

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi e simulazione di una mano robotica sottoattuata in MATLAB e SolidWorks

Relatore

Prof.ssa Maffiodo Daniela

Candidato

Cantiello Giuseppe

Co-relatori

Prof. Raparelli Terenziano

Dr. Pacheco Quiñones Daniel

Luglio 2025

*Ai miei genitori,
per gli insegnamenti, il sostegno
e la fiducia che non sono mai mancati.*

*A mia sorella,
per la sua vicinanza, la complicità
e l'incoraggiamento costante.*

SOMMARIO

Il presente elaborato si inserisce all'interno di un più ampio progetto di ricerca avente l'obiettivo di sviluppare un sistema robotico per effettuare operazioni di salvataggio in ambienti estremamente angusti, con particolare riferimento ai pozzi artesiani abbandonati. Questi pozzi vengono realizzati per far fronte alla carenza di acqua potabile, un problema che colpisce soprattutto i Paesi in via di sviluppo. Tuttavia, una volta in disuso, spesso non vengono messi adeguatamente in sicurezza, rappresentando un serio pericolo per la popolazione, in particolare per i bambini. Questo ha causato, negli ultimi anni, numerosi casi di incidenti nei quali bambini sono accidentalmente caduti al loro interno.

In tale contesto si inserisce il progetto della realizzazione di una mano robotica sottoattuata a tre dita, ideata per supportare operazioni di salvataggio in ambienti, come i pozzi artesiani, nei quali le convenzionali tecniche di salvataggio risultano complicate da utilizzare. L'obiettivo di questo lavoro è l'analisi della cinematica dell'ultimo prototipo della mano robotica sottoattuata a tre dita, partendo dai modelli CAD delle singole componenti.

A tal fine, è stato inizialmente riassembleato l'assieme completo in ambiente SolidWorks, andando ad inserire adeguati vincoli meccanici e cinematici per poter eseguire diverse simulazioni di movimento tramite il tool SolidWorks Motion.

In una fase successiva è stato sviluppato un modello nell'ambiente MATLAB per la simulazione della cinematica della mano di presa, in modo da riprodurre il movimento delle tre dita a partire dalla configurazione iniziale e dando in input al modello sei angoli target relativi alle sei falangi. Lo script implementato si propone come uno strumento alternativo, più flessibile e rapido rispetto al solo ambiente CAD di SolidWorks Motion.

I risultati ottenuti tramite il modello MATLAB sono stati successivamente confrontati con quelli derivanti dalle simulazioni in SolidWorks Motion, mostrando, in generale, un'ottima coerenza tra i due ambienti. Questo ha confermato la validità dell'approccio seguito per la realizzazione del modello in MATLAB e rappresenta una base solida per il futuro sviluppo e ottimizzazione della mano robotica e del modello realizzato in questo lavoro.

Indice

SOMMARIO	<i>i</i>
1 Introduzione	7
1.1 Contesto.....	7
1.2 Obiettivo del progetto	8
2 Stato dell'arte	9
2.1 Mani di presa nella robotica	9
2.2 Classificazione delle mani di presa	11
2.2.1 Sistemi di presa impactive	11
2.2.2 Sistemi di presa ingressive.....	12
2.2.3 Sistemi di presa astrictive	12
2.2.4 Sistemi di presa contigutive.....	13
2.3 Mani robotiche antropomorfe	14
2.4 Mani robotiche sottoattuate	17
3 Mano di presa.....	20
3.1 Introduzione.....	20
3.2 Architettura generale del sistema.....	21
3.3 Descrizione meccanica del sistema	22
3.3.1 Telaio	22
3.3.2 Sistema di attuazione	23
3.3.3 Sistema di guida e trasmissione del moto	25
4 Metodologia di analisi e simulazione	27
4.1 Introduzione.....	27
4.2 Assemblaggio del modello CAD in SolidWorks	28
4.2.1 Ricostruzione e adattamento del modello CAD.....	28
4.2.2 Definizione dei vincoli geometrici e cinematici	29
4.2.3 Gestione dei vincoli e dei gradi di libertà in SolidWorks Motion.....	30
4.3 Simulazioni in Solidworks Motion.....	34
4.3.1 Setup delle simulazioni	34

4.3.2	Validazione delle equazioni cinematiche del singolo dito	37
4.4	Sviluppo del modello Matlab	41
4.4.1	Obiettivo del modello	41
4.4.2	Struttura del modello	41
4.4.3	Modellazione cinematica del singolo dito	45
4.4.4	Modellazione cinematica della piastra triangolare	47
4.4.5	Struttura iniziale dello script principale MATLAB e richiamo alla function	49
4.4.6	Calcolo cinematico di una fase del movimento e gestione delle condizioni di transizione alla fase successiva.....	52
5	<i>Simulazioni e validazione del modello cinematico della mano robotica</i>	54
5.1	Validazione del modello cinematico del singolo dito.....	54
5.2	Analisi di un caso singolo di simulazione del movimento adattativo della mano in SolidWorks Motion.....	57
5.3	Approssimazione numerica del moto della piastra triangolare.....	63
5.4	Confronto simulazione tra il modello MATLAB e SolidWorks	71
6	<i>Conclusioni e sviluppi futuri.....</i>	82
	<i>Bibliografia.....</i>	84
	<i>Appendice A Analisi cinematica del singolo dito.....</i>	87
A.1	Meccanismo biella-manovella	87
A.2	Quadrilatero articolato	89

Indice delle figure

Figura 2.1 - SCHUNK PGN-plus-P [14] (a sinistra) e Robotiq 2F-85 [15] (a destra)	12
Figura 2.2 - Vacuum gripper Robotiq PowerPick SingleCup [17]	13
Figura 2.3 - Shadow Dexterous Hand [18]	15
Figura 2.4 - Allegro Hand V5 (4F Plus) [19]	15
Figura 2.5 - Qb SoftHand [20]	16
Figura 2.6 - Pisa/IIT SoftHand [25]	18
Figura 2.7 - Robotiq 3-Finger Adaptive Gripper [13]	19
Figura 3.1 - Vista CAD isometrica della mano di presa	20
Figura 3.2 - Vista dall'alto della mano di presa (a) e struttura singolo dito (b)	21
Figura 3.3 - Parte superiore (a) e parte inferiore del telaio (b)	22
Figura 3.4 - Dynamixel XC330-T288-T (a) e servomotore privo di scocca (b) [27]	23
Figura 3.5 - Sistema vite-madrevite Igus [28]	23
Figura 3.6 - Piastrina di giunzione	24
Figura 3.7 - Piastra triangolare (a sinistra) e piastra motrice (a destra)	24
Figura 3.8 - Guida lineare IKO Nippon Thompson LWLC3C1R60T0H (a) e viste di dettaglio guida lineare (b) [29]	26
Figura 4.1 - Finestra relativa ai Gradi di libertà del sistema in SolidWorks Motion	33
Figura 4.2 - Impostazione del motore lineare in SolidWorks Motion	35
Figura 4.3 - Proprietà studio del movimento in SolidWorks Motion	36
Figura 4.4 - Singolo dito con riportati gli angoli caratteristici	39
Figura 4.5 - Sezione iniziale del diagramma della function sim3.m	43
Figura 4.6 - Sottosezione del diagramma della function sim3.m relativa a due delle tre possibili fasi 4 del movimento nel caso di stop della falange prossimale 1	43
Figura 4.7 - Sottosezione del diagramma della function sim3.m relativa alla terza possibile fase 4 del movimento nel caso di stop della falange prossimale 1	44
Figura 4.8 - Parte finale del diagramma di flusso caratterizzato dal blocco della falange distale 3 nella fase 3	44
Figura 4.9 - Schema meccanico semplificato del singolo dito	45
Figura 4.10 - Schema del quadrilatero articolato: (a) posizione iniziale; (b) configurazione nell'istante di stop della falange prossimale; (c) configurazione generica con rotazione della falange distale	46

Figura 5.1 - Andamento angoli caratteristici nella presa di precisione	55
Figura 5.2 - Andamento degli angoli caratteristici nella presa adattativa	55
Figura 5.3 - Zoom sull'andamento degli angoli $\alpha(h)$ e $\gamma(t)$ (presa adattativa)	56
Figura 5.4 – Viste laterali della mano di presa ad inizio simulazione (a) e fine simulazione (b)	58
Figura 5.5 - Andamento degli angoli α in funzione dell'alzata del punto O.....	59
Figura 5.6 - Andamento degli angoli δ in funzione dell'alzata del punto O	59
Figura 5.7 - Andamento degli angoli γ in funzione dell'alzata del punto O.....	60
Figura 5.8 – Andamento degli angoli χ in funzione dell'alzata del punto O	60
Figura 5.9 – Andamento degli angoli θ in funzione dell'alzata del punto O	61
Figura 5.10 – Andamento dell'alzata dei punti A della piastra rispetto al punto centrale O.....	61
Figura 5.11 - Vista dimetrica della mano di presa a fine simulazione	62
Figura 5.12 - Interpolazione dell'alzata del punto A_2 nelle tre simulazioni relative alla configurazione con dito 1 bloccato, falange prossimale 2 e falange distale 3 in rotazione	64
Figura 5.13 - Interpolazione dell'alzata del punto A_3 nelle tre simulazioni relative alla configurazione con dito 1 bloccato, falange prossimale 2 e falange distale 3 in rotazione	65
Figura 5.14 - Interpolazione dell'alzata del punto A_1 nelle quattro simulazioni relative alla configurazione con rotazione della falange prossimale 1 e delle distali 2 e 3.....	66
Figura 5.15 - Interpolazione dell'alzata dei punti A_2 e A_3 nelle quattro simulazioni relative alla configurazione con rotazione della falange prossimale 1 e delle distali 2 e 3.....	67
Figura 5.16 – Interpolazione dell'alzata dei punti A_2 e A_3 nelle cinque simulazioni relative alla configurazione con il dito 1 bloccato e le falangi distale 2 e 3 in rotazione.....	68
Figura 5.17 – Zoom del grafico relativo all'interpolazione dell'alzata dei punti A_2 e A_3 nelle cinque simulazioni relative alla configurazione con il dito 1 bloccato e le falangi distale 2 e 3 in rotazione	69
Figura 5.18 – Grafico comparativo degli andamenti dell'angolo α nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks.....	72
Figura 5.19 - Grafico comparativo degli andamenti dell'angolo δ nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks.....	73
Figura 5.20 - Grafico comparativo degli andamenti dell'angolo γ nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks.....	74
Figura 5.21 - Grafico comparativo degli andamenti dell'angolo χ nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks.....	75

Figura 5.22 - Grafico comparativo degli andamenti dell'angolo θ nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks.....	76
Figura 5.23 - Grafico comparativo degli andamenti dell'alzata dei punti A nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks.....	77
Figura 5.24 – Andamento degli angoli di Roll e Pitch della piastra triangolare nella simulazione MATLAB	79
Figura 5.25 – Vista isometrica del modello MATLAB della mano di presa nell'istante finale della simulazione	80
Figura 5.26 – Vista laterale del modello MATLAB della mano di presa nell'istante iniziale (a) e finale (b) della simulazione.....	81
Figura A.1 - Schema biella-manovella ABO_1	87
Figura A.2 - Schema quadrilatero articolato O_1BCO_2	89

Indice delle tabelle

Tabella 4.1 - Accoppiamenti standard SolidWorks	31
Tabella 4.2 - Accoppiamenti avanzati SolidWorks	32
Tabella 4.3 – Accoppiamenti meccanici SolidWorks	32

1 Introduzione

1.1 Contesto

La carenza di acqua potabile rappresenta una delle sfide più critiche a livello globale, con conseguenze più gravi, in particolare, nei Paesi in via di sviluppo. In India, ad esempio, si stima l'esistenza di circa 27 milioni di pozzi artesiani, noti come *borewell*, utilizzati per l'estrazione di acqua sotterranea. Tuttavia, molti di questi pozzi, una volta esauriti o abbandonati, rimangono aperti e non adeguatamente segnalati, costituendo un grave pericolo, soprattutto per i bambini. Tra il 2009 e il 2019, sono stati registrati almeno 40 decessi di bambini caduti in questi pozzi, sebbene il numero reale possa essere superiore a causa di casi non documentati [1].

Gli incidenti più noti includono la tragica morte di Sujith Wilson, un bambino di due anni che nel 2019 è rimasto intrappolato per oltre 80 ore in un pozzo profondo circa 88 piedi nello stato del Tamil Nadu, prima che il suo corpo senza vita venisse recuperato [2]. Un altro caso avviene nel 2019, quando il piccolo Fatehveer Singh è caduto in un pozzo di 150 piedi di profondità nel Punjab e, nonostante un'operazione di salvataggio durata 109 ore, non è sopravvissuto [3].

Le operazioni di salvataggio in questi contesti sono estremamente complesse a causa delle dimensioni ridotte dei pozzi, della profondità e delle condizioni ambientali sfavorevoli. Normalmente, i soccorritori tentano di scavare un pozzo parallelo per raggiungere la vittima, ma questo metodo è spesso lento e rischioso. Per affrontare queste sfide, la ricerca scientifica sta esplorando soluzioni innovative, come l'utilizzo di robot specializzati per il salvataggio in pozzi stretti. Ad esempio, sono stati sviluppati prototipi di robot dotati di bracci meccanici e sistemi di visione per localizzare e recuperare le vittime in modo più rapido e sicuro [4] [5].

1.2 Obiettivo del progetto

In questo contesto, la presente tesi si inserisce in un progetto più ampio avente l'obiettivo di progettare e simulare una mano robotica sottoattuata, destinata a operare in ambienti confinati come i pozzi artesiani. Lo scopo è contribuire allo sviluppo di dispositivi robotici efficaci per le operazioni di salvataggio, riducendo i tempi di intervento e aumentando le probabilità di successo nelle missioni di recupero. L'obiettivo di questo lavoro è la realizzazione di un modello che vada a simulare il movimento del prototipo di mano robotica realizzato in [6], in modo da fornire uno strumento utile e versatile per il proseguimento futuro del progetto.

2 Stato dell'arte

2.1 Mani di presa nella robotica

Negli ultimi decenni, la robotica ha compiuto notevoli progressi nello sviluppo di sistemi di manipolazione avanzati, con particolare attenzione alla progettazione delle mani di presa, anche note come end-effector o gripper. Secondo la definizione fornita dalla norma ISO 8373:2012, un end-effector è il dispositivo montato all'estremità di un braccio robotico, progettato per interagire con l'ambiente circostante e svolgere specifici compiti, come la manipolazione, l'afferraggio o l'esecuzione di lavorazioni [7].

Questi dispositivi sono progettati con l'obiettivo di riprodurre, almeno in parte, la destrezza, l'adattabilità e la versatilità della mano umana, che rappresenta un riferimento biomeccanico di eccezionale complessità. La mano umana è infatti un sistema articolato che conta 27 ossa, oltre 20 gradi di libertà e un'elevata concentrazione di recettori tattili nella regione distale delle dita. Riprodurre fedelmente tale struttura e funzionalità costituisce attualmente una delle sfide più impegnative della robotica moderna [8].

L'utilizzo di mani robotiche si è progressivamente diffuso in numerosi contesti applicativi: dall'automazione industriale alla robotica collaborativa, dall'assistenza sanitaria alla chirurgia robotica, fino ad ambiti emergenti come il soccorso in spazi ristretti. Anche in questi ambiti, la richiesta di soluzioni che siano leggere, compatte, robuste e capaci di adattarsi a oggetti e scenari di qualsivoglia tipo ha spinto la comunità scientifica e ingegneristica a sviluppare nuove soluzioni progettuali [9].

Una distinzione fondamentale ed ampiamente riconosciuta in letteratura riguarda la modalità di interazione tra la mano robotica e l'oggetto da afferrare: si identificano infatti i gripper *impactive*, *astriuctive*, *ingressive* e *contigutive* [10], definiti nella sezione 2.2. Al di là di questa classificazione funzionale, l'evoluzione più significativa ha poi riguardato l'architettura meccanica e l'intelligenza passiva dei meccanismi di presa.

In particolare, l'interesse verso le mani robotiche sottoattuate, ovvero sistemi in cui il numero di attuatori è inferiore al numero totale di gradi di libertà, ha acquisito crescente importanza grazie alla loro capacità di adattarsi in modo passivo alla forma degli oggetti da manipolare, riducendo la complessità del sistema di controllo ed il numero di componenti attivi [11]. Queste caratteristiche risultano estremamente vantaggiose in condizioni operative

critiche, come nel caso di missioni di salvataggio in ambienti confinati e angusti (es. pozzi o spazi ristretti), dove robustezza, compattezza e semplicità di attuazione diventano requisiti fondamentali.

Nel mentre, la ricerca e lo sviluppo riguardo le mani robotiche antropomorfe, orientata a replicare in modo più fedele possibile la struttura e la destrezza della mano umana, continua a offrire soluzioni avanzate nei campi in cui sono richieste manipolazioni di elevata complessità, interazioni più naturali o compatibilità con strumenti progettati per l'uso umano [12].

In questo contesto, il presente capitolo fornisce una panoramica dello stato dell'arte delle mani di presa robotiche. Dopo una classificazione generale delle tipologie di mani esistenti, verranno approfondite le due famiglie particolarmente significative precedentemente citate: le mani robotiche antropomorfe e le mani robotiche sotto-attuate, mettendo in luce i principi di funzionamento, i vantaggi, le limitazioni e le principali applicazioni di ciascuna tipologia.

2.2 Classificazione delle mani di presa

Le mani robotiche possono essere classificate secondo diversi criteri, ma uno dei più diffusi è basato sulla modalità con cui queste interagiscono fisicamente con l'oggetto da manipolare. Tale classificazione, infatti, differenzia le mani in base all'efficacia, la precisione e l'idoneità del dispositivo in funzione dell'ambiente in cui operano e del tipo di oggetti manipolati.

Una delle classificazioni più riconosciute in letteratura è quella proposta da Monkman et al. [10], che suddivide i dispositivi di presa in quattro categorie principali:

- *Impactive*: presa per contatto diretto meccanico, attraverso dita, pinze o ganasce.
- *Ingressive*: presa per penetrazione fisica della superficie dell'oggetto tramite aghi, uncini o punte.
- *Astrictive*: presa basata su forze di campo (magnetiche, elettrostatiche o a vuoto).
- *Contigutive*: presa mediante adesione superficiale, tramite fenomeni chimici, termici o fluidodinamici.

Questa classificazione si fonda sul principio fisico della presa, piuttosto che sulla geometria del dispositivo, e risulta utile per confrontare gripper con caratteristiche strutturali anche molto diverse.

2.2.1 Sistemi di presa impactive

I gripper *impactive* sono la tipologia più diffusa in ambito industriale grazie alla loro semplicità e robustezza durante il funzionamento. Questi operano andando ad applicare forze di contatto diretto tra le dita del dispositivo e l'oggetto, sfruttando uno o più attuatori per movimentare le parti mobili (dita o ganasce). I gripper *impactive* sono tipicamente costruiti con materiali rigidi e sono ideali per afferrare oggetti di forma regolare o geometrie note e non complesse.

Tra gli esempi più noti rientrano i gripper a due o tre dita come il PGN-plus-P della Schunk e le pinze adattive 2F-85 e 2F-140 della Robotiq, questi presentano un'elevata affidabilità e una facile integrazione nei sistemi robotici standard. Tuttavia, la loro efficacia può ridursi significativamente quando operano con oggetti di forma complessa, scivolosi o deformabili, a causa della scarsa adattabilità della loro presa [13].



Figura 2.1 - SCHUNK PGN-plus-P [14] (a sinistra) e Robotiq 2F-85 [15] (a destra)

2.2.2 Sistemi di presa ingressive

I gripper *ingressive* interagiscono con l'oggetto penetrando la sua superficie tramite punte, aghi, uncini o altri strumenti appuntiti. Sono usati prevalentemente in applicazioni di nicchia, come nella manipolazione di materiali tessili o fibrosi, come tessuti, fibre di vetro o di carbonio, e nella microrobotica, dove le tradizionali tecniche di presa potrebbero risultare non efficaci. Questi dispositivi non sono adatti per oggetti riutilizzabili o fragili, poiché possono danneggiarne la superficie durante la presa [10].

2.2.3 Sistemi di presa astrictive

Nei gripper *astricive*, la forza di presa è ottenuta senza contatto meccanico diretto, ma tramite campi di forza esterni o differenze di pressione. Le principali sottocategorie comprendono:

- *Gripper a vuoto* (vacuum grippers), ampiamente utilizzati nell'industria per il packaging ed il pick-and-place veloce.
- *Gripper magnetici*, efficaci con oggetti ferromagnetici.
- *Gripper elettroadesivi*, impiegati in settori avanzati come la micromanipolazione o la robotica bio-ispirata.

L'efficacia di questi gripper dipende dalle condizioni ambientali e superficiali dell'oggetto (pulizia, porosità, umidità), rendendoli più adatti a scenari controllati ed ambienti strutturati. Un esempio attuale è il Robotiq PowerPick SingleCup, un vacuum gripper flessibile progettato per integrarsi con robot collaborativi [16].



Figura 2.2 – Vacuum gripper Robotiq PowerPick SingleCup [17]

2.2.4 Sistemi di presa contigutiva

I sistemi contigutiva impiegano fenomeni di adesione superficiale per generare la forza di presa dopo il contatto fisico. Le forze adesive possono derivare da interazioni chimiche, effetti termici o fluidi viscosi. Questo approccio è altamente non invasivo, garantisce adattabilità anche su oggetti di forma irregolare o piccole dimensioni, ma presenta alcune limitazioni: è sensibile alle condizioni ambientali (temperatura, umidità, polverosità) e inadatto alla manipolazione di oggetti pesanti [10].

I sistemi di presa contigutiva basano il loro funzionamento su di una forza di adesione unidirezionale sviluppata dopo il contatto con l'oggetto, la natura della forza può essere principalmente di tre tipi: chimica, termica o a fluido. I vantaggi di questa tipologia di sistemi sono la non invasività degli stessi, l'elevata adattabilità a forme irregolari e ad oggetti di piccole dimensioni. Gli svantaggi sono la sensibilità di questi alle condizioni ambientali dove operano e l'impossibilità nel poterli usare con oggetti pesanti.

2.3 Mani robotiche antropomorfe

Le mani robotiche antropomorfe sono dispositivi progettati per replicare, almeno parzialmente, la forma anatomica e le capacità funzionali della mano umana, con l'obiettivo di riprodurre la destrezza, versatilità e adattabilità nell'interazione con oggetti di varia natura. Queste mani sono costituite da più dita articolate, in genere quattro più un pollice opponibile, e un numero elevato di gradi di libertà (DOF), che consente loro di afferrare, manipolare e interagire con oggetti di dimensioni, forme e materiali diversi, anche in scenari non strutturati.

Diversamente dai gripper rigidi tradizionali, le mani antropomorfe permettono di eseguire movimenti adattivi complessi e prese di precisione. Ciò le rende ideali per applicazioni avanzate nei settori della robotica di servizio, nella chirurgia robotica, nella telemanipolazione in ambienti pericolosi e nella protesica avanzata.

La progettazione di tali mani è però estremamente complessa: la necessità di replicare i movimenti articolati della mano umana impone sfide in termini di miniaturizzazione degli attuatori, coordinamento del controllo e integrazione sensoriale. In genere, le mani antropomorfe impiegano attuatori remoti (con trasmissioni a cavi o pulegge) per ridurre l'ingombro sul palmo e includono sensori di forza, posizione e/o tattili distribuiti lungo le dita.

Uno degli esempi commerciali più avanzati è la *Shadow Dexterous Hand*, sviluppata dalla Shadow Robot Company, dotata di 20 gradi di libertà attivi e oltre 100 sensori integrati. Questo dispositivo è progettato per imitare fedelmente i movimenti della mano umana e viene utilizzato in applicazioni che spaziano dalla robotica collaborativa alla manipolazione in ambienti remoti, anche con interfacce di controllo mioelettriche o via teleoperazione [18].



Figura 2.3 - Shadow Dextrous Hand [18]

Un secondo esempio notevole è la *Allegro Hand*, sviluppata da Wonik Robotics. Si tratta di una mano antropomorfa a 4 dita indipendenti e 16 DOF, del peso di circa 1 kg, molto utilizzata in contesti di ricerca accademica e robotica sperimentale. La sua compatibilità con il sistema ROS e la semplicità di interfacciamento la rendono ideale per test di controllo avanzato [19].



Figura 2.4 - Allegro Hand V5 (4F Plus) [19]

Nel campo della robotica bio-ispirata, un esempio di successo è la *qb SoftHand*, progettata da qbrobotics in collaborazione con l'Istituto Italiano di Tecnologia (IIT). Questa mano adotta una filosofia progettuale differente: utilizza un singolo attuatore centrale accoppiato a un sistema di tendini flessibili ed elastici, basato sul concetto di sinergie motorie. Grazie a questa architettura, la mano è in grado di adattarsi in modo naturale alla forma degli oggetti, riducendo la complessità di controllo pur mantenendo un'elevata capacità di presa [20]. Questa mano rappresenta una soluzione intermedia tra mani completamente antropomorfe e mani sottoattuate, e ha avuto ampia diffusione anche in ambito protesico.



Figura 2.5 - Qb SoftHand [20]

Dal punto di vista della ricerca accademica, le mani antropomorfe sono state protagoniste di alcuni dei progetti più iconici nella storia della robotica. Ad esempio, la *Utah/MIT Hand*, sviluppata negli anni '80, è considerata una delle prime mani robotiche con un'elevata destrezza: dotata di quattro dita e 16 gradi di libertà, usava cavi flessibili per la trasmissione del moto e sensori tattili su ciascun dito [21]. In Europa, un progetto simile è stato portato avanti dal DLR (Centro Aerospaziale Tedesco) con la realizzazione della *DLR Hand II*, dotata di 13 DOF attivi, sensori integrati e una modularità avanzata per esperimenti di manipolazione fine [22]. La *Gifu Hand II*, sviluppata in Giappone, ha ulteriormente spinto l'integrazione sensoriale distribuendo sensori tattili su tutte le falangi, ed è stata adottata in numerosi laboratori per studi di manipolazione realistica [23].

Nel complesso, le mani antropomorfe rappresentano una tecnologia in cui convergono meccanica avanzata, controllo distribuito e percezione sensoriale. Tuttavia, il loro elevato costo, la complessità di implementazione e la fragilità meccanica ne limitano tuttora l'utilizzo industriale su larga scala. Per questo motivo, si stanno sviluppando architetture ibride che mantengono una morfologia antropomorfa ma con approcci più semplici dal punto di vista attuativo, come vedremo nel prossimo paragrafo dedicato alle mani sottoattuate.

2.4 Mani robotiche sottoattuate

Le mani robotiche sottoattuate rappresentano una soluzione progettuale estremamente efficace, poiché permettono di bilanciare complessità meccanica, adattabilità e semplicità di controllo, risultando adatte per una vasta gamma di applicazioni, dalle protesi robotiche alla robotica di servizio.

Un meccanismo è definito sotto-attuato quando il numero di attuatori attivi è inferiore al numero di gradi di libertà (DOF) del sistema. Questa caratteristica consente di ridurre significativamente il peso, il costo e la complessità del sistema di controllo, pur mantenendo un'elevata versatilità funzionale. In particolare, la sotto-attuazione consente alle dita robotiche di adattarsi passivamente alla forma dell'oggetto durante la presa, sfruttando i vincoli meccanici e la cedevolezza strutturale per determinare la configurazione finale delle articolazioni [9].

Questa adattabilità di forma (*shape adaptation*) è ottenuta grazie all'uso di trasmissioni flessibili o di accoppiamenti meccanici cedevoli, spesso supportati da elementi elastici. Il comportamento che si ottiene è altamente robusto: l'oggetto afferrato contribuisce direttamente a determinare l'orientamento delle dita, evitando la necessità di controllare ogni giunto in modo indipendente. In contesti non strutturati o in ambienti operativi ostili, tale caratteristica si traduce in un'elevata affidabilità e adattabilità alle variazioni esterne.

Due strategie progettuali principali sono comunemente adottate:

- Trasmissioni flessibili a tendini e pulegge, che conferiscono grande adattabilità e leggerezza, adatte a contesti in cui è importante ridurre la massa in movimento (es. protesi e robot collaborativi);
- Meccanismi rigidi a link articolati, che garantiscono maggiore robustezza e resistenza, tipici di applicazioni industriali o ambienti gravosi [24].



Figura 2.6 - Pisa/IIT SoftHand [25]

Tra le mani robotiche sottoattuate più rilevanti in letteratura e nel commercio troviamo:

- *Pisa/IIT SoftHand*: sviluppata dall'Università di Pisa e dall'Istituto Italiano di Tecnologia, questa mano adotta un singolo attuatore e un sistema a tendini con elasticità distribuita, ispirato al concetto di sinergie motorie. Le dita si muovono lungo una traiettoria predefinita, ma si adattano automaticamente alla forma degli oggetti durante la chiusura, garantendo prese stabili e flessibili con un controllo a bassa dimensionalità [11].
- *Robotiq 3-Finger Adaptive Gripper*: progettata per applicazioni industriali collaborative, questa mano combina sotto-attuazione meccanica e compliance strutturale per afferrare oggetti con geometrie variabili. Ogni dito può piegarsi in modo indipendente in funzione del contatto, pur condividendo gli attuatori [26].
- *RBO Hand 2*: sviluppata presso la Technische Universität Berlin, è un esempio emblematico di mano soft e sottoattuatora. Realizzata con attuatori pneumatici deformabili, essa permette prese morbide e sicure anche su oggetti fragili o irregolari, sfruttando la deformazione elastica delle dita per conformarsi automaticamente all'oggetto da afferrare [24].



Figura 2.7 – Robotiq 3-Finger Adaptive Gripper [13]

3 Mano di presa

3.1 Introduzione

La mano di presa a tre dita sottoattuata, realizzata in [6] nell'ambito dello stesso macro-progetto, rappresenta il dispositivo su cui si basa il presente lavoro. Si tratta di una mano di presa progettata per essere leggera, compatta, affidabile e dotata di una buona adattabilità agli oggetti da afferrare, pur mantenendo un'elevata semplicità costruttiva.

Il dispositivo si basa su un principio di sottoattuazione meccanica passiva, ovvero la capacità di adattarsi alla forma dell'oggetto da afferrare pur essendo comandato da un solo attuatore. La sua struttura è stata ottimizzata rispetto ai precedenti prototipi con l'obiettivo di garantire la massima efficienza operativa in ambienti confinati.

Questo capitolo fornisce una descrizione approfondita della mano, esaminando dettagliatamente la struttura meccanica, il sistema di attuazione, il meccanismo di trasmissione e la cinematica del sistema, elementi essenziali per comprendere il modello MATLAB sviluppato nella presente tesi.

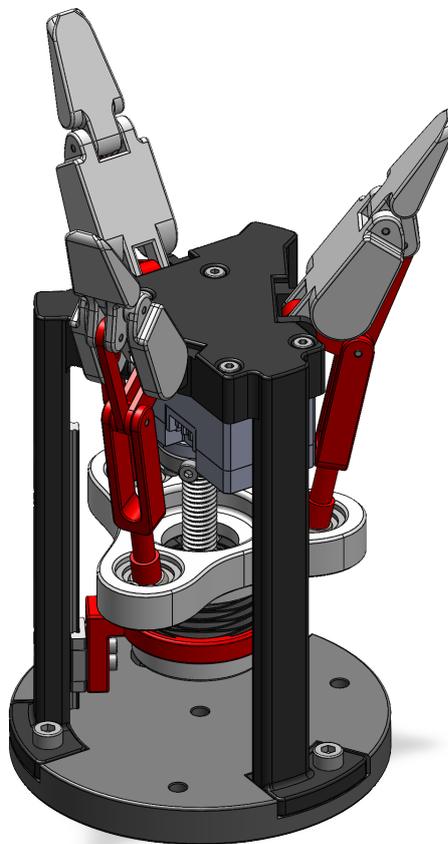


Figura 3.1 - Vista CAD isometrica della mano di presa

3.2 Architettura generale del sistema

La mano adotta una configurazione meccanica costituita da tre dita identiche, disposte in modo radiale attorno ad un asse centrale con una simmetria di 120° . Ogni dito è composto da due falangi rigide: una prossimale (collegata direttamente al telaio) e una distale (collegata alla falange prossimale). Il sistema ha quindi sei gradi di libertà complessivi, gestiti in configurazione sottoattuata da un unico attuatore elettrico centrale.

Il movimento delle dita è dato dalla piastra motrice che trasla lungo l'asse verticale grazie all'azione del servomotore. Il moto della piastra si trasmette ad una piastra triangolare flottante, vincolata a quella motrice mediante una molla di compressione, la quale movimentata le tre bielle relative alle tre dita attraverso giunti sferici.

Quello che rende il sistema adattativo è quindi la presenza della piastra triangolare e della molla di compressione: quando durante il movimento un dito entra in contatto con un oggetto prima delle altre, il sistema consente alle restanti dita di completare la chiusura, permettendo di effettuare una presa efficace anche in presenza di un oggetto con geometrie irregolari.

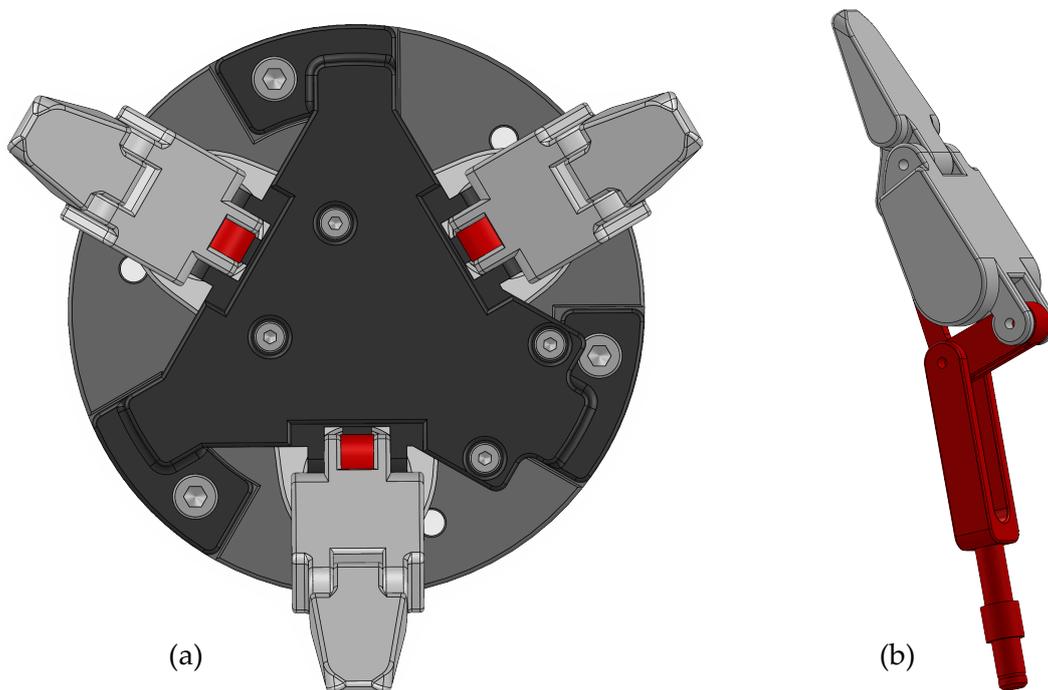


Figura 3.2 – Vista dall'alto della mano di presa (a) e struttura singolo dito (b)

3.3 Descrizione meccanica del sistema

3.3.1 Telaio

Il telaio della mano di presa ha una funzione strutturale fondamentale, in quanto ospita l'attuatore, il sistema di trasmissione e costituisce la base di fissaggio per le dita. È stato progettato in due parti divise e principali:

- Parte superiore, che ha la funzione di palmo della mano e presenta i tre supporti per le dita, disposte a 120° . Questa parte accoglie anche il servomotore centralmente nella parte inferiore del palmo.
- Parte inferiore, che funge da base d'appoggio e da interfaccia meccanica per il montaggio della mano su un banco prova o su di un sistema robotico.

La geometria del telaio è stata ottimizzata, rispetto al precedente prototipo, in modo da massimizzare la compattezza e al tempo stesso facilitare l'assemblaggio dei componenti interni. Le due parti del telaio sono accoppiate mediante viti e dadi, garantendo robustezza e possibilità di ispezione e/o manutenzione.

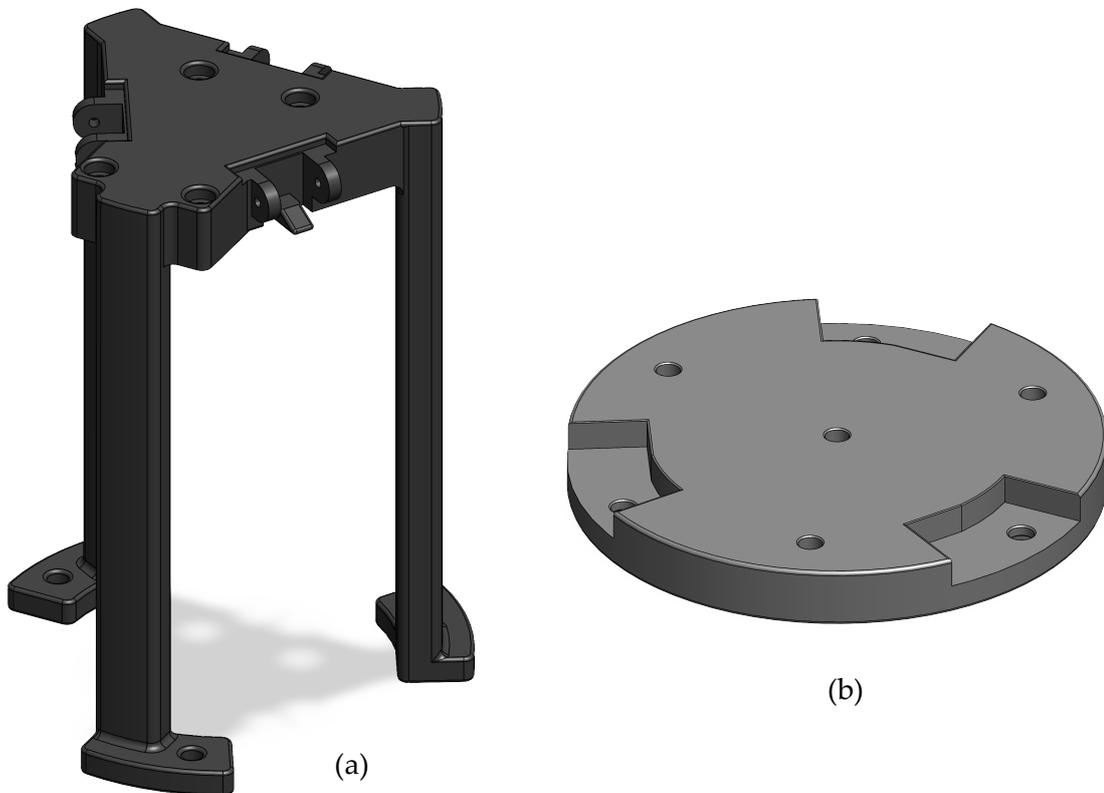


Figura 3.3 – Parte superiore (a) e parte inferiore del telaio (b)

3.3.2 Sistema di attuazione

Il sistema di attuazione della mano di presa è stato progettato per garantire compattezza, efficienza e controllo preciso della presa. Al centro del sistema, fissato alla parte inferiore del palmo, si trova un servomotore *Dynamixel XC330-T288-T*, scelto per le sue caratteristiche mecatroniche avanzate e la compatibilità con ambienti di controllo come MATLAB.

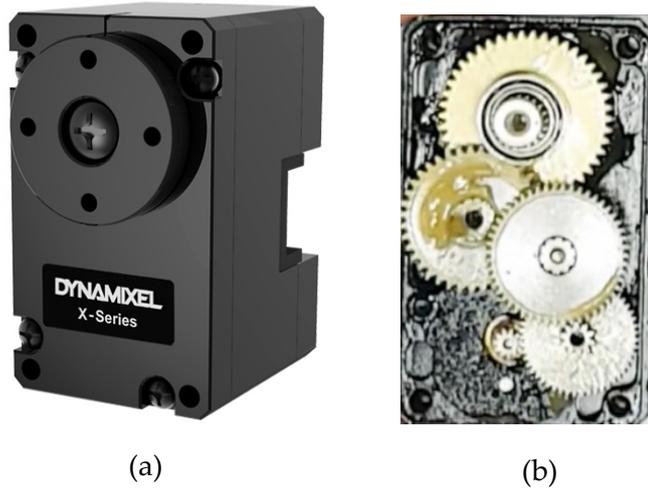


Figura 3.4 - Dynamixel XC330-T288-T (a) e servomotore privo di scocca (b) [27]

Il servomotore trasmette il moto a una vite trapezoidale multiprincipio, accoppiata a una madrevite fissata alla piastra motrice. Questo accoppiamento costituisce un classico sistema vite-madrevite, che converte il moto rotatorio dell'albero motore in un moto traslatorio lineare della piastra.



Figura 3.5 - Sistema vite-madrevite Igus [28]

Per garantire il collegamento tra l'albero del motore e la vite, è stata realizzata una piastrina di giunzione stampata in 3D, che svolge anche la funzione di adattatore meccanico. Questa piastrina è fissata da un lato alla flangia del servomotore mediante viti, e dall'altro accoglie l'estremità della vite tramite interferenza meccanica e viti di bloccaggio.

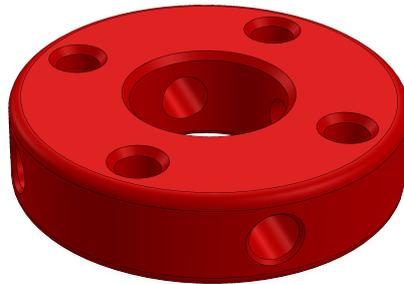


Figura 3.6 - Piastrina di giunzione

Il sistema consente così di ottenere una traslazione verticale della piastra motrice in conseguenza della rotazione del motore, rendendo possibile il movimento nelle varie situazioni di funzionamento delle dita. L'utilizzo del servomotore, rispetto al motore stepper utilizzato nel primo prototipo, consente inoltre di:

- lavorare in anello chiuso, grazie all'encoder integrato;
- monitorare posizione, corrente e temperatura;
- implementare strategie di controllo avanzate (es. rilevamento del contatto tramite corrente assorbita).

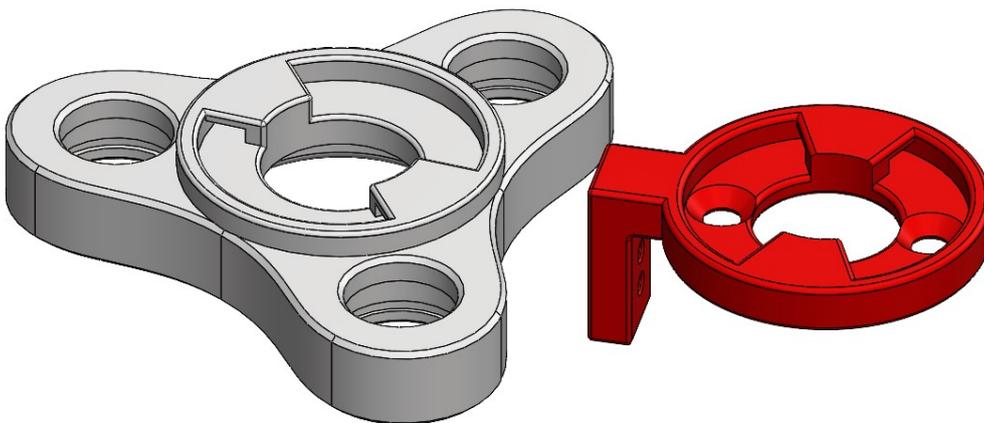


Figura 3.7 - Piastra triangolare (a sinistra) e piastra motrice (a destra)

3.3.3 Sistema di guida e trasmissione del moto

Il cuore del movimento della mano robotica è costituito dalla trasmissione meccanica tra il servomotore e le dita, ottenuta mediante un sistema a vite-madrevite accoppiato a una guida lineare a ricircolo di sfere. La vite, azionata dal servomotore, trasforma il moto rotatorio in uno spostamento assiale della piastra motrice, la quale scorre verticalmente guidata dalla guida lineare IKO LWLC3C1R60T0H. Questo componente, fissato a uno dei montanti del telaio, garantisce coassialità, stabilità e riduce l'attrito radente, andando a migliorare la regolarità del moto.

La piastra motrice è collegata alla piastra triangolare mediante una molla a onde multiple, che consente una certa libertà di rotazione relativa. Questa caratteristica è fondamentale per realizzare il comportamento adattativo delle dita: in fase di chiusura, se una delle tre dita incontra un oggetto, la piastra triangolare può inclinarsi, permettendo alle altre dita di completare la presa. Questo comportamento adattativo del sistema avviene senza la necessità di sensori o di un controllo attivo, ma grazie alla presenza della molla ad onde multiple in compressione tra le due piastre.

Ogni dito è collegato alla piastra triangolare tramite un giunto sferico, da cui parte la catena cinematica comprendente una biella, una manovella e le due falangi. Il moto iniziale unicamente traslatorio si trasforma in movimento angolare delle dita grazie al meccanismo composto dal:

- sistema biella-manovella, che comanda la falange prossimale;
- quadrilatero articolato, che regola la falange distale.

In questo paragrafo si fornisce solo una panoramica funzionale del movimento: una trattazione più approfondita della cinematica delle dita e delle modalità di presa (di precisione e adattativa) sarà riportata nel Capitolo 4.

Mano di presa

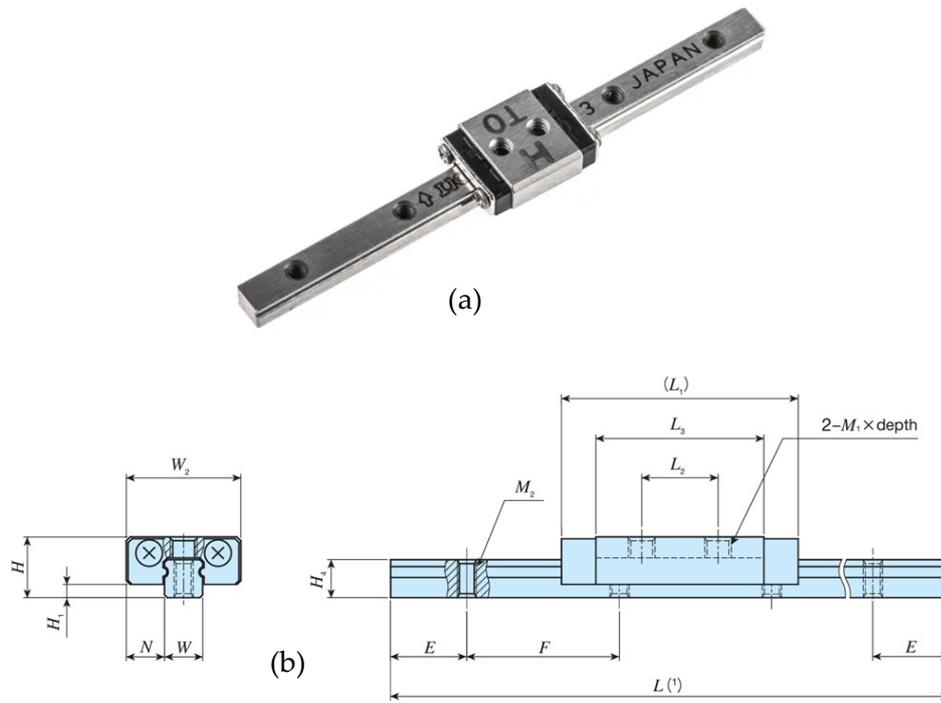


Figura 3.8 - Guida lineare IKO Nippon Thompson LWLC3C1R60T0H (a) e viste di dettaglio guida lineare (b) [29]

4 Metodologia di analisi e simulazione

4.1 Introduzione

In questo capitolo sono presentati e discussi dettagliatamente i metodi adottati per lo sviluppo e la validazione del modello cinematico della mano robotica sottoattuata a tre dita, oggetto di questa tesi. Il lavoro parte dal prototipo fisico della mano sviluppato precedentemente [6], con l'obiettivo di riprodurre e analizzarne il comportamento cinematico attraverso un approccio simulativo.

Lo scopo principale del presente lavoro è stato quello di creare uno strumento di simulazione che consenta una rappresentazione accurata e verificabile della cinematica del dispositivo. Ciò permetterà non solo di predire con affidabilità il comportamento atteso dal sistema reale, ma anche di facilitare eventuali ottimizzazioni future del progetto.

Il processo metodologico adottato comprende inizialmente la ricostruzione e l'adattamento accurato del modello CAD originale utilizzando il software SolidWorks, con particolare attenzione alla definizione precisa dei vincoli cinematici e meccanici. Successivamente, si è proceduto alla realizzazione di simulazioni del movimento tramite SolidWorks Motion, per validare l'integrità e la coerenza del modello CAD.

Parallelamente, è stato sviluppato uno script dedicato in MATLAB per simulare il movimento della mano robotica in modo flessibile e rapido, offrendo una soluzione alternativa e complementare alla simulazione esclusivamente basata sul CAD.

Infine, i risultati ottenuti dal modello MATLAB sono stati confrontati con quelli derivanti dalle simulazioni SolidWorks, mostrando una significativa coerenza tra i due approcci. Questa comparazione conferma la validità e l'efficacia del metodo proposto, offrendo una solida base per ulteriori sviluppi e ottimizzazioni del sistema robotico.

4.2 Assemblaggio del modello CAD in SolidWorks

4.2.1 Ricostruzione e adattamento del modello CAD

Il primo passo del lavoro ha riguardato la ricostruzione completa dell'assieme della mano robotica sottoattuata, a partire dai modelli CAD delle singole parti del sistema realizzati in [6]. Al fine di rendere l'assieme idoneo alla simulazione del movimento tramite il tool SolidWorks Motion Study, si è reso necessario ridefinire l'albero di assemblaggio e l'applicazione di vincoli cinematici e geometrici adeguati.

L'assemblaggio è stato inizialmente condotto seguendo le specifiche geometriche riportate in [6]. Tuttavia, per consentire una corretta esecuzione delle analisi mediante il tool, tali vincoli sono stati in parte modificati e adattati secondo le linee guida per la costruzione di modelli solidi e stabili in ambiente Motion Study. In particolare, è fondamentale che la catena cinematica sia ben definita e priva di ambiguità o sovrapposizioni nei gradi di libertà.

A tal proposito, sono state seguite le seguenti accortezze progettuali:

- Tutte le parti fisse del modello sono state definite tali all'interno dell'albero di SolidWorks, in generale è obbligatorio che almeno una parte dell'assieme sia fissa.
- Gli accoppiamenti tra le parti sono stati definiti esclusivamente utilizzando le superfici reali dei componenti e non facendo uso delle geometrie di riferimento globali dell'assieme, quali piani, assi o origini.
- È stata posta particolare attenzione all'eliminazione di gradi di libertà residui, che avrebbero potuto compromettere la stabilità numerica della simulazione o generare movimenti non desiderati.
- È stato mantenuto il numero di accoppiamenti di primo livello al minimo necessario, privilegiando quelli più rappresentativi del comportamento fisico reale. Ad esempio, come descritto nel Paragrafo 4.2.2, nel caso dei giunti rotanti tra falangi, è stato impiegato il vincolo di cardine fisso anziché una combinazione di accoppiamenti concentrico e coincidente, al fine di rappresentare più fedelmente il comportamento della cerniera meccanica.

4.2.2 Definizione dei vincoli geometrici e cinematici

Una volta ricostruito l'assieme della mano robotica sottoattuata, è stato necessario definire con precisione i vincoli geometrici e cinematici tra i componenti, al fine di rappresentare fedelmente il comportamento meccanico del sistema reale e renderlo idoneo alle simulazioni in ambiente SolidWorks Motion.

I vincoli sono stati progettati per riprodurre le reali condizioni di vincolo presenti nel prototipo fisico, e per garantire la corretta trasmissione del moto dall'attuatore alle dita attraverso la catena cinematica composta da piastra motrice, piastra triangolare, bielle e falangi. Di seguito si riportano i principali accoppiamenti inseriti:

- Giunti rotazionali delle dita: le articolazioni tra falange prossimale e telaio, tra falange prossimale e distale, e tra i vari link del sistema (manovella, bielle) sono state modellate tramite accoppiamenti meccanici del tipo cardine fisso. Questa tipologia di accoppiamento è preferibile rispetto alla combinazione di vincoli concentrico e coincidente, in quanto garantisce una maggiore stabilità nella definizione e nel calcolo dei gradi di libertà all'interno dell'assieme.
- Traslazione della piastra motrice: per simulare la corsa verticale della piastra motrice lungo la guida lineare, è stato definito un vincolo prismatico che consente il solo moto traslatorio lungo l'asse Z, impedendo ogni rotazione e assicurando la coassialità con la vite motrice.
- Accoppiamento tra piastra motrice e piastra triangolare: essendo la piastra triangolare collegata elasticamente alla piastra motrice tramite una molla, è stato modellato un collegamento semi-vincolato che consente una rotazione passiva in risposta al contatto differenziale delle dita con l'oggetto. In SolidWorks, ciò è stato simulato lasciando liberi alcuni gradi di rotazione vincolando la traslazione verticale attraverso superfici coincidenti.
- Giunti sferici tra piastra triangolare e dita: i collegamenti meccanici reali sono giunti sferici (SKF GE 4 C), perciò in CAD sono stati rappresentati mediante vincoli che consentono la libera rotazione in tutte le direzioni. Questo permette alle bielle di trasmettere correttamente il moto alle dita.

Durante la fase di definizione dei vincoli, è stata posta particolare attenzione all'eliminazione di gradi di libertà indesiderati o ridondanti, che avrebbero potuto compromettere la

stabilità della simulazione o generare errori numerici. La struttura vincolata così ottenuta si è dimostrata stabile e coerente, come verificato mediante test preliminari di simulazione.

Grazie a questa configurazione, il modello CAD è in grado di riprodurre il comportamento cinematico del prototipo, sia nella presa sincrona (quando tutte le dita si muovono insieme), sia nella presa adattativa (quando una o più dita si arrestano per contatto, e le altre proseguono la chiusura). Questa modellazione consente quindi di analizzare in dettaglio, nelle fasi successive, la cinematica dei singoli elementi e il comportamento complessivo della mano in diverse condizioni operative.

4.2.3 Gestione dei vincoli e dei gradi di libertà in SolidWorks Motion

Nel processo di definizione dell'assieme CAD della mano robotica, come già detto, è stato fondamentale assicurare una corretta gestione dei vincoli meccanici, al fine di ottenere un sistema cinematicamente determinato e idoneo alla simulazione in ambiente SolidWorks Motion. A tal fine, sono stati seguiti i principi progettuali raccomandati da SolidWorks per il controllo dei gradi di libertà (GdL) e la definizione delle catene cinematiche.

SolidWorks Motion consente di eseguire simulazioni solo su assiemi in cui ogni corpo mobile è vincolato in modo congruente. Per tale motivo, è stato evitato l'utilizzo di vincoli derivati da geometrie di riferimento globali dell'assieme (come piani principali o origine), privilegiando accoppiamenti diretti tra superfici reali dei componenti.

Per garantire la robustezza del modello sono state rispettate le seguenti regole:

- Ogni componente deve avere tutti i gradi di libertà bloccati, oppure deve essere libero di muoversi solo secondo le condizioni previste dalla catena cinematica.
- Almeno una parte deve essere fissata nell'assieme, preferibilmente impostandola come "fissa" nell'albero di modellazione (ad esempio il palmo della mano).
- I vincoli utilizzati devono essere riconosciuti dal Motion solver: non tutti gli accoppiamenti disponibili in ambiente CAD sono supportati da Motion Study.

Come mostrato in Tabella 4.1, Tabella 4.2 e Tabella 4.3 i vincoli riconosciuti dal solver sono suddivisi in tre categorie: standard, avanzati e meccanici.

Ogni vincolo riduce un certo numero di gradi di libertà al componente. Ad esempio:

- Un cardine elimina cinque GdL lasciando solo una rotazione libera (come richiesto per le falangi).

- Un giunto sferico lascia 3 rotazioni, bloccando le 3 traslazioni.

Nel caso dell'assieme della mano robotica, i vincoli sono stati selezionati in modo da:

- Simulare fedelmente i giunti rotanti tra falangi con vincoli di tipo cardine;
- Consentire libertà di rotazione nei giunti sferici tra piastra triangolare e bielle;
- Vincolare la guida della piastra motrice con accoppiamenti concentrico + distanza, per riprodurre la traslazione lungo l'asse z;
- Eliminare ogni vincolo ridondante o sovrapposto, utilizzando lo strumento *Motion Study Degrees of Freedom* per il controllo finale.

L'utilizzo corretto dei vincoli ha permesso di ottenere un modello cinematicamente determinato, privo di gradi di libertà inutilizzati o eccessivamente vincolato, rendendo possibile una simulazione fluida e coerente del movimento in SolidWorks Motion.

Tipo di vincolo	Traslazioni bloccate	Rotazioni bloccate	Gdl bloccati
Coincidente (facce piane)	1	2	3
Coincidente (punto-punto)	3	0	3
Parallelo	0	2	2
Perpendicolare (tra facce)	0	1	1
Concentrico (cilindri)	2	2	4
Concentrico (sfere)	3	0	3
Blocca	3	3	6

Tabella 4.1 - Accoppiamenti standard SolidWorks

Tipo di vincolo	Traslazioni bloccate	Rotazioni bloccate	Gdl bloccati
Centro profilo	Non è riconosciuto da SolidWorks Motion		
Simmetrico	Non è riconosciuto da SolidWorks Motion		
Larghezza	Non è riconosciuto da SolidWorks Motion		
Percorso	2	0	2
Lineare	0	1	1
Distanza limite	0	2	2
Angolo limite	0	0	0

Tabella 4.2 - Accoppiamenti avanzati SolidWorks

Tipo di vincolo	Traslazioni bloccate	Rotazioni bloccate	Gdl bloccati
Camma	2	2	4
Asola	Non è riconosciuto da SolidWorks Motion		
Cardine fisso	3	2	5
Ingranaggio	3	2+2	7
Sistema a cremagliera	0	1	1
Vite	2	3	5
Giunto cardanico	3	1	4

Tabella 4.3 – Accoppiamenti meccanici SolidWorks

Un aspetto fondamentale nell'analisi del movimento in Motion è la corretta analisi dei gradi di libertà (DOF) del sistema. È importante verificare in fase preliminare l'assenza di vincoli ridondanti, i quali potrebbero compromettere l'integrità della simulazione. SolidWorks Motion, infatti, è in grado di eseguire simulazioni soltanto su sistemi meccanicamente determinati e non sovraconnessi.

Per effettuare questa verifica, è consigliabile impostare una simulazione preliminare in ambiente Motion Study. Il procedimento standard prevede l'impostazione di un'analisi di tipo *Motion Analysis* con una durata di simulazione pari a 1 secondo e con l'unico parametro fisico attivo impostato come gravità. Una volta eseguita la simulazione, è possibile accedere alla voce "Gradi di libertà" (Degrees of Freedom) dal menu "Accoppia" all'interno dell'albero di MotionManager.

Il sistema apre quindi una finestra riepilogativa (Figura 4.1) in cui viene mostrato il numero totale di gradi di libertà attualmente presenti nel modello. Di particolare rilevanza è la riga inferiore, relativa al numero di vincoli ridondanti individuati. SolidWorks, qualora rilevasse delle ridondanze, le elimina automaticamente per poter risolvere le equazioni del moto e garantire il movimento del sistema. Tuttavia, questa rimozione automatica può comportare l'eliminazione di vincoli essenziali, non distinguendo tra vincoli non necessari e quelli funzionalmente indispensabili alla cinematica progettata.

Nel caso in cui vengano rilevati vincoli ridondanti, SolidWorks li elenca nella parte inferiore della finestra DOF, fornendo un elenco dettagliato degli accoppiamenti rimossi. È dunque

buona norma, in presenza di vincoli eliminati automaticamente, verificare attentamente la loro natura, riformulare la catena cinematica se necessario e assicurarsi che la rimozione non modifichi il comportamento reale del modello.

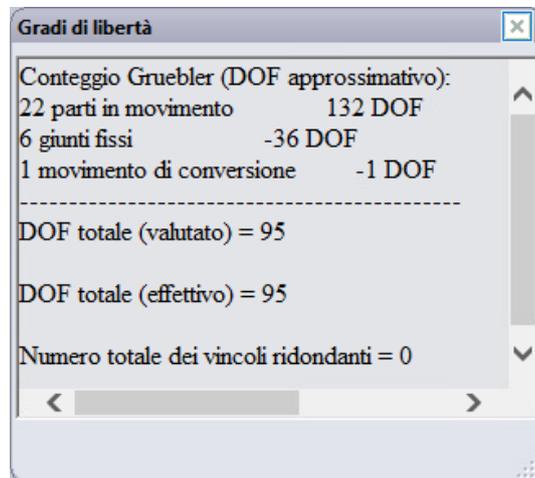


Figura 4.1 – Finestra relativa ai Gradi di libertà del sistema in SolidWorks Motion

4.3 Simulazioni in Solidworks Motion

Al fine di analizzare il comportamento cinematico della mano robotica sottoattuata a tre dita, sono state condotte simulazioni utilizzando il modulo *Motion Study* di SolidWorks. L'obiettivo primario di questa fase è verificare la correttezza e coerenza delle equazioni cinematiche analitiche sviluppate in [6], confrontando le configurazioni articolari restituite da tali equazioni con i risultati ottenuti tramite la simulazione CAD.

In secondo luogo, l'ambiente SolidWorks è stato utilizzato per simulare diverse configurazioni di funzionamento della mano, osservando l'evoluzione cinematica delle dita durante la chiusura in scenari differenziati. I risultati di queste simulazioni, presentati nel Capitolo 5, forniranno una base di confronto diretta con il modello MATLAB, che costituisce il cuore di questo lavoro.

4.3.1 Setup delle simulazioni

La simulazione è stata utilizzando uno studio di tipo *Motion Analysis* per la sua capacità di gestire in modo accurato i vincoli meccanici e riprodurre con precisione il comportamento cinematico dei sistemi articolati. Tuttavia, in linea con gli obiettivi di questa fase del lavoro, l'analisi si è limitata a un approccio puramente cinematico, tralasciando gli aspetti dinamici come forze, masse, momenti d'inerzia o attriti.

Il modello CAD della mano robotica è stato importato e assemblato rispettando le condizioni geometriche e cinematiche definite in fase progettuale.

Per simulare la chiusura della mano, è stato imposto un motore lineare virtuale applicato al punto centrale della piastra triangolare, con una velocità costante verso l'alto pari a 1 mm/s.

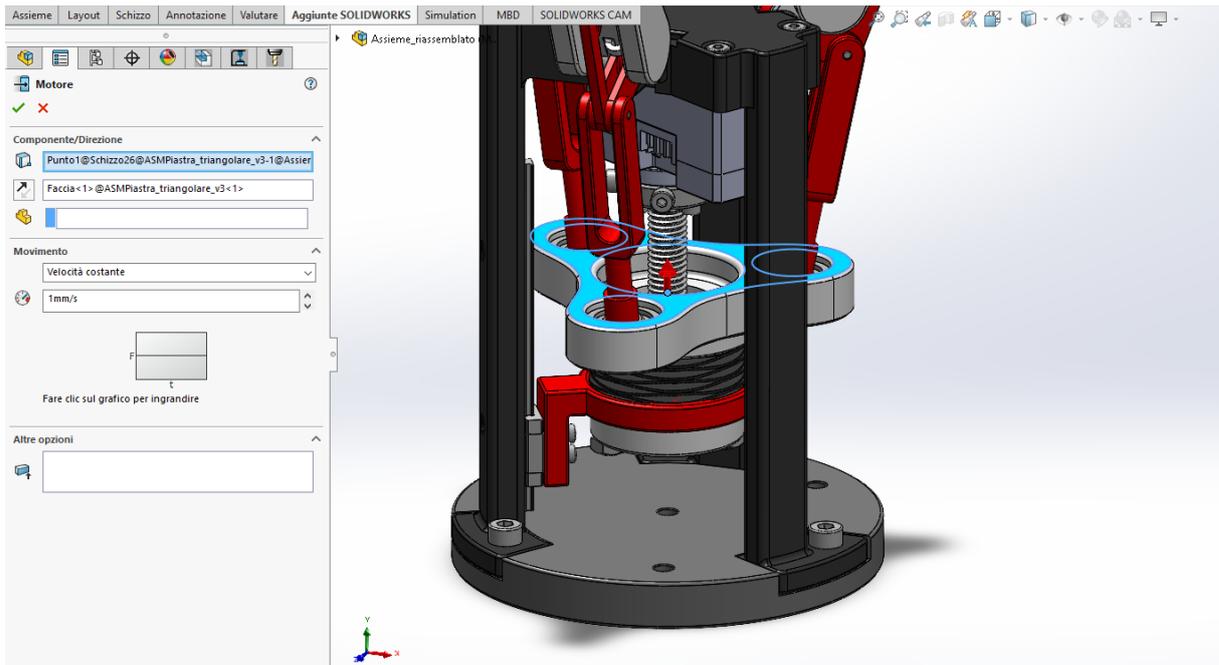


Figura 4.2 - Impostazione del motore lineare in SolidWorks Motion

Tale moto rappresenta l'effetto cinematico della traslazione impressa dal servomotore tramite il sistema vite-madrevite e costituisce l'unico ingresso attivo del sistema, coerentemente con il principio di sotto-attuazione che caratterizza il dispositivo.

Dal punto di vista computazionale, il calcolo della soluzione cinematica è eseguito per passi temporali discreti (*time steps*), durante i quali SolidWorks Motion calcola iterativamente la posizione dei componenti fino a soddisfare tutti i vincoli cinematici. In ciascun passo, il software risolve le equazioni differenziali algebriche del moto utilizzando un metodo iterativo basato su Newton-Raphson modificato, che cerca la convergenza delle soluzioni per ogni istante temporale.

In fase di configurazione della simulazione, sono state impostate le seguenti opzioni principali:

- Metodo di integrazione: è stato adottato il metodo *GSTIFF*, il default di SolidWorks Motion, particolarmente adatto per analisi cinematiche. Questo metodo, pur essendo molto accurato nel calcolo degli spostamenti, presenta alcune limitazioni nella precisione della derivazione numerica delle accelerazioni, le quali possono generare picchi temporanei nei grafici.
- Fotogrammi al secondo: è stato impostato un valore elevato per ridurre l'ampiezza del passo temporale, rendere più fluida l'animazione e aumentare la risoluzione

spaziale e temporale dei risultati. Un valore di 50 fps rappresenta una scelta adeguata a ottenere studi di movimento sufficientemente precisi, senza generare un'eccessiva quantità di dati al momento dell'esportazione delle traiettorie dei punti.

- Precisione: il parametro di tolleranza dell'errore è stato settato con un valore pari a $1e-8$, coerente con quanto suggerito per analisi accurate e simulazioni di durata media. Una precisione maggiore permette di migliorare la convergenza e ridurre l'accumulo di errori nei risultati.
- Variabile indipendente del ciclo: è stato scelto di utilizzare la velocità ciclo come parametro indipendente, andando ad impostare un valore standard pari ad uno.

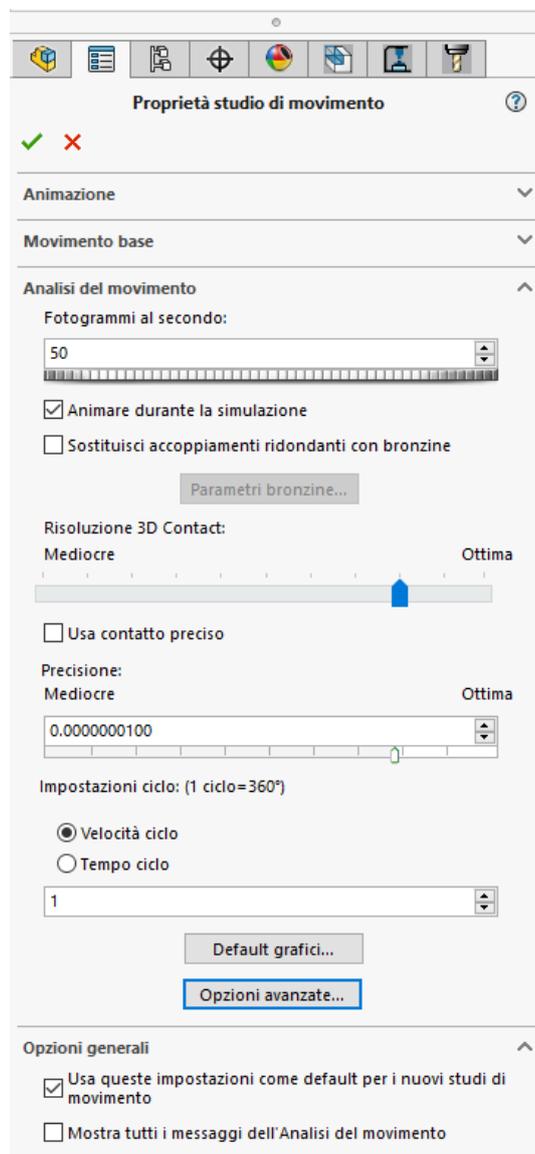


Figura 4.3 - Proprietà studio del movimento in SolidWorks Motion

La corretta definizione dei vincoli cinematici, inclusi i giunti sferici tra dita e piastra triangolare e i cardini tra le falangi, è stata essenziale per garantire la stabilità numerica della simulazione. È stato inoltre fondamentale assicurare che almeno una parte dell'assieme (il telaio) fosse definita come fissa, e che non ci fossero gradi di libertà residui o ridondanze che potessero alterare il comportamento del modello.

In conclusione, il setup così configurato ha permesso di ottenere una simulazione stabile e coerente, utile sia per validare le equazioni cinematiche analitiche del singolo dito, sia per generare dati di riferimento per il successivo confronto con il modello sviluppato in MATLAB.

4.3.2 Validazione delle equazioni cinematiche del singolo dito

Uno degli obiettivi principali della simulazione in SolidWorks Motion è stato la verifica della correttezza delle equazioni cinematiche analitiche sviluppate in [6] per descrivere il comportamento del singolo dito della mano sottoattuata. Tali equazioni permettono di calcolare, in funzione dell'alzata verticale della piastra motrice, la configurazione angolare assunta dalla falange prossimale e da quella distale nel tempo.

La procedura di validazione ha seguito una strategia comparativa, basata sul confronto tra:

- i risultati ottenuti in SolidWorks, in cui sono state osservate le rotazioni delle falangi ed esportati i dati relativi alle traiettorie dei loro punti caratteristici, successivamente elaborati per l'analisi;
- i valori teorici calcolati mediante le equazioni analitiche trovate in [6], implementate e risolte numericamente in uno script MATLAB dedicato.

La simulazione è stata impostata in modo da riprodurre fedelmente la condizione di moto definita nel modello analitico: è stata imposta una traslazione verticale uniforme della piastra triangolare, pari a 1 mm/s, in assenza di carichi esterni o contatti con oggetti. In questo scenario ideale, il comportamento cinematico è determinato unicamente dalla geometria del meccanismo e dai vincoli imposti.

La validazione è stata condotta su due diverse configurazioni operative della mano:

- una presa di precisione, in cui si simula una presa in cui solo le falangi distali entrano in contatto con l'oggetto da afferrare;
- una presa adattativa, in cui sia le falangi prossimali che distali partecipano al contatto e al bloccaggio ideale dell'oggetto.

In entrambe le configurazioni, è stato considerato il comportamento solidale delle tre dita, in modo da verificare la coerenza tra il modello cinematico analitico e il comportamento osservato nel sistema simulato completo. Questo ha permesso di valutare anche il comportamento dell'intera struttura sottoattuata, non limitandosi alla validazione isolata del dito singolo.

Durante la fase iniziale della simulazione, è stata osservata una rotazione solidale delle due falangi attorno al punto O_1 , in accordo con la prima fase descritta nel modello teorico. Nel caso della presa adattativa con l'avanzare dell'alzata, il sistema ha raggiunto il punto in cui, teoricamente, si innesca il passaggio alla seconda fase di movimento: il blocco della falange prossimale e la rotazione indipendente della distale tramite il quadrilatero articolato O_1BCO_2 . Anche questo comportamento è stato correttamente replicato nella simulazione, confermando la validità qualitativa della sequenza di fasi cinematiche prevista analiticamente. Le varie fasi del movimento del singolo dito verranno riportate in modo dettagliato nel Paragrafo 4.4.3.

Da SolidWorks sono state esportate le coordinate nello spazio dei punti caratteristici del sistema meccanico per ciascun dito: A, B, C, O_1 , O_2 e T. Tali dati sono stati importati ed elaborati in MATLAB, dove, attraverso apposite relazioni geometriche, sono stati calcolati gli angoli caratteristici delle dita di interesse:

- α : angolo della manovella rispetto all'orizzontale,
- δ : angolo della falange prossimale rispetto alla verticale,
- θ : angolo relativo tra le due falangi,
- γ : angolo del link O_2C rispetto all'orizzontale,
- χ : angolo del link BC rispetto alla verticale.

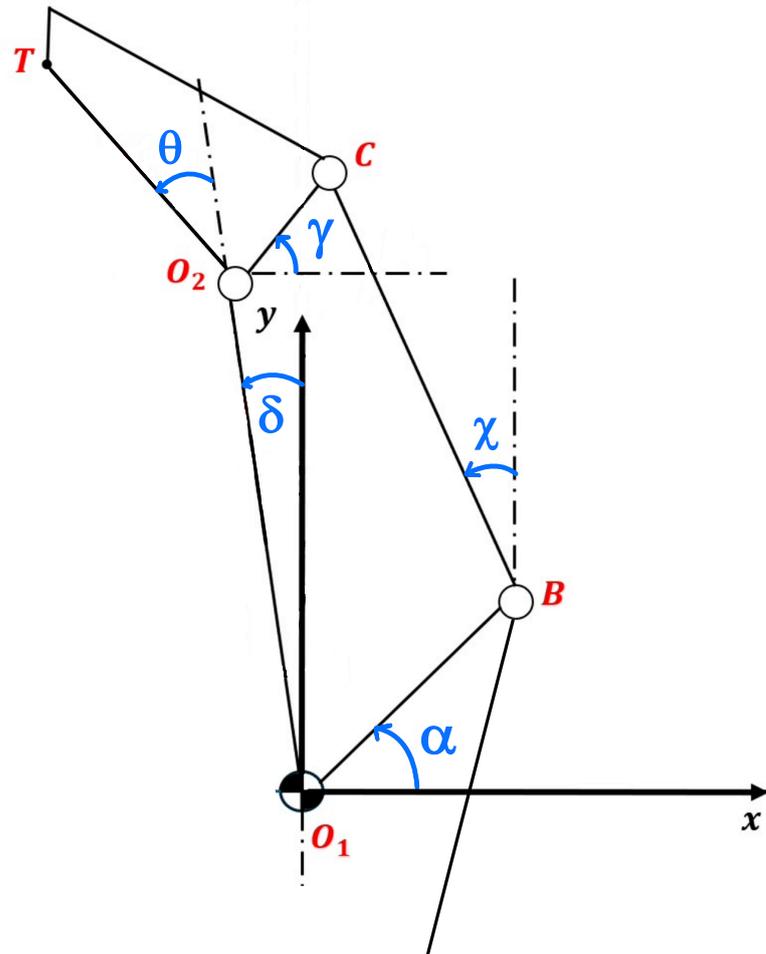


Figura 4.4 – Singolo dito con riportati gli angoli caratteristici

I due insiemi di risultati, quelli ottenuti dal modello cinematico analitico e quelli derivati dalla simulazione CAD, sono risultati fortemente coerenti, con scostamenti trascurabili e comunque entro il margine di tolleranza numerica associato alla precisione della simulazione. Questo ha confermato l'accuratezza del modello teorico e la consistenza della simulazione SolidWorks, che è stata correttamente configurata e rappresenta in maniera affidabile la cinematica del prototipo fisico.

Questo confronto ha permesso di concludere che:

- le equazioni analitiche forniscono una descrizione accurata del comportamento cinematico del dito;
- il modello CAD e la simulazione in Motion sono stati costruiti correttamente e rappresentano fedelmente la geometria e i vincoli del prototipo reale;

- la simulazione può essere utilizzata con affidabilità come base per la successiva validazione del modello MATLAB completo a tre dita, in scenari di presa più complessi.

I grafici e i confronti quantitativi tra le due metodologie saranno presentati nel Paragrafo 5.4 dedicato all'analisi dei risultati simulativi.

4.4 Sviluppo del modello Matlab

4.4.1 Obiettivo del modello

L'obiettivo principale dello sviluppo del modello in MATLAB è stato quello di simulare il comportamento cinematico della mano robotica sottoattuata, in particolare:

- riprodurre il movimento delle dita in funzione dello spostamento verticale della piastra motrice;
- estendere il modello da un singolo dito a tutta la mano a tre dita, tenendo conto delle caratteristiche di simmetria e sottoattuazione;
- ricostruire l'evoluzione degli angoli caratteristici delle dita ($\alpha, \delta, \theta, \gamma, \chi$) rispetto all'alzata del punto centrale della piastra triangolare O;
- confrontare i risultati con quelli ottenuti dalla simulazione in SolidWorks Motion;
- ottenere una visualizzazione grafica del movimento delle tre dita, utile sia a fini di analisi che per la comunicazione visiva del funzionamento del meccanismo.

Il modello consente inoltre di simulare e analizzare in anticipo diverse configurazioni operative, anche non ancora simulate in SolidWorks, offrendo così uno strumento utile per lo studio del comportamento della mano. Rispetto all'ambiente CAD, MATLAB offre maggiore controllo numerico, velocità di calcolo e versatilità nelle analisi.

4.4.2 Struttura del modello

Il modello MATLAB è composto da due blocchi distinti:

- uno script principale, responsabile dell'inizializzazione dei parametri, della definizione della traiettoria di input (alzata della piastra motrice), della chiamata alla function simulativa e del successivo plot dei risultati;
- una function (*sim3.m*), che costituisce la parte computazionale del modello. All'interno di questa function sono implementate le equazioni cinematiche, insieme alla gestione delle fasi di contatto e delle condizioni di arresto per ciascuna falange.

La function è progettata per simulare simultaneamente le tre dita della mano robotica a partire da un ingresso comune: lo spostamento verticale del punto centrale della piastra triangolare. A ogni step, la function verifica per ciascun dito se le falangi prossimali e distali

possono continuare a ruotare oppure devono bloccarsi a causa del raggiungimento dell'angolo target dato in input.

La struttura della function è rappresentata da un diagramma di flusso, che descrive in dettaglio la sequenza di rotazioni e blocchi delle falangi. Le fasi 1 e 2, che corrispondono rispettivamente alla rotazione iniziale solidale delle sole falangi prossimali e alla fase successiva di blocco di una delle falangi prossimali, sono comuni a tutte le simulazioni. A partire dalla fase 3, il sistema può evolversi in modo diverso a seconda dell'ordine con cui si verificano gli stop delle falangi.

Vengono di seguito riportate alcune parti del diagramma completo, divise in più figure per una migliore leggibilità:

- **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.:** sezione iniziale del diagramma fino alle possibili fasi 3 del movimento;
- **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.:** sottosezione relativa a due delle tre possibili fasi 4 del movimento nel caso di stop della falange prossimale 1;
- Figura 4.8: sottosezione relativa alla terza possibile fase 4 del movimento nel caso di stop della falange prossimale 1;
- Figura 4.8: sottosezione relativa alle possibili fasi 4 del movimento nel caso di stop della falange distale 3.

La suddivisione adottata permette una maggiore chiarezza espositiva. Non viene riportata la sottosezione relativa alle eventuali fasi 4 in corrispondenza dello stop della falange prossimale 2, in quanto tale configurazione segue esattamente la stessa logica illustrata nella Figura 4.6 e Figura 4.7, con l'unica differenza che le dita 1 e 3 risultano invertite. Ciascuna sequenza del flusso è gestita nel codice MATLAB tramite strutture condizionali e cicli iterativi, permettendo di simulare tutte le varie possibili casistiche.

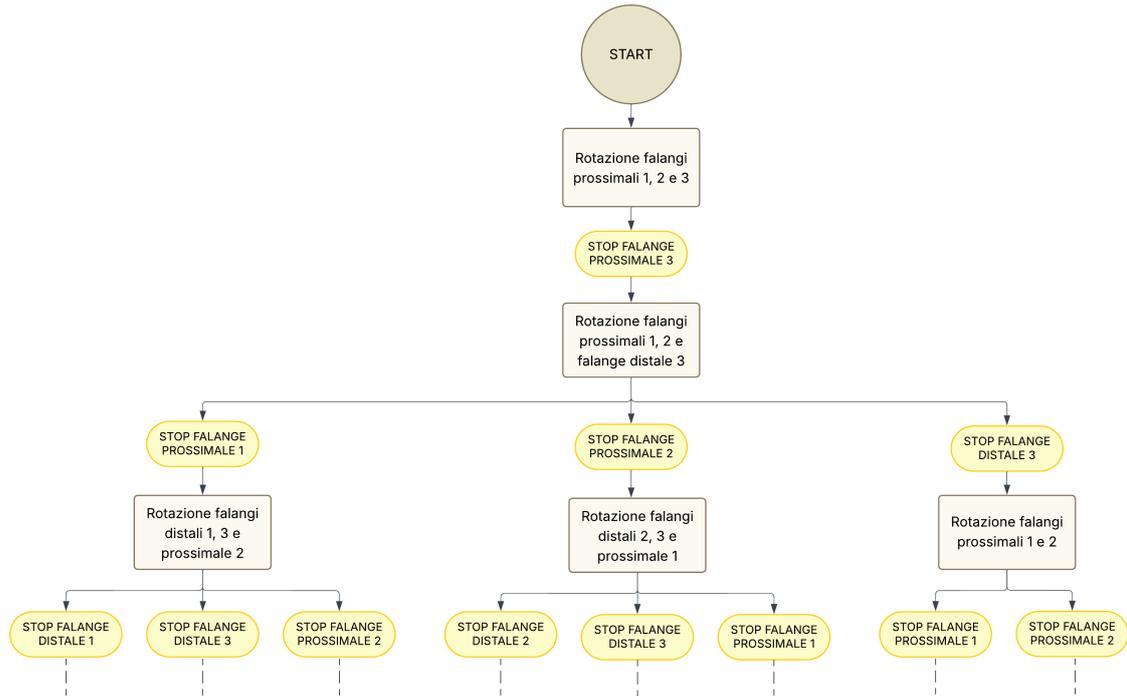


Figura 4.5 – Sezione iniziale del diagramma della function sim3.m

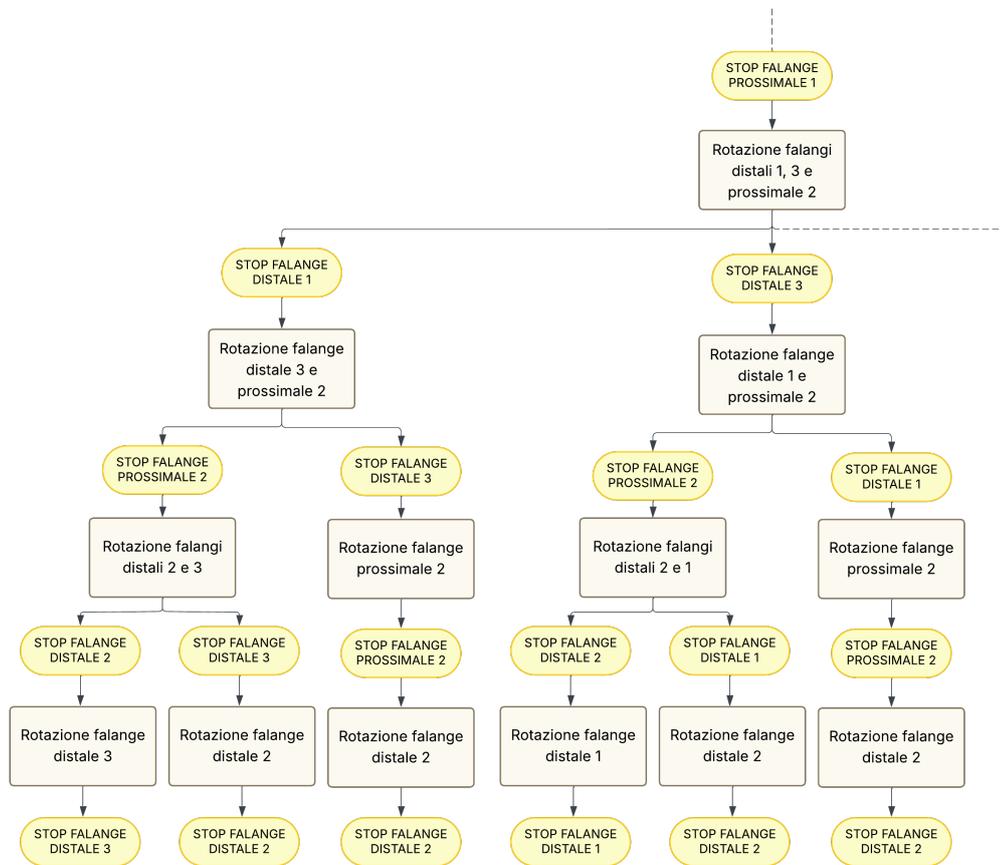


Figura 4.6 - Sottosezione del diagramma della function sim3.m relativa a due delle tre possibili fasi 4 del movimento nel caso di stop della falange prossimale 1

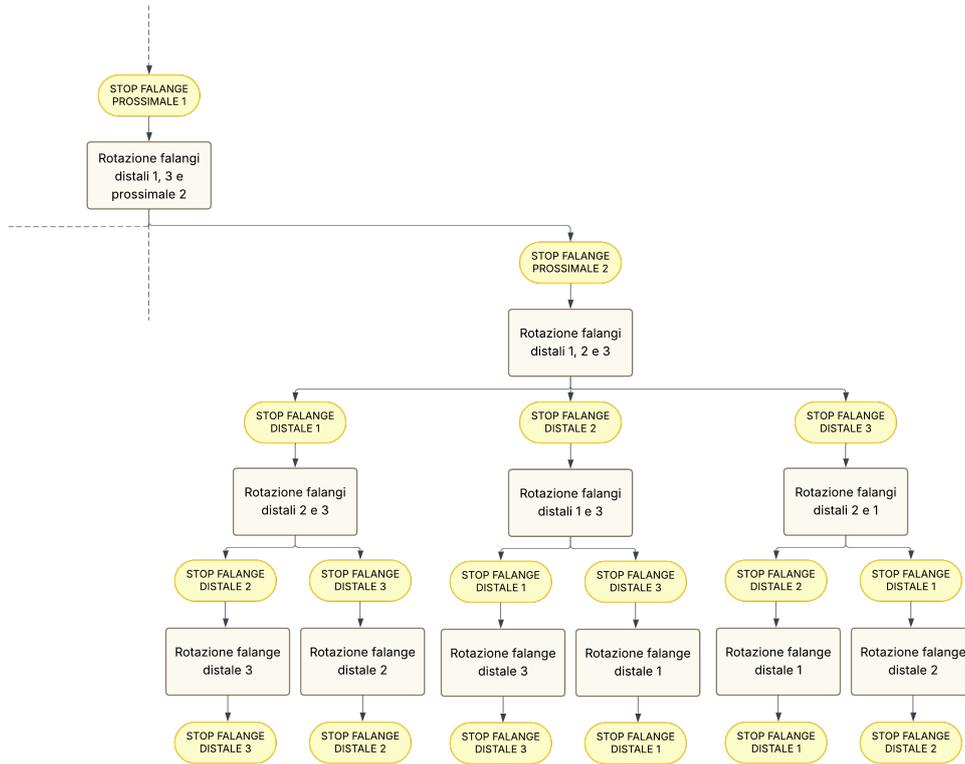


Figura 4.7 - Sottosezione del diagramma della function sim3.m relativa alla terza possibile fase 4 del movimento nel caso di stop della falange prossimale 1

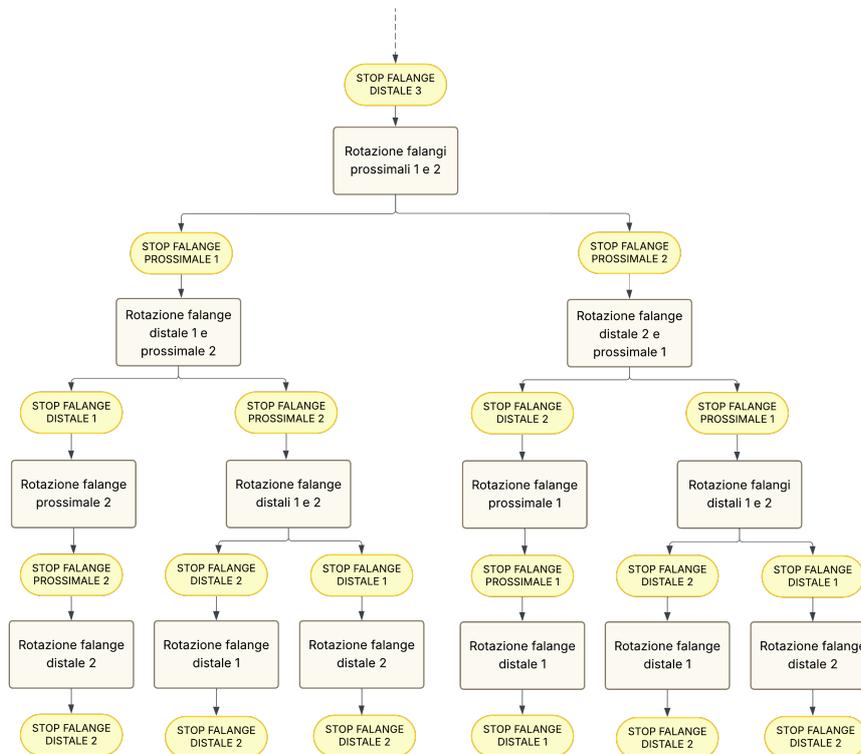


Figura 4.8 – Parte finale del diagramma di flusso caratterizzato dal blocco della falange distale 3 nella fase 3

4.4.3 Modellazione cinematica del singolo dito

La modellazione della cinematica del singolo dito costituisce la base teorica e computazionale del modello MATLAB. Ogni dito è composto da una falange prossimale e una falange distale, collegate tra loro mediante un meccanismo a quadrilatero articolato, mosso da un sistema biella-manovella collegato alla piastra triangolare. Di seguito in Figura 4.9 viene riportato uno schema semplificato del singolo dito in cui sono riportati i vari punti caratteristici (A, B, C, O_1 , O_2 e T) e il riferimento ai nomi dei vari link che costituiscono il sistema (l , r , m , n , L_1 e L_2). Si noti come il punto A viene rappresentato come vincolato ad una sola traslazione in direzione verticale, ipotesi questa che viene mantenuta anche all'interno del modello MATLAB del sistema.

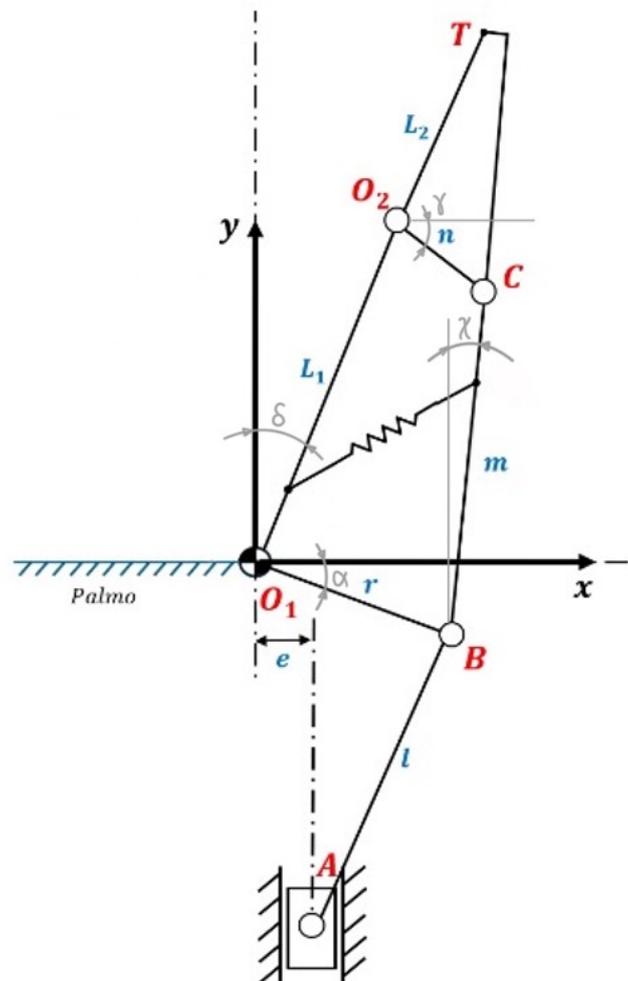


Figura 4.9 - Schema meccanico semplificato del singolo dito

Il singolo dito durante il movimento completo del sistema può trovarsi nelle seguenti tre fasi distinte, che vengono simulate all'interno di ogni fase del movimento nella funzione *sim3.m*:

1. Fase 1 – Rotazione rigida iniziale: le due falangi si comportano come un corpo rigido unico che ruota attorno al punto O_1 , trascinate dalla biella AB collegata alla piastra triangolare. In questa fase non ci sono falangi bloccate, e la configurazione del dito è determinata dall'alzata verticale del punto di attacco del dito sulla piastra triangolare.
2. Fase 2 – Blocco della falange prossimale: quando la falange prossimale entra in contatto con un oggetto simulato o raggiunge l'angolo target, il punto O_2 diventa fisso. La falange distale continua a ruotare, azionata dal link BC attraverso il quadrilatero O_1BCO_2 .
3. Fase 3 – Blocco completo: una volta che anche la falange distale entra in contatto o raggiunge l'angolo target, il dito si arresta completamente.

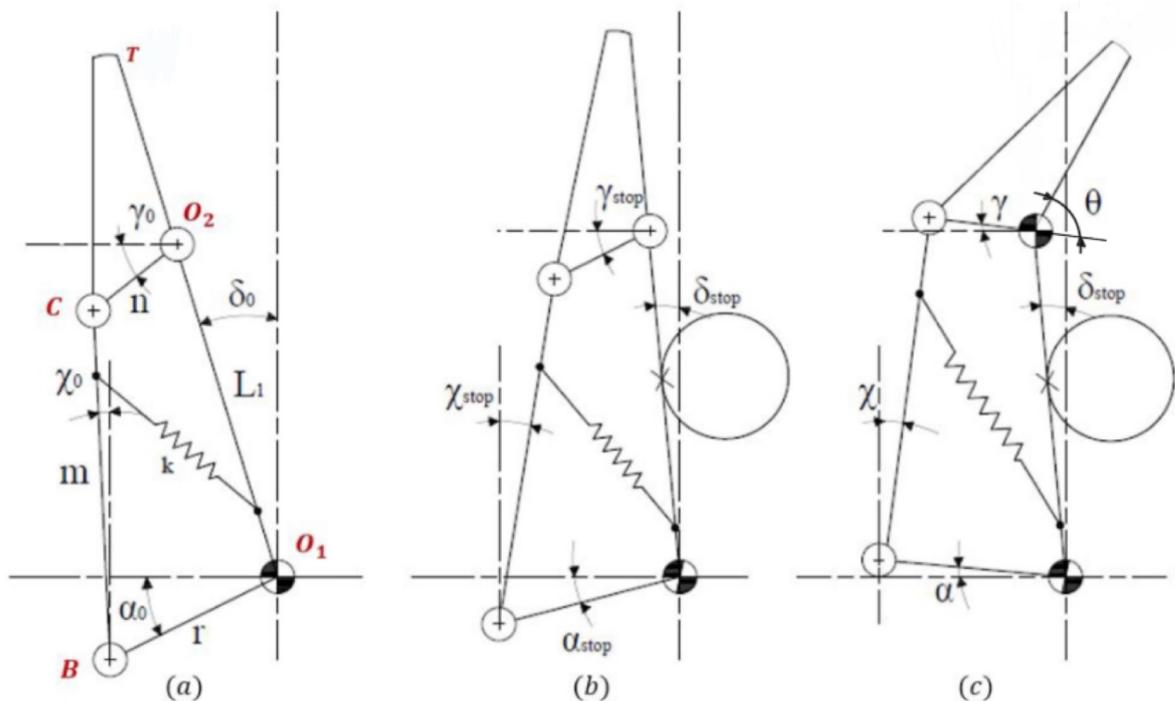


Figura 4.10 - Schema del quadrilatero articolato: (a) posizione iniziale; (b) configurazione nell'istante di stop della falange prossimale; (c) configurazione generica con rotazione della falange distale

Per ciascun passo della simulazione, il modello calcola per ogni singolo dito:

- la posizione del punto A di attacco sulla piastra triangolare;
- la lunghezza e direzione della biella AB, con la quale si determina l'angolo α ;

- la posizione dei punti B e O_1 , da cui si ricava δ , l'angolo della falange prossimale rispetto alla verticale;
- la risoluzione del quadrilatero articolato O_1BCO_2 , che consente di calcolare:
 - γ : angolo della falange distale rispetto al telaio,
 - θ : angolo relativo tra falange prossimale e distale,
 - χ : angolo interno alla biella BC.

Le equazioni, riportate per intero in Appendice A, di tipo geometrico-trigonometrico basate sulla lunghezza dei link e sulle condizioni di chiusura dei triangoli e quadrilateri:

- per α e δ si utilizzano relazioni dirette sulle coordinate note;
- per γ , θ e χ si risolve un sistema non lineare che impone la chiusura del quadrilatero;
- i punti B, C, O_1 , O_2 e T vengono aggiornati a ogni passo, garantendo coerenza geometrica tra tutti i componenti.

Il modello gestisce autonomamente il passaggio da una fase all'altra, controllando le condizioni di blocco impostate in input dall'utente e aggiornando gli angoli caratteristici delle falangi solo se queste risultano in rotazione (non bloccate). Questa struttura consente una simulazione realistica, capace di adattarsi all'evoluzione delle condizioni cinematiche del sistema.

4.4.4 Modellazione cinematica della piastra triangolare

La piastra triangolare svolge un ruolo fondamentale nella trasmissione del moto verso le dita della mano robotica. In condizioni ideali e simmetriche, essa si muove verticalmente mantenendo la propria geometria rigida e inalterata, trasmettendo il moto in modo solidale alle tre bielle collegate alle rispettive dita. Tuttavia, in condizioni di funzionamento più complesse, ad esempio quando una o più dita entrano in contatto con un oggetto prima delle altre, la piastra può ruotare, deformando di fatto la traiettoria dei suoi vertici in termini cinematici.

In queste condizioni, non è stato possibile definire un modello analitico esplicito che descriva il comportamento della piastra triangolare in presenza di contatti adattativi. La complessità del sistema, unita alla natura passiva e sottoattuata del meccanismo, rende infatti estremamente difficile ricavare equazioni chiuse che descrivano la posizione dei vertici della piastra in funzione dell'alzata del punto centrale. Questo è dovuto al fatto che il sistema di

equazioni da determinare risulterebbe molto ampio, complesso e soprattutto non lineare, rendendo poco praticabile un approccio analitico.

Per superare questa limitazione, è stato adottato un approccio empirico e numerico:

- Sono state condotte numerose simulazioni cinematiche in SolidWorks Motion, analizzando il comportamento delle tre dita in diverse condizioni operative e variando, di simulazione in simulazione, la durata del tempo in cui ciascun dito veniva mantenuto in una determinata configurazione;
- Da ciascuna simulazione sono stati estratti i dati di traiettoria dei tre punti di attacco delle bielle sulla piastra triangolare;
- Per ogni punto mediante un opportuno script, è stato eseguito un fitting polinomiale, al fine di descrivere il movimento del vertice rispetto allo spostamento verticale del punto centrale della piastra. È stato adottato un polinomio di quarto ordine, poiché rappresenta un buon compromesso tra accuratezza nella ricostruzione e complessità del polinomio;
- I polinomi ottenuti sono stati infine implementati nel modello MATLAB, permettendo di aggiornare la posizione dei vertici della piastra durante la simulazione.

L'errore introdotto dall'utilizzo dei polinomi all'interno del modello MATLAB, confrontato con i risultati ottenuti dalle simulazioni in SolidWorks Motion, è risultato generalmente contenuto, pur mostrando variazioni da una simulazione all'altra a seconda della configurazione delle dita. In ogni caso, la deviazione osservata è rimasta entro margini accettabili, consentendo una buona coerenza tra i due ambienti simulativi. L'integrazione di questi dati interpolati ha inoltre permesso al modello MATLAB di replicare con fedeltà il comportamento adattativo della chiusura delle dita in presa.

Questa strategia ha permesso di riprodurre in modo fedele il comportamento cinematico della piastra triangolare anche nel caso di simulazioni di presa complesse. I polinomi garantiscono una descrizione continua e fluida del moto dei punti di attacco, evitando discontinuità o incoerenze geometriche durante la simulazione.

L'utilizzo di questi dati interpolati ha avuto un impatto significativo sulla qualità del modello, rendendo possibile la simulazione completa a tre dita in scenari di presa complessi e realizzando un compromesso efficace tra accuratezza, efficienza computazionale e robustezza numerica.

I grafici relativi ai fitting polinomiali, effettuati per ciascun punto di attacco sulla piastra triangolare per le varie casistiche di movimento, saranno presentati e discussi nel Paragrafo 5.3.

4.4.5 Struttura iniziale dello script principale MATLAB e richiamo alla function

Nella parte iniziale dello script principale sviluppato in MATLAB, vengono definite tutte le grandezze geometriche e cinematiche necessarie alla simulazione. Si tratta di parametri fisici noti, ricavati dal modello CAD, e valori iniziali misurati o derivati dal comportamento reale del prototipo.

In particolare, si definiscono:

- le lunghezze dei componenti principali del meccanismo (manovella, biella, falangi, ecc.);
- l'eccentricità e la distanza tra il centro della piastra e i punti di attacco;
- gli angoli iniziali di configurazione (mano aperta), tra cui α_0 , β_0 e δ_0 , determinati sulla base del finecorsa delle cerniere meccaniche;
- gli angoli di arresto δ_{stop} e θ_{stop} delle falangi prossimali e distali per ciascun dito, specificati in gradi e convertiti in radianti per il calcolo.

Successivamente, vengono calcolate grandezze ausiliarie come i coefficienti $h1$, $h2$, ..., $h5$, necessari per la risoluzione delle equazioni quadratiche legate al quadrilatero articolato.

```
% Dimensioni geometriche
r = 12;      %lunghezza manovella [mm]
l = 41.6;   %lunghezza biella [mm]
e = 2.45;   %eccentricità [mm]
...
w = 18.15; %distanza centro palmo e punti O1 [mm]

% Condizioni iniziali (mano aperta completamente)
alpha0 = -deg2rad(27); % è fisso e definito dal riscontro fisico (finecorsa della cerniera)
beta0 = asin((-r.*cos(alpha0)+e)./l); %angolo tra biella e verticale
...
delta0 = -deg2rad(35.49); %angolo iniziale di L1 rispetto alla verticale;

% Definizione angoli di stop
deg_stop = [0,-15,-30,10,20,30];
delta1_deg_stop = deg_stop(1);
delta2_deg_stop = deg_stop(2);
...
theta3_deg_stop = deg_stop(6);

% Quadrilatero articolato
% grandezze ausiliarie per le equazioni di secondo grado
h1 = l1/r;
h2 = l1/m;
...
h5 = (l1^2+r^2+n^2-m^2)/(2*n*r);

% Valori grandezze allo stop della falange distale -> grandezze_STOP
delta1_stop = deg2rad(delta1_deg_stop);
theta1_stop = deg2rad(theta1_deg_stop);
alpha1_stop = alpha0 + delta1_stop - delta0;
```

Metodologia di analisi e simulazione

```

gamma1_stop = gamma0 + delta1_stop - delta0;
...
chi3_stop = chi0 + delta3_stop - delta0;
beta3_stop = asin((e-r*cos(alpha3_stop))/l);

% Matrice di rotazione per 120°
R = [cos(deg2rad(120)), 0, sin(deg2rad(120)); 0, 1, 0; -sin(deg2rad(120)), 0, cos(deg2rad(120))];

%% Punto O piastra triangolare
v_0 = 1; %velocità del punto O verso l'alto [mm/s]
h_max = 15; %corsa [mm]
...
O(:,2) = v_0*t; %vettore posizione verticale punto O

%% Inizializzazione matrici coordinate punti (x,y,z)
A1 = zeros(N,3);
B1 = zeros(N,3);
...
P = zeros(1,3);

alpha1 = zeros(1,N);
beta1 = zeros(1,N);
...
zeta3 = zeros(1,N);

```

Un punto fondamentale dello script è la gestione delle diverse casistiche cinematiche, ovvero delle possibili configurazioni di movimento che derivano da combinazioni diverse degli angoli di stop. Lo script verifica quali dita hanno falangi prossimali che si bloccano simultaneamente, e in funzione di questa analisi, seleziona il corretto ordine del set di parametri da passare alla function *sim3*.

```

%% Definizione casistiche
%Calcolo parametro A e alpha per primo calcolo stop falange prossimale
A = ((O(:,2)-d0).^2+r^2+e^2-1^2)/(2*r);
alpha = 2*atan(((O(:,2)-d0)+sqrt((O(:,2)-d0).^2-A.^2+e^2))./(A+e));

%% Blocco falangi prossimali simultaneo %%
if (delta1_stop == delta2_stop) && (delta1_stop == delta3_stop)

    if (theta1_stop == theta2_stop) && (theta1_stop == theta3_stop)
        [i_alpha1_STOP,i_theta1_STOP,i_alpha2_STOP,i_theta2_STOP,i_alpha3_STOP,i_theta3_STOP,...
         alpha1,beta1,delta1,chi1,gamma1,eta1,zeta1,alpha2,beta2,delta2,chi2,gamma2,eta2,...
         zeta2,alpha3,beta3,delta3,chi3,gamma3,eta3,zeta3,A1,B1,C1,T1,O1_1,O2_1,A2,B2,C2,T2,...
         O1_2,O2_2,A3,B3,C3,T3,O1_3,O2_3] = sim3(O,d0,r,e,l,q,m,N,delta0,alpha0,pyA,h1,h2,...
         h3,h4,h5,L1,L2,P,w,R,alpha1_stop,theta1_stop,alpha2_stop,theta2_stop,alpha3_stop,theta3_stop);

    elseif (theta1_stop == theta2_stop) && (theta1_stop ~= theta3_stop)

        if (theta1_stop > theta3_stop)
            [i_alpha1_STOP,i_theta1_STOP,i_alpha2_STOP,...,O2_3] = sim3(O,d0,...,theta3_stop);

        elseif (theta1_stop < theta3_stop)
            [i_alpha1_STOP,i_theta1_STOP,i_alpha3_STOP,...,O2_3] = sim3(O,d0,...,theta3_stop);
        end

    ...

    elseif (theta1_stop ~= theta2_stop) && (theta2_stop == theta3_stop)
        [i_alpha1_STOP,i_theta1_STOP,i_alpha2_STOP,...,O2_3] = sim3(O,d0,...,theta3_stop);
    end
end

%% Blocco di 2 falangi prossimali simultaneo %%
if (delta1_stop == delta2_stop) && (delta1_stop ~= delta3_stop)
    if (delta1_stop > delta3_stop)
        [i_alpha1_STOP,i_theta1_STOP,i_alpha2_STOP,i_theta2_STOP,i_alpha3_STOP,i_theta3_STOP,...
         alpha1,beta1,delta1,chi1,gamma1,eta1,zeta1,alpha2,beta2,delta2,chi2,gamma2,eta2,...
         zeta2,alpha3,beta3,delta3,chi3,gamma3,eta3,zeta3,A1,B1,C1,T1,O1_1,O2_1,A2,B2,C2,T2,...
         O1_2,O2_2,A3,B3,C3,T3,O1_3,O2_3] = sim3(O,d0,r,e,l,q,m,N,delta0,alpha0,pyA,h1,h2,...
         h3,h4,h5,L1,L2,P,w,R,alpha1_stop,theta1_stop,alpha2_stop,theta2_stop,alpha3_stop,theta3_stop);

    elseif (delta1_stop < delta3_stop)
        [i_alpha3_STOP,i_theta3_STOP,i_alpha2_STOP,...,O2_1] = sim3(O,d0,...,theta1_stop);
    end
end

```

```

...
elseif (delta2_stop == delta3_stop) && (delta2_stop ~= delta1_stop)
    if (delta2_stop > delta1_stop)
        [i_alpha2_STOP,i_theta2_STOP,...,O2_1] = sim3(0,d0,r,e,l,q,m,N,delta0,alpha0,pyA,h1,h2,...
            h3,h4,h5,L1,L2,P,w,R,alpha2_stop,theta2_stop,alpha3_stop,theta3_stop,alpha1_stop,theta1_stop);

    elseif (delta2_stop < delta1_stop)
        [i_alpha1_STOP,i_theta1_STOP,...,O2_3] = sim3(0,d0,...,theta3_stop);
    end

%%% Blocco di nessuna falange prossimale simultaneo %%%
elseif (delta1_stop ~= delta2_stop) && (delta1_stop ~= delta3_stop) && (delta2_stop ~= delta3_stop)
    if (delta1_stop > delta2_stop) && (delta1_stop > delta3_stop) && (delta2_stop > delta3_stop)
        [i_alpha1_STOP,i_theta1_STOP,i_alpha2_STOP,i_theta2_STOP,i_alpha3_STOP,i_theta3_STOP,...
            alpha1,beta1,delta1,chi1,gamma1,eta1,zeta1,alpha2,beta2,delta2,chi2,gamma2,eta2,...
            zeta2,alpha3,beta3,delta3,chi3,gamma3,eta3,zeta3,A1,B1,C1,T1,O1_1,O2_1,A2,B2,C2,T2,...
            O1_2,O2_2,A3,B3,C3,T3,O1_3,O2_3] = sim3(0,d0,r,e,l,q,m,N,delta0,alpha0,pyA,h1,h2,...
            h3,h4,h5,L1,L2,P,w,R,alpha1_stop,theta1_stop,alpha2_stop,theta2_stop,alpha3_stop,theta3_stop);

    elseif (delta1_stop > delta2_stop) && (delta1_stop > delta3_stop) && (delta2_stop < delta3_stop)
        [i_alpha1_STOP,i_theta1_STOP,i_alpha3_STOP,...,O2_2] = sim3(0,d0,...,theta2_stop);

    ...

    elseif (delta3_stop > delta1_stop) && (delta3_stop > delta2_stop) && (delta2_stop < delta1_stop)
        [i_alpha1_STOP,i_theta1_STOP,i_alpha3_STOP,...,O2_2] = sim3(0,d0,...,theta2_stop);
    end
end
end

```

Un altro aspetto chiave della struttura implementata riguarda la gestione della numerazione delle dita: la function *sim3.m* è progettata in modo tale che il dito 3 corrisponda sempre al dito la cui falange prossimale si blocca per prima.

Pertanto:

- nello script principale, prima della chiamata alla function, viene identificata la falange prossimale che si arresta per prima, sulla base dei valori di *delta_stop*;
- i parametri in input alla function vengono riordinati in modo che questo dito venga passato come “dito 3” alla function *sim3*;
- all’interno della function, i calcoli seguono sempre la stessa struttura, trattando il dito 3 come riferimento iniziale;
- al termine dell’esecuzione, gli output vengono riassegnati in modo da restituire i risultati con la numerazione originale delle dita, così da mantenere coerenza nell’analisi e nella visualizzazione dei risultati.

Questa strategia permette di generalizzare la logica di simulazione, evitando di duplicare il codice per ogni possibile combinazione di arresto, e al tempo stesso garantisce un output coerente indipendentemente dallo scenario simulato.

4.4.6 Calcolo cinematico di una fase del movimento e gestione delle condizioni di transizione alla fase successiva

Il modello MATLAB simula il comportamento delle tre dita in modo disaccoppiato, adattandosi all'evoluzione delle condizioni di stop delle falangi. Ogni dito può trovarsi in una fase diversa del movimento, e il passaggio tra fasi è regolato da condizioni cinematiche specifiche.

Nel frammento riportato di seguito è illustrata la fase III, in cui sono in rotazione le falangi distali 1, 3 e la prossimale 2.

L'istruzione `if condizione == 1` che apre il blocco fa riferimento a una condizione verificata alla fine della fase II, in cui si è stabilito quale falange si sia arrestata per prima in quella fase. Tale condizione determina l'ingresso nella configurazione specifica della fase III.

Per ciascun dito il modello esegue i seguenti passaggi:

1. calcola la coordinata verticale del punto di attacco del dito sulla piastra triangolare, mediante la funzione *polyval* e il richiamo ai polinomi specifici di questa tipologia di fase che descrivono il movimento della piastra triangolare;
2. utilizza successivamente le formule già presentate nel Paragrafo 4.4.3 per calcolare in cascata gli angoli α , δ , γ ed eventualmente η (quando la falange prossimale è già ferma).

Alla fine del ciclo *for*, vengono verificate tre condizioni logiche *if*, che servono a stabilire quale delle tre falangi in rotazione ha raggiunto per prima il proprio angolo di arresto. In base a ciò, viene decisa la transizione alla relativa configurazione della fase IV.

```

%% FASE III Rotazione falangi distali 1 3 e prossimale 2
if condizione == 1
    for i = i_alpha_dito1_STOP+1:N
        % Dito 1 (rotazione falange distale)
        A_dito1(i,2) = polyval(pyA(7,:),0(i,2)-0(i_alpha_dito1_STOP,2)) + A_dito1(i_alpha_dito1_STOP,2);
        A_1 = ((A_dito1(i,2)-d0).^2+r^2+e^2-l^2)/(2*r);
        alpha_dito1(i) = 2*atan(((A_dito1(i,2)-d0)+sqrt((A_dito1(i,2)-d0).^2-A_1.^2+e^2))./(A_1+e));
        delta_dito1(i) = delta_dito1(i_alpha_dito1_STOP);
        a = -h1*sin(delta_dito1(i)) - cos(alpha_dito1(i)) - h5 - h3*sin(delta_dito1(i)-alpha_dito1(i));
        b = 2*sin(alpha_dito1(i)) - 2*h1*cos(delta_dito1(i));
        c = h1*sin(delta_dito1(i)) + cos(alpha_dito1(i)) - h5 - h3*sin(delta_dito1(i)-alpha_dito1(i));
        gamma_dito1(i) = 2*atan((-b-(b^2-4*a*c)^0.5)/(2*a));
        eta_dito1(i) = gamma_dito1(i) - gamma_dito1(i_alpha_dito1_STOP) - delta_dito1(i) + delta_dito1...
        (i_alpha_dito1_STOP);

        % Dito 3 (rotazione falange distale)
        A_dito3(i,2) = polyval(pyA(7,:),0(i,2)-0(i_alpha_dito1_STOP,2)) + A_dito3(i_alpha_dito1_STOP,2);
        A_3 = ((A_dito3(i,2)-d0).^2+r^2+e^2-l^2)/(2*r);
        alpha_dito3(i) = 2*atan(((A_dito3(i,2)-d0)+sqrt((A_dito3(i,2)-d0).^2-A_3.^2+e^2))./(A_3+e));
        delta_dito3(i) = delta_dito3(i_alpha_dito3_STOP);
        a = -h1*sin(delta_dito3(i)) - cos(alpha_dito3(i)) - h5 - h3*sin(delta_dito3(i)-alpha_dito3(i));
        b = 2*sin(alpha_dito3(i)) - 2*h1*cos(delta_dito3(i));
        c = h1*sin(delta_dito3(i)) + cos(alpha_dito3(i)) - h5 - h3*sin(delta_dito3(i)-alpha_dito3(i));
        gamma_dito3(i) = 2*atan((-b-(b^2-4*a*c)^0.5)/(2*a));
        eta_dito3(i) = gamma_dito3(i) - gamma_dito3(i_alpha_dito3_STOP) - delta_dito3(i) + delta_dito3...
        (i_alpha_dito3_STOP);

        % Dito 2 (rotazione falange prossimale)
        A_dito2(i,2) = polyval(pyA(8,:),0(i,2)-0(i_alpha_dito1_STOP,2)) + A_dito2(i_alpha_dito1_STOP,2);
        A_2 = ((A_dito2(i,2)-d0).^2+r^2+e^2-l^2)/(2*r);
    
```

Metodologia di analisi e simulazione

```
alpha_dito2(i) = 2*atan(((A_dito2(i,2)-d0)+sqrt((A_dito2(i,2)-d0).^2-A_2.^2+e^2))./(A_2+e));
delta_dito2(i) = delta0 + alpha_dito2(i) - alpha0;
a = -h1*sin(delta_dito2(i)) - cos(alpha_dito2(i)) - h5 - h3*sin(delta_dito2(i)-alpha_dito2(i));
b = 2*sin(alpha_dito2(i)) - 2*h1*cos(delta_dito2(i));
c = h1*sin(delta_dito2(i)) + cos(alpha_dito2(i)) - h5 - h3*sin(delta_dito2(i)-alpha_dito2(i));
gamma_dito2(i) = 2*atan((-b-(b^2-4*a*c)^0.5)/(2*a));

if eta_dito1(i) > theta_dito1_stop
    i_theta_dito1_STOP = i-1;
    condizione = 1;
    fprintf('Fase IV Rotazione falange distale 3 e prossimale 2\n');
    break;

elseif eta_dito3(i) > theta_dito3_stop
    i_theta_dito3_STOP = i-1;
    condizione = 2;
    fprintf('Fase IV Rotazione falange distale 1 e prossimale 2\n');
    break;

elseif alpha_dito2(i) > alpha_dito2_stop
    i_alpha_dito2_STOP = i-1;
    condizione = 3;
    fprintf('Fase IV Rotazione falange distale 1 2 e 3\n');
    break;
end
end
```

Questa parte di script mostra chiaramente la modularità e flessibilità del modello sviluppato: ciascun dito viene trattato in modo indipendente, e il flusso logico della simulazione consente una gestione realistica delle sequenze di arresto. Il passaggio alla fase successiva è deciso automaticamente in base all'evoluzione degli angoli articolari, senza forzature esterne.

5 Simulazioni e validazione del modello cinematico della mano robotica

5.1 Validazione del modello cinematico del singolo dito

Per verificare la correttezza delle equazioni analitiche sviluppate per descrivere il comportamento cinematico del singolo dito, è stato condotto un confronto diretto con i risultati ottenuti tramite simulazioni in SolidWorks Motion. Sono state considerate due tipologie di presa:

- presa di precisione (Figura 5.1), in cui l'afferraggio avviene esclusivamente tramite le falangi distali, con le dita che si comportano come un corpo rigido che ruota intorno al punto O_1 ;
- presa adattativa (Figura 5.2), in cui entrambe le falangi partecipano attivamente al contatto con l'oggetto, in una prima fase c'è la rotazione delle dita come corpi rigidi e successivamente c'è la fase in cui a ruotare sono solo le falangi distali.

In entrambi i casi, le tre dita della mano si sono mosse in maniera solidale, presentando andamenti identici degli angoli articolari. È stato quindi sufficiente analizzare un solo dito rappresentativo per ciascuna simulazione, confrontando gli angoli ottenuti in SolidWorks Motion con quelli calcolati tramite le equazioni analitiche.

Nel caso della presa di precisione, sono stati confrontati i seguenti angoli in funzione dell'alzata h del punto centrale della piastra triangolare:

- $\alpha(h)$: angolo della manovella O_1B rispetto all'orizzontale;
- $\delta(h)$: angolo della falange prossimale rispetto alla verticale;
- $\gamma(h)$: angolo della falange distale rispetto all'orizzontale;
- $\chi(h)$: angolo della biella BC rispetto alla verticale.

Nel caso della presa adattativa, si è aggiunto il confronto anche per:

- $\theta(h)$: angolo relativo tra la falange prossimale e quella distale.

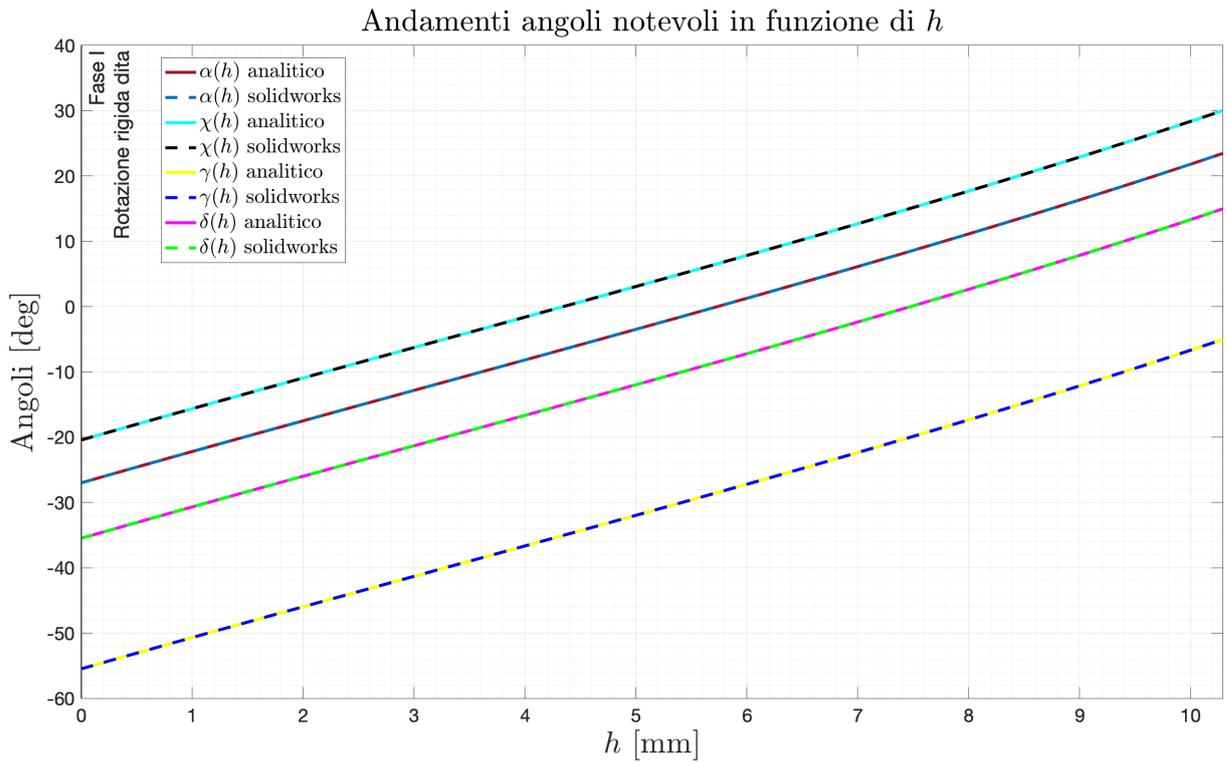


Figura 5.1 - Andamento angoli caratteristici nella presa di precisione

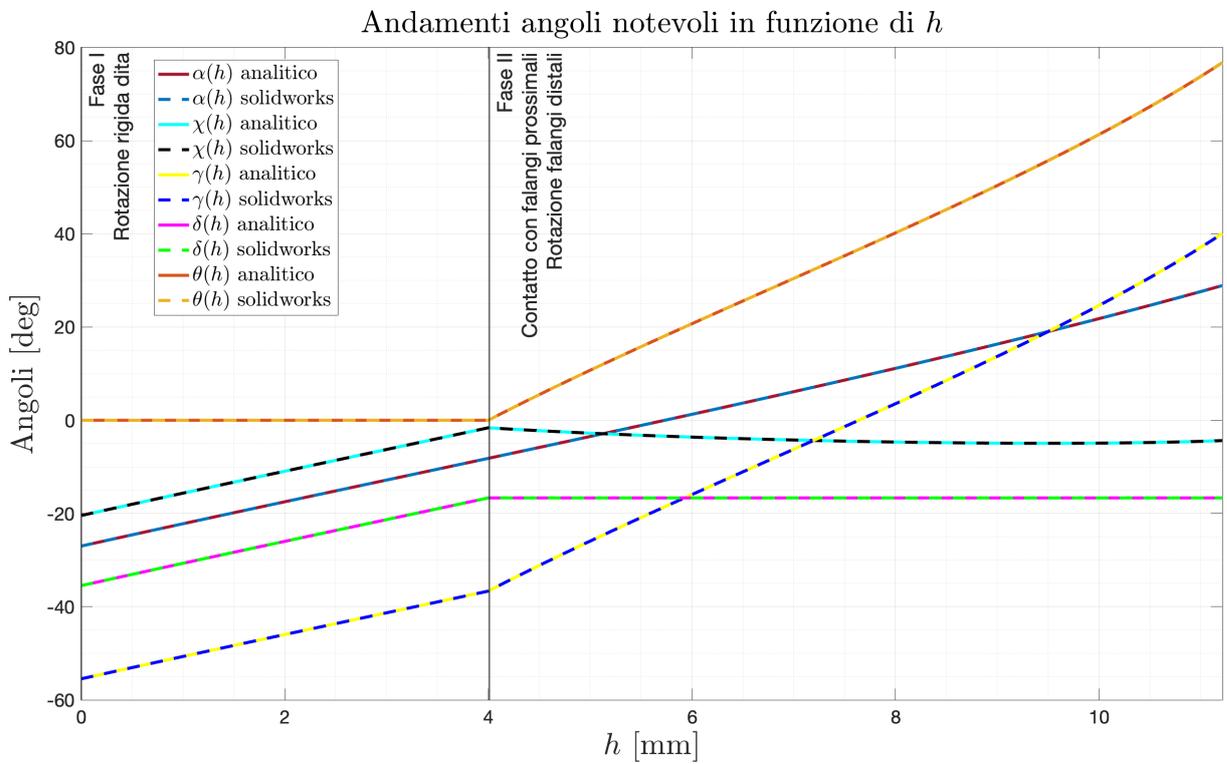


Figura 5.2 - Andamento degli angoli caratteristici nella presa adattativa

Dai grafici si osserva una ottima coerenza tra i risultati dei due modelli, sia nell'andamento qualitativo degli angoli che nella corretta individuazione delle fasi del moto. In particolare:

- nella presa di precisione si verifica una rotazione rigida del dito intorno a O_1 fino al raggiungimento dei limiti meccanici della mano;
- nella presa adattativa si riconosce chiaramente il passaggio tra la fase di rotazione solidale iniziale e l'attivazione del quadrilatero articolato, con variazione significativa di $\theta(h)$.

Per tutti gli angoli analizzati gli scostamenti tra i due metodi, come mostrato in Figura 5.3, risultano inferiori al decimo di grado, dovuti principalmente alla risoluzione numerica e agli approssimanti geometrici del CAD. I risultati confermano la validità delle equazioni analitiche e la correttezza dell'implementazione nel modello MATLAB, che potrà essere utilizzato con affidabilità per simulare il comportamento dell'intera mano.

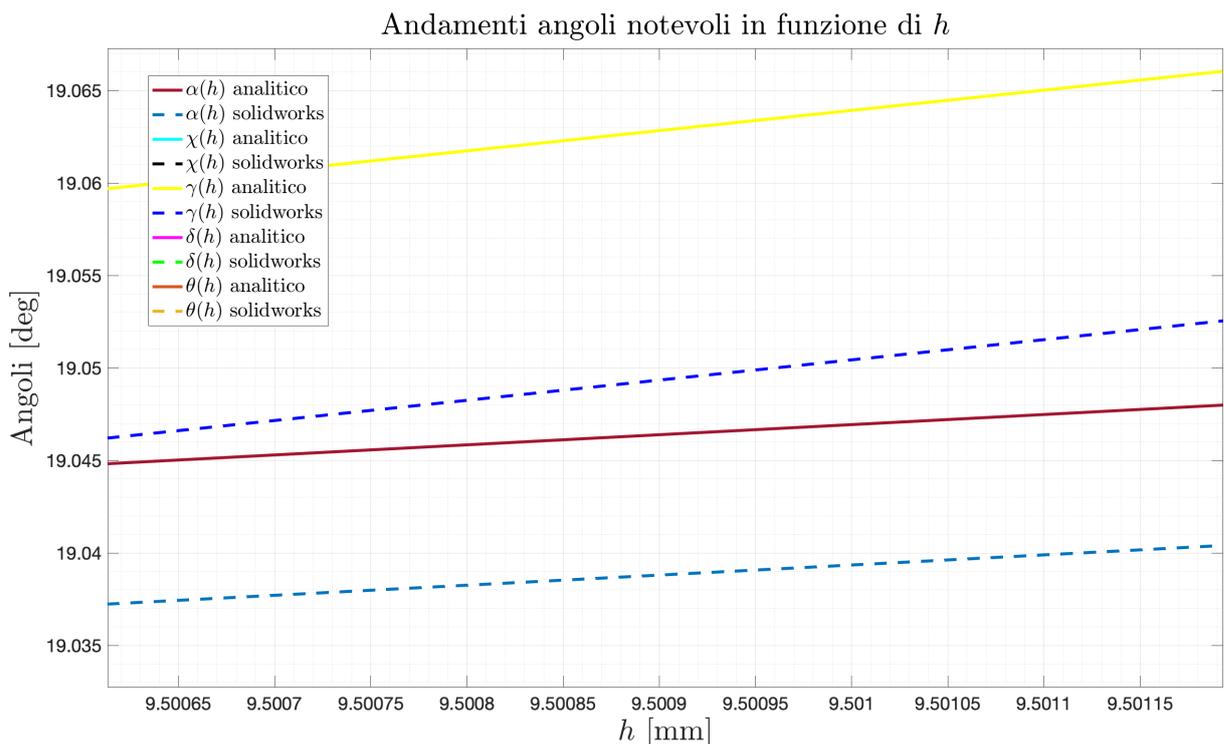


Figura 5.3 - Zoom sull'andamento degli angoli $\alpha(h)$ e $\gamma(t)$ (presa adattativa)

Confermata la validità delle equazioni cinematiche per il dito singolo, nel prossimo paragrafo verranno presentati casi simulativi più complessi, in cui il movimento delle dita non è più perfettamente solidale.

5.2 Analisi di un caso singolo di simulazione del movimento adattativo della mano in SolidWorks Motion

Per mettere in evidenza il comportamento adattativo della mano robotica sottoattuata, è stata selezionata una simulazione CAD in cui le tre dita eseguono una chiusura non sincrona, con blocchi progressivi delle falangi in istanti differenti. Questo tipo di simulazione consente di osservare con chiarezza l'effetto della sottoattuazione e della trasmissione del moto ad opera della piastra triangolare.

L'intera sequenza di presa può essere suddivisa in diverse fasi successive della chiusura, che descrivono l'evoluzione del movimento delle dita e la conseguente rotazione della piastra triangolare:

- I) Tutte le dita ruotano in modo solidale attorno ai punti O_1 , con rotazione rigida delle falangi. La piastra triangolare trasla verticalmente mantenendosi parallela al terreno, trasmettendo il moto in modo simmetrico alle tre bielle.
- II) La falange prossimale del dito 1 si blocca. La piastra triangolare inizia a ruotare passivamente per compensare il vincolo, consentendo il proseguimento del movimento attraverso la rotazione della falange distale 1 tramite il quadrilatero articolato. In questa fase, la rotazione della piastra è contenuta e guidata dal vincolo geometrico ancora attivo tra la biella e la falange distale.
- III) Si blocca anche la falange distale del dito 1, rendendo il dito completamente bloccato. A partire da questo momento, la piastra ruota in modo più marcato e con un diverso centro istantaneo di rotazione, in quanto il punto di attacco del dito 1 diventa statico. Il moto viene ridistribuito solo verso i punti A_2 e A_3 , causando una variazione più evidente nelle loro traiettorie.
- IV) Le falangi prossimali delle dita 2 e 3 raggiungono a loro volta i rispettivi angoli di stop e si bloccano. A questo punto si ha il movimento esclusivamente delle falangi distali.
- V) Anche le falangi distali delle dita 2 e 3 si arrestano determinando lo stop completo della mano.

In Figura 5.4 viene mostrata la vista laterale della mano di presa ad inizio e fine simulazione, si può ben notare la rotazione della piastra triangolare che permette la sottoattuazione del sistema.

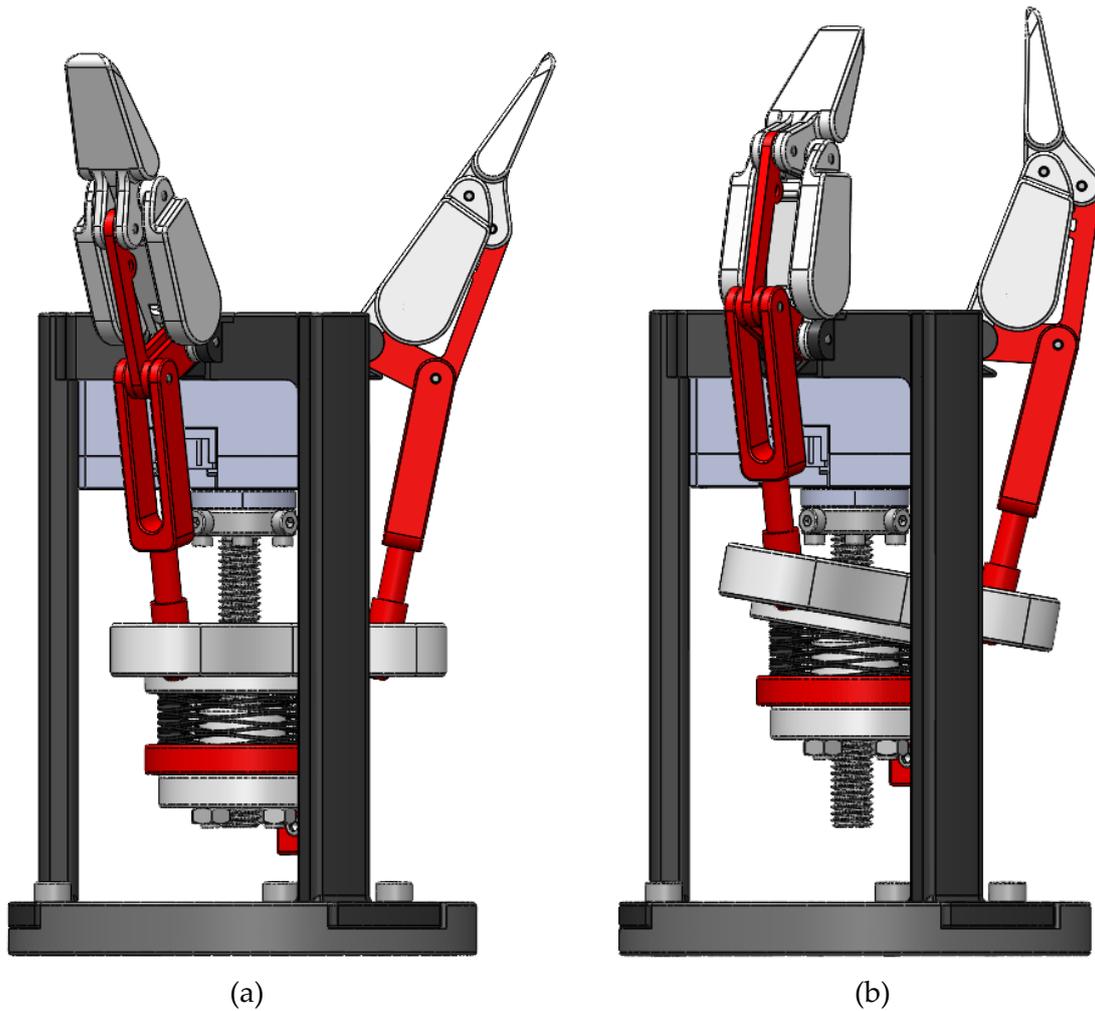


Figura 5.4 – Viste laterali della mano di presa ad inizio simulazione (a) e fine simulazione (b)

Come già detto, questa configurazione meccanica consente al sistema, pur essendo azionato da un unico attuatore lineare, di adattare in modo autonomo il movimento delle singole dita in funzione dei blocchi delle falangi. In particolare, la piastra triangolare, libera di ruotare grazie alla presenza della molla di accoppiamento con la piastra motrice, modifica la distribuzione del moto trasmesso alle bielle, permettendo alle dita non ancora bloccate di continuare la chiusura.

Il primo parametro analizzato, in Figura 5.5, è l'angolo α , che rappresenta la rotazione della manovella O_1B rispetto all'orizzontale. Questo angolo costituisce l'ingresso del sistema e fornisce un riferimento utile per confrontare l'evoluzione del moto delle tre dita.

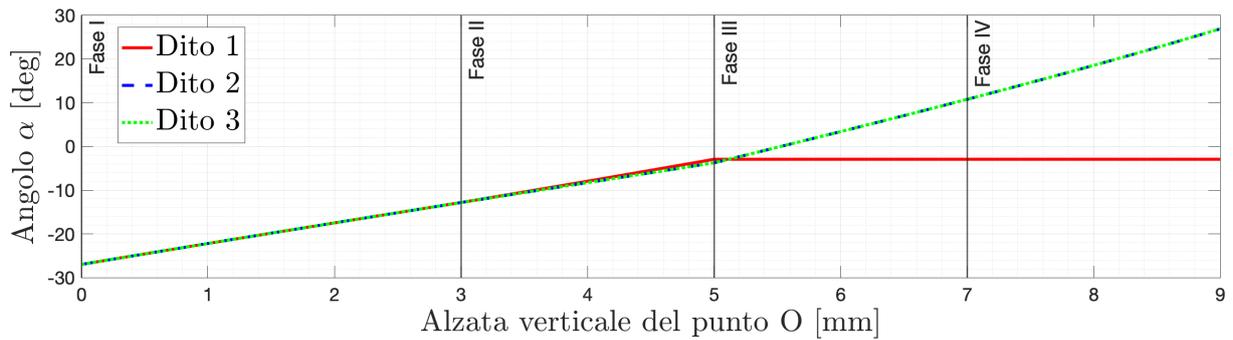


Figura 5.5 - Andamento degli angoli α in funzione dell'alzata del punto O

L'andamento degli angoli α mostra un'evidente divergenza tra il Dito 1 e gli altri due a partire dalla Fase III, in corrispondenza del blocco completo del primo dito. Le curve delle Dita 2 e 3 proseguono invece in modo simmetrico fino al termine della simulazione.

L'analisi prosegue con l'angolo δ , in Figura 5.6, che descrive l'inclinazione assoluta della falange prossimale rispetto alla verticale. Questo parametro permette di evidenziare i momenti in cui ciascuna falange prossimale raggiunge l'angolo target.

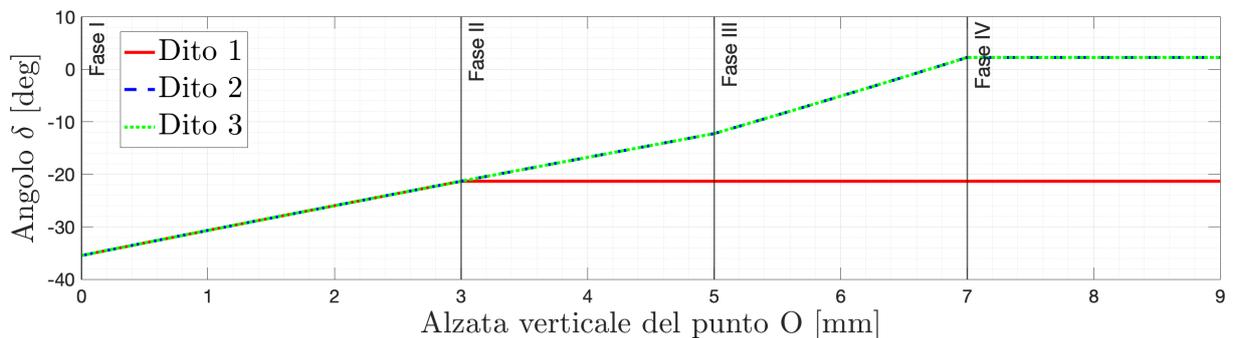


Figura 5.6 - Andamento degli angoli δ in funzione dell'alzata del punto O

Anche gli andamenti degli angoli δ confermano il blocco anticipato della falange prossimale del Dito 1. Per le Dita 2 e 3 si nota una prosecuzione regolare fino alla Fase IV, in cui anche le loro falangi prossimali raggiungono l'angolo di arresto.

L'andamento dell'angolo γ , in Figura 5.7, riferito alla falange distale, è utile per osservare le fasi in cui il moto prosegue attraverso l'attivazione del quadrilatero articolato, dopo l'arresto della falange prossimale.

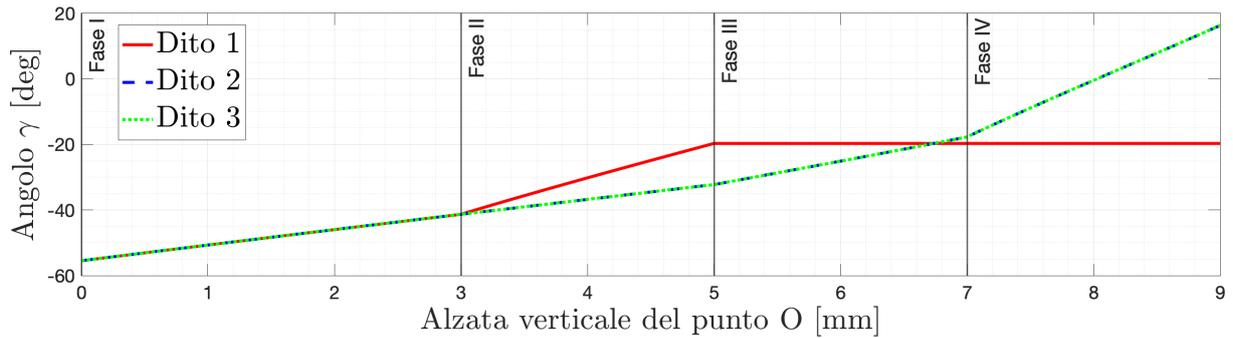


Figura 5.7 - Andamento degli angoli γ in funzione dell'alzata del punto O

Alla rotazione delle falangi distali segue l'attivazione del quadrilatero articolato. In particolare, si osserva una transizione graduale nella curva del Dito 1 durante la Fase II e un arresto netto in Fase III. Le Dita 2 e 3 completano la rotazione fino alla fine della Fase IV.

L'angolo interno χ della biella BC, riportato in Figura 5.8, completa l'analisi del comportamento del quadrilatero, fornendo un'indicazione sull'evoluzione geometrica del meccanismo durante la presa.

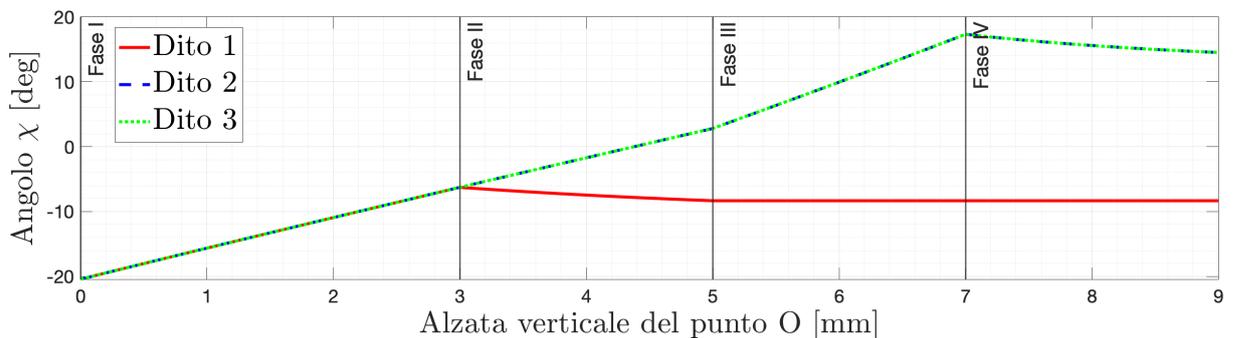


Figura 5.8 - Andamento degli angoli χ in funzione dell'alzata del punto O

Le curve evidenziano il momento in cui le bielle si bloccano in seguito all'arresto completo delle rispettive falangi del Dito 1.

L'angolo θ , il cui andamento è riportato in Figura 5.9, è definito solo nelle fasi in cui la falange prossimale è bloccata: misura la rotazione relativa tra la falange prossimale e quella distale, sintomo dell'attività del quadrilatero articolato. È un indicatore diretto del passaggio da moto rigido a moto articolato.

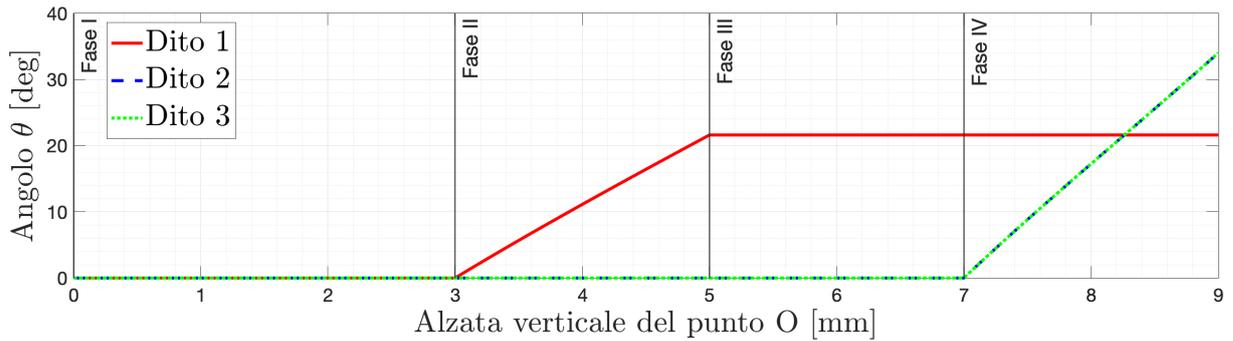


Figura 5.9 – Andamento degli angoli θ in funzione dell'alzata del punto O

In particolare, per il Dito 1 l'angolo θ inizia a variare durante la Fase II, quando la falange prossimale si blocca e la distale prosegue la rotazione. Lo stesso comportamento si osserva successivamente nelle Dita 2 e 3, a partire dalla Fase IV.

Infine, l'andamento dell'alzata relativa tra ciascun punto A e il centro O della piastra triangolare, in Figura 5.10, mette in evidenza la rotazione passiva della piastra. In particolare, quando un dito si blocca, il corrispondente punto A si arresta mentre O continua a salire.

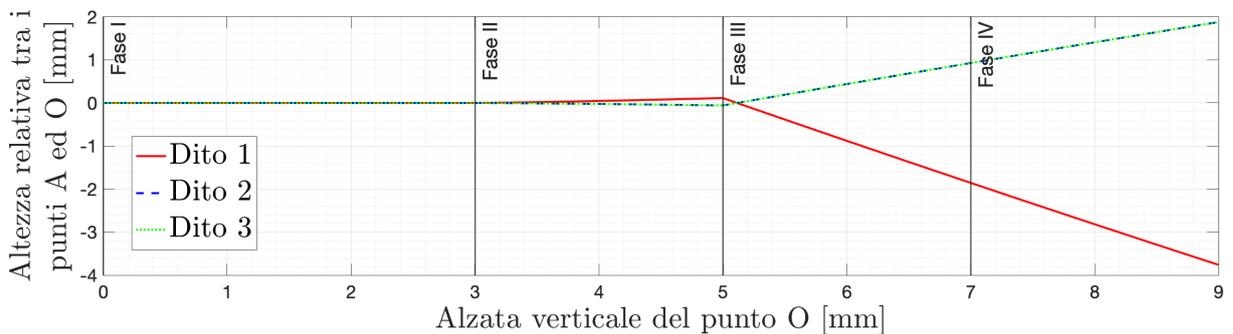


Figura 5.10 – Andamento dell'alzata dei punti A della piastra rispetto al punto centrale O

Il grafico dell'alzata relativa dei punti A_1 , A_2 e A_3 rispetto al centro O evidenzia con chiarezza la rotazione adattativa della piastra triangolare. In corrispondenza del blocco del Dito 1 (Fase III), il punto A_1 si arresta, mentre il punto O continua a salire: ciò si traduce in una diminuzione progressiva dell'alzata tra i due punti, visibile come un tratto decrescente nella curva rossa. I punti A_2 e A_3 , al contrario, proseguono la loro traiettoria verso l'alto, dimostrando che la piastra si inclina e redistribuisce il moto verso le dita ancora attive.

I grafici riportati permettono di tracciare con precisione l'evoluzione cinematica delle tre dita costituenti la mano di presa. La rotazione passiva della piastra triangolare rappresenta il

meccanismo chiave che consente al sistema di adattarsi a differenti condizioni di blocco delle varie falangi, pur mantenendo un singolo ingresso attivo.

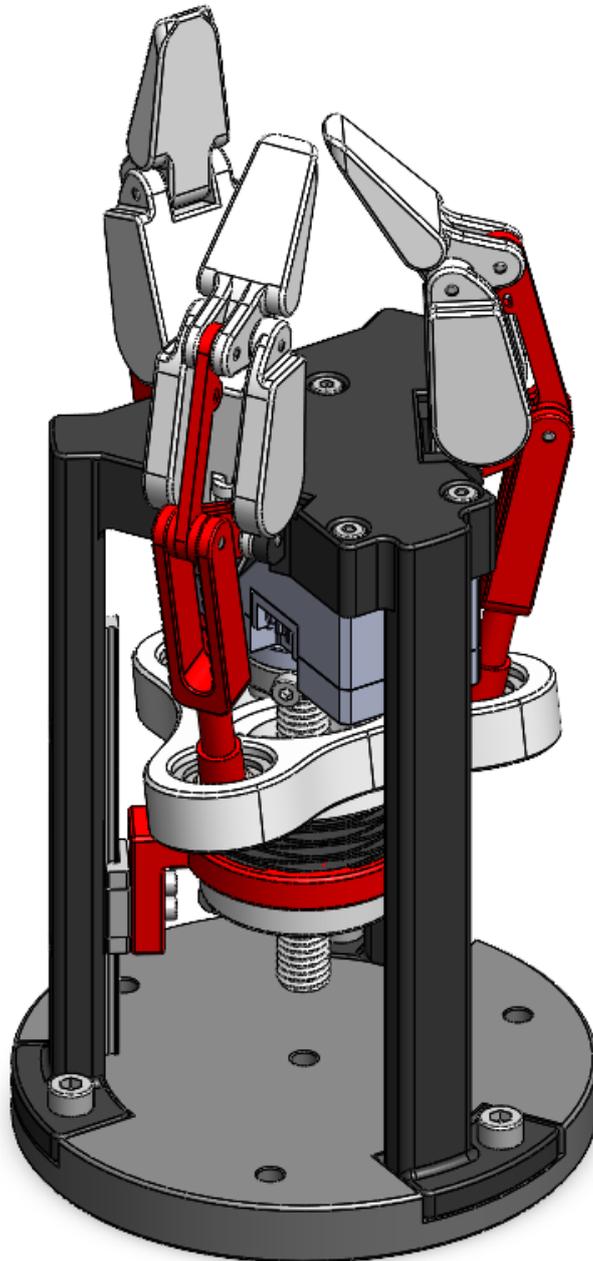


Figura 5.11 - Vista dimetrica della mano di presa a fine simulazione

5.3 Approssimazione numerica del moto della piastra triangolare

La rotazione passiva della piastra triangolare, osservata nelle simulazioni SolidWorks in presenza di blocchi asincroni delle dita, comporta una variazione delle alzate dei punti A_1 , A_2 e A_3 durante il movimento. Poiché non è stato possibile ricavare un'espressione analitica chiusa in grado di descrivere il comportamento della piastra durante tali fasi, si è scelto di adottare un approccio numerico basato sull'interpolazione polinomiale dei dati estratti dalle simulazioni CAD.

Sono state considerate diverse configurazioni cinematiche della mano, ciascuna caratterizzata da una diversa combinazione di blocchi delle falangi e dita. Le casistiche analizzate includono:

- dito 1 completamente bloccato (blocco di falange prossimale e distale);
- dito 1 bloccato, rotazione delle falangi distali delle dita 2 e 3;
- dito 1 bloccato, rotazione delle falangi prossimali delle dita 2 e 3;
- falange prossimale del dito 1 bloccata, rotazione della falange distale del dito 1 e delle dita 2 e 3;
- falangi prossimali delle dita 1 e 2 bloccate, rotazione delle falangi distali 1 e 2 e del dito 3.

Per ciascuna di queste configurazioni sono state condotte più simulazioni, variando il punto di inizio della fase studiata e la durata del tratto simulato, così da ottenere curve campionate su intervalli diversi di alzata. In ogni simulazione sono state estratte le alzate assolute (coordinate verticali) dei punti A_1 , A_2 e A_3 in funzione dell'alzata del punto centrale O della piastra. Su queste curve è stato applicato un fitting polinomiale di quarto grado, ritenuto un buon compromesso tra accuratezza e semplicità computazionale.

Per valutare la consistenza dell'approccio, è stato effettuato un confronto tra i polinomi ottenuti per la stessa casistica in più simulazioni. Un caso particolarmente significativo riguarda la configurazione in cui il dito 1 è completamente bloccato, mentre sono in rotazione la falange prossimale del dito 2 e la falange distale del dito 3. Per questa configurazione sono state condotte tre simulazioni, con blocchi impostati rispettivamente come segue:

- Simulazione 1: blocco della falange prossimale del dito 1 per $h = 1\text{mm}$, blocco della falange distale del dito 1 per $h = 2\text{mm}$, blocco della falange prossimale del dito 2 per $h = 3\text{mm}$;

- Simulazione 2: blocchi rispettivamente per $h = 2 \text{ mm}$, $h = 3 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$;
- Simulazione 3: blocchi rispettivamente per $h = 3 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$, $h = 5 \text{ mm}$.

È importante sottolineare che i grafici che seguono non fanno riferimento all'intera simulazione della presa, ma solo alla porzione in cui la mano si trovava nella configurazione cinematica specifica analizzata: dito 1 bloccato, falange prossimale 2 e falange distale 3 in rotazione. Da ciascuna simulazione completa è stata quindi estrapolata esclusivamente la porzione utile, e su questi tratti sono stati calcolati i polinomi interpolanti per ciascun punto A_i .

I risultati sono mostrati in Figura 5.12 e Figura 5.13, dove si confrontano i polinomi relativi ai punti A_2 e A_3 ottenuti dalle tre simulazioni.

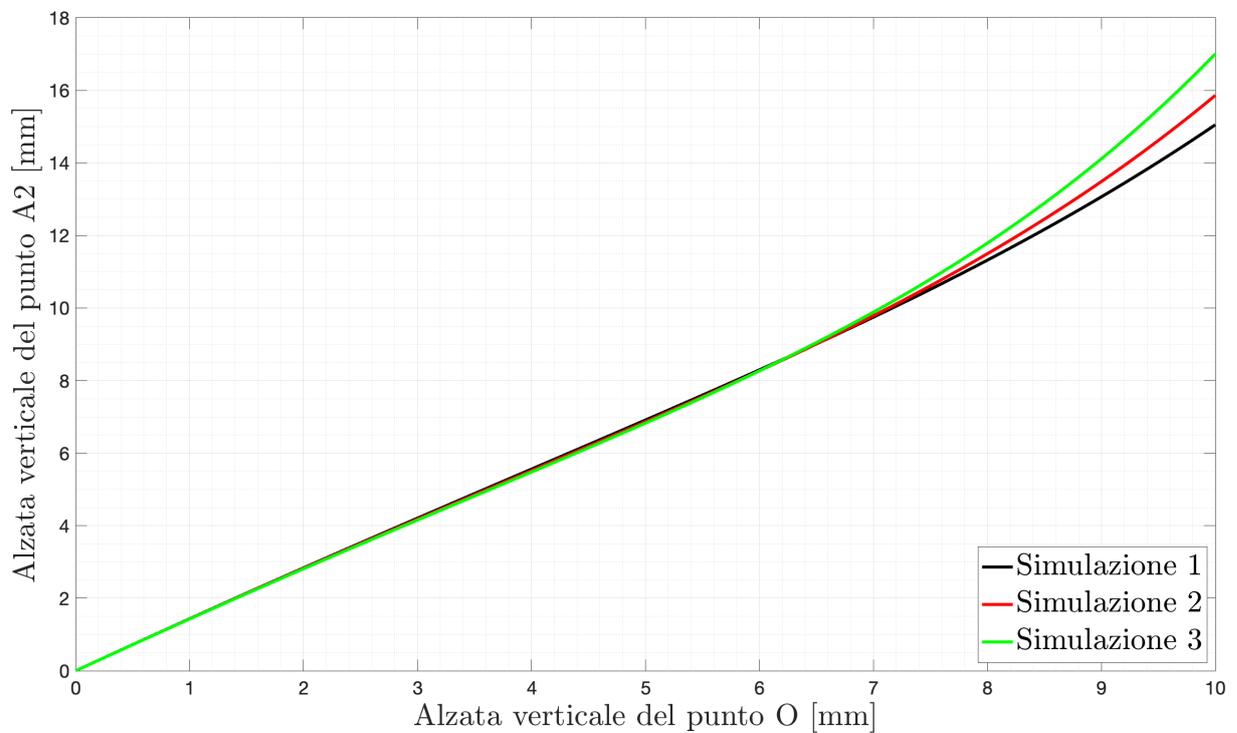


Figura 5.12 - Interpolazione dell'alzata del punto A_2 nelle tre simulazioni relative alla configurazione con dito 1 bloccato, falange prossimale 2 e falange distale 3 in rotazione

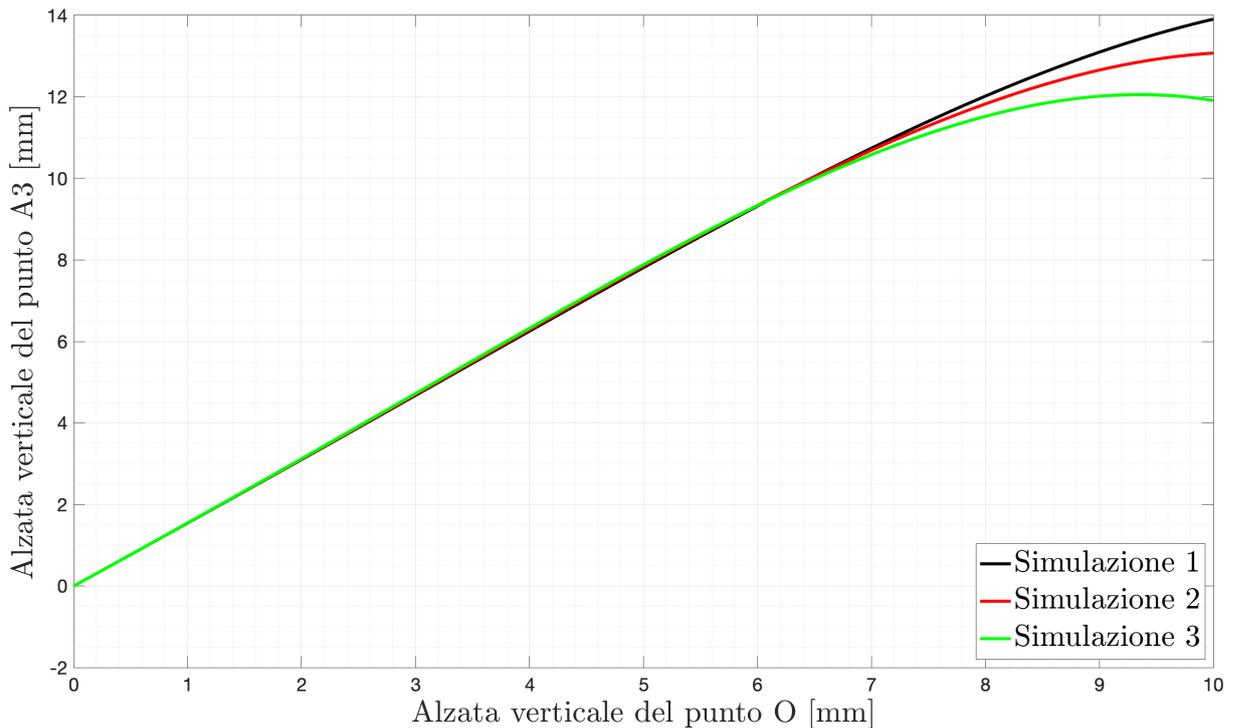


Figura 5.13 - Interpolazione dell'alzata del punto A_3 nelle tre simulazioni relative alla configurazione con dito 1 bloccato, falange prossimale 2 e falange distale 3 in rotazione

Nel caso del punto A_2 (Figura 5.12), si osserva che le curve coincidono quasi perfettamente fino ad una alzata pari a 7mm e divergono leggermente successivamente, in particolare nelle simulazioni più brevi (simulazioni 2 e 3). Il polinomio della simulazione 1 (in nero), calcolato su un numero maggiore di punti, risulta più regolare e rappresenta meglio l'evoluzione della traiettoria nel tratto finale.

Un comportamento analogo si nota anche per il punto A_3 (Figura 5.13), dove i tre polinomi presentano andamenti simili sempre fino a 7mm di alzata del punto O, ma mostrano deviazioni crescenti successivamente. In particolare, la curva della simulazione 3 tende ad appiattirsi e invertire la pendenza, segno di una scarsa affidabilità dell'interpolazione quando effettuata su una simulazione con meno punti estrapolati.

Questi risultati confermano che i polinomi ottenuti da simulazioni più lunghe sono più stabili, coerenti e rappresentativi dell'andamento reale. Per ciascuna casistica, è stato quindi adottato nel modello MATLAB il polinomio calcolato sulla simulazione con la durata maggiore e il maggior numero di dati estrapolati, in modo da garantire la massima affidabilità nell'evoluzione del moto della piastra triangolare.

Un secondo caso di studio riguarda la configurazione in cui sono in rotazione la falange prossimale del dito 1 e le falangi distali delle dita 2 e 3. Anche in questo caso è stata adottata la stessa logica di confronto tra simulazioni di diversa durata, andando a variare il momento in cui si bloccano le falangi prossimali delle dita 2 e 3. Le condizioni delle quattro simulazioni sono le seguenti:

- Simulazione 1: blocco delle falangi prossimali delle dita 2 e 3 per $h = 1 \text{ mm}$;
- Simulazione 2: blocco a $h = 2 \text{ mm}$;
- Simulazione 3: blocco a $h = 4 \text{ mm}$;
- Simulazione 4: blocco a $h = 5 \text{ mm}$.

Come nel caso precedente, i dati sono stati estratti esclusivamente durante la fase in cui la mano si trovava nella configurazione descritta, ovvero con la falange prossimale del dito 1 e le falangi distali delle dita 2 e 3 in rotazione. Anche qui l'analisi si è concentrata sull'alzata assoluta dei punti A_1 , A_2 e A_3 in funzione dell'alzata del punto O, e per ciascun punto è stato calcolato un polinomio interpolante del quarto ordine.

I grafici seguenti (Figura 5.14 e Figura 5.15) mostrano l'andamento delle alzate dei punti A_1 , A_2 e A_3 per le quattro simulazioni, mettendo a confronto i polinomi ottenuti.

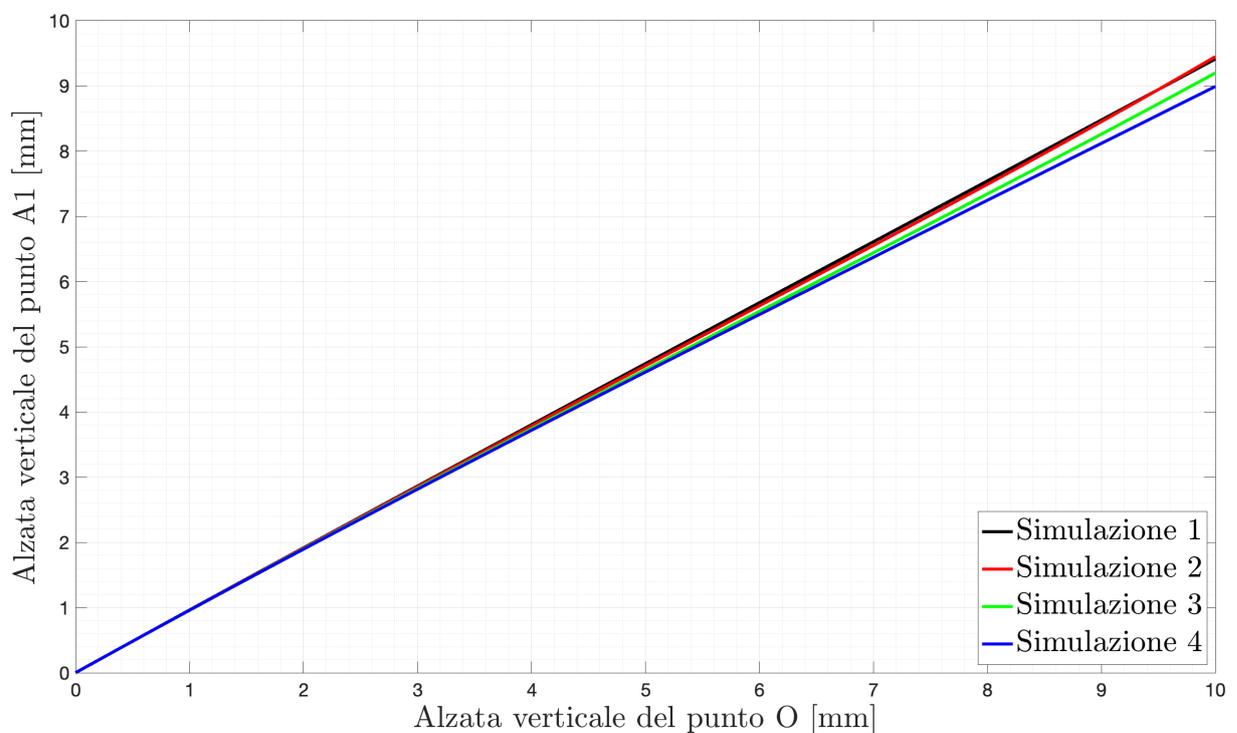


Figura 5.14 - Interpolazione dell'alzata del punto A_1 nelle quattro simulazioni relative alla configurazione con rotazione della falange prossimale 1 e delle distali 2 e 3

Nel caso del punto A_1 (Figura 5.14), le curve risultano estremamente coerenti tra loro lungo quasi tutta la traiettoria. Solo per alzate superiori a circa 8 mm si osservano lievi differenze tra i polinomi, che rimangono comunque contenute. Anche in questo caso, la simulazione 1 (in nero), costruita su un numero maggiore di dati, produce un'interpolazione più stabile e continua.

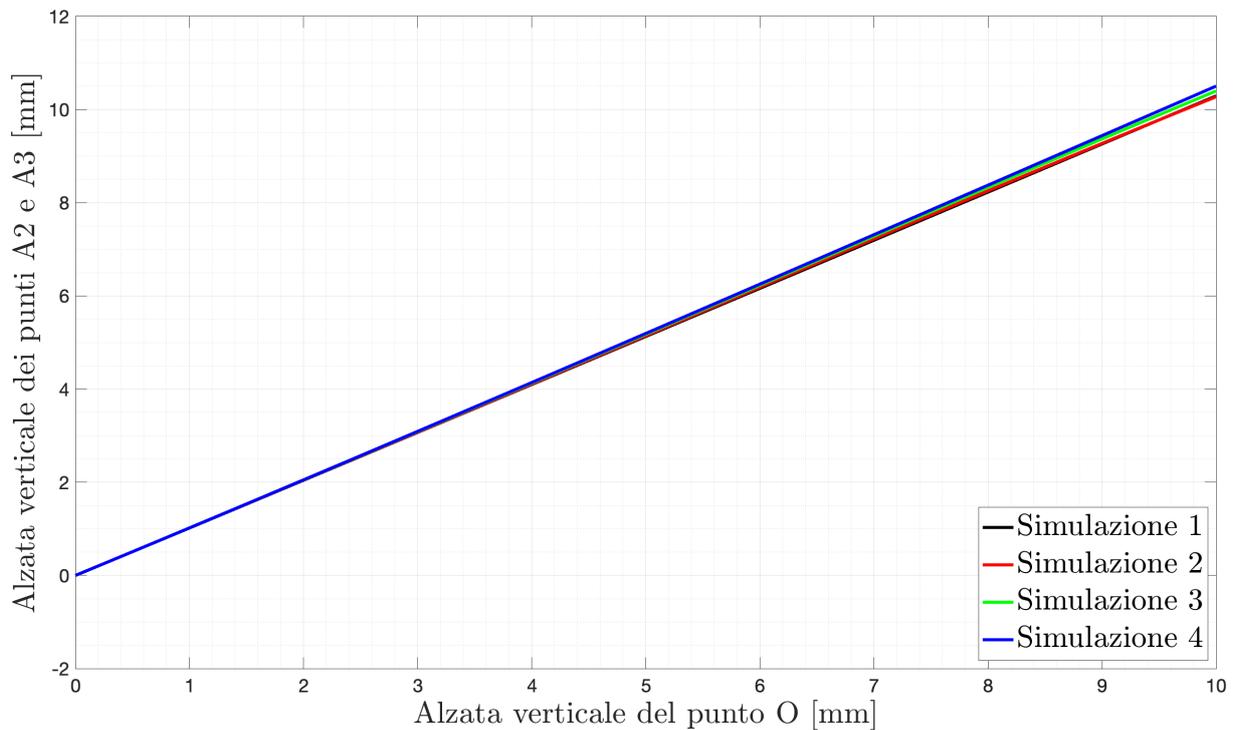


Figura 5.15 - Interpolazione dell'alzata dei punti A_2 e A_3 nelle quattro simulazioni relative alla configurazione con rotazione della falange prossimale 1 e delle distali 2 e 3

Per i punti A_2 e A_3 (Figura 5.15), la sovrapposizione tra le curve è ancora più marcata: i quattro polinomi risultano praticamente coincidenti per l'intero intervallo, con una leggera divergenza osservabile solo negli ultimi millimetri di alzata. Questo indica che, per questa particolare configurazione, anche i tratti più brevi forniscono un'ottima approssimazione, sebbene la versione ottenuta dalla simulazione più lunga sia stata comunque adottata nel modello MATLAB per garantire la massima affidabilità.

L'ultima configurazione presentata riguarda il caso in cui il dito 1 è completamente bloccato, mentre le falangi distali delle dita 2 e 3 proseguono la loro rotazione. Questa casistica è caratterizzata da una cinematica più uniforme si presta bene alla valutazione della stabilità dell'interpolazione in condizioni cinematicamente costanti.

Sono state eseguite cinque simulazioni, ciascuna con una diversa durata della fase, variando il momento in cui si verifica il blocco delle falangi prossimali delle dita 2 e 3:

- Simulazione 1: blocco a $h = 1 \text{ mm}$,
- Simulazione 2: blocco a $h = 2 \text{ mm}$,
- Simulazione 3: blocco a $h = 3 \text{ mm}$,
- Simulazione 4: blocco a $h = 4 \text{ mm}$,
- Simulazione 5: blocco a $h = 5 \text{ mm}$.

Come nei casi precedenti, i dati sono stati estratti esclusivamente nel tratto in cui la mano si trovava in questa configurazione, e sono state considerate le alzate assolute dei punti A_2 e A_3 in funzione dell'alzata del punto O. Per ciascuna simulazione è stato calcolato un polinomio interpolante di quarto grado.

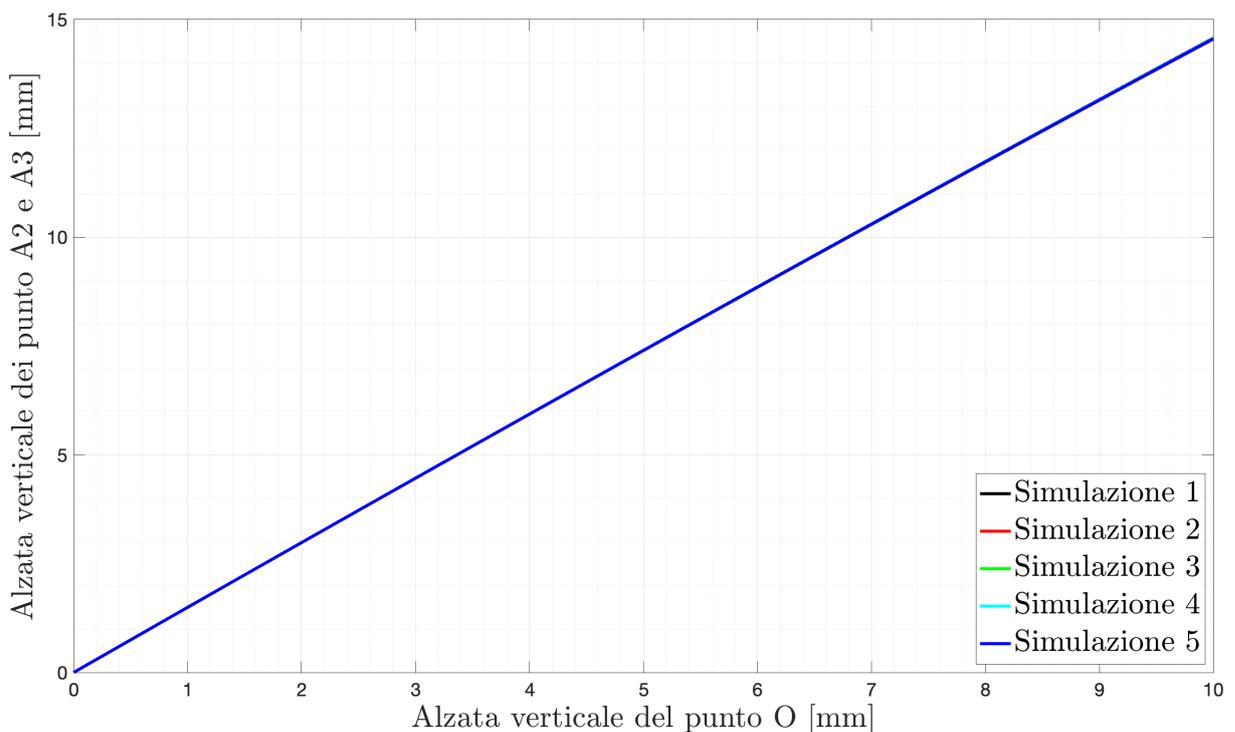


Figura 5.16 – Interpolazione dell'alzata dei punti A_2 e A_3 nelle cinque simulazioni relative alla configurazione con il dito 1 bloccato e le falangi distale 2 e 3 in rotazione

Dalla Figura 5.16 emerge che le cinque curve sono quasi perfettamente sovrapposte per l'intero intervallo analizzato. Per verificare l'eventuale scostamento tra i polinomi, è stato riportato uno zoom (Figura 5.17) su un tratto finale della traiettoria. Anche in questo dettaglio si

conferma una notevole stabilità: le differenze tra le curve sono minime, dell'ordine di pochi centesimi di millimetro.

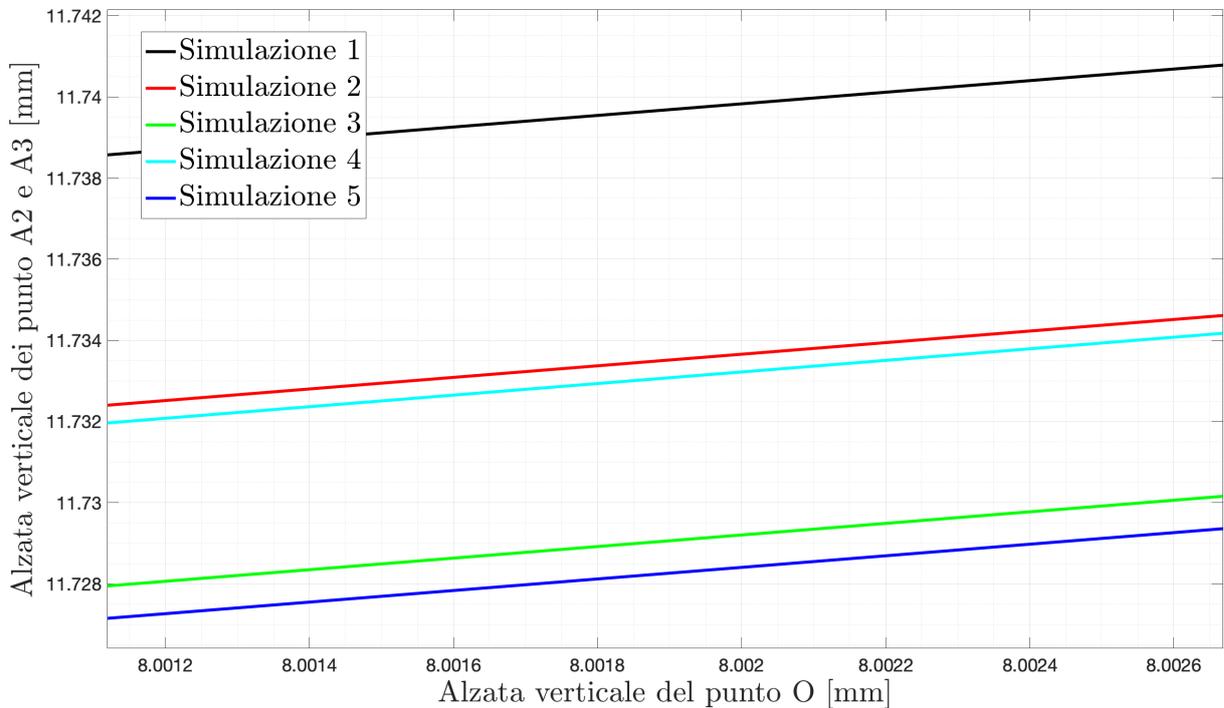


Figura 5.17 – Zoom del grafico relativo all'interpolazione dell'alzata dei punti A_2 e A_3 nelle cinque simulazioni relative alla configurazione con il dito 1 bloccato e le falangi distale 2 e 3 in rotazione

Questo comportamento dimostra che, in configurazioni cinematicamente regolari, i polinomi interpolanti mantengono un'elevata precisione anche se calcolati su tratti relativamente brevi. Tuttavia, per garantire coerenza metodologica con gli altri casi analizzati, anche in questa configurazione è stato selezionato, per l'implementazione nel modello MATLAB, il polinomio ottenuto dalla simulazione con durata maggiore.

In conclusione, l'approccio basato su interpolazione polinomiale si è dimostrato efficace nel descrivere il moto dei punti A_1 , A_2 e A_3 sulla piastra triangolare in diverse configurazioni cinematiche. I confronti tra polinomi ottenuti da simulazioni di durata variabile hanno mostrato che, in generale, le traiettorie risultano più stabili e affidabili quando il fitting viene eseguito su un intervallo più esteso, mentre tratti brevi tendono a introdurre maggiore variabilità, pur mantenendo l'andamento qualitativo corretto.

In alcune configurazioni cinematicamente più regolari, i polinomi ottenuti da simulazioni brevi si sono comunque dimostrati molto precisi, con differenze minime rispetto a quelli più

completi. Tuttavia, per garantire uniformità nel processo di modellazione e massima affidabilità nella successiva simulazione MATLAB, per ciascuna casistica è stato adottato il polinomio calcolato sulla simulazione più lunga disponibile.

5.4 Confronto simulazione tra il modello MATLAB e SolidWorks

Questo paragrafo rappresenta il punto conclusivo del lavoro svolto e ha l'obiettivo di dimostrare come il modello sviluppato in ambiente MATLAB sia in grado di riprodurre con elevata fedeltà il comportamento cinematico osservato in una simulazione SolidWorks Motion, partendo in input dagli stessi angoli di stop per le falangi.

A titolo esemplificativo, si analizza una specifica simulazione in cui viene eseguita la chiusura completa della mano di presa, mostrando passo dopo passo le grandezze cinematiche rappresentanti il sistema in funzione delle fasi che caratterizzano il movimento adattativo.

Il confronto tra i due ambienti permette di verificare la correttezza delle equazioni implementate e della struttura del modello MATLAB e conferma la coerenza tra i risultati, evidenziando al contempo il vantaggio in termini di flessibilità e velocità computazionale offerto dalla soluzione sviluppata.

I due ambienti mostrano una corrispondenza ottima, con scostamenti minimi riconducibili esclusivamente a fattori numerici, come la diversa gestione dei passi temporali, l'approssimazione dei contatti e le metodologie di interpolazione adottate nei due software. SolidWorks Motion utilizza, come precedentemente spiegato nel Paragrafo 4.3.1, una risoluzione automatica basata su integratori adattivi (come il metodo GSTIFF), che può introdurre leggere fluttuazioni locali, specialmente nei punti di cambio fase o in presenza di vincoli interni complessi. Questo comporta che, sebbene i due modelli evolvano con modalità di calcolo differenti, il risultato globale sia praticamente sovrapponibile, con scarti non significativi ai fini progettuali.

La simulazione analizzata è caratterizzata dalle seguenti fasi:

- I) Rotazione simultanea delle falangi prossimali 1, 2 e 3.
- II) Rotazione delle falangi distali 2 e 3 e prosecuzione della prossimale 1.
- III) Rotazione della distale 2 e della prossimale 1.
- IV) Rotazione della sola falange prossimale 1.
- V) Rotazione finale della falange distale 1.

Questa sequenza dimostra l'efficacia del sistema sottoattuato nel garantire una presa adattativa anche in presenza di blocchi asimmetrici delle falangi.

Il grafico dell'angolo α (Figura 5.18) mostra l'andamento della rotazione del link O_1B , ovvero della manovella che trasmette il moto dalla piastra triangolare alla biella AB. Nella prima

parte del grafico (Fase I), si osserva un andamento pressoché identico per tutte e tre le dita, ad indicare una rotazione sincrona dei link, coerente con la configurazione iniziale simmetrica del sistema. All’inizio della Fase III e della Fase IV si notano rispettivamente il blocco del dito 2 e del dito 3. La piena coerenza tra la simulazione MATLAB e quella SolidWorks è evidente nella sovrapposizione delle curve: entrambe le simulazioni restituiscono lo stesso comportamento cinematico del sistema, sia in termini di angolo massimo raggiunto sia nella posizione dei punti di interruzione. Gli scostamenti sono nell’ordine dei decimi di grado, quindi del tutto accettabili.

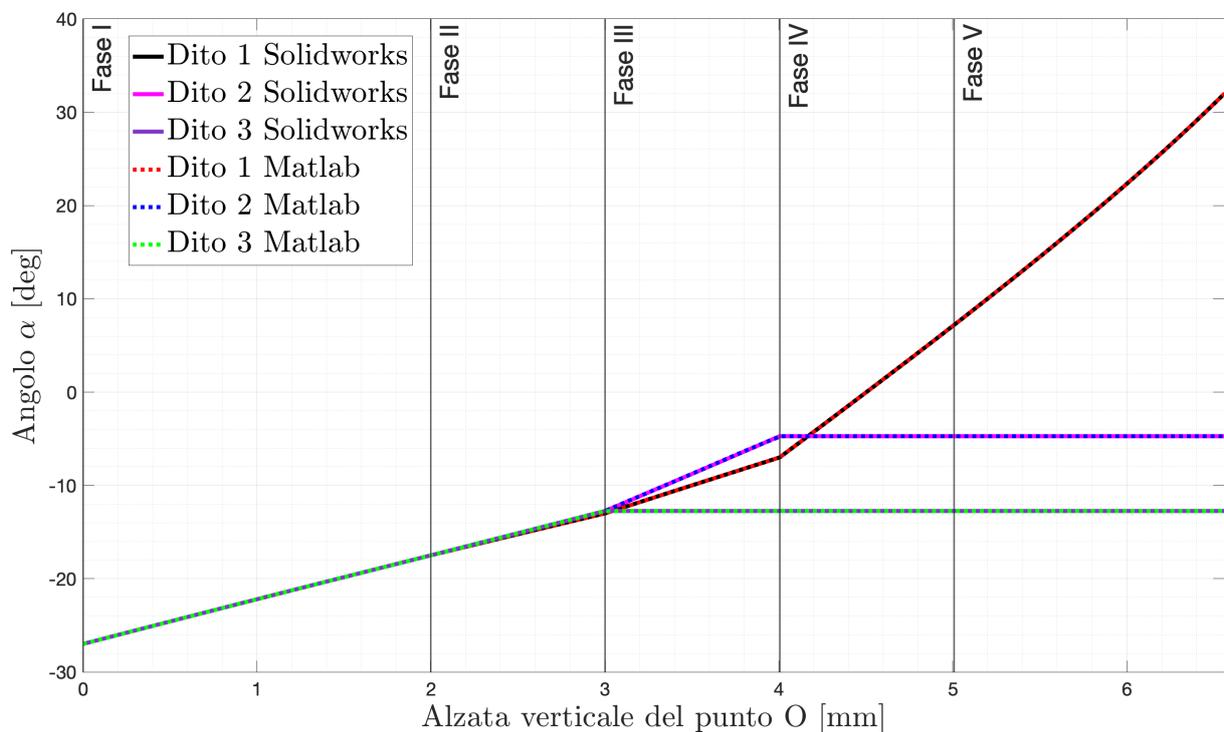


Figura 5.18 – Grafico comparativo degli andamenti dell’angolo α nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks

Il grafico dell’angolo δ (Figura 5.19) rappresenta l’evoluzione dell’inclinazione della falange prossimale di ciascun dito rispetto alla direzione verticale. Anche in questo caso nella fase iniziale (Fase I), tutte e tre le curve seguono un andamento crescente e pressoché sovrapposto, a conferma della rotazione solidale e simmetrica delle falangi prossimali durante l’avvio della chiusura della mano.

All’inizio della Fase II, le curve delle dita 2 e 3 evidenziano lo stop delle rispettive falangi prossimali mantenendosi completamente sovrapposte. La curva relativa al dito 1,

invece, continua a salire, indicando che la sua falange prossimale prosegue la rotazione anche dopo che le altre due si sono arrestate. Questo comportamento è coerente con le Fasi II-IV della simulazione, in cui il dito 1 si muove in modo indipendente grazie all'inclinazione della piastra triangolare.

La perfetta sovrapposizione tra le curve MATLAB e SolidWorks anche in questo caso conferma l'accuratezza del modello numerico e la corretta gestione delle condizioni di transizione tra le fasi.

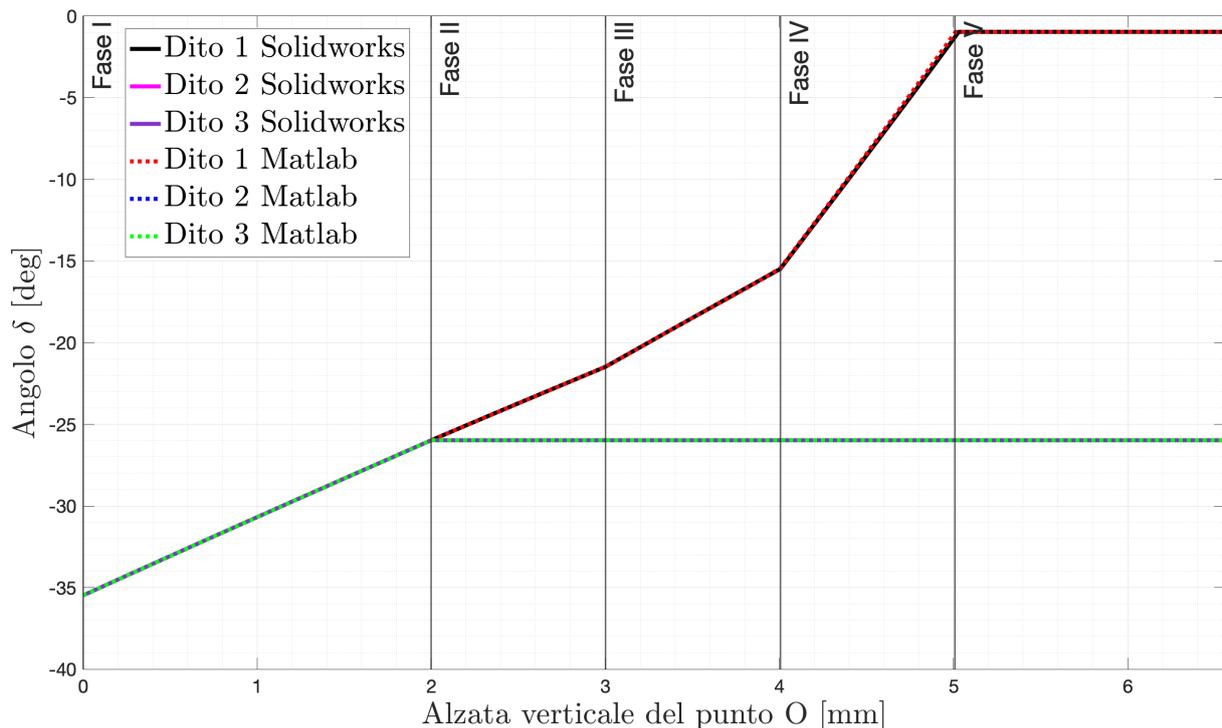


Figura 5.19 - Grafico comparativo degli andamenti dell'angolo δ nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks

Il grafico dell'angolo γ (Figura 5.20) fornisce una visione chiara della cinematica delle falangi distali durante la chiusura della mano. Si osservano chiaramente le fasi in cui le falangi distali delle varie dita si arrestano, e come il blocco di uno o più dita influenzi l'andamento della curva dell'angolo γ relativo alle dita rimanenti. In particolare, nel passaggio dalla Fase IV alla Fase V, si nota che le dita 2 e 3 sono già completamente bloccate, e il moto viene trasferito unicamente al dito 1. Questo si traduce inizialmente nel blocco della sua falange prossimale, seguito dalla rotazione della falange distale, che conclude la presa. L'effetto di questo trasferimento è chiaramente visibile nell'inclinazione della curva dell'angolo γ relativo al dito

1, che subisce un cambiamento di pendenza una volta che le altre dita non contribuiscono più al movimento complessivo.

Anche in questo grafico le curve ottenute dal modello MATLAB risultano sovrapponibili a quelle provenienti da SolidWorks, anche nei punti di transizione tra le fasi. Questo dimostra che il modello implementato riesce a gestire correttamente la cinematica del sistema articolato, riproducendo fedelmente anche le fasi in cui avviene il disaccoppiamento tra falangi.

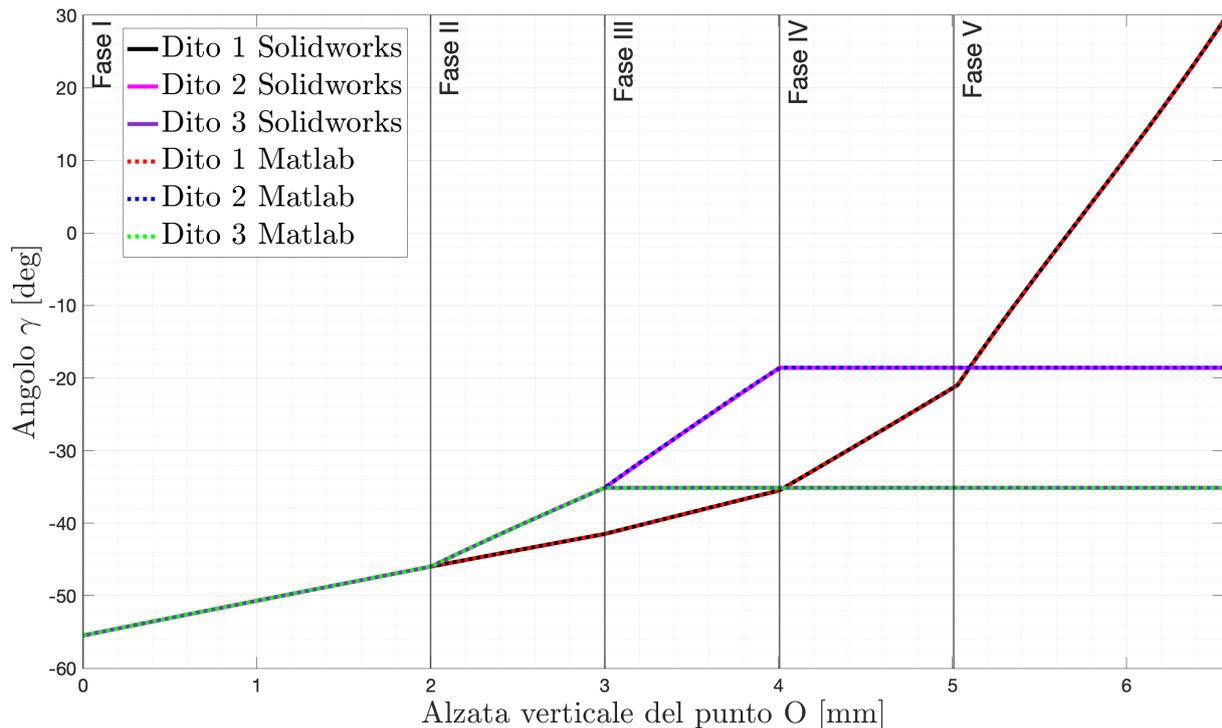


Figura 5.20 - Grafico comparativo degli andamenti dell'angolo γ nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks

Il grafico dell'angolo χ (Figura 5.21) fornisce un'indicazione preziosa sul comportamento del meccanismo articolato O_1BCO_2 durante la chiusura della mano.

Nella Fase I, l'angolo χ mostra un andamento pressoché costante per tutte le dita, confermando il movimento solidale di quest'ultime. Quando si verifica il primo blocco (inizio Fase II), le curve dell'angolo χ relative alle dita 2 e 3 iniziano a variare bruscamente: le bielle BC cominciano a ruotare per trasferire il moto residuo alla falange distale, mentre le prossimali sono ormai vincolate.

Le curve ottenute con il modello MATLAB e SolidWorks risultano del tutto sovrapponibili confermando la corretta gestione della cinematica interna del quadrilatero articolato.

L'andamento dell'angolo χ è particolarmente utile per evidenziare le transizioni tra le fasi, poiché riflette direttamente la riorganizzazione del moto tra le falangi, in risposta allo stop progressivo di quest'ultime.

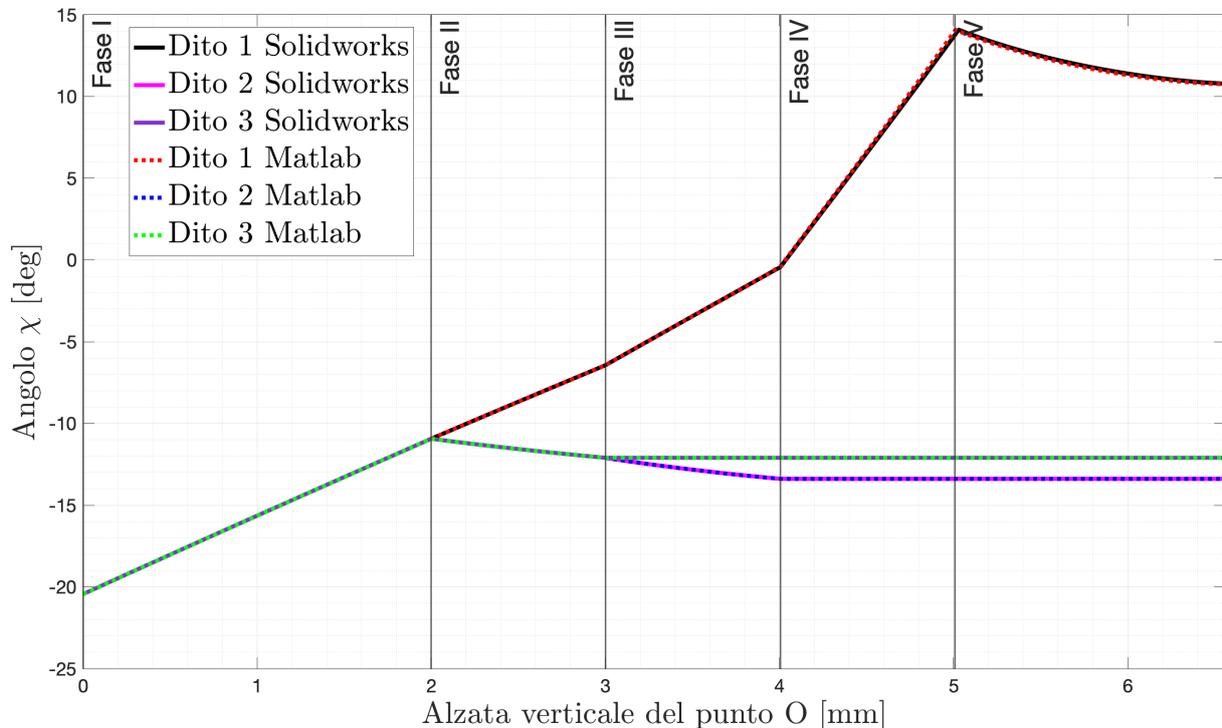


Figura 5.21 - Grafico comparativo degli andamenti dell'angolo χ nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks

Il grafico dell'angolo θ (Figura 5.22) evidenzia in modo diretto la rotazione relativa tra la falange prossimale e quella distale di ciascun dito. Questo angolo è particolarmente significativo perché permette di distinguere le fasi in cui le due falangi di ogni dito ruotano in modo solidale da quelle in cui si verifica un disaccoppiamento cinematico, con le due falangi che si muovono in modo indipendente.

Nella Fase I, le curve di θ per tutti e tre le dita sono pressoché piatte, a indicare che le falangi si muovono in blocco, mantenendo un assetto rigido imposto dalla geometria del sistema. L'angolo relativo resta nullo, poiché non si è ancora verificato nessun blocco di falangi prossimali. Con l'inizio della Fase II, si osserva un primo incremento dell'angolo θ per le dita 2 e 3: il blocco della falange prossimale e l'inizio del moto della distale comportano una rapida variazione dell'angolo relativo. Nel caso del dito 1, l'angolo θ rimane nullo più a lungo, coerentemente con la sua rotazione solidale più prolungata. Solo nella Fase V, quando anche la

falange prossimale 1 si blocca, θ inizia a crescere rapidamente, segnalando l'attivazione della falange distale 1 come ultimo elemento della sequenza di chiusura.

Le curve MATLAB e SolidWorks risultano perfettamente coerenti, sia nella forma che nei tempi di variazione.

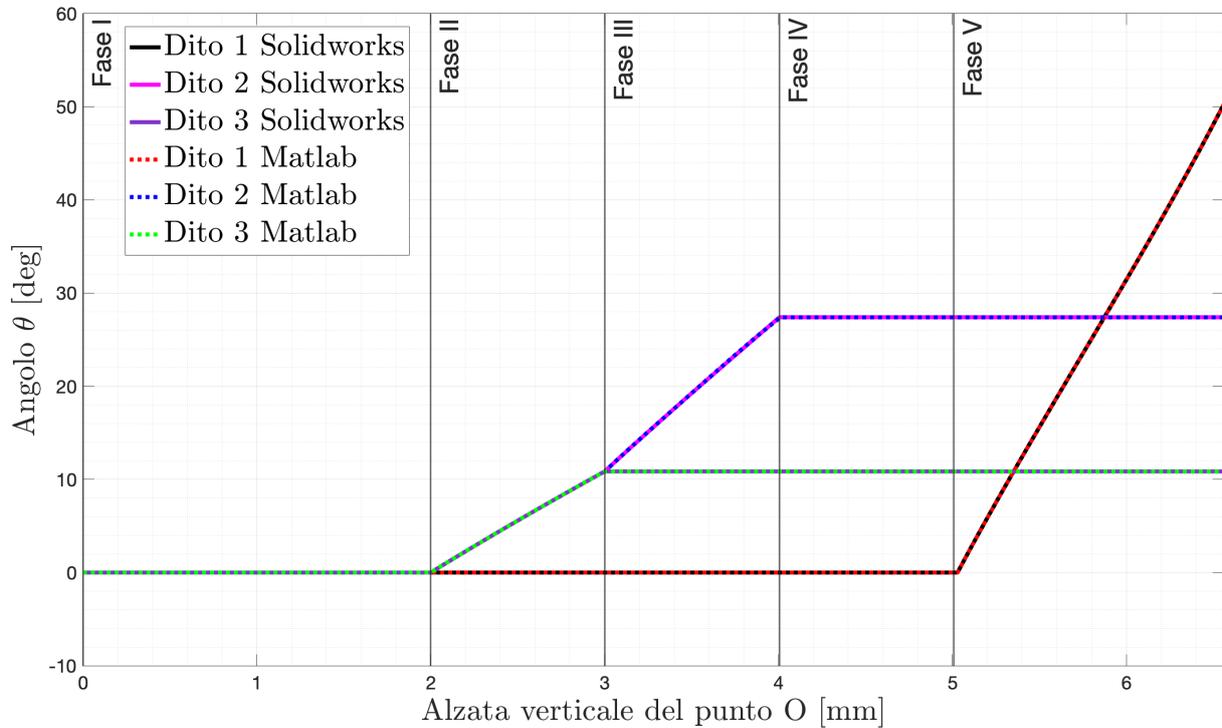


Figura 5.22 - Grafico comparativo degli andamenti dell'angolo θ nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks

Il grafico dell'alzata dei punti A (Figura 5.23) mostra l'evoluzione della posizione verticale dei tre punti di attacco tra la piastra triangolare e le dita (A_1, A_2, A_3), durante la chiusura della mano. Questo parametro è direttamente influenzato dalla traslazione della piastra motrice lungo l'asse verticale e dalle rotazioni indotte da eventuali blocchi differenziati delle falangi.

All'inizio della simulazione, nella Fase I, i tre punti A si alzano in modo perfettamente sincrono, seguendo la salita uniforme della piastra. Le curve corrispondenti sono sovrapposte, indicando che non si è ancora verificato alcun blocco e che il movimento è completamente simmetrico.

Successivamente, con l'avanzare della chiusura, le curve dei punti A_2 e A_3 (dita 2 e 3) mostrano un arresto: le rispettive falangi ditali raggiungono l'angolo di stop e si bloccano,

impedendo l'ulteriore sollevamento dei loro punti di attacco. A partire da questo momento, la curva del punto A_1 (dito 1) continua a salire: la piastra triangolare ruota attorno a un asse passante tra i punti bloccati, permettendo al dito 1 di proseguire il movimento: questo comportamento è una manifestazione diretta della sottoattuazione del sistema.

Il grafico evidenzia con chiarezza l'effetto adattativo della geometria meccanica, e la sovrapposizione ottima tra i risultati MATLAB e SolidWorks conferma che il modello sviluppato è in grado di riprodurre accuratamente non solo le rotazioni articolari, ma anche il comportamento tridimensionale globale della struttura.

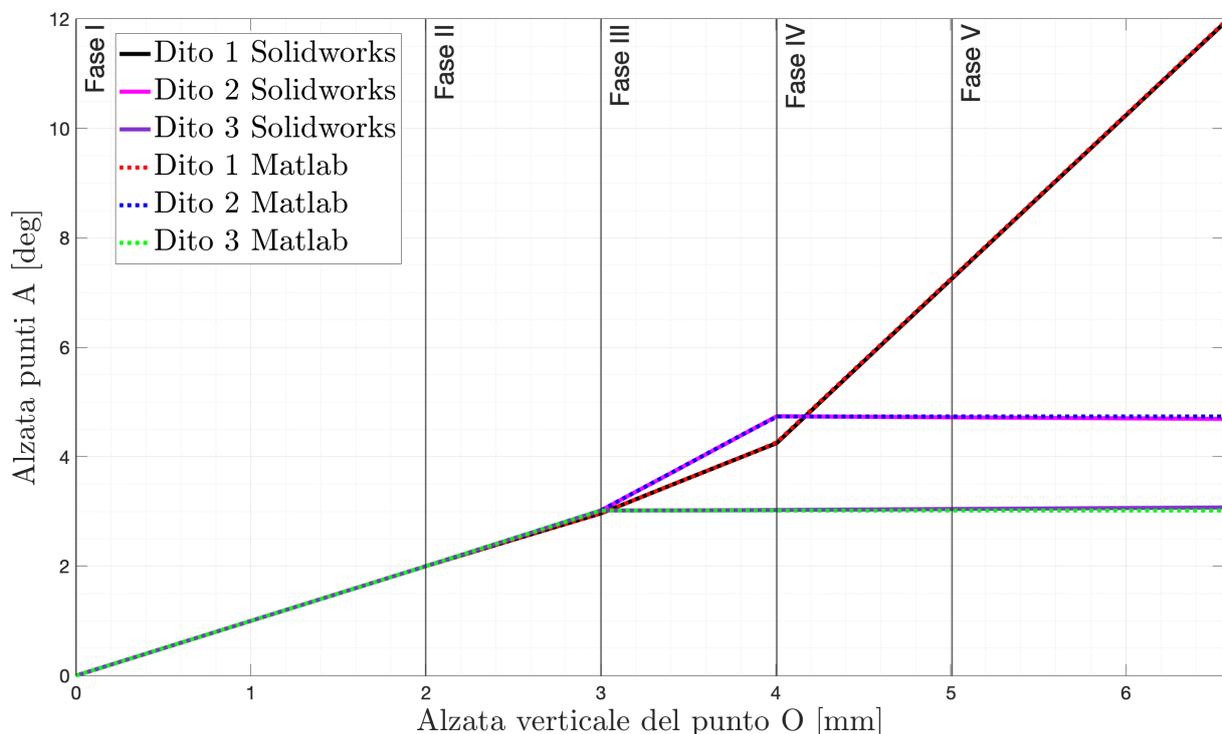


Figura 5.23 - Grafico comparativo degli andamenti dell'alzata dei punti A nelle simulazioni MATLAB e SolidWorks

Il grafico degli angoli di Pitch e Roll (Figura 5.24) della piastra triangolare, calcolati dal modello MATLAB, evidenziano un'evoluzione regolare dell'inclinazione del piano della piastra durante il movimento di chiusura. Questo risultato conferma il corretto comportamento tridimensionale del sistema e l'attuazione passiva del meccanismo, coerente con la cinematica imposta dai vincoli e dalla geometria sottoattuata.

Il sistema di riferimento adottato per il calcolo di questi angoli è di tipo cartesiano, definito come segue:

- asse z orientato verticalmente lungo la direzione di avanzamento della piastra motrice (verso l'alto),
- asse x orientato passante per il punto O centrale della piastra e per il punto A1 relativo all'attacco del dito 1 sulla piastra triangolare,
- asse y ortogonale ai precedenti, secondo la convenzione destrorsa.

All'interno di questo riferimento:

- l'angolo di Pitch rappresenta la rotazione della piastra triangolare attorno all'asse x,
- l'angolo di Roll rappresenta la rotazione attorno all'asse y.

Questa scelta consente di interpretare facilmente le inclinazioni della piastra nel piano orizzontale, legandole alla differente alzata dei punti di attacco dei tre dita. In particolare:

- variazioni del Roll sono sintomatiche di una chiusura asincrona tra due dita 2 e 3,
- variazioni del Pitch indicano una rotazione rispetto al dito 1.

Il calcolo degli angoli di Roll e Pitch è stato eseguito a partire dalle traiettorie dei tre punti A, definendo in ogni istante il piano della piastra e valutandone l'inclinazione rispetto al piano orizzontale. Poiché il grafico dell'alzata dei punti A ha mostrato una corrispondenza eccellente tra i modelli MATLAB e SolidWorks, si è scelto di calcolare questi angoli unicamente sulla base dei dati MATLAB.

L'andamento dei due angoli riflette chiaramente le transizioni tra le fasi del movimento:

- nella fase I, Pitch e Roll restano prossimi allo zero, coerentemente con il moto sincrono dei tre dita;
- con il blocco progressivo delle dita 2 e 3, si osserva una variazione graduale di entrambi gli angoli, sintomo dell'inclinazione della piastra per consentire la prosecuzione della chiusura del dito 1.

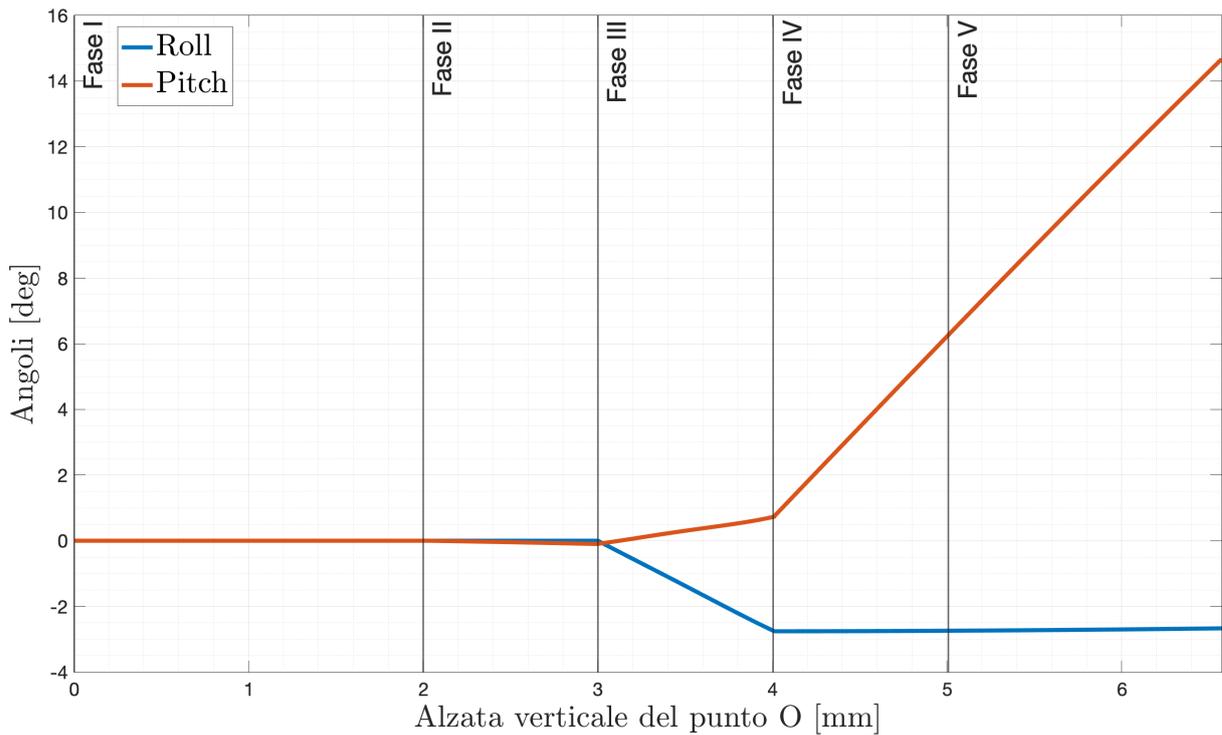


Figura 5.24 – Andamento degli angoli di Roll e Pitch della piastra triangolare nella simulazione MATLAB

Per rafforzare visivamente quanto emerso dai grafici, si riportano due immagini (Figura 5.25 e Figura 5.26) del modello: una in vista isometrica dell'istante finale della simulazione e una in vista laterale del confronto tra l'istante iniziale e finale. Entrambe mostrano chiaramente l'inclinazione della piastra triangolare, dovuta all'interruzione del moto delle dita 2 e 3. È evidente come il dito 1 completi la propria rotazione in ritardo rispetto agli altri, confermando l'adattabilità geometrica della mano anche in assenza di controllo attivo.

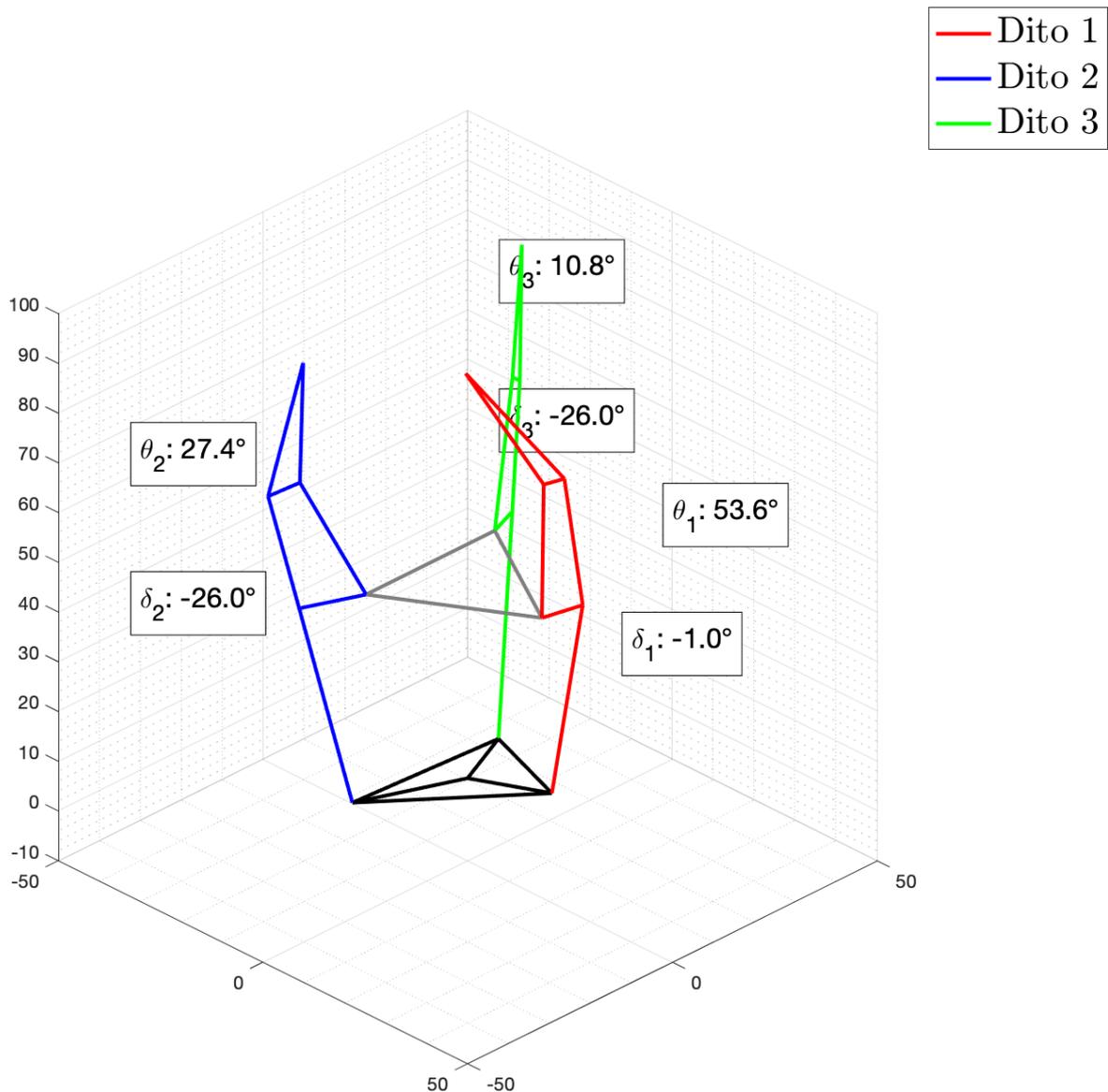


Figura 5.25 – Vista isometrica del modello MATLAB della mano di presa nell’istante finale della simulazione

L’ottima sovrapposizione tra le simulazioni MATLAB e SolidWorks, unita alla corretta riproduzione delle cinque fasi del movimento, dimostra l’efficacia del modello sviluppato. Gli scostamenti riscontrati sono estremamente contenuti e non pregiudicano in alcun modo la coerenza globale del sistema.

Il modello MATLAB sviluppato si dimostra quindi un valido strumento di simulazione e analisi, con il vantaggio di una maggiore flessibilità, velocità ed espandibilità rispetto all’ambiente CAD, risultando adatto per ulteriori sviluppi del progetto.

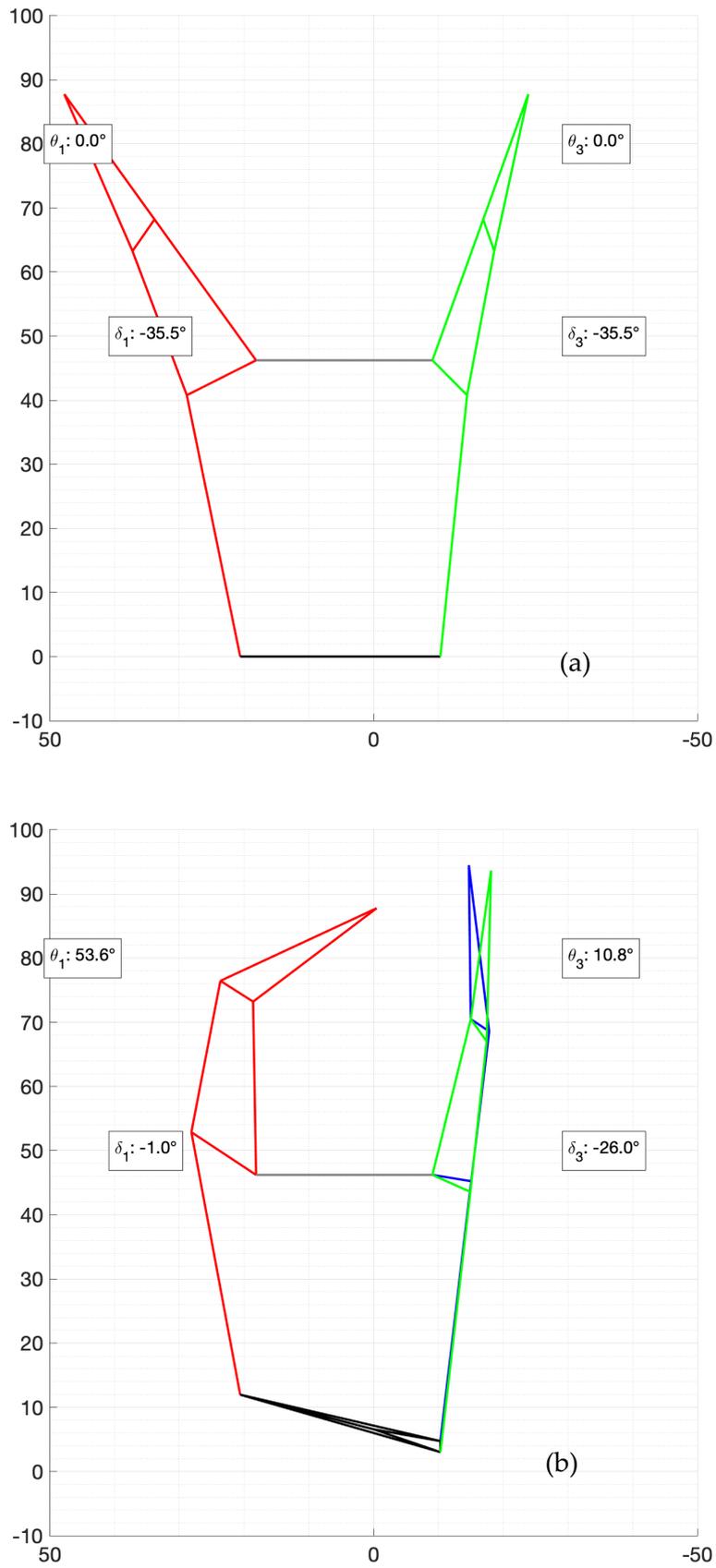


Figura 5.26 – Vista laterale del modello MATLAB della mano di presa nell’istante iniziale (a) e finale (b) della simulazione

6 Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro svolto in questa tesi ha avuto come obiettivo principale lo sviluppo di un modello di simulazione, in ambiente MATLAB, della cinematica di una mano robotica sottoattuata a tre dita, progettata per operazioni di salvataggio in ambienti angusti come i pozzi artesiani.

Attraverso la ricostruzione accurata dell'assieme CAD del prototipo esistente e la definizione di un modello cinematico numerico, è stato possibile simulare il comportamento adattativo del sistema meccanico con ottima fedeltà. L'approccio seguito ha permesso di validare il modello MATLAB attraverso il confronto con i risultati ottenuti dalle simulazioni condotte in SolidWorks Motion, confermando una significativa coerenza tra i due ambienti. In particolare, l'andamento degli angoli caratteristici delle falangi e la rotazione della piastra triangolare durante il movimento sono risultati in linea con quanto ottenuto in SolidWorks Motion, dimostrando la correttezza delle relazioni implementate e l'efficacia del modello.

Un aspetto rilevante del lavoro ha riguardato la gestione delle condizioni di stop delle falangi ed il passaggio da una fase all'altra del movimento, che ha reso possibile simulare prese sia sincrone che adattative. Questo ha permesso di ricreare scenari realistici e variabili, evidenziando la versatilità del modello e la sua capacità di replicare il comportamento della mano robotica. Inoltre, l'utilizzo di interpolazioni polinomiali per rappresentare la cinematica della piastra triangolare ha consentito di superare le complessità analitiche associate alla modellazione completa del sistema sottoattuato, mantenendo comunque un buon compromesso tra accuratezza e semplicità computazionale.

Sebbene il modello sviluppato rappresenti un valido strumento di analisi, esistono diversi ambiti di possibile miglioramento e ampliamento:

- Estensione alla dinamica: attualmente il modello è limitato all'analisi puramente cinematica. L'integrazione con aspetti dinamici (forze, coppie, attriti) permetterebbe di simulare in modo più completo il comportamento della mano in fase di presa.
- Validazione sperimentale diretta: confrontare i risultati del modello MATLAB con misure ottenute da test fisici sulla mano consentirebbe di verificare ulteriormente l'attendibilità del modello.
- Simulazioni in scenari realistici: un passo ulteriore potrebbe essere l'integrazione del modello con ambienti virtuali che ricreino situazioni operative.

Conclusioni e sviluppi futuri

In conclusione, il lavoro svolto fornisce una solida base su cui poter costruire future evoluzioni del progetto della mano robotica, contribuendo al suo miglioramento in vista di un utilizzo operativo reale.

Bibliografia

- [1] The New Indian Express, «Get tougher laws to stop borewell deaths,» 22 Dicembre 2024. [Online]. Available: <https://www.newindianexpress.com/editorials/2024/Dec/22/get-tougher-laws-to-stop-borewell-deaths>.
- [2] CNN, «Sujith Wilson: Indian toddler trapped in well dies,» 29 Ottobre 2019. [Online]. Available: <https://edition.cnn.com/2019/10/29/asia/india-boy-trapped-well-dies-intl-hnk/index.html>.
- [3] The Economic Times, «Killer borewells: Recent cases of children falling into deadly holes,» *The Economic Times*, 30 Luglio 2022.
- [4] D. R. P. Rajarathnam, K. A. Kumar, R. Bhuvanesh e R. Subash, «Borewell Rescue Robot,» *IJMRET (International Journal of Modern Research in Engineering and Technology)*, 2018.
- [5] D. P. M. A. Majeed, S. Praveen e M. Mohanraj, «Hand gesture base bore well rescue robot,» *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- [6] D. Russo, *Modellazione e sperimentazione di una mano di presa a tre dita sottoattuata*, Torino: Politecnico di Torino, 2024.
- [7] International Organization for Standardization (ISO), ISO 8373:2012 - Robots and robotic devices – Vocabulary, Geneva: International Organization for Standardization (ISO), 2012.
- [8] C. Melchiorri e M. Kaneko, «Robot hands,» in *Springer Handbook of Robotics*, Cham, Springer, 2016, p. 463–485.
- [9] C. Piazza, G. Grioli, M. G. Catalano e A. Bicchi, «A century of robotic hands,» *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2019.
- [10] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann e H. Schunk, *Robot Grippers*, Chichester, UK: Wiley, 2007.

Bibliografia

- [11] M. G. Catalano, G. Grioli, E. Farnioli, A. Serio, C. Piazza e A. Bicchi, *Adaptive Synergies for the Design and Control of the Pisa/IIT SoftHand*, London: SAGE Publications, 2014.
- [12] U. Kim, D. Jung, H. Jeong, J. Park, H. Jung, J. Cheong, H. Choi, H. Do e C. Park, «Integrated linkage-driven dexterous anthropomorphic robotic hand,,» *Nature Communications*, 2021.
- [13] Robotiq Inc., «Pinze adattive,,» [Online]. Available: <https://robotiq.com/it/prodotti/pinze-adattive#Three-Finger-Gripper>. [Consultato il giorno 4 Maggio 2025].
- [14] Schunk, «PGN-plus-P,,» [Online]. Available: https://schunk.com/it/it/sistemi-di-presa/pinza-parallela/pgn-plus-p/c/PGR_3228. [Consultato il giorno 19 Maggio 2025].
- [15] Robotiq Inc., «3-Finger Adaptive Robot Gripper,,» [Online]. Available: <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>. [Consultato il giorno 4 Maggio 2025].
- [16] Robotiq Inc., «PowerPick SingleCup Vacuum Gripper,,» 12 Maggio 2025. [Online]. Available: <https://robotiq.com/products/powerpick>.
- [17] Robotiq Inc., «PowerPick SingleCup Vacuum Gripper,,» [Online]. Available: <https://robotiq.com/products/powerpick>. [Consultato il giorno 12 Maggio 2025].
- [18] Shadow Robot Company, «Shadow Dexterous Hand,,» [Online]. Available: <https://www.shadowrobot.com/dexterous-hand/>. [Consultato il giorno 12 Maggio 2025].
- [19] Wonik Robotics, «Allegro Hand V5(4F Plus),» [Online]. Available: <https://www.allegrohand.com/v5-4fplus>. [Consultato il giorno 12 Maggio 2025].
- [20] qbrobotics, «qb SoftHand Research,,» [Online]. Available: <https://qbrobotics.com/products/qb-softhand-research/>. [Consultato il giorno 19 Maggio 2025].
- [21] S. C. Jacobsen, E. K. Iversen, D. F. Knutti, R. T. Johnson e K. B. Biggers, «Design of the Utah/MIT dexterous hand,,» in *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1986.

Bibliografia

- [22] J. Butterfass, M. Grebenstein, H. Liu e G. Hirzinger, «DLR-Hand II: Next generation of a dextrous robot hand,» in *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2001.
- [23] H. Kawasaki, T. Komatsu e K. Uchiyama, «Dexterous anthropomorphic robot hand with distributed tactile sensor: Gifu Hand II,» in *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, 2002.
- [24] RBO Lab, «The RBO Hand 2: A compliant, underactuated hand,» [Online]. Available: https://www.robotics.tu-berlin.de/menue/rbo_hand_2/. [Consultato il giorno 2025 Maggio 13].
- [25] Wevolver, «The PISA-IIT SoftHand 2,» 2020. [Online]. Available: <https://wevolver.com/article/pisa-iit-softhand>. [Consultato il giorno 2 Maggio 2025].
- [26] Robotiq Inc., «3-Finger Adaptive Robot Gripper,» [Online]. Available: <https://robotiq.com/products/3-finger-adaptive-robot-gripper>. [Consultato il giorno 4 Maggio 2025].
- [27] Dynamixel, «MotoreDynamixel XC330-T288-T,» [Online]. Available: <https://www.dynamixel.com>. [Consultato il giorno 20 Maggio 2025].
- [28] igus S.r.l., «Sistema vite madrevite Igus,» [Online]. Available: <https://www.igus.it/>. [Consultato il giorno 2025 Maggio 20].
- [29] Nippon Thompson Co., «Guida lineare IKO Nippon Thompson,» [Online]. Available: <https://www.ikont.co.jp/eg/product/chocado/tou07.html>. [Consultato il giorno 20 Maggio 2024].

Appendice A Analisi cinematica del singolo dito

L'analisi cinematica del singolo dito costituisce la base teorica della simulazione del movimento della mano robotica. Le equazioni implementate nello script MATLAB sono state ricavate a partire dal modello teorico presentato in [6], che analizza in dettaglio il comportamento del meccanismo biella-manovella e del quadrilatero articolato che compongono la cinematica del dito.

Ogni dito è composto da una falange prossimale e una falange distale, azionate da una biella collegata alla piastra triangolare. Il sistema si divide in due sottomecanismi fondamentali: biella-manovella e quadrilatero articolato.

A.1 Meccanismo biella-manovella

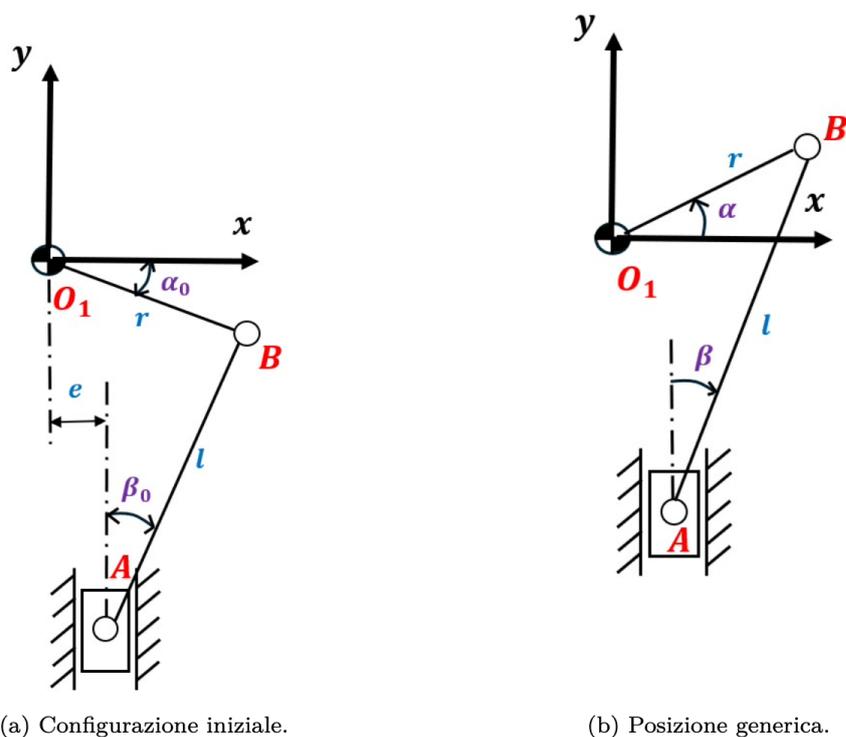


Figura A.1 - Schema biella-manovella ABO₁

Il primo sottosistema è costituito dal cinematismo biella-manovella (punti A-B-O₁), che descrive il moto della falange prossimale fino al suo eventuale arresto. Nello script MATLAB, questo sottosistema consente di determinare istante per istante l'angolo di manovella α e

l'inclinazione della biella β , in funzione dell'alzata h del punto A, punto di attacco sulla piastra triangolare.

Le equazioni, ricavate in [6], sono le seguenti:

$$\alpha(y_A) = 2 \arctan \left(\frac{y_A + \sqrt{y_A^2 - A^2 + e^2}}{A + e} \right)$$

con

$$A = \frac{y_A^2 + r^2 + e^2 - l^2}{2r}$$

dove

- r è la lunghezza della manovella,
- l è la lunghezza della biella,
- e l'eccentricità tra il punto di attacco della biella sulla piastra e l'asse della manovella,
- y_A la posizione verticale del piede di biella.

L'angolo β della biella si ottiene da:

$$\beta = \arcsin \left(\frac{-r \cdot \cos(\alpha) + e}{l} \right)$$

A.2 Quadrilatero articolato

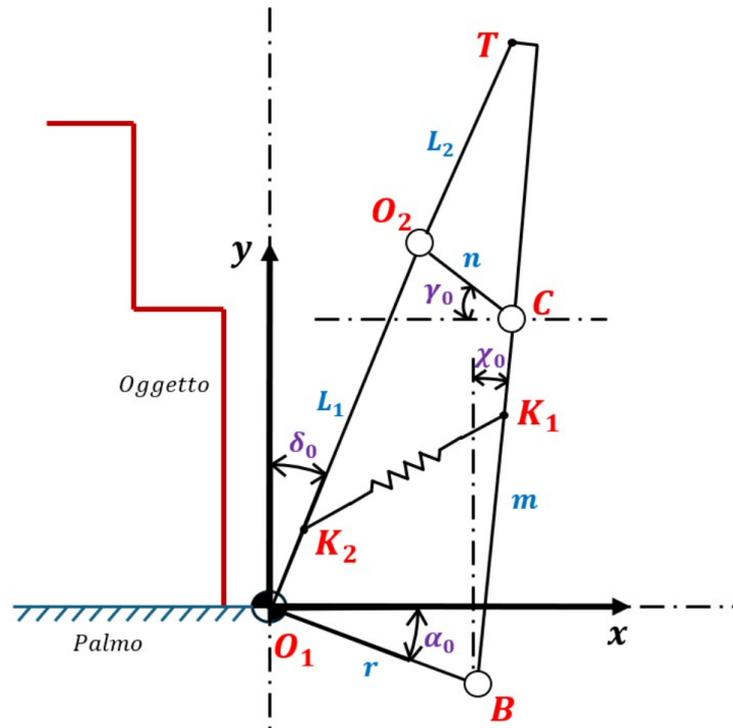


Figura A.2 - Schema quadrilatero articolato O_1BCO_2

Una volta che la falange prossimale entra in contatto con l'oggetto (o raggiunge l'angolo limite), inizia a ruotare la falange distale, secondo la cinematica del quadrilatero articolato (punti $O_1-B-C-O_2$). I legami cinematici sono ottenuti andando a studiare la seguente uguaglianza vettoriale:

$$\vec{r} + \vec{m} + \vec{n} + \vec{L}_1 = 0$$

Si ottiene il seguente sistema:

$$\begin{cases} L_1 \sin(\delta_{STOP}) + r \cos(\alpha) = n \cos(\gamma) + m \sin(\chi) \\ L_1 \cos(\delta_{STOP}) + n \sin(\gamma) = r \sin(\alpha) + m \cos(\chi) \end{cases}$$

dove:

- χ è l'angolo della biella BC rispetto alla verticale,
- γ l'angolo della falange distale rispetto al telaio,
- L_1 è la lunghezza della falange prossimale,
- m, n sono le lunghezze dei link del quadrilatero.

La risoluzione di queste equazioni porta, tramite sostituzioni trigonometrico-algebriche, alle seguenti relazioni chiuse:

Appendice A Analisi cinematica del singolo dito

$$\chi(\alpha) = 2 \arctan\left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}\right) \quad e \quad \gamma(\alpha) = 2 \arctan\left(\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right)$$

con coefficienti A, B, C e a, b, c calcolati in funzione dei parametri geometrici del meccanismo e dell'angolo α .

