



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

Progettazione di una cella robotizzata per il disassemblaggio di calzature

Design of a robotic cell for footwear disassembly

Candidato:
Leonardo Gasparrini

Relatore:
Prof. Giacomo Palmieri

Anno Accademico 2023-2024



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

Progettazione di una cella robotizzata per il disassemblaggio di calzature

Design of a robotic cell for footwear disassembly

Candidato:
Leonardo Gasparrini

Relatore:
Prof. Giacomo Palmieri

Anno Accademico 2023-2024

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA
Via Brezze Bianche – 60131 Ancona (AN), Italy

Indice

Introduzione	1
1 Sviluppo sostenibile	3
1.1 Economia Circolare	3
1.2 Sostenibilità nel settore calzaturiero	4
2 Presentazione del robot	7
2.1 Caratteristiche del robot	7
2.1.1 Parametri di movimento del robot - controllo della posizione	8
2.1.2 Controllo in forza	11
3 Lavorazioni Termiche e Meccaniche	13
3.1 Modelli 3D di supporto	13
3.2 Materiali lavorati	14
3.2.1 Caratteristiche chimico-fisiche TPU	14
3.2.2 Caratteristiche chimico-fisiche EVA	15
3.3 Operazioni in preparazione all'esperimento	16
3.4 Lavorazioni Termiche	17
3.4.1 Caratteristiche della prova	17
3.4.2 Considerazioni	18
3.5 Lavorazioni meccaniche	19
3.5.1 Taglierino-cutter	19
3.5.2 Dremel	21
4 Conclusioni e Obiettivi futuri	29
4.1 Conclusioni	29
4.2 Obiettivi futuri	29

Elenco delle figure

1.1	Obiettivi dell'Europa entro il 2030	3
1.2	Modello di economia circolare proposto dall'UE [1]	4
1.3	Produzione di calzature europee [2]	5
1.4	Materiali e componenti per le scarpe in pelle	5
1.5	Materiali e componenti per le scarpe sintetiche	6
1.6	Materiali e componenti per le scarpe in tessuto	6
1.7	Modello di progetto di riciclo <i>Calzare 4.0</i> da parte della Santoni Spa.	6
2.1	Foto del robot in laboratorio con utensile	7
2.2	Display controllo del robot	8
2.3	Tabella parametri di posizione [3]	9
2.4	Struttura cinematica del robot UR5e [4]	10
3.1	Supporto saldatore a stagno con flangia robot	14
3.2	Struttura del TPU [5]	14
3.3	Formula chimica Etil Vinil Acetato [6]	15
3.4	Prova di taglio	19
3.5	Dettaglio mancato taglio del filo tra suola e tomaia	20
3.6	Passaggi cutter	20
3.7	Fresa Parkside PFBS 160 B2 [7]	21
3.8	Lavorazione con disco da taglio	23
3.9	Codice robot disco da taglio	23
3.10	Codice punta conica	25
3.11	Lavorazione con punta conica	25
3.12	Lavorazione con punta sferica "prova preliminare"	26
3.13	Codice punta sferica	27
3.14	Lavorazione con punta sferica "prova cobot"	28

Elenco delle tabelle

3.1	Proprietà Etil Vinil Acetato [8]	16
3.2	Tabella prova 1	17
3.3	Tabella prova 2	18
3.4	Tabella specifiche tecniche fresatrice [9]	21
3.5	Riassunto delle caratteristiche del disco da taglio	22
3.6	Riassunto caratteristiche punta conica	24
3.7	Riassunto caratteristiche punta sferica	26

Introduzione

Questa tesi è nata con lo scopo di realizzare un progetto per unire l'automazione industriale al concetto di sostenibilità. L'obiettivo dell'esperimento è stato quello di trovare un metodo per la rimozione della cucitura che collega la suola delle scarpe alla tomaia, in modo tale da rigenerare la scarpa. Il progetto è stato svolto grazie alla partecipazione dell'azienda marchigiana "Santoni" che ha fornito i modelli di scarpe per effettuare le prove e grazie al laboratorio M.I.R. del Dipartimento di Ingegneria Industriale e delle Scienze Matematiche che ha messo a disposizione tutta l'attrezzatura. La tesi è suddivisa in quattro capitoli; nel primo si parla dello sviluppo sostenibile e di inquinamento, partendo dal concetto di economia circolare e passando per i progetti dell'UE e di sostenibilità nell'industria calzaturiera; nel secondo si descrive il robot utilizzato e si illustrano e spiegano i controlli di posizione, di forza e la cinematica; nel terzo capitolo si parla delle prove svolte e dei loro risultati, dividendo le prove eseguite con mezzi termici da quelle con mezzi meccanici; infine, per concludere, si esprimono le considerazioni finali sulle prove eseguite e i possibili obiettivi e aggiornamenti per rendere possibile una vera applicazione industriale di questo esperimento.

Capitolo 1

Sviluppo sostenibile

In questi ultimi anni nel mondo e soprattutto in Europa è diventato tema ricorrente quello della sostenibilità ambientale. La comunità europea ha iniziato ad intraprendere una politica sempre più *green* con lo scopo di andare a ridurre l'inquinamento che negli anni sta aumentando esponenzialmente. Una delle manovre emendate dall'UE è "*Un'Europa sostenibile entro il 2030*", che punta ad uno sviluppo sostenibile che risponda alle necessità delle generazioni attuali senza compromettere la capacità di quelle future di soddisfare le proprie [10].



Figura 1.1: Obiettivi dell'Europa entro il 2030

1.1 Economia Circolare

La crescente disponibilità ed economicità dei materiali e dei prodotti hanno portato ad un aumento della qualità della vita nell'UE. Tuttavia, il consumismo ha determinato uno sfruttamento eccessivo delle risorse con crescenti pressioni sul clima [11][12]. Lo scopo è dunque continuare a far crescere l'economia in modo sostenibile e migliorare il tenore di vita. Si ha la necessità di adottare una riprogettazione dei materiali e dei prodotti, per essere adeguatamente attrezzati per il ricorso crescente al riutilizzo, alla riparazione e al riciclaggio. Un prodotto alla fine del suo ciclo di vita viene smaltito nelle discariche e non deve divenire materia di scarto, ma deve poter essere riutilizzato per generarne di nuovi. La transizione verso un'economia circolare rappresenta proprio l'opportunità di rimanere competitivi, ma in modo sostenibile. Il piano comprende misure per modificare i modelli di consumo e di produzione,

concentrandosi sulla progettazione dei prodotti (durabilità, riparabilità, riutilizzo e riciclabilità), sulla gestione dei rifiuti (prevenzione, riciclaggio dei materiali, recupero dell'energia e prevenzione dello smaltimento in discarica) e sulla sensibilizzazione dei consumatori [12].



Figura 1.2: Modello di economia circolare proposto dall'UE [1]

1.2 Sostenibilità nel settore calzaturiero

Negli ultimi decenni, la crescente consapevolezza mondiale nelle tematiche ambientali ha rapidamente diffuso l'uso degli studi di valutazione del ciclo di vita (LCA), sia a livello di ricerca che di politica. [13]. Oggigiorno, l'industria della moda è uno dei settori più sviluppati dell'industria manifatturiera con circa 2,7 kg di calzature consumate da una singola persona ogni anno. Tale dato ha un impatto ambientale molto significativo, causato principalmente dai materiali, difficili da decomporre, utilizzati in fase di produzione. Inoltre, ciascuna scarpa a fine vita viene smaltita nelle discariche diventando uno dei flussi di rifiuti più importante del settore calzaturiero [14]. L'impatto ambientale delle industrie che producono calzature si studia osservando il ciclo di vita dei prodotti, che possiamo suddividere in sette diverse fasi, dalla materia prima fino a quando le scarpe si buttano via dopo che sono state indossate. Si ottengono così dei risultati misurabili in emissioni di gas a effetto serra, Greenhouse Gases (GHG in inglese), per ogni fase del ciclo di vita. L'industria calzaturiera è responsabile dell'1,4% delle emissioni globali di GHG, equivalenti a 700 milioni di tonnellate di CO₂-eq, ossia CO₂ equivalente, l'unità di misura che permette di pesare insieme le emissioni dei vari gas serra aventi differenti effetti sul

1.2 Sostenibilità nel settore calzaturiero

clima. Oltre il 60% delle emissioni proviene da due fasi: produzione ed estrazione di materie prime. [2]

1. Ricavare le materie prime per le scarpe, produce il 20% di emissioni.
2. Filatura, tessitura e concia, il 14% di emissioni.
3. Produrre le parti necessarie per le scarpe, attraverso processi di taglio e il collegamento tra tutti i componenti, il 43%.
4. Cucire e assemblare le calzature impatta per il 20%.
5. La produzione di scatole per le scarpe, l'1%.
6. Trasporti fino ai negozi, il 2%.
7. La raccolta e la gestione di prodotti di calzature alla fine della loro vita utile (incenerimento e messa in discarica) ha un impatto assolutamente irrilevante: 0%

PRODUZIONE	SCARPE IN PELLE	SCARPE SINTETICHE	SCARPE IN TESSUTO	TOTALE
Milioni di ton.	5,39	12,05	3,82	21,27
Milioni di paia	5.395	12.047	3.825	21.266
%	25%	57%	18%	100%

Figura 1.3: Produzione di calzature europee [2]

SCARPE IN PELLE	MATERIALI	QUANTITÀ	UNITÀ	COMMENTI
Estrazione delle materie prime	EVA (Copolimero etilene vinilacetato)	2,00	Mt (milioni di ton.)	Materiale per intersuola (37%)
Trasformazione delle materie prime	Gomma	0,97	Mt	Materiale per suola (18%)
	Pelli grezze	11,87	Mt	Materiale per tomaia (40%)
	Pelli conciate	1.541,35	Milioni di m ²	Conversion da pelle grezza a pelle conciata: m ² 1 = kg. 7,7 di pelle conciata

Figura 1.4: Materiali e componenti per le scarpe in pelle

Capitolo 1 Sviluppo sostenibile

SCARPE SINTETICHE	MATERIALI	QUANTITÀ	UNITÀ	COMMENTI
Estrazione delle materie prime	EVA (Copolimero etilene vinilacetato)	6,87	Mt (milioni di ton.)	Materiale per intersuola (57%)
Trasformazione delle materie prime	Gomma	2,17	Mt	Materiale per suola (18%)
	Poliesteri	1,51	Mt	Materiale per tomaia (25%)
	Poliuretano	1,51	Mt	
	Filature e tessitura delle fibre di poliestere e poliuretano	3,01	Mt	

Figura 1.5: Materiali e componenti per le scarpe sintetiche

SCARPE IN TESSUTO	MATERIALI	QUANTITÀ	UNITÀ	COMMENTI
Estrazione delle materie prime	EVA (Copolimero etilene vinilacetato)	2,18	Mt (milioni di ton.)	Materiale per intersuola (57%)
	Gomma	3,24	Mt	Materiale per suola (18%)
	Cotone	0,96	Mt	Materiale per tomaia (25%)
Trasformazione delle materie prime	Filatura delle fibre di cotone	0,96	Mt	

Figura 1.6: Materiali e componenti per le scarpe in tessuto

Dunque, lo scopo di molte industrie diventa proprio quello di voler ricercare degli spunti per poter effettuare il riciclaggio dei loro prodotti in accordo con le leggi europee. Nello specifico, nella fase di progettazione si sta facendo particolare attenzione alla scelta dei materiali, alla possibilità di riutilizzo di alcune parti e al mantenere affidabili i prodotti che subiranno operazioni di riciclo [14]. Ne è un esempio l'azienda marchigiana di calzature di lusso "Santoni", che con il suo progetto "Calzare 4.0" mira alla riduzione degli impatti ambientali attraverso la reingegnerizzazione e il riciclaggio dei suoi prodotti (Figura 1.7). Il servizio dona una nuova vita alla calzatura, sia in termini di funzionalità che di estetica sostituendo il componente obsoleto, come la suola, con uno nuovo [15].

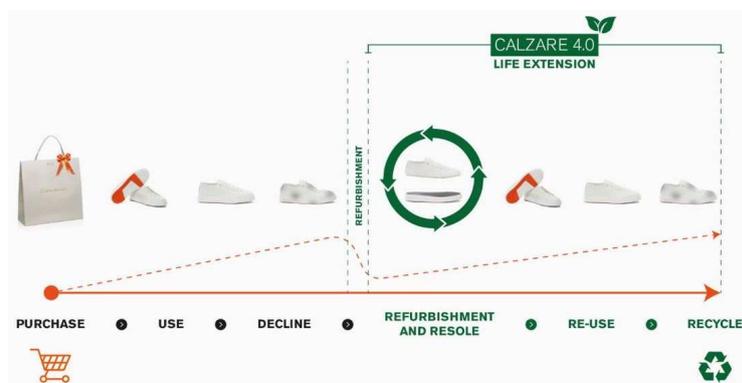


Figura 1.7: Modello di progetto di riciclo *Calzare 4.0* da parte della Santoni Spa.

Capitolo 2

Presentazione del robot

Per la conduzione degli esperimenti è stato utilizzato un cobot dell'azienda danese Universal Robots, che è una delle maggiori produttrici di questa tipologia di robot. Ciò che rende questi robot diversi da quelli classici è la possibilità di avere un'interazione diretta tra la macchina e l'operatore all'interno di uno spazio condiviso. Nonostante ciò però, nel nostro caso, è sempre consigliata la scelta di un ambiente controllato, perché le azioni che svolgerà il robot prevedono l'utilizzo di utensili che possono essere pericolosi per chi si trova nei pressi dell'area di lavoro.

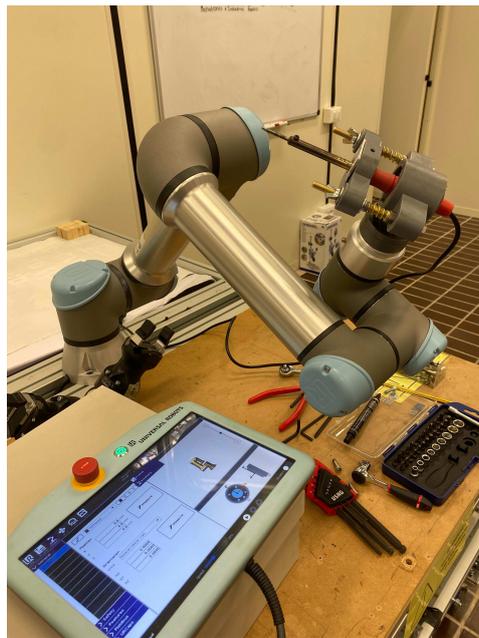


Figura 2.1: Foto del robot in laboratorio con utensile

2.1 Caratteristiche del robot

Il robot, modello *UR5e*, è dotato di 6 giunti rotanti comandati ciascuno da un motore elettrico, ha una portata utile fino a 5 *kg* all'estremità dell'ultimo giunto, ovvero sulla sua flangia, dove è collegato l'effettore terminale. Ha una portata di raggio 850 *mm* misurati dall'asse di base del robot. È realizzato completamente in

alluminio, con struttura in acciaio e alcune coperture in plastica sui giunti. Presenta inoltre, un display di controllo che permette una facile programmazione (Figura 2.2) e una porta M8 a 8 pin, vicino alla flangia, che permette l'implemento di diversi utensili che possono interfacciarsi con il robot. Il controllore logico programmabile (PLC) integrato gestisce: i motori, le istruzioni per l'utente, i segnali elettrici, le funzioni di sicurezza e altro ancora. Inoltre, il robot può essere collegato ad un computer esterno tramite porta ethernet e programmato tramite sistema operativo *Linux*. [16]

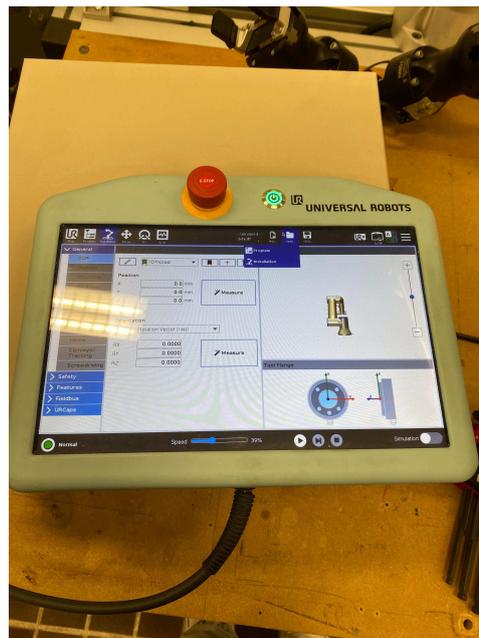


Figura 2.2: Display controllo del robot

2.1.1 Parametri di movimento del robot - controllo della posizione

Per muoversi il robot è stato progettato utilizzando il modello cinematico che è necessario per la simulazione numerica e il controllo del robot stesso. La cinematica diretta del robot si può ottenere attraverso la geometria e la posizione spaziale di ciascuno dei collegamenti che compongono il sistema. Diversamente, la cinematica inversa può essere ottenuta attraverso la determinazione delle variabili di giunzione in base alla posizione e all'orientamento dell'effettore finale. I parametri delle unioni sono ottenuti attraverso la convenzione Denavit-Hartenberg (DH) dove le matrici di trasformazione omogenee sono ottenute per qualsiasi robot manipolatore. [17][3]

I parametri di posizione sono calcolati attraverso i sistemi di riferimento e sono rappresentati nella tabella di (Figura 2.3), dall'algoritmo DH, dove i_n =rappresenta gli assi che compongono il robot, α_i =angolo misurato attorno all'asse x, a_i =distanza misurata lungo l'asse x, d_i =distanza misurata lungo l'asse z, θ_i =angolo misurato attorno all'asse z. [3]

i_n	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	$\frac{\pi}{2}$	0	L_1	θ_1
2	0	a_2	0	θ_2
3	0	a_3	0	θ_3
4	$\frac{\pi}{2}$	0	L_4	θ_4
5	$-\frac{\pi}{2}$	0	L_5	θ_5
6	0	0	L_6	θ_6

Figura 2.3: Tabella parametri di posizione [3]

Per ottenere la posizione e la rotazione effettiva del robot si vanno a moltiplicare le 6 matrici di trasformazione omogenee rappresentate in (2), ottenute dalla matrice di trasformazione omogenea generale della metodologia DH (1). Svolgendo i calcoli della matrice (2) troviamo le equazioni che danno i parametri di *orientamento* (3):

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cdot \cos a_i & \sin \theta_i \cdot \sin a_i & a_i \cdot \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cdot \cos a_i & \cos \theta_i \cdot \sin a_i & a_i \cdot \sin \theta_i \\ 0 & \sin a_i & \cos a_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0T_6 = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$r_{11} = c_1 c_{234} c_5 c_6 + c_6 s_1 s_5 - c_1 s_{234} s_6 \quad (3.1)$$

$$r_{12} = -c_1 c_{234} c_5 c_6 - s_1 s_5 s_6 - c_1 c_6 s_{234} \quad (3.2)$$

$$r_{13} = -c_1 c_{234} s_5 + c_5 s_1 \quad (3.3)$$

$$r_{21} = c_{234} c_5 c_6 s_1 - c_1 c_6 s_5 - s_1 s_{234} s_6 \quad (3.4)$$

$$r_{22} = -c_{234} c_5 s_1 c_6 + c_5 s_5 s_6 - c_6 s_1 s_{234} \quad (3.5)$$

$$r_{23} = -c_{234} s_1 s_5 - c_1 c_5 \quad (3.6)$$

$$r_{31} = c_5 c_6 s_{234} + c_{234} s_6 \quad (3.7)$$

$$r_{32} = -c_5 c_6 s_{234} + c_{234} c_6 \quad (3.8)$$

$$r_{33} = -s_{234} s_5 \quad (3.9)$$

e i parametri di *posizione* (4):

$$p_x = -c_1 c_{234} s_5 d_6 + c_5 s_1 d_6 + c_1 s_{234} d_5 + s_1 d_4 + c_1 c_{23} a_3 + c_1 c_2 a_2 \quad (4.2)$$

$$p_y = -c_{234} s_1 s_5 d_6 - c_1 c_5 d_6 + s_1 s_{234} d_5 - c_1 d_4 + c_{23} s_1 a_3 + c_2 s_1 a_2$$

$$p_z = -s_{234} s_5 d_6 - c_{234} d_5 + s_{23} a_3 + s_2 a_2 + d_1 \quad (4.3)$$

Da queste equazioni possiamo infine ottenere le equazioni per la posizione angolare che completano la soluzione della cinematica inversa del robot UR5e [3]:

$$\theta_1 = a \tan 2(A_1, B_1) \pm a \tan 2\left(\sqrt{A_1^2 + B_1^2 - d_4^2}, d_4\right) \quad (5.1)$$

$$\theta_2 = a \tan 2(K_s, K_c) - a \tan 2(a_3 s_3, a_3 c_3 + a_2) \quad (5.2)$$

$$\theta_3 = \pm a \tan 2(s_2, s_3) \quad (5.3)$$

$$\theta_4 = \theta_{234} - \theta_2 - \theta_3 \quad (5.4)$$

$$\theta_5 = \pm a \tan 2(s_5, c_5) \quad (5.5)$$

$$\theta_6 = a \tan 2(s_6, c_6) \quad (5.6)$$

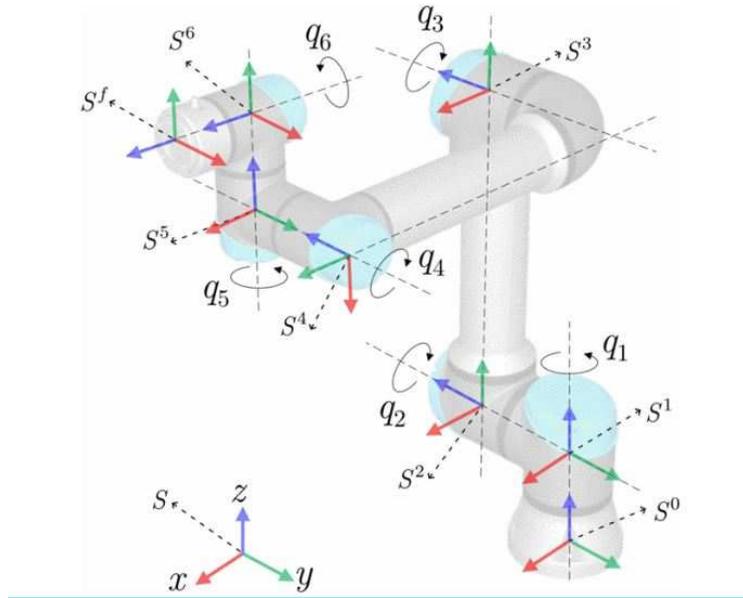


Figura 2.4: Struttura cinematica del robot UR5e [4]

2.1.2 Controllo in forza

La capacità di controllo della forza può aiutare il robot manipolatore a completare alcune attività di contatto complesse. Negli ultimi trent'anni, sono stati presentati due tipi di metodi di controllo della forza: controllo ibrido e controllo dell'impedenza. Il controllo ibrido chiamato anche controllo posizione/forza è stato presentato per la prima volta da Mason, Raibert e Craig . L'idea principale di questo metodo è: quando il robot esegue attività di contatto, l'ambiente causa alla macchina due tipi di vincoli: vincoli naturali e vincoli artificiali. Nel controllo ibrido, il controller gestisce solo le variabili dei vincoli artificiali. Invece, il controllo dell'impedenza è presentato da Hogan. Questo metodo semplifica il modello di contatto del manipolatore robot e l'ambiente in un sistema massa-molla-smorzatore di secondo ordine. In sostanza, è un tipo di controllo della posizione modificato dalla forza [18]. L'equazione del moto per il manipolatore vincolato con 6 gradi di libertà, considerando la forza di contatto e i vincoli, è data nelle coordinate dello spazio di lavoro come:

$$\bar{M}(x)\ddot{x} + \bar{C}(x, \dot{x}) + \bar{N} = F_f \quad (2.1)$$

Dove $x, \dot{x}, \ddot{x} \in R^6$ sono rispettivamente il vettore posizione/posa dello spazio di lavoro, il vettore velocità e il vettore accelerazione; $\bar{M} \in R^6$ è la matrice di inerzia nello spazio delle attività; $\bar{C}(x, \dot{x})$ sta per termini di Coriolis e centrifughi; \bar{N} è un termine causato dalla gravità; $F \in R^6$ rappresenta la forza di contatto; $F \in R^6$ la forza di controllo nello spazio di lavoro. L'equazione dinamica del manipolatore robotico vincolato è non lineare e ad alto accoppiamento e con i dovuti calcoli si ottiene [18] :

$$F = \bar{M}_c(x)\lambda_d^{-1}\hat{F} + \bar{C}_c(x, \dot{x}) + \bar{N}_c \quad (2.2)$$

Dove $\bar{M}_c(x), \bar{C}_c(x, \dot{x}), \bar{N}_c$ sono il valore calcolato di $\bar{M}(x), \bar{C}(x, \dot{x}), \bar{N}$, rispettivamente; λ_d è una matrice diagonale e positiva definita dall'utente. Se il parametro dinamico del robot è calcolato in modo accurato, abbiamo [18]:

$$\bar{M}_c = \bar{M} \quad \bar{C}_c = \bar{C} \quad \bar{N}_c = \bar{N} \quad (2.3)$$

Riprendendo \hat{F} dalla (2.2) la sua definizione è:

$$\hat{F} = F_p + F_f \quad (2.4)$$

Dove F_p e F_f appresentano rispettivamente la forza di controllo della posizione e la forza di controllo della forza.

Con questo controllo sono state svolte quasi tutte le prove, poiché si rivelato di più immediata programmazione rispetto ad un controllo in posizione.

Capitolo 3

Lavorazioni Termiche e Meccaniche

Per svolgere l'esperimento sono state cercate diverse soluzioni di taglio sulla base delle seguenti caratteristiche:

1. Accuratezza di taglio del filo
2. Facilità di implementazione con il robot
3. Possibilità di aggiornamento degli utensili al fine di migliorare la qualità del taglio

Ogni utensile scelto per l'operazione è stato prima testato manualmente in officina, al fine di comprendere la sua efficacia, e poi è stato accoppiato al robot. I tentativi iniziali hanno portato alla scelta di tre tipologie di utensili: taglierino (o *cutter*), saldatore a stagno e dremel. (Il primo di questi, è stato scartato prima di essere accoppiato con il robot ma verrà ripreso meglio successivamente.)

3.1 Modelli 3D di supporto

Una volta selezionati gli utensili, sono stati creati diversi supporti che potessero collegarli alla flangia del robot. La progettazione dei supporti è stata effettuata attraverso i software *NX* e *SolidEdge*, entrambi programmi del tipo CAD/CAE (Figura 3.1). I modelli creati virtualmente sono stati poi stampati in 3D tramite una stampante a polimeri e sono stati successivamente aggiornati per migliorarne le caratteristiche.

Ad esempio, per il supporto del saldatore sono state aggiunte delle molle elicoidali per aiutare il controllo in forza del robot. Questi elementi sono serviti ad evitare vibrazioni eccessive del supporto durante le operazioni di lavorazione, che altrimenti avrebbero portato ad una perdita di precisione del robot e a conseguenze negative sul risultato.

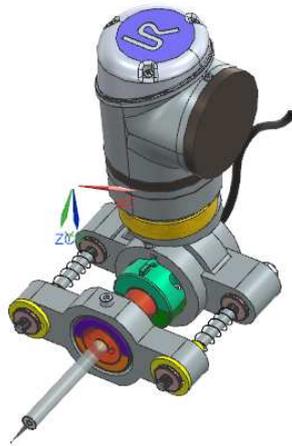


Figura 3.1: Supporto saldatore a stagno con flangia robot

3.2 Materiali lavorati

Per eseguire l'esperienza sono state utilizzate tre diverse calzature fornite da Santoni. I modelli a disposizione erano tutti in pelle scamosciata, con suola in gomma e filo in nylon. In particolare, l'esperienza si è concentrata sulla parte della suola, di conseguenza la gomma è stato il materiale principale di lavorazione. Nel settore calzaturiero i principali materiali utilizzati per la composizione della suola sono: poliuretano termoplastico (*TPU*) e etil vinil acetato (*EVA*).

3.2.1 Caratteristiche chimico-fisiche TPU

Il poliuretano termoplastico è un polimero che si forma dalla policondensazione di un isocianato con un diolo [5]. La natura chimica di questa catena va ad influenzare il comportamento meccanico e la resistenza chimica del materiale. Nell'ambito della produzione delle suole per le scarpe, per ottenere caratteristiche più simili alla gomma, le catene polimeriche devono essere lunghe; diversamente invece, con catene corte si ha un comportamento plastico con deformazione permanente. Quest'ultimo caso è applicabile in altri settori industriali. [5]



Figura 3.2: Struttura del TPU [5]

Ricordiamo tra le caratteristiche meccaniche del TPU l'eccezionale resistenza all'usura e allo strappo, l'elevata resistenza all'urto, la durezza Shore A pari a 95, fino al 580% di allungamento prima di giungere a rottura e una buona resistenza alla corrosione verso molti prodotti chimici e oli industriali comuni.

3.2.2 Caratteristiche chimico-fisiche EVA

EVA è l'acronimo di Etil Vinil Acetato, un materiale plastico a base di polietilene. È un copolimero ottenuto per polimerizzazione di etilene e acetato di vinile in reattore ad alta pressione. Sulla base delle percentuali di combinazione dei due comonomeri varia la resa finale del materiale plastico ottenuto. In particolare, il materiale più trasparente e flessibile è quello ad elevato contenuto di acetato di vinile.[19]

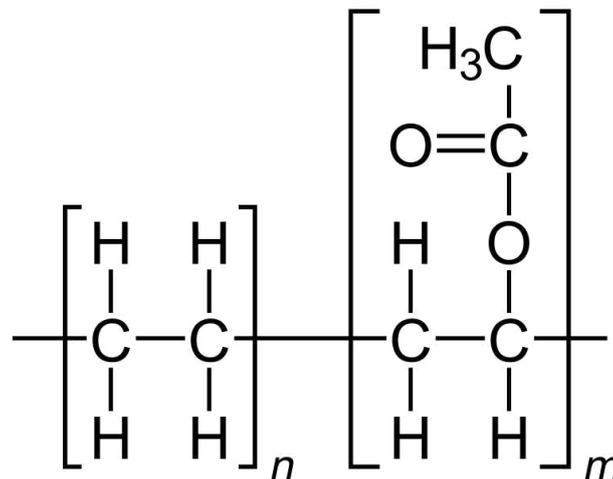


Figura 3.3: Formula chimica Etil Vinil Acetato [6]

EVA è un materiale semicristallino, le cui caratteristiche derivano per lo più dal comonomero acetato di vinile. La sua temperatura di utilizzo si aggira intorno a 40°C massimi. A causa del comonomero acetato di vinile l'odore del polimero è molto caratteristico e ricorda vagamente quello dell'aceto. I copolimeri EVA a causa del loro carattere polare assorbono piccole quantità di umidità. L'assorbimento di acqua aumenta proporzionalmente a VA. Un'altra proprietà è la permeabilità a gas e vapori che è legata in modo inversamente proporzionale alla frazione di materiale cristallino nel polimero. I copolimeri EVA con un tenore dal 10% al 30% di Vinil Acetato hanno caratteristiche simili agli elastomeri e al PVC plastificato con un tenore del 30% a 40% di plastificante. L'Eva è caratterizzato da una buona resistenza alle basse temperature, un'ottima resistenza a flessione e resistenza ai prodotti chimici. Le proprietà di isolamento elettrico sono buone, sono invece scarse quelle nei confronti dei gas e di agenti abrasivi. Rispetto agli elastomeri, i copolimeri EVA presentano una miglior resistenza all'ozono e (a seconda del tipo di elastomero) si lavorano come

i termoplastici, ma non è necessaria la vulcanizzazione. Di contro hanno una minore resistenza alle alte temperature quando sottoposti a sforzi, e minor elasticità.[8]

Proprietà	Dati
Resistività di volume Ohm/cm	$2,5 \times 10^{16}$
Costante dielettrica	2,6–3,2
Temperatura di esercizio	60°C a +80°C
Low Temperature Range	-30°C a -50°C
Punto di infragilimento	-30°C
Maxima temperatura in uso Statico	+80°C
Modulo di Young	da 7 a 120 MPa
Capacità termica specifica	2.3 J/(g*K)
Conducibilità termica	0.35 W/(m*K)
Densità	da 92 a 0,95 g/cm ³

Tabella 3.1: Proprietà Etil Vinil Acetato [8]

3.3 Operazioni in preparazione all'esperimento

Le prove per l'esperimento sono state effettuate nel laboratorio M.I.R dell'università dove il cobot è installato su un piano di lavoro. Come prima operazione si deve accoppiare la flangia del robot con l'utensile tramite il supporto 3D; successivamente sarà necessario settare il *TCP*, robot Tool Center Point, ossia il punto usato dal robot per posizionarsi. Il suddetto *TCP* è usato in ogni programma robot che utilizza bersagli definiti nello spazio Cartesiano. In questa fase la punta dell'utensile con cui si intende fare le lavorazioni viene fatta avvicinare a un punto (il TCP) con diverse angolazioni. Una volta settato, come ulteriore passaggio, è necessario specificare il peso dell'utensile accoppiato alla flangia, in modo tale che venga definito il centro di massa. Queste operazioni vanno effettuate attentamente perché possono precludere il risultato della prova. Successivamente si procede con la definizione dei *waypoint* che sono dei punti nello spazio che il robot deve raggiungere. Tramite un menù allegato è possibile scegliere diversi parametri, tra cui velocità e accelerazione del robot. In seguito, bisogna accostare l'utensile alla scarpa attraverso il controllo di contatto, nel quale il robot sente la reazione vincolare che ha con la suola della scarpa. Per effettuare il taglio del filo va impostato lo scorrimento della punta dell'utensile lungo il filo della suola. Per fare ciò si possono definire sia un controllo in posizione che in forza. Ogni parametro è regolabile tramite i menù che si trovano sul pannello di controllo del cobot.

3.4 Lavorazioni Termiche

In questa fase dell'esperimento è stata utilizzata energia termica, sfruttata come calore da un saldatore a stagno, per rimuovere la cucitura che collega la suola alla tomaia della scarpa. Nell'esperimento sono stati utilizzati due saldatori a stagno. In particolare, il secondo di questi è dotato di reostato, strumento che tramite una resistenza variabile, permette di regolare la temperatura della punta dell'utensile. Questa soluzione ha avuto un impatto positivo sulla prova perché ha permesso un maggiore controllo sul taglio.

Le prove di taglio sono state prima svolte manualmente e poi tramite il robot, per verificarne preliminarmente la fattibilità. In quelle effettuate con il cobot sono stati effettuati diversi tentativi su piccole porzioni di suola. In un primo momento a saldatore spento, poi a saldatore acceso e sia con controllo in forza che in posizione. Inoltre, sono state testate diverse temperature, che variavano in un range di $400-500^{\circ}C$. Altri fattori tenuti in considerazione sono stati:

1. angolo di taglio
2. velocità e accelerazione del robot
3. profondità di penetrazione della suola
4. forza applicata dal robot

3.4.1 Caratteristiche della prova

In definitiva si è preferito condurre le prove con il saldatore dotato di reostato poiché l'altro era meno aggiornato e poco controllabile. Principalmente le prove si possono dividere in due categorie che differiscono tra loro per il tipo di punta utilizzata. L'esperimento è iniziato scegliendo il tipo di punta e settando il TCP dell'utensile e del suo supporto. Poi è stato scritto il programma di comando del cobot ed impostato il controllo in forza. I parametri di velocità del braccio robot e di angolazione dell'utensile sono stati scelti per ultimi e fatti variare durante le due prove, per trovare il set-up migliore. Nella Tabella 3.2 e Tabella 3.3, si trovano tutti i parametri utilizzati durante le due prove.

Dati	Valori
Punta	acuminata
Temperatura	$500^{\circ}C$
Angolo	0° e 45°
Velocità robot	35 mm/s
Accelerazione robot	700 mm/s^2
Penetrazione	1 mm
Forza controllo di contatto	5 N

Tabella 3.2: Tabella prova 1

Dati	Valori
Punta	a scalpello
Temperatura	500°C
Angolo	45°
Velocità robot	25 mm/s
Accelerazione robot	550 mm/s ²
Penetrazione	1.50 mm
Forza controllo di contatto	7N

Tabella 3.3: Tabella prova 2

3.4.2 Considerazioni

Entrambi le punte dei saldatori hanno rimosso efficacemente il filo, ma quella fine è preferibile perché assicura una migliore precisione grazie alla caratteristica della punta che riesce ad inserirsi perfettamente nella guida di cucitura della suola. Importante è assicurare un angolo tra la direttrice uscente dalla punta e la normale alla suola, così da evitare durante lo spostamento lungo il perimetro della scarpa un'eccessiva flessione della punta dell'utensile. Un'altra precauzione da prendere riguarda la sicurezza dell'operatore che può trovarsi vicino al robot. È fondamentale prestare attenzione alle alte temperature e allo sviluppo di fumi tossici dovuti al riscaldamento della gomma. Riassumendo, si possono andare a elencare i principali vantaggi e svantaggi dell'utilizzo di mezzi termici.

I *vantaggi* di adottare il saldatore sono:

1. Rimozione pulita del filo senza sbavature
2. Possibilità di regolazione della temperatura
3. Possibilità di utilizzare diverse punte

Gli *svantaggi* sono:

1. Alta possibilità di errore per le elevate temperature
2. Produzione di fumi (al fine di maggiore sicurezza è importante garantire l'aspirazione)
3. Rischio di flessione della punta del saldatore
4. Realizzazione di un supporto ignifugo e resistente al calore

Di seguito sono elencate due immagini che rappresentano uno dei principali svantaggi dell'utilizzo del saldatore (Figura 3.4)

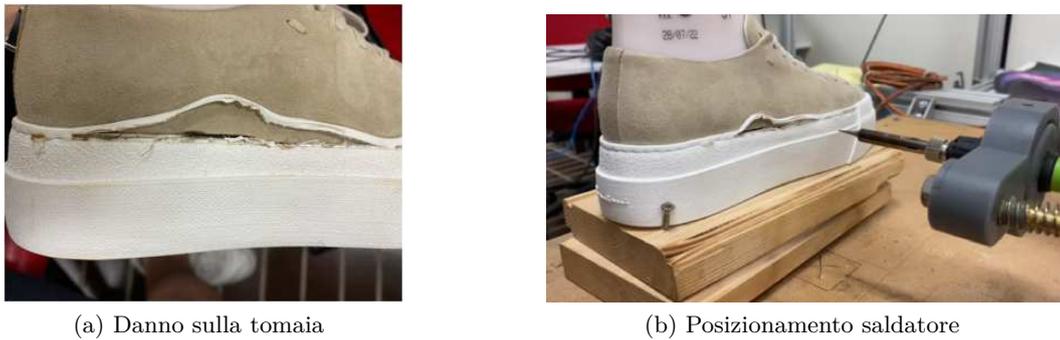


Figura 3.4: Prova di taglio

3.5 Lavorazioni meccaniche

Nella fase delle lavorazioni meccaniche svolte con il robot è stato utilizzato un unico utensile: il dremel; d'altro canto, non è stato usato il taglierino a causa dell'impossibilità di implementarlo con il robot per la complessità del taglio. Nello specifico in questa fase, per degradare il filo della suola è stato sfruttato l'attrito generato dalla punta dell'utensile in rotazione. È importante sottolineare anche la difficoltà maggiore di questa fase, ossia quella di regolare in modo ottimale il sensore di contatto sia per il controllo in forza che in posizione, ma verrà ripreso successivamente. Anche in questo caso gli utensili sono stati prima provati manualmente e poi accoppiati al robot.

3.5.1 Taglierino-cutter

Questo utensile si è rivelato molto efficiente nella pratica manuale. Essendo dotato di una lama sottile e molto tagliente, il taglio del filo risulta pulito e preciso. Sono state effettuate due tipologie di taglio: uno perpendicolare al filo che va a tagliare singolarmente ogni cucitura e uno parallelo che taglia in lunghezza tutte le cuciture (Figura 3.5). Queste due modalità sono state applicate solo nel taglio della parte esterna del filo, poiché spesso la lama non riusciva a penetrare perfettamente nella suola e parte di questa rimaneva attaccata alla tomaia. Per questo motivo, bisogna effettuare un'ulteriore operazione, ossia passare il cutter nello spazio suola-tomaia che è stato creato dalle prime due tipologie di taglio (Figura 3.6). Quest'ultima operazione è molto delicata perché si rischia il taglio della pelle, ed essendo già complicata manualmente, è risultata anche di difficile implementazione con il robot. Si è preferito dunque scartarla.

Considerazioni

Riassumendo sono state utilizzate due tecniche di taglio, dove vantaggi e svantaggi possono essere elencati qui di seguito.



Figura 3.5: Dettaglio mancato taglio del filo tra suola e tomaia



(a) Rimozione filo interno tra suola e tomaia.



(b) Dettaglio risultato finale.

Figura 3.6: Passaggi cutter

- **Taglio perpendicolare al filo (dall'alto al basso)**
 - *Vantaggi*: semplicità di esecuzione
 - *Svantaggi*: taglio poco pulito, forze elevate, tempo di esecuzione elevato, pulizia del filo interno con rischio di taglio della tomaia per errata inclinazione della lama
- **Taglio parallelo al filo (il più efficace)**
 - *Vantaggi*: forze inferiori, taglio più rapido, rimozione facilitata
 - *Svantaggi*: pulizia del filo interno maggiore del caso precedente, con rischio taglio della tomaia per errata inclinazione della lama

3.5.2 Dremel

Il dremel è un utensile rotante, a velocità variabile e multiuso dotato di un mandrino nel quale possono essere inserite diverse punte: sia da taglio che da fresatura. Per il nostro esperimento è stata utilizzata una fresatrice Parkside modello *PFBS 160 B2*, di cui si elencano le caratteristiche tecniche (Tabella 3.4):

CARATTERISTICHE TECNICHE	VALORI
Peso	760 g
Motore	elettrico a spazzole
Potenza	160 W
Velocità di rotazione	da 10.000 a 30.000 giri/min
Dimensioni	31 x 18 x 9 cm
Diametro del mandrino	3,2 mm
Fresatura	fino a 30 mm di profondità
Incisione e taglio	vari materiali (legno,gomma,plastica)

Tabella 3.4: Tabella specifiche tecniche fresatrice [9]

Anche per questo utensile si è dovuto costruire un supporto per poterlo accoppiare con il robot. Ancora una volta è stato utilizzato il software cad *NX* e poi successivamente il pezzo disegnato è stato stampato con la stampante 3D.



Figura 3.7: Fresa Parkside PFBS 160 B2 [7]

Caratteristiche della prova

Come per gli altri utensili, le prove di taglio sono state eseguite prima manualmente e poi con il robot. Per eseguire le prove sono state utilizzate 3 punte differenti: un disco da taglio e due punte da fresatura. Le modalità di taglio sono state differenti a seconda del tipo di punta utilizzata. Sono state scelte diverse posizioni per il braccio robotico perché, in particolare con le punte coniche e sferiche, il robot andava in singolarità e bloccava l'esperimento. I moti di avanzamento del taglio sono stati lineari e a differenti angolazioni, sia perpendicolari al filo sia inclinato rispetto al vettore direttore del filo. Questa è stata la prova che ha dato più problemi con il robot, poiché oltre alle difficoltà incontrate per i diversi approcci e per le diverse punte utilizzate, si sono verificate difficoltà con il controllo in forza.

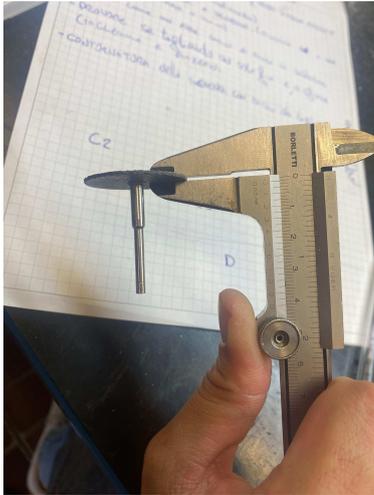
Disco da taglio

La punta utilizzata è un disco da taglio rinforzato in fibra di vetro con abrasivo all'ossido di alluminio, adatto a qualsiasi tipo di materiale. Considerata la geometria della punta e dunque la direzione di taglio del disco, il dremel è stato posizionato verticalmente rispetto al banco di lavoro. Questo posizionamento risultava essere favorevole poiché non mandava il robot in posizione di singolarità. Infatti, per ruotare intorno alla scarpa il braccio robotico non ha bisogno di allungarsi troppo e non deve effettuare movimenti complessi della flangia, proprio perché il dremel si troverà sempre in posizione verticale e il disco ha possibilità di taglio a 360 gradi. Una volta settato il TCP sono stati settati 4 waypoint di avvicinamento alla scarpa e uno per definire la direzione del taglio. Poi sono state eseguite due prove: una ad utensile spento e una ad utensile acceso. Il taglio è avvenuto in modo netto e pulito con velocità dell'utensile da 2 a 4 (da 14'000 a 26'000 giri/min) ed eseguendo le prove si è notato che la pulizia del taglio era proporzionale alla velocità stessa. La medesima cosa vale per il numero di passaggi da effettuare, in particolare a rpm più bassi si necessitano di 1-2 passate.

Le caratteristiche del disco sono riportate nella Tabella 3.5:

Caratteristiche	Dati
Diametro	32 mm
Spessore	1.3 mm
Diametro gambo	3.2 mm
Diametro di lavoro	32 mm
Profondità di lavoro max	14 mm
Lunghezza	36 mm
Giri/min (max)	35'000 giri/min
Materiale	fibra di vetro con abrasivo all'ossido di alluminio

Tabella 3.5: Riassunto delle caratteristiche del disco da taglio



(a) Disco da taglio



(b) Operazione con il robot

Figura 3.8: Lavorazione con disco da taglio

Considerazioni della prova con il disco da taglio

L'operazione di taglio ha avuto successo positivo solo se eseguita da un operatore umano, poiché manualmente si riusciva a regolare rapidamente la forza da applicare sul filo e dunque il disco aveva modo di ruotare liberamente. Quando il dremel è stato implementato al robot, il disco tendeva a bloccarsi nonostante si impostava al massimo la velocità di rotazione. Il problema si verificava per l'elevata frizione del disco con la gomma ai bordi del filo e per la forza costante indotta dal robot. Infatti, il problema è stato amplificato per l'utilizzo di un controllo in forza. In seguito, nonostante l'utilizzo di un controllo in posizione, il fenomeno continuava a comparire. Ultimo aspetto, ma non meno importante è la produzione di detriti dovuti al consumo della gomma della suola; si consiglia dunque l'implemento di una cappa di aspirazione per mantenere pulito l'ambiente di lavoro.

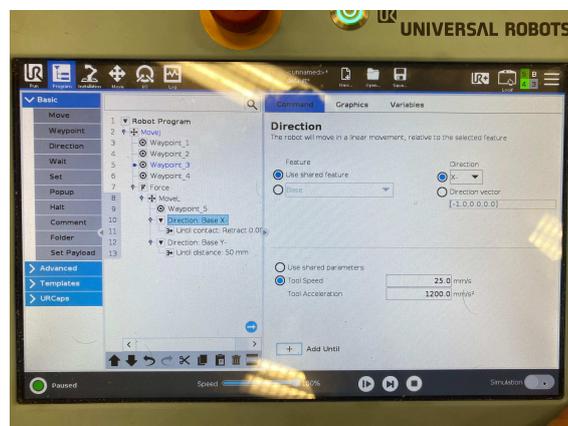


Figura 3.9: Codice robot disco da taglio

Punta conica

Un'ulteriore punta utilizzata nella sezione delle lavorazioni meccaniche è quella conica. È caratterizzata da una superficie conica diamantata adatta alla lavorazione di materiali duri e semiduri. In questa fase della lavorazione a differenza del disco da taglio, il dremel non è stato posto verticalmente al banco da lavoro, ma parallelamente ad esso. Questa variazione è stata necessaria per la modalità di taglio della punta, ma ha generato alcuni problemi al braccio robotico, poiché per determinati movimenti si sono raggiunti i punti di singolarità. In particolare, nel momento in cui si andrà a tagliare il filo lungo tutta la suola, il robot dovrà ruotare intorno alla scarpa mantenendo il dremel sempre perpendicolare alla superficie laterale della suola. Questo fa compiere dei movimenti più complessi al Cobot rispetto al disco da taglio e necessitano di uno studio più approfondito. Nonostante ciò, la qualità del taglio è molto buona. In questo caso una volta settato il TCP dell'utensile sono stati settati tre waypoint: due di avvicinamento alla scarpa e uno di guida per lo spostamento. Subito dopo il secondo waypoint sono stati impostati il controllo di contatto e poi l'avanzamento del braccio mediante controllo in posizione. La velocità di spostamento è stata settata a 40 mm/s e parallela al filo della suola. Le caratteristiche della punta sono riportate nella Tabella 3.6:

Caratteristiche	Dati
Forma	Cono piccolo
Diametro base cono	3,2 mm
Diametro gambo	3 mm
Lunghezza	36,0 mm
Giri/min	30'000 giri/min
Materiale cono	Diamante

Tabella 3.6: Riassunto caratteristiche punta conica

Considerazioni della prova con la punta conica

In conclusione, i risultati di questa prova sono stati soddisfacenti. Il taglio effettuato è stato eseguito correttamente e senza sbavature come si può notare dalla (Figura 3.12b). La prova è stata effettuata a velocità 3 (20'000 giri/min) e portata poi a 5 (33'000 giri/min) senza variazioni nel risultato della prova. Come per il saldatore, sono state provate due angolazioni differenti: una perpendicolare alla suola e l'altra con un angolo di 45 gradi rispetto alla normale della suola. Tra le due opzioni la seconda si è rivelata più efficace, poiché si ha una perforazione minore e si ha minore danneggiamento della tomaia. Però proprio a causa di questa forma della punta, si formano numerosi detriti di gomma che andrebbero eliminati anche in questo caso con un sistema dedicato. In definitiva, i principali problemi di questa prova sono stati: evitare di raggiungere i punti di singolarità e realizzare un taglio uniforme anche adottando diverse angolazioni dell'utensile. Per la prima problematica, una

3.5 Lavorazioni meccaniche

delle possibili alternative può essere effettuare una mappatura della suola della scarpa e posizionarla correttamente nel piano di lavoro del robot; per la seconda sarebbe più opportuno utilizzare un'altra tipologia di punta.

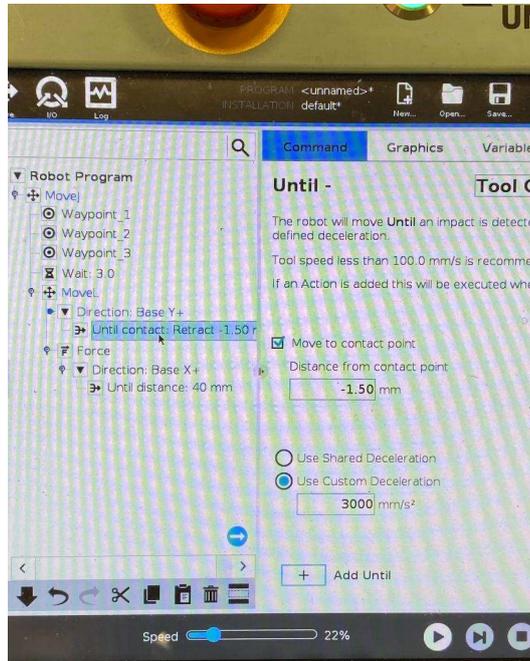
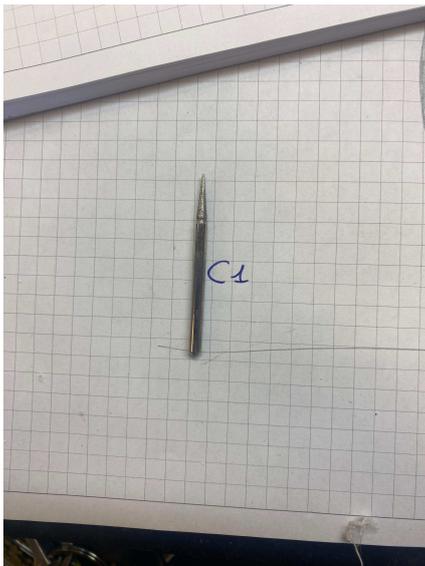


Figura 3.10: Codice punta conica



(a) Punta conica



(b) Dettaglio pulizia taglio

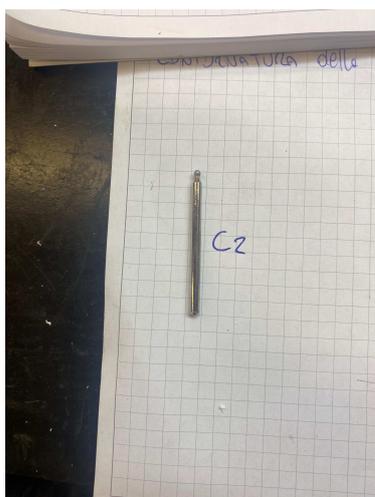
Figura 3.11: Lavorazione con punta conica

Punta sferica

Questa tipologia di punta ha offerto le migliori prestazioni tra le tre alternative testate. Nel controllo del robot, come per la punta conica, sono stati settati sempre 3 waypoint e la stessa velocità di avanzamento. L'unica modifica è stata fatta aggiungendo una prova anche con il controllo in forza oltre che a quello in posizione. Nelle prove preliminari, effettuate manualmente, i risultati del taglio sono stati pressoché identici a quelli della punta conica. Invece, le prove eseguite dal cobot hanno mostrato un vantaggio non banale, ovvero: la possibilità di sfruttare la geometria sferica della punta per lavorare sia con utensile angolato che perpendicolare alla superficie laterale della suola. Con il robot sono state eseguite quattro prove totali: due con utensile spento e due con lo stesso acceso. Nelle ultime sono stati utilizzati prima il controllo in posizione poi quello in forza. Le caratteristiche della punta sono elencate nella sottostante Tabella 3.7:

Caratteristiche	Dati
Forma	Sfera piccola
Diametro gambo	3,2 mm
Diametro sfera	2,2 mm
Diametro lavoro	2,0 mm
Lunghezza accessorio	40,0 mm
Giri/min	35'000 giri/min
Materiale sfera	Diamante

Tabella 3.7: Riassunto caratteristiche punta sferica



(a) Punta sferica



(b) Dettaglio pulizia taglio

Figura 3.12: Lavorazione con punta sferica "prova preliminare"

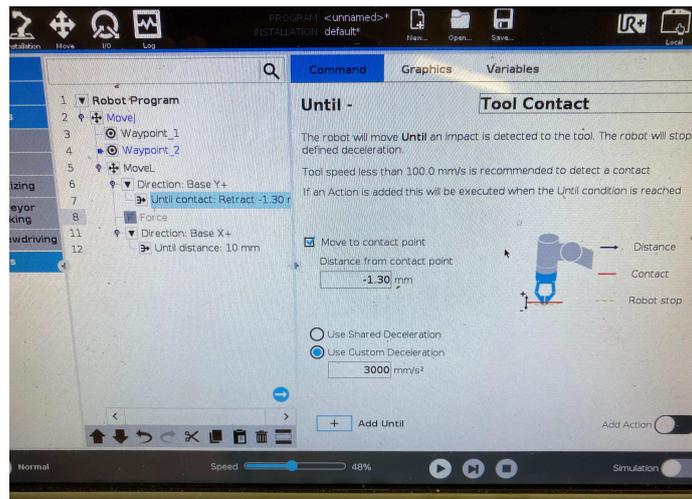


Figura 3.13: Codice punta sferica

Considerazioni della prova con la punta sferica

I risultati migliori sono stati ottenuti con questa tipologia di punta, poiché oltre ad effettuare un ottimo taglio assicura anche precisione con diversi angoli di taglio. L'aspetto negativo è lo stesso della punta conica, ossia il rischio di andare in singolarità con il cobot a causa del posizionamento dell'utensile. Una soluzione si può trovare posizionando la calzatura in una configurazione comoda per il braccio del robot e accoppiarla con una mappa 3D della suola. Un ulteriore problema è sopraggiunto nel momento in cui si è effettuata la prova di taglio con la fresa accesa, poiché nel momento in cui la punta ha toccato il robot, i suoi sensori di contatto non hanno ricevuto alcuna reazione vincolare ed è avvenuta la perforazione della tomaia (Figura 3.14b). Probabilmente, a causa delle vibrazioni provocate dal motorino della fresa o per interferenza elettromagnetica, il sensore di controllo di contatto non ha funzionato. Per verificare l'ipotesi è stata fatta una prova aggiuntiva schermando il dremel con la carta stagnola e facendo il collegamento a terra; il fenomeno della perforazione non è più avvenuto. Questa parte va affrontata con maggiore studio, poiché lo stesso problema non si verificava con una punta conica.

In definitiva i *vantaggi* della prova sono:

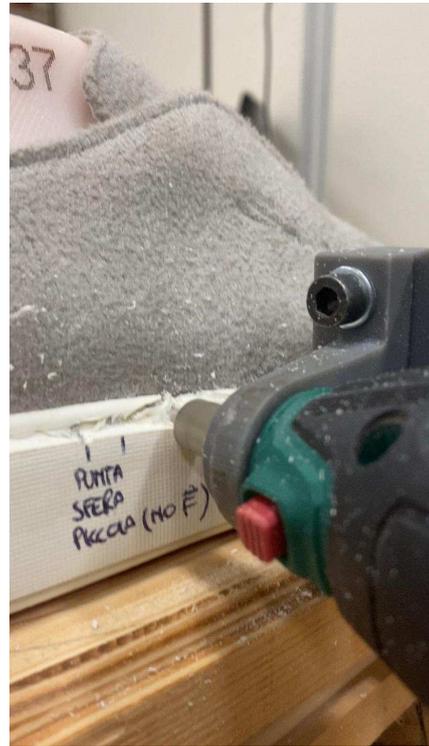
1. Taglio del filo in modo pulito e netto
2. Taglio del filo sia con punta dell'utensile angolata che perpendicolare alla gomma.
3. Utensile sicuro e controllabile

Invece, gli *svantaggi* sono:

1. Rischio della perforazione della tomaia
2. Possibilità di arrivare a configurazioni di singolarità



(a) Lavorazione con punta sferica tramite cobot



(b) Dettaglio perforazione della tomaia

Figura 3.14: Lavorazione con punta sferica "prova cobot"

Capitolo 4

Conclusioni e Obiettivi futuri

4.1 Conclusioni

Lo scopo di questo esperimento è stato trovare un metodo efficace per la rimozione della suola dalle calzature, al fine di poter riciclare la suola in gomma e tenere la tomaia in pelle. Le prove effettuate hanno determinato diversi risultati che sono stati analizzati sotto diversi aspetti come: efficacia del taglio, pulizia dell'operazione, possibili problematiche di utilizzo, implementazione robotica e controllo robotico. In conclusione, la scelta migliore che si può intraprendere per svolgere con successo l'esperimento è la fresa dremel con la punta sferica diamantata, poiché offre la migliore pulizia di taglio e versatilità di utilizzo. Anche il saldatore era un'opzione valida ma a causa delle elevate temperature le percentuali di errore e di danneggiamento sono alte.

4.2 Obiettivi futuri

Al fine di migliorare ancora la qualità del taglio e trovare applicazione sul campo si può implementare il software del robot con uno esterno. Una delle parti più critiche è stata evitare posizioni di singolarità del robot e per superare questo problema come già scritto, si può recuperare una mappatura della suola direttamente dagli archivi della casa produttrice. In questo modo, è possibile regolare il robot in modo tale da lavorare in modo ottimale, riducendo i problemi e aumentando la produttività generale. Per l'applicazione in azienda sarà essenziale dotare il robot di sensori per poter migliorare le caratteristiche dell'operazione e per tagliare interamente il filo della suola, perché fino ad oggi sono state possibili solo le rimozioni di piccole porzioni di filo, a causa della complicata geometria della suola. Altro spunto interessante sarà la gestione e la progettazione del software esterno e l'aggiunta di tutti i dispositivi di rimozione dei detriti generati dalla lavorazione. In ultima battuta l'esperimento è ancora nella fase iniziale, ma mostra notevoli potenzialità di sviluppo che alla lunga potranno migliorare la sostenibilità del settore calzaturiero.

Bibliografia

- [1] https://www.europarl.europa.eu/resources/library/images/20230927PHT05960/20230927PHT05960_original.png.
- [2] Assomac. Gli indicatori chiave dell'impatto ambientale. *Confindustria*, <https://assomac.it/it/news/news-da-assomac/3-gli-indicatori-chiave-dellimpatto-ambientale-8/>.
- [3] Filemon Arenas-Rosales, Fernando Martell-Chavez, Irma Y. Sanchez-Chavez, and Carlos A. Paredes-Orta. Virtual laboratory for online learning of ur5 robotic arm inverse kinematic and joint motion control. In *2021 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*, pages 1–6, 2021.
- [4] Ricardo Terreros, Sergio Morales, Axel Céspedes, Joao Fabian, and Ruth Canahuire. Motion constraints and control of the ur5e robot based on its redundancy. In *2024 9th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*, pages 162–167, 2024.
- [5] Giovannardi textile experience. Poliuretano termoplastico (tpu), 2024-10-05T12:53:19.000Z. 2024-10-05.
- [6] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/10/Ethylenvinylacetat.svg/800px-Ethylenvinylacetat.svg.png>.
- [7] <https://www.shoptize.com/es/images/9040410/250/100/1/multiherramienta-parkside-pfbs-160-b2.png>.
- [8] <http://www.mediapolymer.com/eva>. *EVA – Mediapolimero*. Mediapolymer srl, 2024-10-07T09:25:20.000Z.
- [9] Dremel.com Bosch Power Tools BV 2021, tutti i diritti riservati. Disco da taglio 32 mm taglio | dremel, 2024-10-06T19:43:29.000Z. 2024-10-06.
- [10] Direzione generale della Comunicazione. Un'europa sostenibile entro il 2030. *Commissione europea.*, 2024-10-08T16:35:36.000Z.
- [11] Eurostat. Sviluppo sostenibile nell'unione europea. *Rapporto di monitoraggio sui progressi verso gli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile nel contesto dell'UE*, 2018 edition.
- [12] Commissione europea. Documento di riflessione: Verso un'europa sostenibile entro il 2030. 2024-10-08T19:12:03.000Z.

Bibliografia

- [13] Thomas Schaubroeck, Simon Schaubroeck, Reinout Heijungs, Alessandra Zama-gni, Miguel Brandão, and Enrico Benetto. Attributional consequential life cy-
cle assessment: Definitions, conceptual characteristics and modelling restrictions.
Sustainability, 13:7386, 07 2021.
- [14] Marta Herva, Antonio Alvarez, and Enrique Roca. Sustainable and safe design
of footwear integrating ecological footprint and risk criteria. *Journal of hazardous
materials*, 192 3:1876–81, 2011.
- [15] <https://www.santonishoes.com/it-it/calzare40.html>.
- [16] Adrian Brey, Jose J. Quintana, Moises Diaz, and Miguel A. Ferrer. Smartphone-based
control system for universal robot ur5e: A tool for robotics education. In *2024 XVI
Congreso de Tecnología, Aprendizaje y Enseñanza de la Electrónica (TAAE)*, pages
1–5, 2024.
- [17] Kadirimangalam Jahnavi and P. Sivraj. Teaching and learning robotic arm model.
In *2017 International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and
Control Technologies (ICICT)*, pages 1570–1575, 2017.
- [18] Hui Zhang, Zhiqiang Zhen, Qing Wei, and Wenseng Chang. The position/force control
with self-adjusting select-matrix for robot manipulators. In *Proceedings 2001 ICRA.
IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164)*,
volume 4, pages 3932–3936 vol.4, 2001.
- [19] <https://www.plastmagazine.it/eva-etilene-vinil-acetato-caratteristiche-tipologie-impieghi/>.
EVA (etilene vinil acetato): caratteristiche, tipologie, impieghi.
PAOLO.SPINELLIDBINFORMATION.IT, 2022-06-17T10:07:45.000Z.