

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA  
MECCANICA

STUDIO E OTTIMIZZAZIONE  
ENERGETICA DI APPLICAZIONI DI  
ROBOTICA COLLABORATIVA

RELATORE: PROF. ING. GIULIO ROSATI

CORRELATORE: PROF. ING. MATTEO BOTTIN

LAUREANDO: ENRICO PISANI

MATRICOLA: 2055107

ANNO ACCADEMICO 2023-2024



*Ai miei genitori e ai miei nonni.*



*“ Scegli un lavoro che ami, e non dovrai lavorare neppure un giorno in vita tua.*

*”*

CONFUCIO



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>IX</b>
<b>Introduzione</b>	<b>XI</b>
<b>1 Robotica Collaborativa</b>	<b>1</b>
1.1 Di cosa si tratta . . . . .	1
1.2 Cenni storici . . . . .	2
1.3 Applicazioni, vantaggi e svantaggi . . . . .	6
1.4 Fattore umano . . . . .	10
<b>2 Modello del Robot a 7 Assi</b>	<b>15</b>
2.1 Kuka iiwa 7 R800 . . . . .	15
2.2 Spalla e Polso sferici . . . . .	19
2.2.1 Spalla sferica . . . . .	20
2.2.2 Polso sferico . . . . .	21
2.3 Modello di Denavit-Hartenberg . . . . .	22
<b>3 Modello Energetico</b>	<b>27</b>
3.1 Modello della simulazione . . . . .	27
3.1.1 Braccia dell'operatore . . . . .	27
3.1.2 Postazione di lavoro . . . . .	30
3.2 Controllo della ridondanza . . . . .	32
3.3 Analisi dinamica inversa . . . . .	37
3.3.1 Formulazione di Newton-Eulero . . . . .	38
3.3.2 Massa dei giunti del braccio . . . . .	41
3.3.3 Inerzia dei giunti del braccio . . . . .	44

3.3.4	Carico sollevato dall'operatore	44
3.4	Modello metabolico di Alexander	44
3.5	Esempio di uso del modello	46
<b>4</b>	<b>Simulazione</b>	<b>59</b>
4.1	Pick and place di tre carichi cubici	59
4.1.1	Sequenza 1	63
4.1.2	Sequenza 2	73
4.1.3	Considerazioni	82
4.2	Pick and place di tre carichi cubici con braccia appoggiate	83
4.2.1	Sequenza 1	83
4.2.2	Sequenza 2	93
4.2.3	Considerazioni	102
	<b>Conclusioni</b>	<b>105</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>107</b>

# Sommario

Il presente lavoro di tesi magistrale mira al calcolo della spesa energetica metabolica di un operatore umano per il compimento di una serie di operazioni industriali, come per esempio assemblaggi e pick and place.

Lo studio prevede una breve introduzione alla robotica collaborativa per poi descrivere il braccio robotico usato come riferimento in queste pagine: il Kuka iiwa 7 R800. Di questo robot viene quindi illustrata la creazione del modello virtuale fondato sulla parametrizzazione proposta da Denavit e Hartenberg. Si procede con lo studio delle tematiche associate all'analisi dinamica inversa del manipolatore in esame. Dopodiché il lavoro prosegue con l'introduzione e la discussione del modello metabolico di Alexander, necessario per il calcolo della spesa energetica a partire dai risultati ottenuti con l'analisi dinamica inversa. Infine quanto analizzato è stato applicato allo studio e all'ottimizzazione della spesa energetica per un esempio applicativo di pick and place.



# Introduzione

La robotica collaborativa è diventata un elemento fondamentale dell'Industria 4.0, il cui scopo è affiancare esseri umani e robot in un'attività efficiente, produttiva, flessibile e sicura. Il notevole sviluppo di questa forma di automazione ha portato la nascita di studi riguardo metodi per l'allocazione di task tra essere umano e robot, in modo da aumentare l'efficienza nelle operazioni collaborative, aumentare l'ergonomia dell'operatore e diminuire la spesa energetica.

La tesi magistrale che viene descritta nelle pagine che seguono si inserisce nel contesto della misura della spesa energetica dell'operatore. Questa consiste nello sviluppo di un modello virtuale che ha come obiettivo finale il calcolo e l'ottimizzazione della spesa energetica dell'operatore per il completamento di operazioni industriali. L'utilità di tale modello è duplice: in primis può essere utilizzato come confronto tra la spesa energetica di un operatore umano e di un robot industriale, in modo da ricavare quale dei due sia più efficiente nelle diverse task operative. In secundis può essere utilizzato come parametro per verificare l'ergonomia dell'operazione.

Il capitolo [1](#) tratta un'introduzione alla robotica collaborativa contestualizzando la nascita, gli usi, i vantaggi, gli svantaggi e introducendo infine il concetto di fattore umano, aspetto centrale dello studio qui presente.

Il capitolo [2](#) propone una descrizione del modello virtuale usato in questa tesi. Si è iniziato con la presentazione del robot Kuka iiwa 7 R800, a cui il modello del braccio umano fa riferimento, per poi analizzarne la spalla sferica e il polso sferico. Infine si è introdotto il modello di Denavit-Hartenberg necessario alla parametrizzazione del robot stesso.

Il capitolo [3](#) presenta i passaggi con cui il modello virtuale è stato creato.

Dopo aver mostrato la biomimesi del robot con il braccio umano e introdotta la postazione di lavoro con relative norme che la regolano, è stata affrontata la questione della parametrizzazione della ridondanza caratteristica dei robot a 7 assi. Particolare attenzione è stata prestata alla presentazione dell'analisi dinamica inversa e ai parametri richiesti per poterla calcolare. È poi presentato il modello metabolico di Alexander che permette il calcolo della spesa energetica a partire dai risultati ottenuti dall'analisi dinamica inversa. Infine è presente un semplice esempio pratico effettuato con il singolo braccio destro per far familiarizzare i fruitori della presente tesi con lo studio presente nel capitolo successivo.

Il capitolo [4](#) analizza un esempio di operazione industriale compiuta dal modello virtuale sviluppato. Dopo una spiegazione dell'operazione sono presentate le curve dei parametri di maggior interesse e i risultati numerici calcolati dal modello. Viene inoltre anche analizzato lo stesso caso ma considerando nulla la potenza durante la fase di attesa nella posizione di riposo generando così, di conseguenza, una spesa energetica nulla in quella stessa fase di attesa.

Lo studio si conclude con le conclusioni raccolte in un apposito capitolo.

# Capitolo 1

## Robotica Collaborativa

### 1.1 Di cosa si tratta

Nel contesto dell'evoluzione tecnologica e dell'automazione industriale, la robotica collaborativa emerge come un campo di ricerca e applicazione fondamentale. Questa disciplina si propone di integrare l'interazione tra esseri umani e robot in ambienti condivisi, promuovendo una collaborazione sinergica e sicura tra le due entità e fondendo la produttività dei sistemi automatizzati con la flessibilità e la destrezza dei sistemi manuali.

Le tradizionali concezioni di robotica sono spesso caratterizzate da macchine isolate, operate in ambienti separati dagli esseri umani. Tuttavia, con l'avvento della robotica collaborativa, si è aperto un nuovo orizzonte di possibilità, in cui i robot non sono solo strumenti autonomi, ma partner attivi e flessibili nelle operazioni quotidiane.

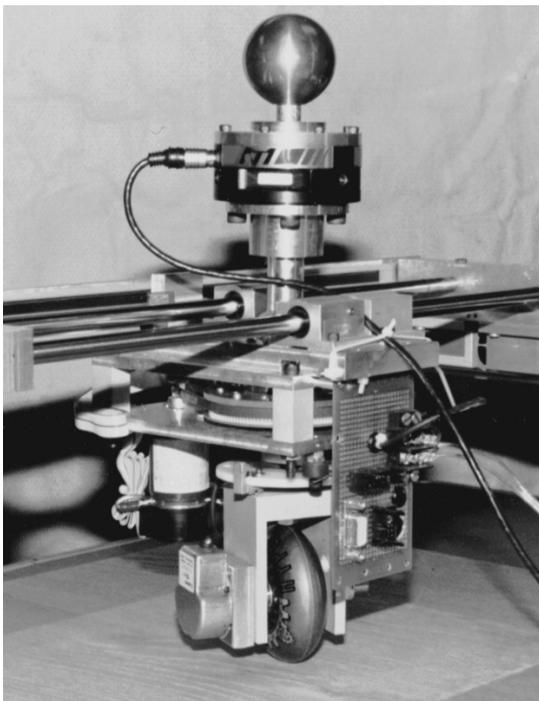
L'obiettivo principale della robotica collaborativa è quello di migliorare l'efficienza, la produttività e la sicurezza nei contesti lavorativi e domestici, consentendo una condivisione efficace dello spazio e delle attività tra robot e operatori umani. Questo approccio non solo promuove una maggiore flessibilità nelle operazioni industriali, ma favorisce anche la creazione di ambienti di lavoro più sicuri ed ergonomici, riducendo il rischio di incidenti e lesioni.

La robotica collaborativa coinvolge una vasta gamma di tecnologie e metodologie, tra cui sensori avanzati, algoritmi di percezione e pianificazione del movi-

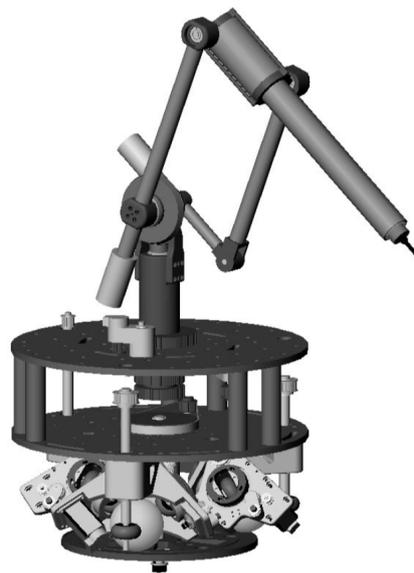
mento, attuatori intelligenti e interfacce uomo-macchina intuitive. Tali strumenti consentono ai robot di comprendere l'ambiente circostante, di adattarsi dinamicamente alle variazioni delle condizioni operative e di cooperare in modo efficace con gli operatori umani.

Nonostante i numerosi vantaggi offerti dalla robotica collaborativa, ci sono ancora sfide da affrontare, tra cui la sicurezza, l'etica, lo stress psicologico e l'accettazione sociale. È necessario sviluppare normative e standard adeguati a garantire una corretta implementazione di queste tecnologie, oltre a promuovere una consapevolezza e una comprensione diffuse dei loro benefici e delle loro limitazioni.

## 1.2 Cenni storici



(a)



(b)

Figura 1.1: a)Una singola ruota a contatto con una superficie di scorrimento planare è il cobot più semplice, con uno spazio di lavoro bidimensionale (2-D) [1]. b)Un cobot con lo spazio di lavoro di un braccio robotico azionato con l'uso di tre assi di rivoluzione [1].

Il punto di partenza fondamentale per la robotica collaborativa può essere individuato nel lavoro pionieristico del Prof. J. Edward Colgate e del Prof. Michael Peshkin presso la Northwestern University negli Stati Uniti [\[1\]](#),[\[2\]](#). Nel 1996, i due professori hanno creato il "Phantom Haptic Interface", un dispositivo che ha svolto un ruolo cruciale nello sviluppo iniziale della robotica collaborativa.

Il Phantom Haptic Interface era un dispositivo di retroazione sensoriale, progettato per consentire agli utenti umani di interagire con robot industriali in modo sicuro e intuitivo. Il dispositivo utilizzava un braccio robotico leggero e sensibile, fornendo feedback sensoriali agli operatori umani attraverso un'interfaccia tattile. Questo feedback sensoriale permetteva agli operatori di percepire e controllare la forza e il movimento del robot, consentendo loro di lavorare fianco a fianco con macchine industriali senza il rischio di lesioni.

Il Phantom Haptic Interface è stato un punto di svolta perché ha dimostrato che i robot potevano essere progettati e controllati in modo tale da collaborare in modo sicuro e efficace con gli esseri umani. Questo concetto ha ispirato numerosi altri ricercatori e ingegneri a esplorare ulteriormente le possibilità della robotica collaborativa.

Le innovazioni introdotte da Colgate e Peshkin hanno posto le basi per il successivo sviluppo dei cobot come li conosciamo oggi. Molti dei principi e delle tecniche sviluppate per il Phantom Haptic Interface sono stati successivamente incorporati nei design e nelle tecnologie dei robot collaborativi moderni. Inoltre, il lavoro di Colgate e Peshkin ha contribuito a cambiare il paradigma della robotica industriale, spostando l'attenzione da macchine isolate e autonome a sistemi collaborativi e interattivi in cui uomini e robot possono lavorare insieme in modo sinergico.

Nel corso degli anni successivi, altre aziende e istituti di ricerca hanno continuato a sviluppare e raffinare i robot collaborativi con la conseguente creazione di nuove generazioni di cobot. Tali cobot rappresentano un notevole avanzamento rispetto ai loro predecessori, offrendo caratteristiche che li rendono ideali per una vasta gamma di applicazioni industriali e commerciali, promuovendo la diffusione della robotica collaborativa nei vari settori (Figura [1.2](#)). Di seguito sono presentati alcuni dei principali sviluppi e caratteristiche di questi cobot di nuova

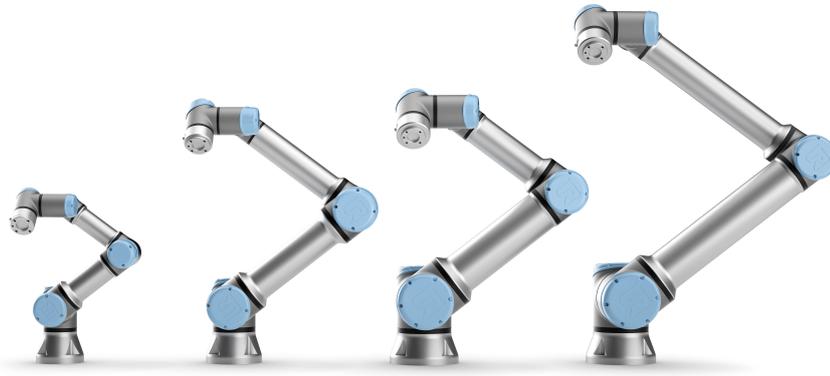


Figura 1.2: Diversi modelli di cobot prodotti dalla Universal Robots [\[3\]](#)

generazione:

- **Design ergonomico e sicuro:** progettati con un'attenzione particolare alla sicurezza e all'ergonomia. Questi robot sono solitamente dotati di superfici morbide e angoli arrotondati per ridurre al minimo il rischio di lesioni in caso di contatto con gli esseri umani. Inoltre, spesso presentano caratteristiche come sensori di sicurezza tattili e ammortizzatori per ridurre l'impatto in caso di collisione.
- **Bracci robotici leggeri e agili:** rispetto ai robot industriali tradizionali, i cobot di nuova generazione sono spesso dotati di bracci robotici più leggeri e agili. Questo li rende più adatti a operare in spazi ristretti e a eseguire compiti che richiedono movimenti precisi e rapidi. Inoltre, i bracci più leggeri contribuiscono a ridurre il rischio di lesioni in caso di contatto accidentale con gli operatori umani.
- **Sistemi di sensori avanzati:** dotati di sistemi di sensori avanzati che consentono loro di percepire l'ambiente circostante e di interagire in modo intelligente con gli esseri umani. Questi sensori possono includere telecamere, lidar, sensori di forza e di pressione, nonché sensori di prossimità per rilevare la presenza di persone nelle vicinanze. Questi sistemi consento-

no ai cobot di adattare il loro comportamento in tempo reale in base alla situazione e di operare in modo sicuro e efficace vicino agli esseri umani.

- **Facilità d'uso e programmazione:** progettati per essere facilmente programmabili e configurabili dagli utenti senza necessità di competenze specialistiche in robotica. Molte aziende offrono software intuitivi e piattaforme di programmazione basate su GUI (Interfaccia Grafica Utente) che consentono agli operatori di programmare i cobot attraverso semplici operazioni di trascinamento e rilascio o mediante istruzioni di programmazione visuale. Questo rende i cobot accessibili anche a utenti non esperti e contribuisce a ridurre i tempi e i costi di implementazione.

Con l'aumento della presenza di robot collaborativi negli ambienti di lavoro dove i quest'ultimi operano vicino agli esseri umani, è essenziale garantire la massima sicurezza per evitare incidenti e lesioni. A tal fine, sono stati sviluppati diversi standard specifici per i cobot che definiscono delle linee guida per la sicurezza e il loro uso pratico. Le applicazioni collaborative rientrano nell'ambito generale della sicurezza delle macchine disciplinato dalla Direttiva Macchine che definisce il RESS (Essential Health and Safety Requirements).

Gli standard di riferimento riportati nella Direttiva Macchine sono:

- **UNI EN ISO 12100:2010** “Machine safety, general design principles, risk assessment, and risk reduction”.
- **UNI EN ISO 10218-2:2011** “Robots and equipment for robots, Safety requirements for industrial robots, Part 2: Systems and integration of robots”.
- **UNI EN ISO 10218-1:2012** “Robots and equipment for robots, Safety requirements for industrial robots, Part 1: Robots”.

In un contest internazionale la specifica tecnica ISO/TS 16066:2016 “Robots and robotic devices, Collaborative Robots” è dedicata ai requisiti di sicurezza dei metodi collaborativi previsti dallo standard UNI EN ISO 10218-2:2011.

In accordo con lo standard internazionale UNI EN ISO 10218 1 e 2, e più ampiamente spiegato nella ISO/TS 15066:2016, sono definite quattro classi di requisiti di sicurezza per robot collaborativi:

- Arresto monitorato con valutazione della sicurezza (SMS) è usato per cessare il moto del robot prima che un operatore entri nello spazio di lavoro collaborativo per interagire con il robot e completare il compito. Questa modalità viene usata tipicamente quando il cobot lavora principalmente da solo ma occasionalmente un operatore umano entra nella sua zona di lavoro.
- Guida a mano (HG), dove un operatore usa un dispositivo di guida a mano, che si trova sull'end-effector o in sua prossimità, per trasmettere un comando di movimento al robot.
- Monitoraggio della velocità e della separazione (SSM), dove il robot e l'operatore possono muoversi insieme nello spazio di lavoro collaborativo. La riduzione del rischio è attiva mantenendo almeno la distanza protettiva di separazione tra robot e operatore in ogni momento. Durante il suo movimento, il robot non deve mai avvicinarsi all'operatore più della distanza protettiva di separazione. Quando questo accade il robot si ferma. Quando poi l'operatore si sposta il robot può ricominciare il suo movimento. Quando il robot diminuisce la sua velocità di lavoro anche la distanza protettiva di separazione diminuisce di conseguenza.
- Limitatore di forza e potenza (PFL), il sistema del robot dovrebbe essere progettato per ridurre il rischio di un operatore non superando il valore della soglia limite per contatti quasi statici, come definito nella valutazione dei rischi.

### 1.3 Applicazioni, vantaggi e svantaggi

I tradizionali sistemi robotici industriali richiedono un uso pesante di barriere ed equipaggiamenti per la sicurezza perimetrale che riducono inevitabilmente la flessibilità aumentandone però il costo e lo spazio richiesto. Tuttavia il mercato

attuale richiede tempi di consegna ridotti e personalizzazione di massa, imponendo in questo modo sistemi di assemblaggio flessibili e multi-obiettivo [4]. Queste necessità sono particolarmente comuni per piccole e medie aziende (SME). Robot collaborativi (o cobot) rappresentano la naturale evoluzione che può risolvere le attuali sfide nelle attività di manifattura e di assemblaggio. Queste soluzioni sono inoltre progettate per essere facilmente riprogrammate anche da operatori non esperti così da poter essere riusate in diversi ruoli. La collaborazione tra uomo e cobot viene vista come una via promettente per raggiungere incrementi di produttività riducendo i costi di produzione in quanto combina l'abilità di giudicare, reagire e pianificare dell'uomo con la ripetibilità e la forza di un robot.

La scelta verso sistemi collaborativi uomo-robot è principalmente dettata da motivazioni economiche, di salute occupazionale (ergonomia e fattore umano) e di uso efficiente degli spazi. Un altro vantaggio è la semplificazione nella programmazione del robot per le azioni necessarie al completamento di un compito. La maggior convenienza è tuttavia la flessibilità dei sistemi collaborativi: teoricamente questi sistemi possono essere inseriti nell'impianto molto facilmente e più velocemente e possono inoltre adattarsi bene nei casi in cui il layout della produzione abbia bisogno di essere cambiato continuamente [5]. Sistemi collaborativi possono anche ottenere costi unitari di produzione più bassi: [6] si è osservato che elevato grado di collaborazione ha un alto impatto nella portata e, in determinati processi, la portata può anche essere maggiore di quella dei sistemi tradizionali. La Tabella 1.1 fornisce un confronto tra sistemi collaborativi e tradizionali per quattro diversi lavori: assemblaggio (l'atto di collegare due o più componenti), posizionamento (l'atto di posizionare ogni parte nella posizione corretta), la presa (l'atto di prendere dal punto di alimentazione) e il maneggiamento (la manipolazione della parte in presa).

Nel comparare le capacità dell'operatore umano rispetto ad un sistema automatizzato risulta chiaro che le performance del sistema manuale sono molto influenzate da fattori ergonomici, i quali limitano il peso del prodotto e l'accuratezza dell'operatore [7]. Queste restrizioni limitano quindi le capacità dell'operatore umano di effettuare compiti di maneggiamento e presa di parti pesanti e/o ingombranti. I sistemi robotici tradizionali possono superare questo problema

avendo elevata capacità di carico e ripetibilità. Tuttavia la flessibilità e destrezza richiesta per assemblaggi complessi potrebbe rivelarsi troppo costosa o addirittura impossibile da raggiungere con robot tradizionali [8]. Questo divario può essere superato dai sistemi collaborativi in quanto combinano le capacità dei robot tradizionali con la destrezza e flessibilità dell'operatore umano. I robot collaborativi sono specialmente vantaggiosi per compiti di assemblaggio in particolare se il compito viene eseguito con un operatore umano. Possono anche essere usati per applicazioni di pick and place anche se robot tradizionali possono offrire risultati migliori in termini di velocità, precisione e carico.

Per riassumere brevemente quanto spiegato sopra, di seguito sono elencati alcuni dei principali vantaggi e svantaggi.

**Vantaggi della Robotica Collaborativa:**

- **Aumento della produttività:** I robot collaborativi possono lavorare in sinergia con gli operatori umani, aumentando la produttività complessiva delle operazioni industriali.
- **Miglioramento della qualità:** Grazie alla precisione e alla ripetibilità delle azioni, i robot collaborativi possono contribuire a migliorare la qualità dei prodotti e dei processi.
- **Riduzione del rischio di incidenti:** I robot collaborativi sono progettati per interagire in modo sicuro con gli operatori umani, riducendo il rischio di incidenti sul lavoro.
- **Flessibilità operativa:** I robot collaborativi sono in grado di adattarsi rapidamente a cambiamenti nelle condizioni di produzione e di eseguire una vasta gamma di compiti diversificati.
- **Riduzione dei costi:** L'automazione attraverso robot collaborativi può contribuire a ridurre i costi di produzione, ad esempio attraverso la riduzione degli errori umani e il miglior utilizzo delle risorse.
- **Miglioramento delle condizioni di lavoro:** L'uso di robot collaborativi può ridurre il carico di lavoro fisico e ripetitivo sugli operatori umani, migliorando le loro condizioni di lavoro e riducendo l'affaticamento.

	Human Operator	Collaborative System	Traditional Robot	Handling Systems
<i>Assemblaggio</i>	Elevata destrezza e flessibilità	Combina destrezza dell'uomo e capacità del robot	Destrezza e/o flessibilità forse irraggiungibili	No compiti complessi con end-effector commerciali
<i>Posizionamento</i>	Elevata destrezza	Cobot commerciali con ripetibilità inferiore	Elevata ripetibilità e carico	Elevato carico
<i>Handling</i>	Peso del prodotto limitato	Tipici cobot con utile basso	Elevato carico e velocità	Elevato carico
<i>Picking</i>	Peso del prodotto limitato	Tipici cobot con utile basso	Elevato carico e ripetibilità	Difficile raccolta dei contenitori a causa delle dimensioni

Tabella 1.1: Valutazione quantitativa delle soluzioni più adatte per i principali compiti industriali [9]

**Svantaggi della Robotica Collaborativa:**

- Costo iniziale elevato: L'implementazione di sistemi robotici collaborativi può richiedere un investimento significativo in termini di hardware, software e formazione del personale.
- Complessità tecnologica: La progettazione e l'implementazione di sistemi robotici collaborativi possono essere complesse e richiedere competenze specializzate nell'ingegneria meccanica, elettronica, informatica e nell'integrazione di sistemi.
- Rischi di sicurezza: Nonostante siano progettati per interagire in modo sicuro con gli operatori umani, i robot collaborativi possono ancora presentare rischi di sicurezza, ad esempio in caso di guasti hardware o errori di programmazione.
- Impatto sull'occupazione: L'automazione attraverso robot collaborativi può portare a una riduzione della domanda di manodopera in alcuni settori, con possibili implicazioni sull'occupazione e sulla ristrutturazione del mercato del lavoro.
- Necessità di manutenzione e aggiornamenti: I robot collaborativi richiedono regolare manutenzione e aggiornamenti software per garantire il loro corretto funzionamento nel tempo, il che può comportare costi aggiuntivi e interruzioni delle attività produttive.

## 1.4 Fattore umano

Il “fattore umano” nella robotica collaborativa rappresenta degli aspetti fondamentali per il design delle moderne postazioni di lavoro necessari a garantire un ambiente di lavoro sicuro, efficiente e produttivo in cui uomini e robot possono interagire in modo sinergico.

È possibile valutare il fattore umano come macro argomento adottando le seguenti sottocategorie, riassunte anche nella Tabella [1.2](#).

<b>Fattore umano</b>	<b>Descrizione</b>
<i>Ergonomia</i>	Aspetti fisici, muscoloscheletrici e sensoriali di attività lavorative e collaborative
<i>Carico Mentale</i>	Aspetti cognitivi ed emozionali relativi alla richiesta lavorativa (complessità dei task), architettura cognitiva umana (limitate risorse cognitive), emozioni e umore
<i>Fiducia</i>	L'atteggiamento secondo cui il robot aiuta a raggiungere un obiettivo in una situazione specifica, correlato alla comprensione da parte del lavoratore delle capacità e dei limiti del robot (ad es. sicurezza percepita, affidabilità, consapevolezza della situazione e trasparenza, movimento e velocità della presa del robot)
<i>Accettazione</i>	Gli aspetti legati alla convinzione soggettiva che il robot possa aumentare le prestazioni sul lavoro e che possa essere utilizzabile senza sforzo, anche per quanto riguarda le potenziali conseguenze dell'introduzione del cobot a livello di comunità di forza lavoro (ad es. cambiamenti di ruolo, perdita di posti di lavoro)
<i>Usabilità</i>	Gli aspetti legati all'efficacia, all'efficienza e alla soddisfazione nel raggiungimento degli obiettivi specifici

Tabella 1.2: Campi di ricerca del fattore umano [10]

- La sottocategoria dell'ergonomia si concentra sulle caratteristiche anatomiche, antropometriche, fisiologiche e biomeccaniche dell'uomo in relazione con le attività collaborative. Infatti, è ben noto che disturbi muscoloscheletrici, legati al layout, sicurezza e salute della postazione di lavoro, possano impattare sulle performance del sistema ([11] e [12]). L'importanza dell'ergonomia va di pari passo con quanto esprime Hägele et al.(2002) [8]: robot industriali, e quindi i cobot, vengono spesso usati per rimpiazzare o aiutare l'operatore umano quando sono necessari grandi sforzi fisici come per esempio il sollevamento e la gestione di carichi pesanti. Inoltre l'ergonomia dovrebbe anche essere considerata per minimizzare i rischi derivanti da attività ripetitive così da ridurre il fattore di rischio legato ai disturbi muscoloscheletrici (MSD).
- La sottocategoria del carico mentale si concentra sugli sforzi mentali dovuti a stress cognitivo e/o esterno che può derivare dalla richiesta del lavoro (per esempio la complessità dei task, intercambiabilità e il formato delle istruzioni) e dall'architettura cognitiva dell'uomo (per esempio le limitate risorse cognitive e la capacità di memoria) (Van Acker et al., 2018 [13]). Il carico mentale viene anche associato alle emozioni e all'umore degli uomini che possono condizionare l'operatore in termini di performance lavorative e di soddisfazione. 3. La sottocategoria della fiducia si riferisce alla comprensione dell'operatore riguardo le abilità e i limiti del robot, ovvero valuta quanto l'operatore si sente a suo agio a lavorare in collaborazione con il robot. Questo dipende dalle informazioni disponibili dai lavoratori e dalla loro esperienza, per questa ragione la fiducia dipende in gran parte dall'addestramento dell'operatore ed è quindi di importanza critica per il successo della collaborazione. La fiducia viene inoltre influenzata da tre sottocategorie, come riporta Hancock et al. (2011) [14]: persona (ovvero l'esperienza dell'operatore), robot (ovvero il numero di informazioni presentate all'operatore) e l'ambiente (ovvero la complessità delle attività)
- La sottocategoria dell'accettazione considera l'opinione dell'operatore e il conseguente uso/non uso della tecnologia. Tali fattori possono essere legati

alla cultura dell'individuo come anche alla percezione della propria efficienza specialmente nel caso di robot dalle sembianze antropomorfe (Latikka et al.,2019 [15]). Si considerano inoltre le conseguenze all'introduzione del cobot nella comunità lavorativa.

- La sottocategoria dell'usabilità rappresenta gli aspetti di semplicità e soddisfazione nell'uso del cobot. Infatti non è solo importante che l'operatore sia in grado di operare con il cobot ma anche che questo sia soddisfacente. Un sistema con scarsa usabilità risulta dannoso per la collaborazione uomo-robot in quanto ostacola l'acquisizione degli obiettivi condivisi. Nella seguente trattazione verrà analizzata la sottocategoria dell'ergonomia, in particolare per quanto riguarda l'analisi della spesa metabolica dell'operatore in relazione al completamento delle attività.



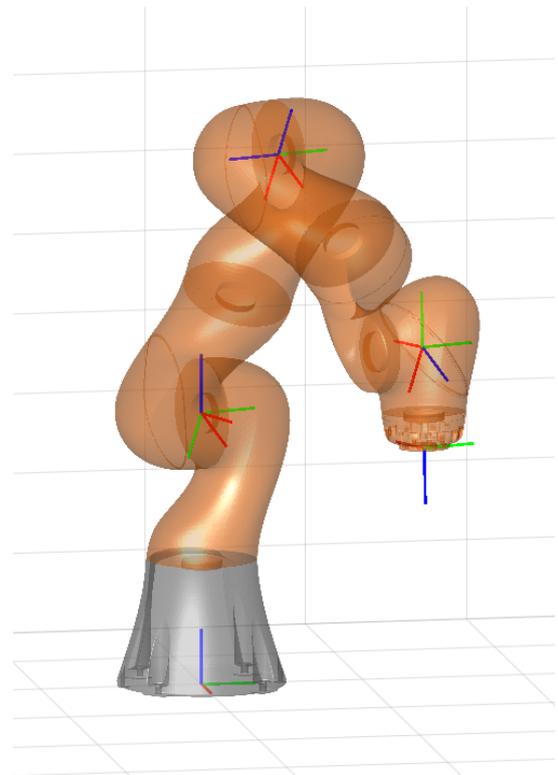
# Capitolo 2

## Modello del Robot a 7 Assi

### 2.1 Kuka iiwa 7 R800



(a)



(b)

Figura 2.1: a) il robot Kuka iiwa 7 R800 [16] b) il modello 3D del robot implementato con MatLAB<sup>®</sup>.

Per creare il modello matematico e quindi simulare la spesa energetica metabolica di un braccio umano è stato preso come riferimento il robot Kuka LBR iiwa 7 R800, uno tra i robot industriali più avanzati e versatili del mercato. Si tratta di un innovativo robot industriale progettato e prodotto da Kuka Robotics. La sigla "iiwa" sta per "intelligent industrial work assistant", sottolineando il suo ruolo di assistente intelligente per il lavoro industriale.

Caratterizzato da una struttura snodata a 7 assi, questo robot è concepito per operare in stretta collaborazione con gli operatori umani, grazie alla sua capacità di percezione dell'ambiente e di adattamento alle variazioni delle condizioni di lavoro. Il Kuka iiwa 7 R800 è caratterizzato da una serie di specifiche tecniche che lo rendono particolarmente adatto per l'interazione uomo-robot e per applicazioni in ambienti collaborativi. La sua struttura meccanica a 7 gradi di libertà offre una notevole flessibilità di movimento, consentendo al robot di eseguire una vasta gamma di compiti con precisione e affidabilità. Il Kuka iiwa 7 R800 è in grado di manipolare carichi fino a 7 kg, il che lo rende adatto per una vasta gamma di applicazioni industriali. Il suo raggio di lavoro di circa 800 mm consente di operare in spazi ristretti o in ambienti di lavoro condivisi con operatori umani senza compromettere le prestazioni o la sicurezza. Altre importanti caratteristiche del Kuka iiwa 7 R800 includono:

- **Autonomia:** l'unità di controllo Kuka Sunrise Cabinet di LBR iiwa agevola una rapida messa in funzione anche per attività più complesse. Attività non ergonomiche e monotone possono essere quindi realizzate in modo affidabile e autonomo.
- **Capacità di apprendimento:** possiede tre modalità operative e programmate LBR iiwa attraverso la simulazione: indicata la posizione desiderata il robot rileverà le coordinate del punto della traiettoria. Per eventuali pause è possibile realizzare interruzioni e controlli semplicemente attraverso lo sfioramento.
- **Flessibilità operativa:** grazie alla sua struttura snodata e alla gamma completa di movimenti dei suoi 7 assi, il Kuka iiwa 7 R800 è in grado di

eseguire una vasta gamma di compiti, da quelli delicati e precisi a quelli più robusti e dinamici.

- **Programmazione intuitiva:** il robot può essere programmato e controllato attraverso un'interfaccia utente intuitiva e user-friendly, che consente agli operatori umani di definire facilmente le attività e le sequenze di movimento desiderate. Grazie a funzionalità come il "Lead-Through Programming", che consente di insegnare al robot nuove posizioni e movimenti mediante la guida manuale, anche gli operatori meno esperti possono sfruttare appieno le potenzialità del robot senza necessità di competenze di programmazione avanzate. Questa facilità di programmazione rende il Kuka iiwa 7 R800 adatto anche per utilizzi in ambienti di produzione flessibili e adattivi.
- **Riduzione del tempo di inattività:** grazie alla sua capacità di adattarsi alle variazioni delle condizioni di lavoro e alla sua elevata affidabilità, il Kuka iiwa 7 R800 può contribuire a ridurre il tempo di inattività delle linee di produzione e a migliorare l'efficienza complessiva dei processi industriali.
- **Sensibile:** questo robot leggero con regolazione di qualità riconosce i contorni in modo rapido e con forza regolabile. Rileva la corretta posizione di montaggio, monta i componenti rapidamente e con una precisione di momento specifica per l'asse pari a  $\pm 2$
- **Sensori di contatto:** grazie a un sofisticato sistema di sensori di forza e a un controllo di movimento avanzato, il robot è in grado di rilevare e rispondere alla presenza di oggetti e di operatori umani nell'ambiente di lavoro. Questa caratteristica permette al robot di operare in modo sicuro e intuitivo, regolando autonomamente la sua traiettoria e la sua forza per evitare collisioni e danni.
- **Tempi di reazione rapidi:** grazie ai sensori di coppia, LBR iiwa riconosce subito i contatti e riduce immediatamente la forza e la velocità. È in grado di maneggiare componenti delicati grazie alla regolazione della posizione e della flessibilità senza pericolo di taglio o di incastro.

Il Kuka iiwa 7 R800 trova ampio impiego in una vasta gamma di settori industriali grazie alle sue capacità precedentemente elencate. Di seguito sono presentate più nel dettaglio alcune delle principali applicazioni e i vantaggi derivanti dall'utilizzo di questo robot collaborativo:

- **Assemblaggio e manipolazione:** il Kuka iiwa è ideale per l'assemblaggio di componenti complessi in settori come l'elettronica, l'automotive e la produzione industriale in generale. Grazie alla sua capacità di movimento preciso e alla sua sensibilità, può gestire componenti delicati e sensibili senza danneggiarli.
- **Pallettizzazione e confezionamento:** il robot è in grado di movimentare e impilare merci su pallet con grande precisione e affidabilità. Questa capacità lo rende particolarmente utile nei settori della logistica e della distribuzione, dove la movimentazione di merci è un'attività fondamentale.
- **Pick-and-Place:** il Kuka iiwa può essere utilizzato per il prelievo e la posa di oggetti in diversi contesti, come la produzione, la logistica e la lavorazione dei materiali. La sua flessibilità e precisione lo rendono adatto per gestire una vasta gamma di oggetti di diverse forme e dimensioni.
- **Lavorazione dei materiali:** il robot può essere impiegato anche in operazioni di taglio, saldatura, fresatura e altre lavorazioni dei materiali, contribuendo a migliorare la qualità e l'efficienza dei processi produttivi.
- **Collaborazione uomo-robot:** uno dei principali vantaggi del Kuka iiwa è la sua capacità di lavorare fianco a fianco con gli operatori umani senza barriere fisiche di sicurezza. Questo consente di creare ambienti di lavoro più flessibili e dinamici, in cui robot e operatori possono sfruttare al meglio le rispettive competenze e abilità.

In sintesi, il Kuka iiwa 7 R800 rappresenta una soluzione avanzata e affidabile per una vasta gamma di applicazioni industriali, offrendo numerosi vantaggi in termini di produttività, qualità, sicurezza e flessibilità operativa. La sua capacità di collaborare direttamente con gli operatori umani apre nuove prospettive nel

campo della robotica collaborativa, contribuendo a creare ambienti di lavoro più sicuri, efficienti e dinamici.

## 2.2 Spalla e Polso sferici

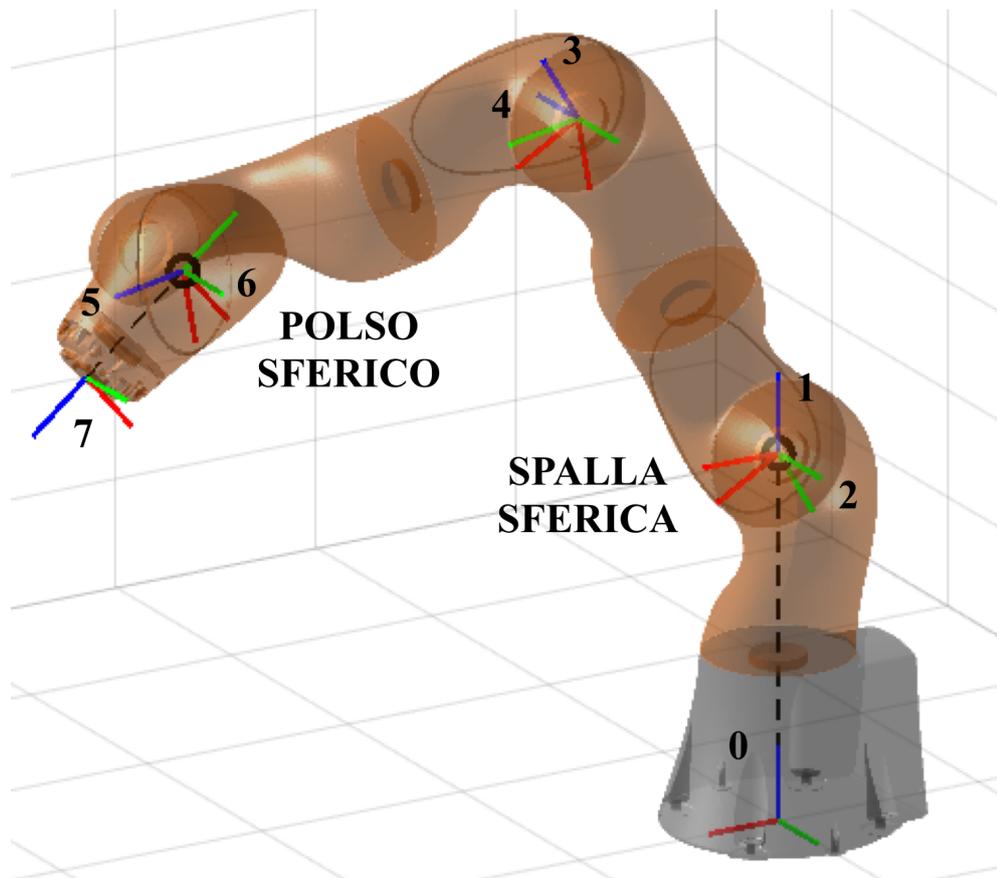


Figura 2.2: Modello di un robot a 7 assi con rappresentate le terne dei giunti, il centro spalla e il centro polso

Si parla di spalla sferica di un robot quando i suoi primi tre giunti ruotano attorno ad assi tra loro ortogonali e la loro intersezione crea un singolo punto. La posizione di questo punto, detto centro della spalla è indipendente dalle rotazioni dei tre giunti che invece influenzano solo l'orientazione del braccio robotico.

In modo analogo, si parla di polso sferico quando gli ultimi tre giunti ruotano attorno ad assi tra loro ortogonali e la loro intersezione crea un singolo punto. Anche in questo caso la posizione del punto, detto centro del polso, è indipendente

dalle rotazioni dei tre giunti che invece influenzano solo l'orientazione dell'end-effector. Entrambi sono componenti chiave di un robot industriale, necessari per consentire una vasta gamma di movimenti e operazioni.

### 2.2.1 Spalla sferica

La spalla sferica è la connessione primaria tra il braccio robotico e il corpo principale del robot. Essa fornisce una vasta gamma di movimenti al braccio, consentendogli di muoversi in modo flessibile e preciso nello spazio tridimensionale. Questo tipo di articolazione è spesso costituita da uno o più giunti rotanti ed è chiamata "sferica" proprio perché consente una rotazione multidirezionale attorno a un punto centrale, simile al movimento della spalla umana. Questo permette al robot di estendere e ritrarre il braccio, nonché di inclinarlo e ruotarlo per eseguire operazioni in diverse posizioni nello spazio. La spalla è fondamentale per fornire al robot una vasta gamma di movimenti e posizioni, consentendo di raggiungere facilmente punti di lavoro diversi e adattarsi alle variazioni delle condizioni di lavoro.

Le caratteristiche principali della spalla sferica di un robot includono:

- **Movimento sferico:** La spalla sferica permette al braccio robotico di compiere movimenti simili a quelli di una sfera grazie ai tre assi di rotazione ortogonali tra loro. Questa versatilità consente al robot di raggiungere posizioni complesse e orientarsi in modo flessibile per eseguire compiti di manipolazione e assemblaggio. I tre assi di rotazione tra di loro ortogonali precedentemente menzionati sono:
  - **Rollio:** Questo è il movimento di rotazione attorno all'asse longitudinale del braccio. Consente al braccio di ruotare lateralmente o di compiere movimenti simili a quelli di un rotolo.
  - **Beccheggio:** Questo movimento avviene attorno all'asse laterale del braccio e consente al braccio di inclinarsi verso l'alto o verso il basso, simile al movimento di una testa che annuisce.

- **Imbardata:** Questo è il movimento di rotazione attorno all'asse verticale del braccio. Consente al braccio di ruotare intorno a se stesso come un timone.
- **Attuatori:** Per generare questi movimenti, la spalla sferica è dotata di attuatori come motori elettrici o idraulici che forniscono la potenza necessaria. Questi attuatori sono controllati dal sistema di controllo del robot, che invia segnali per regolare la velocità e la direzione dei movimenti della spalla sferica.
- **Sensori di posizione:** La spalla sferica può anche essere equipaggiata con sensori di posizione che monitorano la posizione e l'orientamento del braccio rispetto al corpo principale del robot. Questi sensori forniscono feedback al sistema di controllo per garantire che il braccio si sposti nella posizione desiderata con precisione.
- **Struttura e materiali:** La spalla sferica è progettata per essere robusta e resistente, in grado di sostenere carichi pesanti e fornire stabilità al braccio durante le operazioni del robot. Di solito è realizzata con materiali resistenti e leggeri come alluminio o leghe di acciaio, che garantiscono una lunga durata e una maggiore affidabilità.

La spalla sferica è quindi una parte cruciale del braccio robotico in quanto consente al robot di generare una vasta gamma di movimenti in modo flessibile e preciso utili per eseguire una varietà di compiti industriali.

### 2.2.2 Polso sferico

Il polso sferico di un robot è situato all'estremità del braccio robotico ed è progettato per offrire una notevole flessibilità di movimento, simile al polso umano. L'integrazione del polso sferico nel braccio robotico fornisce al robot la capacità di eseguire movimenti di rotazione e inclinazione con l'utensile o con l'oggetto in presa con una maggiore precisione e versatilità. Il polso sferico è composto da uno o più giunti, a seconda della complessità del robot. Nel caso dei tre giunti,

ognuno di essi è responsabile del movimento lungo uno dei tre assi ortogonali che caratterizzano il polso sferico.

In particolare, i suoi tre movimenti principali sono così descritti:

- **Rollio:** Questo movimento consente al polso sferico di ruotare l'utensile o l'oggetto in presa attorno all'asse longitudinale del braccio robotico. Ad esempio, se il robot tiene un oggetto piatto come un disco, il rollio consentirà di ruotare il disco in modo che la sua faccia superiore possa essere rivolta in qualsiasi direzione desiderata.
- **Beccheggio:** Il beccheggio permette al polso sferico di inclinare l'utensile o l'oggetto in presa verso l'alto o verso il basso rispetto al piano orizzontale. Questo movimento è utile quando il robot deve sollevare un oggetto da una superficie o posizionarlo su una superficie più alta o più bassa.
- **Imbardata:** L'imbardata consente al polso sferico di ruotare l'utensile o l'oggetto attorno all'asse verticale. Questo movimento permette al robot di orientare l'oggetto in diverse direzioni orizzontali, consentendo una maggiore flessibilità nel posizionamento e nell'assemblaggio degli oggetti.

Il polso sferico è generalmente controllato da motori o attuatori che ricevono comandi dal sistema di controllo del robot. Questi motori possono variare nella loro complessità, a seconda delle capacità e delle specifiche del robot. In sintesi, la spalla e il polso sferico sono componenti essenziali di un robot industriale che consentono una vasta gamma di movimenti e operazioni, permettendo al robot di adattarsi a una varietà di compiti e condizioni di lavoro. Grazie a queste caratteristiche, i robot possono eseguire una vasta gamma di compiti in ambienti industriali, migliorando l'efficienza, la precisione e la flessibilità delle operazioni produttive.

## 2.3 Modello di Denavit-Hartenberg

Il modello di Denavit-Hartenberg (D-H) è un metodo ampiamente utilizzato per la descrizione della cinematica di un manipolatore seriale, come un braccio robotico.

È stato sviluppato da Jacques Denavit e Richard S. Hartenberg nel 1955 ed è diventato uno standard nel campo della robotica.

Il modello D-H rappresenta il sistema di coordinate locali per ciascun giunto di un manipolatore seriale. Questi sistemi di coordinate vengono utilizzati per descrivere la posizione e l'orientamento di ciascun link del robot. Il modello fornisce 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. Questi parametri risulteranno essere due rotazioni e due traslazioni (di cui una coordinata libera e 3 costanti).

Le caratteristiche principali del modello D-H includono:

- **Asse di rotazione:** Ogni giunto è associato a un asse di rotazione attorno al quale avviene il movimento. Questo asse è definito rispetto all'asse di traslazione del giunto precedente.
- **Asse di traslazione:** Ogni giunto ha un asse di traslazione lungo il quale avviene il movimento. Questo asse è definito rispetto all'asse di rotazione del giunto precedente.
- **Sistema di coordinate:** Per ciascun giunto, vengono definiti un sistema di coordinate locale con origine, asse z, asse x e asse y. Questi sistemi di coordinate descrivono la posizione e l'orientamento del link successivo rispetto al link corrente.
- **Parametri di D-H:** Per descrivere completamente il sistema, vengono utilizzati quattro parametri D-H per ciascun giunto: l'angolo tra i due sistemi di coordinate ( $\alpha$ ), la lunghezza del link ( $a$ ), l'angolo di giunto ( $\theta$ ) e la lunghezza del link sull'asse di traslazione ( $d$ ).
- **Matrice di trasformazione:** Usando i parametri D-H, è possibile calcolare la matrice di trasformazione omogenea tra i sistemi di coordinate locali dei link adiacenti. Queste matrici permettono di trasformare le coordinate tra i diversi sistemi di riferimento.

La procedura per il calcolo dei parametri di D-H si sviluppa in quattro passaggi:

1. Individuazione e numerazione degli assi di movimento
2. Individuazione delle normali comuni alle coppie di assi successivi
3. Disegno delle terne di riferimento
  - l'origine  $O$  si pone all'intersezione con il segmento di minima distanza tra l'asse di movimento considerato e quello successivo;
  - l'asse  $z$  si disegna allineato con l'asse di movimento (che sia questo una traslazione o una rotazione) con verso arbitrario;
  - l'asse  $x$  si disegna allineato con il segmento di minima distanza (ortogonale ad entrambi gli assi di movimento) e punta verso l'asse di movimento successivo;
  - infine l'asse  $y$  si disegna secondo la regola della mano destra.
4. Compilazione della tabella di D-H contenete in ogni riga i quattro 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) e tre costanti (figura 2.3):
  - $\alpha_{i-1}$ : 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);
  - $a_{i-1}$ : distanza di  $O_i$  (origine dell' $i$ -esima terna) da  $O_{i-1}$  misurata lungo l'asse  $x_{i-1}$  (positiva secondo il verso dell'asse  $x_{i-1}$ );
  - $\theta_i$ : 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). Nel caso del Kuka iiwa 7 R800 considerato questo parametro coincide sempre con la coordinata libera;
  - $d_i$ : distanza di  $O_i$  da  $O_{i-1}$  misurata lungo l'asse  $z_{i-1}$  (positiva secondo il verso dell'asse  $z_{i-1}$ ).

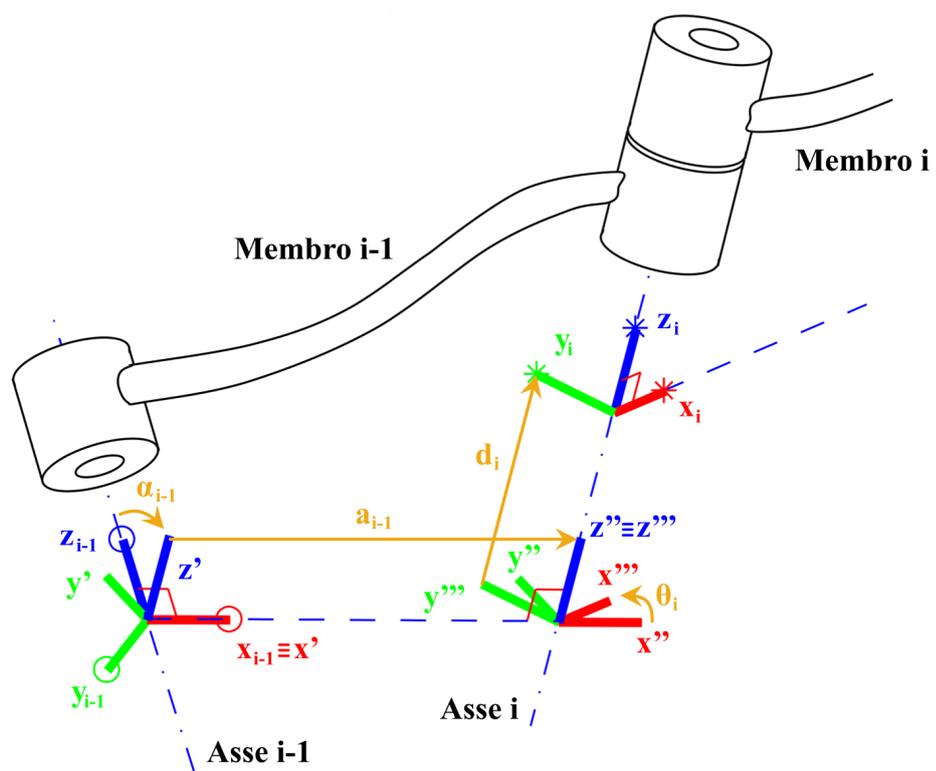


Figura 2.3: Allocazione dei sistemi di riferimento con il metodo D-H e parametri di D-H

Dopo aver calcolato i quattro parametri di D-H, tra la terna  $i-1$  e la terna  $i$ , è possibile ricavare la matrice di trasformazione  $\mathbf{T}_{i,i-1}$  nel modo seguente:

$$\mathbf{T}_{i,i-1} = \mathbf{T}_{Rx}(\alpha_{i-1})\mathbf{T}_{Tx}(a_{i-1})\mathbf{T}_{Rz}(\theta_i)\mathbf{T}_{Tx}(d_i) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_{i-1}) & -\cos(\alpha_{i-1}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & -\cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Risolvendo le moltiplicazioni tra matrici si ottiene il risultato finale:

$$\mathbf{T}_{i,i-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1})d_i \\ \sin(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i)\sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1})d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

È quindi possibile comporre la tabella di D-H (Tabella 2.1) e determinare le matrici di trasformazione del Kuka iiwa 7 R800. Il calcolo dei quattro parametri è avvenuto tramite cinematica inversa implementata con MatLAB<sup>®</sup>.

$i$	$\mathbf{T}_{i,i-1}$	$\alpha_{i-1}$ [°]	$a_{i-1}$ [mm]	$\theta_i$ [°]	$d_i$ [mm]
1	$T_{10}$	0	0	$\theta_1$	$d_1$
2	$T_{21}$	$-\pi/2$	0	$\theta_2$	0
3	$T_{32}$	$\pi/2$	0	$\theta_3$	$d_3$
4	$T_{43}$	$\pi/2$	0	$\theta_4$	0
5	$T_{54}$	$-\pi/2$	0	$\theta_5$	$d_5$
6	$T_{65}$	$-\pi/2$	0	$\theta_6$	0
7	$T_{76}$	$\pi/2$	0	$\theta_7$	$d_7$

Tabella 2.1: Tabella di D-H del Kuka iiwa 7 R800;  $d_1 = 340mm$ ,  $d_3 = 400mm$ ,  $d_5 = 400mm$ ,  $d_7 = 126mm$ .

# Capitolo 3

## Modello Energetico

### 3.1 Modello della simulazione

L'obiettivo di questa tesi, riguardante lo studio della spesa energetica metabolica di un operatore durante l'esecuzione di uno o più task, ha richiesto l'implementazione di un modello MatLAB<sup>®</sup> che potesse simulare il funzionamento di entrambe le braccia (vedi paragrafo [3.1.1](#)) dell'operatore che opera in una postazione di lavoro con caratteristiche che rispettano le norme ISO (vedi paragrafo [3.1.2](#)).

#### 3.1.1 Braccia dell'operatore

Come già anticipato in precedenza (vedi paragrafo [2.1](#)) la modellazione del robot in esame è avvenuta con considerevole mimesi dell'architettura del braccio umano: entrambi i meccanismi presentano infatti 7 gradi di libertà e si ha facile possibilità di individuare una corrispondenza tra alcuni punti lungo il braccio robotico e i punti anatomici di spalla, gomito e polso [3.1](#).

In particolare, l'intersezione tra gli assi di rotazione dei primi tre giunti rappresenta la spalla del robot, l'intersezione tra i giunti 3,4 e 5 individua il gomito mentre il punto in cui si incontrano gli assi di rotazione degli ultimi tre giunti individua il polso del robot. Per la simulazione del braccio destro e sinistro è stato usato il modello descritto nel capitolo [2](#) ruotandone adeguatamente la terna di base attorno all'asse y di, rispettivamente, 90° e -90°. Il modello implementato rappresenta così le braccia dell'operatore come mostrato nella Figura [3.2](#).

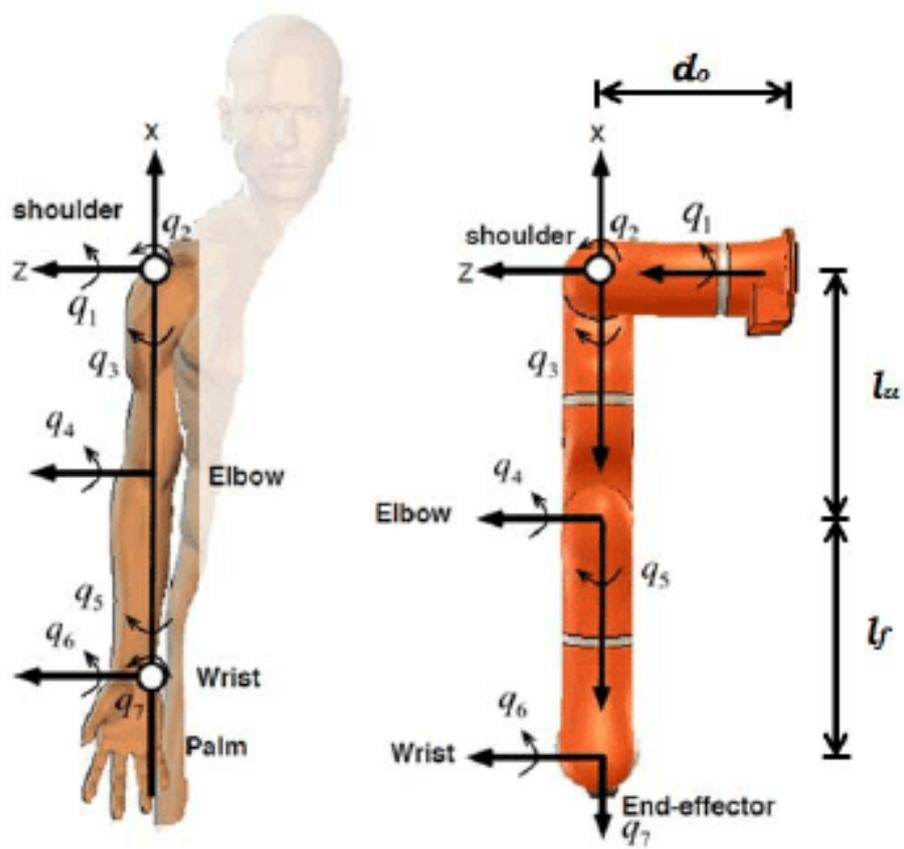


Figura 3.1: Biomimesi del Kuka iiwa 7 R800 [17].

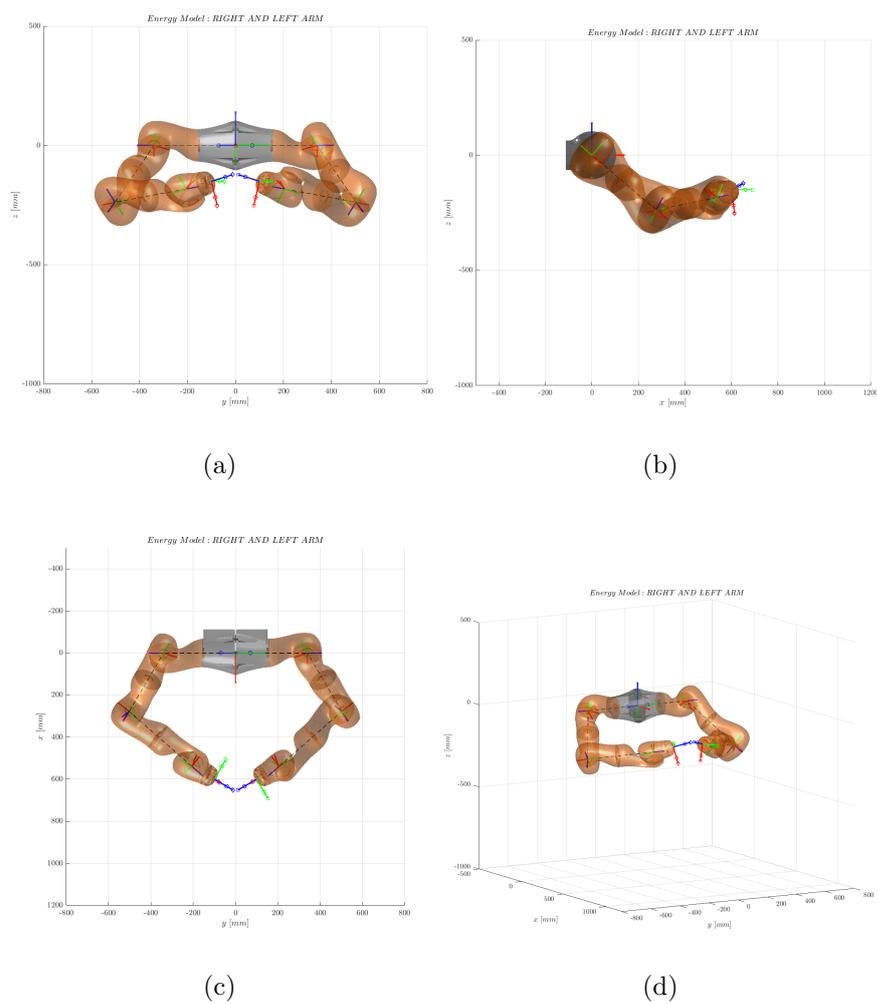


Figura 3.2: Diverse viste del modello MatLAB<sup>®</sup> delle braccia usato per lo studio: a) frontale, b) laterale, c) superiore e d) prospettica.

### 3.1.2 Postazione di lavoro

La postazione di lavoro nell'assemblaggio manuale riveste un ruolo cruciale nell'industria manifatturiera, poiché sono il punto in cui gli operatori umani eseguono una serie di compiti che richiedono precisione, destrezza e attenzione ai dettagli. L'ergonomia di queste postazioni è di fondamentale importanza per garantire la salute e il benessere degli operatori, nonché per massimizzare l'efficienza e la qualità delle operazioni di assemblaggio.

In questo contesto, diverse normative e linee guida sono state sviluppate per regolare l'ergonomia delle postazioni di lavoro:

- **ISO 6385 - Principi ergonomici nell'organizzazione del lavoro:** Questa norma fornisce principi ergonomici generali che devono essere applicati alla progettazione di qualsiasi sistema di lavoro, comprese le postazioni di assemblaggio manuale. Essa sottolinea l'importanza di adattare il lavoro all'uomo, considerare le esigenze fisiche e mentali degli operatori, e progettare per la variazione individuale.
- **ISO 9241 - Ergonomia dell'interazione uomo-sistema:** Questa serie di norme fornisce linee guida per la progettazione di sistemi interattivi, inclusi i dispositivi e le interfacce utilizzati nelle postazioni di lavoro di assemblaggio manuale. Si concentra sulla facilità d'uso, sulla compatibilità con le esigenze dell'utente e sulla riduzione dell'affaticamento e dello stress fisico e mentale.
- **Normative nazionali sulla sicurezza e la salute sul lavoro:** Molti paesi hanno normative specifiche che regolano la sicurezza e la salute sul lavoro, inclusi gli aspetti ergonomici delle postazioni di lavoro. Queste normative possono includere requisiti per l'ergonomia delle sedie, l'altezza dei tavoli di lavoro, la disposizione degli strumenti e la gestione dei carichi di lavoro.
- **Linee guida industriali e raccomandazioni:** Alcune industrie hanno sviluppato linee guida specifiche per l'ergonomia delle postazioni di lavoro nell'assemblaggio manuale, tenendo conto delle particolari esigenze e sfide

del settore. Queste linee guida possono includere raccomandazioni per la disposizione degli strumenti, l'utilizzo di dispositivi di assistenza ergonomica e la pianificazione delle rotazioni dei compiti.

Assicurarsi di conformarsi a tali normative non solo migliora la salute e il benessere degli operatori umani, ma contribuisce anche a migliorare la qualità del lavoro e la produttività complessiva delle operazioni di assemblaggio manuale. Le normative e le linee guida specifiche sull'ergonomia sono necessarie per la progettazione di postazioni di lavoro per l'assemblaggio manuale sicure, confortevoli ed efficienti.

Ecco alcuni dei principali parametri ergonomici considerati dalle normative:

- **Altezza del piano di lavoro:** L'altezza del piano di lavoro deve essere regolabile per adattarsi alle diverse altezze degli operatori umani. Le norme ISO raccomandano che l'altezza del piano di lavoro sia compresa tra 680 mm e 720 mm per le operazioni sedute e tra 900 mm e 1100 mm per le operazioni in piedi.
- **Spazio per le gambe:** Deve essere previsto uno spazio adeguato sotto il piano di lavoro per le gambe degli operatori umani, garantendo una postura comoda e permettendo loro di muoversi liberamente durante le operazioni di lavoro. Le norme ISO raccomandano uno spazio per le gambe di almeno 600 mm in larghezza e 650 mm in profondità.
- **Spazio di lavoro:** La postazione di lavoro deve essere progettata in modo tale da permettere agli operatori umani di raggiungere facilmente tutte le aree di lavoro senza doversi piegare eccessivamente o sforzarsi. Le norme ISO raccomandano uno spazio di lavoro orizzontale di almeno 800 mm in larghezza e 600 mm in profondità per le operazioni sedute e di almeno 1200 mm in larghezza e 800 mm in profondità per le operazioni in piedi.
- **Posizione degli strumenti e degli utensili:** Gli strumenti e gli utensili utilizzati dagli operatori umani devono essere posizionati in modo ergonomico per ridurre lo sforzo fisico e migliorare l'accessibilità. Le norme ISO raccomandano che gli strumenti e gli utensili siano posizionati entro

un raggio di 600 mm intorno all'area di lavoro principale degli operatori umani.

- **Illuminazione:** La postazione di lavoro deve essere adeguatamente illuminata per garantire una visibilità ottimale delle operazioni di lavoro. Le norme ISO raccomandano un livello di illuminazione di almeno 500 lux per le operazioni generali e di almeno 1000 lux per le operazioni di precisione.
- **Ventilazione e temperatura:** La postazione di lavoro deve essere dotata di un sistema di ventilazione adeguato per mantenere una temperatura confortevole e un'aria pulita e salubre. Le norme ISO raccomandano una temperatura ambiente compresa tra 20°C e 25°C e una velocità dell'aria inferiore a 0,25 m/s.

Nel modello implementato per questo studio è stata introdotto la presenza di un tavolo di lavoro seguendo le linee guida delle normative (Figura 3.3). È stato inoltre implementato un metodo per impedire alle braccia di collidere e/o intersecarsi con il tavolo (vedi paragrafo 3.2) così da evitare movimenti e posizioni che sarebbero risultate impossibili in una simulazione reale.

## 3.2 Controllo della ridondanza

La presenza del settimo asse in un robot genera un grado di libertà in eccesso che può essere sfruttato per richiedere al robot di effettuare un ulteriore compito mentre raggiunge la posizione determinata. Questa capacità viene definita “ridondanza” e permette al robot di compiere una serie di movimenti che possono avvenire senza che la posizione dell'end-effector venga modificata. Anche se non strettamente necessaria, la presenza del settimo asse offre una maggiore flessibilità e capacità al sistema. Per comprendere facilmente quanto appena affermato si pensi all'analogia umana: fissata la posizione e l'orientazione della mano, il gomito può comunque ruotare su un arco di circonferenza il cui vettore normale è parallelo alla congiungente tra la spalla e il polso.

I principali motivi per cui potrebbe essere desiderabile avere un settimo asse in un robot sono:

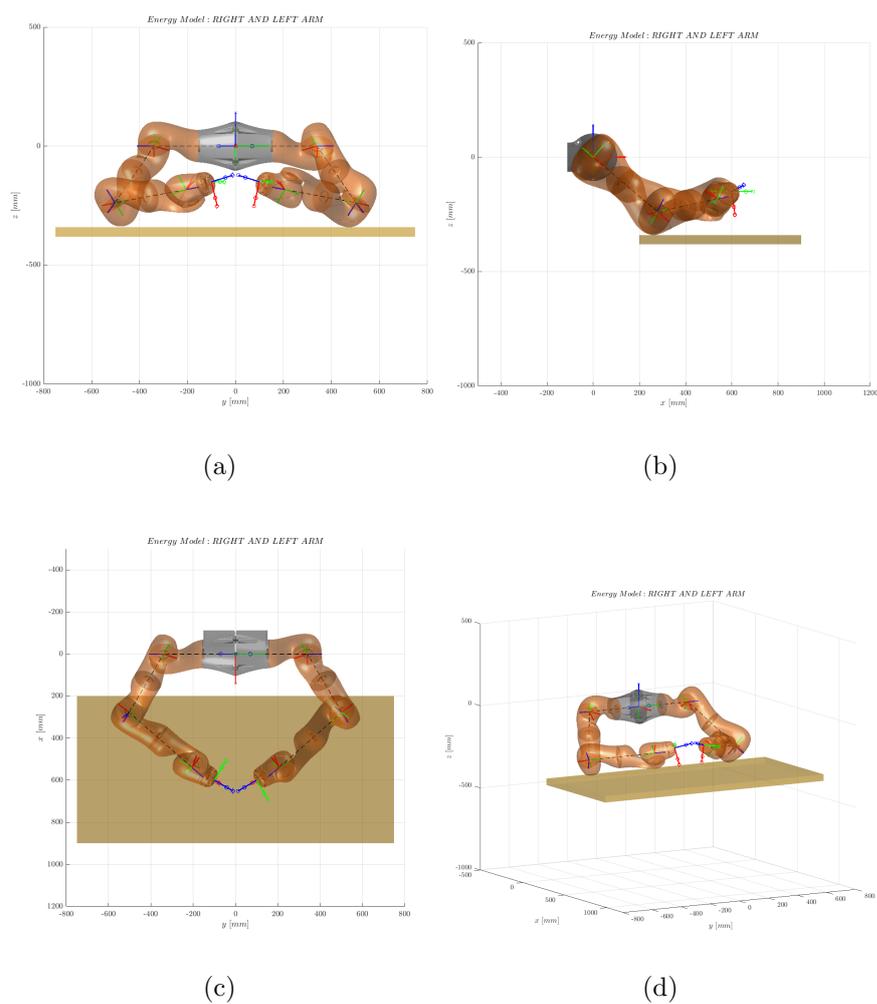


Figura 3.3: Diverse viste del modello MatLAB<sup>®</sup> complessivo di braccio destro, braccio sinistro e tavolo: a) frontale, b) laterale, c) superiore e d) prospettica.

- **Aumento della flessibilità:** l'aggiunta di un settimo asse può consentire al robot di raggiungere posizioni o angoli che altrimenti sarebbero al di fuori della sua portata con solo sei assi. Questo aumenta la flessibilità del robot nell'esecuzione di compiti complessi e può ridurre la necessità di posizionare e orientare ripetutamente i pezzi;
- **Miglioramento della precisione:** un settimo asse può essere utilizzato per effettuare piccoli aggiustamenti di posizione o orientamento, migliorando la precisione complessiva del sistema. Questo può essere particolarmente utile in applicazioni di alta precisione, come la lavorazione dei materiali o l'assemblaggio;
- **Ottimizzazione del percorso:** il settimo asse può essere utilizzato per ottimizzare il percorso del robot, riducendo la necessità di movimenti bruschi o complessi dei sei assi principali. Questo può portare a un miglioramento delle prestazioni del sistema e a un aumento della velocità operativa.

Tuttavia, la presenza di un settimo asse può anche portare a complessità aggiuntive nel controllo e nella programmazione del robot, nonché a costi aggiuntivi per l'installazione e la manutenzione. Pertanto, l'utilità della ridondanza dovuta al settimo asse dipenderà dalle esigenze specifiche dell'applicazione e dalle considerazioni di costo/beneficio.

Nel caso della seguente tesi, la scelta di simulare il braccio umano con un robot a sette assi è dovuta proprio all'ulteriore possibilità di movimento che quest'ultimo possiede. Questo consente di richiedere al robot il raggiungimento di una desiderata posizione mantenendo il gomito in una certa posizione rispetto alla spalla e al polso. Per questo motivo il grado di libertà in eccesso è stato parametrizzato per gestire la posizione del gomito nello spazio e quindi avere un maggior controllo sulla configurazione del robot. Per la gestione della ridondanza è quindi stato introdotto l'angolo al centro  $\alpha$  sotteso dall'arco di circonferenza descritto dal gomito rispetto ad una posizione di riferimento (Figura 3.4).

Prima di procedere con la trattazione si riporta nuovamente la tabella di D-H del robot in analisi già mostrata in precedenza (vedi paragrafo 2.3) per definire l'uso di alcuni nuovi parametri.

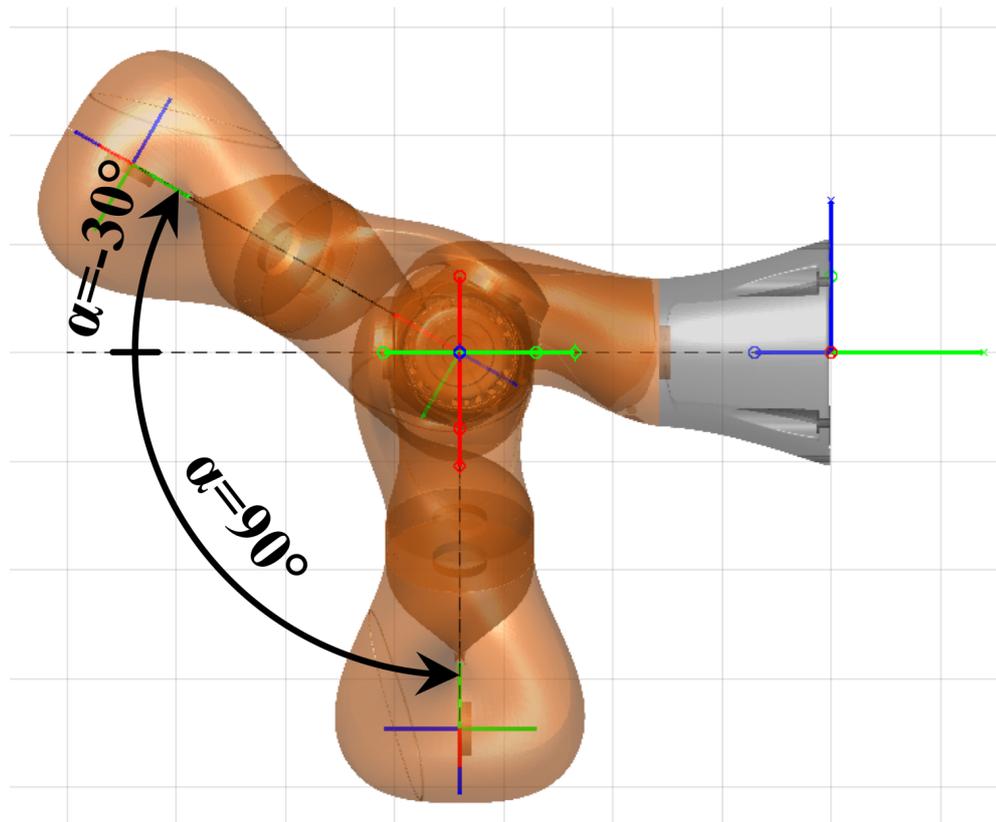


Figura 3.4: Ridondanza del Kuka iiwa 7 R800 parametrizzata dall'angolo al centro  $\alpha$  (la linea orizzontale rappresenta il piano di riferimento). In particolare sono qui rappresentate due delle infinite posizioni che il gomito può raggiungere al variare di  $\alpha$  nonostante l'end-effector sia nella medesima posizione in tutti i casi.

$i$	$T_{i,i-1}$	$\alpha_{i-1}$ [°]	$a_{i-1}$ [mm]	$\theta_i$ [°]	$d_i$ [mm]
1	$T_{10}$	0	0	$\theta_1$	$d_1$
2	$T_{21}$	$-\pi/2$	0	$\theta_2$	0
3	$T_{32}$	$\pi/2$	0	$\theta_3$	$d_3$
4	$T_{43}$	$\pi/2$	0	$\theta_4$	0
5	$T_{54}$	$-\pi/2$	0	$\theta_5$	$d_5$
6	$T_{65}$	$-\pi/2$	0	$\theta_6$	0
7	$T_{76}$	$\pi/2$	0	$\theta_7$	$d_7$

Tabella 3.1: Tabella di D-H del Kuka iiwa 7 R800;  $d_1 = 340mm$ ,  $d_3 = 400mm$ ,  $d_5 = 400mm$ ,  $d_7 = 126mm$ .

Siano definiti:

- ${}^b l_s = d_1$  : distanza tra terna di base e spalla;
- ${}^s l_e = d_3$  : distanza tra spalla e gomito;
- ${}^e l_w = d_5$  : distanza tra gomito e polso;
- ${}^w l_t = d_7$  : distanza tra polso e end-effector;

Assegnata la posizione obiettivo si può calcolare:

$$\mathbf{T}_{70} = \mathbf{A} = \begin{bmatrix} & & & x_A \\ & \mathbf{R}_A & & y_A \\ & & & z_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Il vettore  $\mathbf{w}$  individua la posizione del polso rispetto al sistema di coordinate di base:

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix} - {}^w l_t \mathbf{R}_A \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

Per calcolare il vettore  $\mathbf{ws}$  che descrive la posizione del polso rispetto alla spalla è sufficiente operare come segue:

$$\mathbf{ws} = \begin{pmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ {}^b l_s \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

Si usa ora la formula di Rodrigues, utile per calcolare la matrice di rotazione in grado di ruotare un vettore nello spazio noti l'asse di rotazione (parallelo a  $\mathbf{ws}$  nel presente caso) e l'angolo di rotazione ( $\alpha$ ):

$$\mathbf{R}_\alpha = \mathbf{I} + (1 - \cos(\alpha)) {}^s \mathbf{K}_2^w + \sin(\alpha) {}^s \mathbf{K}_w \quad (3.4)$$

${}^s \mathbf{K}_w$  è una matrice asimmetrica che si ricava dal vettore  ${}^s \mathbf{u}_w$  come segue:

$${}^s \mathbf{u}_w = \frac{\mathbf{ws}}{\|\mathbf{ws}\|} \quad (3.5)$$

$${}^s \mathbf{K}_w = \begin{bmatrix} 0 & -{}^s u_w(z) & {}^s u_w(y) \\ {}^s u_w(z) & 0 & -{}^s u_w(x) \\ -{}^s u_w(y) & {}^s u_w(x) & 0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Come già riportato, grazie alla ridondanza, la posizione del robot risulta indipendente dalla posizione e dall'orientazione dell'organo terminale. Ciò che cambia sono però le rotazioni dei giunti sferici di spalla e polso. In particolare il cambiamento nell'orientazione della spalla si calcola come:

$$\mathbf{R}_{30} = \mathbf{R}_\alpha \mathbf{R}'_{30} \quad (3.7)$$

dove  $\mathbf{R}'_{30}$  indica la matrice di trasformazione tra la terna del membro 3 e la terna di base quando l'angolo  $\theta_3$  è uguale a 0 (piano di riferimento). L'angolo  $\alpha$  è uguale a 0 se e solo se il piano in cui giace il gomito (e quindi l'intero braccio robotico) coincide con il piano di riferimento.

### 3.3 Analisi dinamica inversa

L'analisi dei modelli dinamici è essenziale per simulare il movimento, esaminare la configurazione dei robot e progettare algoritmi di controllo. Simulare il movimento

di un robot permette di creare strategie di controllo e pianificare le traiettorie da valutare, senza dover dipendere da un sistema fisicamente presente.

L'analisi dinamica inversa si usa per determinare le forze necessarie per produrre una specifica accelerazione all'interno di un sistema a corpo rigido. Il calcolo della dinamica inversa può essere riassunto dalla seguente equazione:

$$\boldsymbol{\tau} = ID(model, \mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \quad (3.8)$$

dove  $\mathbf{q}$ ,  $\dot{\mathbf{q}}$ ,  $\ddot{\mathbf{q}}$  e  $\boldsymbol{\tau}$  sono, rispettivamente, vettori di variabili generalizzate di posizione, velocità, accelerazione e forza mentre *model* è un modello di sistema di un particolare sistema a corpo rigido.

Esistono due metodi principalmente utilizzati per la derivazione delle equazioni del moto di un robot nello spazio dei giunti [18] [19]. Il primo metodo, concettualmente semplice e sistematico, si basa sulla formulazione di Lagrange. Il secondo metodo invece si basa sulla formulazione di Newton-Eulero e restituisce il modello in forma ricorsiva. È computazionalmente più efficiente rispetto al primo caso citato in quanto sfrutta la struttura aperta della catena cinematica del robot. In questa trattazione è stato usato il metodo basato sulla formulazione di Newton-Eulero.

### 3.3.1 Formulazione di Newton-Eulero

Questa formulazione si basa sulla definizione di un algoritmo necessario per il calcolo della dinamica inversa di un albero cinematico. L'algoritmo è definito algoritmo ricorsivo di Newton-Eulero ed è l'algoritmo più semplice ed efficiente per il lavoro in quanto usa una limitata complessità computazionale.

Per comprendere l'algoritmo di seguito illustrato è necessario descrivere adeguatamente il modello di sistema del robot utilizzato in termini di membri, giunti e inerzie. Il primo passo nella definizione di un modello di sistema è classificare i vari componenti (membri e giunti) e specificare come sono collegati. Il robot preso in considerazione è costituito da un'unica catena cinematica non ramificata, ad anello aperto, come mostrato in Figura 3.5.

Si considerino  $n$  membri mobili e  $n$  giunti a un grado di libertà tali che il giunto  $i$  connetta il membro  $i$  con il membro  $i - 1$ . Il giunto 1 collega il membro

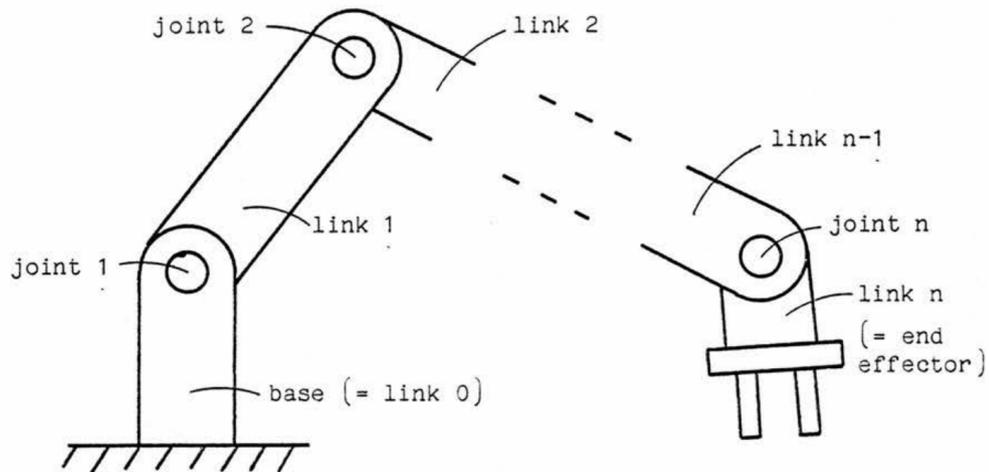


Figura 3.5: Robot costituito da un'unica catena cinematica non ramificata, ad anello aperto [20].

1 all'elemento di base fisso, che verrà definito membro 0. Il passo successivo è definire la geometria del membro, i tipi di giunto e i parametri di inerzia (vedi Figura 3.6). Viene introdotto così un insieme di sistemi di coordinate, uno per ciascun membro, dove il sistema di coordinate collegato al membro  $i$  è chiamato  $F_i$ . Poiché la posizione di un membro è fissa nel proprio sistema di coordinate, possiamo considerare l'inerzia del membro  $i$  e l'asse di qualsiasi giunto incorporato nel membro  $i$  come costanti nel sistema  $F_i$ . Sia  $\mathbf{I}_i$  l'inerzia rotazionale del membro  $i$  e sia  $z$  l'asse di movimento consentito dal giunto  $i$ , entrambi espressi nelle coordinate di  $F_i$ .

Una volta introdotti i sistemi di coordinate di ciascun membro, è possibile spostarsi da un sistema di coordinate ad un altro. Per fare ciò, sono state introdotte le matrici di trasformazione di coordinate tra membri adiacenti  $\mathbf{R}_{i+1,i}$ . Ciascuna di queste matrici è una funzione di una variabile di giunto e deve essere calcolata per ciascun caso specifico. I dettagli su come ciò viene fatto dipendono da come vengono scelti i sistemi di coordinate del membro. Infine, dobbiamo definire le variabili di sistema: la variabile di giunto per il giunto  $i$   $q_i$ , la velocità  $\dot{q}_i$ , l'accelerazione  $\ddot{q}_i$  e la forza generalizzata  $\tau_i$ .

La dinamica inversa di un generico albero cinematico può essere calcolata attraverso i seguenti tre passaggi:

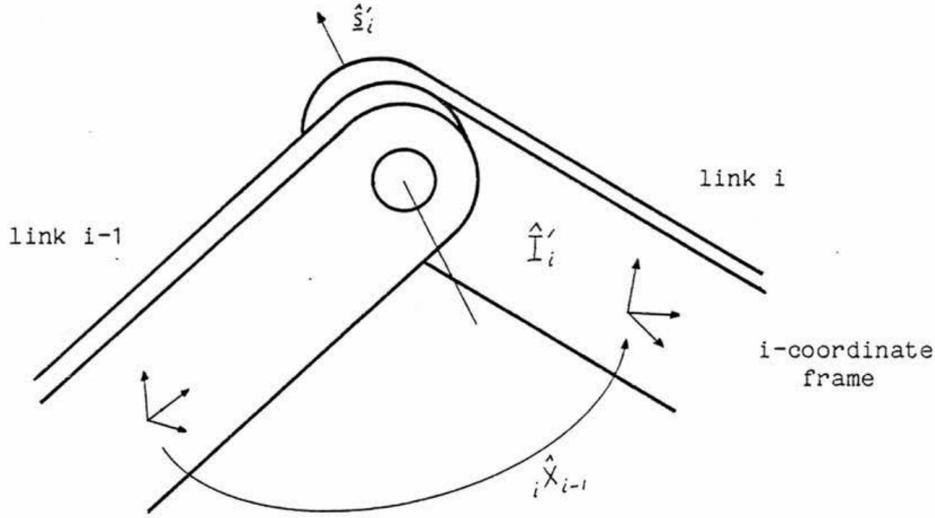


Figura 3.6: Parametri e geometria di un giunto  $i$  [20].

1. Calcolare la velocità e l'accelerazione di ciascun corpo nella catena cinematica
2. Calcolare le forze necessarie per produrre queste accelerazioni
3. Calcolare le forze trasmesse attraverso le articolazioni dalle forze che agiscono sui corpi

L'algoritmo viene descritto infine attraverso le seguenti formule (valide solo per i giunti rotoidali):

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_i = \mathbf{R}_{i-1,i} \dot{\boldsymbol{\theta}}_{i-1} + \mathbf{z}_i \dot{q}_i \quad (3.9)$$

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{R}_{i-1,i} (\mathbf{v}_{i-1} + \dot{\boldsymbol{\theta}}_{i-1} \times \mathbf{r}_{i,i-1}) \quad (3.10)$$

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_i = \mathbf{R}_{i-1,i} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{i-1} + \mathbf{z}_i \ddot{q}_i + (\mathbf{R}_{i-1,i} \dot{\boldsymbol{\theta}}_i) \times \mathbf{z}_i \dot{q}_i \quad (3.11)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{R}_{i-1,i} (\dot{\mathbf{v}}_{i-1} + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{i-1} \times \mathbf{r}_{i,i-1} + \dot{\boldsymbol{\theta}}_{i-1} \times \dot{\boldsymbol{\theta}}_{i-1} \times \mathbf{r}_{i,i-1}) \quad (3.12)$$

$$\mathbf{F}_i = m_i (\dot{\mathbf{v}}_i + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i \times \mathbf{c}_i + \dot{\boldsymbol{\theta}}_i \times \dot{\boldsymbol{\theta}}_i \times \mathbf{c}_i) \quad (3.13)$$

$$\mathbf{N}_i = \mathbf{I}_i^{cm} \ddot{\boldsymbol{\theta}}_i + \dot{\boldsymbol{\theta}}_i \times \mathbf{I}_i^{cm} \dot{\boldsymbol{\theta}}_i \quad (3.14)$$

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{F}_i + \mathbf{R}_{i+1,i} \mathbf{f}_{i+1} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{n}_i = \mathbf{N}_i + \mathbf{c}_i \times \mathbf{F}_i + \mathbf{R}_{i+1,i} \mathbf{n}_{i+1} + \mathbf{r}_{i+1,i} \times \mathbf{R}_{i+1,i} \mathbf{f}_{i+1} \quad (3.16)$$

$$\tau_i = \mathbf{z}_i^T + \mathbf{n}_i \quad (3.17)$$

dove:

- $\dot{\boldsymbol{\theta}}_i$  e  $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_i$ : rispettivamente la velocità e l'accelerazione angolari del corpo  $i$ ;
- $\mathbf{v}_i$  e  $\dot{\mathbf{v}}_i$ : rispettivamente la velocità e l'accelerazione lineari nell'origine della terna  $F_i$  (sistema di coordinate di riferimento del corpo  $i$ );
- $\mathbf{F}_i$  e  $\mathbf{N}_i$ : rispettivamente la forza e la coppia nette nel corpo  $i$ , espresse nel loro centro di massa;
- $\mathbf{f}_i$  e  $\mathbf{n}_i$ : rispettivamente la forza e la coppia esercitate dal corpo  $i$  attraverso il giunto  $i$ ;
- $m_i$ ,  $\mathbf{c}_i$  e  $\mathbf{I}_i^{cm}$ : rispettivamente la massa, il centro di massa e l'inerzia rotazionale rispetto al centro di massa del corpo  $i$  nelle coordinate di  $F_i$ ;
- $\mathbf{R}_{i+1,i}$ : la matrice di rotazione ortogonale  $3 \times 3$  che trasforma le coordinate dalla terna  $F_{i-1}$  alla terna  $F_i$ ;
- $\mathbf{r}_{i,i-1}$ : la posizione dell'origine della terna  $F_i$  rispetto alla terna  $F_{i-1}$ , espressa nelle coordinate della terna  $F_{i-1}$ ;
- $\dot{q}_i$ ,  $\ddot{q}_i$  e  $\tau_i$ : rispettivamente la velocità, l'accelerazione e la forza generalizzata del giunto  $i$ ;
- $\mathbf{z}_i$ : la direzione dell'asse del giunto  $i$  espresso nelle coordinate della terna  $F_i$ ;

Tali formule sono quindi state usate al fine di calcolare la forza generalizzata  $\tau_i$  di ogni giunto per essere in seguito usata nel calcolo della spesa energetica metabolica, come spiegato nel capitolo seguente.

### 3.3.2 Massa dei giunti del braccio

In biomeccanica, i parametri dei segmenti corporei (BSP) sono input necessari per una serie di applicazioni. I BSP includono le masse dei segmenti corporei,

le posizioni del centro di massa dei segmenti corporei rispetto a un telaio di riferimento del segmento, i momenti d'inerzia della massa segmentale rispetto a un punto del segmento e le lunghezze dei segmenti corporei. I BSP possono fungere da dati di input per protesi ingegneristiche, per il design ergonomico e sono necessari per la dinamica inversa [21].

Nel presente studio sono stati usati i BPS relativi alla massa per l'assegnazione delle masse dei giunti del robot all'interno del modello MatLAB® per emulare quelle di un braccio umano. Nell'articolo [21] la scansione 3D del corpo umano viene suddivisa in 16 segmenti, tre dei quali suddividono il braccio: braccio superiore (o più semplicemente braccio), avambraccio e mano Figura 3.7.

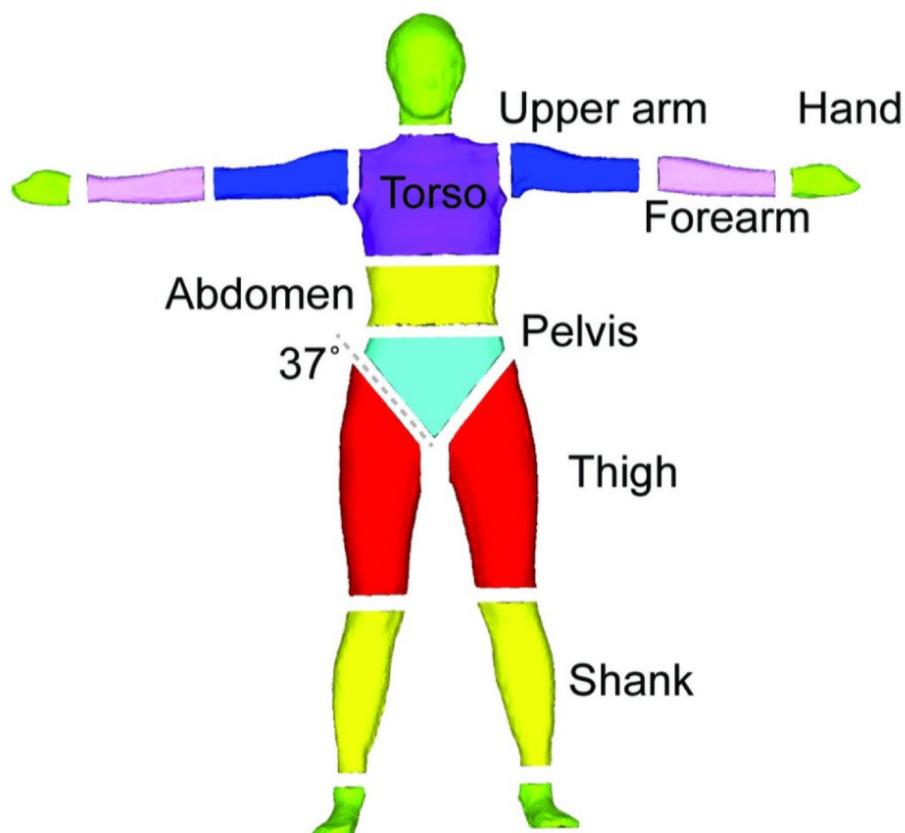


Figura 3.7: Segmentazione della scansione 3D del corpo umano in 16 segmenti individuali [21].

Per ogni segmento sono quindi stati calcolati i diversi BSP mediante un protocollo di scansione di superfici 3D. Come già anticipato precedentemente, si

considerano per questa tesi i BPS relativi alle masse dei segmenti del braccio umano di un soggetto maschile calcolati mediante metodo ECM (vedi Tabella [3.2](#)).

Segmento	Massa [kg]
Braccio	$2,3 \pm 0,3$
Avambraccio	$1,7 \pm 0,2$
Mano	$0,7 \pm 0,1$

Tabella 3.2: Massa dei segmenti del braccio umano di un soggetto maschile calcolati mediante metodo ECM [\[21\]](#).

I valori qui sopra riportati sono quindi stati usati come riferimento per assegnare le masse ai giunti del modello del robot come mostrato in Tabella [3.3](#).

Segmento	Giunto	Massa [kg]
Torso	1	0
Braccio	2	1,65
	3	1,65
Avambraccio	4	0,6
	5	0,6
Mano	6	0,45
	7	0,45

Tabella 3.3: Massa dei segmenti del braccio umano di un soggetto maschile calcolati mediante metodo ECM [\[21\]](#).

L'assegnazione di una massa nulla nel caso del giunto 1 deriva dal fatto che per l'analisi della spesa energetica metabolica del braccio umano non viene considerata la spesa dovuta ai muscoli del torso durante il compimento dei compiti assegnati.

### 3.3.3 Inerzia dei giunti del braccio

Per il calcolo delle inerzie rotazionali dei giunti necessarie al calcolo della dinamica inversa si è usato SolidWorks<sup>®</sup>. A partire dalle rappresentazioni 3D dei singoli giunti è stato usato lo strumento “Mass Properties” del programma per ricavare i momenti di inerzia presi nel centro di massa e allineati con il sistema di coordinate risultato.

### 3.3.4 Carico sollevato dall’operatore

Il modello MatLAB<sup>®</sup> implementato comprende anche la possibilità di applicare un carico al braccio. Grazie a ciò il modello è in grado di calcolare l’energia metabolica spesa sia in condizioni di scarico che di carico, capacità necessaria per l’analisi di operazioni come per esempio assemblaggi o pick and place.

Per fare ciò il carico è stato considerato come fosse un ottavo giunto del robot, direttamente collegato all’end effector del robot. In questo modo è possibile gestire il carico proprio come uno degli altri giunti, assegnandogli una massa e una matrice di inerzia necessari per lo studio dell’analisi dinamica inversa.

## 3.4 Modello metabolico di Alexander

Una volta che sono state calcolate le velocità angolari dei singoli giunti  $\dot{\theta}_i$  e le forze esercitate sugli stessi  $\tau_i$  (vedi paragrafo [3.3.1](#)), è possibile procedere con il calcolo della spesa metabolica. Per fare ciò è necessario trovare una relazione che legghi quanto è stato calcolato. Uno dei modelli più noti e usati è sicuramente il modello di Alexander [\[22\]](#).

Per applicare tale modello si comincia con il calcolo della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  esercitata dal giunto  $i$ -esimo. La formula usata cambia in base al segno della velocità angolare del giunto:

$$\begin{aligned} M_{iso,i} &= M(\dot{\theta}_{max} + G\dot{\theta}_i)/(\dot{\theta}_{max} - \dot{\theta}_i) && \text{per } \dot{\theta}_i > 0 \\ M_{iso} &= M(\dot{\theta}_{max} - 7,6G\dot{\theta}_i)/(\dot{\theta}_{max} - 13,6G\dot{\theta}_i - 0,8\dot{\theta}_i) && \text{per } \dot{\theta}_i < 0 \end{aligned} \quad (3.18)$$

dove  $\dot{\theta}_i$  è la velocità angolare del giunto  $i$ -esimo,  $\dot{\theta}_{max}$  è la velocità angolare massima e  $G$  è una costante.  $G$  assume diversi valori in base al muscolo preso in esame

e solitamente oscilla tra 2 e 6 [23]. La Figura 3.8 è stata disegnata fissando  $G=4$ , un valore tipico per muscoli moderatamente veloci. Maggiore è il valore di  $G$  e più il grafico risulterà concavo per velocità angolari positive.

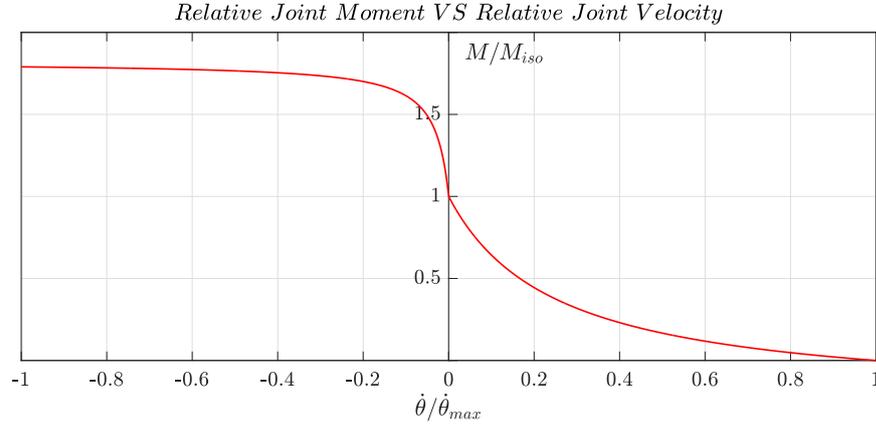


Figura 3.8: Andamento di  $M/M_{iso}$  in relazione a  $\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}$ .

Per quanto riguarda  $\dot{\theta}_{max}$  sono stati raccolti valori empirici dei muscoli umani dei giunti (gomito incluso ma spalla esclusa) [24]. È risultato che la  $\dot{\theta}_{max}$  dei muscoli del gomito risulta 22 rad/s nel caso della contrazione e 28 rad/s per l'estensione. Tuttavia i movimenti che andranno simulati in questo studio non richiederanno elevata forza e/o velocità. Per questo motivo è possibile fissare  $\dot{\theta}_{max}=15$  rad/s, uguale sia nel caso di contrazione che di estensione [25]. Lo stesso valore è stato usato anche per i calcoli relativi alla spalla.

Calcolati quindi i momenti isometrici  $M_{iso,i}$  è possibile procedere al calcolo della potenza meccanica  $P_i$  richiesta dal giunto  $i$ -esimo per il compimento di un singolo movimento, istante per istante:

$$P_i = M_{iso,i} \dot{\theta}_{max} \phi(\dot{\theta}_i/\dot{\theta}_{max}) \quad (3.19)$$

dove  $\phi(\dot{\theta}_i/\dot{\theta}_{max})$  (il cui andamento è rappresentato nella Figura 3.9) è una funzione che cambia in base al segno della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$ :

$$\begin{aligned} \phi(\dot{\theta}_i/\dot{\theta}_{max}) &= 0,23 - 0,16 \exp(-8\dot{\theta}_i/\dot{\theta}_{max}) && \text{per } \dot{\theta}_i > 0 \\ \phi(\dot{\theta}_i/\dot{\theta}_{max}) &= 0,01 - 0,11(\dot{\theta}_i/\dot{\theta}_{max}) + 0,06 \exp(23\dot{\theta}_i/\dot{\theta}_{max}) && \text{per } \dot{\theta}_i < 0 \end{aligned} \quad (3.20)$$

È infine possibile calcolare l'energia spesa  $E_i$  del giunto  $i$ -esimo per il compimento di un'intera operazione (considerata come un'insieme finito di movimenti).

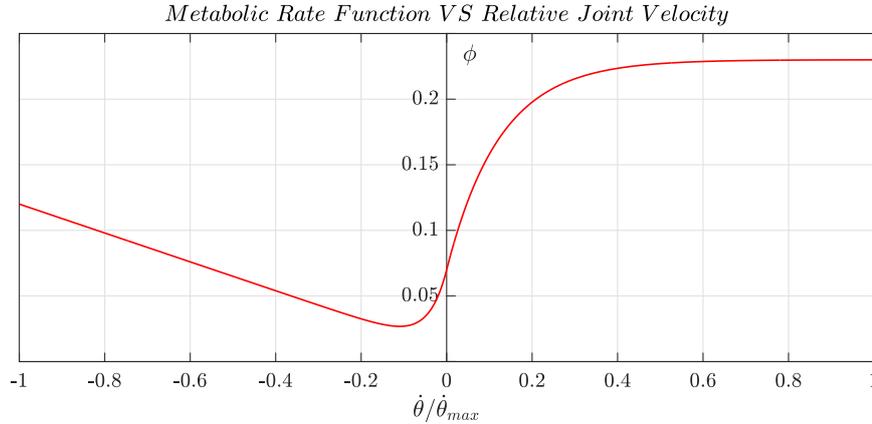


Figura 3.9: Andamento di  $\phi$  in relazione a  $\dot{\theta}/\dot{\theta}_{max}$ .

Per far ciò si integra la potenza metabolica totale del giunto  $i$ -esimo, spesa istante per istante, nel tempo:

$$E_i = \int_0^t |P_{tot,i}(t)| dt \quad (3.21)$$

dove  $P_{tot,i}$  è la somma delle singole  $P_i$  calcolate per ogni movimento che compone l'operazione. Inoltre è stato usato il modulo assoluto così che anche eventuali potenze metaboliche  $P_i$  con segno negativo contribuissero all'incremento dell'energia spesa  $E$  invece che alla sua riduzione.

Si rende nota l'esistenza di un altro articolo [24] che studia il modello di Alexander nel quale, per l'uso delle equazioni 3.18 e le equazioni 3.20, si considera il segno del lavoro invece che quello della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$ . Per questa tesi è stato usato il modello presentato in questo paragrafo in quanto è sembrato più consistente e si sono ottenute curve più significative.

### 3.5 Esempio di uso del modello

Prima di procedere con la simulazione di operazioni con l'utilizzo di entrambe le braccia viene presentato un semplice esempio per il calcolo della spesa metabolica con l'uso del solo braccio destro.

Per l'esempio, si consideri una semplice operazione di pick and place composta di tre movimenti (vedi Tabella 3.6) usando un carico cubico le cui caratteristiche sono espote nella Tabella 3.4.

Massa $m$ [kg]	Spigolo $s$ [m]	Matrice d'inerzia $I$ [kg · m <sup>2</sup> ]
0,1	0,1	$\begin{bmatrix} 1.667 & 0 & 0 \\ 0 & 1.667 & 0 \\ 0 & 0 & 1.667 \end{bmatrix} \times 10^{-4}$

Tabella 3.4: Parametri del carico.

Nella Tabella [3.5](#) sono elencati i parametri delle trasformazioni di Cardano (riferiti alla terna world) usate per definire le terne necessarie per il calcolo della cinematica inversa.

Posizione	Tipologia	$x$ [mm]	$y$ [mm]	$z$ [mm]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]
1	Pick	700	-400	100	0	90	0
2	Place	600	0	-240	0	180	0
3	Riposo	600	-100	-150	0	75	60

Tabella 3.5: Posizioni di pick, place e di riposo con relativi parametri delle trasformazioni di Cardano riferiti alla terna world.

Nella Tabella [3.6](#) sono fissati i tempi  $t_i$  di completamento dei relativi task.

Tempo [s]	Task braccio
0-5	Pick in 1
5-10	Place in 3
10-15	Riposo in 3

Tabella 3.6: Sequenza di operazioni effettuate dal braccio destro e dal braccio sinistro.

Si consideri che prima di raggiungere ogni posizione di pick, il modello prevede che il robot compia un movimento di approach di 50mm lungo l'asse  $z$  della terna del pick e, dopo aver afferrato il carico, compie un movimento di depart sempre della stessa distanza e lungo lo stesso asse. La medesima procedura viene compiuta anche con le posizioni di place. Questi movimenti di approach e depart possono essere apprezzati graficamente nelle figure che mostrano la traiettoria percorsa

dall'end effector ed anche nelle curve della velocità, coppia e potenza, prima e dopo le operazioni di pick e di place.

Una volta assegnati tutti i parametri necessari, il modello calcola i seguenti risultati:

- La rappresentazione della traiettoria disegnata dalla terna 7 (in magenta) (Figure [3.10](#), [3.11](#), [3.12](#) e [3.13](#)), ovvero la terna relativa all'end-effector;
- Le curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  dei singoli giunti (Figura [3.14](#));
- Le curve della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  e della coppia  $M_i$  dei singoli giunti (vedi rispettivamente paragrafo [3.4](#) e [3.3.1](#)) messe a confronto (Figura [3.15](#));
- Le curve della potenza meccanica  $P_i$  dei singoli giunti (Figura [3.16](#));
- Le curve della spesa energetica totale  $E_{tot}$  messa a confronto con la spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti, con carico e senza carico (Figura [3.17](#));
- I valori numerici della spesa energetica totale  $E_{tot}$  e della spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti, con carico (vedi Tabella [3.7](#)) e senza carico (vedi Tabella [3.8](#)).

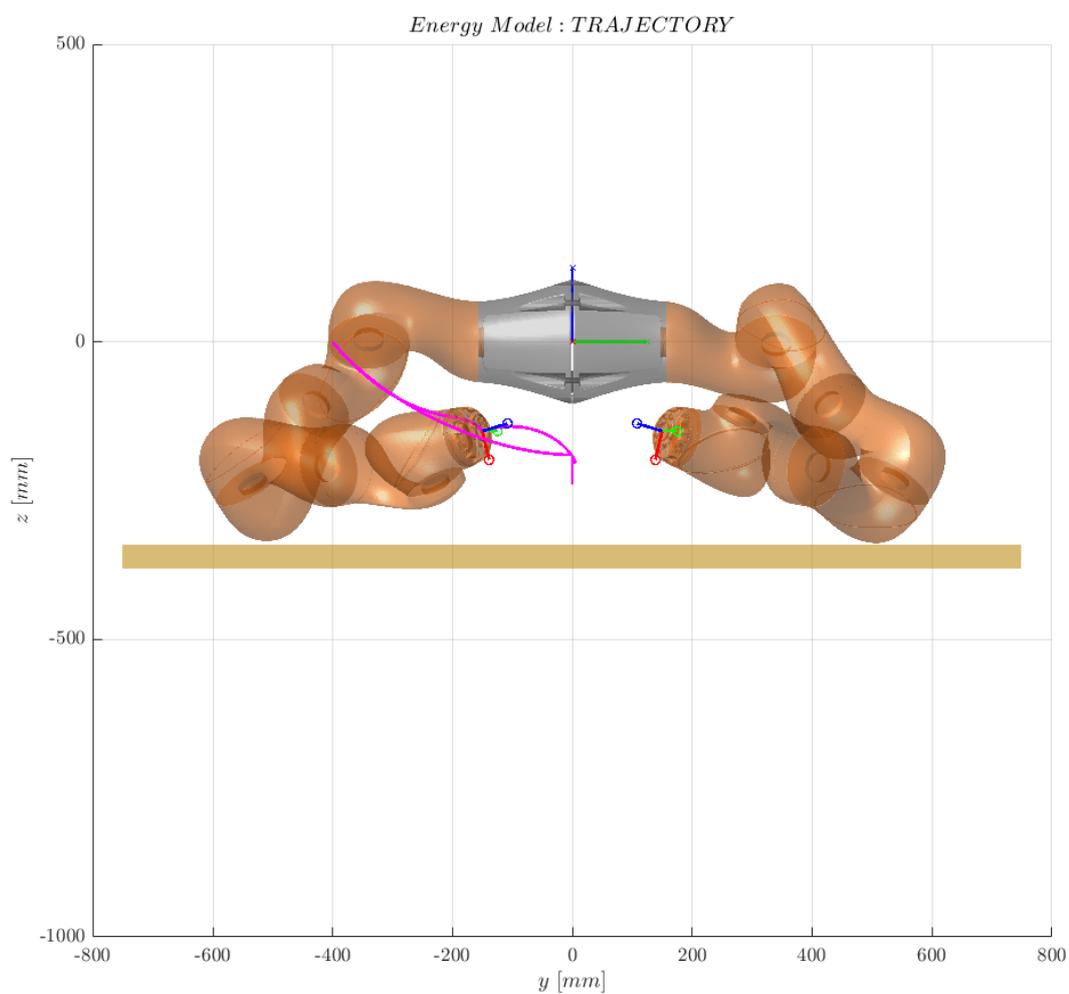


Figura 3.10: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector in vista frontale.

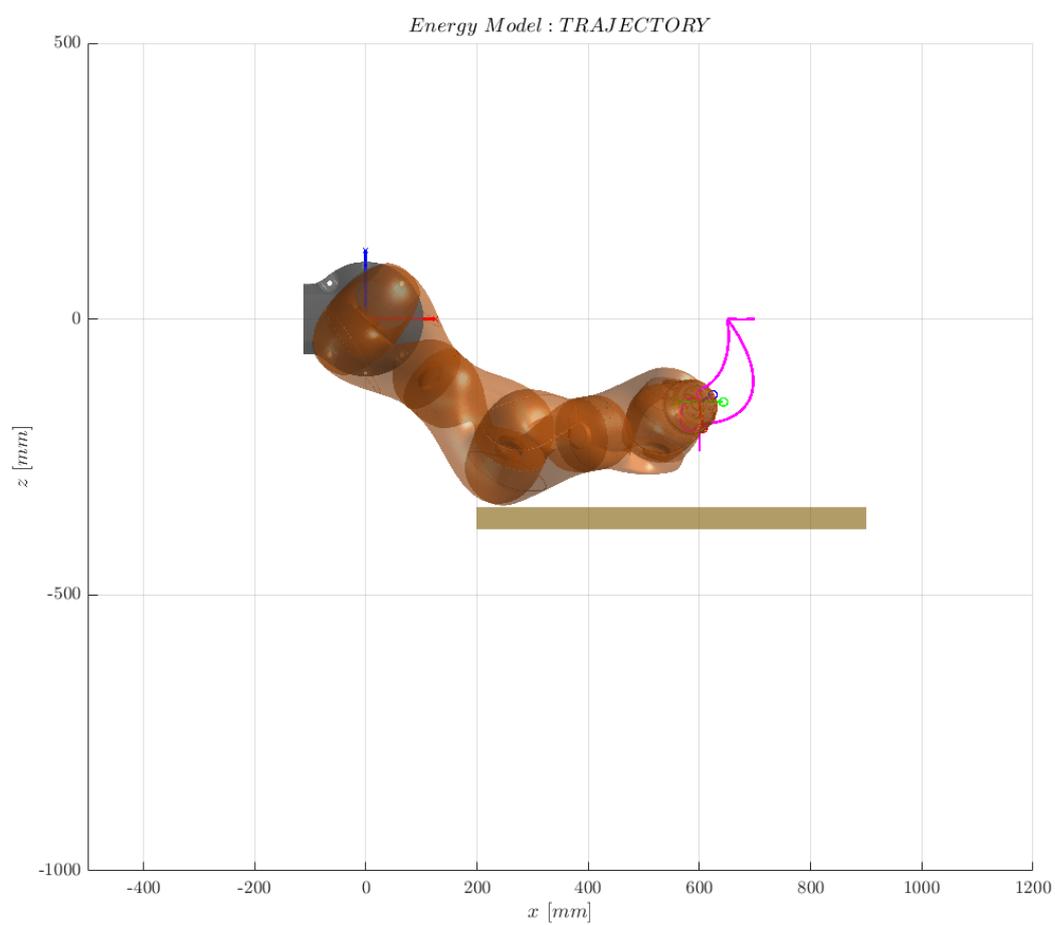


Figura 3.11: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector in vista laterale.

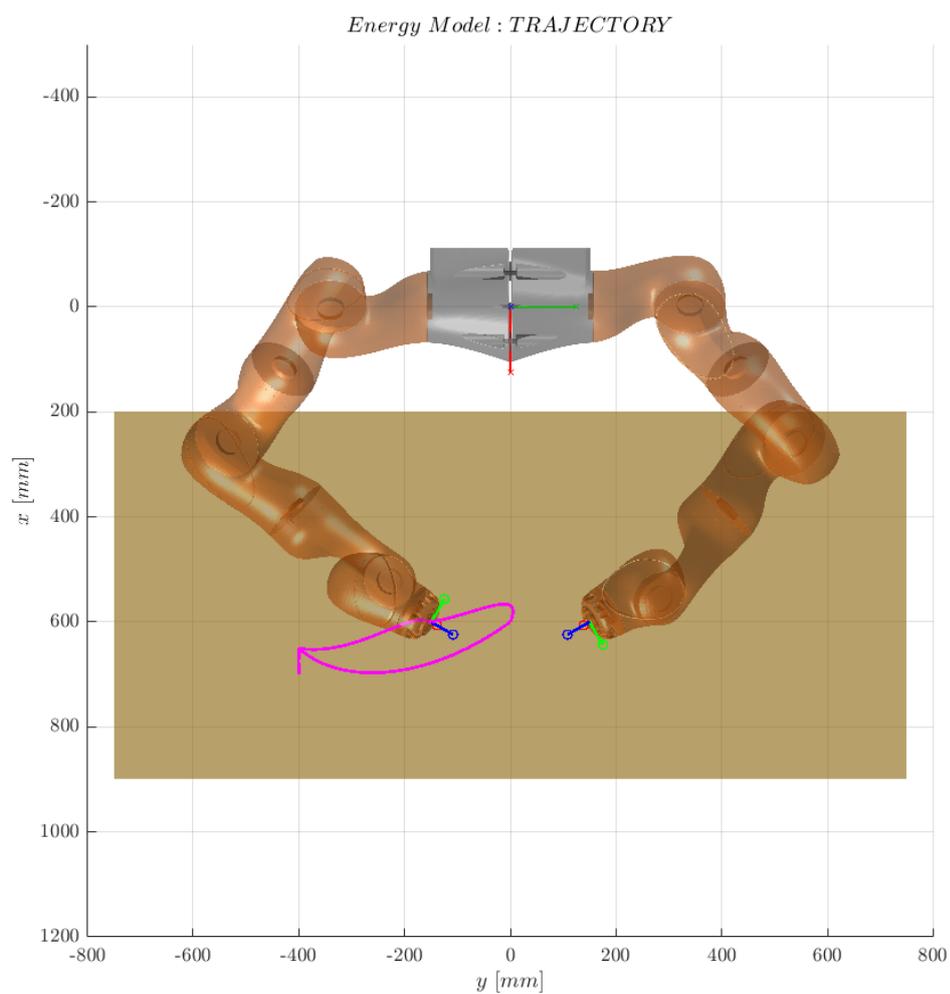


Figura 3.12: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector in vista superiore.

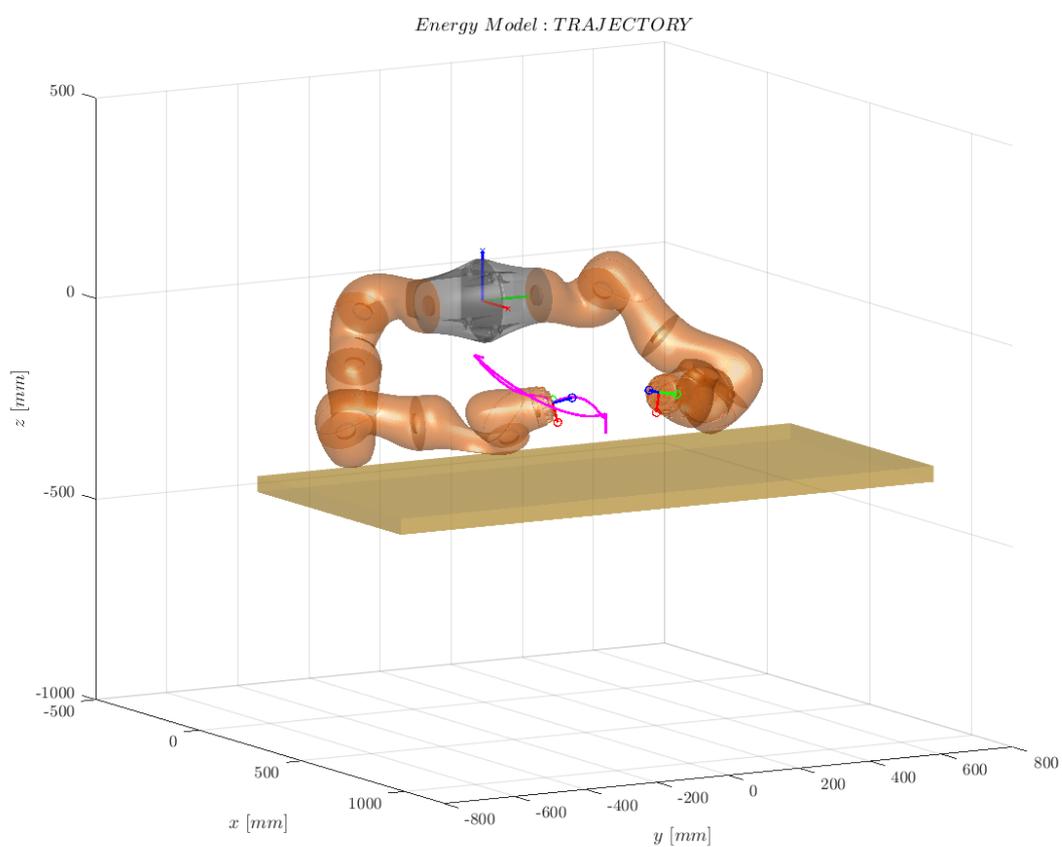


Figura 3.13: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector in vista prospettica.

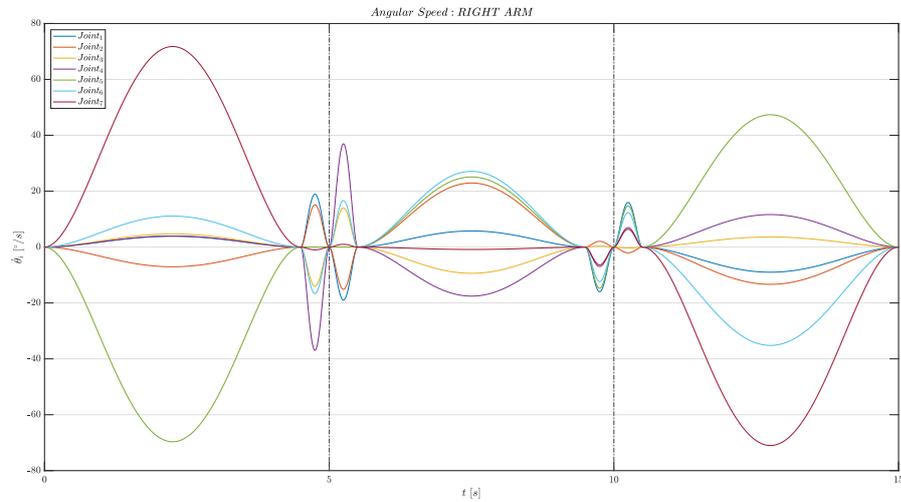


Figura 3.14: Curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  dei singoli giunti.

Nelle figure che riportano le curve della coppia, della coppia isometrica (Figura 3.15) e della potenza (Figura 3.16), sono mostrate sovrapposte le curve ottenute considerando la presenza del carico (linee blu) e quelle che non lo considerano (linee rosse). Da notare che solo parte della linea blu si discosta dalla linea rossa in quanto il carico non è sempre collegato al robot, ma ciò accade solo durante il secondo spostamento ovvero dalla posizione di pick alla posizione di place.

Dalla Figura 3.15 è possibile notare come anche se l'andamento può variare tra le curve delle due coppie calcolate, il loro intervallo di variazione è praticamente lo stesso. Per questo motivo negli studi presentati nel capitolo successivo (vedi Capitolo 4) verrà solamente riportato il grafico della coppia isometrica per evitare ridondanze di risultati.

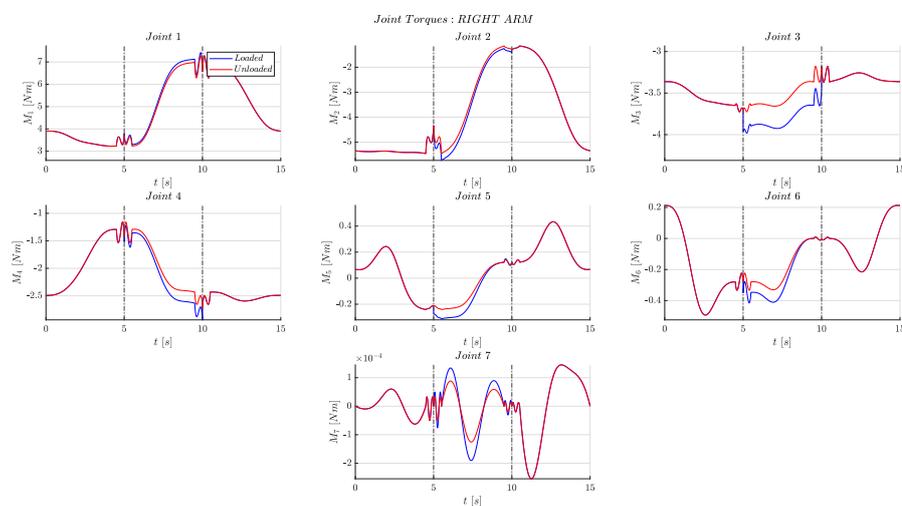
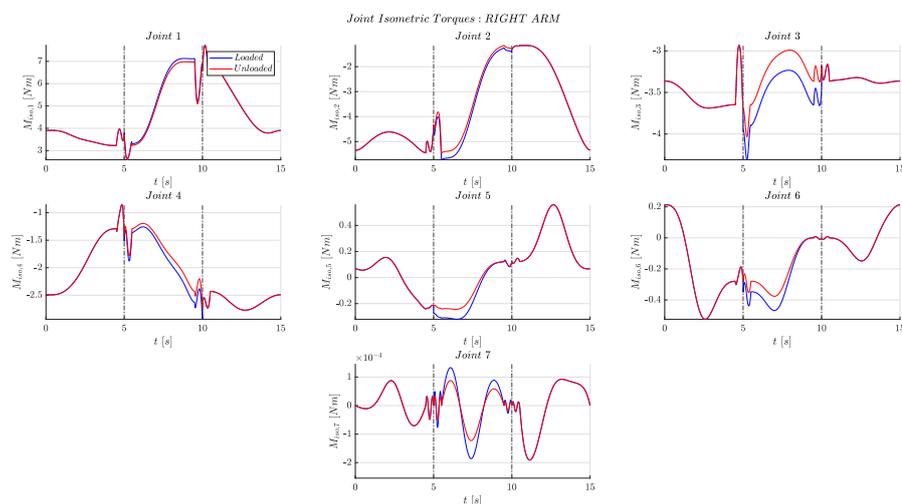


Figura 3.15: a) Curve della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  e b) curve della coppia  $M_i$  dei singoli giunti a confronto.

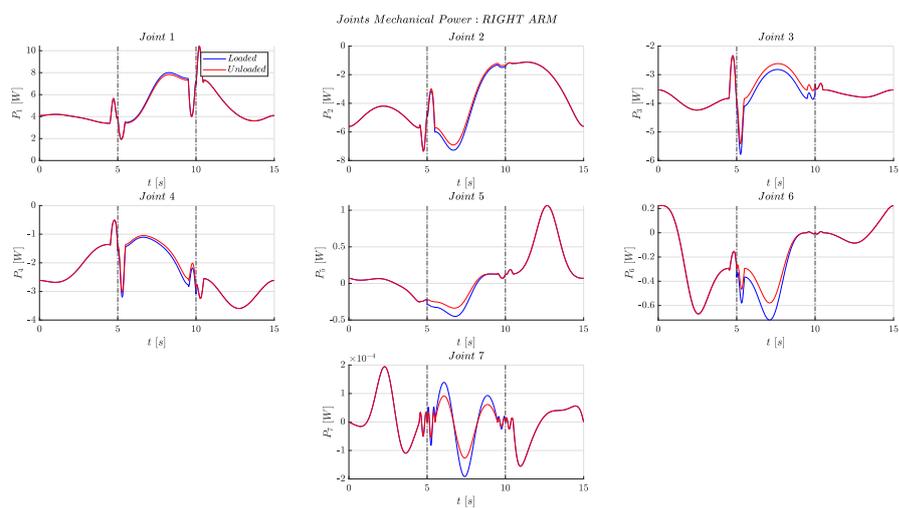


Figura 3.16: Curve della potenza meccanica  $P_i$  dei singoli giunti.

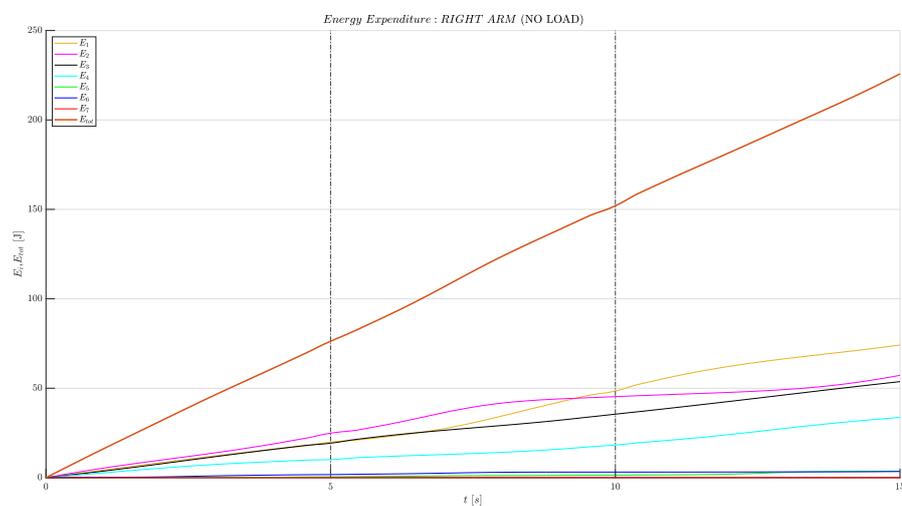
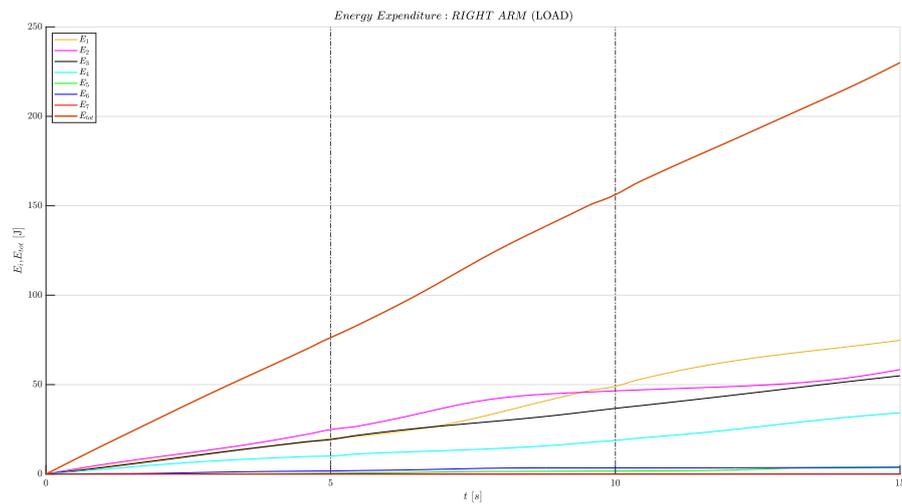


Figura 3.17: Curve della spesa energetica totale  $E_{tot}$  messa a confronto con la spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti a) con carico e b) senza carico.

Nelle seguenti tabelle sono riportati i valori numerici dell'energia totale spesa  $E_{tot}$  e l'energia spesa  $E_i$  dai singoli giunti, con e senza carico (rispettivamente Tabella 3.7 e Tabella 3.8).

Giunto	Spesa energetica [J]
Giunto 1	74.7805
Giunto 2	58.3842
Giunto 3	54.9300
Giunto 4	34.2859
Giunto 5	3.8634
Giunto 6	3.7775
Giunto 7	0.0010
<b>Totale</b>	<b>230.0225</b>

Tabella 3.7: Valori numerici della spesa energetica totale  $E_{tot}$  e della spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti, con carico.

Giunto	Spesa energetica [J]
Giunto 1	74.1456
Giunto 2	57.1843
Giunto 3	53.6958
Giunto 4	33.7136
Giunto 5	3.6062
Giunto 6	3.4359
Giunto 7	0.0009
<b>Totale</b>	<b>225.7823</b>

Tabella 3.8: Valori numerici della spesa energetica totale  $E_{tot}$  e della spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti, senza carico.

Come è facile notare nella Figura 3.17 e ancor di più dai valori presenti nelle Tabelle 3.7 e 3.8, la differenza tra l'energia spesa con la presenza del carico rispetto all'energia spesa senza di esso è irrisoria (variazione percentuale di circa l'1,89%). Questo è dovuto al fatto che la massa del carico considerata risulta

molto ridotta rispetto alla massa dei giunti del robot. Per questo motivo negli studi presentati nel capitolo successivo verrà considerato solo il caso con carico per evitare ridondanza di risultati.

# Capitolo 4

## Simulazione

### 4.1 Pick and place di tre carichi cubici

Questo studio presenta l'analisi di un semplice pick and place (da ora abbreviato come *P&P*) di tre carichi cubici (vedi Tabella [4.1](#)): una volta afferrati dalle loro posizioni di pick (vedi Figura [4.1](#)) i cubi vengono posizionati nelle loro posizioni di place così da comporre una pila di fronte all'operatore (vedi Figura [4.2](#)). La postazione di lavoro presenta una disposizione asimmetrica delle posizioni di pick mentre le posizioni di place hanno le stesse coordinate lungo l'asse x e l'asse y ma diverse coordinate lungo l'asse z in modo che i cubi vengano impilati uno sopra l'altro (vedi Tabella [4.2](#)).

Il presente studio si pone quindi l'obiettivo di analizzare due diverse sequenze di *P&P* mettendone poi a paragone la spesa energetica per trarre conclusioni su quale sia la più energeticamente conveniente.

Per evitare di aumentare eccessivamente la complessità dello studio sono state considerate alcune semplificazioni:

- L'angolo al centro  $\alpha$  è fissato a  $30^\circ$  per il braccio destro e a  $-30^\circ$  per il braccio sinistro;
- I tre carichi presentano la stessa forma, massa, lunghezza dello spigolo e, di conseguenza, la stessa matrice di inerzia (vedi Tabella [4.1](#));
- Si è considerato nullo il tempo di presa e rilascio del carico;

Cubo	Massa $m$ [kg]	Spigolo $s$ [m]	Matrice d'inerzia $I$ [kg · m <sup>2</sup> ]
1	0,1	0,1	$\begin{bmatrix} 1.667 & 0 & 0 \\ 0 & 1.667 & 0 \\ 0 & 0 & 1.667 \end{bmatrix} \times 10^{-4}$
2	0,1	0,1	$\begin{bmatrix} 1.667 & 0 & 0 \\ 0 & 1.667 & 0 \\ 0 & 0 & 1.667 \end{bmatrix} \times 10^{-4}$
3	0,1	0,1	$\begin{bmatrix} 1.667 & 0 & 0 \\ 0 & 1.667 & 0 \\ 0 & 0 & 1.667 \end{bmatrix} \times 10^{-4}$

Tabella 4.1: Parametri dei carichi cubici.

Posizione	Tipologia	$x$ [mm]	$y$ [mm]	$z$ [mm]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]	$\gamma$ [°]
1	Pick	700	-400	0	0	90	0
2	Pick	700	500	0	0	90	0
3	Pick	800	0	200	0	90	0
4	Place	600	0	-240	0	180	0
5	Place	600	0	-140	0	180	0
6	Place	600	0	-40	0	180	0
7	Shift Dx	600	-150	-50	0	75	60
8	Shift Sx	600	150	-50	0	75	-60
9	Shift Dx	600	-150	50	0	75	60
10	Shift Sx	600	150	50	0	75	-60
11	Riposo Dx	600	-100	-150	0	75	60
12	Riposo Sx	600	100	-150	0	75	-60

Tabella 4.2: Posizioni di pick, place, shift e di riposo con relativi parametri delle trasformazioni di Cardano riferiti alla terna world.

Le posizioni definite di "shift" descritte nella Tabella 4.2 sono usate per far allontanare, orizzontalmente, l'end-effector del robot dal carico appena posizionato così da evitare il contatto tra gli elementi del modello durante il successivo movimento.

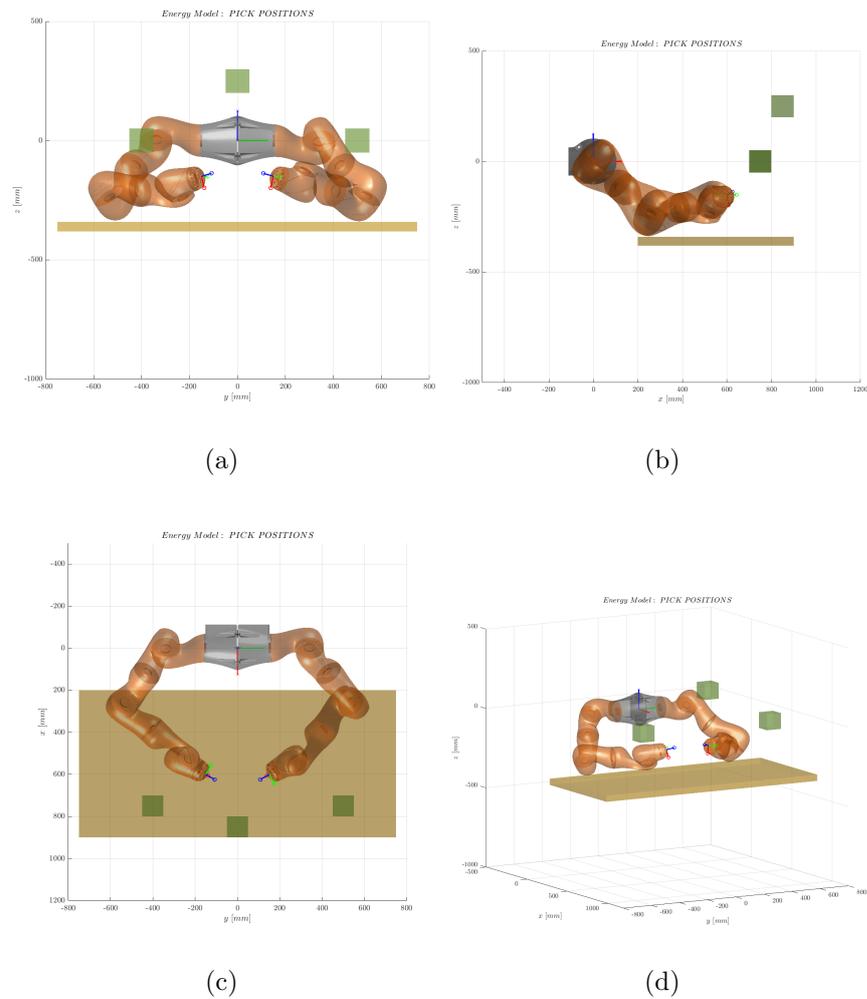


Figura 4.1: Diverse viste del modello MatLAB<sup>®</sup> con presenza dei carichi nelle loro posizioni di pick: a) frontale, b) laterale, c) superiore e d) prospettica.

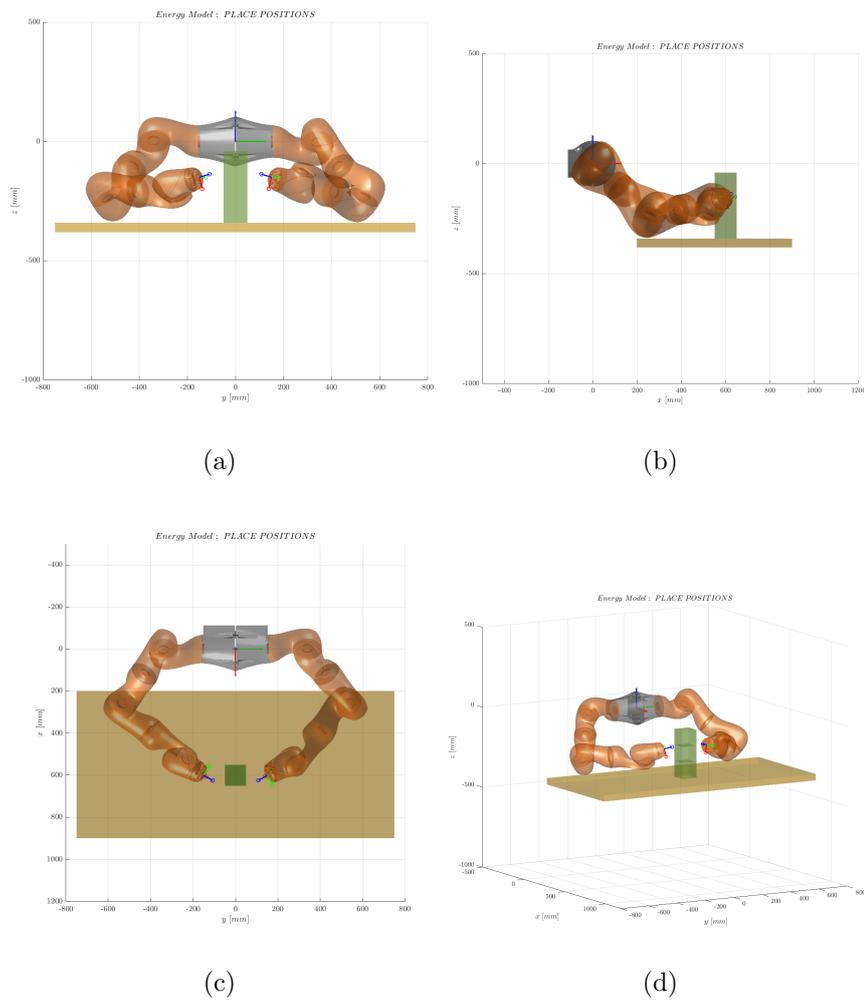


Figura 4.2: Diverse viste del modello MatLAB<sup>®</sup> con presenza dei carichi nelle loro posizioni di place: a) frontale, b) laterale, c) superiore e d) prospettica.

### 4.1.1 Sequenza 1

La presente sequenza considera due *P&P* per il braccio destro e un *P&P* per il braccio sinistro, come mostrato nella Tabella [4.3](#).

Tempo [s]	Task braccio Dx	Task braccio Sx
0-5	Pick in 1	Attesa in 12
5-10	Place in 4	Pick in 2
10-15	Pick in 3	Place in 5
15-20	Attesa in 3	Shift in 8
	Place in 6	Riposo in 12
20-25	Shift in 9	Attesa in 12
	Riposo in 11	Attesa in 12

Tabella 4.3: Sequenza di task effettuati dal braccio destro e dal braccio sinistro.

Le traiettorie ottenute dal modello sono le seguenti (vedi Figure [4.3](#), [4.4](#), [4.5](#) e [4.6](#)):

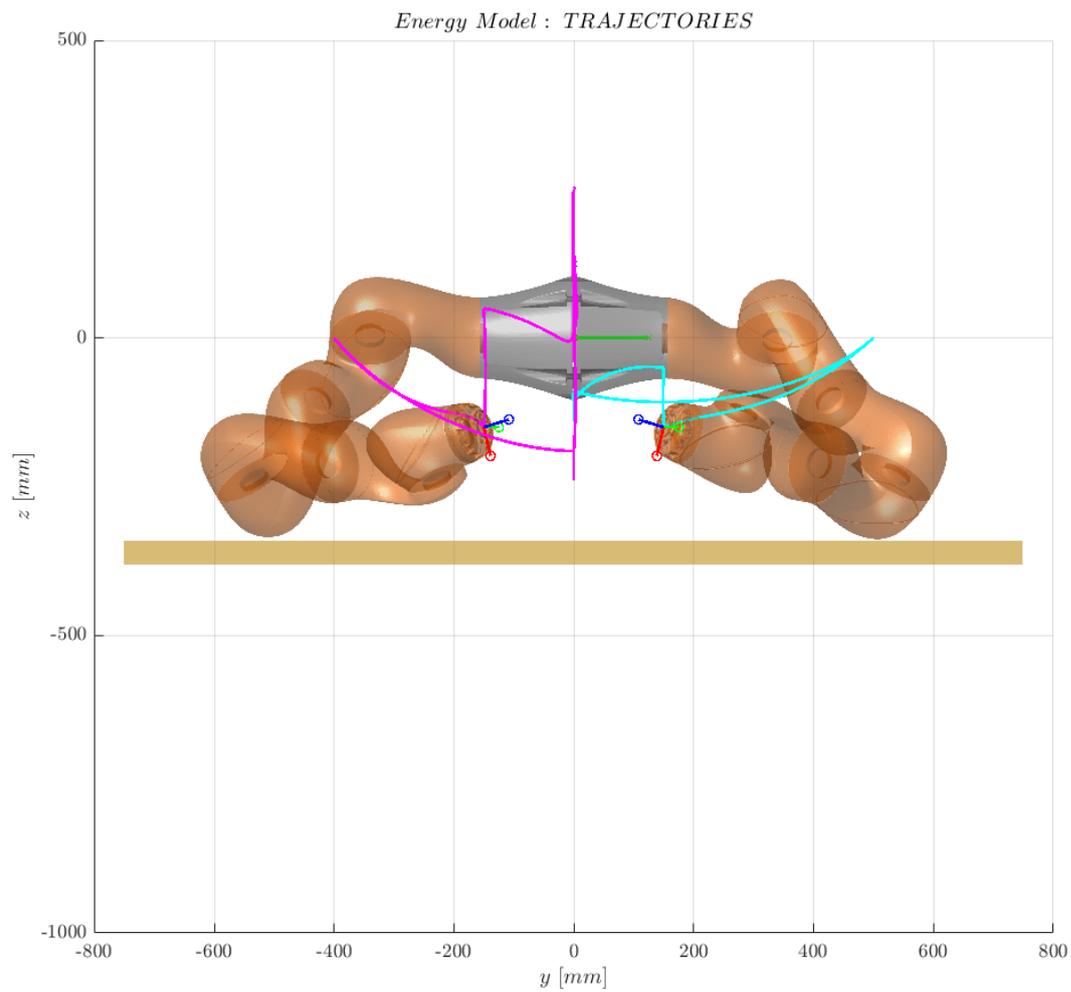


Figura 4.3: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista frontale.

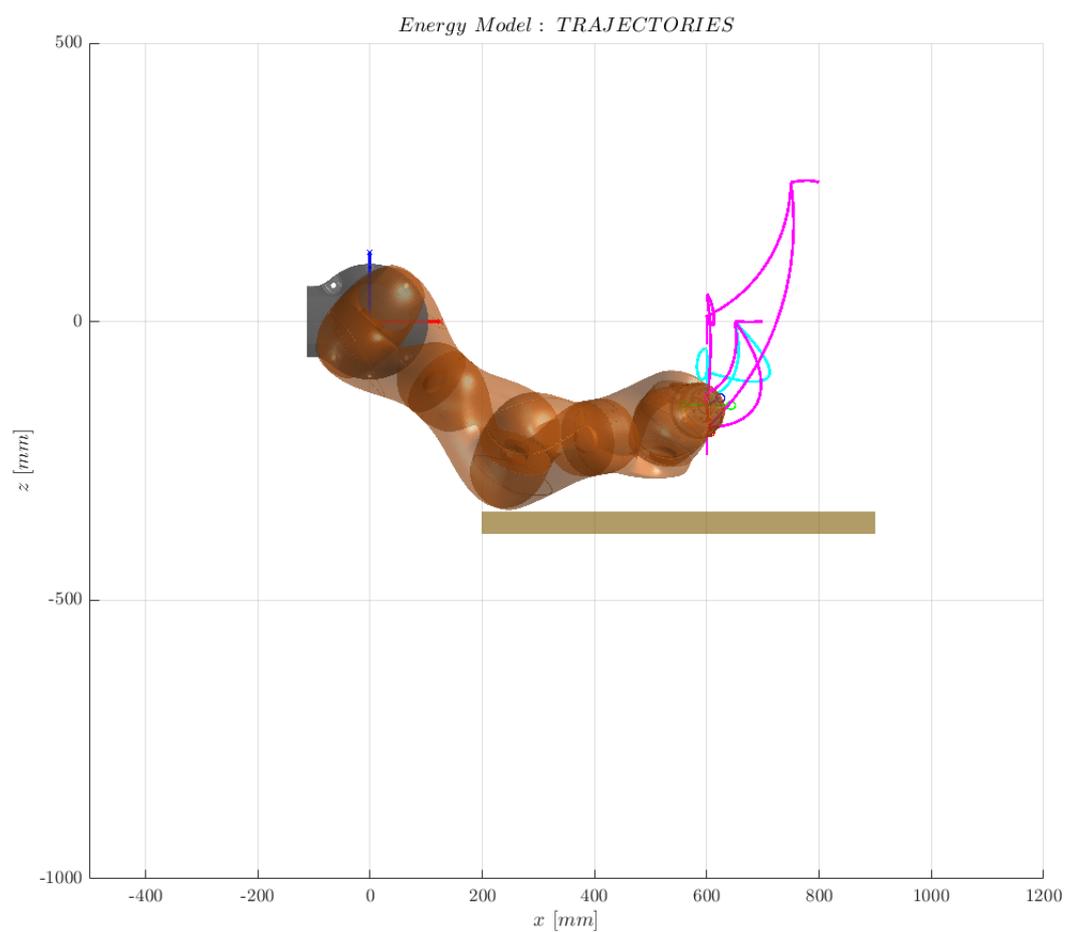


Figura 4.4: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista laterale.

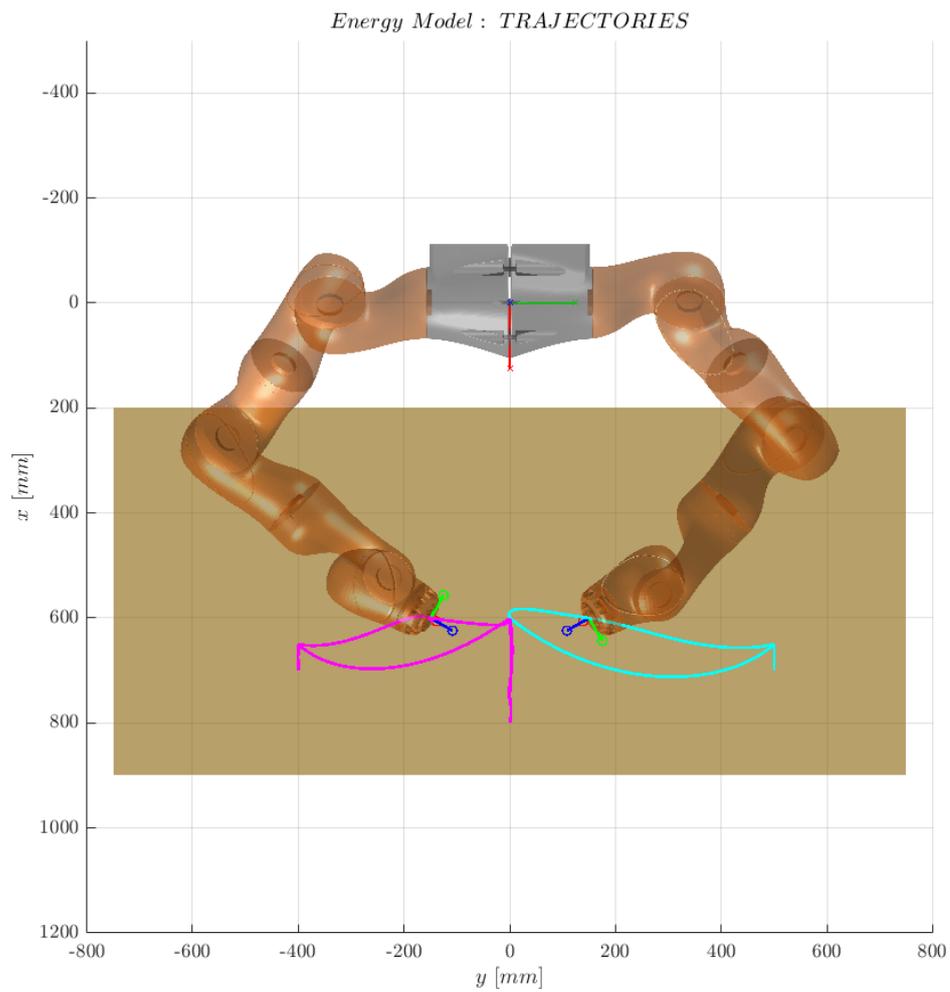


Figura 4.5: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista superiore.

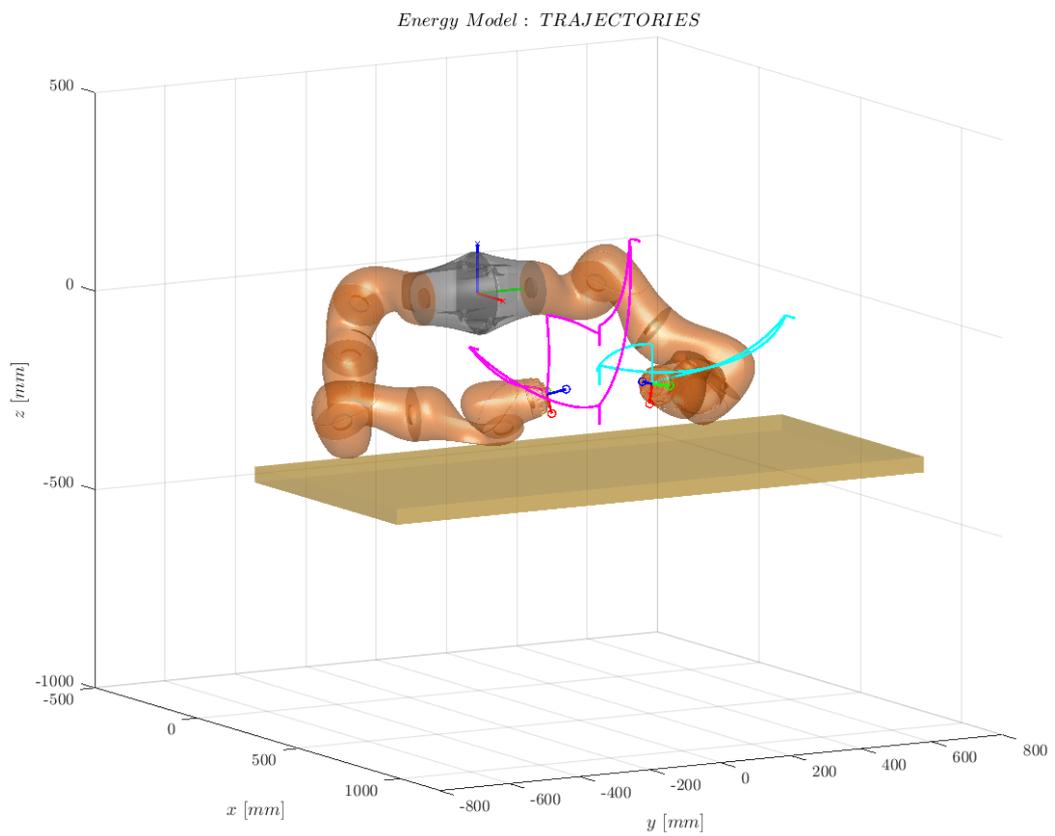
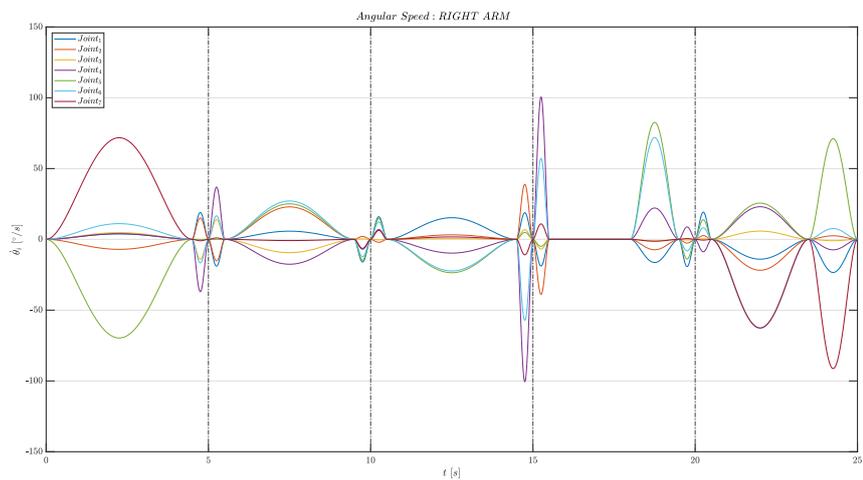
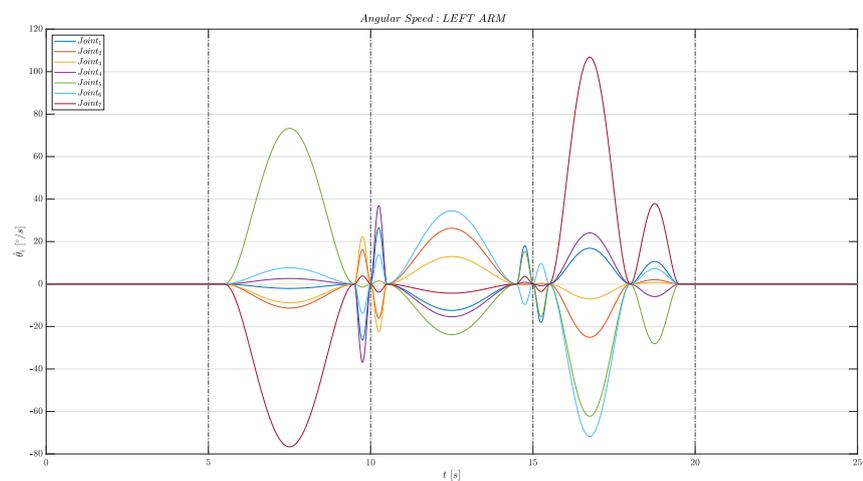


Figura 4.6: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista prospettica.

Di seguito sono riportate le curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  (vedi Figura 4.7), della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  (vedi Figura 4.8), della potenza  $P_i$  (vedi Figura 4.9) e delle energie spese (vedi Figura 4.10), per il braccio destro e sinistro:

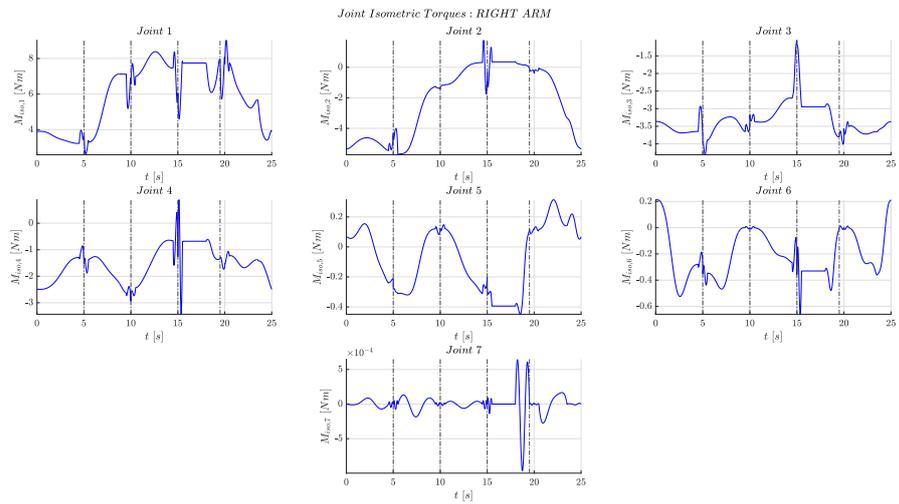


(a)

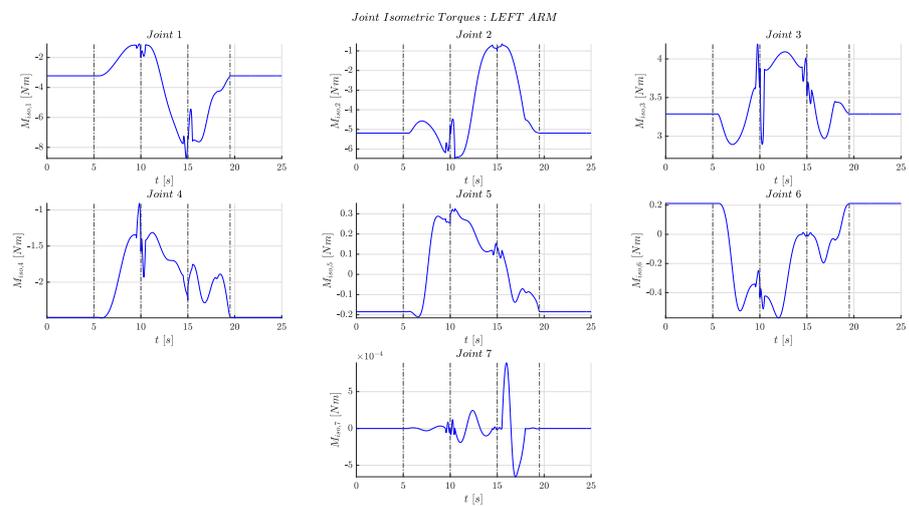


(b)

Figura 4.7: Curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.



(a)



(b)

Figura 4.8: Curve della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

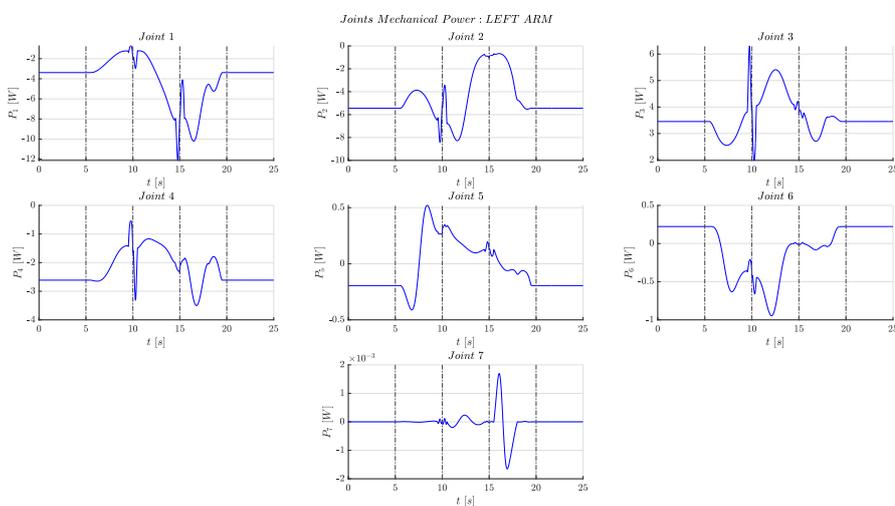
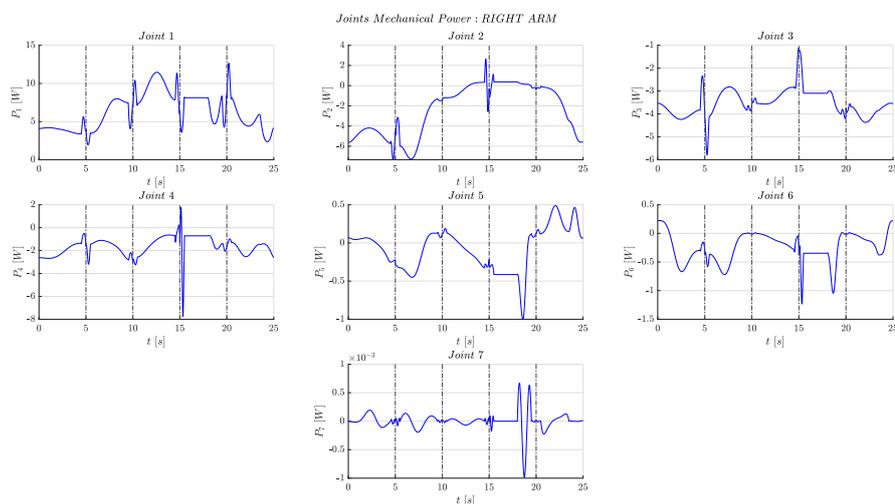
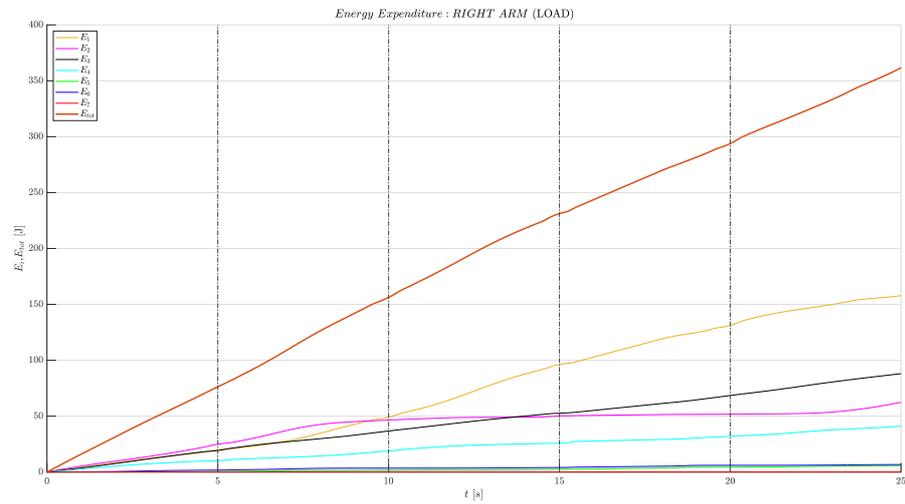
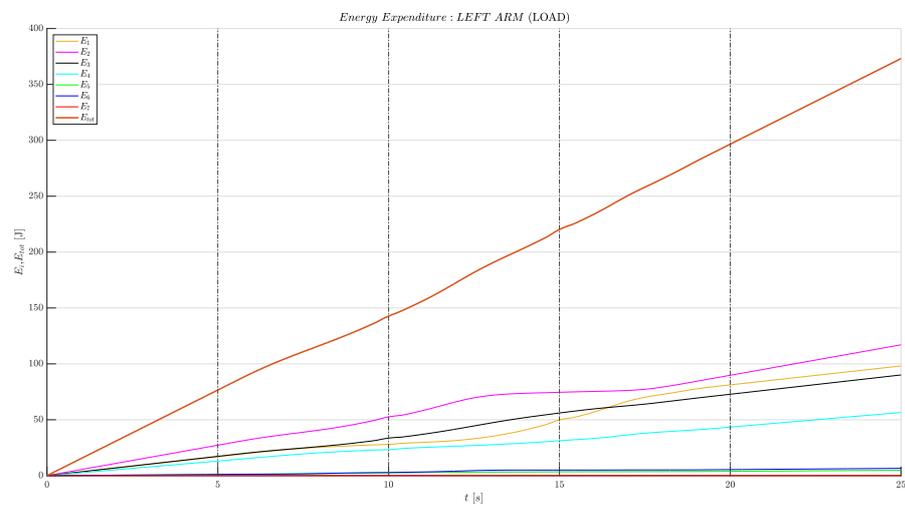


Figura 4.9: Curve della potenza meccanica  $P_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.



(a)



(b)

Figura 4.10: Curve della spesa energetica totale  $E_{tot}$  messa a confronto con la spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

Nella seguente tabella sono riportati i valori numerici dell'energia totale spesa  $E_{tot}$  e l'energia spesa  $E_i$  dai singoli giunti, per il braccio destro e sinistro (Tabella 4.4).

Braccio Destro		Braccio Sinistro	
Giunto	Spesa energetica [ $J$ ]	Giunto	Spesa energetica [ $J$ ]
1	157.8060	1	98.0918
2	62.3960	2	117.0697
3	88.0073	3	90.0733
4	41.1476	4	56.5093
5	5.7063	5	4.8376
6	6.7097	6	6.5354
7	0.0020	7	0.0030
<b>Totale Dx</b>	<b>361.7748</b>	<b>Totale Sx</b>	<b>373.1200</b>
<b>Spesa energetica totale</b>		<b>734.8948</b>	

Tabella 4.4: Valori numerici della spesa energetica totale  $E_{tot}$  e della spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti del braccio destro e del sinistro, sequenza 1.

### 4.1.2 Sequenza 2

La presente sequenza considera un *P&P* per il braccio destro e due *P&P* per il braccio sinistro, come mostrato nella Tabella [4.5](#).

Tempo [s]	Task braccio Dx	Task braccio Sx
0-5	Attesa in 11	Pick in 2
5-10	Pick in 1	Place in 4
10-15	Place in 5	Pick in 3
15-20	Shift in 7	Attesa in 3
	Riposo in 11	Place in 6
20-25	Attesa in 11	Shift in 10
	Attesa in 11	Riposo in 12

Tabella 4.5: Sequenza di task effettuati dal braccio destro e dal braccio sinistro.

Le traiettorie ottenute dal modello sono le seguenti (vedi Figure [4.11](#), [4.12](#), [4.13](#) e [4.14](#)):

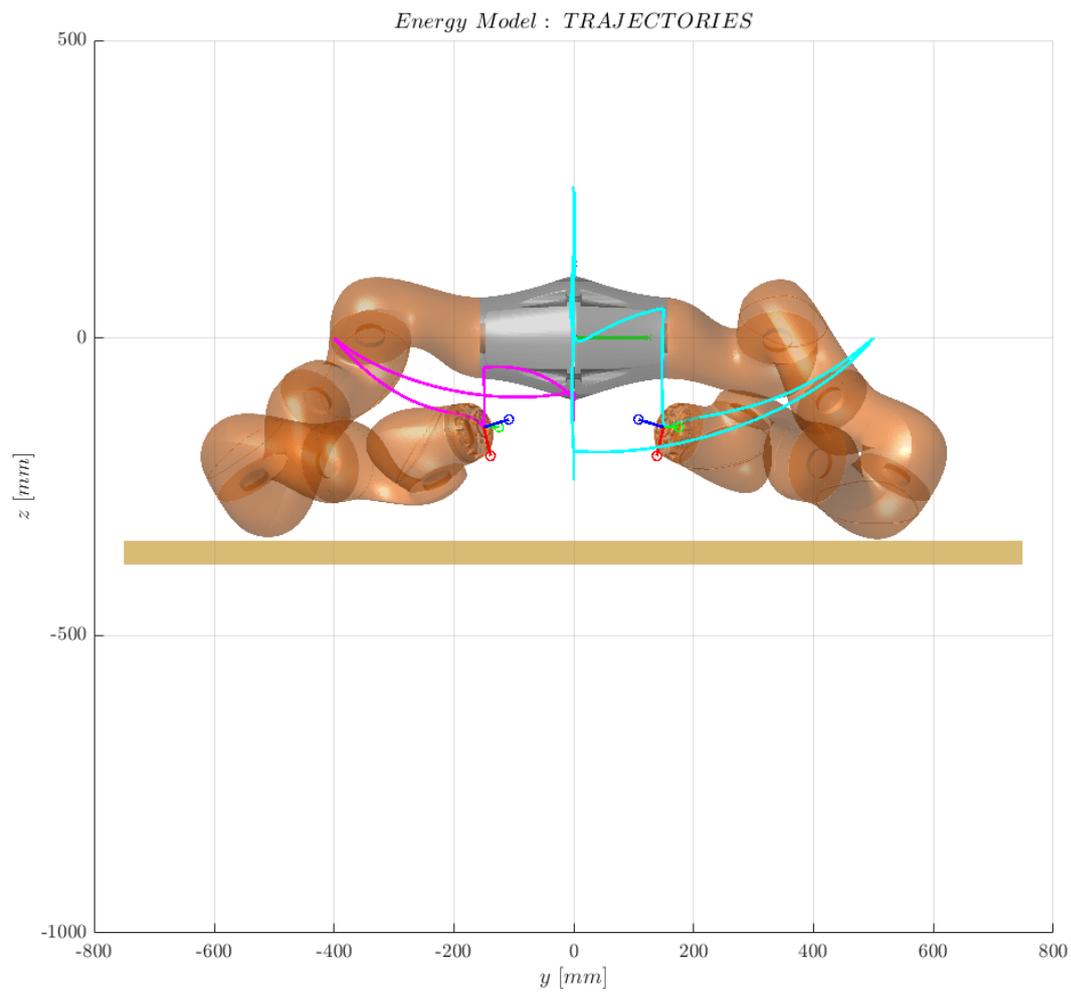


Figura 4.11: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista frontale.

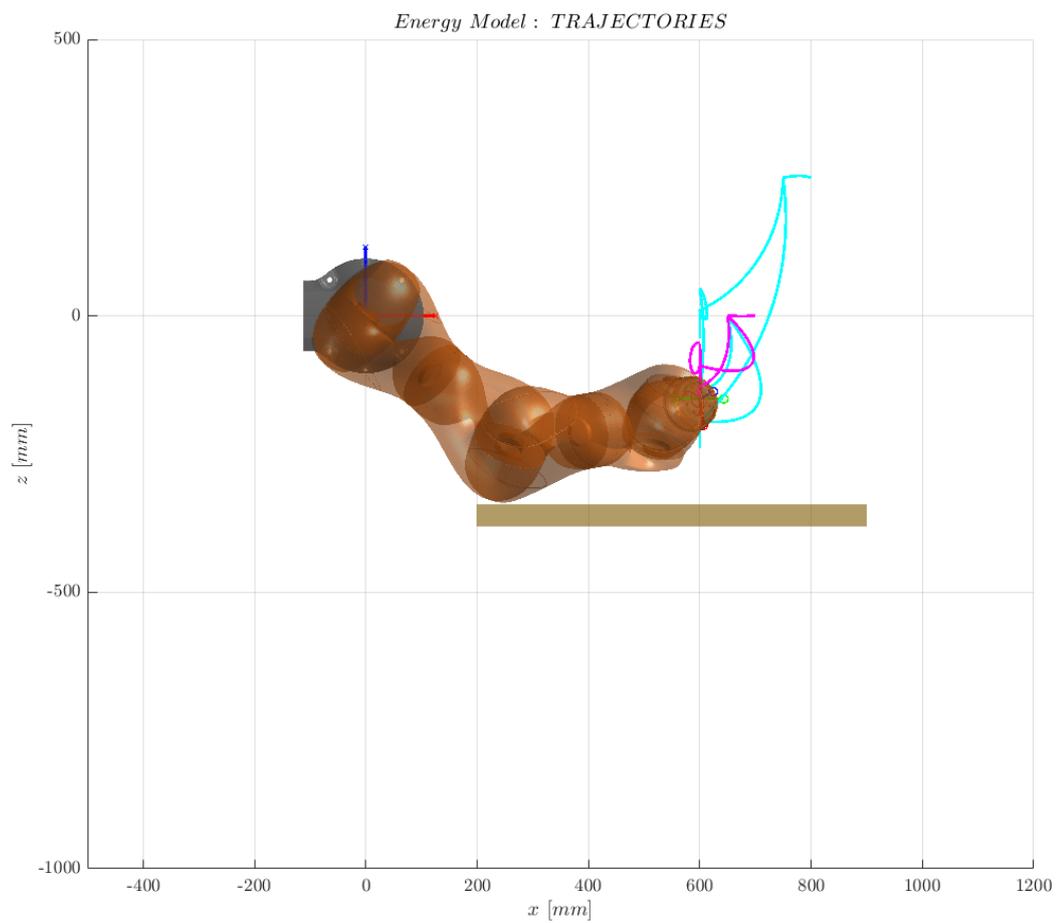


Figura 4.12: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista laterale.

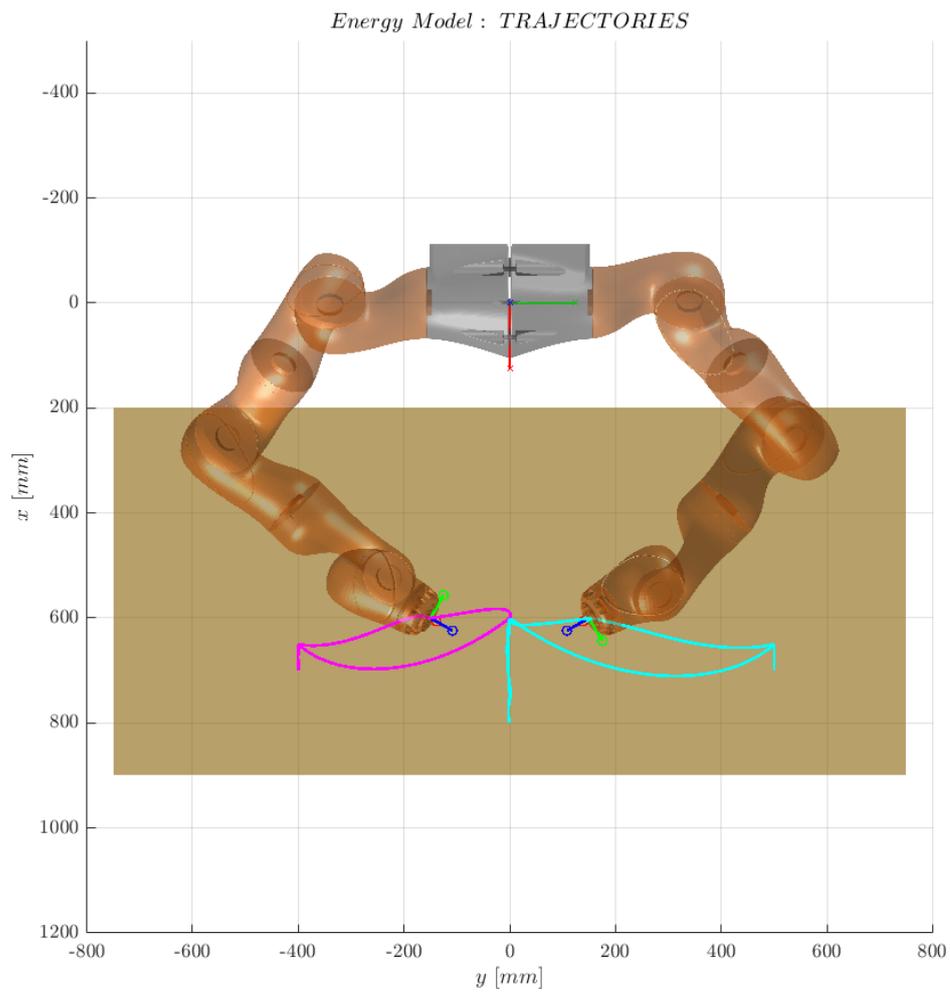


Figura 4.13: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista superiore.

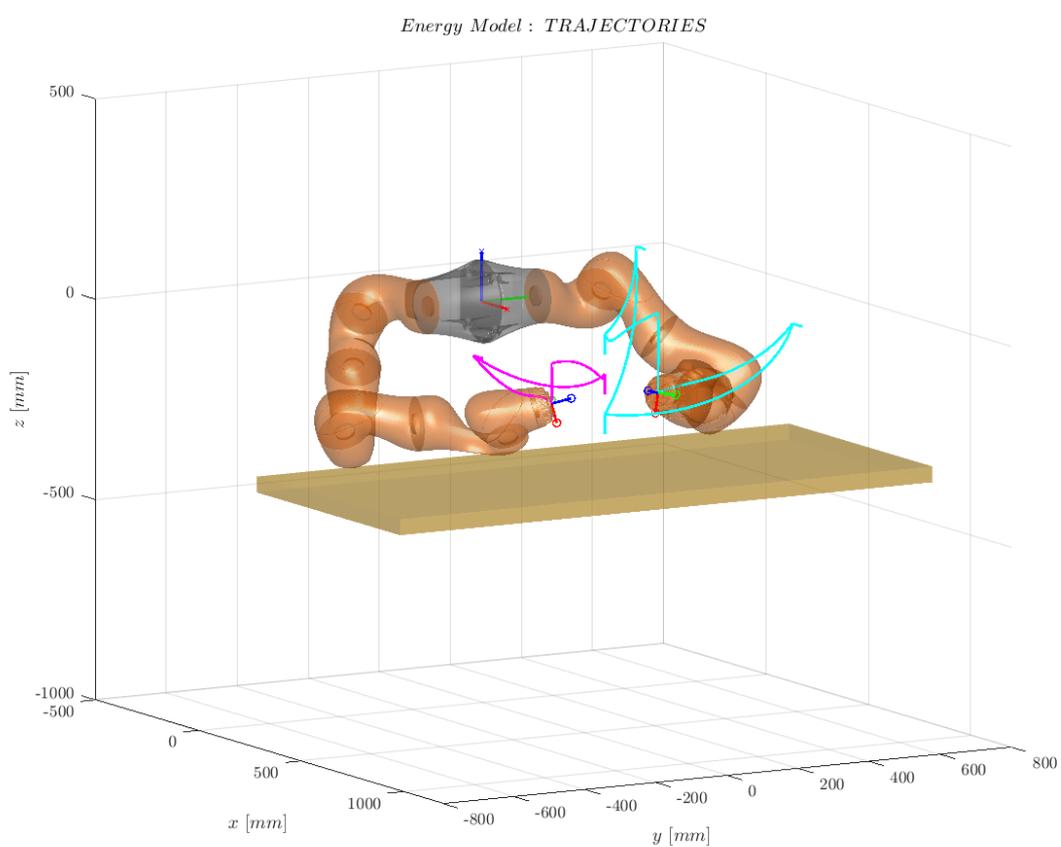
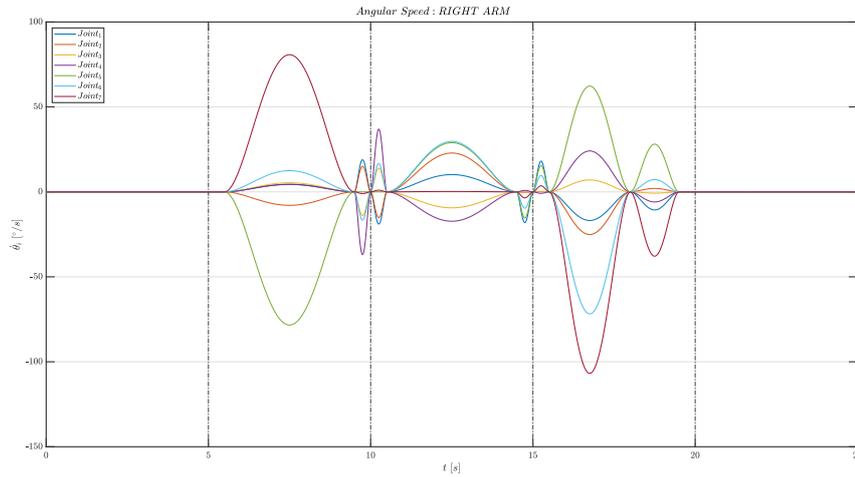
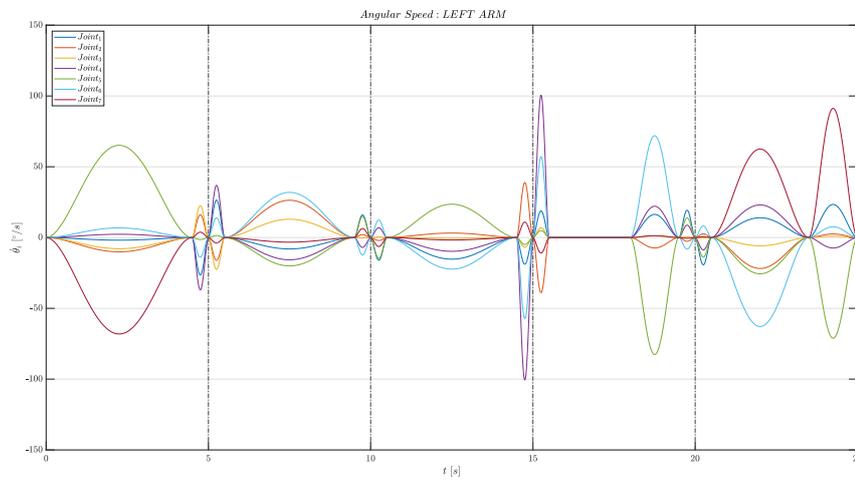


Figura 4.14: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista prospettica.

Di seguito sono riportate le curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  (vedi Figura 4.15), della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  (vedi Figura 4.16), della potenza  $P_i$  (vedi Figura 4.17) e delle energie spese (vedi Figura 4.18), per il braccio destro e sinistro:

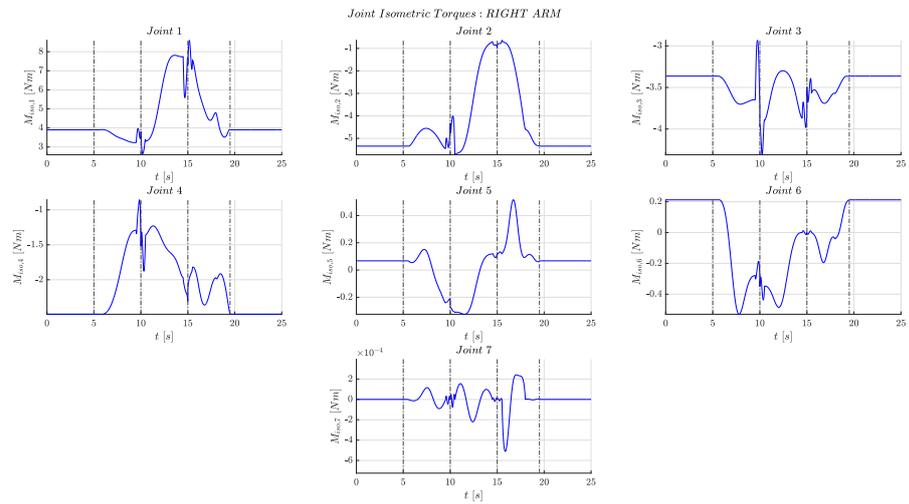


(a)

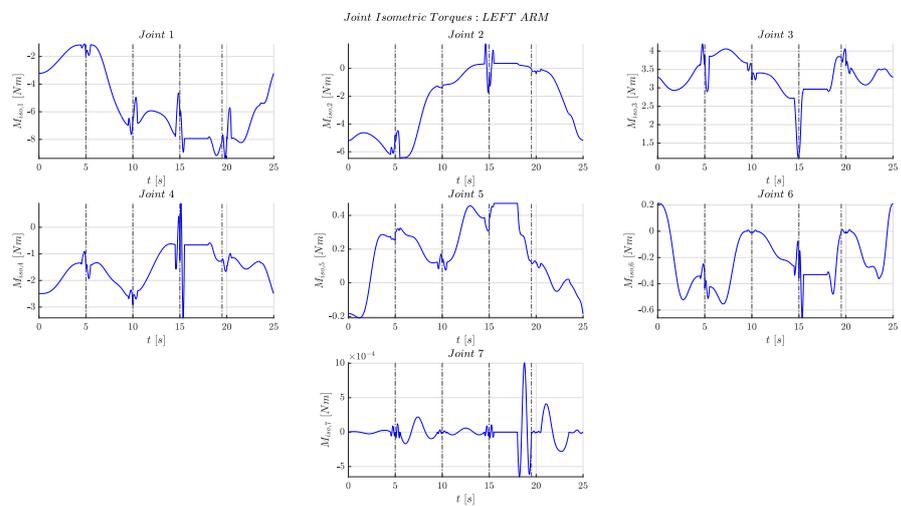


(b)

Figura 4.15: Curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.



(a)



(b)

Figura 4.16: Curve della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

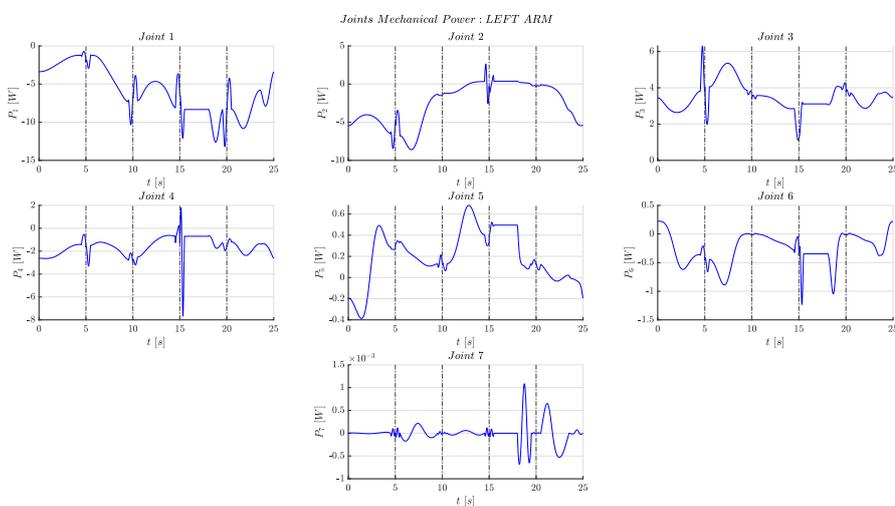
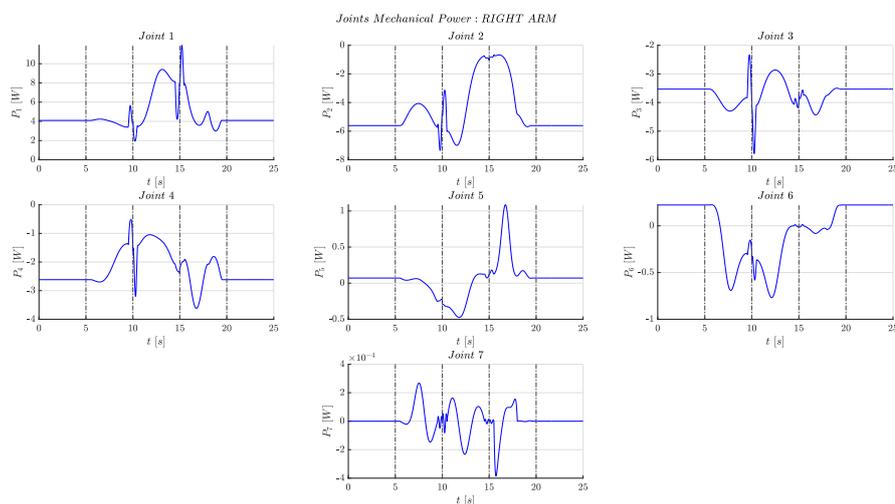


Figura 4.17: Curve della potenza meccanica  $P_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

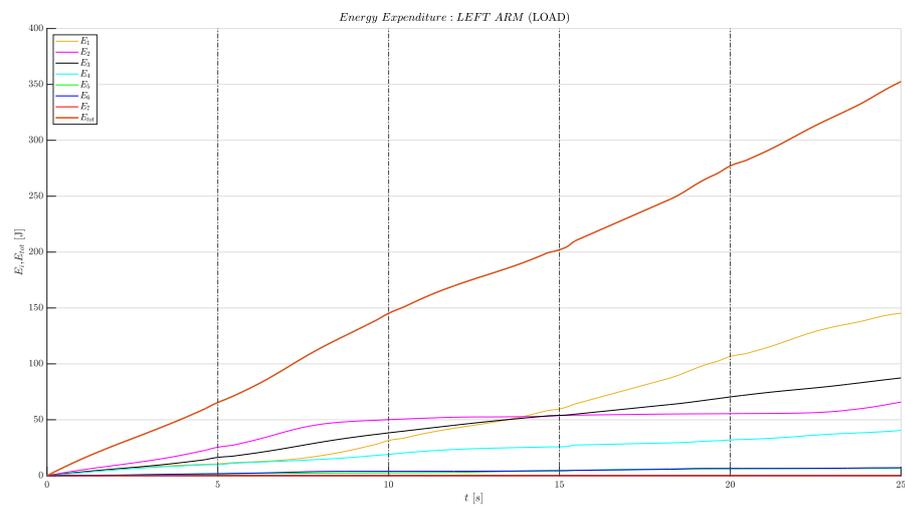
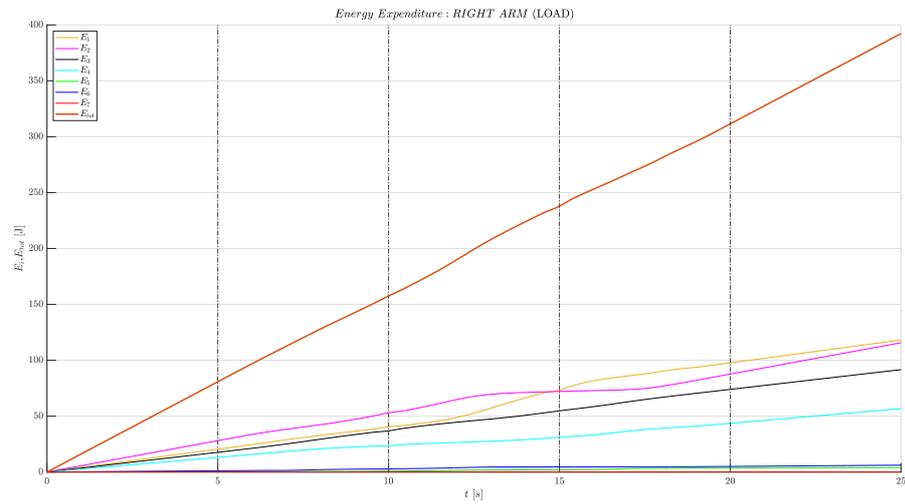


Figura 4.18: Curve della spesa energetica totale  $E_{tot}$  messa a confronto con la spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

Nella seguente tabella sono riportati i valori numerici dell'energia totale spesa  $E_{tot}$  e l'energia spesa  $E_i$  dai singoli giunti, per il braccio destro e sinistro (Tabella 4.6).

Braccio Destro		Braccio Sinistro	
Giunto	Spesa energetica [J]	Giunto	Spesa energetica [J]
1	118.1127	1	145.2443
2	115.7615	2	65.8579
3	91.6053	3	87.4172
4	56.6795	4	40.5057
5	3.9474	5	6.4953
6	6.1317	6	7.1036
7	0.0012	7	0.0027
<b>Totale Dx</b>	<b>392.2393</b>	<b>Totale Sx</b>	<b>352.6266</b>
<b>Spesa energetica totale</b>		<b>744,8659</b>	

Tabella 4.6: Valori numerici della spesa energetica totale  $E_{tot}$  e della spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti del braccio destro e del sinistro, sequenza 2.

### 4.1.3 Considerazioni

Dall'analisi delle Tabelle 4.4 e 4.6 si evince che la sequenza 1 sia quella che richiede una spesa energetica minore (con una variazione percentuale dell'1,36%). Inoltre è possibile notare come la spesa energetica del singolo braccio destro della sequenza 2 sia la più elevata tra tutte le spese degli altri bracci (vedi Figura 4.18 a)). La sequenza 1 si rivela quindi essere la sequenza in assoluto migliore tra le due in quanto oltre a richiedere una spesa energetica complessiva minore richiede anche una minor spesa energetica per i singoli bracci.

## 4.2 Pick and place di tre carichi cubici con braccia appoggiate

In questo studio viene considerata l'operazione del caso precedente con l'unica differenza che quando un braccio rimane in *attesa* nella sua posizione di riposo la potenza esercitata viene considerata nulla, e così la sua spesa energetica. Si è fatta questa considerazione perché in questo studio, che mira alla simulazione del comportamento del braccio umano, è stato considerato che quando il robot è in attesa la potenza dei motori sia nulla proprio per imitare il comportamento di un braccio umano appoggiato, quindi a riposo.

Dato che l'operazione studiata è la stessa del caso precedente viene di seguito presentata l'analisi dei risultati delle due sequenze, per la descrizione dell'operazione si rimanda al paragrafo [4.1](#).

### 4.2.1 Sequenza 1

La presente sequenza considera due *P&P* per il braccio destro e un *P&P* per il braccio sinistro, come mostrato nella Tabella [4.7](#).

Tempo [s]	Task braccio Dx	Task braccio Sx
0-5	Pick in 1	Attesa in 12
5-10	Place in 4	Pick in 2
10-15	Pick in 3	Place in 5
15-20	Attesa in 3	Shift in 8
	Place in 6	Riposo in 12
20-25	Shift in 9	Attesa in 12
	Riposo in 11	Attesa in 12

Tabella 4.7: Sequenza di task effettuati dal braccio destro e dal braccio sinistro.

Le traiettorie ottenute dal modello sono le seguenti (vedi Figure [4.19](#), [4.20](#), [4.21](#) e [4.22](#)):

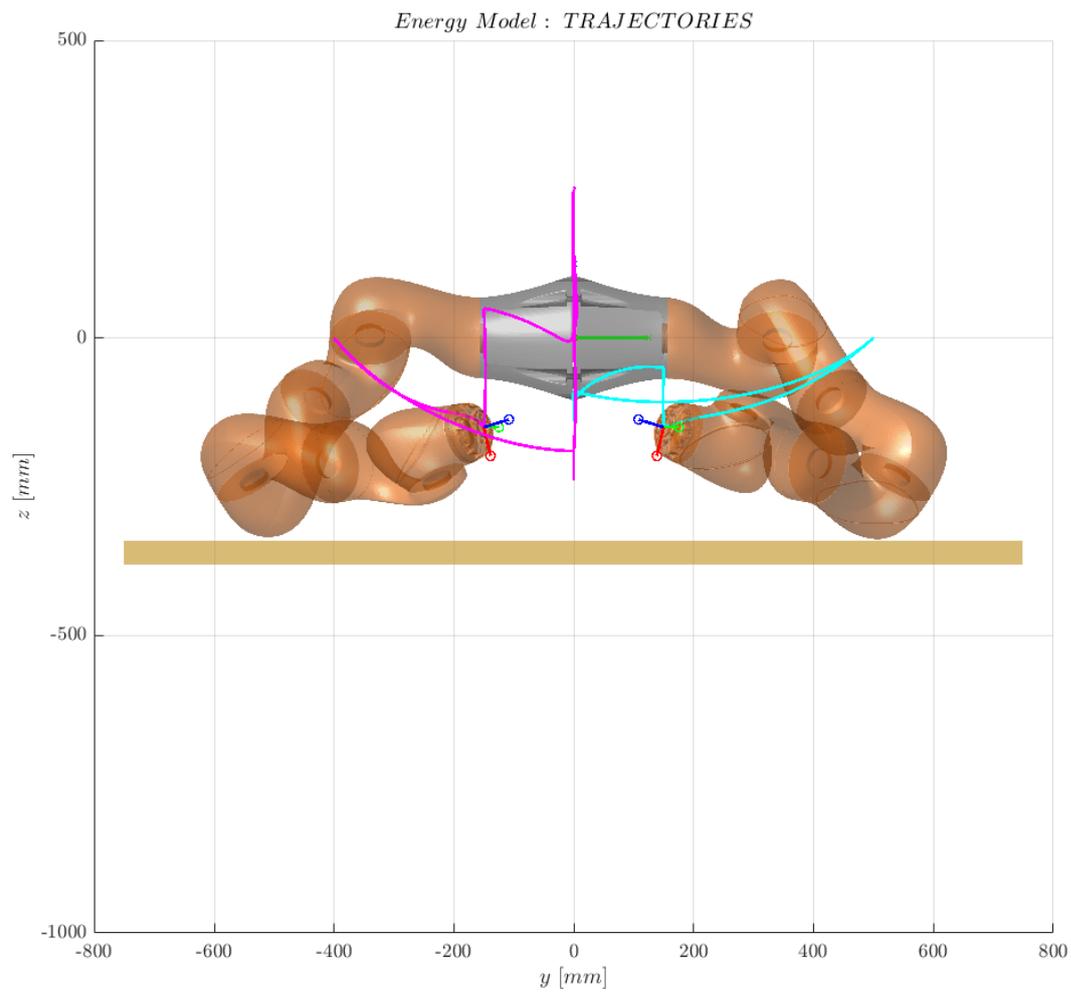


Figura 4.19: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista frontale.

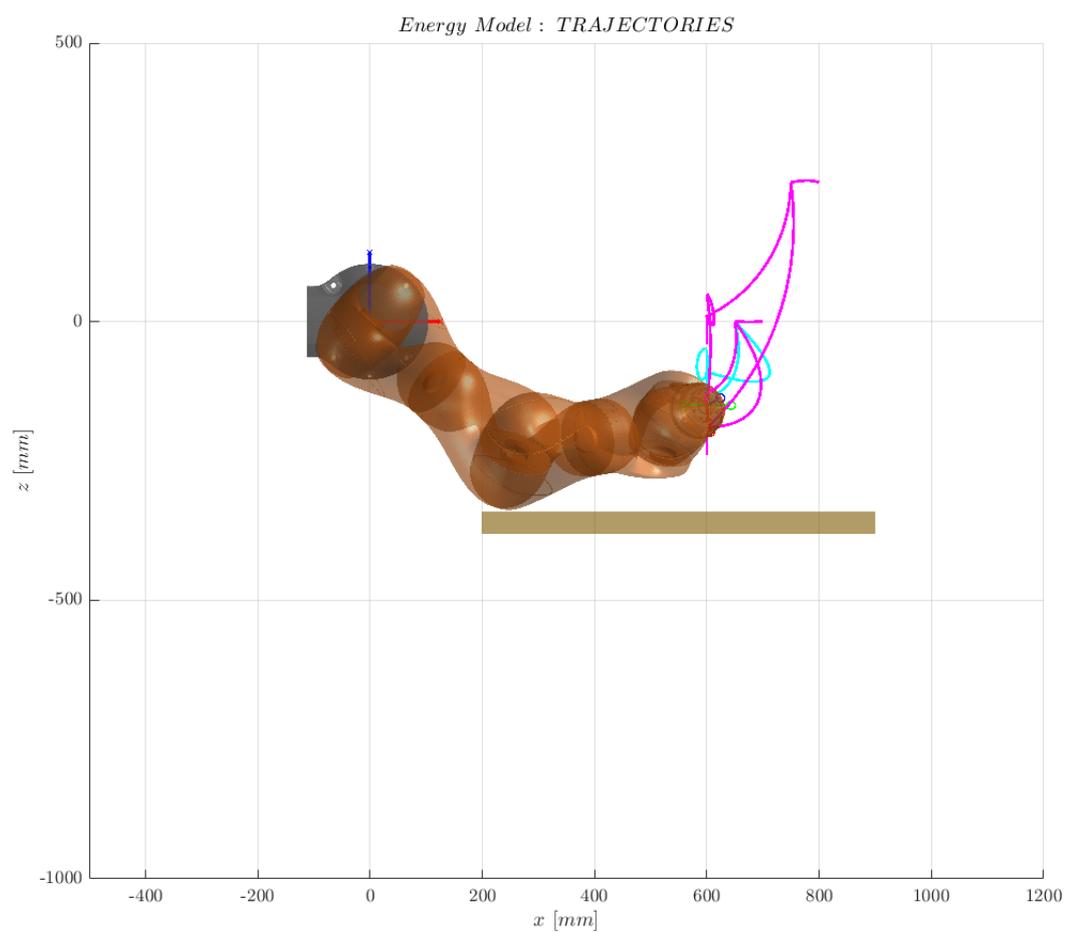


Figura 4.20: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista laterale.

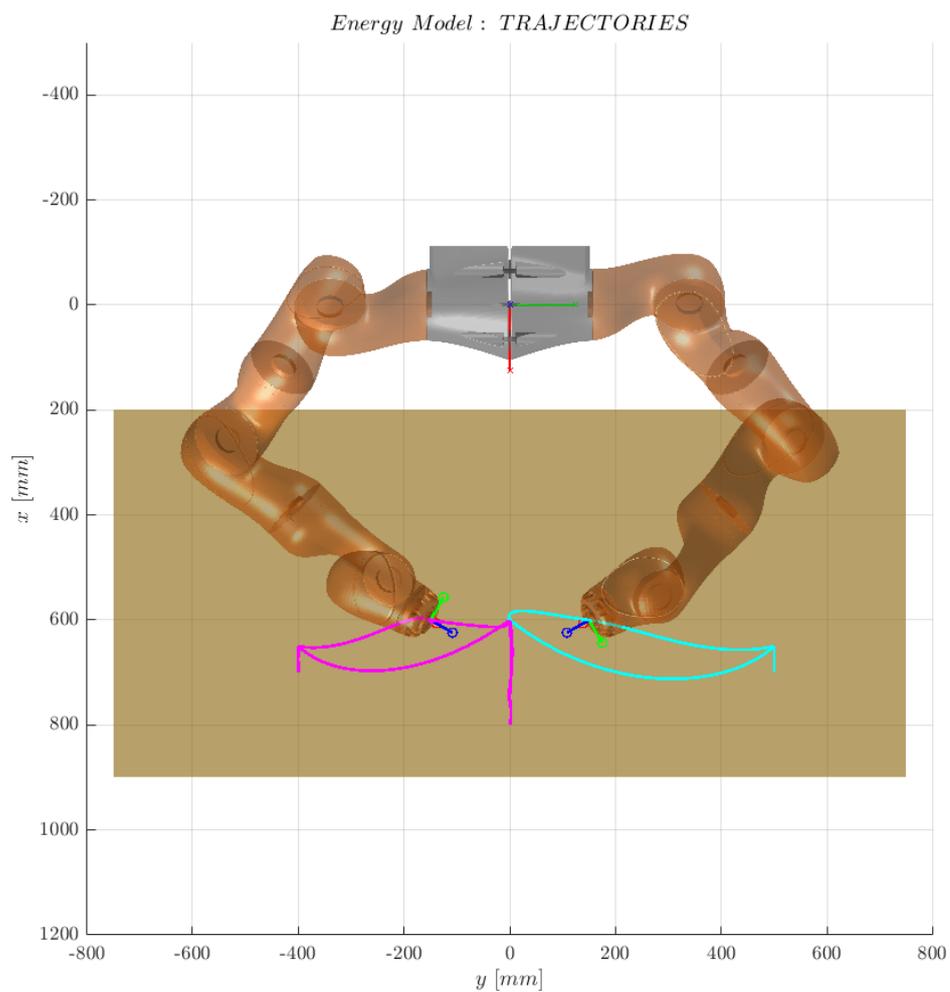


Figura 4.21: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista superiore.

#### 4.2. PICK AND PLACE DI TRE CARICHI CUBICI CON BRACCIA APPOGGIATE<sup>87</sup>

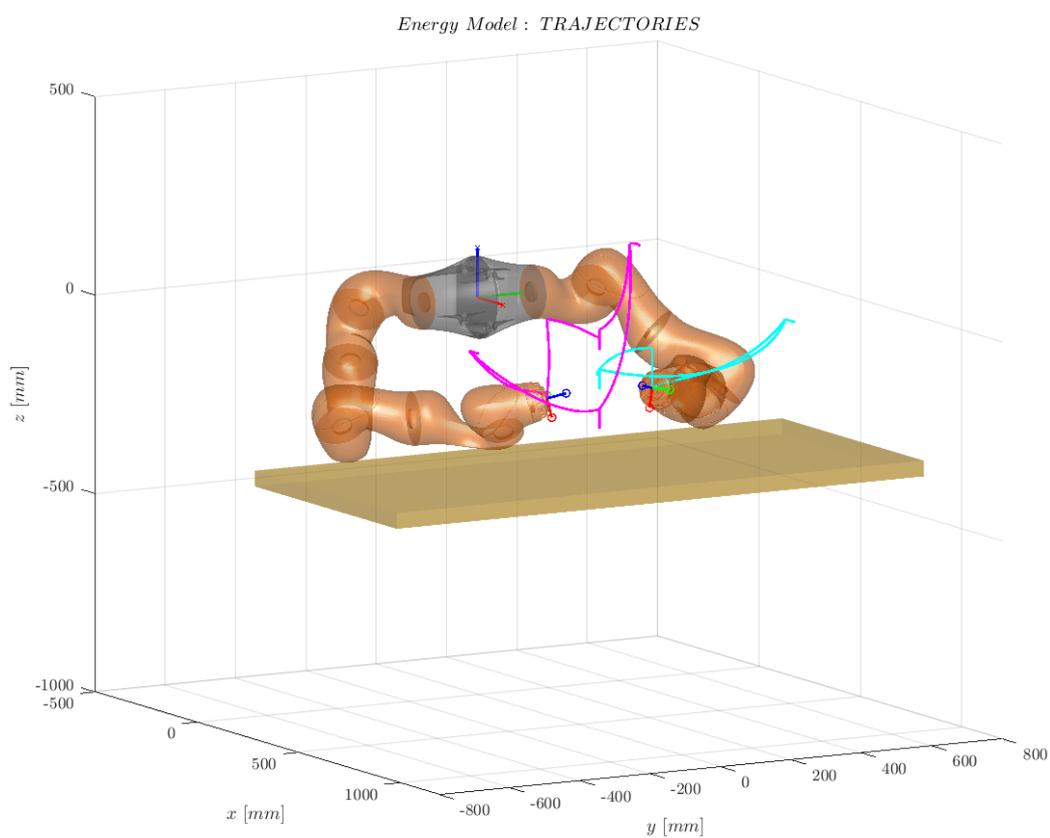
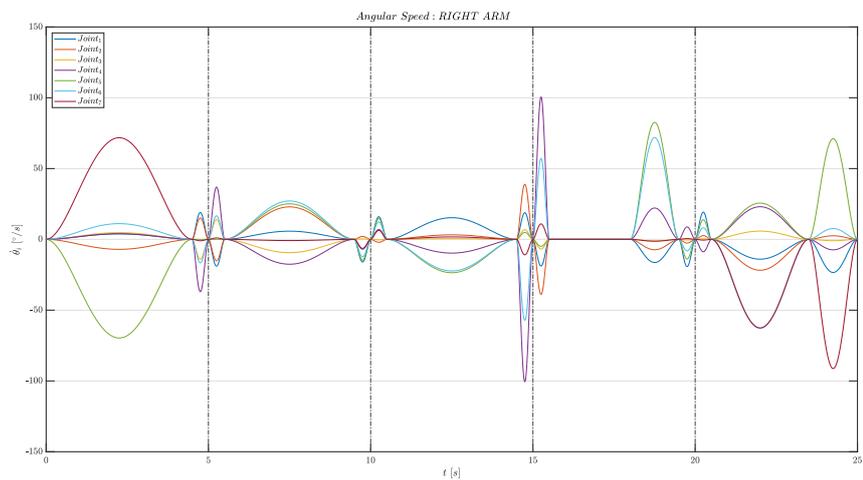
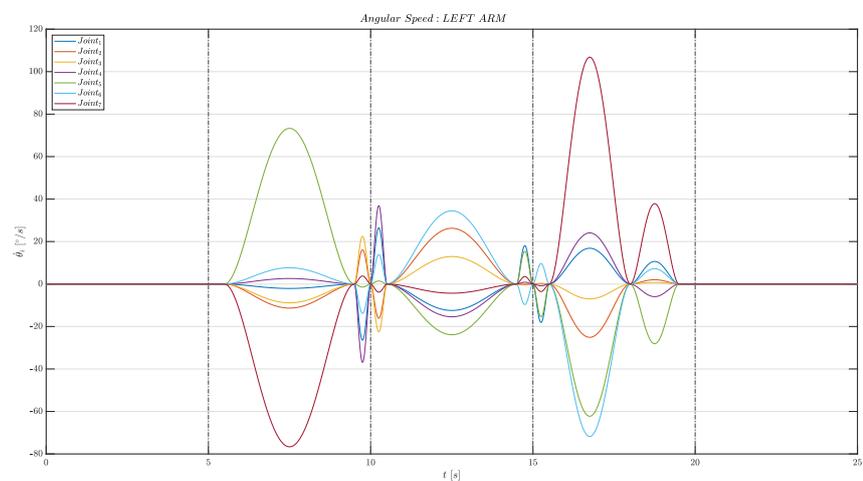


Figura 4.22: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista prospettica.

Di seguito sono riportate le curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  (vedi Figura 4.23), della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  (vedi Figura 4.24), della potenza  $P_i$  (vedi Figura 4.25) e delle energie spese (vedi Figura 4.26), per il braccio destro e sinistro:



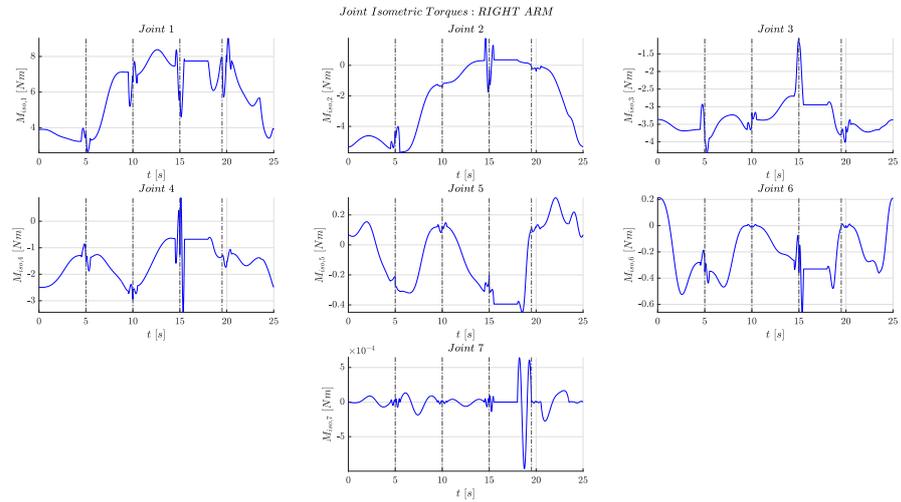
(a)



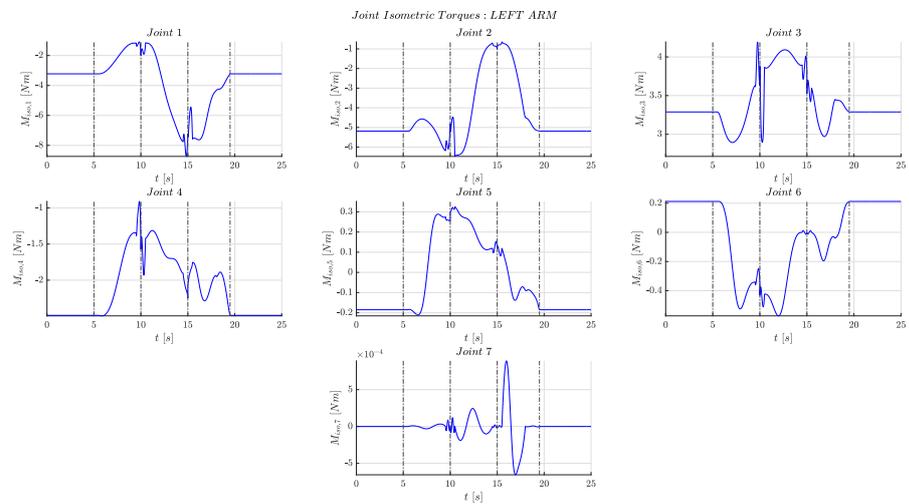
(b)

Figura 4.23: Curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

4.2. PICK AND PLACE DI TRE CARICHI CUBICI CON BRACCIA APPOGGIATE 89



(a)



(b)

Figura 4.24: Curve della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

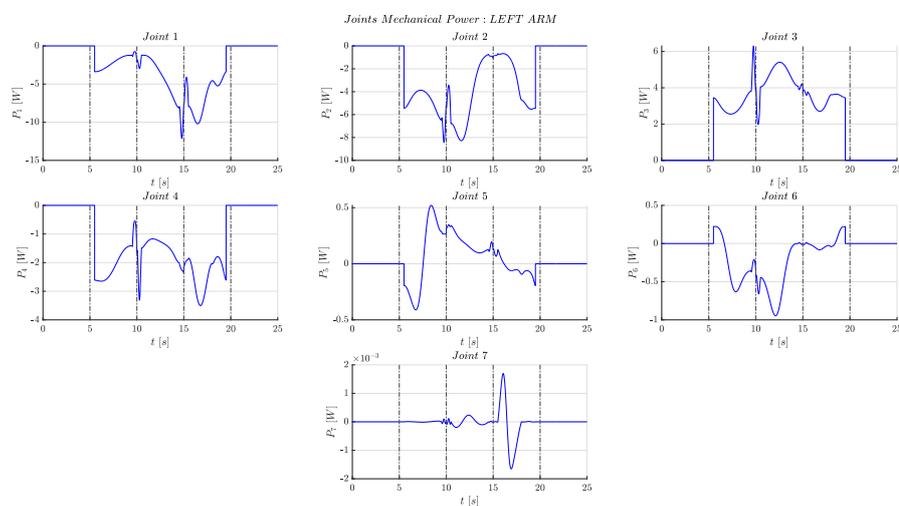
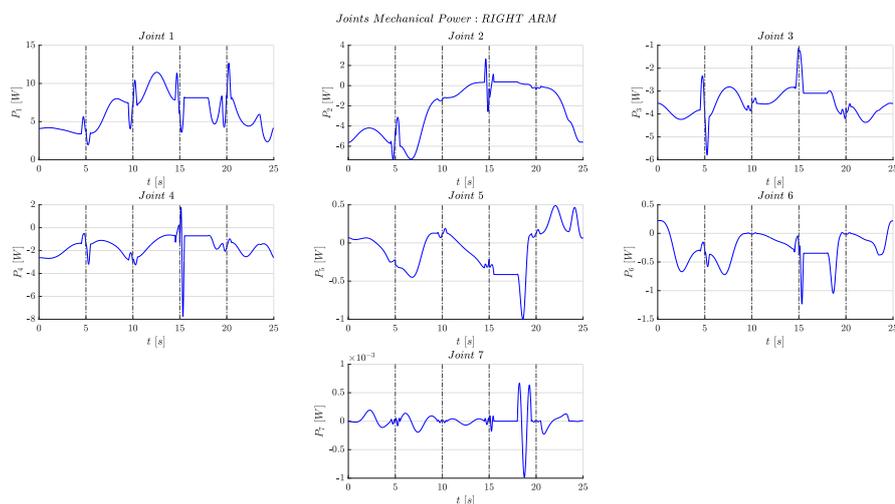
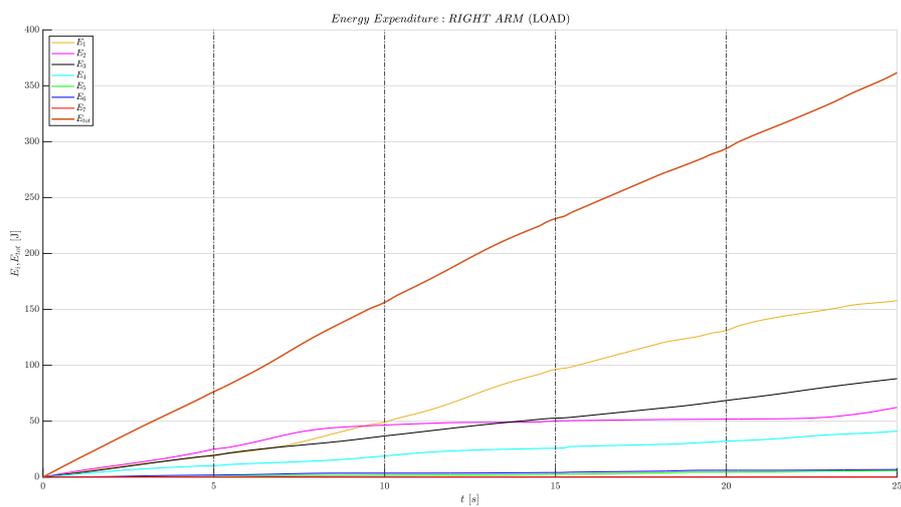
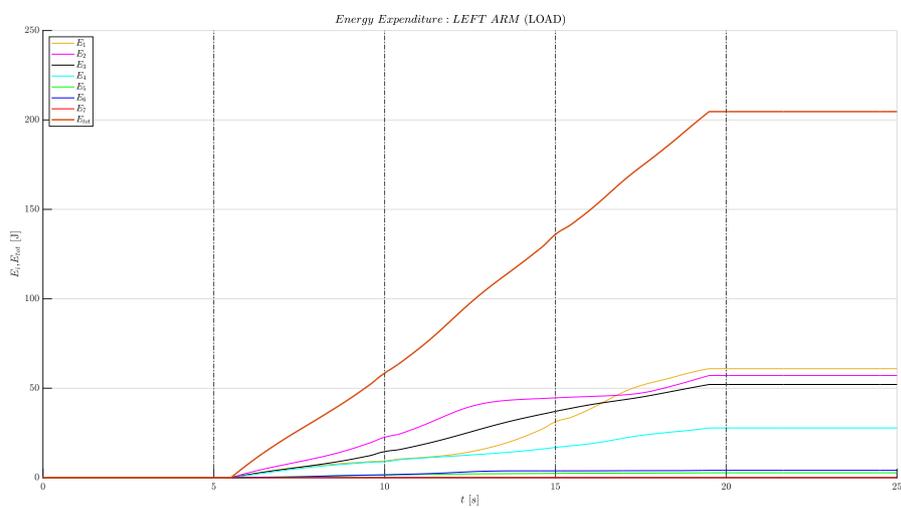


Figura 4.25: Curve della potenza meccanica  $P_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

## 4.2. PICK AND PLACE DI TRE CARICHI CUBICI CON BRACCIA APPOGGIATE 91



(a)



(b)

Figura 4.26: Curve della spesa energetica totale  $E_{tot}$  messa a confronto con la spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

Rispetto alle curve della sequenza 1 ottenute nello studio precedente (vedi paragrafo 4.1.1), le differenze sono evidenti nelle curve della potenza (vedi Figura 4.25) e in quelle della spesa energetica (vedi Figura 4.26) del braccio sinistro. Le curve della potenza relative ai momenti di *attesa* nelle posizioni di riposo del braccio (vedi Tabella 4.7) sono infatti piatte e pari a zero. Di conseguenza, in questi stessi tratti, anche le curve della spesa energetica presentano un andamento costante, dove appunto la spesa resta costante in quanto la potenza è nulla.

Nella seguente tabella sono riportati i valori numerici dell'energia totale spesa  $E_{tot}$  e l'energia spesa  $E_i$  dai singoli giunti, per il braccio destro e sinistro (Tabella 4.8).

Braccio Destro		Braccio Sinistro	
Giunto	Spesa energetica [J]	Giunto	Spesa energetica [J]
1	157.8060	1	60.8596
2	62.3960	2	57.1513
3	88.0073	3	52.0939
4	41.1476	4	27.7733
5	5.7063	5	2.6988
6	6.7097	6	4.0848
7	0.0020	7	0.0030
<b>Totale Dx</b>	<b>361.7748</b>	<b>Totale Sx</b>	<b>204.6648</b>
<b>Spesa energetica totale</b>		<b>566.4396</b>	

Tabella 4.8: Valori numerici della spesa energetica totale  $E_{tot}$  e della spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti del braccio destro e del sinistro, sequenza 1.

Si può facilmente notare come la spesa energetica del braccio sinistro calcolata nel presente studio (vedi Tabella 4.8) risulti nettamente inferiore alla spesa energetica calcolata nello studio precedente (vedi Tabella 4.4) con una variazione percentuale di circa l'82.31%.

### 4.2.2 Sequenza 2

La presente sequenza considera un *P&P* per il braccio destro e due *P&P* per il braccio sinistro, come mostrato nella Tabella [4.9](#).

Tempo [s]	Task braccio Dx	Task braccio Sx
0-5	Attesa in 11	Pick in 2
5-10	Pick in 1	Place in 4
10-15	Place in 5	Pick in 3
15-20	Shift in 7	Attesa in 3
	Riposo in 11	Place in 6
20-25	Attesa in 11	Shift in 10
	Attesa in 11	Riposo in 12

Tabella 4.9: Sequenza di operazioni effettuate dal braccio destro e dal braccio sinistro.

Le traiettorie ottenute dal modello sono le seguenti (vedi Figure [4.27](#), [4.28](#), [4.29](#) e [4.30](#)):

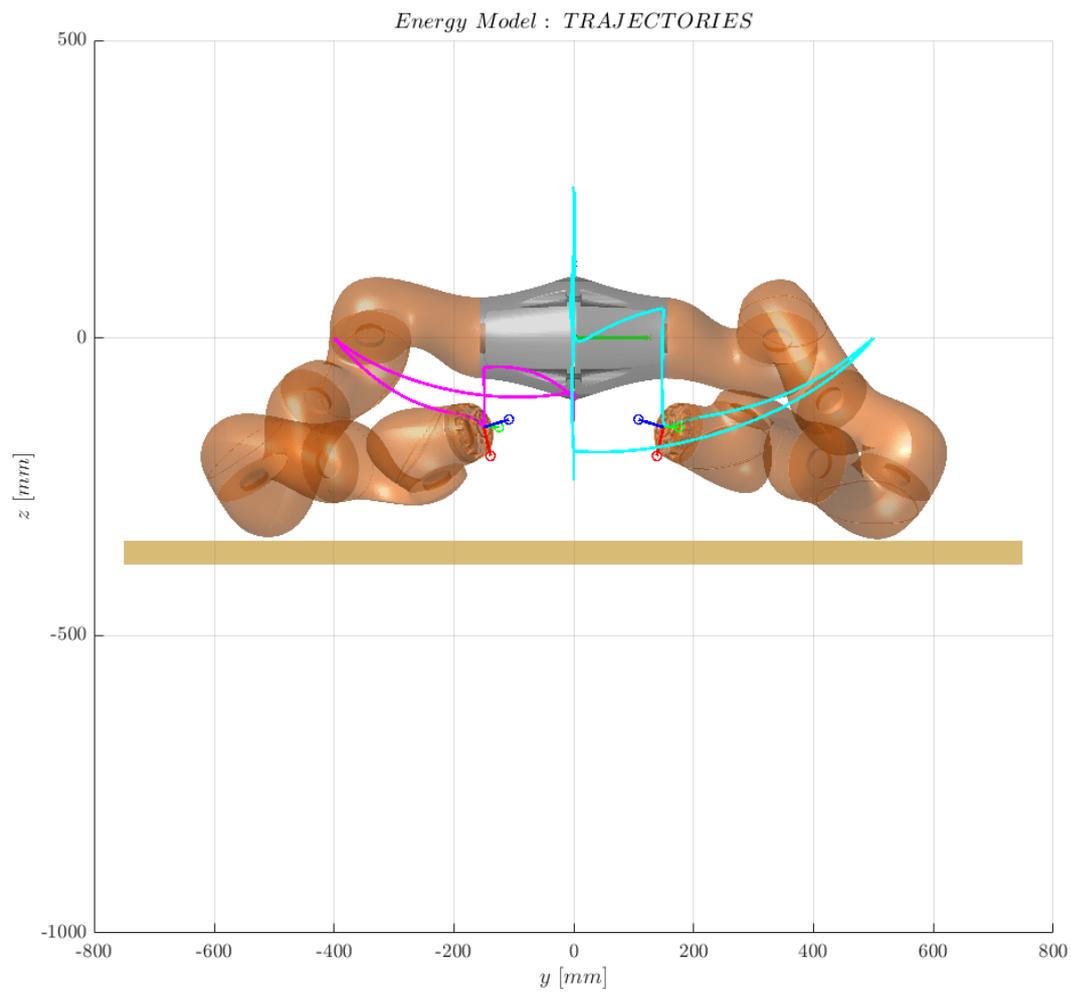


Figura 4.27: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista frontale.

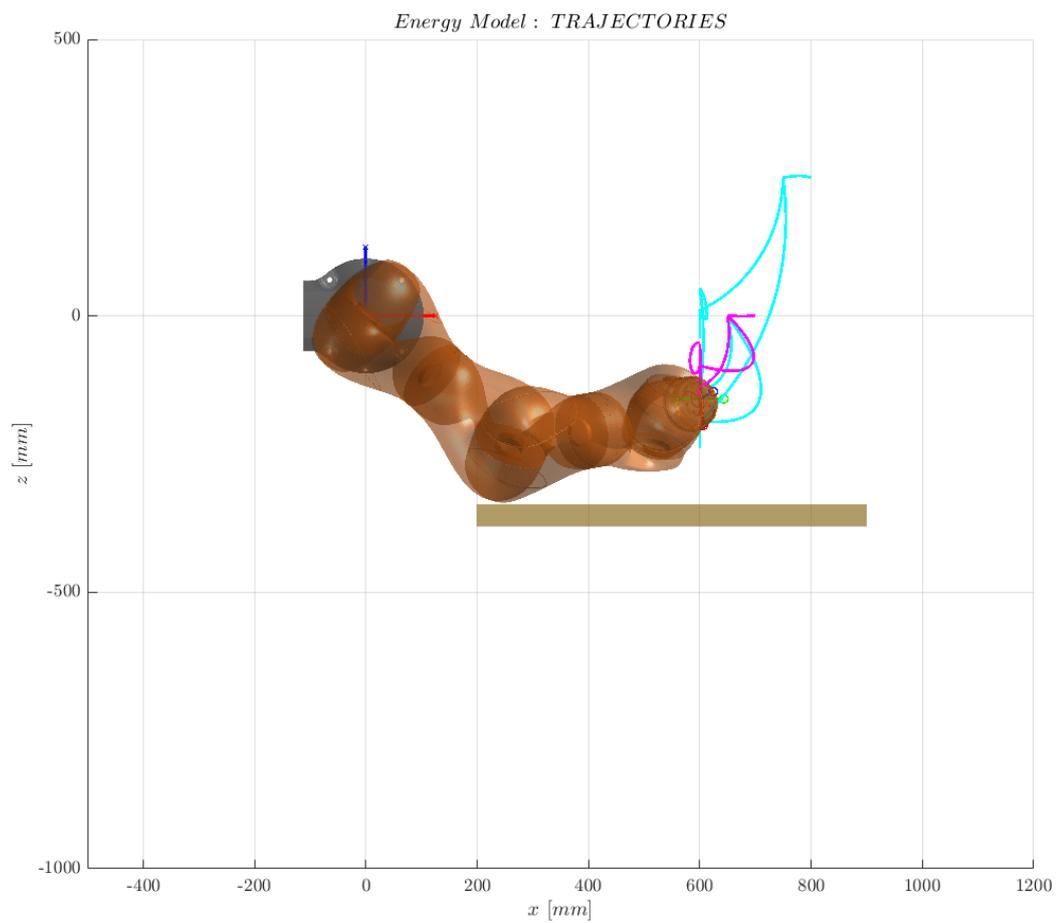


Figura 4.28: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista laterale.

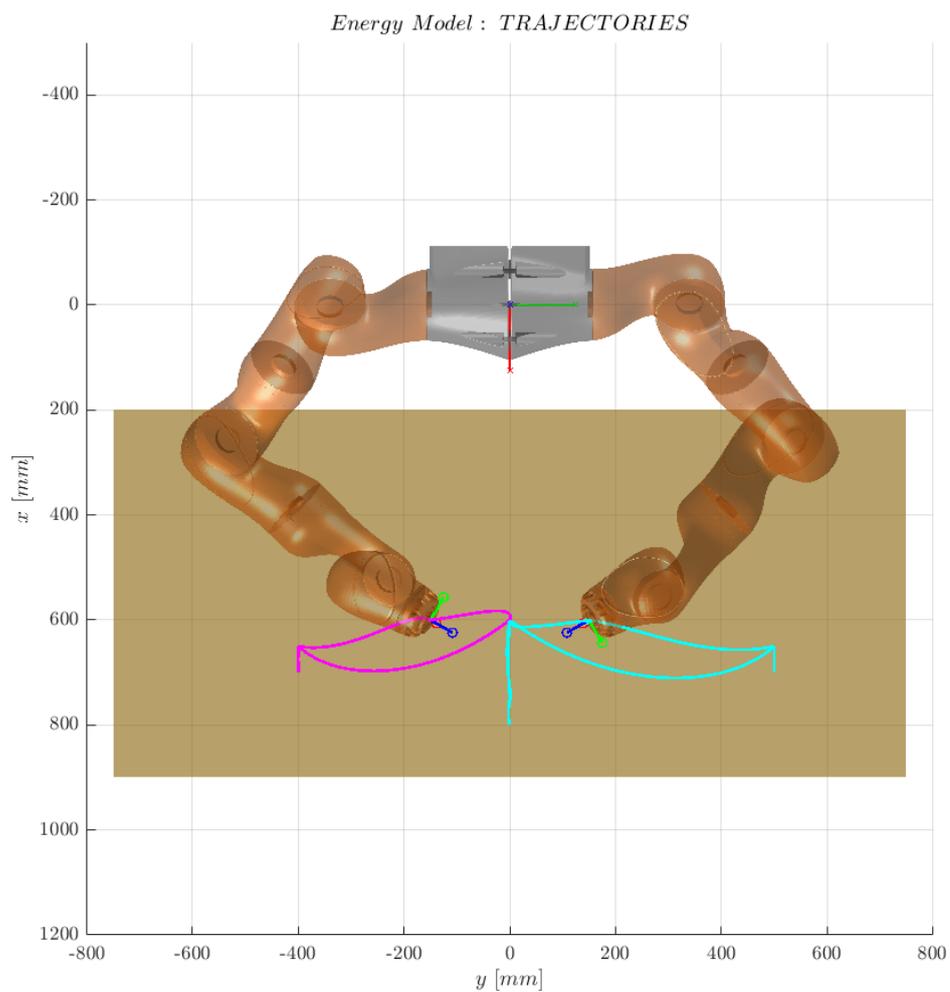


Figura 4.29: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista superiore.

#### 4.2. PICK AND PLACE DI TRE CARICHI CUBICI CON BRACCIA APPOGGIATE 97

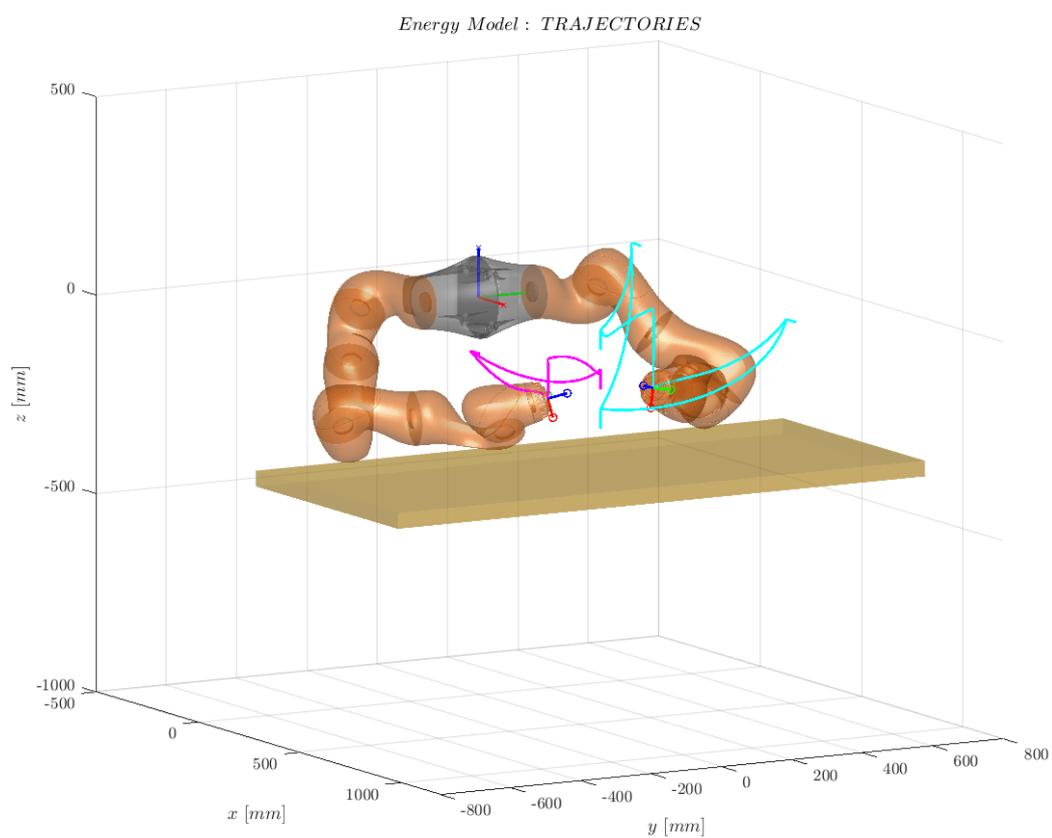
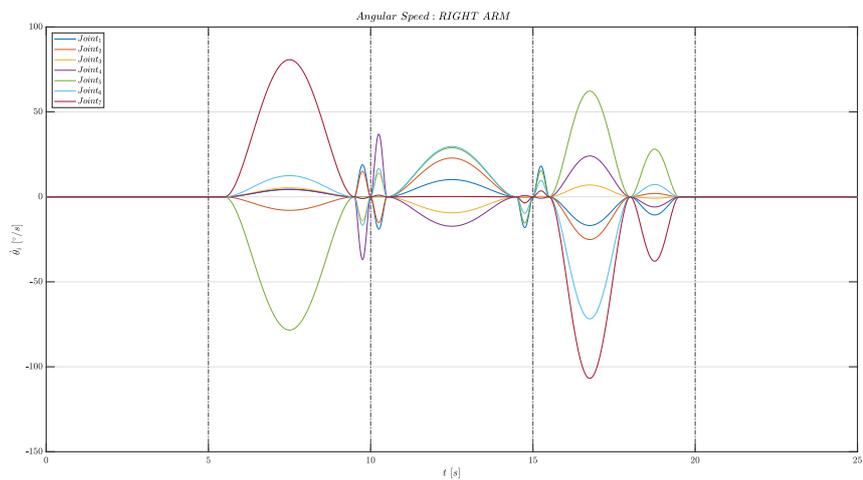
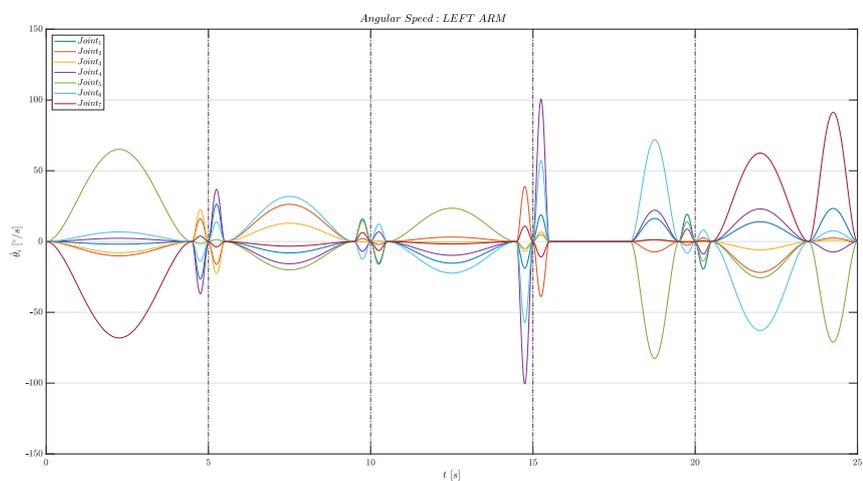


Figura 4.30: Rappresentazione della traiettoria dell'end-effector del braccio destro (magenta) e dell'end-effector del braccio sinistro (ciano), in vista prospettica.

Di seguito sono riportate le curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  (vedi Figura 4.31), della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  (vedi Figura 4.32), della potenza  $P_i$  (vedi Figura 4.33) e delle energie spese (vedi Figura 4.34), per il braccio destro e sinistro:



(a)



(b)

Figura 4.31: Curve della velocità angolare  $\dot{\theta}_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

## 4.2. PICK AND PLACE DI TRE CARICHI CUBICI CON BRACCIA APPOGGIATE 99

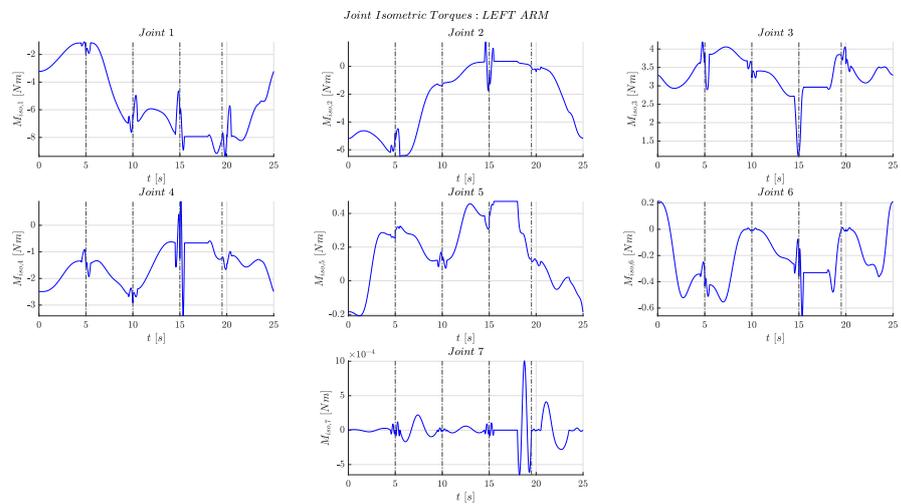
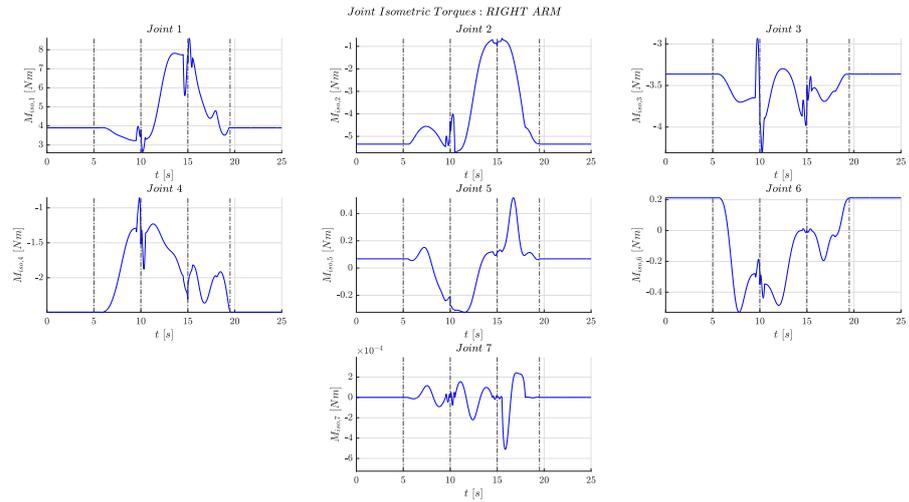


Figura 4.32: Curve della coppia isometrica  $M_{iso,i}$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

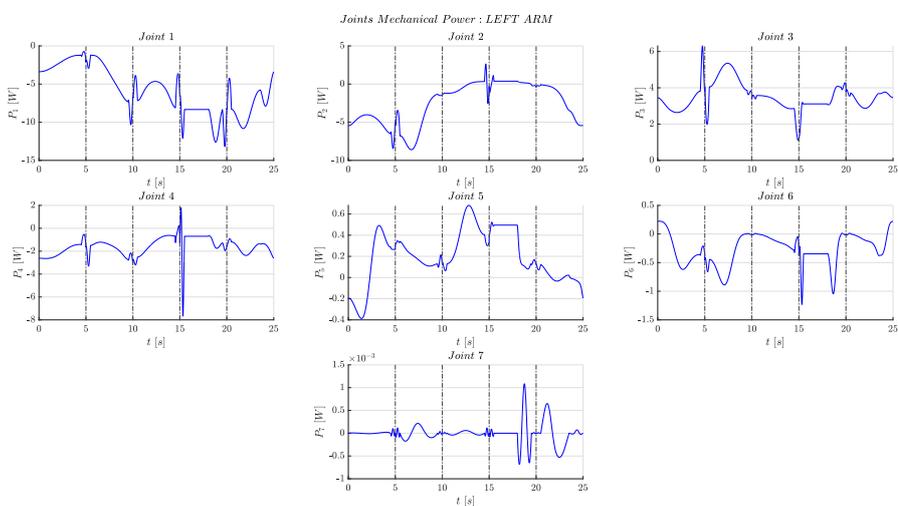
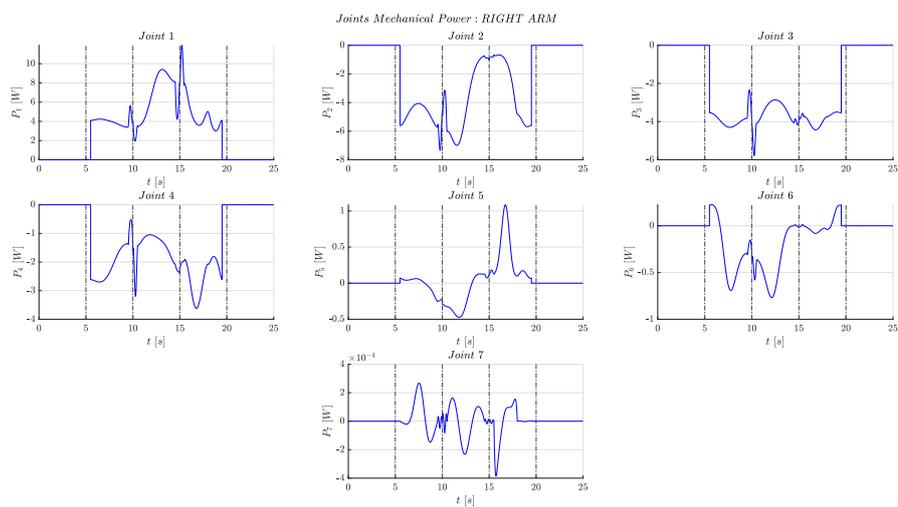


Figura 4.33: Curve della potenza meccanica  $P_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

## 4.2. PICK AND PLACE DI TRE CARICHI CUBICI CON BRACCIA APPOGGIATE 101

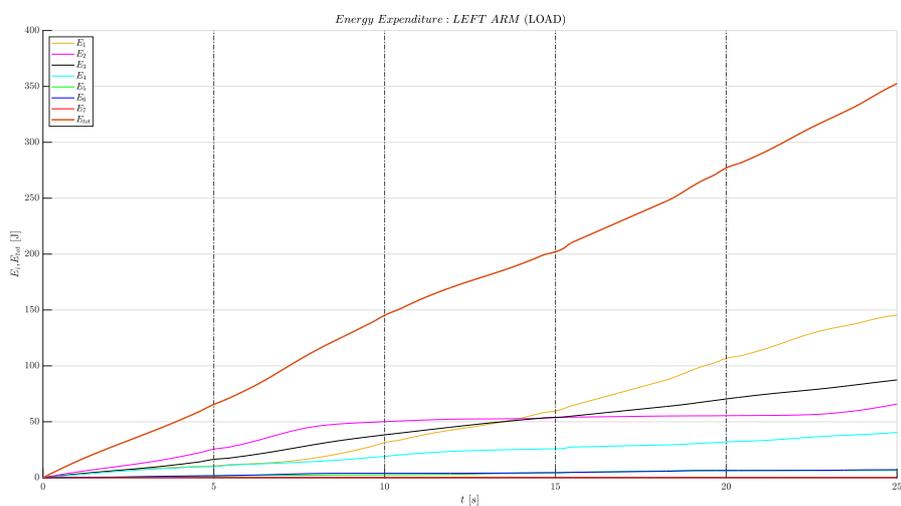
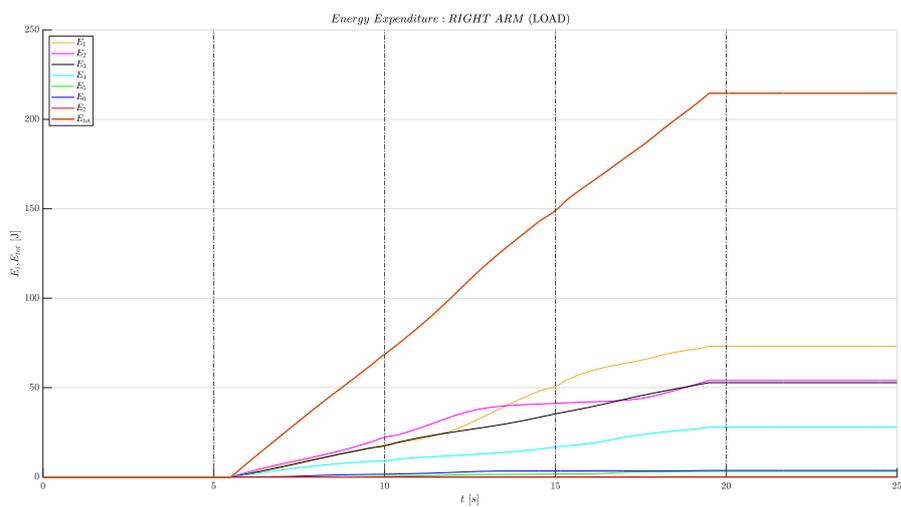


Figura 4.34: Curve della spesa energetica totale  $E_{tot}$  messa a confronto con la spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti del a) braccio destro e del b) braccio sinistro.

Nella seguente tabella sono riportati i valori numerici dell'energia totale spesa  $E_{tot}$  e l'energia spesa  $E_i$  dai singoli giunti, per il braccio destro e sinistro (Tabella 4.10).

Braccio Destro		Braccio Sinistro	
Giunto	Spesa energetica [J]	Giunto	Spesa energetica [J]
1	73.0685	1	145.2443
2	54.0334	2	65.8579
3	52.7595	3	87.4172
4	27.8919	4	40.5057
5	3.1681	5	6.4953
6	3.6811	6	7.1036
7	0.0012	7	0.0027
<b>Totale Dx</b>	<b>214.6037</b>	<b>Totale Sx</b>	<b>352.6266</b>
<b>Spesa energetica totale</b>		<b>567.2303</b>	

Tabella 4.10: Valori numerici della spesa energetica totale  $E_{tot}$  e della spesa energetica  $E_i$  dei singoli giunti del braccio destro e del sinistro, sequenza 2.

Anche qui si può facilmente notare come la spesa energetica del braccio destro calcolata nel presente studio (vedi Tabella 4.10) risulti nettamente inferiore alla spesa energetica calcolata nello studio precedente (vedi Tabella 4.6) con una variazione percentuale di circa l'82.77%.

### 4.2.3 Considerazioni

Dall'analisi delle Tabelle 4.8 e 4.10 si evince che la sequenza 1 sia quella che richiede una spesa energetica minore (anche se solo con una variazione percentuale dello 0,14%). Per questo motivo se si guarda unicamente la spesa energetica complessiva la sequenza 1 sarebbe da favorire. Tuttavia è possibile notare come la spesa energetica del singolo braccio destro nella sequenza 1 (vedi Figura 4.26 a)) sia la più elevata tra le spese degli altri bracci di entrambe le sequenze. Se l'obiettivo desiderato è quindi quello di avere la minor la spesa energetica per

#### 4.2. PICK AND PLACE DI TRE CARICHI CUBICI CON BRACCIA APPOGGIATE<sup>103</sup>

il singolo braccio, la sequenza 2 potrebbe essere quella più favorevole (anche se complessivamente più onerosa).



# Conclusioni

Tra i vantaggi menzionati nell'introduzione dei cobot vi è la possibilità di migliorare l'ergonomia degli operatori, solitamente soggetti all'esecuzione di attività ripetitive e insalubri, rischi comuni nei processi industriali come per esempio le attività di assemblaggio. Tale condizione non comporta solamente disagi di origine muscoloscheletrica ma arreca anche un danno aziendale non indifferente. Pertanto, si ritiene utile indagare in modalità quantitativa l'ipotetica influenza positiva della robotica collaborativa sull'ergonomia degli operatori in sistemi di assemblaggio.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è infatti stato quello di sviluppare un modello MatLAB<sup>®</sup> delle braccia di un operatore allo scopo di calcolarne la spesa energetica per il completamento di un'operazione industriale.

Il modello virtuale proposto è in grado di funzionare sia con semplici operazioni per scopi esemplificativi sia con operazioni più complesse grazie alla possibilità di personalizzare agevolmente gli input richiesti come: posizione e orientazione dei punti di pick e place, posizione del gomito, massa del carico, dimensioni del carico, inerzia del carico e tempi di esecuzione dei task.

I risultati ottenuti possono poi essere usati come parametro per l'assegnazione dei task tra robot e umano, favorendo quest'ultimo assegnandogli operazioni con spesa energetica ridotta. Un altro possibile utilizzo è quello di usare i risultati calcolati come indicatore per stabilire l'idoneità o meno di un'operazione industriale.

Chiaramente la tesi presentata non suppone di aver completamente esplicito l'argomento trattato ma altri studi potrebbero essere condotti per migliorare le possibilità di applicazione del modello e la qualità dei risultati ottenuti con

esso. In particolare potrebbe essere interessante analizzare il comportamento delle braccia robotiche quando sono in attesa. Per esempio potrebbe essere studiato con più attenzione il comportamento dei motori dei giunti individuando quali applicano una coppia e quali no. In questo modo sarà possibile azzerare la potenza, e quindi la spesa energetica, solo dei motori che effettivamente non ne esercitano migliorando così la qualità dei risultati del modello. Un altro ulteriore studio potrebbe riguardare la scelta della posizione del gomito assegnando diversi angoli al centro durante lo svolgimento dell'operazione.

# Bibliografia

- [1] M. A. Peshkin, J. E. Colgate, W. Wannasuphoprasit, C. A. Moore, R. B. Gillespie, and P. Akella, “Cobot architecture,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 17, no. 4, pp. 377–390, 2001.
- [2] J. E. Colgate, W. Wannasuphoprasit, and M. A. Peshkin, “Cobots: Robots for collaboration with human operators,” in *ASME international mechanical engineering congress and exposition*, vol. 15281. American Society of Mechanical Engineers, 1996, pp. 433–439.
- [3] [Online]. Available: <https://www.universal-robots.com>
- [4] L. Barbazza, M. Faccio, F. Oscari, and G. Rosati, “Agility in assembly systems: a comparison model,” *Assembly Automation*, vol. 37, no. 4, pp. 411–421, 2017.
- [5] M. Fechter, P. Foith-Förster, M. S. Pfeiffer, and T. Bauernhansl, “Axiomatic design approach for human-robot collaboration in flexibly linked assembly layouts,” *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 629–634, 2016.
- [6] M. Faccio, M. Bottin, and G. Rosati, “Collaborative and traditional robotic assembly: a comparison model,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 1355–1372, 2019.
- [7] D. Battini, M. Faccio, A. Persona, and F. Sgarbossa, “New methodological framework to improve productivity and ergonomics in assembly system design,” *International Journal of industrial ergonomics*, vol. 41, no. 1, pp. 30–42, 2011.

- [8] M. Hägele, W. Schaaf, and E. Helms, “Robot assistants at manual workplaces: Effective co-operation and safety aspects,” in *Proceedings of the 33rd ISR (international symposium on robotics)*, vol. 7. Citeseer, 2002, p. 97.
- [9] E. Matheson, R. Minto, E. G. Zampieri, M. Faccio, and G. Rosati, “Human–robot collaboration in manufacturing applications: A review,” *Robotics*, vol. 8, no. 4, p. 100, 2019.
- [10] M. Faccio, I. Granata, A. Menini, M. Milanese, C. Rossato, M. Bottin, R. Minto, P. Pluchino, L. Gamberini, G. Boschetti, *et al.*, “Human factors in cobot era: a review of modern production systems features,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 34, no. 1, pp. 85–106, 2023.
- [11] F. Pini, M. Ansaloni, and F. Leali, “Evaluation of operator relief for an effective design of hrc workcells,” in *2016 IEEE 21st international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [12] L. Gualtieri, I. Palomba, E. J. Wehrle, and R. Vidoni, “The opportunities and challenges of sme manufacturing automation: safety and ergonomics in human–robot collaboration,” *Industry 4.0 for SMEs: Challenges, opportunities and requirements*, pp. 105–144, 2020.
- [13] B. B. Van Acker, D. D. Parmentier, P. Vlerick, and J. Saldien, “Understanding mental workload: from a clarifying concept analysis toward an implementable framework,” *Cognition, technology & work*, vol. 20, pp. 351–365, 2018.
- [14] P. A. Hancock, D. R. Billings, K. E. Schaefer, J. Y. Chen, E. J. De Visser, and R. Parasuraman, “A meta-analysis of factors affecting trust in human-robot interaction,” *Human factors*, vol. 53, no. 5, pp. 517–527, 2011.
- [15] R. Latikka, T. Turja, and A. Oksanen, “Self-efficacy and acceptance of robots,” *Computers in Human Behavior*, vol. 93, pp. 157–163, 2019.
- [16] [Online]. Available: <https://www.kuka.com>

- 
- [17] F. Ficuciello, A. Romano, V. Lippiello, V. Luigi, and B. Siciliano, *Human Motion Mapping to a Robot Arm with Redundancy Resolution*. Springer, 07 2014, p. 193–201.
- [18] R. Featherstone, *Rigid body dynamics algorithms*. Springer, 2014.
- [19] B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo, *Robotics Modelling, Planning and Control*. Springer, 2009.
- [20] R. Featherstone, “Robot dynamics algorithms,” *Annexe Thesis Digitisation Project 2016 Block 5*, 1984.
- [21] V. M. Zatsiorsky, *Kinetics of human motion*. Human kinetics, 2002.
- [22] R. M. Alexander, *Principles of animal locomotion*. Princeton university press, 2003.
- [23] R. C. Woledge, N. A. Curtin, and E. Homsher, “Energetic aspects of muscle contraction.” *Monographs of the physiological society*, vol. 41, pp. 1–357, 1985.
- [24] J. M. Winters and L. Stark, “Analysis of fundamental human movement patterns through the use of in-depth antagonistic muscle models,” *IEEE transactions on biomedical engineering*, no. 10, pp. 826–839, 1985.
- [25] R. M. Alexander, “A minimum energy cost hypothesis for human arm trajectories,” *Biological cybernetics*, vol. 76, no. 2, pp. 97–105, 1997.