



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccanica
A.a. 2020/2021
Sessione di Laurea Dicembre 2021

Progettazione di un utensile di taglio azionato da braccio robotico per operazioni di campionamento di colture

Relatori:

Prof. Quaglia Giuseppe
Carbonari Luca
Cavallone Paride
Tagliavini Luigi

Candidato:

Recanatesi Marco

Abstract

Il lavoro di tesi si propone di progettare un utensile per la raccolta di campioni di colture da utilizzare tramite il braccio robotico montato sul veicolo terrestre senza equipaggio Agri.Q, sviluppato dal Politecnico di Torino per operazioni di agricoltura di precisione. Dopo un'introduzione sull'agricoltura di precisione, sul suo sviluppo e le tecnologie utilizzate, si è effettuata una ricerca bibliografica sugli organi di presa, detti pinze o *gripper*, dei robot manipolatori, approfondendo in modo particolare quelle pinze che sfruttano elementi morbidi e strutture cedevoli per eseguire la presa, anche noti come *soft grippers*. Il lavoro si concentra, poi, sulla progettazione dell'utensile che possa essere utilizzato dal braccio robotico Kinova Jaco2 presente sul veicolo Agri.Q, facendo particolare attenzione alla progettazione funzionale di un meccanismo che permetta di afferrare e separare dalla coltura diverse tipologie di campioni utilizzando come input il moto e la coppia generati dalla pinza a due dita presente sul braccio robotico. Lo schema funzionale proposto è analizzato per valutarne le prestazioni ottenibili e viene proposta una prima ottimizzazione dei parametri principali. La tesi si conclude con la progettazione esecutiva di un primo prototipo a basso costo da realizzare tramite fabbricazione additiva e con l'utilizzo di elementi commerciali.

Il presente lavoro è così suddiviso: il Capitolo 1 introduce il concetto di agricoltura di precisione e l'importanza della raccolta di campioni delle colture, descrivendo poi brevemente il rover agricolo Agri.Q; il Capitolo 2 presenta lo stato dell'arte dei soft grippers, facendo una panoramica delle diverse tecnologie adottate; il Capitolo 3 si concentra sulla progettazione dell'utensile: vengono presentati il concept e le specifiche richieste, si descrivono e analizzano gli scemi funzionali del meccanismo che compone l'utensile e si riporta la progettazione esecutiva del primo prototipo e le soluzioni tecnologiche adottate; il Capitolo 4 descrive alcune proposte di sensorizzazione dell'utensile; infine il Capitolo 5 presenta infine le conclusioni.

Sommario

Abstract	I
Indice delle figure	V
1. Introduzione	1
1.1 Agri.Q.....	3
2. Stato dell'arte	7
2.1 Presa per attuazione.....	7
2.2 Presa tramite controllo di rigidità.....	14
2.3 Presa tramite controllo di adesione	16
3. Progettazione.....	19
3.1 Specifiche di progetto.....	20
3.2 Progetto funzionale.....	20
3.2.1 Schemi funzionali	22
3.2.2 Sintesi camma	27
3.2.3 Analisi funzionale del meccanismo a leva.....	33
3.3 Progetto esecutivo	54
3.3.1 Telaio	55
3.3.2 Membri di presa	57
3.3.3 Membri di ingresso	58
3.3.4 Molla a flessione	60
3.3.5 Porta-lama	62
3.3.6 Elementi commerciali	63
3.3.7 Montaggio	66
3.3.8 Funzionamento.....	70
4. Sensorizzazione.....	73
5. Conclusione.....	75
Bibliografia	77
Appendice A: Sintesi analitica dei profili della camma.....	81
Appendice B: Codici MatLab	91
Analisi parametrica del meccanismo di taglio con fulcro fisso	91
Analisi parametrica del meccanismo di taglio a fulcro mobile.....	103

Indice delle figure

Figura 1.1 Obiettivi per lo sviluppo sostenibile.....	1
Figura 1.2 (a) Robot per fertilizzare Cäsar; (b) Greenbot.....	2
Figura 1.3 Robot per l'eliminazione di erbe infestanti: (a) Oz; (b) Dino; (c) Ted.	2
Figura 1.4 Esempio di robot per la raccolta di melanzane [9].....	3
Figura 1.5 Rappresentazione del rover Agri.Q nel suo scenario applicativo.....	4
Figura 1.6 Specifiche tecniche e spazio di lavoro del braccio robotico Kinova Jaco2 a 7 gradi di libertà.	4
Figura 1.7 Foto del veicolo Agri.q02 in differenti condizioni.	5
Figura 2.1 Struttura Fin Ray ad azionamento passivo.	8
Figura 2.2 Pinza passiva che sfrutta la struttura Fin Ray. [17].....	8
Figura 2.3 a) Struttura del gripper sottoattuato, b) elementi principali.	8
Figura 2.4 Processo di presa del dito flessibile.....	9
Figura 2.5 Struttura e sistema di azionamento di una pinza filoguidata.....	9
Figura 2.6 Esempio di modello di pinza filoguidata del progetto Open Hand	10
Figura 2.7 Modello VF ed esempio di funzionamento.	10
Figura 2.8 Modello M2 e struttura del doppio azionamento.	10
Figura 2.9 Prototipo della pinza per presa di una tazza di 55 mm di diametro	11
Figura 2.10 Posizionamento di un bullone di 6 mm di diametro all'interno di una tazza di 80 mm.	11
Figura 2.11 Principio di funzionamento dei DEAs. [23].....	12
Figura 2.12 Principio di funzionamento degli attuatori compositi polimero-metallo ionici. [24]....	12
Figura 2.13 Meccanismo molecolare dell'effetto memoria di forma indotto. [25].....	13
Figura 2.14 Concetto del gripper adattativo a due dita sviluppato mediante un sistema cedevole di variazione di forma. [26].....	13
Figura 2.15 a) Dito del gripper senza attuatori, b) integrato con gli attuatori in filo di nitinol, c) comportamento della struttura, attivazione dell'attuatore 1 (d), 2 (e), 3 (f).	13
Figura 2.16 Gripper che sfrutta polimeri a memoria di forma bidirezionali. [27].....	14
Figura 2.17 Pinza a compattazione di granuli per la presa di una vasta gamma di oggetti.	14
Figura 2.18 (a) La struttura dell'attuatore morbido incorporato con LMPA. (b) La proprietà di autoguarigione dell'attuatore morbido. (c) Le fotografie che mostrano il processo di auto-guarigione dell'attuatore. [29].....	15
Figura 2.19 Pinza che integra l'elettro-adesione con un attuatore dielettrico elastomerico.....	16
Figura 2.20 Pinza elettro-adesiva cedevole [31].....	16
Figura 2.21 Pinza con membrana polimerica ricoperta da adesivi fibrillari. [32] Copyright © 2014, IEEE	17
Figura 3.1 Raffigurazioni delle funzioni richieste all'utensile.	19
Figura 3.2 Raffigurazione della pinza Kinova KG-2 con il sistema di riferimento adottato.....	21
Figura 3.3 Rappresentazione degli elementi di trasmissione D ₀ E	21
Figura 3.4 Modello CAD della pinza Kinova KG-2.....	22
Figura 3.5 Esempi di quadrilateri articolati [35].....	23
Figura 3.6 Schema di un sistema a camma. [35]	23
Figura 3.7 Esempi di leve.	24
Figura 3.8 Rappresentazione delle due versioni del meccanismo.	25
Figura 3.9 Raffigurazione del metodo di sintesi grafica di un profilo a camma tramite software GeoGebra.	27
Figura 3.10 Moto richiesto dell'elemento di presa.....	28
Figura 3.11 Processo di costruzione del profilo sull'elemento di presa.....	29
Figura 3.12 Costruzione del profilo a camma primitivo dell'elemento di presa.....	29

Figura 3.13	Rappresentazione angolo di pressione. [35]	30
Figura 3.14	Profilo dell'elemento di presa con raggio	30
Figura 3.15	Angoli di pressione del profilo ottenuto dalla sintesi grafica	31
Figura 3.16	Angolo di pressione	32
Figura 3.17	Profili analizzati dell'elemento di presa	32
Figura 3.18	Rappresentazione del meccanismo di taglio con campione.	33
Figura 3.19	Rappresentazione meccanismo utensile a fulcro fisso.	34
Figura 3.20	Rappresentazione del meccanismo a fulcro fisso e dettaglio dei parametri.	35
Figura 3.21	Grafici in funzione dell'ascissa del fulcro x_p .	37
Figura 3.22	Grafici in funzione della distanza del perno di collegamento R.	38
Figura 3.23	Grafici in funzione dell'angolo di fasatura ϵ .	39
Figura 3.24	Grafici in funzione dell'ordinata del fulcro Y	40
Figura 3.25	Meccanismo completo asimmetrico a fulcro fisso	41
Figura 3.26	Proporzioni per meccanismi a fulcro fisso asimmetrici.	41
Figura 3.27	Trasmissione per meccanismi a fulcro fisso asimmetrici.	42
Figura 3.28	Guadagni per meccanismi a fulcro fisso asimmetrici.	42
Figura 3.29	Grafici dei meccanismi a fulcro fisso asimmetrici.	42
Figura 3.30	Rappresentazione meccanismo utensile a fulcro mobile.	43
Figura 3.31	Rappresentazione meccanismo di taglio a fulcro mobile e dettaglio dei parametri.	44
Figura 3.32	Grafici in funzione della lunghezza del braccio di ingresso l_1 .	46
Figura 3.33	Grafici in funzione della distanza del perno di collegamento R.	47
Figura 3.34	Grafici in funzione dell'angolo di fasatura ϵ .	48
Figura 3.35	Grafici in funzione dell'ordinata del fulcro Y	49
Figura 3.36	Meccanismo completo asimmetrico a fulcro mobile.	50
Figura 3.37	Proporzioni per meccanismi a fulcro mobile asimmetrici.	50
Figura 3.38	Trasmissione per meccanismi a fulcro mobile asimmetrici	51
Figura 3.39	Guadagno per meccanismi a fulcro mobile asimmetrici	51
Figura 3.40	Ascissa del fulcro per meccanismi a fulcro mobile asimmetrici	51
Figura 3.41	Meccanismo completo implementato nell'utensile	52
Figura 3.42	Caratteristiche del meccanismo ottimizzato	53
Figura 3.43	Complessivo dell'utensile (misure in millimetri)	54
Figura 3.44	Parte principale della scocca (misure in millimetri)	56
Figura 3.45	Coperchio della scocca (misure in millimetri).	56
Figura 3.46	Elemento di presa (misure in millimetri)	57
Figura 3.47	Dettaglio costruzione del profilo a camma sull'elemento di presa.	57
Figura 3.48	Elemento di trasmissione (misure in millimetri)	59
Figura 3.49	Altra vista dell'elemento di trasmissione	59
Figura 3.50	Configurazione di completa chiusura del meccanismo.	59
Figura 3.51	Molla a flessione (misure in millimetri)	60
Figura 3.52	Posizione della molla a flessione.	60
Figura 3.53	Parametri della molla a flessione.	61
Figura 3.54	Elemento porta-lama.	63
Figura 3.55	Tipologie di lama: (a) a by-pass, (b) a battente, (c) a doppia lama.	64
Figura 3.56	Cesoie a battente Lowe 5	64
Figura 3.57	Cesoie a by-pass Verdemax 4187	65
Figura 3.58	Cesoie a doppia lama Archman 19	65
Figura 3.59	Modelli CAD della lama doppia Archman 19: (a) Nuova, (b) Modificata per posizzionarla nel porta-lama.	65
Figura 3.60	Preassemblaggio della scocca	66
Figura 3.61	Preassemblaggio del corpo di trasmissione	66
Figura 3.62	Preassemblaggio dell'elemento di presa.	67

Figura 3.63 Preassemblaggio del porta-lama.....	67
Figura 3.64 Processo di assemblaggio dell'utensile.....	69
Figura 3.65 Configurazione di riposo in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione.	70
Figura 3.66 Inizio del moto in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione.	70
Figura 3.67 Chiusura elemento di presa in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione.	71
Figura 3.68 Termine della chiusura in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione.	71
Figura 3.69 Configurazione di chiusura in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione	71
Figura 3.70 Viste del posizionamento dell'utensile rispetto alla pinza Kinova.	72
Figura A.1 Rappresentazione di una camma	81
Figura A.2 Costruzione del profilo primitivo	82
Figura A.3 Rappresentazione delle velocità (a sinistra) e delle accelerazioni (a destra).....	83
Figura A.4 Accelerazioni	84
Figura A.5 Profilo effettivo.....	84
Figura A.6 Legge polinomiale 3-4-5	85
Figura A.7 Legge biarmonica	85
Figura A.8 Legge cicloidale.....	86
Figura A.9 Valori di riferimento del profilo ottenuto dal metodo grafico.....	87
Figura A.10 Profili di salita secondo le diverse leggi di alzata.	88
Figura A.11 Angolo di pressione dei profili ottenuti.....	88
Figura A.12 Profili ottenuti con sintesi analitica	89

1. Introduzione

Le Nazioni Unite hanno deciso di impegnarsi verso le persone, il pianeta e la prosperità sottoscrivendo, nel 2015, l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile [1]: questa agenda si compone di 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile (*Sustainable Development Goals*, SDGs) che riguardano i più svariati ambiti, dall'eliminazione della fame nel mondo alla lotta alla povertà, dalla parità di genere a garantire un'istruzione di qualità per tutti fino a salvaguardare la salute sia delle persone che del pianeta in cui viviamo. Questi obiettivi, riportati in Figura 1.1, sono obiettivi "comuni" e coinvolgono tutti i Paesi e tutti gli individui.



Figura 1.1 Obiettivi per lo sviluppo sostenibile

Ad oggi nel mondo circa 795 milioni di persone, cioè una persona su nove, soffrono la fame e se, secondo le stime delle Nazioni Unite, la popolazione mondiale dovesse passare dagli attuali 7.6 miliardi a 9.8 miliardi per il 2050, a queste si aggiungerebbe la necessità di sfamare altri 2 miliardi di persone. Se nel 2050 si raggiungesse una tale popolazione sarebbero necessari tre pianeti per soddisfare la domanda di risorse naturali necessarie a soddisfare gli stili di vita attuali e la produzione agricola dovrebbe raddoppiare rispetto a quella attuale [2]. Se si tiene conto, poi, che ogni anno circa un terzo del cibo prodotto viene sprecato a causa delle abitudini consumistiche, del sistema di trasporto o di pratiche agricole inadeguate, il problema diventa ancora più serio.

Si può quindi dedurre che l'agricoltura ricopra un ruolo centrale in molti di questi obiettivi: essa offre mezzi di sostentamento per il 40% della popolazione mondiale e rappresenta la fonte di reddito e di lavoro per le famiglie rurali più povere. Di contro, dal 1900 il settore agricolo ha perso il 75% della varietà delle colture mentre circa 3.6 miliardi di ettari di terreno utilizzabile si sono desertificati a causa del persistente deterioramento e il 52% del terreno attualmente utilizzato per l'agricoltura risulta a rischio. La desertificazione e la siccità fanno perdere 12 milioni di ettari ogni anno, terreno che potrebbe ospitare la coltivazione di 20 milioni di tonnellate di cereali.

Possiamo riassumere i traguardi proposti per l'agricoltura da tali obiettivi come segue:

- Raddoppiare la produttività, anche investendo sui paesi meno sviluppati, utilizzando in modo efficiente le risorse naturali e sfruttando una gestione sostenibile;
- Garantire sistemi di produzione alimentare sostenibili e implementare pratiche agricole resilienti che aumentino la produttività;
- Migliorare la qualità del suolo e la capacità di adattamento alle condizioni sempre più estreme;
- Ridurre e gestire in modo eco-compatibile le sostanze chimiche rilasciate.

È per raggiungere questi traguardi che in agricoltura si sta diffondendo l'uso delle tecnologie più recenti, facendo nascere quella che viene definita "Agricoltura di precisione". Sono stati introdotti robot, sensoristica, big data, Intelligenza Artificiale e internet ad oggetti (*Internet of Things, IoT*) con lo scopo di migliorare l'efficienza, la produttività e la sostenibilità delle operazioni agricole.

Una rapida crescita dell'agricoltura di precisione è avvenuta grazie all'utilizzo di robot che potessero compiere diversi tipi di operazioni agricole, dalla supervisione aerea dei campi tramite droni alla raccolta di frutta fino alla preparazione della terra per la semina, tanto che il valore di mercato dell'agricoltura di precisione nel 2016 è stato stimato in 3.67 miliardi di dollari e si stima che possa crescere fino a 7.29 miliardi nel 2021 [3]. Ad esempio, il robot commerciale Cäsar [4] riportato in Figura 1.2a permette di fertilizzare il terreno sia in modo autonomo tramite il sistema di navigazione satellitare globale (*Global Navigation Satellite System, GNSS*) sia con un controllo da remoto, utilizzando dei sensori ad ultrasuoni per evitare impatti. Il Greenbot [5], mostrato in Figura 1.2b, è capace di fertilizzare, arare e seminare, sfruttando un sistema a quattro ruote motrici e un motore da cento cavalli. Altri robot utilizzano telecamere RGB per riconoscere malattie o i primi stadi di appassimento [6], oppure per individuare erbe infestanti e sfruttare opportuni organi terminali per permetterne la rimozione [7]. Di questa tipologia sono i robot Oz, Dino e Ted della compagnia Naio Technologies [8], rappresentati in Figura 1.3, ed hanno la capacità di riconoscere e rimuovere meccanicamente erbacce operando in modo autonomo. Anche nella raccolta si utilizzano robot con diverse tipologie di elementi di presa, che devono garantire di non rovinare gli ortaggi o la frutta afferrata.



Figura 1.2 (a) Robot per fertilizzare Cäsar; (b) Greenbot.



Figura 1.3 Robot per l'eliminazione di erbe infestanti: (a) Oz; (b) Dino; (c) Ted.



Figura 1.4 Esempio di robot per la raccolta di melanzane [9].

In parallelo ai robot, un'altra importante spinta è stata data dall'utilizzo di sensori elettronici per l'acquisizione di diverse tipologie di dati: dalla quantità di nutrienti e di acqua presenti nel terreno alle condizioni meteo, dalla densità delle colture all'analisi della fotosintesi. Tramite una fitta rete di sensori wireless (*Wireless Sensor Network*, WSN), tecnologia principale dell'IoT, è possibile ricevere in tempo reale una grande quantità di dati [2]. Rielaborando questa mole di informazioni, tramite algoritmi di Intelligenza Artificiale, è possibile stabilire le condizioni di salute delle colture, la presenza e la predizione della comparsa di eventuali malattie, la necessità di irrigazione o di nutrienti, fino a stimare la resa della coltura oppure aiutare nella pianificazione della tipologia e delle quantità della coltura adatta da piantare. L'IoT permette di gestire il rischio e la pianificazione di tutti gli aspetti gestionali delle aziende, migliorandone la resa e riducendo gli sprechi [10].

Nell'agricoltura di precisione l'Intelligenza Artificiale utilizza l'elevata quantità di dati ottenuti tramite l'IoT per gestire le colture. Uno dei principali campi in cui viene utilizzata è nella gestione del terreno e delle erbacce: gli algoritmi permettono di individuare le necessità del terreno per renderlo il più fertile e produttivo possibile e rendono possibile riconoscere la presenza e la posizione delle erbacce, grazie all'utilizzo di appositi robot, e rendere più preciso l'utilizzo dei diserbanti ed erbicidi senza che vadano ad inquinare le colture principali [11].

1.1 Agri.Q

Il PIC4SeR (*Politecnico Interdepartmental Centre for Service Robotics*) è un centro interdipartimentale del Politecnico di Torino con lo scopo di utilizzare diversi campi di conoscenza per sviluppare varie soluzioni di robotica di servizio. Tra i progetti proposti, Agri.Q [12] è un veicolo terrestre senza equipaggio (*Unmanned Ground Vehicle*, UGV) per agricoltura di precisione, con l'obiettivo di effettuare una assistenza intelligente per la salute delle vigne. Il rover Agri.Q è stato pensato per interagire con un drone aereo per compiere insieme operazioni di monitoraggio e mappatura delle viticole e, tramite un braccio robotico commerciale, compiere operazioni di raccolta campioni sfruttando specifiche pinze presenti sul veicolo oppure applicare fertilizzante.



Figura 1.5 Rappresentazione del rover Agri.Q nel suo scenario applicativo.

Il rover è costituito da una piattaforma che ne permette l'interazione con i veicoli aerei, utilizzata anche per ospitare pannelli solari che forniscano ulteriore energia al veicolo, e che ha la possibilità di essere inclinata rispetto al sistema di movimentazione allo scopo di garantire una superficie piana per l'atterraggio dei droni in qualunque condizione del terreno sottostante e, qualora questi non fossero presenti, permette di inclinare i pannelli nella posizione che ne ottimizzi la ricezione di energia solare. Il sistema di movimentazione è composto da due unità, ognuna composta da quattro ruote, che tramite appositi bilancieri hanno la capacità di adattarsi a qualsiasi inclinazione e irregolarità del terreno. Il veicolo è poi completato da un braccio robotico, il Jaco2 di Kinova, che ha lo scopo di interagire con il vigneto e con i droni atterrati sulla piattaforma.

Il Jaco2 è un robot manipolatore ridondante a 7 gradi di libertà, con uno spazio di lavoro quasi sferico. La ridondanza cinematica permette di muovere il gomito del robot lungo una circonferenza mantenendo fissa la posizione del polso, come mostrato nella Figura 1.6. Questa capacità permette al robot di potersi muovere in modo agile e con destrezza attraverso la vigna.

Sul polso va poi montato un organo terminale, anche detto *end-effector*, che interagisce con l'oggetto. Questi end-effector possono essere di diverse tipologie a seconda dell'utilizzo che si vuole fare del robot, ma nel caso in esame gli organi terminali di maggiore interesse sono dispositivi che permettano di afferrare oggetti e campioni, i cosiddetti *gripper* o pinze robotiche. A tale scopo è stata effettuata una ricerca bibliografica su questi organi, riportata nel Capitolo 2, per osservarne lo stato dell'arte.

Tabella 1.1: Specifiche Kinova Jaco 2 a 7 gradi di libertà [13]

Estensione massima	985 mm
Capacità di carico	Senza gripper: 2.1 kg Con gripper a 2 dita KG-2: 1.3 kg
Materiali	Corpi: Fibra di carbonio Attuatori: Alluminio
Peso	Senza gripper: 5.5 kg Con gripper a 2 dita KG-2: 5.98 kg
Potenza richiesta	Picco: 100 W Modalità operativa: 25W

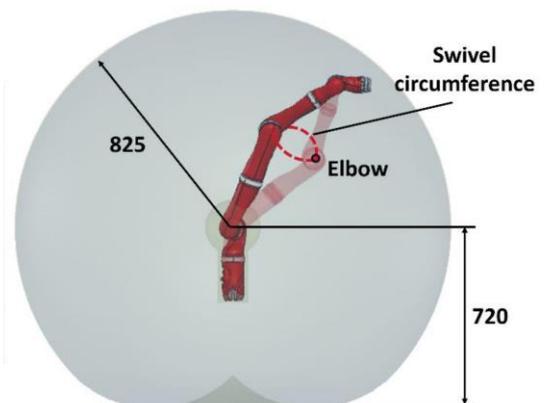


Figura 1.6 Specifiche tecniche e spazio di lavoro del braccio robotico Kinova Jaco2 a 7 gradi di libertà.

In Figura 1.7 si può osservare il prototipo Agri.q02 [14] con montato il braccio robotico e la pinza Kinova con due dita: avendo posizionato il robot nella parte anteriore del rover il braccio Kinova può raggiungere la parte laterale del rover, il terreno, l'altezza di circa 2 m azionando il movimento della piattaforma e un drone atterrato vicino.



Figura 1.7 Foto del veicolo Agri.q02 in differenti condizioni: (a) Braccio robotico a lavoro a lato del rover; (b) Braccio robotico che raccoglie campioni a terra; (c) Braccio robotico esteso con piattaforma azionata nella configurazione di massima altezza raggiungibile; (d) Interazione tra il braccio robotico e il drone atterrato sulla piattaforma.

Allo scopo di permettere al rover di raccogliere campioni sul campo, il presente lavoro si è prefissato l'obiettivo di progettare un organo terminale per il braccio robotico che permetta di svolgere questa importante funzione.

2. Stato dell'arte

Negli ultimi anni l'utilizzo di robot che svolgano le più differenti operazioni ha subito un'enorme crescita, ponendosi come obiettivi quelli di automatizzare processi sia industriali che non oppure di svolgere operazioni di sostegno all'uomo. Uno dei compiti principali richiesti a tali robot, sia industriali sia di assistenza e collaborazione, è quello della manipolazione di oggetti dalle più disparate forme e dimensioni e nelle più differenti situazioni: questi robot hanno tipicamente tutti la stessa struttura e sono composti da diversi corpi rigidi a formare una catena cinematica che termina con un polso a cui si collega l'organo di presa.

Gli organi di presa, anche detti pinze o *gripper*, sono gli elementi che fanno da collegamento tra il robot e l'oggetto da afferrare. Le funzioni principali di questi organi possono essere riassunte in:

- Mantenere fermo l'oggetto in una specifica posizione e orientazione rispetto al robot per il tempo necessario;
- Esercitare le forze e i momenti, sia statici che dinamici, necessari ad assicurare la presa;
- Permettere la manipolazione dell'oggetto da parte del robot;
- Consentire ulteriori operazioni richieste da specifiche operazioni.

Questi organi presentano una notevole varietà di soluzioni, molto spesso direzionate verso specifiche applicazioni: ad esempio per afferrare oggetti convessi si possono utilizzare estremità simili a dita umane che possono compiere movimenti di chiusura di vario tipo o per manipolare delle lastre può risultare comodo sfruttare ventose o elementi elastici che producano un leggero vuoto.

La sempre maggiore richiesta di versatilità ha indirizzato lo sviluppo verso pinze che permettano di afferrare sempre più oggetti di forme e consistenze diverse: una possibile soluzione a questa richiesta di "universalità" è stata intrapresa attraverso l'utilizzo di elementi di presa morbidi e cedevoli, che possano adattarsi a diversi tipi di applicazioni.

Questi tipi di organi di presa, detti anche *soft grippers*, possono essere classificati in molteplici modi. Uno dei più chiari che viene qui riportato è quello utilizzato da Shintake et al. [15] che differenzia i gripper in funzione delle tecnologie utilizzate per effettuare la presa e vengono divisi in:

- Presa per attuazione: in cui la presa viene eseguita per mezzo di estremità prensili azionati in vari modi;
- Presa tramite controllo di rigidità: la pinza presenta un elemento morbido che viene portato in contatto con l'oggetto di presa e tramite diverse soluzioni tale elemento viene irrigidito per assicurare la presa;
- Presa tramite controllo di adesione: sono organi di presa che sfruttano vari tipi di interazione tra superfici per mantenere il contatto con l'oggetto.

2.1 Presa per attuazione

La presa tramite attuazione richiede la presenza di estremità nell'organo di presa, dette dita del gripper o *fingers*, che tramite un'attuazione vengono chiuse attorno all'oggetto da afferrare. L'attuazione può essere effettuata tramite diverse soluzioni.

Nella deformazione guidata della zona di contatto l'interazione con l'oggetto produce una deformazione dell'organo di presa e ne permette l'afferraggio. Un esempio di tale soluzione è la struttura Fin Ray® [16], riportata in Figura 2.1, che possiede la capacità di adattarsi e afferrare un'ampia gamma di oggetti: il movimento della base o tramite un altro tipo di azionamento (ad esempio un cavo che tira la punta come nel caso [17]) fa avvicinare le dita all'oggetto, le quali si deformano attorno ad esso grazie alla loro struttura

cedevole ispirata alle pinne dei pesci. La struttura Fin Ray è costituita da due travi connesse per un'estremità collegate da traverse flessibili di lunghezza crescente che sotto l'azione di una forza si deformano adattandosi alla forma dell'oggetto da afferrare. Luo et al. [18] hanno, invece, sviluppato una mano composta da tre dita, ognuna con 15 gradi di libertà e tre falangi in grado di piegarsi in una determinata direzione quando sottoposti ad un carico ma rigidi nella direzione opposta nella loro posizione iniziale (Figura 2.3). Le falangi sono composte di moduli unidirezionali di piccole unità, collegate tra loro da cerniere e molle di torsione, permettendo di distribuire la forza di contatto in diversi punti e di adattarsi in modo autonomo alla forma dell'oggetto. La mobilità in una direzione delle dita e la rigidità nella direzione opposta permette di sfruttare il meccanismo sia per prese di avvolgimento dell'oggetto (Figura 2.4a-d) sia per prese di precisione con la falange finale (Figura 2.4e-f).

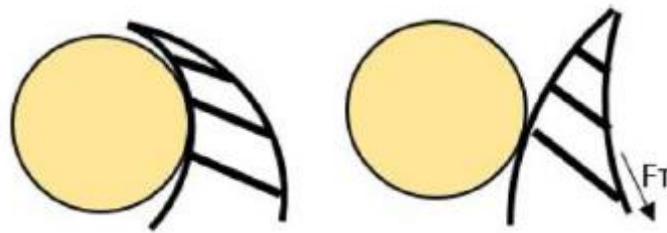


Figura 2.1 Struttura Fin Ray ad azionamento passivo.

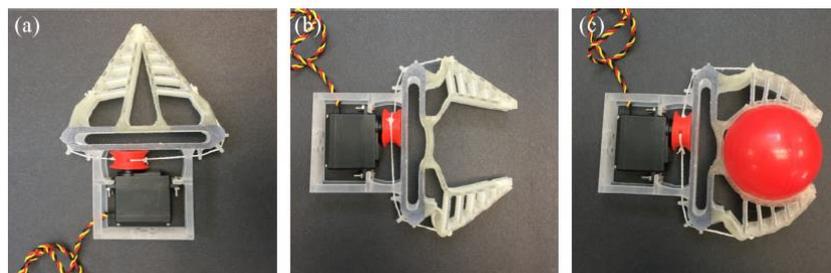


Figura 2.2 Pinza passiva che sfrutta la struttura Fin Ray. [17]

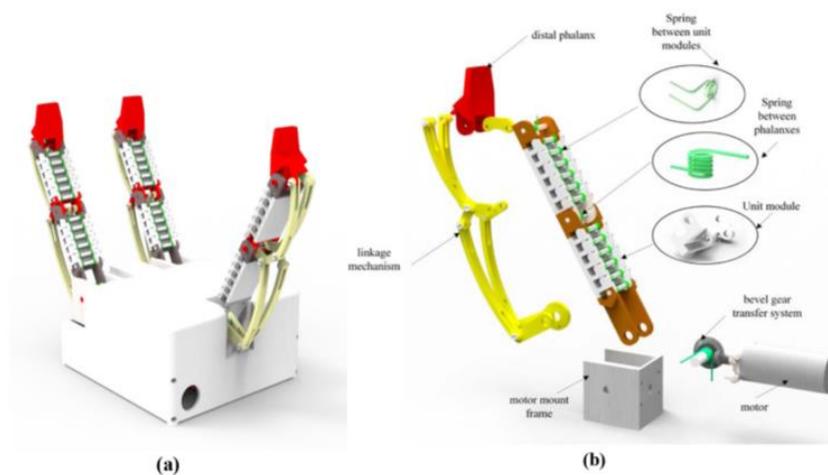


Figura 2.3 a) Struttura del gripper sottoattuato, b) elementi principali.

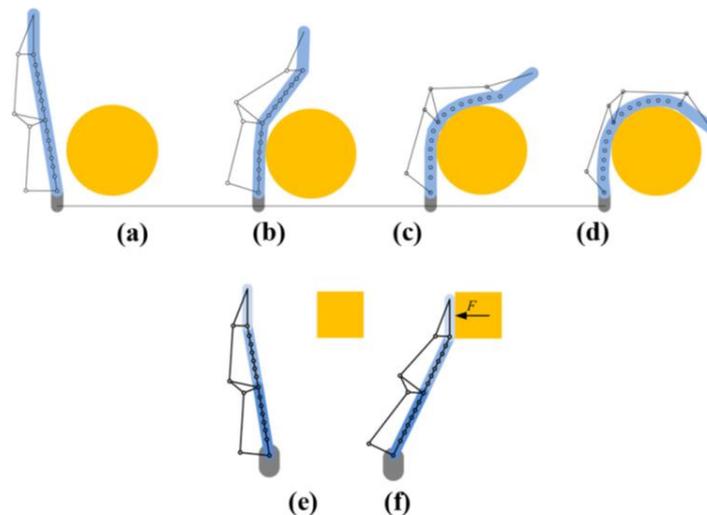


Figura 2.4 Processo di presa del dito flessibile: (a)-(d) Presa di avvolgimento; (e)-(f) Presa di precisione.

Le pinze filoguidate, come esplicitato dal nome, sono azionate tramite dei cavi che sono ancorati alle estremità delle dita e vi scorrono attraverso, permettendone la chiusura, come riportato in Figura 2.5. Le dita sono costituite da corpi articolati simili a quelle umane, con falangi e coppie rotoidali o cerniere virtuali che ne permettono la rotazione relativa, e permettono di replicare l'elevata destrezza della mano umana. Il progetto OpenHand di Yale [19] è un esempio efficace di tale soluzione, in cui tale struttura è stata declinata in diversi modelli per rispondere a differenti necessità. Dei casi particolarmente interessanti sono i modelli VF [20] ed M2 [21], riportati rispettivamente nelle Figure 2.7 e 2.8, poiché sviluppate con l'obiettivo di permettere un certo grado di riorientamento dell'oggetto manipolato. Il primo presenta una superficie a basso attrito azionata da un servomotore con lo scopo di simulare la condizione di slittamento delle dita umane, mentre il modello M2 ha due tipi di azionamento che permette di muovere il dito in modo più destro e una superficie intercambiabile, in opposizione al dito, che permette di compiere diverse operazioni di riorientamento, slittamento e prese di precisione in funzione della tipologia di superficie utilizzata.

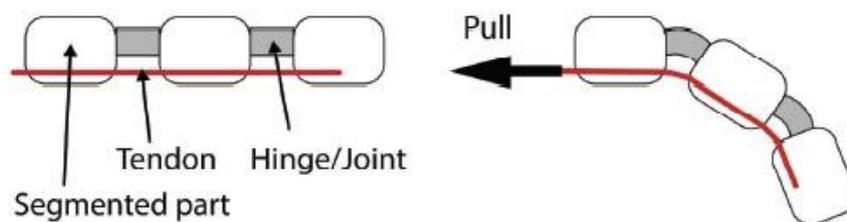


Figura 2.5 Struttura e sistema di azionamento di una pinza filoguidata.

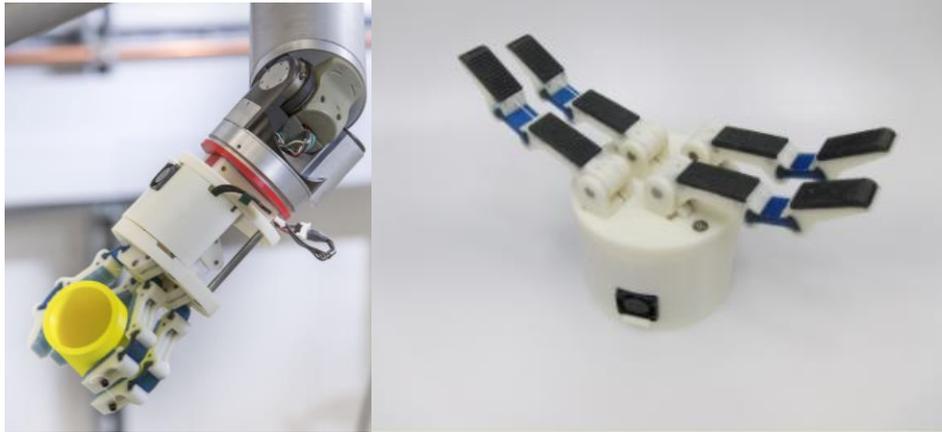


Figura 2.6 Esempio di modello di pinza filoguidata del progetto Open Hand

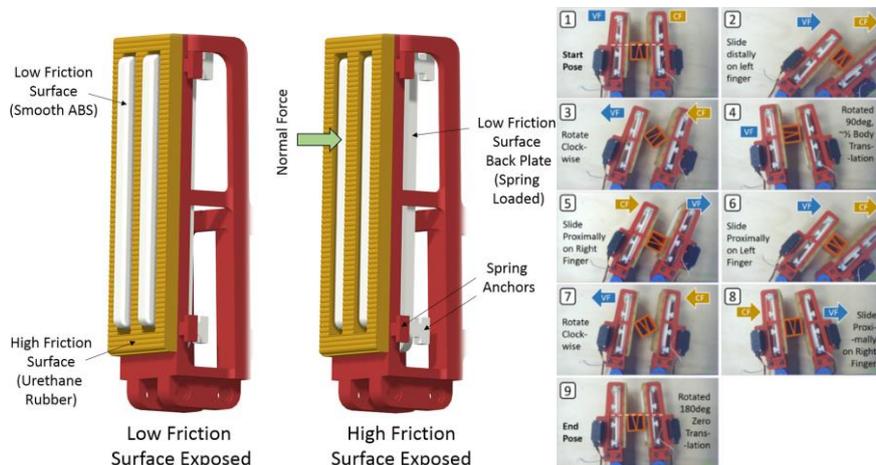


Figura 2.7 Modello VF ed esempio di funzionamento.

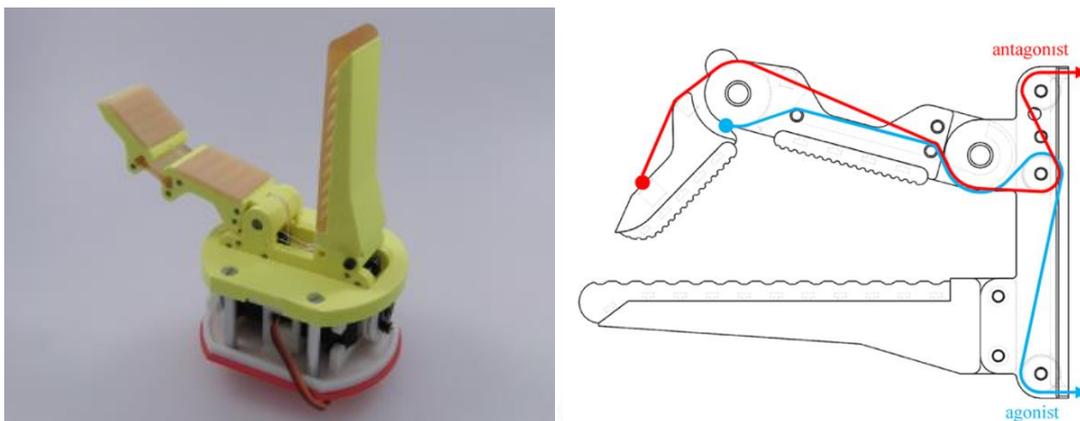


Figura 2.8 Modello M2 e struttura del doppio azionamento.

Gli attuatori elastomerici fluidici sfruttano la pressione esercitata da un fluido all'interno di una camera di un materiale altamente deformabile, ottenendo la deformazione degli elementi di presa mediante una struttura asimmetrica o materiali anisotropi. Teeple et al. [22] hanno sviluppato delle dita con due segmenti flessibili in serie, attuari indipendentemente tramite aria compressa, con la possibilità di ottenere ottime prestazioni sia per prese di avvolgimento sia per prese di precisione (Figura 2.9). Per ottenere la maggior forza di afferraggio possibile la soluzione più ovvia sarebbe avere dita composte da un singolo segmento flessibile attuat

uniformemente mentre per avere una presa di precisione più stabile hanno sperimentato che la soluzione migliore sia quella di avere dita con almeno due segmenti flessibili in cui soltanto quello più prossimo al palmo che viene attuato.

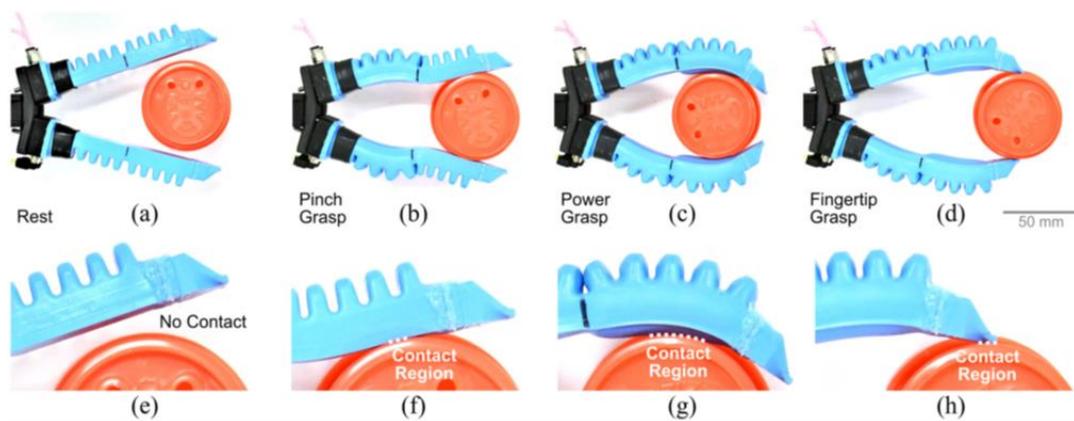


Figura 2.9 Prototipo della pinza per presa di una tazza di 55 mm di diametro. La mano è mostrata (a) a riposo, (b) mentre è in presa con il lato delle dita, (c) in presa di forza, (d) in presa con la punta delle dita. Uno zoom dei casi precedenti in (e)-(h)

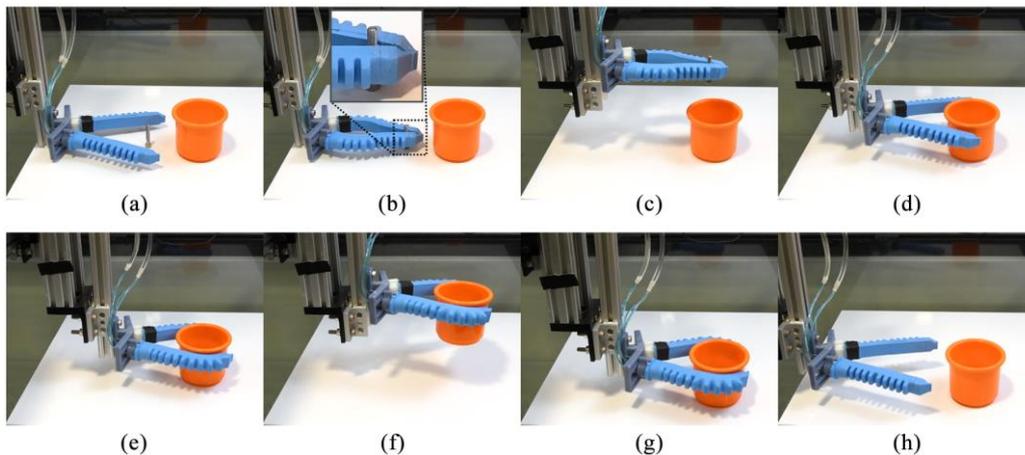


Figura 2.10 Posizionamento di un bullone di 6 mm di diametro all'interno di una tazza di 80 mm, poi viene mossa quest'ultima. (a)-(d) Per la piccola dimensione del bullone viene effettuata una presa di precisione per muoverlo all'interno della tazza. (e)-(f) Dopo aver rilasciato il bullone la mano esegue una presa di forza sulla tazza. (g)-(j) Infine, la tazza viene spostata nella nuova posizione.

Un ulteriore metodo di attuazione sono i polimeri elettro-attivi, che possono deformarsi in maniera reversibile sotto l'azione di stimoli elettrici:

- Gli attuatori elastomerici dielettrici (DEAs) sono composti da una membrana elastomerica frapposta tra due elettrodi [23]: l'azione elettromeccanica si ottiene applicando un elevato voltaggio tra gli elettrodi che attraendosi spremono la membrana producendo un assottigliamento della stessa e un'estensione della superficie (Figura 2.11), tuttavia producono basse tensioni;
- Gli attuatori compositi polimero-metallo ionici sono composti da una membrana polimerica riempita di elettroliti inserita tra due sottili lamine metalliche (Figura 2.12) [24]: quando si applica una differenza di potenziale si ha una migrazione di cariche che producono un differente rigonfiamento e

una conseguente curvatura della lamina verso il lato positivo. Utilizzano un basso voltaggio ed hanno capacità di auto adattamento, ma la velocità di risposta è bassa e presentano isteresi.

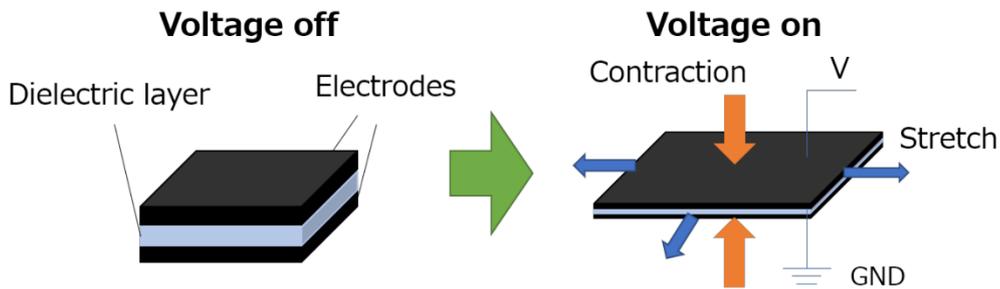


Figura 2.11 Principio di funzionamento dei DEAs. [23]

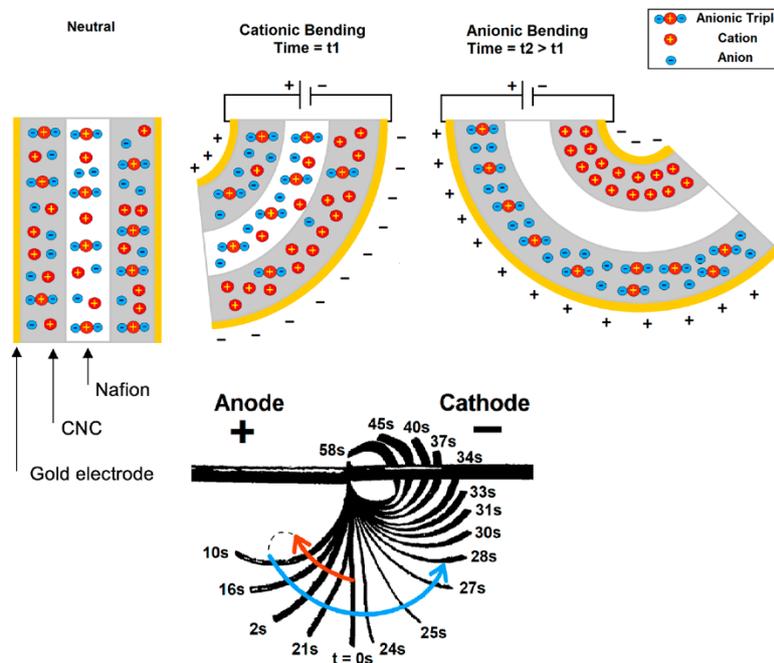


Figura 2.12 Principio di funzionamento degli attuatori compositi polimero-metallo ionici. [24]

I materiali a memoria di forma (che si dividono in leghe, *Shape Memory Alloys*, SMAs, e polimeri, *Shape Memory Polymers*, SMPs), infine, hanno la capacità di tornare alla forma iniziale dopo una temporanea deformazione in risposta ad un certo stimolo, spesso di natura termica (Figure 2.13) [25]. Le leghe sono molto utilizzate grazie alla loro conduttività che permette di sfruttare l'effetto Joule per scaldarle e provocare la deformazione, ma presentano una bassa velocità di risposta, il fenomeno dell'isteresi e necessitano di elevate correnti. Il meccanismo sviluppato da Milojevic et al. [26], ad esempio, rappresenta una struttura monolitica flessibile che sfrutta la deformazione dei suoi segmenti per produrre trasmissione di forza e di movimento (Figura 2.14). Gli attuatori sono prodotti in leghe a memoria di forma e la struttura è dotata di sensori di schiuma di grafite conduttiva. Dai dati di questi ultimi, attraverso il controllore, il sistema può decidere quale attuatore deve essere attivato per produrre un'appropriata variazione di forma. Riguardo i polimeri, invece, si trovano ancora pochi lavori, probabilmente a causa della loro bassa tensione di recupero, e quindi sono spesso utilizzati come componenti a rigidità variabile in combinazione con altri elementi attivi. Un esempio di utilizzo come pinza cedevole ad azionamento è quello implementato da Behl et al. [27] che utilizza quattro segmenti di un SMP bidirezionale reversibile, riuscendo ad afferrare una moneta: sfruttano un'attuazione

termocontrollata grazie a campioni di una rete di copolimeri autoportanti con due diversi tipi di domini cristallizzabili, il primo che definisce la forma del campione e il secondo che ne permette l'attuazione.

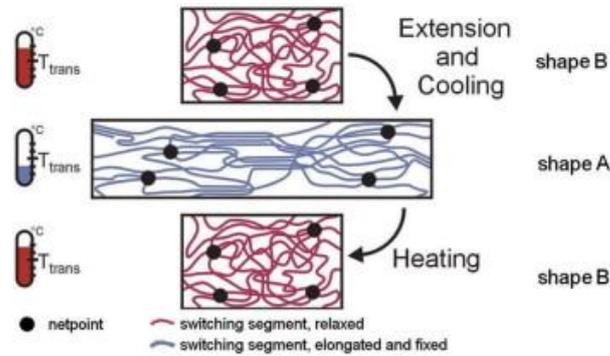


Figura 2.13 Meccanismo molecolare dell'effetto memoria di forma indotto. [25]

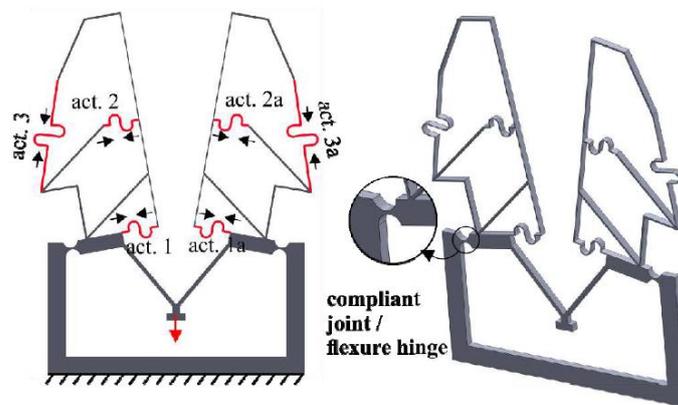


Figura 2.14 Concetto del gripper adattativo a due dita sviluppato mediante un sistema cedevole di variazione di forma. [26] Copyright © 2018, IEEE

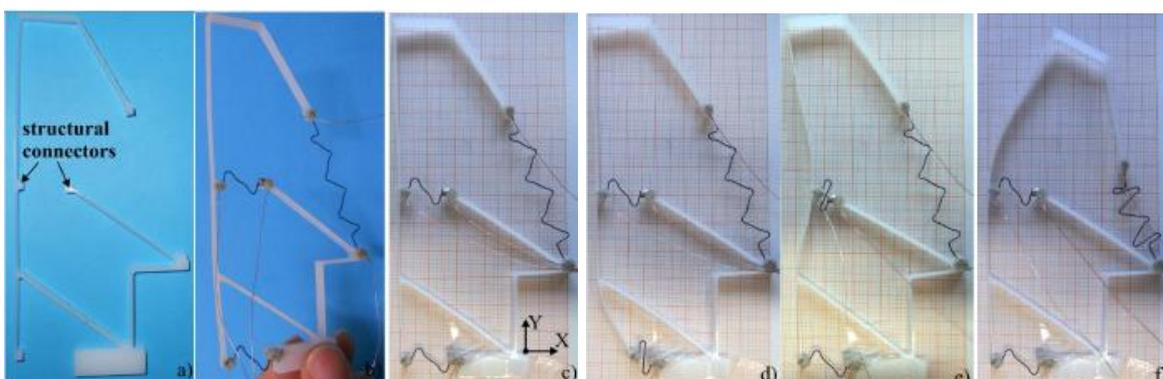


Figura 2.15 a) Dito del gripper senza attuatori, b) integrato con gli attuatori in filo di nitinol, c) comportamento della struttura, attivazione dell'attuatore 1 (d), 2 (e), 3 (f). [26] Copyright © 2018, IEEE

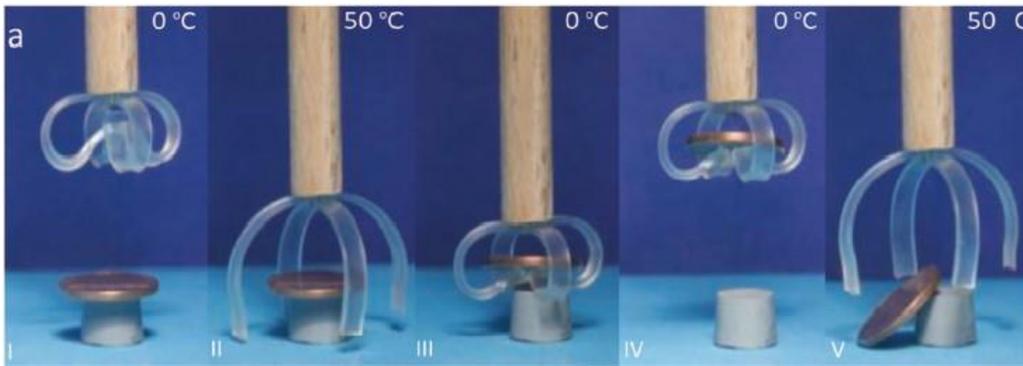


Figura 2.16 Gripper che sfrutta polimeri a memoria di forma bidirezionali. [27]

2.2 Presa tramite controllo di rigidezza

Questo metodo consiste nell'avvolgere l'oggetto con il gripper in una configurazione morbida per poi irrigidire la struttura in modo da bloccare la presa.

La compattazione di granuli, (detto *jamming*), sfrutta la variazione di rigidezza causata dal cambiamento di pressione tra i grani all'interno di un contenitore morbido (Figura 2.17) [28]. L'aspirazione compatta i grani e blocca i loro movimenti relativi rendendo l'elemento come un unico corpo solido consolidando la presa mentre iniettando aria all'interno della sacca è possibile tornare alla condizione morbida. Il tempo di transizione morbido-rigido dipende dalla differenza di pressione, dal flusso prodotto dal compressore e dal volume della sacca.

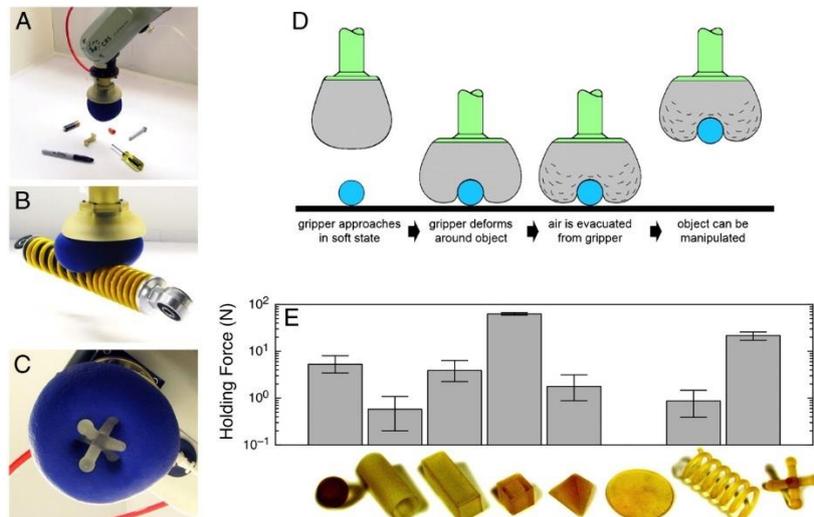


Figura 2.17 Pinza a compattazione di granuli per la presa di una vasta gamma di oggetti. (A) Collegata ad un braccio robot a base fissa. (B) Presa su una bobina dell'ammortizzatore. (C) vista dalla parte inferiore. (D) schema di funzionamento. (E) Forza di tenuta F_h per diverse forme di prova stampate tramite fabbricazione additiva. [28] Copyright 2010, National Academy of Sciences.

Le leghe a basso punto di fusione (*Low Melting Point Alloys*, LMPAs) cambiano il loro stato da solido a liquido in risposta al calore e questo cambio di stato può essere sfruttato nei meccanismi di presa incapsulandoli in strutture di elastomeri o schiume. Yufei et al. [29] hanno ideato la struttura di un attuttore cedevole incorporato con LMPA. L'attuttore è costituito da due parti: lo strato superiore estensibile e lo strato inferiore inestensibile. LMPA, che viene riscaldato dall'elettrodo, viene iniettato nel canale dello strato inestensibile. Quando

l'attuatore subisce un impatto enorme, l'LMPA si romperà in pezzi, tuttavia, si risalderà riscaldando l'attuatore (Figura 2.18).

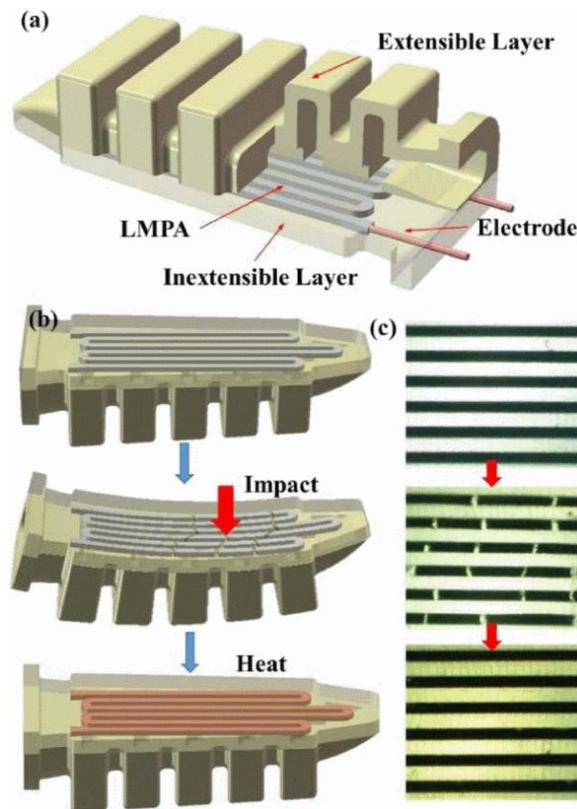


Figura 2.18 (a) La struttura dell'attuatore morbido incorporato con LMPA. (b) La proprietà di autoguarigione dell'attuatore morbido. (c) Le fotografie che mostrano il processo di auto-guarigione dell'attuatore. [29] Copyright © 2017, IEEE

I fluidi elettroreologici e magnetoreologici aumentano la propria viscosità apparente fino a raggiungere un comportamento viscoelastico se sottoposti a un campo elettrico o magnetico, rispettivamente, e possono essere utilizzati all'interno di strutture elastiche, ma hanno un ridotto utilizzo a causa delle basse rigidità ottenibili. Per cercare di aumentare la viscosità sarebbero necessari campi più forti e questo per i fluidi magnetoreologici si traduce nella necessità di generare correnti sempre maggiori per azionare gli elettromagneti mentre per gli elettroreologici il campo elettrico dipende principalmente dalla distanza tra gli elettrodi in cui viene frapposto il fluido.

Materiali a memoria di forma possono essere utilizzati per costruire differenti strutture di dita e sfruttare la loro capacità di variare la rigidità per esercitare elevate forze di presa in condizione rigida o per prese delicate in condizione morbida. Ad esempio Wang e Ahn [30] hanno progettato un dito stratificato i cui giunti a rigidità variabile sono costituiti da SMP riscaldati da fili di nichel-cromo e nella cui struttura sono contenuti SMA che invece forniscono l'azionamento per la piegatura, riuscendo a replicare in modo molto fedele i movimenti della mano umana e a manipolare anche oggetti delicati.

2.3 Presa tramite controllo di adesione

L'adesione è l'attrazione dell'interfaccia tra due superfici che produce uno sforzo di taglio proporzionale alla pressione normale generata. Per il soft grasping sono utilizzate principalmente due tecnologie: l'elettro-adesione e quella che è chiamata gecko-adesione.

L'elettro-adesione sfrutta l'energia di attrazione elettrostatica di cariche di segno opposto: degli elettrodi coperti da un sottile strato di materiale isolante, presenti sul gripper, producono un forte campo elettrico che richiamano cariche elettrostatiche, di polarizzazione su oggetti dielettrici e di induzione su oggetti conduttivi, sulla superficie dell'oggetto e lo attirano all'organo di presa. Un esempio di pinza che sfrutta tale tecnologia è riportato nelle Figure 2.19 e 2.20, dove Hwang et al. [31] hanno combinato l'elettro-adesione con un azionamento elettrostatico: le dita sono composte di un attuttore elastomerico dielettrico stratificato con elettrodi incorporati che permettono di generare un campo elettrico all'esterno del piano della pinza, con la capacità di manipolare anche oggetti molto pesanti.

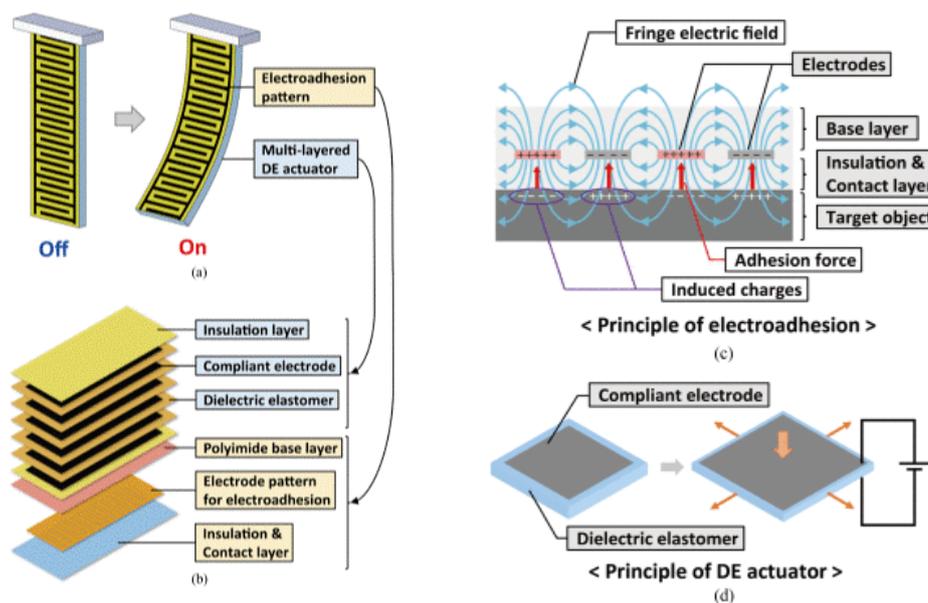


Figura 2.19 Pinza che integra l'elettro-adesione con un attuttore dielettrico elastomerico: (a) Processo di funzionamento; (b) Struttura stratificata con attuttore dielettrico elastomerico multistrato e cuscinetto per l'elettro-adesione; (c) Principio dell'elettro-adesione; (d) Principio dell'attuttore dielettrico elastomerico. [31] Copyright © 2022, IEEE

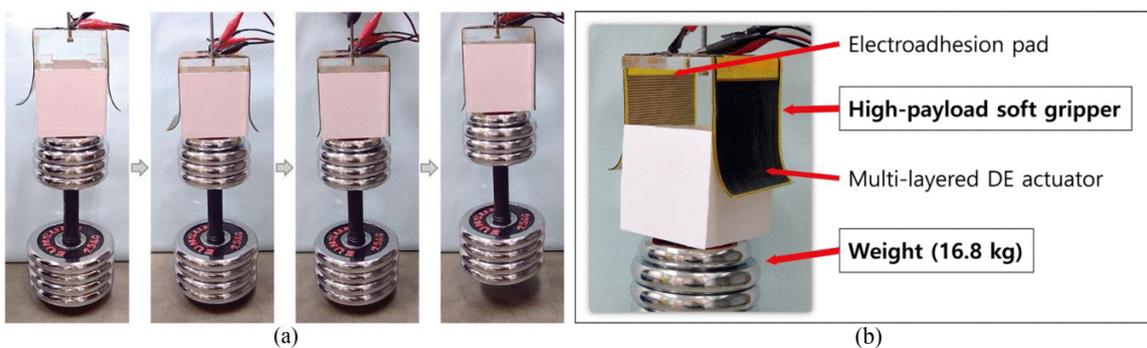


Figura 2.20 Pinza elettro-adesiva cedevole: (a) Riesce a sollevare e mantenere un oggetto di 16.8 kg; (b) Foto di dettaglio. [31] Copyright © 2022, IEEE

La geco-adesione (o adesione asciutta) vuole riprodurre, come dice il nome, la forza di attrazione di Van Der Waals esercitata dalle microfibre presenti sulle zampe del geco e che gli permettono di attaccarsi alle superfici. Questi gripper sfruttano la forza esercitata dalle microfibre quando queste vengono precaricate in direzione normale alla superficie di un oggetto: la forza di presa risulta proporzionale alla superficie di contatto tra le microfibre e la superficie, la quale dipende a sua volta dal precarico esercitato. In Figura 2.21 è riportato un esempio di questi tipi di pinze, ideata da Song et al. [32], che sfrutta una membrana polimerica, ricoperta da fibre a forma di fungo, la cui adesione viene attivata tramite un azionamento pneumatico. Esistono diverse forme di microfibre, in alcune delle quali l'inclinazione delle microfibre può generare anche sforzi di taglio che possono migliorare la presa.

Un altro esempio di controllo di adesione può essere la produzione di vuoto per mantenere il contatto tra oggetto e pinze, come avviene per il trasporto di lastre di vetro tramite ventose.

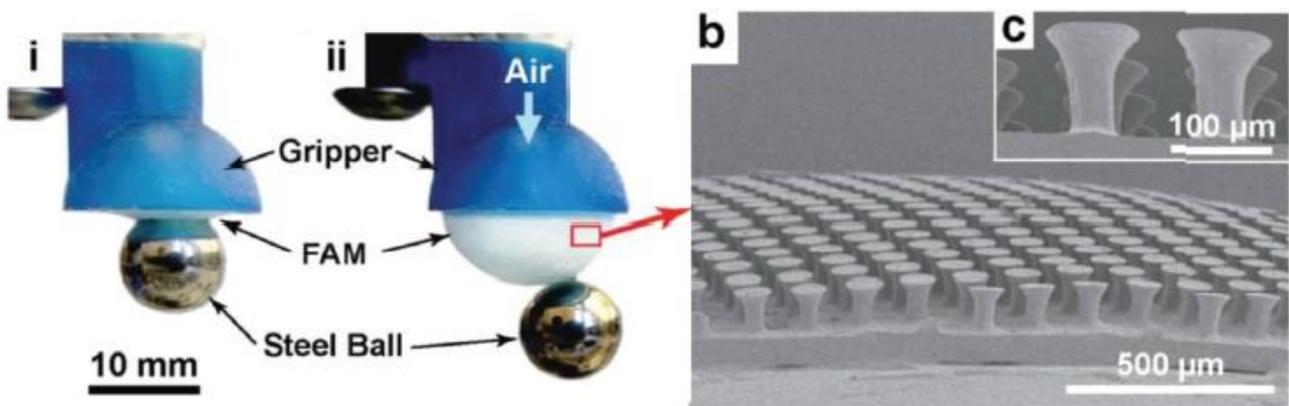


Figura 2.21 Pinza con membrana polimerica ricoperta da adesivi fibrillari. [32] Copyright © 2014, IEEE

3. Progettazione

L'obiettivo del presente lavoro è quello di progettare un utensile che permetta al rover Agri.Q di raccogliere campioni di colture quali foglie, piccoli rametti o piccoli frutti, anche direttamente dalla pianta stessa. Per fare questo è necessario che l'organo terminale, oltre a compiere l'operazione di afferraggio del campione, deve poter essere in grado di separarlo dalla pianta: in particolare per la raccolta di rametti si ritiene necessario dotare l'utensile anche di un elemento che permetta di recidere il campione dal corpo principale.

Allo scopo di rendere il veicolo Agri.Q il più versatile possibile si è deciso di utilizzare la pinza Kinova già posta al termine del braccio robotico per equipaggiare tale utensile e sfruttare il moto e la coppia di chiusura esercitata dal gripper per compiere le operazioni di campionamento. In questo modo l'utensile può essere posto all'interno di un magazzino predisposto sul rover ed equipaggiato al bisogno senza la necessità di agire manualmente sul braccio robotico, mentre il magazzino potrà essere arricchito di altri utensili che, sempre sfruttando la pinza Kinova, permettano di eseguire altre funzioni.

L'utensile qui proposto deve poter esplicare quattro funzioni principali:

- Funzione di riferimento rispetto alla pinza Kinova: deve poter essere preso dal magazzino utensili, assicurato alla pinza in modo agevole e allo stesso modo riposto quando non utilizzato;
- Funzione di pinza: per afferrare il campione da prelevare e mantenere la presa per il tempo necessario;
- Funzione di taglio: per separare il campione dalla pianta;
- Funzione di deposito: ovvero la capacità di depositare il campione prelevato in un apposito contenitore.

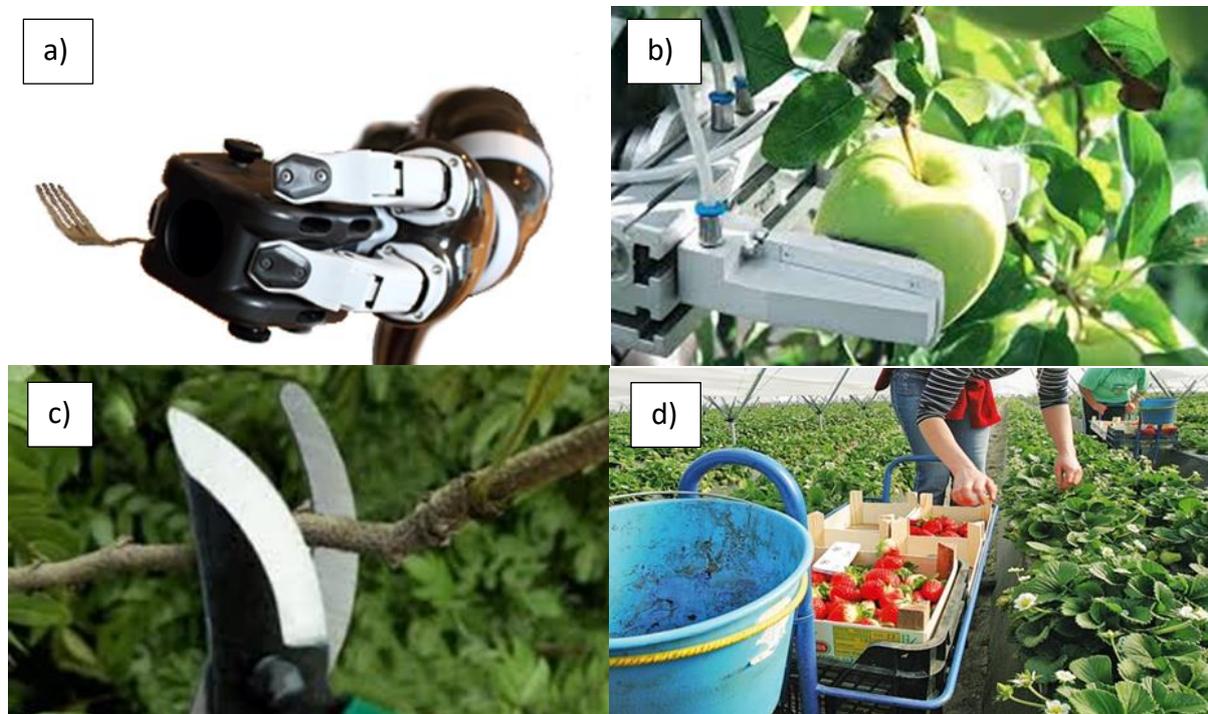


Figura 3.1 Raffigurazioni delle funzioni richieste all'utensile: (a) Capacità di essere afferrato dal braccio robotico; (b) Afferraggio del campione; (c) Separazione del campione; (d) Deposito del campione raccolto.

Le funzioni da compiere sono comunemente svolte dall'uomo durante le fasi di potatura, per questo motivo la progettazione si è ispirata a tali operazioni: il meccanismo di presa vuole simulare la chiusura delle dita umane nell'afferrare piccoli rami e nel tenerli fermi mentre con le cesoie viene eseguito il taglio. La forza esercitata dall'uomo è sostituita dal gripper Kinova e viene trasmessa agli elementi adibiti alla presa e al taglio tramite un corpo di intermezzo, come avviene per gli occhielli delle forbici. Per proteggere il meccanismo e riparare, almeno parzialmente, eventuali elementi elettronici si prevede una scocca esterna che lo copra frontalmente e lateralmente, lasciando aperta solo una piccola zona per permettere l'interazione con il campione.

Ulteriori funzioni possono essere introdotte andando a sensorizzare l'utensile: si può prevedere una telecamera per una visione ravvicinata dell'utensile, in modo da rendere più agevole il comando remoto del braccio robotico, e diversi sensori quali di umidità e temperatura per raccogliere dati sul campo delle condizioni in cui sono raccolti i campioni. Questi sensori possono poi essere collegati ad una scheda elettronica che raccolga questi dati e li trasmetta tramite un modulo di comunicazione wireless alla postazione di comando. Il tutto può essere alimentato da una batteria che si ricarichi quando l'utensile si trova depositato nel magazzino.

3.1 Specifiche di progetto

L'utensile ha lo scopo di raccogliere campioni di colture con diametri massimi fino a circa $\phi = 7 \div 8 \text{ mm}$. L'idea prevede di sfruttare il moto di chiusura e la coppia esercitata dalle dita del gripper Kinova per afferrare, mantenere in presa e separare il campione di coltura tramite un'opportuna serie di meccanismi.

Simulando le operazioni fatte dai viticoltori, si desidera che la funzione di presa si concluda prima, o al limite contemporaneamente, dell'inizio dell'operazione di taglio da parte delle lame, mantenendo la presa sul campione per tutta la durata della fase di separazione e nella successiva riapertura delle lame.

Data l'incertezza sulle effettive capacità della pinza Kinova in dotazione [33, 34], si ricerca una coppia di taglio che sia la maggiore possibile per assicurare il completamento della funzione, in particolare per completare il taglio di piccoli rami legnosi delle viti che richiedono una forza più elevata rispetto ai rami verdi.

Occorre, infine, limitare le dimensioni del meccanismo affinché rimanga il più possibile all'interno del volume interno al palmo della pinza Kinova, per non ottenere un utensile eccessivamente ingombrante, e limitarne il peso a 1.3 kg per i vincoli imposti dalle capacità del braccio robotico.

3.2 Progetto funzionale

Il gripper Kinova a due dita KG-2 presenta due gradi di libertà, ognuno associato ad una delle due falangi che compongono ciascun dito. In Figura 3.2 si riporta il disegno della pinza con una schematizzazione delle falangi e il sistema di riferimento solidale alla pinza adottato: tale sistema di riferimento è stato posto sul punto medio della congiungente le due cerniere fisse A_0 attorno cui ruotano le dita, al centro del palmo della pinza. Azionando il gripper le due dita si chiuderanno in modo sincronizzato con le due falangi che si comportano come un solo corpo, in favore del fatto che alla seconda falange è precluso tramite una battuta un'ulteriore apertura rispetto alla condizione di riposo. Solo nel caso in cui sulla prima falange A_0B agisca una forza resistente sufficientemente elevata da arrestare il suo movimento allora viene permesso il moto relativo in chiusura della seconda falange BC attorno alla cerniera B .

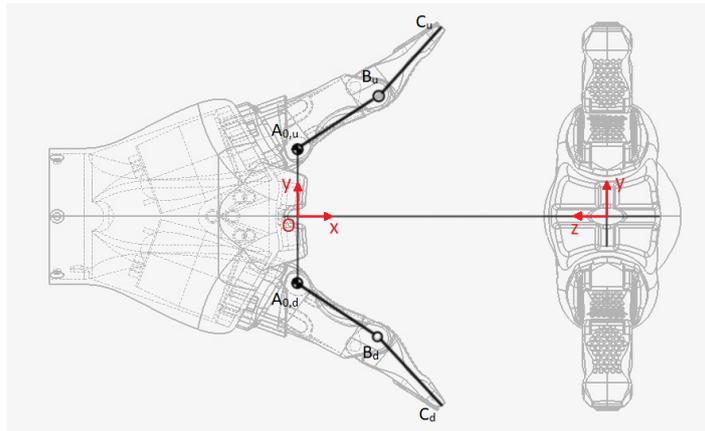


Figura 3.2 Rappresentazione della pinza Kinova KG-2 con il sistema di riferimento adottato.

Questa dipendenza tra i due gradi di libertà e la richiesta di una forza resistente sulla prima falange ha diretto la progettazione a mettere da parte la possibilità di utilizzare il secondo grado di libertà della pinza, facendo appoggiare ciascun dito su di un corpo di trasmissione D_0E che segua il profilo dell'intero dito e ne sfrutti solo il primo grado di libertà α_1 e l'intera forza esercitata. Si è scelto di modellizzare tale membro di trasmissione, o di ingresso, in modo che ruoti in modo coassiale alle dita del gripper e alle cerniere A_0 , poste simmetricamente ad un'ordinata di 30.95 mm. Questa accortezza semplifica la progettazione portando a far corrispondere la rotazione del corpo di ingresso D_0E con quello delle dita della pinza. A causa degli ingombri limitati e dei volumi necessari ai diversi corpi che compongono l'utensile, l'arco di rotazione del membro di trasmissione è stato posto pari a 24° .

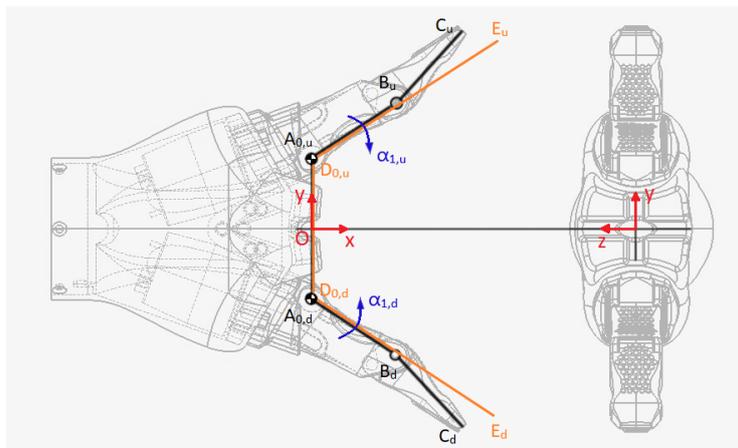


Figura 3.3 Rappresentazione degli elementi di trasmissione D_0E

La progettazione del meccanismo è stata effettuata utilizzando un sistema di riferimento che risulti coincidente con quello proposto sulla pinza Kinova, quando questa ha afferrato l'utensile e i due elementi diventano solidali.

Seguendo gli esempi dati dagli agricoltori si decide di sviluppare due meccanismi paralleli, uno adibito alla funzione di presa e uno alla funzione di taglio, azionati tramite i membri di trasmissione e posti su due piani paralleli, uno nel semipiano con le z positive e l'altro in quello con le z negative.

Per limitare gli ingombri si prevede di afferrare il campione lungo la direzione dell'asse x ad una distanza di circa $100 \div 120 \text{ mm}$ dall'origine.

3.2.1 Schemi funzionali

Posizionamento dell'utensile sul braccio Kinova

La funzione di posizionamento è quella che rende l'utensile utilizzabile dal braccio robotico quando necessario e permette di riporlo quando bisogna esplicitare operazioni differenti. Tale funzione deve permettere che la pinza Kinova possa afferrare l'utensile facendolo diventare solidale al polso e allo stesso modo questa configurazione deve poter essere rimossa quando l'utensile deve essere riposto nel magazzino utensili dopo aver adempito le proprie funzioni.

Analizzando la pinza Kinova risulta interessante la forma caratteristica del palmo, evidenziato in Figura 3.4: si prevede di produrre un calco di tale profilo per riferire in modo univoco l'utensile rispetto al gripper Kinova, in favore della leggera asimmetria di tale forma. Il calco viene posto nel telaio dell'utensile in modo che, fatto combaciare il palmo della pinza all'interno di tale sede, i sistemi di riferimento dei due corpi vengano a coincidere.

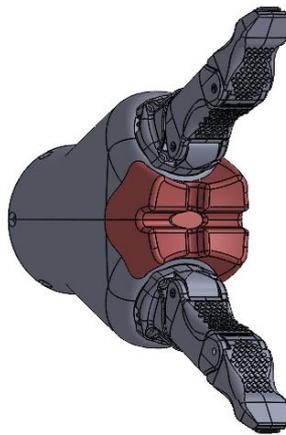


Figura 3.4 Modello CAD della pinza Kinova KG-2.

L'avvicinamento del gripper avviene lungo la direzione x dell'utensile facendo in modo da far coincidere i due sistemi di riferimento: è necessario che le dita siano dirette lungo y e il rigonfiamento del polso si posizioni nella direzione negativa dell'asse z .

Per il blocco rispetto alla pinza Kinova si è pensato di utilizzare un meccanismo che si vada a chiudere intorno al polso quando il gripper afferra l'utensile, che si azioni mediante alcuni gradi di rotazione nel membro di ingresso oppure con dei meccanismi a molla presenti sul magazzino utensile. L'idea potrebbe essere quella di utilizzare un meccanismo che azioni due leve appositamente sagomate che vadano a chiudersi attorno al polso della pinza e blocchino il movimento reciproco tra i due corpi.

Per il primo prototipo che si vuole progettare non è stata approfondita questa funzionalità perché si è pensato di implementarla attraverso l'interazione con il magazzino utensili che non è stato ancora progettato.

Elemento di presa del campione

Per afferrare i campioni ci si è basati sull'esperienza umana dove le piccole colture vengono prese tra le dita, avvicinando i polpastrelli in modo che risultino circa paralleli e mantenendoli in posizione durante e successivamente alla fase di taglio, riaprendoli quando è necessario depositare i campioni. Il moto richiesto si può definire intermittente, in quanto si ha una prima parte di moto di chiusura e un arresto per mantenere la presa.

In quest'ottica, per effettuare la presa si è quindi pensato di utilizzare due elementi che si avvicinino lateralmente al campione da afferrare cercando di raggiungere una condizione la più possibile parallela tra gli elementi stessi. Questi membri sono movimentati ciascuno da uno degli elementi di trasmissione.

Per trasferire questo movimento si è pensato a due possibili soluzioni: un quadrilatero articolato o una camma.

- Il quadrilatero articolato è un meccanismo composto da quattro corpi collegati tra loro da sole coppie cinematiche rotoidali, permette una trasformazione precisa del moto e una buona trasmissione delle forze, di contro richiede almeno altri due corpi (uno dei membri potrebbe essere il bilanciante motore, azionato dalle dita della pinza, e l'altro il telaio che collega tutti meccanismi) e quattro coppie rotoidali che richiedono attenzioni particolari nella realizzazione, inoltre nel caso in cui uno dei corpi fosse solidale al corpo di ingresso non sarebbe possibile mantenere fermi gli elementi di presa durante la fase di taglio ma al più si potrebbe ottenere un indugio, cioè un piccolo spostamento dell'elemento di presa a fronte di un maggiore moto del movente;
- Un sistema a camme è realizzato tramite una coppia cinematica in cui due corpi, il movente o camma e il cedente o punteria, sono collegati tramite elementi cinematici di forma opportuna, i quali definiscono il tipo di moto relativo e permettono di realizzare diverse soluzioni, richiedendo al massimo due coppie rotoidali (una per la camma e una per la punteria, nel caso di camme di seconda specie) e, tramite un'opportuna sintesi del profilo, permetterebbe di realizzare il moto con indugio richiesto, ma di contro potrebbe non sviluppare elevate forze e la trasmissione potrebbe presentare dei giochi.

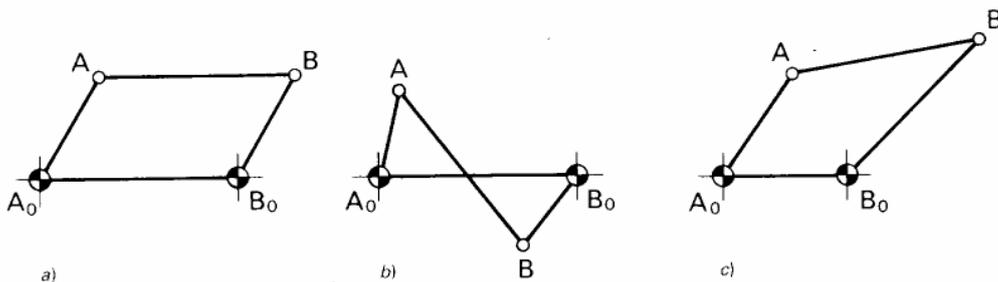


Figura 3.5 Esempi di quadrilateri articolati [35]

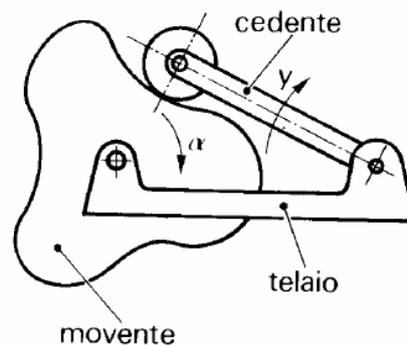


Figura 3.6 Schema di un sistema a camma. [35]

Il minor numero di membri e di coppie cinematiche e la maggiore varietà di movimenti realizzabili ha giustificato l'utilizzo della camma quale coppia cinematica di trasmissione del moto dal corpo di ingresso agli elementi di presa.

Poiché si ha un unico membro di trasmissione che dà la stessa rotazione di ingresso sia all'elemento di presa sia a quello adibito al taglio, si è reso necessario modellare la camma in modo che possa ruotare più

velocemente rispetto alla chiusura della pinza così da assicurare la presa del campione prima che le lame arrivino in contatto con il campione.

Al fine di limitare gli ingombri si è deciso di sviluppare il profilo a camma sull'elemento di presa, mentre sul corpo di trasmissione si posiziona l'elemento che funge da punteria ma che avrà lo scopo di trasferire il moto alla camma, invertendo i comuni ruoli di camma motrice e punteria condotta. In questo modo si è riusciti a spostare l'ingombro più importante dato dal profilo della camma sugli elementi di presa.

Elemento di taglio

La necessità di ottenere una forza sufficientemente elevata per tagliare i campioni a partire da quella limitata prodotta dal gripper richiede un elevato guadagno di forza del meccanismo di taglio: uno dei modi più semplici per ottenere buoni guadagni è sfruttare il principio della leva. I principali utensili per operazioni di taglio sfruttano questo principio: forbici, cesoie e tronchesi utilizzano leve vantaggiose del primo genere per moltiplicare la forza prodotta dalle mani. Anche le leve di secondo genere, sfruttate ad esempio dagli schiaccianoci, permettono di ottenere ottimi guadagni. Il meccanismo di taglio proposto si ispira a questi utensili di uso comune utilizzando due leve incernierate ad uno stesso fulcro.

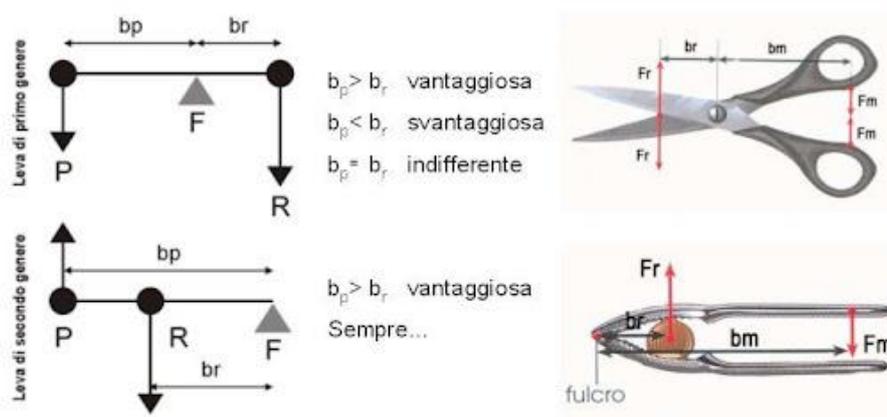


Figura 3.7 Esempi di leve.

Al fine di rendere più semplice l'avvicinamento dell'utensile al punto di taglio si è scelto di utilizzare una leva del primo genere, in quanto la posizione estrema del fulcro nelle leve di secondo genere avrebbe due possibili svantaggi: nel caso in cui il fulcro fosse posto vicino al palmo le leve generate avrebbero un guadagno sempre inferiore ad uno, mentre se fosse posto dalla parte opposta non permetterebbe un avvicinamento agevole dell'utensile ma richiederebbe di avere accesso ad una estremità del ramo e di far risalire l'utensile, seguendone la forma, fino al punto da recidere.

Si sceglie di portare avanti l'analisi di due tipologie di meccanismi a leva del primo genere da utilizzare come meccanismo di taglio: un meccanismo con fulcro fisso e uno con fulcro mobile:

- Il meccanismo con fulcro fisso permette di mantenere in posizione costante i membri di taglio, facilitando il posizionamento dell'utensile rispetto al campione, ma di contro richiede un collegamento tramite glifo tra la leva e il membro motore azionato dal gripper.
- Il meccanismo con fulcro mobile, simile a quello utilizzato dalle forbici, rende fisso il collegamento tra leva e membro di trasmissione ma il fulcro del meccanismo trasla durante l'azionamento.

Per entrambe le tipologie il meccanismo è composto da due leve, ognuna collegata al rispettivo membro di trasmissione, ed incernierate allo stesso fulcro con le lame poste oltre tale fulcro, sul modello delle comuni forbici.

Schemi funzionali e nomenclatura

Gli elementi degli schemi funzionali proposti, riportati in Figura 3.8, risultano specchiati tra la parte superiore, a cui ci riferiremo con il pedice u (“up”), e la parte inferiore del meccanismo, evidenziata dal pedice d (“down”). I meccanismi si sviluppano attorno al telaio $D_{0,u}H_{0,u}H_{0,d}D_{0,d}$, che tramite la funzione di posizionamento diventerà solidale al polso della pinza Kinova. Le cerniere D_0 sono sovrapposte alle cerniere A_0 delle dita del gripper Kinova, mentre le cerniere H_0 attorno cui ruoteranno gli elementi di presa sono simmetriche rispetto l’asse x per ottenere una presa simmetrica sull’asse dell’utensile. Sulle cerniere D_0 ruotano gli elementi di trasmissione D_0E , in arancione, che si muovono seguendo il primo grado di libertà della pinza Kinova, descritto dalla rotazione α_1 . A questi elementi sono collegati i corpi di presa e le leve del meccanismo di taglio. Tramite il punto di contatto G , gli elementi di trasmissione agiscono sul profilo a camma per portare in rotazione i corpi di presa attraverso l’angolo γ . Di particolare interesse risulta il meccanismo di taglio, riportato in verde: le leve FPQ costituiscono gli elementi che ospiteranno le lame e che ruoteranno attorno al fulcro comune P . Il collegamento con gli elementi di trasmissione avviene tramite la coppia cinematica F che in un caso è rappresentata da una cerniera rotoidale mentre nell’altro è un accoppiamento a glifo: il punto F viene definito tramite la distanza r dalla cerniera D_0 e l’angolo ϵ che si ottiene tra FD_0E e viene definito positivo verso l’esterno del palmo rispetto al link D_0E . La rotazione delle leve viene descritta tramite l’angolo θ tra il braccio di ingresso FP e l’asse x , poiché gli elementi su PQ subiranno le stesse rotazioni $\Delta\theta$ descritte dal braccio di ingresso.

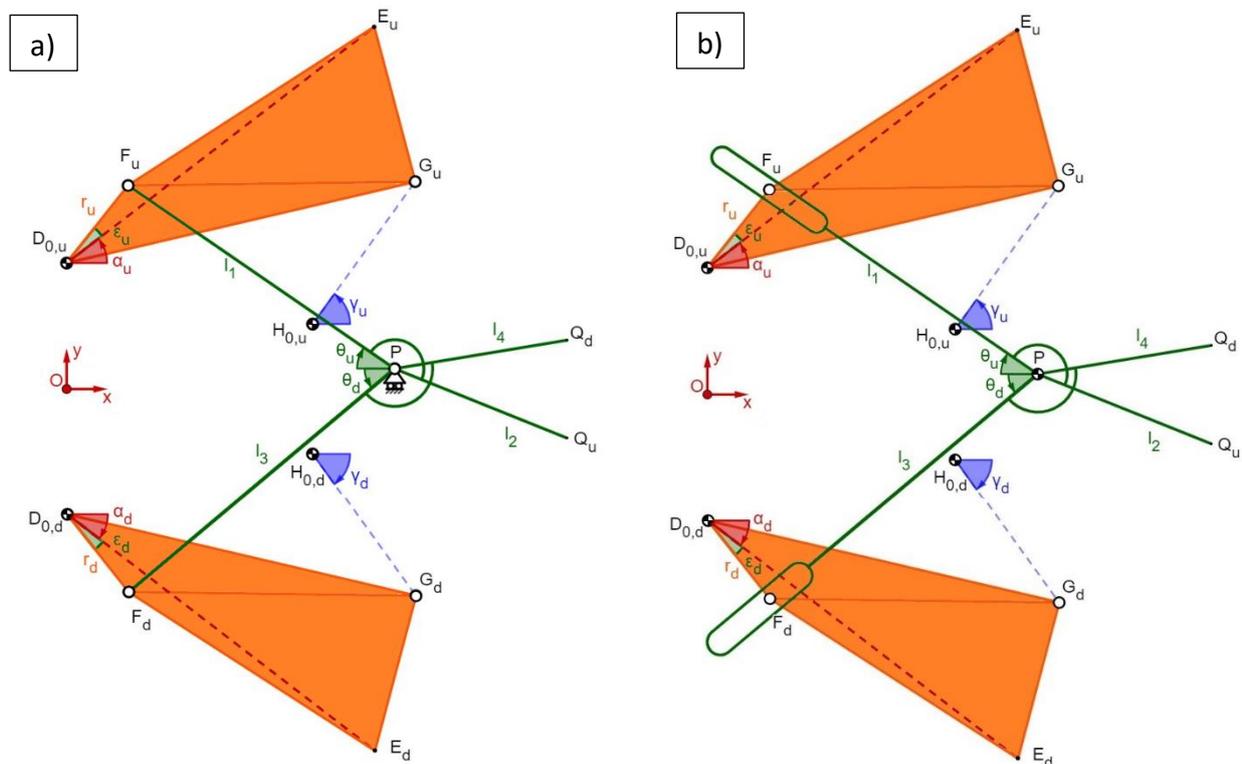


Figura 3.8 Rappresentazione delle due versioni del meccanismo: (a) Con meccanismo di taglio a fulcro mobile; (b) Con meccanismo di taglio a fulcro fisso.

TABELLA 3.1: PEDICI

Pedice	Significato	Descrizione
u	Up, superiore	Parte superiore dei meccanismi
d	Down, inferiore	Parte inferiore dei meccanismi

TABELLA 3.2: PARAMETRI MECCANISMO DI PRESA

Simbolo	Descrizione	Vincoli
x_H	Ascissa della cerniera H_0 del corpo di presa, rispetto all'origine O	$[0, 80] \text{ mm}$
y_H	Ordinata della cerniera H_0 del corpo di presa, rispetto all'origine O	$[0, 30] \text{ mm}$
x_G	Ascissa del punto di contatto G tra il corpo di presa e quello di ingresso, rispetto all'origine O	
y_G	Ordinata del punto di contatto G tra il corpo di presa e quello di ingresso, rispetto all'origine O	

TABELLA 3.3: VARIABILI DEL MECCANISMO DI PRESA

Simbolo	Descrizione	Limiti
α	Rotazione del membro di ingresso, rispetto all'asse x	$[37.8, 13.6]^\circ$
γ	Rotazione del meccanismo di presa	

TABELLA 3.4: PARAMETRI MECCANISMO DI TAGLIO

Simbolo	Descrizione	Vincoli
x_P	Ascissa della cerniera P del meccanismo a forbice, rispetto all'origine O	$[0, 80] \text{ mm}$
y_P	Ordinata della cerniera P del meccanismo a forbice, rispetto all'origine O	$[-30, 30] \text{ mm}$
r	Distanza radiale del perno A dalla cerniera fissa A_0	$[0, 50] \text{ mm}$
ϵ	Angolo prodotto dalla congiungente D_0F rispetto al link D_0E , positivo in senso antiorario, angolo di fasatura	
l_1	Lunghezza braccio motore della parte superiore del meccanismo a forbice di taglio	$[30, 70] \text{ mm}$
l_2	Lunghezza braccio di taglio legato a l_1	Dimensioni delle lame
l_3	Lunghezza braccio motore della parte inferiore del meccanismo a forbice di taglio	$[30, 70] \text{ mm}$
l_4	Lunghezza braccio di taglio legato a l_3	Dimensioni delle lame

TABELLA 3.5: VARIABILI DEL MECCANISMO DI TAGLIO

Simbolo	Descrizione	Limiti
α_1	Rotazione del membro di ingresso, rispetto all'asse x	$[37.8, 13.6]^\circ$
θ	Rotazione del meccanismo a forbice di taglio	

3.2.2 Sintesi camma

L'elemento di presa deve eseguire due funzioni principali: chiudersi verso il campione durante il primo tratto della rotazione del membro di trasmissione e mantenere la presa mentre l'utensile conclude la fase di taglio, compiendo quello che viene definito un moto intermittente. Per soddisfare questa duplice funzione è deciso di utilizzare la versatilità delle camme: l'obiettivo è sintetizzare un profilo che permetta la rotazione dell'elemento di presa H_0G in risposta ad un primo movimento del corpo di trasmissione D_0G , ottenendo quella che viene definita una camma di seconda specie, e che poi tramite un accoppiamento di forma lo mantenga nella posizione raggiunta per la restante rotazione di ingresso.

Volendo applicare il profilo della camma sull'elemento di presa per il processo di sintesi si impone a quest'ultimo il ruolo di movente che, ruotando in verso opposto a quello desiderato, porta a ruotare l'elemento di trasmissione rappresentato dal link D_0G in direzione opposta a quella di utilizzo dell'utensile. Per progettare il profilo appena descritto si è implementato nel software GeoGebra [36] un metodo grafico di sintesi che sfrutta l'inversione cinematica: volendo ottenere il profilo della camma si tiene ferma quest'ultima e si applicano le rotazioni desiderate al telaio H_0D_0 , in verso opposto a quello del moto voluto, e allo stesso tempo si impone al cedente, il membro di trasmissione D_0G , le rotazioni corrispondenti (che saranno quelle di input per l'elemento di presa stesso).

Il metodo di sintesi si può riassumere come segue: si applica la rotazione $[\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$ che si desidera ottenere per la camma H_0G , in verso opposto, al telaio rappresentato dal link D_0H_0 , ottenendo i nuovi centri di rotazione del membro di ingresso D_0', D_0'', \dots ; una volta individuati tali punti si riporta il membro di ingresso D_0G nelle nuove posizioni della cerniera D_0 e gli si applicano le rotazioni $[\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]$ che si vuole producano le corrispondenti rotazioni della camma $[\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$, anche questa volta in senso opposto a quello effettivo del moto, ottenendo i punti di contatto tra camma e punteria G', G'', \dots . Per il tratto in cui la camma deve restare ferma a fronte di un movimento del membro di ingresso si tiene fermo il telaio D_0H_0 e si applica la rotazione α_i al link di ingresso D_0G nell'ultima configurazione ottenuta, questa volta nella direzione reale del moto. Quello ottenuto in questo modo è definito profilo primitivo della camma. Ai punti di contatto ottenuti va poi sovrapposta la forma della punteria, che in Figura 3.9 è stata ipotizzata circolare, ed eseguendo l'involuppo di tali sagome si ottiene il profilo effettivo della camma.

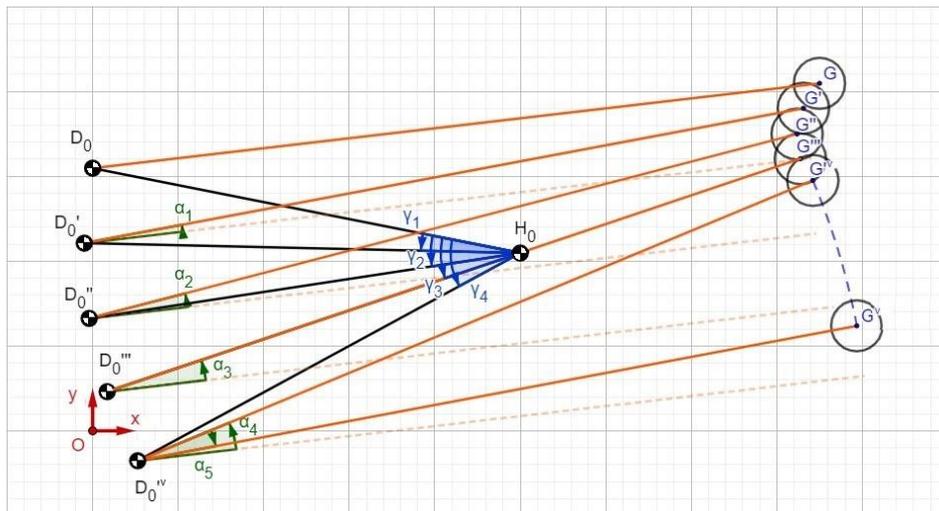


Figura 3.9 Raffigurazione del metodo di sintesi grafica di un profilo a camma tramite software GeoGebra.

L'unico punto noto è la cerniera dell'elemento di ingresso D_0 , mentre le posizioni della cerniera dell'elemento di presa H_0 e del punto di contatto iniziale G e le rotazioni α e γ sono arbitrarie. La cerniera e il punto di contatto sono stati limitati al semipiano delimitato dal membro di ingresso e l'asse x per evitare interferenze con altri corpi e generare un avvicinamento che simuli la presa umana. La cerniera fissa H_0 è stata limitata nei seguenti modi: l'ascissa è stata limitata avendo ipotizzato una lunghezza dell'elemento di presa di circa 50

mm, ottenendo un range di variazione tra 50 e 70 mm dall'origine per le posizioni previste per i campioni, mentre per l'ordinata si sono previsti almeno una decina di millimetri per permettere uno spessore del corpo sufficiente che non provocasse interferenze con l'altro elemento di presa nella configurazione di chiusura. Il punto di contatto iniziale G invece si vuole posizionare ad un'ascissa superiore a quella della cerniera fissa H_0 per ottenere un moto simile tra elemento di trasmissione e corpo di presa e per aumentare lo spostamento di input ottenibile, e l'ordinata in posizione superiore alla cerniera D_0 , cercando un compromesso tra le dimensioni dell'elemento di trasmissione e quello di presa.

La rotazione α ha come limite superiore la rotazione massima del membro di ingresso di 24° , mentre la rotazione γ del membro di presa dipende principalmente dalla sua lunghezza, ma per dimensioni sopra definite è possibile porla nell'intorno di 20° per compiere un avvicinamento di alcuni millimetri nella fase di presa. Tale rotazione è stata definita come compromesso tra la velocità di chiusura dell'elemento di presa e la regolarità del profilo ottenibile, in quanto per angoli inferiori i profili generati producevano angoli molto acuti nella transizione tra la parte motrice e la parte di arresto, rendendo difficile sia un possibile raccordo sia l'esecuzione di un possibile profilo effettivo.

Si sono applicate, quindi, per la sintesi del profilo primitivo le seguenti rotazioni del corpo di presa, riferiti tutti alla condizione di riposo:

$$\gamma = [5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ]$$

da ottenere con una rotazione del membro di ingresso che potesse essere la più ridotta possibile, in modo da ottenere un veloce afferraggio del campione e lasciare un buon margine da concentrare sulla funzione di taglio, ponendo:

$$\alpha = [2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ]$$

sempre riferite alla condizione di riposo, a cui va aggiunta un'ultima rotazione del corpo D_0G di circa $\alpha_5 = 13^\circ$ dall'ultima configurazione ottenuta ($[\alpha_4, \gamma_4]$) che mantenga la camma nella posizione finale durante il completamento della fase di taglio. Il moto intermittente desiderato viene riportato in Figura 3.10.

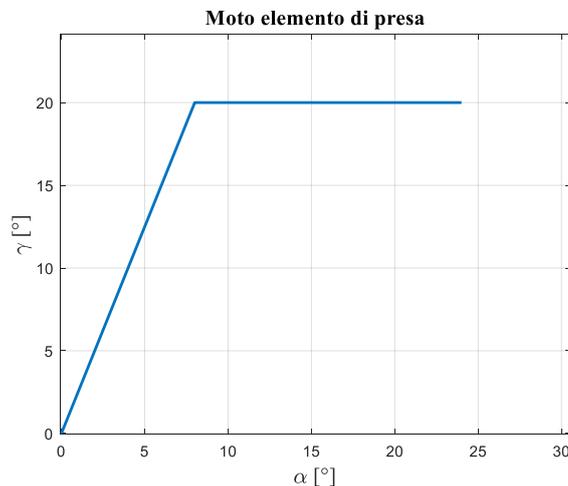


Figura 3.10 Moto richiesto dell'elemento di presa

Con questi dati di ingresso e dopo alcune iterazioni per la scelta delle posizioni della cerniera dell'elemento di presa H_0 e del punto di contatto iniziale G si è ottenuto il profilo primitivo riportato in Figura 3.12. Le iterazioni sono dovute al carattere grafico del metodo di sintesi e la scelta finale della posizione delle cerniere e del punto di contatto è stata effettuata con lo scopo di ottenere un compromesso tra diverse esigenze: mantenere gli ingombri limitati, realizzare membri con dimensioni sufficienti per resistere alle forze in gioco e cercare di realizzare un profilo che potesse essere il più regolare possibile. In quest'ottica sono stati scelti i seguenti punti $H_0 = (60, 15.95)$ e $G = (85, 50.95)$ sul piano xy del sistema di riferimento.

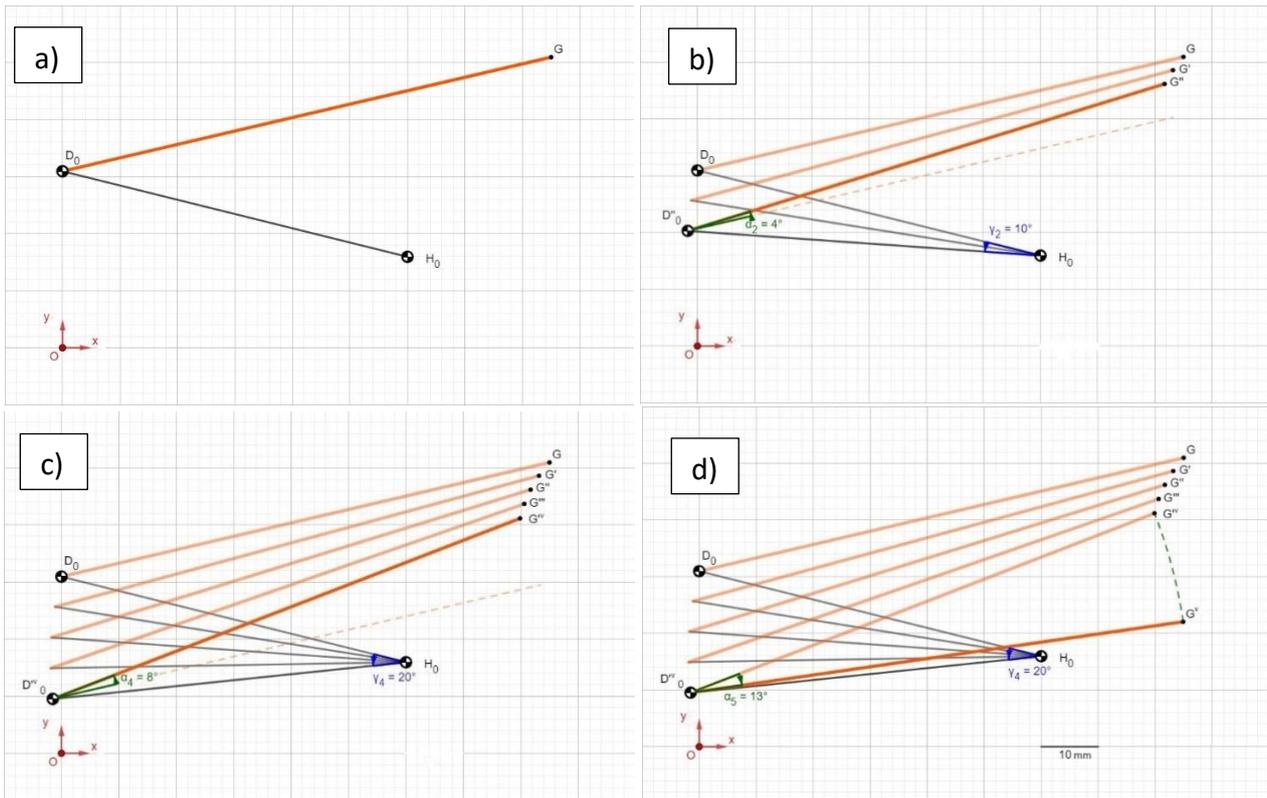


Figura 3.11 Processo di costruzione del profilo sull'elemento di presa

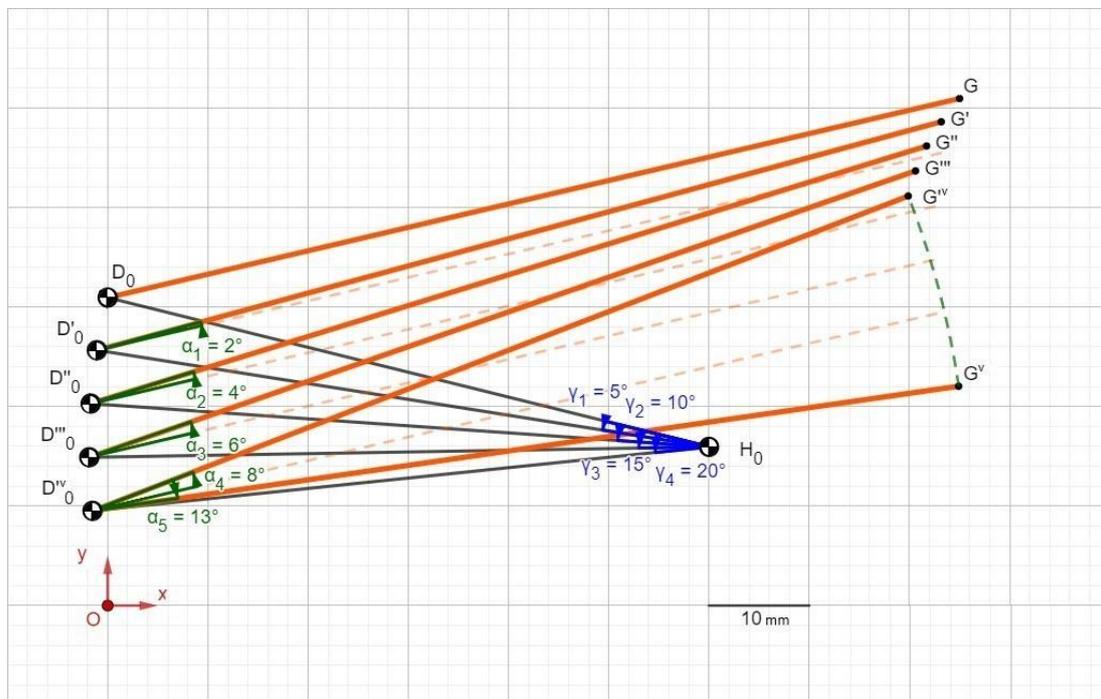


Figura 3.12 Costruzione del profilo a camma primitivo dell'elemento di presa.

Il moto di chiusura ottenuto con il profilo sintetizzato è mostrato con il funzionamento dell'utensile nel paragrafo 3.3.8.

Analisi angolo di pressione

L'angolo di pressione θ_p è l'angolo compreso tra la normale al profilo della camma nel punto di contatto e la direzione del moto della punteria, coincidendo con l'angolo compreso tra la normale al profilo primitivo e la direzione della velocità del cedente. È un'analisi importante in quanto da tale angolo dipende il rapporto tra la forza che provoca il moto della punteria e quella che invece si scarica sulla guida o sulla coppia rotoidale della punteria, diventando un parametro dell'efficacia dell'accoppiamento.

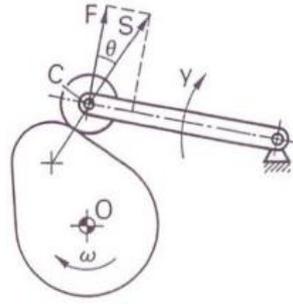


Figura 3.13 Rappresentazione angolo di pressione. [35]

Si è quindi analizzato il profilo primitivo, dove si è eseguito un raccordo di raggio $r = 5\text{ mm}$ nel punto angoloso per rendere più regolare il passaggio tra i due tratti del profilo: il profilo ottenuto risulta quindi l'unione di tre archi di cerchio. La normale al punto di contatto, qualunque sia il raggio della punteria (ipotizzata cilindrica), risulta essere la congiungente tra il punto di contatto G considerato e il centro di curvatura del tratto di profilo in esame; mentre la direzione del moto della punteria, essendo una rotazione attorno alla cerniera fissa D_0 , sarà ortogonale al link D_0G . Si sono analizzati 10 punti nei 20° di rotazione della camma, poiché nel tratto successivo il meccanismo a moto intermittente presenta un accoppiamento di forma che mantiene l'elemento di presa fermo, quindi l'angolo di pressione perde di significato non essendo più presente una forza che agisce nella direzione del moto della punteria. La costruzione e gli angoli esaminati sono riportati nelle Figure 3.14 e 3.15.

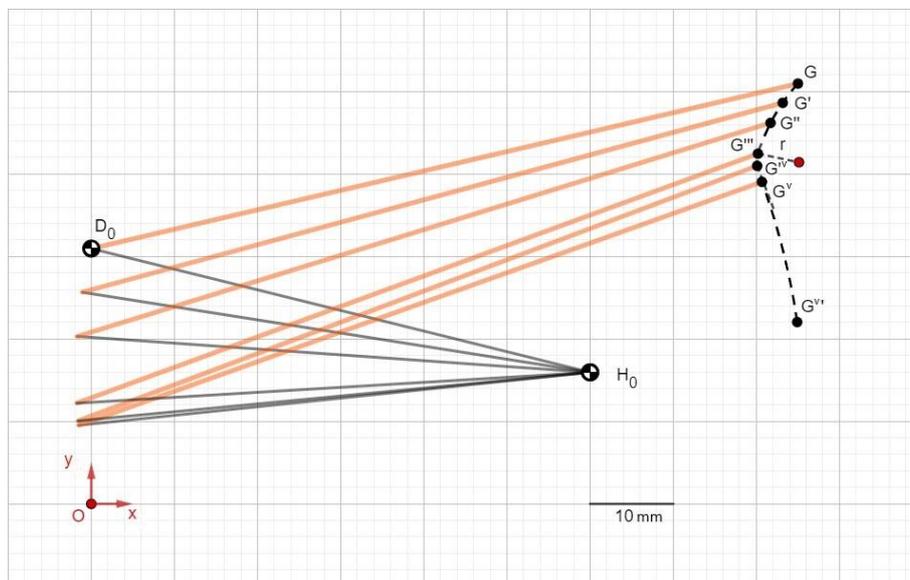


Figura 3.14 Profilo dell'elemento di presa con raggio

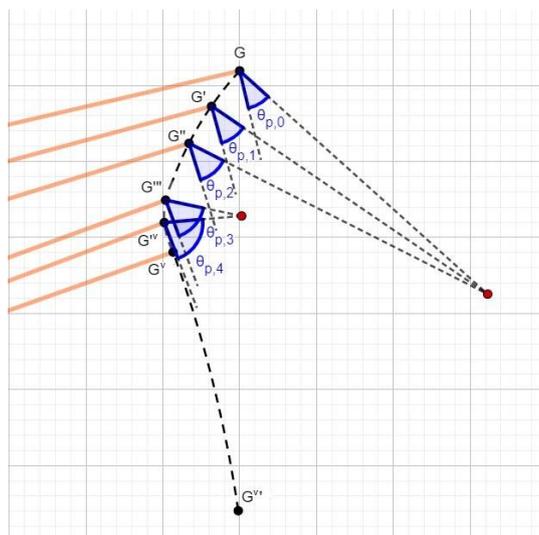


Figura 3.15 Angoli di pressione del profilo ottenuto dalla sintesi grafica

Il risultato dell'analisi è riportato nella Figura 3.16. Si osserva che per il profilo costruito in modo grafico rimane al di sotto dei 50° , angolo di pressione massimo per una trasmissione non gravosa, ma nel raccordo tra i due tratti del profilo sale fino a 71.5° . Per provare a diminuire gli angoli di pressione raggiunti nel raccordo si è provato ad aumentarne il raggio, a 8 mm e a 10 mm, ma la riduzione che se ne ricava è molto esigua e il ritardo nel completamento della chiusura dell'elemento di presa che ne consegue non ne giustifica l'utilizzo.

Per questo motivo si è cercata una soluzione alternativa in profili costruiti tramite leggi analitiche tipicamente utilizzate per la progettazione delle camme: si sono analizzati tre profili alternativi seguendo le leggi polinomiale di esponenti 3-4-5, biarmonica e cicloidale. I profili analitici sono stati costruiti a partire dalla configurazione di chiusura dell'elemento di presa, utilizzando come raggio di base il link D_0G , a cui è stata applicata un'alzata che permetta di raggiungere il punto di contatto iniziale precedentemente definito, con uno stesso angolo di rotazione del corpo di trasmissione utilizzato per il metodo grafico: i profili ottenuti sono riportati in Figura 3.17 (Il processo di sintesi e le leggi utilizzate per la costruzione sono riportate in Appendice A).

Come si può osservare dal confronto in Figura 3.16, per ottenere il moto proposto non si è riusciti a trovare una soluzione meno gravosa del profilo ottenuto dalla sintesi grafica con un raccordo di 5 mm, ad eccezione del profilo biarmonico che presenta un angolo di pressione inferiore per tutta la rotazione dell'elemento di presa ma raggiunge comunque gli stessi angoli nella parte terminale. Si è deciso di utilizzare comunque il profilo costruito in modo grafico perché permette una realizzazione pratica più regolare rispetto al profilo biarmonico, poiché aggiungendo il profilo della punteria a quest'ultimo si ottiene un involuppo che presenta una curva non molto regolare.

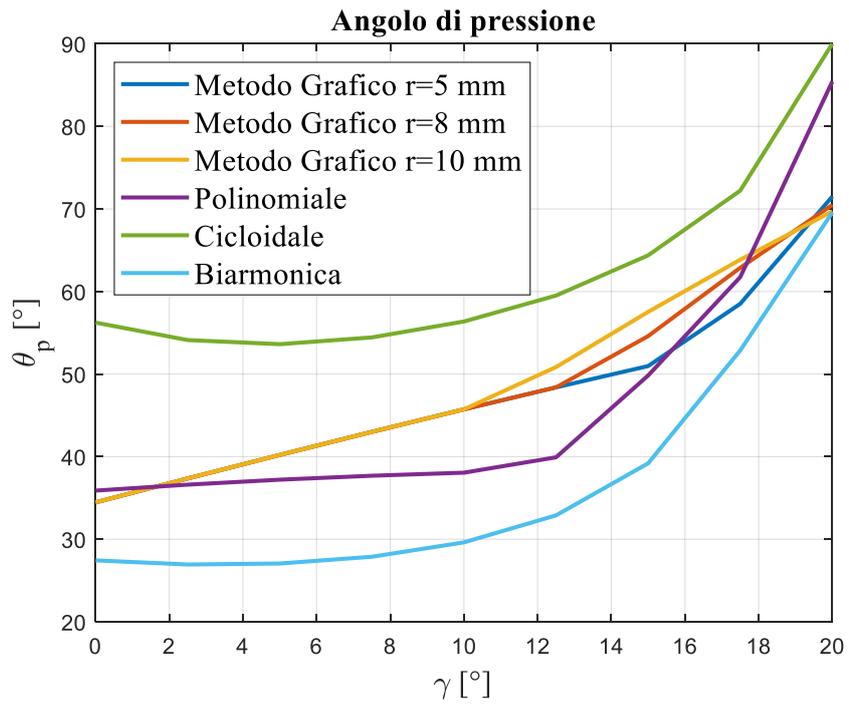


Figura 3.16 Angolo di pressione

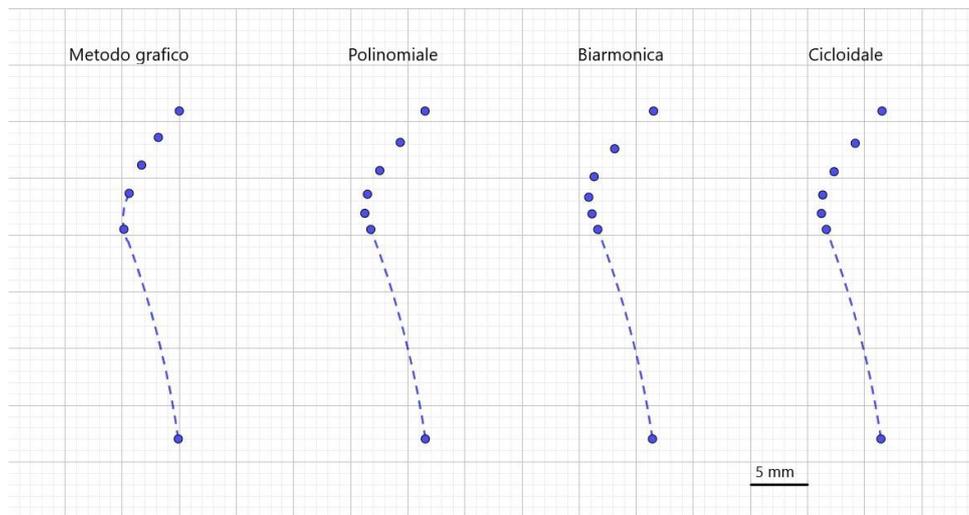


Figura 3.17 Profili analizzati dell'elemento di presa

3.2.3 Analisi funzionale del meccanismo a leva

L'utensile ha lo scopo di raccogliere campioni con diametri massimi di circa $\phi = 7 \div 8 \text{ mm}$. Per rendere più semplice il centraggio e garantire il completamento della fase di taglio si prevede un'apertura delle lame, all'estremità, di circa $2c_t = 15 \text{ mm}$. Di conseguenza la dimensione delle lame andrà a definire la corsa richiesta al meccanismo di taglio, che per lame commerciali di $l_2 = 40 \div 60 \text{ mm}$ risulta pari:

$$\Delta\theta_t = \arcsin\left(\frac{c_t}{l_2}\right) \cong 8^\circ$$

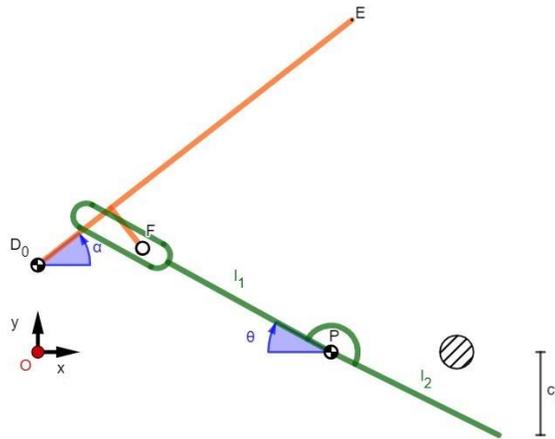


Figura 3.18 Rappresentazione del meccanismo di taglio con campione.

Meccanismo a fulcro fisso

Il meccanismo a fulcro fisso è composto dalle due leve FPQ , incernierate alla coppia rotoidale fissa P , che sono mosse dai corpi di trasmissione D_0E attraverso un accoppiamento a glifo nella coppia cinematica F . Il punto F risulta fisso rispetto alla cerniera D_0 , i cui parametri caratteristici individuati sono la distanza da tale cerniera r e l'angolo ε che forma con il link D_0E . L'angolo ε viene definito positivo in senso antiorario dal link di riferimento, andando a posizionare la coppia cinematica F all'esterno del palmo, come in Figura 3.19, e negativo nel senso opposto, quando F si posiziona all'interno del palmo. Tale angolo viene anche detto angolo di fasatura in quanto rappresenta una sfasatura tra l'angolo di rotazione di ingresso α e la corrispondente rotazione θ di uscita delle leve. Nel meccanismo a forbice con fulcro fisso i parametri x_p, y_p, r ed ε risultano costanti, mentre le lunghezze l_1 ed l_3 tra il punto di applicazione F e la cerniera fissa P variano in funzione della posizione del punto F che scorre all'interno del glifo.

Per valutare le prestazioni del meccanismo si sceglie di analizzare solo la parte superiore del meccanismo, per rendere più snella la trattazione. Nel caso di meccanismo simmetrico, ottenibile ponendo l'ordinata del fulcro y_p nulla e scegliendo uguali parametri r ed ε delle due cerniere coppie cinematiche F superiore ed inferiore, i risultati ottenuti saranno gli stessi per entrambe le parti del meccanismo.

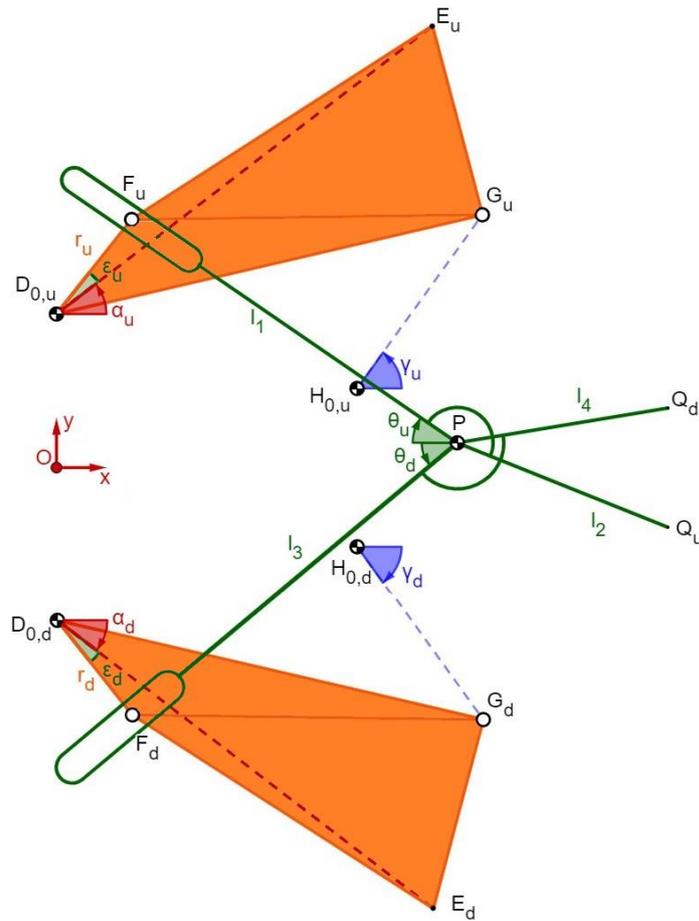


Figura 3.19 Rappresentazione meccanismo utensile a fulcro fisso.

Nella formulazione analitica si tiene conto anche del secondo grado di libertà α_2 della pinza qualora in una successiva realizzazione si voglia sfruttare questo movimento, ma che nell'analisi qui presentata viene mantenuto comunque costante e nullo.

Analizzando la parte superiore del meccanismo, la catena OD_0FPO riportata in Figura 3.20, si ottengono le seguenti equazioni di chiusura della catena cinematica:

$$\begin{cases} r \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \varepsilon) + l_1 \cos(\theta) = x_p \\ r \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \varepsilon) - l_1 \sin(\theta) = y_p - a_0 \end{cases}$$

Facendo il rapporto tra le due, la seconda diviso la prima, si ottiene un'espressione di θ :

$$\tan(\theta) = \frac{r}{l_1} \tan(\alpha_1 + \alpha_2 + \varepsilon) + \frac{a_0 - y_p}{x_p l_1}$$

Che dipende da α_1 e l_1 ed inoltre mostra che l'angolo ε rappresenta una fasatura tra la rotazione di ingresso α_1 e quella di uscita θ .

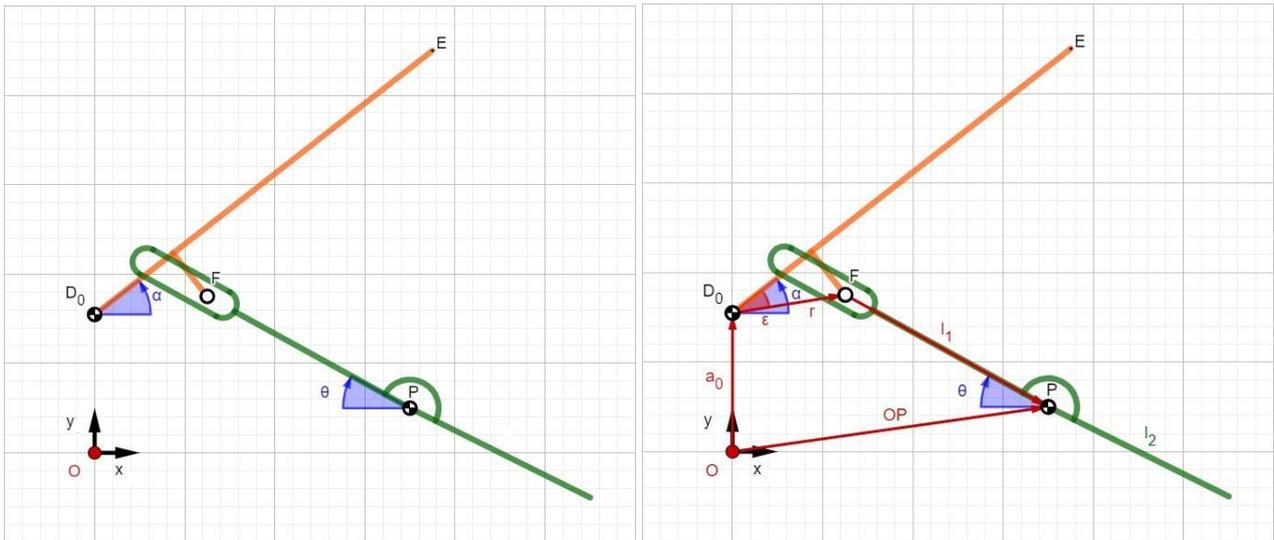


Figura 3.20 Rappresentazione del meccanismo a fulcro fisso e dettaglio dei parametri.

È possibile, rielaborando l'espressione precedente, rendere implicita la dipendenza da l_1 ed ottenere la seguente funzione di θ :

$$\tan(\theta) = \frac{a_0 - y_P + r \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \varepsilon)}{x_P - r \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \varepsilon)}$$

Facendo, invece, l'equilibrio ai momenti del link FPQ rispetto alla cerniera P si può ottenere la funzione della coppia di uscita del meccanismo:

$$C_{out} = F_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \theta) l_1$$

con $F_1 = \frac{C_1}{r \cos(\varepsilon)}$ che rappresenta la forza di ingresso esercitata dalla pinza Kinova e dipende dalla coppia motrice C_1 . Si può quindi definire un guadagno di coppia G , dato dal rapporto tra la coppia di uscita sulla coppia di ingresso:

$$G = \frac{C_{out}}{C_1} = \frac{l_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \theta)}{r \cos(\varepsilon)}$$

Questo guadagno definisce quanto ciascuna leva del meccanismo di taglio riesce a moltiplicare in uscita la coppia che la aziona in ingresso.

Dall'espressione si ricava che per massimizzare il guadagno di coppia sia desiderabile che nella configurazione di taglio si tenda ad ottenere $\cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \theta) \cong 1$.

Per poter analizzare l'effetto dei parametri del meccanismo sul suo comportamento si è effettuato uno studio parametrico, scegliendo x_P come parametro di scala del meccanismo rispetto cui definire i seguenti parametri, di cui si evidenziano anche i valori attribuiti:

$$x_P = [55, 60, 65, 70, 75] \text{ mm}$$

$$R = r/x_P = [1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2]$$

$$\varepsilon = [-30, -10, 0, 10, 30]^\circ$$

$$Y_P = y_P/x_P = [-1/5, -1/10, 0, 1/10, 1/5]$$

I valori di x_P sono stati ipotizzati in funzione degli spazi disponibili, della posizione ipotizzata per il campione e delle lunghezze tipiche delle lame commerciali.

Si è scelto di modellare α_1 come l'angolo che il link D_0E forma con l'asse x , positivo nel verso di apertura, e di conseguenza durante l'azionamento l'angolo va a diminuire tra i due estremi $[37.8^\circ, 13.6^\circ]$.

I parametri principali da analizzare sono la variazione dell'angolo di uscita $\Delta\theta$, per valutare lo spostamento delle lame e il loro posizionamento, e il guadagno di coppia G ottenibile rispetto alla coppia di ingresso, al fine di riuscire a garantire una coppia sufficiente a completare il taglio.

Per eseguire questa analisi si è scritto un codice MatLab che simula il movimento del membro di ingresso, sotto l'azione della pinza Kinova, e dando in output le caratteristiche e le prestazioni del meccanismo a leva, combinando i vari parametri come descritto nei paragrafi seguenti.

Codice

Il codice, riportato in Appendice B, prende in ingresso i dati del meccanismo e simula le variabili del meccanismo e i rapporti definiti sopra come parametri per l'analisi. Utilizza le variabili simulate per effettuare l'analisi cinematica del meccanismo e valutare la lunghezza del braccio l_l , che dipende dalla posizione della cerniera F e dalla rotazione del membro di trasmissione, e il guadagno di coppia G . Infine vengono inseriti i valori che devono assumere le variabili e i parametri dell'analisi e si definisce il vettore che simuli la rotazione di ingresso. Inseriti tutti i dati e definite le formule si effettuano diversi cicli *for* che facciano variare, uno alla volta, i parametri in esame: ciascun ciclo stabilisce i valori di riferimento e il parametro che varia, sostituendo i valori numerici simula la rotazione di ingresso e valuta le variazioni di tutte le variabili di uscita (angolo di uscita θ , guadagno G , lunghezza del braccio motore l_l). Per ciascuna simulazione riporta infine i grafici che verranno presentati successivamente. Per maggiore chiarezza visiva è presente una sezione che definisce i punti caratteristici del meccanismo di taglio ed esegue un grafico che riporta le proporzioni del meccanismo e un altro che riporta la sequenza delle posizioni occupate dal meccanismo durante la rotazione.

Effetto dell'ascissa del fulcro

Si è dapprima analizzato l'effetto che l'ascissa del fulcro x_P ha sul meccanismo in analisi, imponendo i seguenti valori:

$$x_P = [55, 60, 65, 70, 75] \text{ mm}, R = 1/5, Y_P = 0, \epsilon = 0^\circ$$

Si osserva che all'aumentare dell'ascissa della cerniera P vi è un piccolo incremento sia della rotazione di uscita sia del guadagno di coppia ottenibile, dovuti al fatto che allontanando il fulcro aumenta il braccio su cui l'elemento di ingresso può fare leva. È interessante osservare che, durante il moto, il punto di collegamento F si avvicina al fulcro P andando a ridurre il braccio di ingresso e questo fa diminuire la crescita del guadagno di coppia. Per le specifiche richieste la corsa del meccanismo di taglio non è tuttavia sufficiente per ottenere il moto delle lame desiderato, di conseguenza sarebbe necessario aumentarla agendo su altri fattori.

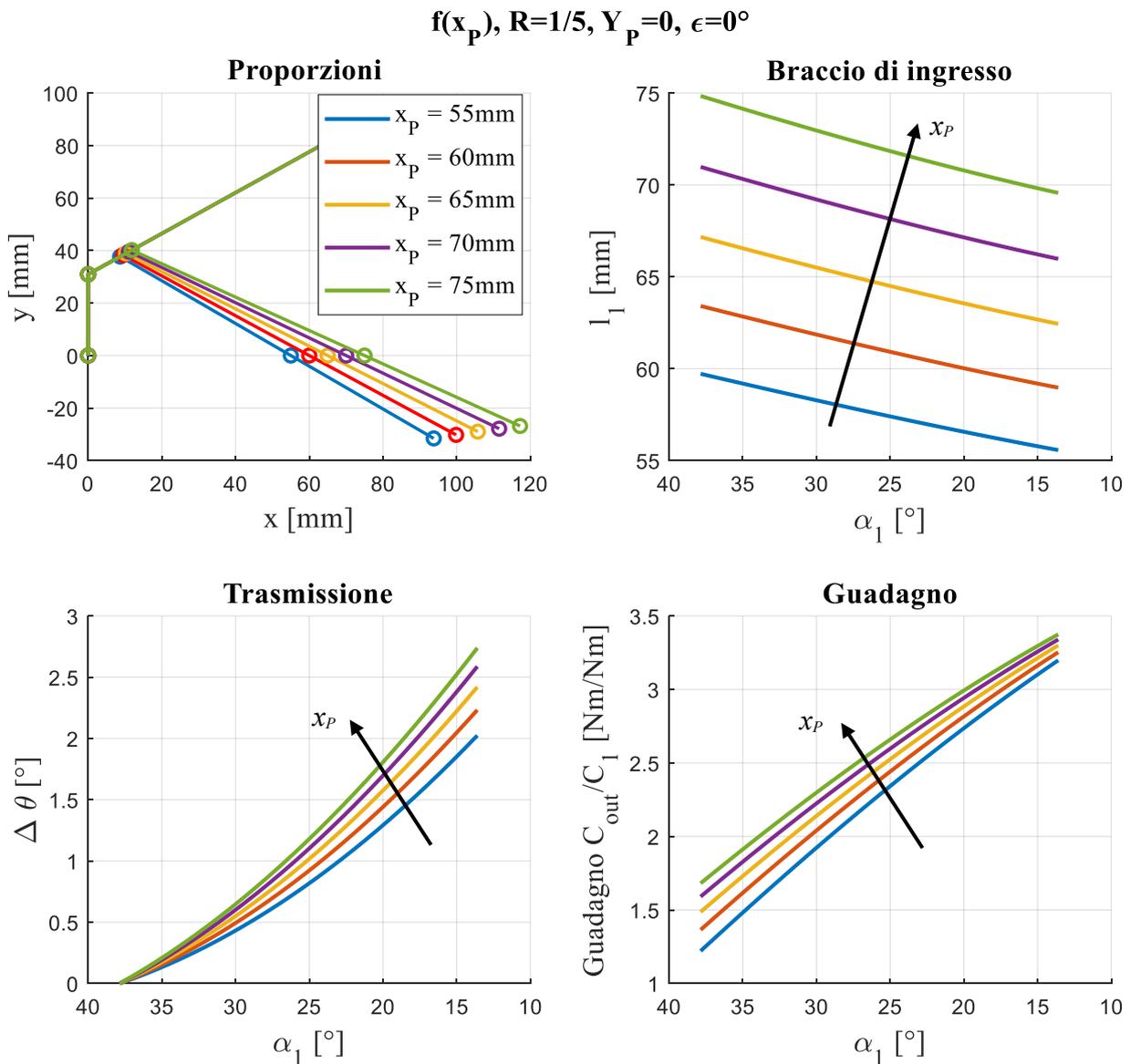


Figura 3.21 Grafici in funzione dell'ascissa del fulcro x_P .

Effetto della distanza del perno di collegamento

$$R = r/x_p = [1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2], x_p = 65 \text{ mm}, Y_p = 0, \epsilon = 0^\circ$$

La distanza del perno F dalla cerniera D_0 ha un effetto considerevole sia sulla corsa di uscita sia sul guadagno di coppia: al crescere della distanza aumenta la corsa dell'angolo di uscita ma, di contro, si ha un crollo del guadagno. Sarà necessario trovare una distanza di compromesso per ottenere una rotazione sufficiente che possa dare il guadagno di coppia maggiore possibile.

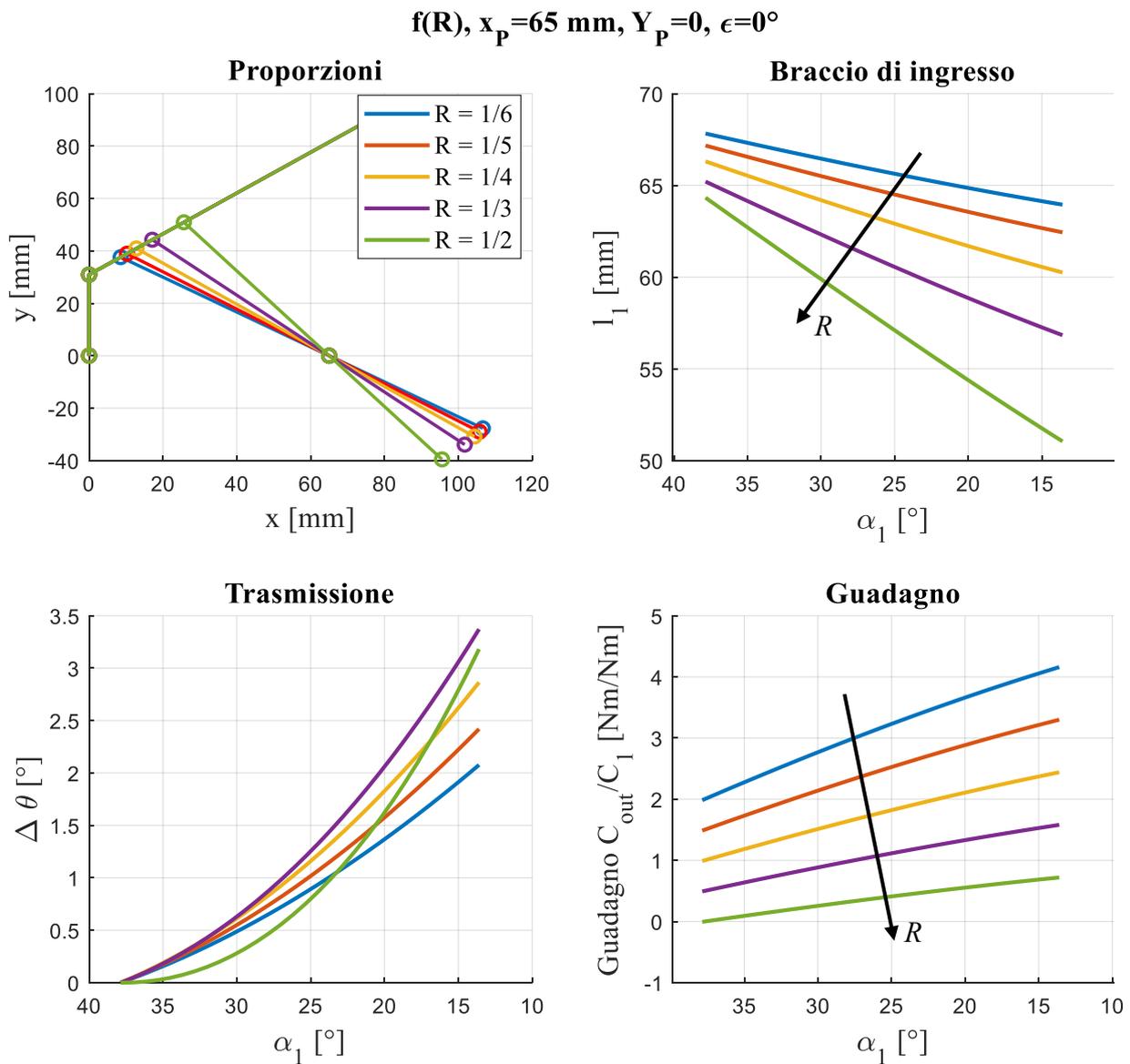


Figura 3.22 Grafici in funzione della distanza del perno di collegamento R .

Effetto dell'angolo di fasatura

$$\varepsilon = [-30, -10, 0, 10, 30]^\circ, x_p = 65 \text{ mm}, R = 1/5, Y_p = 0$$

L'angolo di fasatura ε non produce un effetto rilevante sulla rotazione della leva, mentre il guadagno di coppia aumenta al crescere del modulo dell'angolo con un effetto maggiore per angoli negativi, cioè quelli che pongono la cerniera F all'interno del palmo della pinza. Questo comportamento è giustificato dal fatto che per ε negativi l'angolo θ si riduce e di conseguenza cresce il coseno al numeratore presente nell'espressione del guadagno.

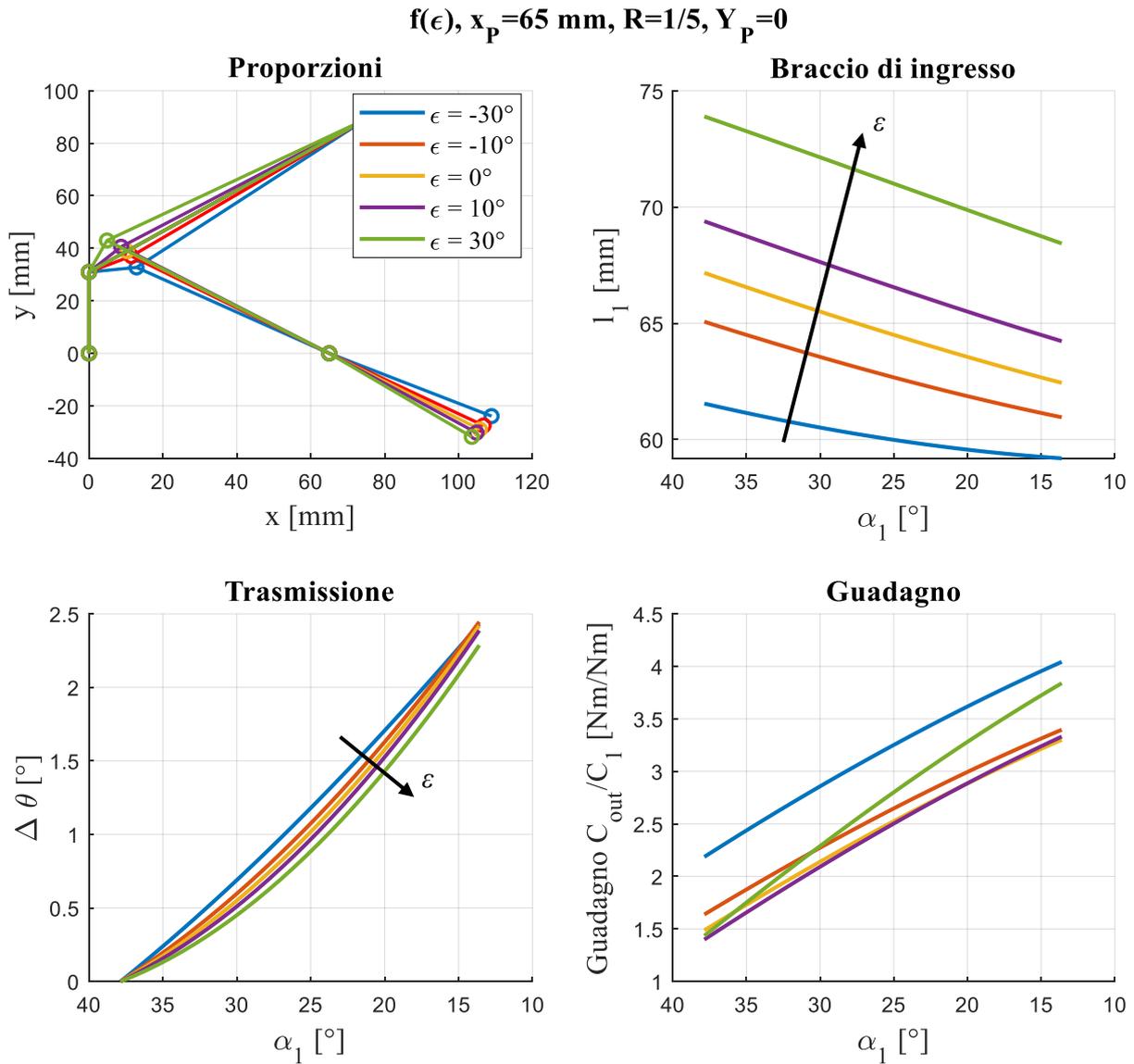


Figura 3.23 Grafici in funzione dell'angolo di fasatura ε .

Effetto dell'ordinata del fulcro

$$Y_P = y_P/x_P = [-1/5, -1/10, 0, 1/10, 1/5], x_P = 65 \text{ mm}, R = 1/5, \epsilon = 0^\circ$$

L'ordinata della cerniera P fa perdere la simmetria del meccanismo e differenzia la corsa di uscita e il guadagno ottenibile dai due bracci. Come si evince dalla Figura 3.24, avvicinando il fulcro alla parte motrice si ha un incremento sia della rotazione ottenibile sia del guadagno di coppia. Si esegue quindi un'analisi più approfondita per verificare l'effettiva validità di tale soluzione.

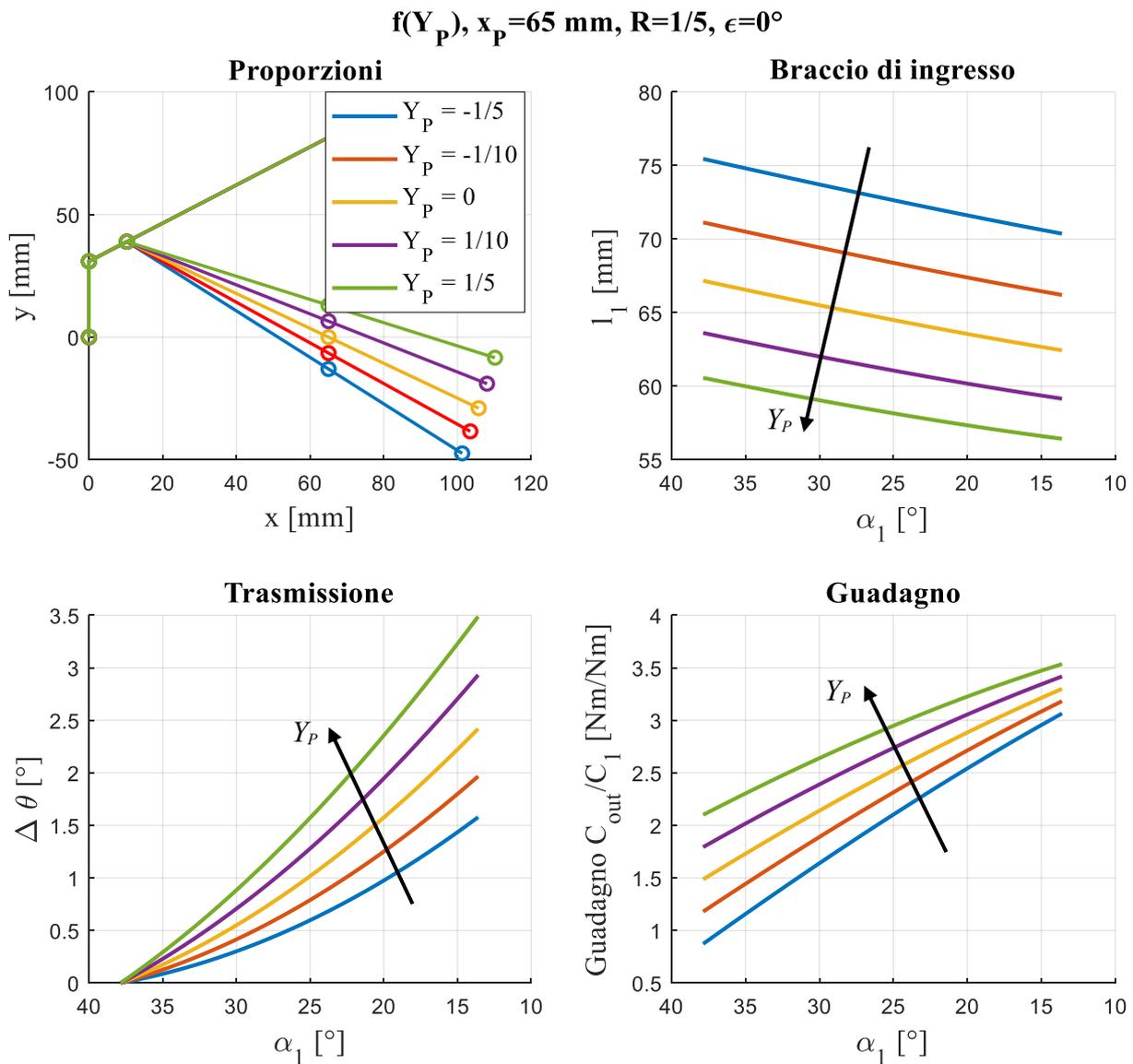


Figura 3.24 Grafici in funzione dell'ordinata del fulcro Y

Analizzando nello specifico l'intero meccanismo nelle due configurazioni con l'ordinata del fulcro positiva che hanno dato i migliori risultati, mantenendo però gli stessi valori di r ed ϵ sia per la parte superiore che per quella inferiore, si osserva che a fronte del miglioramento della parte superiore del meccanismo (nella legenda riportato come "up") si ha una riduzione delle prestazioni della parte inferiore ("down"): al crescere dell'ordinata la differenza tra i risultati ottenuti si amplifica. L'aumento delle prestazioni del braccio superiore

non è però sufficiente a bilanciare la riduzione di quello inferiore e non rende in questo caso giustificabile l'utilizzo di un meccanismo asimmetrico.

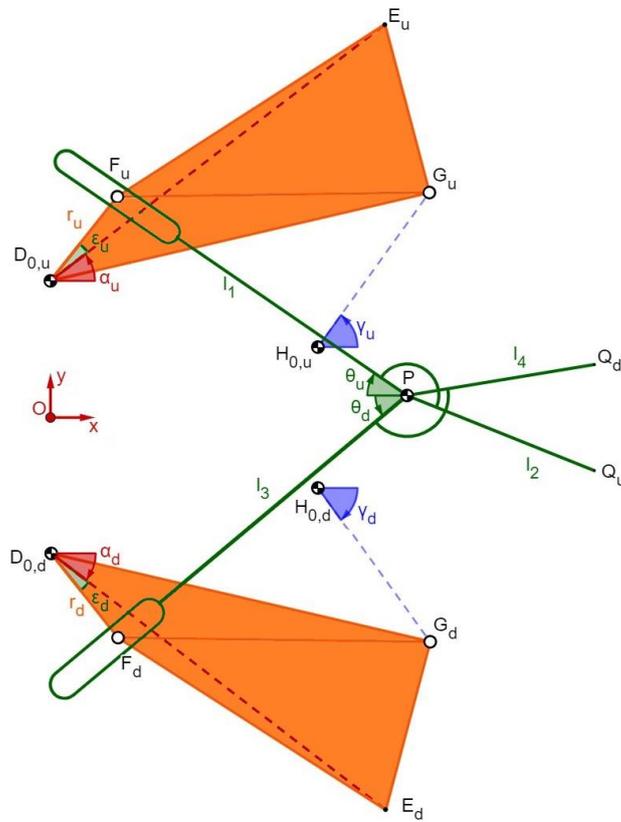


Figura 3.25 Meccanismo completo asimmetrico a fulcro fisso

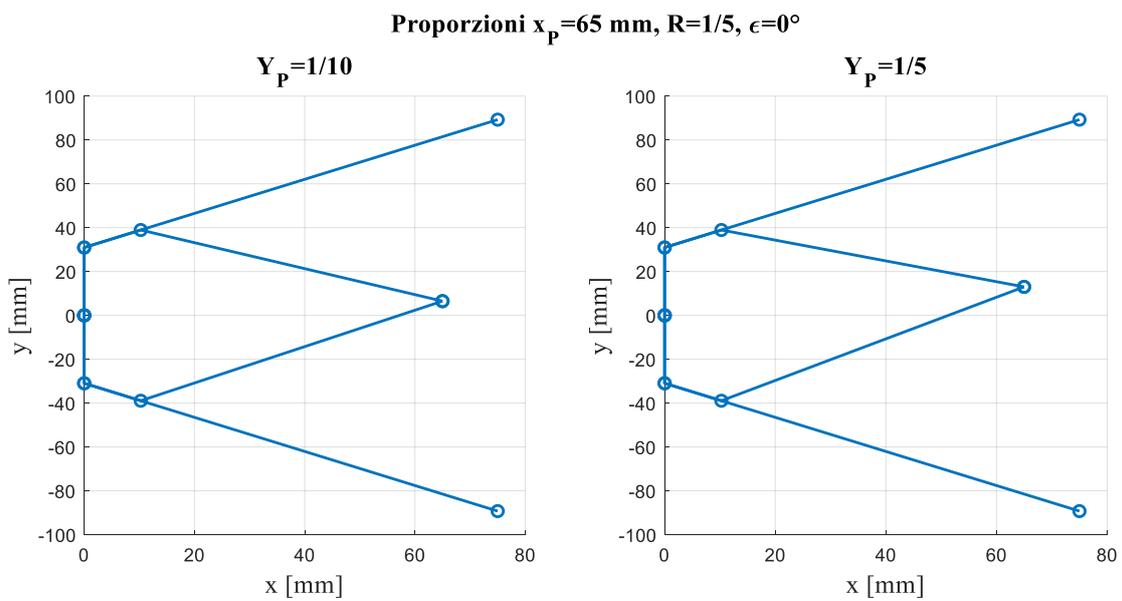


Figura 3.26 Proporzioni per meccanismi a fulcro fisso asimmetrici.

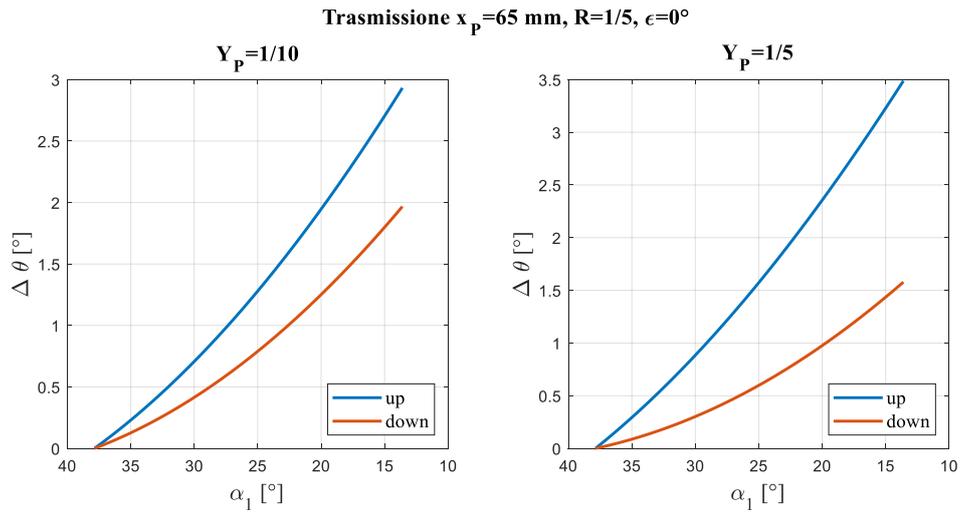


Figura 3.27 *Trasmissione per meccanismi a fulcro fisso asimmetrici.*

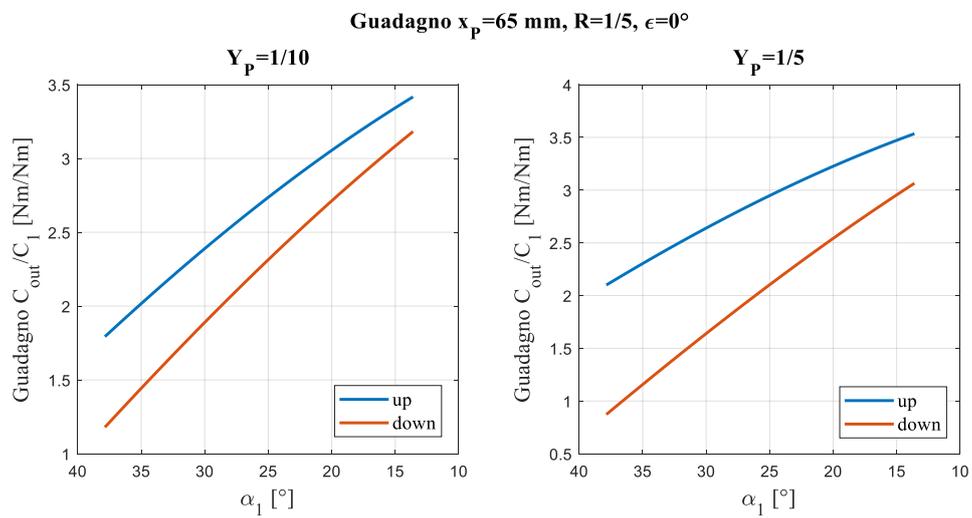


Figura 3.28 *Guadagni per meccanismi a fulcro fisso asimmetrici.*

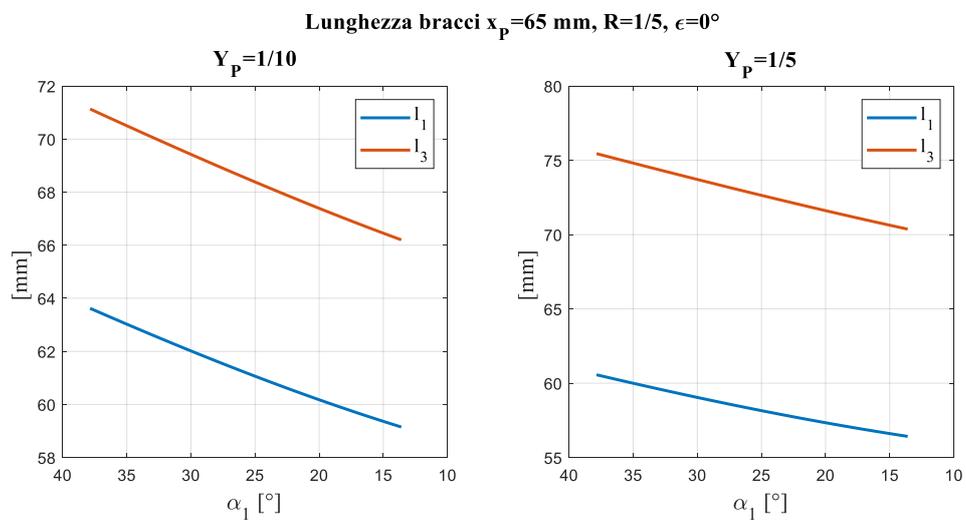


Figura 3.29 *Grafici dei meccanismi a fulcro fisso asimmetrici.*

Meccanismo a fulcro mobile

Il meccanismo a fulcro mobile è composto dalle due leve FPQ , incernierate alla coppia rotoidale P , che sono mosse dai corpi di trasmissione D_0E attraverso la cerniera F . Il punto F risulta fisso rispetto alla cerniera D_0 , i cui parametri caratteristici individuati sono la distanza da tale cerniera r e l'angolo ε che forma con il link D_0E . L'angolo di fasatura ε viene definito positivo in senso antiorario dal link di riferimento, andando a posizionare la coppia cinematica F all'esterno del palmo come in Figura 3.30, e negativo nel senso opposto, quando F si posiziona all'interno del palmo. I parametri l_1 ed l_3 rappresentano le lunghezze dei bracci azionati FP , rispettivamente della leva superiore e della leva inferiore. Nel meccanismo a fulcro mobile sono costanti tutti i parametri ad eccezione di x_P , che varia in funzione della chiusura della forbice. Durante la chiusura il fulcro traslerà in direzione x . Anche in questo caso il moto di input è dato dalla rotazione α e porta in rotazione le leve attraverso l'angolo θ .

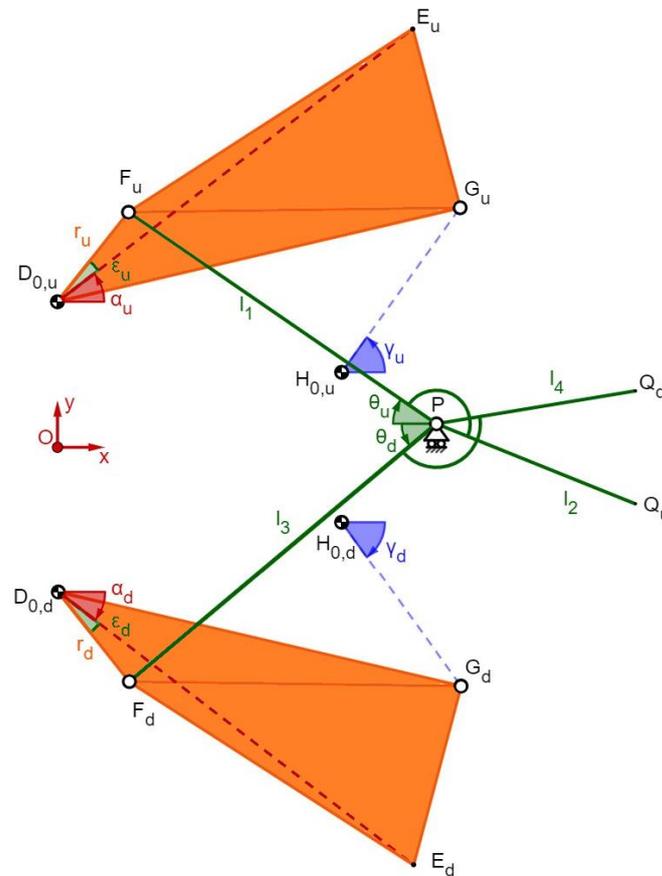


Figura 3.30 Rappresentazione meccanismo utensile a fulcro mobile.

Anche in questo caso per semplificare l'analisi si fa riferimento alla sola parte superiore del meccanismo per studiarne il comportamento: nel caso in cui il meccanismo risulti simmetrico le due parti inferiore e superiore avranno le stesse prestazioni.

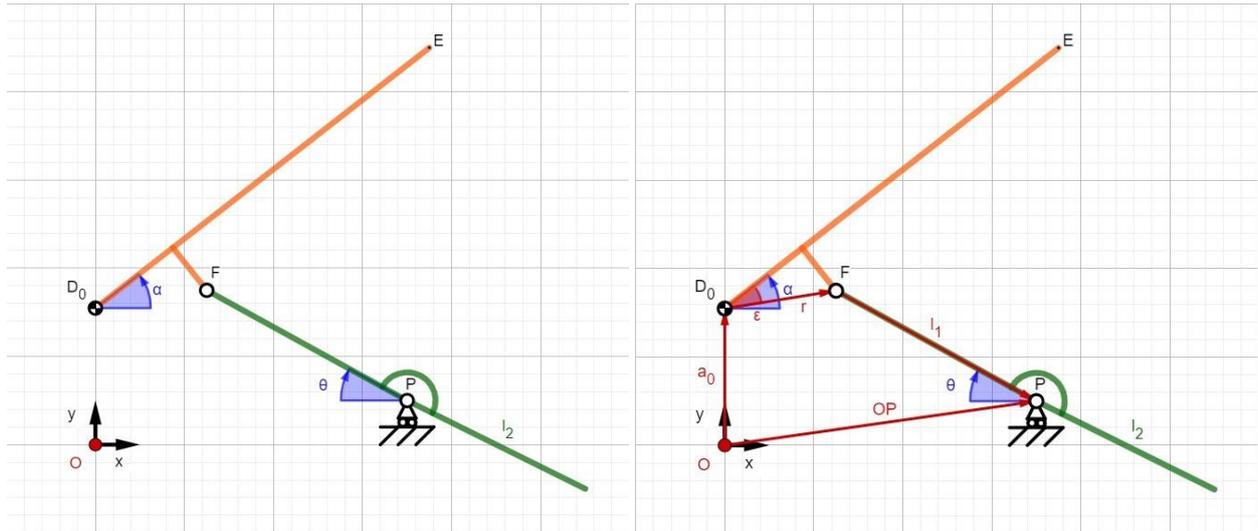


Figura 3.31 Rappresentazione meccanismo di taglio a fulcro mobile e dettaglio dei parametri.

Ripetendo l'analisi sulla parte superiore del meccanismo in Figura 3.31 si ottengono le stesse espressioni di chiusura ottenute in precedenza (anche in questo caso viene inserito il secondo grado di libertà α_2 della pinza Kinova, che nell'analisi viene poi tenuto costante):

$$\begin{cases} r \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \varepsilon) + l_1 \cos(\theta) = x_P \\ r \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \varepsilon) - l_1 \sin(\theta) = y_P - a_0 \end{cases}$$

Facendo il rapporto tra le due, la seconda diviso la prima, si ottiene l'espressione di θ :

$$\tan(\theta) = \frac{r}{l_1} \tan(\alpha_1 + \alpha_2 + \varepsilon) + \frac{a_0 - y_P}{x_P l_1}$$

È possibile, anche in questo caso, rielaborare l'espressione per ricavare θ funzione dei solo parametri fissi:

$$\sin(\theta) = \frac{a_0 - y_P + r \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \varepsilon)}{l_1}$$

Anche la coppia di uscita resta invariata rispetto all'analisi precedente:

$$C_{out} = F_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \theta) l_1$$

con $F_1 = \frac{C_1}{r \cos(\varepsilon)}$ la forza di ingresso esercitata dalla pinza Kinova sugli elementi di trasmissione. Il guadagno di coppia risulta quindi essere pari a:

$$G = \frac{C_{out}}{C_1} = \frac{l_1 \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \theta)}{r \cos(\varepsilon)}$$

L'analisi del meccanismo viene effettuata scegliendo come parametro di scala la lunghezza del braccio l_1 , elaborando l'analisi dei parametri con i seguenti valori:

$$l_1 = [56, 58, 60, 62, 64] \text{ mm}$$

$$R = r/l_1 = [1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2]$$

$$\varepsilon = [-30, -10, 0, 10, 30]^\circ$$

$$Y_P = y_P/l_1 = [-1/5, -1/10, 0, 1/10, 1/5]$$

Anche in questo caso ci si focalizza sulla corsa dell'angolo di uscita $\Delta\theta$ e sul guadagno di coppia G , tuttavia si analizza anche la variazione dell'ascissa del fulcro perché potrebbe avere un effetto rilevante sulle operazioni di taglio e di presa, andando a modificare la posizione delle lame, e quindi del campione, durante l'operazione di campionamento.

Per eseguire questa analisi si è scritto un listato MatLab che simula il movimento del membro di ingresso, sotto l'azione della pinza Kinova, e dando in output le caratteristiche e le prestazioni del meccanismo a leva, combinando i vari parametri come descritto nei paragrafi seguenti.

Codice

Il codice, riportato in Appendice B, prende in ingresso i dati del meccanismo e simula le variabili del meccanismo e i rapporti definiti sopra come parametri per l'analisi. Utilizza le variabili simulate per effettuare l'analisi cinematica del meccanismo e valutare la posizione del fulcro x_p , che dipende dalla posizione della cerniera F , dalla lunghezza del braccio motore l_l e dalla rotazione del membro di trasmissione, e il guadagno di coppia G . Infine vengono inseriti i valori che devono assumere i parametri dell'analisi e si definisce il vettore che simuli la rotazione di ingresso. Inseriti tutti i dati e definite le formule si effettuano diversi cicli *for* che facciano variare, uno alla volta, i parametri in esame: ciascun ciclo stabilisce i valori di riferimento e il parametro che varia, poi, sostituendo i valori numerici, simula la rotazione di ingresso e valuta tutte le variabili di uscita (l'angolo di uscita θ , il guadagno G e la posizione della cerniera x_p). Per ciascuna simulazione si ottengono i grafici che verranno presentati successivamente. Per maggiore chiarezza visiva è presente una sezione che definisce i punti caratteristici del meccanismo di taglio ed esegue un grafico che riporta le proporzioni del meccanismo e un altro che riporta la sequenza delle posizioni occupate dal meccanismo durante la rotazione.

Effetto della lunghezza del braccio

$$l_1 = [56, 58, 60, 62, 64] \text{ mm}, R = 1/5, Y_p = 0, \epsilon = 0^\circ$$

La lunghezza del braccio l_1 non ha un effetto rilevante sulla corsa di uscita ma allontana la posizione della cerniera centrale P, che però ha uno spostamento di pochi millimetri durante il moto. Anche il guadagno di coppia non varia in modo significativo, ma aumenta leggermente al crescere del braccio motore (la crescita è esigua a causa della scelta ravvicinata dei valori di l_1 utilizzati).

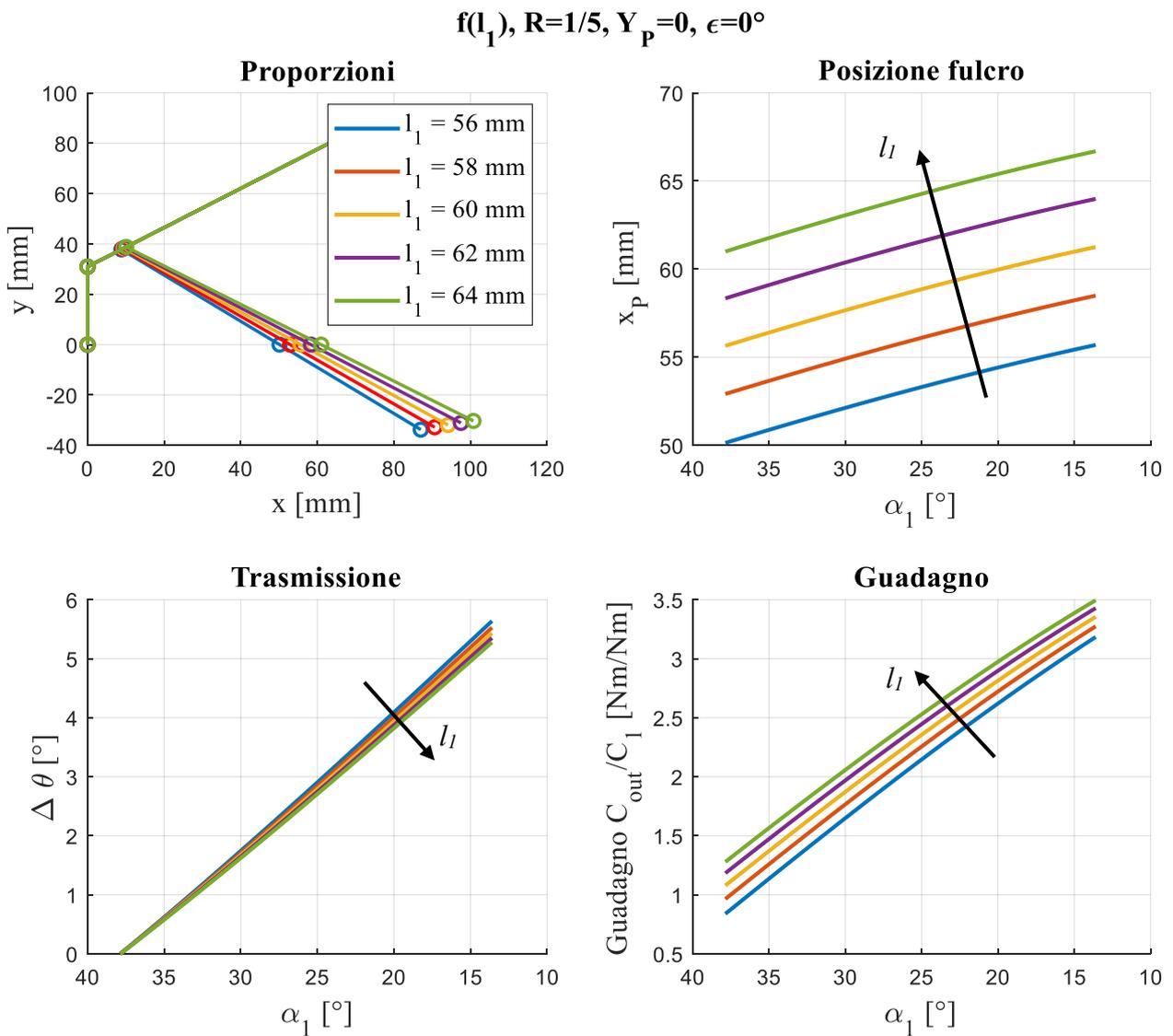


Figura 3.32 Grafici in funzione della lunghezza del braccio di ingresso l_1 .

Effetto della distanza del perno di collegamento

$$R = r/l_1 = [1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2], l_1 = 60 \text{ mm}, Y_p = 0, \epsilon = 0^\circ$$

Come nel meccanismo con il fulcro fisso, anche in questo caso la distanza del perno F presenta gli effetti più rilevanti sulla corsa di uscita e sul guadagno di coppia in modi opposti: al crescere di r aumenta la rotazione $\Delta\theta$ mentre si riduce il guadagno di coppia. Si nota un effetto importante anche sull'ascissa del fulcro, che aumenta sia in posizione che nella sua corsa per distanze r maggiori. Nell'ottica della progettazione, per ottenere un buon guadagno si può porre come limite superiore $R = 1/3$ mentre per ottenere una rotazione compatibile con quella ipotizzata il limite inferiore si può porre a $R = 1/5$.

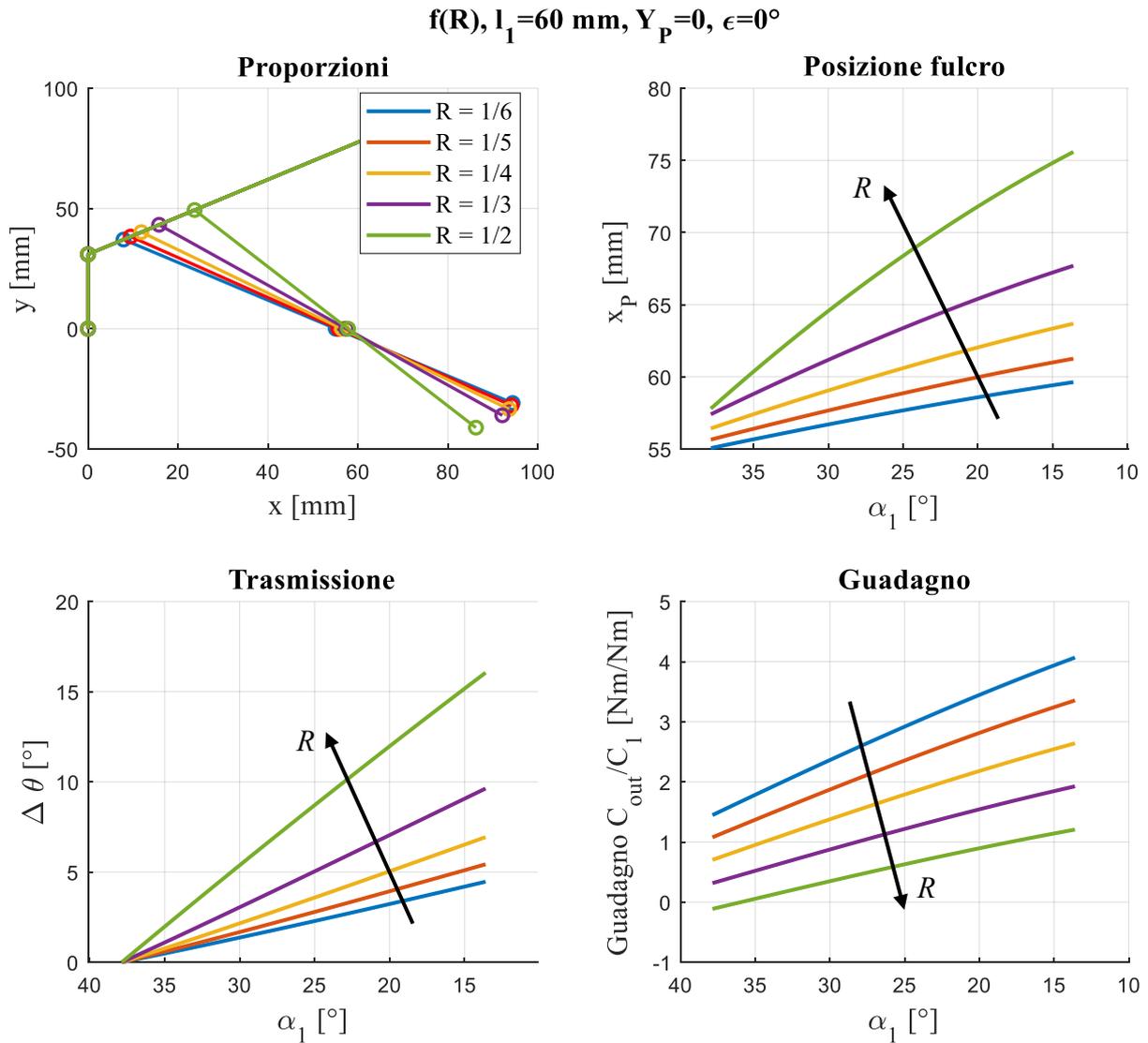


Figura 3.33 Grafici in funzione della distanza del perno di collegamento R .

Effetto dell'angolo di fasatura

$$\varepsilon = [-30, -10, 0, 10, 30]^\circ, l_1 = 60 \text{ mm}, R = 1/5, Y_p = 0$$

L'angolo di fasatura ε presenta effetti diversi in funzione del proprio segno: angoli positivi, che pongono la cerniera F all'esterno del palmo, riducono la corsa del meccanismo di taglio, spostano il fulcro più vicino all'origine, facendogli compiere uno spostamento maggiore, e producono un guadagno inferiore; gli angoli negativi invece permettono di ottenere una rotazione maggiore con un fulcro che si allontana dal palmo ma che si sposta meno, mentre il guadagno presenta un importante aumento in favore del fatto che si riduce l'angolo θ di uscita.

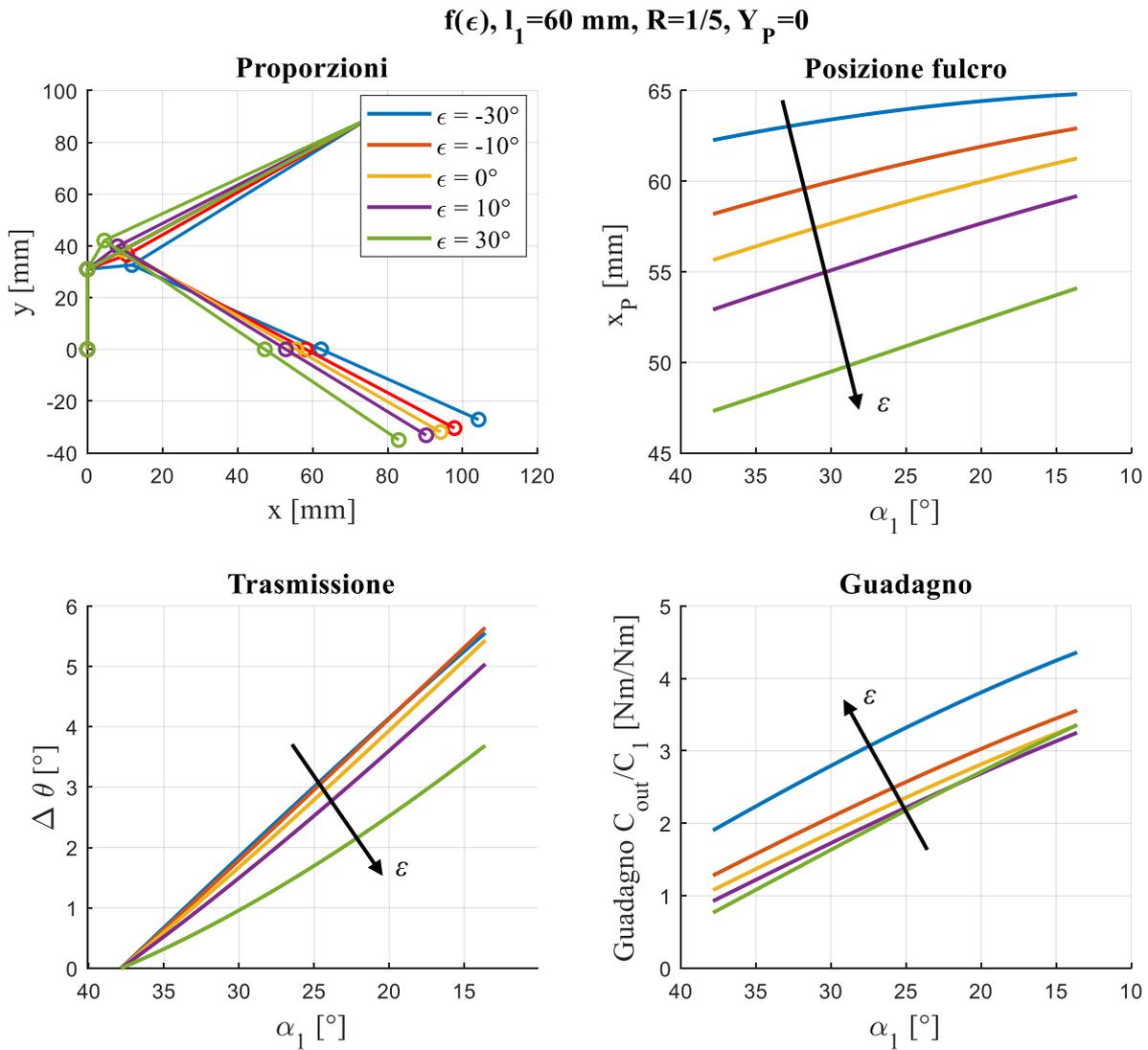


Figura 3.34 Grafici in funzione dell'angolo di fasatura ε .

Effetto dell'ordinata del fulcro

$$Y_P = y_P/l_1 = [-1/5, -1/10, 0, 1/10, 1/5], l_1 = 60 \text{ mm}, R = 1/5, \epsilon = 0^\circ$$

L'ordinata della cerniera P permette di differenziare la corsa di uscita e il guadagno ottenibile dai due bracci del meccanismo. Si osserva che spostando l'ordinata verso la parte motrice aumenta il guadagno ottenibile, a scapito però della rotazione $\Delta\theta$.

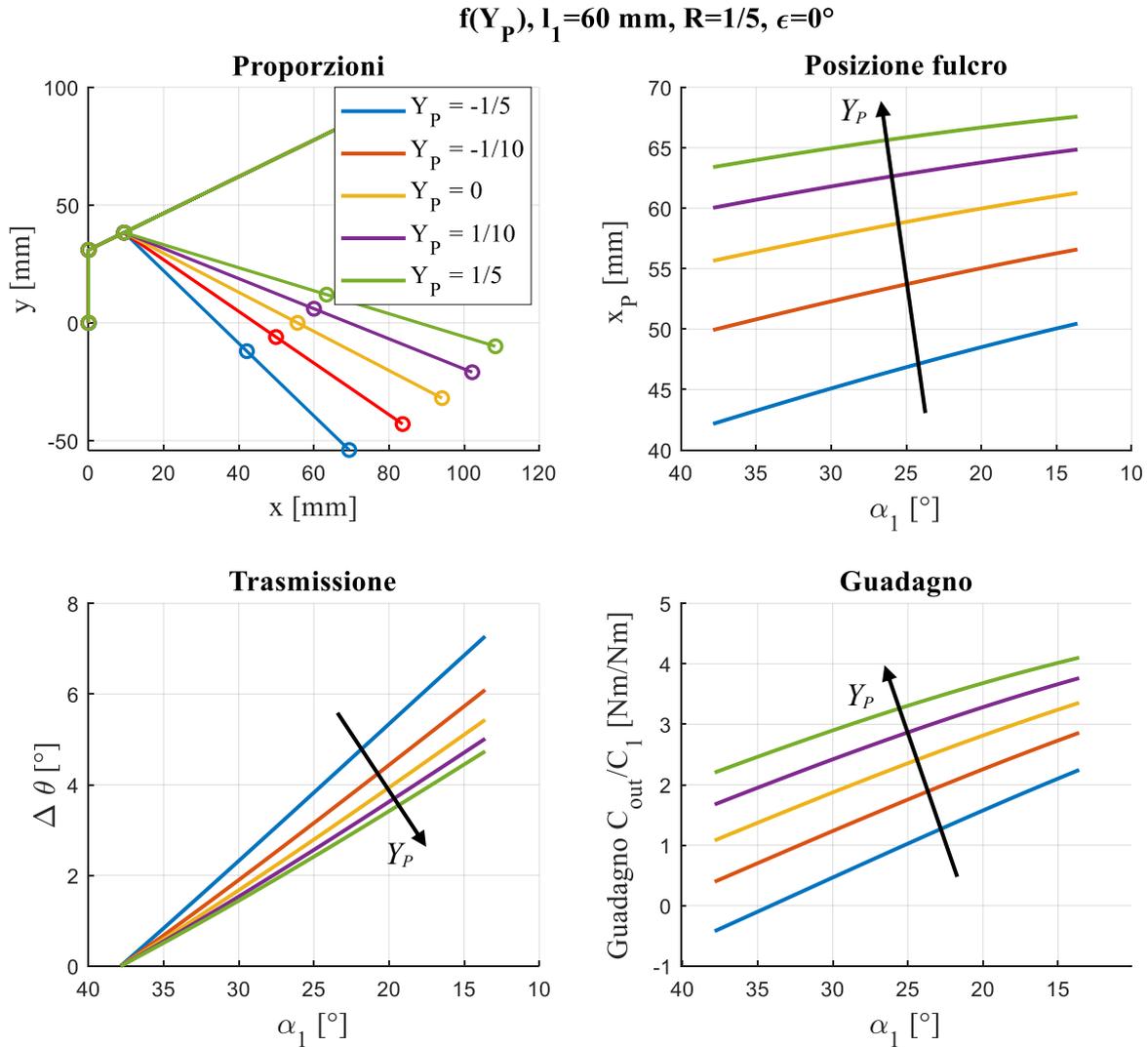


Figura 3.35 Grafici in funzione dell'ordinata del fulcro Y

Per un'analisi più accurata si riportano, come per il caso precedente, i risultati ottenibili dalle due parti del meccanismo nelle due configurazioni con le ordinate positive, mantenendo comunque gli stessi parametri r ed ϵ per entrambe le cerniere di collegamento F . Come mostrato nelle Figure 3.37-40, la perdita di simmetria permette di ottenere un buon aumento di prestazioni: al già più elevato guadagno ottenuto dal braccio superiore dovuto alle condizioni geometriche più favorevoli si aggiunge il guadagno ottenuto dal braccio inferiore che risulta anche maggiore del primo. Di contro però le rotazioni ottenibili si riducono rispetto alla configurazione simmetrica e in maniera più importante per il braccio inferiore.

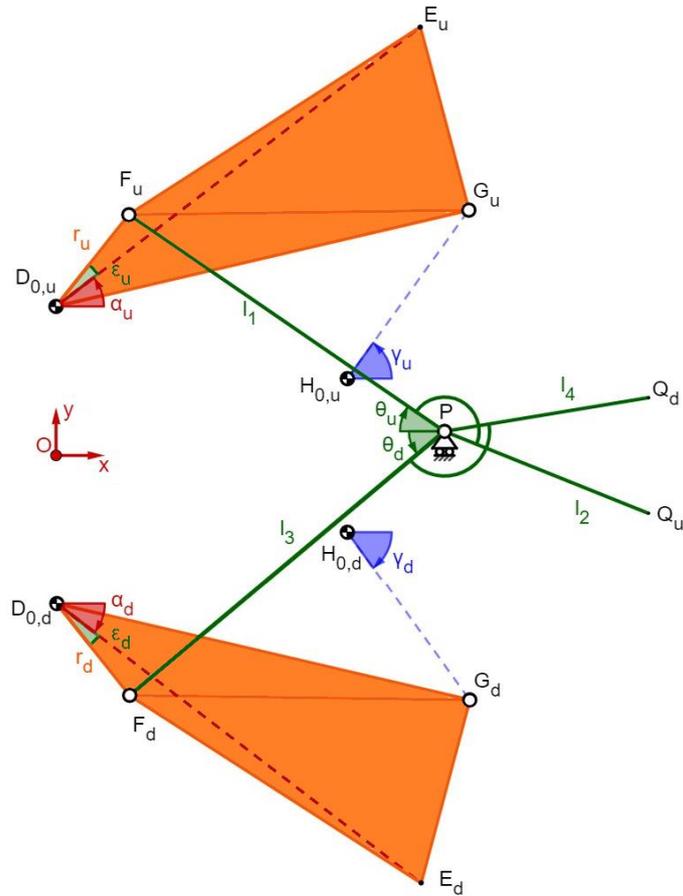


Figura 3.36 Meccanismo completo asimmetrico a fulcro mobile.

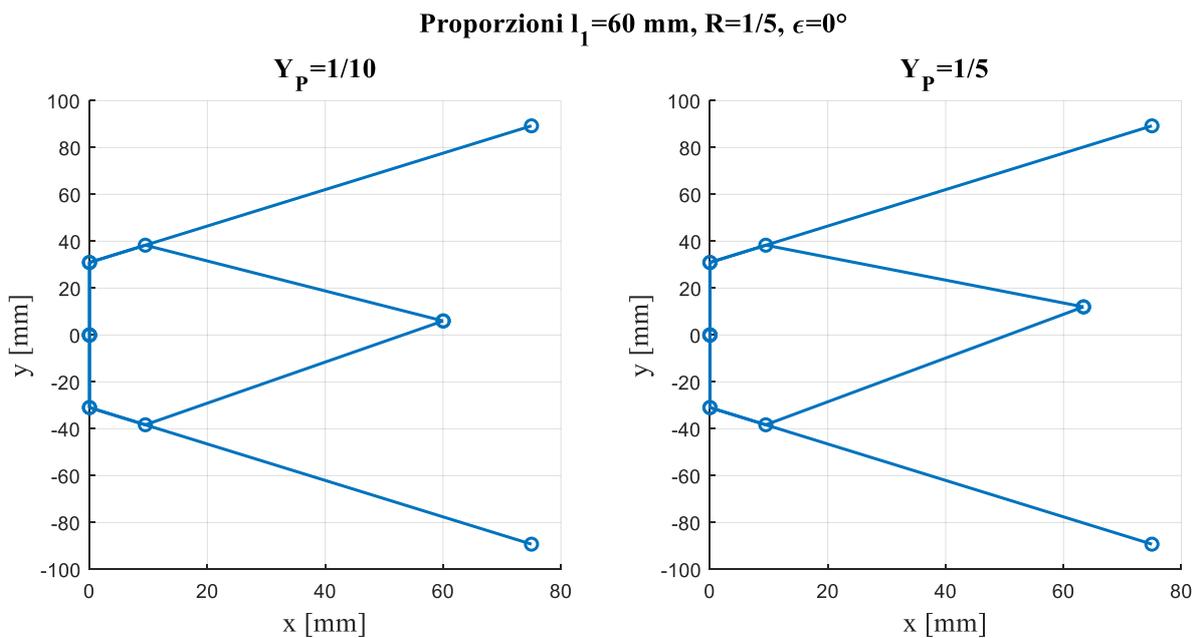


Figura 3.37 Proporzioni per meccanismi a fulcro mobile asimmetrici

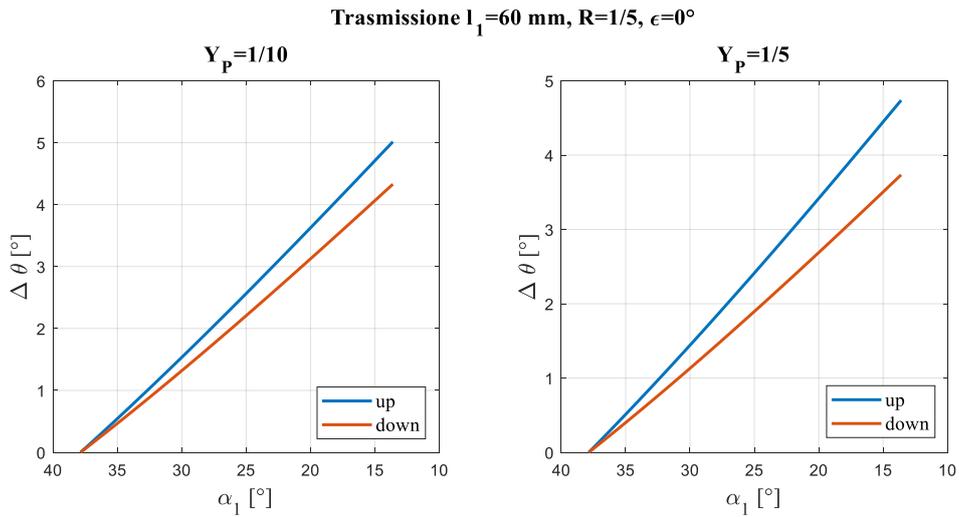


Figura 3.38 *Trasmissione per meccanismi a fulcro mobile asimmetrici*

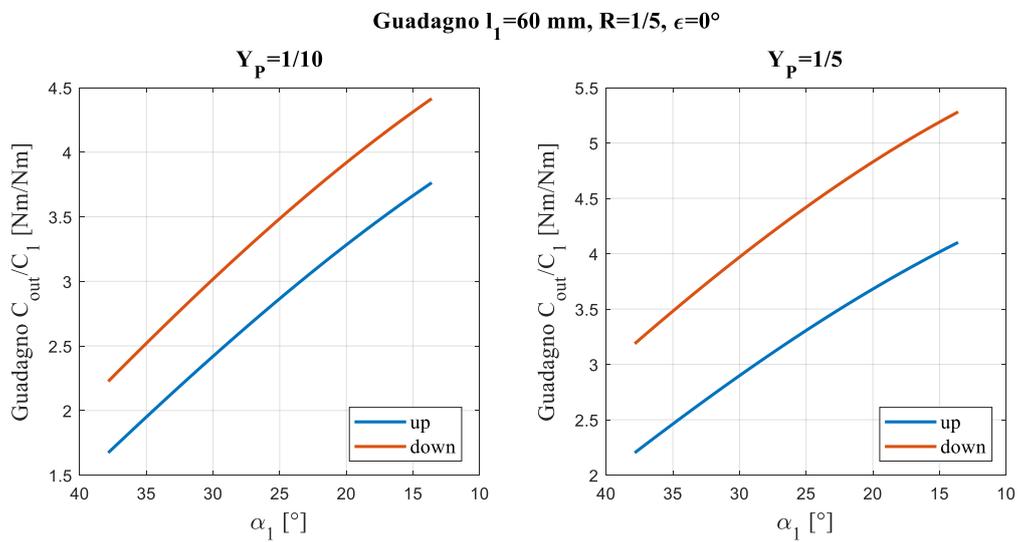


Figura 3.39 *Guadagno per meccanismi a fulcro mobile asimmetrici*

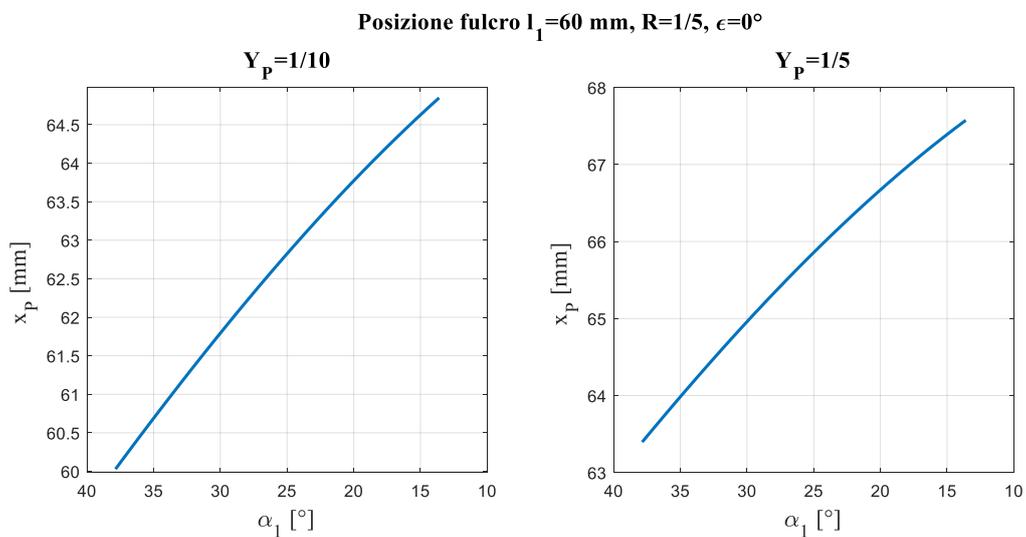


Figura 3.40 *Ascissa del fulcro per meccanismi a fulcro mobile asimmetrici*

Dimensionamento e ottimizzazione del meccanismo di taglio

Date le ridotte corse di uscita ottenibili dal meccanismo a fulcro fisso, e in favore dei ridotti spostamenti della cerniera P del meccanismo a fulcro mobile, si decide di implementare quest'ultima tipologia di meccanismo a leva, avendo anche l'ulteriore vantaggio di richiedere una coppia rotoidale sulla coppia cinematica F invece di un accoppiamento a glifo che comporterebbe una maggiore difficoltà realizzativa. Come ulteriore scelta si pone il fulcro lungo l'asse x , ottenendo un meccanismo simmetrico, per rendere bilanciato il meccanismo e poiché la presenza di una asimmetria produce un moto del fulcro che non è più diretto soltanto lungo l'asse x .

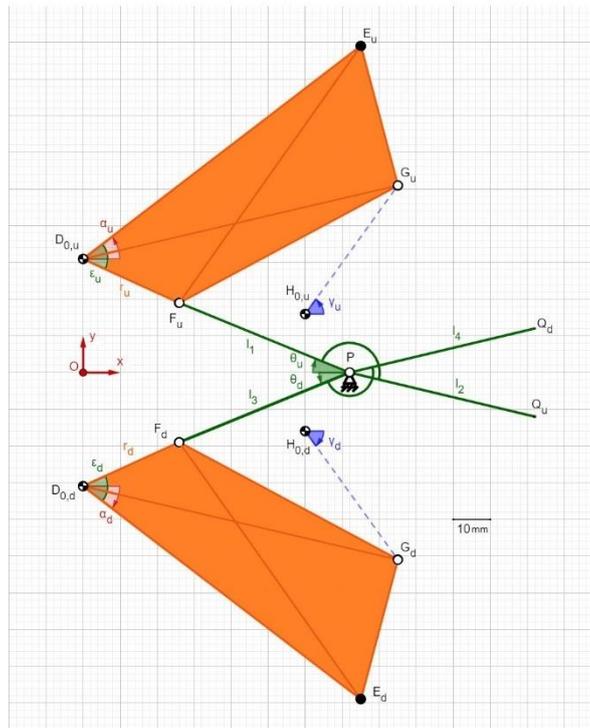


Figura 3.41 Meccanismo completo implementato nell'utensile

Per il dimensionamento del meccanismo da utilizzare nel prototipo si effettua una prima ottimizzazione analizzando i due parametri fondamentali richiesti dalle specifiche: si cerca di massimizzare la coppia di uscita, valutata attraverso il guadagno rispetto alla coppia di ingresso, ottenendo una rotazione del meccanismo sufficiente a completare la chiusura delle lame. I parametri da definire sono:

- La posizione della cerniera di trasmissione F rispetto alla cerniera D_0 , che racchiude la lunghezza r e l'angolo ϵ ;
- La lunghezza del braccio di leva l_1 , da cui dipende l'ascissa del fulcro x_P (avendo posto $y_P = 0$);

Al fine di semplificare la successiva modellazione su software CAD, al posto della lunghezza r e dell'angolo di fasatura ϵ del link D_0F sono state utilizzate le coordinate del punto F rispetto al punto D_0 :

$$r_x = |x_{D_0} - x_F|$$

$$r_y = |y_{D_0} - y_F|$$

Da cui si possono facilmente ricavare i parametri caratteristici secondo le seguenti espressioni:

$$r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \operatorname{atan}\left(\frac{r_y}{r_x}\right) - \alpha_0 & \text{per } \varepsilon \geq 0 \\ -\left[\operatorname{atan}\left(\frac{r_y}{r_x}\right) + \alpha_0\right] & \text{per } \varepsilon < 0 \end{cases}$$

Dove α_0 rappresenta l'angolo che il link D_0E forma con l'asse x e, nella configurazione in analisi, vale:

$$\alpha_0 = 33.9^\circ$$

Si può osservare dall'analisi dell'angolo di fasatura ε effettuata in precedenza che risulta conveniente utilizzare angoli negativi, ponendo la cerniera F all'interno del palmo del gripper Kinova, in quanto si favorisce la trasmissione di coppia rendendo la forza esercitata dalla pinza più vicina alla condizione di perpendicolarità al braccio di leva l_1 .

I dati di ingresso dell'analisi sono stati scelti arbitrariamente in modo che fossero compatibili con gli ingombri desiderati e permettessero una realizzazione sufficientemente solida. Tali dati sono riportati di seguito:

$$r_x = [16, 17, 18, 19, 20] \text{ mm}$$

$$r_y = [3, 4, 5] \text{ mm}$$

$$l_1 = [58, 59, 60, 61] \text{ mm}$$

L'ottimizzazione è stata effettuata eseguendo l'analisi descritta precedentemente del meccanismo a fulcro mobile, richiedendo come risultati la rotazione massima di uscita e il massimo guadagno ottenuto, e combinando i dati scelti.

Si riporta, per brevità, soltanto la combinazione ritenuta migliore:

$$r_x = 19 \text{ mm}, r_y = 5 \text{ mm}$$

$$\text{da cui si ottiene: } r = 19.65 \text{ mm}, \varepsilon = -48.64^\circ$$

$$l_1 = 59 \text{ mm}$$

La scelta è stata effettuata richiedendo una rotazione di uscita sufficiente a far chiudere gli elementi di taglio l_2 ed l_4 e un guadagno di coppia che fosse il maggiore possibile, ottenendo i seguenti risultati:

$$\Delta\theta_{max} = 8^\circ$$

$$G = 3.8$$

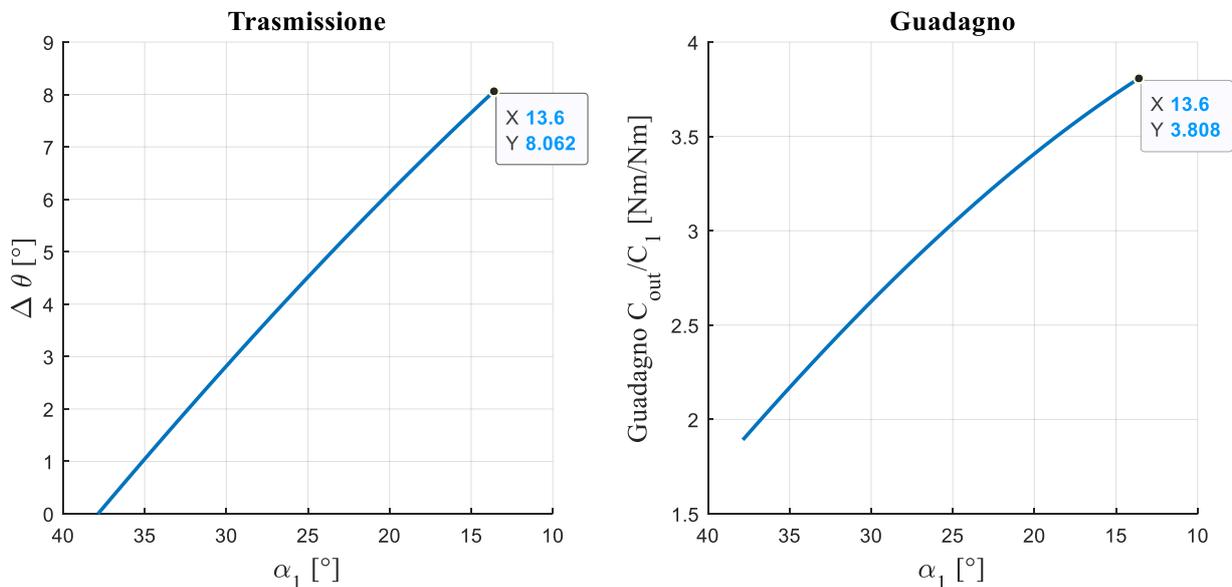


Figura 3.42 Caratteristiche del meccanismo ottimizzato

3.3 Progetto esecutivo

La progettazione esecutiva si è posta come obiettivo quello di ottenere un prototipo a basso costo da produrre tramite fabbricazione additiva, per verificarne l'effettiva funzionalità. Il processo di progettazione ha cercato di trovare un compromesso tra due diverse esigenze: limitare gli ingombri e le masse dei vari membri per rientrare nei limiti di peso del braccio robotico e cercare di assicurare la resistenza meccanica dei componenti aumentando gli spessori dove necessario.

I membri principali dell'utensile, bollati in Figura 3.43, sono:

- Il telaio, che è il corpo che racchiude i meccanismi e resta solidale alla pinza;
- I corpi di trasmissione, o corpi di ingresso, che trasferiscono il moto della pinza ai meccanismi;
- La molla a flessione, che garantisce il contatto tra dito e membro di ingresso e permette al meccanismo di tornare alla configurazione iniziale una volta riaperta la pinza Kinova;
- I membri di presa, che servono ad afferrare il campione;
- Le leve del meccanismo di taglio, che chiameremo anche porta-lama, sono gli elementi su cui vengono montati gli elementi adibiti alla funzione di taglio.

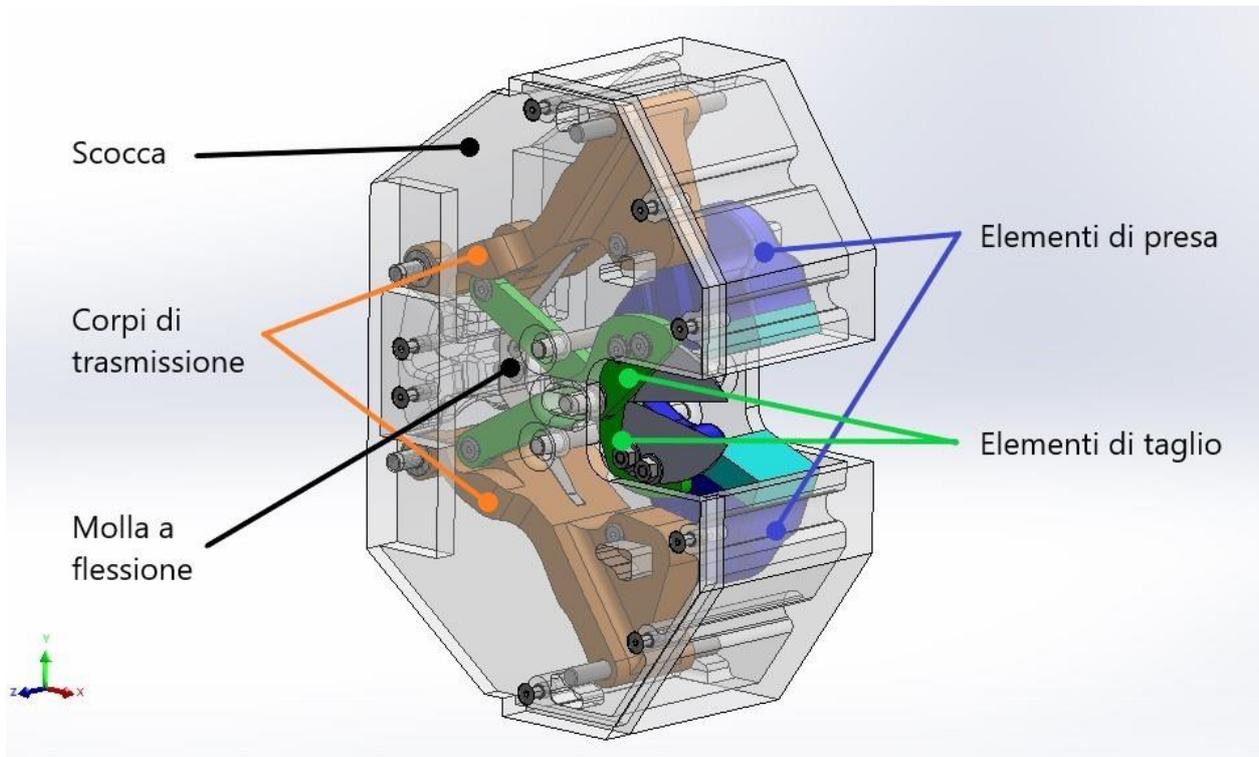


Figura 3.43 Complessivo dell'utensile (misure in millimetri)

In questo primo prototipo si è scelto di eseguire la funzione di blocco rispetto alla pinza in modo manuale, di conseguenza non è stato previsto un elemento che espliciti tale funzione.

3.3.1 Telaio

Il telaio, detto anche scocca o *case* e mostrato nelle Figure 3.44 e 3.45, funge da copertura all'intero utensile e svolge diverse funzioni:

- Proteggere i meccanismi interni;
- Fare da riferimento per il posizionamento della pinza Kinova;
- Fungere da telaio per i meccanismi ed essere solidale al palmo del gripper.

La funzione di protezione è svolta dalle pareti della scocca, in cui sono presenti due aperture: una frontale che permette l'interazione dei meccanismi di presa e taglio con il campione di coltura da raccogliere e la parte in cui si posiziona la pinza Kinova.

Per riferire la pinza rispetto all'utensile si è provveduto a riportare sul case il calco del palmo del gripper, così che il posizionamento relativo tra i due corpi possa essere preciso e univoco, anche in favore della dissimmetria di tale riferimento, ed è stato posizionato in modo da far coincidere i sistemi di riferimento dei due elementi.

Al fine di permettere il montaggio, la parete laterale posta nel semispazio con le z positive è separata dal resto della struttura, così da avere un accesso agibile all'interno dell'utensile. Per collegare le due parti del case si è scelto di utilizzare grani filettati da inserire negli appositi fori nella parte principale per poter avvitare le viti di chiusura dalla parete laterale.

In un primo momento si erano previste sulla scocca delle guide per la rotazione dei membri di trasmissione e per la traslazione del fulcro del meccanismo di taglio, in modo da rendere più solido il meccanismo, tuttavia a causa della bassa pulizia dell'ambiente di lavoro e dei detriti che potrebbero nascere dal taglio dei campioni si è deciso di eliminare almeno le guide per i corpi di ingresso in favore di due profili estrusi che fungano da finecorsa, allo scopo di evitare elementi estranei andassero ad intasare la guida e creassero problemi al funzionamento dell'utensile.

Sulla scocca sono riportati diversi elementi per posizionare e riferire gli altri corpi del meccanismo:

- Le sedi per i perni attorno cui ruotano i membri di trasmissione e che realizzano la cerniera D_0 ;
- I profili che svolgono la funzione di finecorsa per i corpi di ingresso;
- Le sedi che ospitano gli alberi su cui ruotano gli elementi di presa, rappresentando la cerniera H_0 ;
- Le asole centrali che fungono da ulteriore riferimento per la traslazione del fulcro del meccanismo di taglio;
- Due fori, dietro il riferimento per il palmo della pinza, che ospitano i grani filettati per posizionare la molla a flessione.

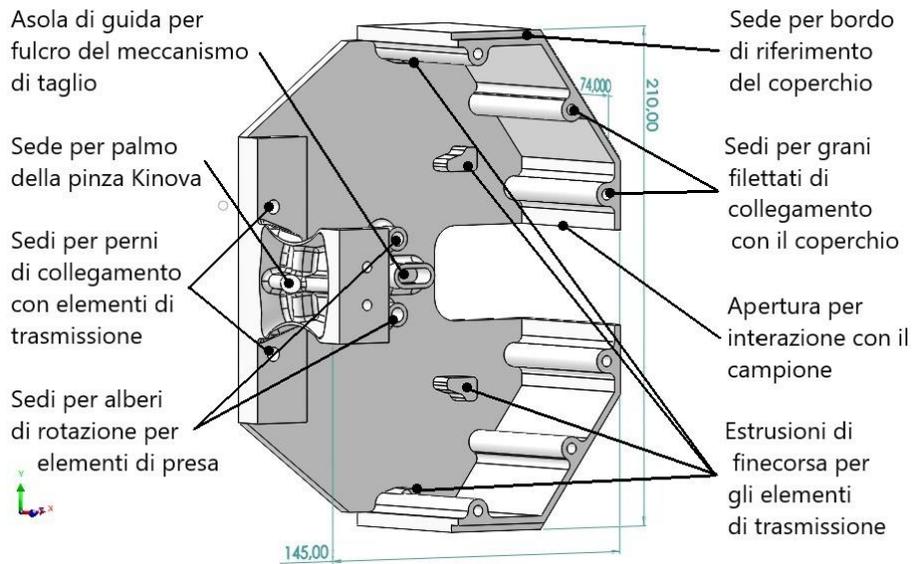


Figura 3.44 Parte principale della scocca (misure in millimetri).

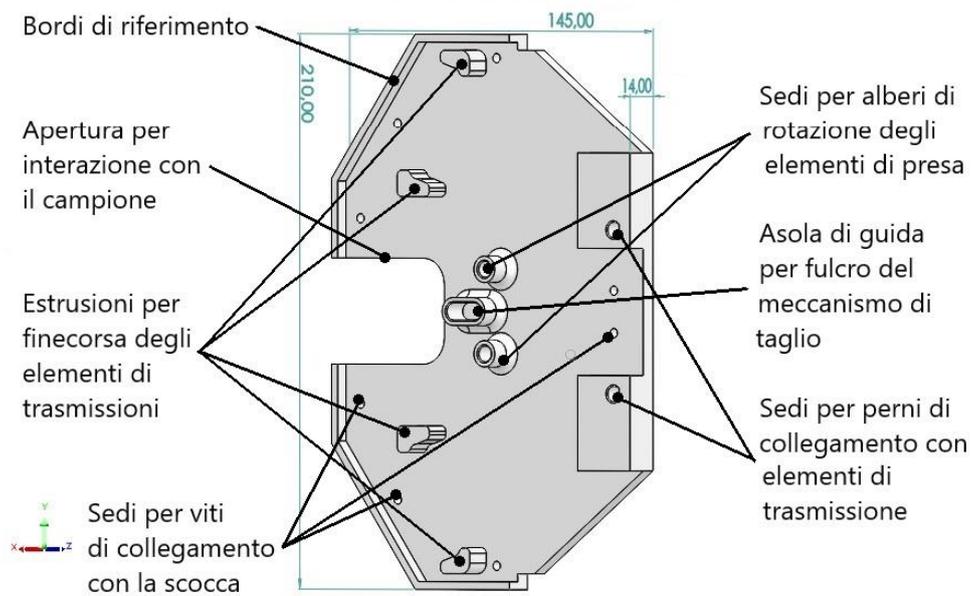


Figura 3.45 Coperchio della scocca (misure in millimetri).

3.3.2 Membri di presa

I membri di presa svolgono la funzione di afferrare e mantenere in presa i campioni da raccogliere e presentano quattro elementi principali, evidenziati in Figura 3.46.

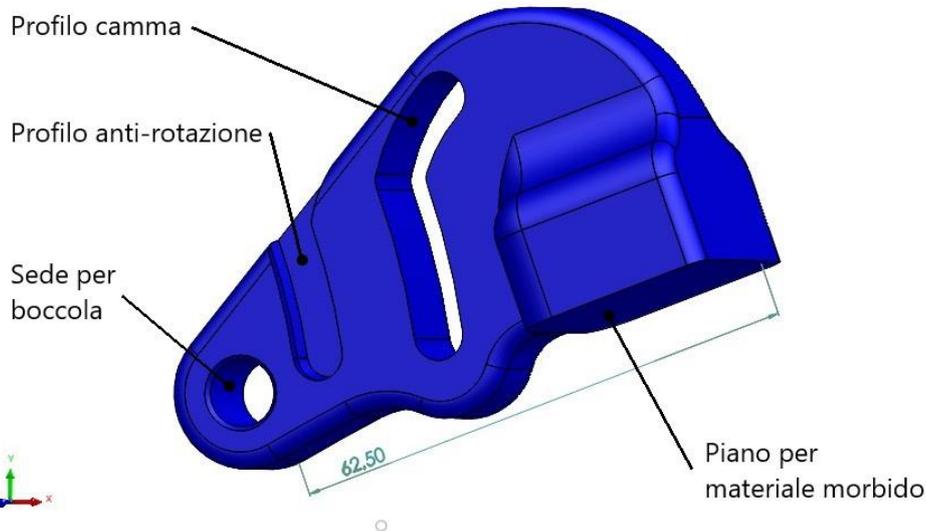


Figura 3.46 Elemento di presa (misure in millimetri)

L'asola passante permette l'accoppiamento con il corpo di trasmissione, eseguito tramite un perno che vi scorre all'interno. Si è scelto questo accoppiamento di forma per svolgere una doppia funzione: trasmettere il moto del corpo di ingresso per effettuare la presa del campione durante la fase di chiusura del meccanismo e al contempo permettere il ritorno alla configurazione iniziale quando si riapre la pinza. Il profilo effettivo dell'asola è ottenuto applicando la sezione del perno, scelto come punteria sul corpo di ingresso, ai punti trovati tramite il metodo di sintesi descritto nel paragrafo 3.2.2 ed eseguendo l'involuppo dei profili ottenuti.

Il profilo cieco serve ad ospitare il secondo perno del membro di ingresso ed ha come scopo quello di ridurre il rischio di rotazione dell'elemento di presa durante la fase di mantenimento della presa, quando sono presenti forze che tendono a riaprire gli elementi. Il profilo è stato ottenuto dalla stessa costruzione di sintesi della camma usato per l'asola ma con un diverso punto di contatto: in questo modo dovendo essere verificati entrambi i punti di contatto a distanza costante, allineati con la cerniera D_0 , alla camma non è permesso di ruotare liberamente attorno alla propria cerniera mentre è nella configurazione di mantenimento della presa.

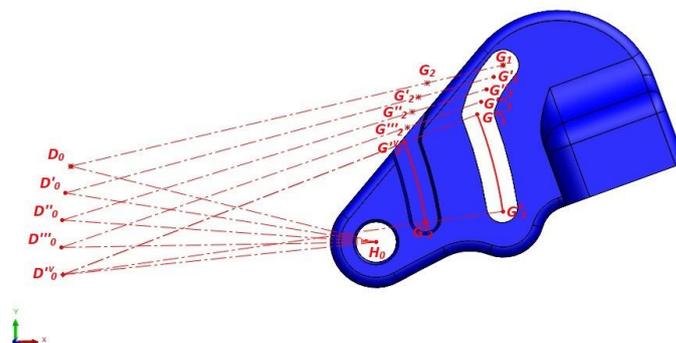


Figura 3.47 Dettaglio costruzione del profilo a camma sull'elemento di presa.

La coppia rotoidale H_0 viene sviluppata tramite un albero passante, inserito nelle opportune sedi ricavate nella scocca, attorno cui ruota il membro di presa per mezzo di una boccola inserita nell'apposito foro.

Seguendo l'ispirazione delle dita dell'uomo, si è deciso di interporre tra l'elemento di presa e il campione uno spesso strato di materiale morbido, o *soft*, con lo scopo di imitare la cedevolezza del polpastrello delle dita umane e permettere alla zona di contatto di assecondare le diverse dimensioni e le superfici irregolari dei campioni. Data l'incertezza sulla posizione di presa del campione si è modellato un ampio piano che ospita l'elemento *soft*. La scelta di questo materiale cedevole viene discussa più avanti. Per la presa dei campioni, in favore della loro leggerezza, si ritiene sufficiente la forza elastica prodotta dalla compressione di tali elementi *soft*.

La sagoma complessiva dell'elemento di presa è stata definita con lo scopo di ospitare tutti gli elementi sopra descritti ed evitare interferenze con gli altri corpi dell'utensile: il profilo piano della parte superiore dell'elemento è stato definito in modo che nella configurazione di completa chiusura non ci sia contatto tra il corpo di trasmissione e quello di presa ad eccezione dell'accoppiamento tramite i profili a camma.

Il posizionamento degli elementi di presa è effettuato tramite la battuta delle sedi per ospitare gli alberi che eseguono la coppia rotoidale e un anello elastico che ne blocca lo scorrimento assiale.

3.3.3 Membri di ingresso

I membri di ingresso svolgono la funzione di trasmettere il moto dalla pinza ai meccanismi dell'utensile. Per fare ciò presentano una zona di appoggio per le dita del gripper Kinova che ne ricopia il profilo, in modo da rendere la superficie di contatto più ampia possibile, e sono incernierate al case tramite delle boccole coassiali alla cerniera attorno cui ruota ciascun dito della pinza, realizzando la coppia rotoidale D_0 .

Nelle Figura 3.48 e 3.49 è rappresentato il corpo di ingresso superiore e vi si possono osservare le varie caratteristiche:

- La superficie di appoggio per le dita della pinza che ne ricopia il profilo;
- Le sedi per le boccole che costituiscono la coppia rotoidale D_0 fissa al telaio e che permettono la rotazione del corpo insieme alle dita del gripper;
- La sede per il perno in cui si incerniera l'elemento porta-lama, che rappresenta la cerniera di collegamento F ;
- Il profilo estruso che ospita i fori per i perni che muovono l'elemento di presa;
- Il foro passante in cui è posizionato l'albero che si accoppia con i fincorsa riportati sul case.

Il profilo estruso che ospita le sedi dei perni di collegamento con gli elementi di presa è stato costruito in modo da infilarsi tra gli elementi di presa stessi e il meccanismo di taglio, senza generare interferenze con gli alberi che fungono da coppie rotoidali e da fulcro, quando viene raggiunta la configurazione di completa chiusura.

Il corpo inferiore risulta essere speculare rispetto al piano xz al corpo superiore appena descritto, salvo per la sede della boccola di collegamento con l'elemento di taglio che risulta spostata lungo il suo asse per assicurare il posizionamento assiale del porta-lama inferiore.

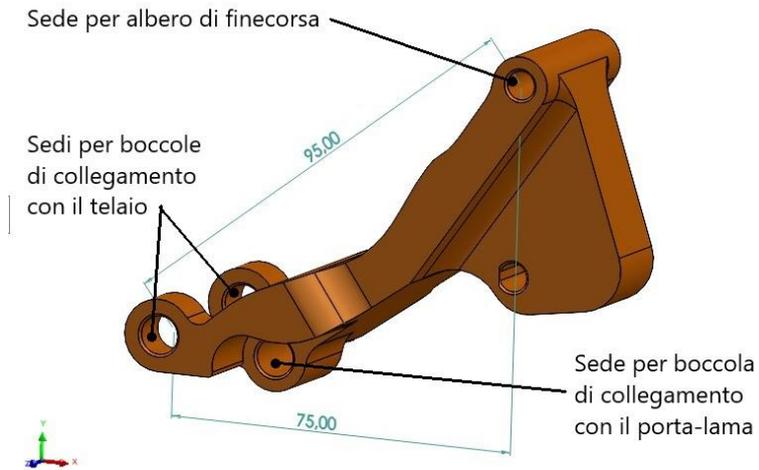


Figura 3.48 Elemento di trasmissione (misure in millimetri)

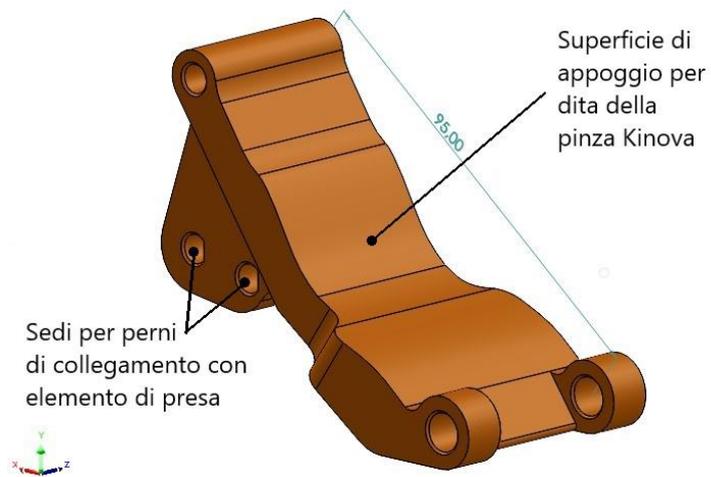


Figura 3.49 Altra vista dell'elemento di trasmissione

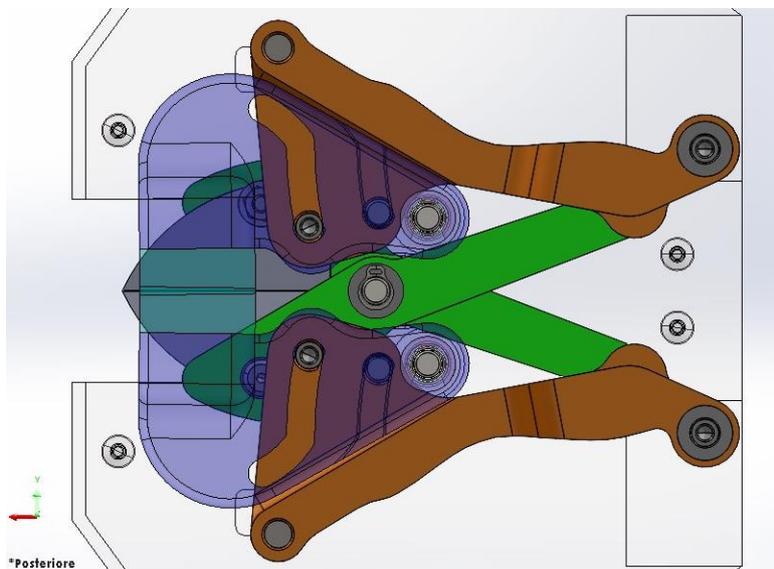


Figura 3.50 Configurazione di completa chiusura del meccanismo.

3.3.4 Molla a flessione

La molla a flessione ha lo scopo di riportare il meccanismo alla posizione iniziale una volta rilasciata la presa della pinza ed inoltre aiuta a mantenere il contatto tra il dito e il membro di trasmissione durante l'azionamento. Si è scelto di utilizzare una molla a flessione trapezoidale di acciaio per molle che poggia sulla parte inferiore del corpo di ingresso e si fletta, scorrendo su di esso, durante la chiusura. La lamina trapezoidale è stata scelta in virtù del fatto che risulti più efficace di quella rettangolare perché fa un migliore utilizzo del materiale e si avvicina all'efficienza della lamina triangolare.

Tale molla è posizionata dietro la sede di riferimento per il polso della pinza e viene fissata tramite due viti, mentre le estremità sono appoggiate alla parte inferiore dei corpi di trasmissione per permetterne lo scorrimento durante la fase di chiusura.

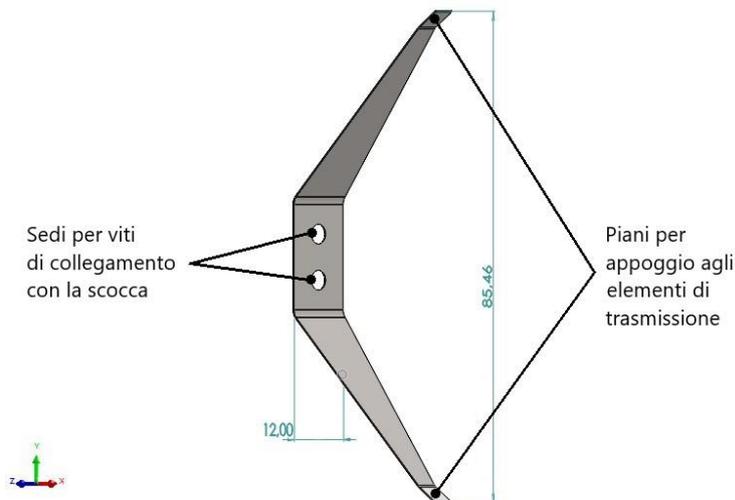


Figura 3.51 Molla a flessione (misure in millimetri)

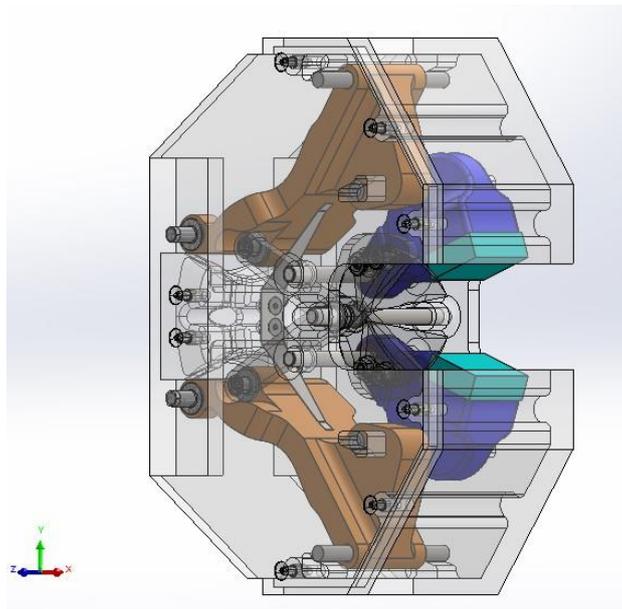


Figura 3.52 Posizione della molla a flessione

Dimensionamento

Il dimensionamento della molla è stato eseguito seguendo due obiettivi: esercitare una forza sufficiente a vincere la forza peso del meccanismo per permetterne il riposizionamento una volta tolta la forza esercitata dalla pinza e al contempo produrre la minore resistenza possibile all'azionamento per sottrarre la minore forza possibile alle funzioni di presa e di taglio.

Per dimensionare la molla a flessione si richiamano le formule tipicamente utilizzate, nel caso di sezione trapezoidale, i cui parametri sono evidenziati in Figura 3.53.

Il fattore di forma α , che descrive il rapporto tra le prestazioni della molla di sezione trapezoidale e quella rettangolare:

$$\alpha = \frac{3}{2} \frac{1}{1-r} \left[3 - \frac{2}{1-r} \left(1 + \frac{r^2}{1-r} \ln r \right) \right] \quad [1]$$

Che può essere semplificata, ammettendo un errore del 4%, nella formula: $\alpha = \frac{3}{2+r}$ [1],

con $r = \frac{b_0'}{b_0}$, dove b_0 larghezza della base della lamina [m], b_0' larghezza all'estremità [m];

La freccia massima, ovvero la deformazione massima ammessa dalla lamina:

$$f = \alpha \frac{Fl^3}{3EI} \quad [m]$$

con F forza esercitata all'estremità [N], l lunghezza della lamina [m], E modulo di Young del materiale [Pa], $I = \frac{b_0 h^3}{12}$ momento di inerzia della lamina [m⁴] e h rappresenta lo spessore della lamina [m];

La rigidità:

$$k = \frac{3EI}{\alpha l^3} \quad [N/m]$$

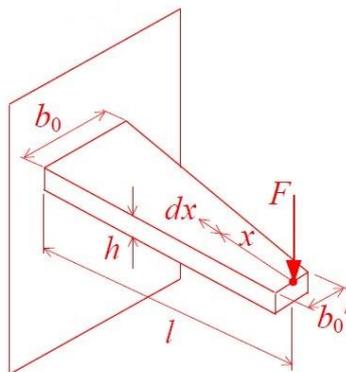


Figura 3.53 Parametri della molla a flessione

Dati gli spazi disponibili e il movimento del meccanismo si pongono:

$$b_0 = 12 \text{ mm}, \quad l = 40 \text{ mm}, \quad f = 20 \text{ mm}$$

Mentre per la forza esercitata in estremità si pone la forza peso del membro di ingresso:

$$F = F_{\text{peso}} = m g = 0,125 \times 9.8 = 1.225 \text{ N}$$

Imponiamo come unica incognita lo spessore h della lamina, effettuandone la valutazione per diversi rapporti r tra le larghezze alla base e all'estremità, i cui valori sono stati fatti variare tra:

$$r = [0.3, 0.5, 0.7]$$

Per ottenere lo spessore h si inverte la formula della freccia massima per ricavare il momento di inerzia da cui ricavare lo spessore, la formula finale risulta essere:

$$h = \sqrt[3]{\frac{4 \alpha F l^3}{E b_0 f}}$$

Facendo variare r si ottengono i risultati riportati nella Tabella 3.6.

TABELLA 3.6: Spessori lamina in funzione di r

r	h [mm]
0.3	0.20
0.5	0.20
0.7	0.19

Si sceglie porre $h = 0.2$ mm, da cui si può calcolare la rigidezza e la conseguente forza resistente esercitata dalla molla, raccolte nella Tabella 3.7.

TABELLA 3.7: Rigidezze e forze resistenze in funzione di r

r	k [N/m]	F_{res} [N]
0.3	60.37	1.21
0.5	65.62	1.32
0.7	70.87	1.42

Al fine di ottenere la minore resistenza possibile si decide di utilizzare un rapporto $r = 0.3$, ottenendo una larghezza della lamina in estremità di $b'_0 = 4$ mm.

3.3.5 Porta-lama

Gli elementi porta-lama rappresentano le leve del meccanismo di taglio su cui vengono assicurate le lame, per cui ne presentano la sede per il posizionamento e i fori per le viti di fissaggio. Sono poi presenti le due coppie rotoidali di cui la prima, che rappresenta la cerniera F e collega il porta-lama al membro di ingresso, è implementata tramite un perno mentre la seconda, centrale, ospita la boccola in cui passa l'albero che esegue il fulcro P del meccanismo taglio. Il posizionamento assiale dei porta-lama avviene tramite due anelli elastici posti sull'albero che funge da fulcro, in modo da esercitare una forza che garantisce il contatto tra le lame.

La sede delle lame viene eseguita ad hoc in funzione della lama da posizionare mentre il fissaggio viene eseguito mediante due viti in modo da bloccarne la rotazione.

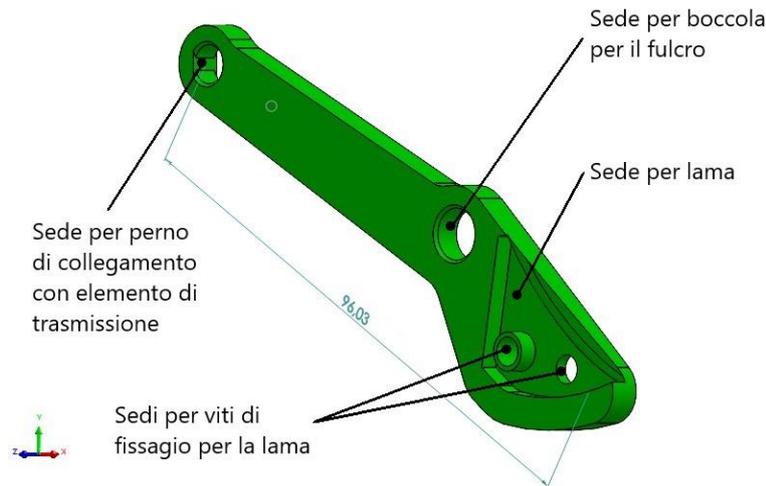


Figura 3.54 Elemento porta-lama.

3.3.6 Elementi commerciali

Al fine di ridurre i costi del prototipo si è cercato di utilizzare elementi commerciali quando possibile.

Minuteria meccanica

Per i componenti meccanici sono stati individuati i seguenti elementi:

- Per le boccole utilizzate nelle coppie rotoidali si sono scelte delle boccole flangiate in resina acetlica che possono essere utilizzate a secco, con diametro interno di 6 mm e spessore di 1 mm, e che accoppiate ai perni in acciaio presentano un coefficiente di attrito di 0.32;
- Come perni da accoppiare alle boccole si è optato per dei grani di riferimento da 6 mm di diametro per 20 mm di lunghezza, in acciaio;
- Le viti di fissaggio sono a testa piatta M3 di due lunghezze, da 15 mm per la chiusura del coperchio della scocca e 2 viti da 6 mm per fissare la molla a flessione;
- Per assicurare la tenuta delle viti si è deciso di utilizzare degli inserti automaschianti da applicare nei fori predisposti sul case, che presentano una filettatura a passo fine sull'esterno adatta a materiali di diverse durezza;
- Alberi da 6 mm di diametro sono utilizzati come fulcro del meccanismo di taglio, come cerniera per gli elementi di presa e come guide dei corpi di trasmissione, e saranno poi lavorati per ricavarne le necessarie sedi per gli anelli elastici che bloccano assialmente i diversi elementi;
- Gli anelli elastici sono stati scelti anelli esterni di tipo C da 6 mm di diametro nominale.
- Due viti a testa bassa M4, accoppiate con due rondelle e due dadi, sono utilizzate per fissare le lame ai porta-lama.

Lame

Un discorso particolare merita la scelta delle lame: volendo scegliere delle lame commerciali utilizzate per cesoie ne esistono di tre tipologie:

- A lama passante o a by-pass che presentano un solo elemento tagliente che si chiude su una contro-lama piatta fino a sovrapporsi per un piccolo tratto, produce tagli netti e puliti su rami verdi e di piccolo diametro (inferiori a 1.5 cm) perché se incontrano una resistenza eccessiva la lama e la contro-lama tendono ad allontanarsi e vanno a sforzare sul fulcro;

- Le lame a battente sono simili alle prime ma la lama è affilata da entrambi i lati e va a battere sulla contro-lama a battuta, permettendo di applicare più forza sulle forbici e di ottenere un taglio dritto e preciso, sono adatte per rami legnosi o secchi fino a 2.5 cm, mentre su rami verdi rischiano di rovinare la corteccia;
- Cesoia a doppia lama che appunto presenta due elementi taglienti che vanno a battere insieme, rendendole adatte ad ogni tipologia di rami e ottenendo sempre tagli precisi e puliti su rami di dimensioni fino a 3 cm, tuttavia la continua battuta tra le due lame le fanno perdere velocemente l'affilatura.

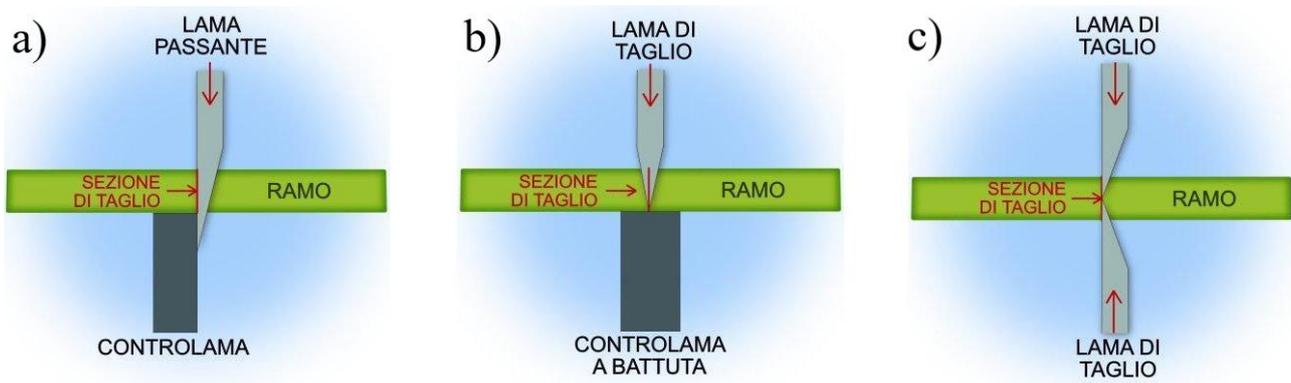


Figura 3.55 Tipologie di lama: (a) a by-pass, (b) a battente, (c) a doppia lama.

Per la scelta delle lame da utilizzare nel prototipo si è deciso di provare una lama per ciascuna tipologia, così da poter sperimentarne l'efficacia tramite la sperimentazione e verificarne personalmente le dimensioni per modellare il porta-lama ad hoc. A causa delle dimensioni dell'utensile non è possibile utilizzare lame di lunghezza del tagliente superiore a 55 mm. Le lame scelte sono riassunte nella Tabella 3.8.

Tabella 3.8: Lame

Tipologia lama	Modello Cesoia	Figura di riferimento
A battente	Lowe 5 [37]	3.56
By-pass	Verdemax 4187 [38]	3.57
A doppia lama	Archman 19 [39]	3.58



Figura 3.56 Cesoie a battente Lowe 5



Figura 3.57 Cesoie a by-pass Verdemax 4187



Figura 3.58 Cesoie a doppia lama Archman 19

Per la tipologia a by-pass ci si è diretti verso un modello “a lama corta”, che possiede una lunghezza del tagliente di 40 mm, poiché le normali cesoie a by-pass hanno lame di lunghezza eccessiva.

Un accorgimento particolare è stato rivolto alla tipologia a doppia lama, dove si è deciso di adoperare la stessa lama, superiore o inferiore, di due coppie differenti per ottenere una lama doppia che possa scorrere l’una sull’altra, per evitare problemi legati alla necessità di una chiusura precisa del meccanismo di taglio per far sì che le due lame vadano a chiudersi battendo insieme e rallentare la perdita di affilatura, a scapito della precisione del taglio.

Per ciascuna tipologia di lama è necessario predisporre l’elemento porta-lama in modo che possa ospitare la lama definita e per fissare i due elementi si eseguono lavorazioni sulle lame per ottenere un accoppiamento che renda i due elementi solidali, quali fori per le viti e adattamento delle forme e dimensioni. Un esempio è riportato nella Figura 3.59 del porta-lama che ospita la lama doppia Archman, la quale è stata tagliata per ridurre l’ingombro e forata per ospitare una seconda vite che ne blocchi la possibile rotazione.

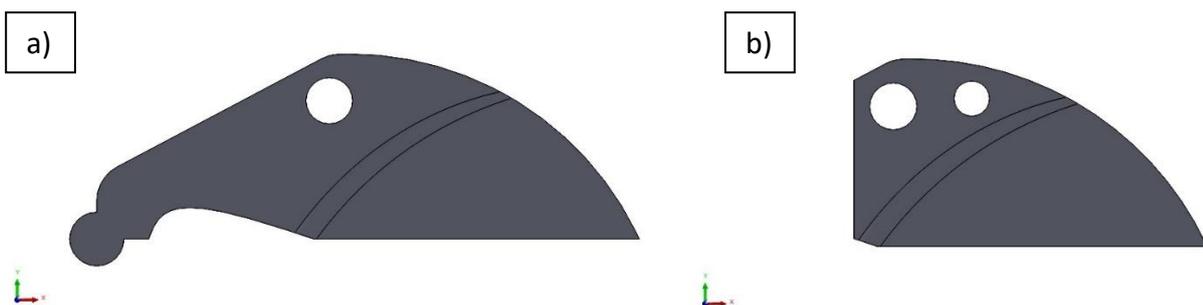


Figura 3.59 Modelli CAD della lama doppia Archman 19: (a) Nuova, (b) Modificata per posizionarla nel porta-lama.

Materiale soft

Il materiale soft da applicare sugli elementi di presa è stato pensato per adattarsi alle diverse dimensioni e forme dei campioni da afferrare. Per assicurare la presa il moto dei corpi di presa è stato progettato in modo che le due parti morbide vadano a contatto e si comprimano di un paio di millimetri.

Per il materiale soft di questo prototipo si è optato per materiali di facile reperimento quali gomma piuma e spugne. Per facilitare il cambio del materiale e allo stesso tempo garantire un fissaggio solido si è deciso di

adoperare un adesivo di velcro da posizionare sulla superficie piana degli elementi di presa e sull'elemento soft da applicare. Le dimensioni degli elementi morbidi sono di 28x25x10 mm.

3.3.7 Montaggio

Per il montaggio dell'utensile si inizia assemblando i sottoassiemi degli elementi principali del meccanismo:

- Sulla parte principale del case si inseriscono i perni e i grani filettati, mentre sul coperchio sono richiesti solo i perni. I perni presentano una battuta sulla scocca per il posizionamento assiale e vengono fissati con interferenza all'interno delle sedi.

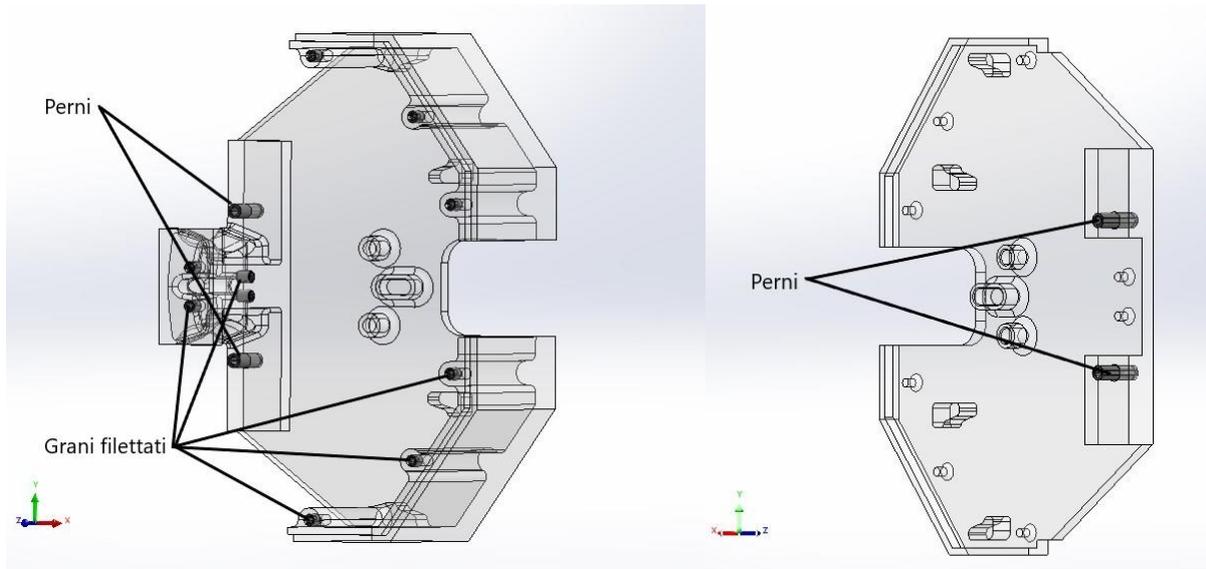


Figura 3.60 Preassemblaggio della scocca.

- Sugli elementi di ingresso si inseriscono le boccole per l'accoppiamento con la scocca e con i portalamina e i perni per azionare gli elementi di presa. Tutti gli elementi sono accoppiati mediante interferenza.

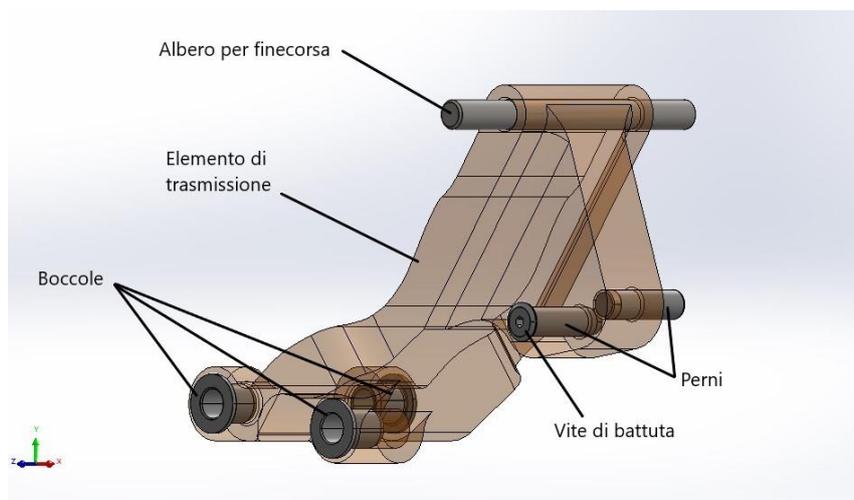


Figura 3.61 Preassemblaggio del corpo di trasmissione

- I corpi di presa richiedono solo il fissaggio con interferenza della boccia nel foro previsto e l'elemento soft tramite il velcro predisposto sulla superficie.

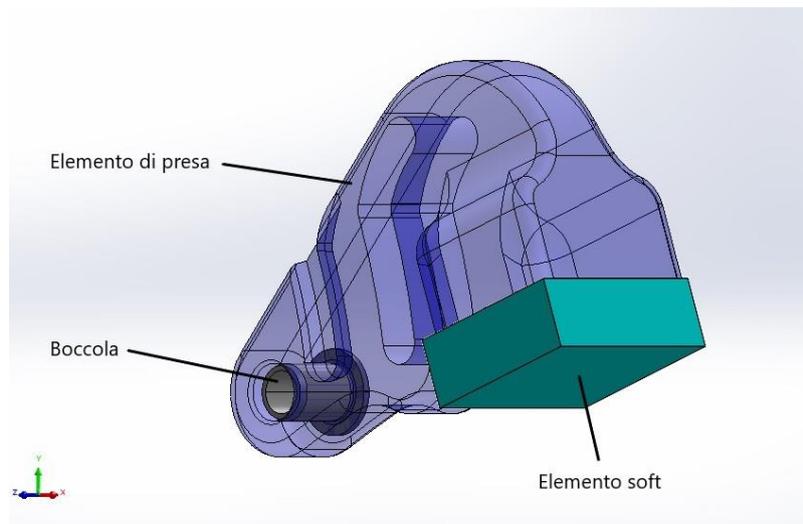


Figura 3.62 Preassemblaggio dell'elemento di presa.

- Sui porta-lama si fissano le lame mediante le viti, con le relative rondelle, e dadi, mentre il grano di collegamento col corpo di ingresso e la boccia per il fulcro sono inseriti mediante interferenza nelle apposite sedi.

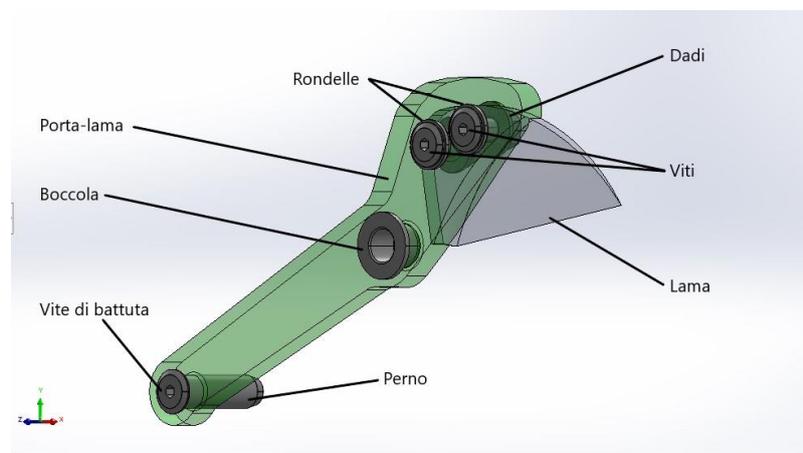


Figura 3.63 Preassemblaggio del porta-lama.

Una volta preassemblati i componenti si effettua il montaggio vero e proprio:

- Sul case principale si inseriscono gli alberi delle camme (Figura 3.64a);
- Si inseriscono le camme di presa nei rispettivi alberi e si assicurano con gli anelli elastici (Figura 3.64b);
- Si fissa la molla a flessione tramite le apposite viti (Figura 3.64c);
- Si posizionano i membri di ingresso nelle sedi delle cerniere facendo attenzione ad inserire l'accoppiamento con il profilo della camma (Figura 3.64d);

- Si inserisce il primo anello elastico nell'albero che fa da fulcro al meccanismo di taglio e vi si posiziona il porta-lama superiore (Figura 3.64e);
- Si accoppia il porta-lama inferiore al relativo corpo di ingresso (Figura 3.64e);
- Si posiziona il secondo porta lama sul corpo di ingresso e sull'albero, dove si assicura con un secondo anello elastico (Figura 3.64e);
- Si chiude l'utensile con il coperchio del case e lo si assicura con le viti di chiusura (Figura 3.64f).

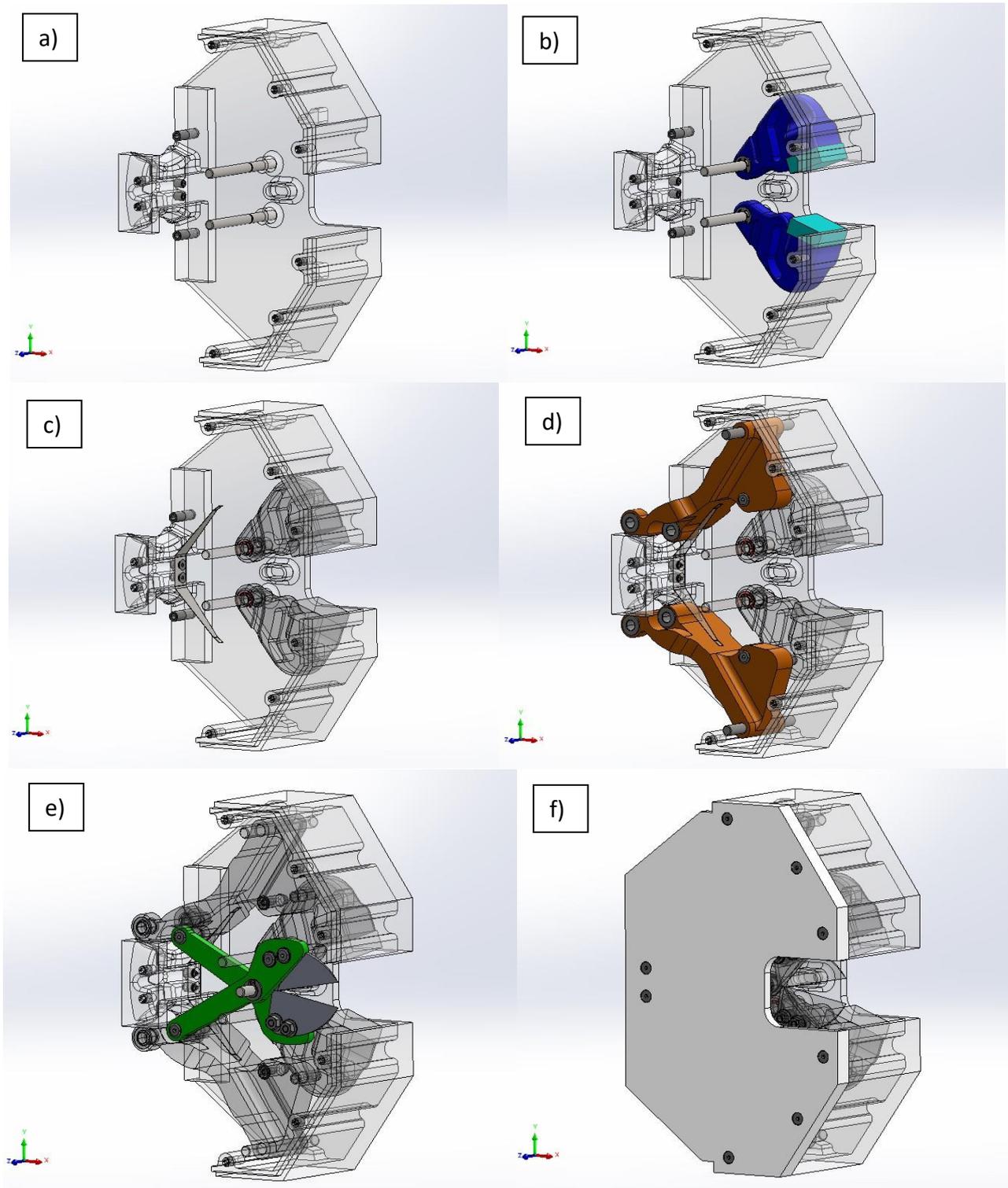


Figura 3.64 Processo di assemblaggio dell'utensile

3.3.8 Funzionamento

L'utensile proposto svolge le funzioni richieste sfruttando come unico input il moto e la coppia prodotti dalla pinza Kinova KG-2. Nella Figura 3.65 viene rappresentato l'utensile nella posizione di riposo. Azionando la pinza si porta in rotazione il membro di ingresso che trasmette il moto ai meccanismi di presa e di taglio. Raggiunta l'inclinazione del corpo di trasmissione di 26° , quindi a seguito di una rotazione di circa metà del moto disponibile, si chiudono gli elementi di presa, come mostrato in Figura 3.67. Da questo punto i corpi di presa restano nella posizione raggiunta mentre il moto dei membri di trasmissione portano a chiusura le lame (Figura 3.69). Una volta ottenuto il campione è possibile riaprire parzialmente le lame e trasportarlo fino alla zona di deposito che sarà predisposta sul veicolo Agri.q, dove basta riaprire la pinza Kinova affinché il meccanismo si apra e lasci cadere il campione. Nelle figure di dettaglio del campione riportate sulla destra, tra le lame si sono sovrapposte le sagome di due diverse dimensioni di campioni: in trasparenza un campione da 8 mm mentre non in trasparenza un campione da 3 mm.

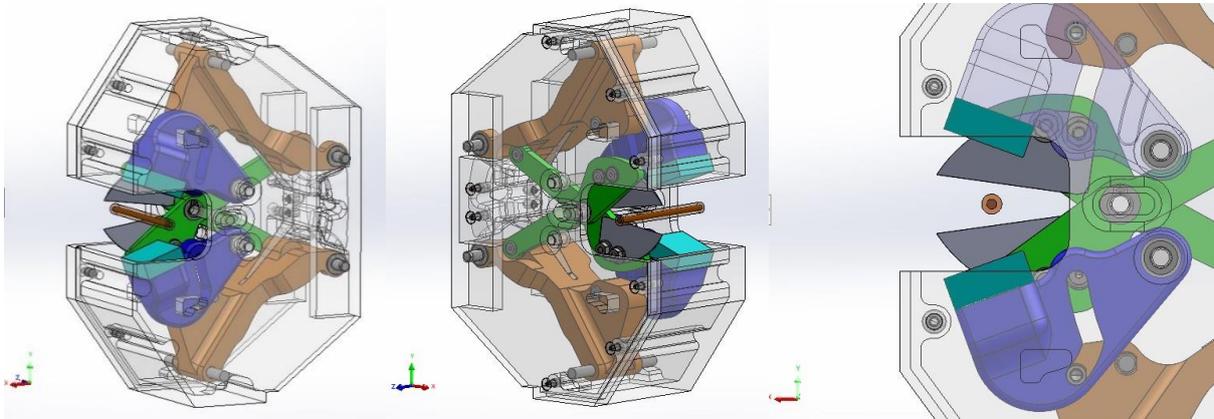


Figura 3.65 Configurazione di riposo in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione.

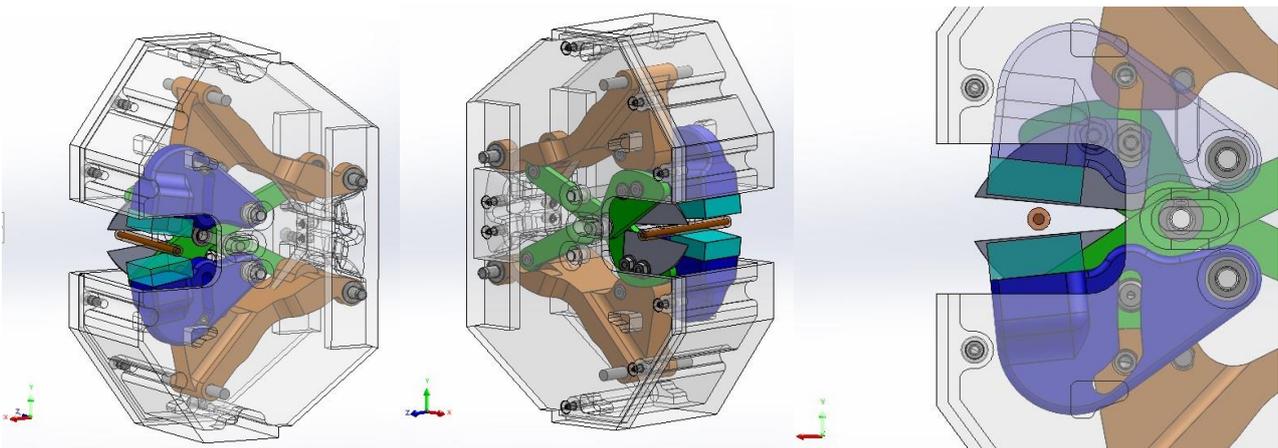


Figura 3.66 Inizio del moto in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione.

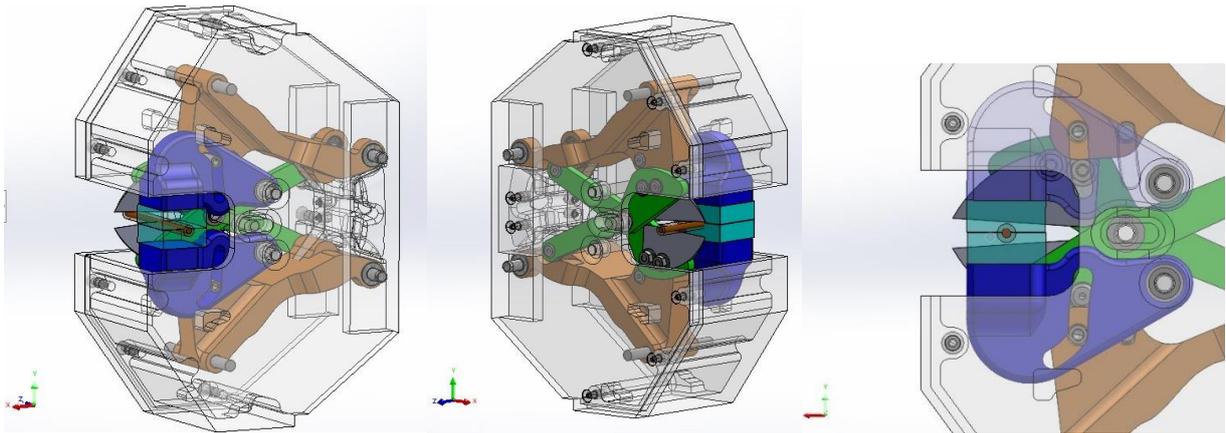


Figura 3.67 Chiusura elemento di presa in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione.

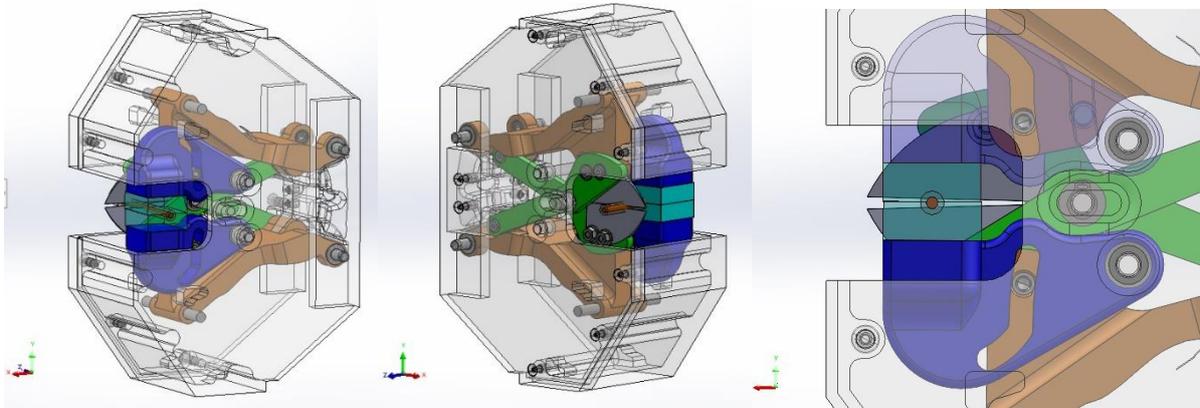


Figura 3.68 Termine della chiusura in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione.

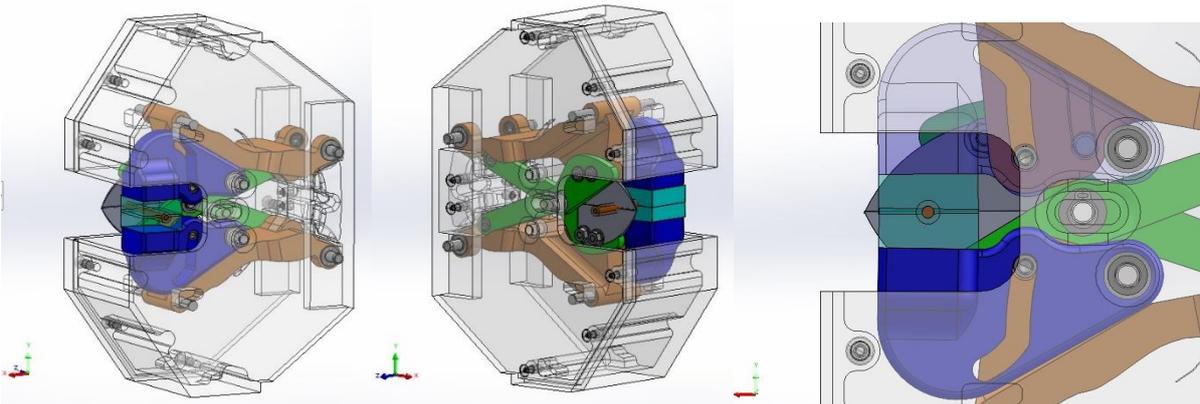


Figura 3.69 Configurazione di chiusura in tre viste, da sinistra: lato elemento di presa, lato meccanismo di taglio, dettaglio del campione

L'avvicinamento della pinza Kinova avviene lungo l'asse x dell'utensile, ponendo le dita in verticale nella direzione y e il rigonfiamento del polso rivolto verso la parte che ospita gli elementi di presa.

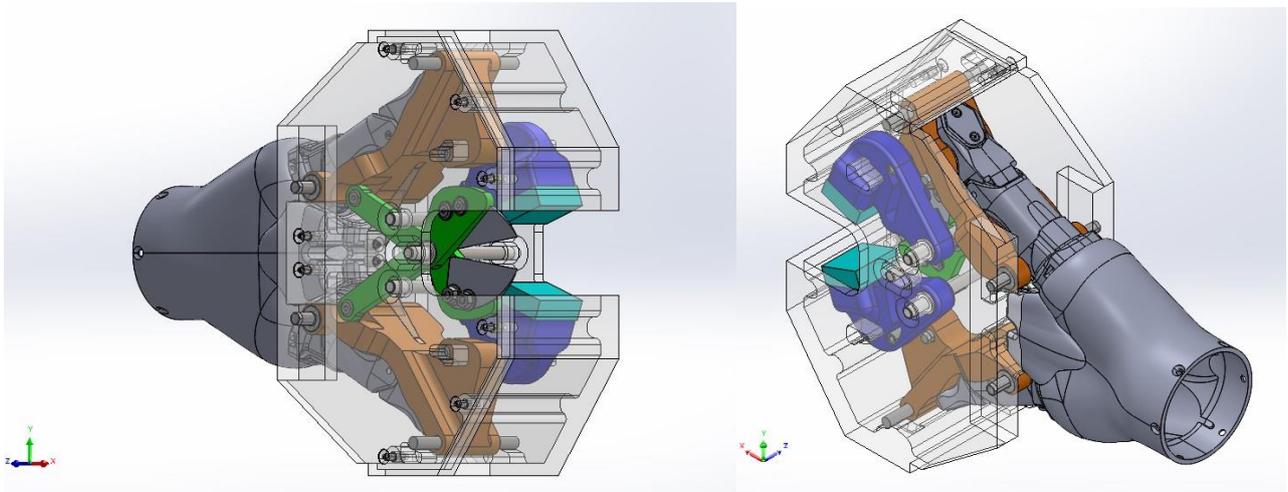


Figura 3.70 Viste del posizionamento dell'utensile rispetto alla pinza Kinova.

4. Sensorizzazione

Una delle principali spinte all'agricoltura di precisione è stata data dall'utilizzo di sensori che permettano di raccogliere informazioni dalle colture e dal terreno: al fine di aumentare le capacità dell'utensile si è deciso utilizzare diversi sensori che vadano a raccogliere importanti dati sul campo.

Di primaria importanza può essere un sensore di visione che permetta di osservare la zona di lavoro dell'utensile ed individuare i campioni da raccogliere. In un'ottica di automatizzazione del processo di raccolta questo sensore può, tramite un algoritmo di Intelligenza Artificiale, permettere il riconoscimento delle colture, la posizione campioni o la presenza di agenti patogeni, infestanti o di parassiti. Per questo compito potrebbe essere sufficiente una camera RGB (*Red Green Blue*). A causa della posizione dei meccanismi di taglio e di presa all'interno della scocca dell'utensile potrebbe essere comodo avere due sensori di visione posizionati ai due lati della scocca in prossimità dell'apertura presente per l'interazione con i campioni e ciò potrebbe permettere, tramite appositi algoritmi, di ottenere anche una visione tridimensionale della zona intorno all'utensile. Potrebbe essere utile utilizzare dispositivi con certificazione della protezione di ingresso (*Ingress Protection, IP*), come le IP65, IP66 o simili, che garantiscano la resistenza a vari livelli di umidità e temperatura e alla polvere fino a certe dimensioni delle particelle, per rendere più robusto il sistema sotto le particolari condizioni di lavoro sul campo. Se si volessero acquisire ulteriori dati tramite la visione esistono altri sensori con maggiori capacità della camera RGB proposta, quali camere multispettrali o termiche, ma tali dispositivi richiedono un investimento economico molto più importante che per l'utilizzo proposto non si ritiene giustificato.

Altri sensori utili per ottenere dati interessanti dall'utensile potrebbero essere un sensore di temperatura e umidità, che con un basso costo permettono di conoscere le condizioni ambientali in cui vengono raccolti i campioni, e un sensore di pressione o di forza da posizionare sulla superficie di appoggio delle dita della pinza Kinova sull'elemento di trasmissione per misurare la forza di chiusura esercitata nella raccolta del campione.

Interessante sarebbe l'utilizzo di una scheda programmabile che raccolga i dati dai sensori e tramite un modulo Wi-Fi possa inviarli in tempo reale al laboratorio per permettere il comando preciso dell'utensile e tenerne sotto controllo l'efficacia. Per alimentare la scheda e i sensori sarà infine necessaria una batteria che si può pensare di ricaricare quando l'utensile non viene utilizzato e resta all'interno del magazzino utensile.

Potrebbe essere utile anche un sensore di luminosità a basso consumo, o un interruttore meccanico, che opportunamente posizionato possa attivare l'acquisizione degli altri sensori quando l'utensile viene afferrato dal magazzino utensili e li "spenga" quando viene riposto, in modo da ottimizzare il consumo e la ricarica della batteria.

5. Conclusione

Nell'ottica dell'agricoltura di precisione si è deciso di dotare il veicolo Agri.Q di un utensile che gli permettesse di raccogliere campioni di colture. Ispirandosi alle normali azioni svolte dall'uomo durante le operazioni di raccolta e potatura si è sviluppato lo schema funzionale dell'utensile utilizzando degli elementi di presa mossi tramite un profilo a camma e un meccanismo a leva che riprenda quello utilizzato per le forbici. Il meccanismo così ottenuto è stato poi vestito con lo scopo di ottenere un primo prototipo a basso costo da realizzare tramite fabbricazione additiva per verificarne l'effettiva funzionalità. Il prototipo proposto permette di quasi quadruplicare la coppia di chiusura della pinza motrice montata sul rover, rispettando i vincoli di peso e ingombro dati dal braccio robotico, concentrandosi il più possibile nell'intorno del gripper e raggiungendo un peso stimato tramite il software CAD SolidWorks di poco più di 1 kg. L'ingombro complessivo dell'utensile è di 145 x 210 x 80 mm.

Il lavoro ha prodotto un utensile per la raccolta di campioni di colture che possa essere utilizzato dal braccio robotico Kinova Jaco 2 senza la necessità di cambiare la pinza già presente. L'utensile permette di sfruttare tutte le caratteristiche di destrezza e mobilità del veicolo e del braccio robotico per verificare la salute e la crescita delle viti nell'ottica dell'agricoltura di precisione. Uno dei punti di forza dell'utensile sarà quello di poter essere equipaggiato e utilizzato dal braccio robotico tramite la pinza Kinova quando necessario ed essere riposto nel magazzino utensili quando non necessario. Inoltre l'utensile permette di svolgere, con un solo comando di input, la duplice funzione di afferrare e separare il campione dalla pianta, mantenendo la presa fino al deposito.

Bibliografia

- [1] Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, <https://unric.org/it/agenda-2030/>
- [2] R. K. Singh, R. Berkvens and M. Weyn, "AgriFusion: An Architecture for IoT and Emerging Technologies Based on a Precision Agriculture Survey," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 136253-136283, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116814.
- [3] Luis G. Santesteban, Precision viticulture and advanced analytics. A short review, *Food Chemistry*, Volume 279, 2019, Pages 58-62, ISSN 0308-8146, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.11.140>.
- [4] Fruit Robot, <https://www.raussendorf.de/en/fruit-robot.html>
- [5] Greenbot, <https://precisionmakers.com/greenbot>
- [6] Schor, N.; Bechar, A.; Ignat, T.; Dombrovsky, A.; Elad, Y.; Berman, S. Robotic Disease Detection in Greenhouses: Combined Detection of Powdery Mildew and Tomato SpottedWilt Virus. *IEEE Robot. Autom. Lett.* 2016, 1, 354–360.
- [7] Jorgensen, R.; Sorensen, C.; Maagaard, J.; Havn, I.; Jensen, K.; Sogaard, H.; Sorensen, L. HortiBot: A System Design of a Robotic Tool Carrier for High-tech Plant Nursing. *CIGR J. Sci. Res. Dev.* 2006, IX, 1–13.
- [8] Naio Technologies, <https://www.naio-technologies.com/en/home/>
- [9] D. Sepúlveda, R. Fernández, E. Navas, M. Armada and P. González-De-Santos, "Robotic Aubergine Harvesting Using Dual-Arm Manipulation," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121889-121904, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3006919.
- [10] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow and M. N. Hindia, "An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3758-3773, Oct. 2018, doi: 10.1109/JIOT.2018.2844296.
- [11] Jiali Zha 2020 *J. Phys.: Conf. Ser.* 1693 012058
- [12] Quaglia G., Visconte C., Carbonari L., Botta A., Cavallone P. (2020) Agri.q: A Sustainable Rover for Precision Agriculture. In: Visa I., Duta A. (eds) *Solar Energy Conversion in Communities*. Springer Proceedings in Energy. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55757-7_6
- [13] Kinova Jeco2, Specifiche tecniche: https://www.kinovarobotics.com/sites/default/files/ULWS-RA-JAC-7DS-SP-INT-EN%20201804-1.2%20%28KINOVA%E2%84%A2%20Ultra%20lightweight%20robotic%20arm%207%20DOF%20Spherical%20Specifications%29_0.pdf
- [14] Quaglia, G.; Visconte, C.; Scimmi, L.S.; Melchiorre, M.; Cavallone, P.; Pastorelli, S. Design of a UGV Powered by Solar Energy for Precision Agriculture. *Robotics* 2020, 9, 13. <https://doi.org/10.3390/robotics9010013>
- [15] Shintake, J., Cacucciolo, V., Floreano, D., Shea, H., *Adv. Mater.* 2018, 30, 1707035. <https://doi.org/10.1002/adma.201707035>
- [16] Pfaff, O., Simeonov, S., Cirovic, I., and Stano, P. (2011). "Application of Fin Ray effect approach for production process automation," in *Annals of DAAAM & Proceedings (Vienna: DAAAM International)*, 1247–1249.
- [17] Crooks W, Rozen-Levy S, Trimmer B, Rogers C, Messner W. Passive gripper inspired by Manduca sexta and the Fin Ray® Effect. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. July 2017. doi:10.1177/1729881417721155

- [18] Luo, C. and Zhang, W. (2019), "A flexible self-adaptive underactuated hand with series passive joints", *Industrial Robot*, Vol. 45 No. 4, pp. 516-525. <https://doi.org/10.1108/IR-01-2018-0015>
- [19] Yale OpenHand Proect, <https://www.eng.yale.edu/grablab/openhand/>
- [20] A. J. Spiers, B. Calli, and A. M. Dollar, "Variable-Friction Finger Surfaces to Enable Within-Hand Manipulation via Gripping and Sliding," *IEEE Robotics and Automation Letters* (with IROS option), 2018
- [21] R.R. Ma, A. Spiers, and A.M. Dollar, "M2 Gripper: Extending the Dexterity of a Simple, Underactuated Gripper," *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robotics (ReMAR)*.
- [22] Teeple CB, Koutros TN, Graule MA, Wood RJ. Multi-segment soft robotic fingers enable robust precision grasping. *The International Journal of Robotics Research*. 2020;39(14):1647-1667. doi:10.1177/0278364920910465
- [23] Shigemune, H.; Sugano, S.; Nishitani, J.; Yamauchi, M.; Hosoya, N.; Hashimoto, S.; Maeda, S. Dielectric Elastomer Actuators with Carbon Nanotube Electrodes Painted with a Soft Brush. *Actuators* 2018, 7, 51. <https://doi.org/10.3390/act7030051>
- [24] Almomani, A.; Hong, W.; Hong, W.; Montazami, R. Influence of Temperature on the Electromechanical Properties of Ionic Liquid-Doped Ionic Polymer-Metal Composite Actuators. *Polymers* 2017, 9, 358. <https://doi.org/10.3390/polym9080358>
- [25] Marc Behl, Andreas Lendlein, Shape-memory polymers, *Materials Today*, Volume 10, Issue 4, 2007, Pages 20-28, ISSN 1369-7021, [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70047-0](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70047-0).
- [26] A. Milojevic, S. Linß, Z. Cojbasic, H. Handroos, L. Luostarinen and L. Zentner, "Adaptive Soft Robotic Gripper Based on Shape Morphing Compliant System," 2018 International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots (ReMAR), 2018, pp. 1-10, doi: 10.1109/REMAR.2018.8449831.
- [27] Behl, M., Kratz, K., Zotzmann, J., Nöchel, U. and Lendlein, A. (2013), Reversible Bidirectional Shape-Memory Polymers. *Adv. Mater.*, 25: 4466-4469. <https://doi.org/10.1002/adma.201300880>
- [28] Eric Brown, Nicholas Rodenberg, John Amend, Annan Mozeika, Erik Steltz, Mitchell R. Zakin, Hod Lipson, Heinrich M. Jaeger, "Universal robotic gripper based on the jamming of granular material", *Proceedings of the National Academy of Sciences* Nov 2010, 107 (44) 18809-18814; DOI: 10.1073/pnas.1003250107
- [29] H. Yufei et al., "A variable stiffness soft robotic gripper with low-melting-point alloy," 2017 36th Chinese Control Conference (CCC), 2017, pp. 6781-6786, doi: 10.23919/ChiCC.2017.8028427.
- [30] Wang, Wei & Ahn, Sung-Hoon. (2017). Shape Memory Alloy-Based Soft Gripper with Variable Stiffness for Compliant and Effective Grasping. *Soft Robotics*. 4. 10.1089/soro.2016.0081.
- [31] G. Hwang, J. Park, D. S. D. Cortes, K. Hyeon and K. -U. Kyung, "Electroadhesion-Based High-Payload Soft Gripper With Mechanically Strengthened Structure," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 1, pp. 642-651, Jan. 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3053887.
- [32] S. Song, C. Majidi and M. Sitti, "GeckoGripper: A soft, inflatable robotic gripper using gecko-inspired elastomer micro-fiber adhesives," 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014, pp. 4624-4629, doi: 10.1109/IROS.2014.6943218.
- [33] Pinza Kinova KG-2, Guida all'utente: https://www.kinovarobotics.com/sites/default/files/AS-GR-KG2-KG3-UG-INT-EN%20201804-1.2%20%28KINOVA%E2%84%A2%20Gripper%20Series%20user%20guide%29_1.pdf

- [34] Pinza Kinova KG-2, Specifiche tecniche: <https://www.kinovarobotics.com/sites/default/files/AS-GR-KG2-KG3-SP-INT-EN%20201804-1.2%20%28KINOVA%E2%84%A2%20Gripper%20series%20KG-2%20KG-3%20Specifications%29.pdf>
- [35] Magnani, Pier Luigi, and Guido Ruggieri. Meccanismi per Macchine Automatiche. Torino: UTET, 1986. Print. Collezione Di Ingegneria Meccanica.
- [36] GeoGebra, Sito: <https://www.geogebra.org/>
- [37] Cesioie Lowe 5, Sito: <https://www.original-loewe.de/it/cesoie/cesoie-per-orticoltura/caratteristiche/scissor/Scissors/show/kleine-amboss-schere.html>
- [38] Cesioie Verdemax 4187, Sito: <https://www.verdemax.it/it/?id=prodotti&category=123&product=163#prettyPhoto>
- [39] Cesioie Archman 19, Sito: <https://www.archman.it/gamma-professionale/forbici-potatura/forbice-a-doppio-taglio-a-lame-intercambiabili-articolo-19>

Appendice A: Sintesi analitica dei profili della camma

La sintesi di un sistema a camma è la definizione delle caratteristiche geometriche di un meccanismo, formato da un movente con velocità angolare costante e un cedente che descrive la legge del moto desiderata. Data la velocità costante del movente si ha una corrispondenza diretta tra il tempo necessario a compiere un certo arco e l'angolo che descrive l'arco stesso:

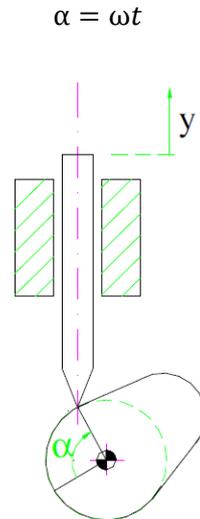


Figura A.1 Rappresentazione di una camma

Per questo motivo possiamo esprimere la legge del moto y del cedente nei seguenti modi:

Grandezze geometriche, in funzione dell'angolo α

$y(\alpha)$ alzata in funzione dell'angolo del movente [m]

$\frac{dy}{d\alpha} = y'$ velocità geometrica [m/rad]

$\frac{d^2y}{d\alpha^2} = y''$ accelerazione geometrica [m/rad²]

Grandezze adimensionali o di forma

$\tau = \frac{t}{t_s} = \frac{\alpha}{\alpha_s}$ tempo adimensionale o angolo adimensionale [$0 < \tau < 1$]

$Y = \frac{y}{h}$ alzata adimensionale (forma del diagramma delle alzate)

$\frac{dY}{d\tau} = Y'$ velocità adimensionale (forma del diagramma di velocità)

$\frac{d^2Y}{d\tau^2} = Y''$ accelerazione adimensionale (forma del diagramma delle accelerazioni)

Per il processo di sintesi devono quindi essere definite le specifiche fondamentali per il progetto:

- Alzata, h , cioè il movimento massimo raggiunto dalla punteria;
- Tempo di salita, t_s , cioè il tempo (o angolo) in cui la punteria compie il moto di alzata;
- Tempo di arresto, t_i , ovvero il tempo in cui la punteria resta all'alzata massima;

- Tempo di discesa, t_d , cioè il tempo in cui la punteria ritorna nella posizione di riposo;
- Tempo di riposo, t_r , ovvero il tempo in cui la punteria resta nella posizione di riposo;

Tali parametri sono arbitrari e vanno a definire la legge del moto.

Da questi possiamo definire:

- $T = t_s + t_i + t_d + t_r$; Periodo
 - $\omega = \frac{2\pi}{T}$; Velocità angolare della camma
 - $\alpha_s = \omega t_s$;
 - $\alpha_i = \omega t_i$;
 - $\alpha_d = \omega t_d$;
 - $\alpha_r = \omega t_r$;
- } Angoli descritti per ogni fase

Andando a variare le leggi nei tratti di salita e discesa è quindi possibile variare la legge del moto.

La sintesi analitica si esegue a partire dal profilo primitivo, generato considerando un raggio della rotella del cedente $R_r = 0$. All'istante generico t la punteria si sarà spostata di un angolo α , quindi dal punto A al punto C nella Figura A.1. Vengono definite $y(\alpha)$, y' , y'' rispettivamente legge delle alzate, legge delle velocità geometriche e legge delle accelerazioni geometriche, che descrivono le grandezze cinematiche della punteria in funzione dell'angolo di rotazione α della camma.

Partendo quindi dal profilo di base di raggio R_{b0} e dalla $y(\alpha)$, otteniamo il raggio del profilo primitivo:

$$r_0 = R_{b0} + y(\alpha)$$

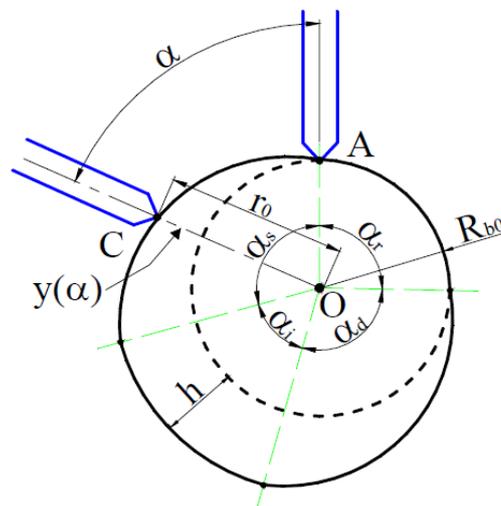


Figura A.2 Costruzione del profilo primitivo

Successivamente vengono calcolati l'angolo di pressione θ e il raggio di curvatura ρ_0 a partire dalle velocità e dalle accelerazioni, rappresentate nella Figura A.3.

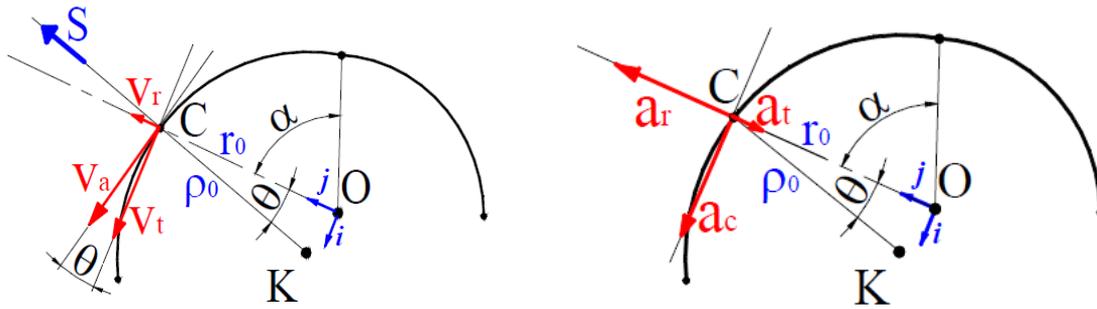


Figura A.3 Rappresentazione delle velocità (a sinistra) e delle accelerazioni (a destra)

Esprimendo le due componenti, di trascinalamento e relativa, della velocità assoluta v_a , in funzione di ω , y e r_0 , si ottiene:

$$v_t = \omega r_0$$

$$v_r = \dot{y} = \omega y'$$

$$v_a = \sqrt{v_r^2 + v_t^2} = \omega \sqrt{(R_{b0} + y)^2 + y'^2}$$

essendo θ l'angolo compreso tra v_t e v_a , risulta:

$$\theta = \arctg \frac{v_r}{v_t} = \arctg \frac{y'}{(R_{b0} + y)} = \arctg \left(\frac{y'}{r_0} \right)$$

Per calcolare ρ_0 , invece, si studiano le accelerazioni:

$$a_t = \omega^2 r_0$$

$$a_r = \ddot{y} = y'' \omega^2$$

$$a_c = 2\dot{y}\omega = 2y'\omega^2$$

scrivendo le accelerazioni nella componente normale e tangenziale al profilo si ottiene:

$$a_{an} = a_t \cos(\theta) - a_r \cos(\theta) + a_c \sin(\theta)$$

$$a_{an} = \frac{(a_t - a_r)v_t + a_c v_r}{v_a}$$

essendo a_{an} l'accelerazione centripeta, può essere scritta come $a_{an} = \frac{v_a^2}{\rho_0}$;

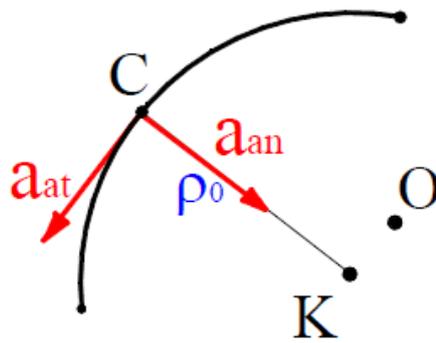


Figura A.4 Accelerazioni

Quindi otteniamo il raggio di curvatura del profilo primitivo:

$$\rho_0 = \frac{[y'^2 + r_0^2]^{3/2}}{r_0^2 - r_0 y'' + 2y'^2};$$

Aggiungendo il contributo del raggio della rotella otteniamo il raggio di curvatura effettivo:

$$\rho = \rho_0 - R_r;$$

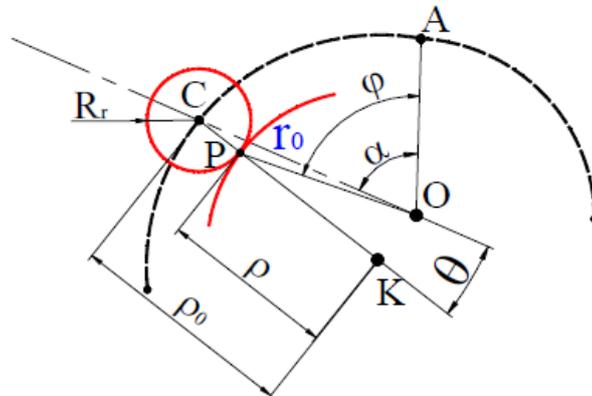


Figura A.5 Profilo effettivo

Per ottenere il profilo effettivo a partire dal primitivo si osserva che:

$$r^2 = R_r^2 + r_0^2 - 2R_r r_0 \cos\theta \quad (\text{dal teorema dei coseni di Carnot})$$

$$R_r \sin(\theta) = r \sin(\alpha - \phi) \quad (\text{dal teorema dei seni})$$

In definitiva:

- $r = \sqrt{R_r^2 + r_0^2 - 2R_r r_0 \cos(\theta)}$ (raggio del profilo effettivo)
- $\phi = \alpha + \arcsin\left(\frac{R_r \sin(\theta)}{r}\right)$ (angolo del profilo effettivo)

Di seguito vengono riportate le formule adimensionali che definiscono le leggi utilizzate per il processo di sintesi.

Legge polinomiale

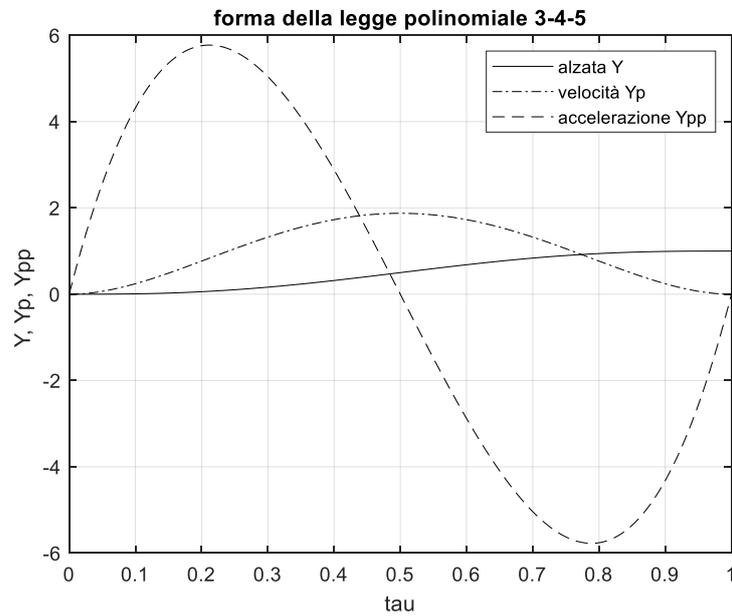


Figura A.6 Legge polinomiale 3-4-5

$$Y'' = 60\tau - 180\tau^2 + 120\tau^3$$

$$Y' = 30\tau^2 - 60\tau^3 + 30\tau^4$$

$$Y = 10\tau^3 - 15\tau^4 + 6\tau^5$$

Legge biarmonica

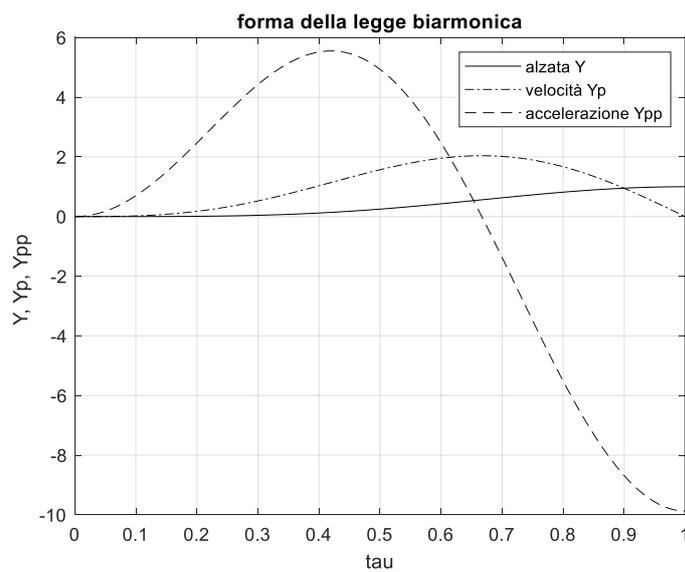


Figura A.7 Legge biarmonica

$$Y'' = \frac{\pi^2}{2} [\cos(\pi\tau) - \cos(2\pi\tau)]$$

$$Y' = \frac{\pi}{2} [\sin(\pi\tau) - \frac{1}{2}\sin(2\pi\tau)]$$

$$Y = \frac{1}{2} \{1 - \cos(\pi\tau) - \frac{1}{4}[1 - \cos(2\pi\tau)]\}$$

Legge cicloidale

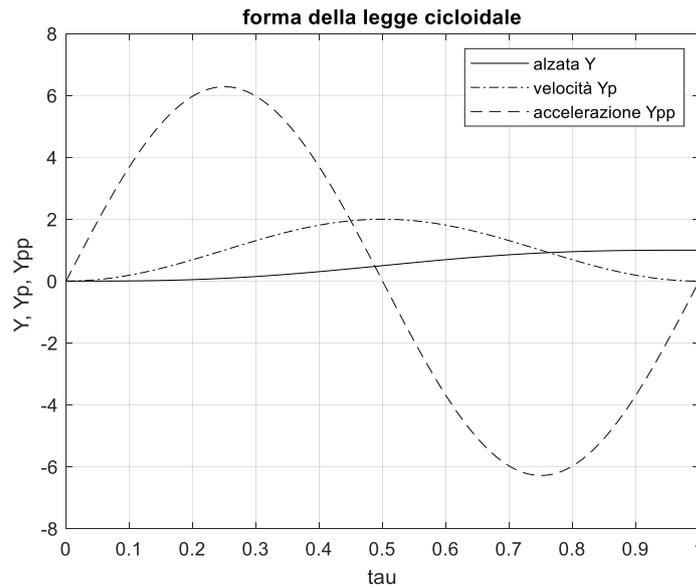


Figura A.8 Legge cicloidale

$$Y = 2\pi\sin(2\pi\tau)$$

$$Y' = \int_0^\tau Y'' d\tau = 1 - \cos(2\pi\tau)$$

$$Y = \int_0^\tau Y' d\tau = \tau - \frac{1}{2\pi}\cos(2\pi\tau)$$

Sintesi dei profili

I profili analizzati nel Paragrafo 3.2.2 sono stati costruiti a partire dalla configurazione di completa chiusura dei corpi di presa, cioè l'ultima configurazione raggiunta nel metodo di sintesi grafico D_0'''' mostrata in Figura A.9, considerata come condizione di riposo e che definisce la dimensione del raggio di base della camma pari a:

$$R_{b0} = \overline{D_0''''G} = 87.32 \text{ mm}$$

e l'alzata necessaria a raggiungere la condizione di riposo del meccanismo che risulta essere:

$$h = \overline{D_0''''G''''} - \overline{D_0''''G} = 8.6 \text{ mm}$$

Dalla condizione di riposo si aggiunge la fase di salita, costruita in modo che fosse raggiunto il punto di primo contatto definito in precedenza $G = (80.95, 50.95)$ attraverso una rotazione di $\Delta\alpha = 4.8^\circ$ (posta uguale a quella ottenuta nel metodo di sintesi grafica, evidenziata in Figura A.9).

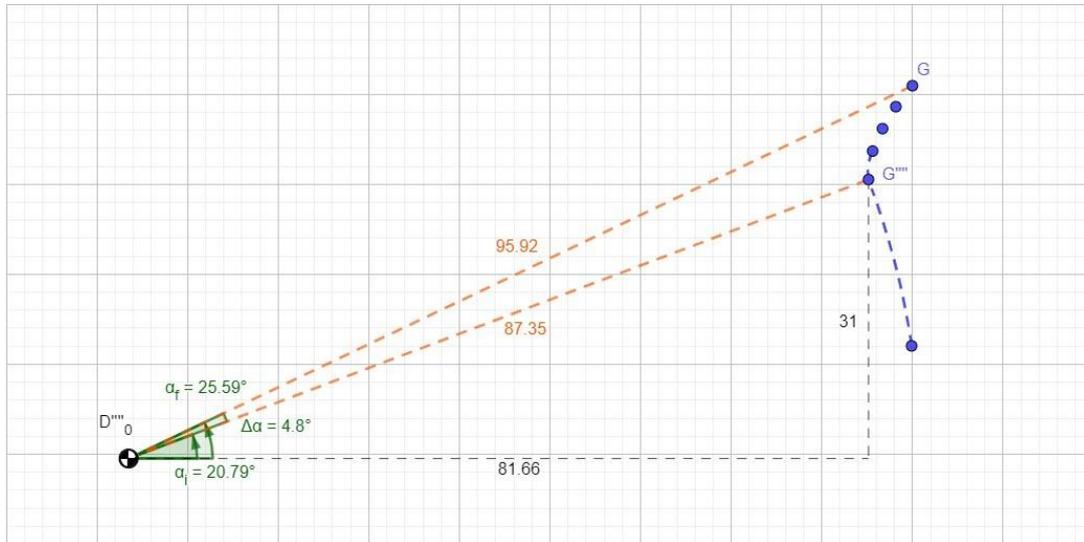


Figura A.9 Valori di riferimento del profilo ottenuto dal metodo grafico

Si impone che tale punto venga raggiunto nella legge adimensionale per $\tau = 0.5$, poiché non risulta necessario il tratto con velocità negativa che accompagna la punteria al tratto di arresto (viene preso lo stesso riferimento anche per la legge biarmonica nonostante la sua velocità si annulli per circa $\tau = 0.68$). Per le leggi polinomiale e cicloidale, raggiungendo il punto medio dell'alzata proprio per il valore di τ desiderato, si può costruire la legge geometrica delle alzate moltiplicando la legge adimensionale per il doppio dell'alzata h richiesta:

$$y(\alpha) = h_f Y(\tau) = 2h Y(\tau)$$

mentre per la legge biarmonica è necessario ricavare un'alzata fittizia h_f che permetta di realizzare il profilo descritto in precedenza: per ricavare tale valore si inverte la legge dell'alzata geometrica inserendo il valore $\tau = 0.5$ e l'alzata richiesta in tale punto $h = 8.6 \text{ mm}$:

$$h_f = \frac{h}{\frac{1}{2} [1 - \cos(\pi\tau)] - \frac{1}{4} [1 - \cos(2\pi\tau)]} = 34.4 \text{ mm}$$

In questo modo si può ottenere il profilo primitivo del tratto di salita applicando la formula:

$$r_0 = R_{b0} + h_f Y(\tau)$$

con $0 < \tau < 0.5$. I profili così ottenuti descrivono il moto di salita per gli angoli $0 < \Delta\alpha < 4.8^\circ$. In Figura A.10 sono riportati i profili che producono un'alzata completa e in Figura A.11 vengono riproposti gli angoli di pressione simulati tramite un codice MatLab di sintesi.

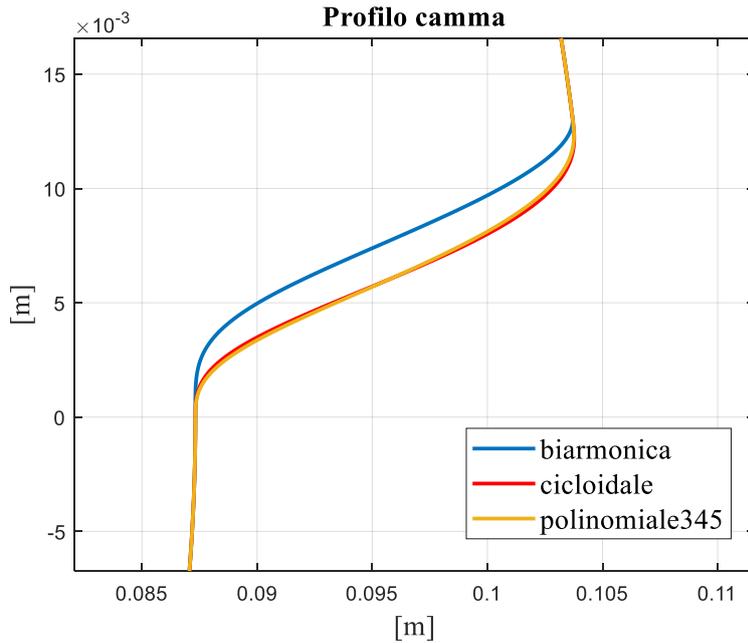


Figura A.10 Profili di salita secondo le diverse leggi di alzata.

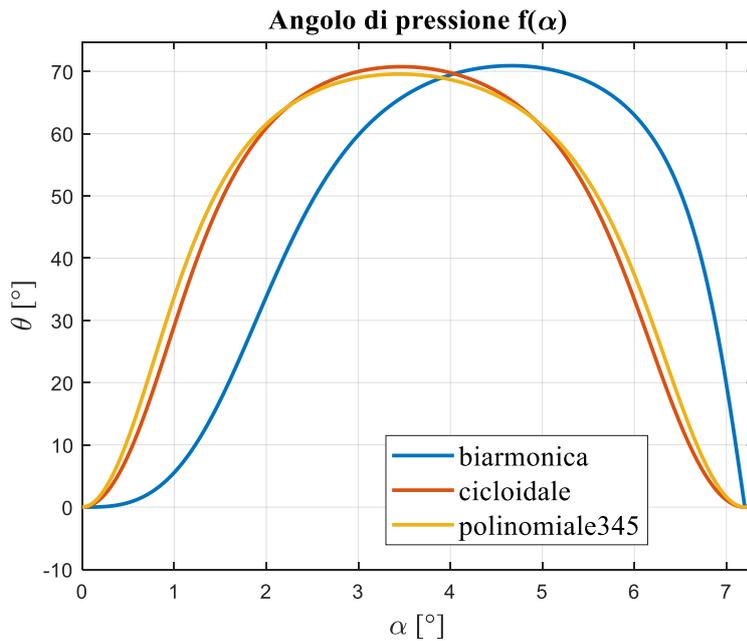


Figura A.11 Angolo di pressione dei profili ottenuti.

Per ottenere il profilo della camma in termini di coordinate cartesiane, ponendo come riferimento il punto D_0'''' , è necessario scomporre il profilo r_0 secondo gli angoli effettivamente raggiunti durante il moto di chiusura dell'elemento di presa, di cui sono riportati gli estremi in Figura A.9 come $\alpha_i = 20.79^\circ$ e $\alpha_f = 25.59^\circ$. Per ricavare dei punti caratteristici per ricostruire i profili si calcola il profilo r_0 con il vettore $\tau_i = [0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5]$ e poi viene proiettato secondo gli angoli intermedi corrispondenti ottenuti tramite delle rotazioni intermedie di $\Delta\alpha_i = \frac{\Delta\alpha}{5} = 0.96^\circ$, ricavando il vettore $\alpha_i = [20.79, 21.75, 22.71, 23.67, 24.63, 25.59]^\circ$.

I profili vengono quindi ottenuti iterando le seguenti formule per la lunghezza del vettore τ :

$$r_{0,i} = h_f Y(\tau_i)$$

$$G_{x,i} = r_{0,i} \cos(\alpha_i)$$

$$G_{y,i} = r_{0,i} \sin(\alpha_i)$$

I profili ottenuti sono riportati nella Figura A.12.

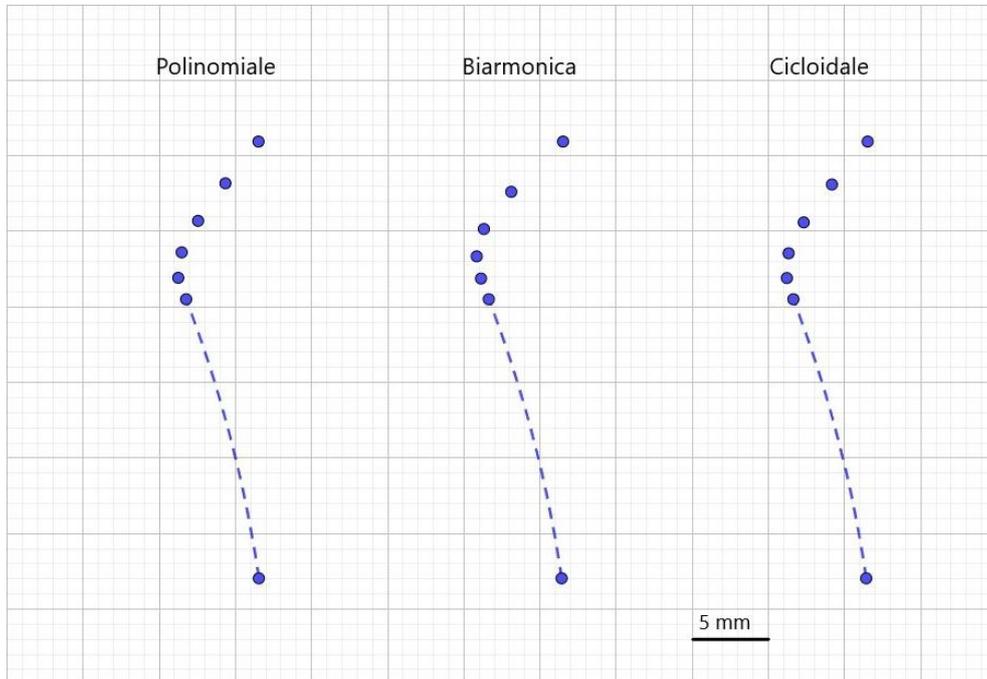


Figura A.12 Profili ottenuti con sintesi analitica

Appendice B: Codici MatLab

Analisi parametrica del meccanismo di taglio con fulcro fisso

```
%% Ananlisi Parametrica della parte superiore del Meccanismo di taglio con Polo fisso

%% Inizializzazione
close all
clear
clc

%% Input
syms alpha1 real % Angolo di input [rad]
syms C1 real % Coppia di input [Nm]
alpha1_lim=deg2rad([37.86 13.6]); % Estremi alpha1 [rad]

%% Dati
a0=30.95; % Semipalmo [mm]
a1 = 95; % Asse corpo di trasmissione [mm]
l2 = 50; % Dimensioni lame [mm]
Alpha1 = linspace(alpha1_lim(1), alpha1_lim(2), 30); % Vettore rotazione [rad]

%% Variabili
% (pedice s: parte superiore del meccanismo)
syms 'l1' real % Distanza F-P0, braccio di ingresso [mm]
syms 'r_s' real % Ditanza D0-F [mm]
syms 'epsilon_s' real % Angolo di fasatura [mm]
syms 'xP' 'yP' real % Coordinate fulcro P [mm]
syms 'theta_s' real % Angolo di uscita [rad]

%% Rapporti
syms 'Rs' 'YP' % R=r/xP YP=yP/xP

%% Analisi cinematica
l1=sqrt((xP-r_s*cos(alpha1+epsilon_s))^2+(a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)-yP)^2);
% Distanza F-P0

G = l1*cos(alpha1+theta_s)/(r_s*cos(epsilon_s)); % Guadagno di coppia [Nm/Nm]

%% Punti
O = [0,0]; % Origine
D0 = [0, a0]; % Cerniera fissa elemento di
trasmissione
F = [r_s*cos(alpha1+epsilon_s), a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)];
% Punto di contatto trasmissione-leva
E = [a1*cos(alpha1), a0+a1*sin(alpha1)];
% Estremita elemento di trasmissione
P = [xP, yP]; % Fulcro
Q = [xP+l2*cos(theta_s), yP-l2*sin(theta_s)]; % Estremo lama

%% Valori dei parametri in esame
xxP = [55 60 65 70 75]; % Posizioni Fulcro [mm]
RRs = [1/6 1/5 1/4 1/3 1/2]; % Rapporti r/xP
epst = deg2rad([-30 -10 0 10 30]); % Angoli di fasatura [rad]
YYP = [-1/5 -1/10 0 1/10 1/5]; % Rapporti yP/xP

%% Elaborazione
Theta_out=[]; % Vettore angoli di uscita [rad]
GG=[]; % Vettore Guadagni di coppia [1]
Ll=[]; % Vettore braccio di ingresso [mm]

%% Iterazione su xP
for s=1:length(xxP)
    Rs=RRs(2); % R=1/5
    YP=YYP(3); % YP=0

    xP = xxP(s); % Iterazione di xP
```

```

r_s=Rs*xP; % Calcolo r
epsilon_s=epst(3); % Calcolo epsilon
yP=YP*xP; % Calcolo yP

leg1(s,:)=['x_P = ', num2str(xP), 'mm']; % Creazione elementi legenda

for i=1:length(Alpha1) % Rotazione
    alpha1=Alpha1(i);

    theta_s=atan((a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)-yP)/...
        (xP-r_s*cos(alpha1-epsilon_s)));
    % Valutazione angolo di uscita [rad]

% Rappresentazione del movimento
figure(1)
hold on
if s==1 % si assegna ad ogni valore di xP un colore diverso
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o')
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o')
elseif s==2
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', 'r')
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r')
elseif s==3
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.9290
0.6940 0.1250])
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250])
elseif s==4
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4940
0.1840 0.5560])
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4940 0.1840 0.5560])
elseif s==5
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4660
0.6740 0.1880])
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4660 0.6740 0.1880])
end

grid on
xlabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Movimento f(x_P)', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')

% Rappresentazione delle proporzioni
if i==1
    figure(2)
    subplot(2,2,1)
    hold on
    if s==1
        line([0, D0(1), eval(E(1))],...
            [0, D0(2), eval(E(2))], 'LineWidth', 1.5)
        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...

```

```

        [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',
'LineWidth', 1.5)

    elseif s==2
        line([0, D0(1), eval(E(1))],...
            [0, D0(2), eval(E(2))], 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5)
        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r', 'LineWidth', 1.5)

    elseif s==3
        line([0, D0(1), eval(E(1))],...
            [0, D0(2), eval(E(2))], 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth',
1.5)

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth', 1.5)
    elseif s==4
        line([0, D0(1), eval(E(1))],...
            [0, D0(2), eval(E(2))], 'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth',
1.5)

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth', 1.5)
    elseif s==5
        line([0, D0(1), eval(E(1))],...
            [0, D0(2), eval(E(2))], 'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth',
1.5)

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth', 1.5)
    end
    grid on
    xlabel('x [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('y [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Proporzioni f(x_P), R=1/5, Y_P=0, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

end

% Raccolta dei valori assunti dalle variabili nei vettori predisposti
L1(s,i)=eval(l1);
Theta_out(s,i)=(theta_s);
GG(s,i)=eval(G);

end

% Grafico lunghezza braccio di ingresso
figure(2)
subplot(2,2,2)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), L1(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('\Delta \theta [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Braccio di ingresso f(x_P), R=1/5, Y_P=0, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

% Grafico della rotazione di uscita
figure(2)
subplot(2,2,3)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), rad2deg(Theta_out(s,1)-Theta_out(s,:)), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('\Delta \theta [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')

```

```

        title('Trasmissione f(x_P), R=1/5, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

% Grafico del guadagno di coppia
figure(2)
subplot(2,2,4)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), GG(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('Guadagno C_{out}/C_1 [Nm/Nm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New
Roman')

        title('Guadagno f(x_P), R=1/5, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

% i 4 grafici delle proporzioni, Lunghezza del braccio di ingresso
% Angolo di uscita e Guadagno sono raccolti in una singola figura
% come subplot per ridurre il numero di figure prodotte
end

% Aggiunta legenda e inversione dell'asse degli angoli del membro di trasmissione
% Per rappresentare il moto di chiusura del meccanismo
figure(2)
subplot(2,2,4)
legend(leg1, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New Roman','Location','southeast')
ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,3)
legend(leg1, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New Roman','Location','southeast')
ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,2)
legend(leg1, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New Roman','Location','southeast')
ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

% Le successive iterazioni ripetono le stesse operazioni per gli
% altri parametri in esame

%% Iterazione su R
for s=1:length(RRs)
    Rs=RRs(s);
    YP=YYP(3);
    xP=xxP(3);

    r_s=Rs*xP;
    epsilon_s=epst(3);
    yP=YP*xP;

    for i=1:length(Alpha1)
        alpha1=Alpha1(i);

        theta_s=atan((a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)-yP)/...
            (xP-r_s*cos(alpha1-epsilon_s)));

% Movimento
figure(3)
hold on
if s==1
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o')
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o')

```

```

elseif s==2
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
         [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', 'r')
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
         [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r')

elseif s==3
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
         [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.9290
0.6940 0.1250])

    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
         [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250])
elseif s==4
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
         [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4940
0.1840 0.5560])

    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
         [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4940 0.1840 0.5560])
elseif s==5
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
         [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4660
0.6740 0.1880])

    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
         [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4660 0.6740 0.1880])
end

grid on
xlabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
ylabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
title('Movimento f(R)', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')

% Proporzioni
if i==1
    figure(4)
    subplot(2,2,1)
    hold on
    if s==1
        leg2_1(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
        line([0, D0(1), eval(E(1))],...
             [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'LineWidth', 1.5)
        line([0, (D0(1)), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
             [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',
'LineWidth', 1.5)

    elseif s==2
        leg2_2(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
        line([0, D0(1), eval(E(1))],...
             [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5)
        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
             [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r', 'LineWidth', 1.5)

    elseif s==3
        leg2_3(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
        line([0, D0(1), eval(E(1))],...
             [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth',
1.5)

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
             [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth', 1.5)
    elseif s==4

```

```

leg2_4(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
line([0, D0(1), eval(E(1))],...
      [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth',
1.5)

line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
      [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
      'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth', 1.5)
elseif s==5
leg2_5(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
line([0, D0(1), eval(E(1))],...
      [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth',
1.5)

line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
      [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
      'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth', 1.5)
end
grid on
xlabel('x [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('y [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Proporzioni f(R), x_P=65 mm, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

end

Theta_out(s,i)=theta_s;
GG(s,i)=eval(G);
Ll(s,i)=eval(l1);
end

% Braccio di ingresso
figure(4)
subplot(2,2,2)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), Ll(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('\Delta \theta [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Braccio di ingresso f(R), x_P=65 mm, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

% Angolo di uscita
figure(4)
subplot(2,2,3)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), rad2deg(Theta_out(s,1)-Theta_out(s,:)), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('\Delta \theta [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Trasmissione f(R), x_P=65 mm, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

%Guadagno di coppia
figure(4)
subplot(2,2,4)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), GG(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('Guadagno C_{out}/C_1 [Nm/Nm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New
Roman')
title('Guadagno f(R), x_P=65 mm, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

end

figure(4)

```

```

subplot(2,2,4)
legend(leg2_1, leg2_2, leg2_3, leg2_4, leg2_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','northeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,3)
legend(leg2_1, leg2_2, leg2_3, leg2_4, leg2_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','northeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,2)
legend(leg2_1, leg2_2, leg2_3, leg2_4, leg2_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','northeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

%% Iterazione su epsilon

for s=1:length(epst)
    Rs=RRs(2);
    YP=YYP(3);

    xP=xxP(3);
    r_s=Rs*xP;
    epsilon_s=epst(s);
    yP=YP*xP;

    for i=1:length(Alpha1)
        alpha1=Alpha1(i);

        theta_s=atan((a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)-yP)/...
            (xP-r_s*cos(alpha1-epsilon_s)));

        % Movimento
        figure(5)
        hold on
        if s==1
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o')
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o')
        elseif s==2
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', 'r')
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r')
        elseif s==3
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.9290
0.6940 0.1250])
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250])
        elseif s==4
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4940
0.1840 0.5560])

```

```

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.4940 0.1840 0.5560])
    elseif s==5
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4660
0.6740 0.1880])

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.4660 0.6740 0.1880])
    end

    grid on
    xlabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
    ylabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
    title('Movimento f(\epsilon)', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')

    % Proporzioni
    if i==1
        figure(6)
        subplot(2,2,1)
        hold on
        if s==1
            leg3_1(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'LineWidth', 1.5)
            line([0, (D0(1)), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',
'LineWidth', 1.5)

            elseif s==2
                leg3_2(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5)
                line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r', 'LineWidth', 1.5)

            elseif s==3
                leg3_3(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250],
'LineWidth', 1.5)

                line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                    'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth', 1.5)
            elseif s==4
                leg3_4(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4940 0.1840 0.5560],
'LineWidth', 1.5)

                line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                    'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth', 1.5)
            elseif s==5
                leg3_5(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4660 0.6740 0.1880],
'LineWidth', 1.5)

                line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                    'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth', 1.5)
            end
        grid on
        xlabel('x [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')

```

```

        ylabel('y [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
        title('Proporzioni f(\epsilon), x_P=65 mm, R=1/5, Y_P=0', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

    end

    Theta_out(s,i)=theta_s;
    GG(s,i)=eval(G);
    Ll(s,i)=eval(l1);
    end

    % Braccio di ingresso
    figure(6)
    subplot(2,2,2)
    hold on
    plot(rad2deg(Alpha1), Ll(s,:), 'LineWidth', 1.8)
    grid on
    xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('\Delta \theta [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Braccio di ingresso f(\epsilon), x_P=65 mm, R=1/5, Y_P=0', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

    % Angolo di uscita
    figure(6)
    subplot(2,2,3)
    hold on
    plot(rad2deg(Alpha1), rad2deg(Theta_out(s,1)-Theta_out(s,:)), 'LineWidth', 1.8)
    grid on
    xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('\Delta \theta [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Trasmissione f(\epsilon), x_P=65 mm, R=1/5, Y_P=0', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

    % Guadagno
    figure(6)
    subplot(2,2,4)
    hold on
    plot(rad2deg(Alpha1), GG(s,:), 'LineWidth', 1.8)
    grid on
    xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('Guadagno C_{out}/C_1 [Nm/Nm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New
Roman')

    title('Guadagno f(\epsilon), x_P=65 mm, R=1/5, Y_P=0', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

end

figure(6)
subplot(2,2,2)
legend(leg3_1, leg3_2, leg3_3, leg3_4, leg3_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman', 'Location','northeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,3)
legend(leg3_1, leg3_2, leg3_3, leg3_4, leg3_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman', 'Location','northeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,4)
legend(leg3_1, leg3_2, leg3_3, leg3_4, leg3_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman', 'Location','northeast')

```

```

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

%% Iterazione su Yp
for s=1:length(YYP)
    Rs=RRs(2);
    YP=YYP(s);

    xP=xxP(3);
    r_s=Rs*xP;
    epsilon_s=epst(3);
    yP=YP*xP;

    for i=1:length(Alpha1)
        alphas=Alpha1(i);

        theta_s=atan((a0+r_s*sin(alphas+epsilon_s)-yP)/...
            (xP-r_s*cos(alphas-epsilon_s)));

        % Movimento
        figure(7)
        hold on
        if s==1
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o')
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o')
        elseif s==2
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', 'r')
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r')
        elseif s==3
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.9290
0.6940 0.1250])
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250])
        elseif s==4
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4940
0.1840 0.5560])
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4940 0.1840 0.5560])
        elseif s==5
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, D0(2), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4660
0.6740 0.1880])
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, D0(2), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4660 0.6740 0.1880])
        end

        grid on
        xlabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
        ylabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
        title('Movimento f(y_P)', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')

        % Proporzioni
        if i==1
            figure(8)

```

```

subplot(2,2,1)
hold on
if s==1
    leg4_1(s,:)=['Y_P = ', num2str(YYP(s))];
    line([0, D0(1), eval(E(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'LineWidth', 1.5)
    line([0, (D0(1)), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',
'LineWidth', 1.5)

elseif s==2
    leg4_2(s,:)=['Y_P = ', num2str(YYP(s))];
    line([0, D0(1), eval(E(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5)
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r', 'LineWidth', 1.5)

elseif s==3
    leg4_3(s,:)=['Y_P = ', num2str(YYP(s))];
    line([0, D0(1), eval(E(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth',
1.5)

    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth', 1.5)
elseif s==4
    leg4_4(s,:)=['Y_P = ', num2str(YYP(s))];
    line([0, D0(1), eval(E(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth',
1.5)

    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth', 1.5)
elseif s==5
    leg4_5(s,:)=['Y_P = ', num2str(YYP(s))];
    line([0, D0(1), eval(E(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2))], 'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth',
1.5)

    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth', 1.5)
end
grid on
xlabel('x [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
ylabel('y [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
title('Proporzioni f(Y_P), x_P=65 mm, R=1/5, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

end

Theta_out(s,i)=theta_s;
GG(s,i)=eval(G);
L1(s,i)=eval(l1);
end

%Braccio di ingresso
figure(8)
subplot(2,2,2)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), L1(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
ylabel('\Delta \theta [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
title('Braccio di ingresso f(Y_P), x_P=65 mm, R=1/5, \epsilon=0°', 'FontSize',
14, 'Fontname', 'Times New Roman')

```

```

% Angolo di uscita
figure(8)
subplot(2,2,3)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), rad2deg(Theta_out(s,1)-Theta_out(s,:)), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('\Delta \theta [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Trasmissione f(Y_P), x_P=65 mm, R=1/5, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

% Guadagno
figure(8)
subplot(2,2,4)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), GG(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('Guadagno C_{out}/C_1 [Nm/Nm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New
Roman')

title('Guadagno f(Y_P), x_P=65 mm, R=1/5, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

end

figure(8)
subplot(2,2,2)
legend(leg4_1, leg4_2, leg4_3, leg4_4, leg4_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','northeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,3)
legend(leg4_1, leg4_2, leg4_3, leg4_4, leg4_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','northeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,4)
legend(leg4_1, leg4_2, leg4_3, leg4_4, leg4_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','northeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

```

Analisi parametrica del meccanismo di taglio a fulcro mobile

```

%% Analisi Parametrica della parte superiore del Meccanismo di taglio con Fulcro mobile
%% Inizializzazione
close all
clear
clc

%% Input
syms alpha real           % Angolo di input [rad]
syms C1 real             % Coppia di input [Nm]
alpha_lim=deg2rad([37.86 13.6]); % Estremi alpha [rad]

%% Dati
a0=30.95;                % Semipalmo [mm]
a1 = 95;                 % Corpo di trasmissione [mm]
l2 = 50;                 % Lunghezza lama [mm]
Alpha1 = linspace(alpha_lim(1), alpha_lim(2), 30); % Vettore rotazione [rad]

%% Variabili
% (pedice s: parte superiore del meccanismo)
syms 'l1' real           % Distanza F-P [mm]
syms 'r_s' real          % Distanza D0-F [mm]
syms 'epsilon_s' real    % Angolo di fasatura [rad]
syms 'xP' 'yP' real      % Coordinate fulcro P [mm]
syms 'theta_s' real      % Angolo di uscita [rad]

%% Rapporti
syms 'Rs' 'Ys' real      %Rs=r/l1      Ys=yP/l1

%% Analisi cinematica
xP = r_s*cos(alpha1+epsilon_s)+l1*cos(theta_s); % Ascissa Fulcro [mm]
yP = Ys*l1; % Ordinata Fulcro [mm]
G = cos(alpha1+theta_s)/(Rs*cos(epsilon_s)); % Guadagno di coppia [Nm/Nm]

%% Punti
O = [0,0]; % Origine
D0 = [0, a0];
% Cerniera fissa elemento di trasmissione
F = [r_s*cos(alpha1+epsilon_s), a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)];
% Cerniera di trasmissione
E = [a1*cos(alpha1), a0+a1*sin(alpha1)]; % Estremo elemento di trasmissione
P = [xP, yP]; % Fulcro
Q = [P(1)+l2*cos(theta_s), P(2)-l2*sin(theta_s)]; % Estremo lama

%% Valori dei parametri in esame
l1l = [56 58 60 62 64]; % Lunghezze braccio di ingresso [mm]
RRs = [1/6 1/5 1/4 1/3 1/2]; % Rapporto r/l1
epst = deg2rad([-30 -10 0 10 30]); % Angolo di fasatura [rad]
YYs = [-1/5 -1/10 0 1/10 1/5]; % Rapporto yP/l1

%% Elaborazione
XP=[]; % Vettore Posizioni fulcro [mm]
Theta_out=[]; % Vettore angoli di uscita [rad]
GG=[]; % Vettore Guadagno di coppia [1]

%% Iterazione su l1
for s=1:length(l1l)
    Rs=RRs(2); % R=1/5
    Ys=YYs(3); % YP=0

    % Valutazione parametri
    l1=l1l(s); % Iterazione di l1
    r_s=Rs*l1; % Calcolo r
    epsilon_s=epst(3); % Calcolo epsilon
    yP=Ys*l1; % Calcolo yP

    % Rotazione
    for i=1:length(Alpha1)

```

```

alpha1=Alpha1(i);

theta_s=asin((a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)-yP)/l1);
    % Valutazione angolo di uscita [rad]

% Rappresentazione del Movimento
figure(1)
hold on
if s==1
    % si assegna ad ogni valore di l1 un colore
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o')
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o')
elseif s==2
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', 'r')
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r')

elseif s==3
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.9290
0.6940 0.1250])
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250])
elseif s==4
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4940
0.1840 0.5560])
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4940 0.1840 0.5560])
elseif s==5
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4660
0.6740 0.1880])
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4660 0.6740 0.1880])
end

grid on
xlabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
ylabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
title('Movimento f(l_1)', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')

% Rappresentazione delle proporzioni
if i==1
    figure(2)
    subplot(2,2,1)
    hold on
    if s==1
        leg1_1(s,:)=['l_1 = ', num2str(l1), ' mm']; % Creazione elementi legenda
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'LineWidth', 1.5)
        line([0, (D0(1)), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',
'LineWidth', 1.5)
    elseif s==2
        leg1_2(s,:)=['l_1 = ', num2str(l1), ' mm'];
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5)
        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...

```

```

        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r', 'LineWidth', 1.5)

    elseif s==3
        leg1_3(s,:)=['l_1 = ', num2str(l1), ' mm'];

        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250],
'LineWidth', 1.5)

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth', 1.5)
    elseif s==4
        leg1_4(s,:)=['l_1 = ', num2str(l1), ' mm'];
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4940 0.1840 0.5560],
'LineWidth', 1.5)

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth', 1.5)
    elseif s==5
        leg1_5(s,:)=['l_1 = ', num2str(l1), ' mm'];
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4660 0.6740 0.1880],
'LineWidth', 1.5)

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth', 1.5)
    end

    grid on
    xlabel('x [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('y [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Proporzioni f(l_1), R=1/5, Y_P=0, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

end

end

% Raccolta dei valori assunti dalle variabili
Theta_out(s,i)=(theta_s);
GG(s,i)=eval(G);
XP(s,i)=eval(xP);
end

% Grafico Posizione fulcro
figure(2)
subplot(2,2,2)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), XP(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('x_P [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Posizione fulcro f(l_1), R=1/5, Y_P=0, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

% Grafico Rotazione di uscita
figure(2)
subplot(2,2,3)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), rad2deg(Theta_out(s,1)-Theta_out(s,:)), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('\Delta \theta [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Trasmissione f(l_1), R=1/5, Y_P=0, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

% Grafico Guadagno
figure(2)

```

```

subplot(2,2,4)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), GG(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('Guadagno C_{out}/C_1 [Nm/Nm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Guadagno f(l_1), R=1/5, Y_P=0, \epsilon=0°', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times
New Roman')

% i 4 grafici delle proporzioni, Lunghezza del braccio di ingresso
% Angolo di uscita e Guadagno sono raccolti in una singola figura
% come subplot per ridurre il numero di figure prodotte

end

% Aggiunta legenda e inversione dell'asse degli angoli del membro di trasmissione
% Per rappresentare il moto di chiusura del meccanismo
figure(2)
subplot(2,2,4)
legend(leg1_1, leg1_2, leg1_3, leg1_4, leg1_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,3)
legend(leg1_1, leg1_2, leg1_3, leg1_4, leg1_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,2)
legend(leg1_1, leg1_2, leg1_3, leg1_4, leg1_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

% Le successive iterazioni ripetono le stesse operazioni per gli
% altri parametri in esame

%% Iterazione su R
for s=1:length(RRs)
    Rs=RRs(s);
    Ys=YYs(3);

    l1=l11(3);
    r_s=Rs*l1;
    epsilon_s=epst(3);
    yP=Ys*l1;

    for i=1:length(Alpha1)
        alpha1=Alpha1(i);

        theta_s=asin((a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)-yP)/l1);

% Movimento
figure(3)
hold on
if s==1
    line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o')
    line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o')
elseif s==2

```

```

        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', 'r')
        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r')

        elseif s==3
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.9290
0.6940 0.1250])

            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                'Color', [0.9290 0.6940 0.1250])
        elseif s==4
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4940
0.1840 0.5560])

            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                'Color', [0.4940 0.1840 0.5560])
        elseif s==5
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4660
0.6740 0.1880])

            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                'Color', [0.4660 0.6740 0.1880])
    end

    grid on
    xlabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Movimento f(R)', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')

    if i==1
        figure(4)
        subplot(2,2,1)
        hold on
        if s==1
            leg2_1(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'LineWidth', 1.5)
            line([0, (D0(1)), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',
'LineWidth', 1.5)

            elseif s==2
                leg2_2(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5)
                line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r', 'LineWidth', 1.5)

            elseif s==3
                leg2_3(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250],
'LineWidth', 1.5)

                line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                    [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                    'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth', 1.5)
            elseif s==4
                leg2_4(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...

```

```

        [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4940 0.1840 0.5560],
'LineWidth', 1.5)

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth', 1.5)
    elseif s==5
        leg2_5(s,:)=['R = ', num2str(RRs(s))];
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4660 0.6740 0.1880],
'LineWidth', 1.5)

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
            'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth', 1.5)
    end
    grid on
    xlabel('x [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('y [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Proporzioni f(R), l_1=60 mm, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

    end

    Theta_out(s,i)=theta_s;
    GG(s,i)=eval(G);
    XP(s,i)=eval(xP);
    end

    % Posizione fulcro
    figure(4)
    subplot(2,2,2)
    hold on
    plot(rad2deg(Alpha1), XP(s,:), 'LineWidth', 1.8)
    grid on
    xlabel('\alpha_1 [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('x_P [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Posizione fulcro f(R), l_1=60 mm, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

    % Angolo di uscita
    figure(4)
    subplot(2,2,3)
    hold on
    plot(rad2deg(Alpha1), rad2deg(Theta_out(s,1)-Theta_out(s,:)), 'LineWidth', 1.8)
    grid on
    xlabel('\alpha_1 [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('\Delta \theta [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Trasmissione f(R), l_1=60 mm, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

    % Guadagno di coppia
    figure(4)
    subplot(2,2,4)
    hold on
    plot(rad2deg(Alpha1), GG(s,:), 'LineWidth', 1.8)
    grid on
    xlabel('\alpha_1 [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('Guadagno C_{out}/C_1 [Nm/Nm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Guadagno f(R), l_1=60 mm, Y_P=0, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

end

figure(4)
subplot(2,2,4)
legend(leg2_1, leg2_2, leg2_3, leg2_4, leg2_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman', 'Location', 'southeast')

```

```

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,3)
legend(leg2_1, leg2_2, leg2_3, leg2_4, leg2_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,2)
legend(leg2_1, leg2_2, leg2_3, leg2_4, leg2_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

%% Iterazione su angolo di fasatura
for s=1:length(epst)
    Rs=RRs(2);
    Ys=Ys(3);

    l1=l11(3);
    r_s=Rs*l1;
    epsilon_s=epst(s);
    yP=Ys*l1;

    for i=1:length(Alpha1)
        alpha1=Alpha1(i);

        theta_s=asin((a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)-yP)/l1);

        % Movimento
        figure(5)
        hold on
        if s==1
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o')
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o')
        elseif s==2
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', 'r')
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r')
        elseif s==3
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.9290
0.6940 0.1250])
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250])
        elseif s==4
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4940
0.1840 0.5560])
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4940 0.1840 0.5560])
        elseif s==5
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...

```

```

        [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4660
0.6740 0.1880])

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
        'Color', [0.4660 0.6740 0.1880])
    end

    grid on
    xlabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    ylabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
    title('Movimento f(\epsilon)', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')

% Proporzioni
if i==1
    figure(6)
    subplot(2,2,1)
    hold on
    if s==1
        leg3_1(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'LineWidth', 1.5)
        line([0, (D0(1)), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
        [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',
'LineWidth', 1.5)

        elseif s==2
            leg3_2(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5)
            line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r', 'LineWidth', 1.5)

            elseif s==3
                leg3_3(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.9290 0.6940 0.1250],
'LineWidth', 1.5)

                line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth', 1.5)
            elseif s==4
                leg3_4(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4940 0.1840 0.5560],
'LineWidth', 1.5)

                line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth', 1.5)
            elseif s==5
                leg3_5(s,:)=['\epsilon = ', num2str(rad2deg(epst(s))), '°'];
                line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4660 0.6740 0.1880],
'LineWidth', 1.5)

                line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
                'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth', 1.5)
            end
            grid on
            xlabel('x [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
            ylabel('y [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
            title('Proporzioni f(\epsilon), l_1=60 mm, R=1/5, Y_P=0', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')
        end
    end
end

```

```

Theta_out(s,i)=theta_s;
GG(s,i)=eval(G);
XP(s,i)=eval(xP);
end

% Posizione fulcro
figure(6)
subplot(2,2,2)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), XP(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('x_P [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Posizione fulcro f(\epsilon), l_1=60 mm, R=1/5, Y_P=0', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

% Angolo di uscita
figure(6)
subplot(2,2,3)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), rad2deg(Theta_out(s,1)-Theta_out(s,:)), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('\Delta \theta [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Trasmissione f(\epsilon), l_1=60 mm, R=1/5, Y_P=0', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

% Guadagno
figure(6)
subplot(2,2,4)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), GG(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('Guadagno C_{out}/C_1 [Nm/Nm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Guadagno f(\epsilon), l_1=60 mm, R=1/5, Y_P=0', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

end

figure(6)
subplot(2,2,4)
legend(leg3_2, leg3_3, leg3_4, leg3_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,3)
legend(leg3_1, leg3_2, leg3_3, leg3_4, leg3_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,2)
legend(leg3_1, leg3_2, leg3_3, leg3_4, leg3_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

%% Iterazione su YP
for s=1:length(YPs)
Rs=RRs(2);

```

```

Ys=YYs(s);

l1=l11(3);
r_s=Rs*l1;
epsilon_s=epst(3);
yP=Ys*l1;

for i=1:length(Alpha1)
    alpha1=Alpha1(i);

    theta_s=asin((a0+r_s*sin(alpha1+epsilon_s)-yP)/l1);

    % Movimento
    figure(7)
    hold on
    if s==1
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o')
        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o')
    elseif s==2
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', 'r')
        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o', 'Color',
'r')

    elseif s==3
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.9290
0.6940 0.1250])

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250])
    elseif s==4
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4940
0.1840 0.5560])

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4940 0.1840 0.5560])
    elseif s==5
        line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Marker', 'o', 'Color', [0.4660
0.6740 0.1880])

        line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
            [0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4660 0.6740 0.1880])
    end

    grid on
    xlabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
    ylabel('[mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
    title('Movimento f(y_P)', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')

    % Proporzioni
    if i==1
        figure(8)
        subplot(2,2,1)
        hold on
        if s==1
            leg4_1(s,:)=['Y_P = ', num2str(YYs(s))];
            line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
                [0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'LineWidth', 1.5)
            line([0, (D0(1)), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...

```

```

[0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',
'LineWidth', 1.5)

elseif s==2
leg4_2(s,:)=['Y_P = ', num2str(Ys(s))];
line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
[0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5)
line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
[0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',
'Color', 'r', 'LineWidth', 1.5)

elseif s==3
leg4_3(s,:)=['Y_P = ', num2str(Ys(s))];
line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
[0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.9290 0.6940
0.1250], 'LineWidth', 1.5)

line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
[0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.9290 0.6940 0.1250], 'LineWidth', 1.5)
elseif s==4
leg4_4(s,:)=['Y_P = ', num2str(Ys(s))];
line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
[0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4940 0.1840
0.5560], 'LineWidth', 1.5)

line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
[0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4940 0.1840 0.5560], 'LineWidth', 1.5)
elseif s==5
leg4_5(s,:)=['Y_P = ', num2str(Ys(s))];
line([0, D0(1), eval(E(1)), eval(F(1))],...
[0, (D0(2)), eval(E(2)), eval(F(2))], 'Color', [0.4660 0.6740
0.1880], 'LineWidth', 1.5)

line([0, D0(1), eval(F(1)), eval(P(1)), eval(Q(1))],...
[0, (D0(2)), eval(F(2)), eval(P(2)), eval(Q(2))], 'Marker', 'o',...
'Color', [0.4660 0.6740 0.1880], 'LineWidth', 1.5)
end
grid on
xlabel('x [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
ylabel('y [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
title('Proporzioni f(Y_P), l_1=60 mm, R=1/5, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

end

Theta_out(s,i)=theta_s;
GG(s,i)=eval(G);
XP(s,i)=eval(xP);
end

% Posizione fulcro
figure(8)
subplot(2,2,2)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), XP(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [^\circ]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
ylabel('x_P [mm]', 'FontSize', 14, 'Fontname', 'Times New Roman')
title('Posizione fulcro f(Y_P), l_1=60 mm, R=1/5, \epsilon=0^\circ', 'FontSize', 14,
'Fontname', 'Times New Roman')

% Angolo di uscita
figure(8)
subplot(2,2,3)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), rad2deg(Theta_out(s,1)-Theta_out(s,:)), 'LineWidth', 1.8)
grid on

```

```

xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('\Delta \theta [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Trasmissione f(Y_P), l_1=60 mm, R=1/5, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

% Guadagno
figure(8)
subplot(2,2,4)
hold on
plot(rad2deg(Alpha1), GG(s,:), 'LineWidth', 1.8)
grid on
xlabel('\alpha_1 [°]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
ylabel('Guadagno C_{out}/C_1 [Nm/Nm]', 'FontSize', 14, 'Fontname','Times New Roman')
title('Guadagno f(Y_P), l_1=60 mm, R=1/5, \epsilon=0°', 'FontSize', 14,
'Fontname','Times New Roman')

end

figure(8)
subplot(2,2,4)
legend(leg4_1, leg4_2, leg4_3, leg4_4, leg4_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,3)
legend(leg4_1, leg4_2, leg4_3, leg4_4, leg4_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

subplot(2,2,2)
legend(leg4_1, leg4_2, leg4_3, leg4_4, leg4_5, 'FontSize', 12, 'Fontname','Times New
Roman','Location','southeast')

ax=gca;
c=ax.XDir;
ax.XDir = 'reverse';

```