



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI  
CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE

Corso di Dottorato in  
Metodi, Modelli e Tecnologie per l'Ingegneria

curriculum Ingegneria Meccanica e Gestionale

Ciclo XXXIV

Sintesi Cinematica e Progetto di un Meccanismo per  
Esoscheletro del Ginocchio

SSD: ING-IND/13

Coordinatore del Corso  
Chiar.mo Prof. Fabrizio Marignetti

Dottorando  
Luciano Tomassi

Supervisore  
Chiar.mo Prof. Giorgio Figliolini



# ABSTRACT

One of the most fascinating challenges of science is the realization of devices that are able to faithfully replicate human movement. Over the years, different solutions have been investigated in different fields of knowledge, such as the world of prosthetic devices, wearable robotic devices and humanoid robots. In the first case, one of the most common solutions is the use of linkages, typically four-bar and six-bar linkages, with particular reference to the knee joint. These devices make it possible to approximate the movement of the joints of the human body with good results.

In robotics, in the last forty years, there have been enormous steps forward in the creation of sensors, control, sources of electrical energy and materials. This has often overshadowed the mechanical aspects, which led to joint joints that are, albeit functional, kinematically approximated.

This PhD thesis explores a new methodology for kinematic synthesis of anthropomorphic mechanisms related to the human knee joint. The first phase focuses on the description of the movement and acquisition of data; the second phase focuses on the design of a prototype of a knee exoskeleton for the lower limb and on its 3D printing fabrication, with final aims being its wearability and testing.

# SOMMARIO

ABSTRACT.....	I
Lista delle Figure .....	IV
INTRODUZIONE .....	1
CAPITOLO 1. Analisi dello Stato dell'Arte di Meccanismi per il Ginocchio Umano 2	
1.1 Biomeccanica del Ginocchio Umano .....	2
1.1.1 Anatomia del Ginocchio .....	2
1.1.2 Movimenti del Ginocchio .....	3
1.2 Meccanismi per il Ginocchio.....	5
1.2.1 Esoscheletri per Arto Inferiore.....	6
1.2.2 Robot Umanoidi .....	11
CAPITOLO 2. Sintesi Cinematica.....	14
2.1 Analisi del Movimento del Ginocchio Umano.....	14
2.2 Sintesi di Tipo e Sintesi di Numero: Quadrilatero Articolato .....	19
2.3 Analisi dei Profili Coniugati e Quadrilatero Antropomorfo.....	23
2.4 Quadrilatero Antropomorfo: Metodo di Suh e Radcliffe .....	27
2.5 Esalatero .....	28
2.6 Manovellismo di Spinta Antropomorfo.....	30
CAPITOLO 3. Analisi Cinematica dei Meccanismi e Traiettorie Polari .....	33
3.1 Introduzione.....	33
3.2 Quadrilatero Articolato.....	34
3.3 Equazioni di Chiusura .....	35
3.4 Traiettorie Polari Quadrilatero Antropomorfo .....	37
3.5 Traiettorie Polari del Manovellismo di Spinta Antropomorfo .....	40
3.6 Confronto Polari Quadrilatero-Manovellismo .....	42
CAPITOLO 4. Progetto Meccanico e Realizzazione del Prototipo.....	44
4.1 Introduzione.....	44
4.2 Progetto CAD dell'Esoscheletro .....	44
4.3 Circuito Pneumatico di Azionamento .....	48
4.4 Stampa 3D del Prototipo .....	49
CONCLUSIONI .....	53

Bibliografia ..... 54

## LISTA DELLE FIGURE

Figura 1.1 Anatomia del ginocchio umano .....	3
Figura 1.2 Piani di riferimento del corpo umano .....	4
Figura 1.3 Movimento di flessione-estensione del ginocchio .....	4
Figura 1.4 Rotazione interna ed esterna del ginocchio .....	5
Figura 1.5 Esoscheletro per la riabilitazione Lokomat .....	8
Figura 1.6 Esoscheletro LOPES .....	8
Figura 1.7 Esoscheletro ALEX .....	9
Figura 1.8 Esoscheletro indossabile per la riabilitazione ReWalk .....	9
Figura 1.9 Esoscheletro Ekso .....	10
Figura 1.10 Esoscheletro Indego .....	10
Figura 1.11 Prototipo del robot umanoide HRP .....	11
Figura 1.12 Prototipo del robot umanoide ASIMO, sviluppato dalla Honda .....	12
Figura 1.13 Il robot umanoide Wabian-2 della Waseda University .....	12
Figura 1.14 Il robot umanoide ATLAS della Boston Dynamics .....	13
Figura 2.1 Modello CAD della T utilizzata per l'acquisizione immagini .....	15
Figura 2.2 Vista frontale della T e definizione dei punti notevoli .....	16
Figura 2.3 Modello della T stampato e montato sul parastinchi .....	16
Figura 2.4 Diverse posizioni assunte dalla T durante la flessione-estensione del ginocchio .....	17
Figura 2.5 Validazione lunghezze segmenti .....	18
Figura 2.6 Validazione cinematica della metodologia di acquisizione dati utilizzata .....	18
Figura 2.7 Traiettorie dei punti notevoli .....	19
Figura 2.8 Le 3 posizioni rigide scelte per la sintesi cinematica .....	20
Figura 2.9 Catena cinematica 4R .....	21
Figura 2.10 Costruzione grafica del quadrilatero generatore di moto rigido .....	22
Figura 2.11 Modello del quadrilatero articolato ottenuto .....	22
Figura 2.12 Profili coniugati di femore e tibia .....	23
Figura 2.13 Costruzione grafica relativa alla formula di Euler-Savary per i profili coniugati .....	24

Figura 2.14 Radiografia laterale del ginocchio umano con approssimazione dei profili tramite spline.....	25
Figura 2.15 Costruzione delle 3 posizioni della biella del quadrilatero a partire dalle 3 posizioni della T.....	25
Figura 2.16 Le tre posizioni di progetto della biella del quadrilatero articolato antropomorfo .....	26
Figura 2.17 Quadrilatero articolato antropomorfo .....	26
Figura 2.18 Quadrilatero articolato antropomorfo calcolato con il metodo di Suh e Radcliffe.....	28
Figura 2.19 Esalatero articolato .....	29
Figura 2.20 Catena Cinematica 3RP .....	30
Figura 2.21 Costruzione grafica del manovellismo di spinta antropomorfo.....	31
Figura 2.22 Manovellismo di spinta antropomorfo .....	32
Figura 2.23 Schema cinematico del manovellismo di spinta antropomorfo.....	32
Figura 3.1 Quadrilatero articolato antropomorfo .....	34
Figura 3.2 Schema del quadrilatero per le equazioni di chiusura .....	35
Figura 3.3 Traiettorie polari del quadrilatero articolato antropomorfo nella posizione di progetto 1.....	37
Figura 3.4 Traiettorie polari del quadrilatero articolato antropomorfo nella posizione di progetto 2.....	38
Figura 3.5 Traiettorie polari del quadrilatero articolato antropomorfo nella posizione di progetto 3.....	39
Figura 3.6 Schema cinematico manovellismo di spinta antropomorfo.....	40
Figura 3.7 Traiettorie polari del manovellismo di spinta antropomorfo nella posizione di progetto 1.....	40
Figura 3.8 Traiettorie polari del manovellismo di spinta antropomorfo nella posizione di progetto 2.....	41
Figura 3.9 Traiettorie polari del manovellismo di spinta antropomorfo nella posizione di progetto 3.....	42
Figura 3.10 Confronto traiettorie polari fisse dei due meccanismi realizzati .....	43
Figura 3.11 Confronto traiettorie polari mobile dei due meccanismi realizzati ...	43
Figura 4.1 Schema cinematico del manovellismo.....	44
Figura 4.2 Schema del telaio del meccanismo per esoscheletro .....	45
Figura 4.3 Guida lineare.....	46
Figura 4.4 Immagine 3D della biella del manovellismo .....	47
Figura 4.5 Progetto meccanico finale dell'esoscheletro per il ginocchio .....	47

Figura 4.6 Circuito pneumatico realizzato per comandare i cilindri pneumatici..	48
Figura 4.7 Schema circuitale dell'azionamento pneumatico realizzato.....	49
Figura 4.8 Stampante 3D Ultimaker 3 Extended .....	50
Figura 4.9 Prototipo stampato ed assemblato, relativo alla parte esterna dell'esoscheletro .....	50
Figura 4.10 Esoscheletro per il ginocchio collegato al circuito di azionamento ed indossato .....	51
Figura 4.11 Esoscheletro per il ginocchio.....	51
Figura 4.12 Evidenza del manovellismo sul prototipo di esoscheletro.....	52

# INTRODUZIONE

La presente tesi di dottorato riguarda la sintesi cinematica ed il progetto di un meccanismo per un esoscheletro del ginocchio umano. L'obiettivo principale è stato quello di voler mettere in piedi una metodologia di progetto che fornisse gli strumenti per realizzare dei dispositivi che fossero in grado di replicare nella maniera più accurata ed antropomorfa possibile il movimento reale del ginocchio umano, per diverse applicazioni, sia che fossero in campo medico-riabilitativo, piuttosto che inerenti al campo della robotica indossabile ed umanoide.

Nel primo capitolo vengono descritte alcune tipologie di meccanismi già consolidate relative al movimento del ginocchio nel campo delle protesi sostitutive del ginocchio e per la sua riabilitazione motoria, nonché diversi esempi di meccanismi semplificati per ginocchio di dispositivi robotici quali esoscheletri e robot umanoidi.

Nel secondo capitolo viene esposta la metodologia di sintesi cinematica dei meccanismi antropomorfi per il ginocchio. Dapprima viene descritto il setup sperimentale per l'acquisizione dei dati, dopodiché vengono proposte diverse soluzioni di sistemi articolati e, in particolare, un quadrilatero articolato ed un manovellismo di spinta antropomorfi.

Nel terzo capitolo viene effettuata un'analisi cinematica con metodi analitici delle soluzioni precedentemente proposte, al fine di validarne l'effettiva funzionalità.

Da ultimo, nel quarto capitolo, viene riportato il progetto meccanico di un esoscheletro per il ginocchio, la sua stampa 3D e la descrizione del circuito pneumatico di azionamento dello stesso.

# **CAPITOLO 1. ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE DI MECCANISMI PER IL GINOCCHIO UMANO**

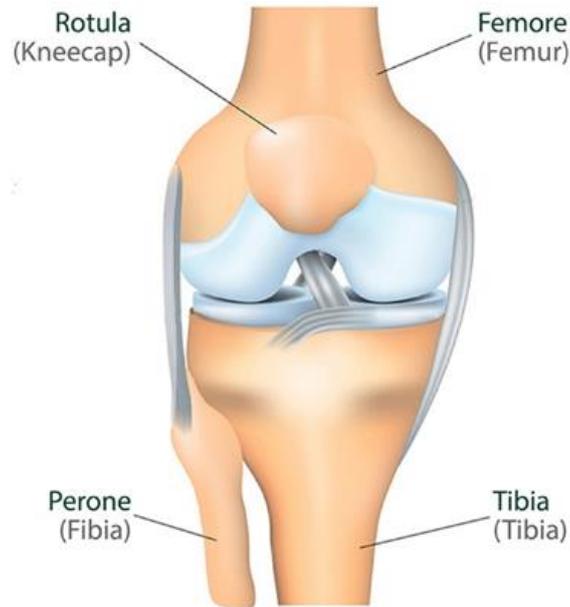
## **1.1 Biomeccanica del Ginocchio Umano**

Al fine di voler realizzare il progetto di un meccanismo per un esoscheletro del ginocchio umano risulta di fondamentale importanza conoscere la biomeccanica del ginocchio umano stesso. Per comprendere ciò è necessario dapprima conoscere l'anatomia del ginocchio, nonché quelle che sono le caratteristiche del suo movimento.

### **1.1.1 Anatomia del Ginocchio**

Il ginocchio è l'articolazione intermedia dell'arto inferiore del corpo umano, ed è una delle articolazioni del corpo umano più complesse, sia sotto il profilo anatomico che dal punto di vista prettamente biomeccanico. Essa, infatti, è costituita non solo da una componente ossea, bensì anche da una parte muscolare ed una parte legamentosa, quest'ultima di fondamentale importanza nella stabilità del ginocchio stesso.

Come si può apprezzare dalla Fig. 1.1, dal punto di vista della struttura ossea il ginocchio è composto dal femore, dalla tibia, dal perone e dalla rotula. Il femore è l'osso più grande dell'arto inferiore ed esso è collegato alla tibia per il tramite dei legamenti. Parallelamente alla tibia è posizionato il perone, mentre la rotula è sita sulla parte superiore. Oltre alle ossa è presente anche una struttura di cartilagine, ovvero il menisco, che si trova all'interfaccia tra femore e tibia ed ha il duplice compito di proteggere il ginocchio e di permettere lo strisciamento relativo tra le due superfici a contatto. Oltre alle ossa ed alla cartilagine sono presenti, come già anticipato, i legamenti, che si suddividono in legamenti crociati anteriore e posteriore, i quali sono collocati nel centro del ginocchio.



*Figura 1.1 Anatomia del ginocchio umano*

### 1.1.2 Movimenti del Ginocchio

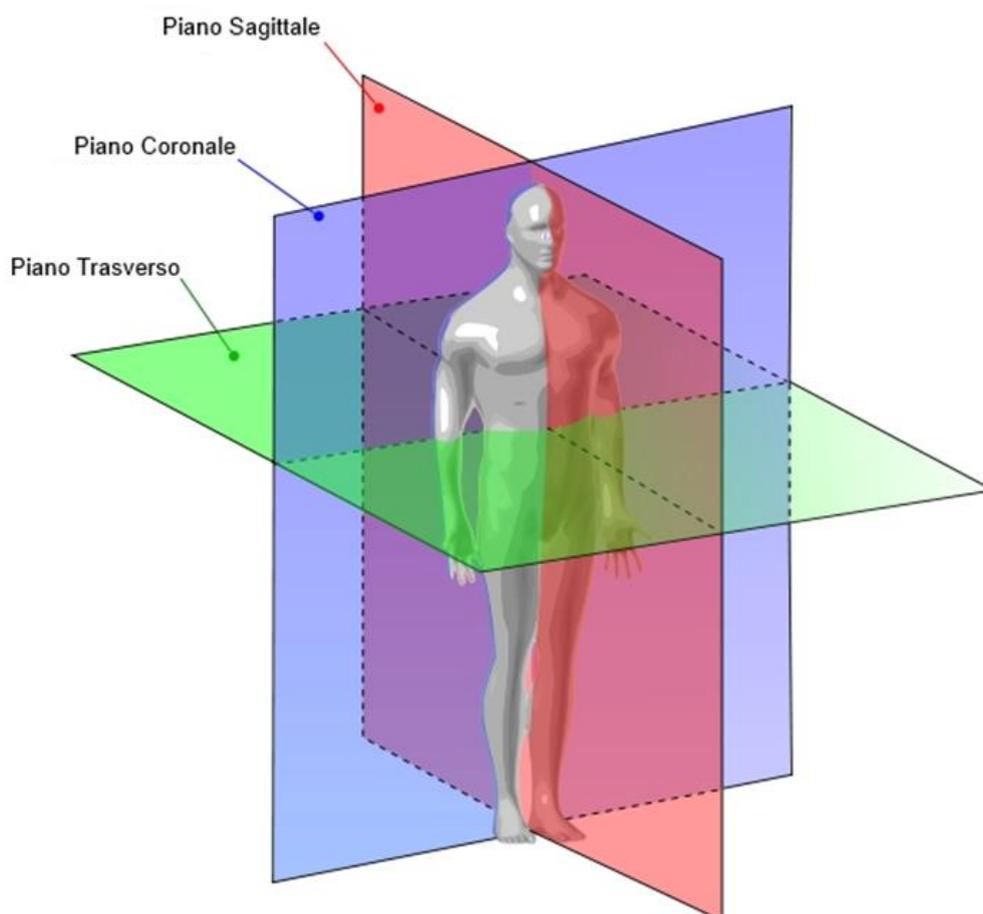
Il comportamento ed il movimento macroscopico del ginocchio può immaginarsi come il risultato dello strisciamento delle superfici coniugate di femore e tibia a contatto. Inoltre, questa coppia cinematica risulta essere lubrificata grazie alla presenza del menisco, che ne evitano dunque l'usura.

Per effettuare una descrizione dei movimenti principali del ginocchio è utile far riferimento ai piani del moto del corpo umano (Fig.1.2): il piano trasverso, il piano sagittale ed il piano coronale.

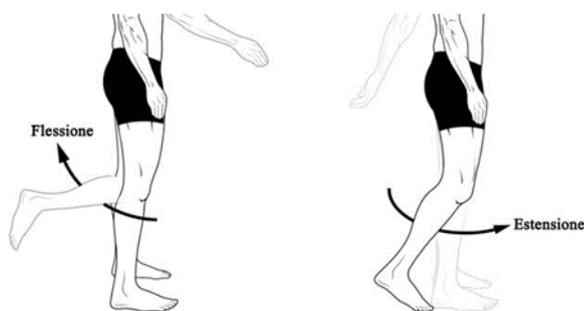
Come anticipato nel Par. 1.1.1 i legamenti risultano di particolare importanza per la stabilità del ginocchio. Infatti, è proprio grazie alla presenza dei legamenti che la struttura scheletrica del ginocchio può considerarsi a due gradi di libertà complessivi. Il primo è quello relativo alla flessione-estensione (Fig. 1.3), che si traduce in una rotazione attorno all'asse medio-laterale, sul piano sagittale. Il secondo è quello relativo alla rotazione interna-esterna, ovvero una rotazione intorno all'asse longitudinale del ginocchio stesso (Fig. 1.4).

Appare ovvio dunque che l'articolazione del ginocchio non può essere schematizzata come una cerniera semplice ed è sicuramente attraverso una accurata indagine cinematica che se ne può comprendere a fondo il funzionamento. Durante la flessione-estensione il moto relativo delle superfici a contatto di femore e

tibia è un rotolamento con strisciamento. Il centro di istantanea rotazione, pertanto, non è fisso durante il movimento di flesso-estensione, come accadrebbe invece se il vincolo fosse una semplice coppia rotoidale.



*Figura 1.2 Piani di riferimento del corpo umano*



*Figura 1.3 Movimento di flesso-estensione del ginocchio*

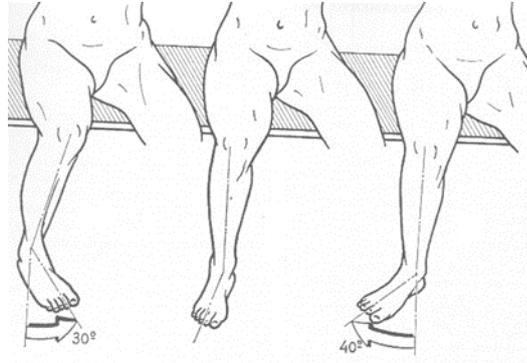


Figura 1.4 Rotazione interna ed esterna del ginocchio

## 1.2 Meccanismi per il Ginocchio

Nel corso degli anni sono stati sviluppati innumerevoli dispositivi che fossero in grado di replicare il movimento del ginocchio. A seconda del campo di applicazione è nata l'esigenza di realizzare dei meccanismi per il ginocchio di diverse tipologie: nella robotica indossabile si possono trovare esoscheletri per l'arto inferiore che utilizzano dei giunti ginocchio funzionali per il loro scopo, che fosse riabilitativo, militare o, più recentemente, industriale; anche nel mondo degli umanoidi, con l'obiettivo di realizzare dei robot antropomorfi, negli anni sono state trovate diverse soluzioni di giunto ginocchio a seconda della specifica applicazione. Quello che è possibile riscontrare come fattore comune a questi due mondi è però che nella quasi totalità dei casi l'articolazione del ginocchio, seppure efficiente dal punto di vista della sensoristica e del controllo, risulta molto semplificata dal punto di vista cinematico.

Uno dei primi lavori scientifici sulla cinematica del ginocchio è stato quello di F. Freudenstein [1], nel 1969. In esso si possono riscontrare delle tematiche e delle metodologie come la descrizione matematica della cinematica piana del ginocchio e l'utilizzo delle traiettorie polari che sono state pioneristiche nel settore relativo allo sviluppo di meccanismi per il ginocchio. Senza dubbio, il meccanismo più utilizzato per approssimare il movimento del ginocchio è il quadrilatero articolato. Muller offre una classificazione sistematica di tutti i quadrilateri articolati che si possono trovare nella struttura dei vertebrati [2]. Dathe et al. [3] offrono una descrizione accurata del movimento del ginocchio umano come un quadrilatero articolato sul piano sagittale.

Altri lavori, come quello di Sancibrian et al. [4], suggeriscono una metodologia per la sintesi di tali meccanismi utilizzando le traiettorie polari. Anche Sancisi et al. [5] e Bapat et al. [6] forniscono una metodologia di ottimizzazione di un meccanismo quadrilatero articolato per il ginocchio a partire dall'acquisizione di dati sperimentali. Il centro di istantanea rotazione del ginocchio e le sue traiettorie polari sono state argomento di interesse per la sintesi di meccanismi articolati per il ginocchio [7]. In particolare, Tsai et al. [8] suggeriscono una metodologia di acquisizione delle traiettorie polari del ginocchio che si basa sull'acquisizione di immagini.

Un settore in cui lo studio della cinematica del ginocchio e l'utilizzo di sistemi articolati hanno avuto un grandissimo sviluppo, è sicuramente quello relativo alla costruzione dispositivi protesici. Già nel 1994 Radcliffe [9] fornisce una soluzione di quadrilatero articolato come protesi per il ginocchio. Anche Etoundi et al. [10], con lo scopo di realizzare un meccanismo antropomorfo per il ginocchio umano, utilizzano una protesi basata sull'utilizzo di un anti-parallelogramma articolato.

Nel campo delle protesi si può riscontrare anche la presenza di meccanismi con un numero di membri superiore a quattro. Sun et al. [11], ad esempio, propongono un meccanismo di protesi del ginocchio a pentalatero articolato, integrato con degli ingranaggi. Chakraborty et al. [12], invece, propongono una soluzione ad esalatero articolato come protesi, così come pure suggerito da Jin et al. [13].

Hamon et al. [14] nel 2015 hanno progettato un quadrilatero articolato per il ginocchio di un walking robot. Quest'ultima applicazione risulta essere molto interessante, in quanto rappresenta un tentativo di trasferire l'utilizzo di una tecnologia ben consolidata nel mondo delle protesi verso il mondo della robotica, che si tratti di walking robots, di robot umanoidi o di esoscheletri per arto inferiore.

### **1.2.1 Esoscheletri per Arto Inferiore**

Gli esoscheletri sono dei dispositivi concepiti per aumentare le capacità fisiche degli esseri umani, principalmente in termini di forza e di resistenza. I primi studi sugli esoscheletri sono nati in campo militare, con l'obiettivo di alleggerire i carichi causati dalle diverse attrezzature che i soldati odierni sono costretti a veicolare, che talvolta arrivano a pesare quasi quanto un essere umano stesso. Nel corso degli anni il loro campo di applicazione si è esteso a diversi settori, soprattutto quello della riabilitazione motoria, oppure, più recentemente, quello industriale.

Tipicamente gli esoscheletri vengono classificati in base al loro sistema di attuazione ed in relazione alla tipologia di supporto che loro realizzano. Nel primo caso si possono trovare esoscheletri attivi o passivi. Gli esoscheletri attivi sono caratterizzati dalla presenza di un sistema di attuatori, che hanno lo scopo di potenziare la forza del soggetto che lo indossa. Per questo motivo, essi devono essere provvisti di una fonte di energia (elettrica, pneumatica od idraulica) che ne consenta il corretto utilizzo. Per quanto riguarda gli esoscheletri passivi, essi, non essendo attuati, non prevedono l'utilizzo di attuatori e di conseguenza non hanno bisogno di una fonte di energia. Il loro campo di applicazione principale è quello relativo alla riabilitazione, essendo progettati in maniera tale da replicare un movimento ben preciso.

Nel secondo caso, si possono distinguere tre categorie di esoscheletri: esoscheletri total body, esoscheletri per arto superiore ed esoscheletri per arto inferiore. Per i fini di questo lavoro di tesi verranno analizzati solamente alcuni esempi principali di esoscheletri per arto inferiore.

Nel campo della riabilitazione motoria dell'arto inferiori sono stati sviluppati numerosi dispositivi esoscheletri, soprattutto a partire dagli ultimi venti anni. In questo settore molto spesso gli esoscheletri sono grounded (dall'inglese "a terra"), in quanto hanno prevalentemente lo scopo di rieducare la specifica articolazione del paziente in esame. Tra quelli più famosi si possono riscontrare sicuramente il Lokomat [15], LOPES [16] ed ALEX [17], che sono riportati rispettivamente in Fig. 1.5, 1.6 ed 1.7.

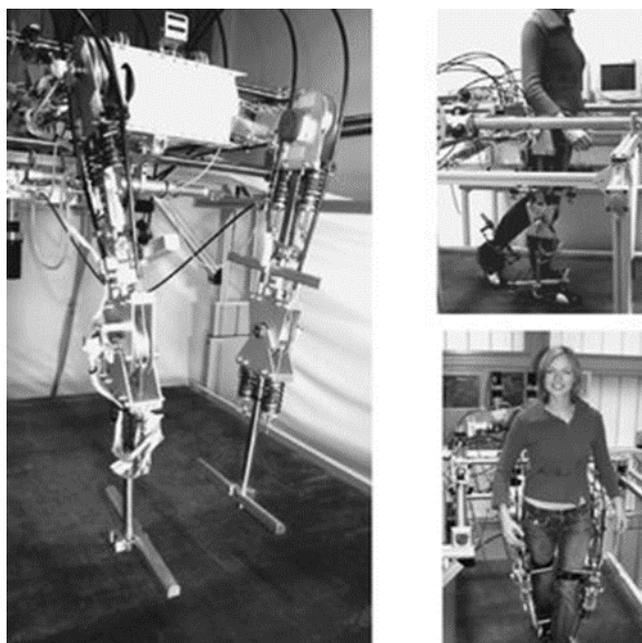
Gli esoscheletri sopracitati, pur essendo tra i più performanti finora realizzati in ambito riabilitativo, presentano delle semplificazioni da un punto di vista meccanico, essendo il giunto ginocchio schematizzato come una pura coppia rotoidale.

Anche per quanto riguarda gli esoscheletri indossabili sono stati individuati alcuni tra quelli più significativi finora realizzati, ovvero il ReWalk [18], l'esoscheletri Ekso [19] ed Indego [20], rappresentati rispettivamente in Fig. 1.8, 1.9 ed 1.10.

Dalle immagini precedenti risulta evidente che, come per gli esoscheletri utilizzati in campo riabilitativo, anche quelli indossabili presentano diverse semplificazioni dal punto di vista cinematico.



*Figura 1.5 Esoscheletro per la riabilitazione Lokomat*



*Figura 1.6 Esoscheletro LOPES*

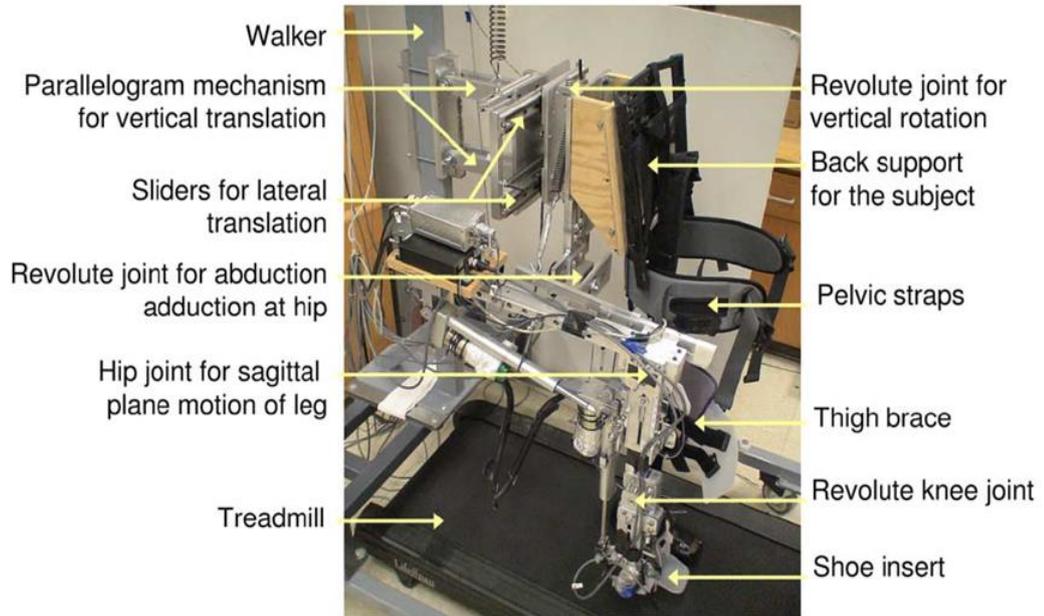


Figura 1.7 Esoscheletro ALEX



Figura 1.8 Esoscheletro indossabile per la riabilitazione ReWalk



*Figura 1.9 Esoscheletro Ekso*



*Figura 1.10 Esoscheletro Indego*

## 1.2.2 Robot Umanoidi

Così come per gli esoscheletri descritti nel Par. 1.2.1, anche nel campo dei robot umanoidi è presente la necessità di dover costruire dei dispositivi che siano in grado di replicare i movimenti del corpo umano. Nel campo della ricerca relativa alla progettazione ci sono state diverse pietre miliari negli anni. Per quanto riguarda i meccanismi di gambe e piedi il Prof. Ichiro Kato ed il suo gruppo di ricerca sono stati dei pionieri, avendo sviluppato il primo umanoide bipede fin dalla fine degli anni '60 (Artificial Lower Limb WL-1, WL-3, WL-5). Nel 1973 essi svilupparono quello che è universalmente riconosciuto come il primo prototipo di robot umanoide moderno: WABOT-1. Facendo una comparazione tra i robot umanoidi più sviluppati al giorno d'oggi (HRP, ASIMO, WABIAN, ATLAS), essi presentano delle similitudini nella progettazione dell'hardware e nella selezione dei vari componenti, suggerendo che l'architettura ideale è ormai definita. Ci sono però ancora numerosi problemi relativi alla ricerca su robot bipedi veloci e maggiormente antropomorfi: la struttura cinematica, la distribuzione della massa, gli attuatori, meccanismi di comando e layout sensoristico. Vengono qui riportati solamente alcuni esempi di diversi robot umanoidi, tra i più performanti finora realizzati. In particolare, in Fig. 1.11 è riportato il l'umanoide HRP [21], in Fig. 1.12 il robot ASIMO [22], in Fig. 1.13 il WABIAN-2 della Waseda [23] ed in Fig. 1.14 l'umanoide ATLAS della Boston Dynamics [24].



*Figura 1.11 Prototipo del robot umanoide HRP*



*Figura 1.12 Prototipo del robot umanoide ASIMO, sviluppato dalla Honda*



*Figura 1.13 Il robot umanoide Wabian-2 della Waseda University*



*Figura 1.14 Il robot umanoide ATLAS della Boston Dynamics*

Come anticipato precedentemente, e come si può osservare dalle immagini sopra riportate, i robot umanoidi hanno sperimentato una grande evoluzione dal punto di vista dell'elettronica, della sensoristica e del controllo, ma la struttura meccanica, soprattutto da un punto di vista cinematico, risulta essere notevolmente semplificata.

# CAPITOLO 2. SINTESI CINEMATICA

## 2.1 Analisi del Movimento del Ginocchio Umano

L'obiettivo di realizzare un meccanismo che sia in grado di replicare nella maniera più accurata possibile il movimento del ginocchio umano prevede in prima battuta un'attenta analisi del movimento reale dell'articolazione stessa. La metodologia di acquisizione dati presa qui in considerazione tiene conto di due fattori principali. Il primo è che il movimento del ginocchio è considerato approssimabile ad un moto piano. Questa approssimazione è più che ragionevole dato che per la maggior parte delle attività quotidianamente svolte dall'essere umano il ginocchio si muove in un piano di riferimento, il piano sagittale.

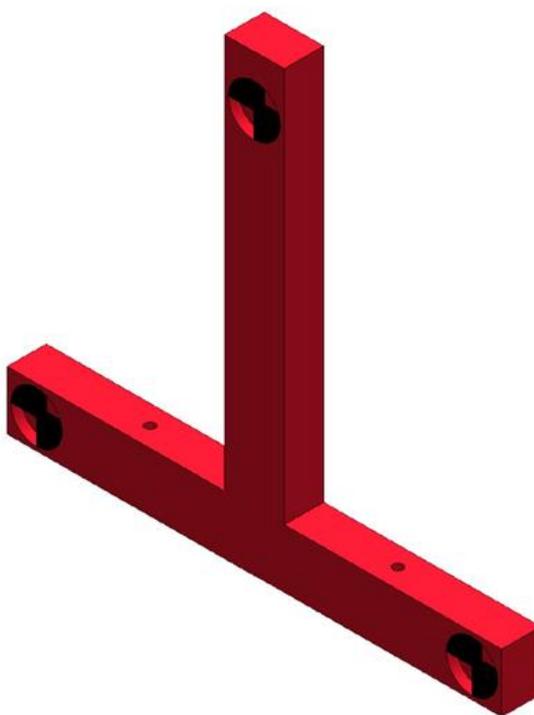
Il secondo fattore chiave è che la sintesi del meccanismo viene eseguita a partire non dal moto continuo del ginocchio, bensì considerando un certo numero di posizioni finite acquisite dallo stesso durante la sua fase di flessione-estensione. Il vantaggio di far riferimento a posizioni rigide acquisite dal ginocchio piuttosto che direttamente al suo moto continuo consiste nel poter utilizzare tecniche di sintesi cinematica molto accurate, che assicurano il passaggio matematico del meccanismo che si vuole realizzare per le posizioni desiderate.

Partendo di queste premesse è nata l'idea di basare l'intera fase di sintesi cinematica sull'analisi di immagini che rappresentino in maniera univoca diverse posizioni rigide assunte dal ginocchio durante la fase di flessione-estensione. Al fine di ottenere delle immagini che consentissero di fornire delle vere e proprie specifiche di progetto si è presentata la necessità di generare dei riferimenti di natura geometrica nelle immagini stesse. In letteratura è stato riscontrato che questo approccio è stato già usato diverse volte per acquisire dati relativi al movimento del ginocchio [8, 25].

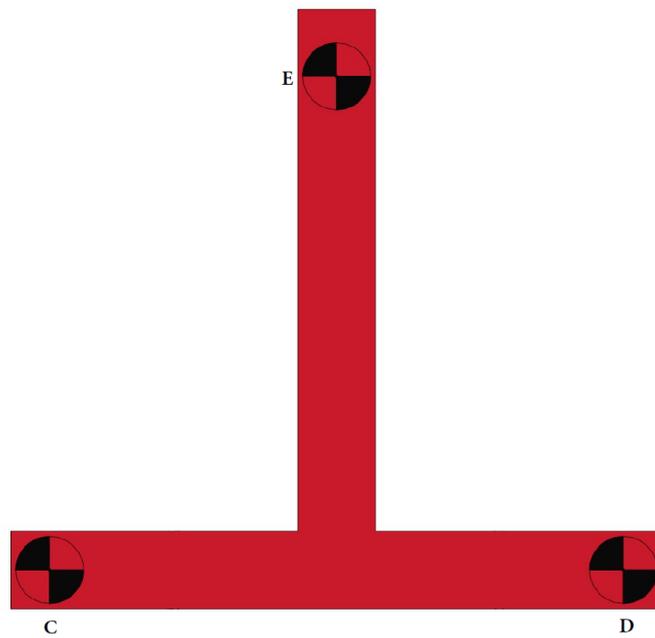
Allo scopo è stato appositamente realizzato un oggetto stampato 3D (Fig. 2.1-2.2). Come si può evincere dalla Fig. 2.2, su quest'oggetto (che d'ora in poi verrà denominato per brevità "T") è possibile riscontrare tre punti notevoli: C, D ed E, che rappresentano i tre vertici di un triangolo equilatero. I primi due consentono di individuare un segmento rigido solidale al piano mobile, il terzo è stato inserito al fine di operare una verifica della bontà della metodologia di acquisizione dati utilizzata. Al

fine di rendere la T solidale con la tibia durante il movimento, essa è stata montata su un parastinchi (Fig. 2.3) che a sua volta è stato collegato alla tibia per mezzo di fasce di velcro. In questa fase è stato necessario prestare attenzione al fatto che il parastinchi dovesse essere situato sulla parte rettilinea della tibia, nonché al fatto che il piano individuato dalla faccia frontale della T fosse parallelo al piano sagittale. La parte della gamba considerata fissa durante il moto è il femore che, sempre per il tramite di fasce di velcro è stato rigidamente fissato ad una sedia appositamente predisposta per la prova.

Per l'acquisizione delle suddette immagini si è partiti dalla ripresa di un video relativo al movimento del ginocchio, ottenuto per il tramite di una videocamera ad alta risoluzione e ad alto numero di frame. Nella fase di ripresa video si è prestata particolare attenzione al fatto che il punto di vista della videocamera fosse il più ortogonale possibile al piano del moto. Dal video sono stati estrapolati diversi fermi immagine (Fig. 2.4), alcuni dei quali sono stati elaborati e predisposti alla successiva fase di sintesi cinematica.



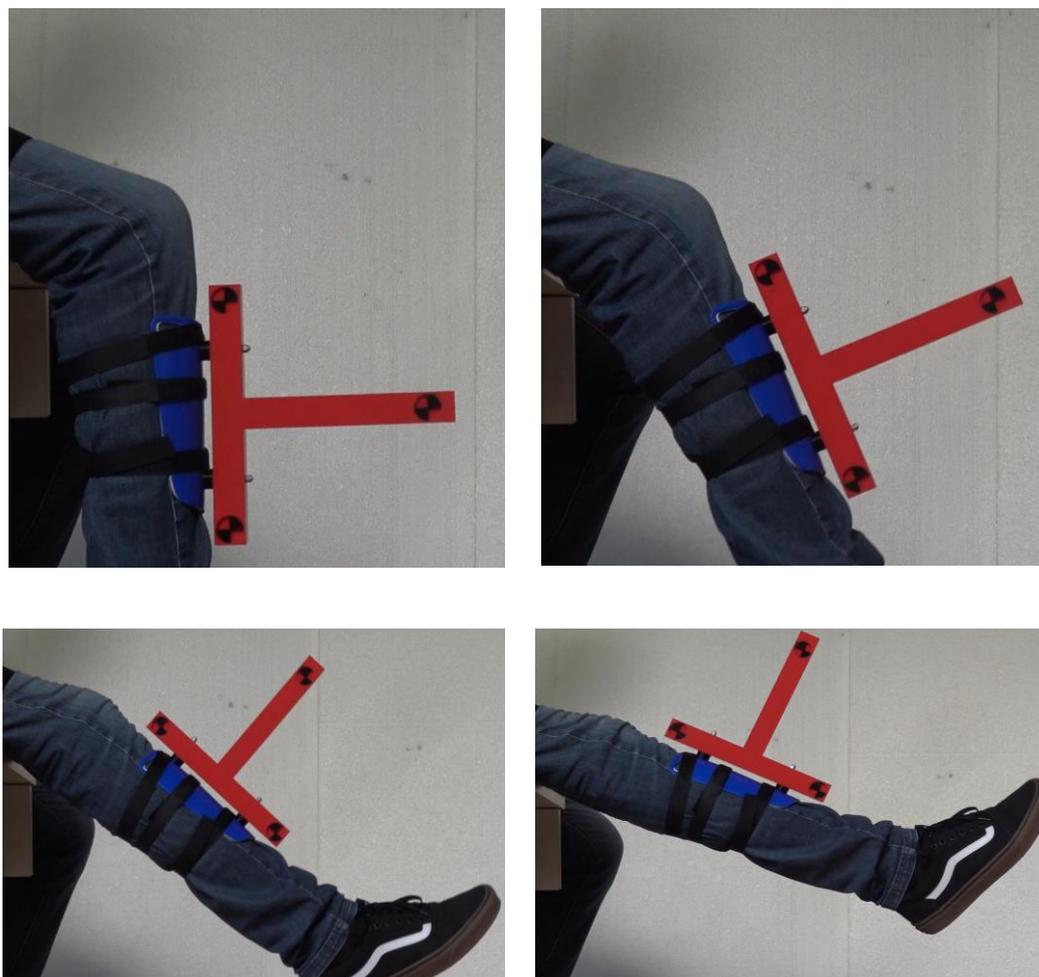
*Figura 2.1 Modello CAD della T utilizzata per l'acquisizione immagini*



*Figura 2.2 Vista frontale della T e definizione dei punti notevoli*



*Figura 2.3 Modello della T stampato e montato sul parastinchi*



*Figura 2.4* Diverse posizioni assunte dalla T durante la flessione-estensione del ginocchio

Come anticipato, la T è stata concepita con una duplice funzione: generare delle specifiche di progetto e validare l'accuratezza del metodo di acquisizione dei dati. Le verifiche fatte sono state due: una di carattere prettamente geometrico, l'altra di natura cinematica. La prima è che essendo i tre punti C, D ed E i vertici di un triangolo equilatero, le lunghezze dei segmenti CD, DE e CE devono essere uguali. Come si può vedere dalla Fig. 2.5 l'errore è dell'ordine del millimetro, che è stato considerato accettabile. La seconda è relativa al fatto che nel passare da una posizione rigida ad un'altra un generico corpo rigido nel piano compie una rotazione attorno ad un punto denominato centro della rotazione finita. Essendo questo punto uno ed uno solo, le mediane dei vettori spostamento di ciascun punto del corpo rigido in esame devono concorrere tutte nel centro della rotazione finita. Come si può notare dalla Fig. 2.6 l'errore è inferiore al grado ed è ritenuto accettabile.

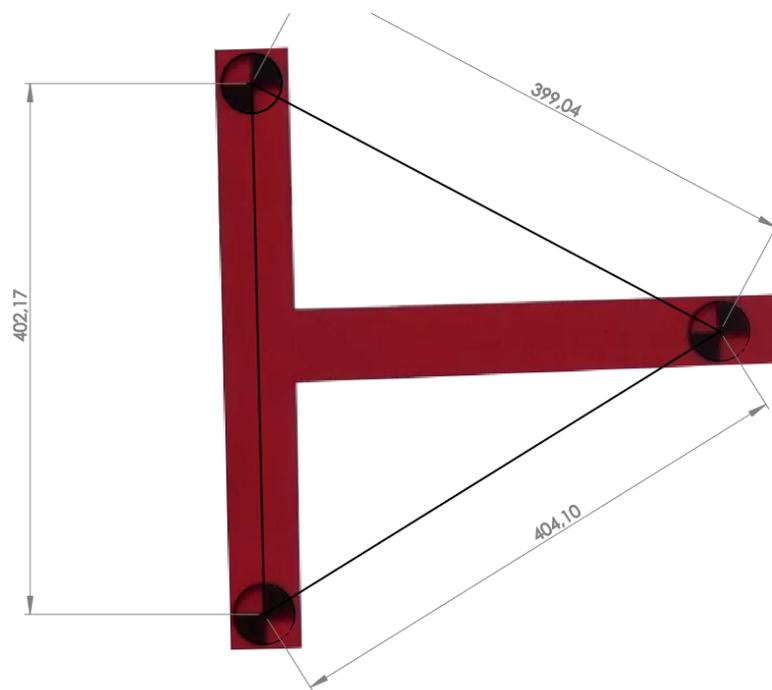


Figura 2.5 Validazione lunghezze segmenti

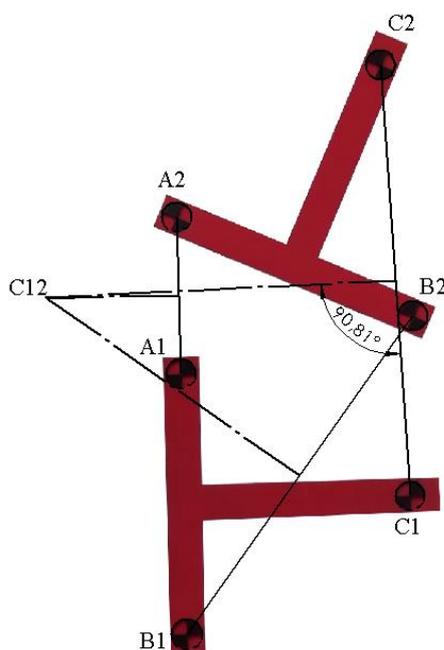
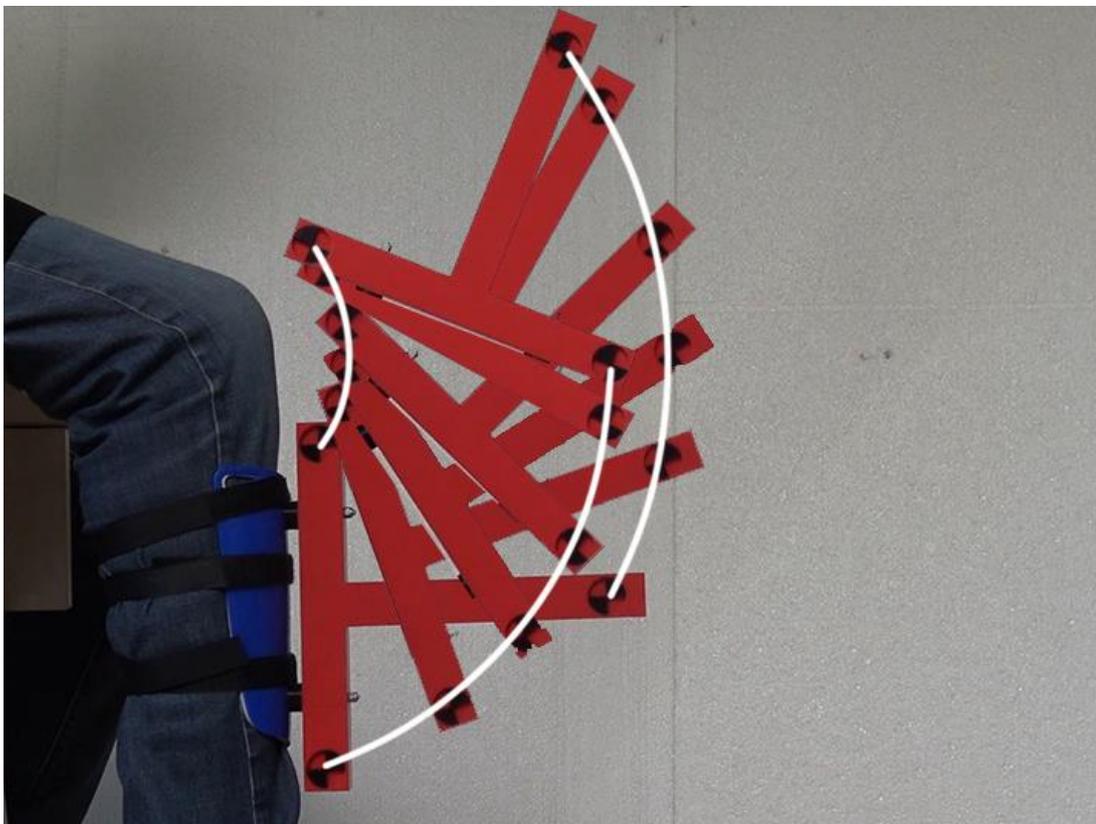


Figura 2.6 Validazione cinematica della metodologia di acquisizione dati utilizzata

Un ulteriore passaggio che è stato fatto in questa fase di analisi immagini è quello relativo alla generazione delle traiettorie descritte dai tre punti di riferimento durante

il movimento. Esse sono state ottenute grazie all'utilizzo del tool motion tracking del software Corel Video Studio e sono rappresentate in bianco nella Fig. 2.7.



*Figura 2.7 Traiettorie dei punti notevoli*

Questa informazione ha consentito di appurare che le traiettorie descritte dai tre punti non sono circolari, bensì delle generiche curve del piano, motivazione che è alla base dell'intera metodologia di sintesi che si vuole introdurre in questo lavoro di tesi di dottorato.

## **2.2 Sintesi di Tipo e Sintesi di Numero: Quadrilatero Articolato**

L'analisi del movimento del ginocchio umano ha consentito di produrre delle specifiche di progetto ben definite per la successiva fase di sintesi cinematica del meccanismo. Come già anticipato, essa verrà eseguita facendo riferimento alle posizioni rigide assunte dalla tibia nel suo moto relativo rispetto al femore. Sono

state scelte tre posizioni rigide di progetto: la posizione iniziale, relativa alla gamba piegata; la posizione finale, relativa alla gamba stesa; una posizione intermedia tra le due (Fig. 2.8).

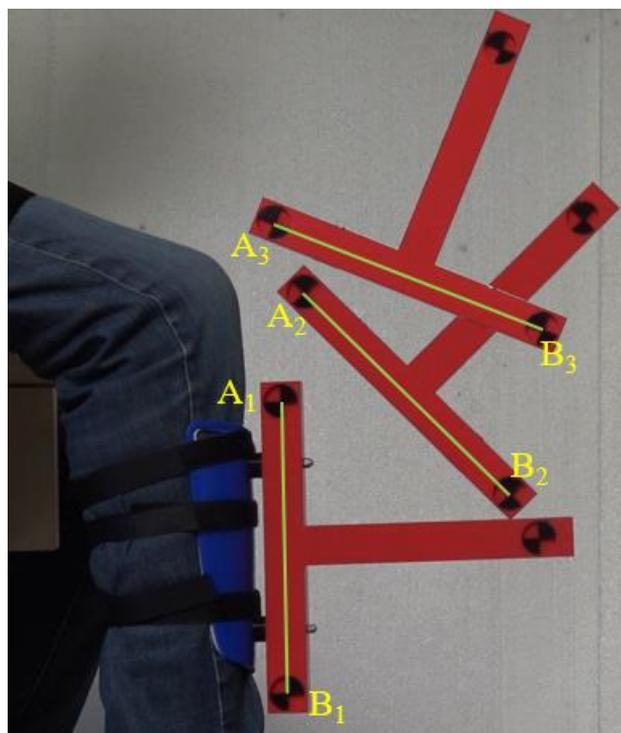


Figura 2.8 Le 3 posizioni rigide scelte per la sintesi cinematica

Una volta definite le posizioni di progetto è stato necessario definire la tipologia di meccanismo da realizzare (sintesi di tipo) ed il numero e la disposizione dei suoi membri (sintesi di numero), nonché le metodologie di sintesi da utilizzare. Dopo un'attenta e rigorosa analisi dello stato dell'arte, esposta nel Cap. 1, si è deciso di scegliere un sistema articolato come meccanismo antropomorfo per il ginocchio. In particolare, la scelta è ricaduta su un quadrilatero articolato, soluzione questa molto utilizzata e consolidata negli anni, soprattutto nel campo delle protesi e della robotica. La sintesi è stata affrontata dapprima con un approccio di tipo grafico, in seguito con un approccio di tipo analitico. In Fig. 2.9 è riportata la catena cinematica 4R del quadrilatero articolato.

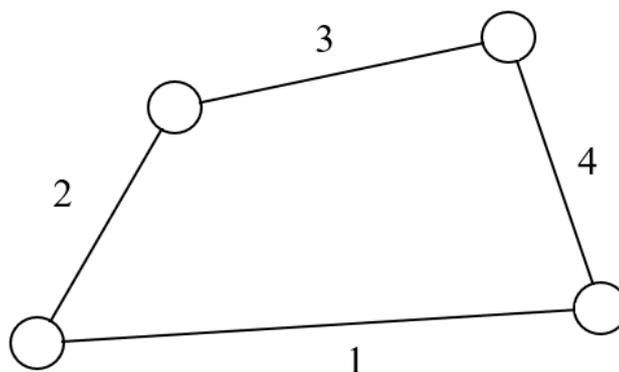


Figura 2.9 Catena cinematica 4R

Il primo caso analizzato è quello più semplice ed intuitivo, che prevede come specifiche di progetto le posizioni assunte dalle cerniere mobili della biella del quadrilatero e come incognite le posizioni delle cerniere fisse del quadrilatero stesso. La sintesi grafica è stata effettuata per il tramite del software SolidWorks. Essa può essere riassunta come segue: fissate le cerniere mobili nelle posizioni 1, 2 e 3, sono stati tracciati i vettori spostamento del punto A e del punto B. Le due mediane relative al vettore spostamento del punto A individuano il centro della rotazione finita del punto A, quelle relative al vettore spostamento del punto B individuano il centro della rotazione finita del punto B. Andando a posizionare le due cerniere fisse A0 e B0 nei suddetti centri, è automaticamente definito il quadrilatero articolato (Fig. 2.10). Tale costruzione grafica è spiegata nel dettaglio in [26].

Il quadrilatero ottenuto, il cui modello cinematico è riportato in Fig.2.11, consente il passaggio per le tre posizioni di progetto in maniera esatta e replica in maniera abbastanza fedele il movimento complessivo del ginocchio. Un quadrilatero siffatto, pur rispettando il passaggio per le posizioni di progetto, non rispetta i criteri di antropomorfismo prefissati come obiettivo del lavoro di tesi. Il motivo principale per cui il meccanismo ottenuto risulta essere non antropomorfo risiede in un'errata scelta delle cerniere mobili, che sono di per sé non antropomorfe. Infatti un meccanismo che risponda alle specifiche di progetto, oltre a consentire il passaggio esatto per le tre posizioni rigide, deve anche avere le cerniere localizzate il più possibile nell'intorno dell'articolazione del ginocchio.

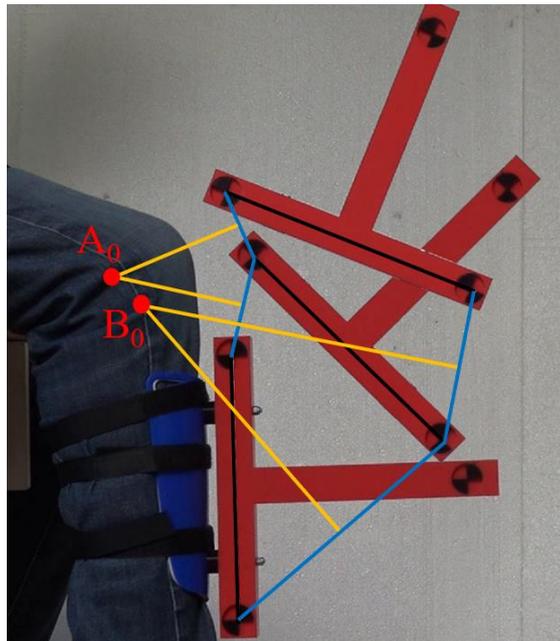


Figura 2.10 Costruzione grafica del quadrilatero generatore di moto rigido

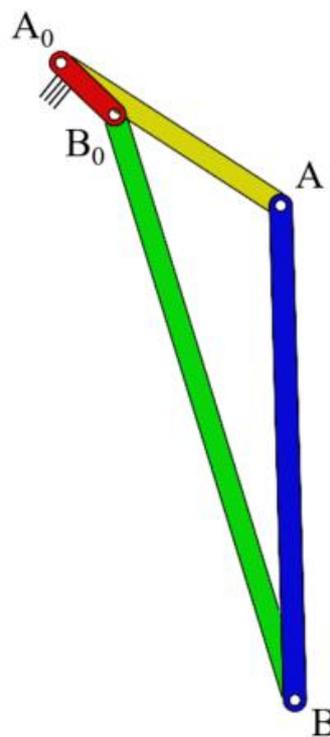


Figura 2.11 Modello del quadrialtero articolato ottenuto

## 2.3 Analisi dei Profili Coniugati e Quadrilatero Antropomorfo

Al fine di poter scegliere delle posizioni dei punti circonferenza che siano in linea con le specifiche di progetto è stato necessario studiare in maniera più dettagliata il movimento del ginocchio umano. Come già esposto nel Cap.1, il movimento di flessione-estensione macroscopico del ginocchio è generato dal moto relativo delle superfici a contatto di femore e di tibia. Schematizzando il moto come un moto piano è possibile distinguere due profili coniugati a contatto (Fig. 2.12).

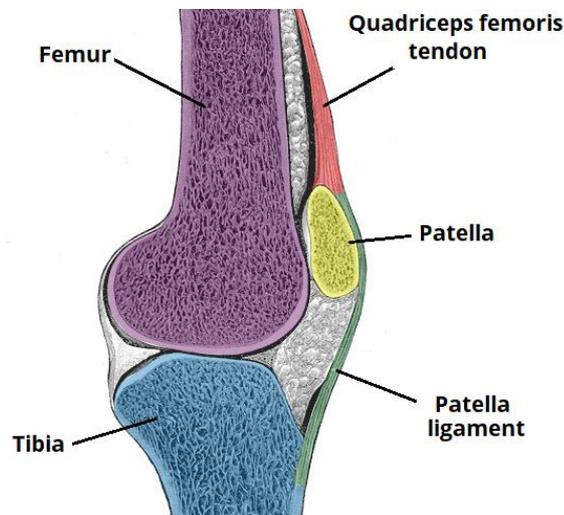


Figura 2.12 Profili coniugati di femore e tibia

Per poter risalire alle posizioni delle cerniere mobili a partire dalla configurazione dei profili a contatto è stata utilizzata la formula di Eulero-Savary per i profili coniugati [27]

$$\left( \frac{1}{P_0\Omega_\sigma} - \frac{1}{P_0\Omega_s} \right) \cos\alpha = \frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \quad (2.1)$$

che fa riferimento alla costruzione grafica riportata Fig. 2.13.

La (2.1) consente di calcolare i centri di curvatura di profili a contatto, i quali rappresentano proprio le coordinate delle cerniere mobili nella configurazione considerata.

I profili sono stati studiati partendo da un'immagine relativa ad una radiografia laterale del ginocchio umano, tratta da un atlante delle radiografie del corpo umano [28].

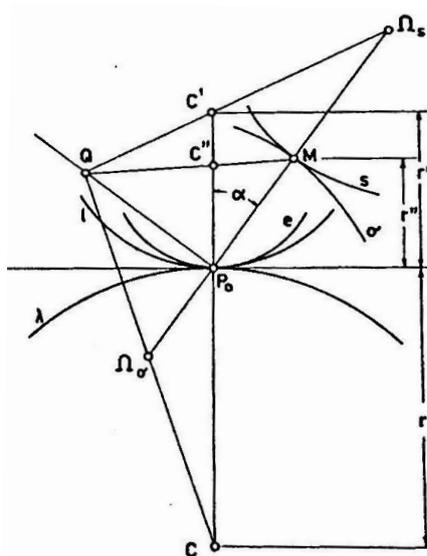
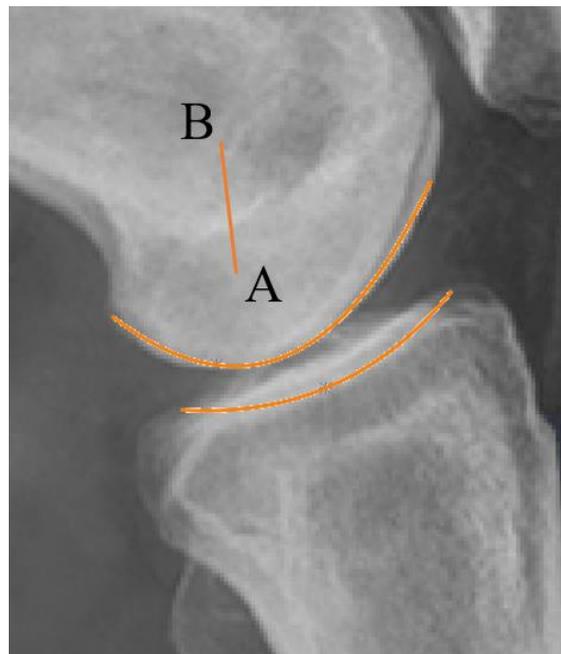


Figura 2.13 Costruzione grafica relativa alla formula di Euler-Savary per i profili coniugati

Allo scopo, l'immagine riportata in fig. 2.14 è stata elaborata per il tramite del software SolidWorks. In particolare, i profili sono stati approssimati con delle spline, delle quali è stato utilizzato il raggio di curvatura minimo per poter trovare il centro delle due cerniere mobili. Tale metodologia, seppur approssimata, ha consentito di trovare la posizione della biella del quadrilatero articolato nella prima configurazione. Le successive posizioni 2 e 3 della suddetta biella sono state individuate a partire dalle posizioni assunte dalla T, essendo entrambe solidali allo stesso piano mobile (Fig. 2.15). Le 3 posizioni di progetto della biella sono riportate in Fig. 2.16, in cui si può apprezzare che queste posizioni sono di per sé antropomorfe, in quanto situate nell'intorno del giunto ginocchio e relative ad una biella di lunghezza contenuta.

Da questo punto in poi si è proceduto con la sintesi di un secondo quadrilatero, utilizzando in prima battuta la medesima costruzione grafica già descritta per il precedente. Le intersezioni tra le mediane ai vettori spostamento dei punti A e B hanno consentito di trovare le posizioni delle cerniere fisse  $A_0$  e  $B_0$ . Il quadrilatero ottenuto è riportato in Fig. 2.17.



*Figura 2.14 Radiografia laterale del ginocchio umano con approssimazione dei profili tramite spline*



*Figura 2.15 Costruzione delle 3 posizioni della biella del quadrilatero a partire dalle 3 posizioni della T*



Figura 2.16 Le tre posizioni di progetto della biella del quadrilatero articolato antropomorfo

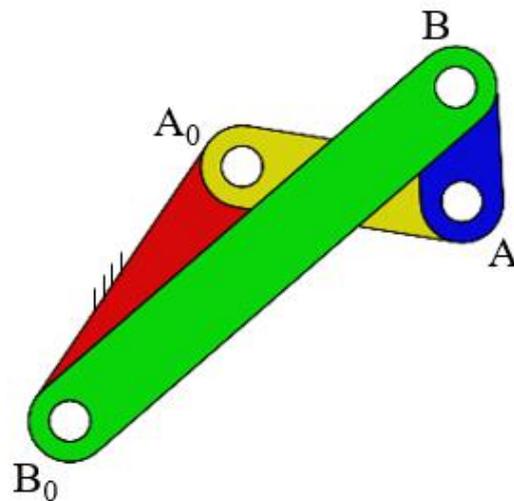


Figura 2.17 Quadrilatero articolato antropomorfo

Esso risulta essere compatibile con le specifiche di progetto definite, sia in termini di passaggio per le posizioni finite, che in termini di ingombri e di posizionamento.

Al fine di poter validare i risultati ottenuti, lo stesso quadrilatero è stato calcolato per via analitica.

## 2.4 Quadrilatero Antropomorfo: Metodo di Suh e Radcliffe

Per progettare un quadrilatero articolato generatore di moto rigido per 3 posizioni assegnate, si può utilizzare il metodo di Suh & Radcliffe [29] che è basato sull'utilizzo di matrici di spostamento che consentono di ricavare i punti circonferenza A e B, assegnando: le coordinate delle cerniere fisse A<sub>0</sub> e B<sub>0</sub>; le coordinate dei punti da raggiungere M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> e M<sub>3</sub>, e le rotazioni delle posizioni 2 e 3 rispetto alla posizione di riferimento 1, θ<sub>12</sub> e θ<sub>13</sub> rispettivamente.

In generale, l'equazione da considerare per ricavare le coordinate dei punti A e B è:

$$X_n A_j + Y_n B_j = C_j \quad (2.2)$$

Avendo indicato con:

$$A_j = R_j \cos\theta_{1j} + S_j \sin\theta_{1j} - x_0 \cos\theta_{1j} - y_0 \sin\theta_{1j} + x_0 \quad (2.3)$$

$$B_j = -R_j \sin\theta_{1j} + S_j \cos\theta_{1j} + x_0 \sin\theta_{1j} - y_0 \cos\theta_{1j} + y_0 \quad (2.4)$$

$$C_j = x_0 R_j + y_0 S_j - \frac{1}{2}(R_j^2 + S_j^2) \quad (2.5)$$

Dove

$$R_j = x_j - x_1 \cos\theta_{1j} + y_1 \sin\theta_{1j} \quad (2.6)$$

$$S_j = y_j - x_1 \sin\theta_{1j} + y_1 \cos\theta_{1j} \quad (2.7)$$

A<sub>j</sub>, B<sub>j</sub>, C<sub>j</sub>, R<sub>j</sub>, S<sub>j</sub> sono dei coefficienti, x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub> indicano le coordinate delle cerniere fisse, X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub> indicano le coordinate dei punti circonferenza.

L'algoritmo per ricavare le cerniere mobili del quadrilatero in esame è stato sviluppato in ambiente Matlab. I risultati sono esposti in Fig. 2.20.

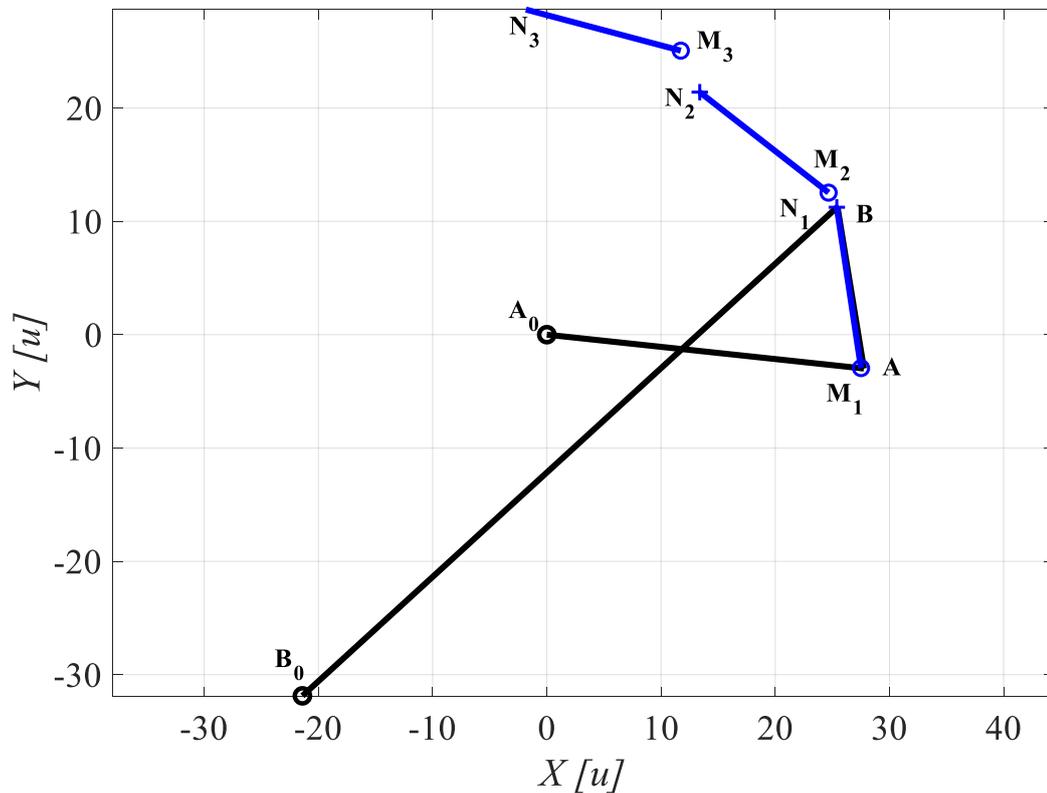


Figura 2.18 Quadrilatero articolato antropomorfo calcolato con il metodo di Suh e Radcliffe

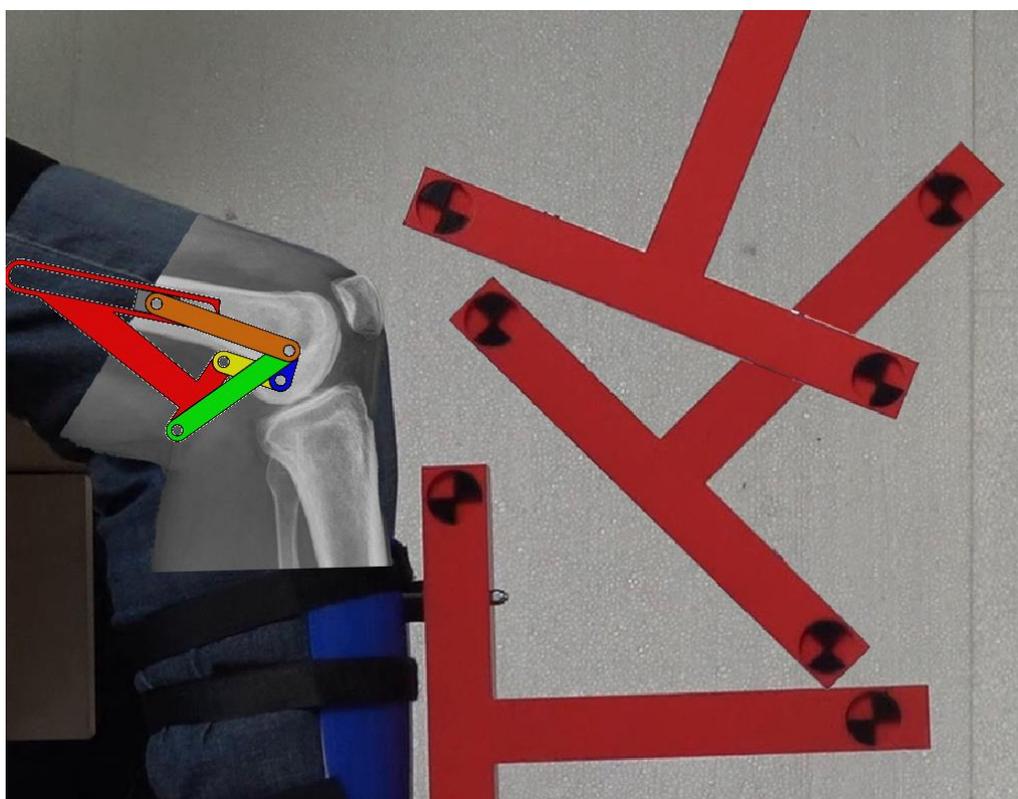
Come si può apprezzare dalla Fig. 2.18 il quadrilatero così progettato è identico a quello ottenuto per via grafica, informazione questa che consente di validare la metodologia utilizzata.

## 2.5 Esalatero

Allo scopo di poter predisporre il meccanismo realizzato come componente di un esoscheletro per il ginocchio umano, è necessario prevedere un azionamento dello stesso. Essendo il quadrilatero articolato un sistema ad 1 grado di libertà è sufficiente prevedere un unico attuatore. Essi possono essere di due tipi, o rotativi (sulla manovella) oppure lineari, sul pistone. Dal punto di vista tecnico si è scelta come

soluzione del sistema di attuazione quella di un attuatore lineare il quale, in analogia con quanto avviene nel corpo umano con i muscoli [30], consente di ottenere il movimento del ginocchio traslando lungo una guida rettilinea parallela all'asse del femore.

Per prevedere un'attuazione di questo tipo è stato necessario installare una guida prismatica, il cui asse fosse collineare a quello del femore, sul quadrilatero articolato. Il meccanismo risultante da questa modifica risulta essere un meccanismo a 6 membri, riportato in Fig. 2.19.



*Figura 2.19 Esalatero articolato*

Il meccanismo ottenuto, pur consentendo di avere dei notevoli vantaggi dal punto di vista dell'attuazione, non risulta particolarmente efficace dal punto di vista antropomorfo, essendo più ingombrante e più complicato da un punto di vista pratico, ovvero avente un numero di membri elevato e degli ingombri non contenuti.

Al fine di mantenere inalterata questa scelta si è scelto di procedere alla sintesi di un meccanismo che avesse sì una guida prismatica, ma con un numero inferiore di membri: un manovellismo di spinta.

## 2.6 Manovellismo di Spinta Antropomorfo

Il manovellismo di spinta è un sistema articolato piano che appartiene alla famiglia della catena cinematica 3RP (Fig. 2.20).

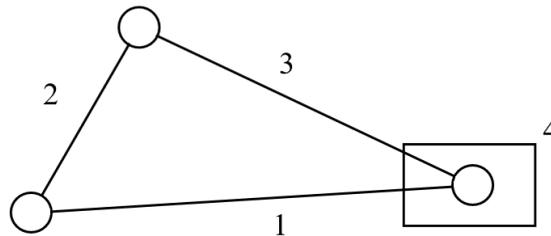


Figura 2.20 Catena Cinematica 3RP

Per poter effettuare la sintesi cinematica di un meccanismo generatore di moto rigido per 3 posizioni finite è stata utilizzata una metodologia di tipo grafico [26], riportata in Fig. 2.21.

A partire dalle medesime posizioni di progetto del quadrilatero articolato antropomorfo, sono stati calcolati i 3 centri della rotazione finita relativi rispettivamente agli spostamenti rigidi 1-2, 2-3 ed 1-3. I tre punti ottenuti individuano un triangolo, denominato triangolo dei poli, rappresentato in arancione in Fig. 2.23, che presenta diverse proprietà dal punto di vista cinematico.

La circonferenza circoscritta al triangolo dei poli, in rosso in Fig. 2.21, è chiamata circonferenza dei centri delle rotazioni finite o, più semplicemente, circonferenza dei poli.

A seguire è possibile tracciare tre circonferenze speculari alla circonferenza dei poli, definite come circonferenze simmetriche rispetto al lato  $P_{ij}P_{ik}$  della circonferenza dei poli stessa. Queste tre circonferenze, denominate  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ , sono rappresentate in blu in Fig. 2.23.

Si può notare che l'ortocentro del triangolo dei poli  $H_c$ , detto anche punto cardinale notevole, è anche il punto di intersezione delle tre circonferenze speculari.

Il passaggio successivo è scegliere una retta qualsiasi passante per l'ortocentro del triangolo dei poli, la quale intersecherà le circonferenze speculari in tre punti:  $H_1, H_2, H_3$ . Nel caso in questione il coefficiente angolare della retta è preso in modo da far sì che essa fosse parallela all'asse longitudinale del femore.

La costruzione brevemente descritta finora ha consentito di definire tutte le entità geometriche necessarie alla realizzazione del manovellismo di spinta antropomorfo desiderato. Infatti, se si sceglie come diade  $A_0A_1$  del manovellismo la stessa del quadrilatero antropomorfo del Par. 2.4, restano da definire solamente la posizione della cerniera mobile e l'asse della guida prismatica.

Scegliendo come asse la retta passante per l'ortocentro e come cerniera mobile il punto  $H_1$  si ottiene un manovellismo di spinta deviato che consente il passaggio per le tre posizioni finite di progetto. In particolare, al passaggio per i punti  $H_1, H_2, H_3$  della guida prismatica corrisponderà il passaggio del triangolo di biella  $A_1, B_1, H_1$  del manovellismo rispettivamente per le posizioni 1, 2 e 3. Il meccanismo risultante è riportato in Fig. 2.22 e Fig.2.23.

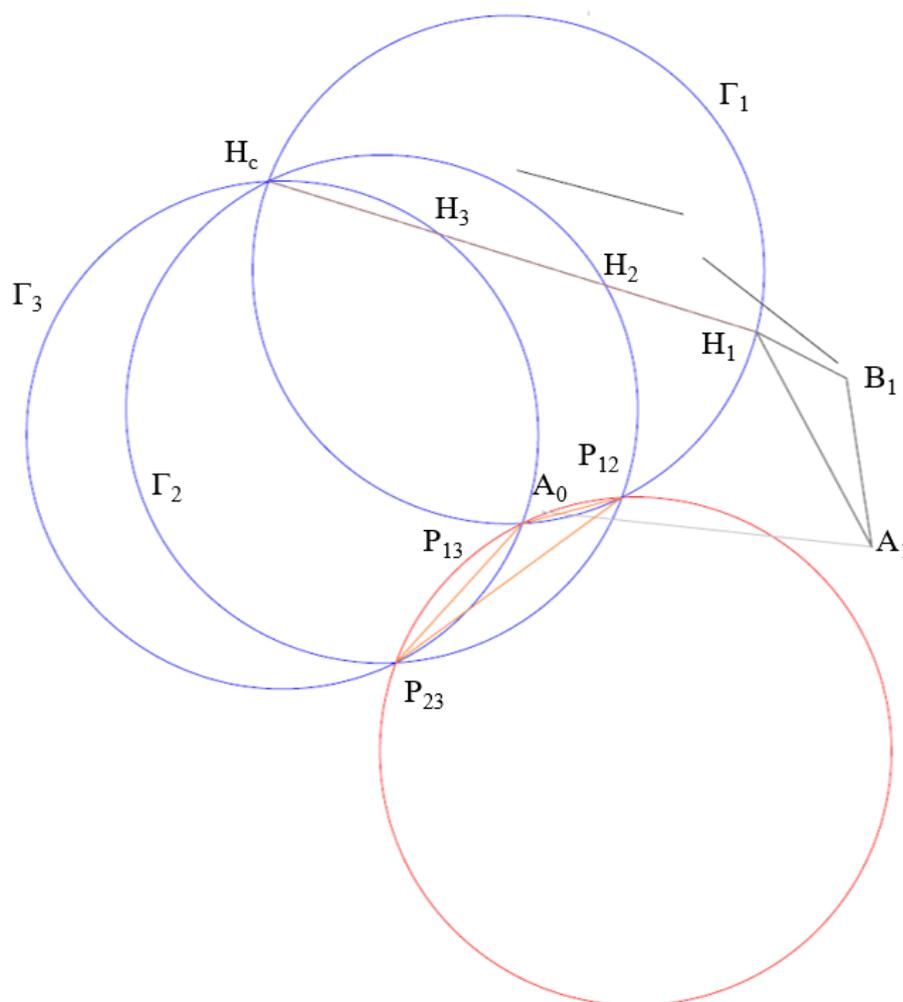


Figura 2.21 Costruzione grafica del manovellismo di spinta antropomorfo

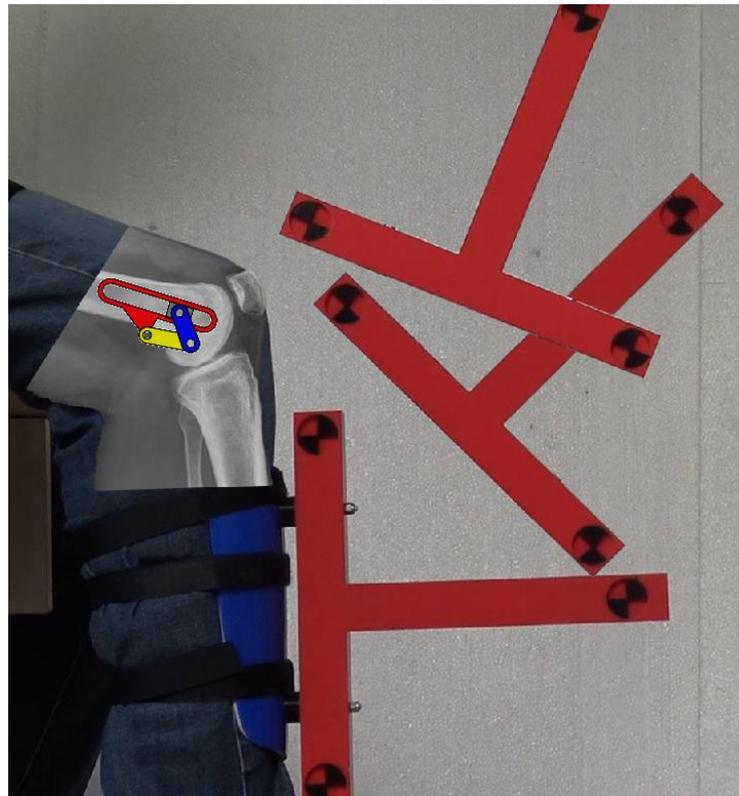


Figura 2.22 Manovellismo di spinta antropomorfo

Figura 2.24 –

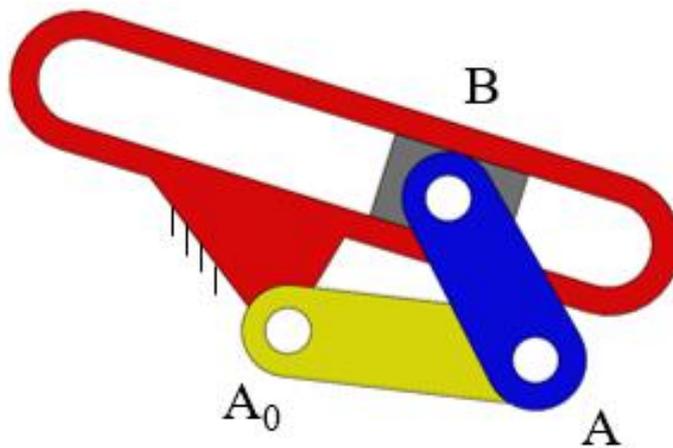


Figura 2.23 Schema cinematico del manovellismo di spinta antropomorfo

# **CAPITOLO 3. ANALISI CINEMATICA DEI MECCANISMI E TRAIETTORIE POLARI**

## **3.1 Introduzione**

L'analisi di immagini e le procedure di sintesi cinematica esposte nel capitolo precedente hanno permesso di realizzare due meccanismi generatori di moto rigido in grado di replicare in buona approssimazione il moto del ginocchio umano: un quadrilatero articolato ed un manovellismo di spinta deviato. Questi meccanismi sono stati in seguito sottoposti ad una fase di analisi cinematica, al fine di evidenziarne alcune caratteristiche. Infatti, il moto continuo del ginocchio è stato approssimato, in fase di progetto, con un moto discreto, basato su 3 posizioni rigide. Per poter verificare il comportamento dei meccanismi durante il loro moto continuo sono state calcolate le traiettorie polari di entrambi.

Le traiettorie polari sono delle proprietà del moto continuo dei corpi rigidi nel piano ed esse rappresentano le traiettorie tracciate dal centro di istantanea rotazione rispetto al riferimento fisso (polare fissa) e rispetto al piano mobile (polare mobile). Qualsiasi legge di moto può essere descritta semplicemente tramite il puro rotolamento della polare mobile sulla polare fissa.

Le traiettorie polari del ginocchio umano sono un argomento abbastanza diffuso nella letteratura scientifica [5, 8], soprattutto nel mondo relativo alla progettazione di dispositivi protesici.

### 3.2 Quadrilatero Articolato

Il primo meccanismo analizzato è il quadrilatero articolato antropomorfo, ottenuto coniugando le metodologie di sintesi di meccanismi generatori di moto rigido con lo studio delle caratteristiche dei profili coniugati a contatto (Fig. 3.1).

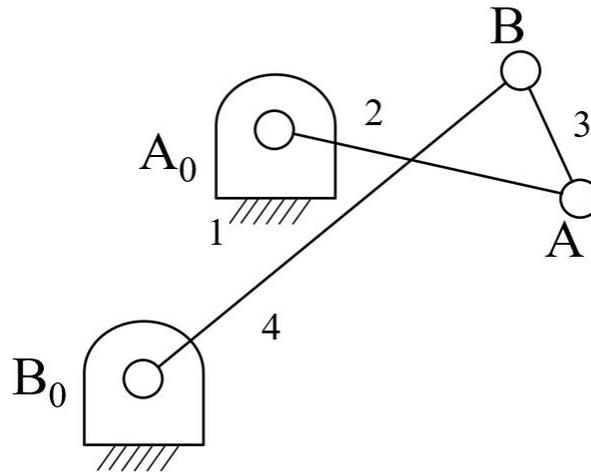


Figura 3.1 Quadrilatero articolato antropomorfo

Applicando la regola di Grashof si può facilmente riscontrare che il quadrilatero non appartiene alla categoria dei quadrilateri di Grashof. La regola di Grashof asserisce che in un quadrilatero articolato piano, per il quale la somma del più corto ( $s$ ) e del più lungo ( $l$ ) dei lati sia minore della somma degli altri ( $p, q$ ), si ha una doppia manovella se si rende telaio l'asta più corta, una manovella ( $s$ ) ed un bilanciere se assume il molo di telaio una delle aste contigue a quella più corta, un doppio bilanciere in tutti gli altri casi [31]:

$$s + l \leq p + q \quad (3.1)$$

Nel quadrilatero in questione il lato più corto è la biella  $AB$ , pari a  $14,35 \text{ mm}$ , mentre il più lungo è il cedente  $B_0B$ , pari a  $63,63 \text{ mm}$ . Gli altri due lati  $A_0A$  ed il telaio  $A_0B_0$  sono lunghi rispettivamente  $27,67 \text{ mm}$  e  $38,39 \text{ mm}$ . Sostituendo i valori nella (3.1) si ottiene:

$$77,98 \leq 66,06 \quad (3.2)$$

La (3.2) risulta non verificata e di conseguenza il quadrilatero è non di Grashof.

### 3.3 Equazioni di Chiusura

Al fine di poter calcolare le traiettorie polari del meccanismo in questione è stata utilizzata una routine, sviluppata in ambiente Matlab, basata sul metodo analitico di analisi cinematica delle equazioni di chiusura [32].

La condizione di chiusura semplicemente esprime la condizione che un meccanismo a catena cinematica chiusa si chiude su se stesso. Per il quadrilatero articolato mostrato in Fig. 3.2 l'equazione vettoriale di chiusura è:

$$r_2 + r_3 = r_1 + r_4 \quad (3.3)$$

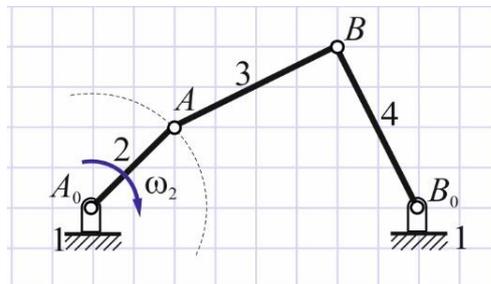


Figura 3.2 Schema del quadrilatero per le equazioni di chiusura

Riscrivendo la (3.3) rispetto alle sue componenti si ottengono due equazioni scalari:

$$r_2 \cos \theta_2 + r_3 \cos \theta_3 = r_1 \cos \theta_1 + r_4 \cos \theta_4 \quad (3.4a)$$

$$r_2 \sin \theta_2 + r_3 \sin \theta_3 = r_1 \sin \theta_1 + r_4 \sin \theta_4 \quad (3.4b)$$

Le eq. (3.4a) e (3.4b) sono le equazioni di chiusura del quadrilatero ed esse devono essere soddisfatte durante il movimento completo del meccanismo. Il vettore posizione  $r_1$  e l'angolo  $\theta_1$  sono costanti. Se  $\theta_2$  è assegnato e se la manovella  $A_0A$  è il membro movente, è necessario risolvere le Eq. (3.4a) e (3.4b) per trovare le incognite  $\theta_3$  e  $\theta_4$  in funzione di  $\theta_2$ .

Il primo step è identificare quale variabile vuole essere calcolata per prima. La procedura di soluzione consiste nell'isolare la funzione trigonometrica relativa all'angolo da determinare al primo membro dell'equazione. Volendo eliminare  $\theta_3$  è necessario prima isolarlo al primo membro delle equazioni (3.4a) e (3.4b) e poi sommare in quadratura le stesse. Rielaborando e semplificando il tutto si perviene ad un'equazione del tipo:

$$A \cos \theta_4 + B \sin \theta_4 + C = 0 \quad (3.5)$$

dove

$$A = 2r_1r_4 \cos \theta_1 - 2r_2r_4 \cos \theta_2$$

$$B = 2r_1r_4 \sin \theta_1 - 2r_2r_4 \sin \theta_2$$

$$C = r_1^2 + r_2^2 + r_4^2 - r_3^2 - 2r_1r_2(\cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2)$$

Per risolvere l'equazione (3.5) si può scrivere

$$(C - A)t^2 + 2Bt + (A + C) = 0 \quad (3.6)$$

dove  $t = \tan\left(\frac{\theta_4}{2}\right)$ , che risolta per  $t$  fornisce

$$t = \frac{-B + \sigma \sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{C - A}, \quad \theta_4 = 2 \tan^{-1} t \quad (3.7)$$

dove  $\sigma = \pm 1$  è una variabile di segno che definisce il modo di assemblaggio del meccanismo. A causa della radice quadrata nell'Eq. (3.7) la variabile  $t$  può essere complessa se il delta è minore di zero. Se questo accade, il meccanismo non può essere assemblato nella configurazione specificata. Le equazioni (3.4a) (3.4b) possono essere risolte per  $\theta_3$  come segue:

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{r_1 \sin \theta_1 + r_4 \sin \theta_4 - r_2 \sin \theta_2}{r_1 \cos \theta_1 + r_4 \cos \theta_4 - r_2 \cos \theta_2} \quad (3.8)$$

La posizione del punto A può essere espressa nel seguente modo:

$$x_A = x_{A0} + r_2 \cos \theta_2, \quad y_A = y_{A0} + r_2 \sin \theta_2 \quad (3.9)$$

La posizione del punto B può essere espressa come

$$x_B = x_{B0} + r_4 \cos \theta_4, \quad y_B = y_{B0} + r_4 \sin \theta_4 \quad (3.10)$$

Nel manovellismo di spinta le equazioni di chiusura sono analoghe a quelle del quadrilatero articolato, a meno di una diade che prevede l'introduzione di una coppia prismatica al posto di una coppia rotoidale.

### 3.4 Traiettorie Polari Quadrilatero Antropomorfo

A seguito della trattazione analitica affrontata per mezzo delle equazioni di chiusura si è proceduto con il tracciamento delle polari del moto relative dapprima al quadrilatero articolato antropomorfo. Le Fig. 3.3, 3.4 e 3.5 rappresentano le polari nel passaggio per le tre posizioni di progetto 1, 2 e 3.

Nelle Fig. 3.3, 3.4 e 3.5 vengono indicate con "λ" la polare fissa, in blu, con "l" la polare mobile, in rosso. Il centro di istantaneo rotazione è indicato con  $P_0$ .

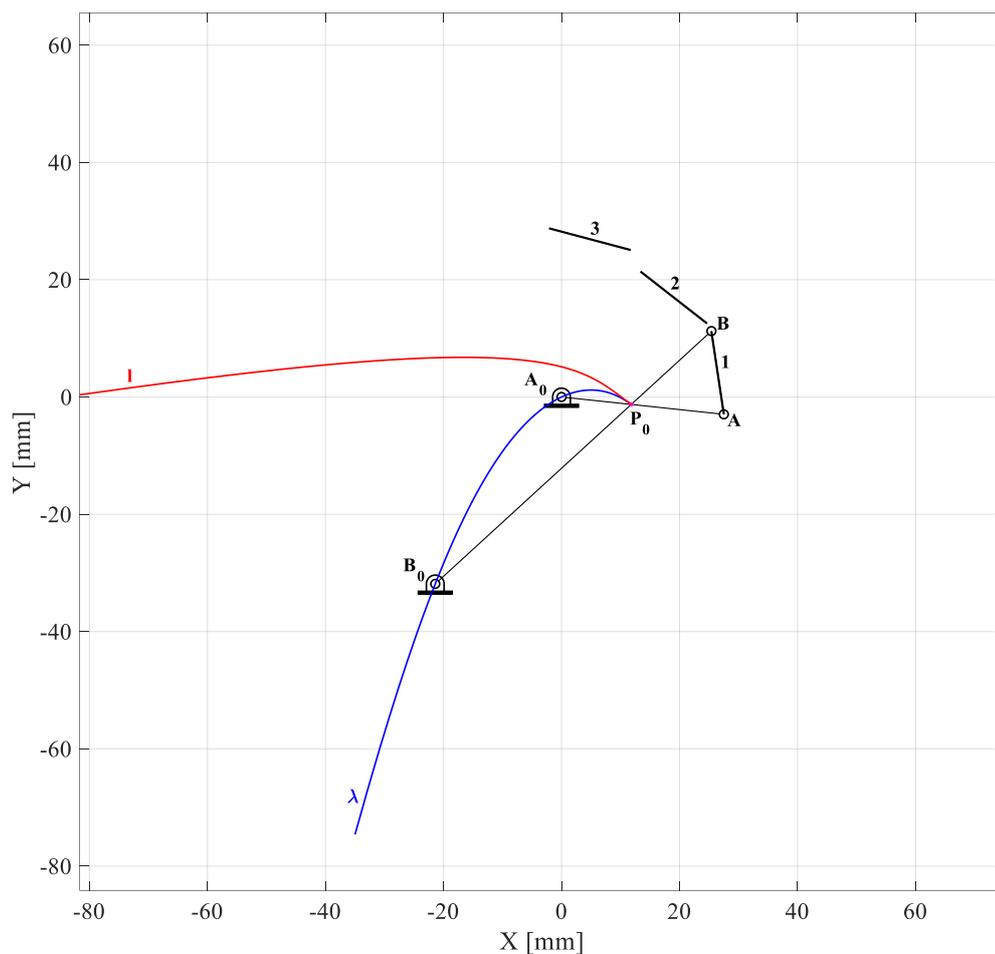


Figura 3.3 Traiettorie polari del quadrilatero articolato antropomorfo nella posizione di progetto 1

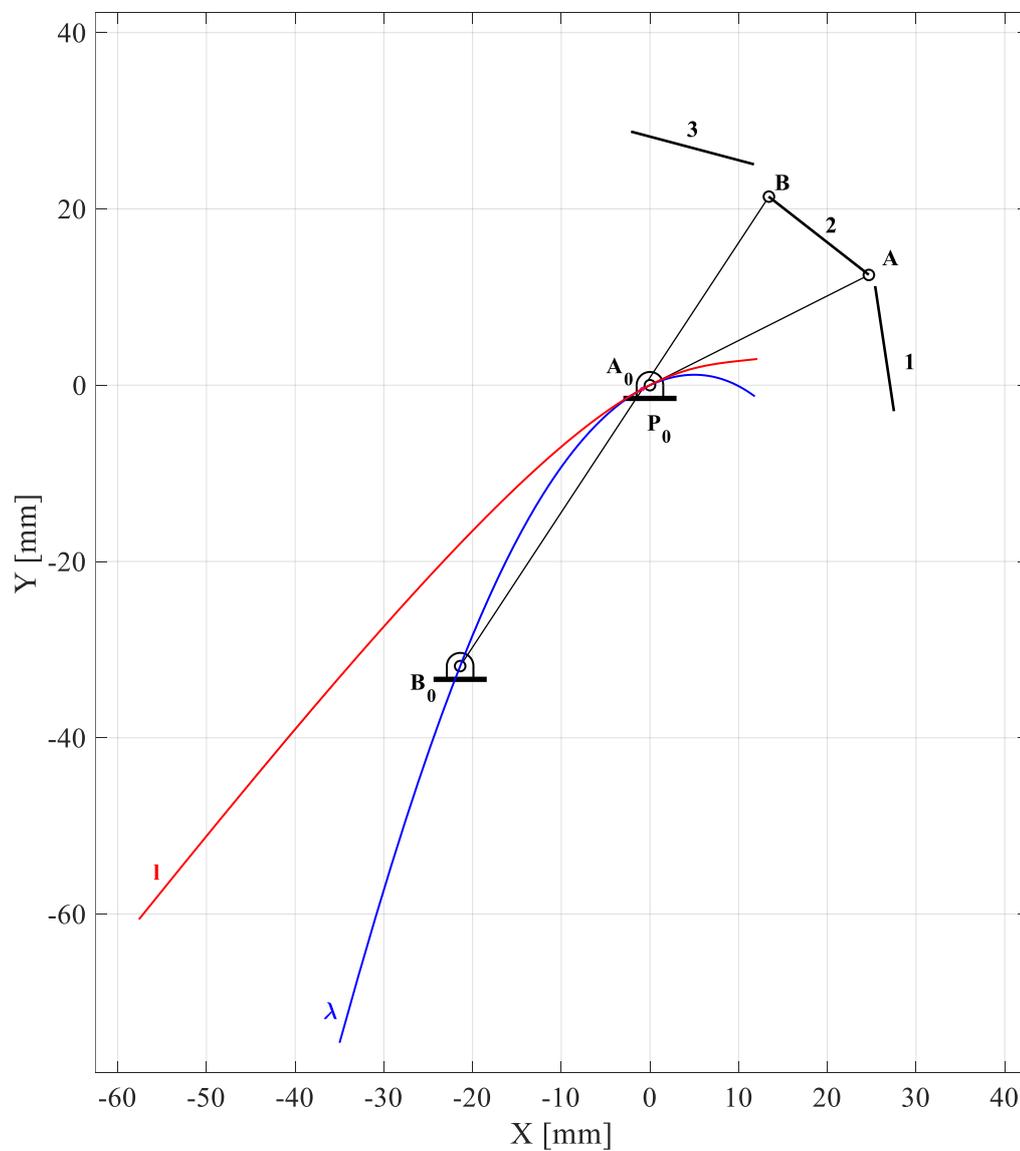


Figura 3.4 Traiettorie polari del quadrilatero articolato antropomorfo nella posizione di progetto 2

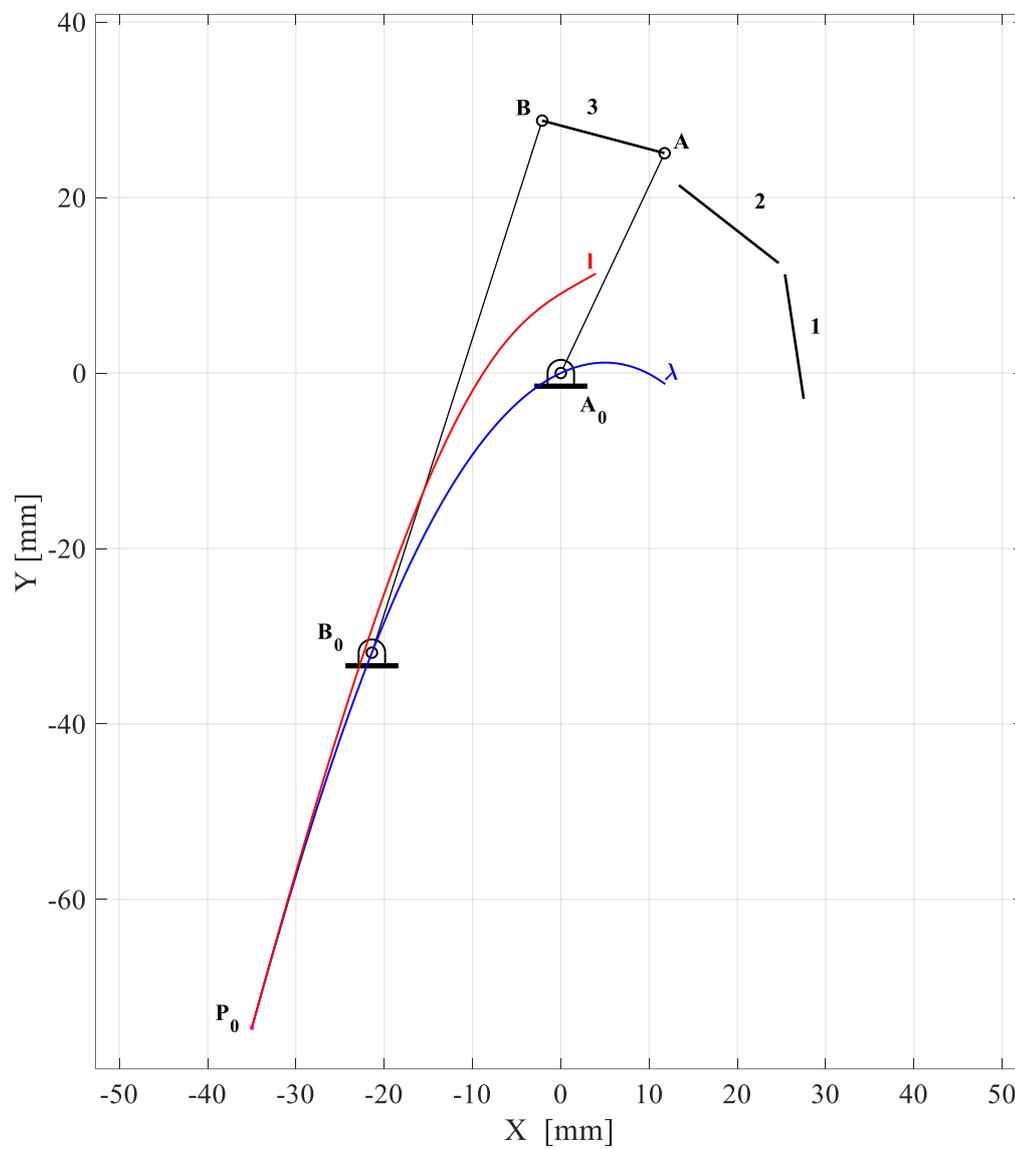


Figura 3.5 Traiettorie polari del quadrilatero articolato antropomorfo nella posizione di progetto 3

### 3.5 Traiettorie Polari del Manovellismo di Spinta Antropomorfo

Il secondo meccanismo analizzato è il manovellismo di spinta deviato antropomorfo. Dopo aver appurato, tramite un'analisi di mobilità, che si tratta di un meccanismo a doppio bilanciere, sono in seguito state tracciate le traiettorie polari.

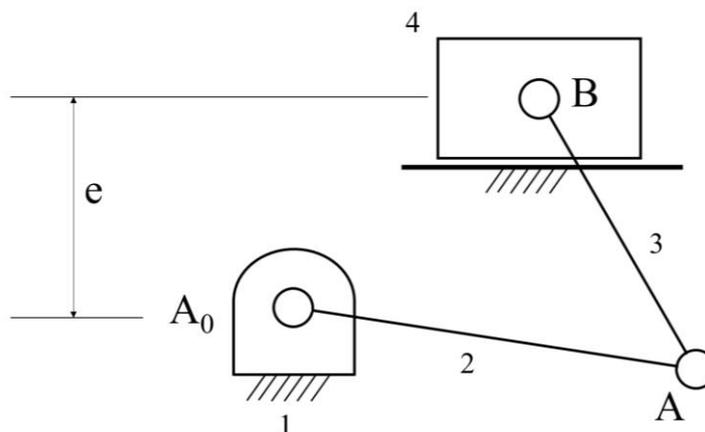


Figura 3.6 Schema cinematico manovellismo di spinta antropomorfo

Di seguito vengono riportate le traiettorie polari del suddetto meccanismo, riportate in Fig. 3.7, 3.8 e 3.9, sulla falsariga di quanto fatto per il quadrilatero articolato.

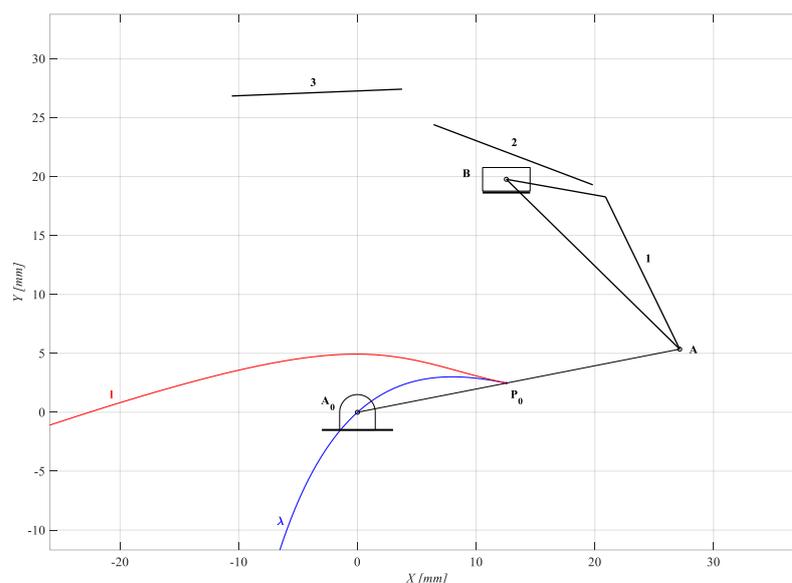


Figura 3.7 Traiettorie polari del manovellismo di spinta antropomorfo nella posizione di progetto 1

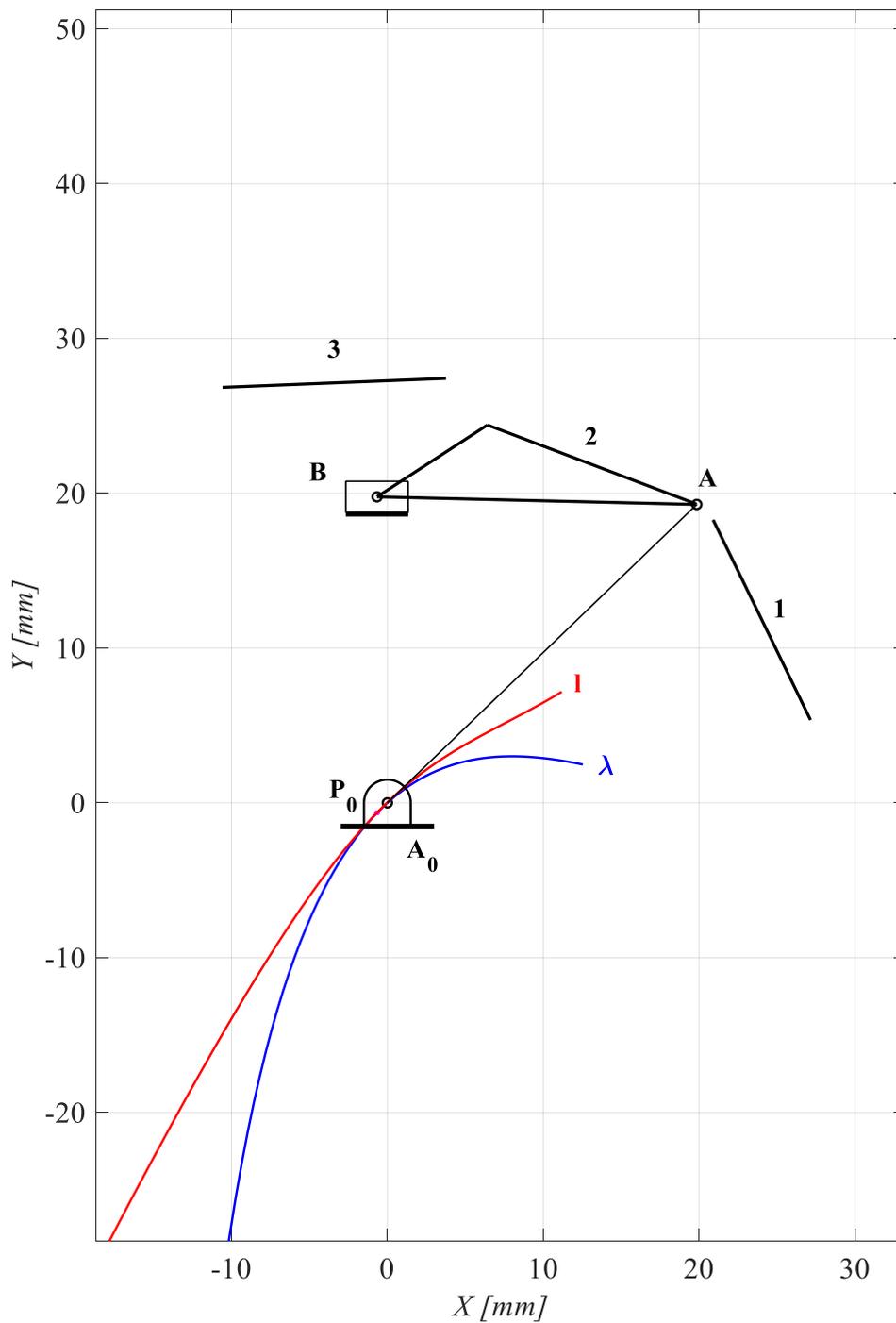


Figura 3.8 Traiettorie polari del manovellismo di spinta antropomorfo nella posizione di progetto 2

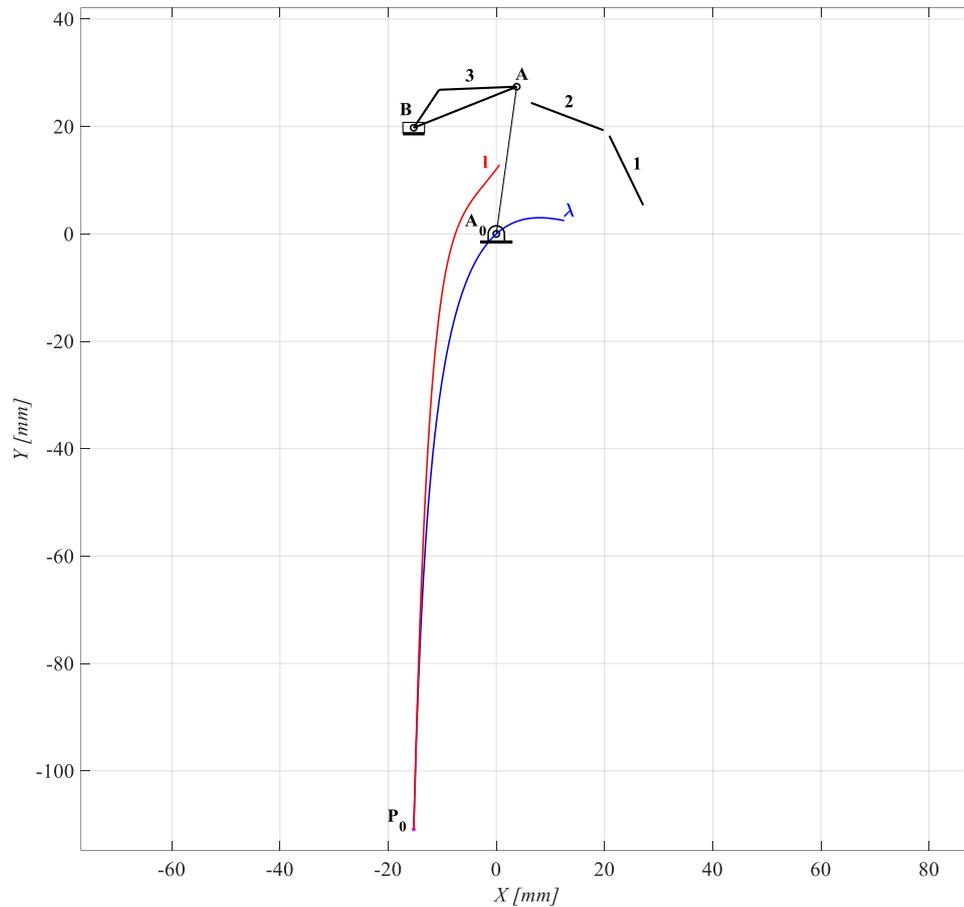


Figura 3.9 Traiettorie polari del manovellismo di spinta antropomorfo nella posizione di progetto 3

### 3.6 Confronto Polari Quadrilatero-Manovellismo

Di seguito vengono riportati due confronti tra le traiettorie polari dei meccanismi analizzati. In Fig. 3.10 vengono confrontate le traiettorie polari fisse, in Fig. 3.11 le traiettorie polari mobili. In entrambe le immagini le curve relative al quadrilatero sono rappresentate in blu, mentre quelle relative al manovellismo sono in rosso.

Come è facile aspettarsi le due curve sono diverse, essendo relative a due sistemi articolati caratterizzati da caratteristiche cinematiche diverse. In particolare le curve di biella dei due meccanismi sono di gradi algebrici differenti e quindi presentano inevitabilmente degli scostamenti. Ad ogni modo, avendo esse in comune il passaggio per le medesime tre posizioni rigide, si può notare come la forma e l'andamento delle stesse sia simile.

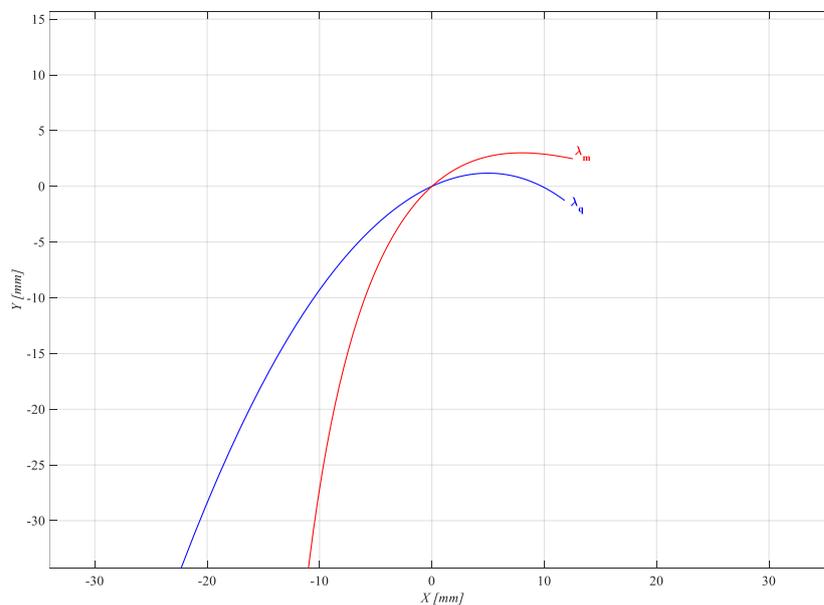


Figura 3.10 Confronto traiettorie polari fisse dei due meccanismi realizzati

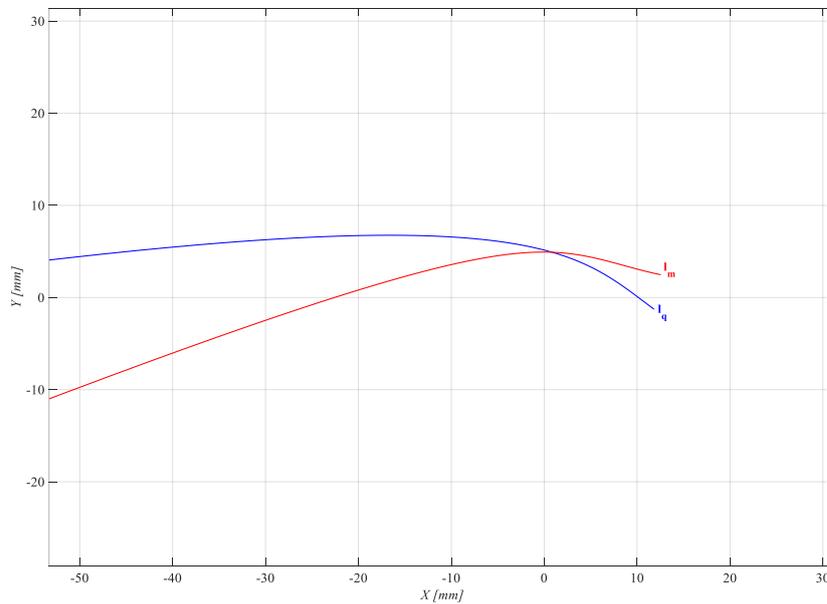


Figura 3.11 Confronto traiettorie polari mobile dei due meccanismi realizzati

# CAPITOLO 4. PROGETTO MECCANICO E REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO

## 4.1 Introduzione

La fase finale di questa tesi di dottorato ha riguardato il progetto meccanico e la realizzazione di un prototipo del meccanismo per esoscheletro del ginocchio, il quale è stato successivamente stampato 3D, al fine di poterne verificare la funzionalità. Il meccanismo scelto per approssimare il movimento del ginocchio è, come anticipato nel Cap. 2, il manovellismo di spinta deviato

## 4.2 Progetto CAD dell'Esoscheletro

Il progetto meccanico dell'esoscheletro per il ginocchio è stato sviluppato a partire dallo schema cinematico del manovellismo di spinta riportato in Fig. 4.1.

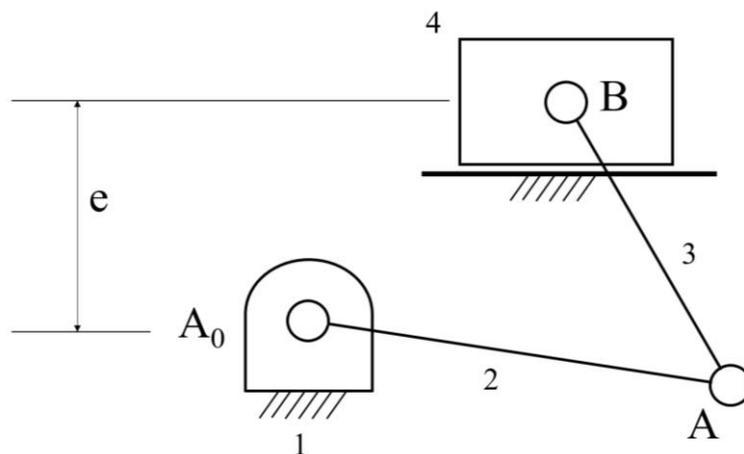


Figura 4.1 Schema cinematico del manovellismo

In Tab. 4.1 sono riportate le principali specifiche di progetto relative al meccanismo da realizzare.

Link	Dimensione [mm]
$A_0A$	27,67
AB	20,52
e	19,77

Tabella 4.1 – Dimensioni del meccanismo

La prima parte ad essere realizzata è stata quella relativa al telaio, riportata in Fig. 4.2, in cui si può apprezzare anche lo schema del meccanismo. Nel progettare questa parte si è dovuto tener conto in primis di dover innanzitutto garantire la cinematica del meccanismo. Allo scopo su di essa è stata realizzata una guida lineare la quale, accoppiata con un pistone, consentisse di avere la traslazione della coppia prismatica lungo un asse parallelo al femore. La vista laterale della guida lineare è riportata in Fig. 4.3.

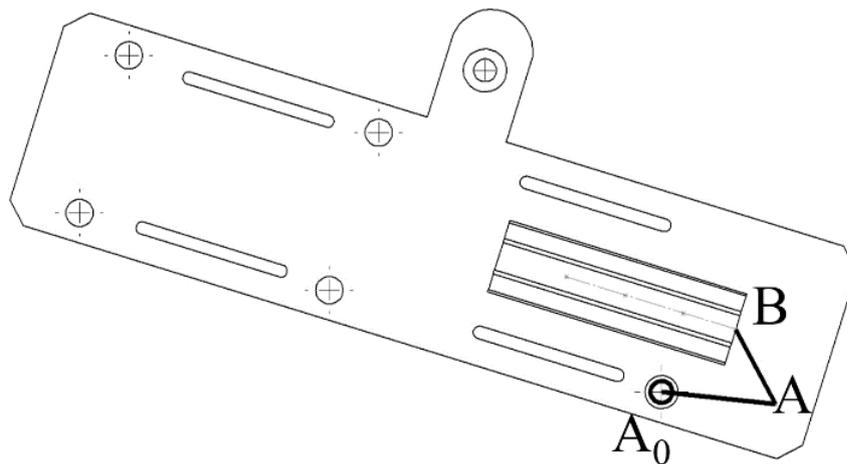
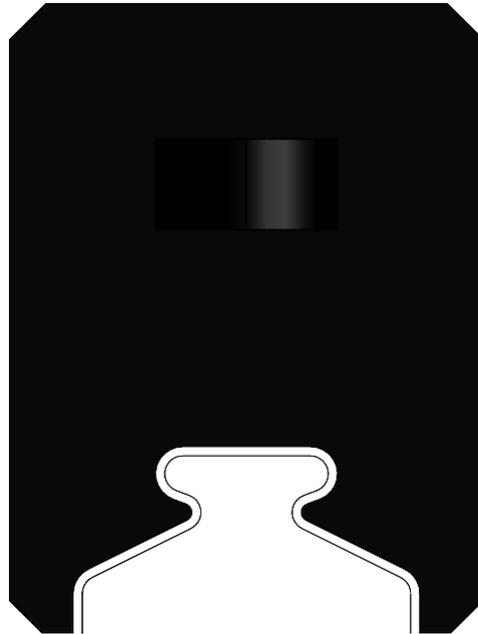


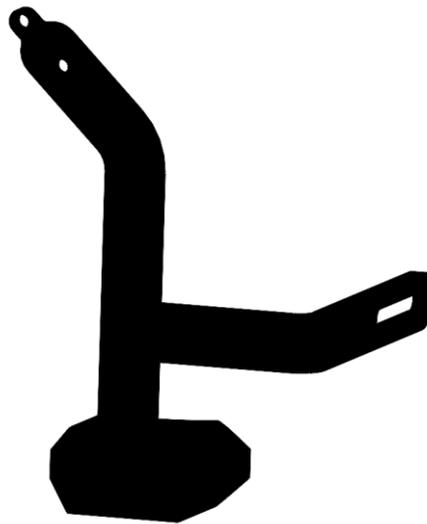
Figura 4.2 Schema del telaio del meccanismo per esoscheletro



*Figura 4.3 Guida lineare*

Nella progettazione del telaio si è dovuto tener conto anche di fattori di natura più prettamente pratica. Esso, infatti, oltre a dover prevedere delle asole per il passaggio delle fasce di velcro, con cui si è deciso di fissare il telaio al femore, deve anche rispettare delle specifiche in termini di ingombri e di ergonomia, nonché prevedere la sede per un dispositivo di attuazione che, come si vedrà più avanti, è un cilindro pneumatico.

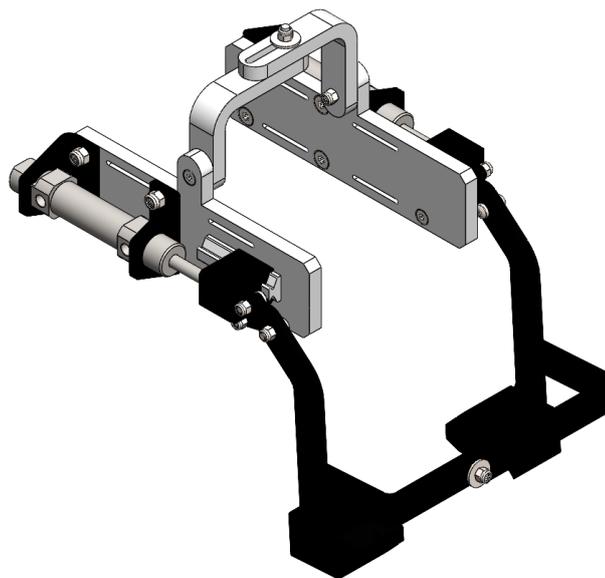
Particolare attenzione si è dovuta prestare anche alla progettazione della biella del meccanismo. Infatti, essa, oltre a dover consentire il corretto movimento del meccanismo, deve anche essere resa solidale con la parte mobile della gamba, ovvero la tibia. Il modello 3D della biella realizzata è riportato in Fig. 4.4, in cui si può apprezzare la presenza delle cerniere mobili A e B, in alto, oltre al fatto che essa è sagomata in maniera tale da poter essere successivamente collegata alla tibia con delle fasce di velcro. Sempre in Fig. 4.4 si può notare la presenza di un'asola, prevista in funzione dell'accoppiamento della biella con una sua parte speculare. Si è pensato infatti di realizzare due meccanismi speculari, uno situato sulla parte esterna della coscia ed uno sulla sua parte interna, al fine di consentire una maggiore stabilità del meccanismo stesso.



*Figura 4.4 Immagine 3D della biella del manovellismo*

Per quanto riguarda la manovella del meccanismo, il suo progetto meccanico non ha richiesto alcuna attenzione particolare, oltre al semplice fatto di garantire il corretto movimento del sistema.

Il progetto meccanico complessivo è riportato in Fig. 4.5, in cui si può osservare che nell'assieme sono state previste le sedi per l'alloggiamento dei cilindri pneumatici, nonché dei raccordi, regolabili con delle asole, concepiti per poter accoppiare le due parti speculari dell'esoscheletro.



*Figura 4.5 Progetto meccanico finale dell'esoscheletro per il ginocchio*

### 4.3 Circuito Pneumatico di Azionamento

Al fine di azionare il meccanismo dell'esoscheletro si è deciso di utilizzare dei cilindri pneumatici, soluzione questa già molto diffusa nel mondo della robotica [30], sfruttando anche l'analogia del comportamento tra i muscoli umani ed i muscoli pneumatici.

I cilindri utilizzati sono dei cilindri prodotti dall'azienda SMC, Mod. C85N 20-25, senza anello magnetico, con un alesaggio di 20mm ed una corsa di 25mm.

Il circuito è costituito da due cilindri pneumatici a doppio effetto comandati in parallelo, forniti di regolatori di flusso, ovvero delle resistenze pneumatiche unidirezionali, per la regolazione della velocità di apertura e chiusura degli steli. Questi cilindri sono collegati a loro volta ad una valvola di potenza 5/2 monostabile ad azionamento pneumatico, a sua volta comandata da una valvola 3/2 monostabile ad azionamento manuale, che funge da interruttore. Tramite il comando a leva è possibile commutare le posizioni di lavoro dei cilindri, ottenendo così il movimento desiderato del ginocchio. Il circuito pneumatico realizzato ed il suo relativo schema circuitale sono riportati rispettivamente in Fig. 4.6 e Fig. 4.7.

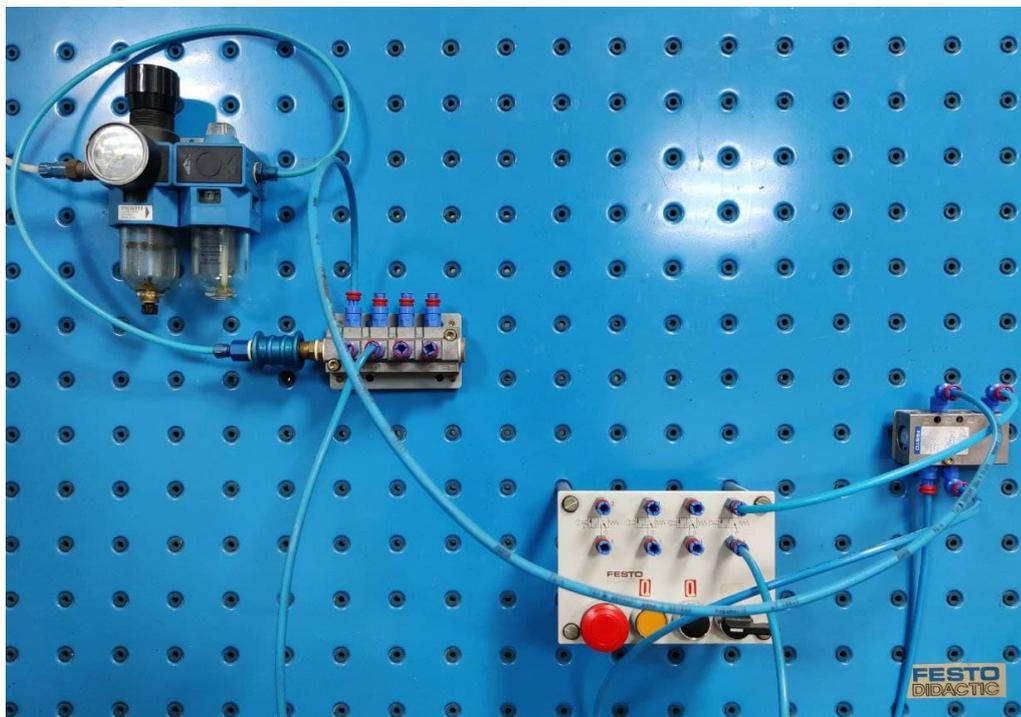


Figura 4.6 Circuito pneumatico realizzato per comandare i cilindri pneumatici

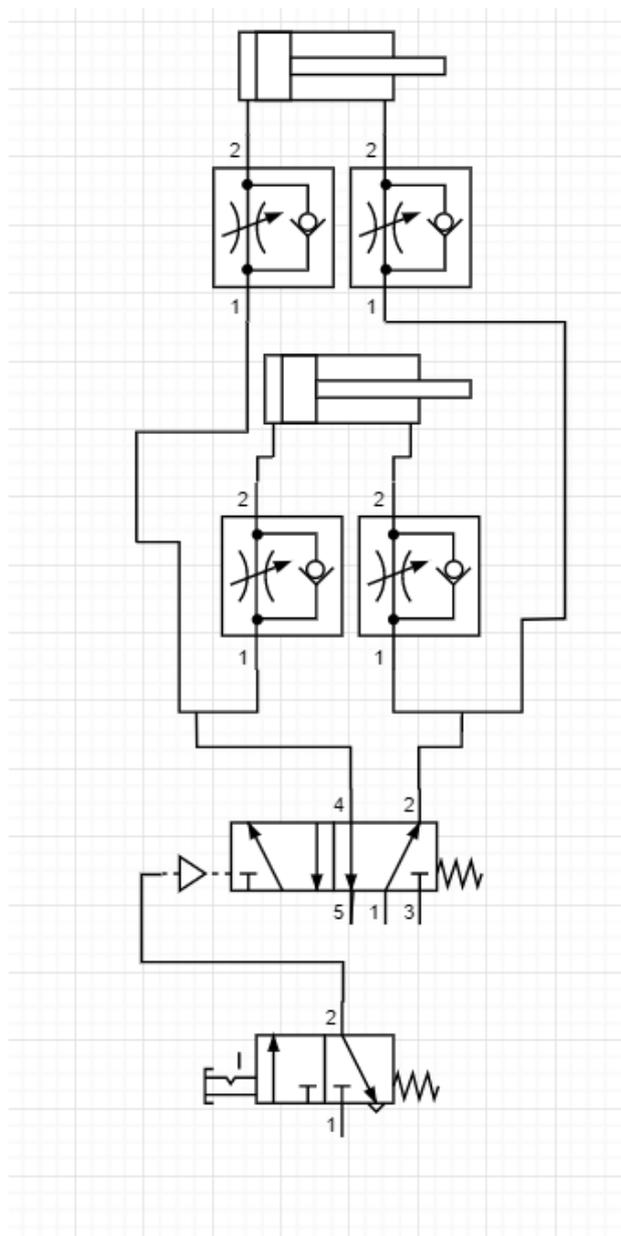


Figura 4.7 Schema circuitale dell'azionamento pneumatico realizzato

## 4.4 Stampa 3D del Prototipo

L'assieme riportato in Fig. 4.5 è stato stampato 3D, con lo scopo di poter essere indossato per verificarne la funzionalità. La stampante utilizzata è una Ultimaker 3 Extended, riportata in Fig. 4.8, una stampante 3D ad architettura cartesiana, ed il materiale utilizzato è comune PLA.



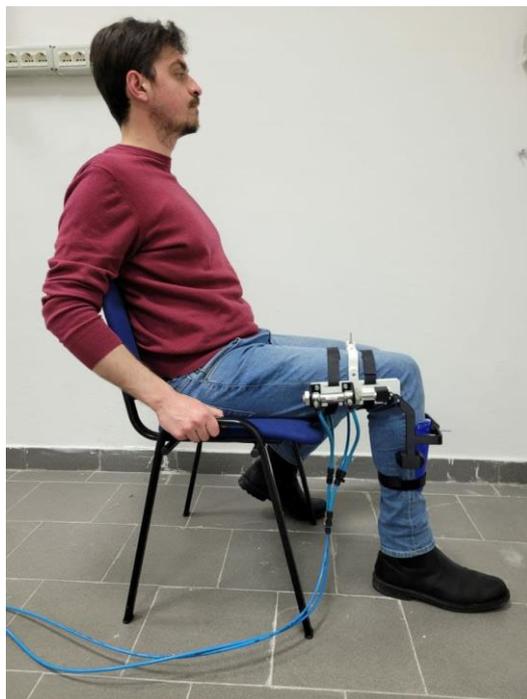
*Figura 4.8 Stampante 3D Ultimaker 3 Extended*

Un'immagine relativa alla parte esterna del prototipo stampato ed assemblato è riportato in Fig. 4.9.



*Figura 4.9 Prototipo stampato ed assemblato, relativo alla parte esterna dell'esoscheletro*

In Fig. 4.10 e Fig. 4.11 sono riportate delle immagini del prototipo 3D dell'esoscheletro assemblato, collegato al circuito di azionamento ed indossato.

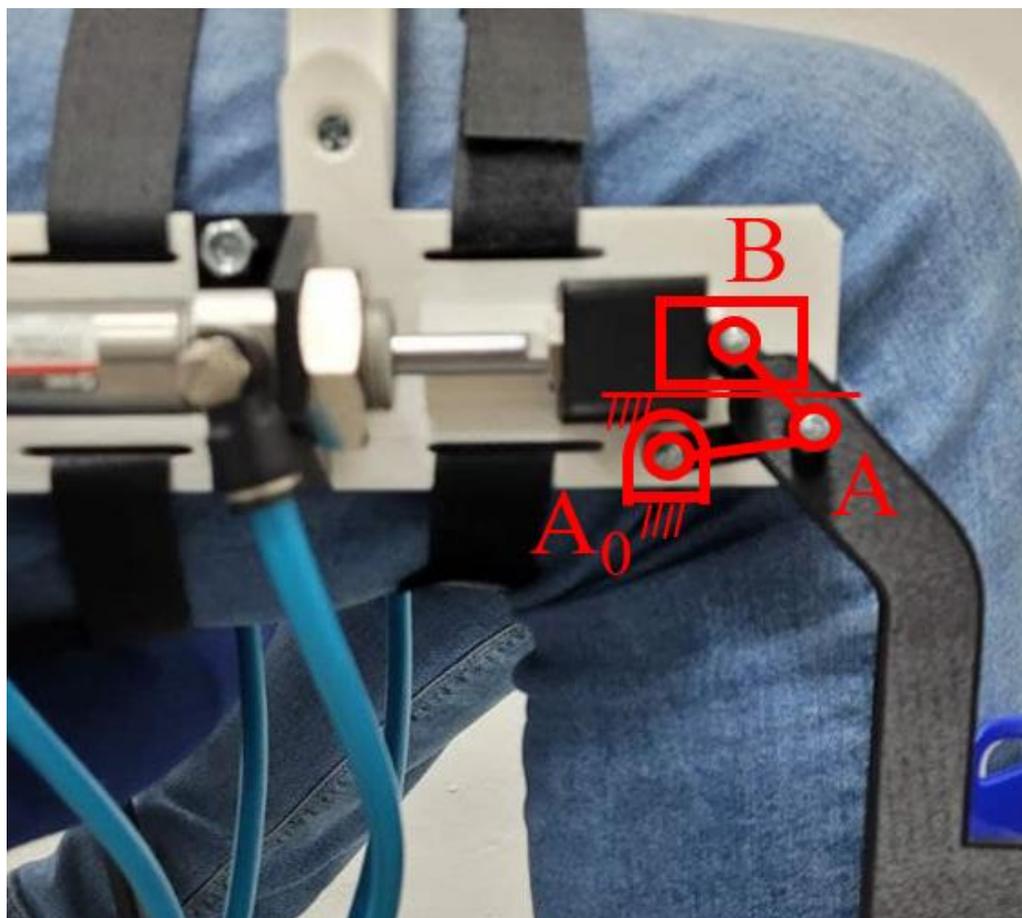


*Figura 4.10 Esoscheletro per il ginocchio collegato al circuito di azionamento ed indossato*



*Figura 4.11 Esoscheletro per il ginocchio*

In Fig. 4.12 si può apprezzare un'evidenza del meccanismo relativo al manovellismo di spinta antropomorfo sull'esoscheletro.



*Figura 4.12 Evidenza del manovellismo sul prototipo di esoscheletro*

# CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi di dottorato, basandosi su un'analisi dello stato dell'arte di meccanismi per il ginocchio umano, ha avuto come risultato finale l'introduzione di una metodologia di sintesi cinematica per la realizzazione di dispositivi antropomorfi.

A partire da un'acquisizione di dati relativa al movimento reale del ginocchio, sono state individuate diverse soluzioni che consentissero di ottenere il movimento desiderato. In particolare, sono stati progettati un quadrilatero articolato ed un manovellismo di spinta antropomorfo, entrambi funzionali allo scopo.

Questi due meccanismi sono stati sottoposti ad un'analisi cinematica che permettesse di evidenziarne le caratteristiche principali, soprattutto grazie al confronto delle traiettorie polari degli stessi.

Le due soluzioni sono state confrontate non solo dal punto di vista cinematico, ma anche dal punto di vista della scelta dell'azionamento. Avendo individuato come scelta dell'attuatore un cilindro lineare pneumatico, sulla falsariga dell'analogia tra i muscoli dell'essere umano e muscoli pneumatici, la scelta è ricaduta sul manovellismo di spinta antropomorfo, che a parità di caratteristiche cinematiche presenta dei vantaggi in termini di semplicità costruttiva.

La sintesi cinematica del manovellismo di spinta antropomorfo è stato il punto di partenza per la costruzione di un prototipo di esoscheletro per il ginocchio. Dopo aver realizzato il modello CAD tridimensionale del dispositivo esso è stato stampato in 3D, al fine di poter essere indossato per verificarne l'effettiva funzionalità. Questo è stato fatto indossando l'esoscheletro e collegandolo al circuito di azionamento pneumatico dello stesso.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Freudenstein, "Kinematics of the Human Knee Joint", *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 31, pg. 215-232, 1969
- [2] M. Muller, "A Novel Classification of Planar Four-Bar Linkages and Its Application to the Mechanical Analysis of Animal Systems", *Philosophical Transactions of the Royal Society*, vol. 351, pg. 689-720, 1996
- [3] H. Dathe, R. Gezzi, C. Fiedler, D. Kuben-Messenburg, H. Nagerl, "The Description of the Human Knee as Four-Bar Linkage", *Acta of Bioengineering and Biomechanics*, Vol. 18, No. 4, 2016
- [4] R. Sancibrian, E. G. Sarabia, A. Sedano, J. M. Blanco, "A General Method for the Optimal Synthesis of Mechanisms Using Prescribed Instant Center Positions", *Applied Mathematical Modeling*, vol. 40, pg. 2206-2222
- [5] N. Sancisi, R. Caminati, V. Parenti-Castelli, "Optimal Four-Bar Linkage for the Stability and the Motion of the Human Knee Prostheses", *Proceedings of Aimeta 2009*, pg. 1-10
- [6] G. M. Bapat, S. Sujatha, "A Method for Optimal Synthesis of a Biomimetic Four-Bar Linkage Knee Joint for KAFO", *Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering*, Vol. 32, pg. 20-28
- [7] R. Ji, L. Li, S. Wang, J. Li, "Experimental Study on Human Knee Joint Instantaneous Center", *Computer Science and Engineering Technology*, pg. 429-436, 2016
- [8] Y. Tsai, C. Lin, G. Huang, H. Lin, "On the Centroides of Human Knee Joints Using Photographic Method", *Life Science Journal*, 2012,
- [9] C. W. Radcliffe, "Four-Bar Linkage Prosthetic Knee Mechanisms: Kinematics, Alignment and Prescription Criteria", *Prosthetics and Orthotics International*, 1994, vol.18, 159-173
- [10] A. C. Etoundi, R. Vaidyanathan, S. C. Burgess, "A Bio-Inspired Condylar Knee Joint for Leg Amputees and for Knee Implants", *Design and Nature*, Vol. VI, pg. 23-34
- [11] Y. Sun, W. Ge, J. Zheng, D. Dong, "Design and Evaluation of a Prosthetic Knee Joint Using the Geared Five-Bar Mechanism", *IEEE Transactions On Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 23, No. 6, November 2015
- [12] J. K. Chakraborty, K. M. Patil, "A New Modular Six-Bar Linkage Trans-Femoral Prosthesis for Walking and Squatting", *Prosthetics and Orthotics International*, 1994, 19, 98-108
- [13] D. Jin, R. Zhang, H. Dimo, R. Wang, J. Zhang, "Kinematic and dynamic performance of prosthetic knee joint using six-bar mechanism", *Journal of Rehabilitation Research and Development*, Vol. 40, No. 1, 2003, pg. 39-48

## REFERENCES

- [14] A. Hamon, Y. Aoustin, S. Caro, "Two Walking Gaits for a Planar Bipedal Robot Equipped with a Four-Bar Mechanism for the Knee Joint", *Multibody Systems Dynamics*, 2014, vol. 31, pg. 283-307
- [15] K. Y. Nam, H. J. Kim, B. S. Kwon, J. Park, H. J. Lee "Robot-assisted gait training (Lokomat) improves walking function and activity in people with spinal cord injury: a systematic review", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, (2017), pg. 14-24
- [16] J. F. Veneman, R. Kruidhof "Design and Evaluation of the LOPES Exoskeleton Robot for Interactive Gait Rehabilitation", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 15, No. 3, 2007
- [17] S. K. Banala, S. H. Kim, S. K. Agrawal, J. P. Scholz, "Robot Assisted Gait Training With Active Leg Exoskeleton (ALEX)", *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 17, no. 1, 2009
- [18] A. Esquenazi, M. Talaty, A. Packel, M. Saulino "The ReWalk Powered Exoskeleton to Restore Ambulatory Function to Individuals with Thoracic-Level Motor-Complete Spinal Cord Injury", *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 2012
- [19] L. A. Brenner, "Exploring the Psychosocial Impact of Ekso Bionics Technology", *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2016
- [20] C. H. Hartigan, C. Kandilakis, S. Dalley, M. Clausen, E. Wilson, S. Morrison, S. Etheridge, R. Farris "Mobility Outcomes Following Five Training Sessions with a Powered Exoskeleton", *Top Spinal Cord Inj Rehabil*, vol.21, pg. 93-99, 2015
- [21] K. Kaneko et al., "Humanoid robot HRP-4 - Humanoid robotics platform with lightweight and slim body," 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2011, pp. 4400-4407
- [22] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: system overview and integration," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2002, pp. 2478-2483 vol.3
- [23] Yu Ogura et al., "Development of a new humanoid robot WABIAN-2," Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006., 2006, pp. 76-81
- [24] N. Banerjee et al., "Human-supervised control of the ATLAS humanoid robot for traversing doors," 2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2015, pp. 722-729
- [25] M. H. Bernal-Torres, H. I. Medellin-Castillo, J. C. Arellano-Gonzalez, "Design and Control of a New Biomimetic Transfemoral Knee Prosthesis Using an Echo-Control Scheme", *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 20, 2018
- [26] A. Di Benedetto, E. Pennestrì, "Introduzione alla Cinematica dei Meccanismi, Vol. 1", Casa Editrice Ambrosiana, Milan, 1999. (in Italian)
- [27] G. Scotto Lavina, "Lezioni di Meccanica Applicata alle Macchine", Edizioni Efesto, 2016

## REFERENCES

- [28] H. Singh, P. Sheik, "Atlas on X-ray and Angiographic Anatomy", Jaypee Brothers Medical Publishers, 2013
- [29] C. H. Suh, C. W. Radcliffe, "Kinematics and Mechanisms Design", Wiley, 1978
- [30] E. Kelasidi, G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos and S. Manesis, "A survey on pneumatic muscle actuators modeling," 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011, pp. 1263-126
- [31] [2] A. Di Benedetto, E. Pennestrì, "Introduzione alla Cinematica dei Meccanismi", Vol. 3, Casa Editrice Ambrosiana, Milan, 1999. (in Italian)
- [32] K.J. Waldron, G.L. Kinzel, S.K. Agrawal, "Kinematics, Dynamics, and Design of Machinery", 3rd Edition. John Wiley & Sons Inc., Chichester (UK), 2016.