



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

A.a. 2022/2023

Sessione di Laurea luglio 2023

Tesi di Laurea Magistrale

**Analisi e integrazione di un meccanismo
sottoattuato per la presa e il taglio di campioni
nell'ambito dell'agricoltura di precisione**

Relatore

Prof. Giuseppe Quaglia

Candidato

Luca Samperi

Correlatore

Giovanni Colucci

Abstract

La seguente tesi di laurea si pone l'obiettivo di realizzare un prototipo di utensile di presa-taglio, per la raccolta automatizzata di campioni di colture, attraverso il braccio robotico del rover Agri.q, un veicolo prototipale sviluppato dal Politecnico di Torino per l'agricoltura di precisione nel campo della viticoltura. Dopo un'introduzione sull'agricoltura di precisione, sulle tecnologie diffuse attualmente e sui suoi possibili sviluppi, si presenterà uno studio approfondito del gripper a due dita del braccio robotico Kinova Jaco2, per valutare le diverse modalità di presa e scegliere quella più efficace per la progettazione dell'utensile.

Alla luce dei risultati emersi dallo studio descritto, verrà presentata una ri-progettazione di una prima versione prototipale precedentemente sviluppata, evidenziandone le principali criticità e punti di possibile miglioramento. L'elaborato presenta, inoltre, una descrizione dettagliata delle soluzioni tecnologiche impiegate per la realizzazione del prototipo, che è stato successivamente validato tramite prove sperimentali.

Ringraziamenti

Questo lavoro di tesi segna la conclusione del mio percorso universitario, durante il quale ho avuto l'opportunità di crescere sia come studente che come persona.

Desidero ringraziare il prof. Giuseppe Quaglia per avermi concesso l'opportunità di svolgere la tesi su un argomento così interessante e per la sua disponibilità e cortesia dimostrate durante la stesura. Vorrei inoltre ringraziare il dottorando Giovanni Colucci per il suo prezioso supporto e per i proficui scambi di opinioni che abbiamo avuto nel corso di questi mesi.

Infine, desidero esprimere un sincero ringraziamento di cuore ai miei genitori, mio fratello e i miei nonni, per il loro amore incondizionato, per aver creduto in me e per il sostegno prezioso che mi hanno sempre donato.

Indice

Indice delle figure.....	iv
Indice delle Tabelle	x
1 Introduzione.....	1
1.1 Dispositivi robotici per Agricoltura di Precisione.....	2
1.1.1 Raccolta dati.....	2
1.1.2 Taglio/Potatura.....	3
1.1.3 Irrorazione.....	4
1.1.4 Presa.....	4
1.2 Agri.q.....	6
1.3 Punti di miglioramento ed obiettivi del lavoro.....	9
2 Analisi cinematica e quasi-statica del gripper	10
2.1 Analisi cinematica del dito.....	11
2.1.1 Descrizione del meccanismo.....	11
2.1.2 Modello cinematico	13
2.2 Analisi quasi-statica	19
2.2.1 Modalità di presa.....	20
2.2.2 Analisi quasi statica del dito con il PLV.....	22
2.2.3 Misurazione sperimentale della forza di attuazione.....	25
2.2.4 Studio delle 4 modalità di presa.....	28
2.3 Modello Multibody	39
2.3.1 Presa con le falangi prossimali – Confronto con modello multibody.....	40
2.3.2 Presa con le falangi distali, senza cedevolezza – Confronto con modello multibody ...	41
2.3.3 Presa con le falangi distali, con cedevolezza – Confronto con modello multibody	42

2.4	Misurazione sperimentale della forza esercitata dal gripper Kinova Jaco2	43
3	Progettazione del meccanismo di presa-taglio	50
3.1	Precedenti versioni del meccanismo	50
3.1.1	Prima versione	51
3.1.2	Seconda versione	52
3.2	Specifiche progettuali.....	54
3.2.1	Misurazione sperimentale della forza di taglio	57
3.3	Progettazione funzionale	61
3.4	Analisi parametrica	65
3.5	Progettazione esecutiva	78
3.5.1	Telaio	80
3.5.2	Leva.....	80
3.5.3	Porta-lama	81
3.5.4	Elemento di presa.....	82
4	Prototipazione	83
4.1	Componenti ottenuti tramite fabbricazione additiva	83
4.2	Componenti commerciali	84
4.3	Assemblaggio prototipo	87
4.4	Integrazione con gripper del braccio robotico.....	91
5	Sperimentazione.....	94
5.1	Presa automatica.....	94
5.2	Taglio	95
5.3	Percorso completo	96
6	Conclusioni.....	99
7	Appendice.....	101

8	Bibliografia.....	119
----------	--------------------------	------------

Indice delle figure

Figura 1 SDGs: Sustainable Development Goals [1,2]	1
Figura 2 Esempio di robot per la raccolta dati: robot VinBot per la raccolta dati nei vigneti.....	3
Figura 3 (a) Sistema robotico per il taglio di rami [7], (b) TrimBot per potatura dei cespugli [8]	3
Figura 4 Robot dedicati all'irrorazione delle piante. (a) Di-wheel [11], (b) AgriBot [12] e (c) Savsar [12]	4
Figura 5 Esempi di robot specializzati nella presa di campioni vegetativi. (a) Robot per la raccolta delle fragole [13] , (b) robot per la raccolta delle fragole [14], (c) robot per la raccolta delle mele [15], (d) robot per la raccolta dei lamponi [16], (e) robot per la raccolta dei peperoni [17].....	5
Figura 6 Foto del rover Agri.q nel suo scenario applicativo [19].....	6
Figura 7 Volume di lavoro del braccio robotico Kinova Jaco 2 [19]	7
Figura 8 Foto del veicolo Agri.q 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 [19].....	8
Figura 9 Esempi di robot con l' <i>end-effector</i> personalizzato. (a) Robot per la raccolta delle mele [15], (b) robot per la raccolta dei lamponi [16], (c) robot per la potatura dei cespugli [8].....	9
Figura 10 Sequenza di foto che mostra la presa automatica dell'utensile	9
Figura 11 Gripper a due dita del robot a 7dof Kinova Jaco2.....	10
Figura 12 Schema del meccanismo con i 5 componenti evidenziati	11
Figura 13 Rappresentazione grafica del dito nella configurazione con la falange distale aperta, sopra, e chiusa, sotto.	12
Figura 14 Modello del dito	13
Figura 15 Rappresentazione grafica del dito con l'indicazione dei punti chiave del modello	13
Figura 16 Dettaglio del modello	15
Figura 17 Andamento di x in funzione di α	17
Figura 18 Configurazione del dito nei 4 estremi dell'area ABCD	18
Figura 19 Schema del dito con le forze applicate.	19
Figura 20 Gripper in presa con le falangi prossimali.....	20

Figura 21 Gripper in presa con le falangi distali.	20
Figura 22 Gripper in presa con le falangi distali ma si ha cedevolezza delle dita sottoattuate.	21
Figura 23 Gripper in presa con entrambe le falangi.	21
Figura 24 Modello del meccanismo sottoposto alle forze FF, FR e FS	23
Figura 25 Dettaglio del modello della falange prossimale	24
Figura 26 Dettaglio del modello della falange distale	24
Figura 27 Gripper con i due attuatori in evidenza	25
Figura 28 Banco prova attuatore.....	26
Figura 29 Staffa di anti-rotazione (7)	27
Figura 30 Interfaccia (3)	27
Figura 31 Vista laterale del banco prova, a sinistra - Dettaglio del punto di contatto tra l'attuatore ed il dinamometro, a destra	27
Figura 32 Fotografia dall'alto del banco prova	27
Figura 33 Immagine del Gripper in presa.....	29
Figura 34 Grafici con l'andamento della forza sulla falange prossimale in funzione dell'angolo α . A destra Dettaglio ingrandito della curva	30
Figura 35 Visualizzazione grafica del modello del dito agli estremi del campo di moto.....	30
Figura 36 Immagine del Gripper in presa con le falangi distali.	31
Figura 37 Grafici con l'andamento della forza sulla falange distale in funzione dell'angolo α . A destra il dettaglio ingrandito della curva.....	32
Figura 38 Visualizzazione grafica del dito agli estremi del campo di moto con la forza sulla falange distale.....	32
Figura 39 Immagine del Gripper in presa con le falangi distali.	33
Figura 40 Grafici con l'andamento della forza sulla falange distale in funzione dell'angolo α , con la falange distale chiusa.....	34
Figura 41 Visualizzazione grafica del dito con la forza sulla falange distale agli estremi del campo di moto.....	34
Figura 42 Immagine del Gripper in presa con entrambe le falangi.	35
Figura 43 Andamento delle forze sulla falange prossimale (FS) e sulla falange distale (FR) in funzione di α per 4 distinti valori di β	36

Figura 44 Nel grafico si riportano le curve della Forza di presa diviso la Forza di attuazione per le tre modalità di presa di interesse: (a) Presa con le sole falangi prossimali, (b) presa con le sole falangi distali con cedevolezza delle dita, (c) presa con le sole falangi distali senza cedevolezza delle dita	37
Figura 45 Rappresentazione grafica con le posizioni di fine corsa del dito nella configurazione a dito piegato e a dito disteso.	38
Figura 46 Modello del dito con l'indicazione delle forze presenti sul sistema	39
Figura 47 Immagine del gripper in presa con le falangi prossimali	40
Figura 48 Confronto tra i due modelli della forza FS con il gripper in presa con le sole falangi prossimali	40
Figura 49 Immagine del gripper in presa con le falangi distali a dita distese.....	41
Figura 50 Confronto tra i due modelli della forza FR con gripper in presa con le falangi distali senza cedevolezza, $\beta = -16.7 \text{ deg}$	41
Figura 51 Immagine del gripper in presa con le falangi distali a dita piegate.....	42
Figura 52 Confronto tra i due modelli della forza FR con gripper in presa con le falangi distali con cedevolezza,	42
Figura 53 Schema del banco prova, vista dall'alto	43
Figura 54 Schema del banco prova, vista aggiuntiva	44
Figura 55 Piastra del dinamometro nella vista dall'alto, a sinistra, e nella vista 3D, a destra.....	45
Figura 56 Foto del banco sperimentale per la valutazione della forza esplicita dalle dita del gripper con quest'ultimo a riposo, in posizione aperta	45
Figura 57 Foto del banco sperimentale per la valutazione della forza esplicita dalle dita del gripper in fase di presa, con il dinamometro che segna una forza di trazione di 62.8 N	46
Figura 58 Foto del banco sperimentale per la valutazione della forza esplicita dalle dita del gripper in fase finale di presa, con il dinamometro che segna una forza di trazione di 30.3 N.....	46
Figura 59 Modello del dito	48
Figura 60 Presa del gripper con dettaglio sulla deformazione della cerniera fissa O.....	49
Figura 61 Rappresentazione 3D del primo prototipo del meccanismo di presa e di taglio [20]	51
Figura 62 Rappresentazione grafica del secondo prototipo del meccanismo di presa e di taglio [19]	52

Figura 63 Vista laterale del secondo prototipo [19]	52
Figura 64 Modello del meccanismo nella configurazione con molla a compressione (a) e a trazione (b) [5]. Il moto del sistema è descritto dalla rotazione dei <i>Link</i> 1 e 2 rispetto al <i>Link</i> 0, rappresentato come fisso.....	53
Figura 65 Schema del gripper in presa delle leve dell'utensile, utile per visualizzare il campo di moto delle dita e delle leve in due configurazioni: gripper aperto, a sinistra, e chiuso, a destra.	55
Figura 66 Schema del banco prova per l'analisi sperimentale della forza di taglio necessaria per tagliare un ramo.....	58
Figura 67 Immagine di un grappolo d'uva con la nomenclatura delle varie parti [www.wineshop.it]	59
Figura 68 Immagini del tralcio della vite. A sinistra, foto tratta da: [www.tesoriditaliamagazine.it] 59	
Figura 69 Andamento della forza di taglio al variare dell'affondamento della lama del ramo, per 7 campioni analizzati, diversi l'uno dall'altro per tipologia di ramo o dimensione del diametro...60	
Figura 70 Schemi dell'utensile in funzione: configurazione iniziale, a sinistra, e configurazione finale, a destra.....	62
Figura 71 Schema funzionale del meccanismo. Il moto del sistema è descritto dalla rotazione dei <i>Link</i> 2,3 e 4 rispetto al <i>Link</i> 1, rappresentato come fisso	62
Figura 72 Schemi con meccanismo in funzione: a) meccanismo in configurazione iniziale; (b) fase di presa del ramo; (c) fase di mantenimento e taglio ramo; (d) fase di deposito (o rilascio) ramo..64	
Figura 73 Schema funzionale con parametri e variabili (senza elemento di presa)	65
Figura 74 Schema funzionale della leva e dell'elemento di taglio con i parametri e le variabili.....	67
Figura 75 Schema funzionale della leva, a sinistra, ed un suo dettaglio, a destra.	68
Figura 76 Schema funzionale del portalama.....	68
Figura 77 Illustrazione del gripper chiuso e aperto, con indicazione dell'angolo massimo e minimo assunto dal dito.....	72
Figura 78 Influenza di b_1 su GA e GF	72
Figura 79 Influenza di ϵ su GA e GF	73
Figura 80 Influenza di d su GA e GF	74
Figura 81 Influenza di b_2 su GA e GF	75
Figura 82 Influenza di b_2 su FE	76

Figura 83 Influenza di t su GA e GF.....	76
Figura 84 Andamenti di GA e GF con i parametri scelti	77
Figura 85 Forza di taglio FT con i parametri scelti, con FIN = 30 N	78
Figura 86 Immagine isometrica dell'utensile	79
Figura 87 Immagini isometriche del telaio	80
Figura 88 Immagini isometriche della leva	81
Figura 89 Immagini del porta-lama e dettagli degli elementi ad esso accoppiati.....	82
Figura 90 Elemento di presa con boccola e materiale soft in due viste diverse	82
Figura 91 Immagine dei componenti prodotti tramite processo di fabbricazione additiva: telaio, leva, porta-lama, elemento di presa e battenti per la regolazione delle due molle	84
Figura 92 Molla 1, classica molla a compressione per forbici da potatura [19].....	84
Figura 93 Foto del banco di misura della rigidità della molla 1	85
Figura 94 Molla a compressione utilizzata tra l'elemento di presa e quello di taglio [19]	85
Figura 95 Lama simile a quella acquistata, a sinistra [foto tratta da: https://www.memigavi.it/prodotto/lama-ricambio-forbice-speedy-campagnola], e lama tagliata, a destra	85
Figura 96 Foto di due inserti filettati: M2x04x3.6, a sinistra, e M4x5.8x6.3, a destra.....	86
Figura 97 Foto del cuscinetto flangiato IGUS. Foto presa da https://it.rs-online.com/	86
Figura 98 Vista esplosa del sottoassieme Telaio	87
Figura 99 Viste aggiuntive del sottoassieme Telaio con il telaio posto in trasparenza	87
Figura 100 Vista esplosa del sottoassieme Leva	88
Figura 101 Viste aggiuntive del sottoassieme Leva con la leva posta in trasparenza	88
Figura 102 Sottoassieme Porta-lama nella vista esplosa e nella vista isometrica con il porta-lama messo in trasparenza.....	89
Figura 103 Sottoassieme Elemento di presa	89
Figura 104 sottoassiemi reali dell'elemento di presa, a sinistra, e dell'elemento di taglio (porta-lama), a destra.....	90
Figura 105 Vista laterale e isometrica del sottoassieme leva	90
Figura 106 Vista dei due lati del sottoassieme telaio.....	90
Figura 107 Foto del prototipo nelle due viste laterali	91

Figura 108 vista laterale dell'assieme dell'utensile e del gripper nella configurazione di gripper aperto e chiuso.....	92
Figura 109 Assieme dell'utensile sul gripper Kinova aperto	93
Figura 110 Assieme dell'utensile sul gripper Kinova completamente chiuso	93
Figura 111 Immagine del porta-utensile e del suo accoppiamento con il meccanismo di presa e di taglio.....	94
Figura 112 Sequenza di immagini della fase di presa automatica.....	95
Figura 113 Sequenza di foto dedicata al taglio del campione vegetativo.....	96
Figura 114 Sequenza di foto che illustrano il funzionamento dell'utensile sul gripper	97
Figura 115 Modello del dito	101
Figura 116 Dettaglio del modello	101
Figura 117 Modello del meccanismo sottoposto alle forze FF, FR e FS	107
Figura 118 Dettaglio del modello della falange prossimale	108
Figura 119 Dettaglio del modello della falange distale	112
Figura 120 (a) Dito smontato dal gripper; (b) Componenti 5 e 2 con la molla estratta dal meccanismo; (c) Dettaglio della molla a pacco.....	114
Figura 121 Grafico della forza elastica in funzione della variazione di allungamento della molla .	115
Figura 122 Schema per la misurazione della rigidità torsionale della cerniera virtuale E	116
Figura 123 Grafico della curva sperimentale della coppia applicate alla cerniera E in funzione della variazione angolare del <i>link</i> e.....	117

Indice delle Tabelle

Tabella 1 Valori dei parametri del dito del gripper Kinova	14
Tabella 2 Angoli limite del modello del dito	14
Tabella 3 Parametri del dettaglio della falange prossimale	15
Tabella 4 Parametri della falange prossimale e distale	24
Tabella 5 Risultati delle prove sperimentali sulla forza di spinta dell'attuatore del dito del gripper Kinova Jaco2	28
Tabella 6 Risultati sperimentali della forza del gripper con la falange prossimale in posizione aperta	47
Tabella 7 Risultati sperimentali della forza del gripper con la falange prossimale in posizione chiusa	47
Tabella 8 Parametri del meccanismo e del gripper	56
Tabella 9 Valori dei parametri nell'accoppiamento del gripper con l'utensile.....	56
Tabella 10 Dati sulla prova sperimentale della forza di taglio	59
Tabella 11 Parametri Leva (<i>link 2</i>)	66
Tabella 12 Parametri Telaio (<i>link 1</i>)	66
Tabella 13 Parametri Porta-lama (<i>link 4</i>).....	66
Tabella 14 Parametri Elemento di presa	66
Tabella 15 Variabili del meccanismo.....	66
Tabella 16 Parametri dell'utensile	77
Tabella 17 Parametri della falange prossimale	108
Tabella 18 Valori dei parametri della falange distale	113
Tabella 19 Dati della molla nel meccanismo del dito	115
Tabella 20 Valori sperimentali della prova di rigidezza della molla del dito	116
Tabella 21 Dati per il calcolo della rigidezza torsionale della cerniera virtuale E	116
Tabella 22 Valori sperimentali della prova di rigidezza torsionale della cerniera virtuale E.....	118

1 Introduzione

Nelle ultime decadi, l'agricoltura di precisione (PA) si è affermata come una soluzione promettente per affrontare i cambiamenti climatici e la crescente domanda di cibo in modo efficiente [3-5], riducendo anche i costi e lo spreco di risorse. L'agricoltura di precisione si basa sull'utilizzo di avanzate tecnologie per ottimizzare la gestione delle colture e migliorare la produttività agricola.

L'impiego sempre più importante della tecnologia al servizio dell'agricoltura è in linea con i "Sustainable Development Goals" (SDGs) [2] adottati da tutti gli Stati membri delle Nazioni Unite (ONU) nel 2015, come parte dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile. Secondo le ultime proiezioni dell'ONU, la popolazione mondiale potrebbe crescere in modo vertiginoso nei prossimi decenni, raggiungendo circa 8,5 miliardi nel 2030 e 9,7 miliardi nel 2050. A quel punto, potrebbe essere necessario l'equivalente di 3 pianeti per fornire le risorse necessarie per sostenere gli attuali stili di vita [1]. In particolare, il 12° dei 17 SDGs è interamente focalizzato sulla risoluzione di queste problematiche, tramite modelli di produzione sostenibile e migliorata. Entro il 2030 gli obiettivi sono: raggiungere la gestione sostenibile e fare un uso efficiente delle risorse naturali, dimezzare lo spreco alimentare globale pro capite a livello di vendita al dettaglio e durante i processi di produzione, e infine ridurre la produzione di rifiuti attraverso la prevenzione, la riduzione, il riciclaggio e il riutilizzo.



Figura 1 SDGs: Sustainable Development Goals [1,2]

Nonostante la produzione agricola sia aumentata significativamente grazie all'automazione, ci sono ancora diverse aree in cui l'impiego di macchine intelligenti può aiutare gli esseri umani, liberandoli da attività ripetitive e che richiedono molto tempo. L'agricoltura di precisione basa le sue attività sulla

raccolta e la rielaborazione dei dati: sono state proposte diverse soluzioni per il rilevamento ed il monitoraggio dei campi agricoli per raccogliere una vasta gamma di dati provenienti dalla coltura e dal suolo, al fine di fornire informazioni sullo stato di maturazione e sul contenuto di nutrienti.

Un'attenzione particolare è stata rivolta ai sistemi robotici mobili che possono operare autonomamente, senza la necessità di un controllo umano diretto. Questi sistemi sono suddivisi in due categorie principali: i veicoli aerei senza pilota (AGV) e i veicoli terrestri senza pilota (UGV), a seconda del loro metodo di locomozione [5]. Tra questi, gli UGV offrono un notevole vantaggio poiché sono in grado di superare le semplici attività di rilevamento e monitoraggio e consentono un'interazione diretta con l'ambiente circostante. Questo permette loro di eseguire una serie di compiti agricoli tradizionali, come la semina, l'erpicoltura, la potatura e la raccolta, contribuendo così ad automatizzare e ottimizzare le operazioni agricole.

1.1 Dispositivi robotici per Agricoltura di Precisione

Al giorno d'oggi, sono disponibili vari esempi di robot utilizzati nell'agricoltura di precisione. Se ne riportano alcuni esempi, suddivisi per area di competenza.

1.1.1 Raccolta dati

La prima categoria di robot utilizzati nell'agricoltura si concentra sulla raccolta dei dati. Questi robot sono appositamente progettati per raccogliere informazioni cruciali, monitorando la condizione del terreno e delle colture. Ad esempio, VinBot [6], rappresentato in Figura 2, è un robot mobile autonomo che utilizza una serie di sensori per catturare e analizzare immagini e dati tridimensionali dei vigneti. VinBot è in grado di determinare il rendimento dei vigneti e condividere informazioni dettagliate con i viticoltori. Questo tipo di robot è parte integrante della viticoltura di precisione (PV) che mira a migliorare la qualità dei vini europei. I viticoltori possono utilizzare queste informazioni per prendere decisioni informate sulla gestione delle colture e ottimizzare il processo di raccolta, garantendo che ogni area del vigneto venga raccolta al momento ottimale di maturazione dell'uva, migliorando così la qualità del vino.



Figura 2 Esempio di robot per la raccolta dati: robot VinBot per la raccolta dati nei vigneti

1.1.2 Taglio/Potatura

Un'altra categoria di robot utilizzati nell'agricoltura di precisione è rappresentata da quelli specializzati nel taglio e nella potatura delle piante. Questi robot sono progettati per eseguire compiti come la potatura degli alberi da frutto o la rimozione delle parti indesiderate delle piante, contribuendo a migliorarne la salute e la produttività. Un esempio significativo è il robot di potatura e taglio delle piante in Figura 3 (a), sviluppato presso la Washington State University [7,8], che integra un braccio robotico con strumenti specializzati per effettuare tagli precisi e mirati. Un altro esempio è il TrimBot2020 [9,10] in Figura 3 (b). Questi robot sono in grado di riconoscere e selezionare le parti delle piante da potare, garantendo un'azione accurata e minimizzando il danno alle colture. Inoltre, l'utilizzo di robot per queste attività riduce il rischio di errori umani ed il tempo impiegato, aiutando gli agricoltori.



(a)



(b)

Figura 3 (a) Sistema robotico per il taglio di rami [7], (b) TrimBot per potatura dei cespugli [8]

1.1.3 Irrorazione

Un'altra categoria di robot è rappresentata dai sistemi robotici specializzati nell'irrorazione delle colture. Questi robot sono progettati per applicare in modo mirato e controllato prodotti chimici o biologici per la protezione delle piante. Utilizzando sensori e algoritmi avanzati, sono in grado di rilevare e identificare le piante, calcolare la quantità ottimale di prodotto da spruzzare e distribuirlo in modo uniforme sulle colture. Questa precisione nell'applicazione dei prodotti chimici riduce al minimo il rischio di sovra/sotto-irrigazione e contribuisce a una gestione più sostenibile delle risorse. Inoltre, automatizzando queste attività si riduce l'esposizione degli agricoltori ai prodotti chimici, migliorando la sicurezza e la salute sul campo. Alcuni esempi sono il Di-wheel [11], sviluppato presso l' "Australian center for Field robotics", in Figura 4 (a), l'Agribot [5,12] in Figura 4 (b) ed il Savsar [5,12], in Figura 4 (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4 Robot dedicati all'irrorazione delle piante. (a) Di-wheel [11], (b) Agribot [12] e (c) Savsar [12]

1.1.4 Presa

Un'altra categoria è rappresentata dai sistemi robotici specializzati nella presa dei campioni vegetativi, come frutta e verdura. Utilizzando bracci robotici e sistemi di visione avanzati, questi robot sono in grado di individuare e selezionare i prodotti maturi e di prenderli con delicatezza senza danneggiarli. Questo processo automatizzato di raccolta dei campioni consente di ottimizzare i tempi e le risorse impiegate, riducendo gli sprechi e aumentando la resa complessiva delle colture. In Figura 5 (a) [13] è riportato un robot per la raccolta delle fragole, progettato presso la "Essex University". Con lo stesso

obiettivo è stato realizzato il robot in Figura 5 (b) [5,14]. In Figura 5 (c) viene mostrato il robot Aigritec [15] in grado di afferrare e staccare le mele dal ramo ruotando velocemente il polso. In Figura 5 (d) è possibile osservare un robot della *Fieldwork robotics* [16] alle prese con la delicata raccolta di un lampone. Infine, come ultimo esempio, in Figura 5 (e) è mostrato Sweeper [17], robot specializzato nella raccolta dei peperoni.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5 Esempi di robot specializzati nella presa di campioni vegetativi. (a) Robot per la raccolta delle fragole [13], (b) robot per la raccolta delle fragole [14], (c) robot per la raccolta delle mele [15], (d) robot per la raccolta dei lamponi [16], (e) robot per la raccolta dei peperoni [17]

1.2 Agri.q

Agri.q è un veicolo terrestre senza equipaggio (Unmanned Ground Vehicle, UGV), che rientra nelle applicazioni della robotica impiegata per agricoltura di precisione [18,19]. È stato sviluppato presso il PIC4SeR (Politecnico Interdipartimental Centre for Service Robotics): un centro interdipartimentale del Politecnico di Torino, che ha l'obiettivo di sviluppare soluzioni di robotica di servizio utilizzando diversi campi di conoscenza. Questo rover, illustrato in Figura 6, è stato sviluppato per compiere, insieme ad un drone (UAV: Unmanned Aerial Vehicle), operazioni di monitoraggio e mappatura delle viticole e, tramite un braccio robotico commerciale (Kinova modello Jaco 2), compiere operazioni di raccolta campioni sfruttando specifiche pinze presenti sul veicolo oppure applicare fertilizzante.



Figura 6 Foto del rover Agri.q nel suo scenario applicativo [19]

Il rover Agri.q è equipaggiato con un set di sensori di visione e dispone di una piattaforma orientabile utilizzata per l'atterraggio dei droni. Su questa piattaforma sono montati dei pannelli solari che permettono l'accumulo di energia per il veicolo. La capacità di orientare la piattaforma rispetto al sistema di movimentazione è fondamentale per garantire una superficie di atterraggio piana per i droni in qualsiasi condizione del terreno, specialmente nelle vigne dove il terreno può essere irregolare e con diverse pendenze. Qualora non servisse il drone, questa tecnologia permetterebbe di orientare i pannelli verso la sorgente di luce per ottimizzare la ricezione di energia.

Il sistema di movimentazione del rover è composto da due unità motrici poste sull'asse anteriore, ciascuna con una coppia di ruote montate su un bilanciere apposito che assicura il contatto con il terreno anche in presenza di irregolarità. Sull'asse posteriore, invece, sono presenti altre quattro ruote motrici che vengono attivate solo quando è necessario affrontare terreni con pendenze ripide. Il veicolo è completato da un braccio robotico, il Kinova Jaco 2, utile per interagire con la vigna.

Il braccio robotico Jaco2 [21] è un manipolatore ridondante con 7 gradi di libertà, collegato a un telaio mobile che offre uno spazio di lavoro quasi sferico, come mostrato nella Figura 7. Grazie alla sua ridondanza cinematica, il braccio può muoversi mantenendo la posizione del polso invariata, offrendo maggiore flessibilità nei movimenti e facilitando la navigazione tra i rami della vigna.

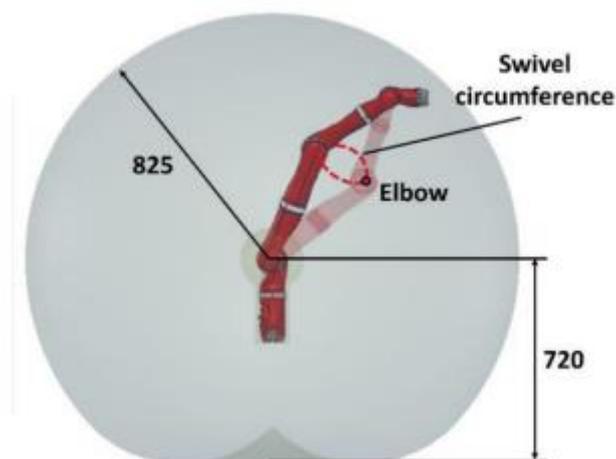


Figura 7 Volume di lavoro del braccio robotico Kinova Jaco 2 [19]

Il rover ed il braccio robotico possono assumere diverse posizioni. In Figura 8 se ne riportano alcune, dove è possibile osservare il braccio, che può raggiungere la parte laterale del rover (a), il terreno (b), l'altezza massima di circa 2 m, azionando il movimento della piattaforma (c) e un drone atterragli vicino (d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 8 Foto del veicolo Agri.q 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 [19]

L'approccio comune per lo sviluppo di sistemi robotici nell'agricoltura di precisione è proprio l'integrazione di una base mobile con un manipolatore robotico seriale. A seconda dell'applicazione specifica e della coltura, il braccio può essere dotato di un attrezzo personalizzato per il compito richiesto, sostituendo il tradizionale gripper del braccio e aprendo le porte a molte ricerche su sistemi personalizzati, sia deformabili (chiamati soft gripper) che rigidi, classificabili in base al tipo di azionamento, al tipo di meccanismo e alla modalità di presa.

1.3 Punti di miglioramento ed obiettivi del lavoro

Lo stato dell'arte sugli attrezzi per l'agricoltura di precisione mostra come un gran numero di soluzioni miri a sostituire il gripper commerciale standard con uno personalizzato, che eventualmente integra telecamere o altri componenti di rilevamento.

Alcuni esempi di robot con l'*end-effector* personalizzato per una specifica attività sono il robot per la raccolta delle mele, Figura 9 (a), e dei lamponi, Figura 9 (b), o i robot per la potatura dei cespugli, Figura 9 (c).

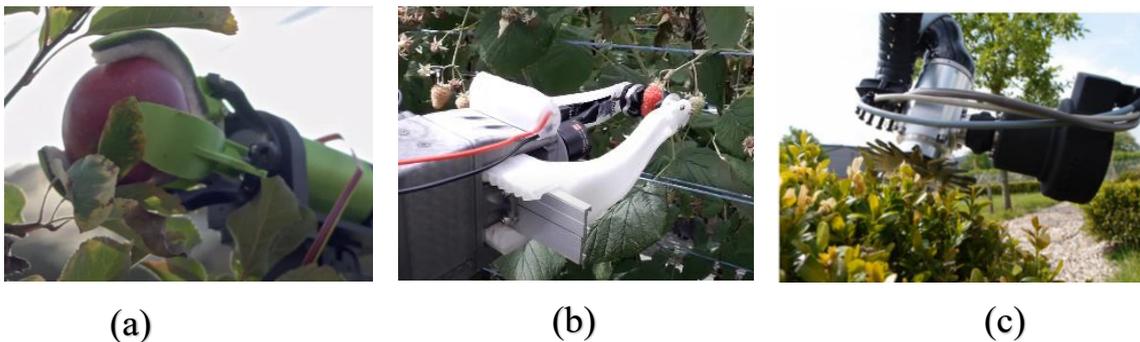


Figura 9 Esempi di robot con l'*end-effector* personalizzato. (a) Robot per la raccolta delle mele [15], (b) robot per la raccolta dei lamponi [16], (c) robot per la potatura dei cespugli [8]

Le necessità di un utensile personalizzato per ogni tipo di applicazione, tuttavia, implica poca adattabilità e flessibilità da parte del sistema robotico. Al fine di risolvere tale aspetto, nella presente tesi verrà descritta la progettazione e prototipazione di un utensile per taglio-presa automatica che non necessita di un montaggio sull'organo terminale da parte di un operatore umano. Il principale punto di innovazione e novità del lavoro, dunque, risiede nella capacità, da parte del manipolatore robotico, di effettuare le operazioni di montaggio e smontaggio dell'utensile in maniera automatica, Figura 10.



Figura 10 Sequenza di foto che mostra la presa automatica dell'utensile

2 Analisi cinematica e quasi-statica del gripper

L'analisi cinematica e quasi-statica del gripper robotico a due dita riveste un ruolo fondamentale per comprendere le specifiche funzionali da implementare nella progettazione dell'utensile di presa-taglio. L'obiettivo di questo studio è analizzare le forze che il gripper può esprimere in relazione al grado di chiusura e alla distribuzione delle forze di contatto sulle falangi. Ciò permette di valutare un range ottimale di lavoro al fine di dotare il gripper di uno strumento di raccolta adeguato. Per ottenere la caratterizzazione del gripper, è stata prima effettuata un'analisi cinematica del meccanismo che controlla la chiusura e l'apertura delle due dita. Successivamente, è stata eseguita un'analisi quasi-statica per ottenere i diagrammi di forza. Attraverso lo studio dettagliato della cinematica e della quasi-statica del gripper, sarà possibile acquisire una maggiore conoscenza sulle prestazioni e sulle potenzialità della mano robotica a due dita. Queste informazioni sono fondamentali per effettuare la progettazione di un utensile compatibile, al fine di massimizzare l'efficienza e la precisione delle operazioni di presa.

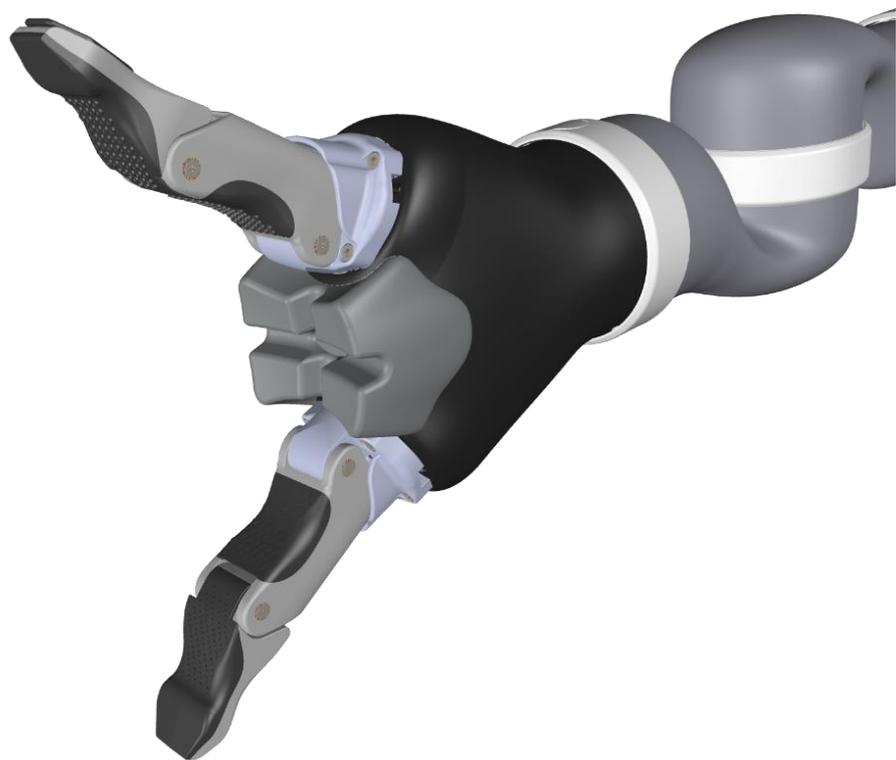


Figura 11 Gripper a due dita del robot a 7dof Kinova Jaco2

2.1 Analisi cinematica del dito

Ogni dito è provvisto di un attuatore lineare a vite senza fine. È quindi possibile concentrare gli studi su un solo dito del gripper, essendo indipendenti l'uno dall'altro.

2.1.1 Descrizione del meccanismo

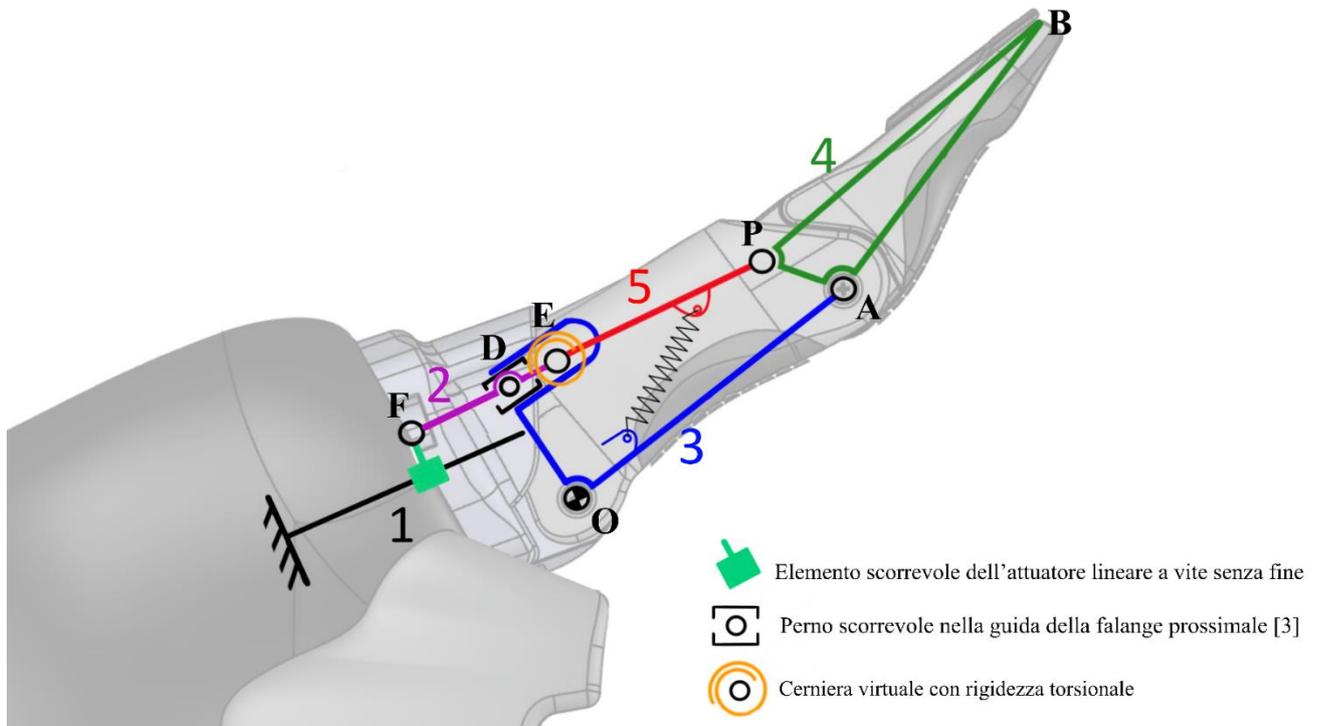


Figura 12 Schema del meccanismo con i 5 componenti evidenziati

Il meccanismo schematizzato in Figura 12 è composto da 5 componenti principali:

- 1) Un attuatore lineare a vite senza fine;
- 2) Un *link*, in viola, collegato al componente 1 per mezzo di una cerniera ed al componente 5 tramite una cerniera virtuale. Quest'ultima impone una piccola resistenza alla rotazione relativa tra i due *link*; Esso è inoltre vincolato a scorrere nella guida del componente 3.
- 3) Un elemento di colore blu, solidale con la falange prossimale del dito robotico;
- 4) Un *link* triangolare verde che rappresenta la falange distale.
- 5) Rappresentato in rosso, si interfaccia con i componenti 2, 3 e 4 rispettivamente per mezzo di una cerniera virtuale, una molla ed una cerniera.

Ruotando la vite, si mette in movimento l'elemento 2, che a sua volta trasmette il moto attraverso un corsoio mobile che scorre all'interno della guida del componente 3. Questo meccanismo permette lo scambio delle forze necessarie per l'apertura e la chiusura della falange prossimale. La falange prossimale è vincolata a ruotare attorno a una cerniera fissa, che è solidale con il gripper.

All'interno del sistema è presente una molla a trazione, tra i componenti 3 e 5. In assenza di un oggetto trattenuto dal gripper, questa molla mantiene il componente 4 nella posizione aperta, impedendo la chiusura della falange distale.

Tuttavia, bloccando la rotazione dell'elemento numero 3, ma mantenendo l'attuatore in funzione, si obbliga il componente 2 a scorrere lungo la guida, trasmettendo il moto al *link* 5 e superando la forza della molla. Ciò provoca la rotazione della falange distale, ossia dell'elemento 4.

In Figura 13 viene riportata una vista laterale del dito con la falange prossimale (3) bloccata e vista in sezione per due configurazioni: falange distale in posizione aperta e chiusa.

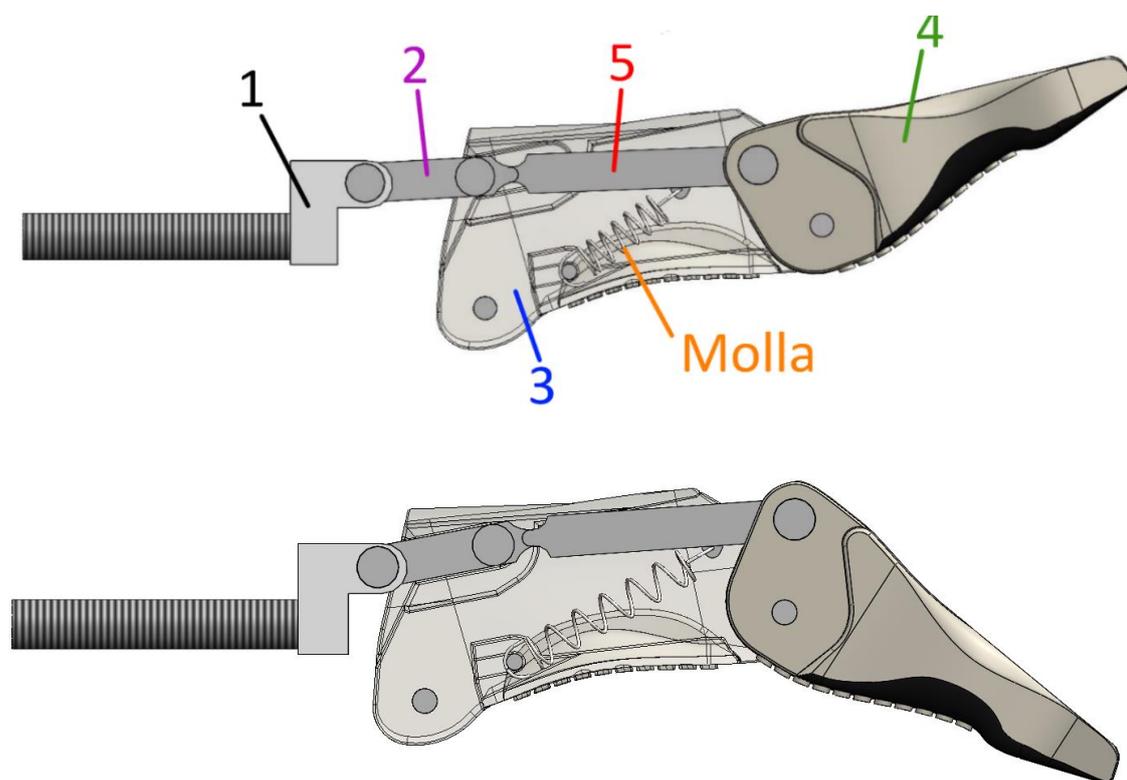


Figura 13 Rappresentazione grafica del dito nella configurazione con la falange distale aperta, sopra, e chiusa, sotto.

2.1.2 Modello cinematico

In Figura 14 si riporta il modello del meccanismo realizzato per lo studio della sua cinematica. Il sistema di riferimento ha origine nella cerniera O solidale al gripper mentre l'asse orizzontale è stato scelto parallelo a quello della vite dell'attuatore.

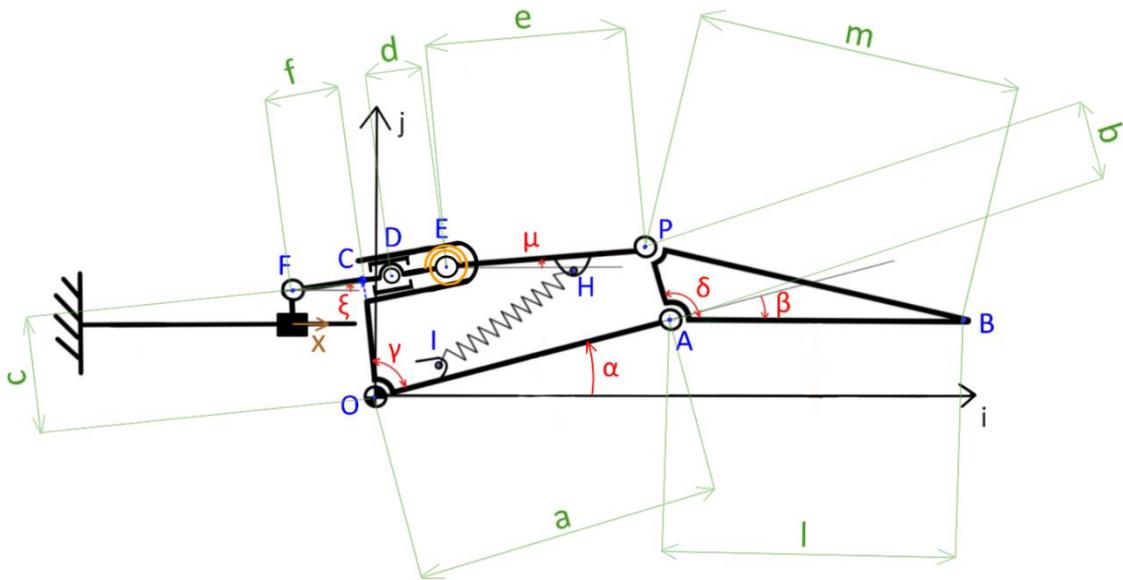


Figura 14 Modello del dito

In Figura 15 è illustrata la grafica 3D dell'assieme reale, con l'indicazione dei punti chiave del modello schematizzato in Figura 14.

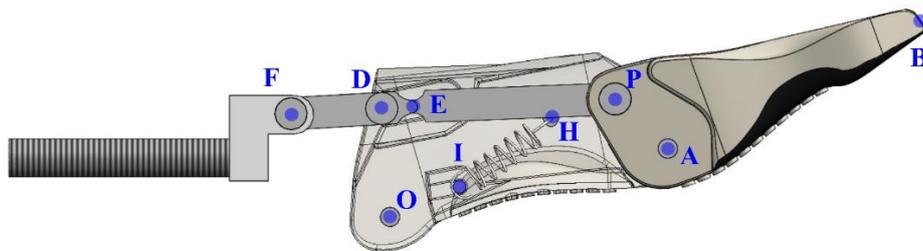


Figura 15 Rappresentazione grafica del dito con l'indicazione dei punti chiave del modello

Si tratta di un sistema a due gradi di libertà: sono stati scelti gli angoli α e β come variabili indipendenti. Gli angoli γ e δ sono fissi mentre ξ e μ variano a seconda della posizione assunta dal dito.

Si riportano di seguito i valori misurati per gli angoli e i *link* del meccanismo:

Tabella 1 Valori dei parametri del dito del gripper Kinova

Parametro	Valore	Unità di misura
$\gamma = B\hat{A}P$	87.1	<i>deg</i>
$\delta = A\hat{O}C$	106	<i>deg</i>
$a = \overline{OA}$	44.10	<i>mm</i>
$b = \overline{AP}$	11.18	<i>mm</i>
$c = \overline{OC}$	16.64	<i>mm</i>
$d = \overline{DE}$	4.50	<i>mm</i>
$e = \overline{EP}$	31.50	<i>mm</i>
$f = \overline{CF}$	14.00	<i>mm</i>
$m = \overline{BP}$	48.00	<i>mm</i>
$l = \overline{AB}$	43.70	<i>mm</i>

Il dito ha i seguenti angoli limite:

Tabella 2 Angoli limite del modello del dito

Parametro	Valore	Unità di misura
α_{max}	13.9	<i>deg</i>
α_{min}	-45.8	<i>deg</i>
β_{max}	36.0	<i>deg</i>
β_{min}	-16.7	<i>deg</i>

In Figura 16 si riporta un dettaglio del meccanismo attraverso il quale è possibile evidenziare il parametro $y = \overline{CD}$ che mostra l'avanzamento del corsoio D nella guida, funzione delle variabili indipendenti α e β . Si introducono in questa figura anche la coordinata $h = F_j$ che è costante, essendo x l'avanzamento della cerniera F parallelo all'asse i . La posizione di partenza di F, con il gripper aperto, è indicata con X_0 .

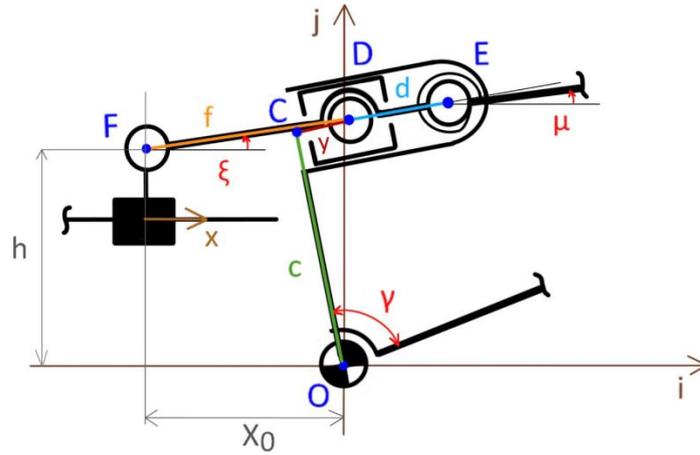


Figura 16 Dettaglio del modello

Tabella 3 Parametri del dettaglio della falange prossimale

Parametro	Valore	Unità di misura
$O\hat{C}D$	90	deg
h	16,00	mm
X_0	15,26	mm

Si vuole trovare una relazione tra lo spostamento x della cerniera F e le variabili α e β . Si calcola il vettore posizione di P attraverso la somma dei vettori posizione di A e di P rispetto ad A :

$$r_p = \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AP} = a * (\cos(\alpha), \sin(\alpha)) + b * (\cos(\alpha - \beta + \delta), \sin(\alpha - \beta + \delta)) \quad (1)$$

Si effettua lo stesso calcolo questa volta passando per le cerniere C , D ed E :

$$r_p = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CD} + \overrightarrow{DE} + \overrightarrow{EP} = c * (\cos(\alpha + \gamma), \sin(\alpha + \gamma)) + y * (\sin(\alpha + \gamma), -\cos(\alpha + \gamma)) + d * (\cos(\xi), \sin(\xi)) + e * (\cos(\mu), \sin(\mu)) \quad (2)$$

In quest'ultima espressione compaiono le variabili incognite μ , ξ e y . Si procede esplicitando il vettore posizione della cerniera D :

$$r_D = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{CD} = c * (\cos(\alpha + \gamma), \sin(\alpha + \gamma)) + y * (\sin(\alpha + \gamma), -\cos(\alpha + \gamma)) \quad (3)$$

Si ottiene lo stesso risultato scrivendo il vettore \overrightarrow{FD} :

$$r_D = \overrightarrow{FD} = (-x_0 + x + f * \cos(\xi), f * \sin(\xi) + h) \quad (4)$$

Dalla componente i di r_D si ricava l'espressione per lo spostamento x della cerniera F, uguagliando l'eq.(3) con l'eq.(4):

$$x(\alpha, \beta) = x_0 - f * \cos(\xi) + c * \cos(\alpha + \gamma) + y * \sin(\alpha + \gamma) \quad (5)$$

Mentre dalla sua componente j si ottiene la variabile y :

$$y = \frac{c * \sin(\alpha + \gamma) - f * \sin(x) - h}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (6)$$

Restano ancora da trovare le variabili μ e ξ . Si confrontano le componenti lungo i e lungo j di r_P dell'eq.(1) ed eq.(2)

$$\begin{aligned} a * \cos(\alpha) + b * \cos(\alpha - \beta + \delta) = c * \cos(\alpha + \gamma) + c * \tan(\alpha + \gamma) * \sin(\alpha + \gamma) + \\ - f * \tan(\alpha + \gamma) * \sin(\xi) - h * \tan(\alpha + \gamma) + \\ + d * \cos(\xi) + e * \cos(\mu) \end{aligned} \quad (7)$$

Si effettua una sostituzione introducendo il parametro B, per mettere in evidenza i soli termini che hanno una dipendenza da μ o ξ :

$$\begin{aligned} B = a * \cos(\alpha) + b * \cos(\alpha - \beta + \delta) - c * \cos(\alpha + \gamma) + c * \tan(\alpha + \gamma) \sin(\alpha + \gamma) + \\ + h * \tan(\alpha + \gamma) \end{aligned} \quad (8)$$

$$B = d * \cos(\xi) - f * \tan(\alpha + \gamma) * \sin(\xi) + e * \cos(\mu) \quad (9)$$

Allo stesso modo, per r_{Pj} :

$$\begin{aligned} a * \sin(\alpha) + b * \sin(\alpha - \beta - \delta) = c * \sin(\alpha + \gamma) - c * \sin(\alpha + \gamma) + f * \sin(\xi) + h + \\ + d * \sin(\xi) + e * \sin(\mu) \end{aligned} \quad (10)$$

$$A = a * \sin(\alpha) + b * \sin(\alpha - \beta + \delta) - h \quad (11)$$

$$A = (f + d) * \sin(\xi) + e * \sin(\mu) \quad (12)$$

Si ottiene quindi un sistema a due equazioni in due incognite, le variabili μ e ξ :

$$\begin{cases} A = (f + d) * \sin(\xi) + e * \sin(\mu) \\ B = d * \cos(\xi) - f * \tan(\alpha + \gamma) * \sin(\xi) + e * \cos(\mu) \end{cases} \quad (13)$$

La soluzione di questo sistema non è immediata poiché entrambe le variabili sono incluse all'interno di funzioni trigonometriche. Per una risoluzione dettagliata, con tutti i passaggi inclusi, si rimanda all'appendice (7.1).

Per ogni configurazione del meccanismo e quindi per ogni possibile coppia di α e β , note ora ξ e μ , è possibile risalire alla posizione x della cerniera F tramite l'eq.(5). In questo modo si lega l'attuazione al grado di apertura e chiusura del dito.

Si riporta nel grafico in Figura 17 l'andamento x della posizione della cerniera F in funzione di α .

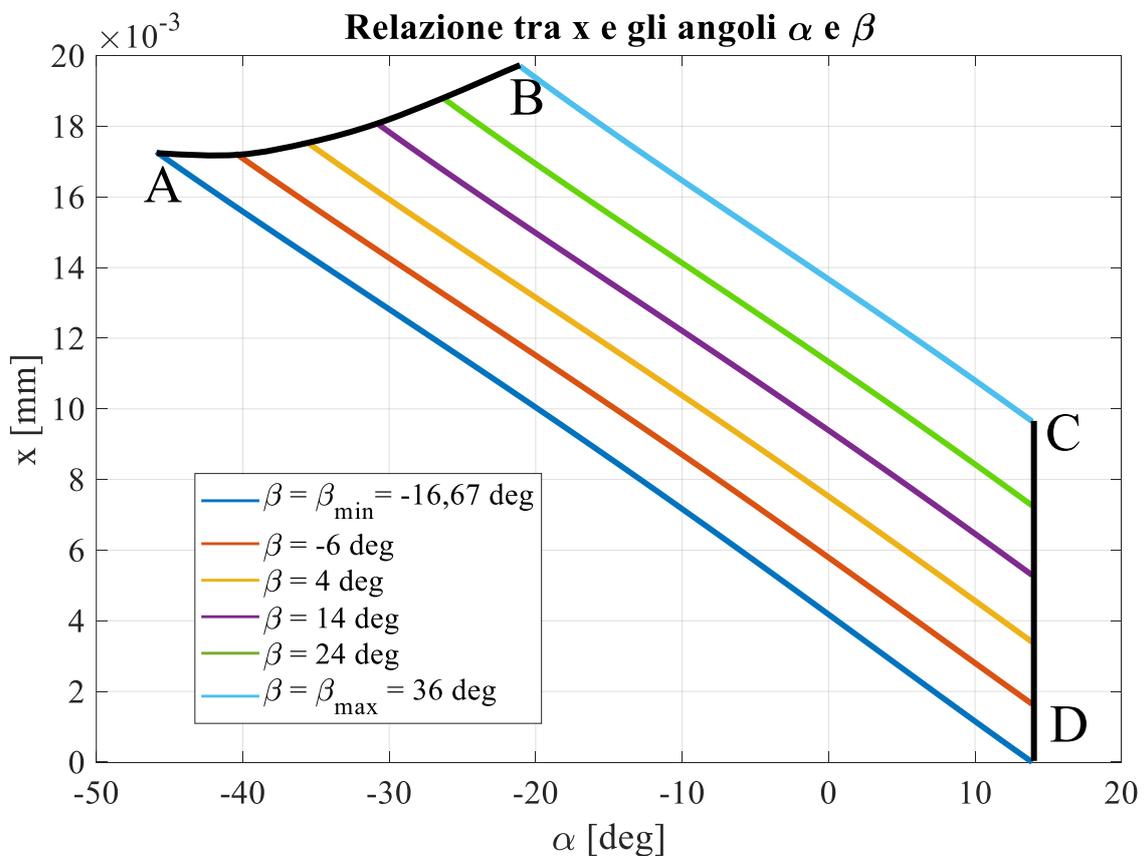


Figura 17 Andamento di x in funzione di α

Si evidenzia quindi un'area che rappresenta le possibili configurazioni del dito. Si osserva che essendo il dito sottoattuato, a due gradi di libertà, a parità di input x dell'attuatore non è univoca la posizione delle due falangi: il dito può infatti assumere diverse posizioni.

Nei quattro estremi il dito assume le posizioni in Figura 18:

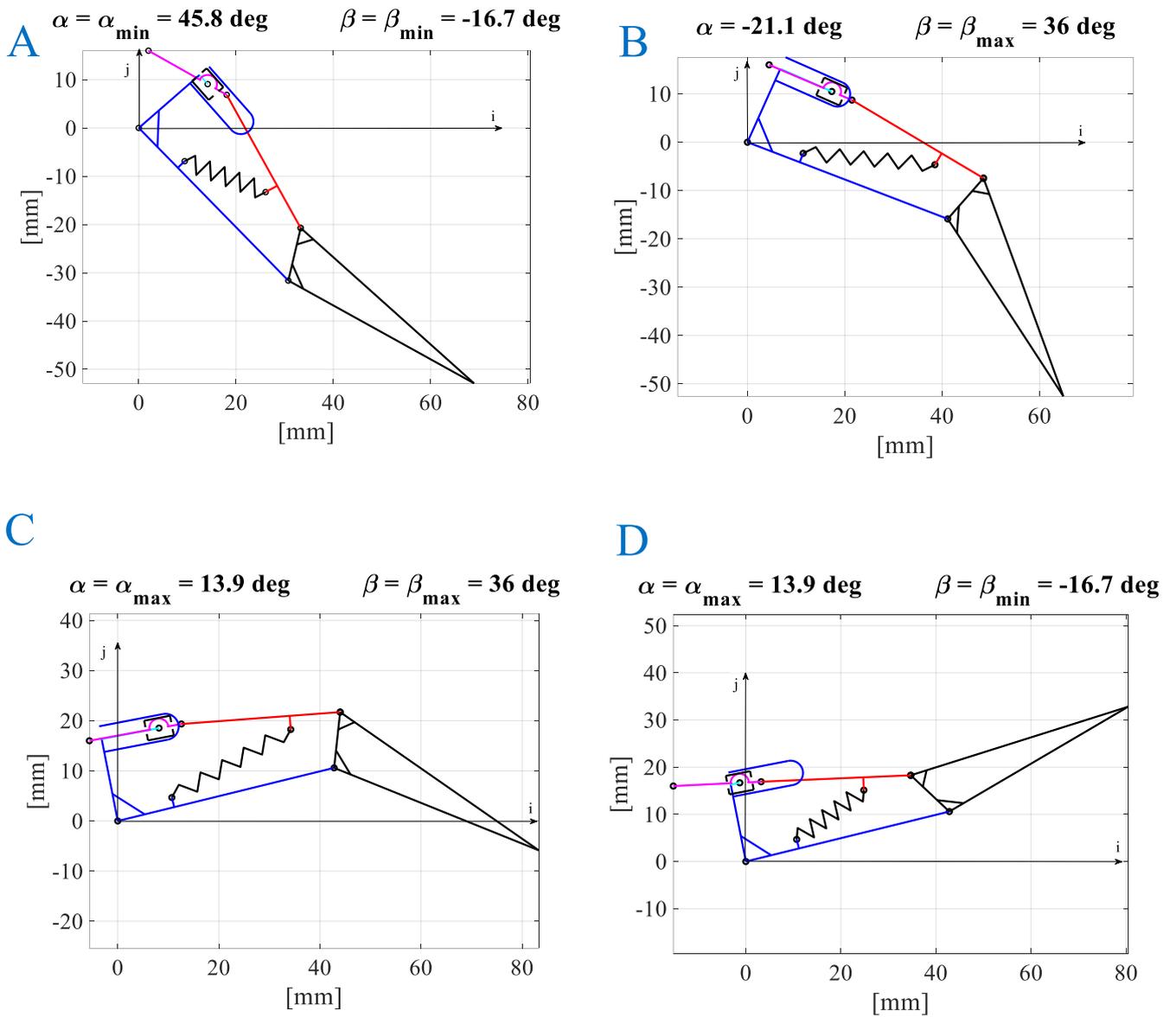


Figura 18 Configurazione del dito nei 4 estremi dell'area ABCD

2.2 Analisi quasi-statica

L'analisi quasi-statica del gripper a due dita sottoattuato è un processo di modellizzazione matematica che permette di prevedere le forze necessarie per afferrare un oggetto o, nel caso in studio, per azionare un meccanismo di presa e di taglio nell'ambito dell'agricoltura di precisione. Questa analisi viene effettuata considerando il gripper in condizioni statiche, cioè con il gripper fermo e con l'oggetto in posizione stabile all'interno delle dita.

Le informazioni legate alla cinematica sono note. Per quanto riguarda la forza dell'attuatore F_F , sono state effettuate delle prove sperimentali atte a stabilirne il valore (paragrafo 2.2.3). Anche la rigidità della molla, tra l'elemento 3 e l'elemento 5, e la rigidità torsionale della cerniera E, visibili in Figura 19, sono state valutate sperimentalmente. I dettagli delle misure sono riportati in appendice (7.3).

Si riportano di seguito le assunzioni che sono state fatte prima di iniziare l'analisi quasi-statica, facendo riferimento alla Figura 14 e alla Figura 19:

- Le forze di contatto tra le falangi e l'oggetto in presa hanno direzione perpendicolare ai *link* a ed l ;
- La forza di contatto F_S tra la falange prossimale e l'oggetto è concentrata ad una distanza $d = \frac{a}{2}$ dalla cerniera O;
- La forza di contatto F_R tra la falange distale e l'oggetto è concentrata ad una distanza $d' = \frac{l}{2}$ dalla cerniera A;
- Si trascurano le forze di attrito interne e quelle con l'oggetto in presa;
- Si trascurano le rigidità dei componenti e la loro deformazione elastica.

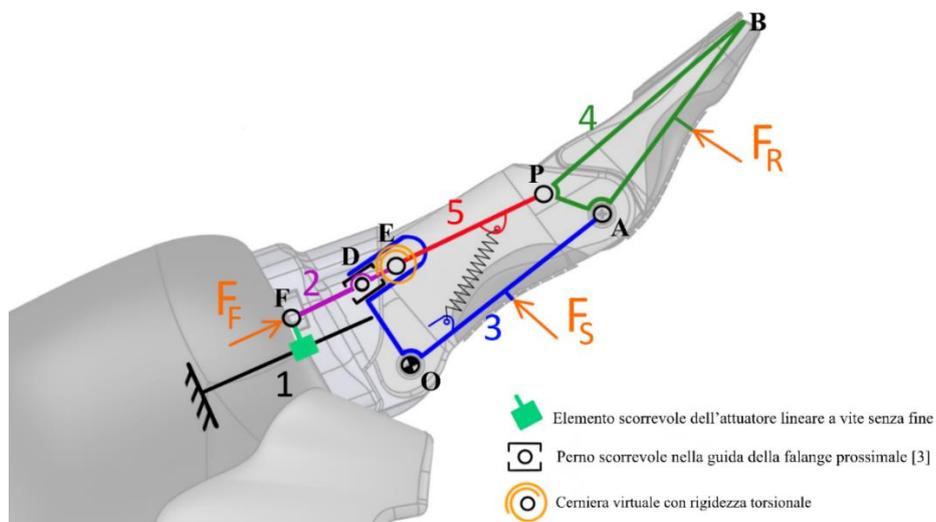


Figura 19 Schema del dito con le forze applicate.

2.2.1 Modalità di presa

Prima di proseguire con l'analisi matematica, si presentano le 4 modalità con cui il gripper può effettuare la presa di un oggetto:

- 1) La presa avviene con le **falangi prossimali**. È presente la forza F_S mentre F_R è nulla: l'oggetto in presa entra in contatto con la falange prossimale bloccandone il moto, ossia fissando l'angolo α . In questa fase l'attuazione vince la forza della molla e porta in rotazione la falange distale fino a raggiungere l'angolo β_{max} , Figura 20.

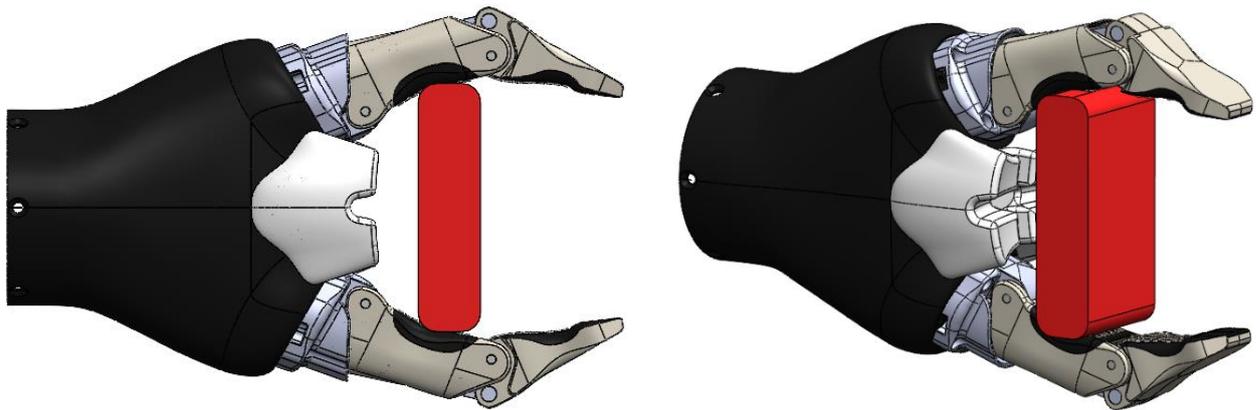


Figura 20 Gripper in presa con le falangi prossimali.

- 2) La presa avviene con le **falangi distali**. È presente la forza F_R mentre in questa configurazione di presa F_S è nulla: l'oggetto rimane pinzato tra le due falangi distali. L'angolo β è fisso e corrisponde a β_{min} ; L'angolo α è tale da permettere la presa dell'oggetto, Figura 21.

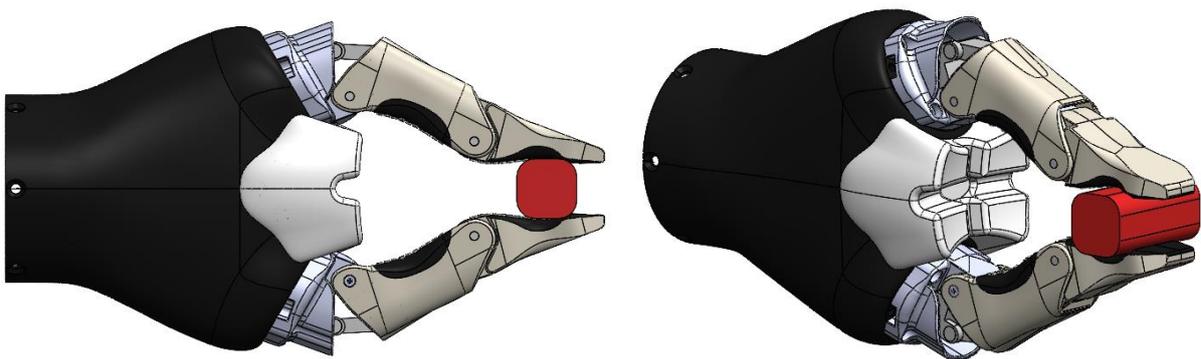


Figura 21 Gripper in presa con le falangi distali.

- 3) Essendo le dita del gripper sottoattuate, può presentarsi il caso in cui l'afferraggio avvenga con le sole **falangi distali** ma con l'angolo $\beta = \beta_{max}$, a differenza del secondo caso dove $\beta = \beta_{min}$.

Il gripper comincia a chiudersi con le dita distese ma una volta che le falangi distali entrano in contatto con l'oggetto si ha cedevolezza delle dita stesse, si vince la forza della molla e si assume la configurazione mostrata in Figura 22.



Figura 22 Gripper in presa con le falangi distali ma si ha cedevolezza delle dita sottoattuate.

- 4) La presa avviene con **entrambe le falangi**. Sono presenti sia la forza F_S che la forza F_R : l'oggetto entra in contatto prima con le falangi prossimali e poi la presa viene serrata dalle falangi distali. L'angolo β può assumere un qualsiasi valore tra il β_{min} e il β_{max} a seconda della geometria dell'oggetto; Anche l'angolo α è determinato dall'oggetto, Figura 23.

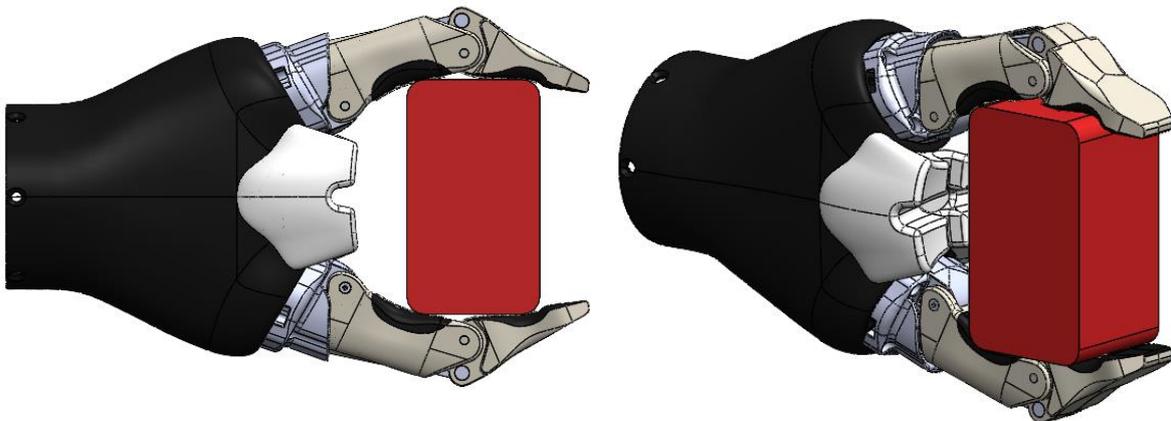


Figura 23 Gripper in presa con entrambe le falangi.

2.2.2 Analisi quasi statica del dito con il PLV

Per trovare le forze agenti sulle falangi prossimale e distale del dito si è utilizzato il principio dei lavori virtuali (PLV), il quale stabilisce che, in un sistema meccanico in equilibrio statico, il lavoro totale svolto dalle forze virtuali sul sistema deve essere nullo.

$$\sum_{j=1}^m F_j \delta q_j = 0 \quad (14)$$

Dove q è la coordinata generalizzata del sistema e F_j è la j -esima risultante delle m forze agenti in direzione q_j .

Il lavoro di F_j relativo allo spostamento infinitesimo δq_j è:

$$\delta W_j = F_j \delta q_j \quad (15)$$

Si ha quindi che:

$$\frac{\partial V}{\partial q_k} = Q_k \quad (16)$$

Dove V l'energia potenziale mentre q_k è la coordinata lagrangiana:

$$q_k = \begin{cases} \alpha \\ \beta \end{cases} \quad (17)$$

Q_k sono le forze generalizzate. Nel caso in studio sono rappresentate dalla forza dell'attuatore F_F e dalle forze esterne F_R e F_S che agiscono sulle falangi del dito.

L'energia potenziale V è la somma del contributo dato dalla molla, di rigidezza $k_1 \left[\frac{N}{m} \right]$, e dalla cerniera virtuale E , di rigidezza $k_2 \left[\frac{Nm}{rad} \right]$

$$V = V_1 + V_2 \quad (18)$$

Con

$$V_1 = \frac{1}{2} k_1 (\Delta l)^2 \quad (19)$$

$$V_2 = \frac{1}{2} k_2 (\Delta \mu)^2 \quad (20)$$

Il primo termine dell'eq.(54) è quindi:

$$\frac{\partial V}{\partial q_k} = \frac{\partial}{\partial q_k} \left(\frac{1}{2} k_1 (\Delta l)^2 + \frac{1}{2} k_2 (\Delta \mu)^2 \right) = \left(k_1 \Delta l \frac{\partial \Delta l}{\partial q_k} + k_2 \Delta \mu \frac{\partial \Delta \mu}{\partial q_k} \right) \quad (21)$$

Si riportano in Figura 25 e in Figura 26 i dettagli dei modelli che hanno permesso di risolvere le equazioni del PLV, mentre in Tabella 4 sono segnati i valori dei vari parametri:

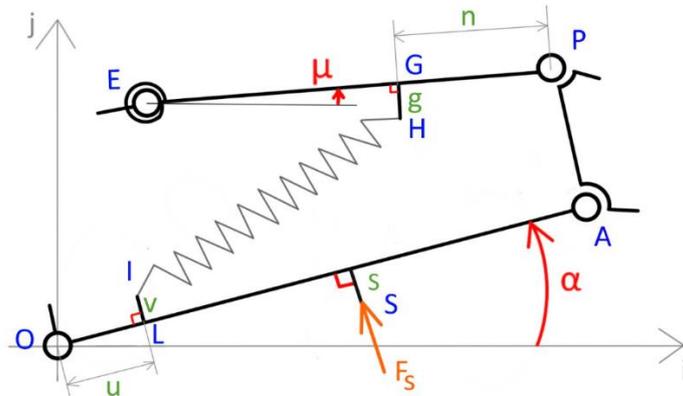


Figura 25 Dettaglio del modello della falange prossimale

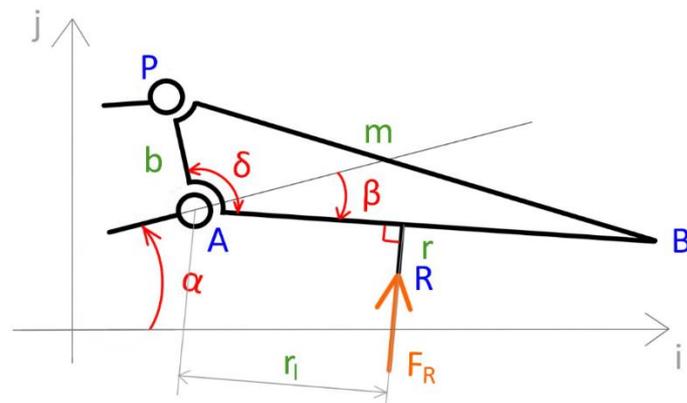


Figura 26 Dettaglio del modello della falange distale

Tabella 4 Parametri della falange prossimale e distale

Parametro	Valore	Unità di misura
n	10	mm
g	2.7	mm
s	2.1	mm
u	11.5	mm
v	1.97	mm
r_l	21.9	mm
r	4.9	mm

Ora che sono stati definiti in generale i termini dell'eq.16, è possibile studiare nel dettaglio le varie modalità di presa. Prima di procedere, è necessario stabilire il valore della forza di attuazione F_F tramite delle misure sperimentali.

2.2.3 Misurazione sperimentale della forza di attuazione

Lo scopo di questa prova sperimentale è quello di rilevare la forza di spinta F_F dell'attuatore lineare a vite senza fine. A tal fine, è stato studiato un banco prova in grado di rilevare, mediante un dinamometro, il massimo valore di forza di attuazione. Le misure effettuate hanno infatti il solo scopo di registrare le coppie di spunto, ovvero la forza massima esercitata dall'attuatore.

Il gripper presenta due attuatori uguali, uno per dito:

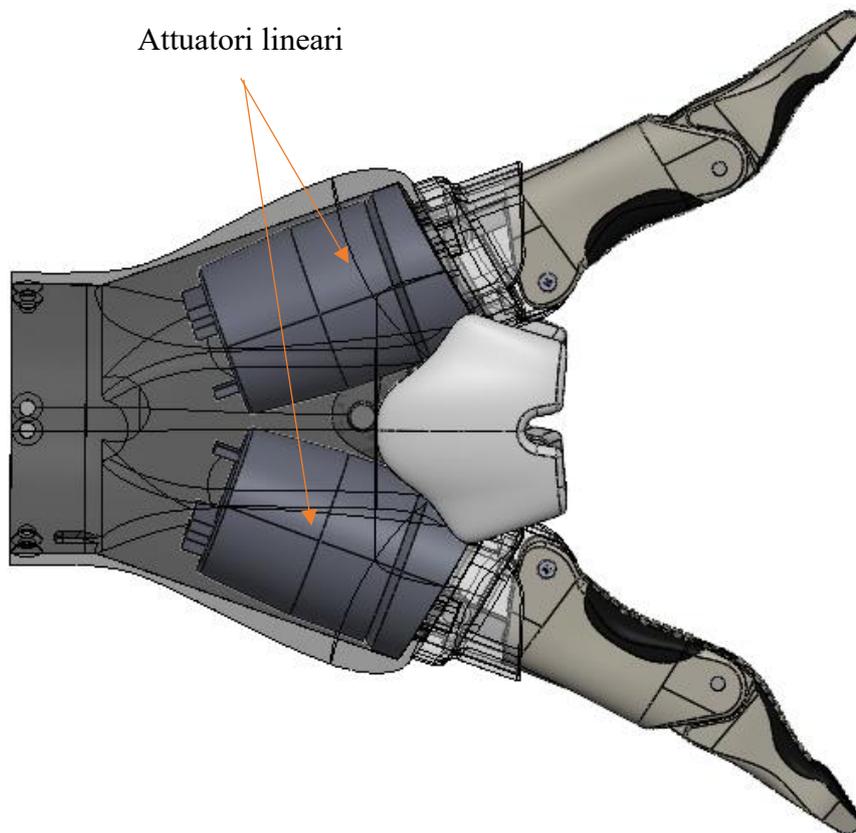


Figura 27 Gripper con i due attuatori in evidenza

Materiale e strumentazione

1. Attuatore lineare del gripper
2. Supporto rigido e forato per l'attuatore - Acciaio
3. Interfaccia sagomata – Tough PLA

4. Vite M9, guida per il sistema di anti-rotazione della vite del motore
5. 2 dadi
6. Vite M2
7. Staffa di anti-rotazione – Tough PLA
8. Dinamometro
9. Spessore per il fissaggio del dinamometro
10. Piastra di staffaggio con scanalature

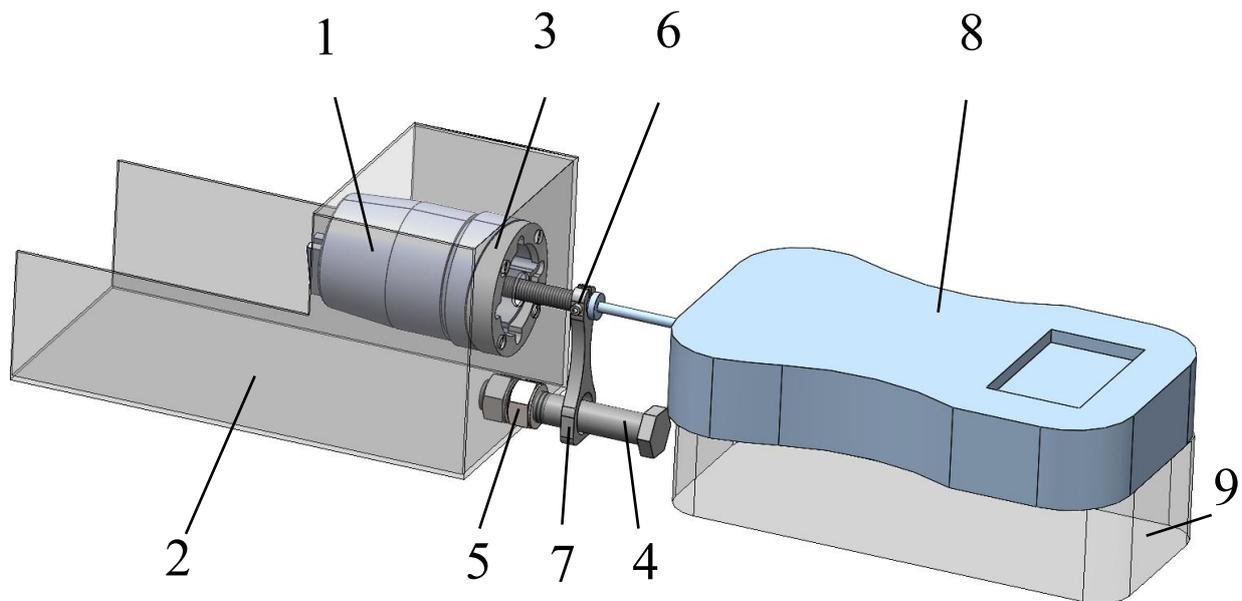


Figura 28 Banco prova attuatore

Descrizione della prova

Il banco prova, rappresentato in Figura 28, è costituito da un attuatore lineare (1) fissato con le sue viti ad un supporto rigido in acciaio (2). La faccia dell'attuatore che accoglie la vite di spinta non è perpendicolare a quest'ultima ma inclinata: per rendere l'asse della vite del motore normale alla faccia forata del supporto è stata realizzata con una stampante 3D un'interfaccia opportunamente sagomata (3), Figura 30. Per impedire alla vite del motore di ruotare all'interno della madrevite si è studiato un sistema di anti-rotazione: tale sistema deve bloccare la rotazione senza assorbire la forza di spinta che andrà ad essere misurata dal dinamometro (8). È presente quindi una vite M9 che viene fissata al supporto (2) tramite due dadi (5). Questa vite viene mantenuta parallela a quella dell'attuatore e serve da guida per la staffa di anti-rotazione (7), dettaglio in Figura 29. Quest'ultima è resa solidale alla vite del motore con la vite M2 (6), è libera di scorrere sul fusto liscio della vite M9 ma ne blocca la rotazione.

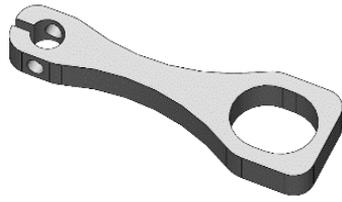


Figura 29 Staffa di anti-rotazione (7)



Figura 30 Interfaccia (3)

Sono state realizzate 30 prove con le seguenti modalità: la punta della vite entra in contatto con il puntale piatto del dinamometro che ne misura la forza di spinta. Vista la necessità di rendere coassiali il puntale e la vite del motore è stato inserito uno spessore forato (9) per rialzare il dinamometro, al quale è stato avvitato. Il supporto rigido (2) e lo spessore (9) sono fissati ad una piastra di staffaggio (10), visibile in Figura 32.

In Figura 31 si riportano il banco prova nella vista laterale, a sinistra, ed un suo dettaglio, a destra.

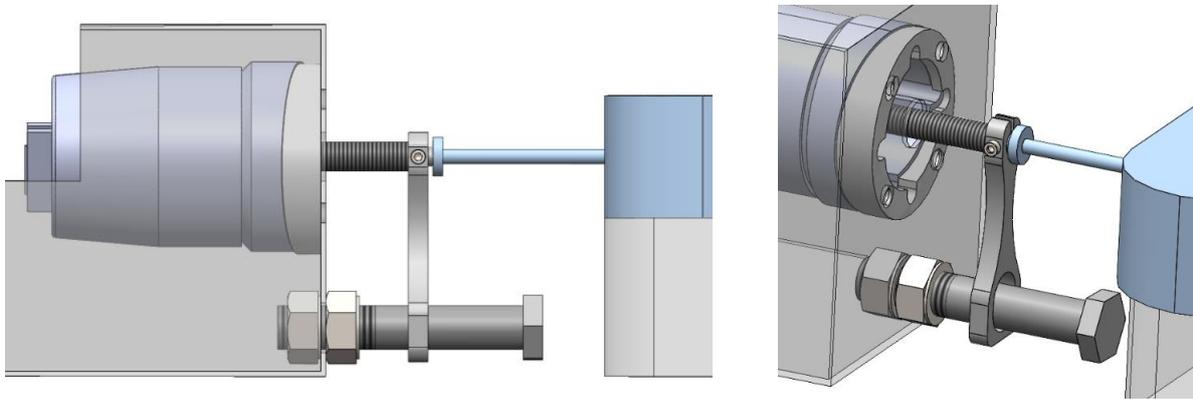


Figura 31 Vista laterale del banco prova, a sinistra - Dettaglio del punto di contatto tra l'attuatore ed il dinamometro, a destra

In Figura 32 è mostrato il banco prova reale:



Figura 32 Fotografia dall'alto del banco prova

Esecuzione delle prove

Sono state fatte 30 rilevazioni. Sono state poi scartate le 5 misurazioni in eccesso e le 5 misurazioni in difetto. Al termine delle prove è stata fatta una media di tutte le rilevazioni.

Si riportano in Tabella 5 i risultati:

Tabella 5 Risultati delle prove sperimentali sulla forza di spinta dell'attuatore del dito del gripper Kinova Jaco2

Prova	F_F [N]	F_F Media [N]
1	141.2	143.3
2	140.5	
3	140.2	
4	144.7	
5	144.2	
6	141.1	
7	144.5	
8	144.2	
9	144.6	
10	144.0	
11	145.8	
12	144.5	
13	145.0	
14	143.1	
15	140.3	
16	144.6	
17	144.6	
18	143.1	
19	143.5	
20	142.6	

2.2.4 Studio delle 4 modalità di presa

Essendo note le equazioni che descrivono la statica del meccanismo e la forza di attuazione F_F è possibile effettuare le semplificazioni per i vari casi, andando ad ottenere una mappatura delle forze esplicitate dal gripper a seconda del tipo di presa e in funzione delle variabili indipendenti α e β .

Presca con le falangi prossimali

In questo primo caso si ha:

- $F_R = 0$;
- $F_S \neq 0$;
- $\beta = \beta_{max}$
- 1 grado di libertà $\rightarrow \alpha$

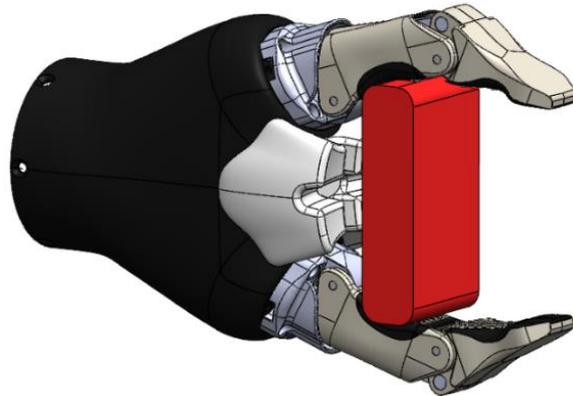


Figura 33 Immagine del Gripper in presa

Il sistema di equazioni del PLV, eq.24 ed eq.25, si semplifica. L'angolo β è fissato pertanto il sistema a due equazioni si riduce ad una sola equazione in funzione di α :

$$-\frac{\partial L}{\partial \alpha} = Q_1 = F_S * \left(-\sin(\alpha) \frac{\partial X_S}{\partial \alpha} + \cos(\alpha) \frac{\partial Y_S}{\partial \alpha} \right) + F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \alpha} \quad (26)$$

La forza sulla falange prossimale risulterà quindi essere:

$$F_S = \frac{-\frac{\partial L}{\partial \alpha} - F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \alpha}}{-\sin(\alpha) \frac{\partial X_S}{\partial \alpha} + \cos(\alpha) \frac{\partial Y_S}{\partial \alpha}} \quad (27)$$

Andando a diagrammare tale forza in funzione di α si ottiene il grafico in Figura 34. La curva mostra un minimo per $\alpha \approx -6 \text{ deg}$ dove $F_S = 102.9 \text{ N}$.

Si osservano inoltre due massimi locali agli estremi del campo di moto, pari a circa:

$$F_S = 113 \text{ N}$$

La variazione di forza è quindi all'incirca di 10N.

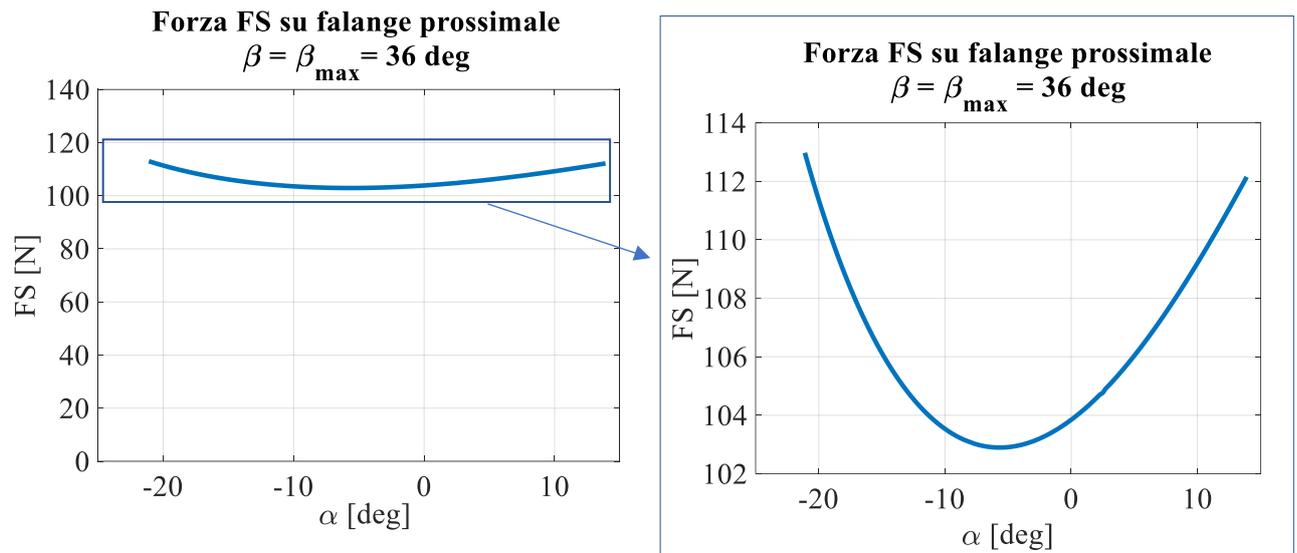


Figura 34 Grafici con l'andamento della forza sulla falange prossimale in funzione dell'angolo α . A destra Dettaglio ingrandito della curva

In Figura 35 si riportano le due configurazioni del dito agli estremi del campo di moto, per visualizzare graficamente la sua posizione e la localizzazione della forza di presa F_S .

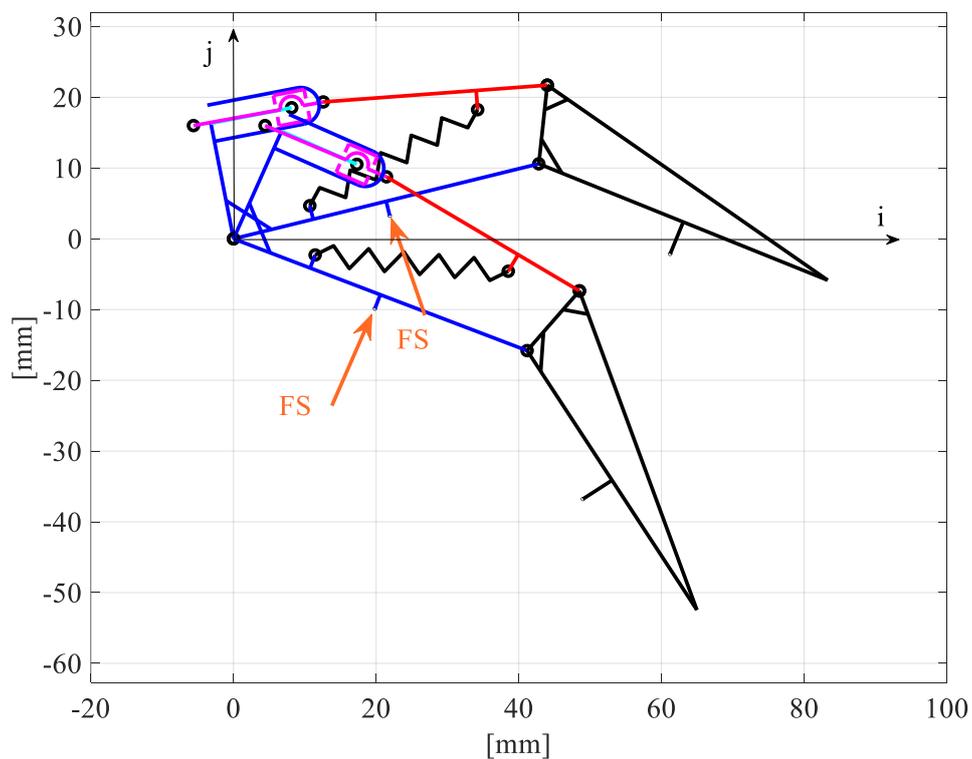


Figura 35 Visualizzazione grafica del modello del dito agli estremi del campo di moto.

Preso con le falangi distali senza cedevolezza del meccanismo

Nel secondo caso di presa, con le falangi distali:

- $F_R \neq 0$;
- $F_S = 0$;
- $\beta = \beta_{min}$;

- 1 grado di libertà $\rightarrow \alpha$

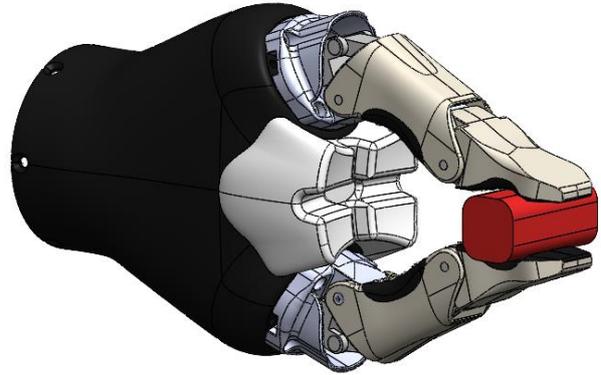


Figura 36 Immagine del Gripper in presa con le falangi distali.

Le due equazioni, eq.24 ed eq.25 si semplificano . L'angolo β è ancora una volta fissato pertanto il sistema resta ad un grado di libertà:

$$-\frac{\partial V}{\partial \alpha} = Q_1 = F_R * \left(-\sin(\alpha - \beta) \frac{\partial X_R}{\partial \alpha} + \cos(\alpha - \beta) \frac{\partial Y_R}{\partial \alpha} \right) + F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \alpha} \quad (28)$$

La forza sulla falange distale risulterà quindi essere:

$$F_R = \frac{-\frac{\partial L}{\partial \alpha} - F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \alpha}}{-\sin(\alpha - \beta) \frac{\partial X_R}{\partial \alpha} + \cos(\alpha - \beta) \frac{\partial Y_R}{\partial \alpha}} \quad (29)$$

I grafici della forza in funzione di α evidenziano un minimo di 35.2 N in corrispondenza di $\alpha = 3.1 \text{ deg}$ ed un massimo di 38.8 N per $\alpha = -31.7 \text{ deg}$. La variazione di forza, passando dalla configurazione del gripper aperto a quella chiusa, è inferiore ai 4N.

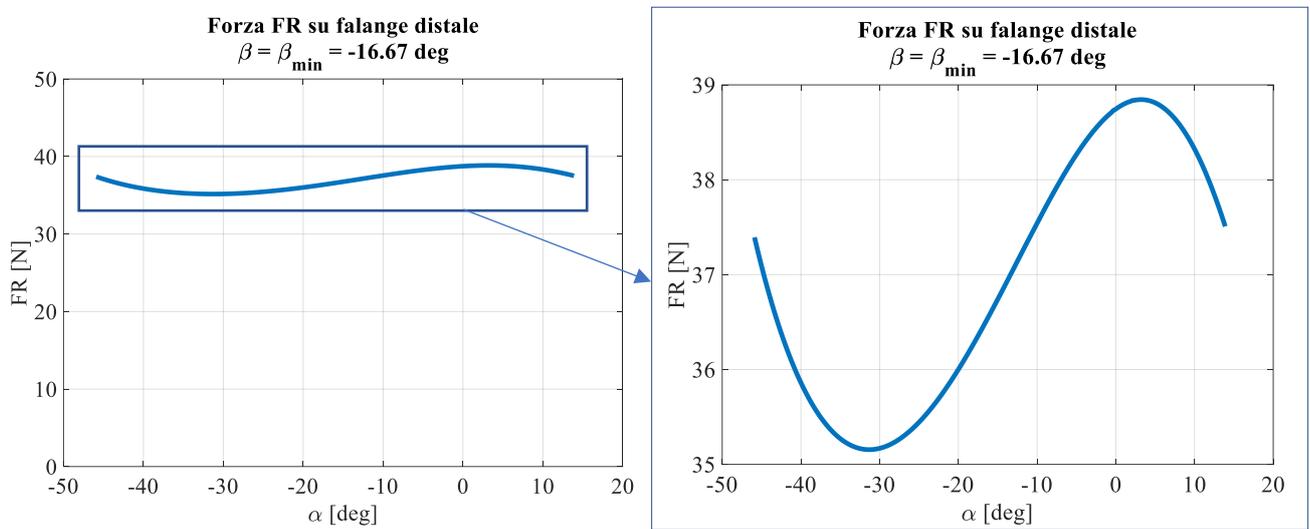


Figura 37 Grafici con l'andamento della forza sulla falange distale in funzione dell'angolo α . A destra il dettaglio ingrandito della curva

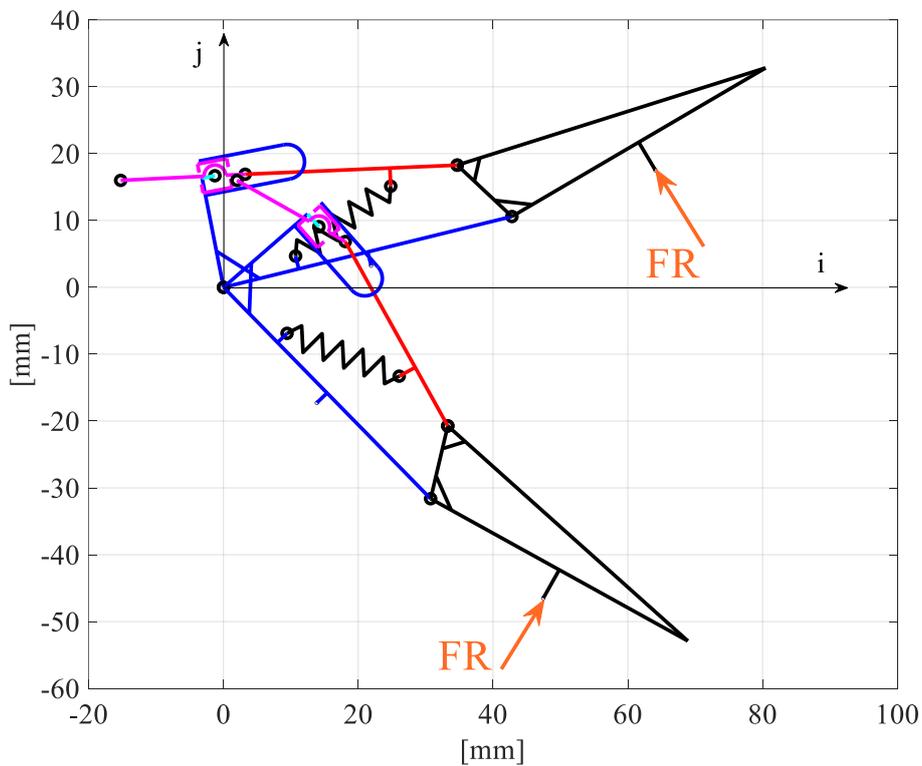


Figura 38 Visualizzazione grafica del dito agli estremi del campo di moto con la forza sulla falange distale.

Presca con le falangi distali con cedevolezza del meccanismo

Le condizioni sono:

- $F_R \neq 0$;
- $F_S = 0$;
- $\beta = \beta_{max}$;
- 1 grado di libertà $\rightarrow \alpha$

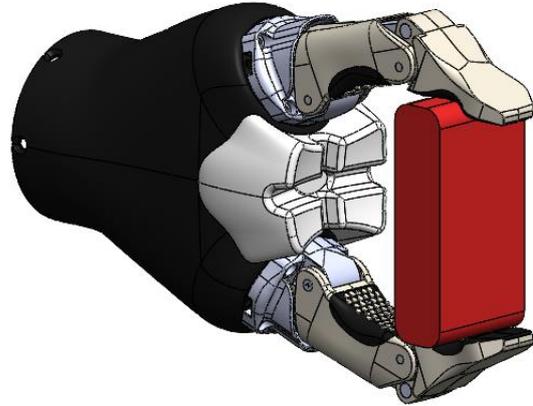


Figura 39 Immagine del Gripper in presa con le falangi distali.

Questo caso è analogo al precedente ma con l'angolo $\beta = \beta_{max}$.

$$\frac{\partial V}{\partial \alpha} = Q_1 = F_R * \left(-\sin(\alpha - \beta) \frac{\partial X_R}{\partial \alpha} + \cos(\alpha - \beta) \frac{\partial Y_R}{\partial \alpha} \right) + F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \alpha} \quad (30)$$

La forza sulla falange distale risulterà quindi essere:

$$F_R = \frac{-\frac{\partial L}{\partial \alpha} - F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \alpha}}{-\sin(\alpha - \beta) \frac{\partial X_R}{\partial \alpha} + \cos(\alpha - \beta) \frac{\partial Y_R}{\partial \alpha}} \quad (31)$$

Nei grafici in Figura 40 si osserva immediatamente che la forza esplicabile dal dito nella falange distale è di molto inferiore a quella esercitabile dalla falange prossimale. La curva ha un andamento simile ai casi precedenti, è presente un minimo intorno ad $\alpha = -5 \text{ deg}$ con $F_R \approx 40 \text{ N}$ e due massimi locali per $\alpha = \alpha_{max}$ e $\alpha = \alpha_{min}$ di rispettivamente 43 e 44 N. La variazione tra il massimo e il minimo è contenuta e inferiore ai 5 N.

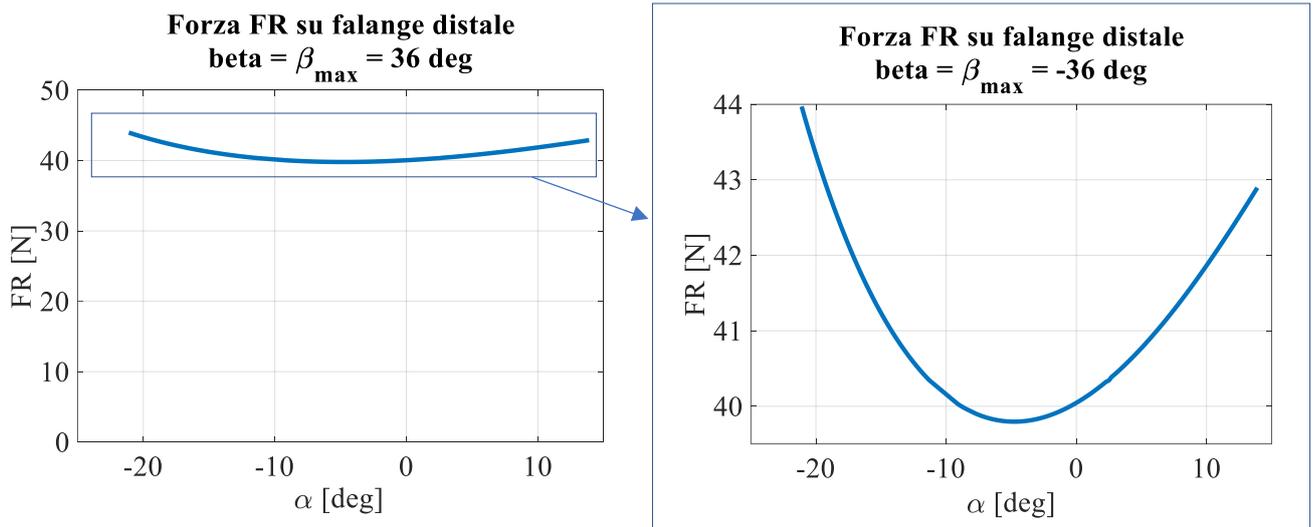


Figura 40 Grafici con l'andamento della forza sulla falange distale in funzione dell'angolo α , con la falange distale chiusa

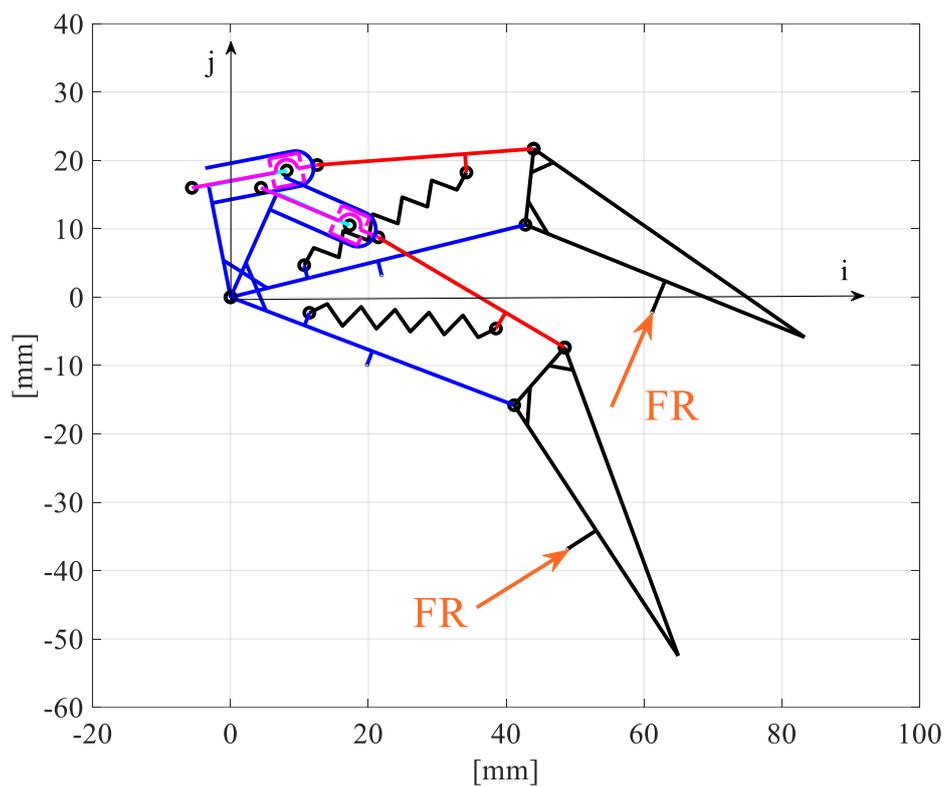


Figura 41 Visualizzazione grafica del dito con la forza sulla falange distale agli estremi del campo di moto.

Presca con entrambe le falangi

- $F_R \neq 0$;
- $F_S \neq 0$;
- 2 gradi di libertà $\rightarrow \alpha$ e β

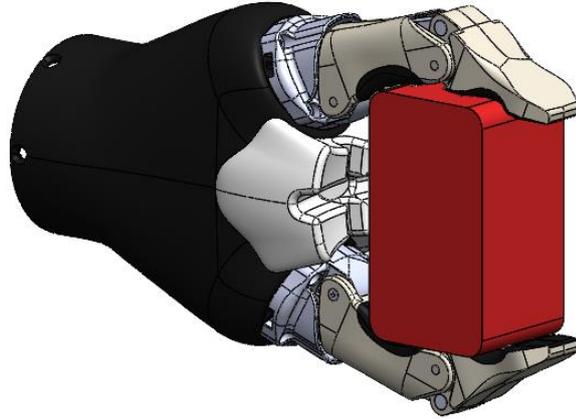


Figura 42 Immagine del Gripper in presa con entrambe le falangi.

La presa con entrambe le falangi è il caso più generale: sia α che β sono gradi di libertà, pertanto, sono valide entrambe le equazioni trovate nel paragrafo 2.3.1.

$$\frac{\partial V}{\partial \alpha} = Q_1 = F_R * \left(-\sin(\alpha - \beta) \frac{\partial X_R}{\partial \alpha} + \cos(\alpha - \beta) \frac{\partial Y_R}{\partial \alpha} \right) + F_S * \left(-\sin(\alpha) \frac{\partial X_S}{\partial \alpha} + \cos(\alpha) \frac{\partial Y_S}{\partial \alpha} \right) + F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \alpha} \quad (32)$$

$$\frac{\partial V}{\partial \beta} = Q_2 = F_R * \left(-\sin(\alpha - \beta) \frac{\partial X_R}{\partial \beta} + \cos(\alpha - \beta) \frac{\partial Y_R}{\partial \beta} \right) + F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \beta} \quad (33)$$

Le forze sulle falangi sono:

$$F_R = \frac{-\frac{\partial L}{\partial \beta} - F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \beta}}{-\sin(\alpha - \beta) \frac{\partial X_R}{\partial \beta} + \cos(\alpha - \beta) \frac{\partial Y_R}{\partial \beta}} \quad (34)$$

$$F_S = \frac{-\frac{\partial L}{\partial \alpha} - F_R * \left(-\sin(\alpha - \beta) \frac{\partial X_R}{\partial \alpha} + \cos(\alpha - \beta) \frac{\partial Y_R}{\partial \alpha} \right) - F_F \frac{\partial(-X_0+x)}{\partial \alpha}}{-\sin(\alpha) \frac{\partial X_S}{\partial \alpha} + \cos(\alpha) \frac{\partial Y_S}{\partial \alpha}} \quad (35)$$

In Figura 43 sono state rappresentate le curve con l'andamento delle forze di contatto sulle due falangi in funzione dell'angolo α per diversi valori di β . Le curve relative alla falange prossimale (FS),

indicate in blu, mostrano sempre valori negativi mentre la forza esercitata dalle falangi distali sull'oggetto è positiva. Questo significa che la presa non viene effettuata con entrambe le falangi, ma soltanto con quelle distali. Il meccanismo è quindi flessibile: si vince la forza della molla e la falange prossimale viene spinta ad allontanarsi dall'oggetto, fino a raggiungere la posizione in cui il dito è completamente piegato, con la cerniera D a fine corsa nella guida del componente 3 (Figura 14), ossia con $\beta = \beta_{max}$. Mentre da un lato questo risultato è sicuramente interessante, in quanto mostra come il dito sia in grado di adattarsi molto bene alla forma dell'oggetto afferrato, dall'altro rivela che questa configurazione di presa non è stabile e non può quindi essere considerata valida nel proseguimento dello studio.

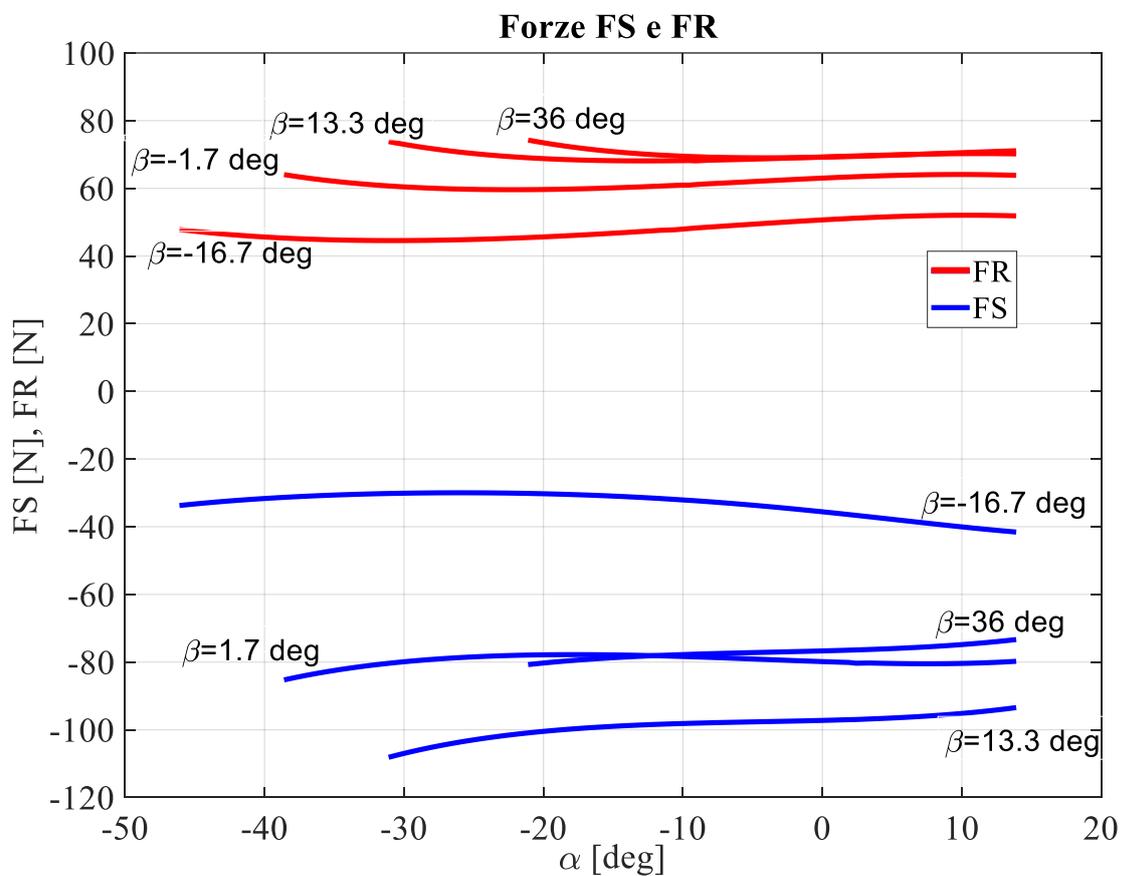


Figura 43 Andamento delle forze sulla falange prossimale (FS) e sulla falange distale (FR) in funzione di α per 4 distinti valori di β

Risultati

I risultati dello studio delle forze di presa del gripper sono riassunti in Figura 44.

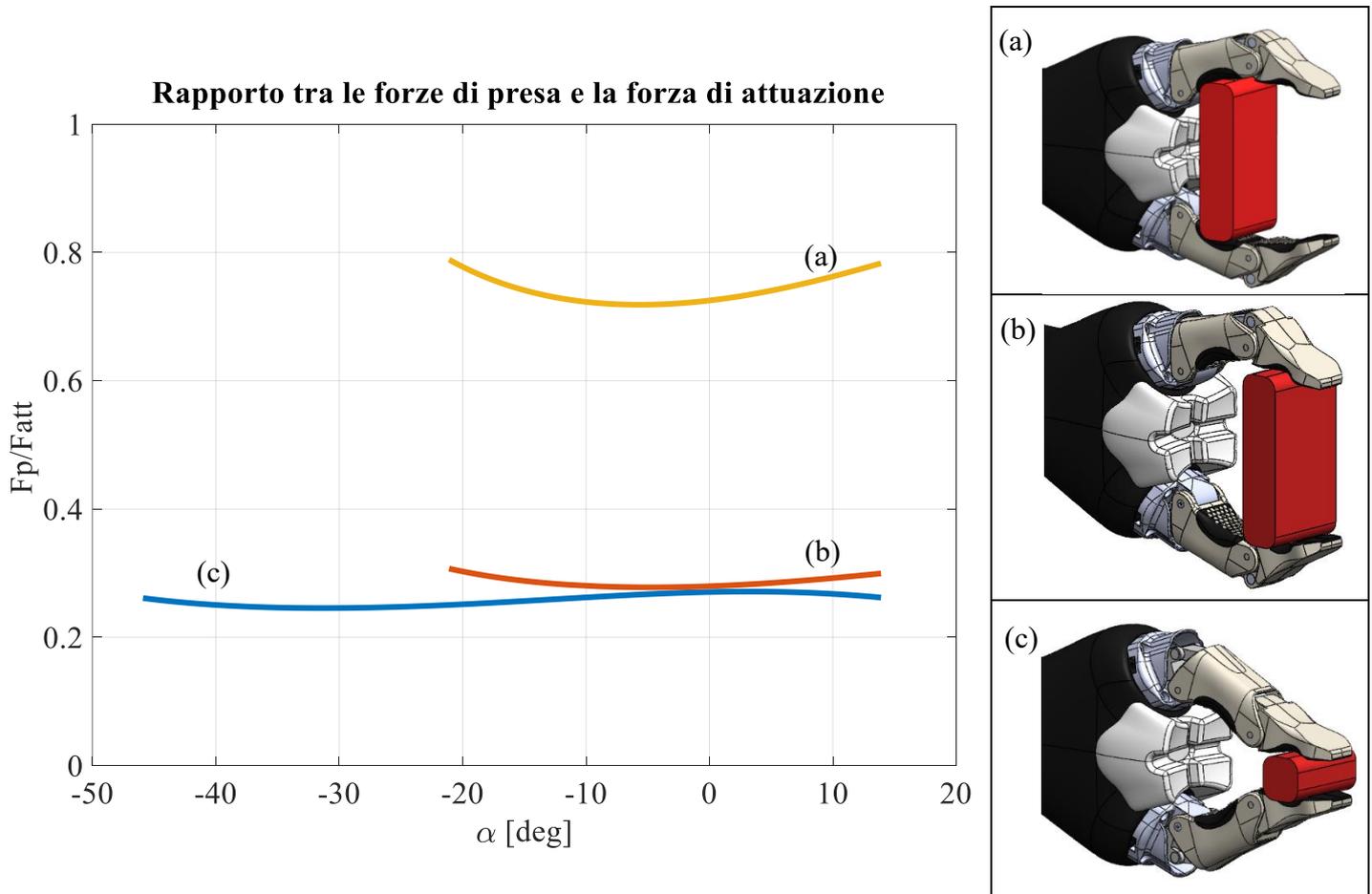


Figura 44 Nel grafico si riportano le curve della Forza di presa diviso la Forza di attuazione per le tre modalità di presa di interesse: (a) Presa con le sole falangi prossimali, (b) presa con le sole falangi distali con cedevolezza delle dita, (c) presa con le sole falangi distali senza cedevolezza delle dita

Il grafico in Figura 44 riporta il guadagno di forza del dito, espresso come rapporto della forza di presa sulla forza di attuazione del motore lineare a vite senza fine, in funzione dell'angolo di chiusura del dito. La forza di presa maggiore viene esplicitata nella curva (a), dove la presa avviene con le sole falangi prossimali. Le altre due modalità di presa, dove il contatto avviene con le sole falangi distali, mostrano valori simili di guadagno di forza, con un lieve vantaggio nella configurazione con il dito piegato. Questi rapporti sono soltanto indicativi di quale sia la presa più efficace in termini di forza erogata: i valori riportati derivano da un modello che non tiene in conto di attriti, cedevolezza, deformazioni del materiale plastico del dito e della gomma che ricopre la superficie in contatto con l'oggetto.

Per rendere di più facile lettura il grafico in Figura 44, si ricorda il sistema di riferimento utilizzato, in Figura 45. L'asse x è solidale all'asse della vite dell'attuatore lineare. La presa con le falangi distali a dito disteso raggiunge il valore minimo $\alpha = -45.8 \text{ deg}$, a differenza delle altre due modalità di presa, che si fermano ad $\alpha = -21.1 \text{ deg}$.

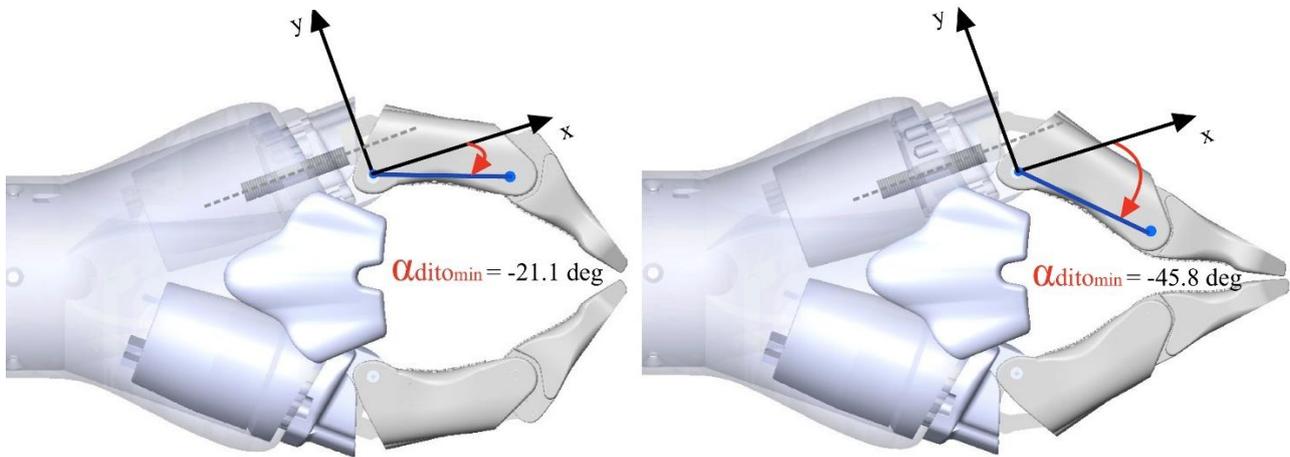


Figura 45 Rappresentazione grafica con le posizioni di fine corsa del dito nella configurazione a dito piegato e a dito disteso.

2.3.1 Presa con le falangi prossimali – Confronto con modello multibody

Il gripper afferra l'oggetto tra le falangi prossimali mentre quelle distali si piegano senza entrare in contatto. La forza FS si esplica una volta che la falange distale raggiunge il fine corsa, cioè l'angolo $\beta = \beta_{max} = 36 \text{ deg}$.

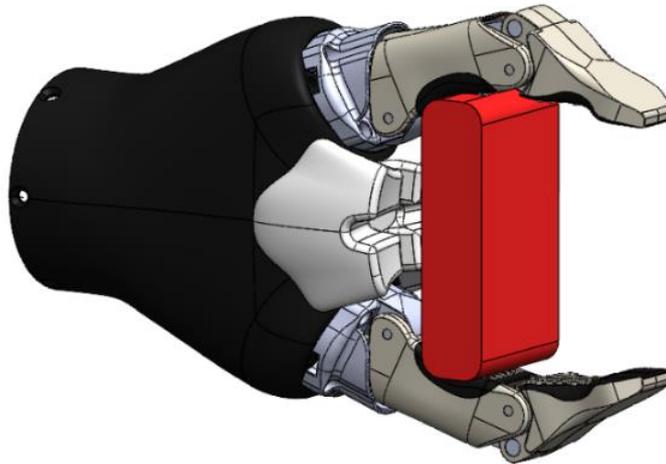


Figura 47 Immagine del gripper in presa con le falangi prossimali

Il confronto tra le curve ottenute si riporta in Figura 48.

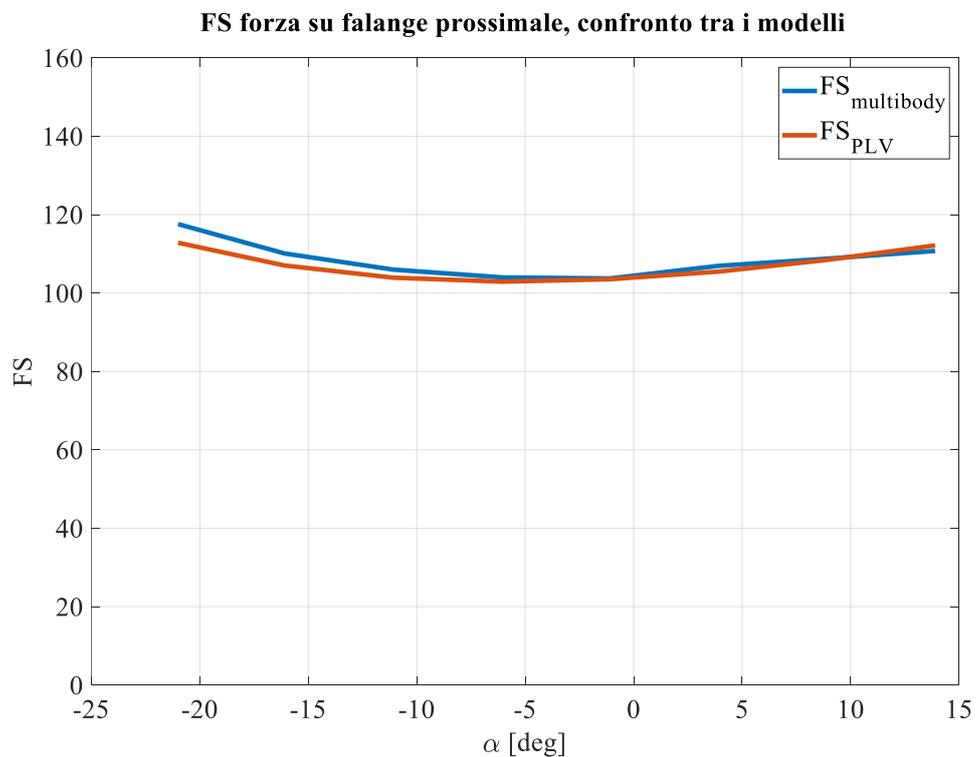


Figura 48 Confronto tra i due modelli della forza FS con il gripper in presa con le sole falangi prossimali

Si osserva una buona corrispondenza tra le due curve per quasi tutto il campo di moto del dito. Lo scostamento massimo si raggiunge per valori bassi di α e corrisponde al 4%.

2.3.2 Presa con le falangi distali, senza cedevolezza – Confronto con modello multibody

Il gripper afferra l'oggetto tra le falangi distali. Le falangi prossimali sono libere e non scambiano forze. La forza FR si esplica tra la falange distale e l'oggetto in rosso, in Figura 49. L'angolo tra le due falangi è quello minimo, ossia $\beta = \beta_{min} = -16.7 \text{ deg}$.

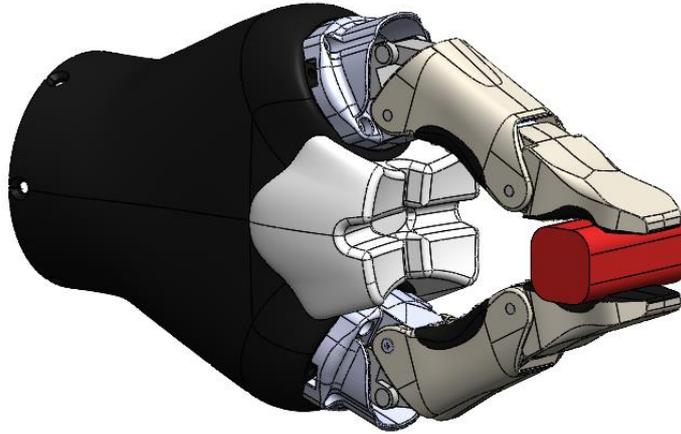


Figura 49 Immagine del gripper in presa con le falangi distali a dita distese.

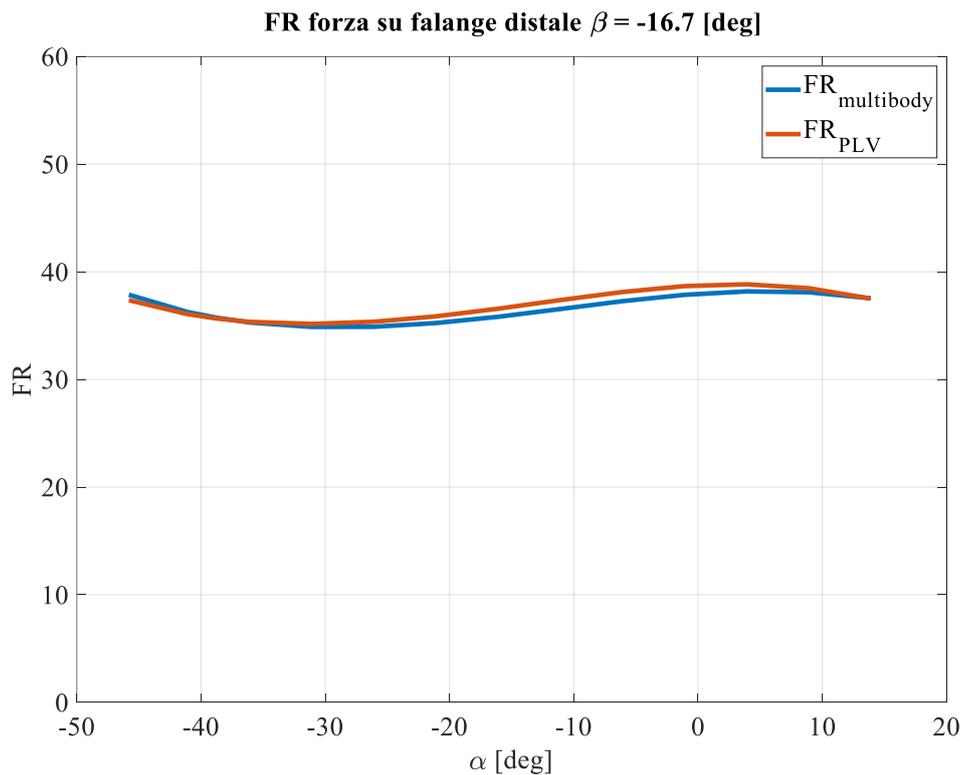


Figura 50 Confronto tra i due modelli della forza FR con gripper in presa con le falangi distali senza cedevolezza, $\beta = -16.7 \text{ deg}$

Le due curve hanno uno scostamento massimo del 2.3%.

2.3.3 Presa con le falangi distali, con cedevolezza – Confronto con modello multibody

Il gripper afferra l'oggetto tra le falangi distali. Come in precedenza, le falangi prossimali sono libere e non scambiano forze. La forza FR si esplica sempre tra la falange distale e l'oggetto in rosso, in Figura 51, ma in questo caso si ha cedevolezza del dito e si vince la forza della molla. L'angolo tra le due falangi è quello massimo, ossia $\beta = \beta_{max} = 36 \text{ deg}$

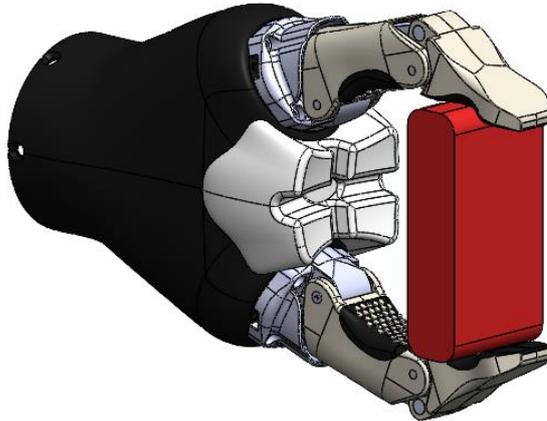


Figura 51 Immagine del gripper in presa con le falangi distali a dita piegate.

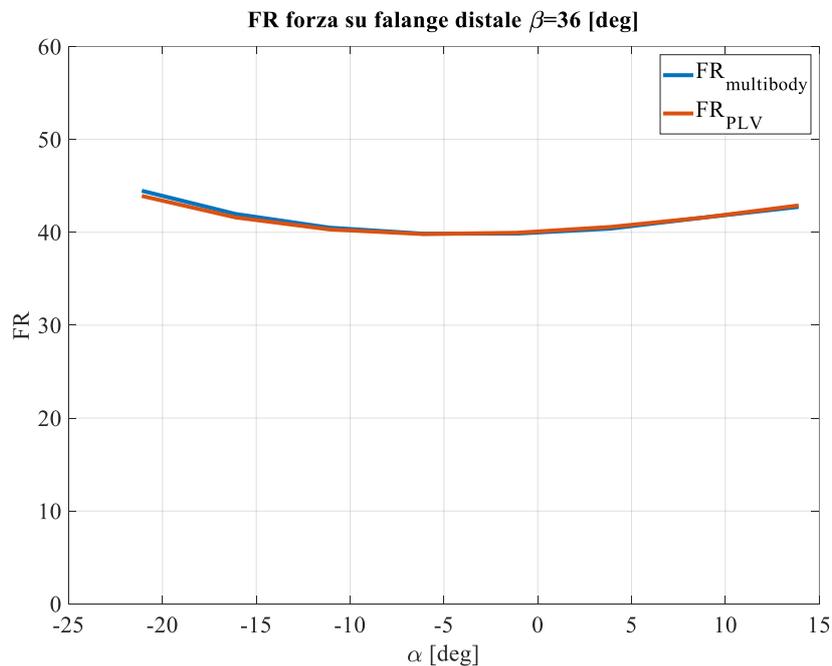


Figura 52 Confronto tra i due modelli della forza FR con gripper in presa con le falangi distali con cedevolezza,

$$\beta = 36 \text{ deg}$$

I due modelli mostrano gli stessi andamenti, con uno scostamento massimo tra le due curve di 1.26%

2.4 Misurazione sperimentale della forza esercitata dal gripper Kinova Jaco2

Lo scopo di questa prova sperimentale è quello di rilevare la forza di presa della falange prossimale delle dita del gripper, in modo da validare il modello con delle prove sperimentali. A tal fine, è stato studiato un banco prova in grado di rilevare con un dinamometro il valore della forza di presa.

Materiale e strumentazione

1. Gripper del braccio robotico Kinova Jaco2
2. Interfaccia per effettuare il collegamento tra dinamometro e gripper – Tough PLA
3. Dinamometro con gancio
4. Vite M6
5. 4 viti M3
6. Piastra per il dinamometro – Tough PLA
7. Piastra con guide per il fissaggio della piastra del dinamometro e del polso del gripper

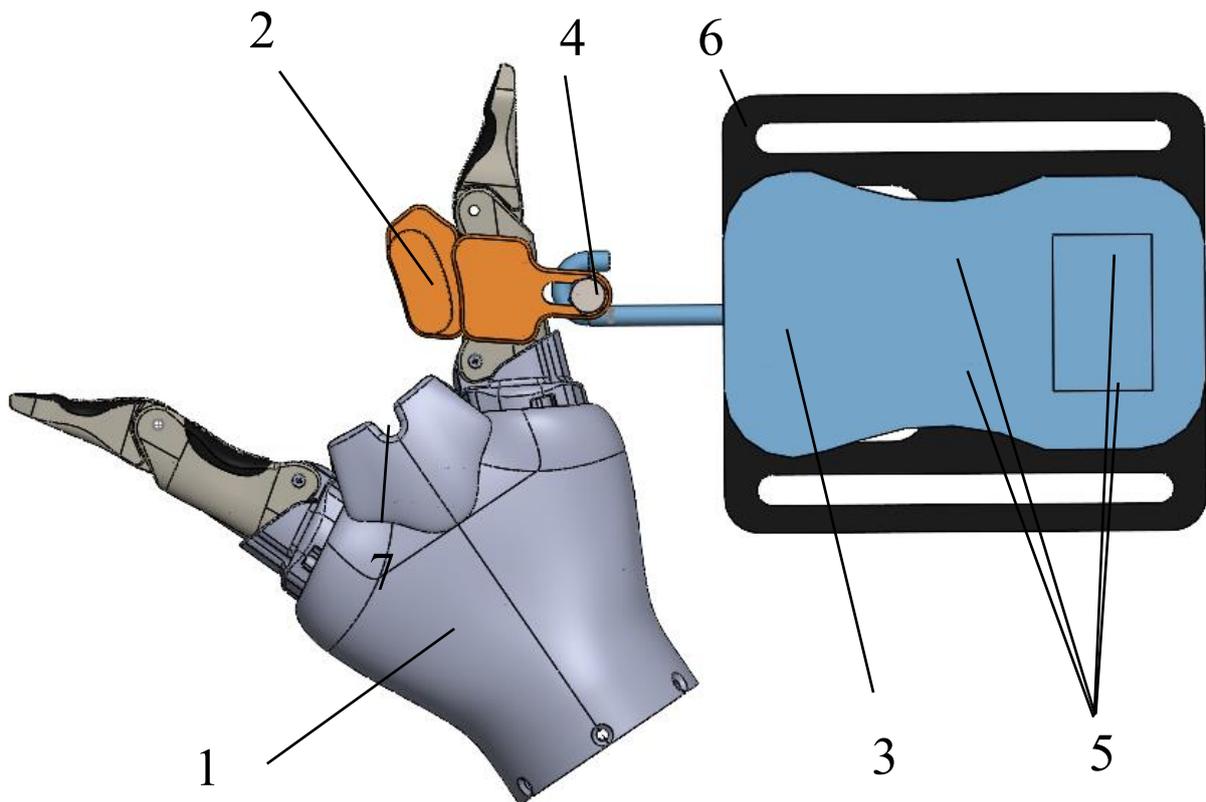


Figura 53 Schema del banco prova, vista dall'alto

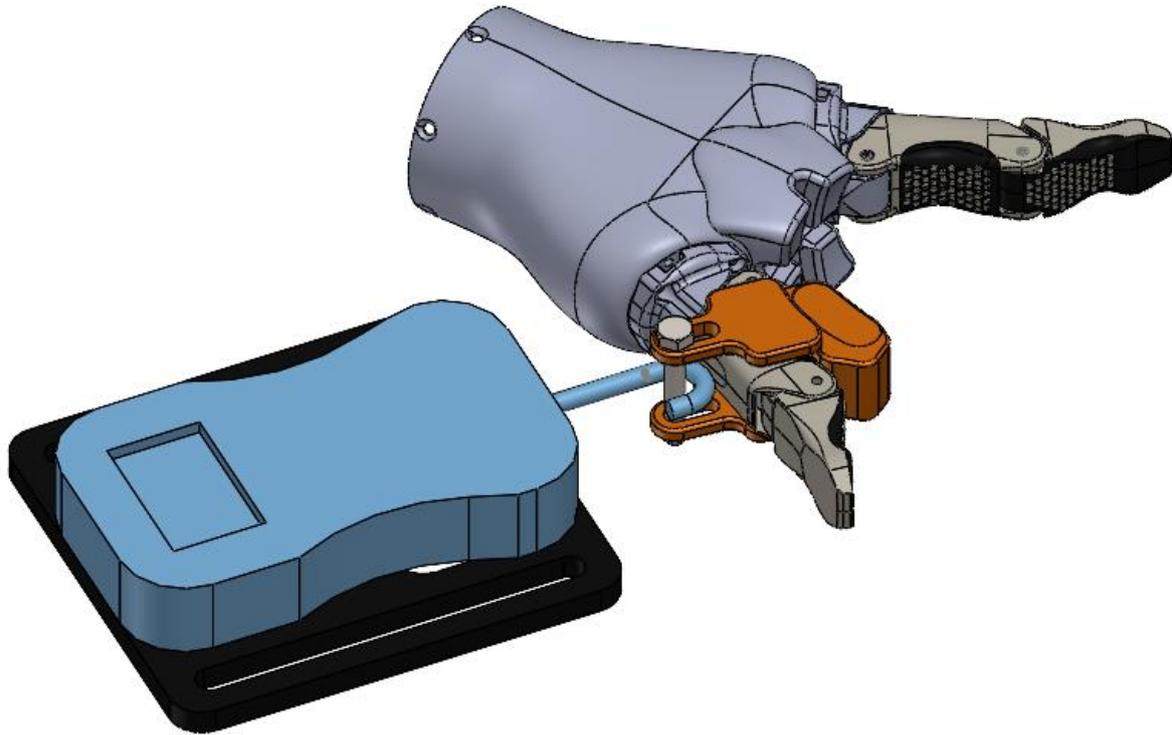


Figura 54 Schema del banco prova, vista aggiuntiva

Descrizione della prova

Il banco prova, rappresentato in Figura 53, è costituito dal gripper del braccio robotico (1) collegato con un'interfaccia (2) stampata in 3d (materiale tough PLA) sulla quale il gripper esercita la forza di presa una volta azionata la chiusura del dito. Tale interfaccia è studiata per permettere al dinamometro di rilevare la forza di presa come forza di trazione. Il dinamometro (3) è provvisto di un gancio che afferra l'interfaccia con l'ausilio di una Vite M6 (4). Per fissare il dinamometro alla piastra con le guide (6, visibile nella foto in Figura 56) è stato necessario stampare in 3D una piastra di appoggio per il dinamometro (5, dettaglio in Figura 55). Quest'ultima è fissata al dinamometro per mezzo di 4 viti M3. Ai lati presenta due guide che permettono il riposizionamento del dinamometro attorno al gripper: al variare del grado di chiusura del dito si ruota il dinamometro per mantenere l'asse del gancio perpendicolare alla falange prossimale.

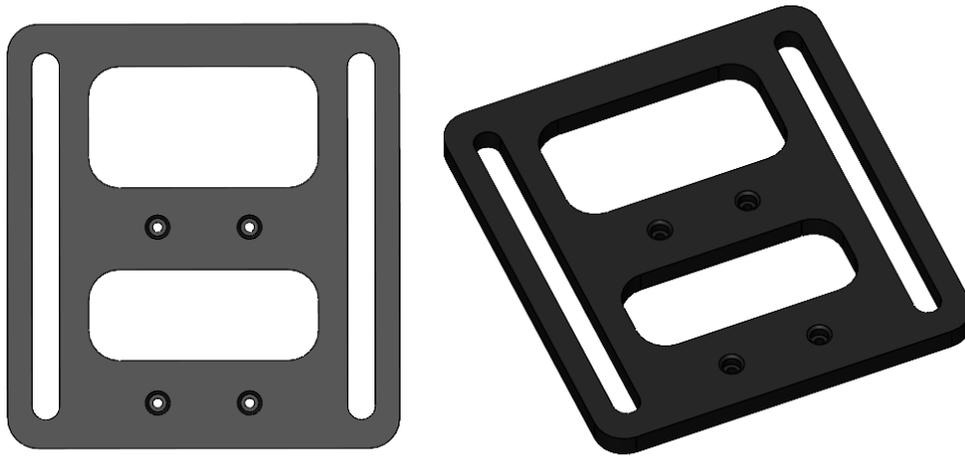


Figura 55 Piastra del dinamometro nella vista dall'alto, a sinistra, e nella vista 3D, a destra

Si riportano in Figura 56 e Figura 57 due foto del banco prova scattate a breve distanza l'una dall'altra. In questa prova in particolare si è valutata la forza di presa con la falange prossimale in posizione aperta. Nella prima il gripper è a riposo ed il dinamometro segna un valore nullo di forza. Successivamente è stata comandata con il joystick la chiusura del gripper e si è serrata la presa. Il dinamometro segna ora una forza di trazione di 62.8 N. Si è scelto di bloccare anche l'altro dito, ma ai fini della prova tale accorgimento è irrilevante: come analizzato in precedenza, ogni dito è comandato da un attuatore ad essi dedicato; pertanto, il comportamento di uno dei due non va a danneggiare l'altro.

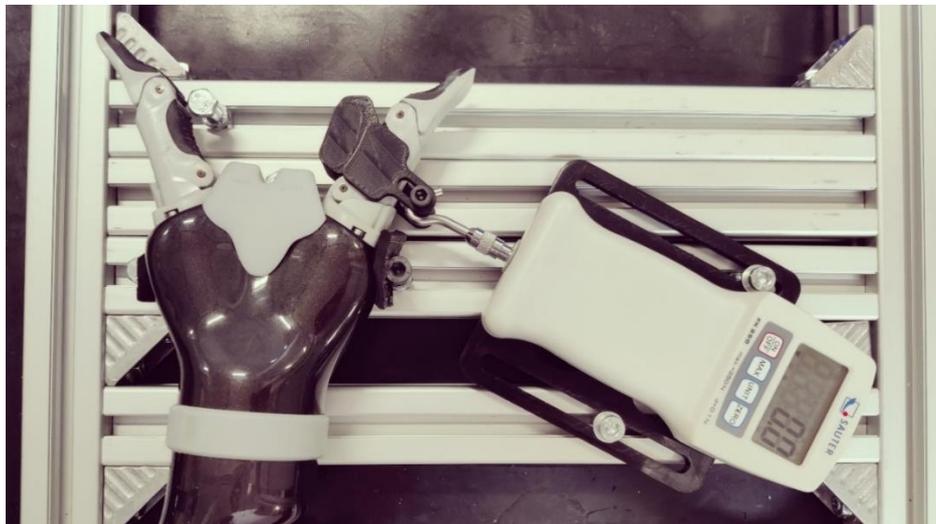


Figura 56 Foto del banco sperimentale per la valutazione della forza esplicata dalle dita del gripper con quest'ultimo a riposo, in posizione aperta



Figura 57 Foto del banco sperimentale per la valutazione della forza esplicita dalle dita del gripper in fase di presa, con il dinamometro che segna una forza di trazione di 62.8 N

Esecuzione delle prove

I test hanno valutato la forza esplicita dal gripper nella configurazione di presa con la sola falange prossimale in due configurazioni: gripper in posizione aperta (Figura 57) e gripper in posizione chiusa, in modo da valutare gli estremi del campo di moto di interesse. Le due configurazioni differiscono per la posizione del dinamometro, che è stato spostato sulla piastra per mantenere l'asse del gancio perpendicolare alla falange prossimale. Il gripper è stato fissato e tenuto fermo per tutta la durata delle prove. Per le due configurazioni sono state fatte 10 misurazioni per poi calcolarne il valor medio.



Figura 58 Foto del banco sperimentale per la valutazione della forza esplicita dalle dita del gripper in fase finale di presa, con il dinamometro che segna una forza di trazione di 30.3 N

Si riportano in Tabella 6 i risultati per la configurazione del gripper con la falange prossimale aperta:

Tabella 6 Risultati sperimentali della forza del gripper con la falange prossimale in posizione aperta

Prova	F_F [N]	F_F Media [N]
1	55.6	59.37
2	62.8	
3	58.4	
4	60.6	
5	60.5	
6	59.4	
7	60.7	
8	57.6	
9	57.8	
10	60.3	

Mentre si riportano in Tabella 7 i risultati per la configurazione del gripper con la falange prossimale aperta:

Tabella 7 Risultati sperimentali della forza del gripper con la falange prossimale in posizione chiusa

Prova	F_F [N]	F_F Media [N]
1	29.9	29.3
2	30.1	
3	30.3	
4	29.3	
5	28.9	
6	29.2	
7	30.0	
8	27.5	
9	28.4	
10	29.4	

Analisi dei risultati

I dati ottenuti sperimentalmente mostrano una certa differenza tra i valori di forza di presa a seconda della posizione delle dita. I test sperimentali si sono concentrati sulle due posizioni più estreme del

campo di moto, ossia con gripper aperto e con gripper chiuso. L'unica modalità di presa analizzata è quella con le sole falangi prossimali, caso che si è rivelato essere il più efficace in quanto capace di esplicare una forza di presa maggiore. Ci sono differenze sostanziali con il modello numerico e con quello multibody, sia in termini di valori assoluti che di scostamento tra la configurazione di gripper aperto e chiuso, ai quali si cercherà di dare una risposta. Il modello studiato ha delle semplificazioni che si sono rivelate, in seguito all'analisi sperimentale, non trascurabili.

In particolare:

- Totale assenza di attriti
- Rigidezza "infinita" dei componenti del gripper

È evidente che la presenza di attriti interni tra i vari componenti, non modellizzati, possano causare perdite di forza esplicita sulle falangi del gripper. L'accoppiamento perno-asola tra l'attuazione e la falange prossimale, ad esempio, comporta uno strisciamento, che non può essere ad attrito nullo.

Una maggiore importanza potrebbe averla la rigidezza interna delle dita, quasi totalmente realizzate in materiale plastico. Nel modello studiato, riportato in Figura 59, la cerniera O è considerata fissa ed è il centro del sistema di riferimento.

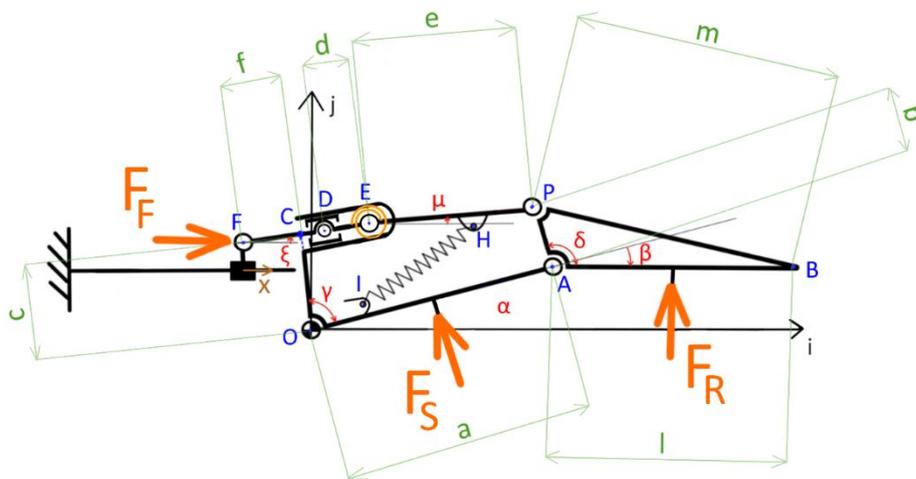


Figura 59 Modello del dito

Tuttavia, durante le prove sperimentali, ci si è accorti che la forza esplicita dal gripper in presa porta a deformare il materiale plastico in prossimità della cerniera O, con conseguente spostamento di un punto considerato fisso nell'analisi del modello.



Figura 60 Presa del gripper con dettaglio sulla deformazione della cerniera fissa O

Come evidenziato in Figura 60, il centro della cerniera O si sposta di qualche millimetro, dalla configurazione con centro in rosso a quella con centro in azzurro. Tale variazione è ancor più evidente nella documentazione video, dove la cedevolezza è molto apprezzabile. Discorso simile si può fare per lo strato di gomma presente sulle falangi: questo materiale si adatta all'oggetto per una presa migliore, ma deformandosi riduce la forza esplicabile. Basta avere una deformazione elastica di pochi millimetri per avere una dissipazione non trascurabile di coppia esplicabile.

Difficile dare una spiegazione per quanto riguarda la riduzione di forza tra le due configurazioni di presa, aperta e chiusa. Il modello presentava una variazione di forza relativamente piccola durante tutto il campo di moto delle dita, mentre l'analisi sperimentale mostra una riduzione significativa. Una rivisitazione del modello che tenga in conto delle problematiche citate in precedenza potrebbe dare una risposta anche a questo quesito.

Il modello resta comunque valido per quanto riguarda lo studio del meccanismo e delle diverse modalità di presa.

3 Progettazione del meccanismo di presa-taglio

Il progetto ha l'obiettivo di sviluppare un utensile che possa essere adattato al gripper del braccio robotico del rover Agri.q, al fine di sostituire le attività di potatura solitamente svolte dall'uomo. Si vuole quindi automatizzare il processo sfruttando la coppia di presa del gripper Kinova al posto della forza esercitata dall'uomo per azionare l'utensile. Inoltre, l'utensile deve essere progettato in modo tale da poter essere facilmente afferrato dal gripper in modo sicuro e senza l'intervento dell'uomo: in questo modo il meccanismo può essere prelevato dal magazzino utensili, utilizzato per le operazioni di potatura ed infine riposto una volta terminate le operazioni.

I requisiti funzionali che il prototipo deve soddisfare sono i seguenti:

1. **Presa/Rilascio automatico dell'utensile:** l'utensile deve poter essere preso/depositato facilmente dal/nel magazzino utensili;
2. **Presa del ramoscello:** il meccanismo deve disporre di un organo di presa in grado di bloccare il campione vegetativo e mantenere la presa anche dopo la fase di taglio;
3. **Taglio del ramoscello;**
4. **Deposito:** dopo il taglio subentra la fase di raccolta del campione. Bisogna quindi garantire una presa sicura mentre il braccio robotico si posiziona in prossimità del punto di raccolta.

Il progetto si basa sulla riproduzione delle operazioni eseguite dall'uomo durante la potatura. L'elemento di presa dell'utensile è stato progettato per simulare l'azione delle dita umane nel prendere il campione di coltura, mentre l'elemento di taglio simula le cesoie che separano il campione dalla pianta. Il meccanismo deve garantire la presa ed il taglio con un solo movimento a disposizione, ossia la chiusura del gripper Kinova a due dita.

3.1 Precedenti versioni del meccanismo

Il medesimo gruppo di ricerca aveva precedentemente condotto due lavori di tesi riguardanti la progettazione di un utensile di presa-taglio. Tali lavori hanno portato alla creazione di due versioni del meccanismo. In questa nuova fase di progettazione, l'obiettivo principale è stato quello di individuare le criticità dell'ultima versione al fine di migliorarlo e ottimizzarlo. Il punto di partenza è stato l'analisi delle problematiche riscontrate in precedenza per identificare i punti cruciali su cui intervenire.

3.1.1 Prima versione

Il primo meccanismo [20], come si può osservare dalla Figura 61, è stato concepito come un sistema a cinematica imposta, il che significa che il movimento dei vari elementi è definito dalle guide e dalle asole sui quali scorrono i perni dei vari membri del meccanismo.

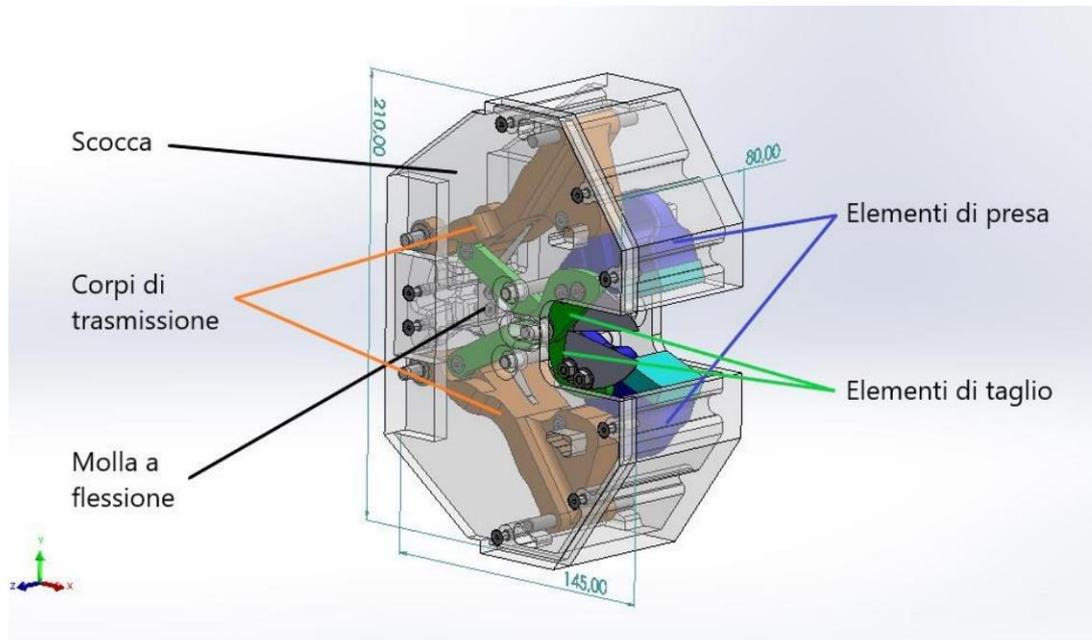


Figura 61 Rappresentazione 3D del primo prototipo del meccanismo di presa e di taglio [20]

Il suo funzionamento consiste nell'utilizzare la pinza del robot per far ruotare i corpi di trasmissione (elementi arancioni nella Figura 61), che a loro volta azionano gli elementi di presa (in blu) e di taglio (in verde). Quando il corpo di trasmissione raggiunge un'inclinazione di 26° , ovvero a metà del movimento disponibile, gli elementi di presa si chiudono per acquisire il campione. A questo punto, i corpi di presa restano nella posizione raggiunta, mentre i membri di trasmissione chiudono le lame. Una volta prelevato il campione, il meccanismo lo trasporta fino alla zona di deposito, dove basta aprire la pinza Kinova per far cadere il campione.

Questa prima versione del meccanismo di presa-taglio presenta alcune criticità che ne limitano l'efficacia e l'efficienza. Innanzitutto, essendo a cinematica imposta, non è in grado di adattarsi in modo adeguato a diverse tipologie di ramo: una minima adattabilità è data dalla deformabilità del materiale soft posizionato all'estremità del membro di presa. Inoltre, il bloccaggio del ramo avviene solo dopo il taglio, aumentando il rischio di perdita del campione durante l'operazione. Un altro problema è legato alle dimensioni dell'utensile, che a causa della presenza di una scocca esterna risulta ingombrante e poco adatto a una vegetazione fitta. Infine, il meccanismo è composto da un

elevato numero di parti, rendendone complicato l'assemblaggio e aumentandone il peso complessivo, a causa della presenza di numerosi componenti metallici.

3.1.2 Seconda versione

Con l'obiettivo di risolvere queste criticità è stato riprogettato l'utensile con una proposta funzionale differente. Il meccanismo è stato pensato prima per essere azionato manualmente e successivamente convertito per la presa del gripper robotico [19, 5].

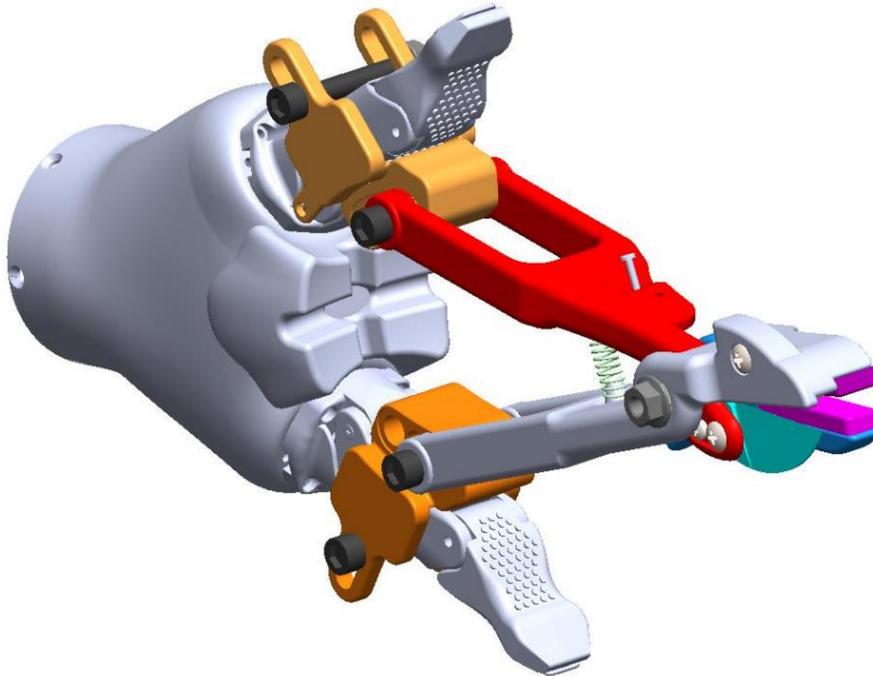


Figura 62 Rappresentazione grafica del secondo prototipo del meccanismo di presa e di taglio [19]

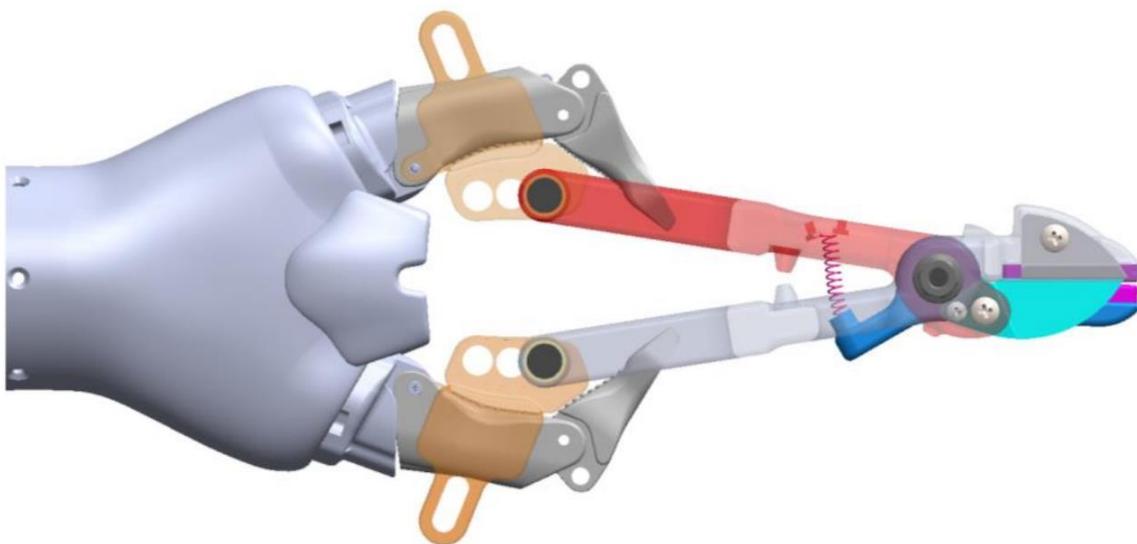


Figura 63 Vista laterale del secondo prototipo [19]

Questo utensile presenta una fase di presa che precede la fase di taglio. Iniziando a chiudere l'utensile si mette in azionamento l'elemento di presa (in azzurro) che si avvicina lateralmente al campione afferrandolo e mantenendolo in posizione. Continuando a chiudere le leve dell'utensile si aumenta la forza di presa, dettata dalla compressione della molla (rosa), e si procede con il taglio. Lo scostamento angolare tra l'elemento di presa e l'elemento di taglio assicura il corretto susseguirsi delle operazioni, evitando che si proceda con il taglio prima di aver garantito la presa del campione.

Il meccanismo è stato pensato in due configurazioni: la molla che collega M_2 e D lavora a compressione, modello in Figura 64 (a) oppure a trazione, modello in Figura 64 (b). La distanza tra la cerniera fissa E_0 e B è stata posta uguale a 0 nel prototipo finale.

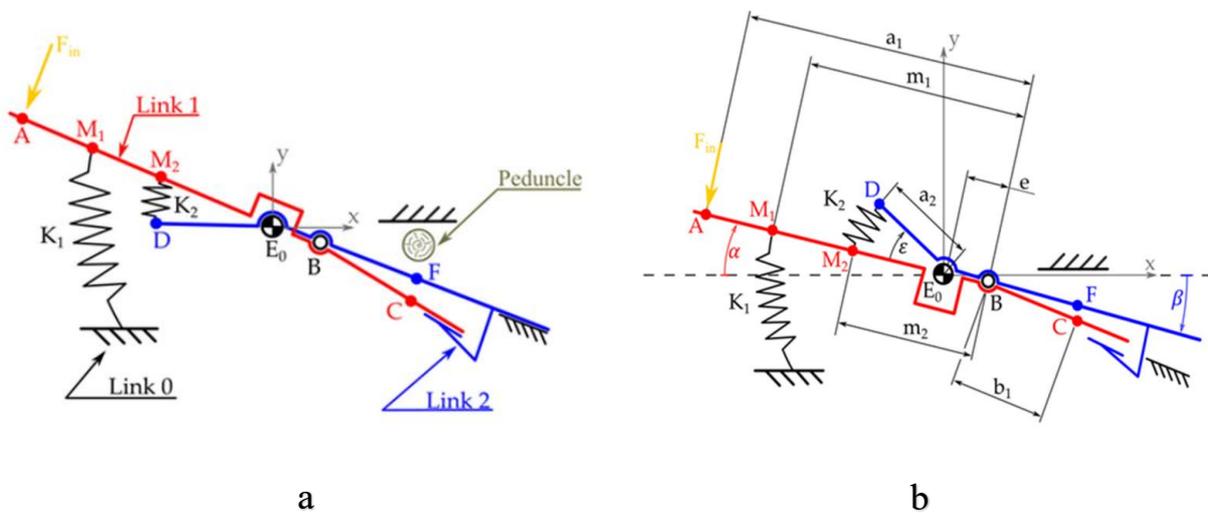


Figura 64 Modello del meccanismo nella configurazione con molla a compressione (a) e a trazione (b) [5]. Il moto del sistema è descritto dalla rotazione dei *Link 1* e *2* rispetto al *Link 0*, rappresentato come fisso

Questo meccanismo risolve le criticità principali elencate in precedenza:

- Il bloccaggio del ramo avviene prima del taglio
- Il meccanismo è più semplice, un ridotto numero di componenti
- È più leggero, minor utilizzo della minuteria meccanica
- Meno ingombrante e utilizzabile anche nella vegetazione più fitta.

Le principali criticità di questo prototipo sono:

1. **Presa del meccanismo da parte del gripper non automatica:** è necessario l'intervento dell'uomo che procede con il fissaggio ed il bloccaggio delle leve alle dita.
2. **Angolo di presa e taglio insufficiente:** l'apertura dell'utensile è di pochi gradi. Questo complica l'avvicinamento e la presa del ramo, che spesso può fallire.

3. **La molla di riscontro non lavora in modo ottimale:** la molla (in verde in Figura 62) lavora a compressione e ha il compito di far tornare in posizione iniziale il meccanismo, qualora non fosse vincolato alle dita tramite l'interfaccia fissa. La corsa della molla non è ad asse rettilineo, pertanto non si ha un lavoro ottimale della stessa, e non è presente un sistema di regolazione del precarico.
4. **Taglio con lama su battente:** questa modalità di taglio è svantaggiosa rispetto al taglio tra due lame con un certo angolo di sovrapposizione.

3.2 Specifiche progettuali

Si è scelto di non stravolgere il precedente progetto ma di effettuare alcune modifiche per migliorarlo e risolvere alcune sue criticità. Il principio di funzionamento è lo stesso: un elemento di presa che viene azionato prima di quello di taglio attraverso un meccanismo che rende le due fasi disaccoppiate. L'utensile rimane sotto-attuato: in seguito ad un input di forza, la chiusura del gripper con rotazione delle dita, si generano due output, rotazione dell'elemento di presa e di taglio.

Nota la configurazione di presa che garantisce il massimo output di forza, ossia quella con le sole falangi prossimali, e quindi nota la posizione di apertura massima e minima del gripper, si è cercato un modo per ottenere un guadagno nell'angolo di apertura dell'utensile, minimizzando la perdita di forza degli elementi di presa e di taglio. La necessità di avere una buona forza di taglio è in contrasto con la volontà di ottenere un'amplificazione dell'angolo tra input e output dell'utensile. La coppia sviluppata è infatti inversamente proporzionale all'apertura del meccanismo. Utilizzare delle lame affilate con un certo grado di ricoprimento permette di ridurre la forza richiesta per il taglio del campione.

Al fine di migliorare le criticità del precedente prototipo, la progettazione si è focalizzata su alcuni aspetti importanti, di seguito elencati:

- Ampliare l'angolo di aperture delle lame e dell'elemento di presa con il telaio per facilitare il corretto imbocco del ramo;
- Ottimizzare l'uso della molla tra leve, soprattutto in ottica presa automatica da parte del gripper: questa molla tiene le leve dell'utensile a contatto con le dita ma, durante la fase di taglio, sottrae una parte della coppia utile. Un sistema in grado di gestire il precarico della molla consentirebbe di calibrarne in modo ottimale il contributo, massimizzando l'efficienza complessiva del sistema.
- Automatizzare la presa, evitando di vincolare i manici dell'utensile alle dita manualmente;

- Utilizzare le lame senza battente, introducendo un certo grado di ricoprimento che permetta di tagliare sfruttando una coppia richiesta inferiore.
- Mantere un valore di forza di taglio quanto più elevato possibile e comunque non inferiore a quello rilevato sperimentalmente e riportato nel paragrafo 3.2.1, al netto del compromesso necessario se si vuole aumentare l'angolo in uscita.

Prima di proseguire con l'analisi parametrica e lo studio del modello del meccanismo è necessario conoscere come il campo di moto del gripper incida sulla cinematica dell'utensile. Si cerca quindi una relazione tra l'angolo di rotazione delle dita del gripper (α_{dito}), rappresentate in nero in Figura 65, e l'angolo di rotazione delle leve del meccanismo, in rosso.

L'angolo di rotazione considerato è quello tra la falange prossimale e l'asse x, nel sistema di riferimento centrato sull'asse del gripper. Nelle analisi sul gripper nel paragrafo 2 l'angolo di riferimento era α_d , con un sistema di riferimento differente, ruotato di $\phi = 20 \text{ deg}$. L'asse x era allineato all'asse della vite dell'attuatore del dito. La relazione tra i due angoli è quindi:

$$\alpha_{dito} = \alpha_d + \phi \quad (36)$$

Si è ipotizzato che la presa da parte del gripper sia concentrata a metà della falange prossimale.

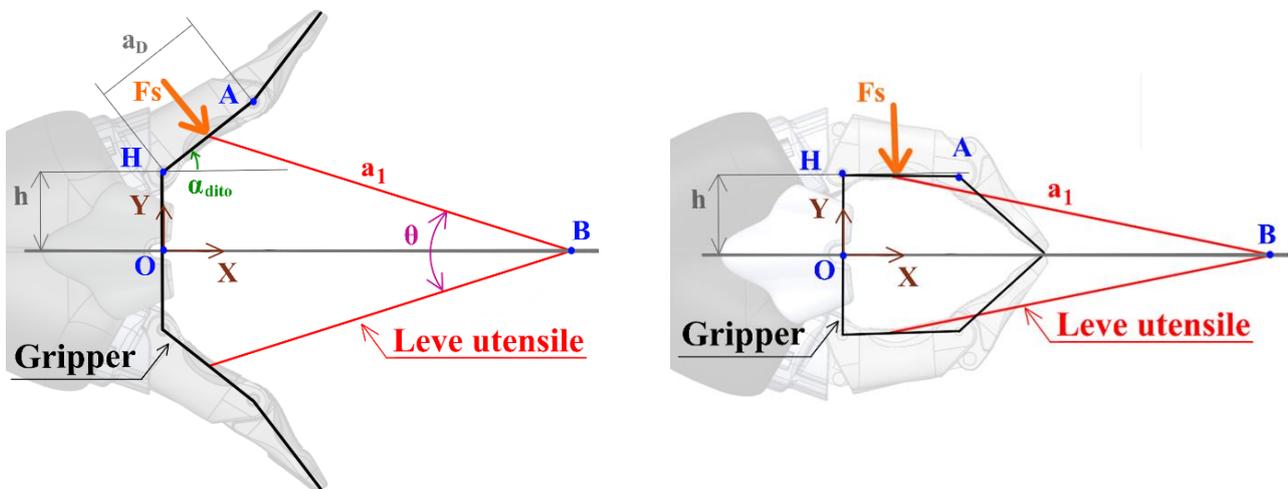


Figura 65 Schema del gripper in presa delle leve dell'utensile, utile per visualizzare il campo di moto delle dita e delle leve in due configurazioni: gripper aperto, a sinistra, e chiuso, a destra.

I parametri presenti nello schema in Figura 65 sono riportati in Tabella 8.

Tabella 8 Parametri del meccanismo e del gripper

Parametro	Descrizione
a_1	Distanza tra la cerniera A e la cerniera B
a_d	Lunghezza della falange prossimale
h	Lunghezza di metà palmo del gripper (dal centro del sistema di riferimento alla cerniera fissa della falange prossimale)
α_d	Angolo di rotazione della falange prossimale del dito nel sistema di riferimento con l'asse orizzontale solidale alla vite
ϕ	Costante, necessaria per passare al sistema di riferimento con assi solidali al centro del gripper (20 deg)
θ	Angolo di apertura massima del meccanismo di presa e di taglio

Attraverso semplici considerazioni geometriche è possibile legare l'angolo α_{dito} di rotazione della falange prossimale con l'angolo θ :

$$\frac{a}{2} \sin(\alpha_{dito}) + h = a_1 * \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (36)$$

Da cui si ottiene:

$$\theta = 2 * \text{asin}\left(\frac{\left(\frac{a}{2} \sin(\alpha_{dito}) + h\right)}{a_1}\right) \quad (37)$$

Una volta scelta la lunghezza delle leve (a_1), senza discostarsi troppo dalle misure adottate nella seconda versione del meccanismo, è immediata la soluzione dell'equazione. Inserendo l'angolo massimo e minimo della falange prossimale si ricava il $\Delta\theta$ come differenza tra θ_{max} e θ_{min} . I valori numerici sono riportati in Tabella 9:

Tabella 9 Valori dei parametri nell'accoppiamento del gripper con l'utensile

Parametro	Valore
a_1	131 mm
a_d	44.1 mm
h	30.8 mm
$\alpha_{d_{max}}$	13.9 deg
$\alpha_{d_{min}}$	-21 deg

ϕ	20 deg
θ_{max}	38.8 deg
θ_{min}	27.1 deg
$\Delta\theta$	11.7 deg

L'angolo di apertura del meccanismo di presa e di taglio di $\Delta\theta = 11.7 \text{ deg}$ rende difficile afferrare il campione per poi tagliarlo.

Si vuole inoltre che l'utensile sia in grado di raccogliere campioni vegetativi con diametri variabili fino ad almeno 6 mm. Per avere un'indicazione sulla forza di taglio necessaria per tagliare alcuni rametti ed in particolare il pedicello dell'uva è stata effettuata una prova sperimentale: sulla base delle informazioni raccolte si è andati a ricercare il giusto compromesso per quanto riguarda il guadagno dell'angolo di apertura ed il guadagno di forza.

3.2.1 Misurazione sperimentale della forza di taglio

Prima di proseguire è necessario conoscere tutte le specifiche progettuali, inclusa la forza di taglio.

Lo scopo di questa prova sperimentale è quello di rilevare la forza necessaria per tagliare dei rami di diametro variabile, per poi scegliere opportunamente i parametri di progetto.

Materiale e strumentazione

1. Telaio con guide
2. Supporto lama con interfaccia per la cella di carico – *Tough PLA*
3. Supporto lama con interfaccia per il fissaggio sulle guide - *Tough PLA*
4. Cella di carico
5. Supporto scorrevole
6. 2 lame
7. Rami di vario diametro e durezza
8. SGA – *Strain Gauge Amplifier*
9. *National Instrument* – acquisizione dati NI DAQ
10. Alimentatore da banco
11. Potenzimetro lineare

Si riporta in Figura 66 uno schema del banco prova, dove è mostrata la sequenza del taglio.

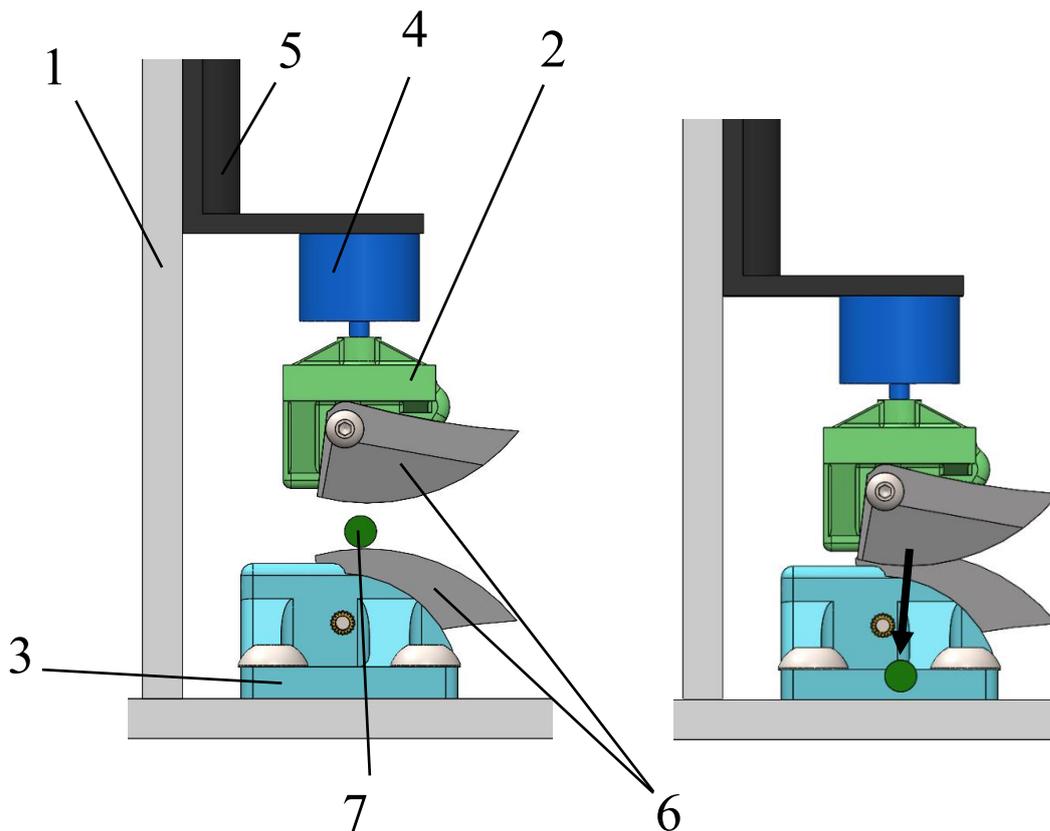


Figura 66 Schema del banco prova per l'analisi sperimentale della forza di taglio necessaria per tagliare un ramo.

Descrizione della prova

La prova consiste nell'abbassare la lama [6] solidale alla cella di carico [4] fino ad intersecare il ramo [7] e a tagliarlo. Prima di eseguire le prove ci si è assicurati che le due lame [6] fossero allineate, come previsto nel loro normale utilizzo. La cella di carico è fissata ad un supporto [5] che permette la traslazione verticale. Solidale al supporto scorrevole è collegato un estremo del potenziometro lineare, per poter tenere traccia dello spostamento. Il segnale in tensione della cella di carico e del potenziometro vengono acquisiti dalla scheda di acquisizione NI DAQ e successivamente convertiti in Newton e in mm attraverso degli appositi guadagni. In particolare, il potenziometro manda un segnale che identifica la posizione istante per istante della lama in movimento e permette di associare il valore di forza rilevato con la posizione della lama lungo la sua corsa.

Esecuzione delle prove

Per poter eseguire le prove sperimentali sono stati raccolti dei campioni vegetativi di particolare interesse. Volendo conoscere la forza di taglio necessaria per raccogliere un grappolo d'uva ci si è

concentrati sull'analisi del peduncolo e del tralcio della vite, che fanno riferimento alla parte terminale del ramo, in prossimità del grappolo, come evidenziato in Figura 67 e Figura 68:

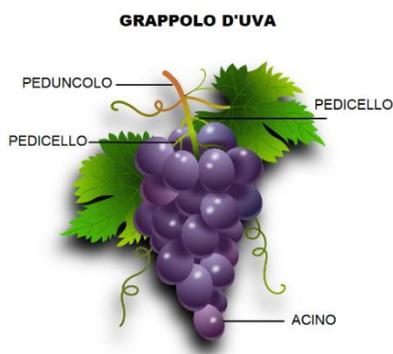


Figura 67 Immagine di un grappolo d'uva con la nomenclatura delle varie parti [www.wineshop.it]

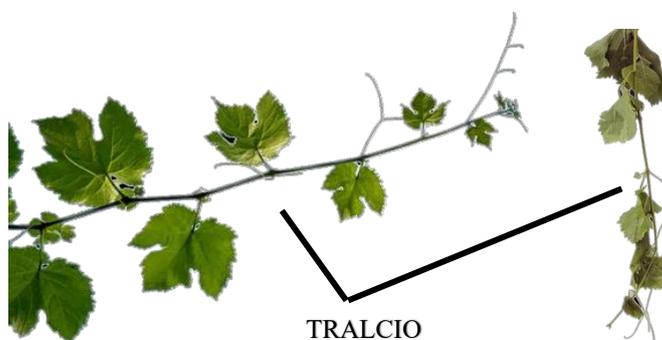


Figura 68 Immagini del tralcio della vite. A sinistra, foto tratta da: [www.tesoriditaliamagazine.it]

Come parametro di confronto è stato inoltre testato un ramo più secco ed uno della rosa, di diversa durezza rispetto a quello della vite.

I rami selezionati per le varie prove ed i risultati in termini di massima forza calcolata sono riportati in Tabella 10:

Tabella 10 Dati sulla prova sperimentale della forza di taglio

Tipologia ramo	Diametro [mm]	Forza max (N)
Vite - peduncolo	1.9	8.7
	2	21
	2.5	16.91
	4.1	17.75
Vite - tralcio	5	60.6
Rosa – gambo	3.5	53.4
Ramo secco	1.5	43.76

Nella Figura 69 è mostrato l'andamento delle curve di forza rilevate dalla cella di carico, una volta filtrate, al variare dello spostamento, che è determinato dal potenziometro. Particolare interesse è rivolto al picco massimo di forza richiesta nell'arco di tutto il moto di taglio: se il meccanismo azionato dal gripper è in grado di soddisfare quella richiesta di forza, verosimilmente non avrà problemi ad effettuare il taglio completo.

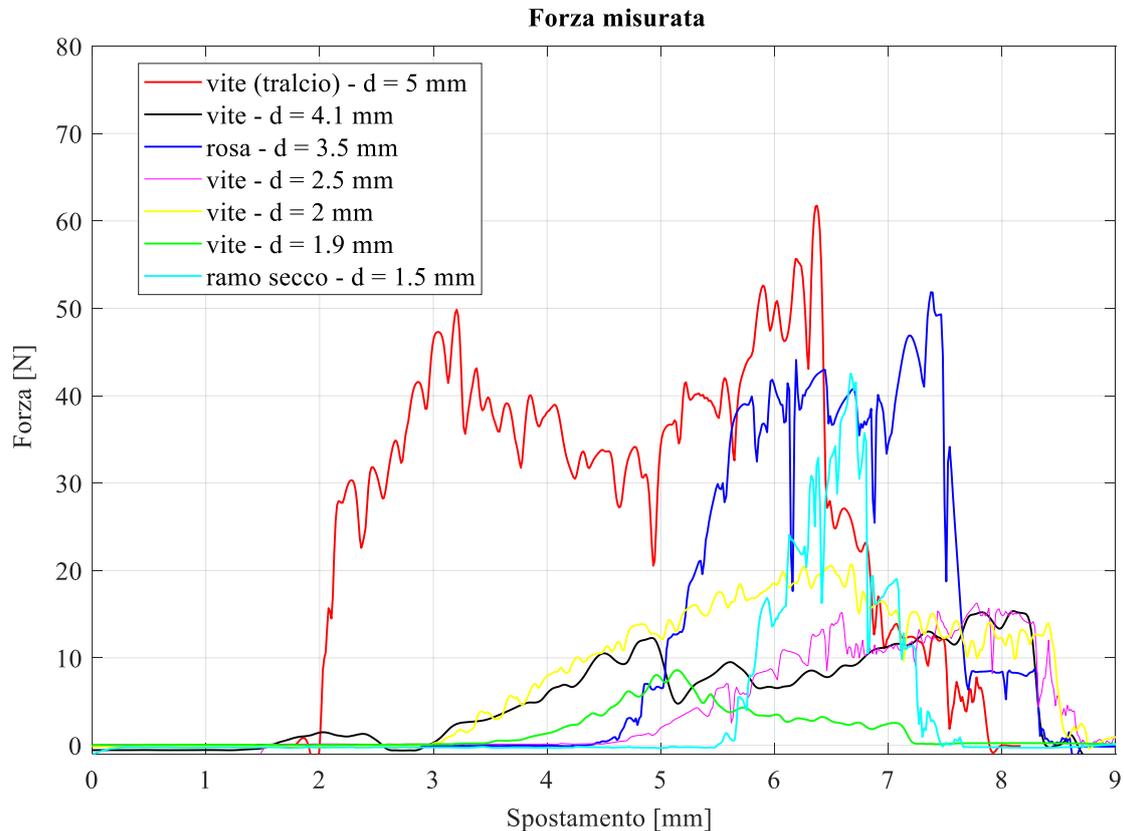


Figura 69 Andamento della forza di taglio al variare dell'affondamento della lama del ramo, per 7 campioni analizzati, diversi l'uno dall'altro per tipologia di ramo o dimensione del diametro

Dall'analisi del grafico emerge chiaramente che il diametro da solo non è un parametro discriminante per la forza di taglio. Il peduncolo, essendo più morbido, presenta una piccola variazione di forza che non aumenta obbligatoriamente con il diametro. I valori di forza richiesta per il taglio del peduncolo oscillano tra 8,7 N e 21 N, con il valore massimo raggiunto da un peduncolo con diametro di 2 mm, il quale probabilmente aveva una durezza maggiore rispetto agli altri (curva gialla). Dall'analisi del tralcio della vite (curva rossa), con un diametro di 5 mm, si ottengono valori di forza più elevati e significativi per la progettazione del meccanismo, con un picco di 60,6 N. La rosa e il ramo più secco hanno diametro inferiore ma sono altrettanto resistenti, non discostandosi molto da quanto visto con il tralcio della vite.

3.3 Progettazione funzionale

In questo capitolo saranno approfondite le operazioni di presa, taglio e deposito del grappolo d'uva eseguite dall'utensile, mentre la caratteristica di afferraggio dell'utensile da parte della pinza sarà analizzata successivamente.

Per effettuare tali operazioni, il meccanismo richiede i seguenti componenti: un elemento di presa, un elemento di taglio, una leva e un telaio.

Elemento di presa: per afferrare i campioni, ci si è basati sull'esperienza umana, in cui le piccole colture vengono prese tra le dita. Le dita vengono avvicinate in modo che i polpastrelli risultino approssimativamente paralleli, e vengono mantenuti in questa posizione prima, durante e dopo la fase di taglio. Quando è necessario depositare il campione, le dita vengono aperte. Il concetto di base è rimasto identico a quello della seconda versione del meccanismo [19].

Tenendo conto di questo approccio, per effettuare la presa dei campioni si utilizza un elemento che si avvicina lateralmente al campione da afferrare. Quando questo elemento viene chiuso, il ramo viene spinto contro il telaio in modo da bloccarlo e mantenerlo in posizione.

Elemento di taglio: per tagliare i campioni bisogna amplificare la forza limitata prodotta dalle dita del gripper. Un modo per farlo è sfruttare il principio della leva, che viene utilizzato dai principali utensili per operazioni di taglio, come forbici, cesoie e tronchesi. Questo da solo non basta, specialmente quando subentrano fattori come il ridotto angolo di chiusura delle dita del gripper. Questo elemento dovrà ruotare di un angolo maggiore rispetto alla leva in input, ma comunque esercitare una forza sufficiente per tagliare il campione. L'utilizzo di lame con un certo grado di ricoprimento limita la forza necessaria per tagliare.

Leva: amplifica la forza che è in grado di esplicitare il gripper e aziona l'elemento di taglio

Telaio: è indispensabile la presenza di un telaio intorno al quale si muove l'intero meccanismo. Funge inoltre da battuta per l'elemento di presa e per la leva.

Per ottenere un disaccoppiamento tra gli angoli di input e di output del meccanismo sono state inserite altre due cerniere, oltre a quella già presente (D): una solidale con il telaio (B) ed un'altra mobile (E), libera di scorrere nella guida della leva rossa, in Figura 70. Per l'analisi del modello, una delle due leve è stata rappresentata in blu e considerata come fissa: da questo punto in avanti, ci riferiremo ad essa come al telaio dell'utensile. È possibile osservare come a fronte di un ridotto angolo in ingresso θ si ottenga un incremento di angolo in uscita β :

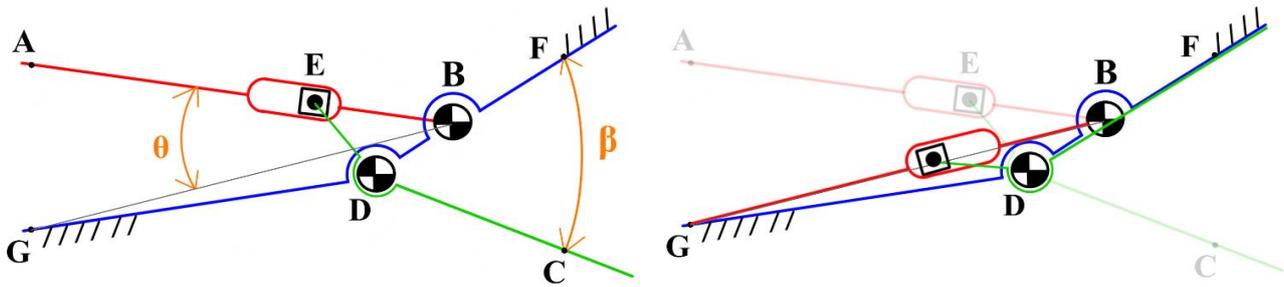


Figura 70 Schemi dell'utensile in funzione: configurazione iniziale, a sinistra, e configurazione finale, a destra

Variando la lunghezza dei *link* DE, BD e la posizione di B intorno a D si ottengono varie configurazioni che vanno ad ampliare o diminuire il guadagno dell'angolo in uscita β rispetto all'angolo in entrata θ . Si è deciso di apportare un'altra modifica consistente nel disallineare l'asse dell'asola in cui scorre la cerniera E rispetto all'asse che collega A e B, visibile in Figura 71. Questa variazione introduce un ulteriore parametro che contribuirà a ottenere vantaggi in termini di compromesso tra l'apertura angolare e la forza esercitata dalle lame.

Nella rappresentazione dello schema funzionale e dei modelli in seguito si è scelto di collocare le due cerniere fisse D e B sull'asse x.

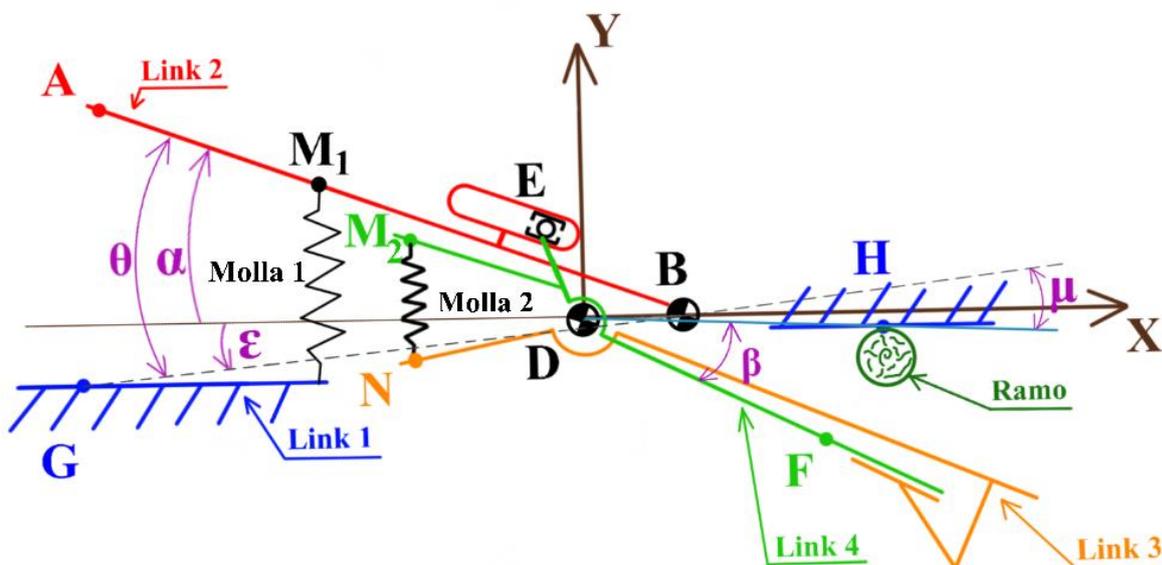


Figura 71 Schema funzionale del meccanismo. Il moto del sistema è descritto dalla rotazione dei *Link* 2,3 e 4 rispetto al *Link* 1, rappresentato come fisso

Lo schema funzionale in Figura 71 mostra i seguenti elementi:

- Quattro link
 - *Link 1*: telaio (blu);
 - *Link 2*: la leva (rosso);
 - *Link 3*: elemento di presa (arancione);
 - *Link 4*: porta-lama (o elemento di taglio, verde).
- Tre cerniere:
 - D: fulcro di rotazione del porta-lama e dell'elemento di presa.
 - B: consente la rotazione relativa tra la leva ed il telaio.
 - E: cerniera mobile. La chiusura della leva (rossa) obbliga la cerniera E a scorrere nella guida portando in rotazione gli elementi di presa e di taglio.
- Molla 1: molla a compressione collocata tra il telaio e la leva; riporta quest'ultima in posizione aperta una volta completata la fase di deposito.
- Molla 2: molla a compressione che permette il disaccoppiamento del moto dell'elemento di presa da quello di taglio (con estremi M_2 ed N).

Un meccanismo di questo tipo, a fronte di un ridotto angolo di chiusura del *link 2* sul *link 1*, amplifica l'angolo di rotazione dei *link 3-4* sul *link 1*. L'elemento di presa (*link 3*) è leggermente sfasato dall'elemento di taglio (*link 2*), in questo modo si garantisce la fase di presa prima di quella di taglio. Per entrambe le molle si prevede un sistema di regolazione del precarico al fine di calibrare la forza esercitata e ottenere la configurazione ottimale di lavoro del meccanismo. Per chiarire al meglio il suo funzionamento, le operazioni svolte dal meccanismo sono state suddivise in tre fasi:

FASE DI PRESA DEL RAMO: l'azione di una forza di ingresso sul *link 2* fa ruotare sia il *link 2*, intorno alla cerniera fissa B, che il *link 3* ed il *link 4*, attraverso l'accoppiamento tra la guida e la cerniera mobile E, intorno alla cerniera fissa D, fino a quando l'elemento di presa entra in contatto con il ramo, bloccandolo. A questo punto, la rotazione del *link 3* è impedita dal ramo, ma il porta-lama continua a ruotare. Man mano che la rotazione avanza, la coppia di presa sul ramo aumenta grazie alla compressione della molla 2 che collega il *link 3* e il *link 4*.

FASE DI TAGLIO E MANTENIMENTO: continuando ad esercitare una forza sul porta-lama è possibile proseguire la rotazione del *link 4* intorno alla cerniera mobile B fino al completamento del taglio del ramo, separando così il campione dalla pianta. Una volta completato il taglio, le forbici si chiudono completamente e la molla 2 si comprime al massimo per quel determinato diametro del

ramo. Ciò garantisce che il ramo rimanga bloccato tra l'elemento di presa e il telaio, mantenendo così il campione fino a quando non viene posizionato in un apposito contenitore per il deposito.

FASE DI DEPOSITO (O RILASCIO): il deposito avviene semplicemente rilasciando la forza sul porta-lama. Senza la coppia di presa agente sul ramo, il ramo può cadere liberamente, consentendo al meccanismo di tornare alla sua configurazione iniziale

In Figura 72 è possibile osservare le varie fasi del meccanismo in funzione, dove è ben mostrata l'idea alla base del sistema: a fronte di un input, la forza esercitata dalle dita della pinza Kinova, si generano due output: la rotazione dell'elemento di taglio e dell'elemento di presa.

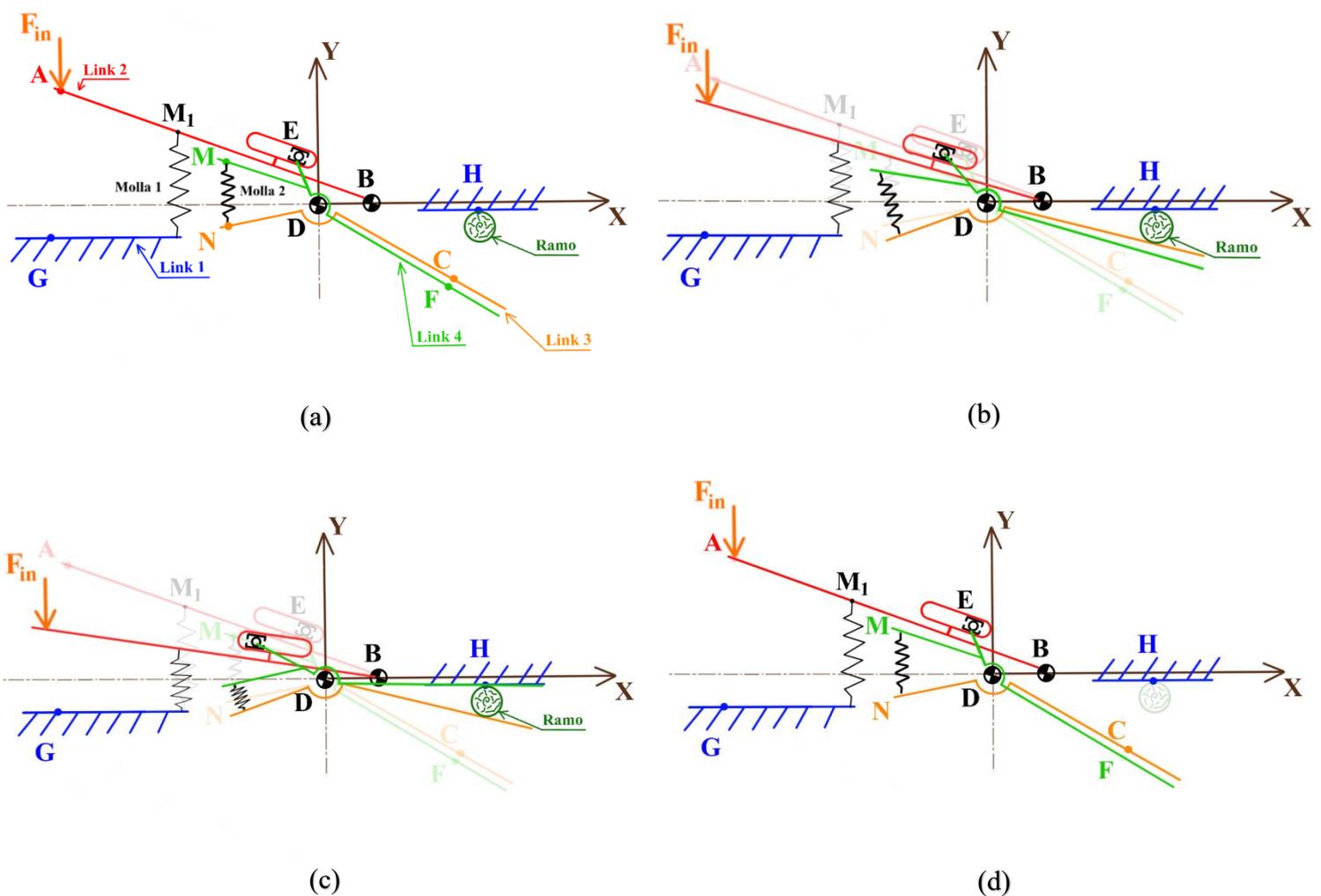


Figura 72 Schemi con meccanismo in funzione: a) meccanismo in configurazione iniziale; (b) fase di presa del ramo; (c) fase di mantenimento e taglio ramo; (d) fase di deposito (o rilascio) ramo

Sono illustrate le varie fasi schematicamente: nella figura (a) il meccanismo si trova nella configurazione di riposo; nella figura (b), invece, si evidenzia la fase di presa ramo, nella quale

l'elemento di presa (arancione) incontra il ramo andandolo a bloccare; nella figura (c) si osserva la fase di mantenimento e taglio, dove la leva continua a chiudersi e il porta-lama continua a ruotare, andando ad eseguire il taglio nel mentre l'elemento di presa esercita una coppia di chiusura sul ramo sempre maggiore, per via dell'accorciamento della molla 2; infine, nella figura (d) si ha la fase di deposito (o rilascio) del ramo, dovuta al fatto che non si ha più la presenza della forza di ingresso F_{in} .

3.4 Analisi parametrica

Partendo dallo schema funzionale, riportato in Figura 73 senza l'elemento di presa, sono stati definiti i parametri e le variabili del meccanismo per poter eseguire l'analisi parametrica e valutarne l'influenza sulle prestazioni e sul comportamento del meccanismo.

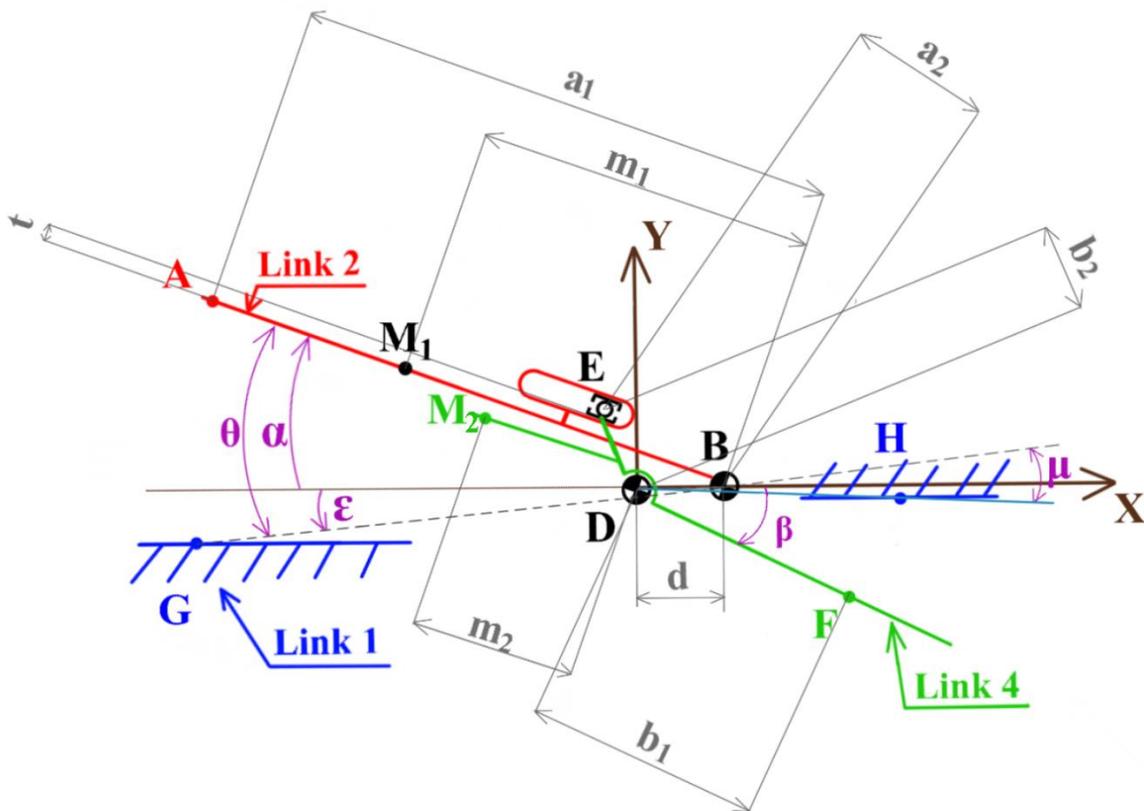


Figura 73 Schema funzionale con parametri e variabili (senza elemento di presa)

Si riportano nelle successive tabelle i parametri rappresentati in Figura 73 per i vari componenti:

Tabella 11 Parametri Leva (*link 2*)

Parametro	Descrizione
a_1	Distanza tra la cerniera A e la cerniera B
m_1	Distanza tra il punto di aggancio della molla 1 e la cerniera B
t	Disallineamento tra l'asse dell'asola e l'asse AB

Tabella 12 Parametri Telaio (*link 1*)

Parametro	Descrizione
e	Distanza tra il punto D e la cerniera B
d	Distanza tra le due cerniere fisse D e B

Tabella 13 Parametri Porta-lama (*link 4*)

Parametro	Descrizione
b_2	Distanza tra la cerniera D e la cerniera mobile E
m_2	Distanza tra il punto M2 e la cerniera D
b_1	Distanza tra la cerniera D e la zona di taglio F

Tabella 14 Parametri Elemento di presa

Parametro	Descrizione
b_1	Distanza tra la cerniera D e la zona di presa C

Tabella 15 Variabili del meccanismo

Parametro	Descrizione
α	Angolo di rotazione del <i>Link 2</i> rispetto all'asse x
β	Angolo di rotazione del <i>Link 4</i> rispetto all'asse x
ϵ	Angolo che definisce la posizione delle leve rispetto alla cerniera B
θ	Angolo di apertura tra le due leve del meccanismo

Per trovare il guadagno del meccanismo, una volta individuati i parametri e le variabili, si procede andando a rappresentare il diagramma di corpo libero della leva mobile e del porta-lama, nella Figura 74.

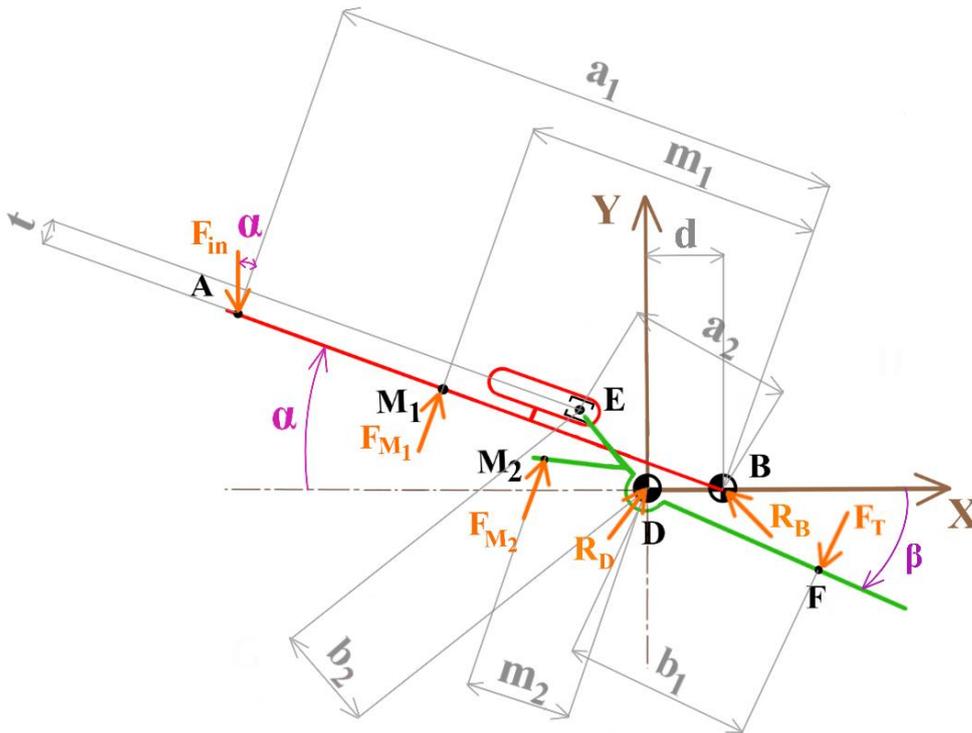


Figura 74 Schema funzionale della leva e dell'elemento di taglio con i parametri e le variabili

I guadagni di angolo e di forza sono dati dalle seguenti relazioni:

$$G_A = \frac{\beta}{\alpha} \quad G_F = \frac{F_T}{F_{IN}} \quad (38)$$

La forza di attuazione del meccanismo è stata calcolata con una prova sperimentale che aveva il compito di valutare la forza esplicabile dal gripper, paragrafo 2.4, mentre quella di taglio la si può ottenere eseguendo gli equilibri alla rotazione dei due elementi rispetto alla cerniera fissa di riferimento, in Figura 75 e Figura 76.

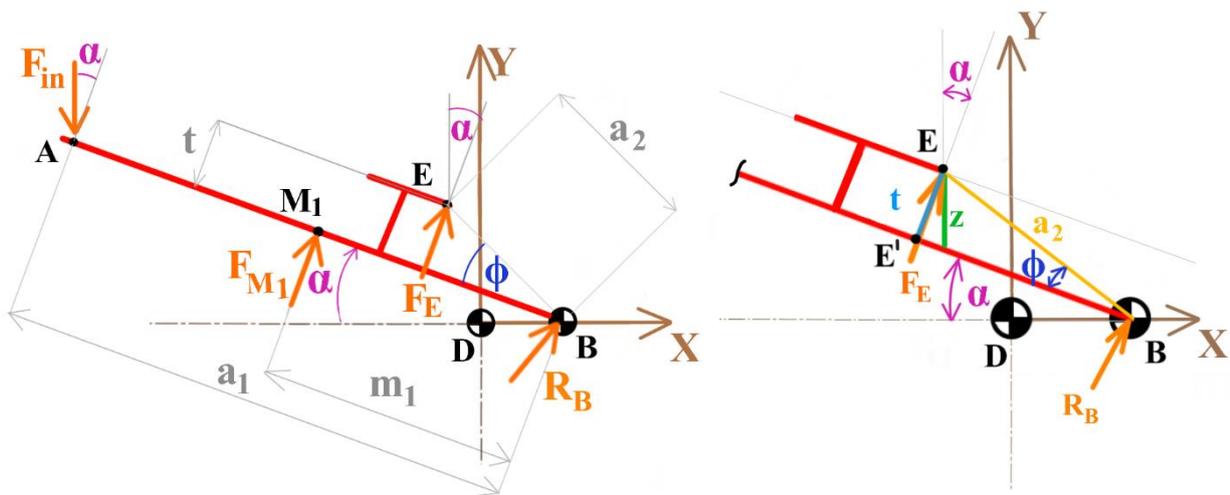


Figura 75 Schema funzionale della leva, a sinistra, ed un suo dettaglio, a destra.

Facendo l'equilibrio alla rotazione attorno a B si ottiene:

$$F_{IN} * \cos(\alpha) * a_1 - F_{M1} * m_1 - F_E * a_2 * \cos(\varphi) = 0 \quad (39)$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{t}{a_2}\right) \quad (40)$$

I parametri fissati sono: a_1 , m_1 e t . Le variabili sconosciute sono a_2 e φ .

Occorre eseguire l'equilibrio alla rotazione del portalamo intorno a D:

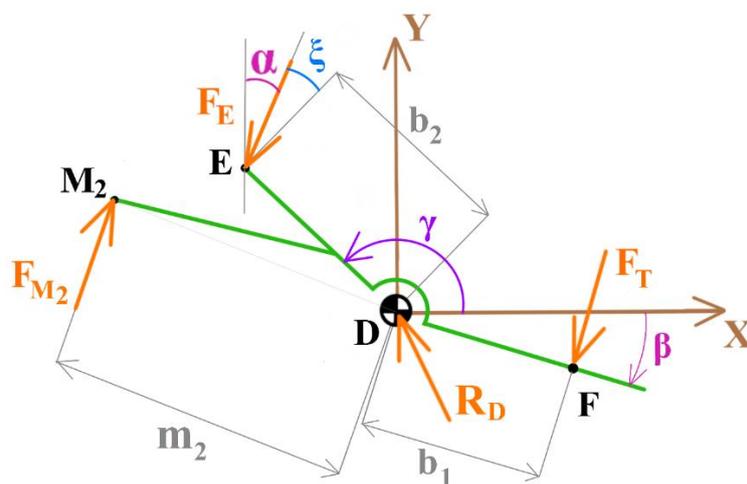


Figura 76 Schema funzionale del portalamo

$$F_E * \cos(\xi) * b_2 - F_{M2} * m_2 - F_T * b_1 = 0 \quad (41)$$

La forza generata dalla molla F_{M2} è stata considerata perpendicolare al braccio m_2 , assumendo la situazione peggiore in cui l'intera forza elastica della molla è impegnata a generare un momento che contrasta il taglio del ramo.

ξ è l'angolo tra la retta di azione della forza F_E e la normale al braccio ED. L'angolo γ , incognito, è l'angolo tra l'asse x ed il segmento ED:

$$\xi = \frac{\pi}{2} - \alpha - \left(\gamma - \frac{\pi}{2} \right) \quad (42)$$

Il punto E è in comune tra la leva ed il portalama. Le sue coordinate sono:

$$x_E = b_2 * \cos(\gamma) \quad (43)$$

$$y_E = b_2 * \sin(\gamma) \quad (44)$$

Date le 3 incognite, X_E , Y_E e γ , è necessaria una terza equazione per risolvere il sistema. Sappiamo che E si trova su una retta parallela a quella passante per A e B, traslata verso l'alto di z, funzione del solo angolo α :

$$z = \frac{t}{\cos(\alpha)} \quad (45)$$

L'equazione di tale retta è:

$$\frac{x - x_A}{x_B - x_A} = \frac{y - (y_A + z)}{(y_B + z) - (y_A + z)} \quad (46)$$

Mettendo a sistema le equazioni eq.43, eq.44 e eq.46 si ottengono, al variare di α , i valori di x_E , y_E e γ . Calcolando la distanza tra i punti B ed E si ricava il valore della variabile a_2 e, di conseguenza, il valore dell'angolo φ :

$$a_2 = \overline{EB} = \sqrt{(x_E - x_B)^2 + (y_E - y_B)^2} \quad (47)$$

Dall'eq.39 si ricava la forza F_E e la si sostituisce nell'eq.41 per ottenere la forza di taglio:

$$F_E = \frac{F_{IN} * a_1 - F_M * m_1}{a_2} \quad (48)$$

$$F_T = \frac{F_E * \cos(\xi) * b_2 - F_m * m_2}{b_1} \quad (49)$$

Le forze delle molle sono:

$$F_M = K_{M1} * \Delta l_1 \quad (50)$$

$$F_m = K_{M2} * \Delta l_2 \quad (51)$$

Sapendo che K_M rappresenta la rigidezza e Δl rappresenta l'accorciamento delle rispettive molle.

Il guadagno risulta quindi essere:

$$G_F = \frac{F_T}{F_{IN}} = \frac{\frac{F_{IN} * a_1 - F_M * m_1}{a_2} * \cos(\xi) * b_2 - F_m * m_2}{b_1 * F_{IN}} \quad (52)$$

L'apertura massima tra le lame $\Delta\beta$ può essere calcolata essendo nota la relazione tra γ e α come differenza tra il valore massimo e il valore minimo dell'angolo γ :

$$\Delta\beta = \gamma_{max} - \gamma_{min} \quad (53)$$

L'angolo β , che serve per localizzare il punto F in cui si effettua il taglio, è una funzione degli angoli ϵ , γ e della costante μ (vedi Figura 73). L'angolo ϵ determina la posizione delle leve rispetto alla cerniera B, e di conseguenza influisce sulla posizione dei punti A e G. La costante μ serve per mantenere il più possibile allineati l'asse che divide a metà le leve dei *link* 1 e 2 con l'asse che divide l'angolo tra i *link* 3 e 4.

$$\beta = \Delta\beta + \mu - \epsilon \quad (54)$$

Con $\mu = 9.5 \text{ deg}$, il quale rappresenta l'angolo tra i segmenti \overline{GD} e \overline{DH} .

Non potendo intervenire sulla forza esplicata dal gripper F_{IN} , per aumentare la forza di taglio bisogna incrementare il parametro a_1 ed il rapporto $\frac{b_2}{a_2}$, mentre bisogna ridurre b_1 , m_1 e m_2 , a parità di forza di richiamo delle due molle. Per non stravolgere il meccanismo, rispetto alla precedente versione, si è scelto di variare le lunghezze delle leve e gli ingombri complessivi il meno possibile. Di conseguenza, i parametri a_1 e b_1 , che sono di primaria importanza in quanto sono i bracci principali delle forze di taglio e di attuazione, sono stati scelti in relazione al precedente prototipo. Variando t e b_2 si va a modificare la posizione dell'asola che determina l'accoppiamento di forza tra la leva ed il portalamo, e quindi il valore di a_2 .

I valori dei bracci su cui si scaricano le forze esercitate dalle molle rivestono sicuramente un'importanza significativa. Tuttavia, l'attenzione principale è incentrata sulla coppia generata dalle forze di richiamo delle molle, data dal prodotto tra la rigidezza, l'allungamento ed il braccio m_1 o m_2 . La possibilità di gestire il precarico della molla, e quindi il suo allungamento, permette di avere più libertà sulla scelta di m_1 o m_2 , i quali possono essere scelti arbitrariamente, avendo successivamente la possibilità di intervenire sulla regolazione del precarico per ottenere la coppia richiesta.

Prima di procedere con l'analisi, bisogna fare un'osservazione sul parametro m_2 : per poter collocare il punto M2 al meglio, devo tenere in conto anche della posizione del punto N sull'elemento di presa, visto che i due punti saranno collegati da una molla. Sappiamo che la forza esercitata da questa molla è necessaria all'elemento di presa (*link 3*) per bloccare il ramo e che al tempo stesso gioca contro al porta-lama (*link 2*), andando quindi a diminuire la coppia di taglio. Trattandosi di una classica molla a compressione, essa dovrà lavorare con un asse il più possibile rettilineo, nonostante sia posizionata tra due elementi in rotazione relativa l'uno con l'altro.

La forza esercitata dal dito è imposta come costante al valore minimo misurato sperimentalmente nel paragrafo 2.5:

$$F_{IN} = 30 \text{ N}$$

Per poter vedere l'effetto di tutti i parametri del meccanismo si è effettuata un'analisi parametrica. Sulla base delle considerazioni precedenti, i bracci delle molle sono stati stabiliti a priori e si è inoltre ipotizzato il loro accorciamento massimo: le molle danno un contributo negativo sulla forza di taglio e, non essendo noto con esattezza il loro precarico, si è scelto di imporre per tutto il range di moto il valore massimo previsto. I valori fissati a monte dell'analisi sono:

- $F_{IN} = 30 \text{ N}$
- $m_1 = 35 \text{ mm}$
- $m_2 = 35 \text{ mm}$
- $k_1 = 68 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$
- $k_2 = 54 \frac{\text{N}}{\text{mm}}$
- $\Delta l_1 = 20 \text{ mm}$
- $\Delta l_2 = 10 \text{ mm}$
- $a_1 = 130 \text{ mm}$

I parametri studiati sono: b_1, ϵ, d, b_2, t .

I successivi grafici che mostrano l'andamento dei guadagni di angolo e di forza del meccanismo al variare dei parametri sono riportati in funzione dell'angolo α_{dito} di chiusura del dito. Per comprendere meglio le prossime analisi, si riporta uno schema che illustra il valore assunto da α_{dito} nella configurazione di gripper chiuso e aperto, in Figura 77.

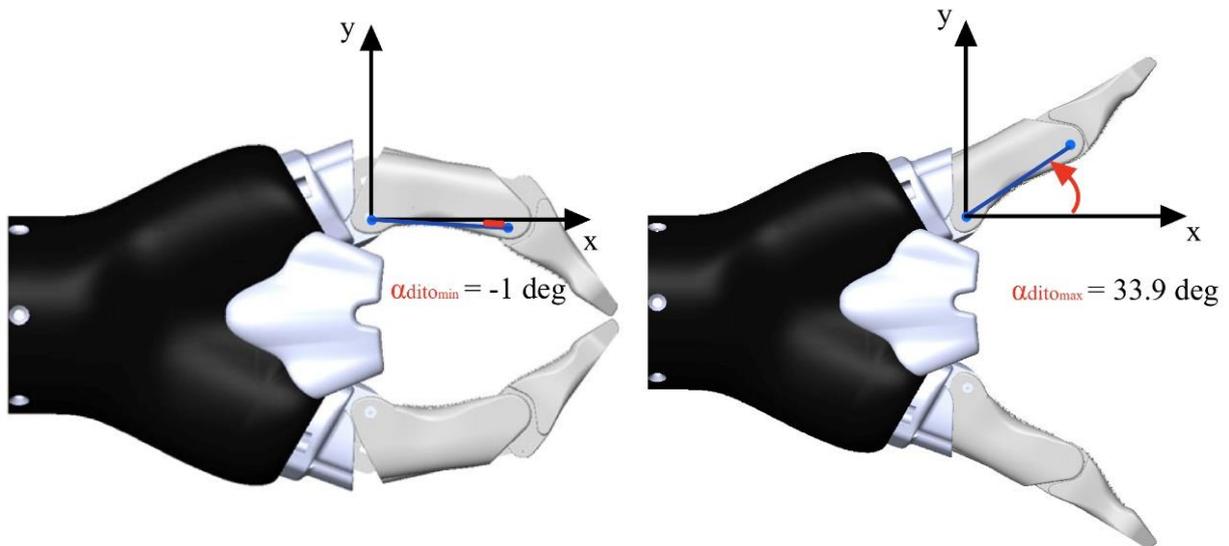


Figura 77 Illustrazione del gripper chiuso e aperto, con indicazione dell'angolo massimo e minimo assunto dal dito

Effetto del punto di applicazione della forza di taglio sul portalama: parametro b_1

Il primo parametro da fissare è b_1 , il braccio della forza di taglio. Accorciando questo elemento si porta ad aumentare il guadagno di forza ($G_F = \frac{F_T}{F_{IN}}$) senza incidere sul guadagno dell'angolo ($G_A = \beta/\alpha$), come mostrato in Figura 78. Il suo effetto è quindi puramente dinamico.

Sono stati imposti i seguenti valori:

$$b_1 = [15, 20, 25, 30, 35]$$

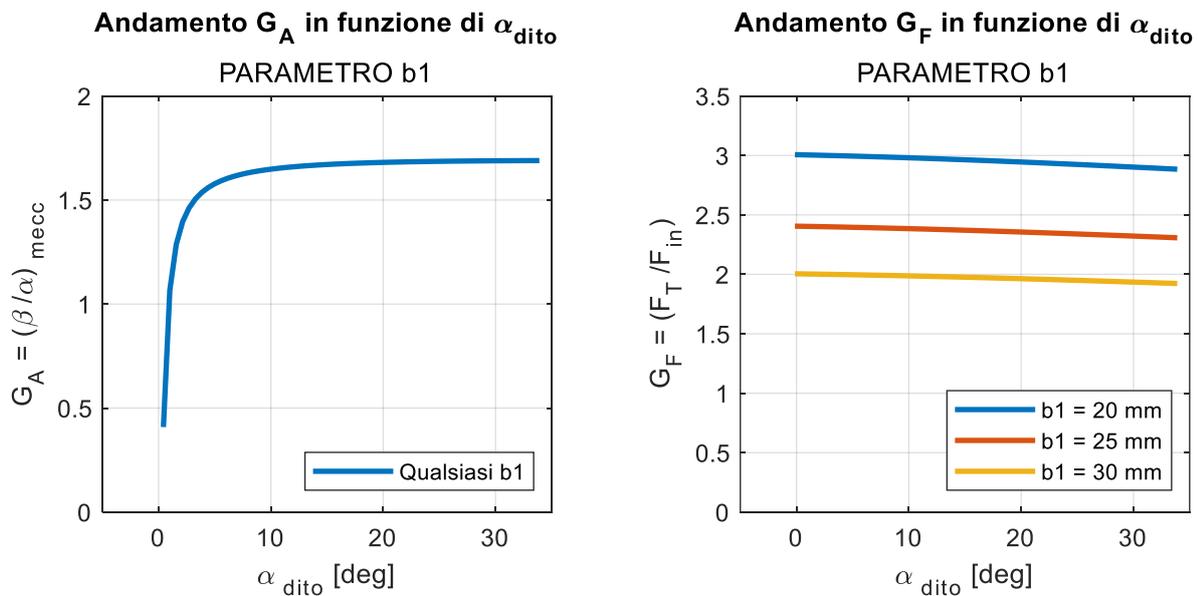


Figura 78 Influenza di b_1 su G_A e G_F

Nonostante gli evidenti vantaggi dati dal ridurre il più possibile il valore di b_1 , non si può esagerare a causa degli ingombri dei perni e del materiale di supporto in corrispondenza delle cerniere D e B. Al netto di queste considerazioni, la scelta ricade sul valore intermedio analizzato:

$$b_1 = 25 \text{ mm}$$

Effetto del posizionamento delle leve rispetto alla cerniera B: parametro ϵ

Un secondo parametro che ha un notevole impatto sulla cinematica e sulla dinamica del meccanismo è ϵ . La posizione della cerniera B rispetto alle leve e alle lame ha grande influenza sui guadagni di angolo ($G_A = \frac{\beta}{\alpha_{mecc}}$) e di forza ($G_F = \frac{F_T}{F_{IN}}$).

Ci sono due zone di interesse:

- La cerniera fissa B si trova spostata verso le leve (valori indicativi: $90 < \epsilon < 270$) $\rightarrow G_A \downarrow$; $G_F \uparrow$.
- La cerniera B è collocata nella zona occupata dalle lame $\rightarrow G_A \uparrow$; $G_F \downarrow$.

I valori analizzati sono:

$$\epsilon = [-20, -10, 0, 10, 20, 170, 200]$$

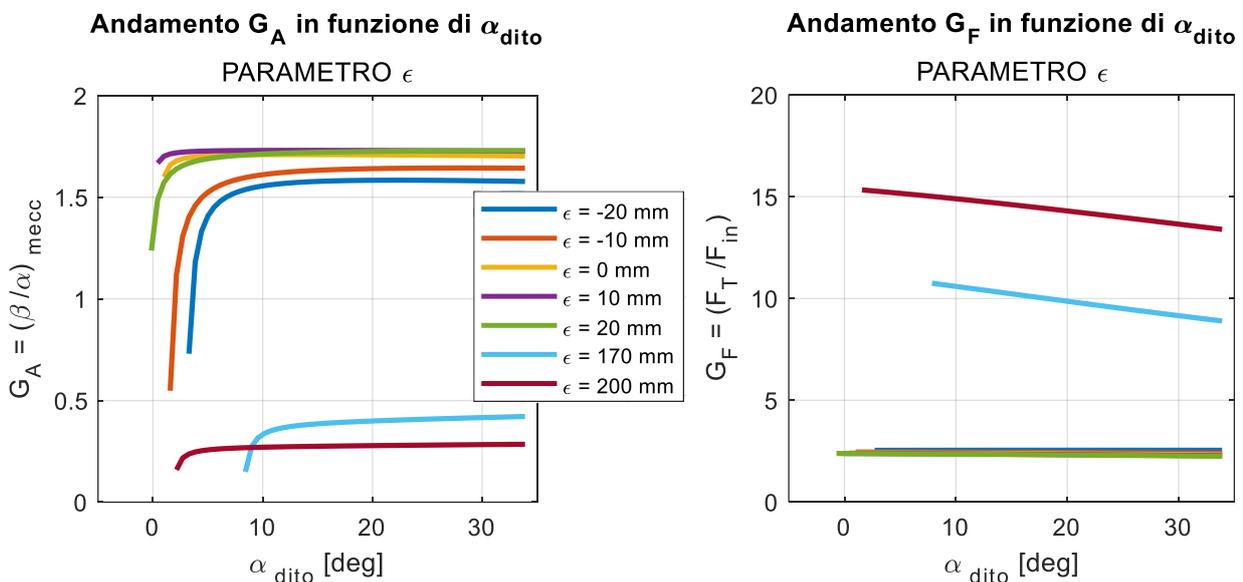


Figura 79 Influenza di ϵ su G_A e G_F

Nella Figura 72 sono riportati i grafici che illustrano l'andamento di G_A e G_F al variare dell'angolo di chiusura delle dita, per diversi valori di ϵ . Dall'analisi del grafico del guadagno dell'angolo (a sinistra), emerge chiaramente che alcuni valori di ϵ , come ad esempio $\epsilon=170$ gradi e $\epsilon=200$ gradi, provocano una significativa riduzione di β rispetto ad α ($G_A < 1$). Questa configurazione, con la cerniera B tra

le leve del meccanismo è inutilizzabile, nonostante l'intensa forza applicata. Al contrario, risultano più interessanti quei valori di ϵ che posizionano la cerniera B in avanti, tra le lame.

Si è quindi scelto di analizzare più nel dettaglio i valori compresi tra $-20 < \epsilon < 20$, prima di congelare il parametro di progetto. È interessante osservare come alcune curve non raggiungano il valore minimo di chiusura del dito, $\alpha_{dito} \cong 0 \text{ deg}$. In determinate configurazioni, come evidenziato dalle curve corrispondenti ai valori di $\epsilon = -10, -20, 170 \text{ e } 200$, la cinematica del meccanismo è limitata dall'accoppiamento perno-asola della cerniera E, il quale non permette una chiusura completa del meccanismo.

Il valore scelto è:

$$\epsilon = 2.6 \text{ deg}$$

Effetto della distanza tra le cerniere fisse D e B: parametro d

Un altro parametro da valutare è la distanza tra le due cerniere D e B. In Figura 80 si riportano i grafici di G_A e G_F in funzione dell'angolo di chiusura delle dita del gripper, per i seguenti valori del parametro d :

$$d = [12, 15, 18, 20]$$

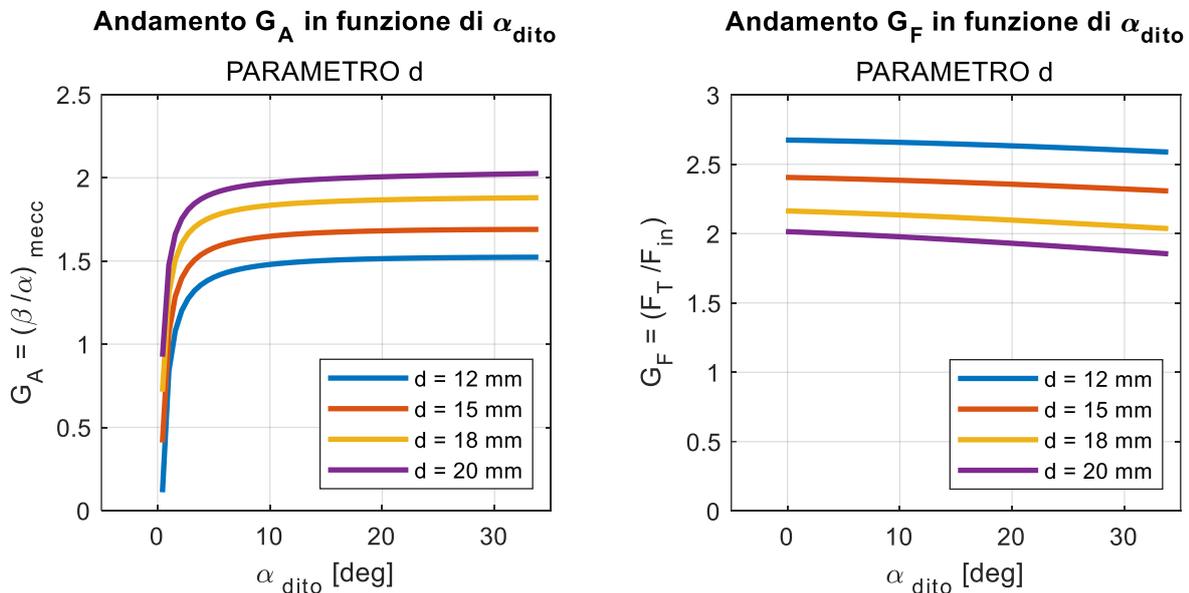


Figura 80 Influenza di d su G_A e G_F

Anche in questo caso la scelta deve essere ponderata per trovare il giusto compromesso tra i due guadagni. Avvicinare troppo le due cerniere aiuta ad aumentare G_F ma riduce G_A . Inoltre, vi è il vincolo legato agli ingombri dei componenti reali. Il valore scelto è:

$$d = 15 \text{ mm}$$

Effetto della distanza tra la cerniera fissa D e la cerniera mobile E: parametro b_2

La distanza tra la cerniera D e la cerniera E determina, insieme al parametro t, la posizione dell'asola sul componente "leva". I valori analizzati sono:

$$b_2 = [12, 18, 20, 22, 24]$$

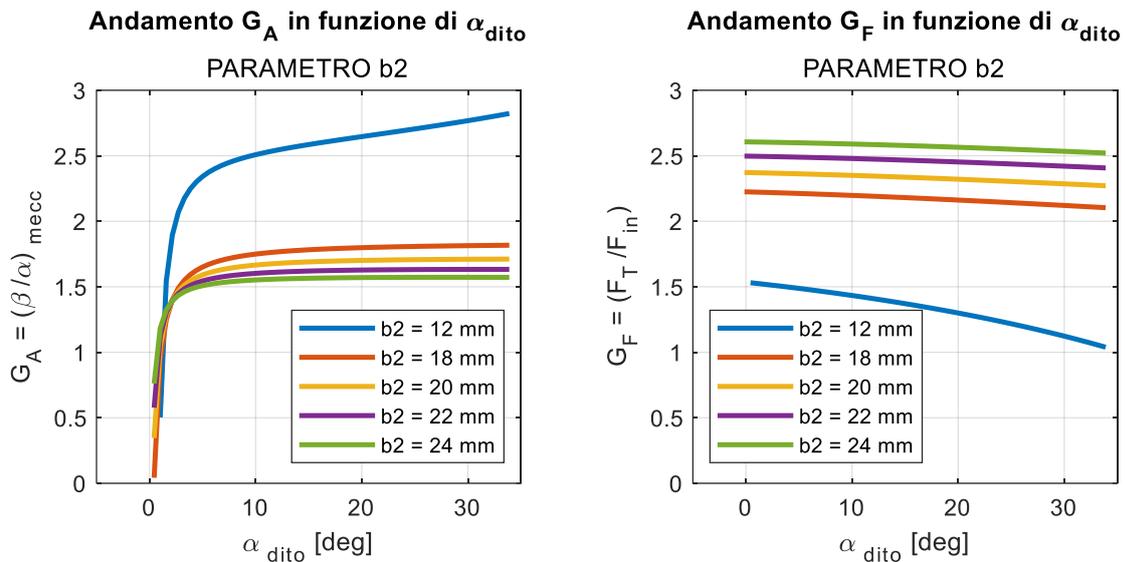


Figura 81 Influenza di b_2 su G_A e G_F

Se i valori di b_2 sono troppo bassi, si riduce il braccio sul quale agisce la forza F_E , il che comporta un notevole aumento del suo modulo, come si può osservare chiaramente nella Figura 82. Questa situazione potrebbe causare punti di stress e deformazioni nel materiale plastico con cui sono realizzati i componenti, mettendo a rischio il corretto funzionamento del meccanismo.

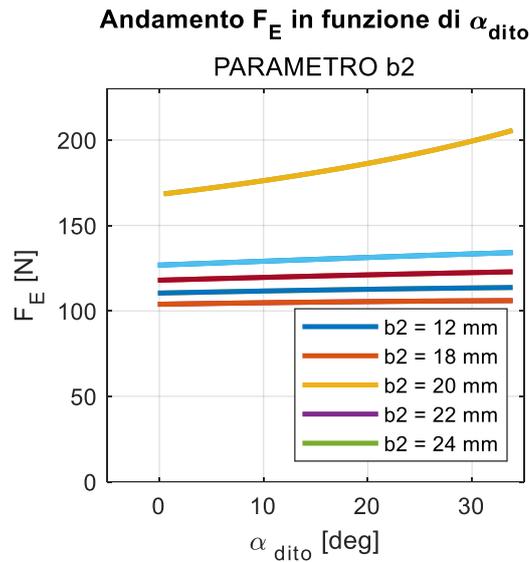


Figura 82 Influenza di b_2 su F_E

Il valore scelto è:

$$b_2 = 20.5 \text{ mm}$$

Effetto del disallineamento dell'asse dell'asola in cui scorre la cerniera mobile E: parametro t

Questo parametro introduce un ulteriore fattore per ottimizzare il meccanismo. Insieme a b_2 stabilisce la posizione dell'asola nel componente "leva". I valori analizzati sono piccoli, ma la sua introduzione permette di ottenere un vantaggio:

$$t = [-4, -2, 0, 2, 4]$$

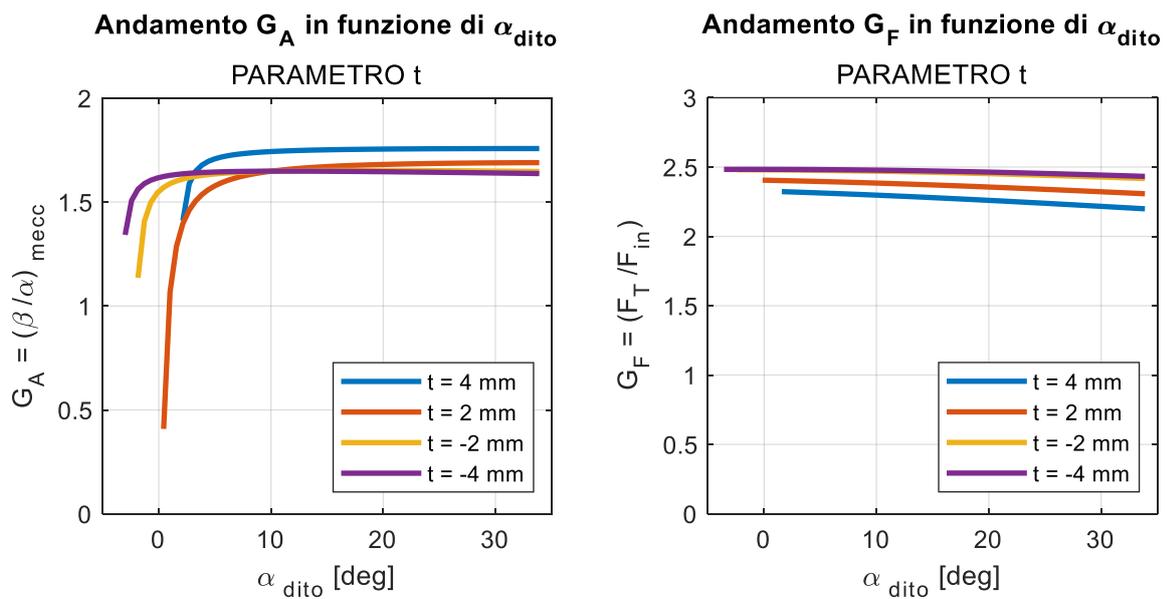


Figura 83 Influenza di t su G_A e G_F

Il valore stabilito è:

$$t = 2 \text{ mm}$$

Risultati

I valori dei parametri del meccanismo sono riportati in Tabella 16.

Tabella 16 Parametri dell'utensile

Parametro	Valore
a_1	131 mm
b_1	25 mm
b_2	20.5 mm
d	15 deg
t	2 deg
ϵ	2.6 deg
m_1	35 deg
m_2	35 deg

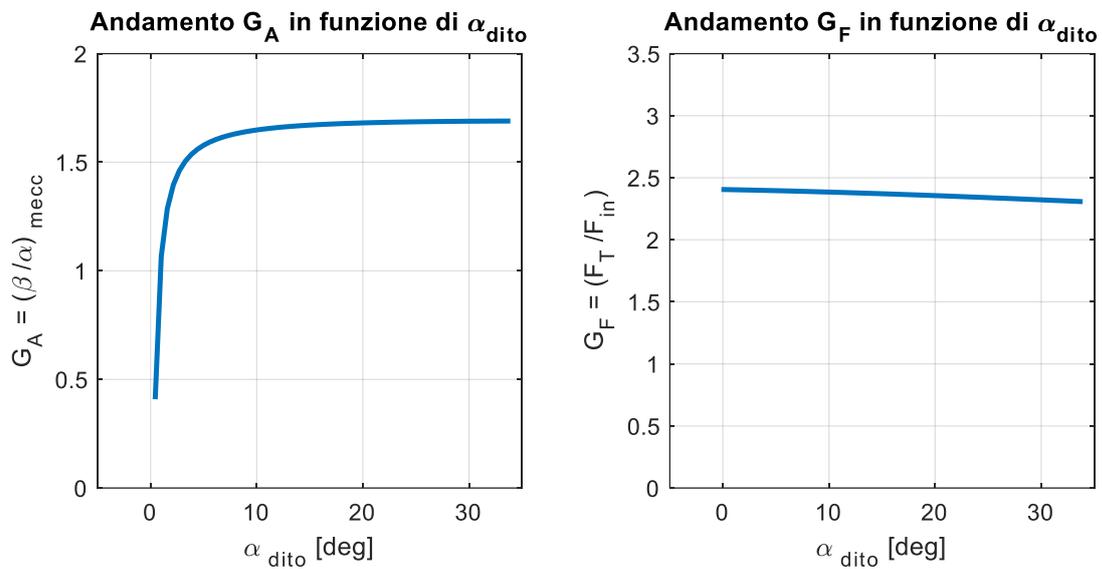


Figura 84 Andamenti di G_A e G_F con i parametri scelti

La forza di taglio in questa configurazione viene riportata in Figura 85:

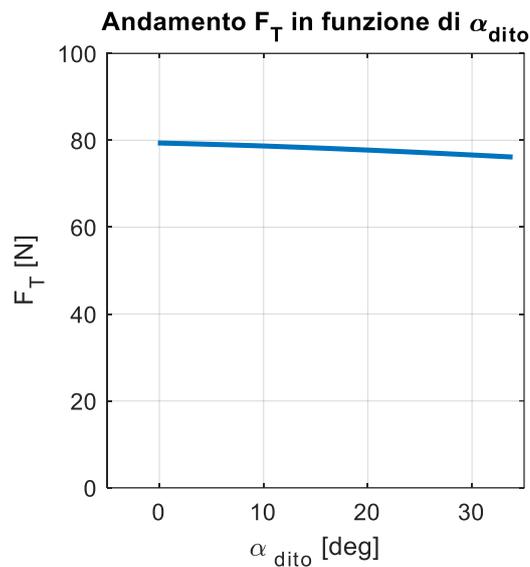


Figura 85 Forza di taglio F_T con i parametri scelti, con $F_{IN} = 30 N$

Questi valori di forza di taglio vengono raggiunti nel caso peggiore, in cui il gripper è prossimo al punto morto di chiusura, mentre normalmente il taglio comincia in una configurazione diversa dove la forza esplicabile dal gripper è maggiore. Questa scelta è stata presa per avere la certezza del taglio anche nella fase finale. Il valore minimo della forza di taglio, in Figura 85, è superiore a quello richiesto per tagliare il tralcio della vite, misurato sperimentalmente nel paragrafo 3.2.1.

3.5 Progettazione esecutiva

La progettazione esecutiva aveva come scopo principale la creazione di un prototipo a basso costo tramite fabbricazione additiva per verificare la sua funzionalità effettiva. Durante il processo di progettazione si è cercato un compromesso tra due obiettivi contrastanti: da un lato, limitare le dimensioni e le masse dei vari componenti per rispettare i limiti di peso della pinza, e dall'altro, garantire la resistenza meccanica dei componenti, aumentando lo spessore quando necessario.

I principali componenti dell'utensile sono i seguenti:

Telaio: svolge la funzione di manico da un lato, accoglie una delle due lame e fa da battuta per l'elemento di presa del ramo.

Leva: funge da manico da un lato e tramite l'accoppiamento perno-asola ha il compito di azionare il porta-lama.

Porta-lama: studiato per ospitare e bloccare la lama nella posizione corretta utilizzando una vite e un dado.

Elemento di presa: ha il compito di bloccare il ramo e nella sua parte terminale è presente un materiale morbido progettato per adattarsi alle diverse dimensioni e forme dei campioni da afferrare.

Molla 1: lavora a compressione e ha il compito importante di far tornare il meccanismo nella posizione iniziale una volta che la forza d'ingresso viene interrotta.

Molla 2: anch'essa lavora a compressione. Oltre a riportare l'elemento di presa nella posizione iniziale, esercita la forza che determina la coppia di presa del ramo.

Entrambe le molle sono provviste di un sistema di precarico che utilizza una vite presente sul porta-lama.

Sede mobile della molla: per entrambe le molle è stato realizzato un elemento cilindrico cavo con al suo interno un cono per il centraggio della molla, regolabile tramite l'apposita vite per calibrare il precarico delle molle.

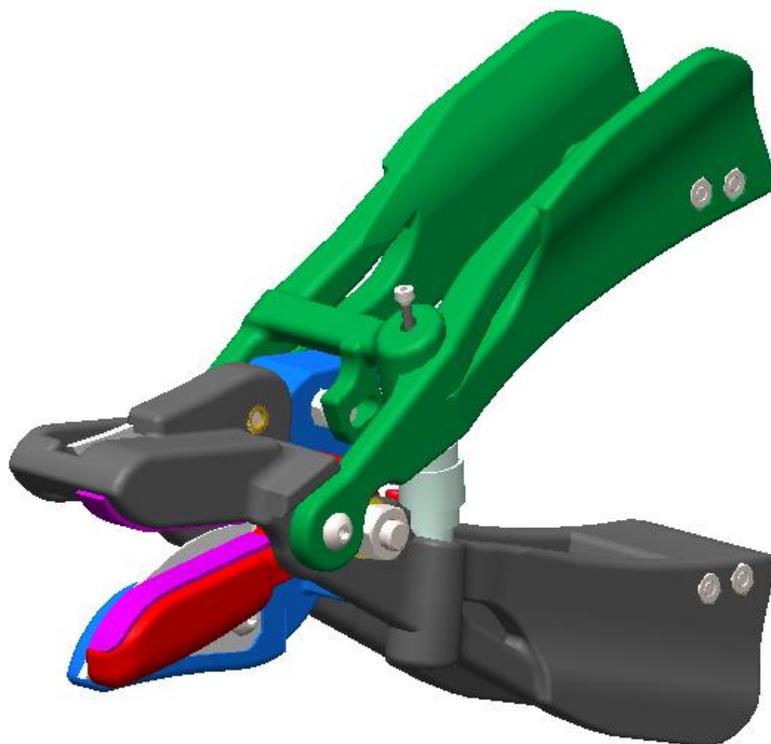


Figura 86 Immagine isometrica dell'utensile

3.5.1 Telaio

È uno dei 2 manici del meccanismo: accoglie una delle due lame e svolge la funzione di battuta per l'elemento di presa del ramo.

Presenta 5 fori nei quali si inseriscono 4 viti: i fori corrispondenti alla cerniera D ospitano 2 boccole autolubrificanti in materiale plastico. In due di questi, quelli che corrispondono alla cerniera B, sono stati inseriti degli inserti filettati, così come nel foro in cui si infila la vite per fissare la lama.

La porzione di manico che si interfaccia con una delle dita del gripper è provvista di due pareti laterali, con un invito raccordato per permettere comodamente la presa dell'utensile e poi la corretta tenuta durante il suo utilizzo. Anche la superficie di contatto su cui si scambiano le forze principali in fase di taglio tra il dito e il telaio ha una superficie che asseconda il moto di chiusura del gripper.

Su un lato è stata ricavata la sede della molla principale, che ha il compito di riportare in posizione aperta il meccanismo e tenerlo a contatto con le dita.

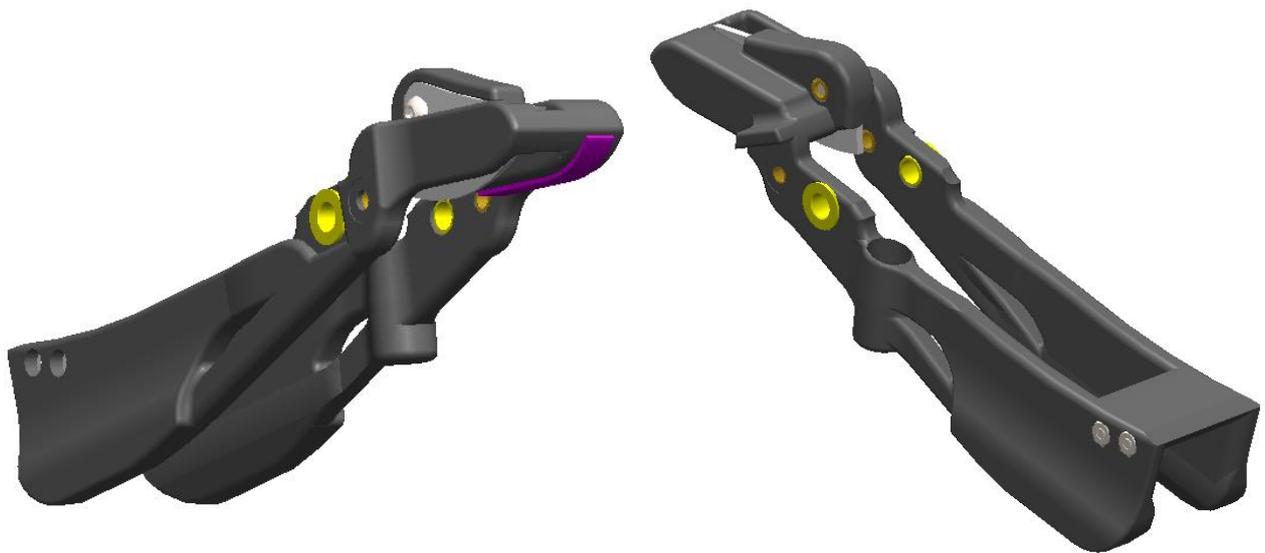


Figura 87 Immagini isometriche del telaio

3.5.2 Leva

È il secondo manico del meccanismo. Presenta due fori che accolgono 2 boccole autolubrificanti, in corrispondenza della cerniera B. All'interno, su un lato, è ricavata un'asola per l'accoppiamento con il porta-lama. Per una maggiore rigidità del componente è stata inserita una traversa all'altezza dell'asola, che attraversa il componente. Questa aggiunta ha permesso la realizzazione di una seconda asola dalla parte opposta del porta-lama, evitando che la forza scambiata tra i due componenti portasse in rotazione il porta-lama flettendolo, essendo realizzato in materiale plastico. Analogamente al telaio,

la leva presenta la sede per l'altro capo della molla principale: da questo lato è previsto un sistema per gestire il precarico, ossia un battente mobile che può essere spostato e regolato da una vite. Quest'ultima è inserita all'interno di un inserto filettato, opportunamente collocato all'interno della sede della molla. L'interfaccia con il dito è la stessa vista in precedenza per il telaio.

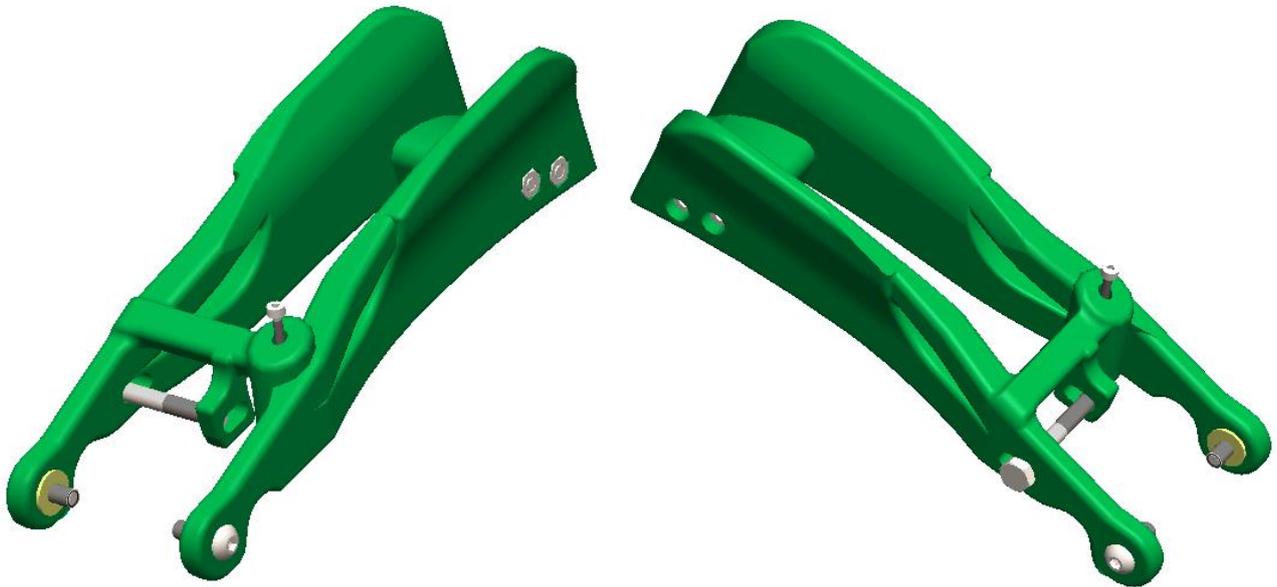


Figura 88 Immagini isometriche della leva

3.5.3 Porta-lama

Ha l'importante compito di accogliere la lama e di bloccarla nella posizione corretta grazie all'utilizzo di vite e dado. Il perno che trasmette il moto è incastrato con interferenza nella prima parte e avvitato dentro un inserto filettato nella seconda. Si inserisce un dado al termine del foro per effettuare un incastro ed evitare giochi nell'accoppiamento. Sul foro principale, in corrispondenza della cerniera D, si utilizza una boccia per garantire il moto di rotazione con il minor attrito possibile.

Dalla Figura 89 è possibile vedere anche la vite per la regolazione del precarico della molla a compressione. Oltre alla vite è stato necessario realizzare, sempre tramite fabbricazione additiva, un componente cilindrico cavo con al suo interno un cono per il centraggio della molla. Questo componente viene avvitato al fondo della vite, così quando si vuole regolare il precarico della molla è sufficiente fare ruotare la vite ed il componente traslerà assieme ad essa.

Una sporgenza opportunamente sagomata funge da fincorsa per l'elemento di presa.

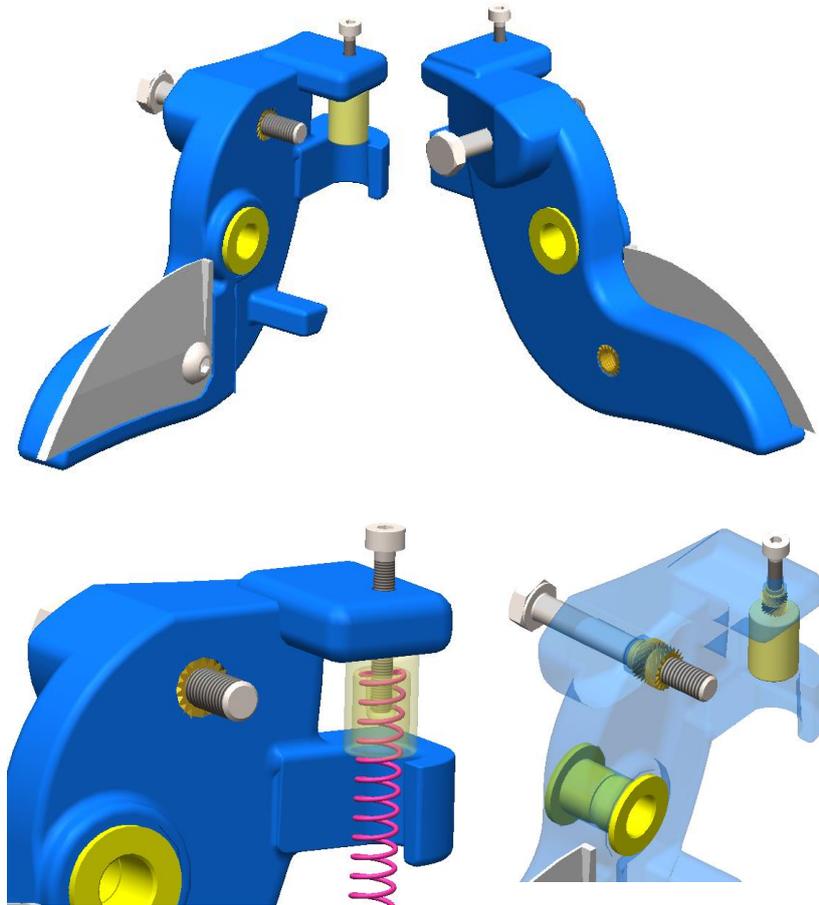


Figura 89 Immagini del porta-lama e dettagli degli elementi ad esso accoppiati

3.5.4 Elemento di presa

Ha il compito di afferrare e mantenere in presa i campioni. È un componente piuttosto semplice, con una parte terminale su cui è incollato il materiale soft, in viola in Figura 90, per facilitare la presa ed il mantenimento del ramo. L'inclinazione del braccio della molla è pensata per far lavorare la molla con una curvatura ridotta, che si annulla quando l'elemento di presa va in battuta sul telaio e la lama è a finecorsa.

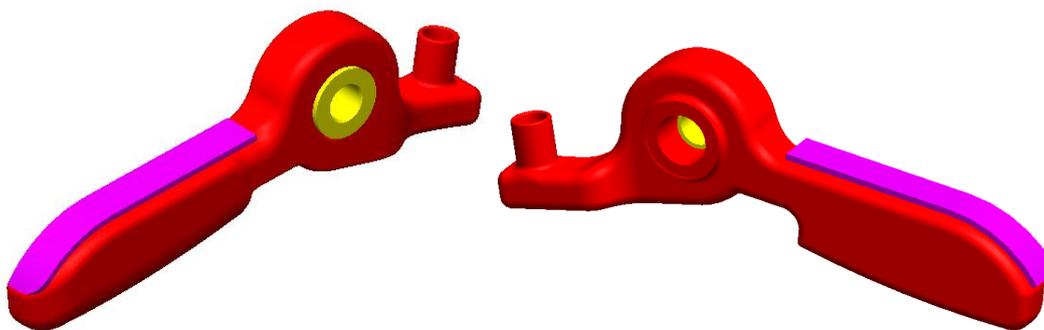


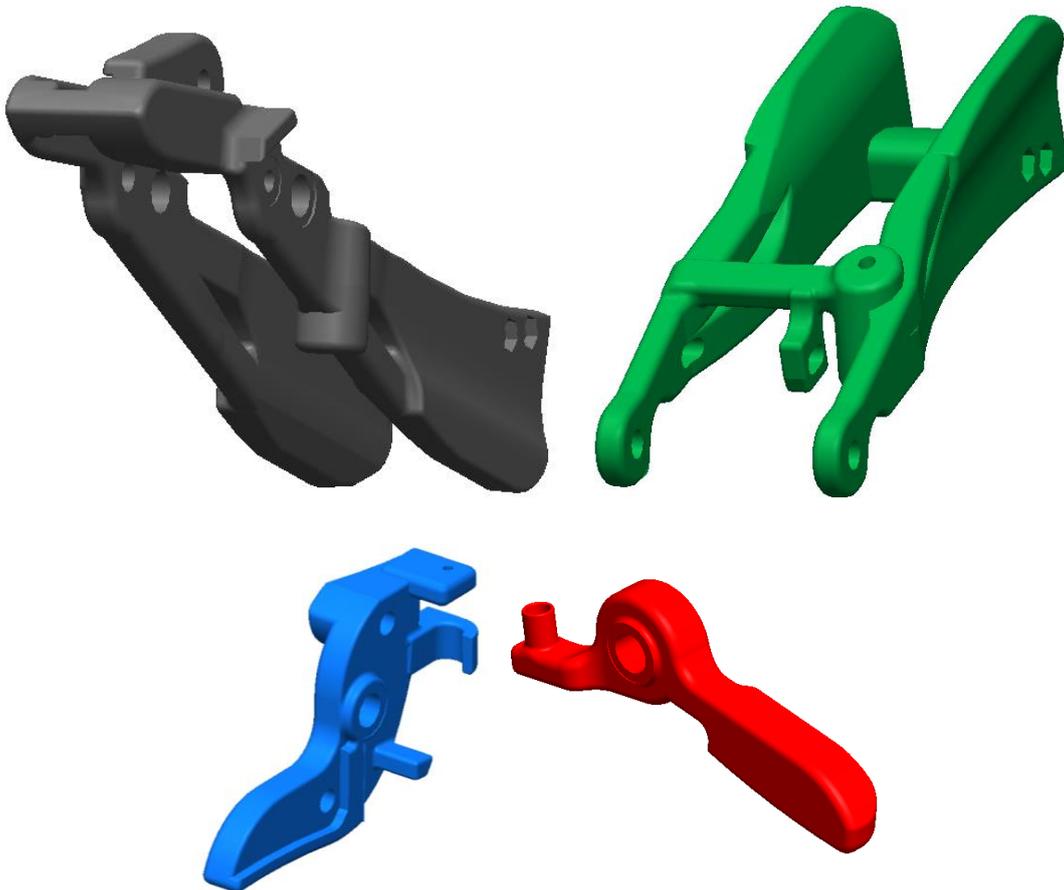
Figura 90 Elemento di presa con boccola e materiale soft in due viste diverse

4 Prototipazione

Per realizzare il prototipo, alcuni componenti sono stati acquistati ed altri realizzati tramite fabbricazione additiva. Terminata la fase di progettazione esecutiva, infatti, sono stati reperiti i componenti commerciali e realizzati i file per la stampante 3D.

4.1 Componenti ottenuti tramite fabbricazione additiva

Gli elementi ottenuti tramite fabbricazione additiva sono: Telaio, Leva, Porta-lama, Elemento di presa e i due battenti per le molle. Sia il telaio che la leva, per la loro particolare geometria, sono stati divisi in due metà ciascuno per ridurre al minimo il materiale di supporto necessario durante il processo di fabbricazione additiva. Sono stati quindi previsti dei fori, utili per avvitare insieme le due parti.



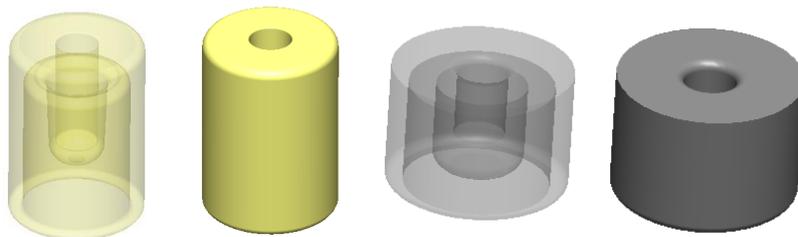


Figura 91 Immagine dei componenti prodotti tramite processo di fabbricazione additiva: telaio, leva, porta-lama, elemento di presa e battenti per la regolazione delle due molle

4.2 Componenti commerciali

Alcuni componenti non sono realizzabili con la stampante 3D ma sono di facile reperimento in commercio:

Minuteria meccanica

Le viti e i dadi utilizzati erano presenti nei laboratori del Politecnico di Torino. Gli inserti, invece, sono stati acquistati, così come le boccole autolubrificanti.

Molle

- La molla 1, interposta tra il telaio e la leva, è una classica molla per forbici da potatura con una lunghezza libera di 54 mm.



Figura 92 Molla 1, classica molla a compressione per forbici da potatura [19]

Questa molla è stata testata su un banco di prova per determinare la sua rigidità, da utilizzare nei calcoli di progetto. In modo simile alla misurazione della forza di taglio, è stata utilizzata una cella di carico per misurare la forza applicata sulla molla.

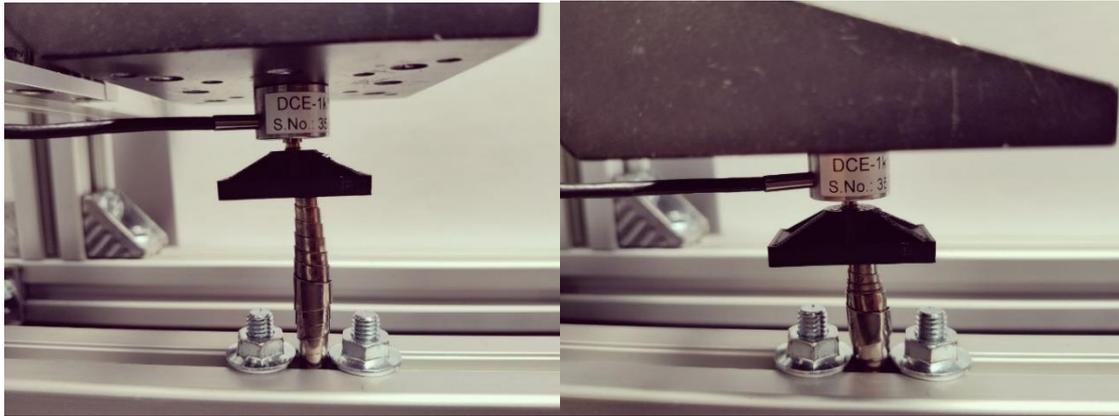


Figura 93 Foto del banco di misura della rigidezza della molla 1

- La molla 2 è interposta tra l'elemento di presa e l'elemento di taglio, lavora a compressione e ha una lunghezza libera di 31 mm. La rigidezza in questo caso era già nota ed è di 0.54 N/mm.



Figura 94 Molla a compressione utilizzata tra l'elemento di presa e quello di taglio [19]

Lame

Sono state acquistate in un ferramenta a Torino. Sono due lame identiche, affilate solo da un lato, che permettono il ricoprimento in fase di taglio. Per adattarle al prototipo sono state tagliate e accorciate, in quanto il foro di maggiori dimensioni non sarebbe stato utilizzato.



Figura 95 Lama simile a quella acquistata, a sinistra [foto tratta da: <https://www.memigavi.it/prodotto/lama-ricambio-forbice-speedy-campagnola>], e lama tagliata, a destra

Inserti

È stato acquistato un set di inserti filettati in ottone appositamente realizzati per l'applicazione su pezzi stampati in 3D. In particolare, sono stati utilizzati i seguenti inserti:

- 2 inserti - M2x4.0x3.6 – lungo 4 mm, è stato utilizzato per accogliere le viti M2 che vanno a regolare il precarico delle 2 molle
- 5 inserti – M4x5.8x6.3 – lungo 5.8 mm, utilizzato come riscontro delle viti M4 per fermare le lame, per collegare la leva al telaio e per fissare il perno di collegamento tra la leva e il portalama dentro quest'ultimo.

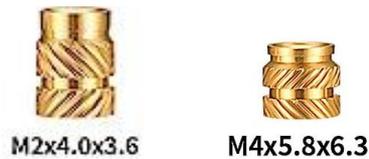


Figura 96 Foto di due inserti filettati: M2x04x3.6, a sinistra, e M4x5.8x6.3, a destra

Boccole autolubrificanti

Questi particolari cuscinetti flangiati IGUS permettono il moto relativo tra le varie parti riducendo di molto l'attrito. Sono state utilizzate boccole di due misure diverse:

- Boccola jfm-0405-06
- Boccola jfm-0608-06



Figura 97 Foto del cuscinetto flangiato IGUS. Foto presa da <https://it.rs-online.com/>.

Materiale soft

Il materiale soft da applicare sugli elementi di presa è stato pensato per dare un minimo di adattabilità alle diverse dimensioni e forme dei campioni da afferrare. Per assicurare la presa, si desidera avere le parti morbide che vadano a contatto e si comprimano di circa 1 millimetro: in questo modo si aumenta il coefficiente di attrito con il ramo, che a contatto con il PLA liscio potrebbe scivolare. Per questo prototipo, si è optato per un materiale di facile reperimento e poco costoso: guarnizione adesiva in gomma espansa, che solitamente viene usata come paraspifferi di finestre e porte.

4.3 Assemblaggio prototipo

Con il materiale a disposizione, è possibile procedere con l'assemblaggio, che prevede prima il montaggio dei singoli sottoassiemi e poi montaggio finale del complessivo.

Assemblaggio sottoassiemi

- Sottoassieme Telaio: stampate le due metà del componente in 3D con il materiale tough PLA e rimossi i supporti in PVC, si uniscono le due parti e si inseriscono le 2 viti M3x30 e i corrispondenti dadi nella zona di supporto per l'appoggio del dito della pinza Kinova. Si procede scaldando e inserendo i 3 inserti M4x5.8x6.3 per il fissaggio della lama e l'attacco della leva. Si inserisce la lama e la si blocca avvitando con una vite M4x8. Infine, si posiziona il materiale soft, incollandolo, e si inseriscono le due boccole jfm-0608-06 nei fori del fulcro principale (cerniera D)

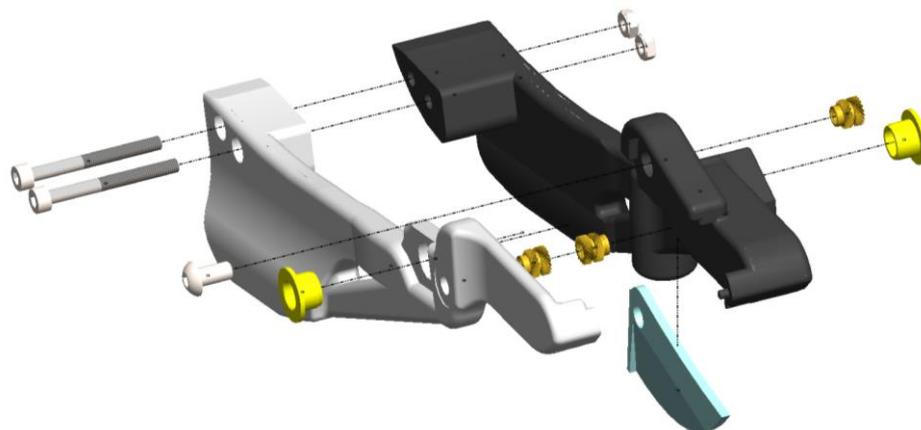


Figura 98 Vista esplosa del sottoassieme Telaio

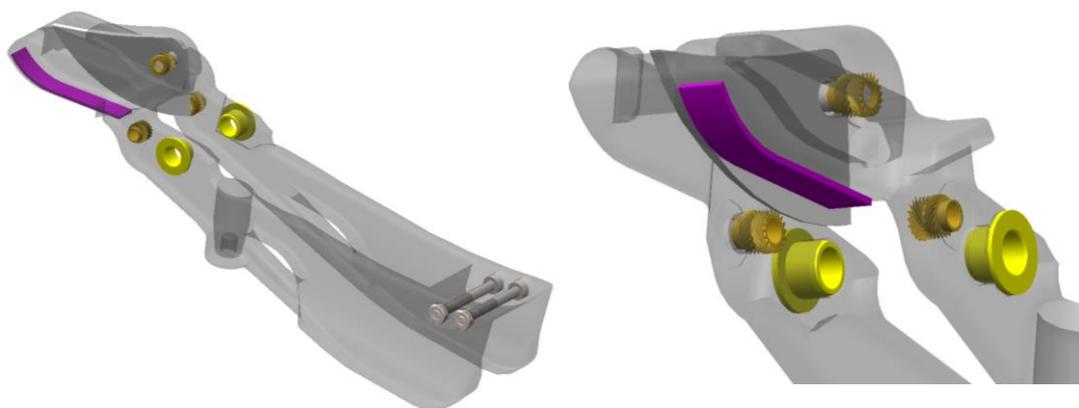


Figura 99 Viste aggiuntive del sottoassieme Telaio con il telaio posto in trasparenza

- Sottoassieme Leva: si uniscono le due metà della leva stampata in 3D in modo analogo a quanto fatto per il sottoassieme telaio, con l'aggiunta della traversa in questo caso, stampata

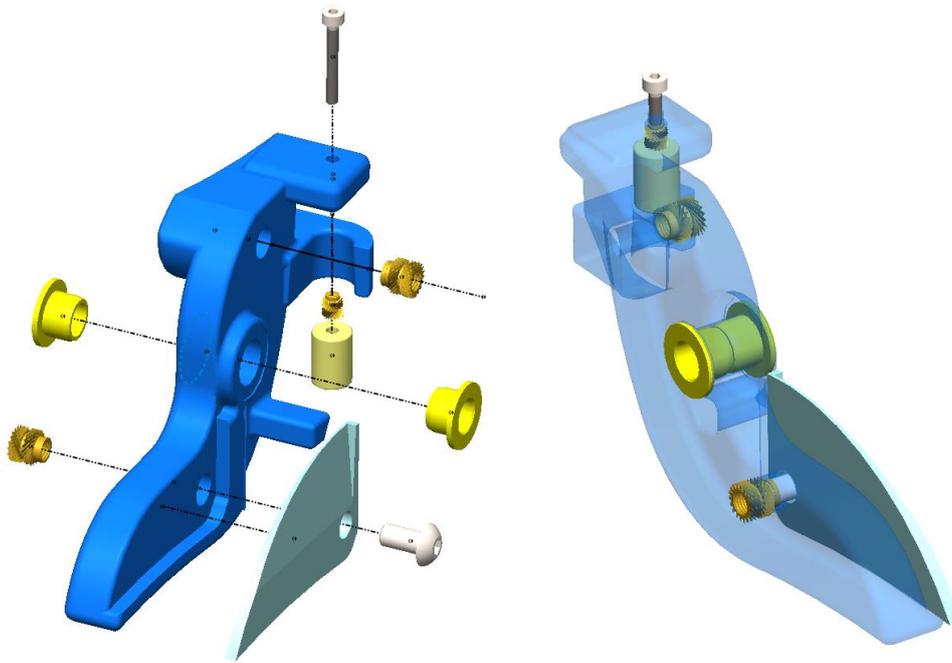


Figura 102 Sottoassieme Porta-lama nella vista esplosa e nella vista isometrica con il porta-lama messo in trasparenza

- Sottoassieme Elemento di presa: si va a posizionare il materiale soft adesivo e si inserisce la boccia jfm-0405-06 (solo da un lato poiché l'altro lato è già in contatto con la flangia della boccia jfm-0405-06 del porta-lama).

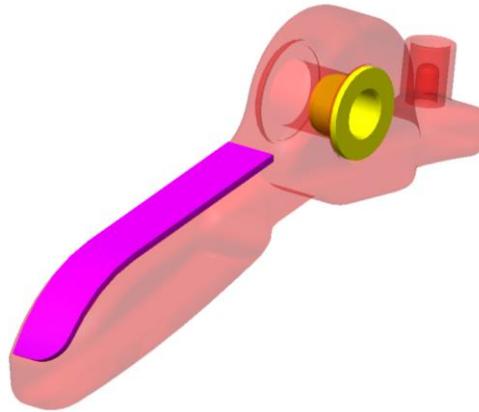


Figura 103 Sottoassieme Elemento di presa

I sottoassiemi reali del porta-lama e dell'elemento di presa sono riportati in Figura 104:



Figura 104 sottoassiemi reali dell'elemento di presa, a sinistra, e dell'elemento di taglio (porta-lama), a destra

Il sottoassieme reale della leva è visibile in Figura 105, in due viste differenti:



Figura 105 Vista laterale e isometrica del sottoassieme leva

Il sottoassieme reale del telaio è visibile in Figura 106, in due viste differenti:



Figura 106 Vista dei due lati del sottoassieme telaio

Montaggio delle parti

Assemblati i sottoassiemi, è possibile procedere con il montaggio di tutte le parti

- La leva viene portata in posizione allineando i fori con quelli del telaio, già provvisti di inserto. Si inserisce la molla 1 nelle due sedi e con le viti M4 si collega la leva al telaio. Grazie alle boccole è permesso il moto tra i due sottoassiemi.
- I sottoassiemi porta-lama ed elemento di presa vengono avvicinati e si inserisce la molla 2 tra le due sedi. I due sottoassiemi sono spinti all'interno del telaio, in modo tale da allineare tutti i fori del fulcro. A questo punto è possibile inserire la vite parzialmente filettata *M6x70mm*, che diventerà il fulcro dell'utensile.
- Si allineano le due asole con il foro del portalama e si inserisce il perno. Superato il portalama si inserisce un dado e si continua ad avvitare mantenendolo fermo, fino a raggiungere la seconda asola. Infine, si stringe il dado verso il portalama per generare un incastro.

In Figura 107 è possibile vedere il prototipo di utensile finito.



Figura 107 Foto del prototipo nelle due viste laterali

4.4 Integrazione con gripper del braccio robotico

Questo innovativo utensile di taglio è stato progettato specificamente per essere utilizzato da una mano robotica a due dita, consentendo un'efficace integrazione tra le due tecnologie. Uno degli elementi chiave di questa integrazione è la superficie di contatto tra le dita della mano robotica e l'utensile stesso, che è stata studiata appositamente per garantire un contatto corretto e affidabile.

Per assicurare una presa stabile, sono presenti delle pareti laterali che aderiscono ai lati del dito, offrendo un supporto aggiuntivo durante l'operazione di taglio. Queste pareti sono state progettate con un bordo smussato, consentendo una facile presa e riducendo al minimo gli ostacoli o gli attriti che potrebbero compromettere l'efficienza del movimento.

Inoltre, è stata prestata particolare attenzione allo spazio disponibile per la punta delle dita quando la mano si chiude attorno all'utensile. Questo spazio adeguato consente una chiusura sicura ed evita qualsiasi interferenza tra la falange distale e l'utensile, garantendo un'accurata esecuzione del compito. Dallo studio della dinamica del gripper, infatti, è emerso che la configurazione di presa in grado di esplicare la forza maggiore è quella con la sola falange prossimale, senza avere il contatto della falange distale con l'oggetto.

La molla che permette alle leve dell'utensile di ritornare nella loro posizione iniziale è stata appositamente calibrata per assorbire il minor valore possibile di coppia. La sua azione deve essere sufficientemente alta da riportare in posizione aperta l'utensile e tenerlo ben saldo tra le dita, ma non eccessivamente in quanto riduce la quantità di forza che arriva alle lame per il taglio. Ciò contribuisce a migliorare l'efficienza complessiva del sistema, riducendo lo sforzo richiesto alla mano robotica e consentendole di eseguire i tagli in modo più rapido e fluido.

L'integrazione tra la mano robotica e l'utensile di taglio consente di svolgere compiti di taglio dei rami con facilità ed efficacia.

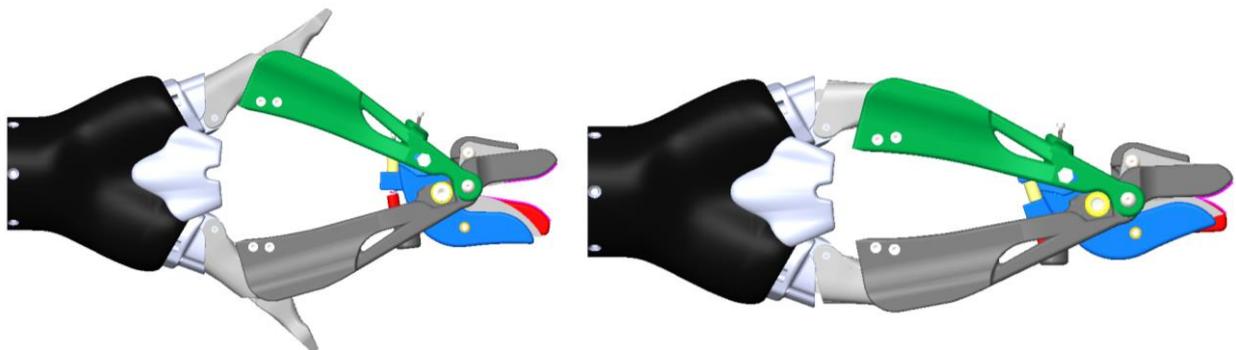


Figura 108 vista laterale dell'assieme dell'utensile e del gripper nella configurazione di gripper aperto e chiuso

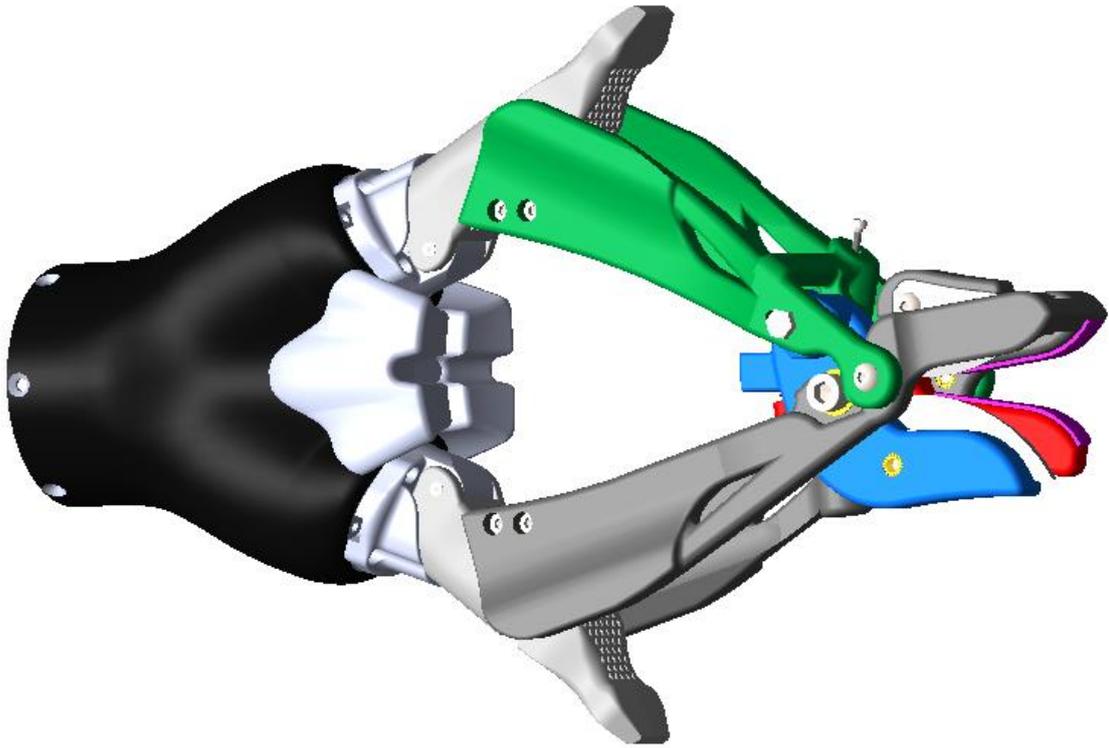


Figura 109 Assieme dell'utensile sul gripper Kinova aperto

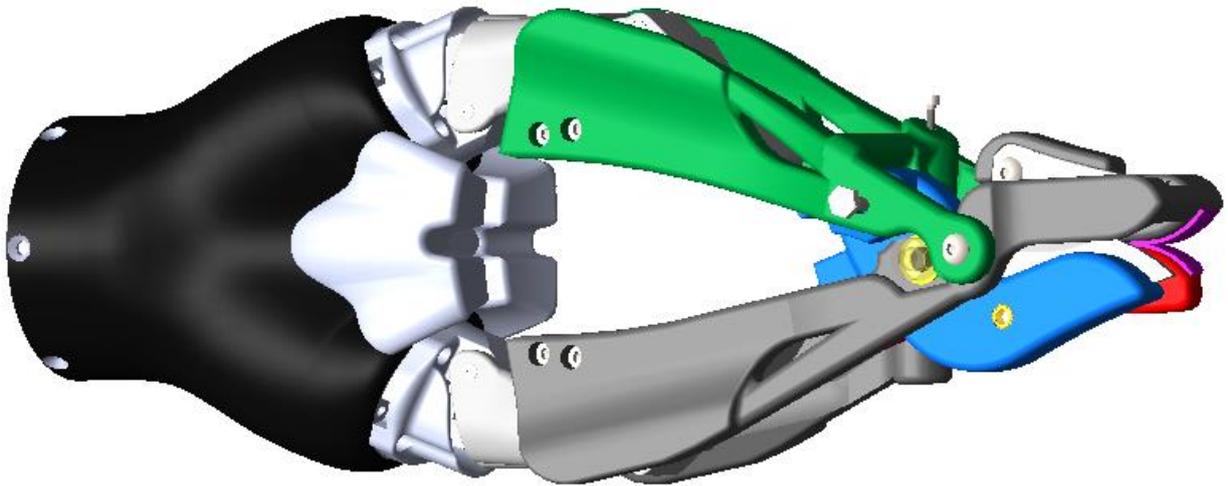


Figura 110 Assieme dell'utensile sul gripper Kinova completamente chiuso

5 Sperimentazione

In questo paragrafo esploreremo la fase di sperimentazione dell'utensile controllato dalla mano robotica. Concentreremo l'attenzione sulla presa automatica, il taglio e il percorso completo che racchiude tutte le fasi dell'operazione di raccolta, mettendo in luce le caratteristiche che migliorano l'efficienza, la precisione e la versatilità di questa soluzione.

5.1 Presa automatica

Iniziamo descrivendo la presa automatica, che è stata realizzata utilizzando un portautensile stampato in 3D, visibile in Figura 111, appositamente progettato per mantenere saldamente in posizione l'utensile. Come per il telaio e la leva, al fine di ridurre al minimo il materiale di supporto durante la stampa si è scelto di dividere il pezzo in due metà. Sono quindi presenti 4 fori per viti M4 con l'apposita sede per i dadi, che andranno a unire i due pezzi.

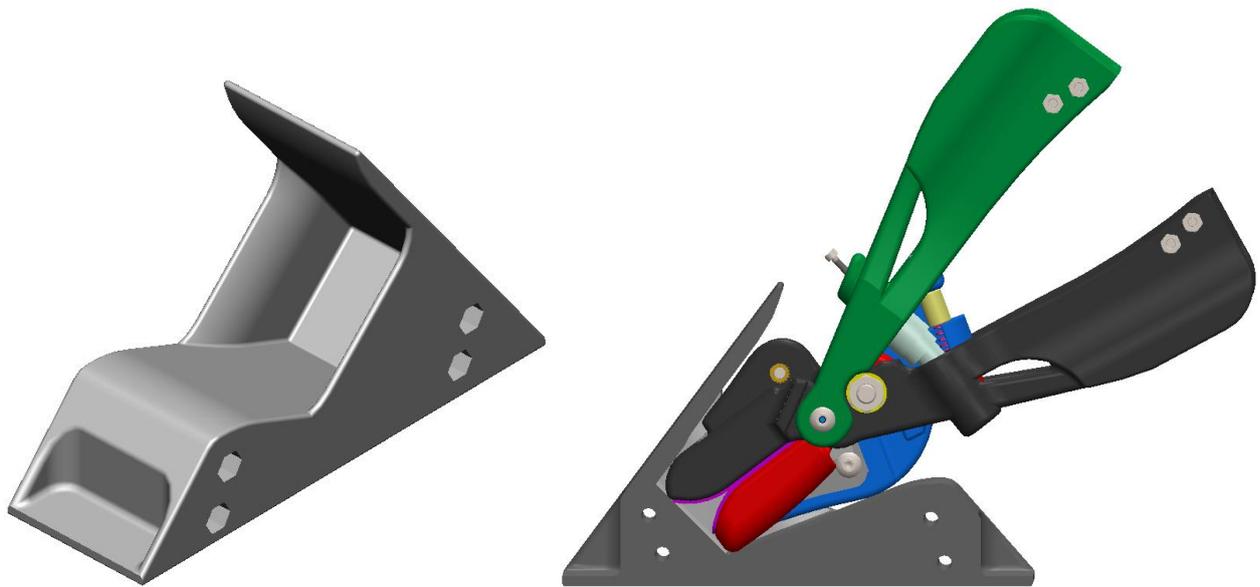


Figura 111 Immagine del porta-utensile e del suo accoppiamento con il meccanismo di presa e di taglio

Per facilitare l'operazione di presa, il porta-utensile deve tenere l'utensile in posizione chiusa. Una volta trasmessa al robot l'informazione sulla posizione del porta-utensile, sarà in grado di avvicinarsi ad esso autonomamente e procedere con l'afferraggio. A questo punto il robot estrae l'utensile in modo preciso e controllato.

La sequenza delle immagini che mostra la presa automatica è riportata in Figura 112.

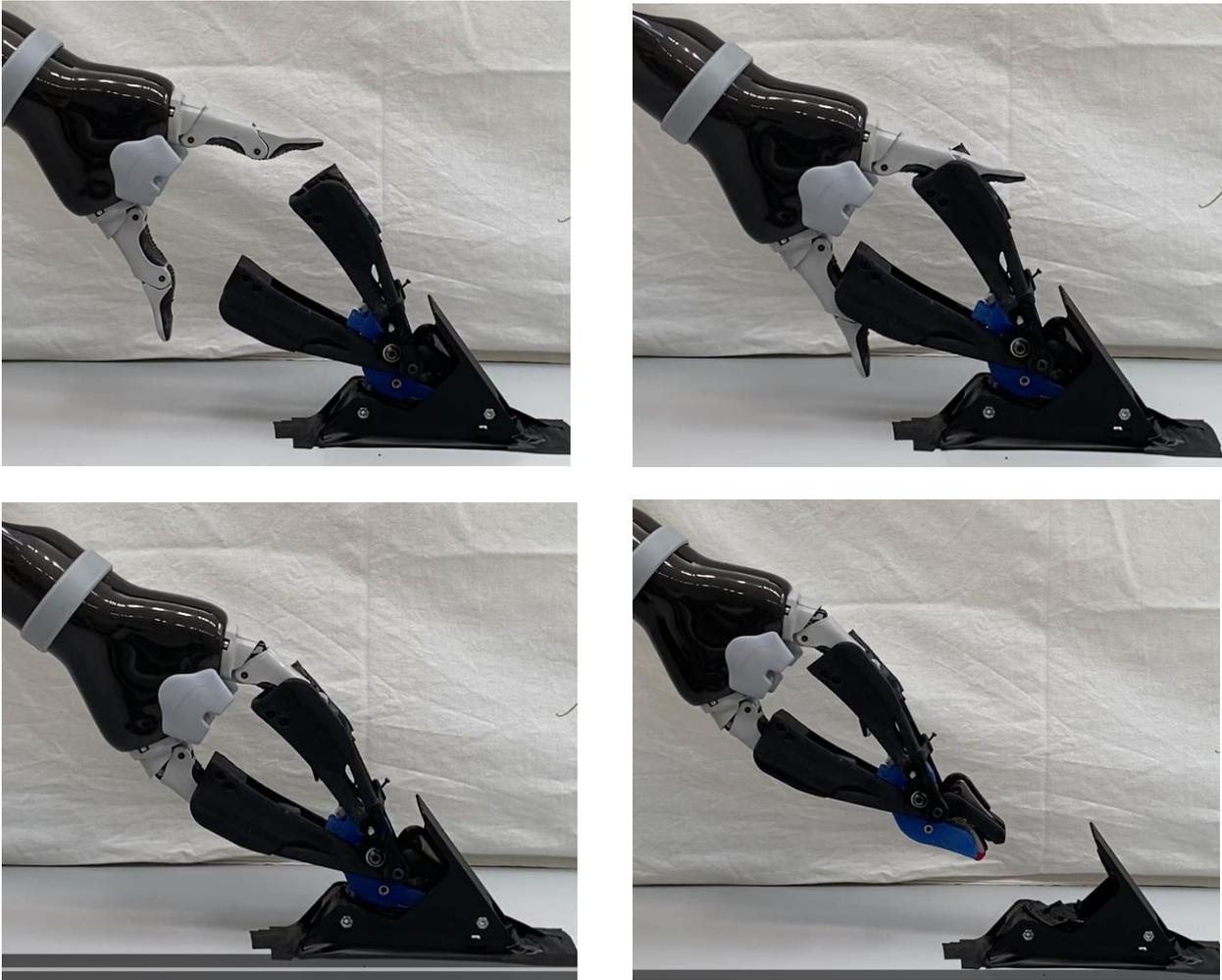


Figura 112 Sequenza di immagini della fase di presa automatica

5.2 Taglio

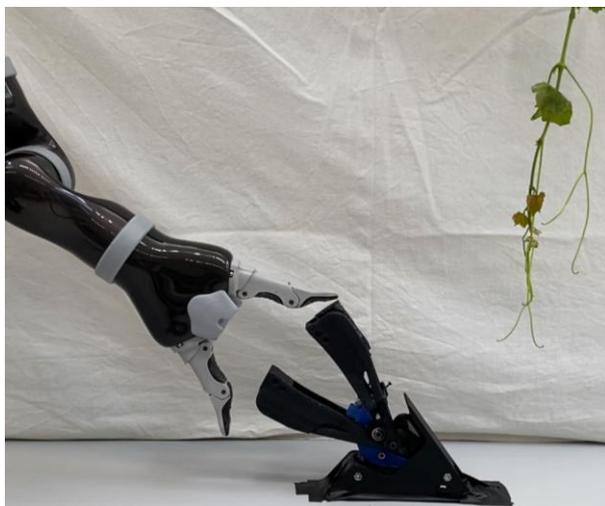
Entriamo nel dettaglio della fase di taglio. Grazie all'imbocco raccordato dell'utensile, è possibile accogliere i rami con un certo grado di errore, consentendo una maggiore flessibilità nel processo di taglio. L'angolo di apertura dell'utensile è stato aumentato rispetto al prototipo precedente, che presentava solo 12 gradi di apertura. Questo nuovo design offre un angolo di apertura superiore a 17 gradi, avanzando l'angolo di sovrapposizione delle lame. Ciò significa che l'utensile può affrontare rami di diverse dimensioni e spessori in modo più efficace, migliorando la qualità e l'efficienza del taglio.



Figura 113 Sequenza di foto dedicata al taglio del campione vegetativo

5.3 Percorso completo

Infine, nel percorso completo dell'operazione, si uniscono i punti descritti in precedenza. Si programma la traiettoria che il robot deve seguire e in totale autonomia procede con le varie operazioni. Dopo aver estratto l'utensile dal portautensile, il robot è in grado di eseguire il taglio dei rami utilizzando le caratteristiche ottimizzate dell'utensile stesso. Una volta completato il taglio, il robot deposita il ramo e riporta l'utensile nel portautensile, per poi allontanarsi. Questo processo avviene in modo autonomo, consentendo al robot di eseguire l'intera operazione senza necessità di intervento umano.



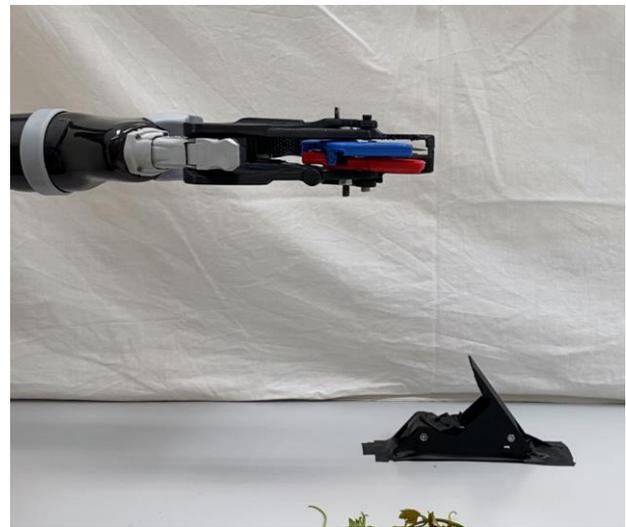
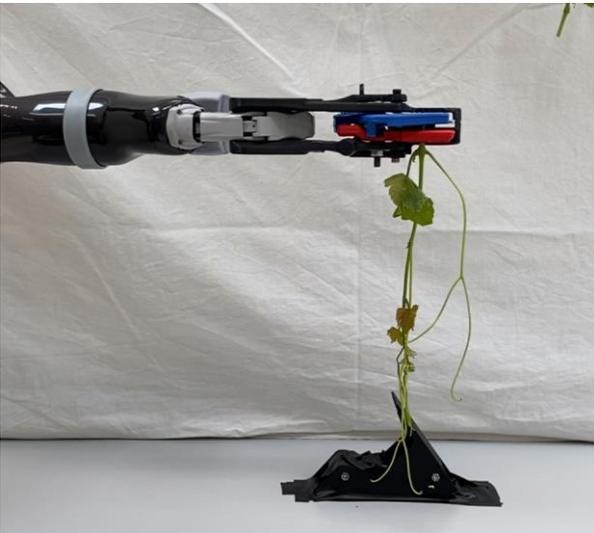
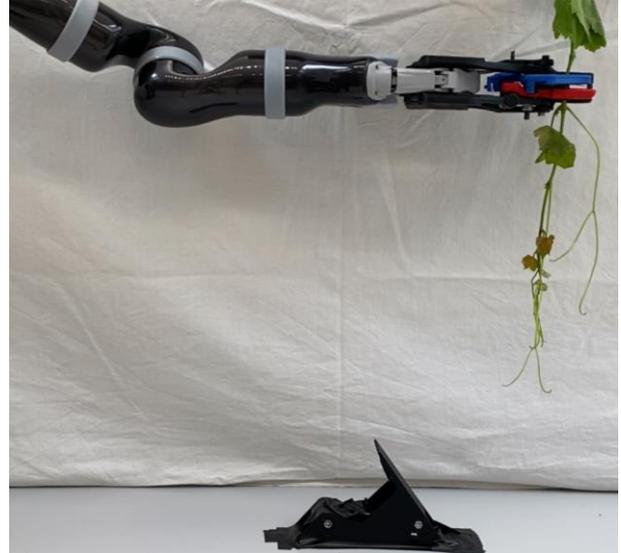
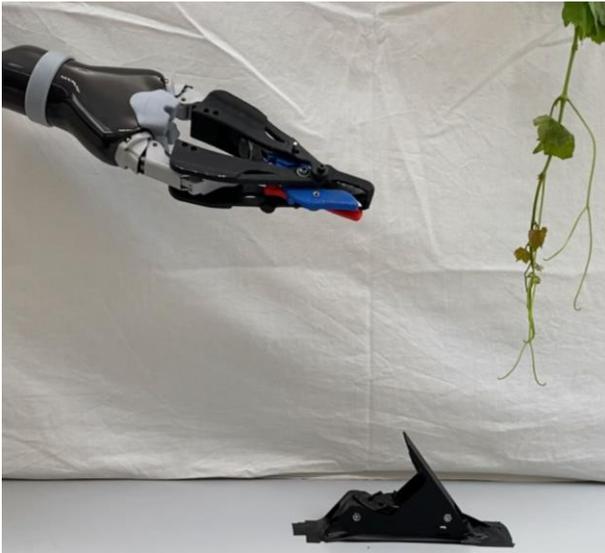


Figura 114 Sequenza di foto che illustrano il funzionamento dell'utensile sul gripper

La sequenza di foto mostra le quattro fasi di lavoro:

1. La prima riga mostra la fase di presa dell'utensile.
2. La seconda riga mostra il raggiungimento del ramo ed il taglio.
3. La terza riga è dedicata alla fase di deposito del campione, con l'apertura delle dita è il rilascio del ramo.
4. La quarta riga riporta il rilascio dell'utensile nel porta utensile e il ritorno verso la posizione di riposo da parte del braccio robotico.

Grazie a queste funzionalità, l'utensile si dimostra un valido strumento per automatizzare le attività di taglio dei rami, offrendo una soluzione sicura e autonoma.

6 Conclusioni

La presente tesi ha contribuito allo sviluppo della robotica di servizio per l'agricoltura di precisione, attraverso la realizzazione di un prototipo di utensile di presa-taglio appositamente progettato per l'organo terminale del braccio robotico del rover Agri.q. Lo stato dell'arte sugli attrezzi per l'agricoltura di precisione mostra come un gran numero di soluzioni miri a sostituire il gripper commerciale standard con uno personalizzato. L'aspetto chiave di innovazione e originalità del progetto risiede nella capacità del robot manipolatore di eseguire in modo autonomo le operazioni di montaggio e smontaggio dell'utensile.

Per definire i requisiti dell'utensile è stato condotto uno studio approfondito sul gripper, concentrandosi in particolare sul meccanismo che costituisce il dito robotico. Attraverso l'analisi della cinematica e della quasi statica del sistema, sono stati generati i grafici delle forze coinvolte nelle diverse modalità di presa. Questi dati hanno fornito informazioni preziose sulla modalità di presa ottimale, tenendo conto della massima forza che può essere esercitata in specifiche configurazioni.

I risultati sono stati validati a livello di simulazione da un secondo modello multibody, ma durante le prove sperimentali sono emerse delle discrepanze, presumibilmente a causa delle semplificazioni del modello che non considerano fenomeni complessi come attriti e deformazioni elastiche dei materiali presenti nel dito robotico.

Successivamente, prendendo ispirazione dalle normali attività svolte dagli agricoltori durante la raccolta e la potatura, e basandosi sul precedente prototipo di utensile di presa e taglio sviluppato presso il medesimo gruppo di ricerca del Politecnico di Torino, il meccanismo è stato oggetto di una riprogettazione al fine di apportare miglioramenti e soddisfare le seguenti funzioni: la presa autonoma dell'utensile da parte del braccio robotico, la presa del campione vegetativo, il taglio, il mantenimento del campione fino al suo deposito ed infine il rilascio dell'utensile. Questo meccanismo risolve le principali criticità riscontrate sul precedente prototipo. In particolare, si è ottimizzato il lavoro della molla principale che riporta il meccanismo in posizione aperta, sono state introdotte due lame con un grado di sovrapposizione appropriato, è stata modificata la cinematica del meccanismo per aumentare l'angolo tra le lame ed è stata modificata la geometria delle leve per rendere autonoma la fase di presa dell'utensile. Al termine della fase di studio, è stato realizzato un prototipo tramite fabbricazione additiva. Durante la fase sperimentale, il robot è riuscito a svolgere tutte le funzioni previste con successo.

Tra le prospettive di sviluppo future, è possibile ipotizzare l'integrazione di diversi sensori che permettano al robot di svolgere in completa autonomia le operazioni di raccolta, anche in ambienti reali più sfidanti rispetto a quello controllato in cui sono stati svolti i test sperimentali.

Alcuni esempi di sensori che potrebbero essere implementati includono:

- Sensori di visione: consentirebbero di monitorare la zona di lavoro dell'utensile e riconoscere i campioni da raccogliere.
- Sensori di temperatura e umidità: queste informazioni potrebbero essere utilizzate per ottimizzare il momento di raccolta, garantendo la massima qualità dei campioni.
- Sensore di forza: posizionato sulla superficie di contatto tra il gripper e l'elemento di interfaccia, potrebbe misurare la forza di chiusura necessaria per separare il campione dalla pianta.

$$r_p = \overline{OA} + \overline{AP} = a * (\cos(\alpha), \sin(\alpha)) + b * (\cos(\alpha - \beta + \delta), \sin(\alpha - \beta + \delta)) \quad (55)$$

Si effettua lo stesso calcolo questa volta passando per le cerniere C, D ed E:

$$r_p = \overline{OC} + \overline{CD} + \overline{DE} + \overline{EP} = c * (\cos(\alpha + \gamma), \sin(\alpha + \gamma)) + \quad (56)$$

$$+ y * (\sin(\alpha + \gamma), -\cos(\alpha + \gamma)) + d * (\cos(\xi), \sin(\xi)) + e * (\cos(\mu), \sin(\mu))$$

In quest'ultima espressione compaiono le variabili incognite μ , ξ e y . Si procede esplicitando il vettore posizione della cerniera D:

$$r_D = \overline{OC} + \overline{CD} = c * (\cos(\alpha + \gamma), \sin(\alpha + \gamma)) + y * (\sin(\alpha + \gamma), -\cos(\alpha + \gamma)) \quad (57)$$

Si ottiene lo stesso risultato scrivendo il vettore \overline{FD} :

$$r_D = \overline{FD} = (-x_0 + x + f * \cos(\xi), f * \sin(\xi) + h) \quad (58)$$

Dalla componente i di r_D si ricava l'espressione per lo spostamento x della cerniera F, uguagliando l'eq.(3) con l'eq.(4):

$$x(\alpha, \beta) = x_0 - f * \cos(\xi) + c * \cos(\alpha + \gamma) + y * \sin(\alpha + \gamma) \quad (59)$$

Mentre dalla sua componente j si ottiene la variabile y :

$$y = \frac{c * \sin(\alpha + \gamma) - f * \sin(x) - h}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (60)$$

Restano ancora da trovare le variabili μ e ξ . Si confrontano le componenti lungo i e lungo j di r_p dell'eq.(55) ed eq.(56)

$$a * \cos(\alpha) + b * \cos(\alpha - \beta + \delta) = c * \cos(\alpha + \gamma) + c * \tan(\alpha + \gamma) * \sin(\alpha + \gamma) + \quad (61)$$

$$- f * \tan(\alpha + \gamma) * \sin(\xi) - h * \tan(\alpha + \gamma) +$$

$$+ d * \cos(\xi) + e * \cos(\mu)$$

Si effettua una sostituzione introducendo il parametro B, per mettere in evidenza i soli termini che hanno una dipendenza da μ o ξ :

$$B = a * \cos(\alpha) + b * \cos(\alpha - \beta + \delta) - c * \cos(\alpha + \gamma) + c * \tan(\alpha + \gamma) \sin(\alpha + \gamma) + \quad (62)$$

$$+ h * \tan(\alpha + \gamma)$$

$$B = d * \cos(\xi) - f * \tan(\alpha + \gamma) * \sin(\xi) + e * \cos(\mu) \quad (63)$$

Allo stesso modo, per r_{pj} :

$$a * \sin(\alpha) + b * \sin(\alpha - \beta - \delta) = c * \sin(\alpha + \gamma) - c * \sin(\alpha + \gamma) + f * \sin(\xi) + h + \quad (64)$$

$$+ d * \sin(\xi) + e * \sin(\mu)$$

$$A = a * \sin(\alpha) + b * \sin(\alpha - \beta + \delta) - h \quad (65)$$

$$A = (f + d) * \sin(\xi) + e * \sin(\mu) \quad (66)$$

Si ottiene quindi un sistema a due equazioni in due incognite, nelle variabili μ e ξ :

$$\begin{cases} A = (f + d) * \sin(\xi) + e * \sin(\mu) \\ B = d * \cos(\xi) - f * \tan(\alpha + \gamma) * \sin(\xi) + e * \cos(\mu) \end{cases} \quad (67)$$

La soluzione di questo sistema non è immediata, avendo entrambe le variabili all'interno di funzioni trigonometriche.

Per semplificare la scrittura dei prossimi passaggi si effettuano le seguenti sostituzioni:

$$a_1 = (f + d) \quad (68)$$

$$c_1 = -f * \tan(\alpha + \gamma) \quad (69)$$

Il sistema da risolvere diventa:

$$\begin{cases} A = a_1 * \sin(\xi) + e * \sin(\mu) \\ B = d * \cos(\xi) + c_1 * \sin(\xi) + e * \cos(\mu) \end{cases} \quad (70)$$

Si portano a sinistra delle equazioni i termini in funzione di μ e a destra quelli in funzione di ξ , poi si eleva al quadrato.

$$\begin{cases} e^2 * \sin^2(\mu) = (A - a_1 * \sin(\xi))^2 \\ e^2 * \cos^2(\mu) = (B - d * \cos(\xi) - c_1 * \sin(\xi))^2 \end{cases} \quad (71)$$

Si sommano le due equazioni e si ottiene:

$$e^2 * \sin^2(\mu) + e^2 * \cos^2(\mu) = (A - a_1 * \sin(\xi))^2 + (B - d * \cos(\xi) - c_1 * \sin(\xi))^2 \quad (72)$$

È possibile osservare come l'eq.(72) in funzione di μ e ξ è in realtà una funzione della sola variabile ξ , dato che:

$$e^2 * \sin^2(\mu) + e^2 * \cos^2(\mu) = e^2 \quad (73)$$

L'eq.(18) diventa:

$$e^2 = A^2 + a_1^2 * \sin^2(\xi) - 2Aa_1 * \sin(\xi) + B^2 + d^2 * \cos^2(\xi) + c_1^2 * \sin^2(\xi) - 2Bc_1 * \sin(\xi) - 2Bd * \cos(\xi) + 2c_1d * \sin(\xi) \cos(\xi) \quad (74)$$

$$(a_1^2 + c_1^2) \sin^2(\xi) + d^2 \cos^2(\xi) + (-2Aa_1 - 2Bc_1) \sin(\xi) - 2Bd * \cos(\xi) + 2c_1d \sin(\xi) \cos(\xi) + -e^2 + A^2 + B^2 = 0 \quad (75)$$

e sapendo che

$$\cos^2(\xi) = 1 - \sin^2(\xi) \quad (76)$$

si ottiene

$$(A^2 + c_1^2 - d^2) * \sin^2(\xi) + (-2Aa_1 - 2Bc_1) * \sin(\xi) - 2Bd * \cos(\xi) + 2cd * \sin(\xi) \cos(\xi) - e^2 + A^2 + B^2 + d^2 = 0 \quad (77)$$

Ricordando le formule parametriche per le funzioni trigonometriche:

$$\sin(\xi) = \frac{2t}{1+t^2} \quad (78)$$

$$\cos(\xi) = \frac{1-t^2}{1+t^2} \quad (79)$$

$$t = \tan\left(\frac{\xi}{2}\right) \quad (80)$$

L'eq.(77) diventa:

$$(A^2 + c_1^2 - d^2) * \frac{4t^2}{(1+t^2)^2} + (-2Aa_1 - 2Bc_1) * \frac{2t}{1+t^2} - 2Bd * \frac{1-t^2}{1+t^2} + 2cd \frac{2t}{1+t^2} * \frac{1-t^2}{1+t^2} - e^2 + A^2 + B^2 + d^2 = 0 \quad (81)$$

Con semplici passaggi matematici, di seguito riportati, si ricava un'equazione di quarto grado nella variabile t:

$$(A^2 + c_1^2 - d^2) * \frac{4t^2}{(1+t^2)^2} + (-2Aa_1 - 2Bc_1) * \frac{2t}{1+t^2} - 2Bd * \frac{1-t^2}{1+t^2} + 2cd \frac{2t}{1+t^2} * \frac{1-t^2}{1+t^2} - e^2 + A^2 + B^2 + d^2 = 0 \quad (82)$$

$$(A^2 + c_1^2 - d^2) * 4t^2 + (-2Aa_1 - 2Bc_1) * 2t(1+t^2) - 2Bd(1-t^2)(1+t^2) + 2cd * 2t(1-t^2) + (-e^2 + A^2 + B^2 + d^2) * (1+t^2)^2 = 0 \quad (83)$$

$$(A^2 + c_1^2 - d^2) * 4t^2 + (-2Aa_1 - 2Bc_1) * 2t(1+t^2) - 2Bd(1-t^2)(1+t^2) + 2cd * 2t(1-t^2) + (-e^2 + A^2 + B^2 + d^2) * (1+t^2)^2 = 0 \quad (84)$$

$$[-e^2 + A^2 + B^2 + d^2 + 2Bd]t^4 + [-4(c_1d + Aa_1 + Bc_1)]t^3 + [4(a_1^2 + c_1^2 - d^2) + 2(-e^2 + A^2 + B^2 + d^2)]t^2 + [4(-Aa_1 - Bc_1 + c_1d)]t + [-e^2 + A^2 + B^2 + d^2 - 2bd] = 0 \quad (85)$$

Si è giunti ad un'equazione di 4° grado del tipo:

$$A_1t^4 + B_1t^3 + C_1t^2 + D_1t + E_1 = 0 \quad (86)$$

Dove i coefficienti sono:

$$A_1 = [-e^2 + A^2 + B^2 + d^2 + 2Bd] \quad (87)$$

$$B_1 = [-4(c_1d + Aa_1 + Bc_1)] \quad (88)$$

$$C_1 = [4(a_1^2 + c_1^2 - d^2) + 2(-e^2 + A^2 + B^2 + d^2)] \quad (89)$$

$$D_1 = [4(-Aa_1 - Bc_1 + c_1d)] \quad (90)$$

$$E_1 = [-e^2 + A^2 + B^2 + d^2 - 2bd] \quad (91)$$

Le 4 soluzioni di un'equazione di 4° grado si possono ricavare dalle seguenti formule:

$$t_{1,2} = -\frac{B_1}{4A_1} - Q \pm \frac{1}{2} \sqrt{-4Q^2 - 2p + \frac{S}{Q}} \quad (92)$$

$$t_{3,4} = -\frac{B_1}{4A_1} + Q \pm \frac{1}{2} \sqrt{-4Q^2 - 2p - \frac{S}{Q}} \quad (93)$$

Con

$$p = \frac{8A_1C_1 - 3B_1^2}{8A_1^2} \quad (94)$$

$$S = \frac{8A_1^2D_1 - 4A_1B_1C_1 + B_1^3}{8A_1^3} \quad (95)$$

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{-\frac{2}{3}p + \frac{1}{3A_1} \left(\Delta_0 + \frac{q}{\Delta_0} \right)} \quad (96)$$

$$\Delta_0 = \sqrt[3]{\frac{s + \sqrt{s^2 - 4q^3}}{2}} \quad (97)$$

$$q = 12A_1E_1 - 3B_1D_1 + C_1^2 \quad (98)$$

$$s = 27A_1D_1^2 - 72A_1C_1E_1 + 27B_1^2E_1 - 9B_1C_1D_1 + 2C_1^3 \quad (99)$$

Solo uno dei 4 valori di t è accettabile. In particolare devono valere entrambe le relazioni che legano t a ξ nelle formule parametriche, eq.(78) ed eq.(79), ossia:

$$\xi = \text{asin}\left(\frac{2t}{1+t^2}\right) \quad (100)$$

$$\xi = 2 \text{atan}(t) \quad (101)$$

Inoltre, devono essere valide le due equazioni del sistema di partenza riportate nell'eq.(70). Solo un particolare valore di ξ restituirà lo stesso valore di μ in entrambe le equazioni.

2. Calcolo dettagliato dei termini del PLV

QUASI STATICA

Come visto nel paragrafo 2.1.3. è stato utilizzato il principio dei lavori virtuali (PLV) per trovare le forze agenti sulle falangi prossimale e distale del dito. In questa appendice si approfondiscono i passaggi matematici che hanno portato ai risultati discussi nel corpo della tesi. Si riprende brevemente il discorso per poi procedere con lo studio.

Il PLV afferma che, in un sistema meccanico in equilibrio statico, il lavoro totale svolto dalle forze virtuali sul sistema deve essere nullo.

$$\sum_{j=1}^m F_j \delta q_j = 0 \quad (102)$$

Dove q è la coordinata generalizzata del sistema e F_j è la j -esima risultante delle m forze agenti in direzione q_j .

Il lavoro di F_j relativo allo spostamento infinitesimo δq_j è:

$$\delta W_j = F_j \delta q_j \quad (103)$$

Si ha quindi che:

$$\frac{\partial V}{\partial q_k} = Q_k \quad (104)$$

Si calcolano le derivate della variazione di lunghezza della molla e dell'angolo μ rispetto alle coordinate lagrangiane. La prima può essere calcolata per qualsiasi posizione delle falangi prossimale e distale una volta nota la posizione dei punti H ed I. La lunghezza della molla a pacco è $l_0 = 14,5 \text{ cm}$.

$$\Delta l = \sqrt{(X_H - X_I)^2 + (Y_H - Y_I)^2} - l_0 \quad (110)$$

Mentre la sua derivata è:

$$\frac{\partial \Delta l}{\partial q_k} = \frac{1}{2\sqrt{(X_H - X_I)^2 + (Y_H - Y_I)^2}} \left(2(X_H - X_I) \left(\frac{\partial X_H}{\partial q_k} - \frac{\partial X_I}{\partial q_k} \right) + 2(Y_H - Y_I) \left(\frac{\partial Y_H}{\partial q_k} - \frac{\partial Y_I}{\partial q_k} \right) \right) \quad (111)$$

Per valutare la posizione dei punti di attacco della molla è utile fare riferimento alla Figura 118, dove è possibile notare in dettaglio il modello della falange prossimale:

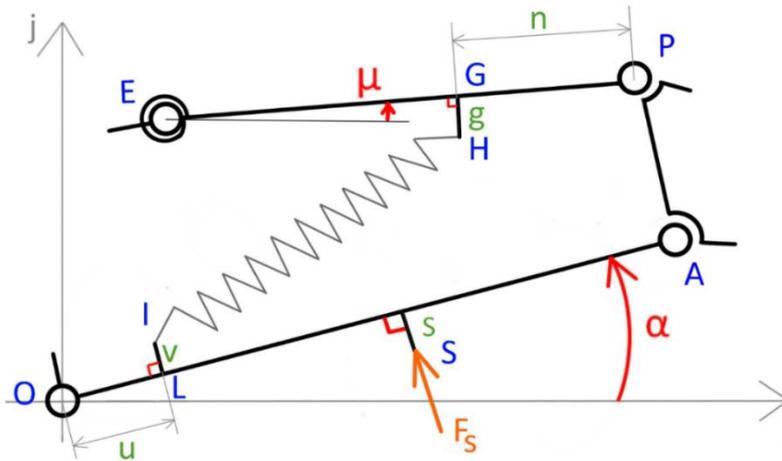


Figura 118 Dettaglio del modello della falange prossimale

I valori di riferimento dei parametri mostrati in Figura 118 sono riportati in tabella:

Tabella 17 Parametri della falange prossimale

Parametro	Valore	Unità di misura
n	10	mm
g	2,7	mm
s	2.1	mm
u	11.5	mm
v	1,97	mm

Si possono scrivere le seguenti relazioni:

$$X_H = a * \cos(\alpha) + b * \cos(\alpha - \beta + \delta) - n * \cos(\mu) + g * \sin(\mu) \quad (112)$$

$$Y_H = a * \sin(\alpha) + b * \sin(\alpha - \beta + \delta) - n * \sin(\mu) - g * \cos(\mu) \quad (113)$$

$$X_I = u * \cos(\alpha) - v * \sin(\alpha) \quad (114)$$

$$Y_I = u * \sin(\alpha) + v * \cos(\alpha) \quad (115)$$

Le loro derivate rispetto ad α sono:

$$\frac{\partial X_H}{\partial \alpha} = -a * \sin(\alpha) - b * \sin(\alpha - \beta + \delta) + n * \sin(\mu) \frac{\partial \mu}{\partial \alpha} + g * \cos(\mu) \frac{\partial \mu}{\partial \alpha} \quad (116)$$

$$\frac{\partial Y_H}{\partial \alpha} = a * \cos(\alpha) + b * \cos(\alpha - \beta + \delta) - n * \cos(\mu) \frac{\partial \mu}{\partial \alpha} + g * \sin(\mu) \frac{\partial \mu}{\partial \alpha} \quad (117)$$

$$\frac{\partial X_I}{\partial \alpha} = -u * \sin(\alpha) - v * \cos(\alpha) \quad (118)$$

$$\frac{\partial Y_I}{\partial \alpha} = u * \cos(\alpha) - v * \sin(\alpha) \quad (119)$$

E rispetto a β :

$$\frac{\partial X_H}{\partial \beta} = b * \sin(\alpha - \beta + \delta) + n * \sin(\mu) \frac{\partial \mu}{\partial \beta} + g * \cos(\mu) \frac{\partial \mu}{\partial \beta} \quad (120)$$

$$\frac{\partial Y_H}{\partial \beta} = -b * \cos(\alpha - \beta + \delta) - n * \cos(\mu) \frac{\partial \mu}{\partial \beta} + g * \sin(\mu) \frac{\partial \mu}{\partial \beta} \quad (121)$$

$$\frac{\partial X_I}{\partial \beta} = 0 \quad (122)$$

$$\frac{\partial Y_I}{\partial \beta} = 0 \quad (123)$$

L'angolo μ si ricava dalla prima formula dell'eq.(67):

$$\mu = \arcsin\left(\frac{A - a_1 \sin(\xi)}{e}\right) \quad (124)$$

Andando a derivare si ottiene:

$$\frac{\partial \mu}{\partial q_k} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A - a_1 \sin(\xi)}{e}\right)^2}} * \frac{1}{e} \left(\frac{\partial A}{\partial q_k} - a_1 \cos(\xi) \frac{\partial \xi}{\partial q_k} \right) \quad (125)$$

Il parametro A è definito nell'eq.(65). La sua derivata rispetto alle coordinate di Lagrange è:

$$\frac{\partial A}{\partial \alpha} = a * \cos(\alpha) + b * \cos(\alpha - \beta + \delta) \quad (126)$$

$$\frac{\partial A}{\partial \beta} = -b * \cos(\alpha - \beta + \delta) \quad (127)$$

Il termine $\frac{\partial \xi}{\partial q_k}$ è più complesso da calcolare poiché è dipendente da t , che è la soluzione di un'equazione di quarto grado, come visto nel capitolo sull'analisi cinematica. Per ogni combinazione di α e β bisogna risalire alla formulazione corretta di t : una volta individuata si va ad utilizzare per ricavare l'equazione della derivata di ξ rispetto ad α e β .

Si ha infatti che:

$$\xi = 2 * \text{atan}(t) \quad (128)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial q_k} = 2 \frac{1}{1+t^2} \frac{\partial t}{\partial q_k} \quad (129)$$

E le derivate di t sono:

$$\frac{\partial t_{1,2}}{\partial q_k} = -\frac{1}{4} * \frac{\frac{\partial B_1}{\partial q_k} A_1 - B_1 \frac{\partial A_1}{\partial q_k}}{A_1^2} - \frac{\partial Q}{\partial q_k} \pm \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\sqrt{-4Q^2 - 2p + \frac{S}{Q}}} \right) * \left(-8Q \frac{\partial Q}{\partial q_k} - 2 \frac{\partial p}{\partial q_k} + \left(\frac{\frac{\partial S}{\partial q_k} Q - S * \frac{\partial Q}{\partial q_k}}{Q^2} \right) \right) \quad (130)$$

$$\frac{\partial t_{3,4}}{\partial q_k} = -\frac{1}{4} * \frac{\frac{\partial B_1}{\partial q_k} A_1 - B_1 \frac{\partial A_1}{\partial q_k}}{A_1^2} + \frac{\partial Q}{\partial q_k} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\sqrt{-4Q^2 - 2p - \frac{S}{Q}}} \right) * \left(-8Q \frac{\partial Q}{\partial q_k} - 2 \frac{\partial p}{\partial q_k} - \left(\frac{\frac{\partial S}{\partial q_k} Q - S * \frac{\partial Q}{\partial q_k}}{Q^2} \right) \right) \quad (131)$$

A_1 e B_1 sono riportati nell' eq.(87) ed eq.(88). La loro derivata è:

$$\frac{\partial A_1}{\partial q_k} = 2A \frac{\partial A}{\partial q_k} + 2B \frac{\partial B}{\partial q_k} + 2d \frac{\partial B}{\partial q_k} \quad (132)$$

$$\frac{\partial B_1}{\partial q_k} = -4d \frac{\partial c_1}{\partial q_k} + 4 \left(-a_1 \frac{\partial A}{\partial q_k} - \left(\frac{\partial B}{\partial q_k} c_1 + B \frac{\partial c_1}{\partial q_k} \right) \right) \quad (133)$$

Con $\frac{\partial A}{\partial q_k}$ riportate nell'eq.(126) e nell'eq.(127), mentre

$$\frac{\partial B}{\partial \alpha} = -a * \sin(\alpha) - b * \sin(\alpha - \beta + \delta) + c * \sin(\alpha + \gamma) - c * \left(\frac{1}{\cos^2(\alpha + \gamma)} \sin(\alpha + \gamma) + \tan(\alpha + \gamma) \cos(\alpha + \gamma) \right) + \frac{h}{\cos^2(\alpha + \gamma)} \quad (134)$$

$$\frac{\partial B}{\partial \beta} = -b * \sin(\alpha - \beta + \delta) \quad (135)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial \alpha} = -\frac{f}{\cos^2(\alpha + \gamma)} \quad (136)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial \beta} = 0 \quad (137)$$

Gli altri termini ancora incogniti sono $\frac{\partial p}{\partial q_k}$, $\frac{\partial S}{\partial q_k}$ e $\frac{\partial Q}{\partial q_k}$, ossia le derivate dell'eq.(94), dell'eq.(95) e dell'eq.(96).

$$\frac{\partial p}{\partial q_k} = \frac{1}{8} \frac{\left(8 \left(C_1 \frac{\partial A_1}{\partial q_k} + A_1 \frac{\partial C_1}{\partial q_k}\right) - 6B_1 \frac{\partial B_1}{\partial q_k}\right) A_1^2 - 2(8A_1 C_1 - 3B_1^2) A_1 \frac{\partial A_1}{\partial q_k}}{A_1^4} \quad (138)$$

$$\frac{\partial S}{\partial q_k} = \frac{1}{8} \frac{\left(8 \left(2A_1 D_1 \frac{\partial A_1}{\partial q_k} + A_1^2 \frac{\partial D_1}{\partial q_k}\right) - 4 \left(\left(\frac{\partial A_1}{\partial q_k} B_1 + A_1 \frac{\partial B_1}{\partial q_k}\right) * C_1 + A_1 B_1 \frac{\partial C_1}{\partial q_k}\right) + 3B_1^2 \frac{\partial B_1}{\partial q_k}\right) A_1^3 - (8A_1^2 D_1 - 4A_1 B_1 C_1 + B_1^3) 3A_1^2 \frac{\partial A_1}{\partial q_k}}{A_1^6} \quad (139)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial q_k} = \frac{1}{2} \frac{1}{2 \sqrt{-\frac{2}{3}p + \frac{1}{3A_1}(\Delta_0 + \frac{q}{\Delta_0})}} \left(-\frac{2}{3} \frac{\partial p}{\partial q_k} + \frac{1}{3} \left(\frac{\left(\frac{\partial \Delta_0}{\partial q_k} + \frac{\frac{\partial q}{\partial q_k} \Delta_0 - q \frac{\partial \Delta_0}{\partial q_k}}{\Delta_0^2}\right) A_1 - (\Delta_0 + \frac{q}{\Delta_0}) \frac{\partial A_1}{\partial q_k}}{A_1^2} \right) \right) \quad (140)$$

Derivando l'eq.(89) si trova $\frac{\partial C_1}{\partial q_k}$:

$$\frac{\partial C_1}{\partial \alpha} = 8C_1 \frac{\partial C_1}{\partial \alpha} + 4A \frac{\partial A}{\partial \alpha} + 4B \frac{\partial B}{\partial \alpha} \quad (141)$$

$$\frac{\partial C_1}{\partial \beta} = 4A \frac{\partial A}{\partial \beta} + 4B \frac{\partial B}{\partial \beta} \quad (142)$$

Derivando l'eq.(90) si trova $\frac{\partial D_1}{\partial q_k}$:

$$\frac{\partial D_1}{\partial \alpha} = 4 \left(-a_1 \frac{\partial A}{\partial \alpha} - \left(\frac{\partial B}{\partial \alpha} c_1 + B \frac{\partial c_1}{\partial \alpha}\right) + d * \frac{\partial c_1}{\partial \alpha} \right) \quad (143)$$

$$\frac{\partial D_1}{\partial \beta} = 4 \left(-a_1 \frac{\partial A}{\partial \beta} - c_1 \frac{\partial B}{\partial \beta} \right) \quad (144)$$

Derivando l'eq.(91) si trova $\frac{\partial E_1}{\partial q_k}$:

$$\frac{\partial E_1}{\partial q_k} = 2A \frac{\partial A}{\partial q_k} + 2B \frac{\partial B}{\partial q_k} - 2d \frac{\partial B}{\partial q_k} \quad (145)$$

All'interno dell'eq.(140) compaiono ancora i termini $\frac{\partial \Delta_0}{\partial q_k}$ e $\frac{\partial q}{\partial q_k}$, derivate delle equazioni eq.(97) ed eq.(98):

$$\frac{\partial \Delta_0}{\partial q_k} = \frac{1}{6 \left(\frac{s + \sqrt{s^2 - 4q^3}}{2} \right)^{\frac{2}{3}}} * \left(\frac{\partial s}{\partial q_k} + \frac{1}{2\sqrt{s^2 - 4q^3}} (2s \frac{\partial s}{\partial q_k} - 12q^2 \frac{\partial q}{\partial q_k}) \right) \quad (146)$$

$$\frac{\partial q}{\partial q_k} = 12 \left(\frac{\partial A_1}{\partial q_k} E_1 + A_1 \frac{\partial E_1}{\partial q_k} \right) - 3 \left(\frac{\partial B_1}{\partial q_k} D_1 + B_1 \frac{\partial D_1}{\partial q_k} \right) + 2C_1 \frac{\partial C_1}{\partial q_k} \quad (147)$$

Restano da definire le forze generalizzate, date dalla somma delle forze esterne moltiplicate per la derivata della posizione del punto di applicazione della stessa rispetto alle coordinate generalizzate. La formula di riferimento è la seguente:

$$Q_K = \sum_{i=1}^m \vec{F}_i * \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_K} \quad (148)$$

Dove $m = 2$ è il numero delle coordinate lagrangiane. L'espressione per il meccanismo in studio è:

$$Q_k = F_R * (\sin(\alpha - \beta) \vec{i}, \cos(\alpha - \beta) \vec{j}) * \frac{\partial}{\partial q_k} (X_R, Y_R) + \quad (149)$$

$$+ F_S * (-\sin(\alpha) \vec{i}, \cos(\alpha) \vec{j}) * \frac{\partial}{\partial q_k} (X_S \vec{i}, Y_S \vec{j}) + F_F(\vec{i}, \vec{j}) * \frac{\partial}{\partial q_k} ((-X_0 + x) \vec{i}, h \vec{j})$$

In particolare le due equazioni sono:

$$Q_1 = F_R(\sin(\alpha - \beta) \vec{i}, \cos(\alpha - \beta) \vec{j}) * \frac{\partial}{\partial \alpha} (X_R, Y_R) + \quad (150)$$

$$+ F_S * (-\sin(\alpha) \vec{i}, \cos(\alpha) \vec{j}) * \frac{\partial}{\partial \alpha} (X_S \vec{i}, Y_S \vec{j}) + F_F(\vec{i}) * \frac{\partial(-X_0 + x)}{\partial \alpha}$$

$$Q_2 = F_R(\sin(\alpha - \beta) \vec{i}, \cos(\alpha - \beta) \vec{j}) * \frac{\partial}{\partial \beta} (X_R, Y_R) + F_F(\vec{i}) * \frac{\partial(-X_0 + x)}{\partial \beta} \quad (151)$$

Per analizzare i termini presenti nelle precedenti equazioni, si riporta in Figura 119 un dettaglio del modello della falange distale:

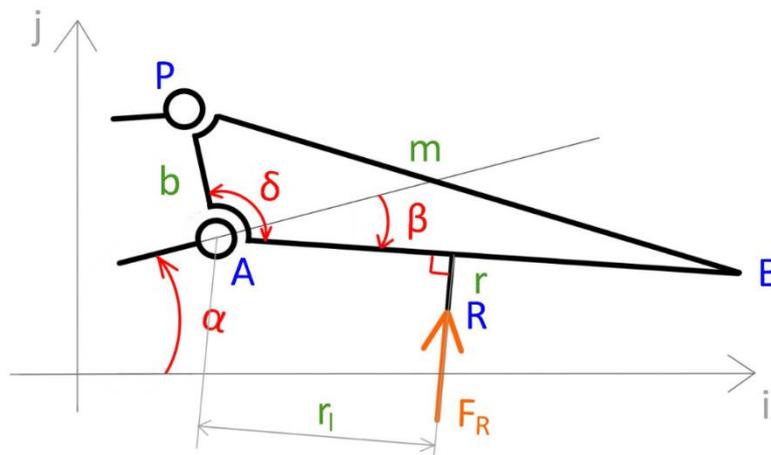


Figura 119 Dettaglio del modello della falange distale

Tabella 18 Valori dei parametri della falange distale

Parametro	Valore	Unità di misura
r_l	21.9	mm
r	4.9	mm

Le coordinate di S e R nel sistema di riferimento i, j , visibili nei dettagli di Figura 118 per il punto S e Figura 119 per il punto R, sono:

$$X_S = a_S * \cos(\alpha) + s * \sin(\alpha) \quad (152)$$

$$Y_S = a_S * \sin(\alpha) - s * \cos(\alpha) \quad (153)$$

$$X_R = a * \cos(\alpha) + l_r \cos(\alpha - \beta) + r * \sin(\alpha - \beta) \quad (154)$$

$$Y_R = a * \sin(\alpha) + l_r \sin(\alpha - \beta) - r * \cos(\alpha - \beta) \quad (155)$$

Si calcolano le loro derivate rispetto ad α :

$$\frac{\partial}{\partial \alpha}(X_S) = -a_S * \sin(\alpha) + s * \cos(\alpha) \quad (156)$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha}(Y_S) = a_S * \cos(\alpha) + s * \sin(\alpha) \quad (157)$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha}(X_R) = -a * \sin(\alpha) - l_r \sin(\alpha - \beta) + r * \cos(\alpha - \beta) \quad (158)$$

$$\frac{\partial}{\partial \alpha}(Y_R) = -a * \cos(\alpha) + l_r \cos(\alpha - \beta) + r * \sin(\alpha - \beta) \quad (159)$$

E rispetto a β

$$\frac{\partial}{\partial \beta}(X_S) = 0 \quad (60)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta}(Y_S) = 0 \quad (162)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta}(X_R) = +l_R * \sin(\alpha - \beta) - r * \cos(\alpha - \beta) \quad (163)$$

$$\frac{\partial}{\partial \beta}(Y_R) = -l_R * \cos(\alpha - \beta) - r * \sin(\alpha - \beta) \quad (164)$$

Infine, nota la posizione della cerniera F:

$$x(\alpha, \beta) = x_0 - f * (\cos(\xi(\alpha, \beta))) + c * \cos(\alpha + \gamma) + c * \sin(\alpha + \gamma) \tan(\alpha + \gamma) + \\ -h * \tan(\alpha + \gamma) \quad (165)$$

È possibile farne la derivata per le due coordinate generalizzate:

$$\frac{\partial x}{\partial \alpha} = f * \sin(\xi) \frac{\partial \xi}{\partial \alpha} - c * \sin(\alpha + \gamma) + c * \left[\cos(\alpha + \gamma) \tan(\alpha + \gamma) + \sin(\alpha + \gamma) * \frac{1}{\cos^2(\alpha + \gamma)} \right] - f * \left[\cos(\xi) * \frac{\partial \xi}{\partial \alpha} * \tan(\alpha + \gamma) + \sin(\xi) * \frac{1}{\cos^2(\alpha + \gamma)} \right] - h * \frac{1}{\cos(\alpha + \gamma)} \quad (166)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \beta} = f * \sin(\xi) \frac{\partial \xi}{\partial \beta} - f * \tan(\alpha + \gamma) \cos(\xi) * \frac{\partial \xi}{\partial \beta} \quad (167)$$

Ora che sono stati definiti in generale i termini dell'eq.104 è possibile studiare nel dettaglio i casi descritti nel paragrafo 3.1.

3. Calcolo rigidzze molle

Rigidzza molla nel dito

Il dito è stato smontato per poter estrarre la molla su cui fare le misurazioni. Si tratta di una molla che lavora a compressione ed è già parzialmente precaricata nella configurazione di riposo, cioè di gripper completamente aperto. In Figura 120 si riporta il meccanismo completo (a), l'elemento 2 smontato e collegato alla molla (b) ed infine un dettaglio della molla a pacco (c).

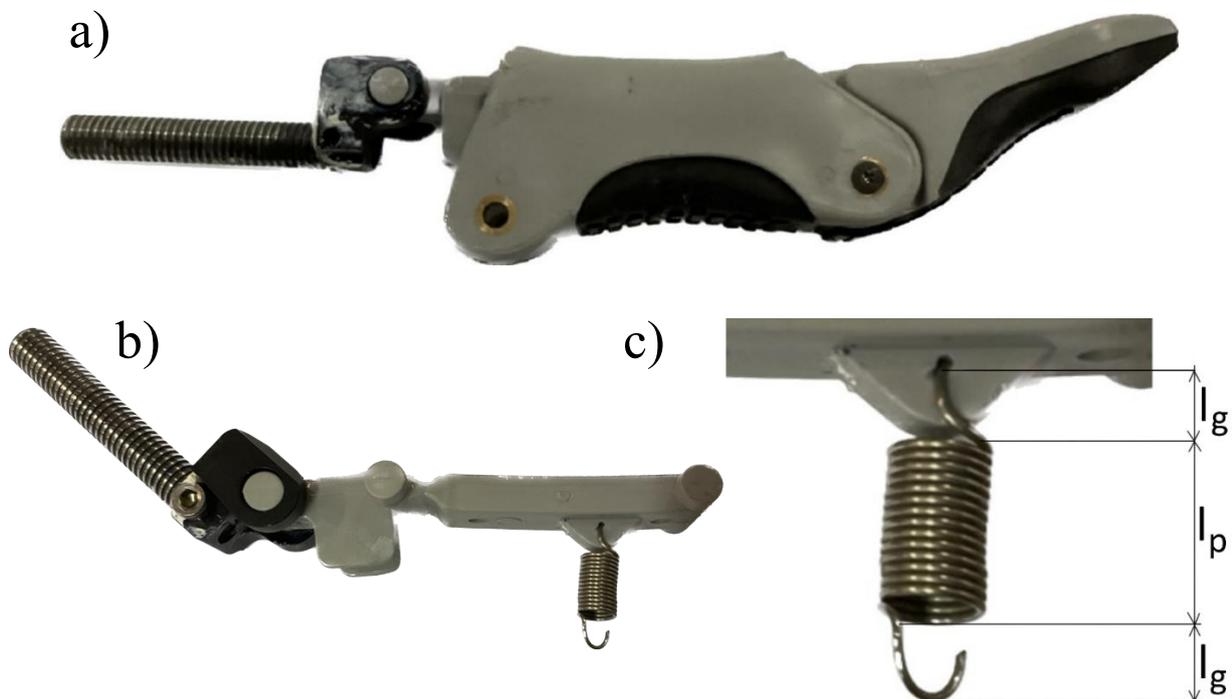


Figura 120 (a) Dito smontato dal gripper; (b) Componenti 5 e 2 con la molla estratta dal meccanismo; (c) Dettaglio della molla a pacco

I dati della molla a riposo sono elencati in Tabella 19.

Tabella 19 Dati della molla nel meccanismo del dito

Parametro	Valore	Unità di misura
l_a	3.5	mm
l_p	7.45	mm
$l_0 = 2 l_g + l_p$	14.45	mm

È stato misurato l'allungamento sollecitando con masse differenti la molla. Sono state utilizzate le seguenti relazioni:

l_m = lunghezza misurata della molla, inclusi i ganci;

$$\Delta l = l_m - l_0 \quad (168)$$

$$F = 9.81 * m \quad (169)$$

La rigidezza è data dalla regressione lineare della curva sperimentale della forza elastica in funzione della variazione di allungamento della molla, Figura 121.

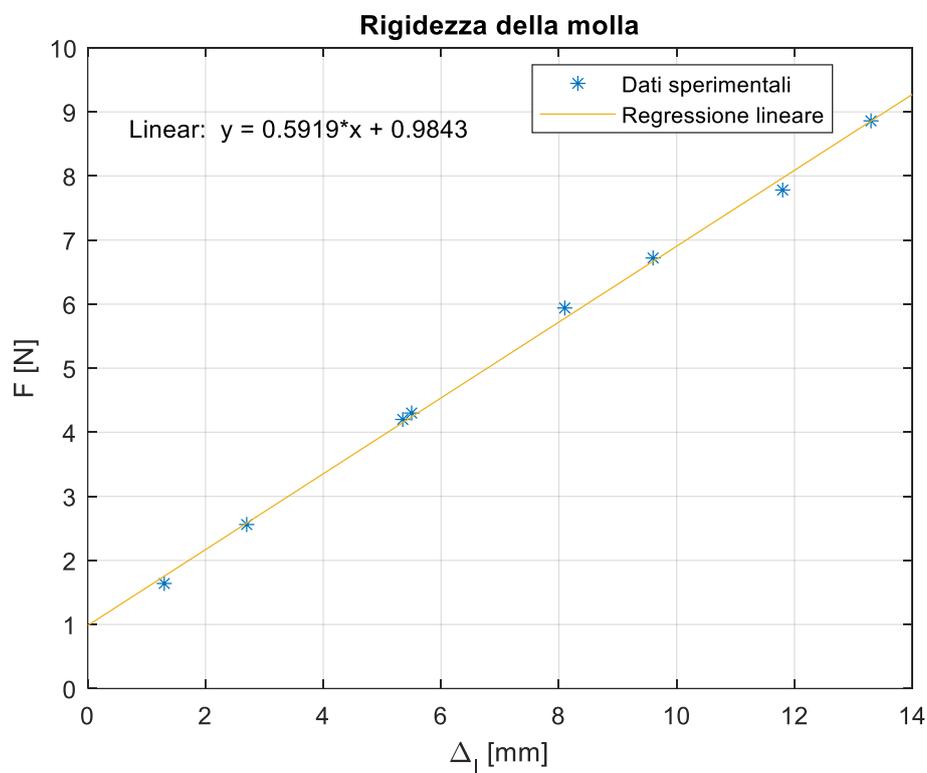


Figura 121 Grafico della forza elastica in funzione della variazione di allungamento della molla

I dati relativi alla prova sperimentale sono riportati in Tabella 20:

Tabella 20 Valori sperimentali della prova di rigidità della molla del dito

l_m [mm]	Δl [mm]	m [kg]	F [N]	K [N/m]
15.75	1.3	0.1668	1.64	591.9
17.15	2.7	0.2611	2.56	
19.80	5.35	0.4279	4.20	
19.95	5.5	0.4387	4.30	
22.55	8.1	0.6055	5.94	
24.05	9.6	0.6850	6.72	
26.25	11.8	0.7927	7.78	
27.75	13.3	0.9031	8.86	

Rigidità della cerniera virtuale

Rigidità torsionale della cerniera virtuale E

Per calcolare la rigidità torsionale della cerniera virtuale E è stato fissato ad un supporto il link \overline{FD} e sono stati applicati dei pesi alla cerniera P. Si è quindi misurata la freccia x per risalire, nota la lunghezza del link e , all'angolo μ .

I dati di partenza, in assenza di pesi, sono riportati in Tabella 21:

Tabella 21 Dati per il calcolo della rigidità torsionale della cerniera virtuale E

Parametro	Valore	Unità di misura
e	31.5	mm
μ_0	0.141	rad
x_0	4.5	mm

Lo schema per la misurazione della variazione angolare del componente in esame è il seguente:

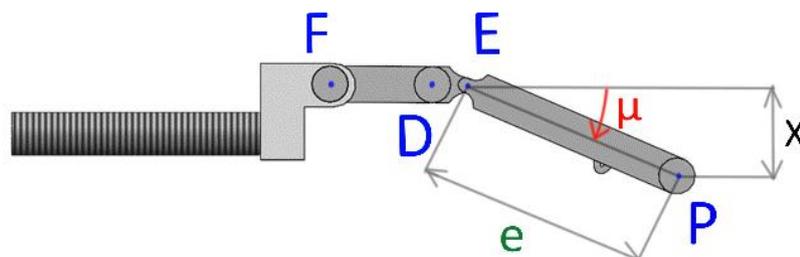


Figura 122 Schema per la misurazione della rigidità torsionale della cerniera virtuale E

La variazione angolare μ è data dalla formula:

$$\Delta\theta = a \sin\left(\frac{x - x_0}{e}\right) \quad (170)$$

Il braccio della coppia data dal peso in P rispetto alla cerniera E è:

$$b = e * \cos(\mu + \mu_0) \quad (171)$$

La forza applicata risulta essere:

$$F = m * 9.81 \quad (172)$$

E quindi la coppia:

$$C = F * b \quad (173)$$

La rigidezza è data dalla regressione lineare della curva sperimentale della coppia in funzione della variazione angolare del componente 2, Figura 121.

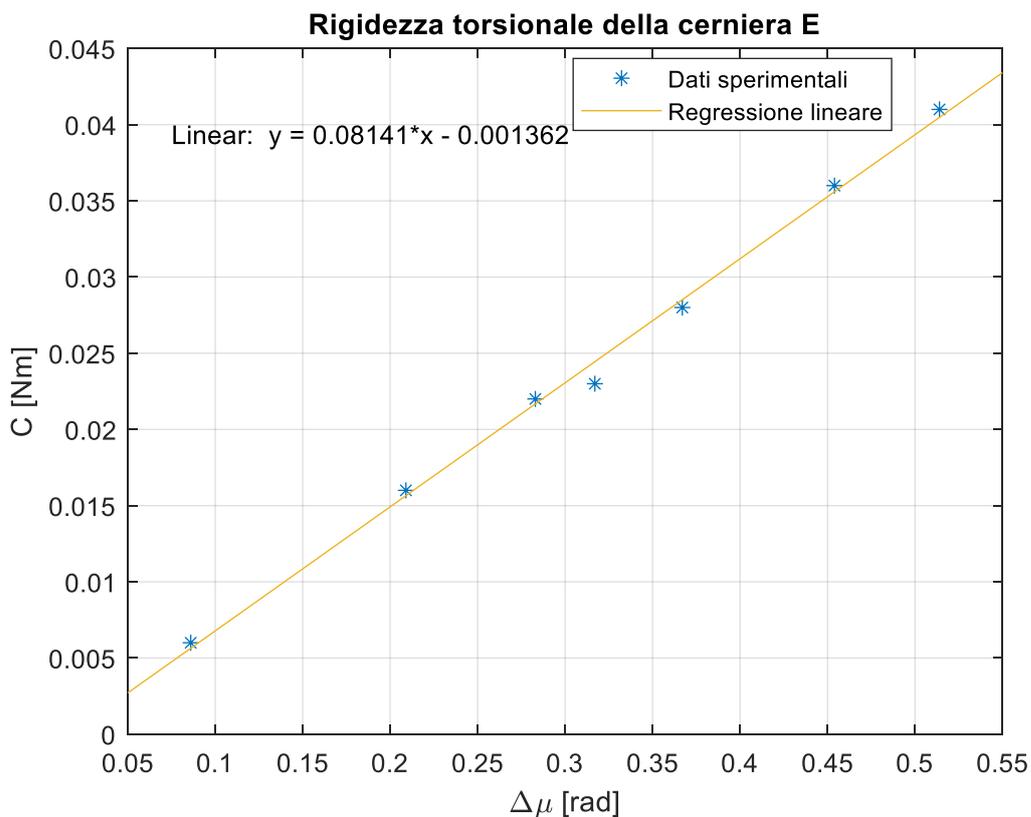


Figura 123 Grafico della curva sperimentale della coppia applicate alla cerniera E in funzione della variazione angolare del *link* e.

I dati sperimentali sono riportati in Tabella 22:

Tabella 22 Valori sperimentali della prova di rigidità torsionale della cerniera virtuale E

x [mm]	$\Delta\mu$ [mm]	m [g]	b [mm]	F [N]	C [Nm]	K [Nm/rad]
7.25	0.086	20.77	31.23	0.20	0.006	0.081
11.15	0.209	51.8	31.35	0.51	0.016	
13.45	0.283	72.57	30.77	0.71	0.022	
14.50	0.317	76.26	30.45	0.75	0.023	
16.00	0.367	97.03	29.92	0.95	0.028	
18.55	0.454	128.06	28.81	1.26	0.036	
20.25	0.514	148.83	27.91	1.46	0.041	

8 Bibliografia

- [1] Obiettivo 12: garantire modelli sostenibili di produzione e consumo, <https://unric.org/it/obiettivo-12-garantire-modelli-sostenibili-di-produzione-e-di-consumo>
- [2] Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile, <https://unric.org/it/agenda-2030/>
- [3] Crist, E.; Mora, C.; Engelman, R. The Interaction of Human Population, Food Production, and Biodiversity Protection. *Science* 2017, 356, 260–264.
- [4] Griffin, T.W.; Yeager, E.A. How Quickly Do Farmers Adopt Technology? A Duration Analysis. In *Precision Agriculture' 19*; Wageningen Academic: Wageningen, The Netherlands, 2019; pp. 843–849.
- [5] Quaglia, G.; Tagliavini, L.; Colucci, G.; Vorfi, A.; Botta, A.; Baglieri, L. Design and Prototyping of an Interchangeable and Underactuated Tool for Automatic Harvesting. *Robotics* 2022, 11, 145. <https://doi.org/10.3390/robotics11060145>
- [6] Autonomous off-road mobile robot to optimize vineyard performance, <https://robotnik.eu/projects/vinbot-en/>
- [7] Kate Prengaman, Pruning robot makes first cut (2022), <https://www.goodfruit.com/pruning-robot-makes-the-first-cut/>
- [8] You, A.; Parayil, N.; Krishna, J.G.; Bhattarai, U.; Sapkota, R.; Ahmed, D.; Whiting, M.; Karkee, M.; Grimm, C.M.; Davidson, J.R. An Autonomous Robot for Pruning Modern, Planar Fruit Trees. *arXiv* 2022, arXiv:2206.07201.
- [9] TRIMBOT 2020 Robotereinsatz zum automatischen Stutzen von Buchsbaum und Rosen, https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Allgemeines/Download/Tagungen-2018/gartenbau/Blaich_Robotereinsatz.pdf
- [10] Strisciuglio, N.; Tylecek, R.; Petkov, N.; Bieber, P.; Hemming, J.; Henten, E.; Sattler, T.; Pollefeys, M.; Gevers, T.; Brox, T.; et al. TrimBot2020: An Outdoor Robot for Automatic Gardening. *arXiv* 2018, arXiv:1804.01792.
- [11] Oliveira, L.F.P.; Moreira, A.P.; Silva, M.F. Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead. *Robotics* 2021, 10, 52. <https://doi.org/10.3390/robotics10020052>
- [12] Adamides, G.; Katsanos, C.; Constantinou, I.; Christou, G.; Xenos, M.; Hadzilacos, T.; Edan, Y. Design and Development of a Semi-Autonomous Agricultural Vineyard Sprayer: Human–Robot Interaction Aspects. *J. Field Robot.* 2017, 34, 1407–1426.
- [13] Could strawberry-picking robots be future of fruit farms? , 2018, University of Essex, <https://www.essex.ac.uk/news/2018/08/20/could-strawberry-picking-robots-be-future-of-fruit-farms>

- [14] De Preter, A.; Anthonis, J.; De Baerdemaeker, J. Development of a Robot for Harvesting Strawberries. IFAC-Pap. 2018, 51, 14–19. [Development of a Robot for Harvesting Strawberries - ScienceDirect](#)
- [15] Agricoltura e robot, gli umani saranno sostituiti? - Maier group, <https://www.maiergroup.it/it/blog/agricoltura-e-robot-586>
- [16] Robocrop: world's first raspberry-picking robot set to work, (2019), Julia Kollwe and Rob Davies, <https://www.theguardian.com/technology/2019/may/26/world-first-fruit-picking-robot-set-to-work-artificial-intelligence-farming>
- [17] Boaz Arad, J. B.-S. (2020). Development of a sweet pepper harvesting robot. (J. B.-S. - Boaz Arad,A cura di) Journal of Field Robotics, 13. doi:10.1002/rob.21937;
- [18] 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. [Agri.q: A Sustainable Rover for Precision Agriculture | SpringerLink](#)
- [19] Ardit Vorfi, Titolo: “Progettazione, prototipazione e validazione sperimentale di utensile da taglio azionato da braccio robotico per agricoltura di precisione” [Tesi di Laurea Magistrale]. Torino: Politecnico di Torino, 2022
- [20] Marco Recanatesi, Titolo: “Progettazione di un utensile di taglio azionato da braccio robotico per operazioni di campionamento di colture” [Tesi di Laurea Magistrale]. Torino: Politecnico di Torino, 2021
- [21] Manuale d'uso e manutenzione Kinova Gen2 7 DoF. (s.d.). Gen2 7 DoF User Guide. <https://www.kinovarobotics.com/en/resources/gen2-technical-resources>
- [22] Kinova SDK User Guide - <https://studylib.net/doc/18470319/user-guide>
- [23] H. Song, T. Bhattacharjee and S. S. Srinivasa, "Sensing Shear Forces During Food Manipulation: Resolving the Trade-Off Between Range and Sensitivity", 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Montreal, QC, Canada, 2019, pp. 8367-8373, doi: 10.1109/ICRA.2019.8794350.