

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Politecnico di Torino

Tesi di Laurea Magistrale

Sensorizzazione e determinazione delle caratteristiche di presa di una mano articolata idonea ad operare in ambienti angusti

Relatore

Prof. Terenziano Raparelli

Candidato

Co-relatore

Prof.ssa Daniela Maffiodo

Fabrizio Di Franca

Anno accademico 2023/2024

SOMMARIO

L'accesso all'acqua potabile è una questione oggi giorno critica, la quale influenza la vita quotidiana di milioni di persone. Tale risorsa in decrescita, abbinata con la crescita demografica e i cambiamenti climatici di numerosi paesi in via di sviluppo, ha reso indispensabile l'uso di soluzioni sostenibili per garantire un approvvigionamento idrico. Paesi quali l'India presentano un gran numero di pozzi aventi lo scopo di rimediare a tale emergenza, garantendo acqua potabile alle comunità rurali e ai complessi urbani. Tuttavia tali pozzi causano alcuni incidenti di bambini caduti e bloccati all'interno provocando, il più delle volte, il decesso della vittima.

L'obiettivo di questa tesi precede la validazione di una mano di presa robotica a tre dita, comandata a distanza, di ausilio durante possibili attività di messa in sicurezza del bambino. In generale, il dispositivo di presa è stato progettato al fine di garantire delle operazioni di salvataggio in condizioni anguste: quali ad esempio i pozzi già citati o ambienti in cui lo spazio di manovra limitato non permette l'impiego delle classiche attrezzature per le estrazioni.

Nel seguente elaborato si riporta in una prima parte lo stato dell'arte per le tipologie di pinze adattative, successivamente si analizzano i componenti della mano necessari per la movimentazione e valutazione del prototipo, ovvero il motore controllato da una scheda Arduino UNO e i sensori montati su di essa.

Per lo studio dei sensori si descrive il circuito realizzato, indicando la scelta rispetto le proposte indicate dai relativi datasheet. Di seguito si riporta la procedura di calibrazione degli stessi, attraverso l'utilizzo di un dispositivo realizzato ad hoc, in modo da rendere la prova in linea rispetto le ideali condizioni di funzionamento.

In seguito, si sono predisposte le tipiche condizioni di presa per effettuare un'analisi delle forze di contatto registrate sulle falangi del dispositivo.

Infine la parte finale prevede l'analisi dei risultati ottenuti e possibili sviluppi futuri del prototipo.

1 Indice

2	Indice delle Figure.....	iii
3	Indice delle Tabelle.....	vi
1	Introduzione	7
1.1	Descrizione del macro-progetto	7
1.2	Stato dell'arte.....	8
1.3	Tipologie di pinze.....	10
1.3.1	Pinze adattive.....	11
1.3.2	Pinze bioniche.....	17
1.4	Prototipo mano di presa	18
1.4.1	Calcolo delle forze di contatto	19
2	Elementi costitutivi.....	22
2.1	Stepper motor.....	22
2.2	Arduino.....	25
2.2.1	Hardware	25
2.2.2	Funzionalità Input/Output.....	25
2.3	Driver A4988	27
2.3.1	Limitazione di corrente	28
2.4	Sensori di forza.....	29
2.4.1	Flexiforce.....	30
2.4.2	Criteri di scelta del sensore.....	32
2.4.3	Flexiforce A101	33
2.4.4	Circuiti: NON-Inverting OP-AMP Circuit, single source.....	36
2.5	Amplificatori MCP6004	37
3	Modellazione del sistema.....	39
3.1	Modello mano di presa su Matlab-Simulink	39
3.2	Modello del circuito dei sensori	41

4	Prove preliminari	45
4.1	Calibrazione sensori	45
4.1.1	Load concentrator	45
4.1.2	Fase pre-calibrazione	46
4.1.3	Leva di Calibrazione	46
4.1.4	Realizzazione circuito su millefori.....	48
4.1.5	Procedura di calibrazione.....	51
4.1.6	Acquisizione dati	51
4.1.7	Valutazione isteresi e resistenza Flexiforce	54
4.1.8	Elaborazione dati.....	57
5	Determinazione delle caratteristiche di presa.....	59
5.1	Movimentazione mano di presa	59
5.2	Montaggio su mano di presa.....	60
5.3	Analisi delle forze di contatto	61
5.3.1	Prova di precisione	62
5.3.2	Prova presa adattativa	68
6	Conclusioni e sviluppi futuri.....	77
7	Bibliografia	79
	Appendice A	83
	Appendice B	89
	Appendice C.....	100
	Ringraziamenti.....	102

2 Indice delle Figure

Figura 1.1 Fin Ray FESTO	11
Figura 1.2 Pinza mGrip, Soft robotics.....	11
Figura 1.3 Octopus gripper FESTO.....	12
Figura 1.4 Pinze adattive Robotiq, modelli Hand-E, 2F-85, 2F-140.....	12
Figura 1.5 Presa di potenza e precisione di una pinza a 3 dita Robotiq.....	13
Figura 1.6 Pinza adattativa a tre dita, ROBOTIQ.....	13
Figura 1.7 Pinza BarretHand, BH8 seriesPinze bioniche	14
Figura 1.8 Mano sotto-attuata a quattro dita.....	14
Figura 1.9 Esempi di presa mano sotto-attuata [22]	14
Figura 1.10 Mano di presa modello T42PP [25]	15
Figura 1.11 Esempio di presa AS Gripper.....	15
Figura 1.12 Prototipo del GR2 Gripper [26].....	16
Figura 1.13 Yale Open Hand project, Model O [27]	16
Figura 1.14 Mano di presa bionica SandiaHand (sinistra) e Ob SoftHand (destra).....	17
Figura 1.15 Prototipo della Pisa/IIT SoftHand [29].....	18
Figura 1.16 Modello CAD complessivo della mano di presa.....	19
Figura 1.17 Rotazione rigida del dito, presa di precisione.	19
Figura 1.18 Forze di contatto presa di precisione in funzione dell'angolo θ	20
Figura 1.19 Rotazione delle falangi, presa adattativa	21
Figura 2.1 Motore lineare Dings 25mm PM External [30]	22
Figura 2.2 Stepper motor [32]	23
Figura 2.3 Funzionamento di uno stepper motor [32]	23
Figura 2.4 Motore Bipolare [32] Figura 2.5 Motore unipolare [32]	24
Figura 2.6 Scheda Arduino UNO.....	25
Figura 2.7 IDE Arduino	26
Figura 2.8 Driver A4988.....	27
Figura 2.9 Schema simbolico driver A4988 [34].....	28
Figura 2.10 Circuito schematico driver A4988	29
Figura 2.11 GloveMAP con Flexiforce sensor	30

Figura 2.12 Principali tipologie Flexiforce sensor [42]	31
Figura 2.13 Stratigrafia Flexiforce sensor [42]	31
Figura 2.14 Falange prossimale Figura 2.15 Falange distale.....	32
Figura 2.16 Flexiforce A101 [44]	33
Figura 2.17 Voltage divider.....	34
Figura 2.18 Inverting OP-AMP Circuit (dual source)	35
Figura 2.19 NON-Inverting OP-AMP Circuit (single source).....	35
Figura 2.20 Schematizzazione del circuito NON-invertente.....	36
Figura 2.21 Simbolo schematico MCP6004	38
Figura 3.1 Revolute Joint	39
Figura 3.2 Planar Joint	39
Figura 3.3 Spherical Joint.....	39
Figura 3.4 Cylindrical joint.....	40
Figura 3.5 Rigid Transform.....	40
Figura 3.6 Spring and damper force	40
Figura 3.7 Modello Simulink	40
Figura 3.8 Modello LTspice.....	42
Figura 3.9 Impulso finito, funzione LTspice.....	42
Figura 3.10 Funzione di resistenza $R_{\text{Flexiforce}}$	43
Figura 3.11 Andamento della $V_{\text{out}}(t)$	43
Figura 3.12 Andamento della $I_{\text{FLEXIFORCE}}(t)$	44
Figura 4.1 Schema Load actuator	45
Figura 4.2 Schema leva per la calibrazione.....	46
Figura 4.3 Dispositivo per la calibrazione	47
Figura 4.4 Schema complessivo del circuito.....	48
Figura 4.5 Circuiti driver-sensori	50
Figura 4.6 Calibrazione sensore	51
Figura 4.7 Ingresso dati Data streamer EXCEL.....	52
Figura 4.8 Curve calibrazione sensori	54
Figura 4.9 $R_{\text{flexiforce}}(F_m)$ sperimentale.....	56
Figura 4.10 $R_{\text{flexiforce}}(F_m)$ da datasheet [44].....	56

Figura 4.11 $F_m(V_{out})$	57
Figura 5.1 Curva di prestazione lineare del motore.....	59
Figura 5.2 Caratteristiche PM external.....	60
Figura 5.3 Posizionamento sensori presa di precisione	60
Figura 5.4 Posizionamento sensori presa adattativa	61
Figura 5.5 Presa di precisione verticale (verso l'alto) sfera	62
Figura 5.6 Prove forza di contatto presa verticale (verso l'alto) precisione sfera.....	63
Figura 5.7 Presa di precisione verticale (verso il basso) sfera.....	64
Figura 5.8 Forze di contatto prova di precisione verticale (verso il basso) sfera.....	65
Figura 5.9 Presa di precisione orizzontale sfera.....	66
Figura 5.10 Forze di contatto prova di precisione orizzontale sfera	67
Figura 5.11 Presa adattativa verticale sfera	68
Figura 5.12 Forze di contatto presa adattativa verticale (verso l'alto) sfera	69
Figura 5.13 Presa adattativa orizzontale sfera.....	70
Figura 5.14 Forze di contatto presa adattativa orizzontale sfera.....	71
Figura 5.15 Presa adattativa verticale (verso il basso) sfera	72
Figura 5.16 Forze di contatto sfera presa verticale (verso il basso) adattativa	73
Figura 5.17 Presa adattativa verticale (verso l'alto) solido in plastica	74
Figura 5.18 Forze di contatto solido plastica presa verticale (verso l'alto) adattativa.....	74
Figura 5.19 Presa adattativa verticale (verso il basso) solido plastica	75
Figura 5.20 Forze di contatto solido plastica presa verticale (verso il basso) adattativa	75
Figura 0.1 Schema circuito sensori.....	83
Figura 0.2 Caratteristica salita/discesa sensore AD	87
Figura 0.3 Caratteristica salita/discesa sensore CD	87
Figura 0.4 Caratteristica salita/discesa sensore BD.....	87
Figura 0.5 Caratteristica salita/discesa sensore CP	88
Figura 0.6 Caratteristica salita/discesa sensore BP	88
Figura 0.7 Caratteristica salita/discesa sensore AP.....	88

3 Indice delle Tabelle

Tabella 1 Classificazione organi di presa [7]	9
Tabella 2 Caratteristiche standard Force sensor [41].....	30
Tabella 3 Caratteristiche Flexiforce A101 [45]	33
Tabella 4 Caratteristiche prestazionali MCP6004	37
Tabella 5 Nomenclatura Sensori-circuito	49
Tabella 6 Calcolo integrali e isteresi curve.....	55
Tabella 7 Valori di Gain delle rette di calibrazione	58
Tabella 8 Calcolo Media, Varianza, Deviazione standard e Coefficiente di variabilità	58
Tabella 9 Legenda circuito elettronico.....	84
Tabella 10 Indici di dispersione dati per sensore AD	84
Tabella 11 Indici di dispersione dati per sensore CD.....	85
Tabella 12 Indici di dispersione dati per sensore BD	85
Tabella 13 Indici di dispersione dati per sensore CP	85
Tabella 14 Indici di dispersione dati per sensore BP.....	86
Tabella 15 Indici di dispersione dati per sensore AP	86
Tabella 16 Nomenclatura modello Simscape	101

1 Introduzione

1.1 Descrizione del macro-progetto

Il dispositivo di presa a 3 dita fa parte del progetto atto alla realizzazione di un sistema per l'estrazione di bambini in ambienti angusti come i pozzi, i quali presentano profondità superiori ai 30 metri e con diametri di circa 30 cm. Tali dimensioni rendono difficoltoso l'intervento dei soccorritori, i quali sono spesso incapaci di mettere in sicurezza la vittima. Incidenti di questo tipo sono molto frequenti in India, in cui il 30% dei decessi per incidente avviene a causa di intrappolamenti nei pozzi [1]. Si contano, dal 2009 al 2016, almeno 19 decessi comprovati e 45 senza alcun tipo di prova, con solo il 10% di bambini tratti in salvo [2]. Attualmente le tecniche di salvataggio prevedono lo scavo di una fossa parallela, il cui tempo di realizzazione è molto elevato (circa 30 ore), causando il decesso del bambino per mancanza di ossigeno. [3] Si ricorda in Italia l'unico caso avvenuto nel Lazio, nel 1981, in cui morì un bambino di appena 6 anni. [4]

Lo scopo del progetto complessivo è quello di realizzare un dispositivo che preveda il completo monitoraggio della vittima, tramite l'ausilio di opportune telecamere e l'installazione di sensori di temperatura, ossigeno e umidità. In seguito, grazie alla movimentazione della mano, si prevede la predisposizione di un opportuno sistema per la messa in sicurezza della vittima.

1.2 Stato dell'arte

Si considera automazione quella tecnologia che ha il compito di controllare macchine e processi produttivi al fine di ridurre l'intervento umano, evitando dunque lavorazioni in ambienti poco salubri. Ciò viene garantito dall'uso di robot collaborativi (cobot): un manipolatore multiuso riprogrammabile concepito per condividere lo spazio di lavoro con l'uomo. [5] La parte terminale del braccio robotico si definisce end-effector (EE), il quale viene definito dalla normativa [ISO 8373:1994, definizione 3.11] come:

“...un dispositivo appositamente progettato per essere collegato all'interfaccia meccanica per consentire al robot di svolgere il suo compito” [6].

L'EE solitamente si accoppia con l'E/OAT (End-Of-Arm Tooling) o gripper. Si riporta la definizione di G.J. Monkaman [7]:

“I gripper sono sottosistemi dei meccanismi di presa che forniscono un contatto temporaneo con l'oggetto da afferrare, assicurandone posizione e orientamento durante la manipolazione. La presa è ottenuta per mezzo di forze prodotte da appositi elementi”.

Si ricorda come le pinze robotiche prevedono l'uso di organi prensili, ovvero dita che permettono la presa stabile di un oggetto in qualsiasi configurazione dello spazio, garantendone una completa risoluzione del problema di Posizione e Orientazione dell'EE (comunemente definita POSA).

È possibile classificare i gripper in quattro categorie in base al metodo di presa: [8]

- **Impactive:** la forza meccanica è impressa direttamente sull'oggetto in più direzioni;
- **Ingressive:** la presa viene effettuata inserendo l'organo di presa all'interno dell'oggetto;
- **Astrictive:** una forza vincola l'oggetto, garantendo la presa;
- **Contigutive:** l'oggetto viene sostenuto da una forza unidirezionale;

Introduzione

Si riporta una tabella che riassume le tipologie di gripper ad esse associate:

Metodo di presa	Tipo di gripper	Tipici esempi
Impactive		Pinze, mani, morse
Ingressive	Intrusive	Aghi, perni, chiodi
	Non-Intrusive	Ganci, velcro
Astrictive	Ad Aspirazione	Aspiratori
	Magneto-adesione	Campo magnetico
	Elettro-adesione	Campo elettrico
Contigutive	Termici	Congelamento, fusione
	Chimici	Adesivi Permatack
	A Fluido	Azione capillare

Tabella 1 Classificazione organi di presa [7]

Un'altra valida differenziazione dei gripper è garantita dalle differenti conformazioni dei modelli multi-dita. Le principali tipologie sono: [7]

- Parallele: due o più dita che si aprono e chiudono lungo un unico asse;
- Centriche: due o più dita si movimentano attorno a un punto centrale;

Entrambe le tipologie sono ideali per operazioni che richiedono ripetibilità e una certa quantità di forza di presa, inoltre le dita possono essere sostituibili direttamente dall'utente a seconda della tipologia di task che la mano dovrà svolgere.

Tra i parametri da considerare per la scelta della mano adeguata sono:

- Payload, definito come il carico massimo che l'EE è in grado di movimentare;
- Gripper stroke, intesa come massima apertura della pinza;
- Peso del gripper stesso, il quale limita il Payload massimo che viene garantito;

1.3 Tipologie di pinze

Il mercato offre una vasta gamma di pinze data dalla diversificazione dei sistemi di azionamento per gli EOAT, rendendo tali dispositivi adattabili a una varietà di applicazioni.

Di seguito si riportano le principali tipologie di attuazioni e le differenti famiglie di pinze presenti nel mercato: [10]

- Pneumatico: il movimento del dispositivo è garantito dall'aria compressa che determina una pressione e quindi una forza sull'elemento stesso. È tipico l'utilizzo per le applicazioni pick and place, tuttavia è necessario garantire il funzionamento continuativo di un compressore;
- Elettrico: permette la movimentazione di servo-pinze controllabili sia in forza, sia in velocità. Di comune impiego commerciale sono la pinza a tre pinze SHUNK, modello MPZ e la pinza a due griffe della ONROBOT, modello 2FG7 [12];
- Idraulico: garantisce la possibilità di utilizzo per applicazioni che prevedono attività pesanti;
- Vuoto: viene impiegato con l'uso di ventose, capaci di prendere e movimentare gli oggetti, adatto ad afferrare pezzi puliti, non porosi e con superfici poco irregolari. L'alimentazione che garantisce la depressione sufficiente si ottiene mettendo un tubo di Venturi all'estremità di una linea di aria compressa. Di comune impiego sono i modelli commerciali COVAL [13], le pinze ad espansione GIMATIC [14] e la pinza pneumatica VERSABALL [15].

Una differente tipologia è quella dei soft end-effector comunemente usati nell'industria alimentare e agricola, i quali hanno delle superfici di contatto morbidi, ideali per delle prese delicate e capaci di modellarsi alla forma e al peso dell'oggetto da afferrare [9].

1.3.1 Pinze adattive

Le pinze adattive a tre/due dita garantiscono il modo più semplice per la movimentazione e la presa degli oggetti, inoltre sono in grado di manipolare elementi con geometrie complesse e particolarmente fragili.

Una tra le più semplici pinze è quella sviluppata da FESTO, modello Fin Ray Effect con attuazione pneumatica. Il principio di funzionamento deriva dalla fisiologia delle pinne dei pesci ed è basato su un elemento di base a forma di triangolo, dentro il quale vi sono dei lati flessibili tenuti separati da tutori articolati collegati alle rispettive parti laterali. Questa struttura bionica garantisce un'ottima aderenza per corpi convessi, in quanto i lati del triangolo si deformeranno concordemente alla geometria del pezzo da movimentare. [16]

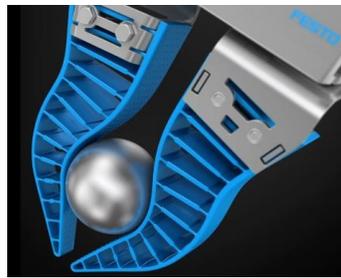


Figura 1.1 Fin Ray FESTO

Un'altra presa adattativa presente in commercio è la pinza mGrip prodotta dalla Soft Robotics. La suddetta pinza è adatta per la movimentazione di oggetti estremamente piccoli, dunque l'ideale soprattutto in imprese alimentari, farmaceutiche medio/piccole. [17]



Figura 1.2 Pinza mGrip, Soft robotics

La FESTO propone un modello con una struttura siliconica controllata pneumaticamente a forma di tentacolo. Essa è capace di piegarsi verso l'interno e l'esterno in modo da poter

avvolgere in modo aderente e delicato. Dunque, l'octopus gripper può essere considerata una soluzione adattabile a numerose geometrie. [18]



Figura 1.3 Octopus gripper FESTO

La linea Robotiq propone, tra la categoria di pinze adattive, le seguenti tipologie di pinze di presa a due dita: [19]

- Hand-E, modello base della linea, facilmente integrabile e collegabile con i principali bracci meccanici presenti in commercio;
- 2F-85 e 2F-140 garantiscono la presa avvolgente e parallela, inoltre il feedback di posizione e il rilevamento automatico del pezzo permettono un'adeguata forza di presa per differenti geometrie dell'oggetto da afferrare;



Figura 1.4 Pinze adattive Robotiq, modelli Hand-E, 2F-85, 2F-140

La pinza a tre dita della Robotiq garantisce una presa di precisione, con tre dita totalmente estese e la presa di potenza in cui le dita si adattano alla forma dell'elemento da afferrare. [20]

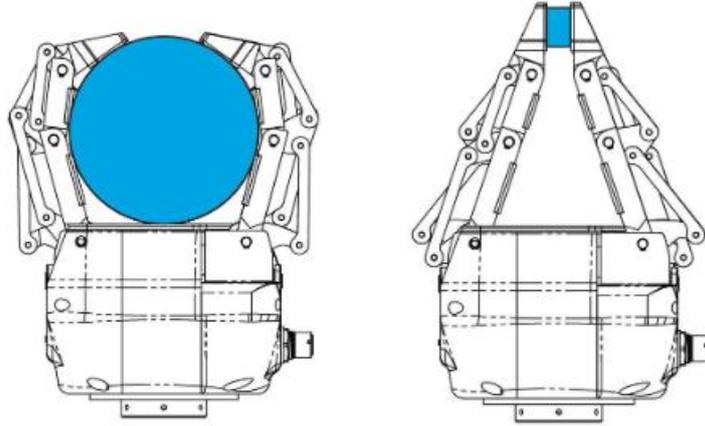


Figura 1.5 Presa di potenza e precisione di una pinza a 3 dita Robotiq



Figura 1.6 Pinza adattativa a tre dita, ROBOTIQ

Un altro modello presente in commercio è la BarrettHand, una pinza programmabile ad attuazione elettrica a tre dita. Il peso ridotto e la base compatta totalmente autonoma permettono l'utilizzo della pinza in numerose applicazioni, inoltre la precisione è garantita da encoder montati sui giunti. [21]

Introduzione



Figura 1.7 Pinza BarretHand, BH8 series Pinze bioniche

Un'alternativa viene offerta da prototipi di mani sottoattuate (Figura 1.8) composte da dita disaccoppiate in grado di eseguire una presa di potenza e precisione. [22]

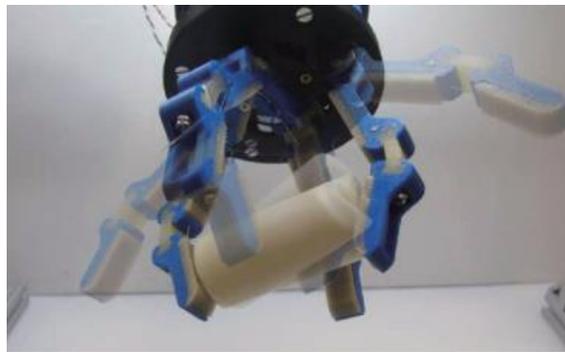


Figura 1.8 Mano sotto-attuata a quattro dita

La presa di precisione è garantita da giunti precaricati con una molla di torsione, inoltre ogni dito è guidato indipendentemente, permettendo una manipolazione planare del dispositivo. [23] La presa di potenza invece è molto simile ai primi modelli di mano SDM [24], ovvero con flessioni rigide delle dita. Il dispositivo presente in Figura 1.8 è leggero e compatto, infatti la base della mano ha un diametro di 115 mm, un'altezza di 76 mm e un peso di 685 g. [22]



Figura 1.9 Esempi di presa mano sotto-attuata [22]

Introduzione

Analogamente al modello analizzato in Figura 1.9, è stato analizzato il modello sotto-attuato T42 a due dita. Tale prototipo è stato sviluppato sia nella versione con giunti a perno precaricati con una molla a torsione (modello indicato con la lettera P), sia con giunti di flessione realizzati con materiali elastomerici (indicato con la lettera F) [25].

Si riporta in Figura 1.10 la mano di presa T42PP:



Figura 1.10 Mano di presa modello T42PP [25]

La traiettoria della mano di presa nella Figura 1.10 è stata programmata con l'uso delle primitive [25], garantendo la presa di oggetti aventi dimensioni maggiori delle primitive tracciate.

Un'altra soluzione di pinza adattativa e sotto-attuata è il prototipo di pinza AS, la quale usa un pollice fermo e un dito dotato di una serie di rulli che ruotano liberamente con due falangi.

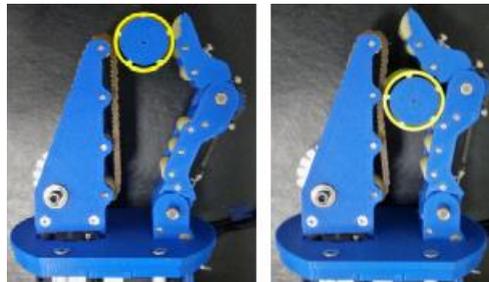


Figura 1.11 Esempio di presa AS Gripper

È stata analizzata inoltre la pinza GR2 a due dita in grado di manipolare un'ampia varietà di oggetti senza sensori. Essa può essere usata anche in tradizionali applicazioni di asservimento macchine e allineamento per le attività di assemblaggio.

Si riporta in Figura 1.12 una generica pinza di questo tipo [26].

Introduzione

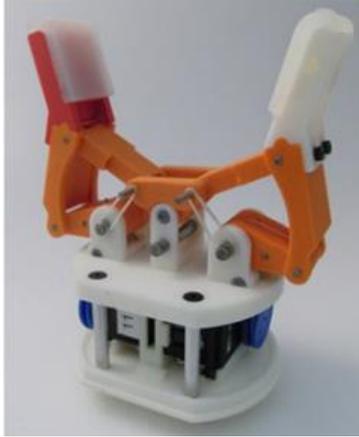


Figura 1.12 Prototipo del GR2 Gripper [26]

Un altro modello analizzato è il Model O (Figura 1.13), anch'essa è una mano robotica sotto-attuata, adattativa, basate sulla flessione dei giunti o da perni caricati a molla [27].



Figura 1.13 Yale Open Hand project, Model O [27]

1.3.2 Pinze bioniche

Le pinze bioniche, tipicamente attuate elettricamente o pneumaticamente, cercano di gestire prodotti di dimensioni simili alla mano umana, garantendo un pollice opponibile e più dita capaci di migliorare la movimentazione e la presa di oggetti. Si riportano due delle principali tipologie di pinze bioniche presenti in commercio: [28]

- Sandia Hand: pinza modulare che consente il collegamento con diverse tipologie di dita con accoppiamenti di tipo meccanico o magnetico. Questa tecnologia è adatta a un'analisi di robotica collaborativa, in quanto le dita si disaccoppiano dalla mano nel caso in cui l'utente si scontri con il dispositivo;
- Ob SoftHand è un prodotto innovativo di Ob Robotics: essa è una pinza bionica ricavata dallo studio del movimento della mano umana, attuata elettricamente. L'architettura della mano permette il movimento di un tendine posto a simulare le articolazioni umane, garantendo elevata destrezza e adattabilità alle numerose condizioni di lavoro;

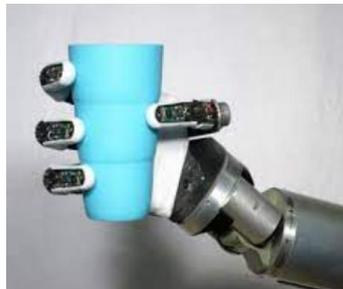


Figura 1.14 Mano di presa bionica SandiaHand (sinistra) e Ob SoftHand (destra)

Un'altra tipologia di pinza bionica è la Pisa/IIT SoftHand, prototipo molto sicuro, ma allo stesso tempo robusto nella struttura, realizzato con lo scopo di essere usata come se fosse una pinza industriale.

L'idea di tale progetto, definita come sinergia adattativa, si basa sul mantenimento del design di una mano pur avendo una sola attuazione, infatti la mano ha 19 articolazioni, ma usufruisce solo di un attuatore per attivare la presa effettiva degli oggetti. [29]

In Figura 1.15 si riporta il prototipo descritto.



Figura 1.15 Prototipo della Pisa/IIT SoftHand [29]

1.4 Prototipo mano di presa

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi, così come precedentemente descritto, è quello di valutare il funzionamento del prototipo di un dispositivo di presa robotico a tre dita, posizionate a 120° , per operazioni di soccorso in ambienti angusti.

La mano di presa riprende un lavoro di progettazione già realizzato [11], in cui si è definito il sistema di attuazione e di trasmissione del moto dalle falangi alle dita, con lo scopo di ottimizzarne gli ingombri e le prestazioni. Una volta definite le specifiche progettuali, è stato effettuato uno studio cinematico del meccanismo che ha permesso, in seguito alla scelta dell'attuatore, di analizzare matematicamente l'andamento delle forze di contatto su ciascun dito. Nello specifico si è adoperato un solo attuatore lineare, minimizzando gli ingombri e permettendo alla mano di effettuare prese di precisione e adattative.

Per poter effettuare la validazione del prototipo è stato necessario dover analizzare il funzionamento della mano di presa e le simulazioni effettuate in precedenza. In particolare, si sono analizzate le forze di contatto agenti nelle dita nel caso di presa adattativa e di precisione.

In Figura 1.16 è riportato il CAD della mano di presa:

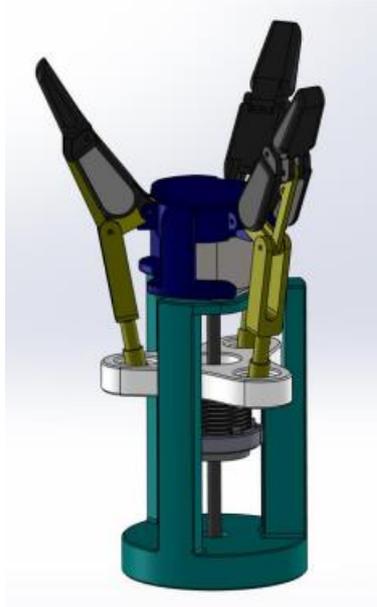


Figura 1.16 Modello CAD complessivo della mano di presa

1.4.1 Calcolo delle forze di contatto

Si descrive la procedura di calcolo delle forze di contatto precedentemente effettuata nelle due condizioni di afferraggio: precisione e adattativa. Di seguito si riporta brevemente la trattazione effettuata in fase di progettazione del prototipo [11]. La presa di precisione prevede il contatto con l'oggetto esclusivamente quando le falangi distali vanno a contatto con l'oggetto, dunque le falangi prossimali possono essere considerate come dei corpi rigidi. In Figura 1.17 si riporta lo schema di rotazione rigida.

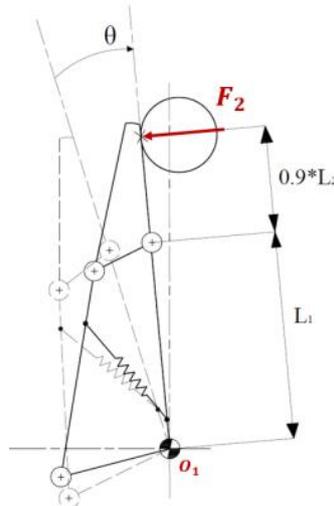


Figura 1.17 Rotazione rigida del dito, presa di precisione.

Introduzione

L'obiettivo dello studio effettuato nell'elaborato precedente, è stata la determinazione della F_2 al variare della F_m fornita dal motore, la quale è stata applicata a una posizione rispetto ad O_1 di $L_1+0.9L_2$.

Risolvendo il sistema di equazioni, si ricava:

$$F_2 = \frac{F_M}{3} \frac{r}{L_1+0.9L_2} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\beta \sin \mu}$$

In cui: β è l'angolo tra la verticale e membro inferiore; μ è l'angolo di trasmissione.

Si può ottenere l'andamento delle forze di contatto F_2 sulla falange distale in funzione dell'angolo θ del dispositivo, come in Figura 1.18.

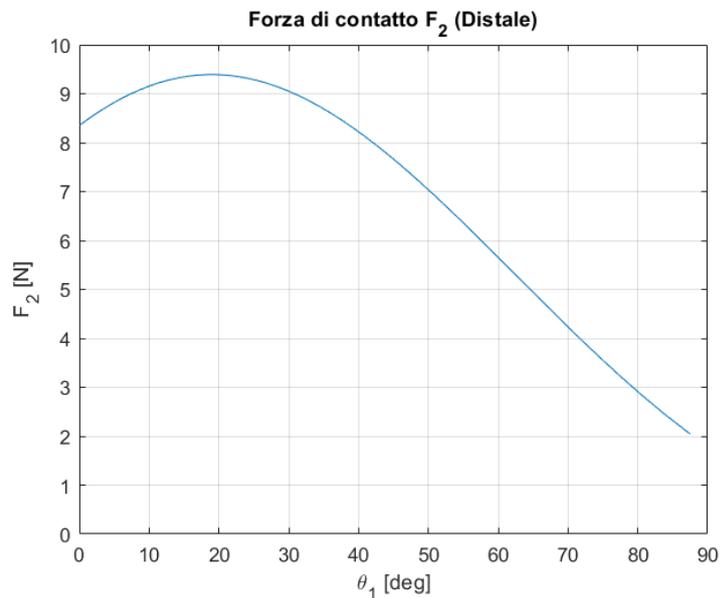


Figura 1.18 Forze di contatto presa di precisione in funzione dell'angolo θ

Il grafico in Figura 1.18 permette di garantire una forza di contatto massima pari a circa 9.5 N, nel caso in cui la forza motrice fornita dal motore sia 40 N.

La presa adattativa è una condizione di afferraggio in cui entrambe le falangi vanno a contatto con l'oggetto da prendere. In Figura 1.19 si riporta lo schema di rotazione nel caso della presa adattativa:

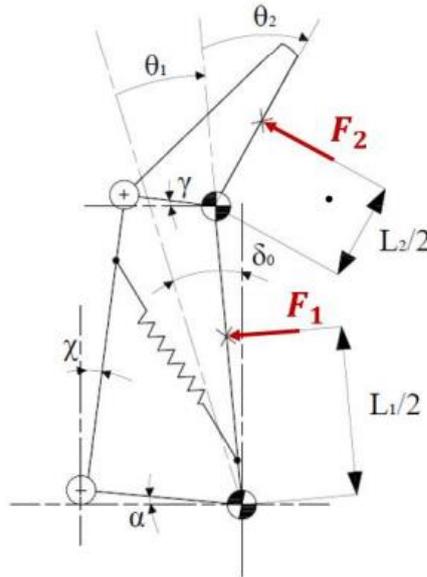


Figura 1.19 Rotazione delle falangi, presa adattativa

Si sono considerate le forze F_1 e F_2 applicate a metà lunghezza delle falangi, simulando i possibili punti di contatto di un oggetto afferrato in questa differente configurazione.

Tale modello è stato risolto in modo del tutto analogo alla presa di precisione, risolvendo le equazioni ricavate dai diagrammi di corpo libero di ogni singolo componente, ottenendo un sistema di 16 equazioni in 16 incognite.

L'elevato numero di incognite e la condizione più conservativa nel caso della presa adattativa, ha portato a considerare come specifica di progetto per la scelta dei sensori il valore di $F_2 = 10$ N calcolato nel caso della presa di precisione.

2 Elementi costitutivi

In seguito alla descrizione del funzionamento della mano e all'analisi matematica delle forze di contatto, bisogna descrivere i componenti necessari per la movimentazione del dispositivo e la validazione del prototipo. Inoltre si sono analizzati, con lo scopo di determinare sperimentalmente le forze di contatto, i componenti elettronici necessari per la realizzazione del circuito del sensore.

2.1 Stepper motor

Gli stepper motor sono dei dispositivi elettromeccanici usati per convertire un segnale di controllo digitale in un movimento. Essi sono usati in numerose applicazioni, quali stampanti 3D, robotica, automazione industriale e macchine CNC.

Tali dispositivi possono essere raggruppati in tre grandi famiglie, a seconda delle strutture fisiche e magnetiche, tali classificazioni possono essere riassunte:

- Motori a induttanza variabile;
- Motori a magneti permanenti;
- Motori ibridi;

Si analizza solo il caso di motori a magneti permanenti, classe in cui appartiene il motore adottato nella mano di presa. Esso è un motore lineare, accoppiato ad un sistema vite-madrevite, capace di trasformare il moto rotatorio della vite in moto lineare della madrevite.

[11]

In Figura 2.1 si riporta il componente Dings, appartenente alla serie da 25mm, formato 'External' [30].



Figura 2.1 Motore lineare Dings 25mm PM External [30]

Elementi costitutivi

Esso è composto da un rotore e uno statore. Quest'ultimo è la parte fissa realizzata in acciaio, mentre il rotore è disposto su un albero dotato di cuscinetti, il quale ruota seguendo il campo magnetico rotante creato intorno allo statore. Quando lo statore viene eccitato, tramite il passaggio di corrente attraverso le bobine, si genera un campo magnetico i cui flussi hanno un'intensità e una direzione funzione della corrente circolante all'interno della bobina stessa. Il vantaggio di avere un rotore a magneti permanenti è quello di mantenere il rotore in posizione anche in assenza di corrente negli avvolgimenti. [31]

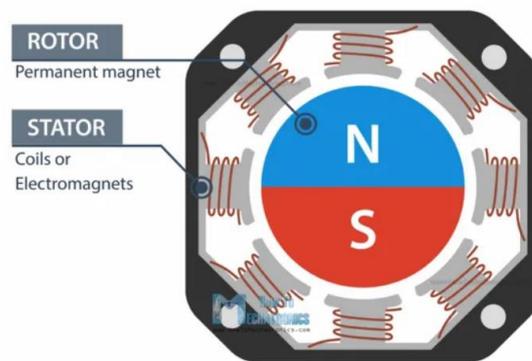


Figura 2.2 Stepper motor [32]

Quando la bobina è eccitata, l'elettromagnete così creatosi attira il magnete (dente) montato sul rotore, posto a una data distanza. Dopo aver effettuato uno spostamento di un dato offset, viene eccitato un altro elettromagnete presente sullo statore, causando un'ulteriore rotazione del rotore, che verrà attratto in una nuova posizione, eccitando le bobine successive avviene la rotazione completa o parziale del rotore.

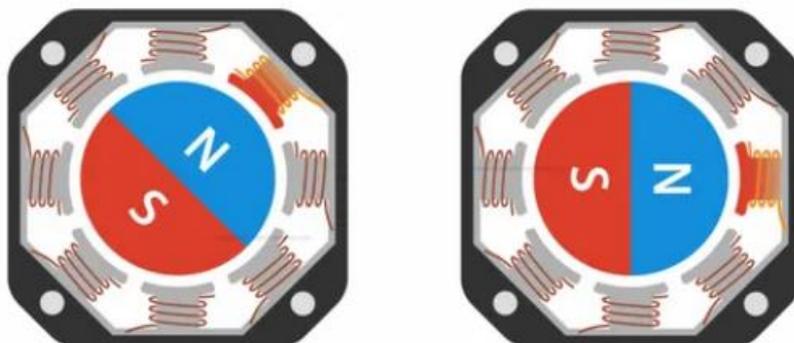


Figura 2.3 Funzionamento di uno stepper motor [32]

2.2 Arduino

Arduino è una piattaforma hardware composta da una serie di schede elettroniche dotate di un microcontrollore. È stata sviluppata nei primi anni 2000 dall'Interaction Design Institute di Ivrea come strumento per la prototipazione rapida totalmente «Open Source». [33]

2.2.1 Hardware

Sono presenti sul mercato decine di schede Arduino. È tuttavia possibile identificare delle caratteristiche di base che accomunano ogni piattaforma, ovvero:

- Un circuito stampato sul quale sono montati il microcontrollore (ad esempio i modelli ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280 e ATmega2560);
- Dei connettori di I/O connessi ad alcuni pin del micro;
- Un regolatore di tensione;
- Una porta USB per interfacciarsi con il computer;



Figura 2.6 Scheda Arduino UNO

2.2.2 Funzionalità Input/Output

Una caratteristica di Arduino è quella di avere a disposizione dei connettori compatibili con dispositivi di ogni genere. A tale scopo, Arduino è dotata di molte delle periferiche input/output (I/O) in uso su altri circuiti, tramite i quali è possibile connettere alla scheda sensori e attuatori.

Le schede distinguono con precisione i connettori connessi ai pin che possono gestire solo segnali digitali o analogici. La scheda Arduino Uno usata per l'attività, dispone di 14 connettori per I/O digitale e 6 connettori dedicati a ingressi analogici. In questa attività, gli

I/O digitali sono stati usati per comandare il driver del motore, collegandosi ai pin STEP e DIR del driver.

Inoltre sono presenti nella scheda altri 6 connettori specificamente dedicati a ingressi di segnali analogici che ricevono valori di tensione dai 6 sensori di forza montati sulla mano (descritto successivamente nella Tabella 5).

I microcontrollori utilizzati sulle schede Arduino lavorano ad una tensione interna di 5V, fornita tramite cavo dalla porta USB del computer.

La programmazione del microcontrollore può avvenire attraverso USB, in un ambiente software di sviluppo integrato, chiamato Arduino IDE (Integrated Development Environment), disponibile per Windows, Mac e Linux: si tratta di un'applicazione scritta in Java creata specificamente per essere utilizzata con dispositivi Arduino.

Il linguaggio utilizzato per la programmazione è chiamato Wiring: si tratta di un linguaggio derivato dal C e dal C++.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. At the top, there is a teal header bar with several icons on the left and a search icon on the right. Below the header, the main workspace is a white text editor with a teal border. The text editor contains the following code:

```
sketch_sep13g
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

Figura 2.7 IDE Arduino

Arduino può anche, tramite un collegamento al PC ed un opportuno codice, interagire con software residenti su computer, nel caso specifico, si provvederà a una rilevazione real-time dei dati ottenuti dal sensore, utilizzando Data streamer di Microsoft Office Excel.

2.3 Driver A4988

Per gestire l'alimentazione e il controllo del motore, è stato usato il driver A4988 da 16 PIN per stepper motor; nella scheda sono inclusi pin maschi da 0.1" non saldati. Lo stesso presenta la corrente di limitazione regolabile, permettendo un'adeguata protezione da sovracorrente e surriscaldamento, inoltre è possibile impostare cinque differenti risoluzioni con micro-step differenti (da full-step a 1/16 step). [34]

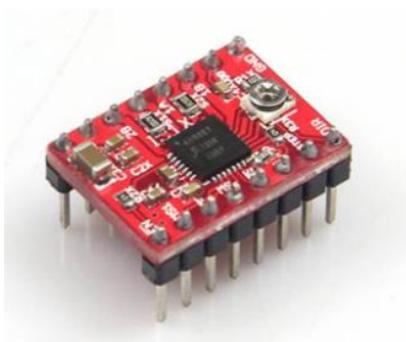


Figura 2.8 Driver A4988

Il driver opera a una tensione che varia da 8 V a 35 V, riuscendo a fornire 1A per fase, senza l'ausilio di un dissipatore, oppure 2A nel caso si predisponga una bobina per il raffreddamento aggiuntivo. La parte logica è alimentata a una tensione di 3.3 V o 5 V [35].

Di seguito si riportano alcune delle caratteristiche principali del drive A4988:

- Microstepping: passo completo, mezzo passo, un quarto, un ottavo e un sedicesimo;
- Regolazione della corrente permette di impostare la corrente massima permessa con il potenziometro;
- Arresto automatico in caso di surriscaldamento, blocco per sotto-tensione e protezione dalla corrente di crossover;
- Protezione contro i carichi brevi e a terra;

Elementi costitutivi

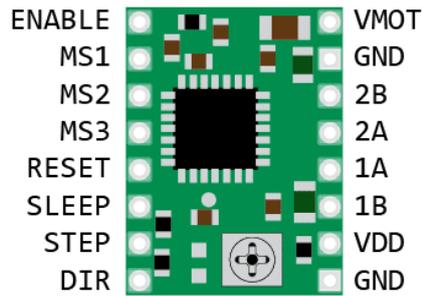


Figura 2.9 Schema simbolico driver A4988 [34]

Affinché le modalità microstep funzionino correttamente, il limite di corrente deve essere impostato sufficientemente basso in modo che venga attivato.

2.3.1 Limitazione di corrente

Un modo per massimizzare le prestazioni del motore passo-passo è utilizzare la tensione più elevata possibile, in particolare l'aumento della tensione generalmente consente velocità di passo e coppia di passo più elevate. Tuttavia, per utilizzare in sicurezza il motore è necessario mantenere la corrente della bobina limitata per evitare che superi la corrente nominale del motore. Il driver A4988 supporta tale limitazione di corrente e il potenziometro trimmer sulla scheda può essere utilizzato per impostare il limite di corrente.

Un modo per impostare il limite di corrente è mettere il driver in modalità passo completo, mantenere il motore in una posizione fissa e misurare la corrente che attraversa ogni singola bobina. Inoltre bisogna tener presente che si deve eseguire nuovamente questa regolazione qualora si cambiasse la tensione logica, poiché il limite di corrente dipende dalla tensione VDD. Il limite di corrente I_{MAX} si riferisce alla tensione di riferimento come segue [32]:

Dove R_{CS} è la resistenza di rilevamento della corrente;

$$I_{MAX} = \frac{V_{ref}}{8R_{CS}}$$

Quindi, nel seguente caso di applicazione si è impostato il limite di corrente con un'alimentazione della parte logica VDD pari a 5 V, disponendo di una scheda con resistori di rilevamento R_{CS} da 0.1 Ω e V_{REF} pari a 500 mV, ottenendo un valore limite massimo di corrente pari a 625 mA.

In Figura 2.10 è riportato lo schema del circuito per la movimentazione del motore:

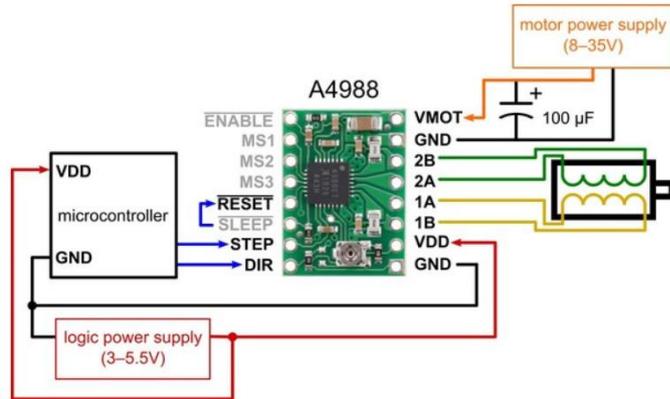


Figura 2.10 Circuito schematico driver A4988

2.4 Sensori di forza

I sensori di forza sono ampiamente utilizzati nel campo della robotica, in particolare per applicazioni di controllo dell'interazione dei robot. Ad esempio, una tipologia è quella dei modelli Force resistive sensor (FSR). Queste tipologie di sensori sono usualmente montate sui polsi dei bracci robotici, con lo scopo di misurare la forza che agisce su di essi [36].

Nel 2008 è stato condotto uno studio per utilizzare il piezoresistivo che ha coinvolto i sensori Tekscan Flexiforce e Interlink FSR in applicazioni robotiche e biomeccaniche. Si è registrato il comportamento dinamico dei sensori e le proprietà non lineari per identificare la modellazione del loro sistema [37].

Dalle rilevazioni riscontrate durante la condizione di "assenza di carico", il valore del sensore FSR può essere maggiore di 1 M Ω , mentre la resistenza può ridursi a diversi k Ω quando la pressione sulla superficie attiva aumenta in relazione al force range di riferimento [38].

Nel 2012 è stato effettuato e analizzato uno studio comparativo per le prestazioni dei sensori Flexiforce e Interlink utilizzando il test di deriva statica e il test di carico ciclico. Lo studio ha concluso che entrambi i sensori FSR hanno una capacità limitata, infatti entrambi mostravano una sostanziale non linearità, isteresi e deriva nelle letture per i cicli di test iniziali e finali [39].

Inoltre, nel 2015 è stata condotta una ricerca in merito all'analisi del segnale di uscita del sensore, considerando un intervallo da 50 g a 1 kg. I risultati hanno rivelato che il piccolo

errore permetteva la sensazione tattile ma non è stata influenzata dalla variazione del peso [40].

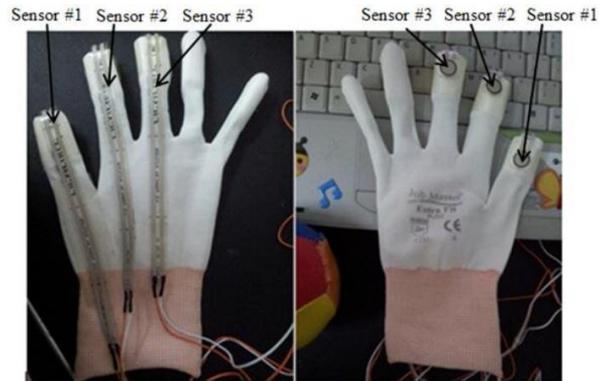


Figura 2.11 GloveMAP con Flexiforce sensor

Dal medesimo studio si è ricavato che i risultati di linearità del sensore Flexiforce sono migliori rispetto al sensore Interlink, motivo per il quale, per la seguente attività di tesi si è preferito l'utilizzo del primo rispetto al secondo.

2.4.1 Flexiforce

L'architettura dei sensori FlexiForce consiste in un circuito stampato ultrasottile e flessibile, che può essere facilmente integrato nella maggior parte delle applicazioni. Nella Tabella 2 si riportano le principali caratteristiche dei sensori Flexiforce.

<i>Modello</i>	<i>Lunghezza sensore</i>	<i>Diametro area sensibile</i>	<i>Range Force</i>
<i>A101</i>	15.7 mm	3.81 mm	1 N – 44 N
<i>A201</i>	152.4 mm	9.53 mm	4 N – 445 N
<i>HT201</i>	152.5 mm	9.53 mm	222 N
<i>A301</i>	25.4 mm	9.53 mm	4 N - 4448 N
<i>A401</i>	56.9 mm	25.4 mm	111 N – 31138 N
<i>A502</i>	81.3 mm	50.8 mm	222 N

Tabella 2 Caratteristiche standard Force sensor [41]

Elementi costitutivi

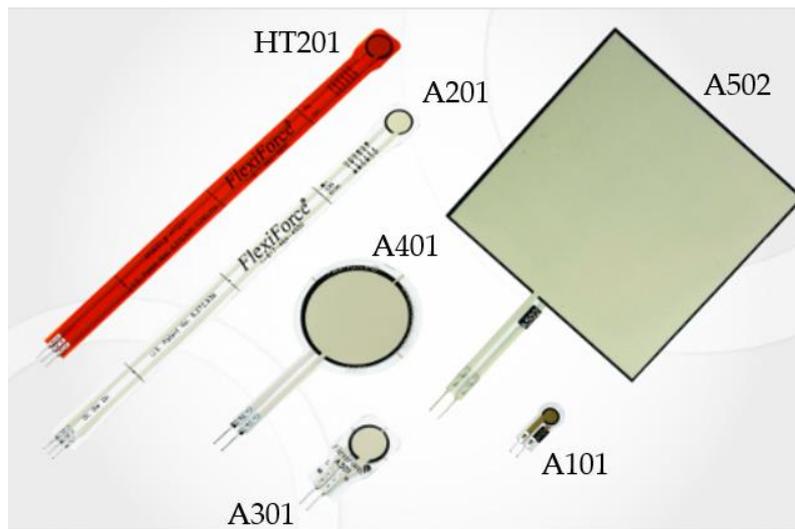


Figura 2.12 Principali tipologie Flexiforce sensor [42]

I sensori sono costituiti da due substrati, composti da poliestere (o poliammide nel caso dei sensori ad alta temperatura). Su ogni strato viene applicato del materiale conduttivo (tipicamente argento), seguito da uno strato di inchiostro sensibile alla pressione, infine viene utilizzato l'adesivo per unire i due strati. Il cerchio d'argento in cima all'inchiostro sensibile alla pressione definisce l'area sensibile del sensore. L'argento si estende dall'area di rilevamento fino ai connettori all'altra estremità del sensore, i quali sono collegati con opportuni cavi conduttivi [43].

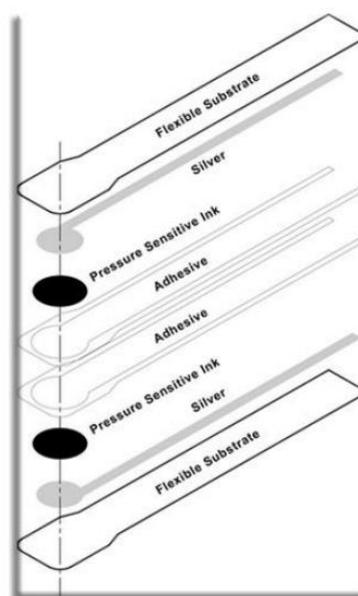


Figura 2.13 Stratigrafia Flexiforce sensor [42]

2.4.2 Criteri di scelta del sensore

I sensori, al fine di garantire la rilevazione delle forze di contatto, sono stati montati sulle tre dita, rispettivamente nelle falangi distali e prossimali. La scelta dei Flexiforce si è basata sia sulle dimensioni, sia sul range forze di applicazione della mano di presa.

Considerando inizialmente le specifiche dimensionali, si riportano le dimensioni delle dita del dispositivo: [11]



Figura 2.14 Falange prossimale

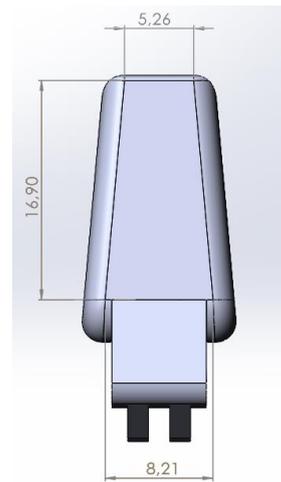


Figura 2.15 Falange distale

Come si evince dalle Figura 2.14 e 2.15 , la scelta del sensore è stata effettuata principalmente tenendo conto delle ridotte dimensioni delle falangi, nello specifico non si possono adottare i modelli A201 e HT201 presenti in Tabella 2.

Parallelamente ai vincoli dimensionali, si sono altresì considerate le specifiche prestazionali in riferimento allo studio precedentemente effettuato sulle forze di contatto Figura 1.18, in cui si è ricavato come, nel caso di una presa di precisione con contatto sulla punta delle falangi distali con rendimento di trasmissione unitario, si ottenga una forza di contatto funzione dell'angolo di trasmissione μ , con F_2 massimo pari a 10 N [11].

In funzione di tali specifiche è stato scelto come sensore il Flexiforce modello A101.

2.4.3 Flexiforce A101

Il sensore di forza Flexiforce A101 è il piezoresistivo standard più piccolo della linea della Tekscan, il design ottimizzato lo rende ideale da incorporare in prodotti ed applicazioni con stringenti specifiche dimensionali, come ad esempio nel caso della mano di presa.

Si riportano le dimensioni del componente: [44]

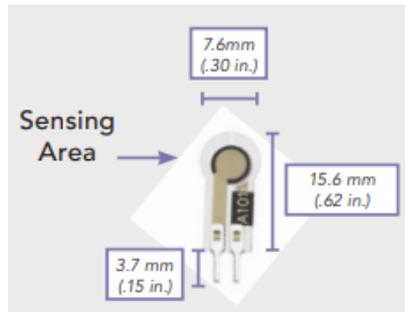


Figura 2.16 Flexiforce A101 [44]

In Tabella 3 si riportano ulteriori caratteristiche di rilievo del sensore.

<i>Caratteristiche</i>		<i>Valori</i>
<i>Dimensionale</i>	Spessore	0.203 mm
	Lunghezza	15.6 mm
	Larghezza	7.6 mm
	Diametro area sensibile	3.8 mm
<i>Prestazionali</i>	Linearità	<3% del full scale
	Ripetibilità	<±2.5%
	Isteresi	<4.5% del full scale
	Deriva	<5 % per scala temporale logaritmica
	Tempo di risposta	<5 μs
	Temp. di utilizzo	-40°C a 60°C
	Durabilità	>3 milioni di utilizzi

Tabella 3 Caratteristiche Flexiforce A101 [45]

Il sensore A101 è in grado di misurare forze fino a 44 N, pertanto la guida Tekscan consiglia di mantenere il range di funzionamento del sensore intorno ai 18 N.

Lo scopo della realizzazione del circuito è fondamentale per permettere un corretto utilizzo del sensore, nel dettaglio si ricerca di:

- Indicare il valore della forza massima, a seconda della differente applicazione;
- Permettere l'interscambiabilità dei sensori;
- Utilizzo dei corretti componenti elettrici;
- Realizzare filtri attivi passa-basso per attenuare frequenze superiori a quella di taglio;
- Ridurre isteresi ed errore a regime;

Tekscan propone tre differenti tipologie di circuiti, i quali sono stati riportati di seguito [46]:

- a. Voltage divider: il circuito con meno componenti all'interno, poco costoso e semplice nella realizzazione. Presenta lo svantaggio di non aver alcun isolamento dal resto del circuito, inoltre risulta complicato limitare le non-linearità delle uscite;

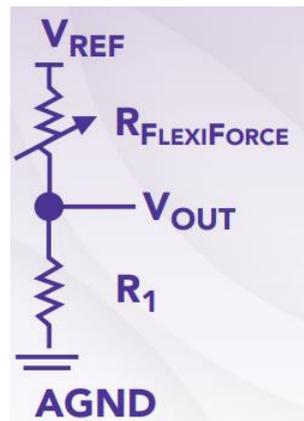


Figura 2.17 Voltage divider

- b. Inverting OP-AMP Circuit (double source): presenta un range dinamico ed un'eccellente linearità nell'uscita, risulta però complicata l'ottimizzazione dei componenti, in quanto si richiede di adottare una doppia sorgente di tensione.

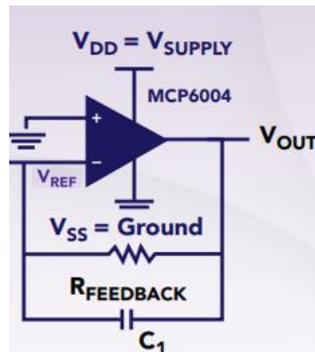


Figura 2.18 Inverting OP-AMP Circuit (dual source)

- c. NON-Inverting OP-AMP Circuit (Single source): presenta un'ottima linearità nell'uscita in tensione, mantenendo un'unica sorgente. Questa soluzione permette, con un partitore di tensione a monte del circuito, di gestire un'unica tensione di alimentazione V_{supply} , semplificando notevolmente il circuito: per tali motivi è stata scelta questa configurazione.

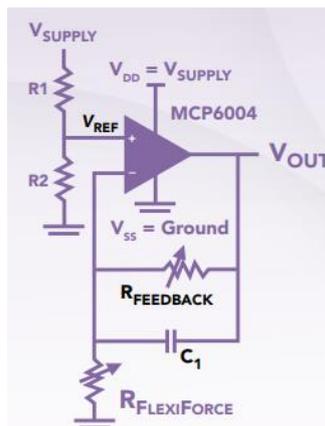


Figura 2.19 NON-Inverting OP-AMP Circuit (single source)

Inoltre, si sono considerati come parametri di progetto:

- Corrente circolante nella scheda ARDUINO pari a 200 mA;
- Corrente circolante nel Flexiforce pari a 2.5 mA;

Successivamente si è realizzato il modello matematico del sistema, scrivendo la funzione di trasferimento ad esso associato nel caso del circuito a unica sorgente.

2.4.4 Circuiti: NON-Inverting OP-AMP Circuit, single source

Per la modellizzazione del sistema, si sono fissati i valori del potenziometro e del sensore, differenziando il partitore di tensione presente a monte e il blocco RC in retroazione.

a) Partitore di tensione:

$$\frac{R_1}{R_2 + R_1} V_{\text{supply}} = V_{\text{REF}} = kV_{\text{supply}}$$

Si ritiene sufficiente usare resistenze dell'ordine dei kΩ, dunque saranno:

$$R_1 = 56 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

b) Retroazione:

Per semplicità dei calcoli, si schematizza la restante parte del circuito con un ulteriore partitore tra un'impedenza equivalente (filtro RC) e la resistenza del sensore

$R_{\text{FLEXIFORCE}}$:

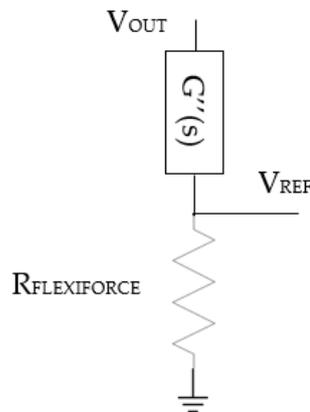


Figura 2.20 Schematizzazione del circuito NON-invertente

Svolgendo i calcoli, si ottiene la funzione di trasferimento del circuito:

$$H(s) = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{REF}}} = \frac{R_{\text{FLEXIFORCE}} + R_{\text{FEEDBACK}}(sC_1 + 1)}{R_{\text{FLEXIFORCE}}(1 + sC_1 R_{\text{FEEDBACK}})}$$

Applicando il teorema del valore finale si analizza la funzione di trasferimento (FDT) a regime:

$$\lim_{s \rightarrow 0} H(s) = \lim_{t \rightarrow \infty} h(t)$$

Considerando $s=0$ e i valori ricavati di $R_{\text{FLEXIFORCE}}=30\text{k}\Omega$ e $R_{\text{FEEDBACK}}=5.6\text{ k}\Omega$ [45], si ottiene:

$$V_{\text{OUT}}(0) = V_{\text{REF}} \left(1 + \frac{R_{\text{FEEDBACK}}}{R_{\text{FLEXIFORCE}}} \right) = 0.6\text{ V}$$

Inoltre, si calcola la corrente circolante nel sensore, ampiamente inferiore alla corrente massima ottenuta dal datasheet ARDUINO:

$$I_{\text{FLEXIFORCE}} = \frac{V_{\text{REF}}}{R_{\text{FLEXIFORCE}_{\text{MIN}}}} \cong 500\text{ }\mu\text{A} \ll 2.5\text{ mA} = I_{\text{MAX}}$$

2.5 Amplificatori MCP6004

La scelta degli amplificatori è stata fatta in base alle indicazioni presenti nei circuiti consigliati da Tekscan, nello specifico si è usato il modello MCP6004 della Microchip Technology Inc., appartenente alla famiglia di amplificatori operazionali progettati per applicazioni di uso generale. Essi possono essere usati per larghezze di banda con guadagno di 1 MHz e circa 90° di margine di fase, inoltre mantiene una fase di 45° margine con un carico capacitivo di 500 pF. Queste tipologie di OP-AMP funzionano con una tensione di alimentazione singola compresa tra 1,8 V – 6 V, assorbendo 100 μA di corrente a range di temperatura estesi, inoltre vengono usati nel settore automobilistico, per attrezzatura portatile, per filtri analogici e sistemi alimentati a batteria [47].

Nella Tabella 4 si riportano le specifiche tecniche degli amplificatori MCP6004:

<i>Caratteristiche</i>	<i>Valori</i>
<i>Larghezza di banda</i>	1 MHz
<i>Tensione di alimentazione</i>	da 1.8 V a 6 V
<i>Corrente di alimentazione</i>	$I_Q = 100\text{ }\mu\text{A}$
<i>Margine di fase</i>	90 °C

Tabella 4 Caratteristiche prestazionali MCP6004

Elementi costitutivi

Di seguito si riporta la schematizzazione del modello MCP6004:

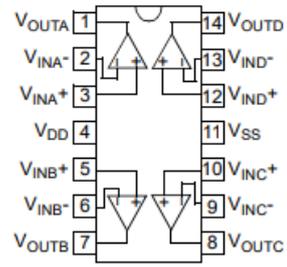


Figura 2.21 Simbolo schematico MCP6004

3 Modellazione del sistema

Si procede con la realizzazione di un modello per la simulazione del dispositivo di presa. Per la parte meccanica si è utilizzato il software di simulazione Matlab-Simulink, con l'estensione Simscape Multibody, capace di realizzare uno schema a blocchi dal CAD precedentemente realizzato su SolidWorks. Successivamente si descrive la simulazione del circuito elettronico sviluppato usando LTspice.

3.1 Modello mano di presa su Matlab-Simulink

Per la ricostruzione dei link è stato necessario importare il modello SolidWorks, al quale sono state riportate opportune modifiche in modo da garantire la corretta esportazione dei rispettivi file CAD, inoltre è stato necessario inserire i rispettivi giunti e le matrici di trasformazione geometrica:

- Revolute Joint: giunto di rivoluzione, 1 DOF di rotazione θ tra due telai;

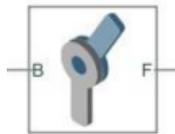


Figura 3.1 Revolute Joint

- Planar Joint: giunto planare, 1DOF di rotazione (θ_z) tra due telai e 2DOF traslazioni x e y di un piano;

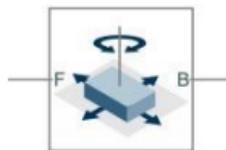


Figura 3.2 Planar Joint

- Cylindrical Joint: giunto sferico, 3DOF di rotazione ($\theta_z, \theta_y, \theta_x$) tra due telai;

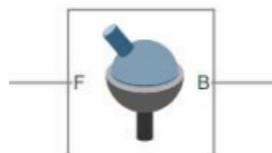


Figura 3.3 Spherical Joint

Modellazione del sistema

- Spherical Joint: giunto cilindrico, 1DOF di rotazione (θ_z) tra due telai e 1DOF di traslazione x ;

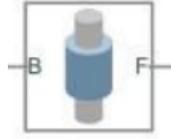


Figura 3.4 Cylindrical joint

- Rigid transform: conserva distanze e angoli in uno spazio 3D, essa permette di modellare la cinematica e la dinamica del sistema, garantendo l'orientamento dei componenti rigidi che costituiscono il modello;

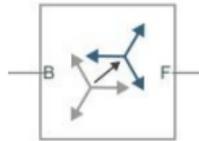


Figura 3.5 Rigid Transform

- Spring and damper force: applica una forza elastica smorzata lineare tra i due telai a cui è collegato il blocco e agisce lungo la linea che collega le origini dei due telai.

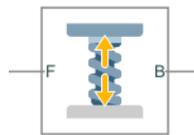


Figura 3.6 Spring and damper force

Si riporta in Figura 3.7 lo schema a blocchi del modello.

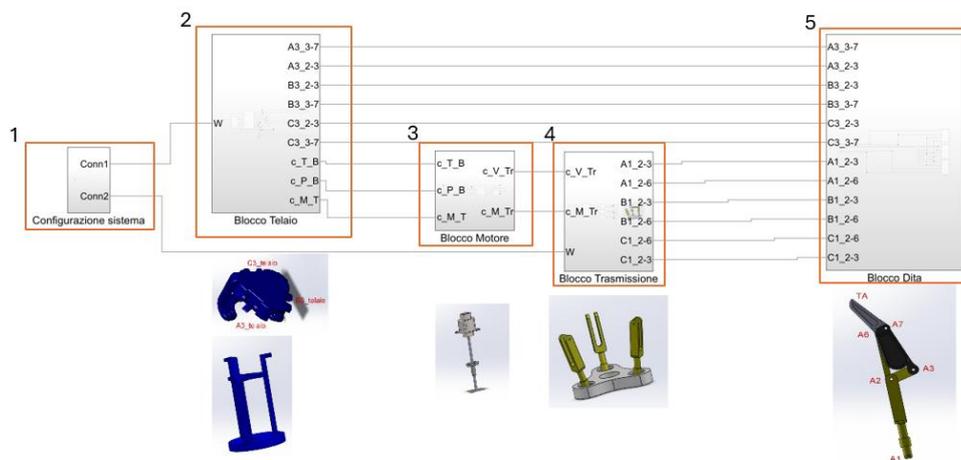


Figura 3.7 Modello Simulink

1. Nel blocco 'configurazione sistema', si definisce il sistema di riferimento globale del sistema, specificando il valore dell'accelerazione di gravità uniforme per tutto il meccanismo. Infine si identifica un blocco 'Solver solution', il quale imposta i parametri per il risolutore del sistema meccanico.
2. Nel 'blocco telaio' si definiscono i sistemi di riferimento e i modelli CAD relativi al palmo e al telaio inferiore del meccanismo. I valori di output di questo blocco si riferiscono ai giunti A3, B3 e C3 delle dita e al 'blocco motore'.
3. Nel 'blocco motore' si definiscono i sistemi di riferimento e i CAD riferiti alla vite, piastra inferiore, molla e motore. Questo sottosistema riceve in INPUT il contatto Telaio-Molla, Telaio-Motore e Telaio-Palmo, mentre restituisce in OUTPUT i collegamenti tra la vite e il blocco Trasmissione (Molla e Vite).
4. Nel 'blocco trasmissione' si ricostruiscono i CAD riferiti alle forcelle di collegamento e alla piastra inferiore. Si identificano come INPUT i giunti Vite-Trasmissione, Molla-Trasmissione e la configurazione del sistema complessivo; gli OUTPUT sono i giunti di collegamento tra dita e membro A_2A_3 .
5. L'ultimo blocco del sistema è quello riferito alle dita, il quale riceve come INPUT dal blocco trasmissione e dal telaio. Dentro tale sottosistema si ricostruiscono le dita e i rispettivi collegamenti con palmo e falangi.

Si riporta in Appendice C il sistema complessivo e la relativa legenda per la nomenclatura dei rispettivi giunti.

3.2 Modello del circuito dei sensori

In seguito alla scelta della tipologia di circuito, si è passati alla simulazione su LTspice del modello descritto matematicamente nel paragrafo 2.4.4.

Nello specifico, LTspice è un software di simulazione per circuiti elettronici sviluppato da Linear Technology [48]. Esso permette, grazie all'utilizzo a una libreria di componenti, di simulare dei circuiti integrati, facendone un'analisi parametrica. Nel caso specifico è stato realizzato il circuito non-invertente, riuscendo ad effettuare una simulazione interattiva, modificando i parametri del circuito in tempo reale.

Modellazione del sistema

In Figura 3.8 si riporta il modello realizzato su LTSpice:

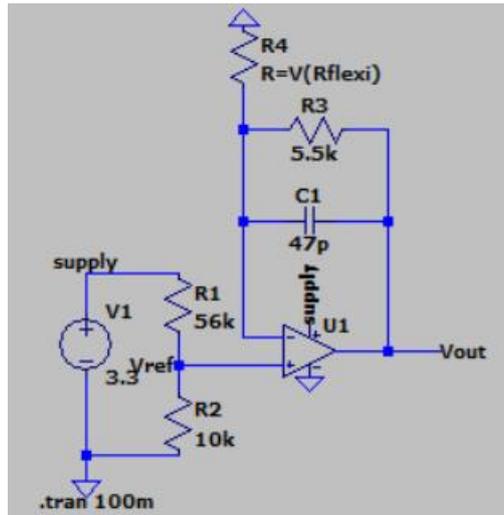


Figura 3.8 Modello LTSpice

Per la realizzazione del circuito, si è ipotizzato fisso il valore di resistenza del potenziometro e variabile la $R_{\text{FLEXIFORCE}}$ posta in retroazione. Nello specifico si è considerato come valore in ingresso un impulso finito, i cui valori dinamici sono riportati in Figura 3.9 :

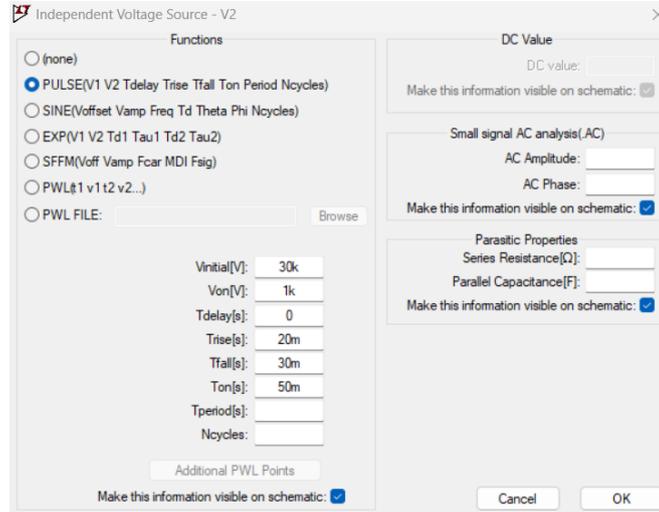


Figura 3.9 Impulso finito, funzione LTSpice

In Figura 3.10 si riporta il segnale d'ingresso al sistema:

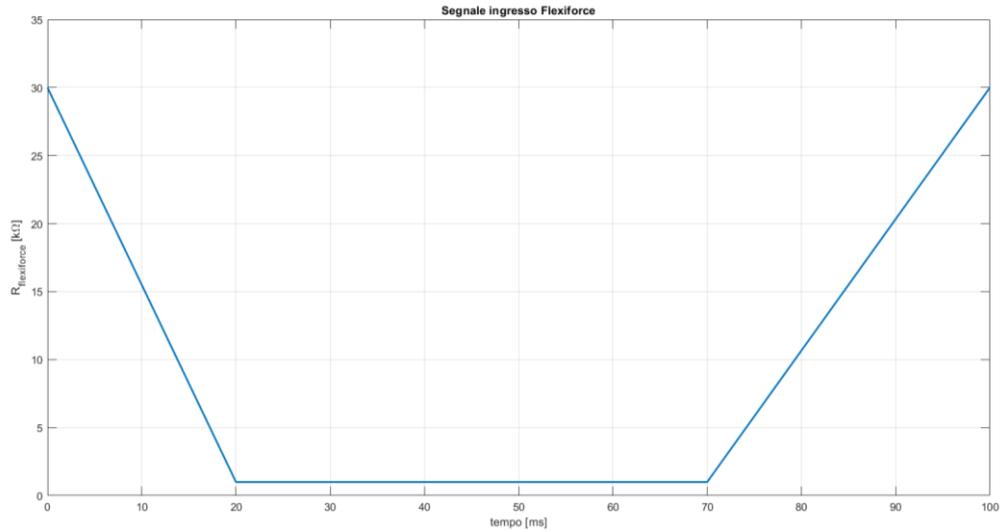


Figura 3.10 Funzione di resistenza $R_{Flexiforce}$

I valori limite della resistenza sono stati scelti in relazione al tipico range di funzionamento del sensore, in linea con le indicazioni fornite dai datasheet forniti dalla Tekscan. [44]

Successivamente, per effettuare la prova, è stato impostato un tempo di simulazione pari a 100 ms, ed i rispettivi tempi di salita/discesa presenti nella Figura 3.9.

In Figura 3.11 si riportano gli andamenti della tensione di uscita:

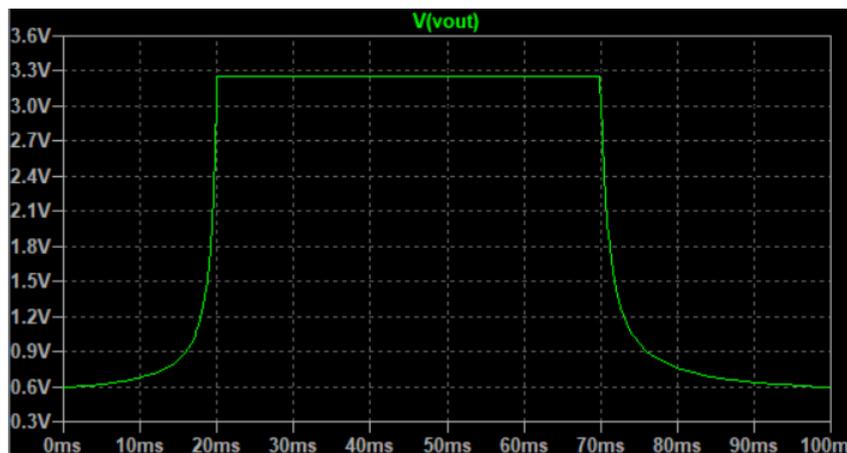


Figura 3.11 Andamento della $V_{out}(t)$

Dalla Figura 3.11 è osservabile come, a fronte di una tensione V_{REF} in ingresso continua a 3.3V, il sistema non satura per i valori di resistenza $R_{FEEDBACK}$ impostati, inoltre è apprezzabile come, il valore della V_{OUT} a regime (0.593V), sia corrispondente al valore ottenuto con il teorema del valore finale applicato nel paragrafo 2.4.4.

Di seguito, in Figura 3.12, si sono analizzate le correnti circolanti nel sensore, in modo da verificare se le condizioni di progetto espresse ad inizio paragrafo siano rispettate.

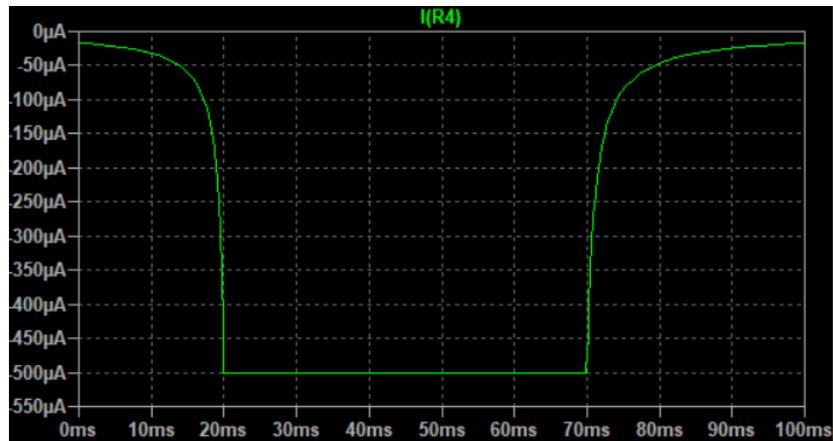


Figura 3.12 Andamento della $I_{FLEXIFORCE}(t)$

Anche in questo caso, così come ricavato dal paragrafo 2.4.4, il valore massimo della corrente circolante nel sensore è pari a 500 μA , ampiamente inferiore rispetto ai 2.5 mA indicati dal datasheet Tekscan.

4 Prove preliminari

In questo capitolo vengono verificate sperimentalmente le prestazioni della mano di presa. Le prove sperimentali di presa sono state precedute da una fase di calibrazione dei sensori, poi si è realizzato il montaggio degli stessi nella mano di presa e infine si sono determinate le forze di contatto tra dita e oggetto da afferrare.

4.1 Calibrazione sensori

4.1.1 Load concentrator

Come descritto nel paragrafo 2.4.1, l'area sensibile è quella descritta dal perimetro nero, all'interno del quale è presente lo strato di argento conduttivo. Per garantire una buona lettura, è necessario che il carico sia applicato nell'area sensibile e normale al piano del sensore.

Nel caso in cui non si riesca a garantire l'applicazione della forza nell'area sensibile, è necessario usare dei concentratori di carico, in plastica acetlica (DELRIN) [46], in modo da diminuire le sollecitazioni di compressione e taglio. La guida, inoltre, raccomanda di sottodimensionare i concentratori di carico a circa il 70 % dell'effettiva area sensibile.

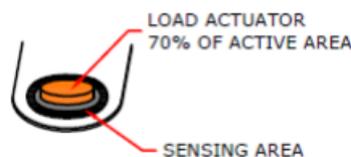


Figura 4.1 Schema Load actuator

Si ricorda inoltre che in questi sensori dovranno essere limitati gli sforzi di taglio in quanto potrebbero causare la rimozione dei concentratori di carico.

4.1.2 Fase pre-calibrazione

Prima di montare i sensori al dispositivo di presa, è stato necessario effettuare una procedura di calibrazione dei sensori, in modo da poter correlare il valore della V_{OUT} alla forza applicata al sensore.

In una prima fase è stato necessario rendere il circuito più vicino possibile al definitivo, per questo motivo si è prevista la realizzazione di un circuito saldato in una millefori, i cui componenti, tra cui i sensori, sono stati montati stabilmente.

La seconda fase prevede il condizionamento del sensore: tale procedura prevede di caricare per cinque volte, con durata minima di 10 secondi ciascuna, con un carico F pari al 120% del valore massimo del campo di applicazione del sensore. [46]

L'ultima fase è la regolazione della sensibilità all'uscita massima, per evitare il sovraccarico per picchi di forza/pressione. Questo processo garantisce che il circuito non saturi prima della forza prevista.

A causa delle dimensioni assai ridotte del sensore, è stato necessario realizzare un dispositivo che possa permettere la procedura di calibrazione ripetibile e stabile. Si è progettata una leva tale da poter risolvere tale problematica e rendere fattibile la calibrazione.

4.1.3 Leva di Calibrazione

Le specifiche dimensionali ridotte del sensore visibili in Figura 2.14 hanno portato alla realizzazione di una leva del terzo genere per effettuare la procedura di calibrazione, in Figura 4.2 è riportato la schematizzazione del sistema:

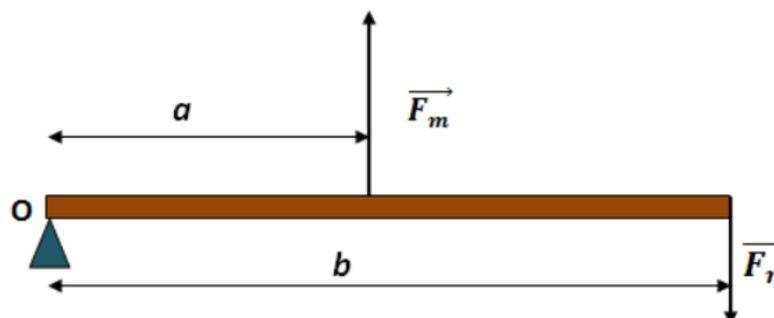


Figura 4.2 Schema leva per la calibrazione

Prove preliminari

È possibile ricavare la forza agente sul sensore, modificando la F_r e moltiplicandola con un guadagno ottenuto dall'equazione di momento attorno la cerniera O.

Il dispositivo comprende nel complesso una leva con un'apposita sede in PVC per il sensore flexiforce A101. Il contatto con il sensore è garantito da un bullone con una vite M4, mentre la barra di alluminio è stata imbullonata ad un occhiello avente il compito di reggere un magnete capace di sostenere i pesi utilizzabili alla procedura di calibrazione (fino ad 80N).

La presenza di un magnete, il quale permette di inserire gradualmente i pesi, e la sede in PVC, rende tale sistema fortemente riutilizzabile con differenti sensori FSR, variabili dimensionalmente e nelle prestazioni.

In Figura 4.3 si riporta il dispositivo per la calibrazione:



Figura 4.3 Dispositivo per la calibrazione

4.1.4 Realizzazione circuito su millefori

Parallelamente alla realizzazione della parte meccanica per la calibrazione, è stata necessaria la realizzazione di una millefori le cui connessioni con i componenti sono state saldate.

La complessità del circuito complessivo, il quale è stato realizzato su LTspice, ha reso necessario l'utilizzo di collegamenti con fili ricoperti di guaina, con lo scopo di evitare eventuali CTO tra i componenti.

Lo scopo di tale circuito è di rendere robusto e compatto il sistema complessivo. Nello specifico nessun componente è stato saldato, rendendo possibili eventuali modifiche dei componenti. Per semplificare la realizzazione, si è considerato il sistema come una black box, i cui parametri INPUT/OUTPUT sono riportati in Figura 4.4 :

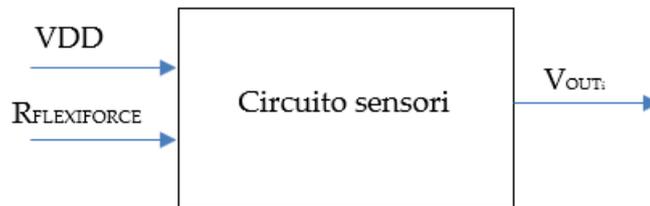


Figura 4.4 Schema complessivo del circuito

Per una maggiore interscambiabilità dei componenti, si sono utilizzati dei blocchi modulari a cui collegare i connettori jumper.

Dallo schema degli amplificatori riportato in Figura 2.21, si riportano gli ingressi e le uscite per gli OP-AMP, ognuno dei quali è stato contrassegnato da una lettera identificativa. Si ricorda come la V_{ref} , comune a tutti i sensori, è collegata al PIN non invertente, mentre il PIN invertente con $V_{flexiforce}$ analizzata in Figura 3.10.

Prove preliminari

Nella Tabella 5 si riportano la corrispondenza circuito-sensore e le parti del circuito.

Lettera I/O OP-AMP	Posizionamento sensore	Sigla	Pin ARDUINO
F	Falange A-Distale	AD	A0
H	Falange A-Proximale	AP	A5
A	Falange B-Distale	BD	A2
C	Falange B-Proximale	BP	A4
D	Falange C-Distale	CD	A1
E	Falange C-Proximale	CP	A3

Tabella 5 Nomenclatura Sensori-circuito

Si riporta in Appendice A lo schema circuitale e la Tabella 9 riassuntiva delle parti del sistema.

Al fine di rendere il sistema compatto e robusto, è stato realizzato un supporto su cui fissare i circuiti delle millefori, i quali sono stati opportunamente separati dal telaio con opportuni distanziali. La scheda, la quale dovrà fornire l'alimentazione al circuito del driver e dei sensori, è stata posizionata nella parte centrale del blocco di supporto.

Prove preliminari

In Figura 4.5 si riporta il circuito realizzato:

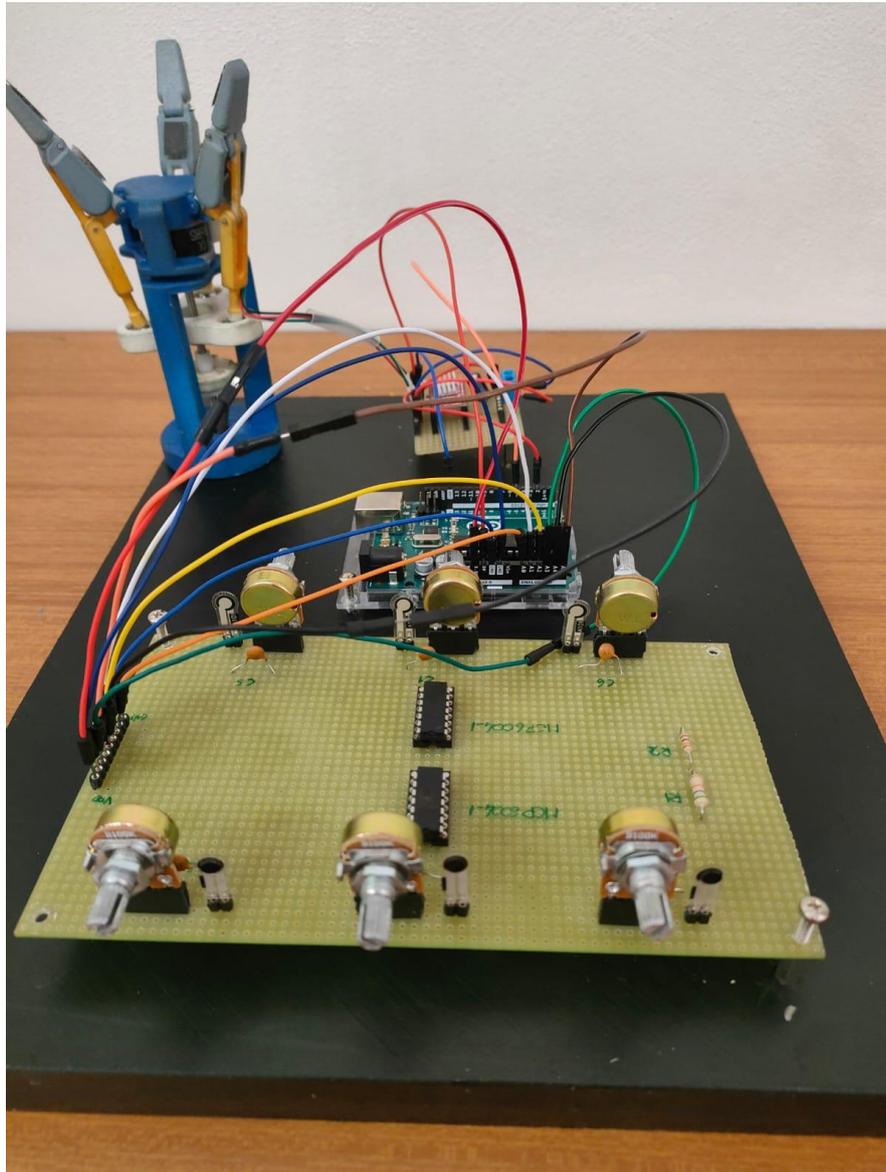


Figura 4.5 Circuiti driver-sensori

Prove preliminari

4.1.5 Procedura di calibrazione

Successivamente è stato possibile procedere con la calibrazione, posizionando il sensore nella sede prevista. Inoltre si sono realizzati dieci provini di 150 g ciascuno, potendo tracciare in modo più accurato il grafico $V_{out}(F_m)$.

Per effettuare la procedura di calibrazione si sono scelti i seguenti valori di $R_{feedback}$, in riferimento alla nomenclatura usata nella Tabella 5:

- $R_{AD} = 6.56 \text{ k}\Omega$;
- $R_{CD} = 13 \text{ k}\Omega$;
- $R_{BD} = 6 \text{ k}\Omega$;
- $R_{CP} = 10.7 \text{ k}\Omega$;
- $R_{BP} = 8.42 \text{ k}\Omega$;
- $R_{AP} = 6.4 \text{ k}\Omega$;

I valori delle resistenze di feedback (potenziometro) si sono ottenute imponendo che il valore V_{out} di ogni sensore sia nell'intorno del 10% del valore medio nel caso di carico massimo applicato (20 N).



Figura 4.6 Calibrazione sensore

4.1.6 Acquisizione dati

I valori di V_{out} ottenuti sono stati acquisiti, tramite PC, con Data streamer di Excel, pertanto è stato necessario scrivere uno sketch Arduino che permettesse la lettura dei valori in uscita dal circuito. La fase successiva prevede di modificare l'uscita COM Arduino, con l'uscita COM Excel, permettendo la comunicazione da seriale proveniente dal sensore.

Inizialmente è stato necessario impostare i dati nella cartella di lavoro, nello specifico si dovranno specificare le righe di dati in cui fare la rilevazione, l'intervallo temporale compreso tra essi ed il numero dei canali di dati (6 sensori).

In Figura 4.7 si riporta l'interfaccia del data streamer Excel:

Ingresso dati (da Arduino Uno (COM1))

Dati correnti						
TIME	AD	CD	BD	BP	CP	AP
9:59:10.65	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Dati storici						
TIME	AD	CD	BD	BP	CP	AP
9:57:31.49	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9:57:32.49	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9:57:33.50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9:57:34.50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9:57:35.50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9:57:36.50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9:57:37.50	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

Intervallo di dati (ms)	150
Righe di dati	70
Canali di dati	10
Orientamento dei dati	Dal meno recente

Figura 4.7 Ingresso dati Data streamer EXCEL

Si riportano per ogni singolo sensore, sei differenti prove effettuate, mantenendo invariate le condizioni operative della prova.

Nello specifico si sono calcolati per ogni punto della caratteristica:

- Media;
- Varianza (Var), che esprime di quanto i dati di un insieme si discostano rispetto la loro media;

$$\text{Var} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Dove: n = numero delle osservazioni effettuate; x_i = valore nell'insieme dati; \bar{x} = la media aritmetica;

- Deviazione standard (σ);

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

Prove preliminari

Dove: σ = deviazione standard; x_i = valore nell'insieme dati; \bar{x} = media dei dati;

n = numero di osservazioni

- Coefficiente di variabilità (CV).

Tale coefficiente esprime una misura statistica per confrontare la variabilità tra i vari dati e il valore medio.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100\%$$

In cui: CV = coefficiente di variabilità; σ = la deviazione standard; \bar{x} = la media dati;

- Linea di tendenza per una rappresentazione grafica della tendenza dei dati;
- R^2 indica in Excel una misura statistica per valutare l'adattamento della linea di tendenza di dati:

Esso è calcolato come:

$$R^2 = 1 - \frac{V_T}{V_O}$$

Dove: V_T = varianza riferita ai valori previsti dalla linea di tendenza; V_O = varianza riferita alla media dei valori osservati;

Un valore di $R^2 \approx 1$ indica un buona approssimazione della linea di tendenza;

Prove preliminari

In Appendice A si riportano i valori di media, varianza, deviazione standard e coefficiente di variabilità per ogni sensore. Eccetto per il sensore BD (in cui CV=10%), i coefficienti CV risultano inferiori al 5 %, dunque ritenuti accettabili.

Infine, in Figura 4.8 si riportano le caratteristiche dei sensori:

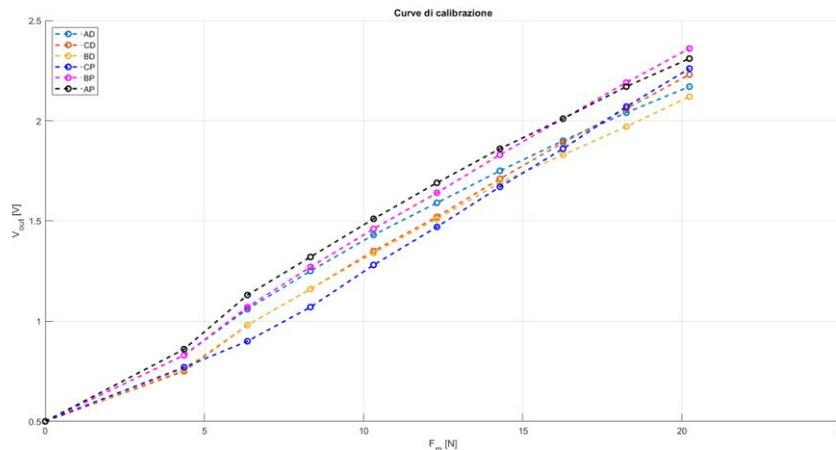


Figura 4.8 Curve calibrazione sensori

Dalla Figura 4.8 si evince come le caratteristiche seguono qualitativamente lo stesso andamento, inoltre lo scarto massimo tra le due curve è nell'intorno del 6%.

Questo può essere attribuibile alla difficoltà di ripetibilità della prova, in particolar modo alla posizione del puntalino della leva sulla parte sensibile del sensore.

4.1.7 Valutazione isteresi e resistenza Flexiforce

Al fine di valutare l'isteresi dei componenti, sono state ricavate sperimentalmente, mantenendo la medesima procedura, le caratteristiche di salita/discesa di ogni singolo sensore. Successivamente si è valutata l'isteresi effettuando:

- Calcolo dell'area sottesa della curva di salita;
- Calcolo dell'area sottesa della curva di discesa;
- Errore relativo tra le due curve ricavate;

Per il calcolo delle aree si è utilizzato il metodo dei trapezi, ottenendo:

$$\int_a^b f(x)dx \cong \sum_{i=1}^n A_i$$

Dove:

Prove preliminari

$$A_i = \frac{h}{2} (f(x_{i-1}) + f(x_i))$$

In cui: $[a,b]$ = estremo di integrazione pari alla forza F_m massima e minima $[0,20N]$; h = passo di discretizzazione pari a 0.15 N; $f(x)$ = funzione ricavata dalla linea di tendenza relativa ad ogni sensore;

Infine si calcola il valore di isteresi come:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n A_i^{\text{salita}} - \sum_{i=1}^n A_i^{\text{discesa}}}{\sum_{i=1}^n A_i^{\text{salita}}}$$

Si riportano in Appendice A le rispettive caratteristiche salita/discesa per ogni sensore:

Nella Tabella 6 si riportano i risultati numerici:

Sensore	H
AD	1.19 %
CD	0.05 %
BD	0.67 %
CP	0.09 %
BP	1.32 %
AP	0.09 %

Tabella 6 Calcolo integrali e isteresi curve

Come si evince dalla Tabella 6, il valore di isteresi risulta essere ampiamente inferiore rispetto il limite di 4.5% riportato nel datasheet del Flexiforce A101 [44]. Pertanto tali risultati risultano essere in linea rispetto i dati garantiti dal costruttore.

In seguito sono state effettuate delle prove per la valutazione della resistenza del sensore al variare della forza applicata sulla leva, senza alcun circuito elettronico collegato.

La procedura di carico/scarico è stata la medesima a quella usata per la caratterizzazione dei sensori, si è collegato un tester in serie con il Flexiforce, effettuando manualmente la lettura della resistenza.

Si riporta nella Figura 4.9 il grafico che riporta l'andamento della $R(F_m)$ per ogni singolo sensore:

Prove preliminari

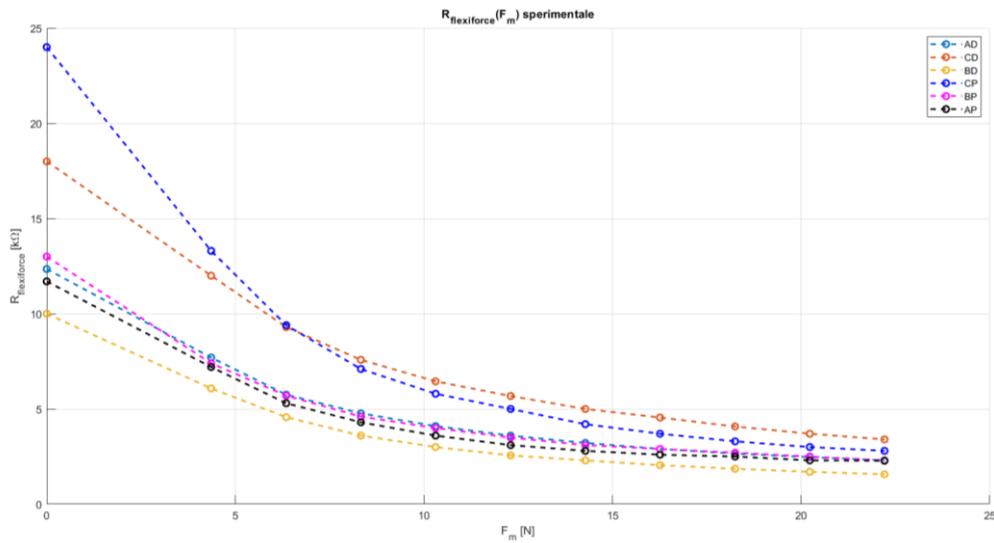


Figura 4.9 R_{flexiforce}(F_m) sperimentale

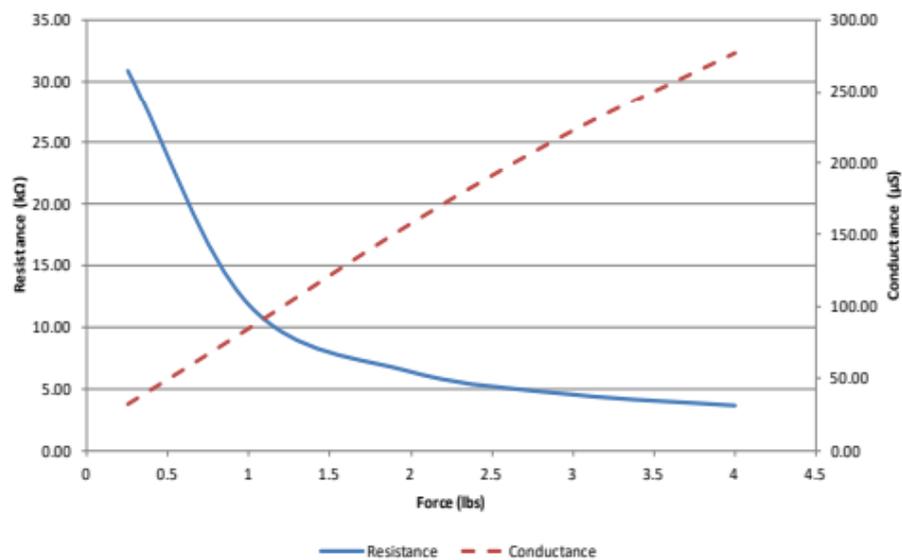


Figura 4.10 R_{flexiforce}(F_m) da datasheet [44]

Come si evince dal confronto dei dati sperimentali in Figura 4.9 e quelli riportati dal datasheet Tekscan presenti in Figura 4.10, gli andamenti della resistenza Flexiforce sono analoghi, dunque si hanno delle resistenze molto alte (circuito aperto) quando il carico è molto basso, viceversa, nel range di lavoro del sensore, il valore della resistenza risulta essere in linea rispetto i dati ottenuti dal datasheet del sensore A101.

Prove preliminari

La Figura 4.9 permette di valutare le differenze di resistenza registrata dal flexiforce indipendentemente dalla tipologia di circuito utilizzato (riportato nel paragrafo 2.4.4), tale risultato è dovuto a:

- Gioco presente tra il foro e il puntalino della leva;
- Posizionamento non simmetrico del sensore;

4.1.8 Elaborazione dati

Successivamente è stato necessario elaborare i dati ottenuti dal paragrafo 4.1.6, nello specifico si è diagrammato la F_m , la quale sarà la grandezza da ricavare in fase operativa, in funzione della V_{out} , considerata come INPUT.

Data la curva di regressione lineare determinata per ogni sensore nel paragrafo 4.1.6, si è calcolata la funzione inversa e, mantenendo costanti i valori delle V_{out} , si è calcolata la caratteristica $F_m(V_{out})$. Da tale funzione inversa ottenuta, è stato possibile ricavare il Gain e l'Offset per ogni specifica curva.

In Figura 4.11 è possibile descrivere la $F_m(V_{out})$.

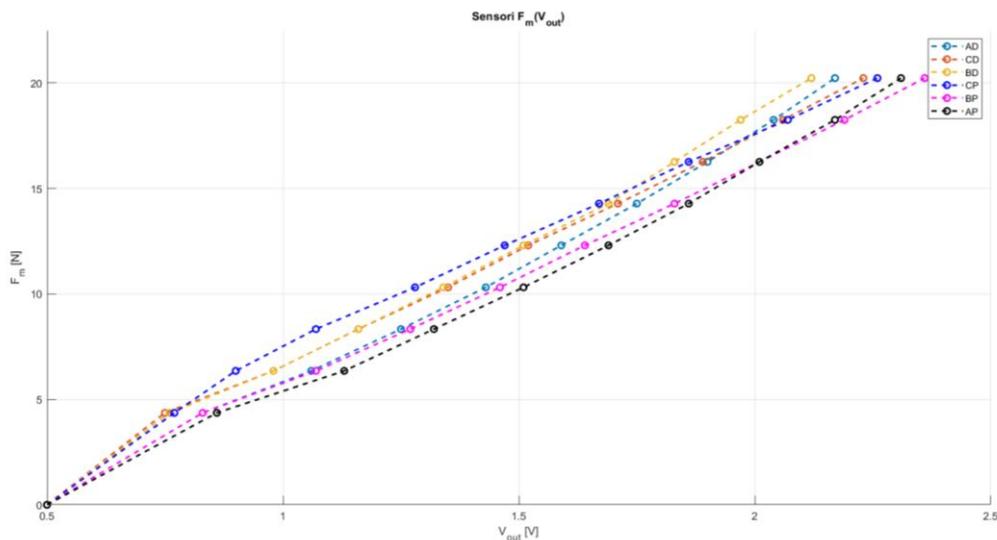


Figura 4.11 $F_m(V_{out})$

Considerate le curve di calibrazione delle rette di calibrazione, si riportano in Tabella 7 i rispettivi valori di Gain:

Prove preliminari

Retta di calibrazione	Gain [N/V]
AD	0.0856
CD	0.0842
BD	0.8088
CP	0.0824
BP	0.0922
AP	0.0933

Tabella 7 Valori di Gain delle rette di calibrazione

Si riporta in Tabella 8 la media, varianza, deviazione standard e coefficiente di variabilità CV del Gain tra i sei sensori analizzati:

Media [N/V]	Varianza [N²/V²]	Deviazione standard [N/V]	Coefficiente di Variabilità [%]
0.086417	2.68 10 ⁻⁵	0.005179	5.98

Tabella 8 Calcolo Media, Varianza, Deviazione standard e Coefficiente di variabilità

5 Determinazione delle caratteristiche di presa

Definite le caratteristiche per ogni singolo sensore, si analizza la movimentazione della mano di presa, il montaggio dei sensori nella mano di presa e la caratterizzazione del dispositivo nelle differenti condizioni di funzionamento.

5.1 Movimentazione mano di presa

La fase preliminare al montaggio dei sensori è quella riferita alla movimentazione del dispositivo di presa. È stato necessario comandare da Arduino il motore lineare in modo da garantire un dato valore di forza e velocità di movimentazione. In Figura 5.1 si riporta la curva di prestazione lineare del motore (curva AA):

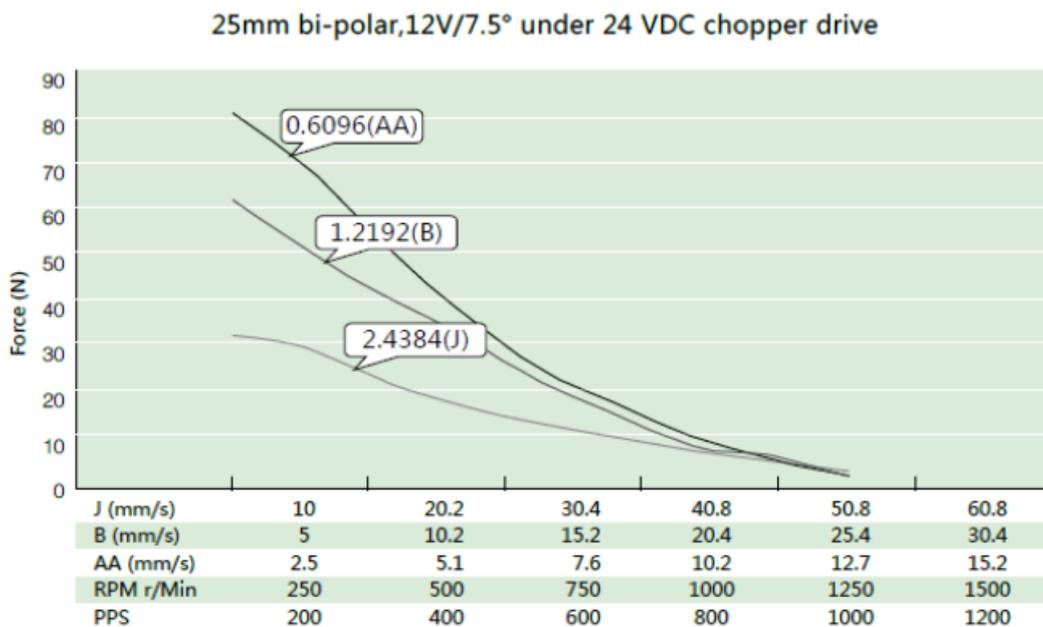


Figura 5.1 Curva di prestazione lineare del motore

Si è scelto, compatibilmente alle indicazioni del costruttore, di imporre il valore di $F=40\text{N}$, a cui corrisponde un valore di velocità garantito pari a $V_{AA}=3.74\text{ mm/s}$.

Ricavata la distanza percorsa per singolo step dalla Figura 5.2, si ottiene il valore del delay (r) espresso nel codice Arduino di controllo del motore:

$$r = \frac{S}{V_{AA}} = 3.4\text{ ms}$$

Determinazione delle caratteristiche di presa

Motor size (mm)	Screw diameter (mm)	Screw lead (mm)	Travel per step (mm)		Max. Thrust force (N)	Power consumption (W)	Screw lead code
			7.5°	15°			
Φ20	Φ3.5	0.6096	0.0127	0.0254	35	3.4	AA
		1.2192	0.0254	0.0508			B
		2.4384	0.0508	0.1016			J
Φ25	Φ3.5	0.6096	0.0127	0.0254	65	3.9	AA
		1.2192	0.0254	0.0508			B
		2.4384	0.0508	0.1016			J
Φ36	Φ6.35	0.6096	0.0127	0.0254	115	5.6	AA
		1.2192	0.0254	0.0508			B
		2.4384	0.0508	0.1016			J

Figura 5.2 Caratteristiche PM external

5.2 Montaggio su mano di presa

Le prestazioni della mano robotica vengono ora valutate con delle prove di presa volte a validare le funzionalità del prototipo. I sensori di forza sono stati montati in modo da garantire il più possibile la condizione di funzionamento elencate nel paragrafo 4.1.1.

In Figura 5.3 si riporta il posizionamento dei sensori nel caso di una presa di precisione:

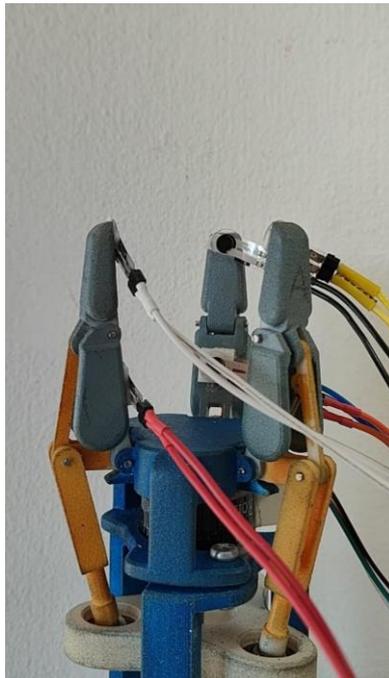


Figura 5.3 Posizionamento sensori presa di precisione

Nel caso di presa di precisione, i sensori delle falangi distali sono stati posizionati seguendo la schematizzazione descritta in Figura 1.17. In questo caso di studio è irrilevante

la posizione dei sensori delle falangi prossimali, poiché non coinvolte nella presa degli oggetti.

In Figura 5.4 si riporta il posizionamento dei sensori nel caso di una presa adattativa:

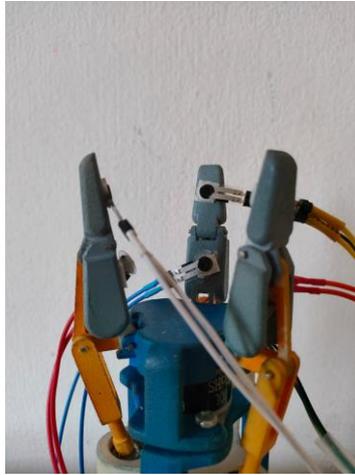


Figura 5.4 Posizionamento sensori presa adattativa

Nel caso di presa adattativa, si è seguito lo schema presente in Figura 1.19, dunque i sensori sono stati fissati rispettivamente a metà della lunghezza delle rispettive falangi.

5.3 Analisi delle forze di contatto

Per effettuare l'analisi delle forze di contatto è stata necessaria la stesura di uno sketch Arduino per la gestione dei sensori e il controllo del motore (riportato in Appendice B).

L'elaborazione dei dati rilevati dal seriale Arduino è stata effettuata su excel, riportando i valori di V_{out} registrati durante la prova di presa. È stata impostata una frequenza di acquisizione pari a 20 Hz, effettuando 300 acquisizioni per ogni prova effettuata.

Si riporta l'analisi delle forze di contatto per le prese adattative e di precisione nelle condizioni di funzionamento verticale ed orizzontale.

5.3.1 Prova di precisione

Come si evince dallo schema presente in Figura 1.17, nel caso di una presa di precisione, solo le falangi superiori sono coinvolte nella presa dell'oggetto, pertanto non sono riportati i valori registrati delle falangi prossimali.

L'oggetto afferrato è una sfera di plastica, di diametro pari a 55 mm e massa di 10 g. Sono state effettuate cinque prove di presa, mantenendo la medesima procedura di acquisizione:

- Posizionamento manuale della sfera in modo da garantire il contatto nella zona sensibile dei sensori;
- Avviamento programma Arduino per la movimentazione mano di presa.
- Rilascio della sfera nell'istante in cui avviene il contatto con le falangi distali.
- Mantenimento della posizione di presa fino al completamento della prova.

Tale procedura non garantisce una buona ripetibilità, pertanto tali prove sono da considerarsi preliminari per una prima validazione del prototipo.

Presa di precisione verticale (verso l'alto) sfera

In Figura 5.5 si riporta il caso di una presa di precisione verticale (verso l'alto) di una sfera in plastica:

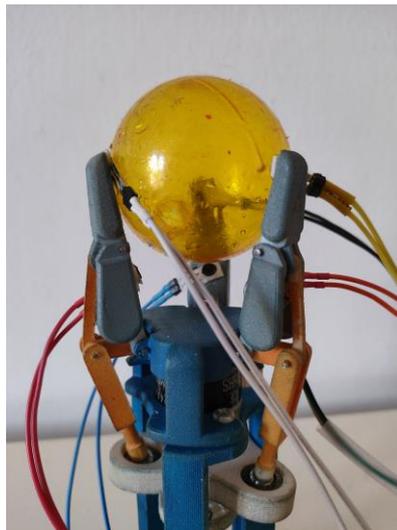


Figura 5.5 Presa di precisione verticale (verso l'alto) sfera

Determinazione delle caratteristiche di presa

In Figura 5.6 si riportano gli andamenti delle forze di contatto:

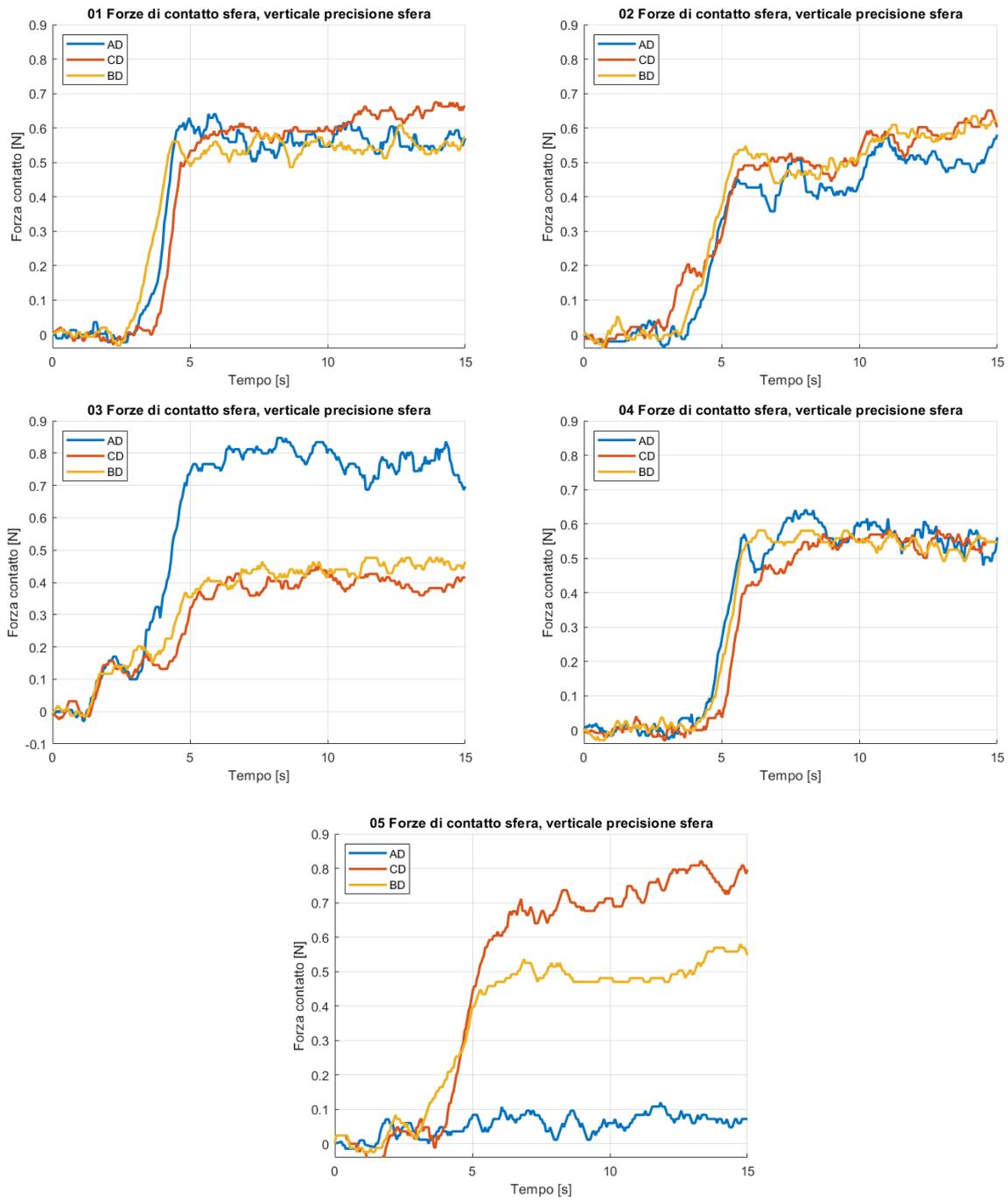


Figura 5.6 Prove forza di contatto presa verticale (verso l'alto) precisione sfera

Determinazione delle caratteristiche di presa

Come si evince dalla Figura 5.6, le prove 01-02-04 presentano un medesimo andamento delle forze di contatto, inoltre le falangi AD-BD-CD presentano lo stesso valore di forza a regime, poiché le dita sono disposte simmetricamente a 120° tra loro.

Le prove 03-05, hanno degli andamenti non simmetrici a causa della bassa ripetibilità della prova, in quanto la parte sensibile del sensore non è perpendicolare al punto di contatto con la sfera: a prova di ciò, si registra nella prova 05 un'assenza di contatto tra AD e la sfera.

Prova di precisione verticale (verso il basso) sfera

In Figura 5.7 si riporta la presa di precisione verso il basso della sfera in plastica:

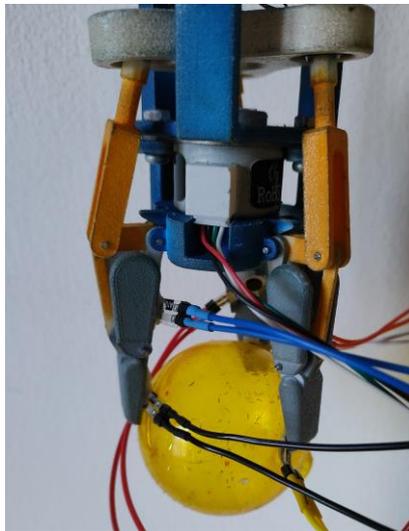


Figura 5.7 Presa di precisione verticale (verso il basso) sfera

In Figura 5.8 l'andamento delle forze di contatto:

Determinazione delle caratteristiche di presa

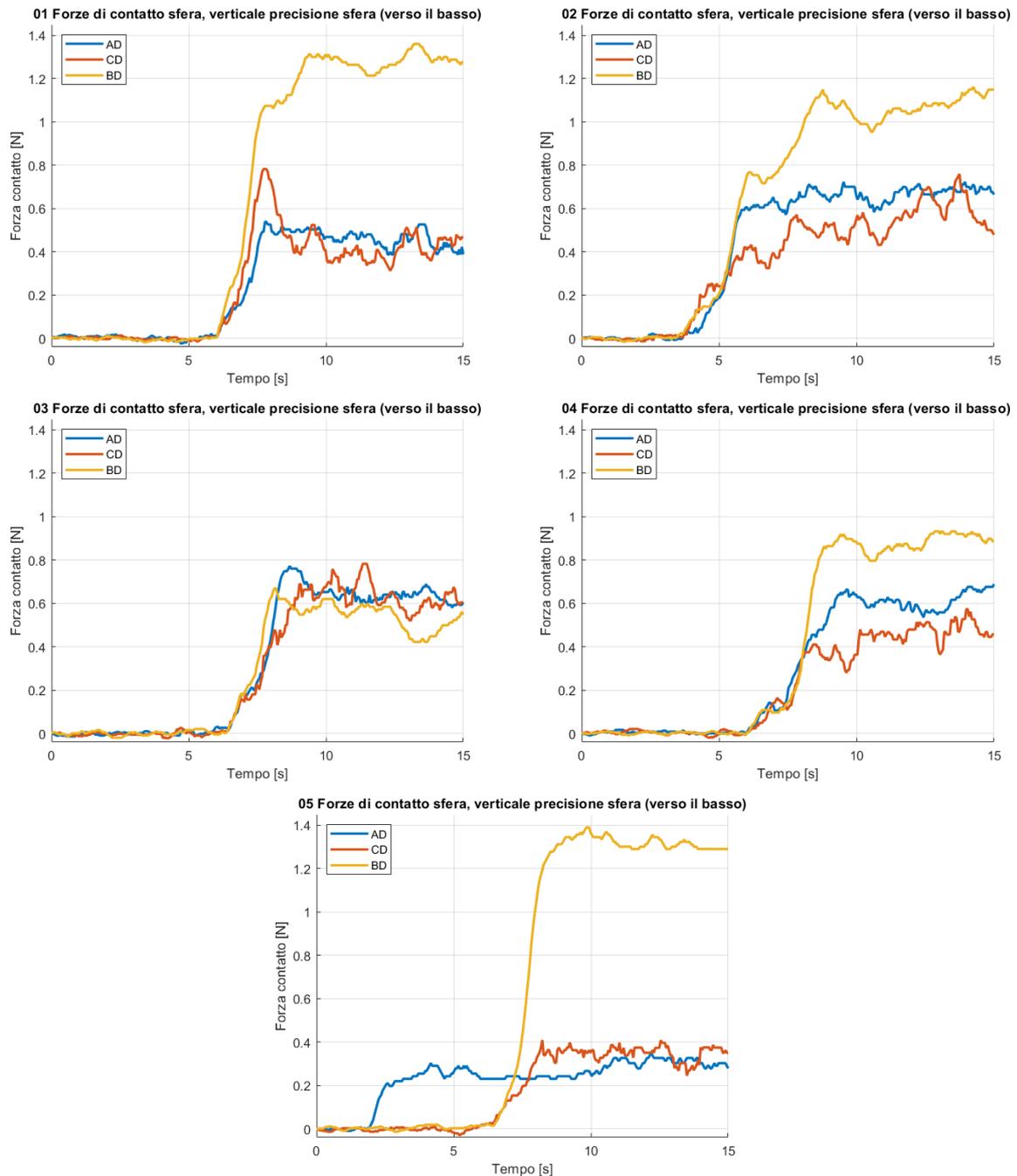


Figura 5.8 Forze di contatto prova di precisione verticale (verso il basso) sfera

L'andamento delle prove presenti in Figura 5.8, eccetto per la prova 05, risulta essere coerente tra le prove. Infatti, tutte le falangi distali sono coinvolte nella presa dell'oggetto, mantenendo a regime circa il medesimo valore di forza.

Nella prova 05, invece, si registra il valore massimo di forza soltanto nella falange BD, unica coinvolta nella presa. Inoltre, la falange AD entra in contatto a $t=2.3$ s, anticipando il contatto

Determinazione delle caratteristiche di presa

con le falangi BD e CD. Tale fenomeno è causato dal posizionamento non simmetrico della sfera durante la fase di prova.

Preso di precisione orizzontale sfera

In Figura 5.9 si riporta la presa di precisione orizzontale della sfera in plastica:

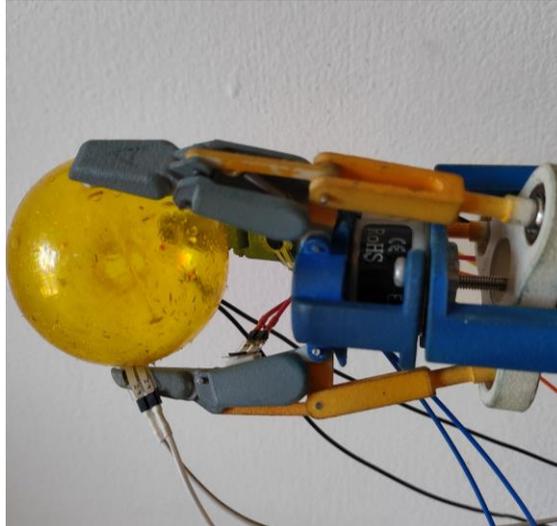


Figura 5.9 Presa di precisione orizzontale sfera

Determinazione delle caratteristiche di presa

In Figura 5.10 si riportano gli andamenti delle forze di contatto:

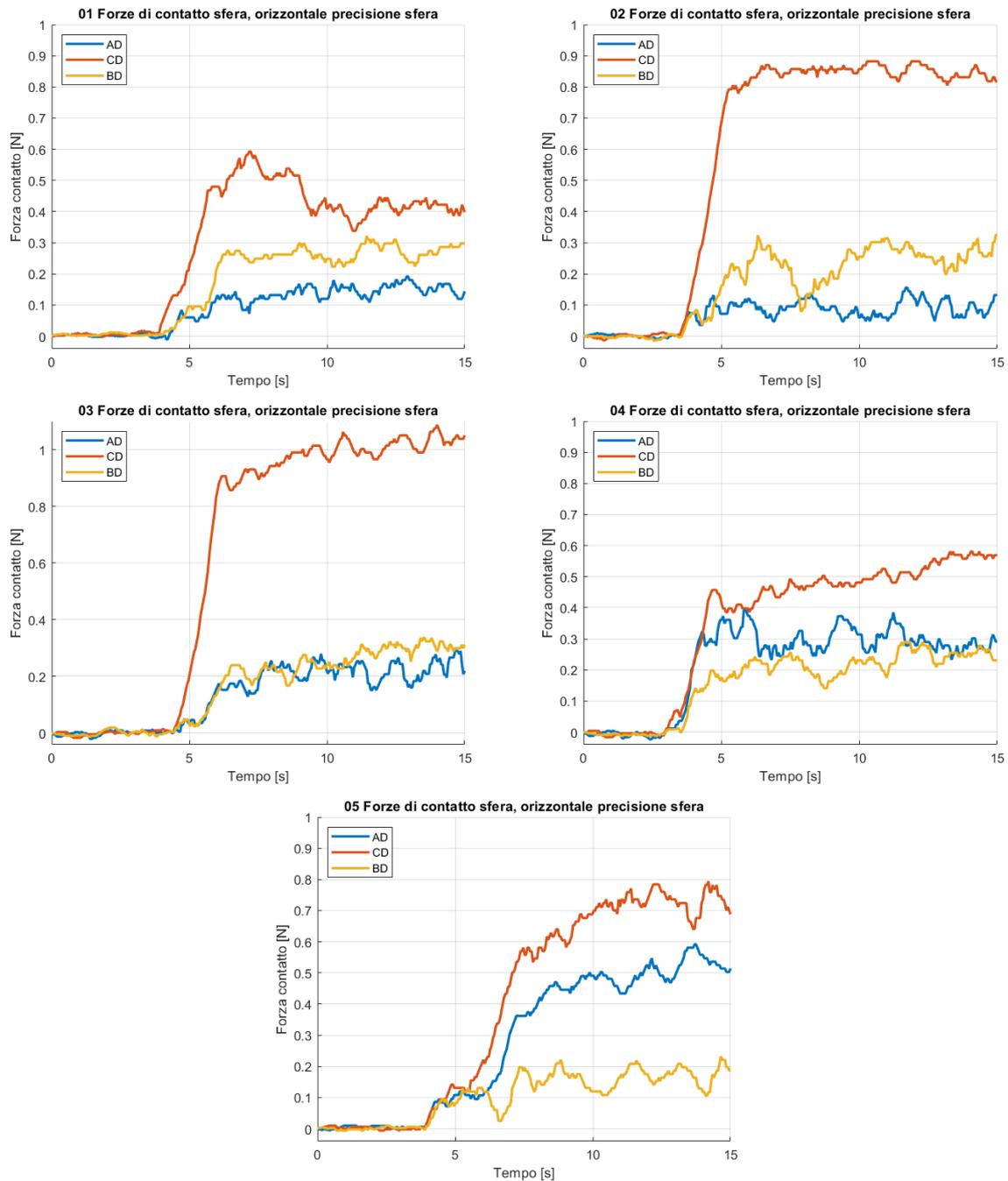


Figura 5.10 Forze di contatto prova di precisione orizzontale sfera

L'andamento delle forze di contatto presenta in Figura 5.10 un andamento equivalente in tutte le prove effettuate, infatti la falange CD risulta essere quella maggiormente sollecitata in quanto è soggetta, oltre al contatto sfera-falange, anche alla forza peso che l'oggetto esercita interamente su di essa.

Determinazione delle caratteristiche di presa

Anche in questo caso, la non perfetta ripetibilità della prova influisce sull'andamento delle curve AD e BD, le quali presentano (eccetto per la prova 05), un valore a regime equivalente.

5.3.2 Prova presa adattativa

In questa parte, si analizzano delle prove di presa adattativa, in cui bisogna valutare i valori di forza registrati in tutti i sensori montati.

Anche queste tipologie di prove sono state effettuate seguendo una fissata metodologia:

- Posizionamento sul palmo della mano dell'oggetto da afferrare.
- Avviamento programma Arduino per la movimentazione.
- Mantenimento della posizione di presa fino al completamento della prova.

Anche in questo caso, l'assenza di un apposito banco di prova comporta a una bassa ripetibilità della prova, infatti anche tali prove sono da considerarsi preliminari.

Presa adattativa verticale sfera

In Figura 5.11 si riporta il caso di una presa adattativa di una sfera in plastica:



Figura 5.11 Presa adattativa verticale sfera

Determinazione delle caratteristiche di presa

Mentre in Figura 5.12 si riportano gli andamenti delle forze di contatto:

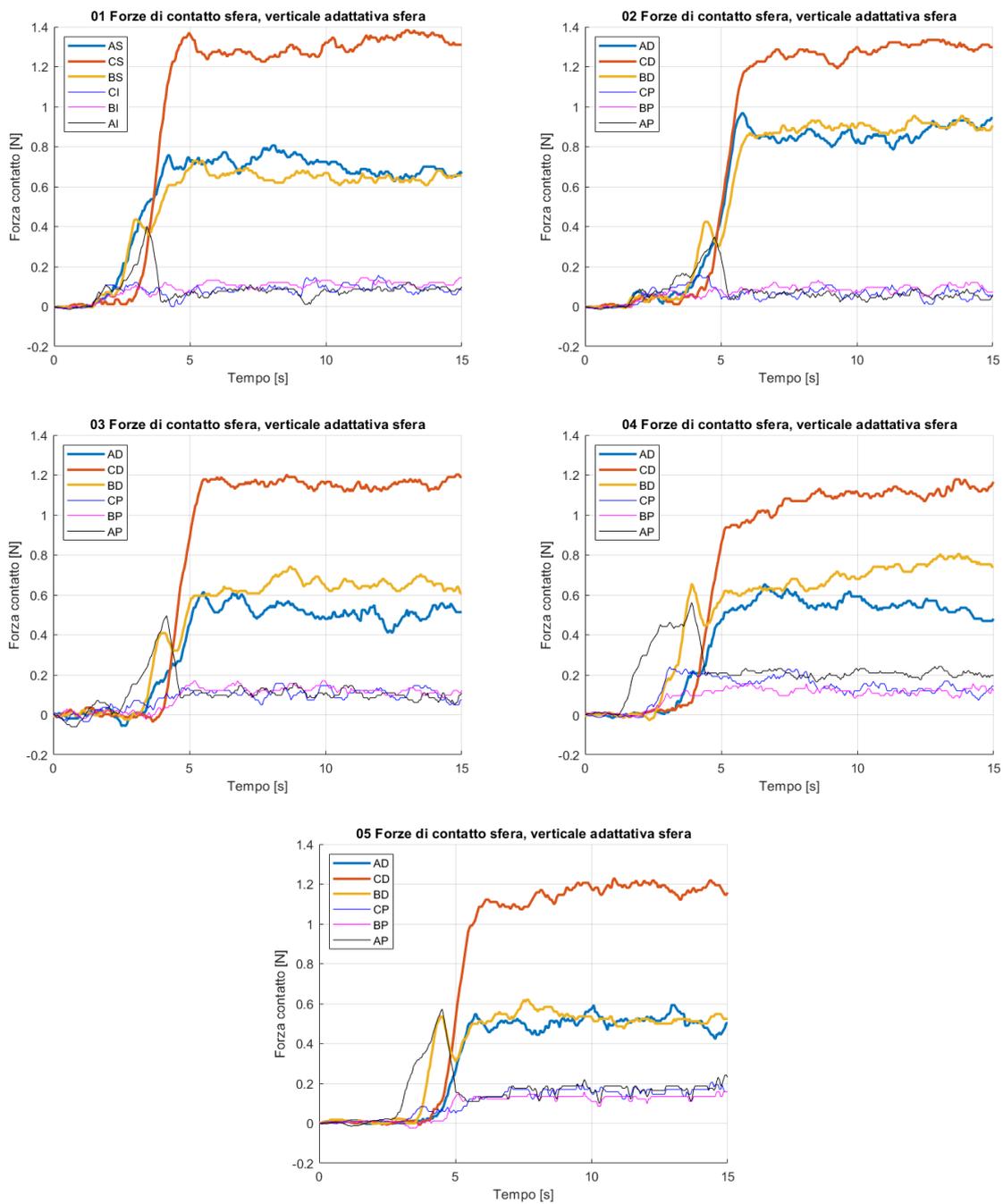


Figura 5.12 Forze di contatto presa adattativa verticale (verso l'alto) sfera

Le forze di contatto descritte in Figura 5.12 presentano un medesimo andamento, nello specifico nella falange distale DC si registrano i massimi valori delle forze di contatto. Inoltre la falange AP sarà la prima ad entrare in contatto, permettendo un'iniziale presa dell'oggetto. Successivamente, per $t=5s$, anche le falangi distali entrano in contatto con l'oggetto, registrando l'andamento crescente delle forze di contatto fino al relativo valore a

Determinazione delle caratteristiche di presa

regime. Viceversa, causa lo spostamento dell'oggetto dovuto a tale contatto, le forze registrate nelle falangi prossimali diminuiscono.

Presa adattativa orizzontale sfera

In Figura 5.13 si riporta il caso di una presa adattativa orizzontale della sfera e le relative forze di contatto Figura 5.14:

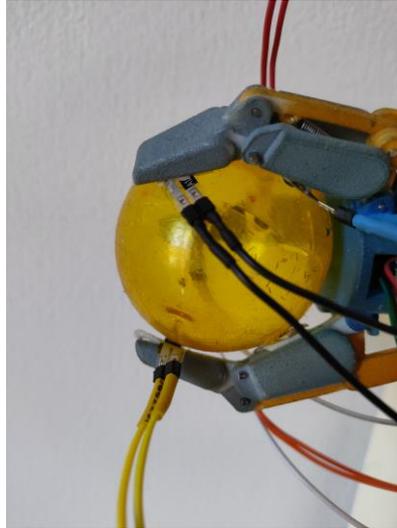


Figura 5.13 Presa adattativa orizzontale sfera

Determinazione delle caratteristiche di presa

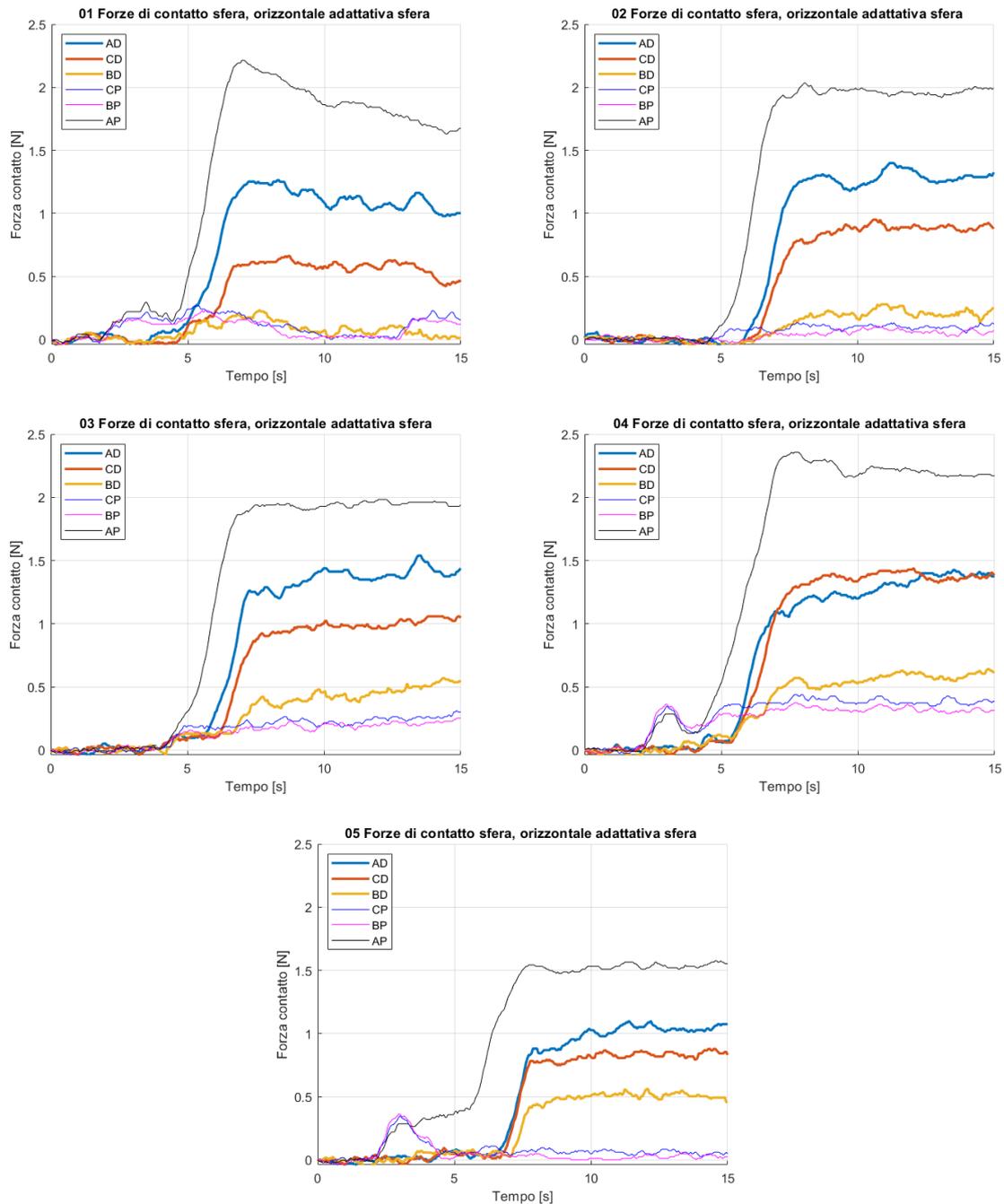


Figura 5.14 Forze di contatto presa adattativa orizzontale sfera

Nella Figura 5.14 si riportano l'andamento delle forze di contatto nel caso della presa adattativa della sfera in posizione orizzontale. Come si evince dalla Figura 5.13, la falange distale e prossimale poste nel dito A sorreggono il peso dell'oggetto da afferrare: per tale motivo si riportano per tali sensori, il valore massimo delle forze di contatto registrate. L'andamento delle forze riportate in Figura 5.14 presentano un andamento equivalente, infatti si riscontra per $t=3s$ il contatto tra le falangi prossimali AP, BP e CP e l'oggetto da

Determinazione delle caratteristiche di presa

afferrare. Successivamente, intorno a $t=7s$, entrano in contatto anche le falangi distali fino al raggiungimento della presa stabile dell'oggetto, mentre lo spostamento dell'oggetto causa la diminuzione delle forze di contatto in AP, BP e CP.

Preso adattiva verticale (verso il basso) sfera

In Figura 5.15 e Figura 5.16 si riporta il caso di una presa adattiva verticale (verso il basso) di una sfera:

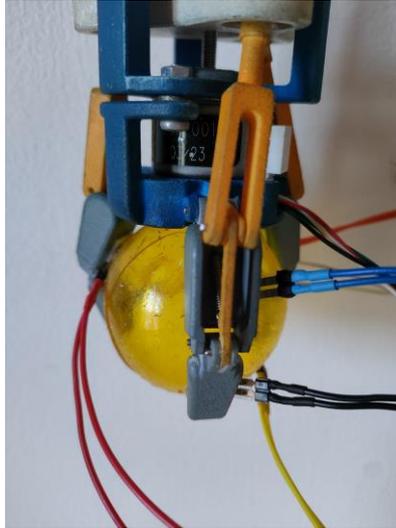


Figura 5.15 Presa adattiva verticale (verso il basso) sfera

Determinazione delle caratteristiche di presa

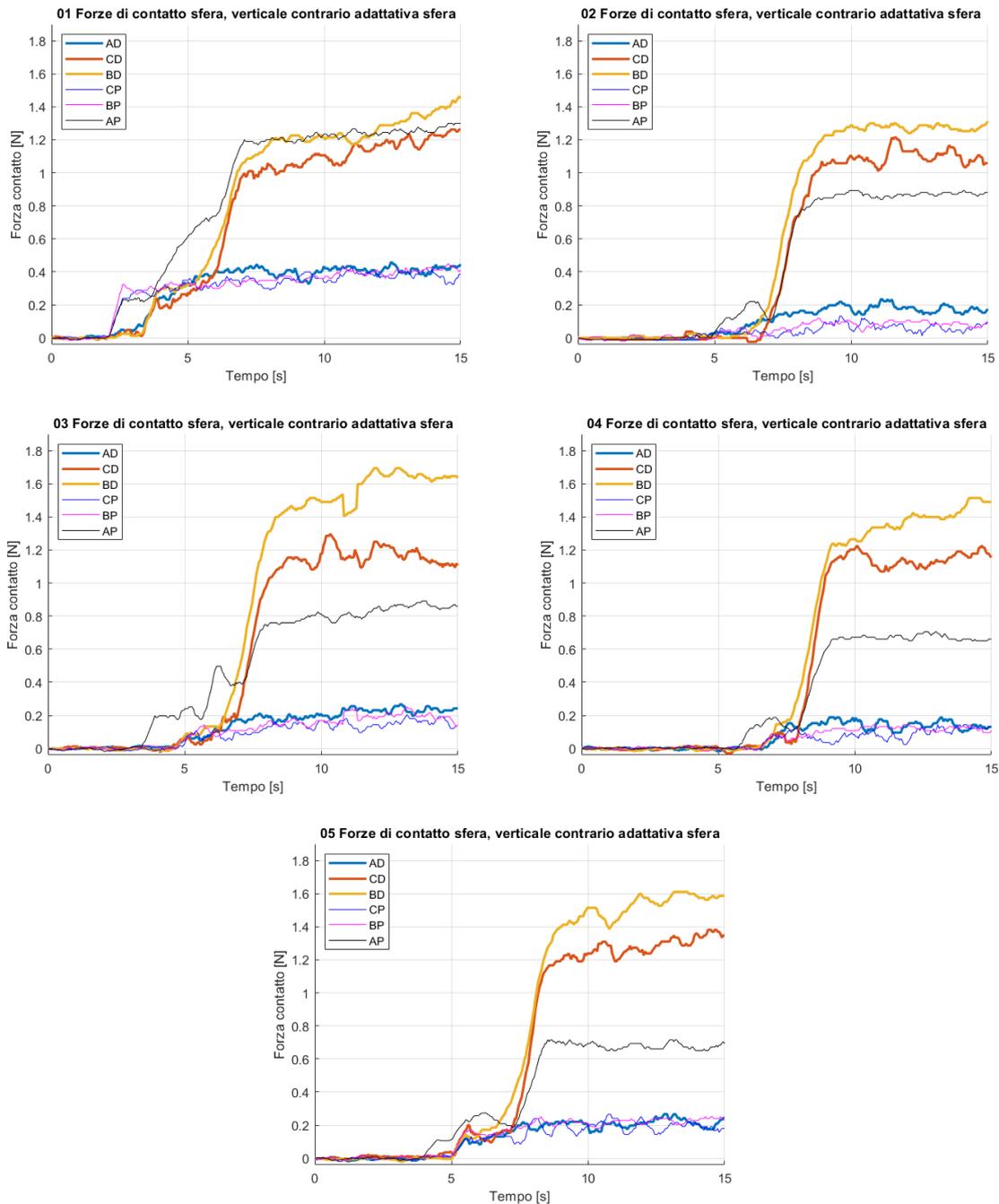


Figura 5.16 Forze di contatto sfera presa verticale (verso il basso) adattativa

Le prove presenti in Figura 5.16 riportano come le falangi AD, BP e CP non sono coinvolti nella presa, inoltre la falange AP, così come nei casi precedenti, registra un primo contatto con l'oggetto per $t=5s$. Successivamente, per $t=7s$, anche le falangi BD e CD sono in contatto con la sfera, infatti il valore delle forze di contatto risulta essere crescente, fino ad un valore massimo registrato a regime.

Determinazione delle caratteristiche di presa

Prova adattativa verticale (verso l'alto) solido

In Figura 5.17 si riporta il caso di una presa adattativa di un solido in plastica avente una massa di 70 g e le relative forze di contatto Figura 5.18. Per la presa di tale oggetto sono state effettuate quattro prove per ogni condizione di presa:



Figura 5.17 Presa adattativa verticale (verso l'alto) solido in plastica

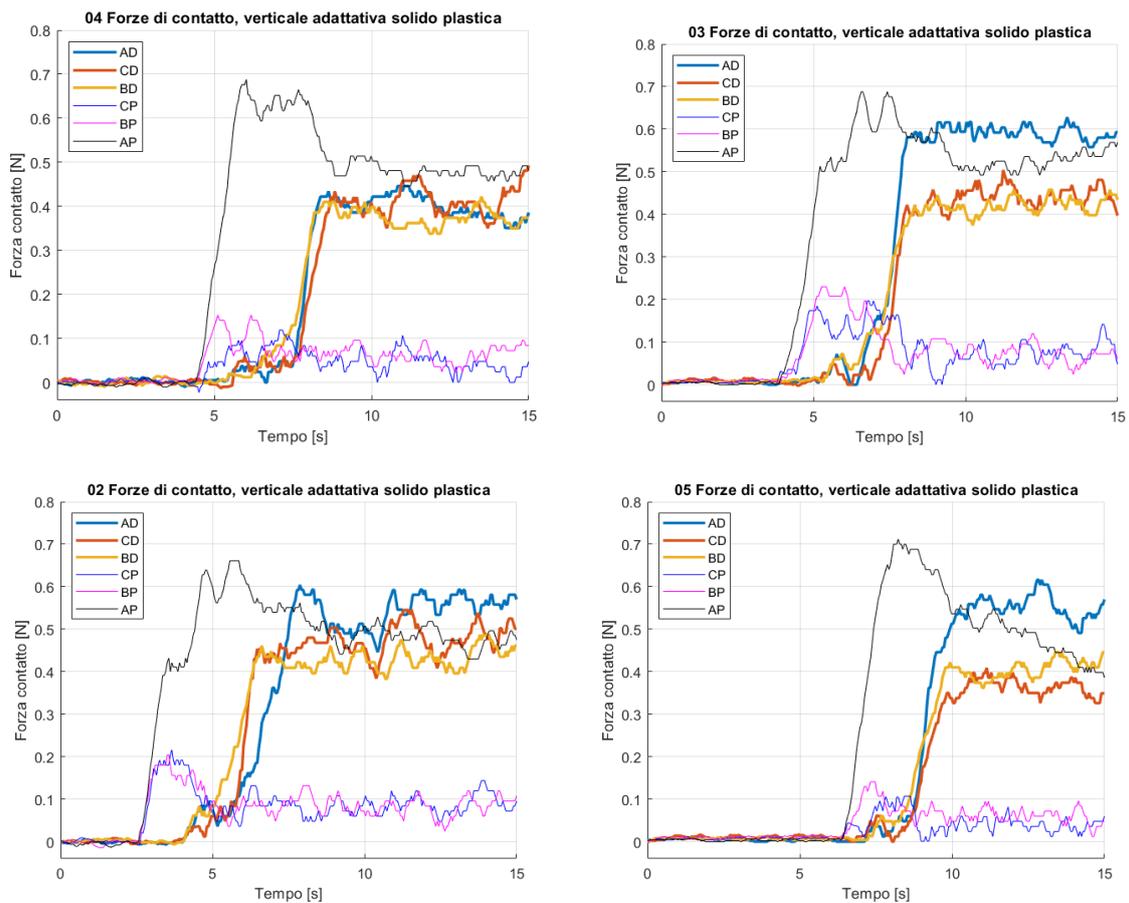


Figura 5.18 Forze di contatto solido plastica presa verticale (verso l'alto) adattativa

Determinazione delle caratteristiche di presa

Prova adattativa verticale (verso il basso) solido

In Figura 5.19 si riporta il caso di una presa adattativa verticale (verso il basso) di un solido in plastica e le relative forze di contatto Figura 5.20:



Figura 5.19 Presa adattativa verticale (verso il basso) solido plastica

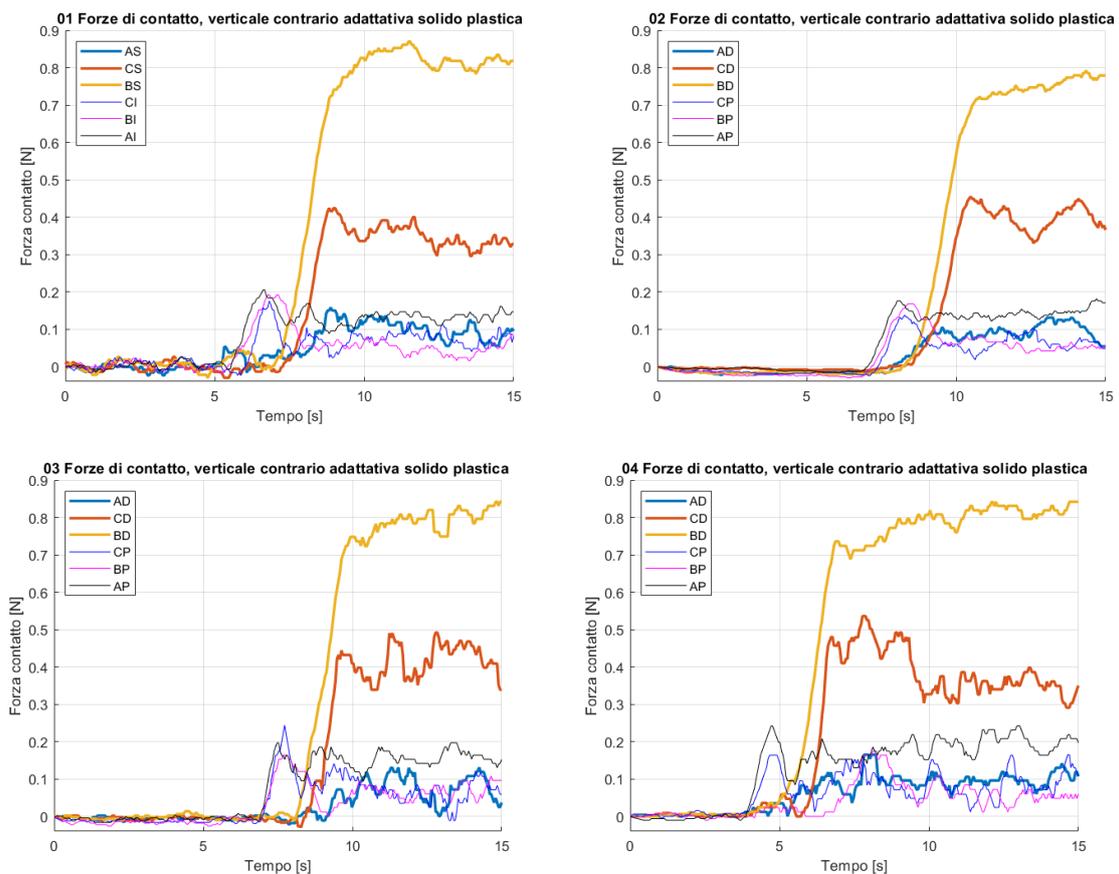


Figura 5.20 Forze di contatto solido plastica presa verticale (verso il basso) adattativa

Determinazione delle caratteristiche di presa

Le forze di contatto riportate in Figura 5.18 e Figura 5.20 presentano un medesimo andamento qualitativo, infatti si registra un primo contatto con le falangi prossimali ($t=4s$) e, successivamente si completa la presa con le falangi distali, infatti si riporta un andamento crescente delle forze di contatto per le falangi coinvolte nella presa degli oggetti fino al valore riportato a regime. Anche in questi casi, a causa dello spostamento dell'oggetto, si registrano delle diminuzioni delle forze di contatto registrate nelle falangi prossimali.

6 Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi è stato quello di effettuare la validazione e sensorizzazione della mano di presa, determinando le caratteristiche di presa per operazioni di soccorso in ambienti angusti.

Per la scelta dei sensori, si sono considerate le forze teoriche di contatto sulla punta di ciascun dito (10 N) e le dimensioni delle falangi in cui fissare i componenti.

Si è sviluppato il circuito dei sensori su LTspice con lo scopo di simulare gli andamenti della tensione in uscita, permettendo l'ottimizzazione dei parametri resistivi del circuito.

Successivamente si è realizzato il circuito, costruito il dispositivo per la calibrazione e regolato i parametri resistivi ottenuti nella fase simulativa. In seguito si è effettuata la calibrazione di ogni singolo sensore, ricavando la caratteristica e calcolando l'isteresi in post-processing.

Le caratteristiche dei sensori risultano coerenti ai risultati riportati nel manuale Tekscan, rilevando bassi valori di isteresi e andamenti lineari per l'intervallo di utilizzazione analizzato (0 N-20N).

La fase successiva ha previsto il montaggio dei sensori nella mano robotica, rispettando il posizionamento ipotizzato in fase di calcolo ed effettuando le prove di presa, in verticale e in orizzontale, per oggetti con geometrie differenti tra loro.

I risultati ottenuti dalla rilevazione delle forze di contatto risultano essere, in condizioni di presa stabile, circa 2.4 N. Tale differenza rispetto ai 10 N ottenuti in fase di calcolo possono essere attribuiti agli attriti presenti nel sistema e al fatto che l'angolo di trasmissione non sia effettivamente tale da ottimizzare la forza di contatto delle falangi.

Pertanto gli andamenti di presa di precisione e adattativa risultano essere coerenti con la dinamica fisica della presa.

Tra gli sviluppi futuri è necessario modificare l'architettura della mano per permettere una maggiore facilità di montaggio del dispositivo.

Nello specifico si propone di modificare tali componenti:

- La piastra motrice inferiore e la piastra triangolare: le quali devono garantire un aggancio stabile con le molle di collegamento, anch'esse da modificare in funzione alla tipologia di gancio con la piastra inferiore;

Conclusioni e sviluppi futuri

- Il telaio, in modo da rendere più semplice il montaggio della mano;
- La geometria delle falangi in funzione alle dimensioni dei sensori di forza che si prevedono di montare;

Per quanto riguarda la parte di simulazione meccanica, è stata effettuata la ricostruzione dei rispettivi link che compongono la mano robotica in ambiente Matlab. Pertanto, per proseguire la realizzazione del modello su Simscape, è necessario inserire i rispettivi vincoli di mobilità per ogni singolo giunto, i materiali per ogni link e gli schemi a blocchi riferiti alle forze di contatto tra solido e falangi.

Un altro sviluppo software è nell'ottimizzazione dello sketch ARDUINO, cercando di renderlo più efficiente e compatto, inserendo differenti funzioni di movimentazione e riducendo il numero di variabili presenti nello stesso.

7 Bibliografia

- [1] M. Chaher, M. Jathar e P. Bhor, «SMART BOREWELL RESCUE,» 2020.
- [2] J. Dhiyaneswaran, S. S. Kumar, A. Mohan, M. J. Carmichael, A. Mohan, T.C, Manjunath, M. Upadhyaya e V. Jothiprakash, «Design and development of rescue robot in borewell environment».
- [3] S. Palaniswamy, «Life Saving Machine,» 2011.
- [4] «Wikipedia, “Incidente di Vermicino - Wikipedia L’enciclopedia libera,”,» 01 2023. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Incidente_di_Vermicino.
- [5] Y. Cohen, S. Shoval e M. Faccio, «Strategic view on Cobot deployment in assembly 4.0 system,» 2019.
- [6] I. 8373:2012, «Robots and robotic devices — Vocabulary,» [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>.
- [7] G. J. Monkman, S. Hesse, R. Steinmann e H. Schunk, *Robotic grippers*, 2007.
- [8] K. Tai, A.-R. El-Sayed, M. Shahriari, M. Biglarbegian e S. Mahmud, *State of the Art Robotic Grippers and Applications*, 2016.
- [9] W. Ye, L. Zhao, X. Luo, J. Guo e X. Liu, «Perceptual Soft End-Effectors for Future Unmanned Agriculture,» 2023.
- [10] Homberger, «Robotica 4.0,» 01 2024. [Online]. Available: <https://www.homberger-robotica.com/news/quantitipi-di-end-effectors-conosci/>.
- [11] B. D. Bellis, «Studio e realizzazione di un dispositivo di presa a tre dita per operazioni di soccorso in ambienti angusti,» Politecnico di Torino, Torino, 2023.
- [12] Robotiq, OnRobot, modello 2FG7, [Online]. Available: <https://onrobot.com/it/prodotti/2fg7>. [Consultato il giorno 01 2024].
- [13] Coval, «Coval vacuum managers,» [Online]. Available: <https://www.coval-italia.com/prodotti/>.
- [14] Gimatic. [Online]. Available: <https://shop.gimatic.com/it/mfd>. [Consultato il

Bibliografia

- giorno 01 2024].
- [15] E. robotics, Versaball, [Online]. Available: <https://www.empirerobotics.com/products/>. [Consultato il giorno 01 2024].
- [16] Festo, «Adaptative gripper finger,» Festo Canada, [Online]. Available: https://www.festo.com/ca/en/p/adaptive-gripper-finger-id_DHAS_GF/. [Consultato il giorno 01 2024].
- [17] S. robotics, «Soft Gripping,» Soft robotics, [Online]. Available: <https://soft-gripping.com/it/>. [Consultato il giorno 01 2024].
- [18] Festo, «Octopus gripping tool,» Festo, [Online]. Available: https://www.festo.com/net/en_group/SupportPortal/Files/630182/Festo_TentacleGripper_en.pdf. [Consultato il giorno 01 2024].
- [19] Robotiq, «Pinze adattative,» [Online]. Available: <https://robotiq.com/it/prodotti/pinze-modello-2f-85-e-2f-140>. [Consultato il giorno 01 2024].
- [20] Robotiq, «Pinza adattiva a 3 dita,» Robotiq, [Online]. Available: <https://robotiq.com/it/prodotti/pinza-adattativa-robotica-a-3-dita>. [Consultato il giorno 01 2024].
- [21] B. Hand, «Barret Hand advanced robotics,» BH8, [Online]. Available: <https://advanced.barrett.com/barretthand>. [Consultato il giorno 01 2024].
- [22] A. M. D. Raymond R. Ma, «An Underactuated Hand for Efficient Finger-Gaiting-Based,» International Conference on Robotics and Biomimetics, Bali,Indonesia, 2014.
- [23] L. U. Odhner, R. Ma e A. M. Dollar, «Experiments in underactuated in-hand manipulation,» Experimental Robotics. Springer International Publishing, 2013.
- [24] A. M. Dollar e R. D. Howe, «Design and evaluation of a robust compliant grasper using shape deposition manufacturing,» International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Orlando, USA, 2005.
- [25] A. M. D. Minas Liarokapis, «Deriving Dexterous, In-Hand Manipulation Primitives for adaptive robot hands,» International Conference on Intelligent

Bibliografia

- Robots and Systems (IROS), Vancouver, Canada, 2017.
- [26] N. Rojas, R. R., Dollar e a. A. M., «The GR2 Gripper: An Underactuated Hand for Open-Loop In-Hand planar manipulation,» IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, 2016.
- [27] A. M. D. Minas V. Liarokapis, «Learning Task-Specific Models for Dexterous, In-Hand Manipulation with Simple, Adaptive Robot Hands,» International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, Korea, 2016.
- [28] qb Robotics, qb SoftHand Industry, [Online]. Available: <https://qbrobotics.com/it/prodotti/qb-soft-hand-industry/#>. [Consultato il giorno 01 2024].
- [29] G. Grioli, E. Farnioli, A. Serio, C. Piazza e A. Bicchi, «Adaptive Synergies for the Design and Control of the Pisa/IIT SoftHand».
- [30] Dings, «Dings Motion,» [Online]. Available: <https://www.dingsmotion.com/index.php>. [Consultato il giorno 2023].
- [31] GIEFFE, Teoria e pratica dei Motori Passo-Passo, Sandit Libri.
- [32] How to mechatronics, «Stepper Motors and Arduino – The Ultimate Guide,» [Online]. Available: https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/stepper-motors-and-arduino-the-ultimate-guide/?utm_content=cmp-true. [Consultato il giorno 2024].
- [33] Arduino, «Arduino.cc,» 2019. [Online]. Available: <https://www.arduino.cc/>. [Consultato il giorno 01 2024].
- [34] Pololu. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/1182>. [Consultato il giorno 2024].
- [35] «How to mechatronics,» [Online]. Available: https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/stepper-motors-and-arduino-the-ultimate-guide/?utm_content=cmp-true.
- [36] A. S. Sadun, J. Jalani e J. Sukor, «Force Sensing Resistor (FSR): A Brief Overview and the Low Cost Sensor for Active Compliance Control,» *Faculty of Engineering Technology, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia,,* 2016.

Bibliografia

- [37] C. Lebosse, M. D. Mathelin e a. P. Renaud, «Nonlinear modeling of low cost force sensors,» 2008.
- [38] J.A. Flórez, «Calibration of force sensing resistors (fsr) for static and dynamic applications,» 2010.
- [39] R. B. Ambar, M. Poad, M. Ali e S. Bin, «Multi-sensor arm rehabilitation monitoring device,» International Conference on Biomedical Engineering, 2012.
- [40] H. E. Nabilah, M. H. Ali, K. S. Talha, N. Farahiyah, K. Wan, D. Hazry, B. Shahrman, M. Razlan e M. Ariffin, «Analysis of touching sensation based on weights of rectangular object,» 2015.
- [41] Tekscan, «Force sensor,» [Online]. Available: <https://www.tekscan.com/force-sensors>.
- [42] Tekscan, «FLEXIFORCE, INTEGRATION GUIDE,» Tekscan.
- [43] Tekscan, «User manual,» [Online]. Available: <https://www.tekscan.com/resources/product-guide/flexiforce-user-manual>.
- [44] Tekscan, «Flexiforce A101,» [Online]. Available: <https://www.tekscan.com/resources/datasheets-guides/flexiforce-a101-datasheet>.
[Consultato il giorno 01 2024].
- [45] Tekscan, «Datasheet a101,» [Online]. Available: <https://www.tekscan.com/sites/default/files/FLX-Datasheet-A101-RevJ.pdf>.
[Consultato il giorno 01 2024].
- [46] Tekscan, «FLEXIFORCE, force sensor design, Integration Guide,» [Online]. Available: www.tekscan.com/es.
- [47] A. Datasheet, «ALL Datasheet.com,» [Online]. Available: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/74939/MICROCHIP/MCP6004.html>. [Consultato il giorno 01 2024].
- [48] Softonic, «LTspice,» [Online]. Available: <https://ltspice.it.softonic.com/>.

Appendice A

L'Appendice A riporta lo schema circuitale dei sensori, i valori degli indici di dispersione e i grafici di salita/discesa per ogni singolo sensore:

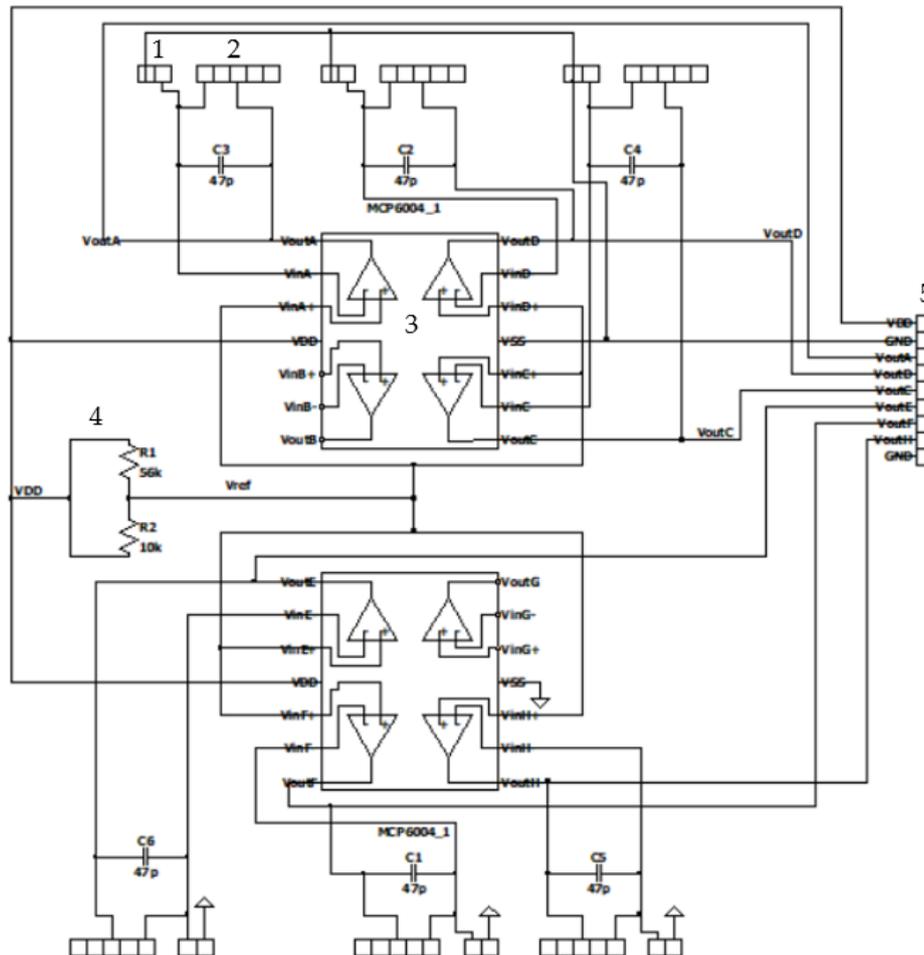


Figura 0.1 Schema circuito sensori

Componente	
1	Sede per posizionamento sensore
2	Sede per posizionamento potenziometro
3	Amplificatori
4	Partitore di tensione
5	Sede per le uscite e l'alimentazione

Appendice A

Tabella 9 Legenda circuito elettronico

Media [V]	Varianza [V²]	Deviazione standard [V]	Coefficiente di Variabilità [%]
0.5	0.0004	0.0194	3.89
0.83	0.0015	0.039	4.69
1.06	0.003	0.0548	5.15
1.25	0.0045	0.0671	5.36
1.43	0.0051	0.0717	5.02
1.59	0.0065	0.0808	5.07
1.75	0.006	0.0772	4.42
1.9	0.01	0.0998	5.26
2.04	0.0054	0.0735	3.62
2.17	0.0069	0.0831	3.84

Tabella 10 Indici di dispersione dati per sensore AD

Media [V]	Varianza [V²]	Deviazione standard [V]	Coefficiente di Variabilità [%]
0.5	0.0003	0.0181	3.6
0.75	0.0014	0.0372	4.95
0.98	0.0013	0.0355	3.63
1.16	0.001	0.0316	2.73
1.35	0.0016	0.0405	3.01
1.52	0.0029	0.0539	3.53
1.71	0.0020	0.0444	2.61
1.89	0.0040	0.0629	3.32
2.06	0.0048	0.069	3.34
2.23	0.0048	0.069	3.08

Appendice A

Tabella 11 Indici di dispersione dati per sensore CD

Media [V]	Varianza [V²]	Deviazione standard [V]	Coefficiente di Variabilità [%]
0.5	0.0007	0.022	5.03
0.76	0.0072	0.085	11.16
0.98	0.0116	0.107	10.91
1.16	0.0170	0.130	11.21
1.34	0.0181	0.134	10.02
1.51	0.0208	0.144	9.54
1.69	0.0183	0.135	8.01
1.83	0.0185	0.136	7.44
1.97	0.0182	0.135	6.84
2.12	0.0193	0.139	6.56

Tabella 12 Indici di dispersione dati per sensore BD

Media [V]	Varianza [V²]	Deviazione standard [V]	Coefficiente di Variabilità [%]
0.5	0.0007	0.025	5.12
0.77	0.0017	0.040	5.27
0.90	0.0032	0.056	6.12
1.07	0.0044	0.066	5.98
1.28	0.0054	0.073	5.74
1.47	0.0061	0.078	5.32
1.67	0.0075	0.086	5.16
1.86	0.0100	0.100	5.37
2.07	0.0143	0.119	5.81
2.26	0.0160	0.126	5.59

Tabella 13 Indici di dispersione dati per sensore CP

Appendice A

Media [V]	Varianza [V²]	Deviazione standard [V]	Coefficiente di Variabilità [%]
0.5	0.0002	0.014	2.72
0.83	0.0014	0.037	4.46
1.07	0.0027	0.051	4.81
1.27	0.0044	0.066	5.20
1.46	0.0062	0.078	5.41
1.64	0.0087	0.093	5.70
1.83	0.0106	0.103	5.64
2.01	0.0134	0.116	5.78
2.19	0.0184	0.135	6.01
2.36	0.0179	0.133	5.67

Tabella 14 Indici di dispersione dati per sensore BP

Media [V]	Varianza [V²]	Deviazione standard [V]	Coefficiente di Variabilità [%]
0.5	0.00001	0.0077	1.61
0.86	0.0003	0.016	1.85
1.13	0.0011	0.034	3.01
1.32	0.0014	0.037	2.83
1.51	0.0025	0.050	3.32
1.69	0.0032	0.056	3.35
1.86	0.0051	0.071	3.84
2.01	0.0080	0.089	4.45
2.17	0.0085	0.092	4.24
2.31	0.0114	0.107	4.62

Tabella 15 Indici di dispersione dati per sensore AP

Appendice A

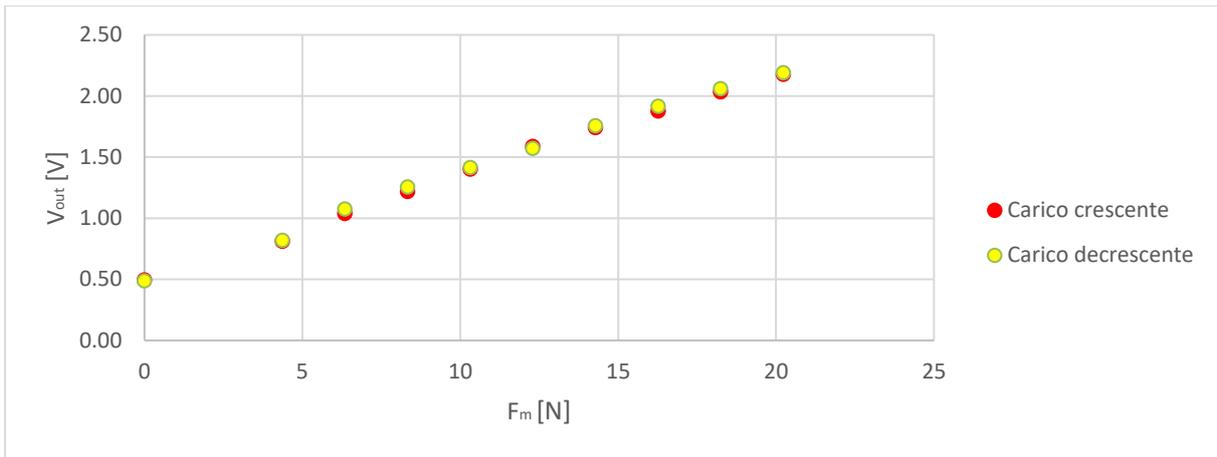


Figura 0.2 Caratteristica salita/discesa sensore AD

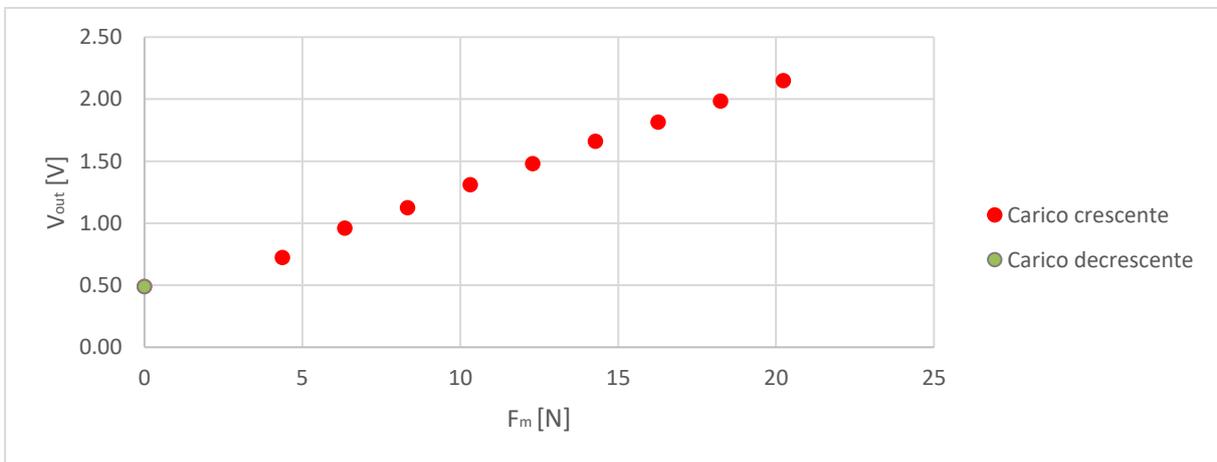


Figura 0.3 Caratteristica salita/discesa sensore CD

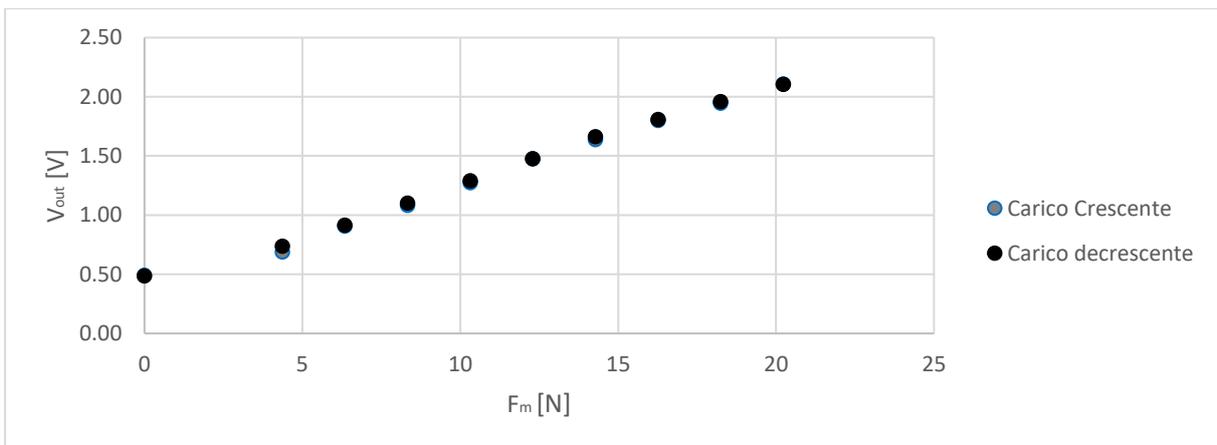


Figura 0.4 Caratteristica salita/discesa sensore BD

Appendice A

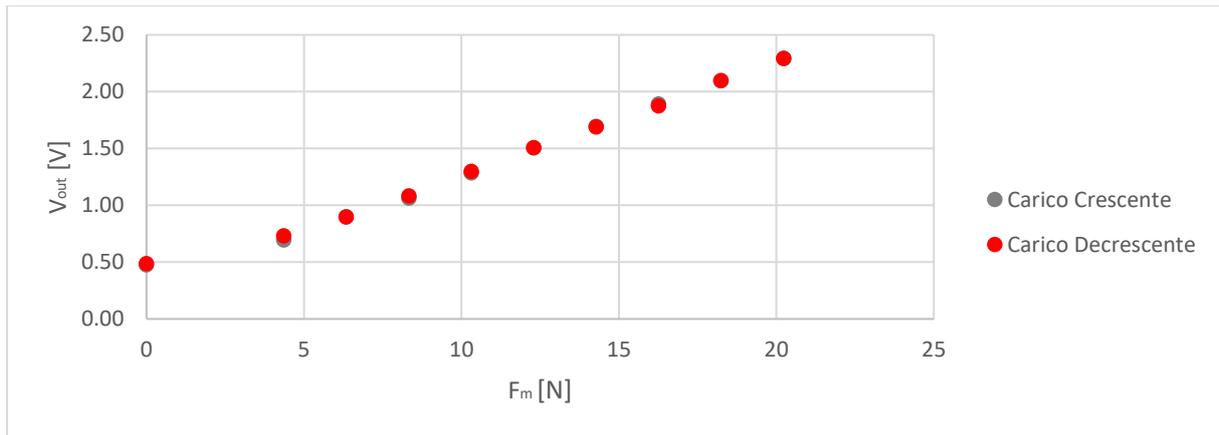


Figura 0.5 Caratteristica salita/discesa sensore CP

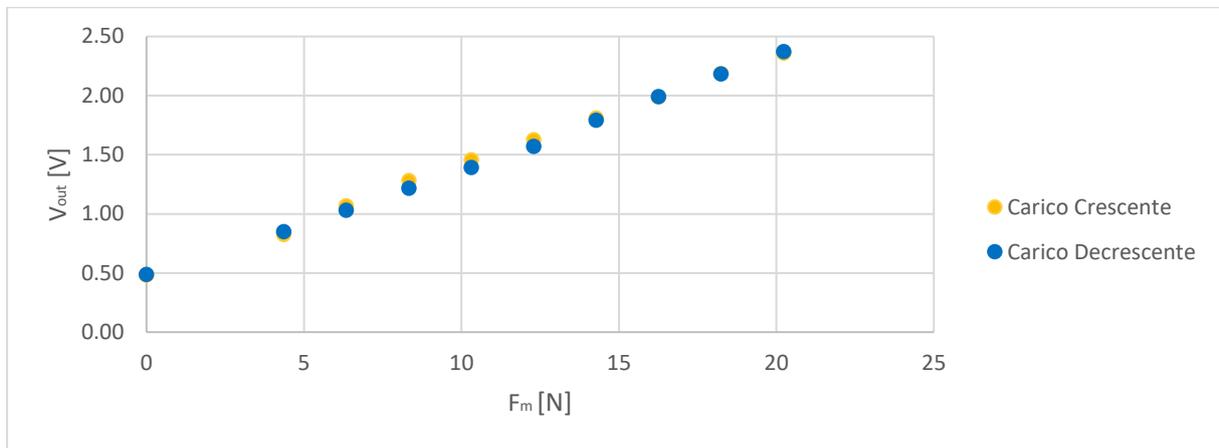


Figura 0.6 Caratteristica salita/discesa sensore BP

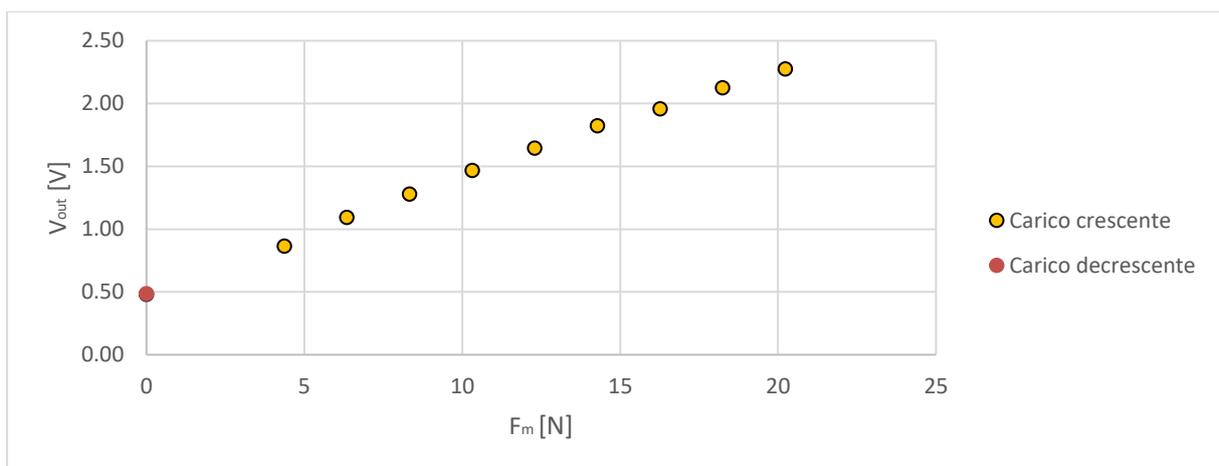


Figura 0.7 Caratteristica salita/discesa sensore AP

Appendice B

L'Appendice B riporta lo sketch Arduino:

```
//                               *VERSIONE 4.0*                               //
//Codice movimentazione mano di presa con menu di supporto.
// Inizializzazione pin e corrispondenti menu

#define dirPin 2
#define stepPin 5

enum stati {idle, menu1, menu_step, menu_verso, menu_view,
menu_exit,process,lettura_sensore,
lettura_0,lettura_1,lettura_2,lettura_3,lettura_4,lettura_5,go_auto};

enum stati stato = idle;
bool FIRST = true;
int step, verso;
int sensore,decisione;
float
sensorRead,sensorRead_0,sensorRead_1,sensorRead_2,sensorRead_3,sensorRead_4,se
nsorRead_5,sensorRead_6,sensorRead1,sensorRead2,sensorRead3,sensorRead4,sensor
Read5,sensorRead6,sensorValue,sensorValue_1,sensorValue_2,sensorValue_3,sensor
Value_4,sensorValue_5,sensorValue_6;
unsigned long t1, ledtime;
float
sensorValue1,sensorValue2,sensorValue3,sensorValue4,sensorValue5,sensorValue6;
String line = "";
int i;
char inputCommand[20]; // Array per memorizzare i dati seriali in ingresso

void setup() {
  pinMode(stepPin, OUTPUT);
  pinMode(dirPin, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  step = 200;
  verso = 1;
}

void loop() {
  switch(stato)
  {
    case idle:
      act_idle();
      break;
    case menu1:
      act_menu1();
```

Appendice B

```
        break;
    case menu_step:
        act_menu_step();
        break;
    case menu_verso:
        act_menu_verso();
        break;
    case menu_view:
        act_menu_view();
        break;
    case menu_exit:
        act_menu_exit();
        break;
    case process:
        act_process();
        break;
    case lettura_sensore:
        act_lettura_sensore();
        break;
    case go_auto:
        act_go_auto();
        break;
}
}

void act_menu1(){
    if (FIRST) {
        Serial.println();
        Serial.println("Che parametro desidera impostare?");
        Serial.println(F("\n1: cambia steps"));
        Serial.println(F("2: cambia verso di rotazione"));
        Serial.println(F("3: vedi impostazioni"));
        Serial.println(F("4: avviamento motore"));
        Serial.println(F("5: lettura dei sensori"));
        Serial.println(F("6: avviamento automatico"));
        Serial.println(F("0: esci"));
        FIRST = false;
        line = "";
    }
    if (Serial.available()){
        char ch = Serial.read();
        switch (ch){
            case '0':
                go(menu_exit);
                break;
            case '1':
                go(menu_step);
                break;

```

Appendice B

```
    case '2':
        go(menu_verso);
        break;
    case '3':
        go(menu_view);
        break;
    case '4':
        go(process);
        break;
    case '5':
        go(lettura_sensore);
        break;
    case '6':
        go(go_auto);
        break;
}
}
}
// Funzione di avviamento del programma

void go(enum stati st){
    stato = st;
    FIRST = true;
}
void act_idle(){
    if (FIRST) {
        Serial.println();
        Serial.println("Menu Seriale v.4");
        Serial.println("Mano di presa per ambienti angusti:");
        Serial.println("Scegli il verso di rotazione e il numero di step per
comandare la mano.");
        Serial.println("Digita 'menu' e premi invio nel comando del monitor
seriale:");
        FIRST = false;
        line = "";
    }
    if (Serial.available()){
        char ch = Serial.read();
        //Serial.write(ch);
        if (ch == '\n') {
            if (line.equals("menu")) go(menu1);
            line = "";
        } else if (ch != '\r') {
            line += ch;
        }
    }
}
}
// Funzione per visualizzare uscire dal programma
```

```

void act_menu_exit(){
    if (FIRST) {
        Serial.println(F("\nVuoi uscire? (s/n)"));
        FIRST = false;
    }
    if (Serial.available()){
        char ch = Serial.read();
        if ((ch != '\n') && (ch != '\r')) {
            if (ch == 's') {
                Serial.println(F("A presto"));
                go(idle);
            } else {
                go(menu1);
            }
        }
    }
}
// Funzione per scegliere gli step

void act_menu_step(){
    if (FIRST) {
        Serial.println(F("\n1: cambia step"));
        Serial.print(F("Numero di step: "));
        Serial.println(step);
        Serial.println(F("Inserisci il nuovo valore (max 500) o annulla (0)"));
        FIRST = false;
        line = "";
    }
    if (Serial.available()){
        char ch = Serial.read();
        if (ch == '\n') {
            if (line.length() {
                if (line.equals("0")) {
                    go(menu1);
                } else {
                    step = constrain(atoi(line.c_str()), 0, 500);
                    Serial.print(F("Nuovo valore : "));
                    Serial.println(step);
                    go(menu1);
                }
            }
        }
        } else if (ch != '\r') {
            line += ch;
        }
    }
}

```

Appendice B

```
//Lettura Vout da sensore
void act_lettura_sensore()
{
  if (FIRST) {
    Serial.println(F("\nLettura sensore, inserire il numero del sensore (da 0
a 1):\n 0 torna al menu \n 1 lettura sensori"));
    FIRST = false;
    line = "";
  }
  if (Serial.available()){
    char ch = Serial.read();
    if (ch == '\n') {
      if (line.length())
      {
        if (line.equals("0"))
        {
          go(menu1);
        }
        else
        {
          Serial.print(F("\n\nVerrà effettuata la rilevazione di 5 valori:\n
"));
          delay(2000);
          for (int conta = 0; conta < 5; conta++)
          {
            sensorRead1 = analogRead(A0);
            sensorValue1 = (sensorRead1)/1024*5;
            sensorRead2 = analogRead(A1);
            sensorValue2 = (sensorRead2)/1024*5;
            sensorRead3 = analogRead(A2);
            sensorValue3 = (sensorRead3)/1024*5;
            sensorRead4 = analogRead(A3);
            sensorValue4 = (sensorRead4)/1024*5;
            sensorRead5 = analogRead(A4);
            sensorValue5 = (sensorRead5)/1024*5;
            sensorRead6 = analogRead(A5);
            sensorValue6 = (sensorRead6)/1024*5;
            Serial.print(sensorValue1);
            Serial.print(",");
            Serial.print(sensorValue2);
            Serial.print(",");
            Serial.print(sensorValue3);
            Serial.print(",");
            Serial.print(sensorValue4);
            Serial.print(",");
            Serial.print(sensorValue5);
            Serial.print(",");
            Serial.print(sensorValue6);
```

```

        Serial.println("");
        delay(1000);
        // rilevazione ogni secondo
    }
    go(lettura_sensore);
}
}
}
else if (ch != '\r')
{
    line += ch;
}
}
}
// Funzione per scegliere il verso di rotazione

void act_menu_verso(){
    if (FIRST) {
        Serial.println(F("\n2: cambia verso di rotazione"));
        Serial.print(F("Verso: "));
        Serial.println(verso);
        Serial.println(F("Inserisci tra 1 (scendi) 2 (sali) o annulla (0)"));
        FIRST = false;
        line = "";
    }
    if (Serial.available()){
        char ch = Serial.read();
        if (ch == '\n') {
            if (line.length()) {
                if (line.equals("0")) {
                    go(menu1);
                } else {

                    verso = constrain(atoi(line.c_str()), 0, 2);
                    Serial.print(F("Nuovo valore: "));
                    Serial.println(verso);

                    if (verso==1){
                        digitalWrite(dirPin, HIGH);
                    }
                    else if (verso==2){
                        digitalWrite(dirPin, LOW);
                    }
                    go(menu1);
                }
            }
        }
    }
} else if (ch != '\r') {

```

Appendice B

```
        line += ch;
    }
}
}
// Funzione per visualizzare il verso di rotazione e gli step

void act_menu_view(){
    if (FIRST) {
        Serial.println(F("\n3: View dati"));
        Serial.print(F("step: "));
        Serial.println(step);
        Serial.print(F("verso: "));
        Serial.println(verso);
        Serial.print("N.B. 1= scendi // 2=sali: ");
        Serial.println(F("\nPremere 0 per tornare al menu principale"));
        FIRST = false;
    }
    if (Serial.available()){
        char ch = Serial.read();
        if ((ch != '\n') && (ch != '\r')) {
            if (ch == '0') {
                go(menu1);
            }
        }
    }
}
// Processo di avviamento
void act_process(){
    if (FIRST) {
        Serial.println(F("\n4:Desideri movimentare la mano?"));
        Serial.println(F("Procedi inserendo (1) o annulla l'operazione(0)"));
        FIRST = false;
        line = "";
    }
    if (Serial.available()){
        char ch = Serial.read();
        if (ch == '\n') {
            if (line.length()) {
                if (line.equals("0")) {
                    go(menu1);
                } else {
                    int contatore=1;
                    for (int i = 0; i < step; i++)
                    {
                        digitalWrite(stepPin, HIGH);
                        delayMicroseconds(10000);
                        digitalWrite(stepPin, LOW);
                        delayMicroseconds(10000);
                        if ((i % 10) == 0)
```

Appendice B

```
{
  sensorRead_0 = analogRead(A0);
  sensorRead_1 = analogRead(A1);
  sensorRead_2 = analogRead(A2);
  sensorRead_3 = analogRead(A3);
  sensorRead_4 = analogRead(A4);
  sensorRead_5 = analogRead(A5);
  Serial.print("\nRilevazione numero\t ");
  Serial.print(contatore);
  float sensorValue_0 = (sensorRead_0+1)/1024*5;
  Serial.print("\n\nValore sensore giallo: ");
  Serial.print(sensorValue_0);
  Serial.println(" mV");
  float sensorValue_1 = (sensorRead_1+1)/1024*5;
  Serial.print("\nValore sensore bianco: ");
  Serial.print(sensorValue_1);
  Serial.println(" mV");
  float sensorValue_2 = (sensorRead_2+1)/1024*5;
  Serial.print("\nValore sensore nero: ");
  Serial.print(sensorValue_2);
  Serial.println(" mV");
  float sensorValue_3 = (sensorRead_3+1)/1024*5;
  Serial.print("\nValore sensore rosso: ");
  Serial.print(sensorValue_3);
  Serial.println(" mV");
  float sensorValue_4 = (sensorRead_4+1)/1024*5;
  Serial.print("\nValore sensore blu: ");
  Serial.print(sensorValue_4);
  Serial.println(" mV");
  float sensorValue_5 = (sensorRead_5+1)/1024*5;
  Serial.print("\nValore sensore arancione: ");
  Serial.print(sensorValue_5);
  Serial.println(" mV");

  contatore=contatore+1;
}
}

  delay(3000);
  go(menu1);
}
}

} else if (ch != '\r') {
  line += ch;
}
}
}
```

Appendice B

```
//Movimentazione e rilascio automatico
void act_go_auto(){
  if (FIRST) {
    Serial.println(F("\Movimentazione automatica, inserire il numero del
sensore (da 0 a 2)"));
    Serial.println(F("Inserisci tra:\n0 torna al menù principale; \n1 presa
automatica;\n2 rilascio automatico;"));
    FIRST = false;
    line = "";
  }
  if (Serial.available()){
    int i=0;
    char ch = Serial.read();
    if (ch == '\n') {
      if (line.length())
      {
        if (line.equals("0"))
        {
          go(menu1);
        }
        else
        {
          decisione = constrain(atoi(line.c_str()), 0, 5);
          delay(2000);
          if (decisione==1)
          {
            //Verso di rotazione, piastra che sale
            digitalWrite(dirPin, LOW);

            do
            {
              if (i%10==0)
              {
                sensorRead1 = analogRead(A0);
                sensorValue1 = (sensorRead1)/1024*5;
                sensorRead2 = analogRead(A1);
                sensorValue2 = (sensorRead2)/1024*5;
                sensorRead3 = analogRead(A2);
                sensorValue3 = (sensorRead3)/1024*5;
                sensorRead4 = analogRead(A3);
                sensorValue4 = (sensorRead4)/1024*5;
                sensorRead5 = analogRead(A4);
                sensorValue5 = (sensorRead5)/1024*5;
                sensorRead6 = analogRead(A5);
                sensorValue6 = (sensorRead6)/1024*5;
                Serial.print(sensorValue1);
                Serial.print(",");
              }
            }
          }
        }
      }
    }
  }
}
```

Appendice B

```
Serial.print(sensorValue2);
Serial.print(",");
Serial.print(sensorValue3);
Serial.print(",");
Serial.print(sensorValue4);
Serial.print(",");
Serial.print(sensorValue5);
Serial.print(",");
Serial.print(sensorValue6);
Serial.println("");
    }
digitalWrite(stepPin, HIGH);
delayMicroseconds(10000);
digitalWrite(stepPin, LOW);
delayMicroseconds(10000);
//0.2 secondi a ciclo
i=i+1;
}while (sensorValue1<1 && sensorValue2<1 && sensorValue3<1 &&
sensorValue4<1 && sensorValue5<1 && sensorValue6<1);
}

if (decisione==2)
{
    //Verso di rotazione, piastra che sale
    digitalWrite(dirPin, HIGH);

    do
    {
        sensorRead1 = analogRead(A0);
        sensorValue1 = (sensorRead1)/1024*5;
        sensorRead2 = analogRead(A1);
        sensorValue2 = (sensorRead2)/1024*5;
        sensorRead3 = analogRead(A2);
        sensorValue3 = (sensorRead3)/1024*5;
        sensorRead4 = analogRead(A3);
        sensorValue4 = (sensorRead4)/1024*5;
        sensorRead5 = analogRead(A4);
        sensorValue5 = (sensorRead5)/1024*5;
        sensorRead6 = analogRead(A5);
        sensorValue6 = (sensorRead6)/1024*5;
        Serial.print(sensorValue1);
        Serial.print(",");
        Serial.print(sensorValue2);
        Serial.print(",");
        Serial.print(sensorValue3);
        Serial.print(",");
        Serial.print(sensorValue4);
        Serial.print(",");
        Serial.print(sensorValue5);
```

Appendice B

```
Serial.print(",");
Serial.print(sensorValue6);
Serial.println("");
digitalWrite(stepPin, HIGH);
delayMicroseconds(10000);
digitalWrite(stepPin, LOW);
delayMicroseconds(10000);
i=i+1;
}while (sensorValue1>0.53 || sensorValue2>0.53 || sensorValue3>0.53
|| sensorValue4>0.53 || sensorValue5>0.53 || sensorValue6>0.53);

for (int j = 0; j < 400; j++)
{
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10000);
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delayMicroseconds(10000);
}

}

    go(menu1);
}
}
else if (ch != '\r')
{
    line += ch;
}
}
}
```

Appendice C

Si riporta di seguito lo schema a blocchi del dispositivo di presa:

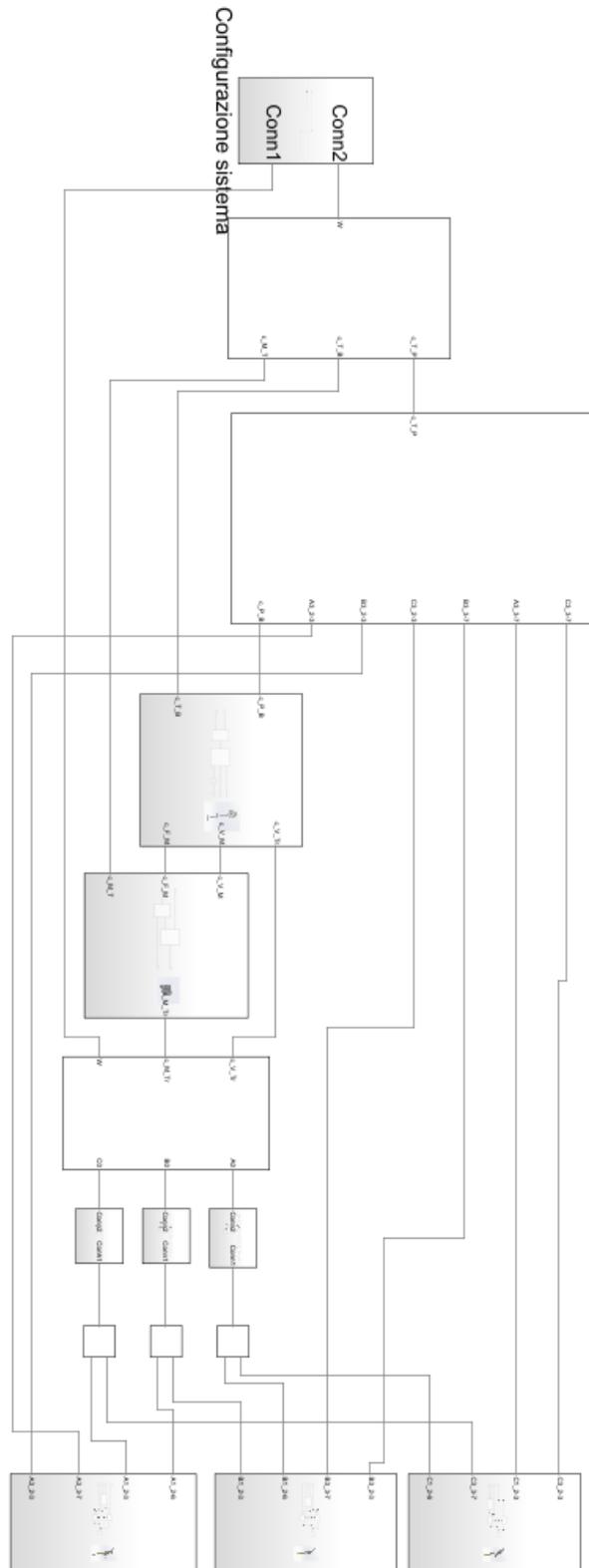


Figura 0.8 Schema a blocchi mano di presa

Appendice C

Nomenclatura:	
c_M_T	= Contatto Molla-Telaio
c_T_B	= Contatto Telaio-Blocco motore
c_T_P	= Contatto Telaio-Palmo
c_P_B	= Contatto Palmo-Blocco motore
c_F_M	= Contatto Flangia motore - Molla
c_V_M	= Contatto Vite - Motore
c_V_Tr	= Contatto Vite - Trasmissione
c_M_Tr	= Contatto Molla-Trasmissione
A3_2-3	= Cerniera collegamento A3 con membro 2-3
B3_2-3	= Cerniera collegamento B3 con membro 2-3
C3_2-3	= Cerniera collegamento C3 con membro 2-3
A3_3-7	= Cerniera collegamento A3 con membro 3-5-7
B3_3-7	= Cerniera collegamento B3 con membro 3-5-7
C3_3-7	= Cerniera collegamento C3 con membro 3-5-7
A1_2-6	= Cerniera collegamento A1 con membro 2-4-6
B1_2-6	= Cerniera collegamento B1 con membro 2-4-6
C1_2-6	= Cerniera collegamento C1 con membro 2-4-6
A1_2-3	= Cerniera collegamento A1 con membro 2-3
B1_2-3	= Cerniera collegamento B1 con membro 2-3
C1_2-3	= Cerniera collegamento C1 con membro 2-3
A2_2-6	= Cerniera collegamento A2 con membro 2-6
B2_2-6	= Cerniera collegamento B2 con membro 2-6
C2_2-6	= Cerniera collegamento C2 con membro 2-6
A2_3-7	= Cerniera collegamento A2 con membro 2-6
B2_3-7	= Cerniera collegamento B2 con membro 2-6
C2_3-7	= Cerniera collegamento C2 con membro 2-6
W	= World

Tabella 16 Nomenclatura modello Simscape

Ringraziamenti

Desidero esprimere la mia profonda gratitudine a tutte le persone che hanno reso possibile il completamento di questo percorso di laurea.

Innanzitutto, desidero ringraziare il Prof. Raparelli, la Prof.ssa Maffiodo e l'ing. Pacheco per la disponibilità e supporto fornito durante la realizzazione di questo elaborato.

Un sentito ringraziamento va alla mia famiglia per il loro costante sostegno e incoraggiamento: in particolare a mia mamma e mio fratello per avermi sopportato e supportato durante questi due anni.

Un pensiero di gratitudine a Silvestro, Cristina e zio Ciccio, amorevoli in tutti i vostri piccoli gesti ad ogni mio ritorno a casa.

Grazie ai miei amici, compagni di innumerevoli esperienze e presenti da sempre con affetto ed estrema purezza d'animo. Grazie a Simone, Pippo e Francesco per essere stati sempre al mio fianco: dalla via Ugo Giuffrida al C.so Duca degli Abruzzi.

Un ringraziamento particolare a Renata per avermi accompagnato in ogni scelta di questi anni. Sei stata, sei e sarai indispensabile, unica.

A conclusione di questo percorso, voglio esprimere la mia gratitudine al Politecnico di Torino per le opportunità e difficoltà riscontrate in questo percorso. Tutto ciò ha permesso, in ogni sua sfumatura, di rendermi l'uomo che sono oggi, facendo accrescere la consapevolezza sul fatto che 'la pazienza è il miglior rimedio per ogni difficoltà'.

Sicuramente ci attende un futuro emozionante e ricco di vita, ci divertiremo senz'altro.

A voi tutti, Grazie.