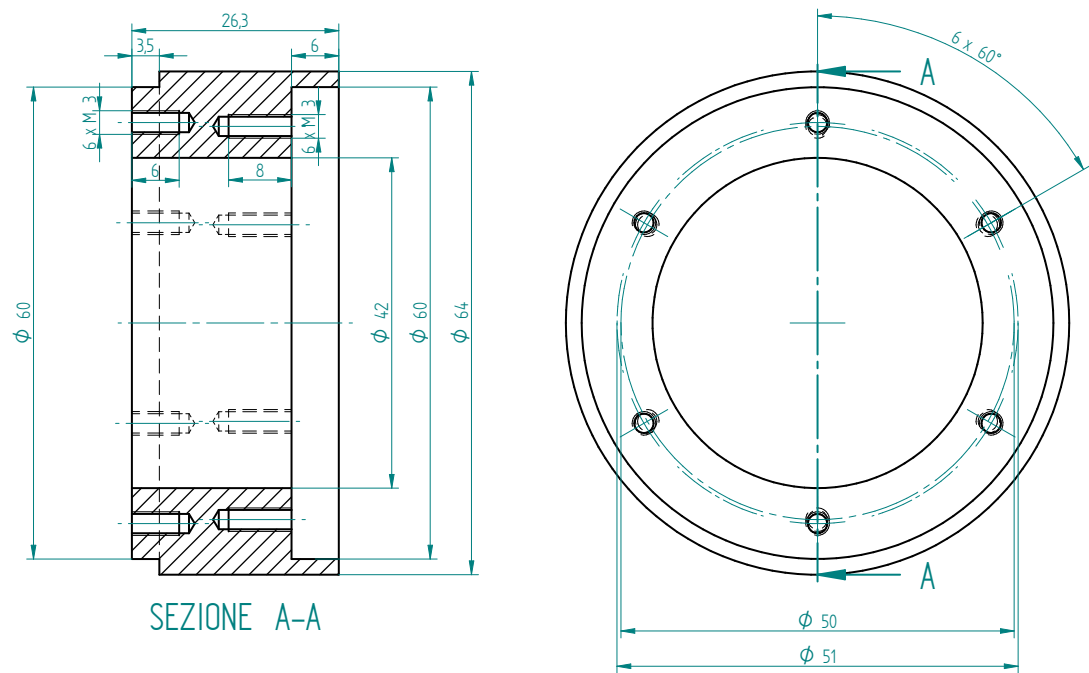
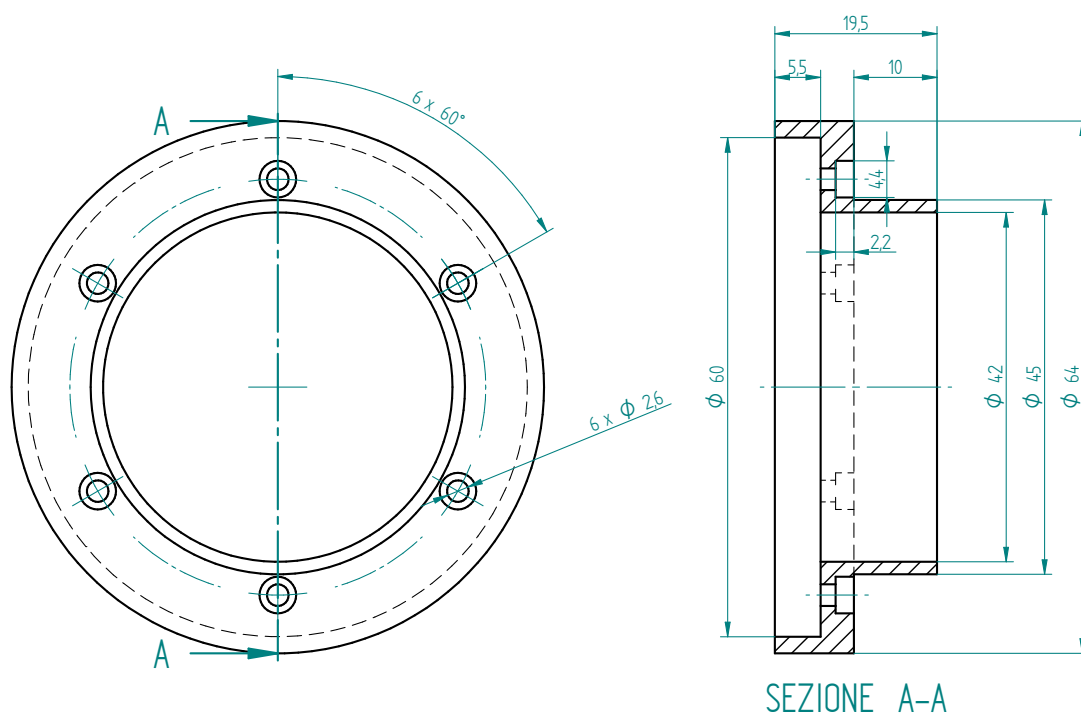
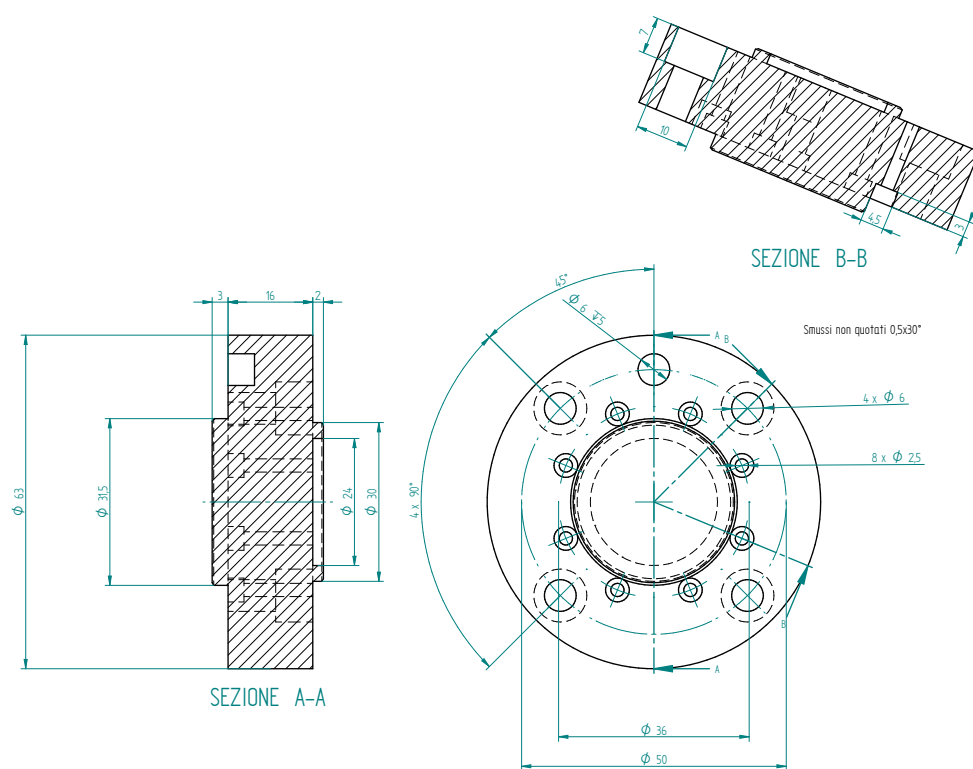


Figura A.3.: Copertura esterna C





**Figura A.4.:** Copertura esterna D



**Figura A.5.:** Flangia di collegamento al robot UR5e

## Bibliografia

- [1] M. A. K. Bahrin, M. F. Othman, N. H. N. Azli, and M. F. Talib, “Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic,” *Jurnal Teknologi*, vol. 78, no. 6-13, 2016.
- [2] C. Thomas, B. Matthias, and B. Kuhlenkötter, “Human-robot-collaboration-new applications in industrial robotics,” in *International Conference on Competitive Manufacturing*, 2016, pp. 293–299.
- [3] G. Michalos, S. Makris, P. Tsarouchi, T. Guasch, D. Kontovrakis, and G. Chryssolouris, “Design considerations for safe human-robot collaborative workplaces,” *Procedia CIRP*, vol. 37, pp. 248–253, 2015.
- [4] U. Robots, “User manual: Ur5e,” 2020.
- [5] K. Castelli, A. M. A. Zaki, Y. Dmytriiev, M. Carnevale, and H. Giberti, “A feasibility study of a robotic approach for the gluing process in the footwear industry,” *Robotics*, vol. 10, no. 1, p. 6, 2021.
- [6] B. Nemec and L. Žlajpah, “Robotic cell for custom finishing operations,” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 21, no. 1, pp. 33–42, 2008.