

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

—

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

—

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA
MECCANICA

VALIDAZIONE DI UNA PINZA
ADATTIVA PER LA MEDIAZIONE
DELL'IMPATTO TRA ROBOT E
PEZZO

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

LAUREANDO: DANIEL BELLATO

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

Ai miei genitori...

“ I have not failed. I’ve just found 10.000 ways that won’t work. ”

THOMAS A. EDISON

Indice

Sommario	IX
Introduzione	XI
1 Concetti introduttivi	1
1.1 Robotica	1
1.1.1 Architettura dei manipolatori	1
1.1.2 MITSUBISHI ELECTRIC RV-4FRL-D	5
1.1.3 Cinematica diretta ed inversa	11
1.1.4 Notazione di Denavit-Hartenberg	17
1.2 Pianificazione di traiettorie	20
1.2.1 Pianificazione nello spazio dei giunti	20
1.2.2 Pianificazione con legge di velocità a profilo trapezoidale	21
1.2.3 Pianificazione nello spazio operativo	24
1.3 Teoria degli urti	30
1.3.1 Parametri d'influenza di un urto tra due corpi	33
1.4 Obiettivi della tesi	40
2 Design e realizzazione dell'end-effector	43
2.1 Meccanismo bistabile	44
2.2 Design complessivo dell'end-effector	55
3 Apparato sperimentale e analisi video	61
3.1 Descrizione dell'apparato sperimentale	61
3.2 Movimentazione del robot	65

3.3	Acquisizione e analisi video	75
3.3.1	Apparato di acquisizione video	75
3.3.2	Analisi video	78
4	Studio del comportamento dell'end-effector	83
4.1	Prove effettuate	83
4.2	Risultati	89
4.2.1	End-effector in assenza di meccanismo bistabile	89
4.2.2	End-effector con la presenza del meccanismo bistabile	92
5	Nuovo design dell'end-effector	117
5.1	Design e realizzazione del nuovo prototipo	117
5.2	Apparato sperimentale	123
5.3	Prove sperimentali svolte con il nuovo prototipo	124
5.4	Risultati	127
5.4.1	Nuovo end-effector in assenza di meccanismo bistabile	127
5.4.2	Nuovo end-effector con meccanismo bistabile	129
5.5	Confronto tra i due prototipi realizzati	136
	Conclusioni	139
	Bibliografia	141

Sommario

Questo lavoro di tesi si posiziona in un'ottica di utilizzo di un robot in teleoperazione, in grado di compiere una task di movimentazione di componenti (operazione di *“sorting”*). Lo studio è atto in particolare a realizzare un prototipo di utensile (o *“end-effector”*), da collegare ad un robot antropomorfo, in grado di ridurre la velocità finale del pezzo compito, e validarne il suo funzionamento a partire da un modello implementato in Simulink. Nella semplice operazione di spostamento di un componente considerata in questo studio, al fine di ridurre il tempo ciclo dell'operazione è necessario aumentare la velocità di movimento del robot. Tuttavia, il componente da spostare non può essere urtato ad una velocità troppo elevata, in quanto l'impatto che ne scaturisce potrebbe spostarlo in maniera troppo violenta, allontanandolo dal robot ed eventualmente causando danni al pezzo o al resto del sistema. È stato quindi realizzato un opportuno sistema adattativo, capace di riconoscere il momento in cui l'utensile entra in contatto con il componente, smorzare l'impatto, e consentire al robot di ridurre la propria velocità ad un valore consono allo svolgimento dell'operazione. Si è dunque realizzato un primo prototipo di utensile, costituito da una paletta e da un meccanismo bistabile, atto al compimento dello scopo preposto. Per valutarne la validità si sono portate a termine numerose prove testando l'utensile in differenti condizioni di utilizzo. Dalle prove effettuate è emerso che l'utensile realizzato, complessivamente, ha effetti migliorativi sulla riduzione di velocità dopo l'urto del componente colpito. Inoltre, a partire dai risultati ottenuti, è stato progettato e realizzato un nuovo utensile, avente un design differente. Anche con questo nuovo prototipo di utensile si sono svolte delle prove sperimentali, in modo valutarne le prestazioni e confrontarlo con il precedente prototipo realizzato, in modo a determinare quale

delle due configurazioni fornisse i risultati migliori. Da queste prove è emerso che il secondo prototipo si è rivelato vincente, sia per quanto riguarda gli ingombri, sia alle prestazioni offerte. Ricerche future possono essere svolte per svolgere altri test su questo nuovo end-effector realizzato, sviluppare soluzioni migliorative o ideare un nuovo design per un nuovo prototipo.

Introduzione

Lo sviluppo della teleoperazione nella robotica ha visto una crescita considerevole negli ultimi anni. Con il termine teleoperazione infatti, in maniera del tutto generica, si indica la possibilità di far funzionare una macchina a distanza. Tuttavia, è molto comune associare questo termine alla robotica e alla tecnologia mobile, ma è applicabile a una vasta gamma di circostanze in cui il macchinario o un'attrezzatura vengono manovrati da una persona a distanza. Tra le varie applicazioni che prevedono un'interazione fisica tra umani e robot, la teleoperazione ha visto, negli ultimi anni, una notevole crescita grazie alla possibilità che fornisce: poter operare con maggior sicurezza in ambienti avversi, difficilmente raggiungibili o con sostanze pericolose. Nella teleoperazione l'utente controlla un "master" robot, un dispositivo robotico il cui movimento viene acquisito e trasferito allo "slave" robot che, invece, interagisce direttamente con l'ambiente di lavoro. In questo tipo di interazione, l'operatore deve gestire le caratteristiche cinematiche e dinamiche del master robot per poter svolgere il lavoro in maniera efficace. Tuttavia, il master robot e tutto l'apparato di lavoro che lo compone, deve essere costruito in modo tale da permettere la massima facilità d'uso. Le interfacce tra esseri umani e robot hanno caratteristiche particolari e complesse, il robot percepisce l'ambiente con sensori che potrebbero non essere facilmente riconducibili ai cinque sensi propri dell'uomo, il che implica lo sviluppo di tecnologie dedicate. Lo sviluppo di un'interfaccia intuitiva verso l'utente è ancora un campo di ricerca aperto e in continua evoluzione. Uno dei problemi principali di questa tecnologia è il ritardo nel trasferimento delle informazioni tra le due unità. Diventa di conseguenza difficile da gestire l'interazione con gli oggetti non vincolati, e che è necessario manipolare, presenti nell'ambiente in cui si opera. Il ritardo di risposta

tra slave robot e master robot comporta anche un ritardo di reazione da parte dell'operatore, e ciò genera un'instabilità operativa del sistema. Il lavoro svolto si posiziona proprio in quest'ambito. L'obiettivo di questa tesi infatti è quello di realizzare un prototipo funzionante di utensile (o "*end-effector*"), da collegare ad un robot antropomorfo, capace di mediare un urto con un pezzo, e validarne il suo funzionamento a partire da simulazioni eseguite con un modello implementato in Simulink. L'utensile in questione risulterebbe utile in una futura applicazione di teleoperazione, in quanto sarebbe capace di porre rimedio al ritardo di risposta presente tra slave e master robot. Nell'ottica di un utilizzo in teleoperazione per un'operazione di "*sorting*" (movimentazione di componenti), è necessario creare un apparato robot-utensile adattativo, capace di ridurre la propria velocità nel momento in cui s'impatta contro un oggetto posto lungo il cammino del robot. L'utensile da realizzare deve inoltre garantire uno smorzamento dell'impatto, in modo da ridurre la velocità del pezzo dopo l'urto.

L'elaborato è articolato in cinque capitoli. Il primo capitolo ha lo scopo di fornire al lettore alcuni concetti base necessari per migliorare la comprensione del lavoro svolto. In particolare, verranno introdotti i concetti che stanno alla base della robotica, analizzati e descritti i manipolatori industriali, e verrà presentato il robot utilizzato per lo svolgimento del lavoro, andandone a definire le caratteristiche e specifiche tecniche. Verrà trattata la pianificazione di traiettorie, nozione significativa quando si tratta di far muovere un robot secondo una certa legge temporale. Verranno esposti i concetti di fisica che stanno alla base dei fenomeni d'urto. Inoltre, a partire da ricerche e lavori di tesi precedenti, verranno presentati i parametri che influenzano l'urto che avviene tra due corpi. Per ultimo verranno definiti quelli che sono gli obiettivi di questo lavoro. Per un maggiore approfondimento degli argomenti riguardanti i concetti di robotica presentati nella prima parte di questo capitolo, è possibile consultare le fonti [1], [2], [3], [4], [5] e [6]. Per la stesura della seconda parte, invece, ci si è affidati alle fonti [7], [8] e [9]. Nel secondo capitolo, verranno presentate le fasi che sono state seguite per la progettazione e la realizzazione di un end-effector funzionante e conforme a portare a termine lo scopo preposto. Nel terzo capitolo, verrà descritto in maniera accurata la composizione dell'apparato sperimentale, utilizzato per

effettuare le prove di validazione dell'end-effector. Verranno inoltre presentati e descritti i codici Matlab utilizzati per la movimentazione del robot, nonché per l'acquisizione e la successiva analisi dei video. La fonte principale a cui si fa riferimento in questo capitolo è [1]. Per tutte le informazioni in merito al linguaggio di programmazione, le funzioni e le operazioni possibili disponibili in Matlab, è stato utilizzato il sito "MathWorks" [10]. Infine, per quanto riguarda l'utilizzo del software di acquisizione video, si è fatto riferimento alle informazioni presenti negli appositi manuali, che è possibile fruire direttamente dal sito del fornitore "TELEDYNE DALSA" [11]. Nel quarto capitolo, invece, sono presentate le prove effettuate per valutare l'efficacia dell'end-effector realizzato, nonché i risultati derivanti dalla loro analisi. Verranno inoltre confrontati i risultati ottenuti dalle prove sperimentali, con i risultati ottenuti a partire dal modello di simulazione sviluppato in Simulink, in modo tale da valutare anche la bontà di quest'ultimo. A partire dai primi risultati ottenuti dalle prove utilizzando il primo prototipo, si è realizzato un secondo end-effector. Il secondo prototipo realizzato presentava una differente configurazione, ed è stato progettato con lo scopo di creare un utensile che fosse più efficace, più leggero e avesse dimensioni più contenute. La presentazione del nuovo design è trattata nell'ultimo capitolo di questa tesi.

Capitolo 1

Concetti introduttivi

1.1 Robotica

1.1.1 Architettura dei manipolatori

In ambito scientifico, per prevedere il comportamento di un sistema è necessario sviluppare un modello fisico. Tanto più questo modello risulta semplice tanto più risulta facilmente utilizzabile. Tuttavia oltre che semplice, il modello sviluppato deve essere anche accurato, in modo tale che sia attendibile e che i risultati ottenuti rispecchino il modello reale. Nel campo della robotica industriale, un manipolatore può essere approssimato ad un meccanismo spaziale in catena aperta costituito da corpi rigidi. Per meccanismo si definisce un insieme di organi meccanici (*componenti* o, dall'inglese, "*link*") collegati tra loro tramite accoppiamenti cinematici, i quali ne vincolano il moto relativo (si veda Figura 1.1 come esempio).

Come ipotesi aggiuntiva si assume che i vincoli (realizzati per mezzo di accoppiamenti cinematici) siano indipendenti dal tempo, lisci (ossia privi di attrito), bilateri (esprimibili tramite equazioni, senza ricorrere a disequazioni), olonomi (ossia le equazioni interessano solo le posizioni, non le velocità) e infine privi di giochi. Come definito in precedenza, il meccanismo è approssimato con dei corpi rigidi. Per definizione di corpo rigido: dati due punti qualunque appartenenti ad esso, la loro distanza rimane invariata nel tempo. In altre parole, si suppone che i carichi applicati al corpo non ne modifichino in alcun modo le dimensioni per effetto di deformazioni elastiche e/o plastiche. Un corpo rigido privo di vincoli,

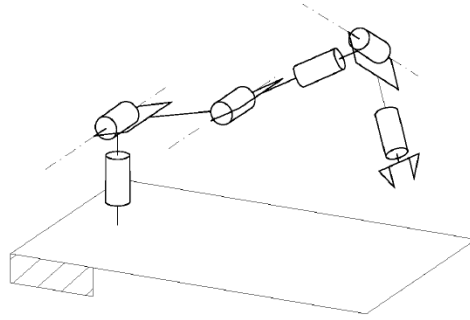


Figura 1.1: Architettura di un manipolatore.

e libero di muoversi nello spazio, dispone di sei gradi di libertà, ciò significa che sono necessarie sei coordinate indipendenti per individuarne la configurazione in modo univoco. Queste coordinate prendono il nome anche di coordinate lagrangiane o coordinate libere. Per definire tali coordinate appartenenti ad un corpo rigido è conveniente scegliere una terna di riferimento solidale al corpo rigido e utilizzare come coordinate libere la posizione dell'origine della terna (3 variabili) e l'orientazione dei suoi assi (esprimibile con 3 variabili), si veda Figura 1.2.

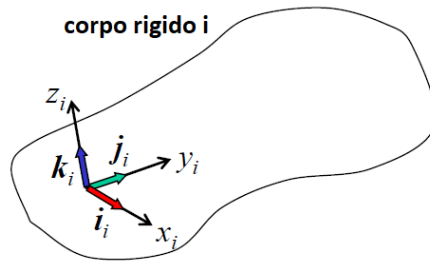


Figura 1.2: Terna solidale ad un corpo rigido.

Per poter determinare la configurazione del corpo rigido, ossia la posizione di tutti i suoi punti rispetto ad un sistema di riferimento assoluto, è necessario conoscere le coordinate dei punti rispetto alla terna solidale, le quali coordinate sono un dato del problema e sono costanti. Tali coordinate è necessario trasformarle nelle corrispondenti coordinate riferite al sistema di riferimento assoluto, questo può essere fatto utilizzando la matrice di trasformazione, una matrice di dimensione $[4 \times 4]$ che comprende al suo interno le operazioni di traslazione e di rotazione.

Il numero di gradi di libertà di un meccanismo (indicati con la lettera n) dipende dal numero di elementi di cui si compone, dal numero di gradi di libertà di ciascun elemento e dal numero e dalla tipologia di vincoli realizzati tramite gli accoppiamenti cinematici. Il numero di gradi di libertà del meccanismo in catena aperta coinciderà con il numero di accoppiamenti o giunti. In riferimento ai robot industriali, gli accoppiamenti comunemente utilizzati sono essenzialmente due:

- Rotoidale: consentono una rotazione relativa;
- Prismatico: consentono una traslazione relativa.

Per maggiore chiarezza si rappresentano gli accoppiamenti cinematici sopra citati in figura 1.3.

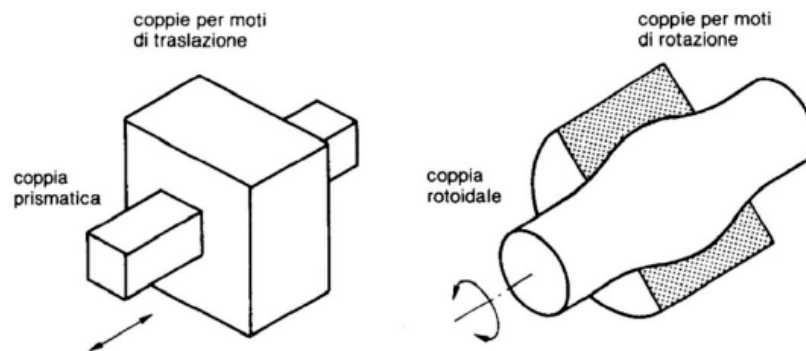


Figura 1.3: Rappresentazione di un accoppiamento prismatico e rotoidale.

Ciascuno di questi accoppiamenti consente un moto relativo tra i membri collegati che si può descrivere con una singola coordinata (angolare o lineare), quindi aggiunge un grado di libertà alla catena cinematica. Tali coordinate sono tra loro indipendenti, in quanto il movimento di un giunto è cinematicamente indipendente degli altri. Queste coordinate prendono il nome di coordinate lagrangiane, coordinate libere o coordinate di giunto e vengono comunemente indicate con q_i , dove i identifica l' i -esimo giunto del manipolatore. Esistono differenti tipologie di robot e differenti criteri di classificazione. Quello di gran lunga più diffuso si basa sull'identificazione della successione dei tipi di giunto (prismatici o rotazionali) che articolano il braccio del manipolatore. Per questa trattazione si ritiene utile

presentare la sola configurazione antropomorfa (o articolata), costituita da giunti rotazionali in serie. In Figura 1.4 se ne riporta un esempio.



Figura 1.4: Robot antropomorfo della “ABB” modello “IRB 2400” .

1.1.2 MITSUBISHI ELECTRIC RV-4FRL-D

Dopo una descrizione accurata di come si caratterizzano i manipolatori industriali e le loro architetture, in questa sezione verrà presentato e descritto il robot utilizzato per svolgere questa trattazione: il modello “RV-4FRL-D” prodotto dalla “MITSUBISHI ELECTRIC”, si veda Figura 1.5.



Figura 1.5: Robot modello “RV-4FRL-D” della “MITSUBISHI ELECTRIC” utilizzato per lo svolgimento della trattazione.

Questo è un robot di tipo antropomorfo a 6 assi, ciò significa che possiede 6 giunti rotazionali in serie i quali consentono un'unica rotazione relativa tra due giunti adiacenti attorno al rispettivo asse di rotazione. I sei giunti rotazionali vengono comunemente indicati dalla lettera “J” (dall'inglese “*joints*”, che significa giunto) seguita dal numero dell'asse a cui si fa riferimento. Dati i 6 giunti indipendenti il robot presenta 6 gradi di libertà esprimibili mediante le coordinate di giunto q_i , con i che va da 1 a 6. Per maggiore chiarezza si faccia riferimento alla figura 1.6.

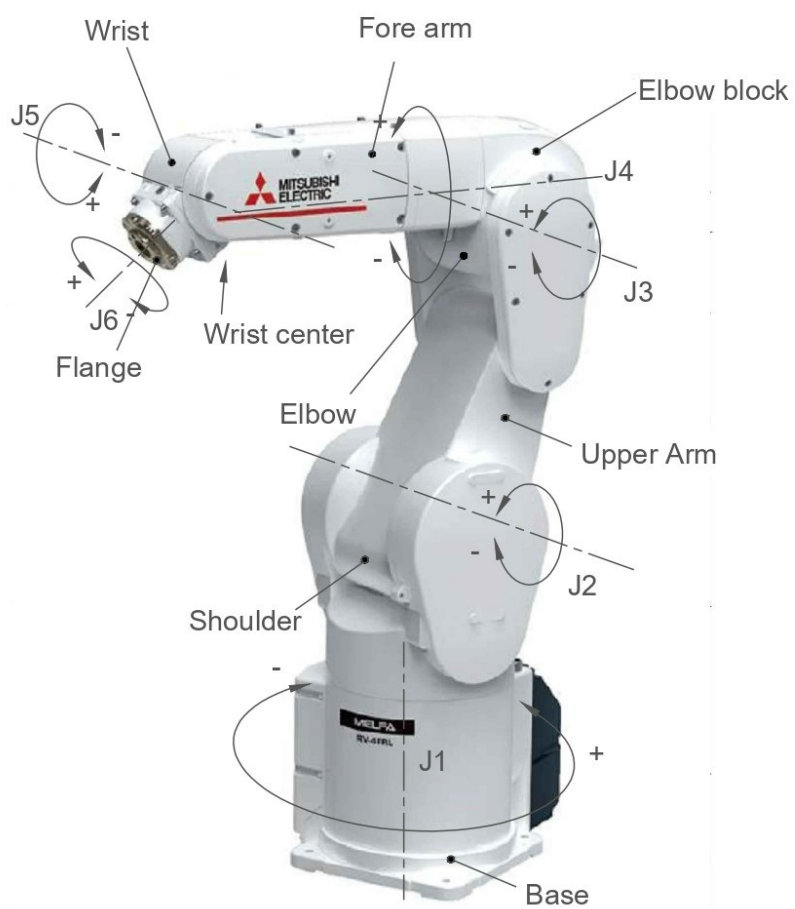


Figura 1.6: Giunti del robot modello “RV-4FRL-D” della “MITSUBISHI ELECTRIC” utilizzato per lo svolgimento della trattazione.

Le parti che costituiscono un braccio robotico antropomorfo vengono comunemente nominate facendo riferimento alle parti che compongono un braccio umano in particolare, a partire dalla base robot, si avrà: una spalla (*“shoulder”*), un braccio (*“upper arm”*), un gomito (*“elbow”*), un avambraccio (*“fore arm”*) e infine un polso (*“wrist”*). Inoltre presenta un polso sferico, ciò significa che la posizione del centro polso (*“wrist center”*) è indipendente dalle rotazioni dei tre giunti finali del braccio, i cui assi sono in esso concorrenti; le suddette rotazioni influenzano solamente l’orientazione della mano. All’estremo mobile del robot, dopo il polso, si trova la flangia robot, ossia la parte adibita ad alloggiare l’utensile, o dall’inglese *“tool”* (più comunemente definito *“end-effector”*), per svolgere l’operazione prestabilita. L’end-effector quindi viene adattato di volta in volta in relazione all’operazione da svolgere; comunemente può essere una pinza (*“gripper”*), una paletta, un avvitatore o qualsiasi altro strumento utile a far compiere al robot una determinata azione. Se la funzione da svolgere è un’operazione comune può essere acquistato direttamente sul mercato, dove sono presenti aziende specializzate nella realizzazione di end-effector. Nel caso in cui si debba svolgere un’operazione particolare o complessa che necessita di un end-effector specifico, come nel caso di questa trattazione, è necessario progettarelo appositamente.

Si presentano ora alcune caratteristiche e specifiche tecniche del robot. Per definire le dimensioni del robot e lo spazio raggiungibile da esso, è utile fare riferimento ai disegni CAD 2D reperibili direttamente dal sito web della casa produttrice; in Figura 1.7 vengono presentate le dimensioni e gli ingombri generali, mentre in Figura 1.8 viene rappresentato lo spazio raggiungibile (corrispondente allo spazio di lavoro). A partire dai disegni tecnici sopra citati si può dire che il robot può essere idealmente racchiuso in un box di dimensioni $250 \times 720 \times 765 \text{ mm}^3$. Per quanto riguarda la zona di lavoro invece, si può stimare in prima approssimazione che questa sia compresa all’interno di una sfera avente raggio pari a circa 500 mm.

I robot industriali inoltre presentano delle limitazioni in riferimento ad angoli di rotazione e velocità raggiungibili dei singoli giunti. Per il robot in oggetto se ne riportano i valori in Tabella 1.1. Va preso nota che i valori limite di rotazione, espressi in $[\circ]$, sono definiti a partire dalla posizione presentata nei disegni tecnici di Figura 1.7 e 1.8.

Giunti	Ampiezza limite $[\circ]$	Velocità limite $[\frac{\circ}{s}]$
J1	480 (± 240)	420
J2	240 (± 120)	336
J3	0-164	250
J4	400 (± 200)	540
J5	240 (± 120)	623
J6	720 (± 360)	720

Tabella 1.1: Tabella limiti di giunto del robot modello “RV-4FRL-D” prodotto dalla “MITSUBISHI ELECTRIC”.

Inoltre, è importante tenere in considerazione la velocità massima composta raggiungibile dal robot (“*Maximum composite speed*”), pari a $9048 \frac{mm}{s}$. Un’ altro parametro fondamentale per quanto riguarda i robot industriali è la ripetibilità, caratteristica da cui discende la precisione del robot stesso, che tuttavia va distinta dal concetto di accuratezza. Per una maggiore comprensione dei concetti che verranno presentati si rimanda alla Figura 1.9, in cui sono presentati in maniera visiva.

Facendo quindi riferimento alla Figura 1.9, un robot industriale può essere:

- Preciso ma non accurato;
- Non preciso ma accurato;
- Preciso ed accurato;
- Non preciso e non accurato.

Nell’ipotesi di movimentare il robot in una posizione spaziale stabilita, esso risulta essere accurato e la posizione raggiunta coincide con quella prestabilita.

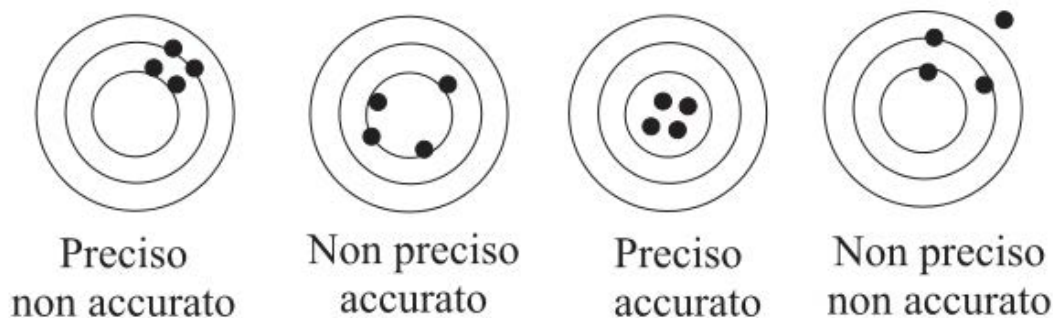


Figura 1.9: Per presentare in maniera visiva il concetto di precisione e accuratezza si può fare riferimento a quattro fucili che sparano contro un bersaglio.

Supponendo invece di muovere il robot in quella determinata posizione per più volte, viene definito preciso se la posizione raggiunta risulta essere sempre all'interno di un intorno spaziale, le cui dimensioni sono definite dal valore attribuito al parametro della ripetibilità. Solitamente i robot industriali operano in una condizione di precisione ma non di accuratezza, ciò significa che essi raggiungono sempre la posizione entro i limiti della loro ripetibilità, ma non è detto che la posizione raggiunta sia esattamente quella voluta. Generalmente il dato che emerge dalle schede tecniche fornite dai costruttori di robot industriali è sempre quello della ripetibilità, ma non quello dell'accuratezza, in quanto questa non risulta mai elevata e viene messa in secondo piano dai costruttori. In particolare, il valore di ripetibilità fornito dalla casa produttrice per il robot usato in questa trattazione risulta essere pari a $\pm 0,02$ mm. Per quanto riguarda l'accuratezza, dato che come detto in precedenza non viene mai fornita dalle case produttrici, si può ritenere che un buon valore sia attorno a 1 mm.

Per completezza, il peso del robot è pari a e 41 kg e la sua capacità di carico è pari a 4 kg, ciò significa che può movimentare componenti circa il 10% del suo peso, valore usuale per quanto riguarda i robot industriali.

1.1.3 Cinematica diretta ed inversa

L'obiettivo della cinematica è la descrizione analitica dello spostamento del robot nello spazio. L'importanza di tale studio risiede nel fatto che impiegare un robot significa collocarlo in un ambiente composto da molti altri elementi necessari all'esecuzione dell'applicazione cui il robot è dedicato. Risulta perciò d'importanza rilevante calcolare in modo accurato la posizione in cui il robot si trova o il percorso che deve seguire, in modo tale da non danneggiarlo o romperlo, andando a collidere contro se stesso o altri elementi che si trovano nella cella di lavoro in cui è collocato. La configurazione del robot in un generico istante si può determinare in due modi:

1. Spazio dei giunti

Si vanno a definire le posizioni dei singoli giunti costituenti il robot. Ogni posizione viene definita da 6 coordinate di giunto q_i , dove i va da 1 a 6. Esse esprimono la rotazione, espressa in $[\circ]$ o $[\text{rad}]$, attorno ai 6 assi del robot. Una generica configurazione nello spazio dei giunti può essere espressa per mezzo di un vettore riga del tipo: $J1 = [q1, q2, q3, q4, q5, q6]$.

2. Spazio operativo

Si vanno a definire la posizione e l'orientamento dell'estremo ultimo del robot. In questo caso si utilizzano le coordinate spaziali x , y e z per definire il punto in cui si trova la flangia robot e le coordinate α , β e γ per definire l'orientamento della flangia rispetto alla base del robot. Le prime 3 si esprimono solitamente in $[\text{mm}]$, mentre le ultime 3 è possibile esprimerle in $[\circ]$ o in $[\text{rad}]$. Come nel caso precedente, una configurazione nello spazio operativo è descritta per mezzo di un vettore riga del tipo: $P1 = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]$.

Lo scopo della cinematica di posizione, oltre a descrivere in maniera analitica lo spostamento del robot nello spazio dei giunti o nello spazio operativo, identifica anche la relazione tra di essi. In seguito verrà presentato in che modo è possibile scindere il problema in due sotto-problemi.

- *Cinematica diretta*: utile per determinare la posizione e l'orientazione dell'estremità del robot a partire dalle posizioni dei giunti (passa da una configurazione nello spazio dei giunti ad una nello spazio operativo), e presenta una ed una sola soluzione;
- *Cinematica inversa*: utile invece per individuare le posizioni dei giunti corrispondenti ad una precisa posizione (incluso l'orientamento) della flangia del robot (passa da una configurazione nello spazio operativo ad una nello spazio dei giunti). Può ammettere un numero di soluzioni variabile (identificabile con un punto non raggiungibile dal robot), ad una, a multiple, ad infinite soluzioni.

In maniera schematica quanto detto viene rappresentato in Figura 1.10.

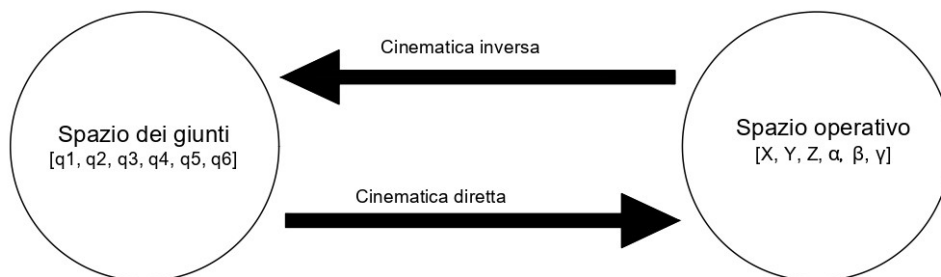


Figura 1.10: Schema passaggio cinematica diretta e inversa.

Prima di introdurre in maniera dettagliata la cinematica diretta e inversa è necessario descrivere le matrici di trasformazione, le quali rappresentano la base teorica necessaria a comprendere gli argomenti trattati di seguito in questo capitolo. La matrice di trasformazione consente di convertire le coordinate di un punto da un sistema di riferimento ad un altro. Dato un corpo rigido caratterizzato da un sistema locale di coordinate solidale con esso che ruota e trasla, denominato 2, e un sistema assoluto denominato 1; per un generico punto "P" del corpo rigido

valgono le seguenti relazioni, rispettivamente rappresentate in forma compatta e in forma estesa:

$$\begin{Bmatrix} P \\ 1 \end{Bmatrix}_1 = T_{21} \begin{Bmatrix} P \\ 1 \end{Bmatrix}_2 \quad (1.1)$$

$$\begin{Bmatrix} x_{P,1} \\ y_{P,1} \\ z_{P,1} \end{Bmatrix}_1 = \begin{bmatrix} R_{21} & O_{21} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{P,2} \\ y_{P,2} \\ z_{P,2} \end{Bmatrix}_2 \quad (1.2)$$

Dove $(x_{P,1}, y_{P,1}, z_{P,1})$ e $(x_{P,2}, y_{P,2}, z_{P,2})$ rappresentano le coordinate del punto P viste rispettivamente dal sistema di riferimento assoluto 1 e dal sistema di riferimento locale 2. La matrice T_{21} prende il nome di matrice di trasformazione o di rototraslazione ed ha dimensione $[4 \times 4]$. Questa è composta dal vettore $\{O_2\}_1$, avente dimensione $[3 \times 1]$, il quale rappresenta la posizione dell'origine della terna 2 rispetto l'origine della terna 1, sotto forma di coordinate x,y e z; e dalla matrice R_{21} , che prende il nome di matrice di rotazione. Essa ha dimensione $[3 \times 3]$ e contiene le informazioni riguardanti l'orientazione della terna 2 rispetto alla terna 1, si determina immaginando di sovrapporre l'origine delle due terne e facendone combaciare gli assi mediante rotazioni successive. Per fare ciò sono necessarie 3 rotazioni in sequenza, eseguite usualmente seguendo due metodi:

- **Metodo di Eulero**

Consiste nell'esprimere una rotazione generica di assi come la seguente sequenza di tre rotazioni su assi mobili:

$$Z_1(\alpha) \longrightarrow Y'(\beta) \longrightarrow Z''(\gamma)$$

Ogni rotazione, a partire dalla terna 1, genera una nuova terna intermedia provvisoria su cui applicare la rotazione successiva in sequenza. La matrice di rotazione può essere facilmente ricavata utilizzando la seguente relazione:

$$R_{21} = R_E(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) \quad (1.3)$$

- **Metodo di Cardano**

Consiste nell'esprimere una rotazione generica di assi come la seguente sequenza di tre rotazioni su assi fissi:

$$X_1(\alpha) \longrightarrow Y_1(\beta) \longrightarrow Z_1(\gamma)$$

Ogni rotazione, a partire dalla terna 1, genera una nuova terna intermedia provvisoria ma, a differenza del caso precedente, le rotazioni vengono riferite alla terna di partenza. La matrice di rotazione in questo caso può essere facilmente ricavata utilizzando la seguente relazione:

$$R_{21} = R_C(\alpha, \beta, \gamma) = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_z(\alpha) \quad (1.4)$$

Le singole matrici di rotazione espresse nelle formule 1.3 e 1.4 che esprimono la rotazione attorno ad ogni singolo asse sono matrici [3x3] e possono essere ricavate come segue:

$$R_x(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$R_y(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 & -\sin(\phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\phi) & 0 & \cos(\phi) \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

$$R_z(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

ϕ rappresenta un angolo generico, da sostituire con gli angoli α , β o γ in funzione del metodo utilizzato. Nel momento in cui si esprime una configurazione nello spazio operativo è necessario chiarire se si sta facendo riferimento alla notazione di Eulero o alla notazione di Cardano, per lo svolgimento di questa trattazione la notazione utilizzata è quella di Eulero.

Cinematica diretta

Come introdotto in precedenza la cinematica diretta ha lo scopo di ricavare la posizione dell'estremo ultimo del robot (flangia terminale) a partire dalle coordinate libere di giunto $\vec{q}=(q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,q_6)$. Ad ognuno dei membri componenti il robot si associa un sistema locale di coordinate solidale ad esso, e ad ognuno di questi membri si associa un sistema di riferimento locale. A questo punto si calcolano le matrici di trasformazione tra i sistemi di riferimento locali e il sistema di riferimento assoluto, corrispondente al sistema associato alla base robot (terna 0). In questo modo noti i punti di ciascun membro nel proprio sistema locale, è possibile calcolarne la posizione assoluta mediante le matrici di trasformazione. Dato che i membri sono vincolati nel moto relativo, è conveniente definire le trasformazioni relative tra le terne solidali a membri adiacenti. In generale, ciascuna trasformazione relativa è funzione di 6 parametri: una coordinata libera associata al moto relativo tra i membri adiacenti, e 5 costanti. Identificato con n il numero di gradi di libertà del manipolatore (e quindi anche il numero dei suoi membri), la matrice di trasformazione del membro n rispetto alla base robot si ottiene dal prodotto di più trasformazioni relative. In particolare per quanto riguarda il robot utilizzato in questa trattazione si avrà:

$$T_{60} = T_{10}(q_1)T_{21}(q_2)T_{32}(q_3)T_{43}(q_4)T_{54}(q_5)T_{65}(q_6) \quad (1.8)$$

Nella realtà un manipolatore per essere impiegato, deve essere inserito in un ambiente e dotato di un utensile che consenta la presa o la lavorazione di oggetti, è necessario quindi introdurre altre due terne: una terna ambiente chiamata “*world*”, e una terna utensile chiamata “*tool*”. Data la presenza di queste due nuove terne è necessario introdurre di conseguenza anche le due trasformazioni relative T_{tn} e T_{0w} . Segue che il problema cinematico diretto di posizione in forma completa, riferito al caso in esame, si può scrivere come:

$$T_{tw} = T_{0w}T_{60}(\vec{q})T_{t6} \quad (1.9)$$

La soluzione del problema cinematico diretto di posizione di un meccanismo spaziale in catena aperta esiste ed è univoca. Al variare di tutti i valori possibili delle variabili di giunto, si ottengono:

- lo **spazio raggiungibile** del manipolatore, ovvero il luogo dei punti raggiungibile dall'utensile (senza specifica di orientamento);
- lo **spazio di lavoro** del manipolatore, ovvero il luogo dei punti raggiungibili con qualunque orientazione dell'utensile. Questo non è altro che un sottoinsieme dello spazio raggiungibile.

Cinematica inversa

A partire dalla posizione e dall'orientazione della flangia robot è possibile ricavare la matrice di trasformazione T_{60} e determinare la configurazione del robot ricavando le coordinate di giunto $\vec{q}=(q_1,q_2,q_3,q_4,q_5,q_6)$. Questo è un procedimento molto più complesso rispetto al caso precedentemente esposto e per la risoluzione è necessario ricorrere a metodi numerici. Nel caso più generale possibile, ovvero quello in cui nel robot sia applicato un "tool" e in cui la terna associata alla base differisca da quella del sistema "world", il problema della cinematica diretta si presenta nella forma:

$$T_{60}(\vec{q}) = T_{0w}^{-1}T_{tw}T_{tn}^{-1} \quad (1.10)$$

In questo caso T_{tw} è nota ed è necessario calcolare $T_{60}(\vec{q})$ per ricavare poi le coordinate di giunto \vec{q} . In questa dinamica le soluzioni al problema possono essere:

- **non esiste**, in tal caso la configurazione obiettivo T_{tw} si trova al di fuori dello spazio raggiungibile dal manipolatore;
- essere **unica** o **multipla**, in quest'ultimo caso è possibile raggiungere la configurazione utensile richiesta con un numero finito di configurazioni, tra loro differenti, del braccio robotico;
- essere **infinite**, si parla allora di un manipolatore ridondante:
 - *intrinsecamente*, quando il numero di gradi di mobilità n del manipolatore è maggiore rispetto ai gradi di libertà dello spazio di movimento;
 - *funzionalmente*, quanto n è superiore al numero di gradi di libertà necessari a svolgere il compito.

1.1.4 Notazione di Denavit-Hartenberg

La notazione di Denavit-Hartenberg è un metodo per sistematizzare la scelta delle terne di riferimento al fine di semplificare il calcolo dei parametri che definiscono le matrici di trasformazione relative. Essi risulteranno ridotti da 6 a 4 per ciascuna trasformazione: due rotazioni e due traslazioni, cui una coordinata risulta libera mentre le rimanenti 3 sono costanti. Questo metodo è stato utilizzato per definire le terne relative dei vari membri. Per applicare questo metodo è necessario seguire la seguente procedura operativa:

1. si individuano e si numerano gli assi di movimento;
2. si individuano le normali comuni alle coppie di assi successivi;
3. si disegnano le terne di riferimento, rispettivamente seguendo questo ordine:
 - a. l'origine, corrispondente all'intersezione con il segmento di minima distanza tra l'asse di movimento considerato e quello successivo;
 - b. l'asse z , allineato con l'asse di movimento (rotazione/traslazione), avente verso arbitrario;
 - c. l'asse x , allineato con il segmento di minima distanza (ovvero, ortogonale a entrambi gli assi di movimento), e punta verso l'asse di movimento successivo;
 - d. l'asse y , individuato mediante la regola della mano destra.
4. si compila la tabella di Denavit-Hartenberg contenete in ogni riga i 4 parametri di una trasformazione relativa; le righe saranno in numero pari al numero di gradi di libertà del manipolatore; ciascuna riga conterrà una e una sola coordinata libera (un angolo se il giunto è di rotazione, una distanza se è di traslazione). In riferimento alla Figura 1.11, i parametri della notazione di Denavit-Hartenberg sono i seguenti:
 - α_{i-1} è l'angolo intorno all'asse x_{i-1} che porta l'asse z_{i-1} lungo la direzione dell'asse z_i (positivo secondo la regola della mano destra). Applicando questa rotazione alla terna $i-1$ si ottiene la prima terna intermedia;

- a_{i-1} è la distanza di O_i da O_{i-1} misurata lungo l'asse x_{i-1} (positiva secondo il verso dell'asse x_{i-1}). Applicando questa traslazione alla prima terna intermedia si ottiene la seconda terna intermedia;
- θ_i è l'angolo intorno all'asse z_i che porta l'asse x_{i-1} lungo la direzione dell'asse x_i (positivo secondo la regola della mano destra). Applicando questa rotazione alla seconda terna intermedia si ottiene la terza terna intermedia;
- d_i è la distanza di O_i da O_{i-1} misurata lungo l'asse z_{i-1} (positiva secondo il verso dell'asse z_{i-1}). Applicando questa traslazione alla terza terna intermedia si ottiene la terna i .

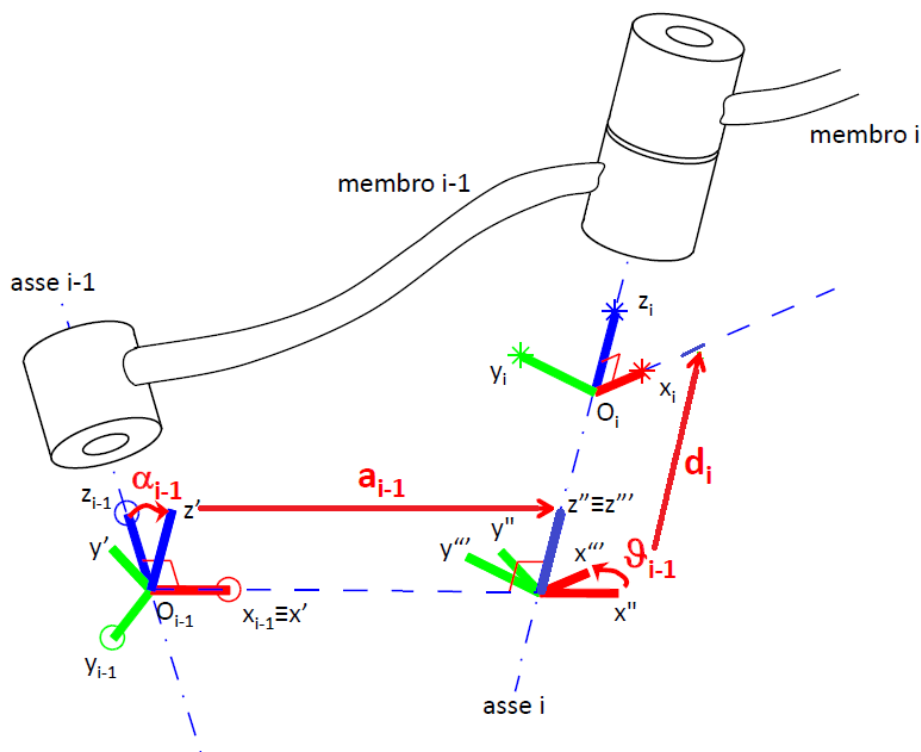


Figura 1.11: Parametri di Denavit-Hartenberg.

Per quanto riguarda il robot presentato e utilizzato per la trattazione la tabella di Denavit-Hartenberg corrispondente è la seguente:

T_{ij}	α_{i-1} [°]	a_{i-1} [mm]	θ_i [°]	d_i [mm]
10	0	0	q(1)	350
21	-90	0	-90 + q(2)	0
32	0	310	q(3)	0
43	-90	50	q(4)	335
54	90	0	q(5)	0
65	-90	0	q(6)	85

Tabella 1.2: Tabella dei parametri di Denavit-Hartenberg per il robot modello “RV-4FRL-D” utilizzato nella trattazione.

Nota la tabella contenente i parametri di Denavit-Hartenberg (Tabella 1.2) si può facilmente ricavare le matrici di trasformazione relative, questo utilizzando la seguente formula:

$$T_{i-1} = T_{Rx}(\alpha_{i-1})T_{Tx}(a_{i-1})T_{Rz}(\theta_i)T_{Tz}(d_i) \quad (1.11)$$

Le matrici $T_{Rx}(\alpha_{i-1})$ e $T_{Rz}(\theta_i)$ rappresentano le matrici di rotazione aventi dimensione $[4 \times 4]$; mentre le matrici $T_{Tx}(a_{i-1})$ e $T_{Tz}(d_i)$ rappresentano le matrici di traslazione, aventi anch'esse dimensione $[4 \times 4]$. Per completezza se ne riportano le formule di seguito.

$$T_{Rx}(\alpha_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$T_{Tx}(a_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.13)$$

$$T_{Rz}(a_{i-1}) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

$$T_{Tz}(a_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

Una volta ricavate tutte le trasformazioni relative $T_{i,i-1}$ è possibile facilmente ricavare la trasformazione T_{60} , rappresentante la terna dell'estremo ultimo del robot rispetto alla terna base robot. Il metodo di Denavit-Hartenberg permette quindi di risolvere il problema della cinematica diretta in modo molto semplice.

1.2 Pianificazione di traiettorie

In questo paragrafo verranno descritte le due tipologie di pianificazione di traiettorie. In particolare verrà presentata la pianificazione con legge di velocità trapezoidale, utilizzata in questo elaborato per movimentare il robot.

1.2.1 Pianificazione nello spazio dei giunti

La pianificazione di traiettorie più semplice è il moto punto-punto, metodo utilizzato anche per lo svolgimento di questo lavoro. Date due configurazioni dei giunti del robot, una iniziale e una finale (q_0 e q_f), il robot viene portato da una all'altra in un tempo prefissato T eseguendo la pianificazione nello spazio dei giunti. Il percorso viene generato singolarmente per ogni giunto ed è dato dalla retta che interpola il punto iniziale e finale. Ognuna di queste traiettorie è caratterizzata dalla medesima tipologia di legge oraria, scelta in precedenza. Le varie leggi orarie sono scalate nel tempo, rispettando le velocità massime raggiungibili dai vari motori, ne risulta che il giunto più lento determina il tempo totale di movimento. Il vantaggio principale di utilizzare questa tipologia di pianificazione risiede nel

fatto che il movimento avviene nello spazio dei giunti e il calcolo è poco oneroso dal punto di vista computazionale. Il difetto però, è che muovendosi nello spazio dei giunti, non è possibile controllare la traiettoria seguita dal robot nello spazio cartesiano, è necessario quindi prestare attenzione da evitare collisioni con oggetti posti nell'ambiente in cui è montato il robot. Solitamente si ricerca una traiettoria che sia in grado di ottimizzare, in relazione a qualche indice di qualità, lo spostamento dei vari giunti. Teoricamente non c'è limite al numero e alla varietà delle primitive di moto che rispettano i limiti elencati in precedenza, e ognuno è libero di usare la propria legge di moto personale. In pratica però si sono imposte alcune primitive che sono risultate vincenti per via della loro semplicità e per il controllo che permettono su alcuni parametri della traiettoria. Tra le tante alternative presenti si esporrà solamente la legge utilizzata in questa trattazione, ossia le legge con profilo di velocità trapezoidale.

1.2.2 Pianificazione con legge di velocità a profilo trapezoidale

A volte risulta conveniente usare delle funzioni polinomiali miste, definite a tratti sull'intervallo $(0, T)$ dove T è il tempo impiegato per svolgere il movimento. In questo modo è possibile ridurre il grado dei polinomi, mantenendo però il numero di vincoli di un polinomio di grado più elevato. Modificando l'estensione dei singoli sotto intervalli è possibile intervenire su alcuni parametri caratteristici della legge oraria, come la velocità o l'accelerazione massima. Spezzando la durata del moto in tre intervalli, il primo di durata T_a ad accelerazione costante, il secondo ad accelerazione nulla e il terzo di durata T_d a decelerazione costante, è possibile ottenere un profilo di velocità con andamento trapezoidale, come quello in Figura 1.12.

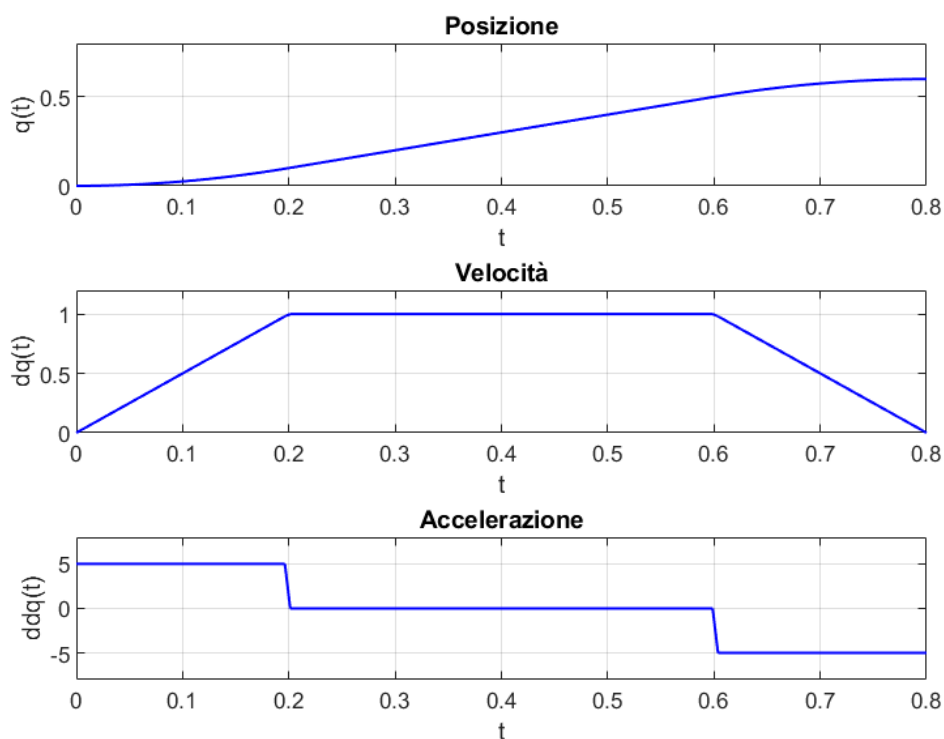


Figura 1.12: Legge con profilo di velocità trapezoidale.

Le equazioni che descrivono questo tipo di legge sono le seguenti:

- posizione:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 + \frac{1}{2}\dot{q}_{max} \frac{t^2}{T_a} & 0 \leq t \leq T_a \\ q_0 + \dot{q}_{max} \left(t - \frac{T_a}{2}\right) & T_a < t \leq T - T_d \\ q_f - \frac{1}{2}\dot{q}_{max} \frac{(T-t)^2}{T_d} & T - T_d < t \leq T \end{cases} \quad (1.16)$$

- velocità:

$$\dot{q}(t) = \begin{cases} \dot{q}_{max} \frac{t}{T_a} & 0 \leq t \leq T_a \\ \dot{q}_{max} & T_a < t \leq T - T_d \\ \dot{q}_{max} \frac{(T-t)}{T_d} & T - T_d < t \leq T \end{cases} \quad (1.17)$$

- accelerazione:

$$\ddot{q}(t) = \begin{cases} \frac{\dot{q}_{max}}{T_a} & 0 \leq t \leq T_a \\ 0 & T_a < t \leq T - T_d \\ -\frac{\dot{q}_{max}}{T_d} & T - T_d < t \leq T \end{cases} \quad (1.18)$$

- velocità massima:

$$\dot{q}_{max} = \frac{q_f - q_0}{T - \frac{T_a + T_d}{2}} \quad (1.19)$$

- coefficiente di velocità:

$$c_v = \frac{T}{T - \frac{1}{2}(T_a - T_d)} \quad (1.20)$$

- coefficiente di accelerazione:

$$c_{a+} = c_v \frac{T}{T_a} \quad (1.21)$$

$$c_{a-} = c_v \frac{T}{T_d} \quad (1.22)$$

- coefficiente di potenza:

$$c_p = c_v^2 \frac{T}{\min(T_a, T_d)} \quad (1.23)$$

Dalle equazioni sopra esposte si può notare che la legge di moto è descritta da polinomi al più quadratici, mentre la posizione la velocità iniziale e finale sono vincolate come un polinomio cubico. Nonostante la sua semplicità, questa legge risulta molto efficace nell'ottenere un movimento rapido e sufficientemente privo di vibrazioni.

Noti i parametri T_a e T_d , rappresentanti rispettivamente il tempo di accelerazione e decelerazione è possibile regolare a piacimento la legge oraria. L'idea generale è quella di trovare un compromesso nella scelta di tali valori, in particolare, se sono troppo elevati l'accelerazione e la decelerazione sono anch'esse elevate e ciò può causare vibrazioni indesiderate, al contrario se sono troppo bassi non sono presenti vibrazioni, ma il tempo impiegato per compiere il movimento desiderato aumenta, diminuendo la produttività del robot. Solitamente quando

si applica questo tipo di legge oraria, per semplicità, si pone $T_a = T_d$ e la legge trapezoidale risulta simmetrica. In questa maniera i parametri che descrivono la legge di moto si semplificano come segue:

- velocità massima:

$$\dot{q}_{max} = \frac{q_f - q_0}{T - T_a} \quad (1.24)$$

- coefficiente di velocità:

$$c_v = \frac{T}{T - T_a} \quad (1.25)$$

- coefficiente di accelerazione:

$$c_{a+} = c_{a-} = \frac{T^2}{T_a(T - T_a)} \quad (1.26)$$

$$c_{a-} = c_v \frac{T}{T_d} \quad (1.27)$$

- coefficiente di potenza:

$$c_p = c_v^2 \frac{T}{T_a} \quad (1.28)$$

Solitamente i parametri T_a e T_d vengono definiti andando a ricercarne i valori che ottimizzano il coefficiente di potenza della legge oraria, il quale risulta minimo per $T_a = T_d = \frac{T}{3}$. Questo si può notare anche graficamente, come presentato in Figura 1.13.

1.2.3 Pianificazione nello spazio operativo

Come specificato in 1.1.3, andando a pianificare la traiettoria di un manipolatore nello spazio dei giunti viene generata una traiettoria per ogni singolo asse, prendendo come riferimento le sole posizioni iniziale e finale del moto. Così facendo però, come detto in precedenza, si perde il controllo della traiettoria seguita dall'end-effector (o della flangia robot se nulla è collegato ad essa). Può quindi risultare utile pianificare la traiettoria nello spazio operativo. Questa pianificazione porta con sé il vantaggio di pianificare a priori la traiettoria seguita dall'end-effector, inoltre, è possibile controllare in maniera precisa la velocità e

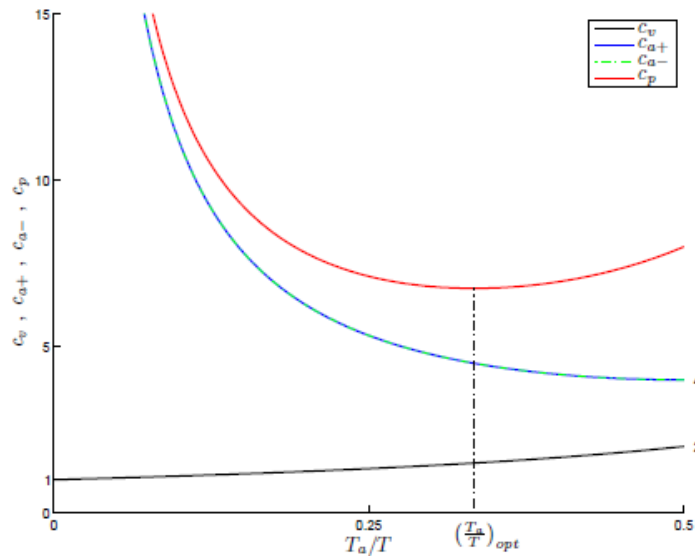


Figura 1.13: Coefficienti di velocità, accelerazione e potenza, in funzione del rapporto $\frac{T_a}{T}$, per $T_a = T_b$.

l'accelerazione (e anche decelerazione se necessario) con cui viene eseguito il movimento. Quindi, impostata la traiettoria nello spazio cartesiano e impostata la legge oraria da seguire, la traiettoria viene discretizzata in un numero finito di punti e per ognuno di questi viene eseguita una inversione cinematica, ottenendo posizione, velocità ed accelerazione dei vari giunti. In funzione della cinematica del manipolatore le traiettorie seguite dai vari giunti possono essere fortemente non lineari, anche quando il percorso da seguire dell'end-effector è rettilineo. Di conseguenza i coefficienti di velocità ottenuti con la pianificazione nello spazio operativo sono generalmente più elevati rispetto a quelli ottenuti eseguendo una pianificazione nello spazio dei giunti. Va ricordato inoltre che uno dei fattori limitanti di un manipolatore è la velocità massima raggiungibile da ogni giunto, ciò significa, che una traiettoria pianificata nello spazio dei giunti è più scalabile e comporta quindi un tempo di azionamento minore. Non solo, per eseguire questa pianificazione la cinematica inversa presenta una maggiore complessità di calcolo, in quanto ogni punto cartesiano della traiettoria deve essere convertito tramite cinematica inversa per ottenere la posizione in coordinate di giunto. È inoltre necessario verificare che la conversione per tutti i punti della traiettoria sia

possibile, in modo che il robot possa raggiungerli senza che si manifestino errori.

Generalmente, quando è necessario ridurre il più possibile il tempo di movimento e non è rilevante il percorso da seguire, come ad esempio il posizionamento del robot in un punto della zona di lavoro dove poi dovrà eseguire un'operazione o il semplice spostamento di un pezzo, si esegue una pianificazione nello spazio dei giunti. Se invece è necessario avere precisione nel percorso da seguire e non è importante avere tempi ridotti, allora si esegue una pianificazione nello spazio operativo. Tuttavia va ricordato che una pianificazione non esclude l'altra, tant'è vero che nei cicli di lavoro dei manipolatori industriali vengono utilizzate entrambe, in modo da ottimizzare il tempo totale di movimento ed avere una buona precisione nel movimento.

Preso un percorso nello spazio operativo, in letteratura si trovano vari metodi per eseguire la pianificazione di tale percorso. Ad esempio si possono fissare dei punti di cammino lungo la traiettoria desiderata ed eseguire la pianificazione nello spazio dei giunti su tale sequenza di punti. Successivamente vengono poi confrontati il percorso desiderato con quello effettivamente ottenuto, e si aumenta il numero di punti finché lo scarto non è minore di una determinata tolleranza.

Un metodo più elegante, ma non necessariamente più efficace dal punto di vista computazionale, consiste nel determinare una soluzione analitica al problema. In questo caso sia il percorso che la legge oraria seguiti dall'end-effector coincidono con la traiettoria desiderata, senza passare per una formulazione nello spazio dei giunti.

Per lo svolgimento di questa trattazione si è utilizzata la pianificazione nello spazio operativo, risulta quindi conveniente per una maggiore comprensione presentare come poter esprimere analiticamente una determinata traiettoria.

Percorso cartesiano

Sia $P = g(\sigma)$ una generica curva nello spazio, funzione dell'unico parametro σ e passante per il punto iniziale $P_i = g(\sigma_i)$ e il punto finale $P_f = g(\sigma_f)$. Essendo di interesse il tratto di curva compreso tra i due punti, risulta utile riscrivere l'equazione della curva in funzione dell'ascissa curvilinea s , parametro che misura

la distanza percorsa lungo la curva.

$$P = f(s) = \begin{pmatrix} x(s) \\ y(s) \\ z(s) \end{pmatrix} \quad (1.29)$$

$$s = \int_{\sigma_i}^{\sigma} \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} = \int_{\sigma_i}^{\sigma} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\sigma}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\sigma}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\sigma}\right)^2} d\sigma \quad (1.30)$$

Tranne casi particolari, in ogni punto P della curva sono definiti tre versori. Il primo è il versore tangente \mathbf{t} , il quale giace sulla retta tangente in \mathbf{P} alla curva ed è orientato nel verso positivo indotto sulla curva da s . Il secondo è il versore normale \mathbf{n} , che insieme al versore tangente genera il piano osculatore. Il terzo è il versore binormale $\mathbf{b} = \mathbf{t} \times \mathbf{n}$, normale sia a \mathbf{t} che a \mathbf{n} e tale da rendere la terna $(\mathbf{t}, \mathbf{n}, \mathbf{b})$ levogira. Per una particolare scelta del parametro s risulta:

$$\mathbf{t}(s) = \frac{dP}{ds} = \begin{pmatrix} \frac{dx}{ds} \\ \frac{dy}{ds} \\ \frac{dz}{ds} \end{pmatrix} \quad (1.31)$$

$$\mathbf{n}(s) = \frac{1}{\left\| \frac{d^2P}{ds^2} \right\|} \frac{d^2P}{ds^2} \quad (1.32)$$

Posizione, velocità e accelerazione

Per un percorso $P(s)$ si può generare una traiettoria assegnando una legge oraria $s(t)$. Tale legge del moto può essere determinata in maniera del tutto analoga al caso del moto punto-punto, tenendo conto del compito che deve svolgere il robot, del tempo di esecuzione e dei limiti meccanici del sistema.

La legge oraria del moto $s(t)$ fornisce l'andamento nel tempo s , della sua derivata prima \dot{s} e della sua derivata seconda \ddot{s} , tuttavia risulta di maggiore importanza conoscere le caratteristiche temporali del moto del punto P.

$$P(t) = P(s(t)) \quad (1.33)$$

$$\dot{P}(t) = \frac{dP}{ds} \frac{ds}{dt} \dot{s} \quad (1.34)$$

$$\ddot{P}(t) = \frac{dP}{ds} \frac{d^2s}{dt^2} + \frac{d^2P}{ds^2} \left(\frac{ds}{dt} \right)^2 = t\ddot{s} + \left\| \frac{d^2P}{ds^2} \right\| n\dot{s}^2 \quad (1.35)$$

Si può osservare che $\dot{P}(t)$ ha una direzione uguale al vettore tangente e un modulo uguale a \dot{s} . L'accelerazione $\ddot{P}(t)$ ha invece una componente lungo \mathbf{t} uguale a \ddot{s} e una componente centripeta proporzionale a $\dot{s}^2 \left\| \frac{d^2P}{ds^2} \right\|$.

Nello svolgimento di questo lavoro, quando si è pianificato il movimento del robot nello spazio operativo, si è utilizzata la legge oraria trapezoidale presentata in precedenza in 1.2.2. La formulazione è la medesima, con la differenza che la formulazione presentata in precedenza faceva riferimento alla variabile di giunto generica q_i del manipolatore, mentre nella formulazione utilizzata è necessario sostituirla con la variabile parametrica s .

Per muoversi tra due punti non sarà necessario andare a definire curve parametriche particolari, sarà sufficiente saper definire correttamente dei semplici segmenti nello spazio oppure degli archi di circonferenza su un piano. Nella conformità di questa trattazione di seguito viene presentata la formulazione del solo caso utilizzato: un segmento nello spazio.

Esempio di un segmento nello spazio

Per parametrizzare analiticamente un segmento nello spazio tramite la variabile s bisogna disporre delle seguenti informazioni:

- punto iniziale P_i di coordinate x_i , y_i e z_i ;
- punto finale P_f di coordinate x_f , y_f e z_f ;
- lunghezza del segmento d , ce è possibile ricavare a partire dalle informazioni precedenti tramite l'equazione: $d = \|P_f - P_i\|$.

La formula, che vale per $0 \leq s \leq d$, è la seguente:

$$P(s) = P_i + \frac{P_f - P_i}{\|P_f - P_i\|} s \quad (1.36)$$

1.3 Teoria degli urti

Per valutare gli effetti dell'interazione tra l'end-effector e il componente da colpire, come primo approccio viene considerato un movimento planare unidirezionale e viene adottato un tipico robot industriale a sei gradi di libertà con polso sferico. Viene implementato un modello monodimensionale di collisione, sufficiente a rappresentare il movimento dell'end-effector lungo la direzione di avvicinamento all'oggetto, in questo caso l'asse x . Di conseguenza il modello di robot a sei gradi di libertà è ridotto a un sistema di smorzamento massa-molla ad un solo grado di libertà in modo da tenere conto della cedevolezza e dell'inerzia del robot nell'impatto. Inoltre, se la durata dell'impatto è molto breve e le forze impulsive sono molto grandi rispetto alle altre forze in gioco, l'impatto tra l'utensile in movimento e il pezzo può essere studiato secondo la classica teoria degli urti.

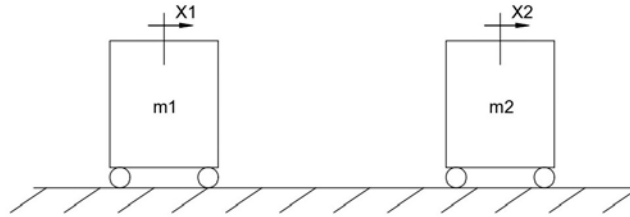


Figura 1.15: Masse m_1 e m_2 in moto lungo l'asse x con velocità pari rispettivamente a v_1 e v_2 .

Si considerino due masse, aventi rispettivamente massa m_1 e m_2 , soggette ad un moto rettilineo lungo l'asse x con velocità iniziale rispettivamente v_1 e v_2 (Figura 1.15). Se queste, in un certo istante di tempo, interagiscono tra loro e vengono a contatto e, se tale tempo di contatto è trascurabile rispetto ai tempi di osservazione del loro moto prima e dopo il contatto, si genera il fenomeno di urto. Durante questo fenomeno si possono sviluppare forze molto intense, dette forze impulsive, che sono forze interne al sistema analizzato. Fintanto che le due masse sono in contatto, per il principio di azione e reazione, le forze a cui sono sottoposte sono uguali ed opposte, e si può scrivere:

$$m_1 \ddot{x}_1 = -F \quad (1.40)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = F \quad (1.41)$$

$$m_1 \ddot{x}_1 = -m_2 \ddot{x}_2 \quad (1.42)$$

Se consideriamo che il fenomeno d'urto si esplica nell'intervallo di tempo $\tau = t_2 - t_1$, integrando l'equazione 1.42 su tale intervallo, si ricava il bilancio della quantità di moto del sistema costituito dalle due masse:

$$m_2 \dot{x}_2(t_2) - m_1 \dot{x}_1(t_1) = -[m_2 \dot{x}_2(t_2) - m_1 \dot{x}_1(t_1)] \quad (1.43)$$

In assenza di forze esterne o quando le forze interne d'interazione sono molto più grandi di eventuali forze esterne, per cui è possibile trascurare queste ultime, nel sistema si verifica, durante l'urto, la conservazione della quantità di moto totale. Se consideriamo le due masse in movimento con velocità iniziale v_1 e v_2 nell'istante precedente all'urto, e con V_1 e V_2 le corrispondenti velocità nell'istante successivo all'urto, la conservazione della quantità di moto può essere espressa come:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 V_1 + m_2 V_2 \quad (1.44)$$

Se la quantità di moto durante l'urto si conserva, a priori non è noto se le forze interne che si sviluppano nell'urto sono conservative e pertanto non si può assumere la conservazione dell'energia meccanica del sistema durante l'urto. Questa variazione, è dovuta al fatto che durante l'interazione delle due masse si possono verificare fenomeni di dissipazione d'energia dovuti all'attrito interno dei materiali. Durante un urto, infatti, l'energia cinetica viene convertita in energia di deformazione e, successivamente, questa viene dissipata in calore. Tali fenomeni di dissipazione si generano quando l'energia cinetica è convertita in deformazione elastica dei corpi, oppure per il semplice attrito di strisciamento dei corpi sul piano di scorrimento. È importante sottolineare che la posizione dei punti non varia nell'urto se quest'ultimo ha durata infinitesimale, perciò eventuali energie potenziali non variano, ciò significa che la variazione dell'energia mecca-

nica è attribuita alla sola variazione dell'energia cinetica. L'equazione di bilancio dell'energia meccanica del sistema prima e dopo l'urto può essere espressa come:

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1V_1^2 + \frac{1}{2}m_2V_2^2 + \Delta E_{k,diss} \quad (1.45)$$

Dove $\Delta E_{k,diss}$ rappresenta l'energia cinetica dissipata durante l'urto. Per rappresentare il fenomeno d'urto e quantificare l'ammontare di energia cinetica dissipata, un metodo molto semplice è quello di valutare il coefficiente di restituzione, definito come il rapporto tra le velocità prima e dopo il fenomeno d'urto:

$$e = -\frac{V_2 - V_1}{v_2 - v_1} \quad (1.46)$$

Si può scrivere dunque:

$$\Delta E_{k,diss} = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (v_2 - v_1)^2 (1 - e^2) \quad (1.47)$$

Inoltre, introducendo 1.46 in 1.44, si possono facilmente determinare le espressioni del calcolo delle velocità finali delle masse dopo l'urto, note le masse m_1 e m_2 , le velocità iniziali v_1 e v_2 e il coefficiente di restituzione e .

$$V_1 = v_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} (1 + e)(v_2 - v_1) \quad (1.48)$$

$$V_2 = v_2 - \frac{m_1}{m_1 + m_2} (1 + e)(v_2 - v_1) \quad (1.49)$$

Il valore del coefficiente di restituzione si può ricavare sperimentalmente o attraverso simulazioni numeriche, e può assumere valori compresi tra zero e uno. Tale coefficiente caratterizza il tipo di urto che si verifica, in particolare si possono individuare tre scenari possibili:

- *Urto perfettamente elastico*, caratterizzato da un coefficiente di restituzione unitario ($e = 1$). Caratterizza un fenomeno d'urto durante il quale oltre alla quantità di moto, si conserva anche l'energia cinetica del sistema. Ciò comporta che le forze interne che si manifestano durante l'urto sono conservative. I due corpi quando urtano rimbalzano l'uno contro l'altro senza deformarsi in modo plastico e riprendendo la loro configurazione iniziale, in

questo modo non c'è alcuna dispersione di energia cinetica. La conseguenza è che le velocità dei corpi sono uguali prima e dopo l'urto,

- *Urto anelastico*, caratterizzato da un coefficiente di restituzione compreso tra zero e uno. Rappresenta il fenomeno d'urto più comune in cui si conserva la quantità di moto del sistema se non agiscono forze esterne di tipo impulsivo, ma non l'energia cinetica. Una parte di energia cinetica durante l'urto viene dunque dissipata. In questo tipo d'urto i corpi, dopo la collisione, ritornano separati.
- *Urto completamente anelastico*, caratterizzato da un coefficiente di restituzione nullo ($e = 0$). Rappresenta un fenomeno d'urto in cui i due corpi restano attaccati dopo la collisione, formando un unico corpo avente massa $m_1 + m_2$ che si muove con medesima velocità finale. In questa condizione l'equazione di conservazione della quantità di moto si può scrivere come:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = (m_1 + m_2)V_{finale} \quad (1.50)$$

1.3.1 Parametri d'influenza di un urto tra due corpi

Dopo aver compreso il fenomeno d'urto, si possono valutare i parametri e i modelli utilizzati per simulare il contatto tra l'utensile montato sul robot e l'oggetto da colpire nel piano, e valutare quali sono i parametri che permettono di minimizzare la quantità di moto trasferita all'oggetto colpito, e quindi di ridurre la sua velocità dopo l'urto.

Per il modello sono state attribuite una massa all'oggetto da colpire, m_p , e una massa all'utensile fissato al robot, m_t . I casi studiati sono essenzialmente due:

1. L'utensile è rappresentato con una faccia piana rigidamente connessa al robot, Figura 1.16 (a). Fintanto che la massa dell'utensile è maggiore rispetto alla massa dell'oggetto il suo cambio di velocità è ininfluenza, ciò significa che la velocità dell'utensile prima e dopo l'impatto si mantiene costante ed è quella imposta dal sistema di controllo del robot.

2. L'utensile è completamente disaccoppiato dal robot, Figura 1.16 (b). La velocità iniziale dell'utensile è imposta dal movimento del robot, ma può variare dopo l'impatto e l'utensile può muoversi indietro.

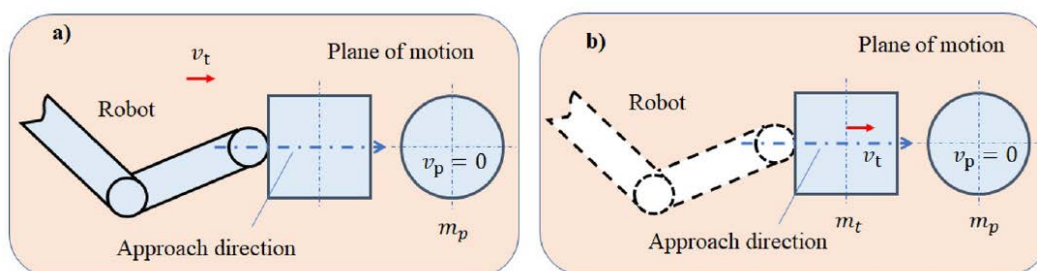


Figura 1.16: Modello d'impatto. In (a) l'utensile è rigidamente fissato al robot; in (b) l'utensile invece è disaccoppiato dal robot.

Considerando un urto anelastico, un parametro che si è rilevato essere molto importante è il coefficiente di restituzione. In particolare, un incremento del coefficiente di restituzione porta ad un incremento della velocità finale dell'oggetto colpito e alla variazione della velocità dell'utensile. Inoltre, una diminuzione della massa dell'utensile causa una riduzione della velocità finale dell'oggetto per ogni valore del coefficiente di restituzione. Tali osservazioni si possono osservare anche graficamente in Figura 1.17 e in Figura 1.18.

La comparativa tra le velocità finali degli oggetti, calcolate nei due casi limite, mostrano che la variazione di velocità dell'utensile porta ad una grande riduzione della velocità finale dell'oggetto. Questa semplice analisi mostra che la riduzione del coefficiente di restituzione e il disaccoppiamento meccanico tra l'utensile e il robot sono necessari per minimizzare la velocità finale dell'oggetto dopo l'impatto. Il fatto di avere un utensile completamente disaccoppiato consente di ridurre la durata dell'impatto e compensa la piccola cedevolezza del robot; in caso contrario, se l'utensile risulta rigidamente collegato al robot, la forza di contatto presenta il picco massimo di valore quasi il doppio rispetto al caso in cui l'utensile è disaccoppiato, e questo risulta controproducente nella riduzione del trasferimento della quantità di moto.

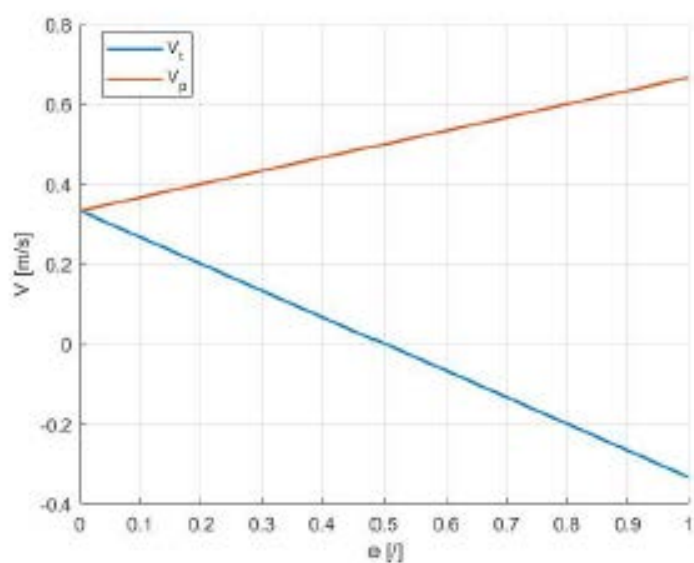


Figura 1.17: Andamento delle velocità dopo l'impatto al variare di e . La simulazione è stata effettuata con masse $m_1 = 0,125$ kg e $m_2 = 0,250$ kg, aventi velocità iniziali $v_1 = 1 \frac{m}{s}$ e $v_2 = 0 \frac{m}{s}$.

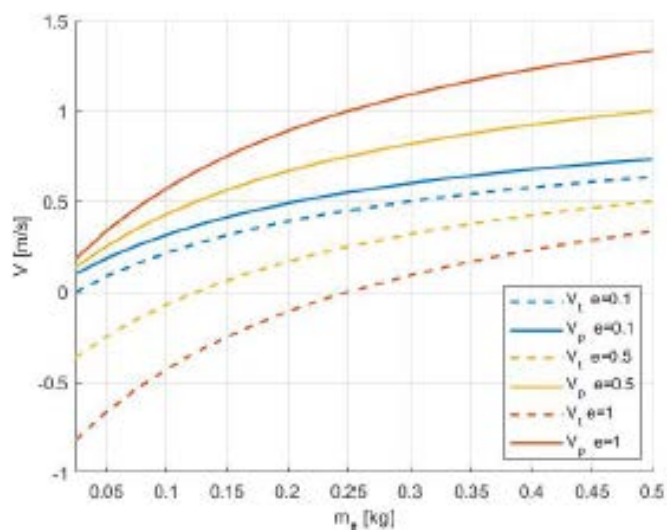


Figura 1.18: Andamento delle velocità dopo l'impatto al variare della massa m_1 , per diversi valori del coefficiente di restituzione. Il grafico fa riferimento ad una massa $m_2 = 0,250$ kg e a velocità iniziali $v_1 = 1 \frac{m}{s}$ e $v_2 = 0 \frac{m}{s}$.

L'impatto tra due corpi può essere schematizzato con un elemento elastico e uno smorzatore, caratterizzati rispettivamente da una rigidità di contatto k_c e da un coefficiente di smorzamento c_c , si veda Figura 1.19.

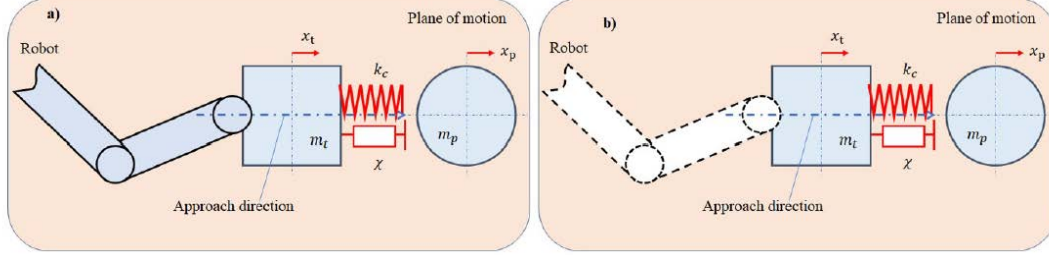


Figura 1.19: Modello d'impatto. In (a) l'utensile è rigidamente fissato al robot; in (b) l'utensile invece è disaccoppiato dal robot.

L'elemento elastico può essere lineare o non lineare mentre, lo smorzatore, è solitamente non lineare e la forza di smorzamento dipende dalla velocità di deformazione $\dot{\delta}$ e dalla deformazione stessa δ . Tale forza può essere valutata secondo l'equazione:

$$F = k_c \delta^m + \chi \delta^n \dot{\delta} \quad (1.51)$$

In cui k_c rappresenta la rigidità di contatto, χ è una costante e m , n sono due esponenti. F rappresenta la forza che l'utensile esercita sull'oggetto, e $\delta = x_t - x_p$, con $x_t - x_p > 0$ in modo da garantire il contatto.

La legge di moto delle due masse dopo l'impatto può essere facilmente calcolata risolvendo le due equazioni differenziali:

$$m_t \ddot{x}_t = -F \quad (1.52)$$

$$m_p \ddot{x}_t = -F \quad (1.53)$$

Se l'utensile risulta connesso rigidamente al modulo, solo la seconda equazione deve essere risolta, in quanto x_t è noto.

È interessante osservare che l'equazione 1.51 con $m = 1$ e $n = 0$ rappresenta un semplice modello molla-smorzatore lineare. Il modello di contatto lineare permette

di predire le forze di contatto e la durata dell'impatto e ciò permette di ottenere una semplice relazione tra il rapporto di smorzamento del moto relativo e il coefficiente di restituzione, tuttavia presenta degli inconvenienti. Il coefficiente di restituzione non dipende dalle velocità relative dei corpi prima dell'impatto. La componente viscosa della forza di contatto è discontinua, poiché aumenta improvvisamente all'inizio del contatto, e non risulta pari a zero alla fine del contatto, opponendosi alla separazione tra l'oggetto colpito e l'utensile. Questo comportamento non risulta coerente con l'intuizione fisica poiché all'inizio e alla fine del contatto non c'è penetrazione e la forza dovrebbe risultare nulla.

Un modello di contatto non lineare va oltre la esula delle condizioni sopra menzionate. A partire da ricerche precedenti è stato riscontrato ottimale porre i coefficienti m e n pari a $\frac{3}{2}$. Ciò può essere fatto in quanto il contatto tra utensile e pezzo è stato schematizzato rispettivamente come una superficie piana e una sfera.

La costante χ viene definita costante di smorzamento e può essere calcolata attraverso la seguente equazione:

$$\chi = \frac{3}{2} \left(\frac{1-e}{e} \right) k_c \frac{1}{\dot{\delta}_{in}} \quad (1.54)$$

Dove $\dot{\delta}_{in}$ rappresenta la velocità relativa iniziale.

L'andamento della forza di contatto nei due casi limite presentati in Figura 1.19 è presentato in Figura 1.20.

La molla e lo smorzatore sono rappresentati come due elementi concentrati e ad essi è associata la deformazione dello stesso corpo. Un valore negativo della forza viscosa significa che lo smorzatore riduce la forza di contatto rispetto al valore teorico corrispondente ad un urto puramente elastico.

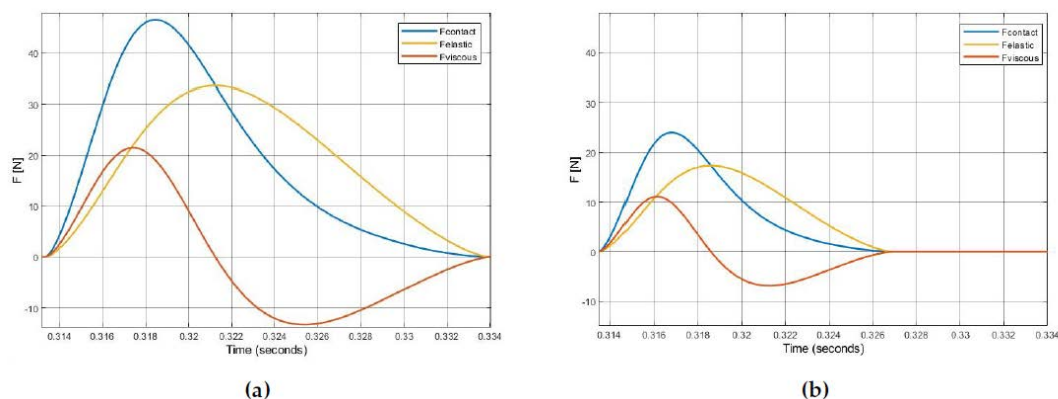


Figura 1.20: Andamento della forza di contatto nei due casi limite presentati in Figura 1.19. I parametri utilizzati risultano essere: $m_t = 0,125$ kg, $m_p = 0,25$ kg, $k_c = 10^5 \frac{N}{m^{1,5}}$, $e = 0,5$, $v_t = 0,1 \frac{m}{s}$, e $v_p = 0 \frac{m}{s}$.

Al contatto tra i due corpi, oltre alla rigidità di contatto k_c , viene attribuita anche una rigidità dell'utensile k_t , nonché un coefficiente di smorzamento c_t (Figura 1.21).

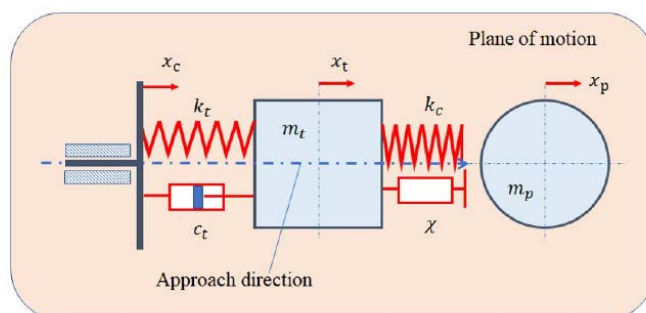


Figura 1.21: Modello d'impatto tra utensile e pezzo.

Le equazioni del moto che descrivono la collisione sono:

$$m_t \ddot{x}_t = c_t(\dot{x}_c - \dot{x}_t + k_t(x_c - x_t) - k_c \delta^m - \chi \delta^n \dot{\delta}) \quad (1.55)$$

$$m_p \ddot{x}_p = k_c \delta^m + \chi \delta^n \dot{\delta} \quad (1.56)$$

Un incremento di k_c porta ad un incremento della forza di contatto. Questo comportamento è coerente con l'intuizione fisica in quanto, quando k_c aumenta,

la deformazione diminuisce ma l'energia elastica trasferita dall'utensile all'oggetto si mantiene costante, quando e è fissato, e la riduzione della deformazione è compensata dall'incremento della forza di contatto. Mentre, se la rigidità di contatto si mantiene costante, all'aumentare del contributo di forza viscosa, la forza globale aumenta, come il coefficiente di restituzione e . Da queste osservazioni si può facilmente intuire che un incremento della rigidità di contatto k_c , porta ad una diminuzione della durata di contatto. Questo effetto si manifesta perché la deformazione diminuisce quando k_c aumenta. L'incremento della durata di contatto è un fattore molto importante in quanto influisce sul trasferimento della quantità di moto e consente di dare il tempo al robot di rilevare il contatto e arrestarsi. L'aumento della durata dell'impatto con la diminuzione del coefficiente di restituzione è relativo al fatto che se e tende a zero (urto anelastico) le due masse si muovono insieme dopo l'impatto, ciò costituisce la condizione ideale che si vorrebbe ottenere. Segue che il massimo decremento della velocità dell'oggetto e l'incremento della durata di contatto, si possono ottenere combinando un piccolo coefficiente di restituzione con una piccola rigidità di contatto, ottenibile attraverso un'opportuna selezione del materiale della superficie dell'utensile che impatta contro l'oggetto. Realizzando un utensile totalmente disaccoppiato dal robot e avente una rigidità k_t bassa, è possibile consentire all'utensile di deformarsi facilmente, assorbire l'urto e garantire una maggiore durata del contatto. Tuttavia, l'introduzione di una molla e di uno smorzatore fa sì che il pezzo una volta colpito non riceva solo la quantità di moto legata all'inerzia dell'utensile, ma anche quella legata alle forze di reazione della molla e dello smorzatore, condizione che può causare urti multipli tra utensile e pezzo. Questo effetto è tanto più marcato quanto minore è la differenza tra i parametri k_c e k_t , e tra c_t e c_c . Infatti se le forze che si sviluppano durante la collisione risultano paragonabili a quelle dovute alla risposta dell'end-effector, allora il pezzo riceve non solo la quantità di moto legata all'inerzia dell'utensile, ma anche quella originata dalle forze di reazione dell'end-effector, il quale una volta che viene urtato può rimbalzare e generare urti multipli. Dunque, per evitare che ciò accada, è importante che il valore di k_t e c_t siano sempre minori di quello relativo ai parametri k_c e c_c . Dunque, in accordo con quanto appena detto e da quello che emerge dalla

Figura 1.18, è necessario minimizzare la massa dell'utensile in modo da contenere l'inerzia che entra in contatto con il pezzo e ridurre il più possibile la quantità di moto trasferita.

Aggiungere all'utensile uno smorzatore genera un impulso positivo che introduce quantità di moto nel sistema, segue che tanto maggiore è il coefficiente di smorzamento c_t maggiore è la velocità del componente dopo l'urto. Da questo si conclude che l'effetto dello smorzatore peggiora l'impatto, comportando un aumento non trascurabile della velocità nel caso di contatto cedevole.

Dato che nell'applicazione pratica di riferimento il componente è inizialmente fermo e viene spinto dall'urto nella direzione positiva del moto, la sua velocità è positiva, quindi, la forza d'attrito è sempre negativa e si oppone al moto. Da questa considerazione si intuisce che la forza d'attrito ha un effetto benefico sulla riduzione della velocità dell'oggetto dopo l'urto, in quanto riduce la quantità di moto totale del sistema. Tale forza può facilmente essere calcolata come segue:

$$F_{\text{attrito}} = -\mu m_p g \quad (1.57)$$

Dove μ rappresenta il coefficiente d'attrito statico del sistema oggetto da colpire e il piano su cui scorre.

1.4 Obiettivi della tesi

Questo lavoro di tesi si posiziona in un'ottica di utilizzo di un robot in teleoperazione, in grado di svolgere una semplice movimentazione di componenti (operazione di *sorting*). A partire da un modello di simulazione implementato utilizzando il software Simulink, questo studio è atto in particolare a realizzare un prototipo di end-effector, da collegare ad un robot antropomorfo, in grado di ridurre la velocità finale del pezzo colpito dal robot.

Con il duplice scopo di validare il modello di partenza implementato in Simulink, e testare l'effettiva efficacia dell'end-effector, è necessario realizzare un apparato robot-utensile adattivo, capace di identificare il momento in cui l'utensile entra a contatto con il componente, smorzare l'impatto, e consentire al robot di

ridurre la propria velocità ad un valore consono allo svolgimento dell'operazione preposta.

Al fine di valutare la bontà del sistema realizzato e validare il modello di simulazione, è necessario effettuare un'analisi video del momento dell'impatto, in modo da quantificare le velocità raggiunte dal componente colpito.

Capitolo 2

Design e realizzazione dell'end-effector

Le simulazioni di urto tra end-effector e il componente da colpire, svolte mediante l'utilizzo del software Simulink, hanno dato come risultato la configurazione che un possibile end-effector dovrebbe avere affinché possa portare a compimento nel modo migliore l'operazione assegnata, ossia ridurre il più possibile la velocità finale del componente colpito. Utilizzando la teoria degli urti, in particolare nella condizione di urto monodimensionale e durata di contatto tra i corpi infinitesimale. Analizzando i risultati ottenuti, si è ipotizzato un possibile design di end-effector, costituito da una molla montata su un meccanismo bistabile. Il meccanismo, così concepito, permette di accompagnare il pezzo generando una forza positiva nella prima metà di corsa e dando così tempo al robot di ridurre la sua velocità mentre, superata metà corsa, genera una forza negativa che richiama la paletta sul finecorsa opposto. Con questo sistema si cerca di far durare il contatto paletta-pezzo il più a lungo possibile, in modo da dare tempo al robot di ridurre la propria velocità al valore prestabilito dopo l'urto.

Il design finale è stato realizzato in modo da ospitare il meccanismo bistabile e una paletta, montata perpendicolare al piano di lavoro, che scorre parallelamente a questo. Il funzionamento è il seguente: la paletta, in battuta sul finecorsa, quando urta il pezzo si sposta sul finecorsa opposto smorzando l'urto e fornendo al robot il tempo necessario a ridurre la propria velocità. Raggiunto il finecor-

sa opposto, la paletta accompagna il pezzo a velocità ridotta come una paletta rigida. Dato il design simmetrico così concepito per l'end-effector, esso consente di eseguire tale operazione in maniera continuativa lavorando su due lati, senza bisogno di un intervento esterno per riportare il meccanismo nelle condizioni ottimali di lavoro.

I principi che si sono seguiti per arrivare alla configurazione finale sono quello di realizzare un modello funzionante, di facile realizzazione, economico e che permetta di ottenere diverse configurazioni in modo semplice e veloce. Tutta la fase di design è stata eseguita utilizzando il software di modellazione 3D Solidwoks. Per la realizzazione dei pezzi, ci si è affidati alla prototipazione rapida utilizzando una stampante 3D con modalità FDM (dall'inglese "*Fused Deposition Modeling*"). Tale tecnologia utilizza filamenti di materiale plastico che vengono fatti estrudere attraverso un ugello riscaldato che porta a fusione il materiale (in questo caso specifico si tratta di PLA). Una volta estruso, il materiale plastico è depositato su una superficie di lavoro riscaldata, andando a formare strato dopo strato il componente. Per la realizzazione di prototipi la prototipazione rapida risulta essere una tecnologia vincente da utilizzare poiché è possibile realizzare parti, aventi anche geometrie complesse, in maniera semplice, veloce ed economica rispetto alle tradizionali tecnologie di produzione.

In questa sezione verranno elencati i vari componenti costituenti l'end-effector e le scelte progettuali che sono state portate a termine per realizzarli.

2.1 Meccanismo bistabile

Come suggerito dalle simulazioni, per minimizzare la velocità finale dell'oggetto colpito è necessario che l'end-effector abbia un comportamento elastico puro, con una rigidità k_t la più piccola possibile quando l'impatto è anelastico ($e = 0$). Inoltre, deve garantire un disaccoppiamento con il robot in modo tale da ridurre la massa impattante. La rigidità del sistema elastico deve essere piccola, ma sufficiente a mantenere l'utensile nella posizione desiderata quando il robot accelera verso l'oggetto; devono essere evitati i rimbalzi dell'utensile che restituiscono energia all'oggetto e provocano urti multipli. Per soddisfare a queste richieste, il

meccanismo interno dell'end-effector è composto da una molla lineare montata in maniera tale da costituire un meccanismo bistabile. Questo sistema è caratterizzato da due posizioni di equilibrio stabile e consiste in una molla con un'estremità connessa ad un pattino scorrevole (lungo l'asse x in questo caso), mentre l'estremità opposta è fissata a telaio ed è impossibilitata a muoversi. Il sistema così concepito è in grado di generare una forza elastica agente sul pattino scorrevole costituita da due componenti:

- Una componente parallela all'asse di scorrimento F_x , che rappresenta la componente di forza che si oppone ad un'eventuale forza esterna applicata al pattino.
- Una componente ortogonale all'asse di scorrimento F_y .

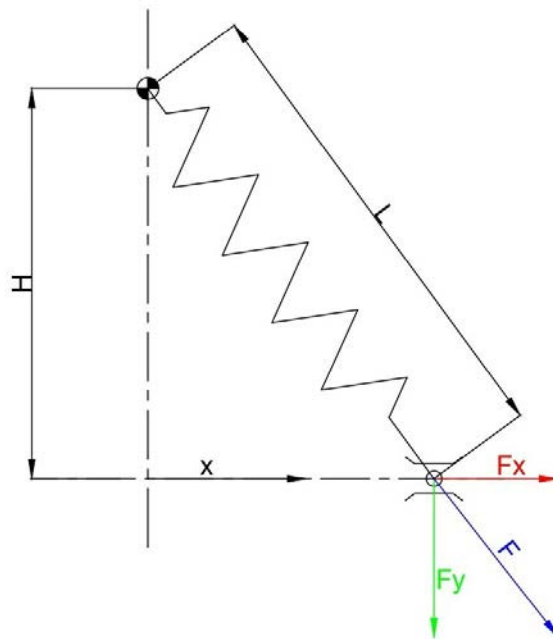


Figura 2.1: Rappresentazione schematica del meccanismo bistabile ad una singola molla.

In riferimento allo schema del meccanismo rappresentato in Figura 2.1, le componenti di forza sono calcolate come segue:

$$\tan\alpha = \frac{C - x}{H} \quad (2.1)$$

$$F_x = K \cdot \tan \alpha \cdot [H - (L_0 \cdot \cos \alpha)] \quad (2.2)$$

$$F_y = K \cdot [H - (L_0 \cdot \cos \alpha)] \quad (2.3)$$

Dove k è la rigidezza della molla, L_0 è la lunghezza libera della molla, x è la posizione del pattino scorrevole rispetto all'intersezione della retta passante per il punto fisso della molla con l'asse di scorrimento, H è la distanza tra l'estremo superiore fisso della molla e la direzione di scorrimento del pattino. Nelle reali applicazioni il pattino scorrevole può essere fatto muovere tra due limiti meccanici introdotti mediante dei fine corsa, i quali introducono un limite di movimento.

Per completezza, la lunghezza della molla nella condizione di lavoro L , può essere calcolata come segue:

$$L = \sqrt{H^2 + x^2} \quad (2.4)$$

I parametri costruttivi del meccanismo bistabile vengono scelti in modo tale da rispondere a due richieste fondamentali:

- La molla deve essere in grado di esercitare una forza minima sull'utensile per mantenerlo nella posizione iniziale durante l'accelerazione del robot, ed evitare oscillazioni prima dell'impatto. Tale forza può essere facilmente ricavata conoscendo la massa dell'utensile (m) e l'accelerazione (a) imposta dal robot all'end-effector ($F = m \cdot a$).
- Deve essere in grado di prevenire rimbalzi dell'utensile, in modo da evitare collisioni multiple e la restituzione dell'energia elastica assorbita nell'urto.

In riferimento alla Figura 2.1 si ha che per una corsa positiva del pattino, $x > 0$, la forza esercitata dalla molla è positiva, al contrario per $x < 0$ è negativa. Ciò significa che se l'estremo scorrevole è posto a destra della posizione $x = 0$ ed è presente una forza esterna che agisce su di esso e lo spinge verso la direzione negativa dell'asse x , il sistema bistabile reagisce con una forza elastica positiva che si oppone a tale forza ma, quando il pattino si sposta sull'asse x negativo, la forza diventa negativa e tende spontaneamente a portarsi verso il vincolo sinistro

e trattenuto dalla forza elastica. Modificando il parametro H e la posizione dell'estremo fisso (spostandolo verso destra o sinistra) è possibile variare il precarico applicato alla molla e quindi il profilo della forza elastica esercitata dalla molla stessa. In particolare, variando H si può aumentare la componente di forza F_x in modo da evitare oscillazioni del pattino durante il movimento oppure diminuirla, in modo da ridurre la forza impressa all'oggetto durante l'impatto.

In Figura 2.2 e 2.3 sono rappresentati i profili di forza esercitati da una molla lineare a compressione montata su meccanismo bistabile per diversi valori di altezza H . Il meccanismo rappresentato presenta una corsa totale di scorrimento del pattino pari a 40 mm e una molla avente costante elastica pari a $0,49 \frac{N}{mm}$, avente estremo fisso montato a metà della corsa totale.

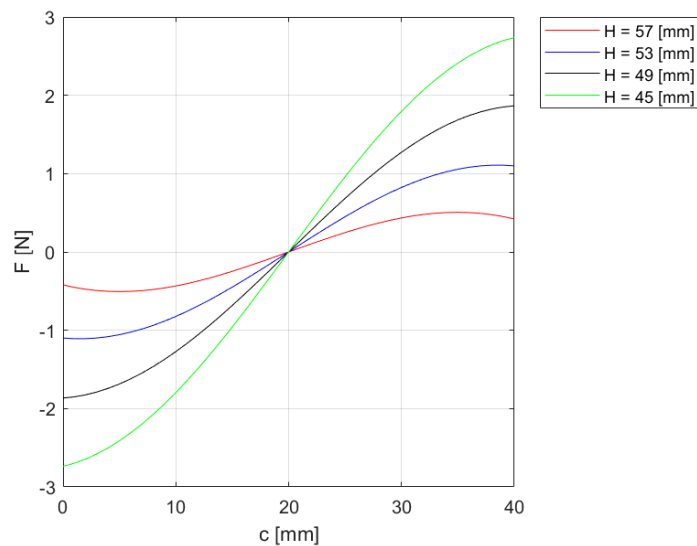


Figura 2.2: Grafico dell'andamento della componente di forza F_x esercitata dalla molla montata su meccanismo bistabile. La forza esercitata è calcolata per diverse altezze H e messa in relazione alla corsa del meccanismo, entrambi i parametri sono espressi in mm.

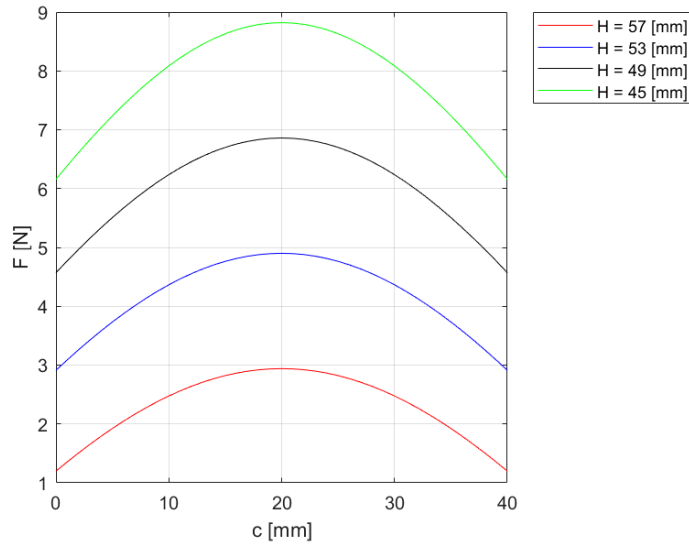


Figura 2.3: Grafico dell'andamento della componente di forza F_y esercitata dalla molla montata su meccanismo bistabile. La forza esercitata è calcolata per diverse altezze H e messa in relazione alla corsa del meccanismo, entrambi i parametri sono espressi in mm.

La realizzazione pratica del meccanismo bistabile è iniziata con la progettazione dell'alloggiamento della molla. Questo è costituito da due parti, accoppiate tra loro con un leggero gioco in modo tale da costituire un meccanismo in cui un albero scorre attraverso un foro, alle cui estremità sono presenti dei sistemi di contenimento della molla a compressione (Figura 2.4). Questo sistema a scorrimento permette alla molla di comprimersi liberamente durante il movimento e consente di variare l'altezza del meccanismo in modo semplice e senza limitazioni. La parte rossa presenta un diametro interno di dimensioni pari al diametro interno della molla, in modo da accoppiarsi con la molla con una leggera interferenza. Tale sistema evita inoltre alla molla il cosiddetto fenomeno di *"buckling"*, questo non è altro che l'instabilità dovuta ad un carico assiale di punta. La molla, soggetta ad una forza di compressione, in assenza di una guida che la tiene in posizione potrebbe flettersi lateralmente, pregiudicando così il corretto funzionamento del meccanismo.

Per il sistema di scorrimento lungo l'asse x , a cui è collegato un estremo del meccanismo bistabile, sono state fatte numerose prove e la scelta è ricaduta su

una guida lineare con carrello a ricircolo di sfere (Figura 2.4). Una guida lineare consente di ottenere un moto lineare basato sull'utilizzo di sfere, ciò consente di avere un moto caratterizzato da un coefficiente di attrito statico circa pari a quello dinamico, ossia di 0,002-0,003. Dato che la differenza tra coefficiente d'attrito statico e dinamico è trascurabile, la forza di primo distacco è uguale, al netto delle tenute, alla forza necessaria a mantenere il moto che tuttavia risulta particolarmente ridotta dati i bassi coefficienti d'attrito. Inoltre, l'elevata superficie di scorrimento e la particolare conformazione delle sfere consentono di eliminare completamente gli effetti di stick-slip e di consentire il moto anche in presenza di una leggera rotazione della slitta. Il fissaggio del binario della guida lineare dovrebbe essere effettuato lungo tutta la sua lunghezza, tuttavia date le ridotte forze in gioco agenti su di esso, per facilità di costruzione e assemblaggio, si è ritenuto più che sufficiente collegarne solo le sue estremità.

Il collegamento tra pattino scorrevole e il sistema di alloggiamento della molla avviene tramite un sistema di ancoraggio ricavato direttamente sulla paletta mediante l'utilizzo di un semplice collegamento smontabile filettato (collegamento vite-dado), Figura 2.6. Il sistema così concepito costituisce un unico pezzo che svolge entrambe le funzioni: paletta per svolgere la funzione richiesta e collegamento, sia con la slitta sia con l'alloggiamento inferiore della molla. La scelta progettuale di utilizzare un singolo pezzo, ottemperante entrambe le funzioni sopra citate, è stata dettata dalla necessità di ridurre al minimo eventuali giochi interni del sistema. Inizialmente il primo prototipo era stato concepito con due componenti distinti, uno costituente il collegamento con la slitta e il sistema di ancoraggio della molla, e la paletta, collegata a quest'ultimo mediante un collegamento filettato smontabile (collegamento vite-dado). Questa scelta tuttavia non si è rivelata la scelta ottimale infatti, dopo numerose prove, si è riscontrato che un sistema di questo tipo portava con sé una serie di flessibilità interne sfavorevoli nei riguardi dello svolgimento della operazione. Queste flessibilità erano causate dai giochi posseduti dai numerosi collegamenti dei vari elementi, e facevano in modo che tutto il meccanismo si comportasse come una molla, che restituiva energia al componente durante la fase di spostamento ad urto avvenuto, quando cioè la paletta si trovava al finecorsa opposto alla direzione dell'impatto.

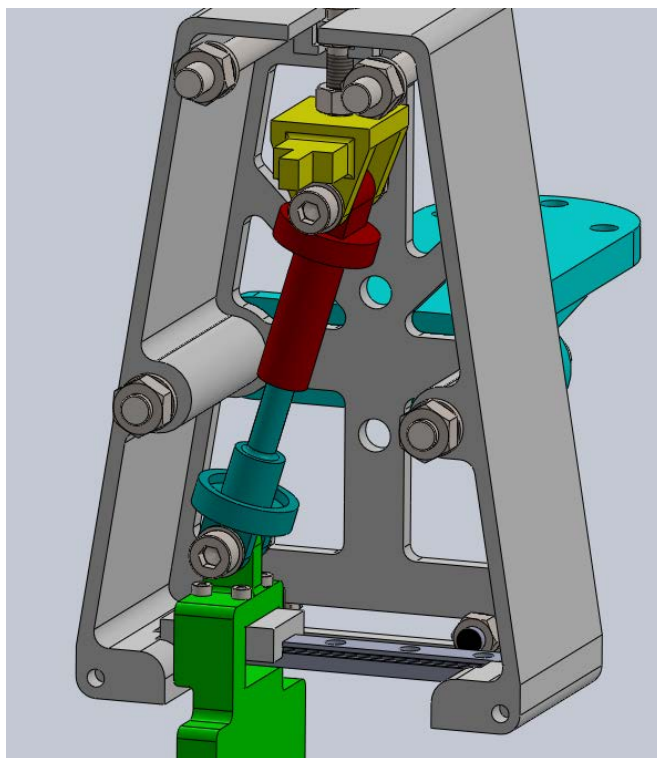


Figura 2.4: Ingrandimento del meccanismo di alloggiamento della molla in cui la parte azzurra si inserisce in quella rossa con un leggero gioco, in modo da garantirne lo scorrimento. Nella parte inferiore è possibile vedere la guida lineare e il pattino a ricircolo di sfere, mentre nella parte superiore è presente il meccanismo di regolazione della quota H.

Allo stesso modo per ridurre la flessibilità del sistema, la lunghezza della paletta è stata decisa in modo tale che la forza generata durante l'impatto non generasse un momento troppo elevato.

Per quanto riguarda il sistema di ancoraggio del sistema di alloggiamento della molla, di seguito verranno presentate le configurazioni prese in esame.

- Collegamento sopra l'asse di scorrimento(Figura 2.5 (a)), in questa condizione la componente di forza orizzontale F_x genera un momento che si somma al momento generato dalla forza che si origina dal contatto con il pezzo, incrementandone quindi il valore.
- Collegamento sull'asse di scorrimento (Figura 2.5 (b)), in questa condizione la componente di forza orizzontale F_x genera un momento nullo, il com-

portamento quindi risulta neutro e il momento generato è solamente quello dato dalla forza che si origina dal contatto con il pezzo.

- Collegamento sotto l'asse di scorrimento (Figura 2.5 (c)), in questa condizione la componente di forza orizzontale F_x genera un momento negativo al momento generato dalla forza che si origina dal contatto con il pezzo, incrementandone quindi il valore, diminuendone complessivamente il valore.

La condizione più favorevole dunque risulta essere la terza, in cui si posiziona il collegamento con la molla al di sotto dell'asse di scorrimento, tuttavia date le ridotte forze in gioco il momento generato dalla molla è trascurabile rispetto a quello generato dalla forza che si instaura quando la paletta urta il pezzo perciò per non complicare inutilmente il sistema si è optato per l'opzione più semplice anche se a prima vista svantaggiosa, ossia di posizionare l'aggancio della molla al di sopra dell'asse di scorrimento.

L'estremo opposto del meccanismo è costituito dal sistema di regolazione dell'altezza del sistema bistabile (componente giallo della Figura 2.4). Questo è stato pensato in modo che fosse di semplice realizzazione, facilmente assemblabile e che consentisse una comoda regolazione. Per ottemperare a queste richieste si è realizzato una forcella su cui viene montato un estremo del meccanismo bistabile (parte rossa). Tale forcella presenta un semplice sistema costituito da un parallelepipedo allungato che consente sia di bloccare la rotazione, una volta che il meccanismo è racchiuso dai due coperchi, sia per avere un riscontro visivo sull'altezza in cui si trova il meccanismo una volta regolato (grazie ad una scala graduata posta sul coperchio). La regolazione si effettua con un semplice sistema costituito da una vite e da un dado fissato direttamente al coperchio mediante un'apposita cava, mentre la forcella è fissata alla vite mediante due dadi autobloccanti lasciando la vite libera di ruotare. Tale sistema risulta essere molto economico tuttavia efficace, in quanto permette di regolare il meccanismo dall'esterno anche quando l'end-effector è montato sul robot, senza bisogno di aprire l'intero sistema. L'aggiunta di un ulteriore dado esterno, come sicurezza, consente di bloccare il meccanismo una volta regolato.

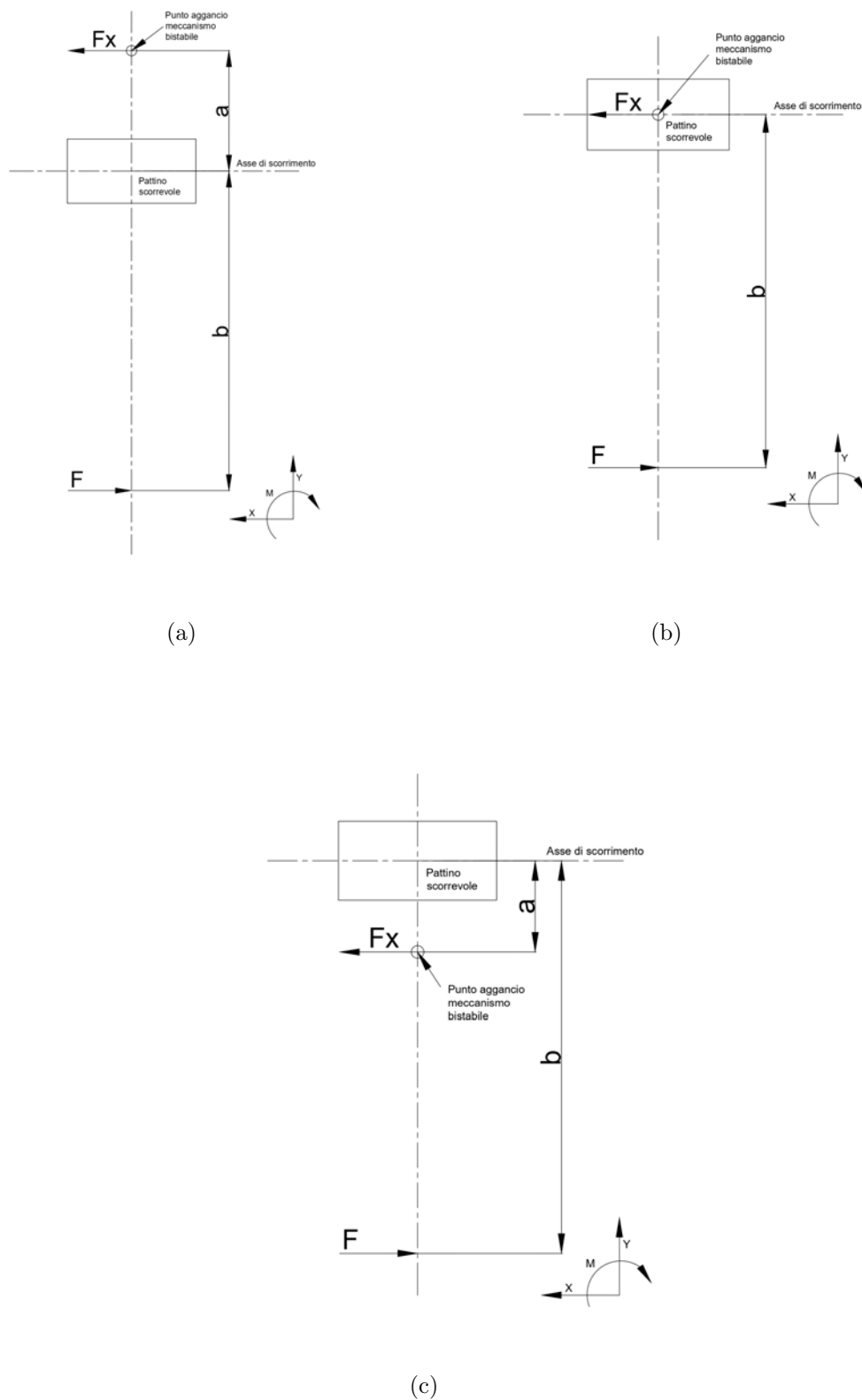


Figura 2.5: Schemi rappresentanti i vari casi di collegamento della molla al pattino scorrevole.

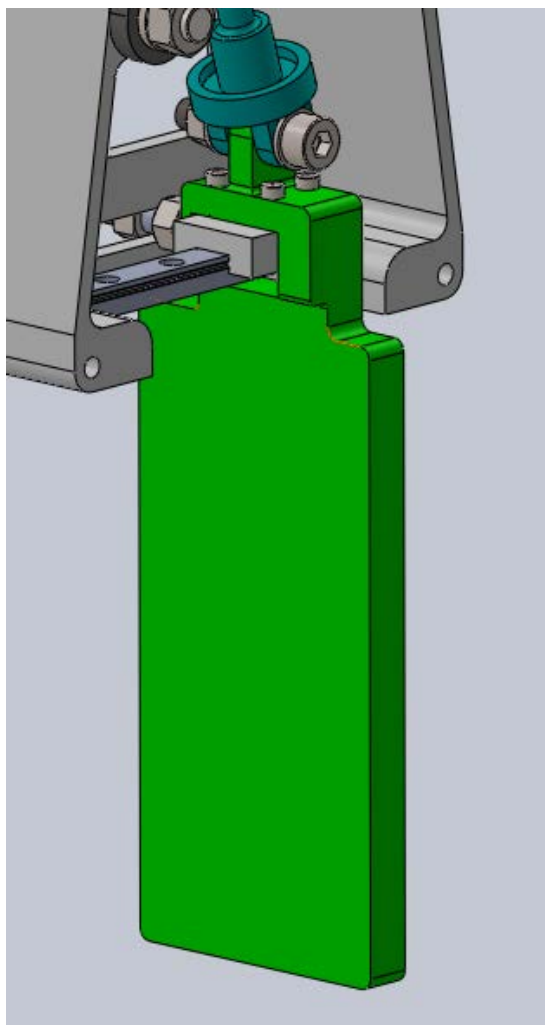
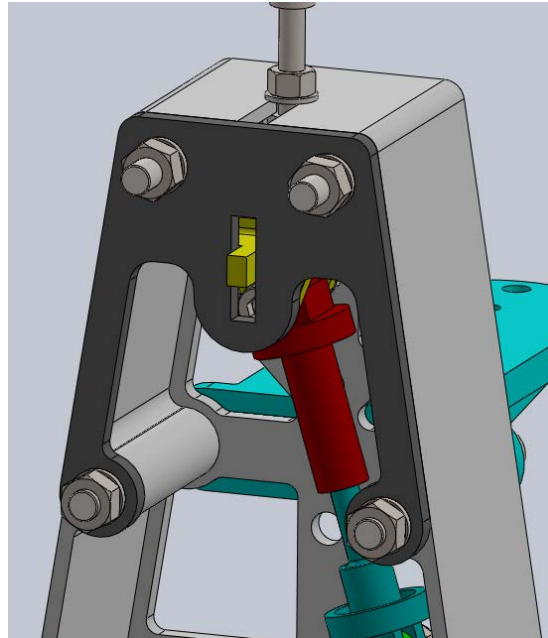
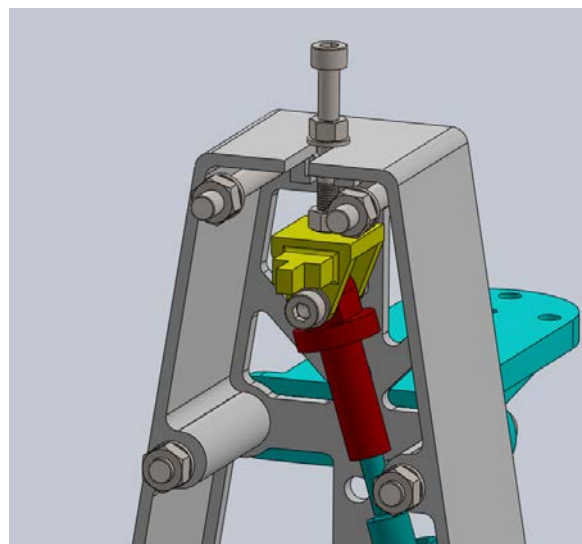


Figura 2.6: Dettaglio del pattino scorrevole su cui è collegata direttamente la paletta, la quale costituisce un pezzo unico con l'aggancio al sistema di alloggiamento della molla.



(a)



(b)

Figura 2.7: Dettaglio del sistema di regolazione del meccanismo bistabile, con (a) e senza (b) coperchio anteriore, cui è possibile variarne l'altezza H , e quindi aumentare o ridurre il precarico della molla.

2.2 Design complessivo dell'end-effector

Per racchiudere il meccanismo bistabile sono stati realizzati due coperchi, uno primario che rappresenta la parte di aggancio di tutto il meccanismo e uno secondario, necessario solo ad impedire la rotazione della forcella e a ospitare la scala graduata.

Gli obiettivi posti per la progettazione di questi elementi sono quelli di avere delle parti leggere e aventi il minore ingombro possibile, ottimizzate in modo da ridurre il materiale ma che comunque presentassero una resistenza tale da sopportare le forze in gioco. Il contenimento delle dimensioni dell'end-effector è una fattore molto rilevante sia per quanto riguarda gli ingombri sia per quanto riguarda il peso complessivo dell'end-effector, infatti tanto più leggero è l'insieme tanto meglio funziona la cinematica del robot a cui è collegato. Inoltre, dato che i componenti sono realizzati mediante prototipazione rapida, tanto minori sono le dimensioni complessive dei componenti e tanto più rapido ed economico è il processo di stampa.

Partendo con il coperchio principale, la forma trapezoidale e le sue dimensioni sono state scelte in conformità agli obiettivi proposti in precedenza di ridurre l'ingombro complessivo dell'end-effector, le cui dimensioni fossero sufficienti al semplice alloggiamento del meccanismo. Nella parte inferiore è stata predisposto un alloggiamento per la guida lineare e la slitta, il fissaggio di quest'ultima è garantito da opportuni fori realizzati direttamente sul coperchio durante la fase di stampa. Tali fori sono passanti, in modo tale da garantire il fissaggio della guida mediante vite-dado nell'eventualità che la filettatura del materiale plastico cui è realizzato il coperchio dovesse rovinarsi, senza quindi dover ristampare l'intero componente. Nella parte superiore, oltre al foro per il passaggio della vite, è stata predisposta una cava per l'alloggiamento del dado del sistema di regolazione. A metà dell'altezza del coperchio sono presenti i fori per l'attacco alla piastra per l'attacco al robot.

Per ottemperare all'obiettivo della leggerezza e di riduzione del materiale, il coperchio è stato concepito con una serie di fori avente un design che garantisca comunque la resistenza necessaria per portare a termine l'operazione. L'asola pre-

sente nella parte inferiore invece è stata ricavata per alloggiare i sensori induttivi, necessari per rilevare il momento in cui la paletta impatta contro il pezzo posto sul piano.

Il coperchio secondario che consente la chiusura completa del meccanismo, invece, è stato realizzato per evitare la rotazione della forcella di regolazione e per ospitare la scala graduata, necessaria per valutare in modo visivo l'altezza del meccanismo. Tuttavia in accoppiamento con il coperchio primario garantisce una maggiore resistenza all'end-effector. La scelta di coprire solamente la parte superiore del sistema è dettata sia dalla necessità di ridurre al minimo la massa sia per fare in modo di visionare il comportamento interno del sistema bistabile, così da analizzarne il suo corretto funzionamento.

Per collegare l'end-effector al robot si è progettata un'apposita piastra realizzata anch'essa mediante prototipazione rapida. Il design, caratterizzato anche da delle nervature nella parte inferiore, è stato studiato in modo da garantire un'elevata rigidità del componente ed evitare flessibilità dell'intero sistema una volta che questo è collegato al robot.

Il risultato finale è un end-effector caratterizzato da un peso molto contenuto, pari a 0,2 kg, di cui 0,076 kg attribuiti al sistema scorrevole costituito dalla paletta e dalla slitta.

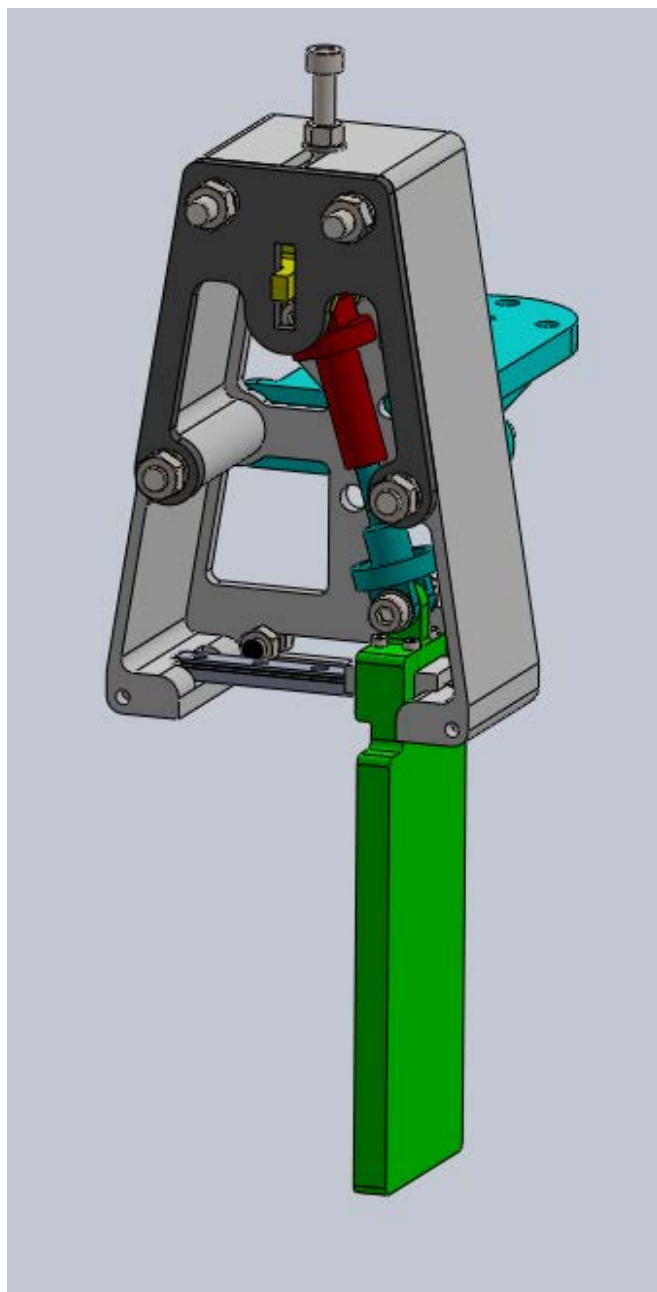


Figura 2.8: Design finale dell'end-effector.

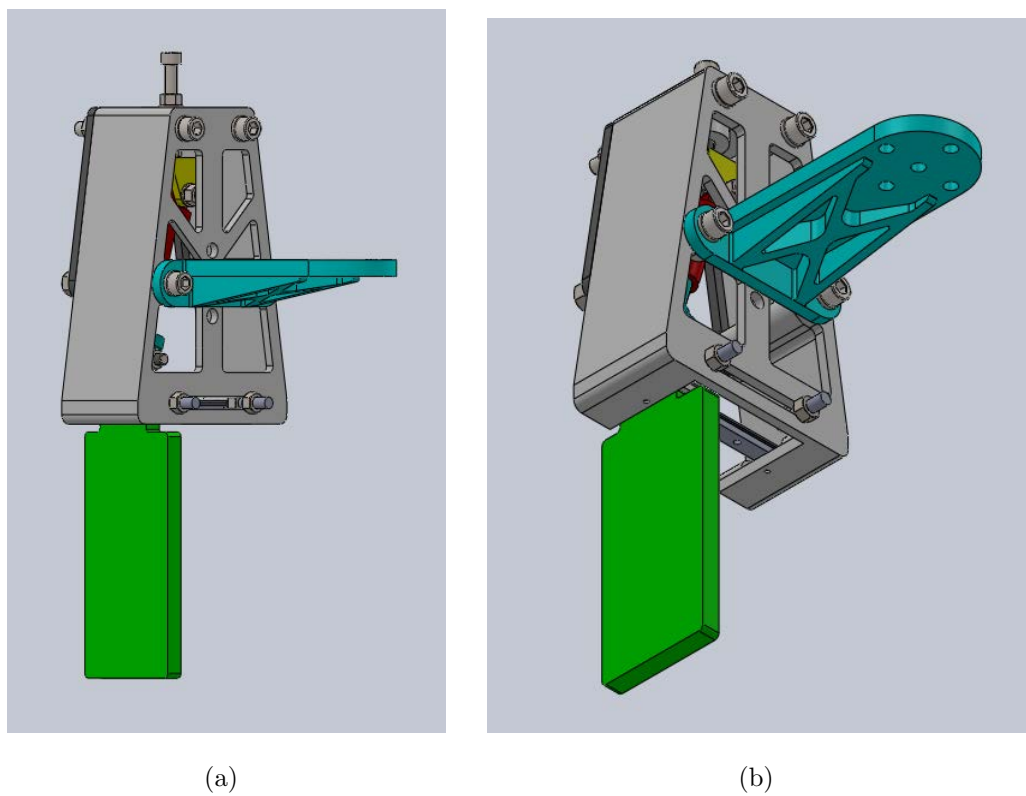


Figura 2.9: Dettagli del design complessivo dell'end-effector. Nell'immagine (a) si può notare la parte posteriore in cui sono alloggiati i sensori induttivi. Nell'immagine (b) in dettaglio la piastra di aggancio al robot.

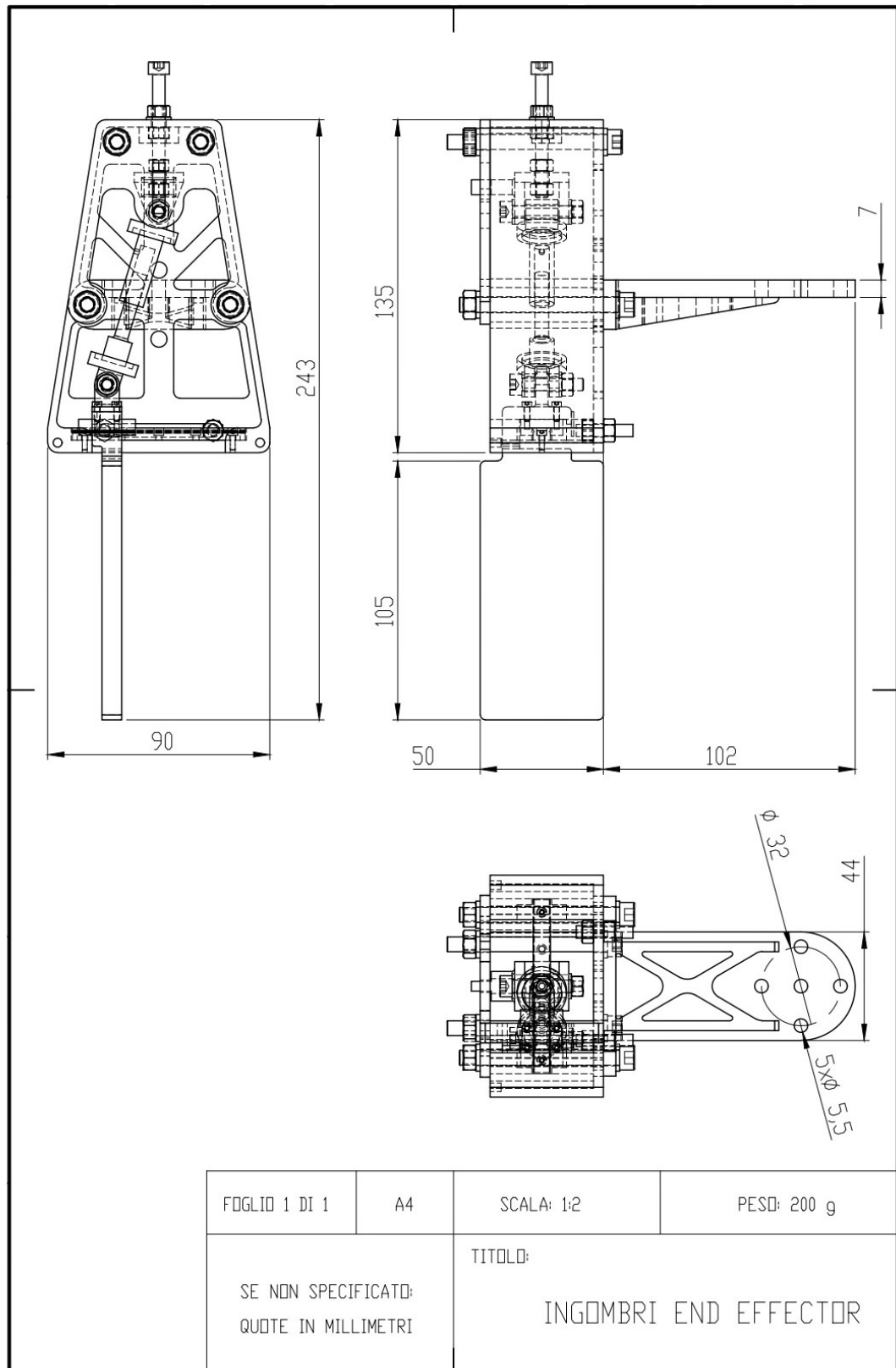
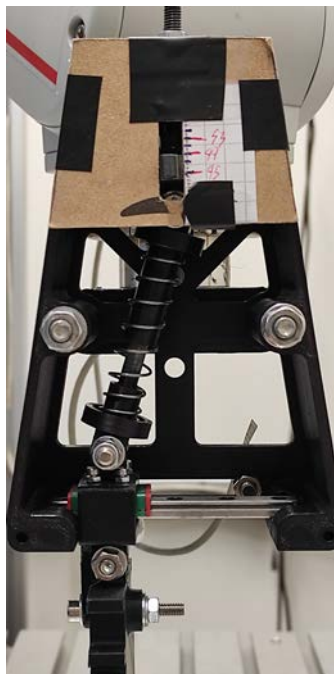
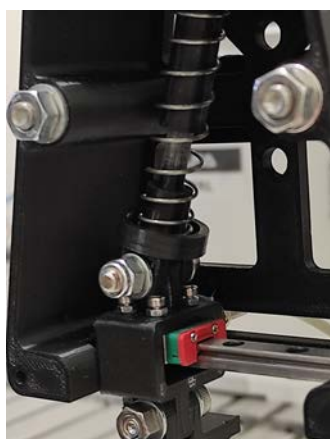


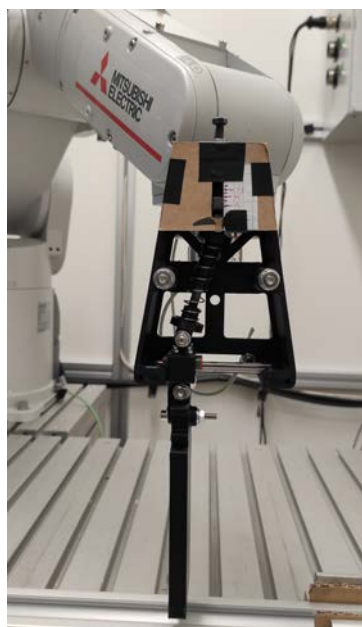
Figura 2.10: Ingombri esterni dell'end-effector.



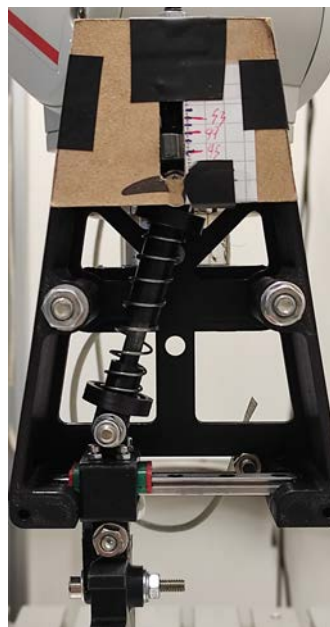
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.11: Foto dell'end-effector realizzato.

Capitolo 3

Apparato sperimentale e analisi video

3.1 Descrizione dell'apparato sperimentale

L'apparato sperimentale utilizzato per lo svolgimento delle prove è prima di tutto composto dal robot della “Mitsubishi Electric” modello “RV-4FRL-D”, già presentato nel capitolo 1. Il robot è collegato ad un PC mediante cavo Ethernet, e la connessione avveniva mediante protocollo UDP/IP. Questo non è altro che un metodo di comunicazione a pacchetti composti da bit di dati, tra dispositivi differenti presenti sulla rete. Ad ognuno risulta assegnato un indirizzo IP, ossia un valore di 32 bit che lo identifica in maniera univoca. Per maggiori dettagli si consulti [1].

Come metodo di identificazione dell'impatto si è utilizzata una coppia di sensori induttivi. Tra i tanti metodi disponibili per svolgere questo scopo, infatti, questo è risultato essere il più semplice da implementare in Matlab, nonché anche il più economico. Un sensore induttivo è identificato anche con il nome di sensore di prossimità, infatti è in grado di rilevare la presenza di un oggetto metallico ad una distanza ravvicinata (nell'ordine di qualche millimetro fino a qualche decina di millimetri). L'uscita di un sensore induttivo ha due possibili stati: aperto e chiuso, identificati rispettivamente dal valore 0 e 1. In maniera molto semplice, il circuito è chiuso quando di fronte al sensore induttivo è posto un oggetto ferro-

magnetico e, se questo viene allontanato, il circuito si apre. Il vantaggio di questi sensori è la loro capacità di commutare il loro stato a frequenze molto elevate, rendendoli adatti a rilevare oggetti in rapido movimento. Questi sensori sono fissati direttamente all'end-effector, e usati per identificare il distacco della paletta dai fincorsa. La paletta era munita di una piastrina di acciaio sull'estremità a contatto con il sensore, in modo che potesse essere rilevata da quest'ultimo. In Figura 3.1 si può osservare il sensore induttivo collegato all'end-effector.



Figura 3.1: Particolare di uno dei due sensori induttivi collegati ai fincorsa dell'end-effector.

Affinché questi sensori venissero rilevati dal software Matlab e utilizzati all'interno del programma di movimentazione del robot, si è fatto uso di un modulo BECKHOFF (Figura 3.2). Un modulo BECKHOFF è un modulo programmabile definito come "softPLC", dove PLC rappresenta l'acronimo di "controllori logici programmabili", dall'inglese "*Programmable Logic Controllers*", che permette di gestire segnali molto velocemente. In maniera semplificata, all'interno di ogni modulo scorre un insieme d'informazioni, e tutti i moduli comunicano con il terminale principale, quest'ultimo collegato al PC tramite cavo Ethernet. Le varie schede aggiuntive (moduli) raccolgono e scaricano i dati direttamente dalle informazioni che le attraversano, senza che queste necessitino di essere fermate ed

elaborate. Ciò si traduce in un processo molto rapido. Il terminale principale si collega poi al computer e viene letto attraverso il software TwinCAT, che funziona in background e comunica con Matlab. Il vantaggio di utilizzare un softPLC in luogo del classico PLC tradizionale, anche dal punto di vista industriale, è quello di garantire principi come flessibilità, efficienza e “*cost-effectiveness*” (letteralmente tradotto dall’inglese come “efficacia dei costi”). I softPLC infatti riducono i costi di produzione rispetto ai PLC tradizionali, hanno costi d’installazione e manutenzione inferiori, e risultano quindi complessivamente meno onerosi. In aggiunta a questo, promuovono l’efficienza dell’impianto, il che si traduce nell’aumento della produttività e in rendimenti più elevati. I PLC tradizionali spesso risultano particolarmente impegnativi da utilizzare e da programmare, poiché non sempre supportano i linguaggi di programmazione più diffusi, ma solo quelli del produttore. Diversamente da questi invece i softPLC supportano linguaggi di programmazione differenti, con elevati vantaggi in termini di facilità nel configurare l’applicazione ed effettuare aggiornamenti. Per questo risultano la soluzione migliore anche in ambienti industriali, in cui sono richiesti aggiornamenti costanti.

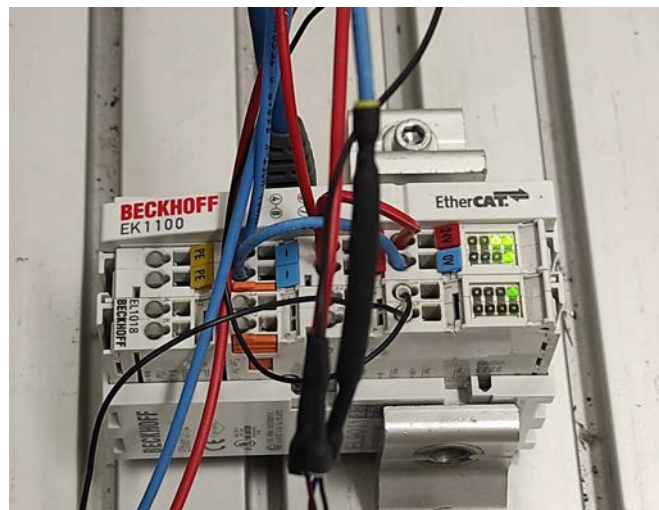


Figura 3.2: Modulo BECKHOFF utilizzato per il collegamento dei sensori induttivi.

Per garantire il moto rettilineo del pezzo colpito e ridurre l'attrito di strisciamento tra le superfici a contatto, il componente da colpire era fissato su un carrello scorrevole su un'apposita guida. La guida in questione era realizzata in lega di alluminio anodizzato (EN AW-6060 T66) su cui scorreva all'interno un cursore realizzato di polizene 1000 (o polietilene 1000). Quest'ultimo è più semplice dei polimeri sintetici ed è la più comune fra le materie plastiche. Questo sistema garantiva la ripetibilità del movimento rettilineo e un coefficiente d'attrito costante e noto pari a circa 0,2 (si veda Figura 3.3).

Per quanto riguarda i pezzi da colpire, questi erano dei semplici cilindri aventi massa differente tra loro.

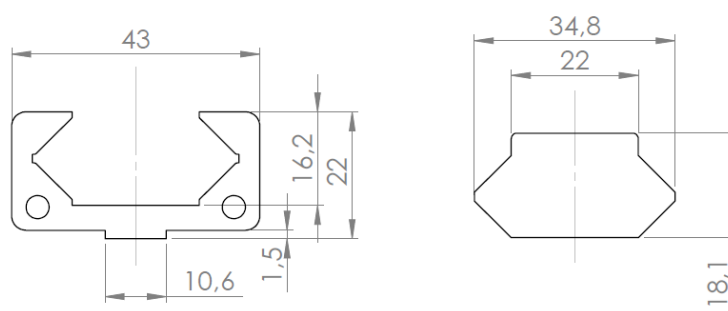


Figura 3.3: Quote principali della guida lineare (destra) e del cursore (sinistra) su cui era fissato il pezzo da colpire.

Per la descrizione accurata dell'apparato di acquisizione video, questa si rimanda alla sezione 3.3.1.

In Figura 3.4 è presentata una foto che comprende tutto l'apparato sperimentale sopra descritto.



Figura 3.4: Apparato sperimentale completo, è possibile vedere anche la guida su cui scorre il carrellino e al di sopra del quale è collegato il pezzo.

3.2 Movimentazione del robot

Il robot Mitsubishi era collegato al PC tramite cavo Ethernet e i dati trasferiti tramite protocollo UDP/IP, in modo da poterlo controllare in tempo reale. La connessione tra PC e robot avveniva prima di tutto attraverso il software RT ToolBOX3, realizzato dalla “MELSOFT”, che utilizza come linguaggio di programmazione “MELFA-BASIC V”, e permette di svolgere diverse operazioni. In particolare è stato utilizzato per predisporre il controller robot alla ricezione di segnali dall'esterno, in modo che il robot potesse ricevere istruzioni direttamente da Matlab. Il motivo principale per cui si è usato il software Matlab in luogo del software proprietario RT ToolBox3 è perchè quest'ultimo risulta sì molto intuitivo e di facile apprendimento per l'utilizzatore finale, ma allo stesso tempo è molto limitante in termini di tipologia di programmi e operazioni che possono essere fatte eseguire al robot.

Per realizzare il programma per il movimento del robot in Matlab, allo scopo di questo lavoro di tesi, si sono utilizzate innanzitutto delle proprietà della classe MITSUBISHI, una classe sviluppata in una tesi precedente ([1]), e delle proprietà appartenenti alla classe KINpro. Quest'ultima è una classe sviluppata nel laboratorio di robotica dell'università di Padova. In particolare, della classe KINpro si è

utilizzato l'oggetto `Robot`, con il quale è possibile importare il modello del robot con le sue caratteristiche in Matlab. Con questo comando è possibile ottenere le informazioni sugli ingombri del robot, sulle terne locali che definiscono i vari membri, le trasformazioni spaziali per identificare le terne stesse, la matrice di Denavit-Hartenberg, la posizione della base rispetto alla terna *"world"*, l'eventuale utensile utilizzato, i limiti dei giunti e le loro velocità massime. Una volta importato l'oggetto robot, lo si può mostrare, si possono eseguire di operazioni di cinematica diretta o inversa e si possono pianificare traiettorie nello spazio dei giunti o nello spazio operativo. Della classe `MITSUBISHI` si sono invece utilizzati le seguenti proprietà e metodi:

- `MITSUBISHI`

Metodo che serve per creare l'oggetto `MITSUBISHI`, con il quale si andrà ad effettuare la connessione con il controller del robot.

- `open_connection` e `close_connection`

Comandi utilizzati per settare l'indirizzo IP, definire la connessione con il robot ed aprirla o chiuderla a programma terminato.

- `data_msg.invio`

Proprietà necessaria per inviare i pacchetti dati dal PC al controller del robot, e quindi farlo muovere secondo quanto pianificato.

- `connection_send`

Proprietà che contiene l'oggetto relativo alla connessione, che si crea grazie alla funzione `udp_address`, che contiene l'indirizzo IP necessario ad effettuare la connessione tra PC e controller del robot. La connessione viene aperta per il trasferimento di informazioni con `fopen` e viene chiusa con `fclose`.

Si è inoltre creata appositamente una classe `Sensore`, necessaria per importare in Matlab i segnali letti dai sensori attraverso TwinCAT. Tale classe è caratterizzata dalle proprietà `symbol` e `ipAddress`.

Il movimento imposto al robot è una linea retta, sviluppata lungo l'asse y, percorsa con una legge di moto trapezoidale con velocità variabile in relazione

alle condizioni che si verificano. Ogni punto della traiettoria infatti veniva calcolato e subito inviato al robot in modo che tali punti potessero essere di volta in volta calcolati in relazione alle condizioni che si verificavano. Il calcolo dei punti avveniva utilizzando le formule rappresentative della legge trapezoidale, come esposto nel paragrafo 1.2.2. Il codice per il calcolo dei punti dipendeva quindi dalle condizioni esterne, condizioni che venivano rilevate mediante i sensori induttivi e gestite mediante dei cicli `if`. Settati quindi tutti i parametri che caratterizzano una legge di moto trapezoidale, e denominati sensore 1 il sensore del finecorsa nel lato in cui avviene l'impatto e sensore 2 il sensore presente nel finecorsa opposto, le condizioni determinanti la legge da seguire sono le seguenti:

1. la prima condizione `if` imponeva che se il sensore 2 risulta attivo, la legge di moto seguiva una semplice legge con accelerazione costante fino al raggiungimento della velocità massima imposta (Figura 3.5), e il robot percorreva quindi la traiettoria rettilinea per un tempo totale di movimento imposto. Questa condizione risultava utile per far funzionare l'end-effector come una semplice paletta rigida. In questo modo era possibile effettuare delle prove con o senza l'ausilio del meccanismo bistabile, in modo da valutarne l'effettiva efficacia.

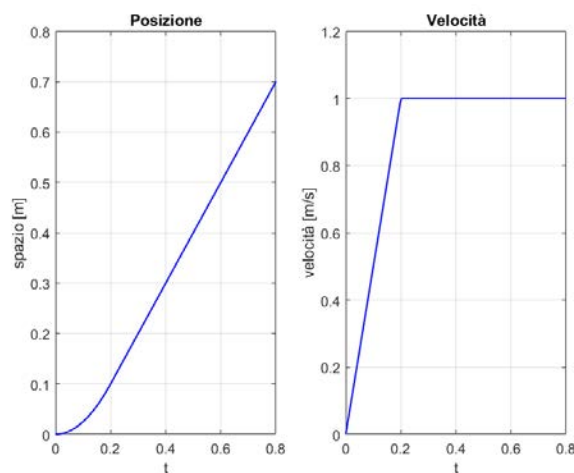
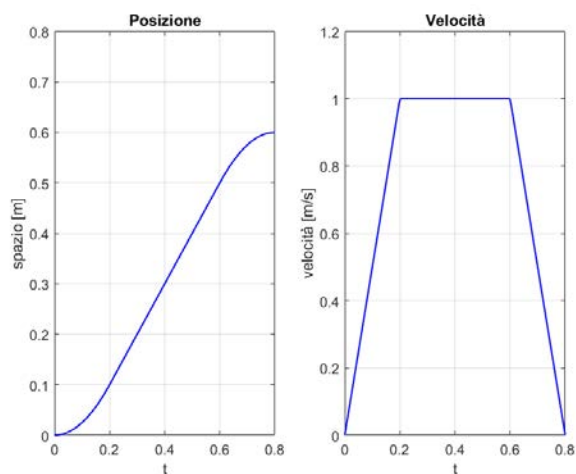


Figura 3.5: Legge seguita dal robot con meccanismo bistabile disattivato. I parametri in questo caso risultano essere i seguenti: accelerazione pari a $5 \frac{m}{s^2}$, velocità di $1 \frac{m}{s}$ e tempo totale di movimento pari a $0,7 s$

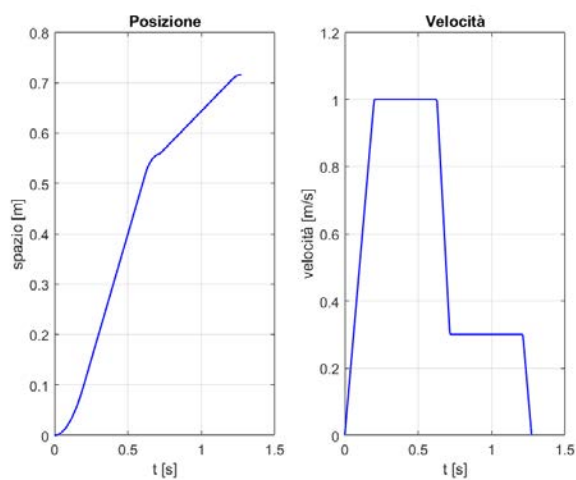
2. Se invece il meccanismo bistabile era attivato, dunque ad inizio del moto il sensore 1 era attivo, potevano verificarsi due condizioni differenti, gestite anche queste da dei cicli `if`:
 - a. il robot cominciava il suo movimento con legge trapezoidale e, nel caso che in un certo istante avvenisse l'impatto con il pezzo disposto lungo la traiettoria del robot, il sensore si disattivava e il robot diminuiva la sua velocità. La velocità era ridotta fino all'arresto del robot o, fino al raggiungimento di una velocità ridotta rispetto a quella iniziale. In entrambe le condizioni si raggiungevano i valori di velocità con una decelerazione imposta costante. Nel caso in cui la velocità dopo l'urto fosse diversa da zero, il robot, dopo l'urto, continuava il suo moto rettilineo con velocità ridotta fino al raggiungimento del tempo totale di movimento imposto (Figura 3.6). In questa particolare condizione veniva inoltre rilevato il tempo in cui avveniva l'impatto.
 - b. nel caso in cui il meccanismo bistabile risultava attivo, ma non avvenisse l'urto, il moto avveniva con legge trapezoidale con durata e parametri iniziali imposti, come presentato in Figura 3.5.

I punti della traiettoria erano calcolati secondo la legge trapezoidale parametrizzata, perciò per ogni punto veniva calcolata l'ascissa curvilinea s e, a partire da questa, calcolati i punti corrispondenti nel piano cartesiano x , y e z a partire da un punto iniziale P imposto. Per ogni coordinata del moto nel piano cartesiano veniva eseguita la cinematica inversa di posizione, in modo da ricavare le coordinate di giunto. Quest'ultimo passaggio avveniva utilizzando la proprietà `joints` della classe `KINpro`.

Fatto ciò il punto calcolato era inviato al robot, questo andando a creare uno specifico pacchetto di dati composto complessivamente da 196 bytes, ognuno dei quali contenente una specifica informazione. Per inviare ogni punto al robot con una certa frequenza di spedizione, il ciclo di calcolo ed invio è stato gestito utilizzando la funzione `timer`, funzione atta a far partire un oggetto timer collegato a determinate funzioni da svolgere. La funzione `timer` presenta differenti confi-



(a)



(b)

Figura 3.6: Differenti leggi seguite in caso di urto avvenuto. I parametri iniziali del moto imposti sono: accelerazione pari a $5 \frac{m}{s^2}$, velocità $1 \frac{m}{s}$, decelerazione dopo l'urto pari a $5 \frac{m}{s^2}$; per la figura (a) la velocità finale dopo l'urto è $0 \frac{m}{s}$, mentre per la figura (b) pari a $0,5 \frac{m}{s}$.

gurazioni per il suo funzionamento, in particolare in questa trattazione si sono utilizzati:

- **TimerFcn**

Indica la funzione principale che deve essere eseguita ogni volta che scade il timer. In questo caso la funzione da svolgere risultava essere quella sopra descritta, ossia il calcolo dei punti della traiettoria e il successivo invio.

- **ExecutionMode**

Esprime il metodo con cui vengono eseguite le funzioni del timer. Ci sono quattro modalità possibili, ma quella utilizzata in questa trattazione è la `fixedRate`. Questa modalità è atta a far partire la funzione associata al timer solamente dopo un lasso di tempo specificato dal parametro `Period`, indipendentemente dal fatto che la funzione precedente sia stata portata a termine o meno. La modalità di esecuzione `fixedRate` tiene conto del fatto che una funzione viene solitamente eseguita con un certo ritardo rispetto al suo lancio, il conteggio del `Period` in questo caso tiene già conto di questo lag e parte leggermente in anticipo. La scelta nell'utilizzare la modalità di esecuzione `fixedRate` in questo lavoro, è stata dettata dall'esigenza di eliminare il più possibile le code e i ritardi, che si potevano manifestare durante il trasferimento dei pacchetti dati.

- **Period**

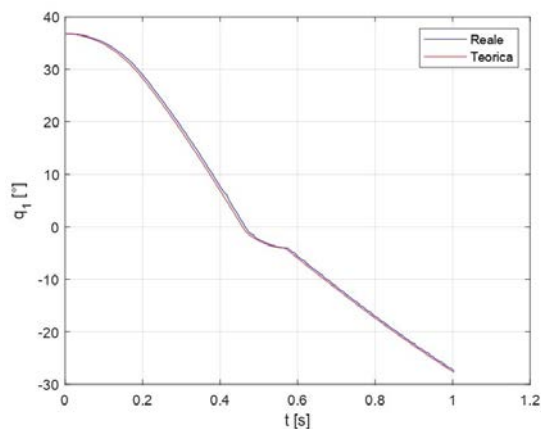
Indica il lasso di tempo tra le esecuzioni della funzione principale del timer. In questo caso indica il valore che esprime la frequenza di spedizione dei vari pacchetti dati. Nel codice in questione, tale frequenza è stata posta pari a 200 Hz valore che, sperimentalmente, dopo svariate prove, è stato ritenuto ottimale allo scopo. Infatti per frequenze inferiori, i punti inviati risultavano troppo distanti gli uni dagli altri e il robot non riusciva a raggiungerli in maniera conforme ai suoi limiti cinematici (limiti di velocità raggiungibili dai giunti), andando quindi in errore. Al contrario, per frequenze superiori, non emergevano miglioramenti ma anzi i risultati ottenuti rimanevano pressoché invariati.

Una volta definito l'oggetto timer nello script principale, rappresentato dalla variabile `t`, è necessario farlo partire. Questo è possibile farlo utilizzando il comando `start(t)` di Matlab. In concomitanza con questo comando inoltre, veniva avviato un cronometro mediante la funzione `tic toc`. Questa funzione aveva lo scopo di misurare il tempo trascorso tra il comando d'inizio `tic`, posto prima del comando di avvio del timer, e il comando di fine `toc`, posto invece all'inizio della funzione richiamata ogniqualvolta il timer scattava. In questo modo era possibile usare il tempo determinato dal cronometro per calcolare il punto successivo della traiettoria da inviare di volta in volta al robot. Il timer veniva utilizzato fintanto che il vettore dei tempi, costituito dagli elementi ricavati con il cronometro, raggiungeva il valore del tempo totale imposto per il movimento. Raggiunto questo valore venivano eseguiti, nella funzione richiamata dal timer, i seguenti comandi in quest'ordine:

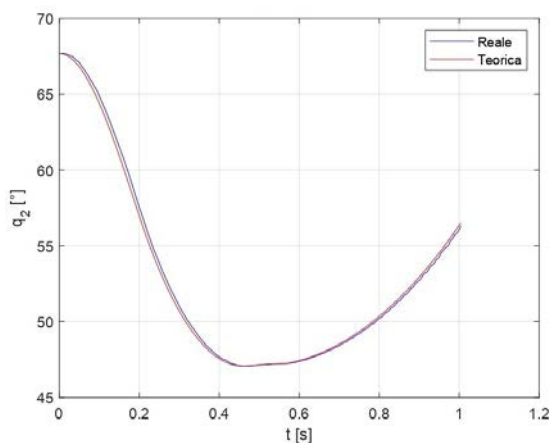
1. il timer veniva interrotto mediante l'utilizzo del comando `stop(t)`;
2. mediante il comando `connection_send`, i punti effettivamente raggiunti dal robot in coordinate di giunto e cartesiane, venivano trasferiti dal controller di quest'ultimo al PC e memorizzati in Matlab;
3. la connessione con il robot veniva chiusa mediante il comando `close_connection`.

Infine nella funzione principale, una volta finito il trasferimento dei dati, venivano generati i grafici riferiti alla legge di moto calcolata e i grafici che mettevano in relazione le posizioni dei giunti raggiunte e quelle teoriche calcolate. Questi ultimi risultavano utili per valutare la bontà della trasmissione dei dati. A tal proposito si riportano in Figura 3.7, 3.8 e 3.9 i grafici delle posizioni dei giunti ottenuti eseguendo la legge oraria presentata in Figura 3.6 (b). Per l'analisi di questi grafici è da tenere in considerazione il fatto che la posizione che si manda al controller è quella da raggiungere a fine movimento, mentre quella che si riceve dal controller è quella di inizio movimento. Per semplicità non si fanno considerazioni sul tempo, esso è dato dalla simulazione in Matlab, ma potrebbe variare rispetto alla realtà (anche se in linea teorica di una quantità trascurabile). Tra i fattori rilevanti che possono incidere su questa discordanza, sono ad esempio eventuali

lag o ritardi nel trasferimento dei pacchetti dati. Si può comunque notare che le due curve non risultano perfettamente sovrapposte e soprattutto nella seconda parte di movimento la curva reale risulta “seghettata” rispetto a quella ideale. Questo è indice di un continuo inseguimento da parte del robot nei confronti della traiettoria voluta. Ciò si traduce in una situazione in cui inviata una posizione, il robot accelera per raggiungerla ma deve decelerare subito dopo per non andare oltre al punto inviato. Tale comportamento è il più possibile da evitare, in quanto crea oscillazioni di velocità e vibrazioni.

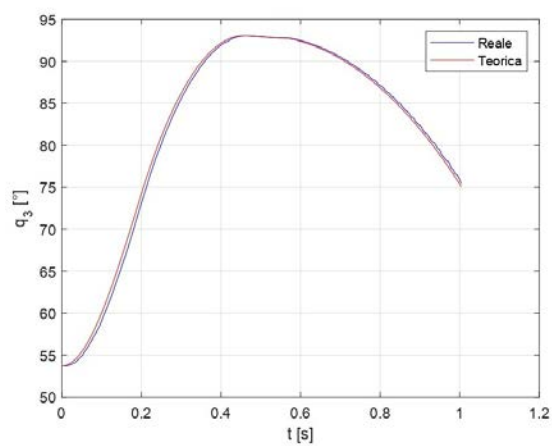


(a)

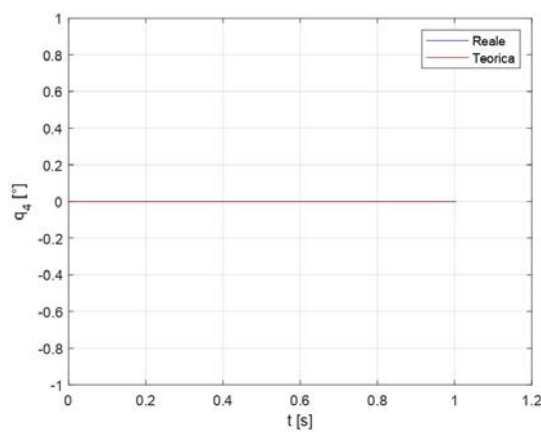


(b)

Figura 3.7: Posizioni dei giunti 1 (a) e 2 (b) calcolate e ricevute dal robot. La frequenza di spedizione dei dati è pari a 200 Hz. Complessivamente i punti inviati vengono raggiunti in maniera accettabile dal robot.

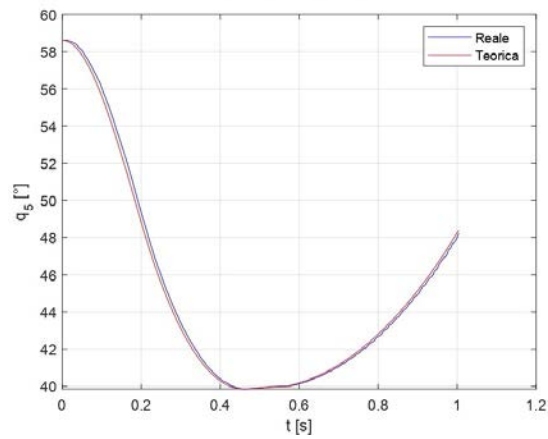


(a)

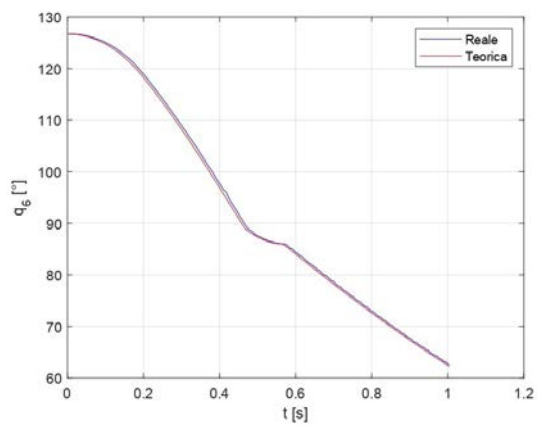


(b)

Figura 3.8: Posizioni dei giunti 3 (a) e 4 (b) calcolate e ricevute dal robot. La frequenza di spedizione dei dati è pari a 200 Hz. Complessivamente i punti inviati vengono raggiunti in maniera accettabile dal robot.



(a)



(b)

Figura 3.9: Posizioni dei giunti 5 (a) e 6 (b) calcolate e ricevute dal robot. La frequenza di spedizione dei dati è pari a 200 Hz. Complessivamente i punti inviati vengono raggiunti in maniera accettabile dal robot.

3.3 Acquisizione e analisi video

3.3.1 Apparato di acquisizione video

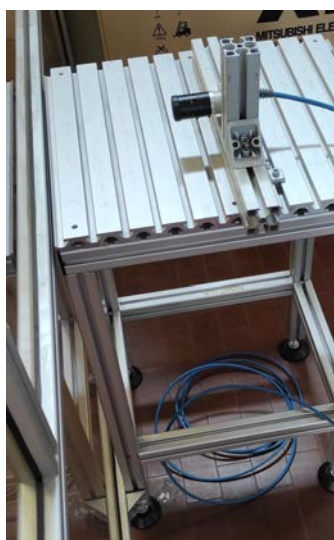
Per svolgere le acquisizioni video è stata utilizzata una videocamera industriale "Genie Nano GigE M640" prodotta dalla "TELEDYNE DALSA", in accoppiamento con il software di acquisizione video "Sapera CamExpert". Le telecamere della serie "Genie Nano" forniscono otturatori elettronici ad alta velocità e a basso rumore. La tecnologia proprietaria TurboDrive consente di superare i frame rate standard, offrendo fino a 800 fps di registrazione (valori di frame rate ottenibili tramite TurboDrive o Burst Acquisition che comunque possono variare in base a fattori quali la qualità dell'immagine e la risoluzione), mantenendo tuttavia la piena qualità dell'immagine. Queste telecamere sono dotate di una serie di funzioni avanzate come finestre multi ROI e Burst Acquisition, che utilizzano il buffer di memoria integrato per ottenere frame rate ancora più veloci. I video ottenuti con questa tipologia di telecamera sono di tipologia monocromatica in scala di grigi. Nel caso specifico di questa trattazione, i video sono stati acquisiti imponendo un frame rate pari a 300,03 fps per una durata imposta pari a 800 frame a video (buffer). La scelta di utilizzare un numero di frame rate di acquisizione così elevato è stata dettata dall'ottenere delle riprese in slow-motion, le quali permettevano una successiva analisi video molto più accurata.

Un esempio della schermata del software di acquisizione video è presentato nella Figura 3.10.

Per effettuare le riprese video la telecamera è stata fissata rigidamente su un apposito supporto, in modo tale che una volta regolati tutti i parametri della telecamera e la sua posizione, questi sarebbero stati costanti per tutta la durata delle prove, e quindi per ogni video acquisito. Si veda Figura 3.11.



Figura 3.10: Schermata del software “Spera CamExpert” utilizzato per l’acquisizione video. In alto a destra è possibile visualizzare i parametri impostati per l’acquisizione: 300,03 fps di frame rate e 800 fps di buffer.



(a)



(b)

Figura 3.11: Apparato di acquisizione video. In Figura (a) si può osservare la struttura su cui è stata fissata rigidamente la telecamera usata per l’acquisizione. In Figura (b) il particolare della telecamera utilizzata: “Genie Nano Gige M640” prodotta dalla “Teledyne Dalsa” (b).

Per accertarsi che nel video utilizzato per l'analisi venissero tracciati solo gli elementi d'interesse di cui si voleva valutare l'effettiva velocità, ossia: il robot, la paletta e il pezzo, questi elementi sono stati muniti di un marker. In questo caso il marker era un semplice pallino bianco, incollato in un generico punto rappresentativo di ogni elemento sopra elencato. In questo modo, andando ad oscurare qualsiasi tipo di superficie riflettente che potesse creare disturbo durante l'analisi del video, è stato possibile visualizzare e tracciare solo il marker, e risalire in modo semplice e accurato alle velocità.

Per limitare l'errore di distorsione della telecamera, prima dell'acquisizione dei video, è stata posizionata una scacchiera nell'inquadratura e sono state scattate dieci differenti foto. La scacchiera in questione era caratterizzata da una dimensione del lato dei quadrati pari a 24 mm (si veda un esempio in Figura 3.12). Le dieci foto scattate, sono state successivamente utilizzate per ricavare i parametri necessari per effettuare la calibrazione della telecamera stessa, ed eseguire un'analisi video che risultasse la più accurata possibile.

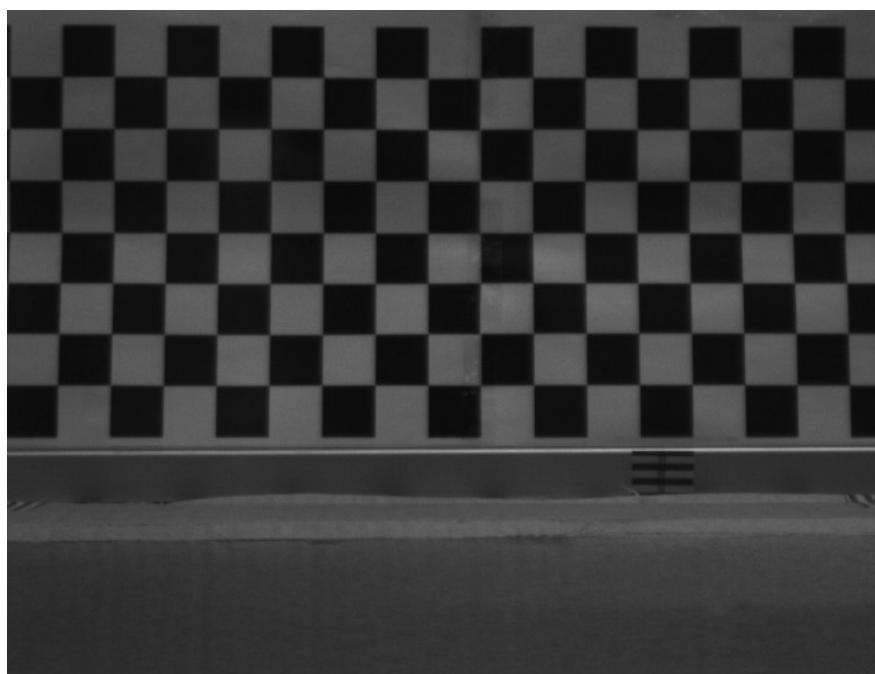


Figura 3.12: Esempio di una delle dieci foto scattate per effettuare la calibrazione della telecamera dove è possibile osservare molto chiaramente la scacchiera utilizzata.

3.3.2 Analisi video

Una volta acquisiti tutti i video, per effettuarne l'analisi si è fatto uso del software Matlab. Per prima cosa, utilizzando le immagini scattate con la scacchiera davanti alla videocamera, mediante l'applicazione di Matlab: Camera Calibrator, si sono ricavati i parametri necessari per correggere le immagini acquisite. Questa applicazione infatti consente di stimare i parametri intrinseci, estrinseci e di distorsione dell'obiettivo della fotocamera. Per stimare tali parametri, è necessario disporre di punti universali 3D e dei corrispondenti punti immagine 2D. È possibile ottenere queste corrispondenze utilizzando più immagini di un modello di calibrazione, come una scacchiera. Utilizzando le corrispondenze, è possibile ricavare i parametri della telecamera. Dopo aver calibrato una telecamera, per valutare l'accuratezza dei parametri stimati, è possibile:

- tracciare le posizioni relative della fotocamera e il modello di calibrazione;
- calcolare gli errori di riproiezione (*"Reprojection errors"*);
- calcolare gli errori di stima dei parametri.

L'algoritmo di calibrazione calcola la matrice della telecamera utilizzando i parametri estrinseci e intrinseci. I parametri estrinseci rappresentano una trasformazione rigida dal sistema di coordinate universali 3D al sistema di coordinate della telecamera 3D (una rotazione e una traslazione). I parametri intrinseci invece rappresentano una trasformazione dalle coordinate della telecamera 3D nelle coordinate dell'immagine 2D. Questi ultimi includono la lunghezza focale, il centro ottico, noto anche come punto principale, e il coefficiente di inclinazione. Per rappresentare accuratamente una telecamera reale, il modello rappresentativo della telecamera include la distorsione. La distorsione ottica si verifica nel momento in cui ai punti del piano oggetto, costituenti una certa figura, corrispondono immagini che non costituiscono una figura simile. Questo fenomeno è dovuto in buona parte al fatto che le superfici esterne delle lenti sono curve o sferiche. Esistono due tipi differenti di distorsione: a cuscino e a barile (Figura 3.13), a seconda della curva concava o convessa che può assumere l'immagine distorta. Solitamente più piccola è la lente, maggiore è il fenomeno della distorsione.

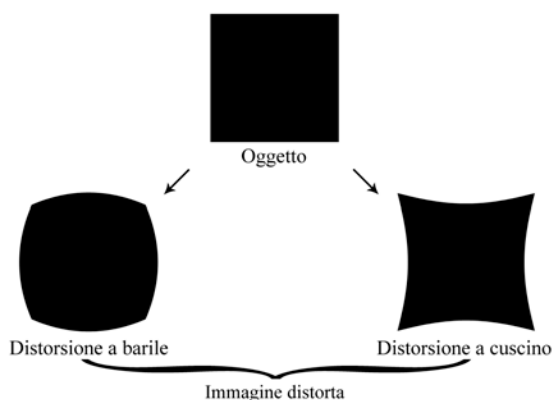


Figura 3.13: Rappresentazione del fenomeno della distorsione ottica.

Per quanto riguarda gli errori di riproiezione, invece, forniscono una misura qualitativa dell'accuratezza. Un errore di riproiezione è la distanza tra un punto chiave del modello rilevato in un'immagine di calibrazione e del punto corrispondente proiettato nella stessa immagine. L'accettabilità di un particolare errore di riproiezione dipende dai requisiti di precisione della specifica applicazione. Per fare in modo che tale errore sia basso, o per ottenere comunque un valore più accurato possibile, è necessario acquisire più immagini di calibrazione, ed è per questo motivo che nel caso di questo lavoro si sono utilizzate dieci immagini. È consigliabile che tali immagini abbiano diversi orientamenti e che siano posizionate in modo da visualizzare i punti chiave in tutte le parti del campo visivo. In particolare, è molto importante avere i punti chiave vicini ai bordi e agli angoli dell'immagine per ottenere una migliore stima dei coefficienti di distorsione. I punti chiave a cui si fa riferimento non sono altro che i punti individuati dall'intersezione degli spigoli dei quadrati che costituiscono la scacchiera.

L'applicazione Camera Calibration, può essere richiamata direttamente dallo script Matlab mediante la funzione `estimateCameraParameters`. Tramite questa funzione è possibile determinare tutti i parametri di correzione definiti in precedenza e utilizzarli per eseguire l'analisi video. Per utilizzare questa funzione però è necessario per prima cosa identificare i punti costituenti la scacchiera a partire dall'immagine, e ciò può essere fatto utilizzando la funzione `detectCheckerboardPoints`. Successivamente, è necessario fornire la dimensione di ogni singolo lato dei quadrati che costituiscono la scacchiera e, per ultimo, generare il sistema di

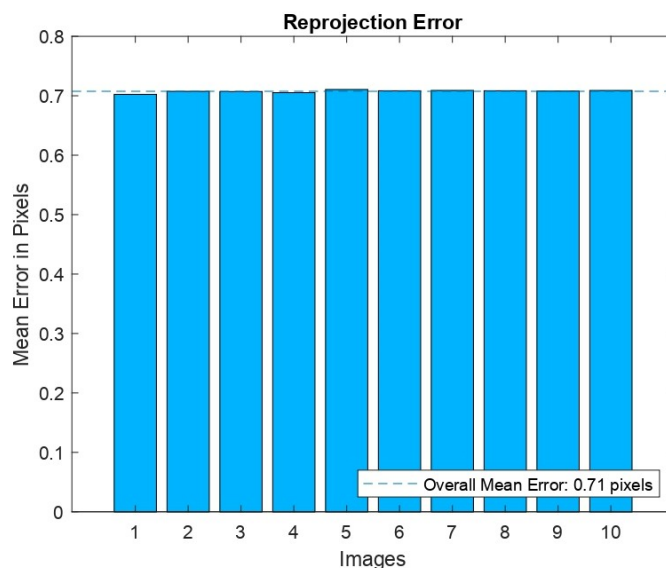


Figura 3.14: Errore di riproiezione derivante dall'analisi di dieci immagini di calibrazione.

coordinate di riferimento mediante la funzione `generateCheckerboardPoints`.

Una volta ricavati tutti i parametri necessari per la calibrazione, è stato possibile utilizzarli in un altro script per correggere i vari frame di cui è composto ogni video, ed eseguirne quindi l'analisi per ricavare le velocità di ogni oggetto. Nello script, ogni video è suddiviso in frame, e ognuno di questi è analizzato singolarmente. Il frame è corretto utilizzando i parametri di calibrazione ricavati in precedenza mediante il comando `undistortImage` e successivamente binarizzato mediante il comando `imbinarize`. Quest'ultimo comando non fa altro che trasformare il frame originale registrato in scala di grigi in un'immagine binaria (la cui matrice è costituita da 0 e 1, dove 0 rappresenta il nero mentre 1 il bianco). Data la presenza dei marker bianchi, precedentemente applicati sugli oggetti da tracciare, questi vengono visualizzati, mentre il restante contenuto dell'immagine viene oscurato (se ne veda un esempio in Figura 3.15). I marker non sono altro che delle aree bianche, e utilizzando la funzione di Matlab `vision.BlobAnalysis` è possibile individuarle e tracciarle. In particolare, fornendo come input della funzione l'immagine e l'intervallo di estensione delle aree d'interesse che si vuole tracciare (valore di area minima e massima), questa fornisce la stima del centro

di ogni area tracciata espressa in coordinate x e y . A questo punto quindi conoscendo la quota x di ogni singolo marker e il tempo che intercorre tra un frame e il successivo, è immediato il calcolo della velocità dell'oggetto di cui si vuole tenere traccia.



Figura 3.15: In questa immagine è possibile visualizzare ciò che produce lo script di Matlab per l'analisi video: a destra il frame video binarizzato in cui sono visibili solo i marker applicati agli oggetti che s'interessa tracciare. A sinistra invece è presentato il frame originale corretto dalle distorsioni della telecamera in cui vengono identificati i marker.

Per determinare la bontà dello script realizzato e valutare che le misurazioni effettuate fossero corrette, si è provveduto a stimare il diametro del marker a partire da un singolo frame video. Il risultato di questa misurazione è stato che il diametro del marker ricavato dall'immagine risultava pari a 5,97 mm. Considerando che il diametro effettivo era pari a 6,2 mm il risultato è da considerarsi accettabile. Le misure ricavate dallo script video per il calcolo delle velocità sono quindi accurate e attendibili.

Capitolo 4

Studio del comportamento dell'end-effector

4.1 Prove effettuate

Per valutare l'efficacia dell'end-effector, le prove sono state eseguite prendendo in considerazione differenti configurazioni. Si sono utilizzati diversi campioni di massa e differenti altezze del meccanismo bistabile, in modo da variare il precarico della molla, e infine leggi di moto differenti. In particolare, il moto imposto è stato quello di far percorrere al robot una traiettoria rettilinea con legge di moto trapezoidale ma, ad urto avvenuto, il robot doveva arrestarsi completamente oppure continuare il suo moto a velocità ridotta. Questo è stato utile per valutare il comportamento del sistema in differenti condizioni di utilizzo. Per ogni configurazione sono state eseguite dieci prove ripetute, in modo da ottenere un numero sufficiente di dati, svolgere un'analisi la più accurata possibile e per valutare la ripetibilità dei risultati. A tale scopo, il componente da colpire, per ogni prova, è stato posizionato ad una distanza nota e costante pari a 0,35 m lungo l'asse y. Questa distanza è stata calcolata a partire dalla posizione iniziale dell'end-effector, posizione che in coordinate cartesiane era identificata dal punto [480,358,251]. Tale posizione è stata ritenuta ottimale in quanto a questa distanza dal punto d'inizio del moto, il robot aveva già terminato la sua fase di accelerazione e si trovava nella condizione di velocità massima imposta.

Le prime prove sono state portate a termine in assenza di meccanismo bistabile, ciò significa che l'urto avveniva tra due corpi idealmente rigidi. Queste prove preliminari sono state necessarie per ottenere dei dati iniziali di riferimento in merito alle velocità raggiunte dalle differenti masse colpite, da cui era possibile poi partire per fare le dovute considerazioni. Per ogni pezzo avente massa differente, sono state effettuate dieci prove, in cui il robot accelerava di moto uniformemente accelerato con accelerazione pari a $5 \frac{m}{s^2}$ fino al raggiungimento della velocità di $1 \frac{m}{s}$, velocità con cui venivano colpite poi i differenti pezzi. Per le configurazioni con meccanismo bistabile attivo invece, le tabelle seguenti presentano tutte le prove effettuate per ogni massa. In tabella vengono riportate: la massa del pezzo sottoposto alla prova m , l'accelerazione imposta al robot a , la decelerazione $-a$ e la velocità dopo l'urto v e, infine, le altezze del meccanismo bistabile. I valori di massa dei pezzi utilizzati per le prove sono da intendersi dovuti alla somma di due masse differenti: un valore di massa costante per tutte le prove pari a 0,024 kg, attribuita al carrello scorrevole su cui è montato solidale ad esso il pezzo da colpire e la massa del pezzo stesso. I valori di massa dei pezzi utilizzati possedevano un valore differente per ogni configurazione, rispettivamente pari a: 0,112, 0,190, 0,312 e 0,425 kg. Per quanto riguarda i valori di decelerazione e di velocità raggiunte dopo l'urto sono stati scelti in maniera arbitraria, in modo da testare differenti condizioni di utilizzo.

m [kg]	a $\frac{m}{s^2}$	-a $\frac{m}{s^2}$	v $\frac{m}{s}$	H [mm]
0,136	5	2	0,5	53
				49
				45
0,136	5	2	0	53
				49
				45
0,136	5	5	0,5	53
				49
				45
0,136	5	5	0	53
				49
				45
0,136	5	7	0,5	53
				49
				45
0,136	5	7	0	53
				49
				45
0,136	5	9	0,5	53
				49
				45
0,136	5	9	0	53
				49
				45

Tabella 4.1: Tabella in cui sono presentate le prove effettuate con l'end-effector munito di meccanismo bistabile. La massa del pezzo colpito è pari a 0,136 kg.

m [kg]	a $\frac{m}{s^2}$	-a $\frac{m}{s^2}$	v $\frac{m}{s}$	H [mm]
0,214	5	2	0,5	53
				49
				45
0,214	5	2	0	53
				49
				45
0,214	5	5	0,5	53
				49
				45
0,214	5	5	0	53
				49
				45
0,214	5	7	0,5	53
				49
				45
0,214	5	7	0	53
				49
				45
0,214	5	9	0,5	53
				49
				45
0,214	5	9	0	53
				49
				45

Tabella 4.2: Tabella in cui sono presentate le prove effettuate con l'end-effector munito di meccanismo bistabile. La massa del pezzo colpito è pari a 0,214 kg.

m [kg]	a $\frac{m}{s^2}$	-a $\frac{m}{s^2}$	v $\frac{m}{s}$	H [mm]
0,336	5	2	0,5	53
				49
				45
0,336	5	2	0	53
				49
				45
0,336	5	5	0,5	53
				49
				45
0,336	5	5	0	53
				49
				45
0,336	5	7	0,5	53
				49
				45
0,336	5	7	0	53
				49
				45
0,336	5	9	0,5	53
				49
				45
0,336	5	9	0	53
				49
				45

Tabella 4.3: Tabella in cui sono presentate le prove effettuate con l'end-effector munito di meccanismo bistabile. La massa del pezzo colpito è pari a 0,336 kg.

m [kg]	a $\frac{m}{s^2}$	-a $\frac{m}{s^2}$	v $\frac{m}{s}$	H [mm]
0,449	5	2	0,5	53
				49
				45
0,449	5	2	0	53
				49
				45
0,449	5	5	0,5	53
				49
				45
0,449	5	5	0	53
				49
				45
0,449	5	7	0,5	53
				49
				45
0,449	5	7	0	53
				49
				45
0,449	5	9	0,5	53
				49
				45
0,449	5	9	0	53
				49
				45

Tabella 4.4: Tabella in cui sono presentate le prove effettuate con l'end-effector munito di meccanismo bistabile. La massa del pezzo colpito è pari a 0,449 kg.

Per quanto riguarda le altezze, invece, anche queste sono state scelte in modo arbitrario. Tuttavia, è stato tenuto in considerazione il fatto che la componente orizzontale di forza esercitata dalla molla, dovesse essere sufficiente a mantenere il meccanismo in posizione durante la fase di accelerazione. Nel caso in esame, data una massa complessiva della parte mobile dell'utensile pari a 0,076 kg e un'accelerazione imposta di $5 \frac{m}{s^2}$, la componente di forza orizzontale minima da garantire risulta di 0,38 N. Per completezza vengono presentate in Tabella 4.5 le componenti di forza orizzontale esercitate dalla molla per le varie configurazioni utilizzate. Le forze sono calcolate con il meccanismo che si trova nella posizione di fine corsa, posizione che garantisce il valore massimo di tale componente.

H [mm]	F_x [N]
53	1,11
49	1,85
45	2,70

Tabella 4.5: Tabella in cui sono riportati i valori delle componenti orizzontali di forza esercitate dalla molla per le varie altezze utilizzate per compiere le prove.

4.2 Risultati

4.2.1 End-effector in assenza di meccanismo bistabile

I dati di riferimento, ricavati a partire dalle analisi video effettuate sulla configurazione dell'end-effector in assenza di meccanismo bistabile, sono presentati in Tabella 4.6.

È importante tenere in considerazione che, anche se non è presente il meccanismo bistabile, l'impatto tra la paletta e il pezzo, non è perfettamente rigido a causa della flessibilità intrinseca dei componenti. Tale flessibilità, è dovuta principalmente ai giochi presenti nei collegamenti tra gli elementi costituenti la parte mobile a cui è collegata la paletta, e alla flessibilità di quest'ultima. Infatti, data l'elevata estensione della paletta lungo la direzione perpendicolare al piano

massa [kg]	velocità massa [$\frac{m}{s}$]
0,136	1,76±0,01
0,214	1,80±0,14
0,336	1,74±0,04
0,449	1,66±0,02

Tabella 4.6: Tabella in cui sono riportati i valori delle velocità raggiunte relative alla massa colpita in assenza di meccanismo bistabile. I valori presentati si riferiscono ai valori medi ricavati dall'analisi delle dieci prove effettuate per ogni massa. La velocità media d'impatto, pari quindi a quella posseduta dal robot, è pari a $1,01 \pm 0,02 \frac{m}{s}$.

di scorrimento, la paletta stessa agisce come un elemento elastico. La paletta, flettendosi durante il contatto con il pezzo, accumula energia derivante dalla sua deformazione, e ne restituisce una parte al pezzo che va a colpire. Questo andamento può essere osservato direttamente dal grafico in Figura 4.1, in cui si possono osservare i due picchi di velocità: il primo determinato dalla paletta che si flette in direzione opposta al moto quando entra a contatto con il pezzo mentre, il secondo, in cui la paletta restituisce l'energia mentre ritorna alla sua condizione indeformata. In questa seconda fase il pezzo viene quindi accelerato in direzione concorde al moto. Il picco di velocità della paletta che si osserva dopo la fase di decelerazione, è dovuto al movimento della paletta stessa. Dopo la brusca decelerazione infatti, la paletta scorre lungo la guida e oscilla riacquistando velocità, dando luogo all'andamento mostrato in grafico. Ciò avviene perché per effettuare queste, prove il meccanismo veniva disattivato andando a posizionare la paletta direttamente al fincorsa opposto alla direzione del moto.

In questa particolare configurazione, in cui non è presente il meccanismo bistabile, quando il pezzo viene urtato, è accelerato in maniera molto rapida, raggiungendo velocità al picco di valore quasi doppio rispetto alla velocità con cui avviene l'impatto. L'andamento della velocità dell'oggetto colpito è pari a quello visibile in Figura 4.1. Il grafico in questione è riferito alla massa di 0,136 kg, ma il trend può essere esteso anche per tutte le altre masse sottoposte alla prova.

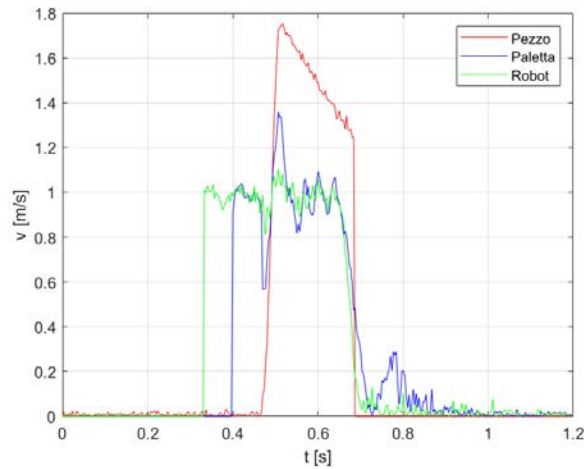


Figura 4.1: Andamento delle velocità in assenza del meccanismo bistabile. Il grafico in questione è riferito alla massa di 0,136 kg.

A partire dal grafico in Figura 4.1, risulta interessante prendere in esame l'andamento della velocità del robot, dal quale è possibile presentare qualche osservazione. Come si può notare, questa oscilla costantemente attorno ad un valore medio, condizione che si presentava anche in 3.2 in cui venivano presentati i grafici delle posizioni di giunto. Il fatto che la velocità del robot oscilli attorno ad un valore medio è derivato dal controllo del robot. Infatti, per il calcolo dei punti della traiettoria ci si affida a Matlab e, il calcolo del punto e il successivo invio, può causare queste oscillazioni. Il robot per cercare di seguire i punti inviati, è costretto ad accelerare e decelerare continuamente per seguire la traiettoria imposta, ciò causa inevitabilmente delle oscillazioni di velocità. Questo andamento si osserva in questo grafico, e in tutti i successivi che verranno presentati e a cui si farà riferimento. Complessivamente, analizzando tutte le prove effettuate in questa configurazione, si può assumere che il valore della velocità media del robot, e quindi la velocità con cui avviene l'impatto, è pari a $1,01 \pm 0,02 \frac{m}{s}$.

A partire dai risultati ottenuti e riportati in Tabella 4.6, si può osservare che le velocità raggiunte dalle differenti masse in assenza di meccanismo bistabile risultano molto simili tra loro, anche se è possibile notare una tendenza decrescente di velocità al crescere della massa colpita. Questo andamento può essere facilmente osservato nel grafico in Figura 4.2. Ciò rispecchia l'intuizione fisica del fenomeno:

tanto più la massa è elevata, tanto più risulta difficile da spostare poiché oppone maggiore resistenza al moto. La parte di energia cinetica che si esplica durante l'impatto, viene dissipata in attrito e in deformazione nei componenti che partecipano all'urto, e questa quantità di energia è tanto maggiore quanto maggiore è la massa in gioco. Ciò si traduce in una minore velocità raggiunta dopo l'impatto dalla massa colpita. Andamento tuttavia incoerente con il pezzo avente massa minore, il quale presenta una velocità dopo l'urto inferiore rispetto al pezzo di massa pari a 0,214 kg.

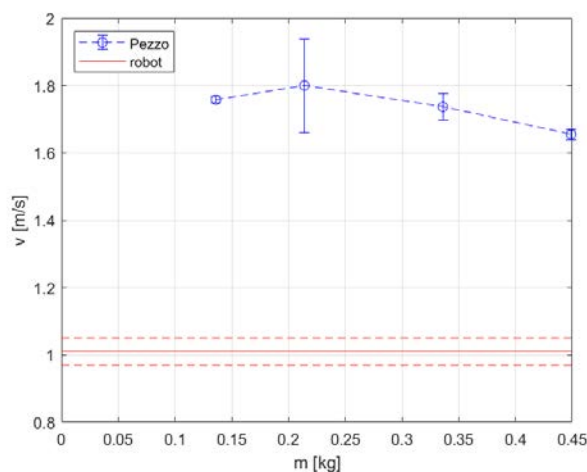


Figura 4.2: Andamento delle velocità delle masse colpite in relazione alla velocità media del robot al momento dell'impatto. Tutti i valori sono rappresentati con le relative bande d'incertezza.

4.2.2 End-effector con la presenza del meccanismo bistabile

Le prove effettuate con la presenza del meccanismo bistabile sono state effettuate andando a variare differenti parametri, in modo da valutare l'effettiva efficacia del meccanismo e la configurazione che avrebbe potuto fornire il risultato migliore.

Una volta analizzati tutti i video e ottenuto gli andamenti di velocità riferiti al pezzo compito, della paletta e del robot, si è valutata la velocità media di quest'ultimo. Tale valore rappresenta la velocità presa come riferimento alla quale avviene l'impatto, nonché la base da cui partire per fare le opportune considerazioni. Il

valore estrapolato dall'analisi dei dati raccolti è risultato essere pari a $1,11 \pm 0,04 \frac{m}{s}$. La velocità del robot infatti non si manteneva perfettamente costante al valore imposto pari a $1 \frac{m}{s}$, ma oscillava indicativamente tra il valore di 1,07 e $1,15 \frac{m}{s}$. Il valore medio ricavato è da considerarsi complessivamente accettabile, in luogo alle considerazioni fatte anche in precedenza in 4.2.1.

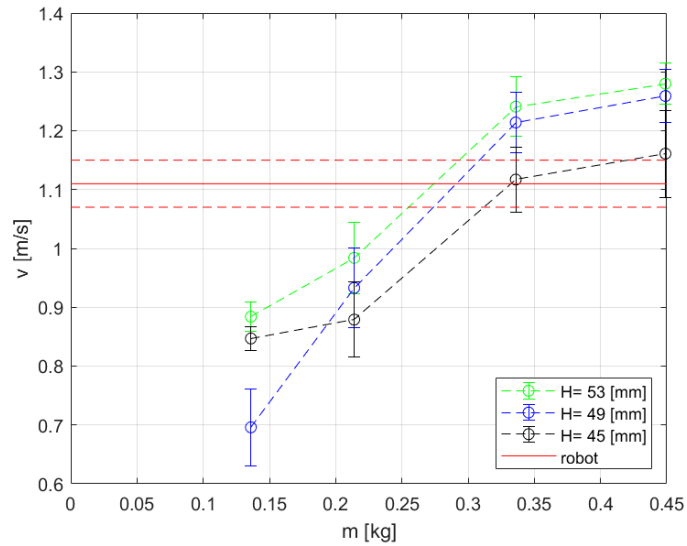
Come prima analisi, si sono valutate le velocità massime raggiunte dal pezzo dopo l'impatto. Per una maggiore comprensione dei risultati questi sono stati inseriti in grafici, questi ultimi presentati in Figura 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6. I risultati in questione sono presentati con le loro relative bande d'incertezza, ricavata con il calcolo della deviazione standard rispetto al risultato medio derivante da tutte le misurazioni effettuate.

Le velocità raggiunte nelle diverse configurazioni, sono state inoltre messe in relazione con la velocità media con cui avveniva l'impatto, velocità quindi posseduta dal robot. Analizzando i risultati ottenuti si può osservare, complessivamente, un andamento di velocità decrescente al diminuire della massa del pezzo colpito e al diminuire dell'altezza del meccanismo. Questo risultato è attribuito al fatto che al diminuire dell'altezza del meccanismo, il precarico a cui è soggetta la molla aumenta, rendendo meno cedevole il meccanismo bistabile. La sopracitata condizione, porta inevitabilmente ad assorbire una quantità di energia derivante dall'urto maggiore per far scattare il meccanismo, e ciò comporta una velocità inferiore del componente raggiunta dopo l'urto.

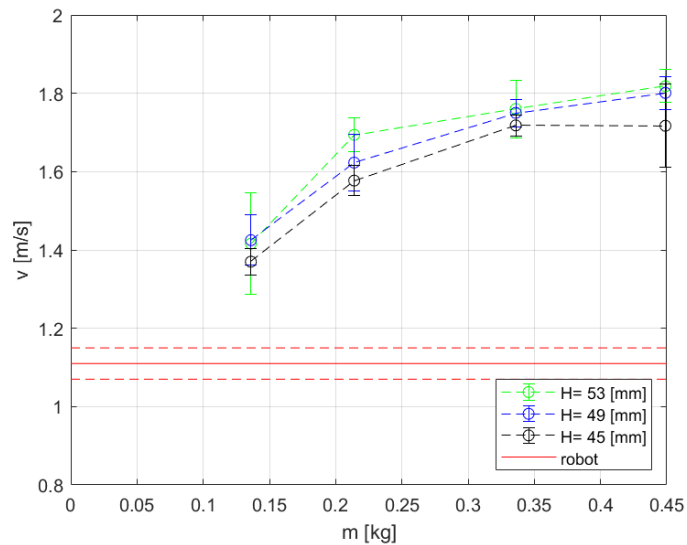
Nelle prove in cui la velocità imposta al robot dopo l'urto corrisponde a $0,5 \frac{m}{s}$ (grafico (a) Figura 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6), si può constatare dai grafici che: per qualsiasi altezza del meccanismo bistabile, per qualsiasi valore di decelerazione utilizzata e per qualsiasi massa colpita, le velocità raggiunte dopo l'urto risultano inferiori rispetto alla condizione in assenza del meccanismo bistabile. I risultati migliori si ottengono però solamente quando si colpiscono le masse di 0,136 e 0,214 kg infatti, in tutte le configurazioni a cui si fa ora riferimento, le velocità da esse raggiunte risultano sempre inferiori rispetto alla velocità a cui avviene l'impatto, segno dell'efficacia nell'utilizzare il dispositivo. Per la massa di 0,336 kg i risultati paragonabili a quelli appena descritti si ottengono solamente con il meccanismo impostato alla quota H di 45 mm, e non quando si impone una

decelerazione di $2 \frac{mm}{s^2}$. Nelle configurazioni ora prese in esame, si osserva inoltre un altro comportamento insolito. Mentre l'andamento generale impone che al diminuire della quota H la velocità dopo l'urto diminuisca, ciò non accade per la massa più leggera. In questa condizione, la velocità raggiunta dal pezzo dopo l'urto con un'altezza H di 45 mm risulta superiore rispetto a quella raggiunta con un'altezza di 49 mm. Da quanto detto emerge che nel caso di masse pari a 0,136 kg e di velocità dopo l'urto pari a $0,5 \frac{m}{s}$, la configurazione migliore del meccanismo bistabile è quella avente la quota H pari a 49 mm. Per tutte le altre masse, invece, risulta favorevole la quota pari a 45 mm. Tuttavia, per la massa più elevata di 0,449 kg, anche questa configurazione non è sufficiente a garantire una velocità dopo l'urto inferiore a quella a cui avviene l'impatto.

Analizzando invece la configurazione che impone l'arresto del robot dopo l'urto, si ottengono risultati differenti. In queste condizioni infatti è necessario distinguere in modo più netto le varie prove effettuate. Il risultato in assoluto peggiore si osserva per la configurazione in cui si utilizza una decelerazione pari a $2 \frac{m}{s^2}$ (Figura 4.3 (b)), dove le velocità raggiunte dalle masse colpite sono pressoché paragonabili a quelle raggiunte in assenza del meccanismo bistabile. Un risultato migliorativo si ottiene per la massa di 0,136 kg, in cui la velocità raggiunta è inferiore rispetto alla condizione in assenza del meccanismo bistabile, ma risulta in ogni caso superiore rispetto alla velocità con cui avviene l'impatto. Il medesimo risultato si ottiene quando si impone una decelerazione pari a $5 \frac{m}{s^2}$ (Figura 4.4 (b)). Infatti anche in questo caso, per tutte le masse, le velocità raggiunte risultano molto elevate ad eccezione della massa di 0,136 kg. Per quanto riguarda invece le decelerazioni più rapide, ossia pari a 7 e $9 \frac{m}{s^2}$ (grafico (b) Figura 4.5 e 4.6), si ottengono i medesimi risultati, tuttavia per la massa di 0,136 kg si ottengono velocità anche inferiori rispetto alla velocità a cui avviene l'impatto.

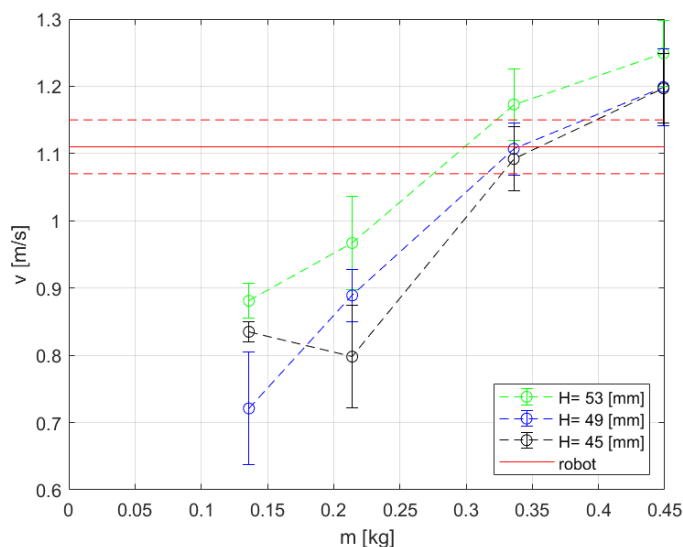


(a)

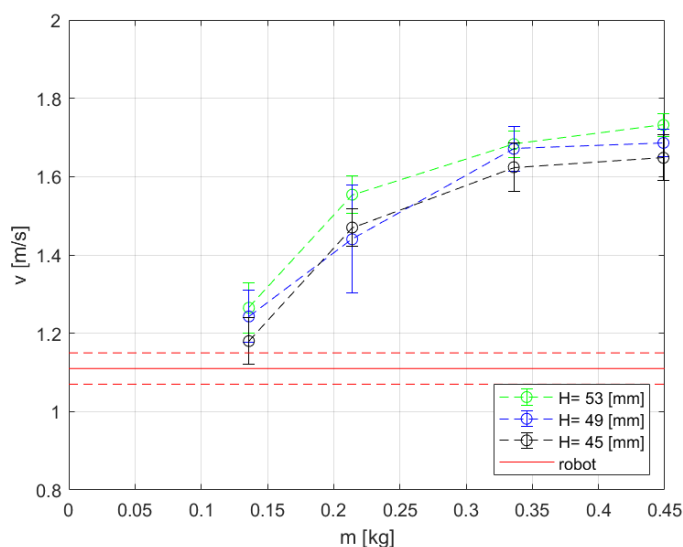


(b)

Figura 4.3: Velocità massime raggiunte dopo l'urto dai pezzi colpiti in relazione alla loro massa. Gli andamenti delle velocità sono in funzione dell'altezza del meccanismo bistabile. Le velocità raggiunte sono messe in relazione con la velocità media del robot al momento dell'impatto. Tutti i valori sono rappresentati con le relative bande d'incertezza. In questo caso la decelerazione imposta dopo l'urto è pari a $2 \frac{m}{s^2}$, le velocità dopo l'urto sono pari a $0,5 \frac{m}{s}$ (a) e $0 \frac{m}{s}$ (b).

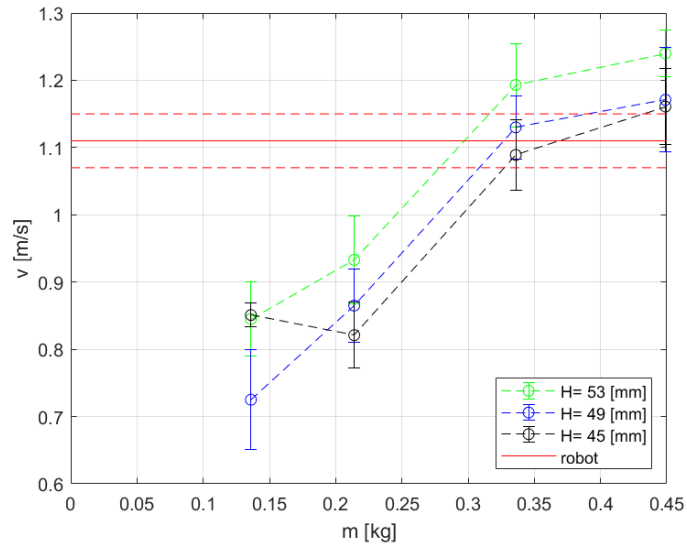


(a)

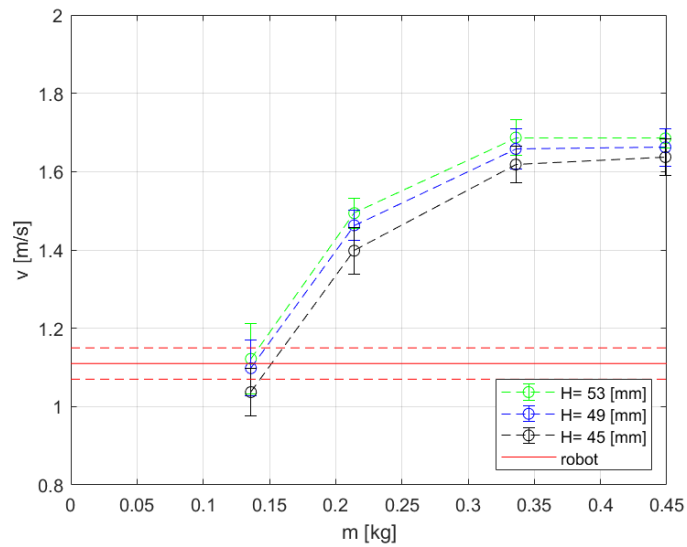


(b)

Figura 4.4: Velocità massime raggiunte dopo l'urto dai pezzi colpiti in relazione alla loro massa. Gli andamenti delle velocità sono in funzione dell'altezza del meccanismo bistabile. Le velocità raggiunte sono messe in relazione con la velocità media del robot al momento dell'impatto. Tutti i valori sono rappresentati con le relative bande d'incertezza. In questo caso la decelerazione imposta dopo l'urto è pari a $5 \frac{m}{s^2}$, le velocità dopo l'urto sono pari a $0,5 \frac{m}{s}$ (a) e $0 \frac{m}{s}$ (b).

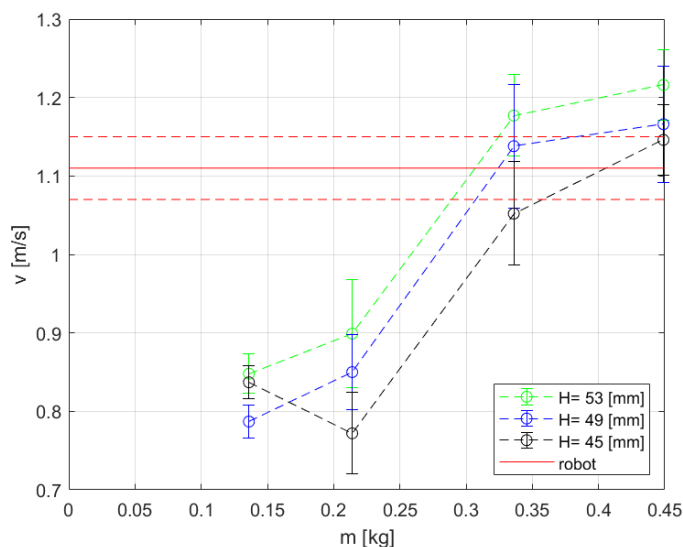


(a)

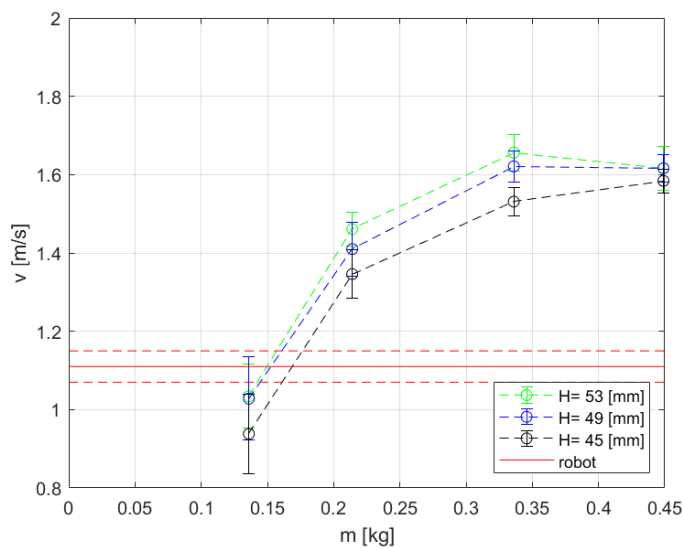


(b)

Figura 4.5: Velocità massime raggiunte dopo l'urto dai pezzi colpiti in relazione alla loro massa. Gli andamenti delle velocità sono in funzione dell'altezza del meccanismo bistabile. Le velocità raggiunte sono messe in relazione con la velocità media del robot al momento dell'impatto. Tutti i valori sono rappresentati con le relative bande d'incertezza. In questo caso la decelerazione imposta dopo l'urto è pari a $7 \frac{m}{s^2}$, le velocità dopo l'urto sono pari a $0,5 \frac{m}{s}$ (a) e $0 \frac{m}{s}$ (b).



(a)



(b)

Figura 4.6: Velocità massime raggiunte dopo l'urto dai pezzi colpiti in relazione alla loro massa. Gli andamenti delle velocità sono in funzione dell'altezza del meccanismo bistabile. Le velocità raggiunte sono messe in relazione con la velocità media del robot al momento dell'impatto. Tutti i valori sono rappresentati con le relative bande d'incertezza. In questo caso la decelerazione imposta dopo l'urto è pari a $9 \frac{m}{s^2}$, le velocità dopo l'urto sono pari a $0,5 \frac{m}{s}$ (a) e $0 \frac{m}{s}$ (b).

Per valutare i comportamenti osservati, è interessante svolgere un'analisi in merito allo spazio necessario al robot per decelerare dalla condizione di velocità massima, al valore imposto dopo l'urto. Lo spazio percorso può essere calcolato utilizzando l'equazione 4.2 una volta noto il tempo impiegato dalla decelerazione, calcolato con l'equazione 4.1. I risultati ottenuti sono presentati in Tabella 4.7.

$$\Delta t = \frac{v_{min} - v_{max}}{-a} \quad (4.1)$$

$$\Delta x = \frac{1}{2} \Delta t |v_{max} - v_{min}| \quad (4.2)$$

-a [$\frac{m}{s^2}$]	v_{max} [$\frac{m}{s}$]	v_{min} [$\frac{m}{s}$]	Δx [mm]
2	1,01	0,5	65
		0	255
5	1,01	0,5	26
		0	102
7	1,01	0,5	19
		0	73
9	1,01	0,5	14,5
		0	57

Tabella 4.7: Tabella in cui si riportano gli spazi per corsi in decelerazione necessari al robot per passare dalla velocità massima, alla velocità imposta dopo l'urto.

Ai risultati presentati in Tabella 4.7, è tuttavia necessario sommare un'ulteriore quantità di spazio percorso dal robot. Questa quantità deriva dal ritardo che si manifesta tra l'istante in cui scatta il sensore induttivo, e l'istante in cui il robot inizia la sua fase di decelerazione. Infatti, tra quando la paletta comincia a spostarsi dal fincorsa in seguito all'urto, e l'istante in cui il robot riceve il comando di decelerare, intercorre un intervallo di tempo non trascurabile. Analizzando tutte le prove, e utilizzando l'istante di tempo identificato da Matlab in cui avviene l'impatto, è stato possibile ricavare un tempo medio pari a 0,06 s, valore che tiene già in considerazione che la corsa necessaria a far scattare il sensore

è pari a circa 2 mm. Segue, che lo spazio percorso dal robot in questo lasso di tempo è pari a circa 67 mm, valore calcolato considerando la velocità media del robot pari a $1,11 \frac{m}{s}$. Sommando questa quantità, indicata con $\Delta x_{sensore}$, ai valori precedentemente calcolati, si ottengono i risultati presentati in Tabella 4.8.

$-a \left[\frac{m}{s^2} \right]$	$v_{max} \left[\frac{m}{s} \right]$	$v_{min} \left[\frac{m}{s} \right]$	$\Delta x + \Delta x_{sensore} \text{ [mm]}$
2	1,01	0,5	132
		0	322
5	1,01	0,5	93
		0	169
7	1,01	0,5	86
		0	140
9	1,01	0,5	81,5
		0	124

Tabella 4.8: Tabella in cui si riportano lo spazio percorso in decelerazione necessario al robot, tenendo in considerazione anche il tempo di risposta del sensore.

Come si può osservare, in tutte le configurazioni lo spazio necessario a raggiungere la velocità imposta dopo l'urto risulta sempre superiore alla corsa del meccanismo bistabile, pari a 40 mm. Segue che, durante l'impatto, la paletta comincia a scorrere verso il finecorsa opposto alla direzione del moto, smorzando l'urto sia con il cedimento del meccanismo, sia con la flessibilità della paletta. Tuttavia, al raggiungimento del finecorsa, il robot non si trova alla velocità ridotta imposta, ma sicuramente ad un valore superiore. Segue che, gli istanti successivi al fenomeno d'urto, si svolgono ad una velocità inferiore a quella a cui avviene l'impatto, ma comunque ad un valore elevato, dato che il robot non ha ancora terminato la sua fase di decelerazione. Ciò è la causa dei valori elevati di velocità del componente che si osservano dopo l'urto. Sempre dai valori presentati in Tabella 4.8, si può osservare che le condizioni che richiedono uno spazio maggiore sono le stesse in cui si osservano le velocità raggiunte dopo l'urto più elevate. Per migliorare questo comportamento, una soluzione sarebbe dunque quella di

incrementare la corsa utile del meccanismo bistabile. Così facendo si darebbe modo al robot di raggiungere la velocità imposta dopo l'urto quando l'utensile raggiunge il finecorsa. Questo comportamento può essere osservato andando a visualizzare l'andamento completo delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito. Da questi grafici è facile osservare quanto detto fino ad ora ma, per una maggiore comprensione, è necessario fornire qualche spiegazione. Come esempio si prende in riferimento il grafico in Figura 4.7. In figura è presentato l'andamento delle velocità del robot, della paletta e del pezzo, avente massa pari a 0,136 kg. La decelerazione imposta al robot, fino al suo completo arresto dopo l'urto, è pari a $7 \frac{mm}{s^2}$ mentre, la quota H del meccanismo è pari a 53 mm. Analizzando per primo l'andamento della paletta si può osservare il punto in cui il pezzo viene urtato (A), causandone la decelerazione fino al raggiungimento della sua velocità minima (B). In concomitanza con questo evento, il pezzo viene accelerato (F) fino a distaccarsi dalla paletta la quale, scorre lungo la guida oltrepassando la metà della corsa (C), e terminando il suo moto al raggiungimento del finecorsa (D). A questo punto la paletta stessa si muove seguendo la legge di moto del robot, raggiunge nuovamente il pezzo, che si trovava nella sua fase di decelerazione, e lo colpisce facendogli raggiungere la velocità massima (G). A questo punto, il pezzo continua il suo moto uniformemente decelerato (causato dagli attriti della guida) fino al suo completo arresto. Il punto a velocità E della paletta potrebbe, a prima vista, sembrare un errore di acquisizione, in realtà questo si raggiunge per via della posizione in cui è stato posto il marker. Infatti, questo è stato posizionato sulla parte flessibile della paletta perciò, a causa della flessione, il punto tracciato si sposta oltre il finecorsa, ciò si traduce nel raggiungimento di una velocità molto elevata, che tuttavia non deve essere tenuta in considerazione. Se il marker fosse stato posizionato direttamente sul carrello, il punto E coinciderebbe esattamente con la velocità del robot. Tuttavia, il posizionamento del marker in una posizione differente rispetto quella ottimale, è stato dettato dalla necessità di coprire la superficie riflettente della guida, in modo che non costituisse una fonte di disturbo durante l'analisi video. Inoltre, in riferimento al grafico in Figura 4.7, si osserva un andamento delle velocità "troncato", in cui non è possibile identificare l'intera traiettoria trapezoidale seguita dal robot e in alcune condizioni anche quella del

pezzo, andamento che si osserverà anche in tutti i grafici che verranno presentati in seguito. La mancanza della traiettoria completa è dovuta al ridotto angolo di ripresa della telecamera industriale utilizzata per i video. L'angolo di ripresa era relativamente piccolo, e se da un lato ciò permetteva di ottenere una minore distorsione dell'immagine, dall'altro ha discriminato la ripresa del solo istante in cui avveniva l'impatto dell'utensile contro il pezzo.

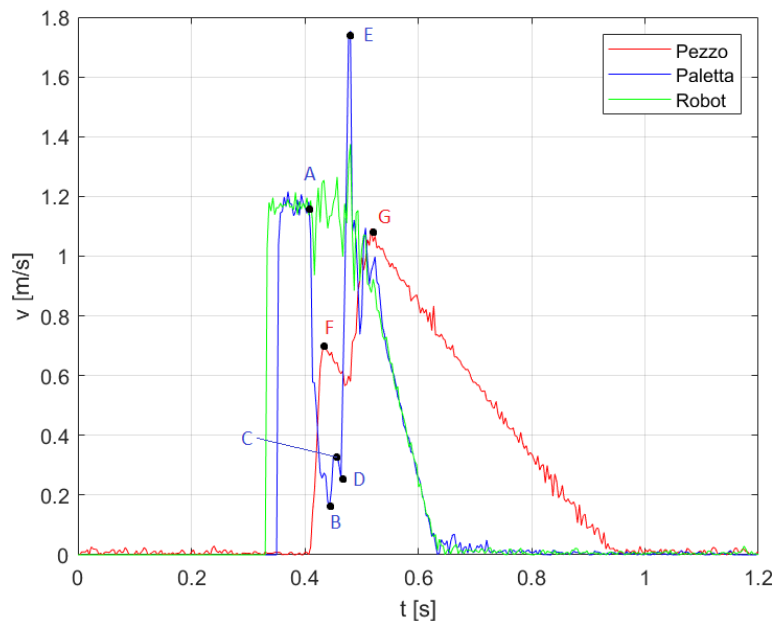


Figura 4.7: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito. La massa del pezzo è pari a 0,136 kg, la decelerazione imposta pari a $7 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

Fatte queste permesse, è possibile analizzare gli andamenti delle velocità nelle varie condizioni di prova. A partire dal grafico appena descritto (Figura 4.7), si può osservare quanto detto in precedenza in riferimento allo spazio necessario al robot per compiere la fase di decelerazione. Analizzando il grafico, e ipotizzando che il punto E coincida con la velocità del robot in quel istante, si osserva che il robot ha appena iniziato la decelerazione, ciò comporta che l'urto avviene ancora ad un velocità particolarmente elevata.

Di seguito verranno presentati alcuni grafici rappresentativi gli andamenti delle velocità ricavati dalle analisi sperimentali. Gli andamenti di velocità sono

inoltre messi a confronto con i corrispettivi andamenti ricavati con il modello sviluppato con il software Simulink.

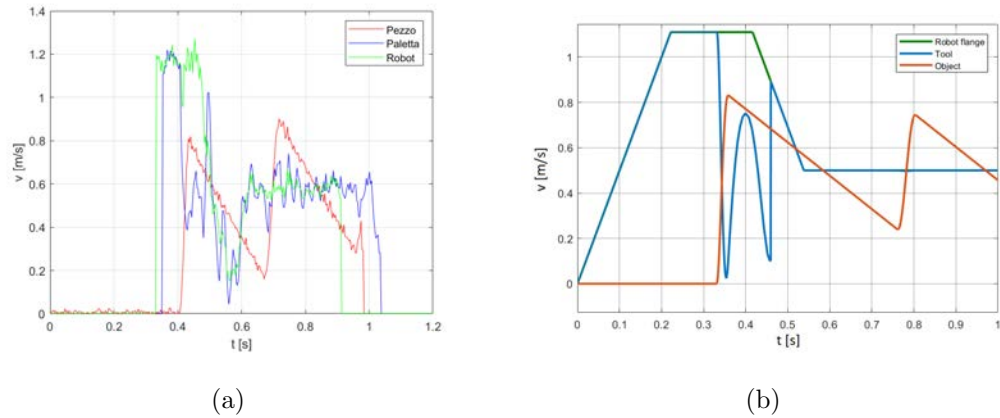


Figura 4.8: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito. La massa del pezzo è pari a 0,136 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 45 mm. La velocità dopo l'urto è pari a $0,5 \frac{m}{s}$.

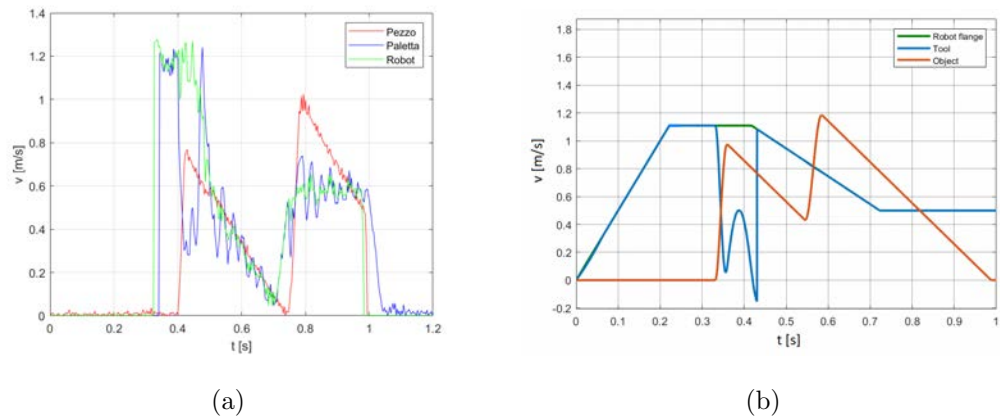


Figura 4.9: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito. La massa del pezzo è pari a 0,136 kg, la decelerazione imposta è pari a $2 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 49 mm. La velocità dopo l'urto è pari a $0,5 \frac{m}{s}$.

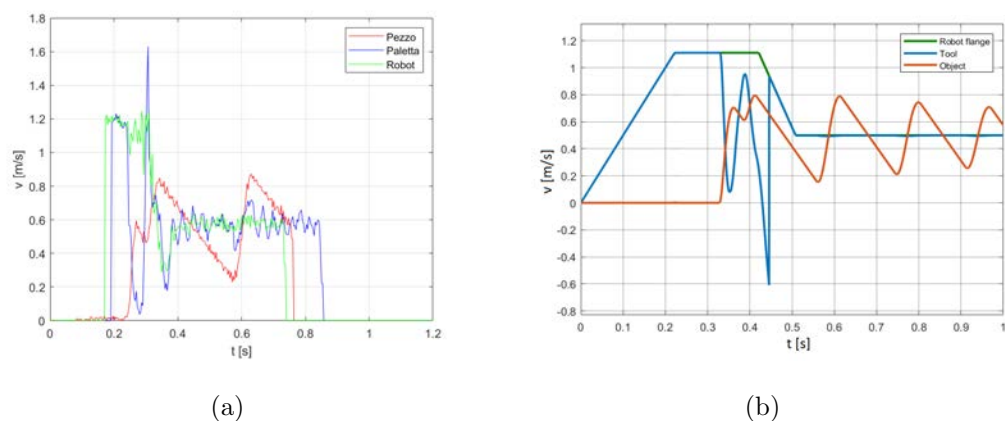


Figura 4.10: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito. La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $9 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 49 mm. La velocità dopo l'urto è pari a $0,5 \frac{m}{s}$.

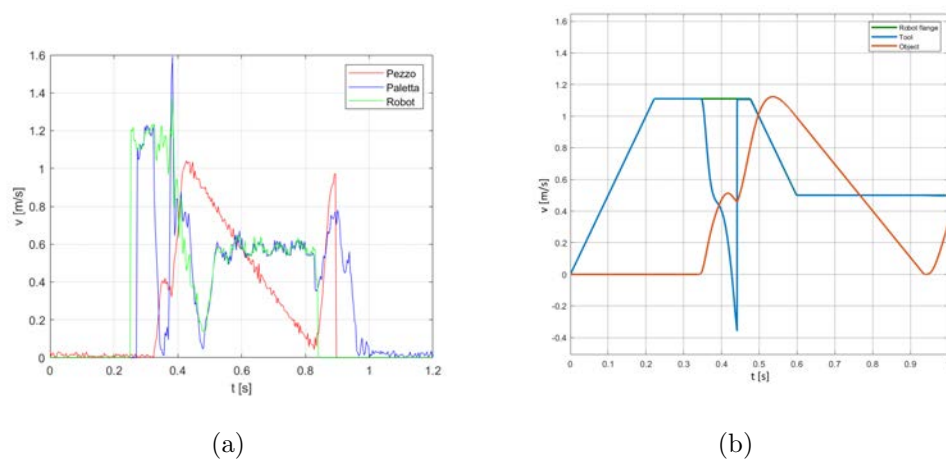


Figura 4.11: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito. La massa del pezzo è pari a 0,336 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 49 mm. La velocità dopo l'urto è pari a $0,5 \frac{m}{s}$.

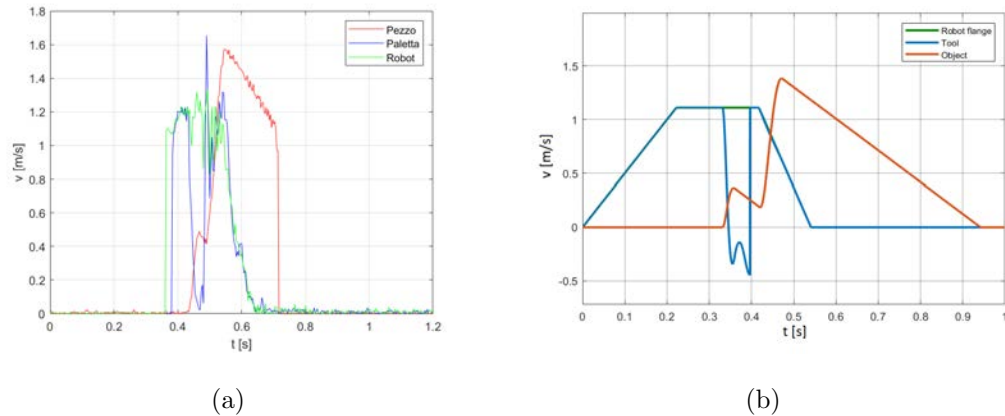


Figura 4.12: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito. La massa del pezzo è pari a 0,449 kg, la decelerazione imposta è pari a $9 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 45 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

Per valutare la ripetibilità dei risultati ottenuti, risulta esemplificativo rappresentare tutti e dieci i grafici degli andamenti delle velocità ricavati sperimentalmente riferiti ad una configurazione. Come esempio si riportano i grafici rappresentanti la configurazione che impone: una decelerazione e una velocità dopo l'urto pari rispettivamente a $5 \frac{m}{s^2}$ e $0 \frac{m}{s}$, un'altezza del meccanismo bistabile pari a 53 mm e un componente da colpire di massa pari a 0,214 kg. I grafici in questione sono presentati in Figura 4.13 e 4.14. In riferimento a tale configurazione risulta opportuno presentare anche il grafico delle velocità ricavato utilizzando il modello implementato in Simulink, Figura 4.15.

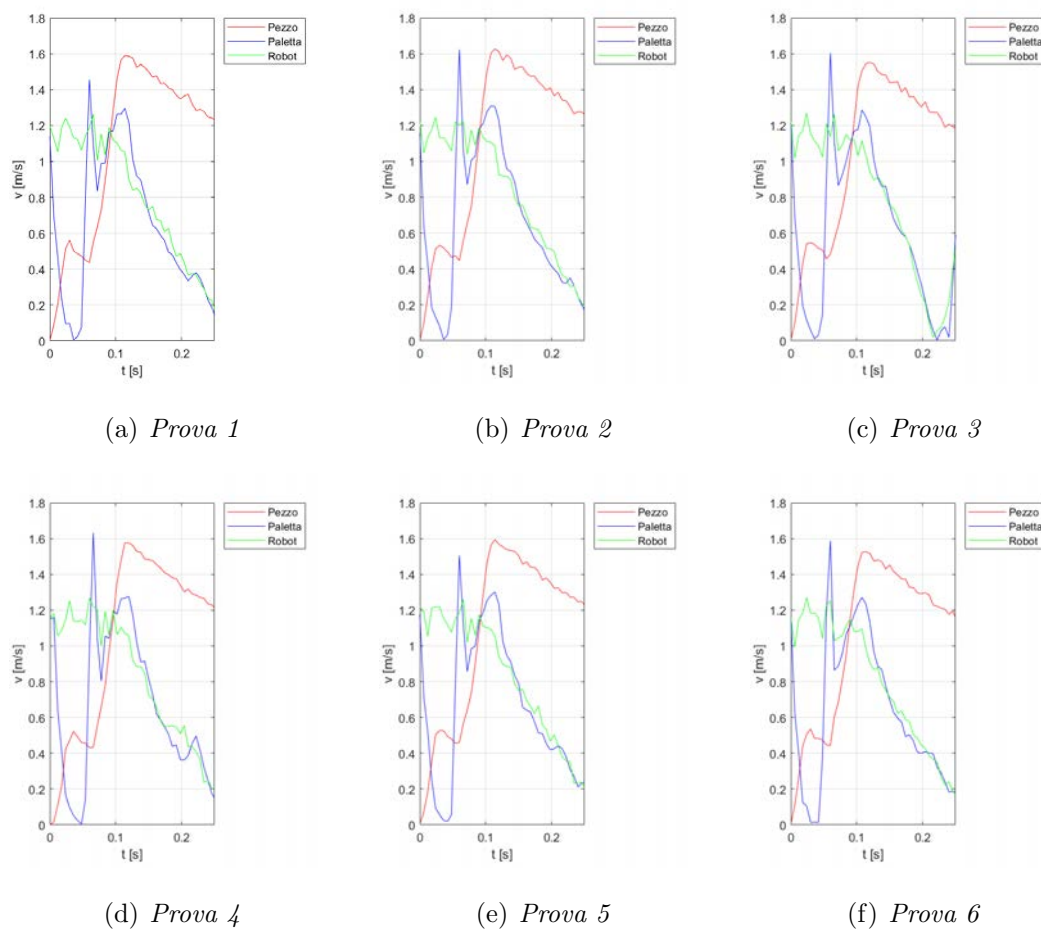
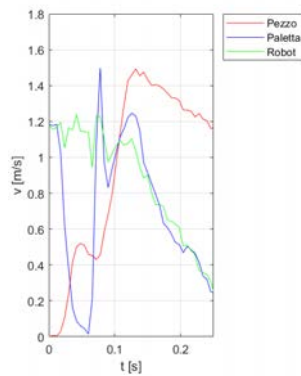
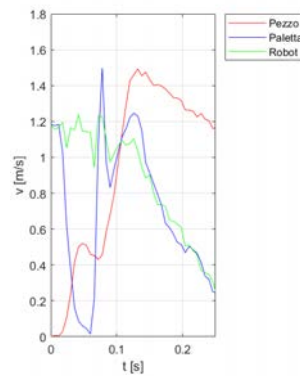


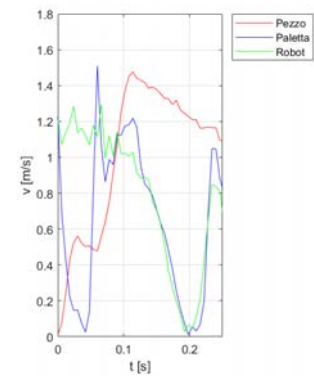
Figura 4.13: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito relative alle prove sperimentali 1-6. La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.



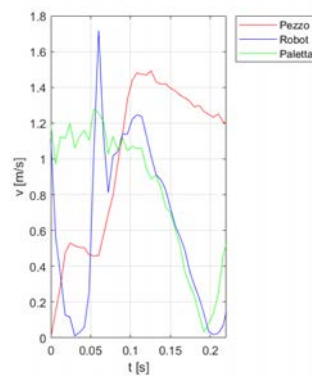
(a) Prova 7



(b) Prova 8



(c) Prova 9



(d) Prova 10

Figura 4.14: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito relative alle prove sperimentali 7-10. La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

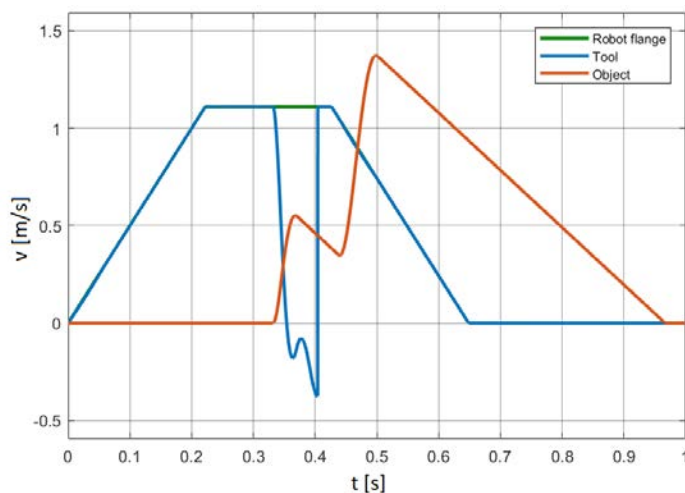


Figura 4.15: Andamento completo delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito ricavate con il modello implementato in Simulink. La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

La prima osservazione che può essere fatta osservando i grafici, è che l'andamento della velocità del pezzo ricavato dalla simulazione con il software Simulink risulta coerente con l'andamento che si osserva a partire dai dati ottenuti con le prove sperimentali. Al contrario, l'andamento dell'utensile non rispecchia appieno l'andamento reale, in quanto per alcune configurazioni si arrivano perfino a velocità della paletta negative, cosa che non si manifesta mai nelle prove reali. Va precisato che per alcune configurazioni i dati inseriti per ricavare l'andamento stimato nella simulazione non coincidono perfettamente con i parametri reali utilizzati, ma sono leggermente differenti. Questo è da considerarsi plausibile, dato che molti fattori che influenzano la realtà non sono considerati nella simulazione, data anche la loro difficoltà ad essere quantificati. Tra i parametri che risultano essere rilevanti, ma non considerati nel modello, risultano gli attriti e i giochi dati dall'accoppiamento dei componenti costituenti l'end-effector. Va tenuto in considerazione inoltre, che i giochi presenti rendono i dati idealmente noti variabili, in quanto possono venire alterati durante il funzionamento dell'end-effector. Tra questi parametri ci può essere l'altezza del meccanismo bistabile ad esempio. Inoltre, nonostante il foro predisposto a far uscire l'aria dal supporto molla

del meccanismo bistabile, il sistema potrebbe comunque funzionare come uno smorzatore, e non solamente come un elemento elastico puro. Si deve prendere in considerazione inoltre che nel modello della simulazione il contatto tra utensile mobile e pezzo avviene lungo l'asse di scorrimento, configurazione non coerente con la realtà. L'end-effector realizzato, infatti, prevedeva l'utilizzo di una paletta montata a sbalzo rispetto l'asse di scorrimento. Questa configurazione spostava il punto di contatto più in basso rispetto all'asse di scorrimento, e introduceva una flessione, e quindi un momento flettente. Nonostante ciò, gli aggiustamenti fatti ai parametri sono da considerarsi trascurabili, e si può ritenere che il modello implementato in Simulink anticipi bene gli andamenti di velocità del pezzo colpito. Quanto detto si può osservare anche dal grafico in Figura 4.17, in cui sono sovrapposti gli andamenti di velocità del pezzo dopo l'urto, ricavati dalle prove sperimentali e dal modello implementato in Simulink. Per quanto riguarda l'andamento della velocità dell'utensile invece, si è scelto di trascurarlo, in quanto essendo un transitorio di velocità risulta molto difficile da simulare, anche in luogo alle considerazioni fatte in precedenza. Detto ciò, i parametri di simulazione sono stati scelti per cercare di ottimizzare il più possibile l'andamento di velocità del pezzo colpito. Per avere un riscontro su quanto detto, in Tabella 4.9 sono presentati i parametri utilizzati per ricavare l'andamento in Figura 4.15. In tabella sono presentati sia i parametri utilizzati e, tra parentesi, i valori reali effettivamente misurati.

In luogo alle osservazioni presentate in precedenza, gli andamenti di velocità dell'utensile invece non sono sempre coerenti con la realtà. Tuttavia, in merito all'obiettivo preposto di questo lavoro di ridurre la velocità del pezzo dopo l'urto, la previsione dell'andamento del pezzo risulta più rilevante rispetto alla previsione dell'andamento dell'utensile. Nel trattarsi di un modello semplificato, in definitiva, il modello risulta valido.

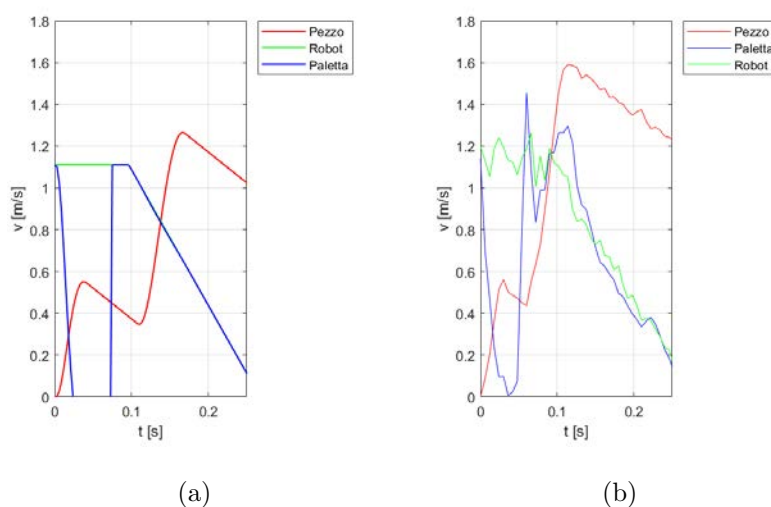


Figura 4.16: Confronto delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito ricavate con il modello implementato in Simulink (a) e ottenuto dalle prove sperimentali (b). La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

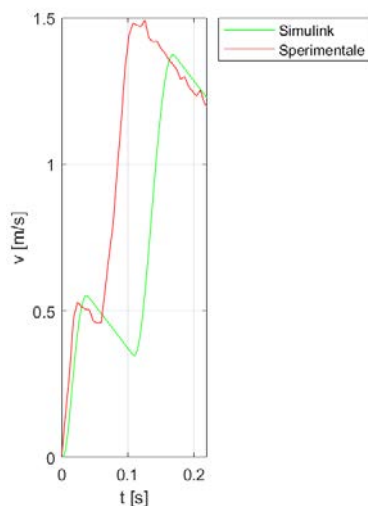


Figura 4.17: Sovrapposizione dell'andamento della velocità del pezzo ricavato con il modello implementato in Simulink e sperimentalmente. La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

		Valore parametro
Velocità robot	$V_r \left[\frac{m}{s} \right]$	1,11
Velocità dopo l'urto	$V_{task} \left[\frac{m}{s} \right]$	0
Accelerazione	$a \left[\frac{m}{s^2} \right]$	5
Decelerazione	$-a \left[\frac{m}{s^2} \right]$	-5
Tempo di reazione del robot	$\Delta t [s]$	0,06
Massa utensile	$m_t [kg]$	0,076
Costante elastica molla	$k \left[\frac{N}{m} \right]$	490
Corsa utensile	$c [m]$	0,038 (0,040)
Altezza meccanismo bistabile	$H [m]$	0,050 (0,053)
Lunghezza a riposo molla	$L_0 [m]$	0,063
Coeff. attrito utensile	$\mu_{utensile}$	0,3 (0,003)
Coeff. attrito pezzo	μ_{pezzo}	0,3 (0,2)
Massa pezzo	$m_p [kg]$	0,214
Coefficiente di restituzione	e	0,85
Rigidezza di contatto	k_c	$0,5 \cdot 10^3$

Tabella 4.9: Valori dei parametri inseriti nel modello in Simulink per ottenere l'andamento di velocità in Figura 4.15. I valori tra parentesi rappresentano i valori reali.

Procedendo con l'analisi di alcuni andamenti delle velocità ricavate sperimentalmente, si può osservare la tendenza al presentarsi di un doppio picco di velocità del pezzo colpito, sinonimo di un doppio urto. Questa particolare condizione si può osservare in numerose configurazioni. In riferimento a quelle qui presentate in Figura 4.10, 4.11 e 4.12. Questo andamento si manifesta perché ad impatto avvenuto i due corpi non si mantengono attaccati, ma il pezzo viene spinto in avanti e, nel medesimo istante la paletta scorre in direzione opposta. A causa della forza esercitata dal meccanismo bistabile la paletta raggiunge autonomamente il finecorsa, a questo punto il sistema raggiunge il pezzo, spingendolo nuovamente in avanti. Questo andamento tuttavia non si manifesta nella configurazione in cui si ha la minima altezza del meccanismo e il pezzo più leggero, in cui si manifesta

un singolo urto. Per migliorare questo comportamento, e ridurre ulteriormente le velocità raggiunte dal pezzo dopo l'impatto, è necessario apportare delle modifiche all'end-effector. In particolare, come ribadito in precedenza, anche in questo caso risulterebbe migliorativo aumentare la corsa utile della paletta, in questo modo è possibile dare tempo al robot di ridurre la propria velocità e portarsi al valore prestabilito. Allo stesso tempo, aumentando la corsa del meccanismo, è possibile fare in modo che il pezzo resti più a lungo a contatto con la paletta e che venga accompagnato più dolcemente in avanti. Apportando queste modifiche, si potrebbe ottenere un'interazione senza il presentarsi del fenomeno del doppio urto, e le velocità raggiunte dovrebbero risultare inferiori rispetto alla condizione attuale. Tuttavia, per mantenere un ingombro contenuto in luogo agli elevati valori di corsa necessari per l'adeguamento del robot alla velocità imposta, è possibile ridurre questi ultimi andando a diminuire il valore di $\Delta x_{\text{sensore}}$. Riducendo la componente di spazio percorso dal robot necessario per accorgersi che il sensore è scattato, si limita anche il valore di corsa utile a raggiungere la velocità imposta. Per fare ciò, bisogna ridurre il tempo che intercorre tra quando la paletta comincia a distaccarsi dal fincorsa e il tempo in cui il cambio di stato del segnale viene rilevato. Allo scopo risulterebbe utile aumentare il tempo di lettura del segnale inviato dal sensore induttivo. A causa dei limiti imposti dal PC utilizzato per le prove, il tempo di lettura è stato impostato a 1 ms. Utilizzando un PC più performante sarebbe possibile portare il tempo di lettura anche ad un valore di dieci volte inferiore, valore che diminuirebbe il tempo di risposta del robot. A fronte di queste considerazioni, segue che apportando queste modifiche sarebbe possibile migliorare ulteriormente i risultati ottenuti.

Si prosegue analizzando l'andamento di velocità del pezzo colpito dopo l'urto. Nelle configurazioni in cui si impone una velocità pari a $0,5 \frac{m}{s}$, si osserva inoltre un andamento a "denti di sega" della velocità del pezzo. Infatti, dopo il picco di velocità, il pezzo viene spinto in avanti e successivamente, a causa degli attriti, tende ad arrestarsi seguendo una legge di moto uniformemente decelerato. Analogamente, dopo l'urto, il robot decelera fino a portarsi alla velocità prestabilita. Il robot successivamente procede a velocità costante e raggiunge nuovamente il pezzo, il quale viene nuovamente accelerato e spinto in avanti. In assenza di ulte-

riori dati si può ipotizzare che il trend presentato possa continuare fintanto che il robot procede lungo il suo moto rettilineo. Questo andamento è dovuto alla condizione che si manifesta: il pezzo non rimane a contatto con la paletta durante e dopo l'urto. Apportando le modifiche sopra elencate, idealmente, sarebbe possibile modificare questo comportamento, facendo in modo che il pezzo segua in maniera più accurata l'andamento di velocità imposto dal robot. Un'altra condizione che sarebbe interessante studiare, è quella di utilizzare una velocità dopo l'urto più bassa di quella utilizzata per eseguire queste prime prove sperimentali. Se in seguito all'urto si imponesse una velocità al robot molto più bassa rispetto ai $0,5 \frac{m}{s}$, in aggiunta alle modifiche sopra citate, sarebbe possibile ottenere un andamento di velocità migliore rispetto a quello attuale. Analizzando i grafici presentati nelle figure precedenti si può osservare che il pezzo, dopo il primo urto, viene nuovamente colpito quando questo si trova ad una velocità di circa $0,1-0,2 \frac{m}{s}$. Da questa osservazione se ne deduce che, se in quell'istante il robot si trova alla medesima velocità, il pezzo viene accompagnato in avanti senza fenomeni d'urto. Ciò produrrebbe un andamento di velocità coerente con il profilo di velocità del robot, e non un andamento a "denti di sega".

Un'ultima osservazione da fare riguarda il comportamento presentato dal robot. Come si può notare dai grafici in cui viene imposta la velocità di $0,5 \frac{m}{s}$ (grafico (a) in Figura 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11), l'andamento della velocità seguito dal robot non rispecchia accuratamente la legge trapezoidale impostata. Infatti, si possono notare dei veri e propri crolli di velocità fino ad un valore nettamente inferiore al valore imposto, che poi aumenta fino al raggiungimento della velocità voluta. Ciò è un'altra causa da imputare alla discrepanza presente tra i risultati ottenuti con il modello implementato in Simulink. Questo crollo di velocità è dovuto presumibilmente al controllo del robot, e alle medesime cause responsabili dell'andamento oscillante della velocità. Tuttavia non si hanno ancora prove certe delle effettive cause che generano tale andamento, studi futuri potrebbero essere svolti in merito.

Per avere un quadro generale dei risultati ottenuti, e visualizzarli con più chiarezza, è utile rappresentare l'effettivo vantaggio che ha una configurazione piuttosto che un'altra nel ridurre la velocità del pezzo dopo l'urto. Per fare ciò, è

utile presentare un grafico in cui in ascissa si ha il valore di decelerazione imposta dopo l'urto mentre, in ordinata, la differenza di velocità tra la velocità raggiunta dal pezzo dopo l'urto in assenza del meccanismo bistabile e con il meccanismo bistabile, espressa in percentuale, relativa ad ogni massa. I valori negativi che si osservano nel grafico in Figura 4.19, stanno ad indicare che le velocità raggiunte in assenza del meccanismo bistabile risultano maggiori rispetto a quelle che si ottengono con il suo utilizzo.

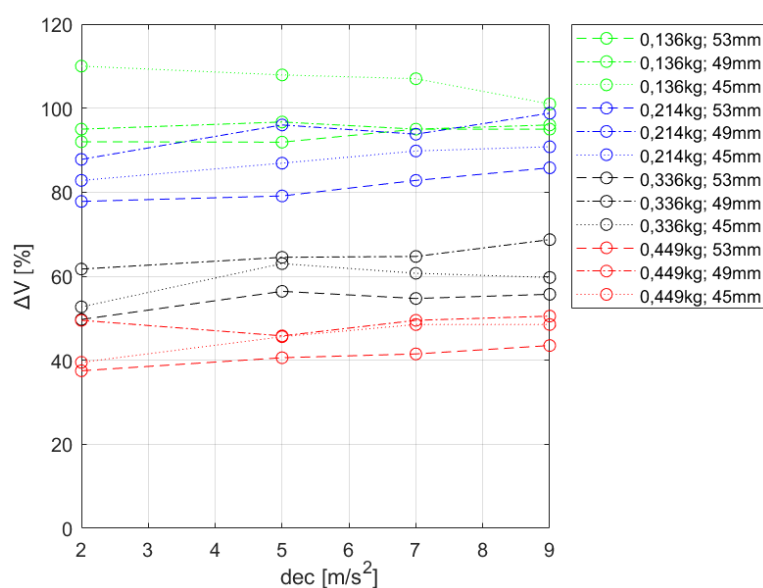


Figura 4.18: Grafico in cui è presentata la differenza tra la velocità senza meccanismo bistabile e con il meccanismo bistabile, raggiunta dal pezzo dopo l'urto, in relazione alla decelerazione imposta. I valori sono calcolati per tutte le configurazioni testate. In questo si tratta della configurazione in cui la velocità dopo l'urto è pari a $0,5 \frac{m}{s}$.

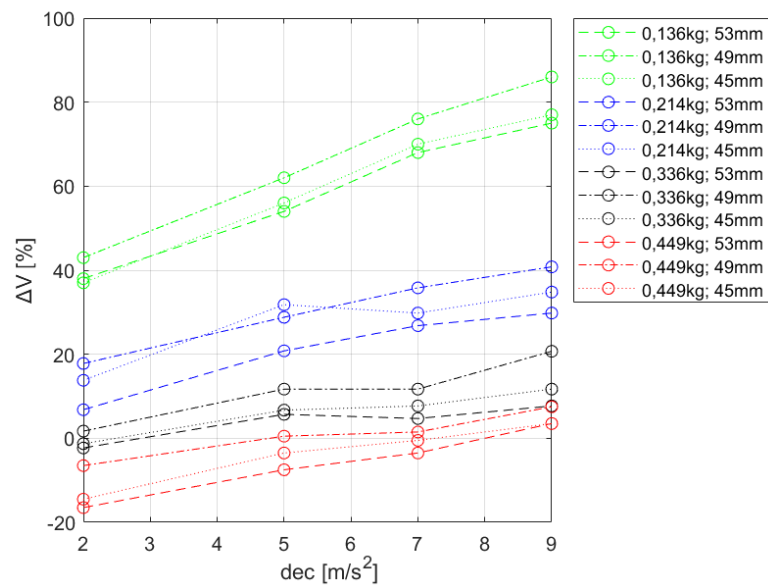


Figura 4.19: Grafico in cui è presentata la differenza tra la velocità senza meccanismo bistabile e con il meccanismo bistabile, raggiunta dal pezzo dopo l'urto, in relazione alla decelerazione imposta. I valori sono calcolati per tutte le configurazioni testate. In questo si tratta della configurazione in cui si impone l'arresto del robot dopo l'urto.

Capitolo 5

Nuovo design dell'end-effector

5.1 Design e realizzazione del nuovo prototipo

A partire dall'analisi dei dati ottenuti con l'utilizzo del primo end-effector, si è realizzato un nuovo prototipo, in cui è stato possibile implementare alcune soluzioni che hanno permesso di migliorarne il design complessivo. Rispetto al precedente il nuovo end-effector risulta più funzionale e compatto. Essendo realizzato a partire da un numero inferiore di componenti, aventi inoltre dimensioni più contenute, è stato possibile realizzarlo andando ad ottimizzare il processo di stampa additiva. I miglioramenti ottenuti in questa fase del processo si ritrovavano nell'utilizzare una minore quantità di materiale e, complessivamente, anche in un minore tempo di stampa. Come per l'end-effector precedente, la progettazione del nuovo prototipo è avvenuta facendo uso del software di modellazione 3D Solidworks. In Figura 5.1 e 5.2, è presentata la configurazione del nuovo prototipo di end-effector.

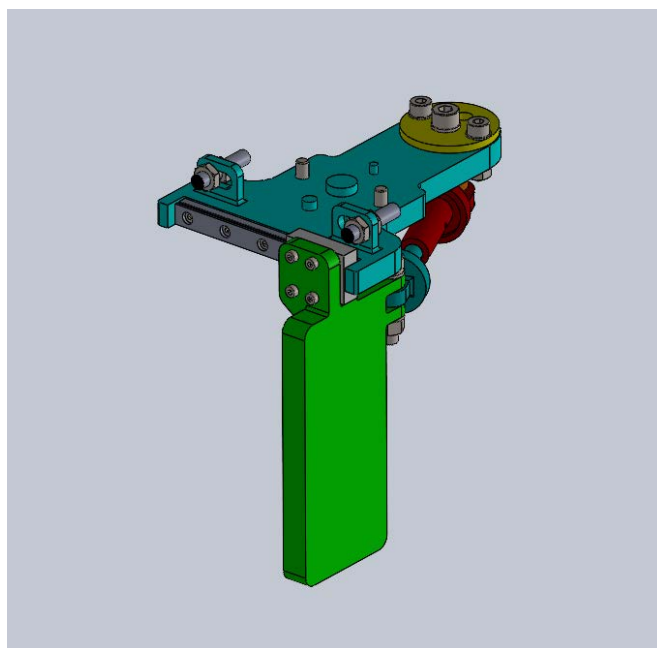
Il nuovo design comprende un corpo centrale, su cui sono collegati tutti gli elementi, e che funge anche da collegamento con la flangia del robot. La modifica sostanziale apportata tuttavia riguarda il meccanismo bistabile. In questa nuova configurazione, il meccanismo è posizionato in orizzontale, in luogo alla configurazione verticale sviluppata in precedenza. Il nuovo posizionamento ha consentito di ottimizzare gli ingombri, mantenendo il suo funzionamento inalterato. Le componenti di forza esercitate dalla molla infatti risultano inalterate rispetto alla configurazione precedente. Per quanto riguarda il sistema di alloggiamento

della molla, invece, non si sono apportate modifiche rispetto alla configurazione precedente.

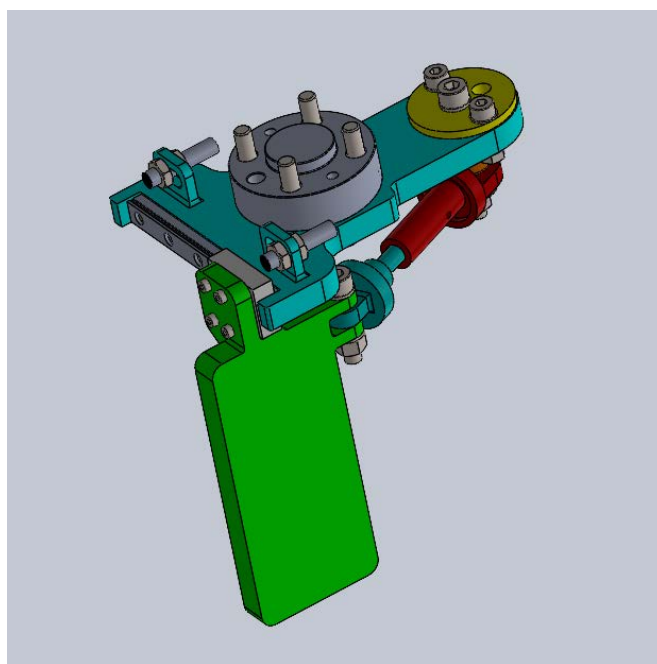
Al fine di ridurre i giochi complessivi del sistema, in luogo del precedente, è stato sviluppato un differente approccio alla regolazione del precarico della molla. La nuova configurazione infatti, prevede l'utilizzo di una flangia rigida (componente giallo in Figura 5.1) montata con leggera interferenza al corpo principale, e fissata con un sistema di collegamento smontabile vite-dado. Con lo stesso sistema di collegamento, alla flangia di regolazione è collegato il sistema di alloggiamento della molla. In relazione all'altezza del meccanismo che si desidera studiare, è possibile realizzare questa flangia appositamente, con i fori posizionati a quote differenti. Ciò costituisce un pezzo intercambiabile a seconda della configurazione che si desidera ottenere, nonché di rapida realizzazione date le sue dimensioni contenute. Il sistema progettato risulta meno flessibile rispetto alla soluzione precedente, ma consente di ottenere un collegamento più rigido tra i corpi. Nella configurazione presentata, i fori sono predisposti per realizzare un'altezza del meccanismo pari a 45 mm o 53 mm. Questi valori sono stati scelti a partire dall'analisi dei dati effettuata con il prototipo precedente.

Sempre con lo scopo di ridurre le dimensioni complessive, la lunghezza del binario della guida lineare è rimasta inalterata rispetto alla configurazione precedente, e quindi anche la corsa della paletta, ciò che è cambiato riguarda la sua predisposizione. In questa nuova configurazione infatti la guida lineare è stata montata in verticale rispetto al prototipo precedente. Questo non comporta sostanziali differenze in merito all'efficacia di funzionamento in quanto, il momento statico ammissibile sopportato dalla slitta in direzione y ha il medesimo valore di quello che si ha in direzione z . Il momento statico ammissibile infatti viene definito per tre direzioni per i sistemi a movimento lineare (M_x , M_y e M_z), come si vede in Figura 5.3.

Per ultimo, date le numerose modifiche apportate, è stato necessario ridefinire anche il design della paletta. Le dimensioni di quest'ultima infatti sono state ridotte il più possibile, soprattutto la sua lunghezza. Ciò, oltre a contenere gli ingombri dell'end-effector, consente di ridurre la componente di momento flettente a cui è sottoposta la slitta durante l'urto.



(a)



(b)

Figura 5.1: Nuovo design dell'end-effector. In figura (a) è possibile osservare la nuova configurazione, in cui si può osservare anche la flangia di regolazione (giallo). In figura (b) è presentato l'end-effector con montata la flangia di attacco al robot.

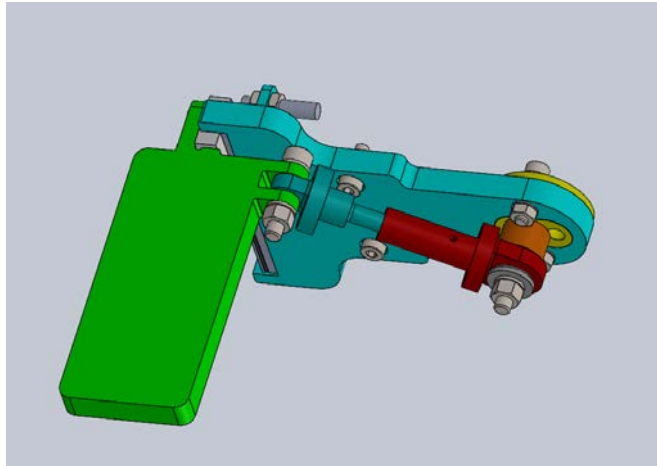


Figura 5.2: Vista della parte inferiore dell'end-effector. Si può osservare la nuova orientazione del meccanismo bistabile.

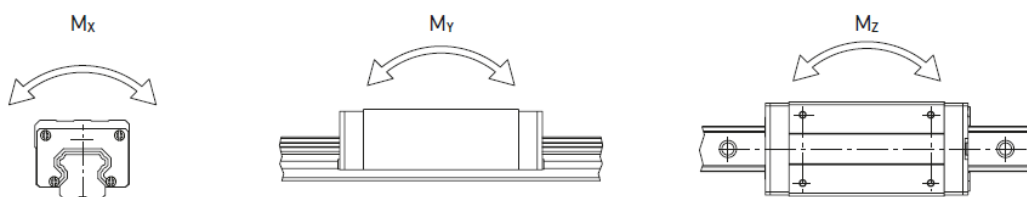
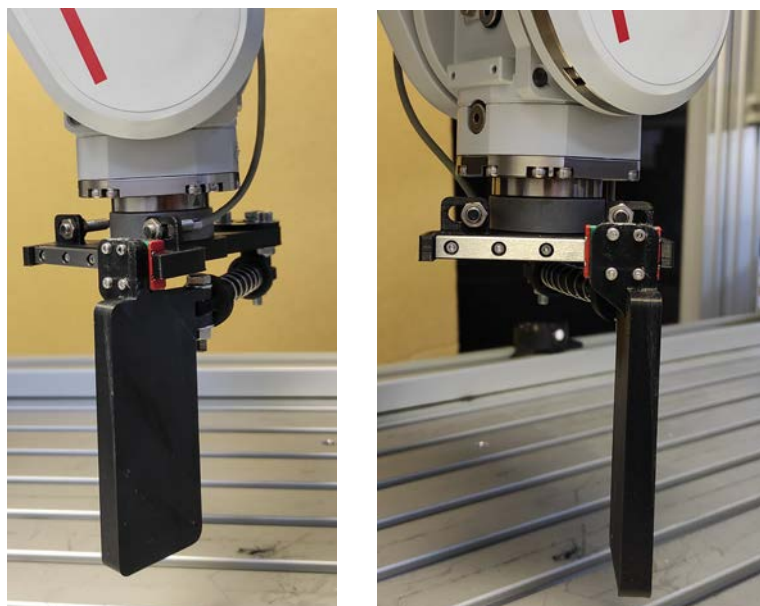


Figura 5.3: Momento statico ammissibile lungo le tre direzioni per un sistema a movimento lineare.

Le quote rappresentanti gli ingombri generali dell'end-effector sono presentate in Figura 5.5.



(a)

(b)



(c)

Figura 5.4: Foto del secondo prototipo di end-effector realizzato.

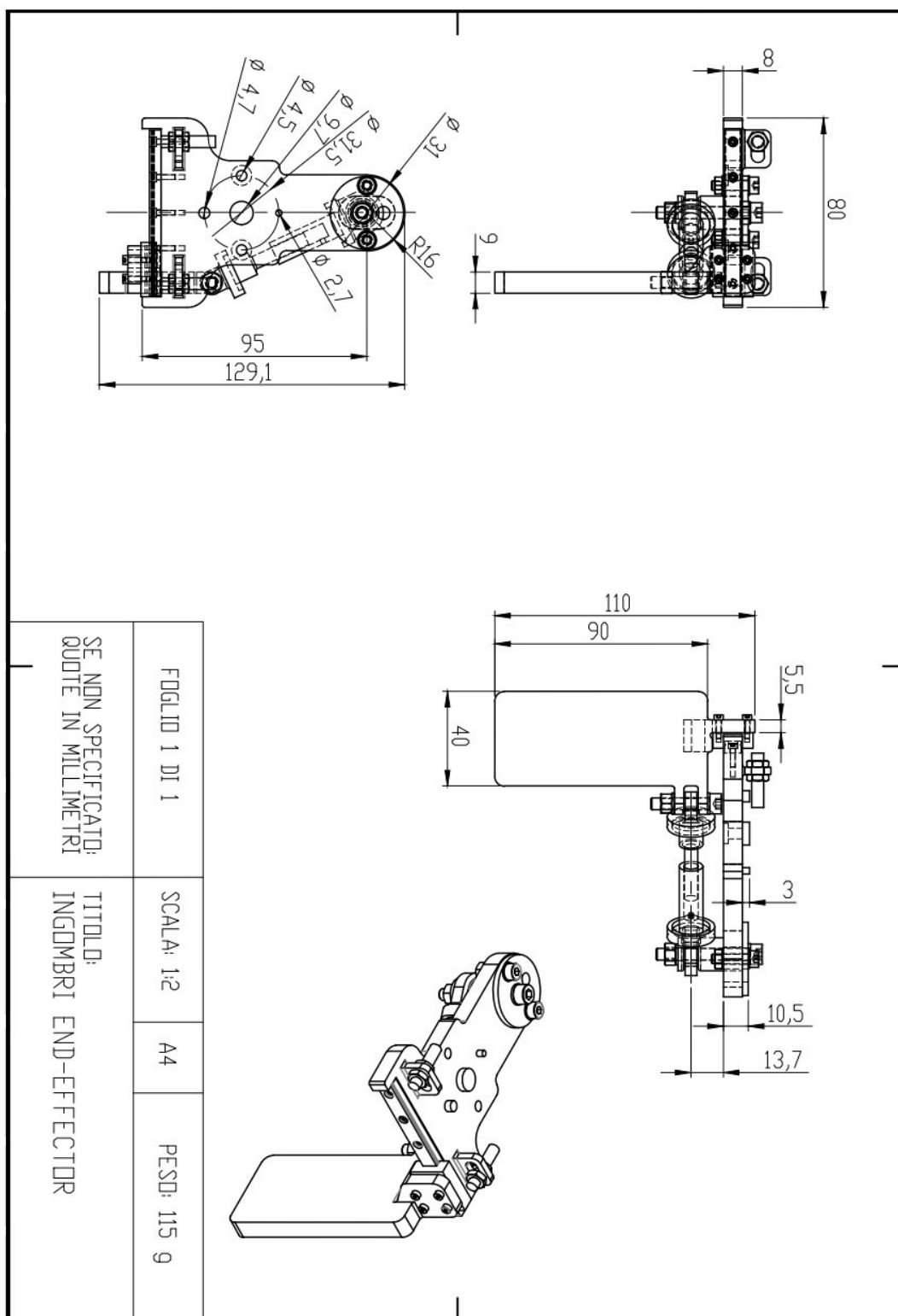


Figura 5.5: Ingombri esterni del nuovo prototipo di end-effector.

5.2 Apparato sperimentale

Per testare l'effettiva efficacia del nuovo prototipo di utensile realizzato, analogamente alla configurazione precedente, sono stati condotti dei test.

L'apparato sperimentale utilizzato per portare a termine le prove si differenziava dalla configurazione precedente (descritta al capitolo 4) per quanto riguarda due elementi: il PC e il modello di robot su cui è stato montato l'utensile. Il nuovo PC risultava essere più performante rispetto al precedente, e ciò ha permesso di ridurre il tempo di lettura dei sensori induttivi. Infatti, in luogo al valore di 1 ms utilizzato in precedenza, il nuovo tempo di lettura imposto era pari a 100 μ s. Ciò risulta un fattore rilevante in quanto, in linea teorica, dovrebbe contribuire a ridurre il tempo di reazione del robot al momento in cui avviene l'impatto con il pezzo da movimentare. Per quanto riguarda il robot invece, questo era sempre prodotto dalla "MITSUBISHI ELECTRIC", ma modello "RV-2FRL-D" (Figura 5.6).



Figura 5.6: Robot antropomorfo modello "RV-2FRL-D" prodotto dalla "MITSUBISHI ELECTRIC", utilizzato per effettuare le prove con il secondo prototipo di end-effector, montato sul robot.

Rispetto al robot precedentemente utilizzato e descritto in 1.1.2, questo secondo modello presenta delle dimensioni molto più contenute, pari a circa la metà rispetto al precedente. Il peso complessivo del robot è pari a 19 kg mentre il massimo carico che è possibile movimentare è pari a 2 kg (valori pari proprio alla metà rispetto al modello precedentemente utilizzato). La distanza massima che è possibile raggiungere è pari a 504 mm e la ripetibilità con cui è possibile raggiungere una posizione è pari a $\pm 0,02$ mm. La massima velocità composta raggiungibile è pari a $4955 \frac{mm}{s}$ e infine, i valori limite di rotazione e velocità raggiungibili dai singoli giunti sono riportati in Tabella 5.1.

Giunti	Ampiezza limite [°]	Velocità limite [$\frac{°}{s}$]
J1	480 (± 240)	300
J2	240 (± 120)	150
J3	0-160	300
J4	400 (± 200)	440
J5	240 (± 120)	450
J6	720 (± 360)	720

Tabella 5.1: Tabella limiti di giunto del robot modello “RV-2FRL-D” prodotto dalla “MITSUBISHI ELECTRIC”.

5.3 Prove sperimentali svolte con il nuovo prototipo

Analogamente al precedente prototipo di end-effector, le prove sono state svolte prima in assenza del meccanismo bistabile e, successivamente, con il meccanismo bistabile attivo, in modo da valutare l'effettiva efficacia nell'utilizzo di un utensile con questa configurazione. Ogni prova è stata ripetuta cinque volte, in modo da valutarne la ripetibilità e poter effettuare un'analisi statistica dei risultati. Analogamente alle prove svolte in precedenza, anche in questo caso, le prove si sono svolte andando a colpire pezzi di masse differenti, variando la decelerazione dopo l'urto e il valore di precarico della molla.

Le prove effettuate sono riportate nelle Tabelle 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

m [kg]	a $\frac{m}{s^2}$	-a $\frac{m}{s^2}$	v $\frac{m}{s}$	H [mm]
0,136	5	5	0	53
0,136	5	7	0	53
0,136	5	9	0	53

Tabella 5.2: Tabella in cui sono presentate le prove effettuate con il nuovo prototipo di end-effector munito di meccanismo bistabile. La massa del pezzo colpito è pari a 0,136 kg.

m [kg]	a $\frac{m}{s^2}$	-a $\frac{m}{s^2}$	v $\frac{m}{s}$	H [mm]
0,214	5	5	0	53
				45
0,214	5	7	0	53
				45
0,214	5	9	0	53
				45

Tabella 5.3: Tabella in cui sono presentate le prove effettuate con il nuovo prototipo di end-effector munito di meccanismo bistabile. La massa del pezzo colpito è pari a 0,214 kg.

m [kg]	a $\frac{m}{s^2}$	-a $\frac{m}{s^2}$	v $\frac{m}{s}$	H [mm]
0,336	5	5	0	53 45
0,336	5	7	0	53 45
0,336	5	9	0	53 45

Tabella 5.4: Tabella in cui sono presentate le prove effettuate con il nuovo prototipo di end-effector munito di meccanismo bistabile. La massa del pezzo colpito è pari a 0,336 kg.

m [kg]	a $\frac{m}{s^2}$	-a $\frac{m}{s^2}$	v $\frac{m}{s}$	H [mm]
0,449	5	5	0	53 45
0,449	5	7	0	53 45
0,449	5	9	0	53 45

Tabella 5.5: Tabella in cui sono presentate le prove effettuate con il nuovo prototipo di end-effector munito di meccanismo bistabile. La massa del pezzo colpito è pari a 0,449 kg.

Come si può osservare, analizzando le tabelle sopra presentate, non si sono svolte le prove in cui il robot procedeva a velocità ridotta dopo l'urto e nemmeno con decelerazione pari a $2 \frac{m}{s^2}$. La motivazione per questa mancanza è da attribuire al nuovo robot e alle sue ridotte dimensioni. Lo spazio raggiungibile dal robot in un movimento rettilineo infatti era fortemente limitato, e ciò non consentiva allo stesso di percorrere la traiettoria imposta oltre un certo punto. Dato che il pezzo da colpire doveva obbligatoriamente trovarsi in una determinata posizione affinché potesse essere ripreso dalla telecamera, ciò non ha consentito di effettuare queste prove. Un'ulteriore osservazione che si può fare, andando ad analizzare la Tabella 5.2 riferita al pezzo di massa 0,136 kg, è che in questa configurazione non è stata utilizzata l'altezza pari a 45 mm. Questo perché, in questa particolare configurazione, il meccanismo bistabile non scattava, ciò significa che il precarico dato dalla molla era eccessivo. È importante osservare che rispetto al prototipo precedente, con questa configurazione la regolazione dell'altezza del meccanismo risulta più precisa e sicura, in quanto non ci sono giochi che possono alterarne il valore. Da questo si deduce che probabilmente l'altezza utilizzata nelle prove precedenti con il primo prototipo, non era perfettamente pari a 45 mm ma un valore leggermente superiore, che risulta difficile quantificare con certezza. Se così fosse, il precarico agente sulla molla risultava di un valore inferiore, e consentiva al meccanismo di cedere all'impatto anche con il pezzo con la massa minore.

5.4 Risultati

5.4.1 Nuovo end-effector in assenza di meccanismo bistabile

Come primi risultati, è utile riportare innanzitutto le velocità che si ottengono nel caso in cui il pezzo venisse colpito senza meccanismo cedevole, ossia se l'urto avvenisse tra due corpi rigidi. È importante porre attenzione sul fatto che, in questo caso, la paletta è stata realizzata con una lunghezza decisamente inferiore rispetto al primo prototipo. Questa caratteristica porta con sé il vantaggio di generare un minore momento flettente nell'istante dell'urto. In primo luogo, ciò

risulta vantaggioso in quanto tutto il meccanismo è meno sollecitato e, in secondo luogo, la paletta reagisce deformandosi meno durante l'urto, agendo quindi più come un corpo rigido piuttosto che come una molla che restituisce energia al pezzo colpito quando ritorna nella sua condizione indeformata.

Dopo un'analisi statistica dei risultati ottenuti dall'analisi dei video, è emerso che la velocità media del robot al momento dell'impatto è pari a $0,94 \pm 0,03 \frac{m}{s}$.

Le velocità raggiunte dai pezzi colpiti in assenza di meccanismo bistabile sono presentati in Tabella 5.6 e, per maggiore comprensione, nel grafico in Figura 5.7.

massa [kg]	velocità massa [$\frac{m}{s}$]
0,136	$1,64 \pm 0,05$
0,214	$1,74 \pm 0,01$
0,336	$1,67 \pm 0,08$
0,449	$1,66 \pm 0,02$

Tabella 5.6: Valori delle velocità raggiunte relative alla massa colpita in assenza di meccanismo bistabile. I valori presentati si riferiscono alla media ricavata a partire dall'analisi delle cinque prove effettuate per ogni massa. La velocità media d'impatto, pari quindi a quella posseduta dal robot, è pari a $0,94 \pm 0,03 \frac{m}{s}$.

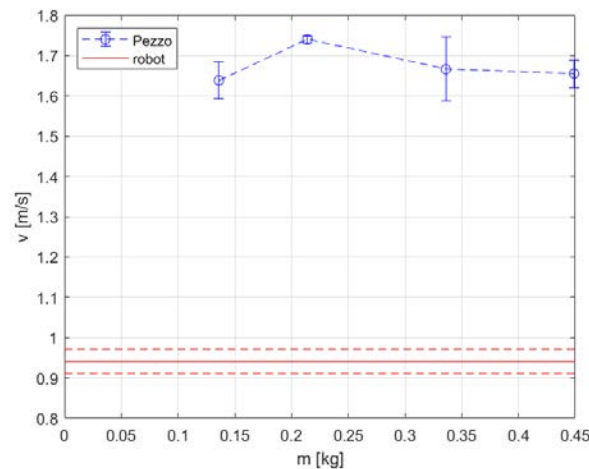


Figura 5.7: Andamento delle velocità raggiunte dal pezzo colpito in relazione alla sua massa. Valori ricavati con urto senza meccanismo cedevole.

Come si può osservare dalla Figura 5.7, l'andamento è pressoché lineare e le velocità raggiunte dai differenti pezzi colpiti sono molto simili tra loro. Questo ad eccezione della massa pari a 0,214 kg, la quale manifesta una velocità superiore rispetto alle altre. Inoltre, le velocità raggiunte utilizzando questo nuovo end-effector, risultano inferiori rispetto al caso precedente. Ciò può essere dovuto sia alla minore velocità con cui avviene l'impatto, sia per le ridotte dimensioni della paletta. Per quanto riguarda la velocità del robot infatti, con le prime prove il suo valore medio era pari a $1,01 \frac{m}{s}$, valore leggermente superiore, che comunque potrebbe influire sul risultato. Per secondo invece, dato che la paletta presenta una lunghezza inferiore, come detto in precedenza, si fletterà meno durante l'urto, e si comporterà più come un corpo rigido, restituendo meno energia al momento dell'impatto.

5.4.2 Nuovo end-effector con meccanismo bistabile

I risultati ricavati dalle prove con attivo il meccanismo bistabile sono presentate nei grafici in Figura 5.8, 5.9 e 5.10, in cui si espongono le velocità massime del pezzo raggiunte dopo l'urto in differenti configurazioni di prova. I dati fanno riferimento alle velocità medie e alle relative incertezze, ricavate a partire dall'analisi statistica svolta sulle cinque prove effettuate per ogni configurazione.

Dall'analisi dei risultati si può osservare che le condizioni di funzionamento migliori si ottengono quando si va a colpire un pezzo di massa pari a 0,214 kg, con una decelerazione pari a 7 e $9 \frac{m}{s^2}$ e un'altezza del meccanismo pari a 45 mm, Figura 5.9 e 5.10. Per queste configurazioni infatti, la velocità raggiunta dal pezzo dopo l'urto è decisamente inferiore rispetto alla velocità con cui avviene l'impatto. Per tutte le altre configurazioni, al contrario, le velocità raggiunte risultano sempre superiori rispetto alla velocità d'impatto.

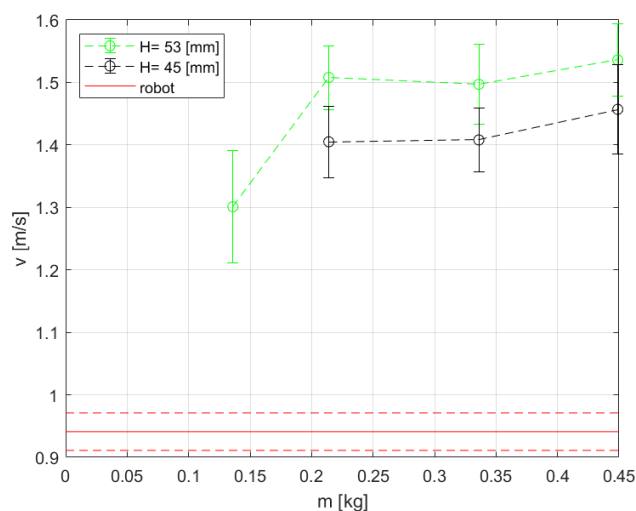


Figura 5.8: Grafico rappresentate il valore della velocità massima raggiunta del pezzo dopo l'urto ricavate a partire dalle prove sperimentali. I valori sono messi in relazione alla massa del pezzo e dell'altezza del meccanismo bistabile. Viene introdotta anche la velocità del robot al momento dell'impatto. La configurazione a cui si fa riferimento impone una decelerazione dopo l'urto pari a $5 \frac{m}{s^2}$.

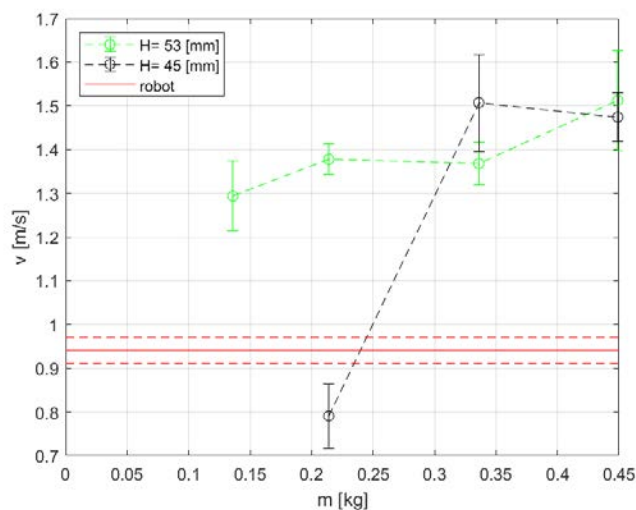


Figura 5.9: Grafico rappresentate il valore della velocità massima raggiunta del pezzo dopo l'urto ricavate a partire dalle prove sperimentali. I valori sono messi in relazione alla massa del pezzo e dell'altezza del meccanismo bistabile. Viene introdotta anche la velocità del robot al momento dell'impatto. La configurazione a cui si fa riferimento impone una decelerazione dopo l'urto pari a $7 \frac{m}{s^2}$.

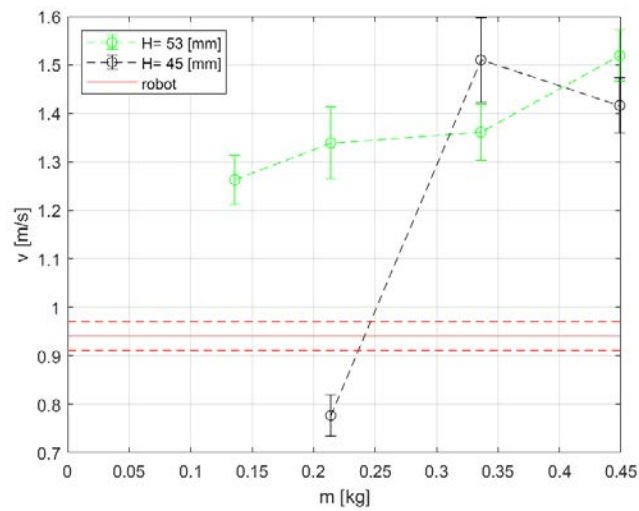


Figura 5.10: Grafico rappresentate il valore della velocità massima raggiunta del pezzo dopo l'urto ricavate a partire dalle prove sperimentali. I valori sono messi in relazione alla massa del pezzo e dell'altezza del meccanismo bistabile. Viene introdotta anche la velocità del robot al momento dell'impatto. La configurazione a cui si fa riferimento impone una decelerazione dopo l'urto pari a $9 \frac{m}{s^2}$.

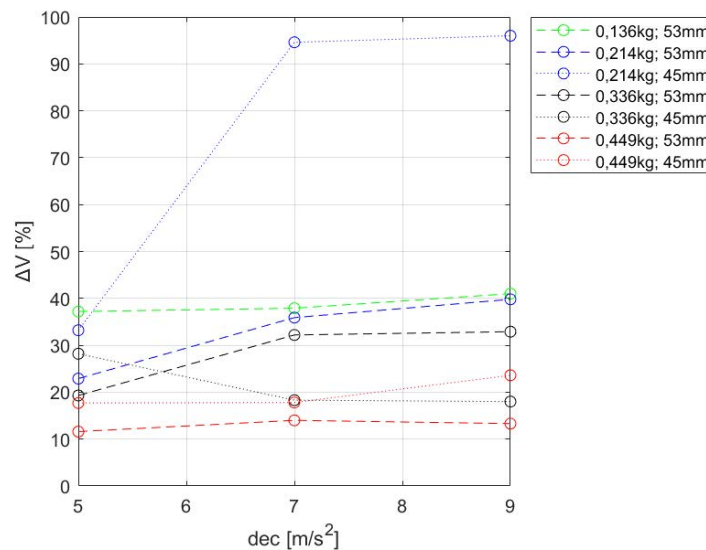


Figura 5.11: Grafico in cui sono rappresentati i valori della differenza di velocità raggiunta dal pezzo colpito senza e con il meccanismo bistabile, espressi in percentuale, riferiti al secondo prototipo di end-effector. I valori sono definiti per le varie configurazioni testate.

Analizzando i dati presentati, è interessante osservare che le velocità dopo l'urto raggiunte dai pezzi colpiti, sono sempre inferiori rispetto alle velocità raggiunte in assenza di meccanismo bistabile, riferite alle corrispettive masse. Per quantificare numericamente quanto appena detto, si può fare riferimento al grafico in Figura 5.11. Nel grafico in questione, sono presentati i valori dati dalla differenza tra la velocità raggiunta dopo l'urto senza, e con, l'introduzione del meccanismo bistabile, espressi in percentuale e riferiti alle diverse masse e configurazioni.

Analogamente a quanto fatto nel capitolo 4, per valutare la ripetibilità delle prove eseguite, anche in questo caso risulta utile presentare tutti i grafici degli andamenti di velocità riferiti ad una configurazione. La configurazione scelta è la stessa di quella presentata in precedenza per il primo end-effector, in modo da avere dei dati confrontabili e valutare i due differenti design realizzati. La prova in questione prevedeva di andare ad impattare contro un pezzo di massa pari a 0,214 kg, con un'altezza del meccanismo pari a 53 mm, e imponeva l'arresto del robot dopo l'urto con una decelerazione pari a $5 \frac{m}{s^2}$. I grafici rappresentativi le cinque prove svolte per questa configurazione sono presentati in Figura 5.12.

In Figura 5.13, è presentato inoltre il grafico relativo all'andamento di velocità ricavato utilizzando il modello implementato in Simulink, riferito alla medesima configurazione. Mentre, in Tabella 5.7, sono indicati i parametri inseriti nel modello. Anche in questo caso, si è data priorità ad ottenere un andamento di velocità del pezzo che fosse paragonabile a quello reale, dando meno importanza all'andamento di velocità dell'utensile. Come si può osservare anche in questo caso il trend di velocità rispecchia bene l'andamento reale, anche se la velocità del secondo picco risulta leggermente inferiore rispetto a quella reale (si veda Figura 5.14 e 5.15). L'andamento del primo picco invece, è coerente con la realtà. Complessivamente, anche in questo caso, la simulazione rispecchia bene l'andamento della velocità del pezzo.

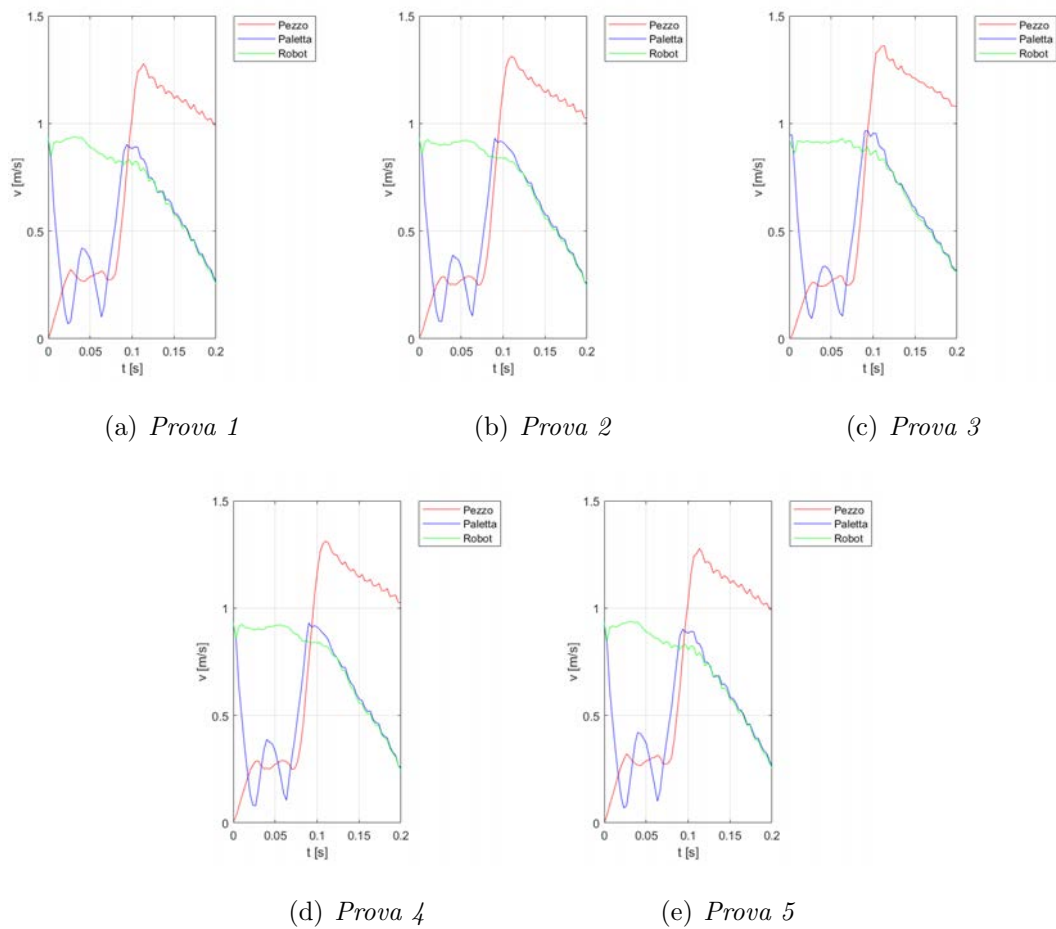


Figura 5.12: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito relative alle prove sperimentali 1-5. La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e l'altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

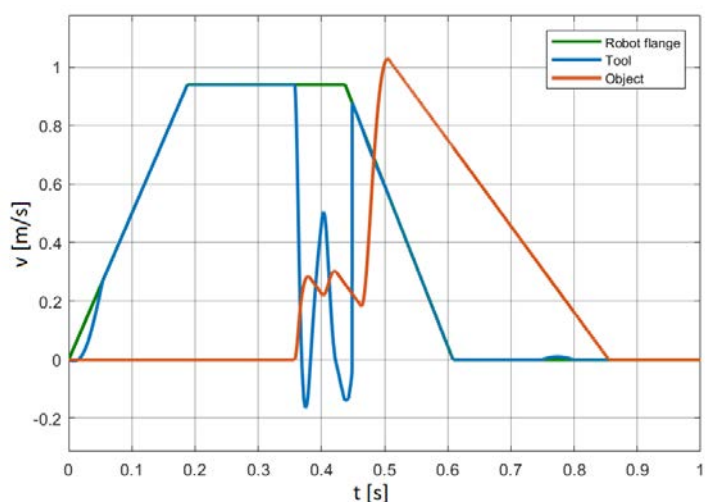


Figura 5.13: Andamento delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito ricavate con il modello implementato in Simulink. La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

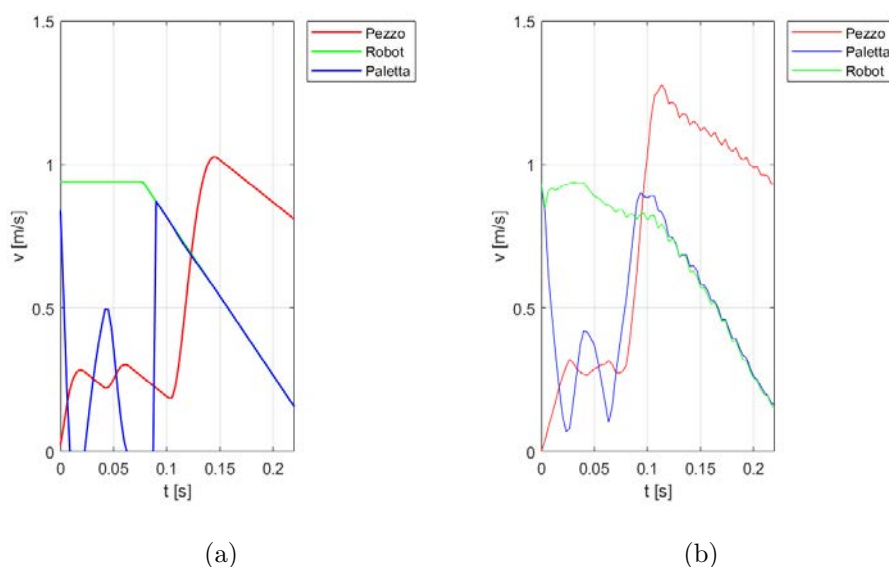


Figura 5.14: Confronto delle velocità di robot, paletta e pezzo colpito ricavate con il modello implementato in Simulink (a) e sperimentale (b). La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

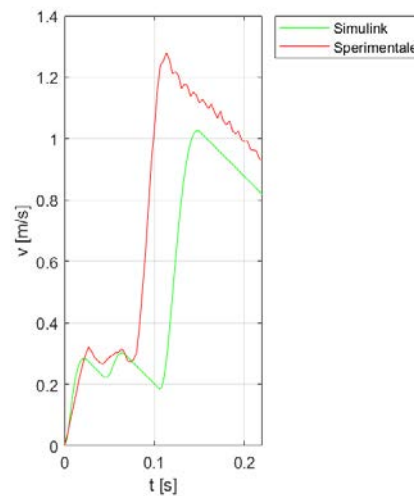


Figura 5.15: Sovrapposizione dell'andamento della velocità del pezzo ricavato con il modello implementato in Simulink e ricavato sperimentalmente. La massa del pezzo è pari a 0,214 kg, la decelerazione imposta è pari a $5 \frac{m}{s^2}$ e altezza del meccanismo pari a 53 mm. Si impone l'arresto completo del robot dopo l'urto.

Come si può osservare in Tabella 5.7, in riferimento al tempo di reazione del robot, si può notare che il valore è pari a 0,06 s, valore coincidente con il tempo di reazione ottenuto dalle prove svolte utilizzando l'apparato sperimentale precedente. Questo vuol dire che nonostante si sia utilizzato un computer più performante, ciò non ha influito sul tempo di reazione del robot. Segue che, per migliorare questo valore e rendere il robot più reattivo, è necessario intervenire andando ad apportare delle modifiche direttamente al codice di controllo robot in Matlab, oppure variando il sistema di identificazione dell'impatto. In luogo ai sensori induttivi, si potrebbe utilizzare un Harvester. Questo non è altro che una lamina di materiale piezoelettrico capace di generare una tensione quando sollecitato da vibrazioni. Durante l'urto tra la paletta dell'utensile e il pezzo, infatti, si generano delle vibrazioni e, collegando questa lamina direttamente sulla paletta (ciò è possibile date le sue dimensioni contenute), si ottiene una tensione, che può essere utilizzata come segnale identificativo dell'impatto. Facendo quindi dei test, sarebbe possibile determinare il valore di tensione di soglia alla quale si manifesta l'impatto. Con questo sistema, inoltre, sarebbe possibile attribuire ad ogni massa colpita un corrispettivo valore di tensione e, a partire dal valore di

tensione, stimare la massa contro cui si è andati ad impattare. Per fare ciò, si potrebbero svolgere dei test andando ad impattare contro campioni di massa nota e, per ognuno di questi, ricavare la tensione corrispondente ottenuta al momento dell'impatto. Ricavati questi valori, sarebbe possibile stimare il valore della massa che ha generato una determinata tensione svolgendo un'interpolazione lineare.

		Valore parametro
Velocità robot	$V_r \left[\frac{m}{s} \right]$	0,94
Velocità dopo l'urto	$V_{task} \left[\frac{m}{s} \right]$	0
Accelerazione	$a \left[\frac{m}{s^2} \right]$	5
Decelerazione	$-a \left[\frac{m}{s^2} \right]$	-5
Tempo di reazione del robot	$\Delta t [s]$	0,06
Massa utensile	$m_t [kg]$	0,048
Costante elastica molla	$k \left[\frac{N}{m} \right]$	490
Corsa utensile	$c [m]$	0,038 (0,040)
Altezza meccanismo bistabile	$H [m]$	0,053
Lunghezza a riposo molla	$L_0 [m]$	0,063
Coeff. attrito utensile	$\mu_{utensile}$	0,6 (0,003)
Coeff. attrito pezzo	μ_{pezzo}	0,3 (0,2)
Massa pezzo	$m_p [kg]$	0,214
Coefficiente di restituzione	e	0,65
Rigidezza di contatto	k_c	$1 \cdot 10^3$

Tabella 5.7: Valori dei parametri inseriti nel modello in Simulink per ottenere l'andamento di velocità in Figura 5.13. I valori tra parentesi rappresentano i valori reali.

5.5 Confronto tra i due prototipi realizzati

A partire dai risultati ottenuti per questa seconda configurazione di end-effector, è possibile fare un confronto con i relativi dati ottenuti con il primo prototipo realizzato. Per fare ciò, è utile presentare le velocità raggiunte dopo l'urto dai

vari pezzi colpiti, riferiti ad una configurazione testata con entrambi i prototipi. La configurazione considerata impone un'altezza del meccanismo pari a 53 mm e l'arresto completo del robot dopo l'urto. I valori di velocità ottenuti con i due prototipi sono presentati nel grafico in Figura 5.16. Come si può notare, ad eccezione per il pezzo avente la massa pari a 0,136 kg, per tutti gli altri pezzi colpiti le velocità raggiunte con il secondo prototipo risultano sempre inferiori rispetto alle corrispettive ottenute con il primo prototipo. In luogo a questa considerazione, si può affermare che il secondo prototipo realizzato risulta più efficace rispetto al precedente, anche considerando le sue dimensioni più contenute.

Le velocità maggiori che si raggiungono con il secondo prototipo per il pezzo di massa più leggera, sono dovuti probabilmente al fatto che, quest'ultimo, risulta più rigido rispetto al prototipo precedente. Il primo design infatti risultava essere molto più flessibile, e capace di smorzare maggiormente l'urto, e ciò risultava più favorevole alla massa pari a 0,136 kg.

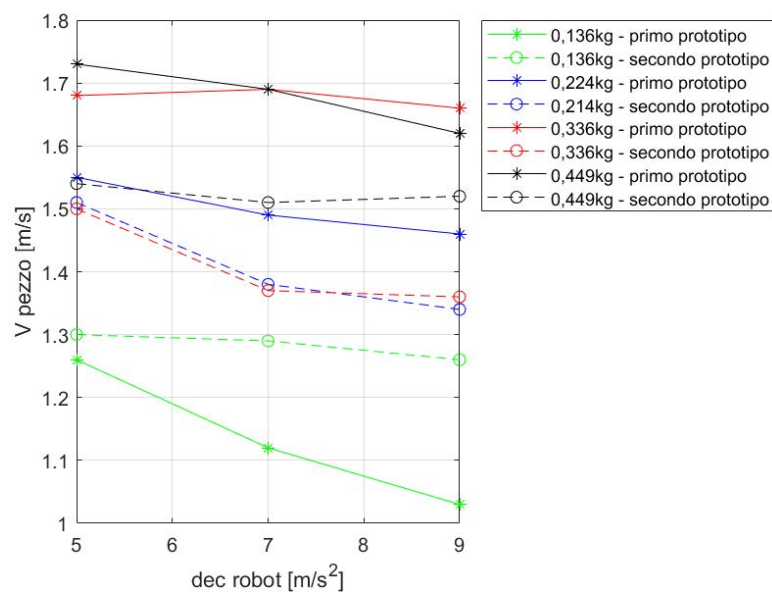


Figura 5.16: Andamento delle velocità raggiunte dai pezzi colpiti con i due prototipi di end-effector in relazione alla decelerazione imposta dopo l'urto. L'altezza del meccanismo è pari a 53 mm, si impone l'arresto del robot dopo l'urto.

Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto ha portato alla realizzazione di un prototipo di end-effector da installare su un robot antropomorfo. L'utensile è stato realizzato in un'ottica di semplificare le operazioni di controllo da remoto di un manipolatore (teleoperazione), da parte di un operatore, nell'operazione di movimentazione di componenti.

A partire da ricerche precedenti e da un modello sperimentale implementato in Simulink, si sono realizzati due prototipi end-effector entrambi in grado di assorbire l'impatto con il componente da movimentare, dissipando la maggior parte dell'energia cinetica sviluppata dal moto relativo tra le masse.

Con l'utilizzo di sensori induttivi si è inoltre sviluppato un codice di movimento del robot che, integrato con l'utensile, costituiva un intero apparato in grado di rilevare l'istante in cui avveniva l'impatto, e permetteva al robot di variare la propria legge di moto dopo l'urto.

Per validare il modello implementato in Simulink e l'effettiva efficacia del prototipo realizzato, sono state condotte numerose prove. Queste ultime sono state gestite andando a variare numerosi parametri, in modo da ottenere un quadro che fosse il più ampio possibile in merito alle prestazioni dell'utensile in diverse condizioni di utilizzo. Dai risultati delle prove effettuate è emerso che complessivamente il secondo prototipo di end-effector realizzato risulta più compatto e apporta miglioramenti in merito alla riduzione di velocità raggiunta dal pezzo dopo l'urto. Tuttavia tali miglioramenti risultano più o meno rilevanti a seconda della configurazione in cui avviene l'operazione di movimentazione del componente. Si è potuto dimostrare inoltre che il modello implementato in Simulink sviluppato in precedenza risulta valido in quanto, nonostante sia un modello semplificato,

predice in maniera accurata l'andamento della velocità del pezzo colpito.

Gli sviluppi futuri di questo progetto di tesi sono:

- testare il sistema eseguendo nuove prove, andando a variare ulteriormente i parametri caratterizzanti l'operazione, con lo scopo di trovare la configurazione che fornisca i risultati migliori. Tra questi si comprende: variare l'altezza del meccanismo bistabile, testare una molla avente costante elastica differente e apportare modifiche alla legge di moto imposta al robot;
- apportare modifiche migliorative sia al design dell'utensile, sia all'intero apparato atto a rilevare l'urto.

Bibliografia

- [1] Alberto Menini, *“Isola robotizzata per applicazioni di additive manufacturing”*, Tesi di laurea magistrale, 2019-2020, Relatore: Ing. Giulio Rosati, Correlatore: Ing. Matteo Bottin.
- [2] J. J. Craig, *“Introduction to robotics: mechanics and control”*, Upper Saddle River (NJ): Pearson Prentice Hall, 2005, vol. 3.
- [3] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *“Robotics: modelling, planning and control”*, Springer, 2010.
- [4] G. Legnani, I. Fassi, and A. Visioli, *“Robotica industriale”*, CEA, 2003.
- [5] G. Rosati, *Dispense tratte da “Corso di robotica industriale”*, Padova, 2020.
- [6] <https://it.mitsubishielectric.com/it/>
- [7] Domenico Tommasino, *“Studio di un sistema robotico adattativo per il controllo del contatto d’urto tra pinza e pezzo”*, Tesi di laurea magistrale, Padova, 2019-2020, Relatore: Ing. Giulio Rosati, Correlatore: Ing. Alberto Doria.
- [8] Domenico Tommasino, Giulio Cipriani and Alberto Doria, *“Study of the effects of end-effector parameters on collisions in robotic teleoperations”*, 2020.
- [9] P. Mazzoldi, N. Nigro and C. Voci, *“Elementi di Fisica - Meccanica”*, 2nd edizione, EdiSES, 2008.
- [10] <https://it.mathworks.com/>.
- [11] <https://www.teledynedalsa.com/>.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Professor Giulio Rosati, mio relatore, che mi ha offerto la possibilità di svolgere questo lavoro di tesi, e che con i suoi insegnamenti è riuscito a trasmettermi la passione per la materia.

Ringrazio Giulio Cipriani, per la disponibilità e il prezioso aiuto ricevuto nello svolgimento di questo lavoro.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori. Con il loro instancabile sostegno, sia morale che economico, hanno sempre creduto in me, hanno sempre sostenuto ogni mia decisione e mi hanno permesso di arrivare alla conclusione di questo mio percorso di studi. Siete sempre stati al mio fianco, vi voglio bene.

Un ringraziamento va anche verso i miei nonni, che ho avuto la fortuna di poter avere al mio fianco durante tutto questo mio lungo percorso di studi. Nonni che, con il loro sostegno e i loro consigli, hanno avuto un ruolo determinante nel raggiungimento di questo mio obiettivo di vita. Questo lavoro di tesi e il raggiungimento di questo traguardo è dedicato anche a loro.

Un ringraziamento speciale a Francesca, che è entrata a far parte della mia vita e mi ha sempre sostenuto e appoggiato in ogni mia scelta. La ringrazio per avermi trasmesso la sua immensa forza e il suo coraggio. Grazie per tutto il tempo che mi hai dedicato. Grazie perché ci sei sempre stata e grazie per avermi fatto capire che, in fondo, gli ostacoli esistono per essere superati.

Per ultimo, ma non per importanza, un ringraziamento a tutti i miei parenti, amici e colleghi di corso. Le persone con cui ho condiviso attimi di gioia e di tristezza, ma che nonostante tutto sono rimasti accanto a me in questi anni di Università e nei mesi della tesi di laurea. Grazie per tutti coloro che, anche per una semplice parola o un gesto di incoraggiamento, hanno contribuito a darmi la forza di raggiungere e portare a termine questo mio importante percorso.