



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Informatica e dell'Automazione

**Studio di un processo robotizzato collaborativo per la
rimozione di bave su soles per calzature**

**Study of a collaborative robotic process for burr
removal on shoe soles**

Relatore:
Prof. Giacomo Palmieri

Tesi di Laurea di:
Silvestri Lorenzo

A.A. 2023/2024

Studio di un processo robotizzato collaborativo per la rimozione di bave su soles per calzature.

Lorenzo Silvestri

Abstract

Questo studio esplora la fattibilità della progettazione e implementazione di un robot collaborativo finalizzato alla rimozione delle bave delle soles in ambienti industriali di produzione di calzature e articoli simili. Le bave, o sbavature, rappresentano un problema comune in tali contesti, richiedendo un processo di rimozione che sia efficiente, preciso e in grado di ridurre al minimo gli errori umani.

La tesi inizia con un'analisi dettagliata del contesto industriale, evidenziando le sfide legate alle pratiche tradizionali di rimozione delle bave e le opportunità che emergono dall'automazione attraverso l'uso di robot collaborativi. Vengono considerati gli aspetti tecnologici, economici e di sicurezza legati a questo tipo di applicazione.

Inoltre all'interno della tesi verranno presentate tutte le componentistiche hardware e software necessarie per realizzare l'applicazione con tutti gli aspetti tecnici riguardanti.

La fase successiva mira a descrivere nel dettaglio come è stata realizzata l'applicazione ovvero la procedura di implementazione del programma all'interno del sistema del robot, per poter effettuare questa operazione.

Il processo di sperimentazione e testing mira a valutare la reale fattibilità del sistema proposto, dimostrando la sua capacità di rimuovere le bave con la necessaria precisione e affidabilità.

In conclusione, questa tesi contribuisce a valutare la fattibilità della progettazione di un robot collaborativo per la rimozione delle bave delle soles in ambienti industriali. I risultati e le sfide affrontate offrono una visione chiara delle possibilità di miglioramento dell'efficienza e della qualità in quest'area, indicando la strada per futuri sviluppi nell'ambito della robotica collaborativa industriale.

Indice

1	Introduzione	2
1.1	Robot Industriale	2
1.1.1	Classificazione dei robot Industriali	3
1.2	Robotica Collaborativa e i Cobot	4
1.2.1	Ambiti di utilizzo dei robot collaborativi	5
1.3	Confronto tra Robot industriali e collaborativi	6
1.4	La sicurezza con i Robot Collaborativi	8
1.4.1	Articolo 1: Collaborative robotics: New era of human-robot cooperation in the workplace	8
1.4.2	Articolo 2: Terminology in safety of collaborative robotics	10
1.4.3	Articolo 3: Examining the Role of Safety in the Low Adoption Rate of Collaborative Robots	12
1.5	Ambito di sviluppo e Obiettivo	20
1.6	Struttura della tesi	22
2	Strumentazione hardware e software	23
2.1	Universal Robots	23
2.2	Cobot UR5	24
2.2.1	Specifiche tecniche	25
2.2.2	Programmazione	27
3	Lavoro Svolto	29
3.1	Realizzazione del programma per rimozione bave	31
4	Test e Risultati	44
5	Conclusioni	53
6	Bibliografia e Sitografia	54
7	Ringraziamenti	55

Elenco delle Immagini

1	Robotica Industriale	2
2	Robotica Collaborativa	5
3	Robotica Collaborativa e Industriale	7
4	Illustrazione del braccio robotico con limitazione di potenza e forza (PFL) utilizzato in un sistema robotico collaborativo	9
5	Cobot e umano	13
6	Collaborazione cobot-umano	16
7	Scala di tensione di sicurezza del cobot	18
8	Cobot e Operatore umano	21
9	Utensile per rimozione bave	22
10	UR5 Universal Robot	24
11	Tabella limiti sicurezza_1	25
12	Tabella limiti sicurezza_2	26
13	PolyScope	27
14	Interfaccia URSim	28
15	Camera FH-SC05R	30
16	Pagina del simulatore UR	30
17	Pagina interna del simulatore UR	31
18	Pinza a vuoto	32
19	Pinza adattiva	33
20	Suola Mephisto Nera	34
21	MoveP	35
22	Circle Move	36
23	Tool Penna	36
24	Tool Utensile-Penna	38
25	Termosoffiatore	39
26	Banco da Lavoro	40
27	Magnanni Bianca	41
28	Hogan	41
29	Hogan Bianca	42
30	Hogan Beige	42
31	Extralight	43
32	Mephisto Nera	43
33	Supporto utensile	44
34	Assetto utensile-robot	45
35	Attrezzo di bloccaggio orizzontale	45
36	Assetto suola ferma	46
37	Hogan beige Pre-taglio	47
38	Hogan beige Post-taglio	47
39	Hogan bianca Pre-taglio	48
40	Hogan bianca Post-taglio	48
41	Hogan Pre-taglio	49
42	Hogan Post-taglio	49
43	Mephisto nera Pre-taglio	50
44	Mephisto nera Post-taglio	50
45	Extralight Pre-taglio	51
46	Extralight Post-taglio	51
47	Magnanni bianca Pre-taglio	52
48	Magnanni bianca Post-taglio	52

1 Introduzione

Tanti anni fa si pensava ai robot come oggetti futuristici. Avere un robot era un lusso per pochi: gli unici robot esistenti erano quelli per movimentare i componenti e per montaggio nelle fabbriche (in ambito industriale) ed i robot umanoidi, oggetti d'apparenza umana costruiti artificialmente, in ambito scientifico.

Negli ultimi anni, grazie al forte sviluppo tecnologico, l'intelligenza artificiale e la robotica sono sempre più integrati negli oggetti che ci circondano e che fanno parte della nostra vita quotidiana. La grande e complessa sfera della robotica si è arricchita di una nuova tipologia di robot: il **Cobot**.

L'utilizzo dei cobot permette di rendere più fluidi e flessibili i procedimenti di produzione, consentendo alle imprese di ampliare la loro produzione, e portando l'azienda a crescere esponenzialmente. Uno dei settori più beneficiati all'era dell'industria 4.0 è il **settore calzaturiero**. Qui, attraverso le nuove tecnologie, si possono facilmente utilizzare i robot collaborativi nei vari step di produzione e/o lucidatura di calzature. La combinazione cobot-uomo è particolarmente efficiente in questo ambito perché le tecnologie innovative e sofisticate integrate al braccio robotico permettono all'operatore di lavorare in sicurezza all'interno dello spazio di lavoro.

1.1 Robot Industriale

Un **robot industriale** è un tipo di robot utilizzato nella produzione industriale, per renderla più rapida e di qualità. Inoltre è un manipolatore automaticamente controllato, riprogrammabile, multiscopo, programmabile in tre o più assi che, fisso sul posto o mobile, sia usato in applicazioni di automazione industriale. Trattasi, quindi, di strumenti estremamente complessi, basati sull'interconnessione di sistemi meccanici, sensori, e software.

Essi sono formati da corpi grandi e pesanti e vengono impiegati maggiormente per mansioni che risultano pericolose o molto difficili per l'essere umano. Al fine di poter compiere questi lavori, tali strutture sono oggi realizzate con almeno sei giunti rotanti, così da fornire flessibilità e la capacità di raggiungere qualsiasi punto interno allo spazio di lavoro in più di una configurazione.

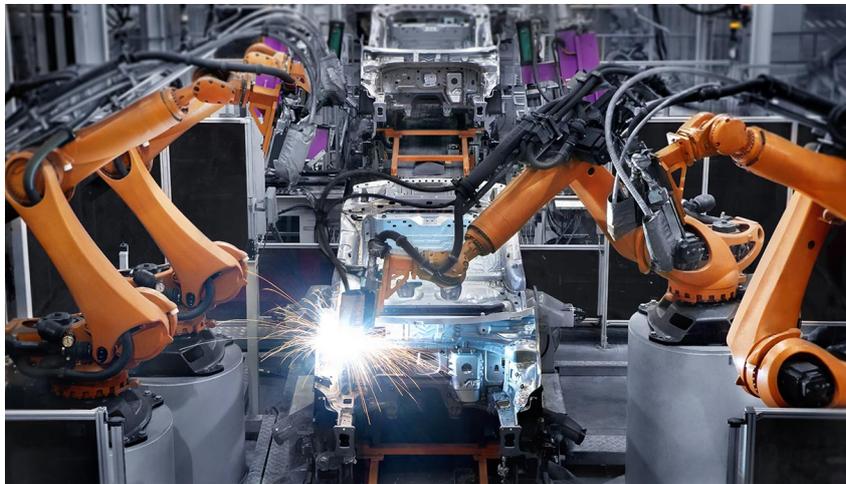


Figure 1: Robotica Industriale

Un robot industriale è fisicamente composto da due unità:

- un'unità meccanica addetta materialmente alla lavorazione;
- un'unità elettronica di programmazione e controllo.

La prima unità è detta **manipolatore**. Tale manipolatore ha una forma tipicamente antropomorfa cioè rassomigliante agli arti superiori dell'uomo. E' possibile definirlo come una sequenza di segmenti rigidi, o link, connessi da giunti rotanti o di traslazione (catena cinematica) attuati da un motore. Il **giunto** è un insieme di due superfici che slittano l'una sull'altra rimanendo a contatto. La coppia **giunto-link** rappresenta il grado di libertà del robot. Vi sono due tipi di giunti: quelli **prismatici**, il cui moto è una traslazione, e quelli rotativi o anche detti **rotoidali**, il cui moto è una rotazione. Vi sono anche giunti sferici ed elicoidali che possono essere considerati come opportune combinazioni di giunti prismatici e rotativi. Esso è costituito nella sua struttura da:

- **Base**: è il supporto fisso, ancorato nel terreno, intorno al quale si muove il robot (robot fisso);
- **Braccio**: è il meccanismo composto da una catena cinematica di elementi rigidi collegati in serie da snodi a traslazione o a rotazione;
- **Spalla**: è la prima articolazione del braccio;
- **Gomito**: è la seconda articolazione del braccio;
- **Polso**: è l'articolazione finale del braccio e serve ad orientare il sotto indicato terminale;
- **Terminale**: è il generico dispositivo fissato all'estremità del polso e serve per effettuare il lavoro cui il robot è deputato.

Inoltre la parte elettronica è un insieme di sensori e organi elettronici atti a definire il movimento del braccio robotico.

1.1.1 Classificazione dei robot Industriali

Essendo molte le funzioni a cui i robot industriali possono assolvere, è utile in primo luogo distinguerli e classificarli in base alle principali tipologie. Due sono le categorie fondamentali che consentono una prima suddivisione:

- La **cinematica**, ovvero i movimenti e i gradi di libertà, si riferisce alla catena meccanica di collegamenti che ci sono tra i vari assi e alle tipologie degli assi, rotativi o lineari;
- Il **numero di assi**.

In riferimento a queste due caratteristiche, vengono individuate 4 macro-categorie di robot industriali:

- I **robot cartesiani** sono caratterizzati dalla cinematica più semplice in quanto sono costituiti da una combinazione di assi lineari e rotativi lungo i quali il robot si muove; a ciascuno corrisponde un grado di libertà. Sono detti anche **robot lineari, a portale o robot XYZ** perché solitamente si muovono in linea retta su 3 assi che fanno riferimento a un sistema di coordinate cartesiane (X, Y e Z), a cui si può aggiungere un polso che consente il movimento rotatorio;
- I **robot SCARA** sono realizzati con 4 assi (4 DoF) e si muovono lungo assi verticali fissi, effettuando rotazioni su uno stesso piano. Consentono il posizionamento dell'oggetto in un volume X,Y,Z a cui viene aggiunta la rotazione. In pratica, in un piano orizzontale si

muovono 2 bracci articolati, incernierati ad una estremità con un asse verticale fisso, mentre all'altra estremità libera si trova un asse Z, rispetto al quale sono consentiti il movimento verticale e la rotazione;

- I **robot antropomorfi** sono così chiamati perché realizzati ad imitazione della capacità di movimento del braccio e della mano dell'uomo. Hanno una struttura molto mobile in quanto sono composti da una serie di giunti che possono variare da 4 a 7, ad ognuno dei quali corrisponde un grado di libertà (DoF), e consentono al robot di raggiungere qualsiasi posizione e orientamento all'interno del loro volume di lavoro;
- I **robot DELTA** sono anche noti come robot paralleli, perché caratterizzati da una struttura cinematica parallela grazie alla quale sono in grado di eseguire applicazioni di automazione più complesse rispetto ai manipolatori a 6 DoF. Sono realizzati da tre braccia collegate tramite giunti ad un'unica base che sormonta l'area di lavoro, all'interno della quale le stesse braccia muovono un singolo tool in modo rapido e preciso, controllando direttamente ogni sua articolazione. Vengono tipicamente impiegati nelle applicazioni di prelievo e posizionamento (pick and place) e packaging nell'industria alimentare, farmaceutica ed elettronica. Tali robot possono avere 3, 4 o 6 assi;
- I **robot collaborativi** sono robot nati per soddisfare l'esigenza di condividere in sicurezza lo spazio di lavoro con gli esseri umani e sono caratterizzati da un'elevata flessibilità. Generalmente, sono più facili da programmare rispetto agli antropomorfi, con i quali hanno in comune i 6 o più gradi libertà, la forma articolare simile al braccio umano e la possibilità di integrazione al polso con svariati tools per l'automatizzazione di operazioni diverse. Essi sono caratterizzati da una cinematica snella, decisamente leggera e di dimensioni contenute che consente loro di lavorare in spazi aperti e di interagire con l'ambiente che li circonda.

1.2 Robotica Collaborativa e i Cobot

La **robotica collaborativa** vede in azione i cosiddetti cobot (collaborative robot), robot capaci di apprendere ed eseguire una straordinaria varietà di compiti per assistere l'uomo nelle lavorazioni. In questo frangente, non ci sarebbe nulla di rivoluzionario rispetto ad un robot tradizionale. La caratteristica distintiva risiede infatti nello specifico della collaborazione.

Il cobot è quindi il risultato di vari contributi tecnologici, come la visione artificiale, il cognitive computing e la sensoristica IoT, che hanno consentito di introdurre macchine di piccole dimensioni, che possono essere continuamente riposizionate, oltre a richiedere un moderato dispendio di energia.

I cobot sono dei preziosi assistenti, intelligenti e capaci di riconoscere il contesto entro cui sono chiamati ad operare e migliorare progressivamente la loro efficienza grazie a sistemi software basati su tecniche di Machine Learning, che possono renderli più o meno autonomi, a seconda delle esigenze di ciascuna linea di produzione. Rispetto alla robotica autonoma tradizionale, che richiedeva spesso spazi esclusivi, la robotica collaborativa è concepita nativamente per lavorare insieme all'uomo, in una condizione di totale confidenza operativa, che elimina il concetto di barriera di sicurezza. I cobot sono infatti dotati di una sensoristica in grado di rilevare in anticipo la possibile collisione con organismi terzi, tra cui rientrano il personale umano e gli altri oggetti e impianti presenti sul piano di fabbrica.

La robotica collaborativa non rende obsoleta la robotica industriale tradizionale, in quanto la sua concezione è assolutamente complementare, programmata per integrarsi con i sistemi e gli impianti esistenti, ai fini di incrementare la produttività, ridurre i costi e il time-to-market dei prodotti, oltre a garantire condizioni di maggior sicurezza sui luoghi di lavoro.

Come molti altri sistemi robotici, il cobot non mira a sostituire l'uomo, ma ad assisterlo nello svolgimento delle operazioni più gravose e ripetitive, ai fini di migliorare l'efficienza complessiva del suo operato. Nella sua configurazione più diffusa, il cobot è un braccio meccanico che offre ai lavoratori umani la proverbiale mano in più.

Nello specifico un **Robot collaborativo** (o cobot) è robot antropomorfo con movimenti su sei assi progettati per rispettare criteri di sicurezza, flessibilità e compattezza e studiati per lavorare a stretto contatto con l'operatore anche senza barriere protettive intorno. Presentano, difatti, dimensioni nettamente minori rispetto alla loro controparte industriale, il che permette una certa versatilità nel posizionamento, oltre a sviluppare forze inferiori.

I cobot si caratterizzano per la facilità nella programmazione. Essi possono essere programmati o tramite tablet (terminale di programmazione) touch screen, quindi utilizzando le funzioni di trascinamento della selezione, o spostando manualmente il braccio robotico in un percorso ideale a punti, chiamati waypoint.



Figure 2: Robotica Collaborativa

1.2.1 Ambiti di utilizzo dei robot collaborativi

I robot collaborativi non sono adatti a carichi pesanti o ad applicazioni molto veloci ma possono trovare spazio in tutti i settori industriali. In particolare nelle applicazioni di:

- **Lucidatura:** il robot lucida anche le superfici curve e irregolari con una forza regolabile per un risultato costante;
- **Stampaggio ad iniezione:** il robot può essere utilizzato in tutte le fasi della produzione di plastiche, con precisione e cadenza richiesta;
- **Analisi di laboratorio:** sollevare gli operatori dai lavori più ripetitivi con un robot per migliorare i processi di testing;

- **Avvitatura:** lasciare che un robot automatizzi i processi di avvitatura, ripetendo lo stesso movimento più volte con la stessa precisione e velocità, per migliorare la produttività e la qualità dei prodotti;
- **Confezionamento e palletizzazione:** potrebbero essere faticose e ripetitive per l'operatore e quindi si lascia che il robot svolga questi compiti;
- **Incollaggio e dosatura:** il robot può aggiungere efficienza ai processi continui, come incollaggio e dosatura, erogando ogni volta la corretta quantità di materiale con la massima precisione;
- **Asservimento macchine:** il robot può essere utilizzato per la maggior parte delle applicazioni di asservimento macchine utensili, ed è facilmente riadattabile al variare del mix produttivo;
- **Assemblaggio:** il robot gestisce senza sforzo il montaggio di plastiche, legni, metalli e un'ampia gamma di altri materiali, migliorando allo stesso tempo la rapidità e la qualità del processo;
- **Prelievo e posizionamento:** un robot può eseguire la maggior parte dei compiti di prelievo e posizionamento in modo autonomo, riducendo tempi di ciclo e gli sprechi di materiale;
- **Controllo qualità:** un robot, correttamente equipaggiato, può rilevare scarti e componenti difettosi prima che siano confezionati, in modo da mantenere alta la qualità del prodotto spedito ai clienti (Universal Robot, 2017).

1.3 Confronto tra Robot industriali e collaborativi

I **robot industriali** sono in genere macchine fisse di grandi dimensioni, progettate per la produzione ad alto volume, ad altissima precisione e ad alta velocità. A causa della velocità del movimento del braccio del robot, i robot industriali possono presentare rischi per la sicurezza dei lavoratori umani, quindi di solito richiedono varie misure di sicurezza, come ad esempio, una gabbia per tenere gli esseri umani fuori dall'area di lavoro del robot e dei laser scanner perimetrali, che fermino automaticamente il robot nel momento in cui viene rilevata una presenza umana entro l'area di lavoro.

I **cobot** sono ideali per le aziende manifatturiere con produzione a bassi volumi e grandi varietà di prodotto o per le aziende che hanno bisogno di automatizzare in sicurezza processi da eseguire insieme ai lavoratori umani. Le principali caratteristiche del robot industriale sono:

- Ideale per le grandi aziende che producono grandi lotti degli stessi prodotti per lunghi periodi;
- Programmato, considerando un ambiente di lavoro stabile e perlopiù immutabile. Esegue uno stesso movimento con il minimo bisogno di adattamento all'ambiente;
- In genere richiede protezioni di sicurezza per tenere i lavoratori umani fuori dalla cella di lavoro del robot;
- In genere ripete le stesse azioni per anni, con un tool integrato per quel processo specifico;
- Grande investimento, ROI più lungo, grandi responsabilità del System Integrator.

Invece, le caratteristiche del robot collaborativo sono riassunte in:

- Progettato per la produzione a basso volume e grande varietà di prodotto, in cui il robot viene spesso redistribuito nel layout di produzione per nuovi processi;
- In grado di adattarsi a un ambiente di lavoro mutevole e dinamico. Si adatta ai pezzi da movimentare;
- Dopo aver svolto una corretta valutazione del rischio, gli esseri umani possono lavorare insieme ai cobot nelle applicazioni collaborative;
- Più adatto ad essere programmato per svolgere compiti diversi da quello iniziale;
- Prezzi cobot competitivi, ma l'integrazione del sistema e la formazione degli operatori richiedono un certo investimento iniziale in tempo e denaro.



Figure 3: Robotica Collaborativa e Industriale

Per concludere questo paragrafo, vengono elencati i principali vantaggi della robotica collaborativa rispetto alla robotica industriale:

- **Flessibilità:** i robot collaborativi possono essere attrezzati in molteplici configurazioni, consentendo altrettante applicazioni;
- **Sicurezza:** i robot collaborativi risolvono il problema legato al distanziamento sociale. Infatti, il cobot, non solo sceglie i percorsi più vantaggiosi ma, al tempo stesso, si arresta ogni volta che trova una persona sulla propria strada;

- **Produttività:** la produttività del magazzino e della fabbrica aumenta in maniera vertiginosa con l'utilizzo dei robot collaborativi, grazie ad un calo netto del tempo/ciclo dovuto alla maggiore autonomia dei cobot;
- **Analytics:** i benefici in termini di risultati che i robot portano sono sempre misurabili e, in base ad essi, è possibile orientare le scelte strategiche sulle attività logistiche.
- **Scalabilità:** la flotta di robot può sempre essere ampliata o ridotta, a seconda delle necessità, con grande facilità di integrazione.

1.4 La sicurezza con i Robot Collaborativi

Quando si parla di robotica collaborativa, un aspetto fondamentale da non trascurare è la **sicurezza**. Questo argomento è trattato all'interno di svariati documenti in letteratura; a tal punto, di seguito, sono riportati degli estratti di tre articoli.

1.4.1 Articolo 1: Collaborative robotics: New era of human–robot cooperation in the workplace

I sistemi robotici collaborativi sono una nuova applicazione robotica che permette agli operatori umani e ai robot di lavorare insieme, in modi che prima erano impossibili. Tuttavia, con questa nuova capacità di lavoro, è necessario effettuare nuove valutazioni sui rischi e pericoli con queste nuove applicazioni. In precedenza, i lavoratori sono sempre stati al sicuro dai sistemi robotici tramite l'ausilio di protezioni e un'enorme distanza nell'ambiente di lavoro. Queste salvaguardie possono essere proprio delle barriere fisiche o dei sistemi di sensori che permettono di avere uno stop protettivo delle attrezzature, se il lavoratore supera determinati confini delineati e conosciuti come lo **spazio di salvaguardia**.

I requisiti di sicurezza per il design e l'implementazione di sistemi robotici industriali sono specificati in determinati consulti standard **ANSI/RIA R15.06-2021 (“R15.06”)**.

I robot collaborativi rappresentano un cambiamento di paradigma dai metodi tradizionali di sicurezza dei lavoratori attorno a robot industriali. Con una corretta implementazione di sistemi robotici collaborativi, è possibile tenere al sicuro i lavoratori senza l'uso di salvaguardie come recinzioni o tende.

Un robot collaborativo o cobot, è un termine usato per descrivere un robot designato ad assistere gli umani in determinati lavori o permettere agli umani e robot di lavorare simultaneamente nello stesso spazio di lavoro, e per questo hanno determinati fattori che rendono sicura la cooperazione tra uomo e robot. La sicurezza nei robot collaborativi è raggiunta tramite numerose innovazioni tecnologiche in questi anni, che hanno equipaggiato le braccia robotici con varie capacità che dipendono dal tipo di collaborazione che intendono svolgere.

Ci sono 4 diversi tipi di operazioni collaborative definite nel **ANSI/RIA**, documenti di sicurezza standard dei robot. I requisiti per ogni tipo di collaborazione sono specificati nel report **RIA TR R15.606-2016**. Essi sono:

- **Safety-rated Monitored Stop (SMS):** I sistemi di controllo rilevano quando un lavoratore entra nello spazio collaborativo e ferma il moto del robot. Inoltre viene monitorata la posizione del robot

mentre il lavoratore è presente; quando non viene rilevato più che il lavoratore è nello spazio del collaborativo, il robot può tornare ad effettuare la propria mansione alla velocità automatica del processo.

- **Hand Guiding (HG):** Il moto del robot è permesso solo quando è direttamente controllato dall'operatore usando un dispositivo di attivazione manuale. Il dispositivo è equipaggiato con delle feature e il robot ha anche un SMS installato.
- **Speed and Separation Monitoring (SSM):** Il moto del robot è permesso solo quando la distanza di separazione tra l'operatore e il robot è pari al minimo indispensabile, per garantire sicurezza per quella determinata applicazione. Se appropriato, il moto del robot può essere rallentato riducendo la velocità per garantire maggiore sicurezza.
- **Power and Force Limiting (PFL):** In questo metodo, contatto tra robot e operatore è consentito, nel momento in cui è stata fatta una limitazione preliminare su forza e pressione del robot da applicare, in modo tale da non recare danno all'operatore. Questa è una nuova area, nella quale non abbiamo grandi dati relativi ai limiti di forza e pressione da dare al robot affinché non venga recato alcun danno all'operatore. Il comitato ISO ha sviluppato uno standard commissionato a studiare e determinare i limiti, basati sul concetto di "insorgenza del dolore" come un predittore di infortuni. Il risultato dello studio è la pubblicazione dell' ISO/TS 15066. Studi aggiuntivi possono aiutare ad arricchire il set di dati a disposizione per ottenere maggiori informazioni su tale argomento molto importante.



Figure 4: Illustrazione del braccio robotico con limitazione di potenza e forza (PFL) utilizzato in un sistema robotico collaborativo

La valutazione dei rischi è, molto più importante se consideriamo un'applicazione collaborativa di quella non collaborativa. Questo perché, dal lavoro in prossimità del robot, nuovi rischi incombono in un potenziale contatto tra uomo e robot, il quale non è presente quando ci sono delle recinzioni tra lavoratore e robot in una classica cella di lavoro. Questo è particolarmente vero per un oggetto, che è il punto focale dell'operazione. Processi dannosi,

parti calde, e il disegno di presa possono creare degli azzardi, i quali non verrebbero considerati in una classica cella robotica non collaborativa. Ci sono tre metodi popolari di valutazione dei rischi per la sicurezza delle macchine: **Failure Mode and Effect Analysis**, **Hazard based risk assessment** e **task based risk assessment**.

- **FMEA**: È un importante metodologia di valutazione dei rischi per i produttori nel determinare le conseguenze se un determinato dispositivo dovesse fallire.
- **Hazard-based Risk Assessment**: Questo metodo di valutazione dei rischi è anch'esso popolare tra i produttori perché permette loro di mitigare dei possibili azzardi causati dalle macchine.
- **Task-based Risk Assessment**: Questa è la metodologia preferita per i sistemi robotici industriali. Essa guarda non solo all'azzardo del sistema, ma anche al task che i lavoratori dovranno intraprendere in relazione con il sistema, e in fine considerare la task-hazard pairs. Quando tutti i task relazionati con il sistema sono stati identificati e considerati, azzardi aggiuntivi non ovvi, possono essere identificati, o di metodi di mitigazione iniziali possono essere anche identificati.

1.4.2 Articolo 2: Terminology in safety of collaborative robotics

Le parole d'ordine in robotica collaborativa possono essere inclini ad un uso sbagliato quando associate a sicurezza. Convenzionali o popolari etichette non sempre riflettono i necessari e appropriati requisiti, causando confusione e possibili implementazioni sbagliate. Innegabilmente, il significato maggiore di etichetta di sicurezza ha servizio all'interno della comunità manifatturiera riferendosi ai tipi generali di applicazioni e perciò, capendo meglio il tipo di feature di sicurezza obbligatorie per le varie conformità, chiamate certificazioni. La robotica collaborativa ha meno di un decennio nell'industria e lotta ancora tra conoscenze parziali di standard e requisiti, misconoscenze e falsi miti. La moltiplicazione delle definizioni, pur essendo benvenuta come punto di partenza per identificare le situazioni pratiche, ha migliorato il livello di apprendimento dei requisiti di sicurezza e la qualità dell'analisi dei rischi nell'interazione tra uomo e robot. Mentre diverse qualifiche sono dinamiche e gradite in diverse comunità robotiche per i task di classificazione e programmazione, le definizioni devono essere standardizzate quando applicano determinate forme di conformità nella sicurezza industriale.

La miglior opportunità per preservare la robotica collaborativa da implementazioni di tecnologie di sicurezza non normative, è quella di evitare di usare definizioni per i requisiti di sicurezza della messa a terra, conservando solo la loro intercambiabilità. Parametri alternativi per una valutazione amichevole del rischio, due definizioni sono raccomandate:

- La frequenza di richieste di accessi dell'uomo;
- L'energia cinetica del sistema robotico.

La **frequenza** è un indice quantificabile di richieste di accessi all'interno dello spazio condiviso per l'esecuzione automatica di un task, dove umani e robot sono operativi. Molti lavori hanno implicitamente riconosciuto il fattore di frequenza alla base del "grado di interazione" o "coinvolgimento" o "condivisione dei compiti" come uno dei criteri per identificare sistemi realmente collaborativi.

L'**energia cinetica** è un fattore generico che tiene conto della richiesta di

prestazioni in una data applicazione, la quale è, di fatto, come un problema, approssimato tramite la velocità. La velocità, a sua volta, è correlata a quasi tutti i criteri di stima della gravità dell'interazione fisica, ad esempio momento, potenza, energia cinetica, ecc.

In questo modo, tutte le applicazioni possono essere etichettate in termini di coppia energia-frequenza.

Ad esempio, un'applicazione di asservimento macchine potrebbe essere definita come un'applicazione con una bassa frequenza, bassa-media energia. Dipendendo dalla valutazione del rischio, l'applicazione può usare funzioni di sicurezza collaborative o convenzionali. Assemblaggio ibrido uomo-robot, invece, verrebbe probabilmente classificato come "ad alta frequenza, a media/alta energia" e appartiene sicuramente alle operazioni collaborative.

La combinazione di questi due fattori quantitativi, usata anche nella stima del rischio, ha una forte correlazione con la progettazione di misure protettive.

Ad esempio, se un'applicazione è molto pericolosa, i parametri convenzionali di salvaguardia sono l'unica soluzione. In questo caso la salvaguardia, includendo guardie e equipaggiamento sensibile protetto, è regolarmente usata per la sicurezza del personale fuori dallo spazio. Tutte le situazioni, dove non c'è condivisione di nessuno dei due spazi o attività, appartengono a questa classe. Al contrario, le applicazioni collaborative sono tutte quelle situazioni dove si cerca un concomitante, non necessariamente simultaneo, ma anche occasionale, presente nello stesso posto dell'operatore umano e muovendo il sistema robotico. In questo caso, le funzioni collaborative sono le migliori per la combinazione di frequenza e velocità.

Per un'elevata richiesta di collaborazione, l'interazione fisica con la salvaguardia del PFL è forse accettabile fintanto che la velocità è limitata. All'aumentare della velocità (tempo di ciclo più breve), il metodo SSM privo di collisioni potrebbe essere più adeguato, purché la frequenza di occupazione dello spazio di lavoro condiviso non lo sia, provocando troppe fasi di decelerazione o arresti. L'utilizzo di una mappa frequenza-energia evidenzia anche due situazioni che sono spesso discutibili nella progettazione della sicurezza. La prima, potenziale inefficienza appare quando la necessità di un accesso a bassa frequenza è implementato con funzioni collaborative, usando PFL metodi.

Questo si traduce in una limitazione obbligatoria della potenza in cambio di benefici limitati a causa della natura occasionale dell'interazione. Molte delle implementazioni preferiscono un perimetro di salvaguardia convenzionale, in aggiunta, per esempio, un accesso bloccato una volta che il robot si ferma temporaneamente, o combina sensori per l'attivazione di opzioni collaborative su effetti di presenza o accesso. Possibili misure rappresentano, invece, la situazione opposta di soluzioni di salvaguardia convenzionali che naturalmente vogliono richiedere un naturale e pratico accesso all'interno dello spazio. Si adatterebbero perfettamente alle caratteristiche e l'aggiramento o l'inganno delle protezioni non è "scoraggiato" per necessità. Possibili misure sono aspettate, con le conseguenze di una generale degradazione di tutta la sicurezza dell'applicazione. Poi la classificazione della coppia frequenza-energia, consiste nella qualifica della natura dell'applicazione, e le funzioni di sicurezza vengono in risposta.

1.4.3 Articolo 3: Examining the Role of Safety in the Low Adoption Rate of Collaborative Robots

I robot collaborativi sono degli importanti acceleratori della crescita dell'industria. Il loro potenziale è indiscusso, eppure il loro utilizzo rimane basso. La sicurezza è uno dei fattori che influenza la loro adozione. Questo documento esamina in particolare, la sicurezza come un fattore di adozione e sostiene che la natura sistemica della sicurezza per i cobot sfocia in una tensione paradossale. Questa tensione porta a segnali confusi e contrastanti per gli operatori del settore contribuendo al basso tasso di adozione dei cobot. Questo articolo aiuta a comprendere meglio il ruolo globale della sicurezza nella robotica collaborativa.

Nell'odierno ambiente produttivo dell'Industria 4.0 la digitalizzazione avanzata è onnipresente. Le tecnologie digitali sono considerate come la principale guida per l'avanzamento dell'industria manifatturiera. I robot collaborativi industriali sono uno di queste tecnologie digitali e sono importanti acceleratori della crescita dell'innovazione industriale. Nonostante il loro potenziale, la distribuzione dei cobot è veramente limitata ed è rimasta al di sotto delle aspettative.

Comparato con i robot industriali convenzionali, l'ultima generazione di robot collabora direttamente con l'operatore umano e lavorano autonomamente. I cobot hanno importanti risorse:

- Essi sono molto flessibili;
- Essi possono facilmente essere programmati per nuovi task;
- Essi sono mobili;
- Essi spesso costano meno dei robot convenzionali.

In aggiunta, possono togliere all'operatore umano lavori pericolosi e ripetitivi. Le caratteristiche dei cobot, inoltre, promuovono le nuove applicazioni e servizi, tramite la distribuzione di nuove tecnologie come la realtà aumentata e l'uso di occhiali intelligenti.

Contrariamente ai robot industriali convenzionali, dove i robot e l'operatore sono separati per garantire la sicurezza, i sistemi collaborativi sono destinati ad interagire con l'operatore umano e i sistemi di controllo e i sensori integrati sono utilizzati per evitare e ridurre l'impatto delle collisioni e migliorare intrinsecamente la sicurezza.

L'obiettivo di questo documento è quello di investigare sul ruolo della sicurezza nel basso tasso di adozione dei cobot e di offrire un punto di inizio per capire le ragioni di questo. E successivamente si propongono suggerimenti per i prossimi passi.

Lo stato dell'arte mostra che il ruolo della sicurezza come fattore di adozione dei cobot è stato sottovalutato. Questo documento sostiene ulteriormente che il contesto mutato per i cobot rivela una natura di sistema della sicurezza di essi. Questa natura di sistema sfocia in una tensione paradossale per la sicurezza dei cobot. Questa tensione contribuisce al basso tasso di adozione dei cobot tramite l'invio di segnali confusi e contrastanti per gli operatori del settore. Per quanto ne sappiamo, non c'è ancora stato uno sforzo per comprendere in modo specifico il ruolo globale della sicurezza nell'adozione dei cobot. Aumentare le conoscenze sulla sicurezza fin dalle prime fasi del processo decisionale è una delle soluzioni suggerite per chiarire i segnali conflittuali e diminuire la tensione. Questa analisi contribuisce alla comprensione delle decisioni sull'acquisizione e l'impiego dei cobot, a cui finora è stata data solo scarsa attenzione.

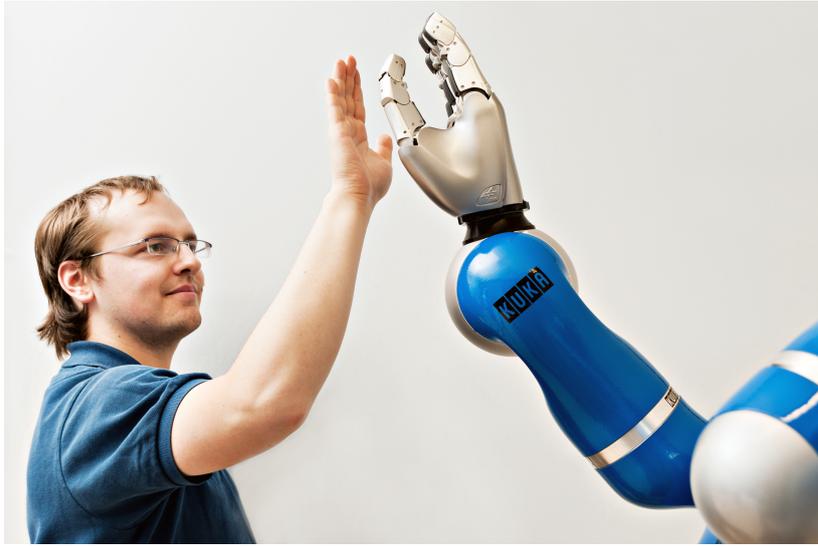


Figure 5: Cobot e umano

La letteratura scientifica è stata consultata per quanto riguarda il modo di misurare il grado di robotizzazione. La fonte più comunemente citata per valutare il livello di robotizzazione dell'industria è la statistica della Federazione Internazionale di Robotica. Riguardo ai robot industriali la domanda di robot industriali è aumentata dal 2010, con un aumento del 9% in media all'anno in tutto il mondo dal 2015 al 2020. La distribuzione dei cobot, dall'altra parte, è davvero limitata ed è rimasta al di sotto delle aspettative.

Sulla base dei dati mondiali della Federazione Internazionale di Robotica, Statista riporta che la quota di robot collaborativi sul totale delle installazioni di robot industriali, pur aumentando annualmente dal 2017, nel 2019 è stata pari al 4,8 %.

La letteratura scientifica dell'ultimo decennio è stata studiata per l'adozione della collaborazione uomo-robot (HRC) in generale e il ruolo della sicurezza nell'adozione dell'HRC in particolare. Un'ampia ricerca iniziale è stata effettuata sui database Web of Science (WoS) e Scopus per le pubblicazioni in inglese dell'ultimo decennio (2011-giugno 2021), contenenti "collaborative" e "industriale" e "robot" nel titolo, nell'abstract o nelle parole chiave. All'interno di questa selezione, sono stati presi in considerazione solo gli articoli che contenevano una delle seguenti parole: adozione, sfida, barriera, driver, sicurezza. Questo processo ha permesso di ottenere 77 pubblicazioni da WoS e 46 da Scopus. Infine, sono state aggiunte 12 pubblicazioni, per un totale di 135 titoli.

Non c'è una comprensione diretta e un uso coerente del termine "adozione" in tutta la letteratura esaminata. I termini "adozione", "acquisizione", "diffusione" vengono utilizzati in modo intercambiabile. Il presente documento utilizza il termine "adozione" per descrivere l'atto di decidere di implementare un robot collaborativo.

L'adozione dell'innovazione e delle nuove tecnologie è un settore di ricerca che ha ricevuto molta attenzione negli ultimi decenni. Un esempio di modello per l'adozione di nuove tecnologie da parte di un individuo è il modello di accettazione (TAM), il quale rappresenta un modello efficace per comprendere le scelte di accettazione delle tecnologie da parte degli utenti coinvolti. Esso è ampiamente descritto e discusso da Venkatesh e Bala. Altre teorie influenti riguardanti l'adozione di nuove tecnologie da

parte di un'organizzazione sono per esempio la teoria della diffusione delle innovazioni (DOI) di Rogers e la teoria della tecnologia-organizzazione-ambiente (TOE).

La nozione di paradosso può essere usata per generare un contributo teorico e una riflessione investigativa. Secondo De Keyser et al., un'importante caratteristica del paradosso è che esso denota una contraddizione, o uno stato di opposizione verso qualcos'altro. Lo stesso autore identifica tre modi di usare il paradosso per generare contributi teorici come mezzo per teorizzare, oppure come mezzo per capire intuizioni avanzate oppure un modo per verbalizzare qualcosa di sorprendente. In quest'ultima categoria, gli studiosi usano il paradosso per affinare il contributo che propongono con la descrizione delle tensioni paradossali presenti in un particolare campo di indagine. Questo documento combina la seconda e la terza opzione per capire meglio il ruolo della sicurezza come un fattore di adozione per i cobot e per approfondire la comprensione delle decisioni di impiego dei cobot, a cui finora è stata dedicata solo poca attenzione.

I risultati presentati sono basati sull'analisi di dieci pubblicazioni listate nella tabella sottostante (1.4.3). Quattro studi sono basati sulla revisione della letteratura, quattro su una ricerca empirica e quattro usano un modello misto nell'analisi descrittiva. La ricerca empirica è di natura qualitativa o esplorativa e basata su un numero limitato di osservazioni. Il tema dell'adozione dei cobot non è stato finora ancora studiato a fondo.

Autore, anno	Tipo di studio
(P1) Aaltonen et al., 2019	Empirico
(P2) Cohen Y. et al., 2021	Revisione letteraria
(P3) Grahn S. et al., 2017	Analisi descrittiva
(P4) Kildal J. et al., 2018	Empirico
(P5) Libert K. et al., 2020	Revisione letteraria
(P6) Matheson E. et al., 2019	Revisione letteraria
(P7) Saenz J et al., 2018	Revisione
(P8) Simões A.C. et al., 2020	Empirico
(P9) Vanderborght B., 2019	Metodo misto
(P10) Whiting T. et al., 2021	IEmpirico

Simões et al., hanno condotto una ricerca estesa dei fattori di adozione dei cobot, basata su tredici interviste realizzate nel 2018 e una revisione letteraria per la quale il periodo di tempo non è specificato. Gli stessi autori hanno proposto una classificazione data da tre categorie:

1. **Interna**
2. **Esterna**
3. **Tecnologica**

Ulteriori documenti in questa revisione, sono concordi con questa classificazione.

La sicurezza come fattore di adozione nella letteratura esaminata viene presentata e discussa separatamente nella prossima sezione.

I fattori di adozione identificati nei nove lavori esaminati accanto a quello di Simões et al., da un lato, confermano la classificazione di Simões et al. e, dall'altro, propongono altri fattori aggiuntivi. I fattori corrispondenti menzionati in almeno due lavori della categoria "Interna" sono l'accettazione da parte dell'utente e la ricettività e la disponibilità dell'organizzazione.

Nella categoria “Esterna”, i singoli autori riferiscono anche, il ruolo dei partner commerciali e la pressione dell’industria come fattore di adozione. L’analisi costi-benefici è citata come fattore di adozione da cinque documenti e la complessità da uno.

L’introduzione dei cobot come soluzione per la carenza di lavoratori qualificati è avanzata a favore dell’adozione dei robot. Il ruolo della gestione delle risorse umane nel processo di cambiamento è come un fattore di adozione. Lo stesso vale per gli importanti fattori esterni identificati in aggiunta: il ruolo della legislazione e della regolamentazione, della certificazione e della standardizzazione. Infine, sono state menzionate alcune considerazioni tecnologiche aggiuntive per cui la mancanza di strumenti ingegneristici per l’analisi delle applicazioni cobot è stata considerata una delle due barriere più importanti per l’adozione dei cobot.

Sei articoli affrontano specificamente il tema della sicurezza come ostacolo all’adozione dei cobot (1.4.3). La sicurezza è stata riconosciuta come una delle due più importanti barriere per l’adozione dei cobot. Gli autori di quest’ultima rassegna attribuiscono questo fatto ai rigidi requisiti di sicurezza per i cobot.

Autore	
(P1) Aaltonen et al., 2019	La generica mancanza di conoscenze, legata alla mancanza di sicurezza come uno degli ostacoli più significativi barriere
(P3) Grahn S. et al., 2017	Il tasso di adozione dei cobot è legato alla percezione della sicurezza dell’operatore.
(P4) Kildal J. et al., 2018	La sicurezza è la seconda barriera più importante dopo la mancanza di conoscenze
(P6) Matheson E. et al., 2019	La sicurezza è una sfida che deve essere risolta per l’adozione industriale dei cobot.
(P7) Saenz J et al., 2018	Gli elevati requisiti di sicurezza sono un ostacolo principale per l’adozione.
(P9) Vanderborght B., 2019	Importanti fattori abilitanti per l’adozione dei cobot legati con la sicurezza: la responsabilità (incerta) e le norme potrebbero disincentivare; certificazione e standard (di sicurezza) visti come promotori della standard (di sicurezza) visti come un promotore per l’adozione di nuove tecnologie

Un rapporto di visione commissionato dalla Commissione europea affronta esplicitamente i fattori abilitanti per l’adozione dei cobot. I seguenti tre fattori sono direttamente collegati alla sicurezza:

1. Gli standard non sono ritenuti sufficientemente avanzati per consentire la certificazione del sistema;
2. Poiché la certificazione di sicurezza dei robot da parte di terzi sta rapidamente diventando un prerequisito per l’ingresso nel mercato,

anche questo potrebbe giocare un ruolo nell'adozione;

3. La responsabilità legale per gli incidenti causati da principi open-source potrebbe creare scenari di incertezza rispetto alla robotica chiusa e potrebbe agire come un importante disincentivo per gli investimenti nei robot.

La percezione di insicurezza degli operatori nei confronti dei cobot, si ritiene che stia rallentando il tasso di adozione, il che implica che i produttori dovranno garantire che gli operatori si sentano a proprio agio e si divertano a lavorare con i cobot.

La revisione della letteratura mostra come un numero limitato di studi investigano e discutono sulla sicurezza vista come un fattore di adozione per i robot. Anche se la sicurezza viene considerata direttamente come un fattore di adozione, nessuno degli articoli esaminati discute il ruolo della sicurezza in modo dettagliato o offre una comprensione più approfondita. Nel resto di questa sezione, viene offerto un punto di partenza per la comprensione.

Quando i robot e gli umani iniziano a lavorare insieme, avviene un cambiamento fondamentale. Franklin et al. affermano un cambiamento di paradigma, dai metodi tradizionali di mantenere i lavoratori separandoli fisicamente, al metodo collaborativo senza recinzioni, dove il contatto tra robot e lavoratori è consentito.

Robot industriali collaborativi sono designati per permettere le fisiche interazioni con l'operatore umano e il cobot. Gli standard e le direttive di sicurezza in vigore permettono di ridurre al minimo le collisioni e quindi di aumentare la sicurezza. Tuttavia, la presenza ravvicinata di un robot e l'interazione tra l'uomo e i cobot crea un ulteriore livello di preoccupazione per la sicurezza. Un robot collaborativo è parte di un complesso sistema che può essere usato per varie applicazioni industriali. Un cobot consiste di vari pezzi hardware come pinze, sensori connessi con diverse applicazioni software che alimentano i dati da fonti di dati diverse e distribuite. La valutazione dei rischi per l'applicazione di cobot è obbligatoria. Le liste di controllo dei rischi per identificare potenziali fonti di rischio sono suggerite nelle norme ISO 15066 e ISO 10218, ma le liste di controllo dei pericoli standardizzate non sono esaustive e spesso ignorano fattori di rischio aggiuntivi.



Figure 6: Collaborazione cobot-umano

La sicurezza per i cobot, si concentra specialmente sugli aspetti tecnologici relativi alle misure di salvaguardia della progettazione fisica come descritto nell' ISO 15066. Questa è una visione ristretta della sicurezza dell'interazione fisica uomo-robot, dove anche gli standard di sicurezza si concentrano su una progettazione tecno-centrica delle salvaguardie.

La necessità di adottare una prospettiva più ampia, al di là delle garanzie tecniche e sicurezza tecnica e fisica, viene difesa guardando i cobot da una prospettiva di sistema. Essa è offerta dal pensiero dei sistemi sociotecnici (STS). Questa teoria aggiunge la dimensione sociale a quella tecnica e si adopera per l'ottimizzazione comune e l'ottimizzazione congiunta e la corretta cooperazione del sistema tecnico e di quello sociale. Ciò significa che ci sono ulteriori fattori che devono essere presi in considerazione nella progettazione di spazi di lavoro collaborativi sicuri per far fronte ai rischi emergenti associati a sistemi complessi come i cobot. Berx et al. hanno identificato i fattori di rischio del cobot sulla base di una revisione della letteratura dell'ultimo decennio e li hanno classificati in cinque classi.

Oltre ai nuovi fattori tecnologici (ad esempio, il rischio informatico) anche i fattori di rischio legati all'essere umano (ad esempio, psicosociale), spazio di lavoro collaborativo (ad es. controllo degli ingressi), all'impresa (ad es. strategia di sicurezza, etica) e all'esterno (ad esempio, la regolamentazione). Il ruolo della sicurezza nell'adozione di cobot è ad ampio raggio e la complessità di per sé può essere considerata una barriera.

Ritornando alla revisione della letteratura, si può notare che la classificazione proposta da Simões et al., in un certo senso riflette già la natura del sistema. Tuttavia, la sicurezza non è specificamente menzionata come fattore di adozione, mentre in un precedente lavoro si affermava che gli aspetti della sicurezza erano stati presi in considerazione dai partecipanti allo studio. La sicurezza dei cobot non può essere isolata come un fattore a sé stante, ma riflette molti fattori di rischio, spesso correlati, come proposto nell'analisi di Berx et al.

Laddove la sicurezza è menzionata come fattore di adozione negli altri documenti esaminati, si può sostenere che ciò avvenga in termini molto generali (P1, P4 e P6) o molto specifici (P3, P7 e P9) ad esempio facendo riferimento alla normativa. Inoltre, la completezza dei fattori di rischio per i cobot richiede una maggiore conoscenza, oltre a quella tecnologica il che è chiaramente visto come un problema, dato che due studi riconoscono che la mancanza di conoscenze è una una barriera importante.

I robot collaborativi sono spesso etichettati come intrinsecamente sicuri. Questo è principalmente legato alla progettazione intrinsecamente sicura dei sistemi robotici collaborativi, in cui può verificarsi un contatto tra l'uomo e il cobot.

In questo caso, il controllo di sistema è specificamente progettato per operazioni collaborative con valori di soglia di potenza e forza, e i cobot possono migliorare la sicurezza minimizzando le collisioni.

il controllo di sistema è specificamente progettato per operazioni collaborative con valori di soglia di potenza e forza, e i cobot possono migliorare la sicurezza minimizzando le collisioni.

La sicurezza nei cobot può essere ulteriormente migliorata dall'applicazione di sensori avanzati, come sensori cutanei, pinze innovative e nuove tecnologie come l'aptica. Tuttavia, non esiste un progetto sicuro in assoluto, poiché è l'applicazione (non solo il braccio robotico, ma anche l'effettore finale e il carico utile) che deve operare in sicurezza in tutte le situazioni.

Inoltre, come discusso in 4.1 i cobot possono creare nuovi rischi a causa della vicinanza con gli esseri umani e, come si è detto nel paragrafo 4.2, ci sono altri fattori di rischio in gioco nei robot collaborativi, oltre a quelli tecnologici. Un luogo di lavoro sicuro per i cobot non significa necessariamente la prevenzione dei rischi per la salute fisica e mentale.

D'altro canto, alcuni ritengono che i cobot siano troppo sicuri. Dal punto di vista del produttore, Esben Østergaard, cofondatore di Universal Robots, ritiene che le norme di sicurezza siano troppo severe e che gli standard di sicurezza adottano un approccio molto conservativo per quanto riguarda le forze accettabili che un cobot può infliggere.

Nel 2021 una ricerca esplorativa nell'ambito di una tesi di laurea magistrale ha intervistato 74 individui (utenti di cobot nel settore manifatturiero, esperti accademici e consulenti) reclutati tramite una campagna su LinkedIn e ha incluso interviste con due importanti produttori di cobot. Questa ricerca ha concluso che, a causa dei limiti di sicurezza, i cobot possono essere più lenti e il carico utile può essere inferiore con conseguente riduzione della produttività. Secondo i produttori di cobot, questo è il motivo principale per cui i cobot non sostituiranno i robot industriali convenzionali, ma piuttosto li integreranno. L'approccio conservativo, che prevede il rallentamento del cobot quando c'è un umano nelle vicinanze, sacrifica la produttività a vantaggio della sicurezza. La sicurezza può essere vista come un vincolo e persino essere considerata controproducente.

C'è una tensione paradossale nella sicurezza di un'applicazione cobot su una scala mobile che va dalla minore sicurezza dei cobot alla intrinsecamente sicuri o troppo sicuri. I cobot sono intrinsecamente sicuri quando la sicurezza si concentra sulle caratteristiche tecniche del sistema cobot (sicurezza della macchina). Quando la visione è orientata alla gestione delle operazioni, i cobot possono diventare troppo sicuri ostacolando la produttività. Da una visione incentrata sulla prospettiva umana, includendo altre dimensioni, oltre a quella tecnologica, i cobot sono meno sicuri a causa dei nuovi rischi introdotti. Questa tensione paradossale è illustrata nella Figura sottostante e mostra come possa sia promuovere che ostacolare le applicazioni o l'adozione dei cobot. Di conseguenza, l'operatore si trova di fronte a un insieme di informazioni in tensione e a un'apparente contraddizione di informazioni sulla sicurezza dei cobot. La confusione che ne deriva, unita alla mancanza di conoscenze su come far funzionare in sicurezza i robot collaborativi, si ritiene che contribuisca al motivo per cui l'adozione dei cobot è relativamente bassa.

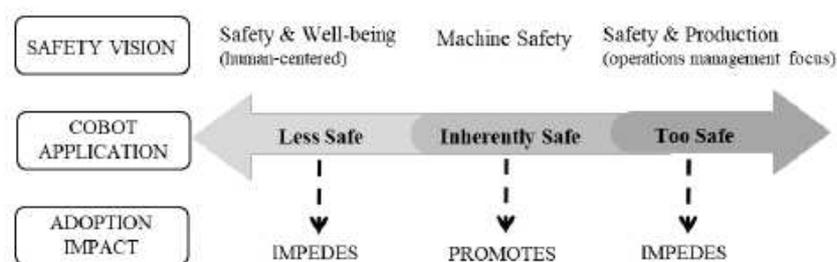


Figure 7: Scala di tensione di sicurezza del cobot

Un passo importante per diminuire la confusione per gli operatori e ridurre la tensione paradossale è quello di fornire più conoscenze in materia di sicurezza nelle prime fasi del processo di acquisizione e adozione del

cobot. La mancanza di conoscenza è stata considerata un una barriera significativa all'adozione nelle ricerche empiriche. Inoltre, quest'ultima ricerca ha messo in relazione questo aspetto con la mancanza di comprensione della sicurezza in generale, della legislazione sulla sicurezza, degli standard e dei parametri di sicurezza e della rivalutazione del rischio. Inoltre, la maggiore complessità dei sistemi collaborativi si traduce in una mancanza di fiducia e di conoscenza da parte delle organizzazioni che impiegano i sistemi di sicurezza. Gli standard esistenti non forniscono una guida completa, poiché le salvaguardie progettuali suggerite negli standard attuali per la sicurezza dei robot non integrano fattori psicosociali degli operatori che lavorano con i robot né nuovi rischi come il rischio informatico o il rischio di sicurezza legato all'applicazione dell'intelligenza artificiale.

Pertanto, per consentire alla robotica collaborativa di raggiungere il suo pieno potenziale nelle applicazioni industriali, è necessario affrontare la componente della sicurezza fin dalle prime fasi del processo decisionale, aiutando gli operatori a comprendere meglio tutti i fattori di rischio in gioco e a fornire uno strumento accessibile che valuti la predisposizione alla sicurezza fin da ora. Una valutazione di prontezza può capire la preparazione delle capacità di sicurezza di un'organizzazione nei confronti dell'impiego di un cobot.

Un punto di partenza metodologico per costruire lo strumento di valutazione del grado di preparazione può essere trovato nei principi dei **modelli di Maturità** (CMM) che consentono ai team e alle organizzazioni di focalizzarsi sullo sviluppare le competenze e le capacità necessarie in ambienti dinamicamente mutevoli. Il CMM è uno dei tanti tipi di modelli di maturità che sono stati applicati in numerosi ambiti accademici e che sono stati utilizzati per valutare la maturità o lo stato di preparazione di processi, progetti e organizzazioni. L'architettura tipica di un modello di maturità consiste in aree che definiscono l'oggetto d'indagine (nel nostro caso la sicurezza dei cobot) e di diversi livelli di maturità, che specificano le capacità che un'azienda possiede. I modelli di preparazione o prontezza possono avere uno scopo descrittivo per determinare e valutare lo stato attuale di preparazione delle dimensioni e delle sottodimensioni del modello in base al livello di preparazione appropriato.

In genere, nei modelli di maturità, esiste una nozione di **"stato finale"**, in altre parole, uno stato finito desiderabile (di eccellenza o di conformità) da raggiungere. Questa nozione di stato finale non è adatta alla sicurezza, poiché la "sicurezza assoluta" non esiste. Pertanto, la valutazione dello stato di competenza o di prontezza delle capacità o delle dimensioni che promuovono la sicurezza per i cobot sembra appropriato.

Questo documento esamina il ruolo della sicurezza nel basso grado di adozione dei cobot e offre un punto di inizio per comprendere le ragioni di ciò. La revisione della letteratura mostra che la sicurezza è uno dei più importanti fattori di adozione dei cobot, tuttavia, l'esame del ruolo della sicurezza è stato sottovalutato. Il mutato contesto per i cobot, che si muovono liberamente all'interno della fabbrica e interagiscono direttamente con gli esseri umani, rivela una natura di sistema della sicurezza dei cobot, con conseguenti tensioni paradossali. Questa tensione è il risultato dell'apparente contraddizione tra cobots troppo sicuri e meno sicuri allo stesso tempo, il che porta segnali confusi e contrastanti per gli operatori. Insieme alla mancanza di conoscenze su come far funzionare in sicurezza i

robot collaborativi, si ritiene che questa tensione sulla sicurezza dei cobot contribuisca al basso tasso di adozione dei cobot. Affrontare la componente di sicurezza presente fin dalle prime fasi del processo decisionale, supportando i professionisti a comprendere meglio tutti i fattori di rischio e fornendo uno strumento accessibile per la valutazione della sicurezza, è proposto come un passo importante per alleviare la tensione paradossale. Un punto di partenza metodologico per uno strumento di valutazione della prontezza può essere trovato nei principi dei Modelli di maturità delle capacità.

1.5 Ambito di sviluppo e Obiettivo

L'innovazione introdotta dalla robotica industriale nei diversi processi produttivi ha raggiunto ormai anche il settore calzaturiero. Ne sono un esempio i robot collaborativi prodotti dalla Universal Robots che grazie alle proprie 15 funzioni di sicurezza, dimensioni compatte e peso contenuto, facilità e immediatezza di installazione e avviamento, non necessitano di barriere perimetrali ausiliarie, possono essere installati in tutti i layout produttivi, anche quelli più complessi e articolati che caratterizzano i calzaturifici, senza richiedere alcun spostamento o modifica alle postazioni di lavoro. Queste caratteristiche, inoltre, consentono una grande flessibilità applicativa e operativa: i cobot UR, infatti, possono essere facilmente spostati all'interno del reparto produttivo e attivati su differenti fasi di lavoro in funzione di potenziali nuove esigenze emergenti.

Ci sono diverse applicazioni che possono essere automatizzate con i cobot. Alcune riguardano espressamente il processo produttivo come formatura, incollaggio, verniciatura di pellame e lucidatura. Il robot collaborativo, in questi casi, può assumere due diverse funzioni. Una è lavorare al posto dell'operatore, consentendo così di liberare le persone da fasi che possono prevedere l'uso di sostanze chimiche, per destinarle a lavorazioni che richiedono maggior intelligenza e creatività e possono generare maggior valore aggiunto. L'altra è lavorare proprio con l'operatore, porgendo e bloccando i semilavorati in posizioni specifiche, garantendo così un aumento di ergonomia nella fase di lavoro, diminuendo fatica e potenziali infortuni. Altre fasi di lavoro in cui queste macchine risultano molto utili sono meno "caratterizzanti" il settore calzaturiero, ma comportano comunque notevoli benefici. Alcuni esempi sono le attività di manipolazione, inscatolamento e pallettizzazione a fine linea. Attività piuttosto pesanti e ripetitive che possono indurre ad errori e che, se, invece, vengono automatizzate risultano molto efficienti e produttive



Figure 8: Cobot e Operatore umano

Oltre alle attività elencate sopra, esiste un'attività ulteriore nella produzione delle scarpe, ovvero la rimozione delle bave. Le **bave** sono dei filamenti sul contorno della suola, le quali, dopo il processo di produzione della scarpa, rimangono incollate sul proprio contorno. Per poter concludere la produzione della scarpa è necessario rimuovere e tagliare tali bave. Questo processo viene effettuato dall'operatore umano, tramite l'ausilio di un utensile e di un fornello industriale: l'operatore scalda la punta dell'utensile tramite questo fornello industriale e segue il contorno della suola per rimuovere le bave. È necessario che la punta dell'utensile sia molto calda, altrimenti la bava non viene tagliata bene, pertanto potrà essere necessario scaldare più volte l'utensile durante la rimozione della bava di una determinata suola.

L'utensile in questione è il seguente:



Figure 9: Utensile per rimozione bave

L'**obiettivo** della tesi è progettare un robot collaborativo che permetta di rimuovere le bave dalle suole, senza l'ausilio dell'operatore umano. Lo stato dell'arte riguardo questa applicazione è inesistente, pertanto sarà necessario, tramite dei test e delle prove, capire la fattibilità della realizzazione di tale applicazione.

1.6 Struttura della tesi

I restanti capitoli della tesi sono organizzati come segue. Nel **capitolo 2** viene presentata la strumentazione hardware e software utilizzata. Viene introdotto il robot collaborativo UR5 prodotto da Universal Robots, descrivendone l'hardware e le differenti modalità di programmazione. In particolare vengono descritte, nel dettaglio, le due modalità di programmazione per il robot, le varie caratteristiche e le metodologie.

Nel **capitolo 3** è descritto tutto il lavoro svolto durante l'attività di tirocinio. Si parte da uno studio iniziale di tutto l'hardware e software da dover utilizzare, valutando documenti e video per apprendere quanto più possibile riguardo ad oggetti mai utilizzati e poi si conclude con la spiegazione dettagliata della realizzazione dell'applicazione vera e propria.

Il **capitolo 4** è il capitolo nel quale vengono descritti tutti i test effettuati per valutare la fattibilità dell'applicazione, con i relativi risultati. Il **capitolo 5** è il capitolo relativo alle conclusioni finali.

Gli **ultimi due capitoli** riguardano la bibliografia e sitografia ovvero, sono presenti i link dei vari siti e documenti utilizzati durante lo svolgimento del lavoro e nella scrittura della tesi, e i ringraziamenti.

2 Strumentazione hardware e software

2.1 Universal Robots

La **Universal Robots** rappresenta uno dei marchi più noti nella produzione dei robot collaborativi, in particolare, utilizzeremo questo brand per la valutazione sperimentale del processo di lucidatura su pellame.

La Universal Robots è nata nel 2005 dagli ingegneri Esben Østergaard, Kasper Støy, e Kristian Kassow. Presso la Syddansk Universitet di Odense, durante una ricerca collaborativa, i tre ingegneri arrivarono alla conclusione che il mondo della robotica industriale era composto da robot pesanti, costosi, e ingombranti. Grazie a questa ricerca, i tre iniziarono a lavorare su soluzioni che rendessero i robot facilmente accessibili soprattutto a piccole e medie fabbriche. Nel 2008 riuscirono a vendere il primo robot collaborativo, nel 2012 hanno lanciato una linea di robot e nel 2018 presentarono una nuova serie E-Series, ovvero “facile da usare”. (Wikipedia, storia UR, 2021)

La scelta di questo marchio è stata fatta per la sua notorietà in ambito calzaturiero. Essendo un’azienda solida, produce ottimi prodotti per un’ampia gamma di settori, garantendo sicurezza, peso ridotto, facilità nell’installazione e avviamento; soprattutto sono molto facili da utilizzare, anche in ambiti diversi da quello al calzaturiero.

La Universal Robots offre 4 differenti cobot che si differenziano in base al carico utile e sono 3, 5, 12,5 e 16 kg, in modo tale da garantire tutti i settori automatizzati. Definiamo ora i 4 robot collaborativi che la Universal Robots propone definendo le caratteristiche principali:

- **UR3e**: il robot collaborativo perfetto per le operazioni da banco. Esso ha dimensioni compatte, perfetto per le attività di montaggio leggere. Pesa solo 11kg, ha un carico utile di 3Kg. UR3e è particolarmente adatto nelle applicazioni di montaggio, lucidatura, incollaggio e avvitatura, ovvero quelle che richiedono una qualità uniforme dei prodotti;
- **UR5e**: Il robot collaborativo UR5e, leggero e molto flessibile, porta maggiore automatizzazione nelle attività ripetitive e pericolose per l’operatore. Esso garantisce un carico utile fino a 5 kg, è l’ideale per ottimizzare processi collaborativi leggeri, come pick and place, assemblaggio e testing e di conseguenza permettere un risparmio per l’operatore. Facile da programmare, maggiore flessibilità nei cambi produttivi offrendo un’installazione veloce;
- **UR10e**: un robot industriale collaborativo versatile, con una capacità di carico di 12,5kg con un raggio di azione molto ampio e ciò permette di avere uno spazio di lavoro più ampio e adatto in molte applicazioni come l’asservimento macchine, pallettizzazione e imballaggio;
- **UR16e**: capacità di carico di 16 kg, maggior dimensione sia a livello di peso che di robustezza ed è costruito per applicazioni che richiedono di prelevare e movimentare pesi maggiori senza tralasciare precisione e velocità. Adatto a processi come confezionamento, movimentazioni, prelievo, etc.

Il robot utilizzato per realizzare questa applicazione è l’UR5e descritto e presentato nel paragrafo successivo.

2.2 Cobot UR5

L'**UR5** è un robot industriale collaborativo leggero e adattabile in grado di gestire lavori di media intensità con la massima flessibilità.

Un **Cobot UR5** è composto da tre parti:

- **Unità di controllo;**
- **Il centro operativo del robot;**
- **Teach Pendant** ovvero, una sorta di tablet, con Linux come sistema operativo, che viene utilizzato come interfaccia tra il robot e l'unità di controllo.

L'**interfaccia di programmazione** vincola le opzioni di controllo al movimento Point-To-Point (PTP) sia nello spazio comune che nello spazio operativo. L'impostazione predefinita di questo tipo di movimento è che il robot acceleri fino alla velocità definita, mantenga costante la velocità per il tempo massimo consentito e decelera fino a fermarsi quando raggiunge il punto di destinazione nello spazio. Ne risulta una traiettoria di velocità trapezoidale. In alternativa è possibile impostare un raggio di miscelazione che dà al robot la libertà di deviare dal percorso originale all'interno del cerchio attorno al punto programmato. Ciò consente al robot di mantenere una velocità costante e di percorrere più velocemente il percorso desiderato senza fermarsi.

Un modo alternativo per controllare il robot è scrivere programmi in un linguaggio di scripting chiamato **URScript**. I programmi possono essere salvati direttamente sul controllore del robot oppure i comandi possono essere inviati tramite un socket TCP/IP al robot. La comunicazione avviene a 125 Hz e tra le informazioni fisiche che possono essere lette con i sensori montati sul robot ci sono:

- Posizionamento e velocità del punto centrale dell'utensile;
- Posizione e velocità angolare dei giunti;
- Correnti del motore.



Figure 10: UR5 Universal Robot

2.2.1 Specifiche tecniche

L'UR5 è un robot sviluppato dall'azienda danese Universal Robots. Esistono anche una versione più piccola e una più grande del robot: l'UR3 e l'UR10. UR3 e UR10 sono in grado di gestire rispettivamente un massimo di tre e dieci chilogrammi. Essi sono tutti considerati robot collaborativi. Significa che sono sicuri perché si fermano non appena colpiscono un oggetto rilevato da un sensore di forza in una delle articolazioni. Pertanto, una gabbia non è necessaria se l'area di lavoro è condivisa con operatori umani.

Tuttavia, un robot UR può ancora causare gravi danni se non viene maneggiato con cura o senza le giuste misure. Pertanto nel definire i limiti del funzionamento del robot, è necessario rifarsi alla normativa **ISO/TS 15066**. All'interno di tale normativa, ne è presente un'ulteriore, ISO 10218-2, la quale definisce i limiti di forza e pressione che possono essere tollerati dall'operatore umano in ciascuna parte del corpo.

Di seguito vengono riportate le immagini relative a tale normativa.

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure ^a P_s N/cm ²	Maximum permissible force ^b N	Maximum permissible pressure multiplier ^c P_T	Maximum permissible force multiplier ^c F_T
Skull and forehead ^d	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	110		not applicable	
Face ^d	3	Masticatory muscle	110	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	
Abdomen	10	Abdominal muscle	140	110	2	2
Pelvis	11	Pelvic bone	210	180	2	2
Upper arms and elbow joints	12	Deltoid muscle	190	150	2	2
	13	Humerus	220		2	
Lower arms and wrist joints	14	Radial bone	190	160	2	2
	15	Forearm muscle	180		2	
	16	Arm nerve	180		2	

Figure 11: Tabella limiti sicurezza_1

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure ^a p_s N/cm ²	Maximum permissible force ^b N	Maximum permissible pressure multiplier ^c P_T	Maximum permissible force multiplier ^c F_T
Hands and fingers	17	Forefinger pad D	300	140	2	2
	18	Forefinger pad ND	270		2	
	19	Forefinger end joint D	280		2	
	20	Forefinger end joint ND	220		2	
	21	Thenar eminence	200		2	
	22	Palm D	260		2	
	23	Palm ND	260		2	
	24	Back of the hand D	200		2	
Thighs and knees	26	Thigh muscle	250	220	2	2
	27	Kneecap	220		2	
Lower legs	28	Middle of shin	220	130	2	2
	29	Calf muscle	210		2	

Figure 12: Tabella limiti sicurezza_2

Inoltre vengono riportate le specifiche fornite da Universal Robots, nella tabella 2.2.1. Una dichiarazione importante delle specifiche è la ripetibilità di 0,1 mm.

Peso	18.4 Kg
Carico	5 Kg
Raggio di azione	850 mm
Range dei Giunti	$\pm 360^\circ$
Massima velocità dei giunti	180°/s
Massima velocità del TCP	1 m/s
Ingombro base	Diametro 149 mm
Gradi di libertà	6 giunti rotanti
Ripetibilità	± 0.1 mm
I/O Alimentazione	12 V / 24 V 600 mA
Comunicazione	TCP/IP, Ethernet socket e Modbus TCP
Programmazione	Interfaccia grafica Polyscope
Classificazione IP	IP54
Potenza consumata	150 W
Alimentazione	200-240 VAC, 50-60 Hz
Materiali	Alluminio, ABS plastica
Temperatura	Range operativo di 0-50°C
Vita Operativa	35000 ore

All'acquisto del robot, usciranno non solo il braccio robot ma anche altri accessori utili come:

- Unità di controllo con teach pendant;
- Staffa di montaggio dell'elaboratore elettronico;
- Staffa di montaggio del teach pendant;
- Chiave di apertura dell'elaboratore elettronico;
- Cavo di collegamento tra braccio robot e elaboratore elettronico;
- Cavo di rete compatibile con l'area di commercializzazione;

- Cavo utensile;
- Penna con laser;
- Certificato di collaudo del robot;
- Manuale di guida.

2.2.2 Programmazione

I robot UR possono essere programmati attraverso due differenti modalità:

- **PolyScope** (interfaccia grafica)
- **URScript** (linguaggio di programmazione creato dall'Universal Robot)

PolyScope garantisce una notevole semplicità di programmazione assicurando flessibilità e possibilità di reimpiego del robot. La Universal Robots mette a disposizione una serie di strumenti formativi, tra cui ebook e corsi online, che permettono di imparare questo tipo di programmazione. Tutto questo consente l'utilizzo del cobot anche alle piccole aziende con una ridotta o nulla competenza robotica. Questo tipo di controllo del robot non richiede la scrittura di codice ed è basato su una programmazione ad albero resa graficamente e semplice da usare.

Di seguito è riportata una schermata Polyscope su Teach Pendant.



Figure 13: PolyScope

Utilizzando PolyScope è possibile generare dei programmi sia all'interno dell'ambiente di lavoro del robot, tramite il Teach Pendant, che offline utilizzando URSim.

URSim è un software per sistemi operativi Linux che può essere utilizzato per la programmazione offline e per la simulazione di programmi di controllo del robot. Per utilizzare URSim l'Universal Robots consiglia di impiegare una **Virtual Machine** come VMWare Player oppure Virtual-Box.

A causa della mancanza di connessione con il braccio robotico reale, il simulatore ha alcune limitazioni riportate nella seguente lista:

- L'arresto di emergenza non può essere usato
- Lo stato degli IO non può essere settato

- Risulta possibile la collisione del robot con se stesso o con oggetti presenti nell'area di lavoro
- Force mode (controllo del movimento del robot basato su forze e momenti applicati dall'esterno) è disabilitato.

L'interfaccia grafica dell'URSim, è simile alla GUI di PolyScope che si trova sul Teach Pendant, anche le funzionalità sono molto simili.

I programmi realizzati con URSim possono essere poi caricati sul robot reale per essere eseguiti.

Di seguito l'interfaccia di URSim:

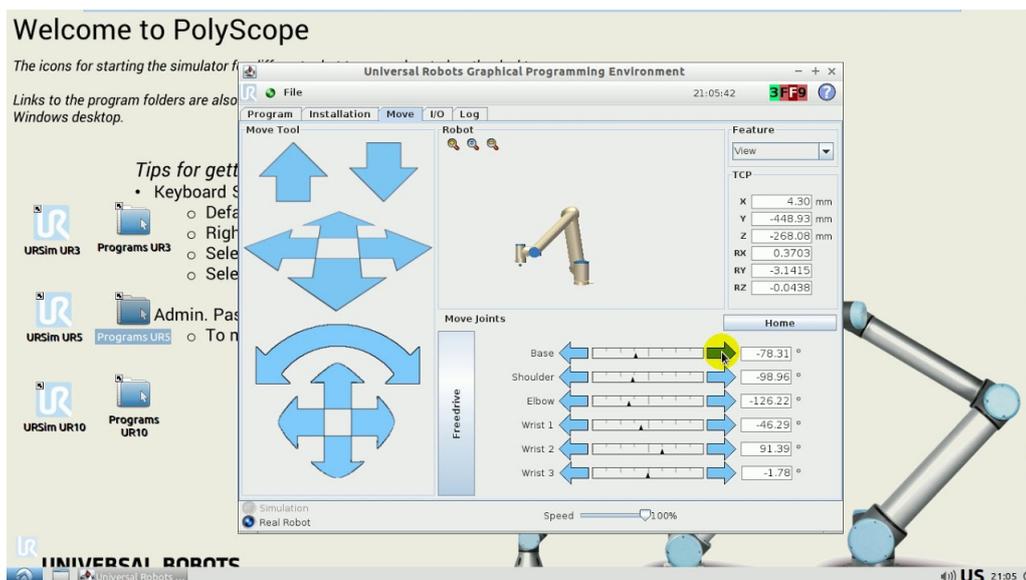


Figure 14: Interfaccia URSim

La programmazione attraverso la scrittura di codice è molto versatile. Mentre PolyScope risulta più adatto per lo sviluppo delle applicazioni della robotica industriale più tradizionale, ad esempio la pallettizzazone, l'asservimento macchina e il pick and place, l'**URScript** permette di utilizzare il robot al pieno delle sue potenzialità. Questo linguaggio di programmazione include variabili, type e flow control statement, oltre a funzioni implementate per monitorare e comandare I/O e movimenti del robot. Le funzioni disponibili sono suddivise nelle seguenti categorie:

- **Motion**, funzioni utili a comandare i movimenti del robot (es. movej, speedj, servoj, etc.)
- **Internals**, utili per ricevere degli output dalla control box riguardo lo stato del robot (es. get_actual_joint_positions, get_actual_tcp_pose, etc.) o per eseguire calcoli di cinematica (get_forward_kin, get_inverse_kin)
- **Urmath**, funzioni matematiche (es. atan2, d2r, interpolate_pose, etc.)
- **Interfaces**, funzioni utili per la lettura di IO digitali e analogici (es. get_digital_out, get_analog_in, etc.)
- **IOconfiguration**, funzioni per configurare IO (es. set_tool_analog_input_domain, set_standard_analog_input_domain, etc.)

Maggiori informazioni sulle funzioni di questo linguaggio di programmazione possono essere trovate nel manuale rilasciato dalla Universal Robots.

La programmazione del robot attraverso codice viene fatta realizzando uno

script su un computer esterno, utilizzando un qualsiasi linguaggio di programmazione, e connettendosi al URControl, ovvero il sistema di controllo low-level della control box, usando una connessione di tipo TCP/IP. Stabilita la connessione i comandi URScript devono essere inviati al socket sottoforma di testo in caratteri ASCII e ogni linea di codice deve terminare con `\n`.

3 Lavoro Svolto

In questo paragrafo verranno descritte tutte le attività effettuate durante il periodo relativo al tirocinio.

La prima cosa analizzata all'interno del periodo di tirocinio è stato l'oggetto cardine del progetto, ovvero il robot UR5. Tale robot è stato descritto a sufficienza nel paragrafo 2.2 descrivendo sia le specifiche tecniche che le normative di sicurezza.

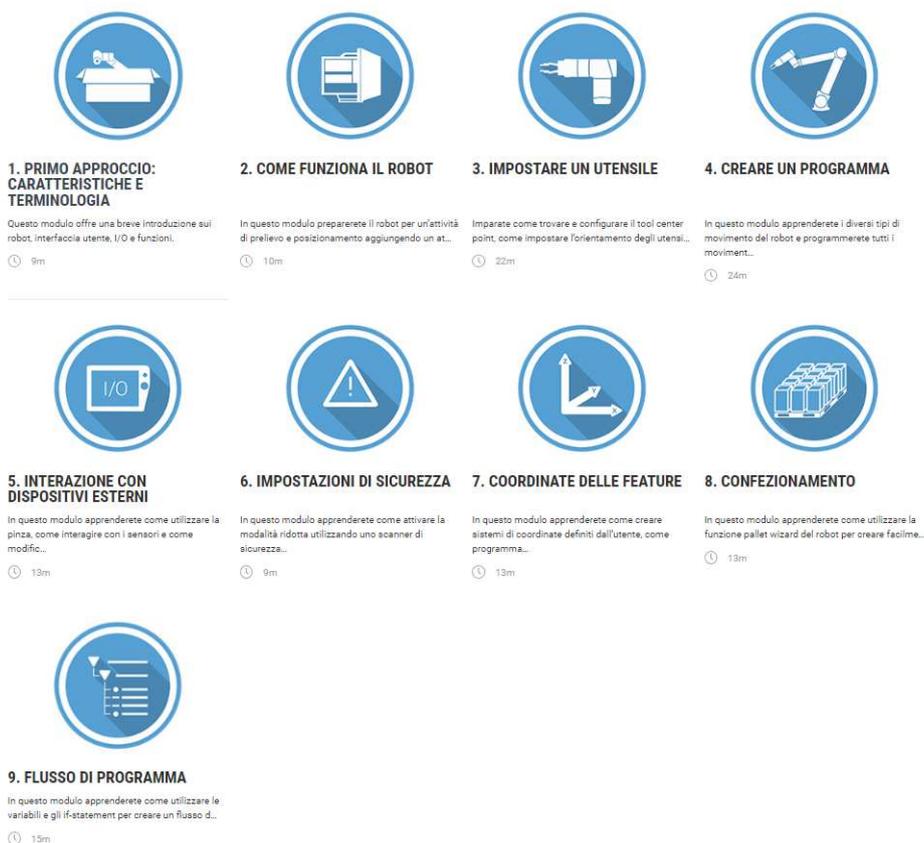
Per ottenere più informazioni possibili riguardo tale robot, è stata necessaria una preliminare ricerca bibliografica all'interno di riviste e documenti scientifici ma anche all'interno di siti web che parlassero di questi strumenti. Il manuale utente del robot è stato subito analizzato perché contiene tutte le informazioni più rilevanti sul robot, a partire dai vari collegamenti elettrici (alimentazione, ingressi input e output), passando per la programmazione, e terminando poi con alcune informazioni relative alla sicurezza.

Per la programmazione, all'interno del manuale utente sono presenti tutte le informazioni relative all'interfaccia con la quale viene programmato il cobot, analizzando sinteticamente tutti i vari programmi.

Per poter apprendere a pieno, non solo il funzionamento dell'interfaccia di programmazione, ma l'idea che c'è dietro la programmazione tramite polyscope, è stato effettuato, inizialmente, un breve corso all'interno del sito di Universal Robots (presente all'interno del paragrafo 6). Questo corso prevedeva tanti moduli all'interno dei quali veniva presentato un argomento diverso.

Ecco l'elenco dei 9 moduli:

MODULI



Modulo	Icona	Titolo	Descrizione	Tempo
1	Robot su tavolo	1. PRIMO APPROCCIO: CARATTERISTICHE E TERMINOLOGIA	Questo modulo offre una breve introduzione sul robot, interfaccia utente, I/O e funzioni.	9m
2	Robot in movimento	2. COME FUNZIONA IL ROBOT	In questo modulo preparerete il robot per un'attività di prelievo e posizionamento aggiungendo un at...	10m
3	Utensile	3. IMPOSTARE UN UTENSILE	Imparate come trovare e configurare il tool center point, come impostare l'orientamento degli utensil...	22m
4	Braccio robotico	4. CREARE UN PROGRAMMA	In questo modulo apprenderete i diversi tipi di movimento del robot e programmerete tutti i movim...	24m
5	Dispositivo I/O	5. INTERAZIONE CON DISPOSITIVI ESTERNI	In questo modulo apprenderete come utilizzare la pinza, come interagire con i sensori e come modifi...	13m
6	Segno di pericolo	6. IMPOSTAZIONI DI SICUREZZA	In questo modulo apprenderete come attivare la modalità ridotta utilizzando uno scanner di sicurezza...	9m
7	Coordinate	7. COORDINATE DELLE FEATURE	In questo modulo apprenderete come creare sistemi di coordinate definiti dall'utente, come programma...	13m
8	Pallet	8. CONFEZIONAMENTO	In questo modulo apprenderete come utilizzare la funzione pallet wizard del robot per creare facilme...	13m
9	Diagramma di flusso	9. FLUSSO DI PROGRAMMA	In questo modulo apprenderete come utilizzare le variabili e gli if-statements per creare un flusso d...	15m

Figure 15: Camera FH-SC05R

La visione di questi moduli è stata molto utile per apprendere conoscenze per poter iniziare a programmare questo robot. A tal proposito, non avendo a disposizione subito il robot vero e proprio, per poter iniziare a prendere confidenza con la programmazione, la Universal Robots mette a disposizione un simulatore. Tale simulatore è disponibile per Linux pertanto, all'interno del sito di Universal Robots è presente un link che permette di estrarre una macchina virtuale con all'interno il simulatore.

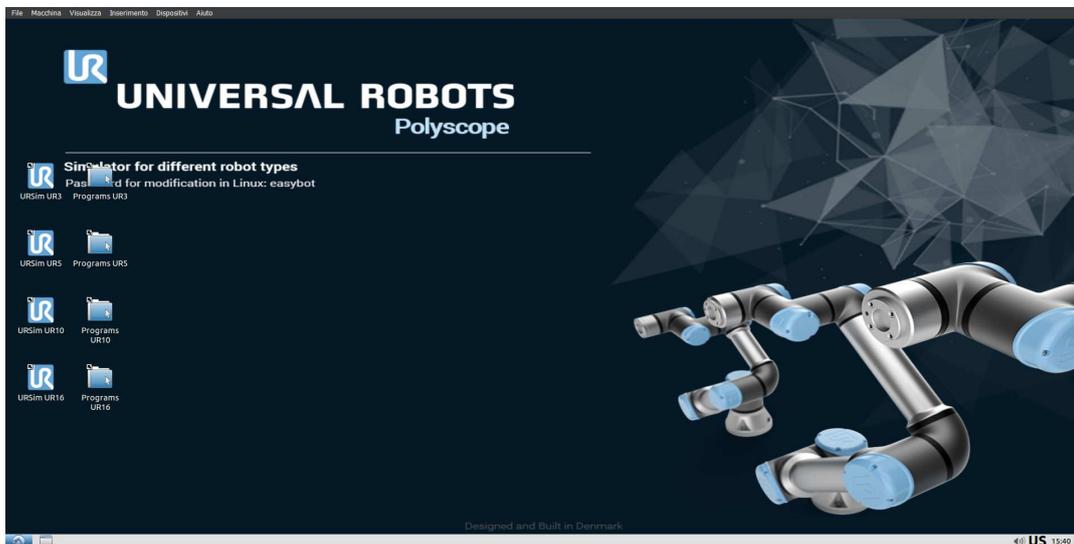


Figure 16: Pagina del simulatore UR

All'interno della pagina mostrata sopra, si possono notare quattro diversi programmi, ognuno dei quali va a simulare uno dei robot collaborativi realizzati dalla Universal Robots.

L'interno del simulatore è identico all'interfaccia di polyscope con le stesse funzionalità disponibili, grazie alle quali si può simulare perfettamente il movimento del robot e la realizzazione di diversi programmi. Questo simulatore è stato molto utile per integrare tutte le conoscenze acquisite con i moduli visti all'interno del corso di Universal Robots.

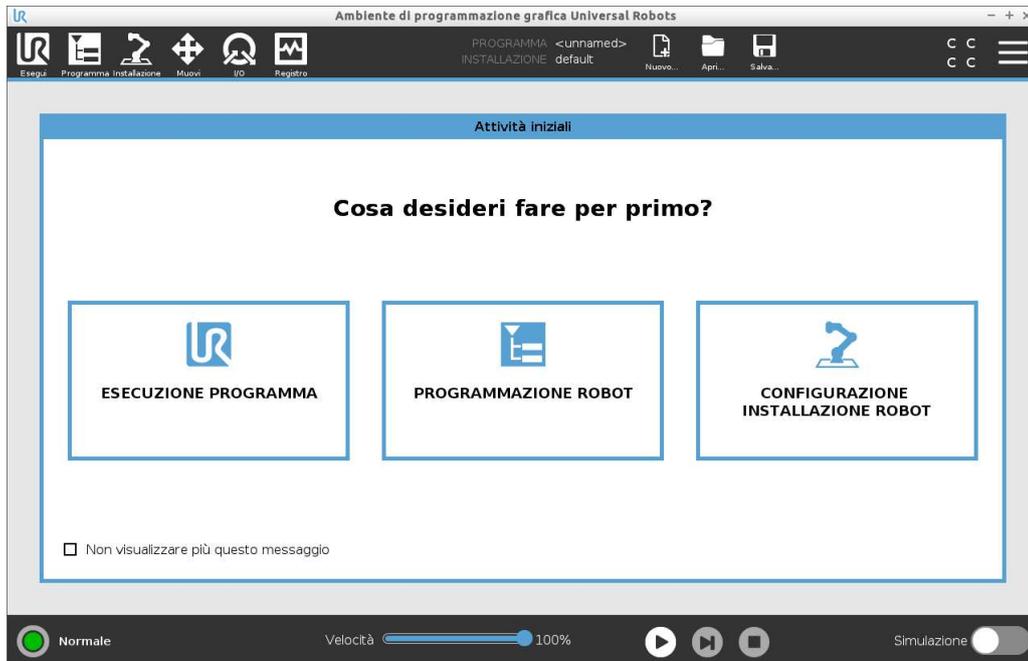


Figure 17: Pagina interna del simulatore UR

Una conoscenza preliminare e fondamentale per utilizzare il robot riguarda la sicurezza. Come già detto in precedenza, la sicurezza è un fattore fondamentale nell'utilizzo dei robot. Nonostante una peculiarità del cobot fosse quella della maggior sicurezza nel lavorarci e nell'interazione con l'uomo, le probabilità di incorre in incidenti compromettenti rimangono comunque abbastanza alte, pertanto è fondamentale avere più conoscenze possibili riguardo tale argomento.

Nel capitolo 1, ci sono tre sottocapitoli relativi a tre articoli che parlano di questo argomento in maniera esaustiva. Oltre ad essi, una nota va fatta riguardo alla normativa che definisce quelli che sono i limiti di sicurezza che il robot può raggiungere in uno spazio di lavoro condiviso con l'uomo. Tale normativa è la **ISO/TS 15066** ed essa è stata già descritta all'interno del sottocapitolo 2.2.1 insieme a tutti i limiti consentiti per l'utilizzo del robot.

3.1 Realizzazione del programma per rimozione bave

Come già spiegato in precedenza, l'obiettivo finale è quello di realizzare un'applicazione che permettesse al cobot di rimuovere le bave esterne dalle suole, in modo da poter essere utilizzate per la realizzazione vera e propria della scarpa.

La prima fase di studio riguarda l'assetto fisico che bisognava realizzare

per poter effettuare nel migliore dei modi, tale rimozione. Le alternative erano due:

1. Mantenere ferma la suola al banco di lavoro e il tool di rimozione sul polso 3 del cobot;
2. Mantenere fermo il tool di rimozione sul banco di lavoro e la suola ferma sul polso 3.

Dopo un'attenta valutazione dei pregi e difetti delle due soluzioni, la scelta è ricaduta sulla soluzione numero uno.

La soluzione numero due aveva determinate problematiche:

- La **prima problematica** era come far prendere la suola dal robot. Inizialmente sono state valutate dei tool appositi di presa come la **pinza adattiva** e la **pinza a vuoto** ma entrambe non erano adatte. La **pinza a vuoto** utilizza la compressione dell'aria per creare il vuoto tra essa e l'oggetto, tramite il quale afferra quest'ultimo, ma essendo le suola fatte in gomma (materiale non troppo duro e resistente) il vuoto necessario per afferrare la suola faceva difficoltà a crearsi pertanto la suola stessa non veniva presa.



Figure 18: Pinza a vuoto

La **pinza adattiva** è una classica pinza a due dita capace di afferrare un oggetto simulando una mano umana.

L'applicazione da realizzare deve tagliare le bave presenti sul contorno della suola pertanto la problematica qui sta sulla posizione di presa della pinza sulla suola, ovvero la pinza afferra la suola sul suo contorno e potrebbe prenderla nelle posizioni in cui deve passare l'utensile per rimuovere le bave.



Figure 19: Pinza adattiva

Esistono vari tool di presa in commercio ma funzionano seguendo queste due filosofie.

- **La seconda problematica** riguarda il tool di rimozione delle bave. Come detto in precedenza, con questa soluzione, il tool deve essere tenuto fermo sul banco di lavoro e la suola gira, tramite la programmazione del robot, attorno al tool, facendo in modo che le bave vengano rimosse dalla punta del tool. Andando nello specifico si potrebbero incontrare due inconvenienti:
 1. Il tool (presentato nella sezione 1.5) è un oggetto di piccole dimensioni e pertanto nel momento in cui la suola esercita una forza su di lui esso, potrebbe muoversi nonostante sia ancorato bene sul banco di lavoro. Se dovesse accadere il test verrebbe considerato nullo.
 2. Il tool per effettuare la rimozione delle bave, deve avere la punta molto calda pertanto dovrà essere riscaldata tramite un fornello industriale. Se esso è ancorato al banco, non ha la capacità di moto e pertanto, a meno dell'intervento di un operatore umano, esso non riceve il calore necessario per effettuare il lavoro previsto.

Queste assunzioni sono state fatte su base teorica pertanto tutto ciò non è stato validato sperimentalmente, quindi non si esclude il fatto che utilizzando tale approccio, possa venir realizzata l'applicazione richiesta.

Sulla base delle valutazioni fatte in precedenza, si è deciso di utilizzare il primo approccio.

Il primo approccio, quindi, consiste nel tenere ferma la suola sul banco di lavoro e il tool sul polso 3 del robot, utilizzandolo a tutti gli effetti come end-effector. Anche questo approccio può presentare dei piccoli inconvenienti, però a differenza del secondo approccio, essi sono facilmente risolvibili.

- Il primo riguarda sempre il riscaldamento del tool, perché, come detto, per poter tagliare, la punta dell'utensile deve essere sempre calda. Per poter venir meno a questo problema, nel programma finale, verranno inseriti vari waypoint in cui il robot porta il tool sul fornello industriale in modo da scaldarne la punta e continuare a tagliare.
- Il secondo riguarda come tener ferma la suola e come afferrare l'utensile. Per l'utensile potrebbe essere utilizzata una pinza che, tramite apposito comando, afferra l'utensile tenendolo fermo. Non è stato utilizzata questa pinza per indisponibilità, pertanto il modo in cui è stato tenuto fermo è un metodo sperimentale e approssimativo, utilizzato per valutare solamente la fattibilità dell'operazione. Tale metodo verrà poi presentato in seguito.
Per quanto riguarda la suola, si è pensato di mantenerla ferma utilizzando dei piccoli supporti.

Una volta fatte queste valutazioni, lo step successivo è stato la realizzazione del programma. Prima però di parlare del programma è necessario fare alcune valutazioni preliminari.

Innanzitutto la prima cosa da dire è che, questa tipologia di applicazione, dipende in maniera significativa dalla dimensione della suola. Per seguire il contorno della suola, sarà necessario individuare dei punti su tale contorno, per far muovere il robot nella maniera desiderata. Le suole però sono svariate e cambiando una singola posizione, il programma perde di efficacia. Questo avviene non solo cambiando marca della scarpa, ma avviene cambiando numero della stessa scarpa oppure semplicemente cambiando dalla suola destra alla sinistra. Pertanto è una tipologia di applicazione che difficilmente può avere una struttura automatizzata al 100%, ma la si può rendere tale se si considerano tutte suole identiche sia in dimensione e sia destra o sinistra. Il fatto che non può essere automatizzata al 100% implica che per ogni suola debba essere realizzato un programma apposito. Questo aspetto è fondamentale.

La seconda cosa da dire riguarda la forma della suola e la traiettoria da far eseguire al robot.

Prendiamo come esempio una delle sei suole utilizzate:



Figure 20: Suola Mephisto Nera

Si può notare come la suola non sia perfettamente lineare in nessun tratto, ma sono prettamente delle traiettorie curve, soprattutto i tratti

della punta e del tallone. Questo, in fase di programmazione, può risultare essere un problema perché il cobot, dati due punti tenderà a seguire una traiettoria lineare che lo porta nel minor tempo possibile al punto di arrivo. La programmazione del robot è stata eseguita utilizzando il teach pendant, usando i comandi messi a disposizione da quest'ultimo.

Per poter realizzare delle traiettorie curve usando il cobot, è stato messo a disposizione un comando particolare, il **MoveP**, il quale all'interno possiede un ulteriore comando ovvero il **Circle Move**.

Il **MoveP** consente all'utensile di spostarsi in maniera lineare a velocità costante, eseguendo transizioni circolari. È concepito per alcune operazioni del processo, come incollaggio o erogazione. La dimensione del **raggio di transizione** è predefinita come valore condiviso tra tutti i punti percorso. Con un valore minore il percorso risulta più spigoloso, mentre con un valore maggiore sarà più uniforme. Sebbene il braccio robot si muova attraverso i punti percorso a velocità costante, l'unità di controllo del robot non può attendere un'operazione di I/O o un'azione dell'operatore. Ciò potrebbe causare l'arresto del braccio robotico o innescare un arresto di protezione.

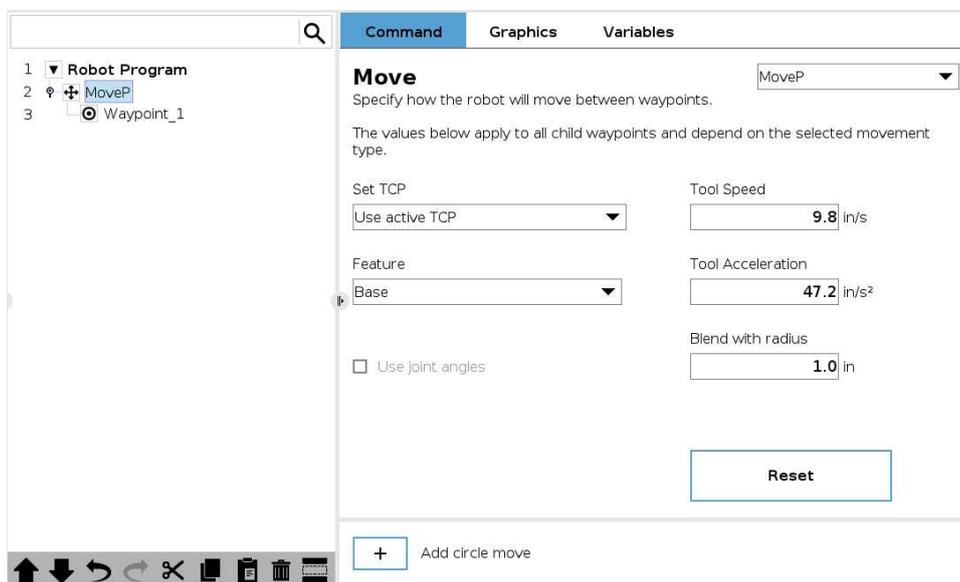


Figure 21: MoveP

Oltre al raggio di transizione, è possibile impostare anche la velocità e l'accelerazione dell'utensile.

In basso a sinistra è presente la dicitura **"Add a circle move"**. Esso permette di inserire un movimento circolare all'interno del MoveP.

Un movimento circolare si esegue usando tre punti percorso:

1. Il punto percorso precedente il nodo Movimento Circolare (1);
2. Il punto percorso intermedio (2);
3. Il punto finale(3)

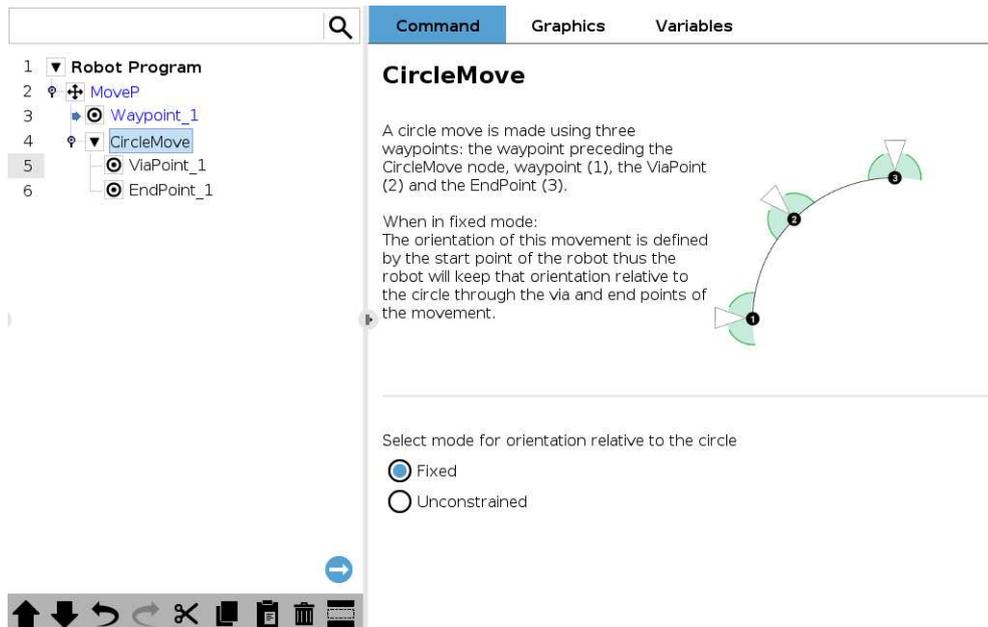


Figure 22: Circle Move

Quando è in modalità fissa, l'orientamento di tale movimento è definito dal punto di partenza del robot, in modo che il robot mantenga quell'orientamento rispetto al cerchio attraverso i punti intermedio e finale del movimento. Sostanzialmente esso, apprendendo la posizione dei tre punti, va a calcolare il raggio del cerchio e di conseguenza riesce ad effettuare tale movimento. Inizialmente, per capire se questo approccio funzionasse, ovvero per capire come realizzare nello specifico il programma per effettuare il contorno della suola, come tool è stata inserita una penna per vedere se effettivamente veniva disegnata la suola. Di seguito viene mostrata la foto dell'assetto usato.



Figure 23: Tool Penna

Una volta realizzato questo assett è cominciata la realizzazione del programma vero e proprio. Inizialmente l'idea è stata quella di utilizzare, in maniera combinata, il moveP nei tratti poco circolari e il circle move sulla punta e nel tallone. Il programma è stato realizzato per step, prendendo parti di suola e valutando pezzo per pezzo se il contorno veniva disegnato bene. La prima parte è stato il tallone, realizzandolo usando il circle move. È stato usato qui perché presenta una traiettoria curva molto accentuata. La traiettoria veniva eseguita correttamente solo se il punto finale era molto largo rispetto alla suola, cosa che rappresentava un problema ai fini dell'applicazione finale, perché nel momento in cui il punto finale veniva dato a livello della bava, la traiettoria veniva schiacciata andando a toccare la suola stessa. Questo perché il circle move va a disegnare un cerchio perfetto, cosa che il tallone non è, pertanto la traiettoria circolare veniva schiacciata.

Detto questo, è stato cambiato l'approccio, andando ad utilizzare esclusivamente il MoveP.

Il nuovo approccio consiste nel dare al programma tantissimi punti corrispondenti ai punti della suola, in maniera tale che il programma discretizzasse per ottenere la miglior traiettoria disponibile. Pertanto, sotto il comando moveP, sono stati aggiunti svariati waypoint in modo tale da ricoprire l'intera suola. Con questo approccio, il problema ottenuto in precedenza, sembrava risolto. Infatti la penna effettuava abbastanza bene l'intero contorno della suola.

Per identificare bene i waypoint, in modalità Freedrive il robot è stato portato in ogni punto in modo che la penna fosse più vicina possibile alla suola, senza toccarla.

Una cosa che poteva essere aggiunta, era una cella di carico per dare la pressione esatta affinché la penna potesse disegnare bene il contorno. Quest'ultima cosa non è stata fatta perché non necessaria ai fini del lavoro da svolgere.

Poiché la suola, in questa fase di programmazione, non è stata tenuta bloccata all'interno del banco di lavoro, per poter tener traccia della posizione mantenuta, sono stati utilizzati due fogli A4, sui quali sono stati disegnati dei riferimenti, per tener sempre traccia della posizione della suola registrata all'interno del programma.

Questo procedimento è stato realizzato per tutte e sei le soles, in modo da avere più test possibili da poter verificare.

Una volta che il contorno della suola è stato realizzato, lo step successivo era capire come implementare all'interno del banco di lavoro l'utensile adibito alla rimozione delle bave.

La prima idea fu quella di inserire l'utensile al posto della penna, date le dimensioni molto simili. Facendo ciò però il programma doveva essere modificato in quanto la punta dell'utensile avrebbe puntato verso il basso ma così facendo non andava in contatto con la bava e di conseguenza l'applicazione non veniva portata a termine. Detto questo, per poter utilizzare l'utensile in quella posizione, era necessario dare alla penna (ancora utilizzata come prova) l'orientamento necessario affinché la sua punta toccasse le bave.

Il programma realizzato in questo modo ha due grandi problemi:

1. Il **primo problema** è relativo alla traiettoria effettuata dal robot. Con questa configurazione il robot non ha una traiettoria molto fluida e in alcuni punti ha delle evidenti problematiche dovute al cambio di orientamento durante il moto, che potrebbe portare ad una cattiva

riuscita dell'applicazione.

2. Il **secondo problema** è relativo alle traiettorie della punta e del tallone. Dovendo dare un orientamento specifico affinché l'utensile sia in grado di tagliare, nelle parti più laterali, l'utensile dovrebbe avere una posizione troppo bassa e quasi orizzontale, posizione irraggiungibile a causa dei limiti tecnici dei giunti del robot, pertanto due traiettorie non eseguibili in questo modo.

Sulla base di questi due problemi si è deciso di adottare un ulteriore approccio ovvero il seguente.

Poiché il contorno della suola viene bene lasciando la penna in verticale, si potrebbe attaccare l'utensile in orizzontale, all'estremità della penna, in maniera tale che l'idea di base del programma rimanga la stessa. Con tale soluzione è possibile utilizzare i programmi già realizzati in precedenza, apportando una piccola modifica a ogni posizione, ovvero posizionando vicino alle bave non più la punta della penna, ma la punta dell'utensile.

Di seguito viene riportata la foto del nuovo assetto del tool.



Figure 24: Tool Utensile-Penna

Questo assetto è stato realizzato attaccando la base della penna e l'utensile tramite del nastro carta, una soluzione poco ingegneristica, la quale in sviluppi futuri sicuramente può essere migliorata utilizzando supporti opportuni. Si potrebbe presentare un problema nella fase di test ovvero che l'utensile non riesca a tagliare perché non fissato saldamente al supporto. Verrà appunto valutato nella sezione 4 .

Una volta definito questo tool, sono stati realizzati i programmi per tutte le suole.

Come detto nelle sezioni precedenti, per poter tagliare la bava, l'utensile deve avere la punta costantemente calda, pertanto dopo aver effettuato

una parte di suola, esso deve ricevere nuovamente calore. Per far questo all'interno del programma sono stati inseriti dei movimenti intermedi, che permettessero al robot di portare l'utensile nella posizione individuata dal fornello, per poter ricevere nuovamente il calore di cui avesse bisogno. Questi movimenti, ovviamente dipendono dal posizionamento del **Termosoffiatore**.

Di seguito la foto del **Termosoffiatore** utilizzato.



Figure 25: Termosoffiatore

Esso è un termosoffiatore **Easy Heat 500** della Bosch, ed è appunto un fono che spara aria calda tra i 300° e i 500°. L'idea non è quella di mantenere fermo il termosoffiatore, ma è quella di sparare aria calda all'utensile come fosse realmente un fono, mentre l'utensile è nella posizione di partenza. Pertanto, il banco da lavoro utilizzato durante la realizzazione di questa applicazione è il seguente:



Figure 26: Banco da Lavoro

Dove, in sintesi, partendo da sinistra troviamo:

- **Teach Pendant;**
- **UR5 con tool di rimozione bave;**
- **Suola di test con i fogli per i riferimenti;**
- **Altri modelli di suola da testare;**

A livello sperimentale, l'interesse si pone sulla fattibilità dell'operazione, cioè sul fatto che possa o meno rimuovere le bave, pertanto il lavoro di tesi si prepone di valutare questo, su uno dei due lati della suola. Qualora il taglio avvenga, in sviluppi futuri si potrebbe provare la rimozione in tutto il contorno della suola, qualora non dovesse avvenire, il taglio con questo assetto e questa idea di realizzazione non si può realizzare. Ovviamente è un lavoro sperimentale, pertanto sia positivo che negativo, il lavoro deve essere poi validato da più fonti.

Il tratto di suola su cui verrà incentrato il lavoro è il tratto sinistro per le soles sinistre e il tratto destro per le soles destre.

Lavorando in questo modo, deve essere realizzato nuovamente un ulteriore programma, il quale va ad effettuare il contorno del solo lato interessato. Questo dovrà essere fatto per tutte le soles che si vogliono testare.

Di seguito vengono riportate le foto frontali dei sei test utilizzati, mentre le

foto dei profili interessati, verranno presentate nella sezione 4 per effettuare il confronto prima e dopo il taglio delle bave.

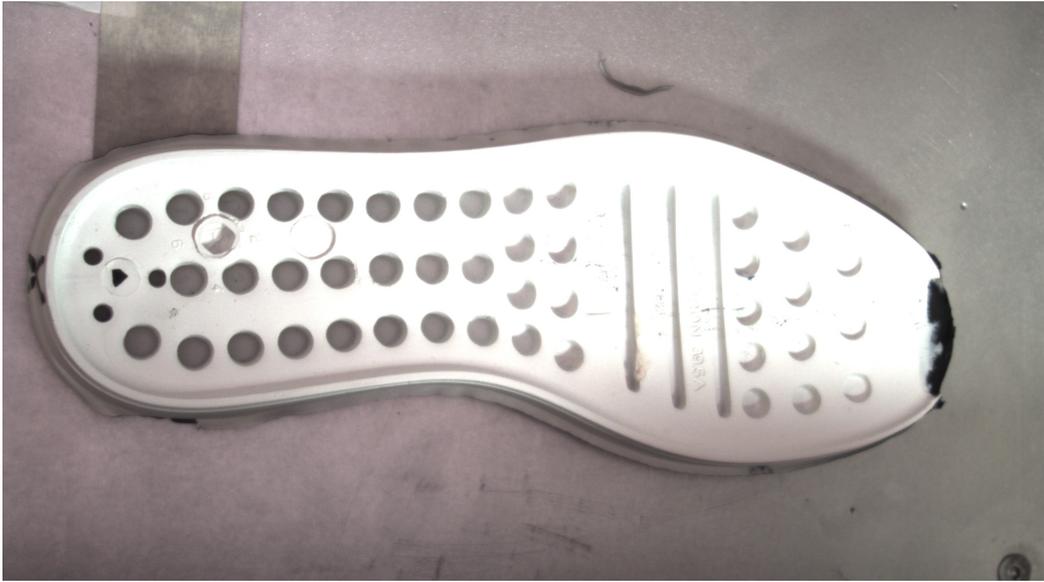


Figure 27: Magnanni Bianca



Figure 28: Hogan



Figure 29: Hogan Bianca

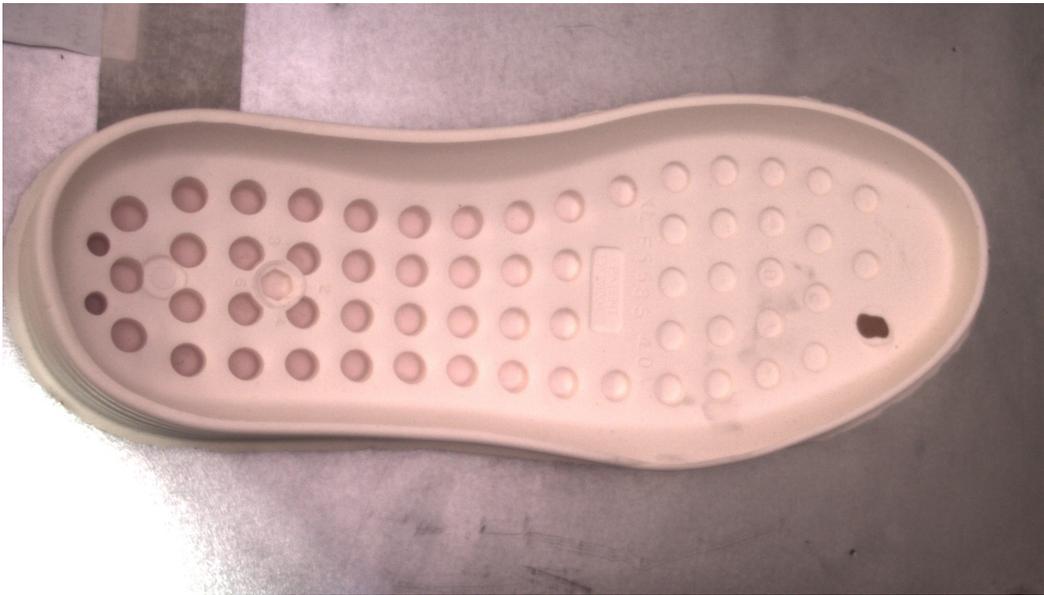


Figure 30: Hogan Beige



Figure 31: Extralight



Figure 32: Mephisto Nera

4 Test e Risultati

Come già detto nelle sezioni precedenti, per poter procedere all'esecuzione dei test per verificare l'avvenuta realizzazione dell'applicazione, è necessario trovare un assetto definitivo per mantenere bloccati sia la suola al banco di lavoro, e sia l'utensile sul polso tre del robot.

- Per quanto concerne l'utensile, è stato realizzato un piccolo supporto il quale possiede un'estremità per essere collegato al polso del robot, mentre l'altra per poter mantenere bloccato l'utensile tramite dei grani.



Figure 33: Supporto utensile

Dalla foto si può notare come la parte superiore deve essere inserita all'interno di un piccolo supporto posto sul polso tre del robot, mentre la parte inferiore possiede una piccola apertura all'interno della quale deve essere inserito l'utensile, il quale verrà mantenuto fermo tramite il fissaggio dei grani. Si può notare come i grani sono all'interno di piccoli buchi come quello visto nell'immagine.

Di seguito la foto relativa all'assetto finale.

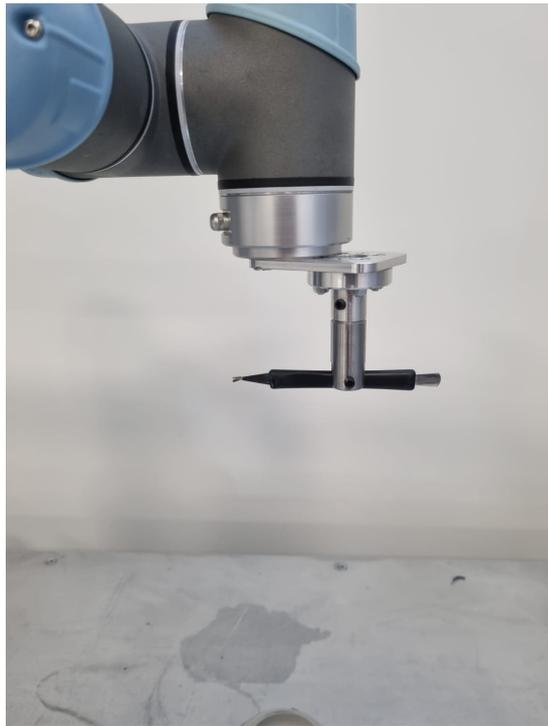


Figure 34: Assetto utensile-robot

- Per quanto riguarda la suola è stato utilizzato un oggetto, il quale, fissato al banco di lavoro con delle viti, riesce a tenere ferma la suola ad esso. Tale oggetto è un **attrezzo di bloccaggio orizzontale** riportato di seguito.



Figure 35: Attrezzo di bloccaggio orizzontale

Per mantenere ferma la suola è necessario inserirla nella parte destra e premere con forza sul manico rosso per poter applicare la forza necessaria per fissare al banco la suola stessa. Come si vedrà nella foto successiva, a causa del poco spessore della suola, affinché l'attrezzo potesse spingere la suola sul banco, è stato necessario inserire sotto ad essa un ulteriore oggetto per fare in modo che l'estremità dell'attrezzo potesse poggiare sulla suola.

Di seguito è riportata l'assetto definitivo.



Figure 36: Assetto suola ferma

Una volta ottenuto l'assetto finale sia per la suola che per l'utensile, è stato possibile realizzare i test per valutare se effettivamente, il programma realizzato in precedenza funzionasse.

I test sono stati realizzati su entrambi i tratti laterali della suola e sono stati realizzati per tutte e sei le soles di test.

Per valutare il lavoro eseguito, di seguito, per ogni suola, verranno inserite le foto prima del taglio e dopo il taglio per mostrare il risultato emerso dai test effettuati.

- Primo Test



Figure 37: Hogan beige Pre-taglio



Figure 38: Hogan beige Post-taglio

- Secondo Test



Figure 39: Hogan bianca Pre-taglio



Figure 40: Hogan bianca Post-taglio

- Terzo Test



Figure 41: Hogan Pre-taglio



Figure 42: Hogan Post-taglio

- Quarto Test



Figure 43: Mephisto nera Pre-taglio



Figure 44: Mephisto nera Post-taglio

- Quinto Test



Figure 45: Extralight Pre-taglio



Figure 46: Extralight Post-taglio

- Sesto Test



Figure 47: Magnanni bianca Pre-taglio



Figure 48: Magnanni bianca Post-taglio

5 Conclusioni

Dai test effettuati si può concludere che a livello teorico e sperimentale il lavoro può essere svolto. Questo approccio, come detto sopra, a livello teorico funziona, evidenziato dalle foto riportate nel capitolo 4 dopo il taglio, ma ha comunque delle possibili problematiche che possono presentarsi in seguito:

- La prima problematica è relativa al mantenere ferma la suola. Avendo immobilizzato la suola nel modo descritto nel capitolo 4, il robot, nel momento in cui fa un lato, deve fermarsi e aspettare che un operatore sposti la suola per fare il lato opposto. Ciò non rende automatizzato il lavoro. Per evitare questo si dovrebbe creare uno stampo all'interno del quale inserire la suola, il quale la mantiene ferma e permette al robot di effettuare tutto il percorso senza dover aspettare che la suola venga girata e cambiata di posizione;
- Il secondo problema è dovuto all'utensile stesso. Durante l'esecuzione del programma, dovuto a possibili errori, la punta dell'utensile che va a poggiare sulla suola, potrebbe puntarsi sul contorno provocando danni alla suola stessa e smetterebbe di funzionare nel modo corretto;
- Un'ulteriore problematica è dovuta alla parte del tallone e della punta. Questi due tratti sono estremamente circolari e pertanto nel momento in cui il robot va a effettuare quel percorso lì, esso incombe nei problemi di sicurezza dei giunti e non va a completare il lavoro. Questo problema potrebbe essere dato solamente da un errato posizionamento e dell'orientamento dell'utensile stesso.

Queste sono delle problematiche che andrebbero risolte per ottenere un'applicazione perfettamente funzionante a livello industriale.

Come detto nel capitolo 1.5 l'obiettivo era quello di valutare la fattibilità dell'operazione e dal lavoro effettuato, a livello teorico, questa fattibilità è stata pressoché dimostrata con successo. Come ripetuto più volte, questo lavoro ha validità a livello teorico e sperimentale ma attualmente non ha validità a livello industriale per due grandi motivi:

- Perché si dovrebbe avere un programma per ogni tipo di suola e numero visto che è determinante la posizione e dimensione della suola;
- Il fatto che le soles sono fatte in materiali che possono essere deformabili in fasce di produzione quindi è possibile che due soles identiche siano diverse in lunghezza di un fattore del 2-3% e quindi se il programma funziona per quella più piccola, quando viene fatto su quella più grande scava la suola pertanto può non generare ripetibilità e quindi a livello industriale potrebbe risultare infattibile.

Per poter ottenere un'applicazione funzionante a livello industriale potrebbe essere necessario l'utilizzo di determinati software con i modelli CAD delle soles. Questi software prendono in ingresso i modelli 3D delle soles e, integrati al cobot UR5, generano dei percorsi utensile da far eseguire al robot senza aver nessuno che debba prendere i punti necessari per effettuare il programma, evitando un controllo di posizione macchinoso come fatto all'interno di questo lavoro.

Esso è un approccio totalmente diverso da quello descritto in questa tesi, potrebbe essere uno sviluppo futuro più concreto ed elaborioso ma anche qui, bisogna valutare la fattibilità dell'operazione, soprattutto perché questa tipologia di applicazione non è stata mai integrata alla robotica collaborativa e all'uso dei cobot.

6 Bibliografia e Sitografia

1. <https://www.youtube.com/watch?v=Y9pHPDG2bS8>
2. https://www.alumotion.eu/wp-content/uploads/2015/11/ur5_user_manual_it_global.pdf
3. <https://academy.universal-robots.com/it/corsi-on-line-gratuiti/corsi-on-line-su-cb3/>
4. <https://www.universal-robots.com/support/>
5. <https://www.youtube.com/watch?v=Y9pHPDG2bS8>
6. <https://www.youtube.com/watch?v=HQC7twohVkY>
7. <https://www.alumotion.eu/marchi/robotiq/force-torque-sensor-ft-300/>
8. <https://www.youtube.com/watch?v=tGrWiRe2I8I>
9. <https://www.youtube.com/watch?v=tGrWiRe2I8I>
10. <https://youtu.be/YnC-ccytJlw>
11. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022437520300797>
12. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584519300614>
13. <https://www.unitedsymbol.com/divisioni/robotica-pallettizzazione/robotica-collaborativa/>
14. <https://quifinanza.it/innovazione/robotica-industriale-cose-applicazioni/511351/>
15. <https://www.industriorget.se/objekt/universal+robots+ur5+ur10/17673/>
16. <https://industrial.omron.it/it/products/FH-L550-10>
17. <https://industrial.omron.it/it/products/FH-SC05R>
18. <https://www.universal-robots.com/products/polyscope/>
19. <https://www.universalrobots.com/download/manuals-cb-series/script-script-manual-cb-series-sw3154/>
20. <https://www.innovationpost.it/tecnologie/robotica/come-scegliere-un-robot-industriale-la-guida-pratica-con-le-caratteristiche-e-le-principali-applicazioni-delle-diverse-tipologie-di-robot/>
21. <https://www.sergentelorusso.it/robotica-collaborativa-cose/>
22. <https://www.eurekasystem.it/blog/cobot-vs-robot-industriali-quali-sono-le-differenze/>
23. <https://www.techartshoes.it/universal-robots-automazione-robotizzata/>
24. <https://www.universal-robots.com/download/software-e-series/simulator-non-linux/offline-simulator-e-series-ur-sim-for-non-linux-594/>
25. <https://www.mecalux.it/manuale-logistica-magazzino/pallet/pallettizzazione>
26. <https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/links>
27. <https://www.publiteonline.it/assemblaggio/lassemblaggio-dei-compressori/>
28. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282712200155X>
29. <https://www.industry4business.it/industria-4-0/cosa-sono-e-qual-e-il-futuro-dei-cobot-i-robot-collaborativi-che-affiancano-gli-uomini-sulle-linee-di-produzione/>

7 Ringraziamenti

Oggi si concludono i cinque anni di Università; è stato un percorso bello e intenso all'interno del quale non sono mancati vari momenti di difficoltà. Soprattutto per quest'ultimi, è necessario fare gli opportuni ringraziamenti. Un sentito ringraziamento va al mio relatore Palmieri Giacomo che mi ha seguito, con disponibilità e gentilezza, in ogni step della realizzazione dell'elaborato, fin dalla scelta dell'argomento.

Ringrazio il mio Tutor Alessi Andrea per il suo prezioso aiuto nel condurre le ricerche, oggetto della mia tesi, presso l'azienda ALCI. Un grazie sentito a tutto il personale dell'azienda ALCI, in cui ho svolto un tirocinio formativo della durata di 375 ore e complementare alla stesura della tesi, per l'ospitalità e per le conoscenze acquisite sul campo.

Proseguo ringraziando la mia famiglia in particolare i miei zii e i miei nonni che, mi hanno sempre fatto sentire il loro supporto incondizionato e aiutato qualora si fosse presentata una difficoltà.

Un ringraziamento speciale va a mia mamma che ci è sempre stata, nei momenti felici e nei momenti bui, nonostante alcuni miei comportamenti è sempre rimasta al mio fianco credendo sempre in me, più di quanto ci abbia creduto io. Ha sempre cercato di alleviare i miei problemi passando sopra ai suoi, con una parola di conforto o con un abbraccio o semplicemente con un sorriso.

Ringrazio mio papà, che purtroppo non è qui con il corpo ma so con certezza che è qui con lo spirito. Lui, come mia mamma, non ha mai smesso di credere in me dal primo giorno, ci è sempre stato e anche ora so che ci sarà sempre. So che mi stai guardando e spero di averti reso orgoglioso di me. Infine voglio ringraziare i miei amici, gli amici di una vita che ci sono sempre stati nei momenti di difficoltà, mi hanno sempre sostenuto e aiutato qualsiasi problema si fosse presentato durante il mio percorso. La loro presenza è stata fondamentale per affrontare questi cinque anni al meglio e sempre con il sorriso.

Un ultimo ringraziamento va a tutte le persone con le quali ho condiviso questi cinque anni e che hanno contribuito a rendere speciale questo mio percorso.