

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE (DIN)

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA MECCANICA

TESI DI LAUREA
in
Meccanica dei Robot M

SVILUPPO E CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DI UN SENSORE CAPACITIVO PER LA MISURA DELLO SCORRIMENTO RELATIVO NELLA PRESA DI UN OGGETTO CON UN GRIPPER ROBOTICO

Relatore:

Dott. Lorenzo Agostini

Candidata:

Gloria Cordisco

Co-relatori:

Prof. Rocco Vertechy

Prof. Nicola Sancisi

Dott. Federico Bertolucci

Dott. Eugenio Monari

A.A. 2022/2023

Sessione I

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Sensori Capacitivi	3
1.2	Gripper Robotici	7
1.3	Elettroadesione	14
2	Progettazione ed analisi del sensore	19
2.1	Metodo di interpolazione spaziale	21
2.1.1	Slider di piccole dimensioni	21
2.1.2	Slider di dimensioni medio-grandi	22
2.2	Metodo di interpolazione resistiva	23
2.3	Materiali	24
2.3.1	Substrato	24
2.3.2	Elettrodi	24
2.3.3	Pannello frontale	25
2.4	Elettronica di lettura	26
2.5	Obiettivo e scelta dei componenti	29
3	Realizzazione slider a scorrimento	31
3.1	Architettura del sensore	32
3.2	Metodologia di costruzione	35
3.3	Definizione del tocco	38
3.4	Materiali impiegati	39
3.5	Processo di fabbricazione (taglio)	42
4	Campagna sperimentale	45
4.1	Acquisizione dati	45
4.2	Caratterizzazione sperimentale	47
4.2.1	Architettura del sensore	47
4.3	Tipologie di test	49
4.3.1	Preprocessing dei dati	51
4.4	Analisi sperimentale	52

4.4.1	K_3 e K_{10} Isolato	54
4.4.2	K_3 e K_{10} Not Grounded	56
4.4.3	K_3 e K_{10} Grounded	59
4.5	Discussione dei risultati	63
5	Analisi Posizionale	65
6	Conclusione e sviluppi futuri	83
	Bibliografia	85

Elenco delle figure

1.1	Condensatore a facce piane parallele	4
1.2	Campo elettrico in un condensatore a facce piane parallele	6
1.3	Modalità di rilevamento della capacità: a sinistra <i>mutual capacitance</i> , a destra <i>self capacitance</i>	7
1.4	Esempio di pinze robotiche	8
1.5	Esempi di Gripper Robotici	10
1.6	Possibile classificazione delle caratteristiche dei gripper morbidi divisi per diverse tecnologie di presa e tipologie di oggetti	13
1.7	Vista in sezione trasversale di un sistema elettroadesivo	16
1.8	Sezione trasversale e frontale del dispositivo elettroadesivo	17
1.9	Il comportamento dinamico tipico dell'elettroadesione e la curva della forza/pressione residua nel tempo	18
2.1	Tipologie di sensori touch	20
2.2	Slider di piccole dimensioni (interpolato spazialmente)	22
2.3	Slider di medie/grandi dimensioni (interpolato spazialmente)	22
2.4	Slider di piccole/medie dimensioni (interpolato resistivamente)	23
2.5	Sezione del sensore	26
2.6	Pin MPR121	28
2.7	MPR121: Misurazione di capacità	29
3.1	Elettrodo di tipologia K_3	32
3.2	Elettrodo di tipologia K_10	33
3.3	Distinzione aree sensore	34
3.4	Tipologie di aree all'interno dell'elettrodo del sensore	35
3.5	Andamento segnale in relazione al tempo	36
3.6	Sensore a modello lineare	37
3.7	Andamento nel tempo della capacità in rapporto ai differenti passi	38
3.8	Spray conduttivo Graphic 33	40
3.9	Esempi di Carbon Black e PDMS	41
3.10	Sezione elettrodo	42

3.11	Sensori con spray conduttivo	42
3.12	Taglierina Laser utilizzata	43
4.1	Collegamenti Arduino Mega con MPR 121	47
4.2	Architettura con elettrodo isolato	48
4.3	Architettura con elettrodo isolato e collegamento a terra	49
4.4	Architettura con elettrodo isolato e conduttore flottante	49
4.5	K_{10} : architettura con elettrodo isolato	49
4.6	Sensore K_{10} con i vari strati	50
4.7	Bacchetta isolata e bacchetta conduttiva	50
4.8	K_3 Isolato: tocco conduttivo	54
4.9	K_{10} Isolato: tocco conduttivo	54
4.10	K_3 Isolato: tocco isolante	55
4.11	K_{10} Isolato: tocco isolante	55
4.12	K_3 Isolato: tocco con dito	56
4.13	K_{10} Isolato: tocco con dito	56
4.14	K_3 Not Grounded: tocco conduttivo	57
4.15	K_{10} Not Grounded: tocco conduttivo	57
4.16	K_3 Not Grounded: tocco isolante	58
4.17	K_{10} Not Grounded: tocco isolante	58
4.18	K_3 Not Grounded: tocco con dito	59
4.19	K_{10} Not Grounded: tocco con dito	59
4.20	K_3 Grounded: tocco conduttivo	61
4.21	K_{10} Grounded: tocco conduttivo	61
4.22	K_3 Grounded: tocco isolante	62
4.23	K_{10} Grounded: tocco isolante	62
4.24	K_3 Grounded: tocco con dito	63
4.25	K_{10} Grounded: tocco con dito	63
5.1	K_3 Discretizzato	66
5.2	K_{10} Discretizzato	67
5.3	Variazione di capacità sensore K_3	68
5.4	Variazione di capacità sensore K_{10}	69
5.5	Andamento polinomiale di sesto grado (K_3)	72
5.6	Andamento polinomiale di sesto grado (K_{10})	72
5.7	Curve trapezoidali e dati sperimentali del sensore K_{10}	76
5.8	Curve trapezoidali e dati sperimentali del sensore K_3	76
5.9	Differenza tra sistema di riferimento assoluto e relativo	81

Elenco delle tabelle

1.1	Costanti dielettriche dei materiali più comuni	5
1.2	KPIs Gripper	11
1.3	KPIs Gripper	12
3.1	Misure caratteristiche degli elettrodi di tipologia K_3 e K_10 . . .	33
4.1	Intervallo ADC	46
4.2	Intervallo capacità	46
5.1	Valori variazioni di capacità K_3	68
5.2	Valori variazioni di capacità K_10	69
5.3	Aree K_3	70
5.4	Aree K_10	71
5.5	Coefficienti polinomiali K_3	73
5.6	Coefficiente di determinazione K_3	73
5.7	Coefficienti polinomiali K_10	73
5.8	Coefficiente di determinazione K_10	73
5.9	Valori coefficienti trapezoidali di K_10	77
5.10	Valori coefficienti trapezoidali di K_3	77
5.11	Errori del sensore K_3	78
5.12	Errori del sensore K_10	78

Abstract

L'innovazione nel campo dei sensori capacitivi sta apportando significativi progressi nella misurazione e nel rilevamento di varie grandezze fisiche. Questi sensori, basati sul principio della variazione di capacità elettrica, offrono vantaggi come la sensibilità elevata, la risposta rapida e la capacità di rilevare anche piccole variazioni nel campo elettrico. Grazie a nuovi materiali, tecniche di fabbricazione avanzate e al continuo sviluppo delle tecnologie di elaborazione del segnale, i sensori capacitivi stanno diventando sempre più compatti, precisi e affidabili. Questa costante innovazione apre nuove possibilità di applicazione in diversi settori, come ad esempio l'automazione industriale. Un esempio in questo ambito sono i sistemi di presa di oggetti, che possono essere basati su gripper meccanici o sistemi ad aspirazione pneumatici, che hanno sempre più il bisogno di essere più versatili, facili da controllare e a basso consumo energetico.

In questo contesto, il seguente lavoro di tesi presenta lo sviluppo e la caratterizzazione di un sensore capacitivo multi-elettrodo da poter essere integrato su un sistema di presa per abilitarne la valutazione del contatto degli oggetti, sia di materiale isolante che conduttivi.

Durante lo studio, sono stati condotti esperimenti di contatto su varie tipologie di materiali, inclusi quelli isolanti, conduttivi e con l'interazione del dito umano. I dati acquisiti dal sensore sono stati analizzati e utilizzati per la validazione di un modello analitico utilizzato per stimare la posizione del contatto sugli elettrodi, basandosi sulla variazione di capacità generata. Tale caratterizzazione ha permesso di associare specifiche variazioni di capacità a determinate posizioni di tocco sul sensore.

Dai risultati ottenuti nello studio, è evidente che l'impiego dei sensori capacitivi all'interno dei gripper robotici offre un potenziale significativo per migliorarne le prestazioni e ottimizzare la caratterizzazione della presa.

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Sensori Capacitivi

Un sensore può essere definito come un dispositivo in grado di reagire attraverso un segnale se riceve uno stimolo dall'ambiente circostante. I sensori svolgono un ruolo fondamentale in diversi contesti, da quelli uso comune a quelli industriali, e sono presenti in ogni oggetto di uso quotidiano.

Si possono trovare una gran quantità di differenti classificazioni per i sensori [21]. Di seguito troviamo le classificazioni più comuni:

- In base al contributo energetico (passivo/attivo);
- In base al tipo di segnale d'uscita (analogico/digitale);
- In base alla natura dell'informazione da elaborare (biologica, chimica, ecc.);
- In base al tipo di meccanismo di trasduzione (ottico, termico, elettrico, meccanico, ecc.).

I sensori che sono stati trattati in questo contesto sono quelli di tipo capacitivo.

I sensori capacitivi sono dispositivi impiegati per rilevare o misurare la variazione indotta nel campo elettrostatico di un condensatore, al fine di identificare la natura conduttiva o isolante di un materiale. Sono ampiamente utilizzati in diversi settori, tra cui l'elettronica di consumo, l'automazione industriale, l'automotive e l'elettronica medica.

Gli esempi più comuni delle sue applicazioni sono [7]:

- **Misurazione:** pressione (le variazioni di pressione possono essere rilevate direttamente come variazione della costante dielettrica o variazione della

tangente alla perdita), portata (i misuratori di portata capacitivi possono misurare direttamente lo spostamento o convertire la pressione in spostamento attraverso un diaframma), concentrazione chimica (i sensori chimici capacitivi possono rilevare il contenuto di analita direttamente come variazione della costante dielettrica).

- **Rilevamento di prossimità:** rilevamento del personale (apertura di sicurezza quando una persona è troppo lontana o troppo vicina), rilevamento del veicolo, rilevamento di oggetti.
- **Comunicazione:** la propagazione della radiofrequenza nel campo vicino può essere misurata da un ricevitore con un'antenna capacitiva.

In Figura 1.1 è mostrata la struttura capacitiva più semplice ovvero un condensatore costituito due piastre parallele separate da un materiale dielettrico. La capacità elettrica è una proprietà dei condensatori che indica la loro capacità di immagazzinare carica elettrica.

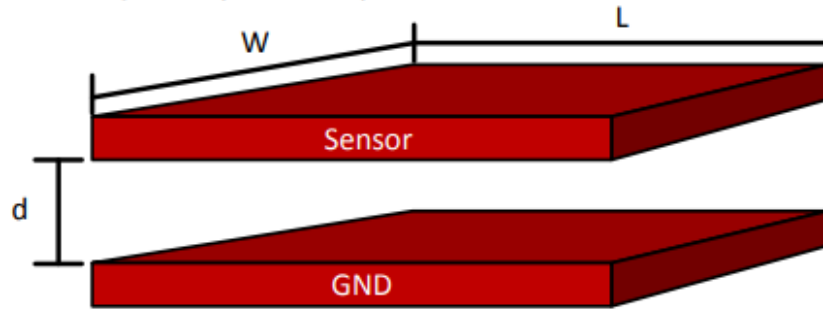


Figura 1.1: Condensatore a facce piane parallele [7]

La capacità di un condensatore a piastre parallele è calcolata dall'equazione:

$$C = \frac{\epsilon_r * \epsilon_0 * A}{d}$$

dove:

- **A** è l'area delle due piastre (in metri);
- ϵ_r è la costante dielettrica del materiale tra le piastre;
- ϵ_0 è la permittività dello spazio libero ($8,85 \times 10^{-12} C^2 / (N * m^2)$);
- **d** è la distanza tra le piastre (in metri).

La capacità elettrica si misura in Farad (F), che rappresenta la quantità di carica, misurata in Coulomb (C), immagazzinata su un condensatore per unità di tensione, misurata in Volt (V).

Un condensatore a facce parallele è un tipo di condensatore costituito da due armature conduttive parallele piatte di dimensioni simili, separate da un dielettrico. Quando si applica una differenza di potenziale, anche detta tensione, si crea tra le due armature un campo elettrico. A causa della presenza del dielettrico, viene immagazzinata una carica elettrica sulle armature: la carica positiva si accumula su una delle armature e la carica negativa sull'altra. Il dielettrico svolge un ruolo importante nel condensatore e può essere costituito da un mezzo isolante (o il vuoto), aria, o un qualsiasi materiale non conduttore come carta, plastica o vetro. Essi sono materiali non metallici ad alta resistività e con un divario energetico molto ampio. La costante dielettrica di un materiale influenza la capacità di un condensatore nel memorizzare energia quando viene applicata ad esso una tensione. I condensatori sfruttano questa proprietà per accumulare energia nel campo elettrico e amplificare l'effetto della capacità.

Nella Tabella 1.1 sono riportate misure tipiche delle costanti dielettriche più comuni [11]:

Materiale	Costante dielettrica (ϵ_r)
Vuoto	1 (per definizione)
Aria	1,00059
Vetro	3,7 - 10
Mica	4,0 - 8
Nylon	3
Silicone	11 - 12,0
Gomma di silicone	3,2 - 9,8
Composto per stampaggio in silicone	3,7
Carta	2
Plexiglass	3,4
Policarbonato	2,9 - 3,0
Polietilene	2,2 - 2,4
Polistirene	2,56
PET	3
Gomma	3
PMMA	2,6 - 4

Tabella 1.1: Costanti dielettriche dei materiali più comuni [11]

Le piastre di un condensatore cariche hanno la stessa intensità di carica, oppo-

sta nel segno, distribuita uniformemente sulle superfici delle lastre, dalla piastra con potenziale maggiore partono linee di campo elettrico che si propagano fino alla piastra con carica inferiore.

Nella Figura 1.2 è rappresentato l'andamento del campo elettrico in un condensatore

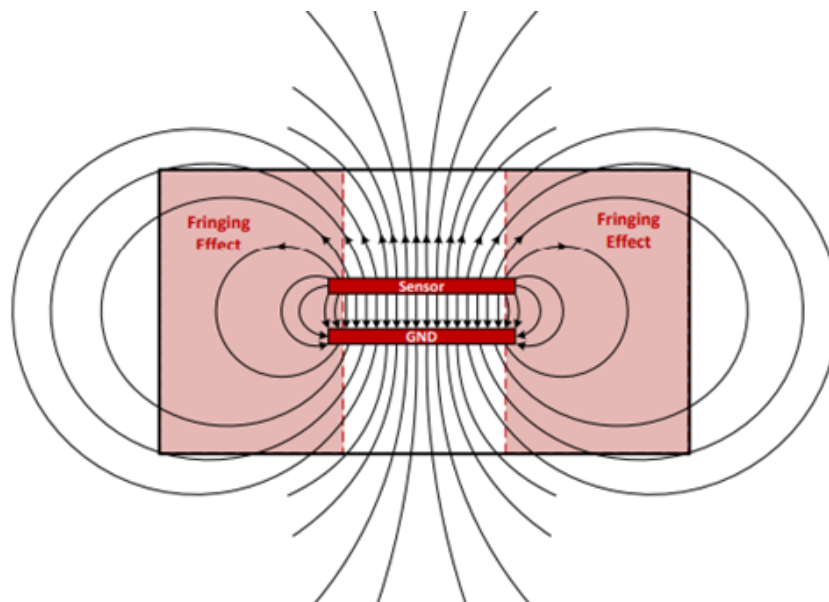


Figura 1.2: Campo elettrico in un condensatore a facce piane parallele [22]

Se la distanza tra le due piastre (d) è contenuta si può affermare che il campo elettrico tra le due piastre è uniforme. Tuttavia, le linee di campo elettrico si generano anche sui bordi delle piastre e quindi all'esterno del condensatore a causa di effetti di bordo; tale campo sarà di intensità minore ma può comunque influire sulla precisione delle misurazioni del sistema.

I sensori capacitivi possono essere suddivisi in due categorie principali: sensori in modalità *self capacitance* e sensori in modalità *mutual capacitance*, come mostrato in Figura 1.3. Entrambi i tipi di sensori sfruttano la variazione di capacità per rilevare la presenza o la posizione di un oggetto, ma differiscono nella loro architettura e modalità di funzionamento [15]:

1. Sensori di *self capacitance* in cui l'oggetto da rilevare può fungere da elettrodo di contro ovvero come un elettrodo ausiliario o un elemento nel sistema che viene utilizzato come punto di riferimento per la misurazione o l'interazione con l'oggetto in questione. La presenza e il comportamento dell'oggetto influenzano la capacità misurata, fornendo un parametro di confronto per valutare le variazioni di capacità rispetto all'oggetto o all'ambiente circostante.

I sensori di *self capacitance* sono comunemente utilizzati in pulsanti capacitivi, pad di scorrimento e altre applicazioni in cui è necessario rilevare la pressione o la posizione di un oggetto su una superficie [5].

2. Sensori di *mutual capacitance* in cui un elettrodo viene attivato come trasmettitore mediante un segnale armonico, mentre il secondo elettrodo funge da ricevitore. Quando un oggetto si trova nelle vicinanze del ricevitore, la sua presenza causa una deviazione del flusso di corrente elettrica, che viene spostata verso una terra distante. Questo comporta un blocco parziale delle linee di campo elettrico tra il trasmettitore e il ricevitore, generando una variazione nella capacità rilevata tra i due elettrodi. La variazione di capacità viene misurata utilizzando tecniche di rilevamento specifiche. I sensori di *mutual capacitance* sono comunemente utilizzati nelle tecnologie touch screen, in cui è necessario rilevare tocche precise e multitocco [5].

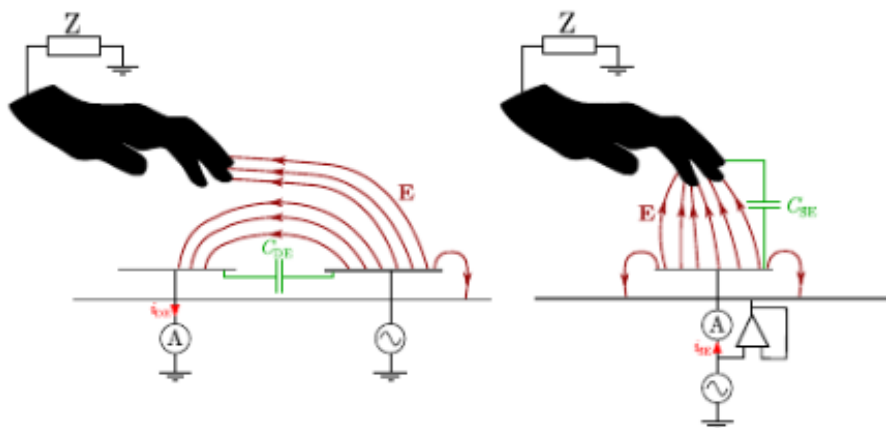


Figura 1.3: Modalità di rilevamento della capacità: a sinistra *mutual capacitance*, a destra *self capacitance* [15]

Nella rilevazione, spesso vengono adottati schemi di eccitazione a modulazione temporale, in cui un singolo elettrodo viene configurato come trasmettitore mentre gli altri elettrodi sono in modalità di ricezione (modalità di *mutual capacitance*), oppure vengono impostati su un valore di polarizzazione per rimanere inattivi (modalità di *self capacitance*).

1.2 Gripper Robotici

La presa e la manipolazione sono due funzioni fondamentali dei robot industriali nel contesto della produttività aziendale e in vari altri ambiti applicativi, come

l'automazione dei processi di produzione, la logistica, la medicina, l'esplorazione spaziale, l'agricoltura e molti altri settori.

La presa di un oggetto rappresenta la capacità intrinseca di un robot di prendere e mantenere in modo stabile un oggetto, superando la presenza di eventuali disturbi esterni. La manipolazione si riferisce alla capacità di un robot di applicare forze controllate sull'oggetto per indurre la sua rotazione o per effettuare uno spostamento rispetto al sistema di riferimento del robot.

Oltre a queste funzioni essenziali, i robot industriali sono in grado di eseguire una vasta gamma di azioni sfruttando i loro organi terminali. Ad esempio, possono effettuare movimenti di locomozione per spostarsi da una posizione all'altra, eseguire operazioni di scavo per creare cavità o scavi, selezionare oggetti specifici, effettuare lavorazioni su superfici e svolgere molte altre attività, a seconda delle loro specifiche capacità e del contesto applicativo in cui vengono impiegati.

Le pinze robotiche tradizionali sono costituite da un insieme di giunti e collegamenti per lo più rigidi [14]. Le pinze robotiche sono dispositivi meccanici impiegati dai robot al fine di eseguire l'afferraggio e la manipolazione di oggetti. Queste pinze sono progettate in base alle specifiche esigenze dell'applicazione e possono presentare variazioni in termini di forma, dimensione e modalità di funzionamento. Un esempio di pinze tradizionali è visibile nella Figura 1.4: esse sono costituite da una combinazione di componenti meccanici, quali dita, ganasce o morsetti, che si muovono in maniera coordinata per afferrare e rilasciare gli oggetti.

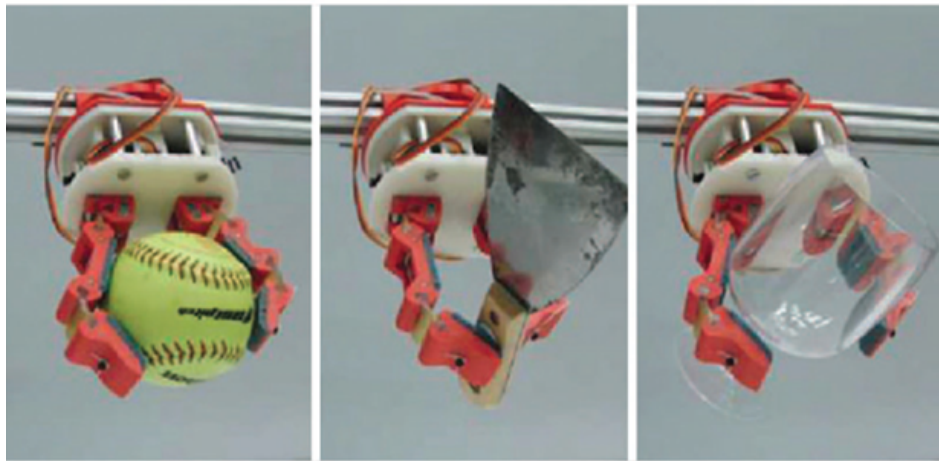


Figura 1.4: Esempio di pinze robotiche [12]

Alcuni sistemi di presa sono attivati manualmente o pneumaticamente, mentre altri possono essere controllati mediante sistemi elettronici o idraulici. Tali organi di presa offrono una vasta gamma di funzionalità nella manipolazione dell'oggetto e

sono utilizzate in svariati contesti industriali, quali assemblaggio, confezionamento, movimentazione di materiali e altre applicazioni specifiche.

Possono essere dotate di sensori propriocettivi, ovvero di dispositivi utilizzati per rilevare e misurare le grandezze fisiche relative al corpo su cui si trovano o a parti di esso. Nel contesto delle pinze robotiche tradizionali, i sensori propriocettivi sono integrati per fornire informazioni sulla posizione, la velocità, la forza o la tensione degli elementi di tenuta della pinza stessa. Questi sensori possono includere sensori ad effetto Hall per la misurazione di campi magnetici, encoder per la rilevazione della posizione angolare, sensori di coppia per la misurazione della forza esercitata e sensori di tensione per la misura della tensione elettrica. Questi dati provenienti vengono poi utilizzati per monitorare e controllare il movimento dell'organo terminale, consentendo una manipolazione precisa e controllata degli oggetti afferrati.

Per rilevare e acquisire informazioni provenienti dall'ambiente esterno o dagli oggetti circostanti sono utilizzati, invece, sensori esteroctivi. Nelle pinze robotiche tradizionali, i sensori esteroctivi sono integrati per ottenere informazioni sugli oggetti che si stanno manipolando. Questi sensori possono includere sensori di pressione per rilevare la forza esercitata durante la presa sugli oggetti, sensori ottici per rilevare la presenza o le caratteristiche ottiche degli oggetti, sensori resistivi e conduttivi per misurare la conducibilità elettrica o le proprietà di contatto degli oggetti, e sensori elettromagnetici per rilevare campi magnetici o altre proprietà magnetiche degli oggetti. Questi sensori consentono al robot di adattare il suo comportamento in base alle caratteristiche degli oggetti afferrati, garantendo una presa sicura e affidabile e facilitando una manipolazione precisa e controllata.

Sebbene le pinze antropomorfe abbiamo subito diversi sviluppi negli anni ci sono ancora dei campi di applicazione in cui il loro uso risulta complesso [8] come l'elevata complessità meccanica e di controllo richiesta per raggiungere la velocità, la flessibilità e la destrezza delle mani umane e la difficoltà nel maneggiare oggetti morbidi e deformabili.

Recentemente, sono state descritte pinze antropomorfe più cedevoli e meccanicamente più semplici che fanno ricorso a componenti flessibili e parzialmente morbidi [19].

Materiali avanzati e componenti morbidi sono sempre più studiati per la progettazione di pinze più leggere, più semplici e possibilmente più universali. Il contatto tra una pinza rigida e un oggetto duro porta a urti che potrebbero danneggiare l'oggetto o non fargli eseguire la traiettoria desiderata. Una soluzione semplice ma solo parziale, ampiamente utilizzata negli organi terminali dei robot industriali, consiste nell'aggiungere materiali cedevoli agli elementi di presa (ad esempio nella semplice forma di cuscinetti in gomma).

La presa morbida è stata classificata in tre categorie: per *attuazione*, per *rigidi-*

tà controllata e per *adesione controllata*. Queste categorie possono essere combinate per ottenere prestazioni ottimali, e molte soluzioni utilizzano una combinazione di due tecnologie. La scelta della tecnologia e dei materiali più adatti dipenderà dalle proprietà dell'oggetto da manipolare, dalle condizioni ambientali (come umidità, pulizia), dalle richieste di forza e velocità, dai requisiti di consumo energetico e peso, dalla biocompatibilità e dai vincoli di integrazione o l'utilizzo di sensori esterni e metodi di controllo.

Le sfide generali per le pinze morbide includono robustezza, velocità, integrazione del rilevamento e controllo. I materiali migliorati (elastomeri, materiali a cambiamento di fase) ed i metodi di lavorazione svolgono un ruolo importante nei miglioramenti futuri.

Attraverso lo studio di [19], [18] e [4] è stato catalogato e raccolto lo stato dell'arte dei gripper robotici mettendoli in relazione con i Key Performance Indicator (KPI) definiti dalle caratteristiche maggiormente utilizzate per descrivere le diverse tipologie di gripper.

Nella Figura 1.5 sono presentate le immagini dei gripper riassunti nelle Tabella 1.2 e Tabella 1.3:

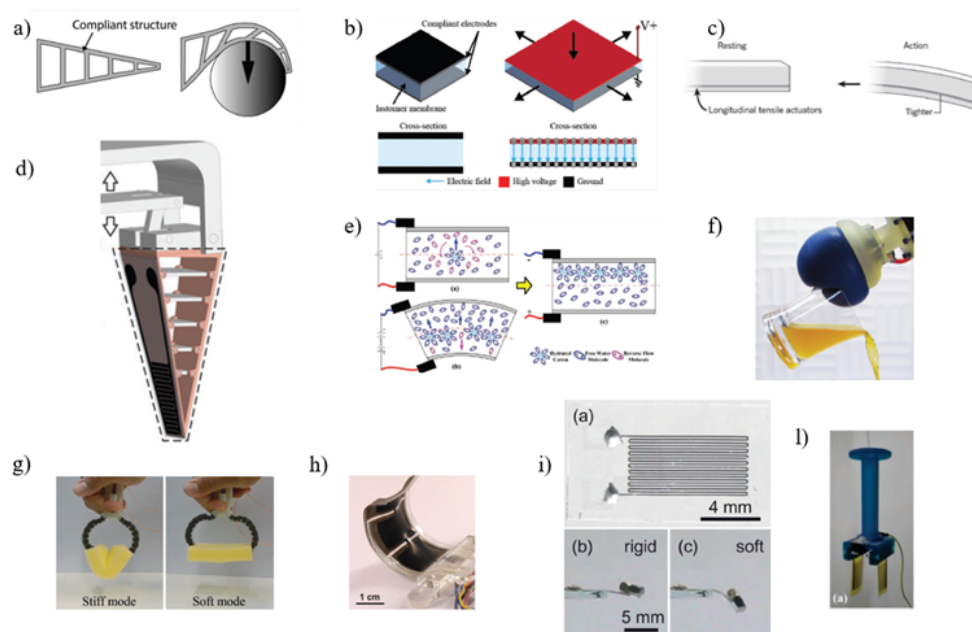


Figura 1.5: Gripper robotici: a) FinRay b) attuatori dielettrici elastomerici (DEA) c) attuatori elastomerici fluidici (FEA) d) FinEa e) compositi a polimero metallico ionico (IPMC) f) Granular jamming g) Dita azionate da tendini (Tendon driven) h) SMA i) Leghe a basso punto di fusione (LMPA) l) Elettroadesione. a)-i) [19], b) [4], l) [3]

KPIs	Fin Ray	Fin EA	DEAs (Dielectric Elastomer Actuator)	FEAs (Fluidic Elastomer Actuator)	IPMCs (Ionic Polymer-Metal Composites)	Granular jamming
Peso da movimentare	fino a 3 Kg	fino a 793,6 g		fino a 3,2 Kg	~ 15 mg	
Forza di presa [N]				max. 80-112 (dipende dalla pressione del fluido)		~ 35
Voltaggio di attuazione [V] (dove necessario)		max. 4-5 kV			1-5	
Velocità di attuazione [s]			0,1-1	0,1-6	1-10	0,1-1,1
Materiali su cui funziona	Non deformabili	Deformabili, non deformabili	Non deformabili	Non deformabili	Non deformabili	Non deformabili
Forme su cui funziona	Sferica, non sferica	Sferica, non sferica, planare	Sferica, non sferica, planare, concavo, deformabile	Sferica, non sferica, planare	Sferica, non sferica, planare	Sferica, non sferica
Condizioni della superficie	Qualsiasi	Qualsiasi	Qualsiasi	Qualsiasi	Qualsiasi	Qualsiasi
Ambienti su cui funziona	Amb. a T standard	Amb. a T standard	Amb. a T standard, fluidi conduttivi	Amb. a T standard	Amb. a T standard, amb.acquosi	Amb. a T standard
Forza normale / di taglio	Entrambe	Entrambe				
Consumo energetico per mantenimento presa [W]	10	10^{-1} (può diminuire)	10^{-1}	10	10^{-1}	10
Rapp. peso ogg. / peso gripper	4,5-16,3	4,5-16,3	8,7	2-68	2-3,5	7,6-15,1
Dimensioni ogg. [10^{-2} m]	0,01- ~ 60	max. $\phi 300mm$	1- ~ 8	0,1- ~ 100	0,1- ~ 4	0,43- ~ 30
Dimensioni gripper [10^{-2} m]	1,2-15,8	1,2-15,9	2-10,3	0,5-120	0,5-8	4,3-35,5
Categoria	Attuazione, controlled adhesion	Attuazione, controlled adhesion	Attuazione	Attuazione	Attuazione	Controlled stiffness
Rigidezza	Ogni cross-beam può avere una diversa rigidezza	Ogni cross-beam può avere una diversa rigidezza	~ 1 MPa		0,2-21 GPa (dipende dal tipo dimembrana ed elettrodi usati)	
Deformabilità	Alta	Alta				Bassa
Tipo di attuazione	Motore esterno	Motore esterno	Polimeri elettroattivi (voltaggio richiesto)	Attuatore pneumatico	Polimeri elettroattivi (voltaggio richiesto)	
Self-sensing	No	No	Si		Si	
Sensing element	ex.circuiti stampati	ex.circuiti stampati		ex. sensori di deformazione resistivi, rilevamento della forza utilizzando tessuto piezoresistivo		
Metodo di fabbricazione	Litografia (SLA), stampa 3D	Litografia (SLA), stampa 3D		Stampaggio con aggiunta di elementi funzionali, stampa 3D		

Tabella 1.2: KPIs Gripper

KPIs	Tendon Driven)	SMA (Shape Memory Alloy)	ER and MR (Electrorheological Fluid and Magnetorheological Fluids)	LMPAs (Low Melting Point Alloy)	SMPs (Shape Memory Materials)	Electro adhesion Materials)
Peso da movimentare						
Forza di presa [N]						
Voltaggio di attuazione [V] (dove necessario)						max. 4-5 kV
Velocità di attuazione [s]		0,67-11	0,001-0,46	30-40	5-60	0,1
Materiali su cui funziona					Qualsiasi	Conduttori, dielettrici
Forme su cui funziona	Sferica, non sferica, planare	Sferica, non sferica, planare	Sferica, non sferica	Sferica, non sferica	Sferica, non sferica	Sferica, planare, deformabile
Condizioni della superficie	Qualsiasi	Qualsiasi	Qualsiasi	Qualsiasi	Qualsiasi	Pulita e asciutta
Ambienti su cui funziona	Amb. a T standard	Amb. a T standard			Amb. a T standard	
Forza normale / di taglio						
Consumo energetico per mantenimento presa [W]		1	10^{-1} (ER) 1 (MR)	1	1	10^{-1}
Rapp. peso ogg. / peso gripper		15-25,8		2,2-5,5	30-925	54,7
Dimensioni ogg. [10^{-2} m]		0,2- ~ 20	~ 5	~ 5-12	~ 0,5-8	3- ~ 100
Dimensioni gripper [10^{-2} m]		0,9-11,5	~ 5	3,5-9	~ 0,5-15,6	3-4,8
Categoria	Attuazione	Attuazione	Controlled stiffness	Controlled stiffness	Controlled stiffness	Controlled adhesion
Rigidezza		Dipende dal materiale e dallo stato di transizione		3-9 GPa (stato solido)	Dipende dal materiale e dallo stato di transizione	
Deformabilità		Bassa				
Tipo di attuazione	Motore esterno	Shape Memory Material (Actuation)			Shape Memory Material (Controlled stiffness)	
Self-sensing	No					
Sensing element	ex. EAD					
Metodo di fabbricazione						

Tabella 1.3: KPIs Gripper

Nonostante i dati presenti nelle Tabella 1.2 e 1.3 non riflettano i massimi limiti di prestazione delle tecnologie selezionate, forniscono una base quantitativa per confrontare le diverse tecnologie in termini di rapporto tra la massa dell'oggetto

e la massa del gripper, dimensioni del gripper e dell'oggetto, velocità, consumo energetico e requisiti relativi alle condizioni superficiali. A causa delle leggi di scala, esistono principi operativi preferiti diversi per diverse scale di dimensioni.

La Figura 1.6 offre una panoramica qualitativa dell'adeguatezza delle tre diverse tecnologie di gripper per diverse forme di oggetti: ad esempio, gli oggetti piatti sono facili da afferrare utilizzando l'adesione controllata, ma non la rigidità variabile [19].

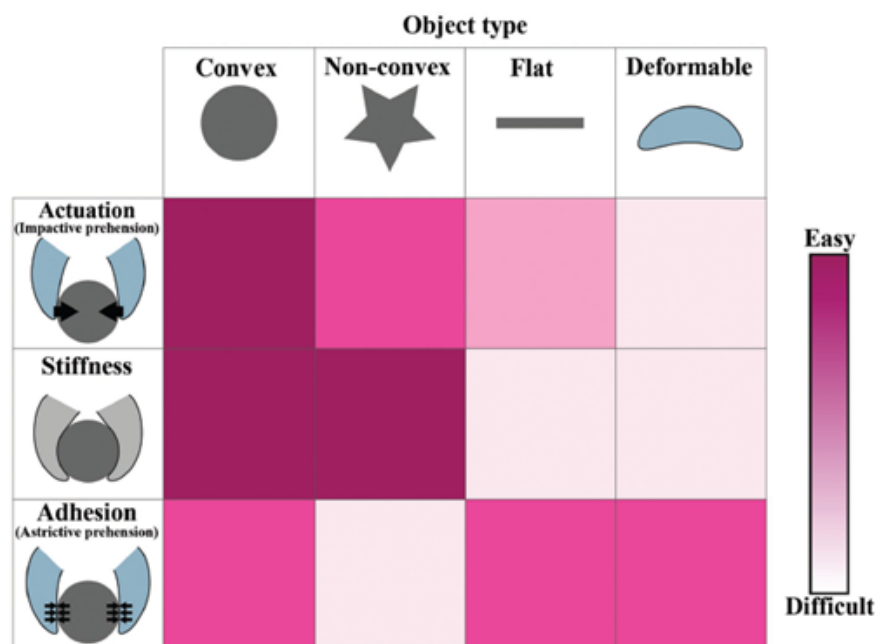


Figura 1.6: Possibile classificazione delle caratteristiche dei gripper morbidi divisi per diverse tecnologie di presa e tipologie di oggetti [19]

La presa mediante *attuazione* coinvolge la piegatura delle dita o degli elementi del gripper intorno all'oggetto, come quando utilizziamo le nostre dita per afferrare un uovo o un bicchiere d'acqua. Nei gripper morbidi, l'afferraggio di un oggetto può essere realizzato attraverso l'adattamento di strutture flessibili deformate da attuatori esterni o integrati. Le tecnologie rappresentative degli attuatori includono strutture passive con motori esterni, attuatori elastomerici fluidici, polimeri elettroattivi e materiali a memoria di forma.

Le strutture passive possono sfruttare le forze di reazione generate dal contatto con l'oggetto o la trazione di cavi incorporati per deformarsi e ottenere la presa dell'oggetto. Gli attuatori elastomerici fluidici si basano sull'espansione di camere elastomeriche strutturate con geometrie asimmetriche o fibre di rinforzo per ottenere la deformazione desiderata.

I polimeri elettroattivi, come gli attuatori elastomerici dielettrici e i compositi metallo-polimeri ionici, possono deformarsi attivamente in risposta a stimoli elettrici. Anche l'effetto di memoria di forma di materiali come le leghe a memoria di forma e i polimeri a memoria di forma è spesso sfruttato per la presa morbida.

La scelta della tecnologia e dei materiali più adatti per un dato compito dipenderà dalle proprietà dell'oggetto da manipolare, dall'ambiente operativo, dalla forza e velocità richieste, dal consumo energetico consentito, dal peso, dalla biocompatibilità e da altri vincoli.

La presa mediante *rigidità controllata* sfrutta la notevole variazione di rigidità di alcuni materiali o combinazioni di materiali per trattenere un oggetto. È necessario un attuttore per avvolgere parzialmente l'oggetto con una parte del gripper, ma poiché il gripper è morbido, la forza di attuazione può essere molto bassa, consentendo di afferrare oggetti estremamente delicati. Esempi significativi includono materiali a cambio di fase come polimeri a memoria di forma e leghe a basso punto di fusione, il fenomeno del *granular jamming* e l'uso di fluidi elettroreologici (ER) / magnetoreologici (MR). Questi gripper possono essere veloci e consentono la regolazione della rigidità a un livello desiderato. Tuttavia, esistono limitazioni riguardo all'ampiezza di variazione della rigidità che può essere ottenuta, e nei sistemi termici possono essere presenti tempi di risposta prolungati.

La presa mediante *adesione controllata*, simile alla *rigidità controllata*, richiede un metodo di attuazione per avvolgere parzialmente l'oggetto. L'adesione controllata tramite elettroadesione o adesivi secchi (come il geckoadesivo) si basa sulle forze superficiali presenti all'interfaccia tra il gripper e l'oggetto. Questo principio operativo è particolarmente vantaggioso quando si manipolano oggetti estremamente delicati, poiché evita l'applicazione di forze di compressione elevate richieste dalla presa mediante attuazione, consentendo l'ottenimento di forze di taglio elevate senza esercitare complessivamente forze normali elevate sull'oggetto. La presa mediante *adesione controllata* è anche ideale per oggetti piatti o oggetti che non possono essere completamente avvolti. Tuttavia, presenta limitazioni come la necessità di superfici pulite, relativamente lisce e asciutte.

Le sfide generali per i gripper morbidi includono la robustezza, la velocità, l'integrazione dei sensori e il controllo. Miglioramenti futuri saranno influenzati da materiali avanzati (come elastomeri e materiali a cambio di fase) e metodi di elaborazione.

1.3 Elettroadesione

L'elettroadesione, inizialmente descritta da due scienziati danesi [10], Alfred Johnsen e Knud Rahbek, negli anni '10, è stata usata per indicare l'attrazione elet-

trostatica generata tra due materiali a contatto quando tra essi è presente una differenza di potenziale elettrico.

Il fenomeno dell'elettroadesione (EA) descrive la forza attrattiva sperimentata tra un conduttore e un semiconduttore quando i due materiali sono in contatto e viene applicata una tensione ai loro capi. Le tecnologie EA estendono l'applicabilità dell'adesione controllabile elettricamente a molti più materiali e applicazioni, tra cui il bloccaggio di oggetti, lo scivolamento robotico e l'arrampicata, le interconnessioni meccaniche ed elettriche, e dispositivi di presa robotici per attività di movimentazione dei materiali.

Tipicamente quattro componenti sono impiegati in un sistema elettroadesivo [2]:

1. Una patch elettroadesiva;
2. Una fonte di alimentazione ad alta tensione;
3. Un'unità di controllo;
4. Un materiale di supporto su cui aderire o da prelevare.

Un esempio di sistema elettroadesivo è mostrato in Figura 1.7:

Un layout tipico di un dispositivo elettroadesivo è quello con elettrodi interdigitati mostrato in Figura 1.8:

Questo tipo di dispositivo è costituito da uno strato a strati in cui sono presenti una serie di strisce di elettrodi polarizzate in modo alternato (rappresentate in rosso e grigio), comunemente chiamate "coppie di elettrodi". Queste coppie di elettrodi sono racchiuse all'interno di due strati dielettrici. Lo strato dielettrico inferiore (colorato in giallo), noto anche come "strato dielettrico principale", è il contatto diretto con l'oggetto che viene afferrato. Questo strato influisce principalmente sulla pressione di presa attraverso caratteristiche come lo spessore, la rigidità dielettrica, la permittività e la resistività.

Lo strato dielettrico superiore (colorato in ciano) svolge due funzioni principali: da un lato, isola gli elettrodi dall'ambiente circostante e, dall'altro, aumenta la tensione di rottura del dispositivo. Ciò permette di applicare una pressione di presa più elevata senza compromettere la sicurezza e l'affidabilità del sistema. Può anche essere utilizzato per fissare l'interfaccia elettrodo-oggetto ad una struttura ospite, se necessario.

Il supporto utilizzato può essere categorizzato come rigido o flessibile, e in alcuni casi può anche essere estensibile. La scelta del tipo di supporto dipende principalmente dai requisiti dell'applicazione, inclusi i criteri di forza di presa e la resilienza del dispositivo. Poiché la forza di presa dipende in modo significativo

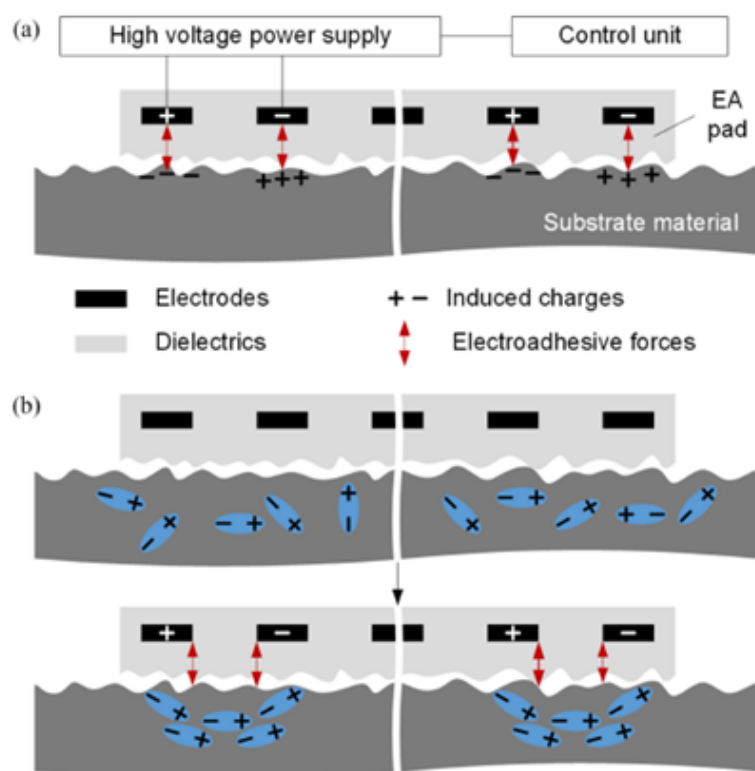


Figura 1.7: Vista in sezione trasversale di un sistema elettroadesivo. (a) Elettroadesione su materiali conduttivi. (b) Elettroadesione su materiali isolanti. “+” indica le cariche positive, “-” quelle negative o il ground [10]

dall’area di contatto tra il dispositivo elettroadesivo e l’oggetto da afferrare, è importante considerare la forma e la superficie dell’oggetto.

Per controllare in modo dinamico le tensioni applicate al sistema, un’unità di controllo è collegata a una fonte di alimentazione ad alta tensione. Quando una tensione viene applicata agli elettrodi, si generano forze elettroadesive tra il pad EA e il materiale del substrato. L’effetto di adesione può essere interrotto semplicemente spegnendo l’alimentazione.

L’elettroadesione offre diversi vantaggi chiave rispetto ad altri metodi di adesione come l’adesione magnetica e pneumatica. Alcuni dei principali vantaggi dell’elettroadesione includono [3], [2]:

1. **Maggiore adattabilità:** l’elettroadesione consente di aderire o sollevare praticamente qualsiasi materiale o superficie, che vanno dalle pellicole di alluminio e carta vetrata al calcestruzzo e alle lastre di vetro. Ciò conferisce al sistema una maggiore flessibilità.

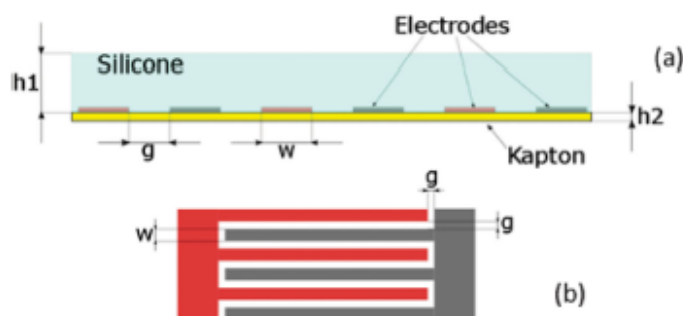


Figura 1.8: Sezione trasversale del dispositivo elettroadesivo (a) e vista frontale parziale dell'array di strisce di elettrodi (b) [3]

2. **Utilizzo in diversi ambienti:** l'elettroadesione può essere impiegato in ambienti polverosi, a basse pressioni e persino nello spazio. Questa versatilità lo rende adatto a una vasta gamma di applicazioni.
3. **Riduzione della complessità del sistema:** l'elettroadesione sfrutta materiali e strutture meccanicamente leggeri e semplici, insieme a componenti di controllo elettrico semplici. A differenza di altri sistemi di adesione e presa che richiedono pompe ad alta intensità energetica o motori elettrici complessi, l'elettroadesione semplifica il sistema complessivo.
4. **Consumo energetico ridotto:** nonostante richieda l'applicazione di una tensione relativamente elevata (tipicamente nell'ordine dei kV), l'elettroadesione richiede solo una bassa corrente (di solito nell'ordine dei μA). Ciò porta a un consumo energetico complessivamente ridotto rispetto ad altri metodi di adesione.
5. **Sollevamento di oggetti delicati:** grazie alla capacità di sospensione senza contatto o all'utilizzo di pad elettroadesivi morbidi, l'elettroadesione consente il sollevamento di oggetti delicati e di valore elevato. Ciò contribuisce a proteggere gli oggetti sensibili durante il processo di presa.

Quando si applica una tensione elevata, di solito compresa tra 1kV e 6 kV, agli elettrodi spazati all'interno di un pad elettroadesivo, si crea un intenso campo elettrico tra gli elettrodi. Quando il pad caricato entra in contatto con una superficie conduttrice, si generano cariche immagine sulla superficie del conduttore, provocando una forza di attrazione tra il pad e la superficie Figura 1.7a. In alternativa, quando il pad viene a contatto con una superficie isolante, si verificano polarizzazioni elettriche all'interno dei materiali isolanti, creando un'attrazione tra

le cariche vicine nei dipoli indotti e il pad in Figura 1.7b. Questo accumulo di carica (e quindi l'accumulo di una forza di adesione netta) richiede un certo tempo, che dipende dai materiali e dalla forma del potenziale applicato. Quando la tensione elevata viene interrotta, la forza adesiva diminuisce nel tempo. Questo decadimento richiede anch'esso un certo tempo, solitamente nell'ordine dei secondi, ma può prolungarsi anche per diverse ore a seconda del tipo di materiali isolanti e del substrato. Questi tempi di accumulo e decadimento hanno un impatto significativo sul ciclo di adesione/rimozione.

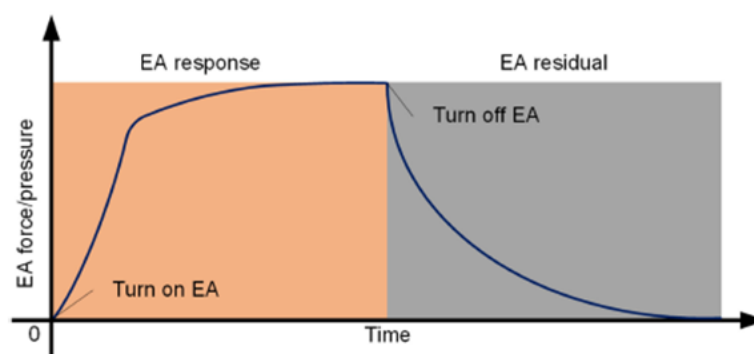


Figura 1.9: Il comportamento dinamico tipico dell'elettroadesione e la curva della forza/pressione residua nel tempo [10]

La risposta dell'EA è definita come il processo che va dall'inizio dell'applicazione di una tensione elevata fino al raggiungimento della massima forza elettroadesiva, quando l'accumulo di cariche indotte è completo. Il residuo dell'EA, invece, indica il processo che si verifica dopo che la tensione elevata è stata interrotta, fino alla completa dissipazione delle cariche residue o intrappolate nei dielettrici dell'EA. Questa caratteristica dinamica (Figura 1.9) è principalmente causata dalla polarizzazione e depolarizzazione nel tempo dei dielettrici che rivestono gli elettrodi e le molecole sulle superfici aderenti (per gli oggetti non conduttori). È fondamentale prestare attenzione a questa caratteristica dinamica durante la progettazione, la produzione, la caratterizzazione e l'applicazione delle tecnologie EA. La natura dinamica del fenomeno EA rappresenta una sfida pratica, ma allo stesso tempo offre un interessante campo di ricerca che richiede soluzioni economiche e robuste per accelerare i processi di adesione e rimozione EA. Ciò è particolarmente importante quando si lavora con oggetti relativamente pesanti o difficili da polarizzare, o quando si deve rimuovere il dispositivo da materiali estremamente leggeri e flessibili.

Capitolo 2

Progettazione ed analisi del sensore

I prodotti che impiegano controlli per la rilevazione del contatto sono dispositivi o sistemi che consentono all'utente di interagire tramite il contatto fisico con specifiche componenti. Tali prodotti sono progettati per rilevare l'input dell'utente attraverso sensori in grado di identificare il tocco o la pressione su determinate parti. Il loro processo di progettazione è un procedimento complesso che implica diverse decisioni, come la scelta dei materiali da utilizzare per la loro costruzione e il soddisfacimento dei requisiti meccanici ed elettrici. Un elemento fondamentale di questo processo è la progettazione dei sensori che costituiscono direttamente l'interfaccia con l'utente, come pulsanti, slider, ruote e touchscreen.

Questa tipologia di sensori è classificata in base alla dimensione geometrica [5]:

- **Sensori con dimensione zero:** sono caratterizzati dalla rappresentazione di un singolo punto di contatto. L'implementazione tipica di un sensore a zero dimensioni è quella di un pulsante.
- **Sensori con una dimensione:** sono caratterizzati dalla capacità di rilevare il movimento lineare di un dito durante il tocco, lungo un singolo asse. Le implementazioni tipiche dei sensori a una dimensione comprendono gli slider e le ruote.
- **Sensori con due dimensioni:** sono caratterizzati dalla capacità di rilevare il movimento di un dito durante il tocco lungo due assi. Le implementazioni tipiche dei sensori a due dimensioni includono i touchscreen e i touchpad.

Queste tipologie differenti di sensori sono riportate in Figura 2.1.

In questo lavoro di tesi è proposto l'implementazione di un sensore di tipo "slider" che usa la tecnologia di *self capacitance* [5]. Questo tipo di sensore viene di solito utilizzato solo con metodi di costruzione di tipo planare.

Possono essere considerati due tipi di sensori:

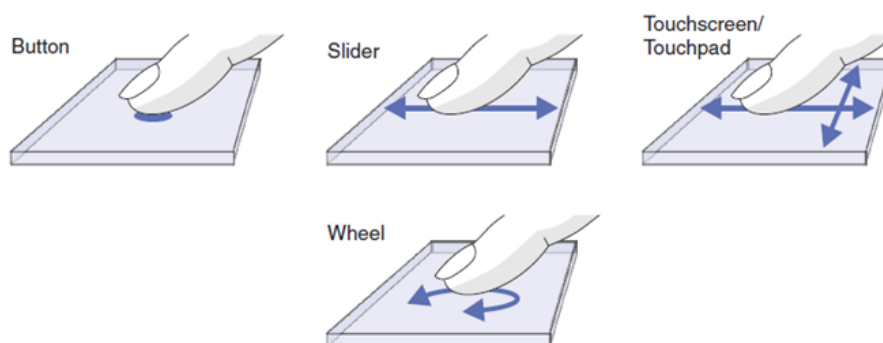


Figura 2.1: Tipologie di sensori touch [5]

- **Sensori con interpolazione spaziale:** questo tipo di sensori sfrutta la forma degli elettrodi per ottenere un'interpolazione spaziale dei campi elettrici sopra il sensore.
- **Sensori con interpolazione resistiva:** i sensori utilizzano resistori fisici per ottenere un'interpolazione elettrica degli elettrodi. Questo tipo di sensore consente una progettazione più semplice degli elettrodi e permette anche di costruire sensori di dimensioni maggiori.

Una delle considerazioni più importanti da tenere presente riguardo agli slider è che essi funzionano al meglio quando presentano una sensibilità ben bilanciata su tutti gli elettrodi che lo compongono. È fondamentale evitare di creare un carico di terra irregolare o eccessivo sotto gli slider, in quanto ciò comprometterebbe la loro utilizzabilità. Un carico di terra moderato o uniforme potrebbe essere accettabile, ma ridurrebbe la risoluzione dell'output dei sensori [5].

È quindi consigliabile evitare di far passare tracce o componenti estranei sotto i sensori degli slider. L'introduzione di tali elementi potrebbe influire negativamente sulle prestazioni e sulla precisione dei sensori. Pertanto, è consigliato mantenere l'area sotto i sensori il più priva possibile di elementi estranei per garantire un funzionamento ottimale e affidabile dei dispositivi [5].

Le seguenti linee guida devono essere seguite durante la progettazione delle tracce per i sensori di slider e ruote:

- Eseguire sempre le connessioni dei canali insieme come gruppo e mantenerle lontane da fonti di disturbo e carichi di terra.
- Effetto dell'ombra della mano: quando un sensore è particolarmente grande rispetto a una mano, è possibile rilevare un falso tocco dalla mano stessa quando viene tenuta sopra il sensore, anziché dal dito dell'utente. Questo

è noto come effetto dell'ombra della mano. Questo effetto rappresenta un problema particolare per slider di grandi dimensioni che utilizzano lo stile di elettrodi a self capacitance. Questi elettrodi vengono generalmente scansiti in modo che tutti i canali vengano misurati contemporaneamente, il che rende tutti i canali ugualmente sensibili al tocco.

2.1 Metodo di interpolazione spaziale

Un sensore di tipo slider interpolato spazialmente è progettato per rilevare con precisione il movimento di uno slider lungo un asse specifico, come ad esempio su/giù o sinistra/destra. Questo tipo di sensore utilizza elettrodi che sono direttamente collegati al chip del sensore e la loro forma dipende dalle dimensioni dello slider stesso.

Un esempio di configurazione degli elettrodi è quella degli "due elettrodi più due metà". In questa configurazione, il canale più alto (ovvero il primo elettrodo rilevato) dello slider viene diviso a metà, creando due elettrodi separati. L'ordine dei canali, cioè la disposizione degli elettrodi lungo lo slider, determina la direzione in cui il sensore interpreta il movimento. Ad esempio, se gli elettrodi sono disposti in ordine da sinistra a destra, il sensore rileverà il movimento orizzontale dello slider.

Questa configurazione offre diversi vantaggi. Innanzitutto, consente di ottenere una maggiore risoluzione nella rilevazione del movimento. Poiché gli elettrodi sono posizionati in modo più ravvicinato lungo lo slider, anche i piccoli spostamenti possono essere rilevati con precisione. Inoltre, permette di evitare eventuali problemi di compensazione dovuti a deviazioni non lineari dello slider. Se ad esempio un elettrodo non funziona correttamente in una determinata regione dello slider, gli altri elettrodi possono comunque fornire informazioni accurate sul movimento.

2.1.1 Slider di piccole dimensioni

Nel caso di uno slider di piccole dimensioni, la sua lunghezza complessiva è compresa tra i 21 e i 26 mm. È importante notare che, poiché lo slider è di dimensioni ridotte rispetto a quelle di un dito, la linearità e l'intervallo utilizzabile sul sensore vengono compromessi a vantaggio di geometrie elettrodi semplici. Uno slider di piccole dimensioni utilizza elettrodi rettangolari semplici (come illustrato nella Figura 2.2). Questo design si basa sul tocco del dito sulla superficie degli elettrodi stessi per l'interpolazione dei canali. Si prevede che questi elettrodi più piccoli abbiano una bassa sensibilità.

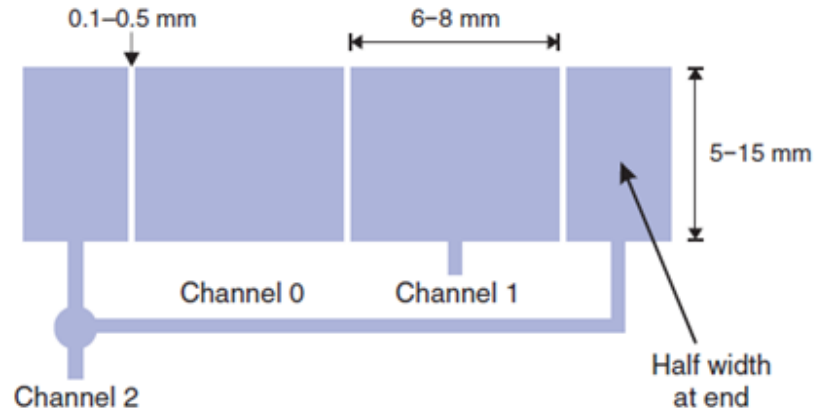


Figura 2.2: Slider di piccole dimensioni (interpolato spazialmente) [5]

2.1.2 Slider di dimensioni medio-grandi

Uno slider di dimensioni medie/grandi si riferisce a uno slider con una lunghezza tipicamente compresa tra 26 e 60 mm. Questo tipo di slider utilizza elettrodi interdigitali (come mostrato nella Figura 2.3) per interpolare il cambiamento capacitivo nello spazio mentre un dito si muove lungo la superficie del sensore, seguendo il suo asse longitudinale. È inevitabile che si verifichi una certa variazione trasversale della posizione quando ci si muove a 90° rispetto alla direzione normale di scorrimento, ma tale variazione può essere ridotta rendendo i segmenti stretti, con dimensioni intorno ai 3 mm.

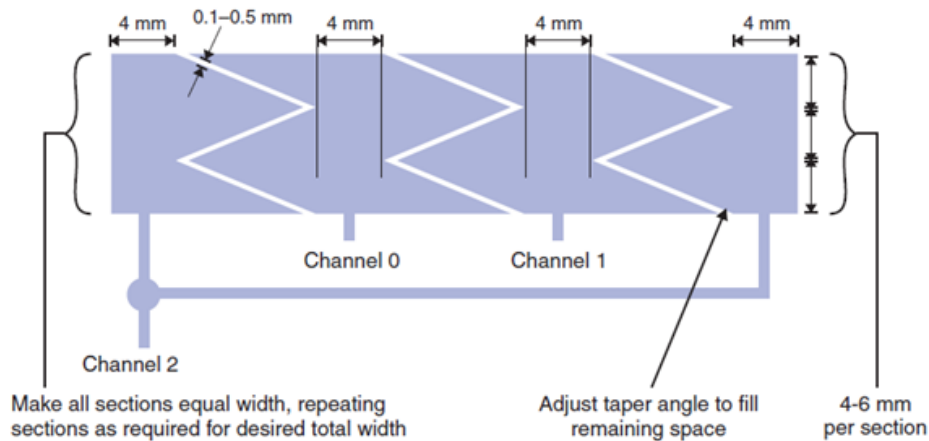


Figura 2.3: Slider di medie/grandi dimensioni (interpolato spazialmente) [5]

Tale disposizione dei sensori semplifica il collegamento dei canali. In questo

caso, tutte le tracce del sensore presentano le connessioni in un solo punto. Questo conferisce una maggiore flessibilità e riduce la possibilità che le varie parti del sensore si influenzino tra loro.

2.2 Metodo di interpolazione resistiva

Un sensore resistivamente interpolato utilizza un numero totale di elettrodi superiore a tre; tuttavia, solo tre di essi sono direttamente collegati all'elettronica di lettura. Nel caso di uno slider, il canale più alto (canale 2 in questo caso) è diviso tra gli elettrodi terminali (come mostrato nella Figura 2.4).

Gli elettrodi aggiuntivi del sensore sono collegati tramite resistori al fine di ottenere un effetto di interpolazione elettrica. Questo significa che la resistenza elettrica dei resistori viene utilizzata per calcolare la posizione o il movimento del cursore o della rotella sul sensore [5].

I resistori possono essere implementati come componenti fisici saldati sul circuito stampato del sensore. È preferibile posizionarli sul lato non-touch del circuito per evitare interferenze con il tocco o lo scorrimento sul sensore stesso.

In alternativa, i resistori possono essere stampati direttamente sul circuito stampato utilizzando materiali come il carbonio. Questo metodo di fabbricazione consente di integrare i resistori direttamente nel design del sensore, semplificando il processo produttivo e riducendo i costi.

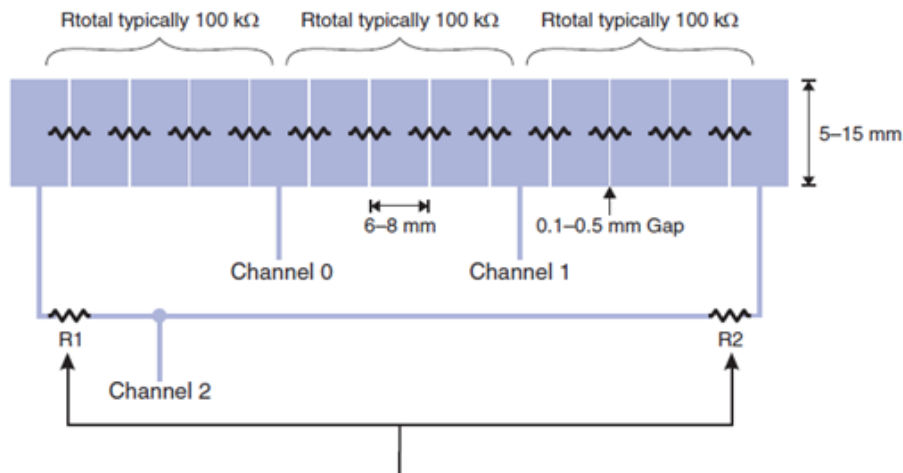


Figura 2.4: Slider di piccole/medie dimensioni (interpolato resistivamente) [5]

2.3 Materiali

Questo capitolo offre una panoramica delle sfide e delle opportunità legate ai materiali utilizzati nei sensori capacitivi, tenendo conto dell'evoluzione tecnologica e delle crescenti aspettative degli utenti per interfacce più sensibili, reattive ed efficienti. Lo scopo principale è fornire una visione completa sui materiali impiegati nei sensori capacitivi in modo tale da assicurare un'interazione fluida e intuitiva tra gli utenti e i dispositivi elettronici moderni.

2.3.1 Substrato

Il substrato è il materiale di base che sostiene gli elettrodi. Praticamente qualsiasi materiale isolante può essere utilizzato come substrato, ma sono generalmente preferibili materiali che solitamente vengono impiegati per creare i circuiti stampati come poliammide, Kapton, ecc. oppure materiali acrilici come il polietilene tereftalato (PET) o policarbonato (PC). Anche il vetro è un eccellente materiale.

In generale, se il substrato preso in considerazione è comunemente utilizzato per assemblaggi elettronici, funzionerà bene anche per la rilevazione capacitiva.

L'applicazione del substrato al gripper può essere realizzata mediante processi di laminazione o fissaggio meccanico. Inizialmente, viene selezionato un substrato adeguato in base alle specifiche richieste, come l'isolamento elettrico e la compatibilità con il processo di rilevazione capacitiva.

Successivamente, il substrato viene posizionato sopra il gripper e applicato mediante adesione o fissaggio meccanico. Nel processo di adesione si utilizza un adesivo apposito per garantire una forte coesione tra il substrato e il gripper stesso, eliminando eventuali bolle d'aria. Nel fissaggio meccanico, viti o altri sistemi di fissaggio vengono impiegati per stabilizzare il substrato sul gripper.

È fondamentale assicurare una superficie di contatto uniforme tra il substrato e il gripper per garantire una rilevazione capacitiva accurata. È necessario adottare precauzioni per evitare che il substrato interferisca con il movimento del gripper oppure che generi attrito indesiderato.

2.3.2 Elettrodi

Gli elettrodi sono generalmente realizzati con materiali come il rame, il carbonio o l'inchiostro argentato, possono essere integrati direttamente sulla superficie del gripper robotico.

Al fine di creare elettrodi che siano implementabili su un gripper robotico, è possibile seguire diverse strategie.

Una possibile opzione consiste nell'applicare elettrodi solidi direttamente sulla superficie del gripper, utilizzando materiali comuni come rame, carbonio o inchio-

stro argentato. È importante selezionare materiali con una resistività più bassa in Ω/m^2 per semplificare il controllo delle costanti di tempo RC e garantire una buona conducibilità elettrica. La scelta della resistività in Ω/m^2 è strettamente correlata alla forma e alle dimensioni dell'elettrodo, poiché la resistenza elettrica è principalmente influenzata dalla geometria dell'elettrodo, mentre le caratteristiche del materiale riguardano altre proprietà come la conducibilità. Gli elettrodi o i tracciati lunghi e sottili accumulano resistenza più rapidamente, anche con resistività relativamente basse. Di solito, le interconnessioni vengono realizzate con materiali a bassa resistività in Ω/m^2 , poiché tendono ad essere lunghe e sottili per natura e quindi tenderebbero ad avere un'alta resistenza elettrica.

Un'altra alternativa è l'utilizzo di pellicole conduttive, realizzate ad esempio con rame o inchiostro conduttivo, che possono essere tagliate e posizionate per formare la geometria desiderata degli elettrodi. In alternativa, è possibile considerare l'impiego di schede PCB flessibili come substrato per gli elettrodi, offrendo una maggiore flessibilità nella progettazione e nell'integrazione. Infine, l'uso di cavi conduttivi può essere considerato per collegare gli elettrodi al circuito di lettura.

La scelta del metodo dipenderà dalle specifiche del gripper, dalle esigenze di rilevazione capacitiva e dalle risorse disponibili, prendendo in considerazione fattori come stabilità meccanica, conducibilità elettrica e integrazione con il circuito di lettura.

2.3.3 Pannello frontale

I materiali comunemente utilizzati per i pannelli frontali includono vetro, plexiglass, polycarbonato e PMMA. Lo spessore del pannello e la sua costante dielettrica (ϵ_r) svolgono un ruolo significativo nella determinazione della forza del campo elettrico sulla superficie del pannello di controllo. Se gli elettrodi metallici si trovano sulla superficie interna del substrato, lo spessore e la ϵ_r del substrato sono anch'essi fattori da considerare.

Un pannello di plastica con uno spessore fino a 10 mm è generalmente utilizzabile, a condizione che sia adatto allo spaziamento e alle dimensioni degli elettrodi. Durante lo sviluppo, la sensibilità del circuito deve essere adeguatamente regolata per compensare lo spessore del pannello, la costante dielettrica e le dimensioni degli elettrodi.

È preferibile ridurre lo spessore del materiale del pannello frontale poiché un maggior spessore comporta un peggioramento del rapporto segnale-rumore.

Il pannello frontale viene montato sul gripper robotico in modo stabile e sicuro. Possono essere utilizzati metodi di fissaggio come viti o adesivi specializzati per garantire che il pannello rimanga saldamente in posizione durante l'uso del gripper. Inoltre, è necessario considerare la disposizione degli elettrodi sulla superficie

interna del pannello, in modo da garantire una rilevazione capacitiva accurata e una buona interazione con gli oggetti afferrati dal gripper.

Di seguito nella Figura 2.5 è presentata una rappresentazione completa del disegno del sensore, comprensiva di tutti i materiali utilizzati.

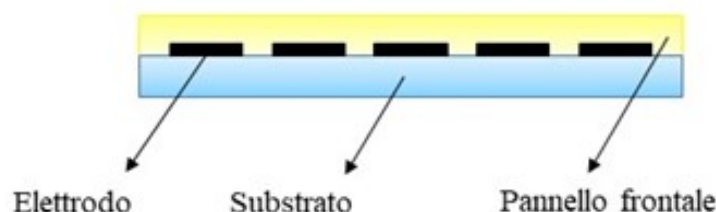


Figura 2.5: Sezione del sensore

2.4 Elettronica di lettura

L'elettronica impiegata per la lettura del sensore è l'MPR121 (il cui datasheet è presente in [17]): un sensore touch capacitivo controllato tramite interfaccia I^2C .

L'implementazione ottimale della breakout board sul gripper robotico è dipendente dalle specifiche del gripper stesso e dalle esigenze specifiche dell'applicazione. Sono disponibili diversi approcci per integrare la breakout board in modo efficace:

1. **Montaggio diretto sul gripper:** se il gripper dispone dello spazio adeguato e di una superficie appropriata, è possibile montare la breakout board direttamente su di esso. È fondamentale assicurare un posizionamento stabile e sicuro del board, ad esempio utilizzando supporti di montaggio o viti. Inoltre, è necessario garantire che le connessioni all'elettronica siano facilmente accessibili per il collegamento con altri componenti del sistema. L'orientamento della breakout board deve essere attentamente considerato al fine di garantire l'accessibilità e la protezione dei componenti e dei connettori durante l'uso del gripper.
2. **Montaggio su una scheda di interfacciamento:** se il gripper non possiede spazio a sufficienza o una superficie idonea per il montaggio diretto della breakout board, è possibile utilizzare una scheda di interfacciamento dedicata. Può essere fissata sul gripper utilizzando metodi di fissaggio come viti o adesivi. È importante assicurare che la scheda di interfacciamento sia meccanicamente stabile e che i connettori della breakout board siano correttamente collegati alla scheda di interfacciamento.

3. **Montaggio su una piastra di montaggio separata:** nel caso in cui il gripper non sia in grado di ospitare direttamente la breakout board o una scheda di interfacciamento, è possibile utilizzare una piastra di montaggio separata. Questa piastra può essere fissata sul gripper mediante supporti di montaggio adeguati. Successivamente, la breakout board viene montata sulla piastra di montaggio, garantendo anche in questo caso che i connettori siano facilmente accessibili per il collegamento con altri componenti.

Indipendentemente dall'approccio scelto, è fondamentale considerare la protezione della breakout board da agenti esterni come polvere, umidità o urti. È possibile utilizzare custodie o gusci di protezione aggiuntivi per garantire un funzionamento affidabile della breakout board all'interno del contesto del gripper robotico.

Tuttavia, l'implementazione ottimale dipende dalle specifiche del gripper e dalle esigenze dell'applicazione. È consigliabile consultare le specifiche del gripper e le linee guida fornite dal produttore della breakout board per garantire un'integrazione corretta e sicura. In Figura 2.6 è rappresentata la board completa, comprensiva di pin.

La breakout board MPR121 è un modulo di interfacciamento che agevola l'utilizzo del sensore capacitivo MPR121 all'interno di un sistema. La sua funzione principale è quella di fornire un'interfaccia semplificata e conveniente per collegare il sensore MPR121 ad altri componenti e dispositivi.

La breakout board MPR121 è progettata per integrare il sensore MPR121 in modo efficace e agevole, riducendo la complessità del cablaggio e semplificando la connessione del sensore ad altri dispositivi di controllo o di acquisizione dati. Essa offre una serie di connettori che consentono un collegamento rapido e sicuro con altre schede di sviluppo.

Inoltre, la breakout board MPR121 può includere componenti aggiuntivi come LED di segnalazione, pulsanti o interruttori che facilitano il monitoraggio e il controllo delle funzionalità del sensore. Questi elementi aggiuntivi possono essere utilizzati per la visualizzazione dei risultati dei tocchi o per la configurazione del sensore, fornendo un'interfaccia più intuitiva e user-friendly.

La scheda di sviluppo MPR121 offre anche circuiti di supporto integrati, come regolatori di tensione e condensatori di smorzamento, che assicurano un'alimentazione stabile e un funzionamento affidabile del sensore.

Tale modulo è dotato di 12 pulsanti touch e supporta la comunicazione I^2C , consentendo un'interfaccia agevole con qualsiasi microcontrollore. Si precisa che sulla scheda non è presente un regolatore di tensione; pertanto, è necessario che la tensione di alimentazione si mantenga compresa tra 1,7 e 3,6 VDC [17].

Questo modulo ha 18 pin. I 6 pin a sinistra sono:

- **VCC:** Alimentazione di 3.3 V;

- **IRQ**: Pin di Interrupt;
- **SCL**: Serial Clock Input per protocollo I^2C ;
- **SDA**: Serial Data Input/Output per protocollo I^2C ;
- **ADD**: Adjusting address per protocollo I^2C ;
- **GND**: Ground (Terra).

I 12 pin a destra sono per collegamenti touch e vengono denominati canali.

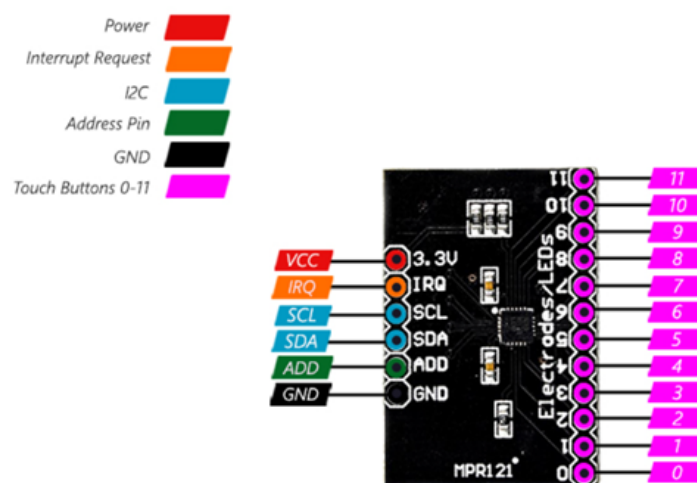


Figura 2.6: Pin MPR121 [17]

Il sistema completo di misurazione della capacità è composto da elettrodi di rilevamento connessi agli ingressi di rilevamento della breakout board, e il MPR121 stabilisce la comunicazione con il processore principale tramite il bus I^2C e l'uscita di interruzione. Il numero totale di canali di rilevamento misurabili è di 13 canali, di cui 12 sono ingressi di elettrodi fisici e un 13° canale è multiplexato per la rilevazione di prossimità. Internamente è presente un multiplexer all'estremità frontale, il che consente di misurare i 13 canali in sequenza nel tempo. Dopo la misurazione della capacità, viene applicato un filtro di rumore e infine viene determinato lo stato di tocco o rilascio.

Oltre al rilevamento del tocco, il MPR121 può essere utilizzato anche per la rilevazione capacitiva a uso generale in varie applicazioni industriali. I dati di uscita a 10 bit (o anche il valore di base a 8 bit, che offre un livello ancora più elevato di eliminazione del rumore per i mezzi che cambiano lentamente) possono essere utilizzati come output di misurazione della capacità correlato ai parametri

misurati, come il livello dell'acqua, lo spostamento o la variazione del contenuto del mezzo [13].

La tecnica di misurazione di base impiegata dall'MPR121 consiste nel caricare il condensatore C su un ingresso elettrodo mediante una corrente continua I per un determinato intervallo di tempo T, denominato tempo di carica. Prima della misurazione, l'ingresso elettrodo viene messo a terra, pertanto la tensione dell'elettrodo parte da 0 V e si carica gradualmente secondo una pendenza definita dalla seguente equazione:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{I}{C}$$

in cui C rappresenta la capacità dell'elettrodo. Durante questa fase di misurazione, tutti gli altri elettrodi vengono messi a terra. Al termine dell'intervallo di tempo T, la tensione dell'elettrodo viene misurata mediante un convertitore analogico-digitale a 10 bit. La tensione misurata è inversamente proporzionale alla capacità, come stabilito da:

$$V = \frac{I \cdot T}{C}$$

Successivamente, l'elettrodo viene scaricato a terra alla stessa velocità con cui è stato caricato (Figura 2.7).

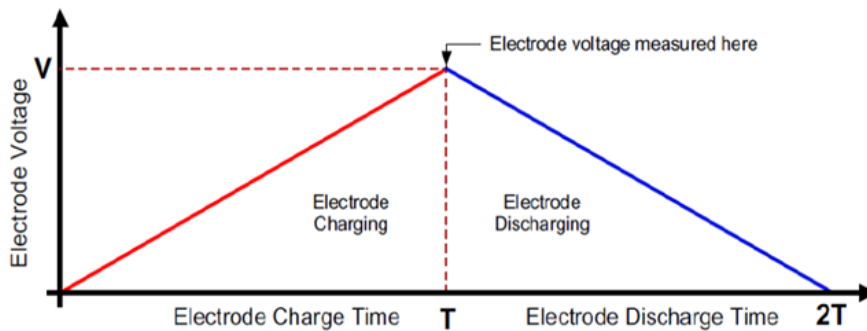


Figura 2.7: MPR121: Misurazione di capacità [13]

2.5 Obiettivo e scelta dei componenti

L'MPR121 è stato scelto come componente principale per la lettura del sensore capacitivo a scorrimento per via della sua elevata versatilità. Questo dispositivo offre fino a 12 canali di lettura, consentendo una vasta gamma di possibilità di

rilevazione e monitoraggio dei tocchi. La sua flessibilità e capacità di gestire numerosi canali rendono l'MPR121 adatto per l'implementazione di un sistema di rilevazione capacitiva sofisticato.

Per quanto riguarda il substrato, è essenziale selezionare un materiale altamente isolante e adatto all'applicazione sul gripper robotico. Data la necessità di un elevato isolamento elettrico, i materiali comunemente utilizzati per la costruzione dei circuiti stampati, come la poliammide o il polietilene tereftalato (PET), possono essere scelte preferenziali per il substrato del sensore. È importante che il substrato sia in grado di garantire l'isolamento e la protezione adeguata dei componenti elettronici sottostanti, nonché resistere alle sollecitazioni meccaniche e all'ambiente operativo del gripper robotico.

Per quanto riguarda il pannello, è raccomandabile utilizzare un materiale con uno spessore ridotto. Poiché il sensore capacitivo a scorrimento verrà applicato su un gripper robotico, un pannello sottile contribuisce a ridurre l'ingombro e il peso complessivo del dispositivo. Materiali come il vetro, il plexiglas o il policarbonato possono essere considerati per il pannello frontale, poiché offrono una buona trasparenza e resistenza meccanica, pur mantenendo uno spessore ridotto.

La combinazione di un substrato altamente isolante, un pannello sottile e l'uso dell'MPR121 come componente di lettura garantisce un design ottimale per il sensore capacitivo a scorrimento da applicare su un gripper robotico. Tale configurazione consentirà un'accurata rilevazione dei tocchi e un'interazione affidabile con l'ambiente circostante, facilitando il controllo e la manipolazione degli oggetti con il gripper robotico.

Capitolo 3

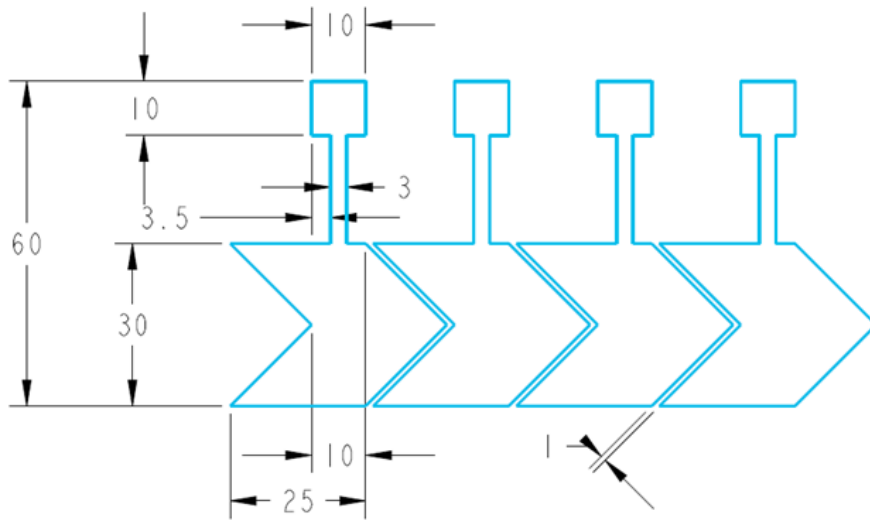
Realizzazione slider a scorrimento

Il design del sensore a scorrimento è stato scelto in base agli obiettivi specifici da raggiungere, che consistono nella caratterizzazione di un sensore capacitivo relativamente all'uso all'interno di un gripper robotico. Al fine di soddisfare tali obiettivi, sono state presentate due geometrie di sensore a scorrimento che si differenziano unicamente per l'area coperta da ogni elettrodo. Questo permette di valutare e confrontare l'effetto della dimensione dell'area sull'efficacia del sensore durante l'uso sul gripper robotico.

Le due geometrie proposte sono state progettate in modo da avere una lunghezza complessiva che rientra nelle dimensioni tipiche di un gripper robotico. Ciò è stato fatto per garantire una compatibilità diretta e un'integrazione agevole del sensore all'interno del gripper. È importante infatti, considerare che le dimensioni del sensore devono essere adeguate per adattarsi allo spazio disponibile nel gripper e per consentire un corretto funzionamento durante l'utilizzo.

Entrambe le geometrie sono progettate in modo da avere un'altezza complessiva che si adatta alle dimensioni tipiche di un gripper robotico, come ad esempio compresa tra i 30 e i 60 millimetri. Queste dimensioni sono state scelte per garantire una corretta integrazione del sensore all'interno del gripper senza comprometterne le prestazioni o la funzionalità.

La scelta delle due geometrie di sensore a scorrimento e la progettazione delle loro dimensioni complessive in linea con quelle di un gripper robotico, sono state effettuate per consentire una valutazione accurata dell'efficacia del sensore nel contesto dell'uso su un gripper robotico. Ciò consente di comprendere meglio le funzioni e le potenzialità del sensore capacitivo all'interno di un'applicazione pratica, offrendo opportunità di miglioramento e ottimizzazione nel design e nell'utilizzo del sensore all'interno dei sistemi robotici.

Figura 3.2: Elettrodo di tipologia K_{10}

In Tabella 3.1 il riassunto delle misure caratteristiche dei due elettrodi.

	K_3	K_10
H [mm]	30	30
L_{tot} [mm]	91,24	119,24
$L_{elettrodo}$ [mm]	33	40
Angolo	45°	45°
Gap [mm]	1	1

Tabella 3.1: Misure caratteristiche degli elettrodi

Ogni sensore si distingue dagli altri per il valore di "K", che determina la lunghezza dell'elettrodo individuale, dove per K_{10} è lungo 10 mm mentre per K_3 è di 3 mm. Il sensore è composto da due parti principali: la sezione touch, responsabile della rilevazione del tocco, e la sezione di collegamento, che permette la lettura dei dati dal sensore come descritto in Figura 3.3.

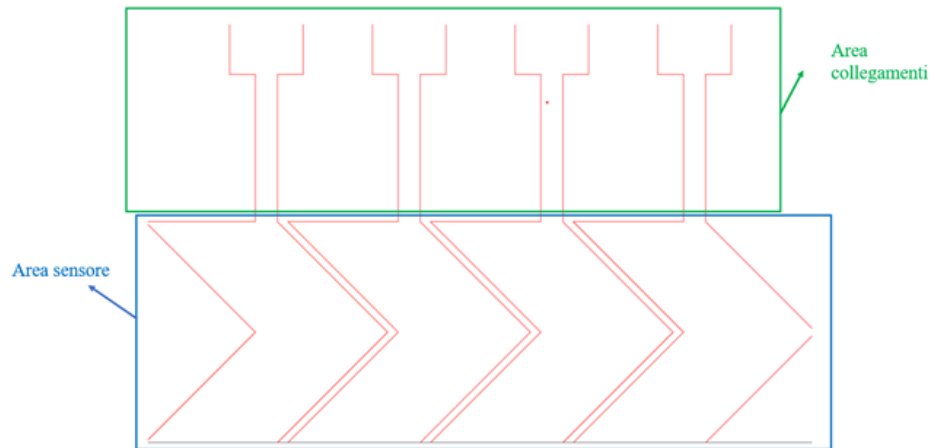


Figura 3.3: Distinzione aree sensore

Per migliorare la conduttività dei collegamenti, è stato aggiunto del nastro di rame a ciascun collegamento. Ciò è stato necessario poiché la superficie di larghezza 3 mm presentava una resistenza troppo elevata, compromettendo il corretto funzionamento dei collegamenti. L'aggiunta del nastro di rame ha consentito di aumentare la conduttività e risolvere i problemi legati alle prestazioni dei collegamenti.

Ciascun elettrodo singolo può essere suddiviso in tre diverse zone (Figura 3.4), ognuna con una funzione specifica:

- **Area 1:** questa zona è condivisa con il sensore precedente;
- **Area 2:** questa zona è specifica del sensore stesso e costituisce l'area massima per ogni elettrodo;
- **Area 3:** questa zona è condivisa con il sensore successivo .

Attraverso la lettura dei sensori, ci si aspetta di rilevare variazioni di capacità sia negli elettrodi precedenti sia in quelli successivi quando si toccano le aree 1 o 3. Questa configurazione consente una discriminazione accurata e localizzata del tocco in base alle variazioni di capacità rilevate in ciascuna zona dell'elettrodo.

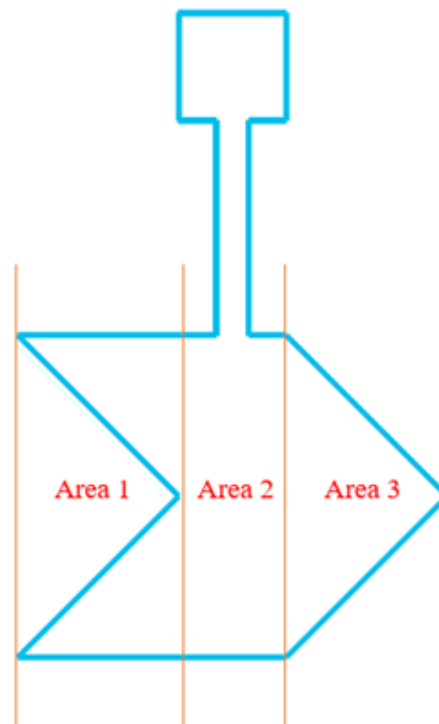


Figura 3.4: Tipologie di aree all'interno dell'elettrodo del sensore

Attraverso questa suddivisione del sensore e l'utilizzo dell'elettronica di lettura, ci si aspetta di ottenere un segnale con il seguente andamento per ciascun elettrodo:

- Aumento del segnale quando il tocco si trova sull'area 1;
- Raggiungimento di un plateau del segnale quando il tocco è posizionato sull'area 2;
- Decrescita del segnale quando il tocco attraversa l'area 3 e si allontana dall'elettrodo.

L'ampiezza del segnale dipenderà dal tipo di sensore in esame e dalle sue caratteristiche specifiche. Questo andamento del segnale per ciascun elettrodo permette di determinare con precisione la posizione del tocco sulla superficie del sensore.

In Figura 3.5 è riassunto l'andamento atteso.

3.2 Metodologia di costruzione

Un sensore lineare di tipo slider è un insieme di elettrodi capacitivi contigui connessi al dispositivo e disposti in una sola linea. I cursori sono tipicamente lineari,

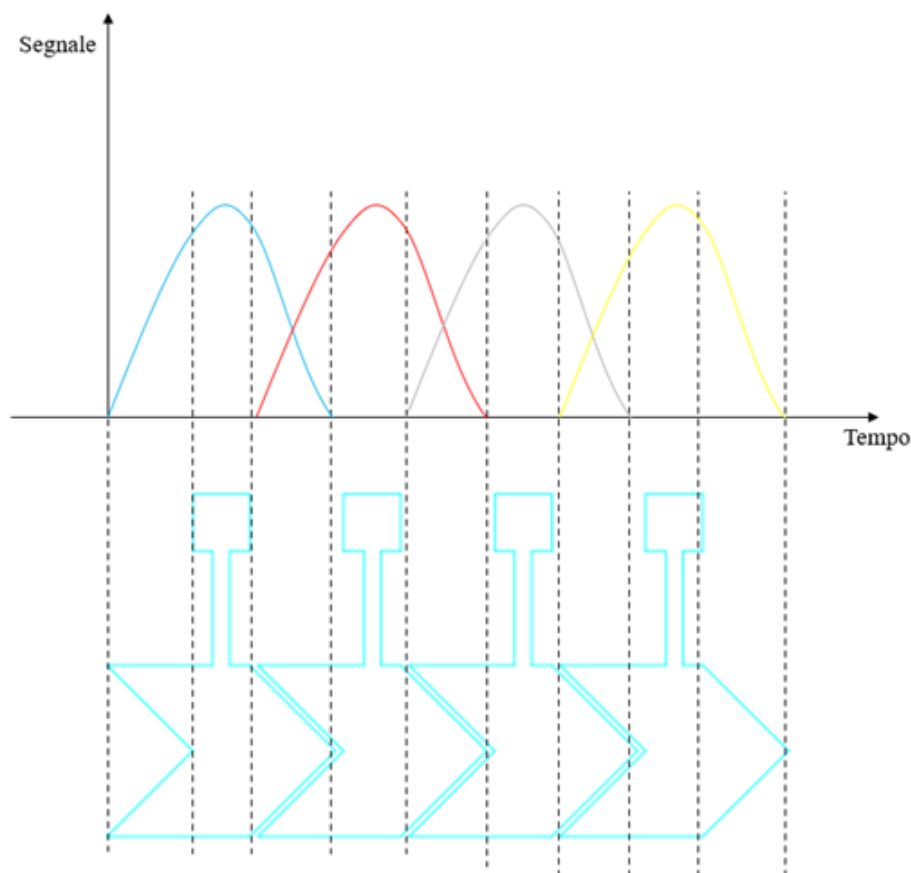


Figura 3.5: Andamento segnale in relazione al tempo

scorrendo solo lungo un singolo asse. Possono essere composti da un insieme di elettrodi, a seconda delle dimensioni e della risoluzione richiesta [20].

Tuttavia, alcune regole generali si applicano a qualsiasi tipo di disposizione:

- **Passo tra gli elettrodi:**

Per garantire che l'oggetto conduttivo si accoppi a più di un elemento, ciascun elemento deve essere sufficientemente piccolo da permettere al dito di sovrapporsi al suo bordo esterno. Tuttavia, deve essere anche sufficientemente grande da garantire una corretta sensibilità anche attraverso l'overlay dell'applicazione. La distanza tra gli elementi dovrebbe essere almeno la metà della larghezza della punta di un dito. Il polpastrello di un utente medio può essere approssimato come un cerchio con un diametro compreso tra 5 e 10 mm, con una media di 8 mm. Un passo maggiore di circa 8 mm di tipo planare produrrà coordinate errate rispetto alla posizione effettiva del tocco sul dispositivo di scorrimento. Quando il tocco si sposta sul dispositivo

di scorrimento, solo uno degli elementi sarà in uno stato di contatto, il che significa che ci sarà un solo segnale su uno dei canali [6].

- **Tipologia di utilizzo:**

Le dimensioni e l'applicazione specifica tendono a determinare la disposizione del cursore.

I sensori lineari utilizzano variazioni di capacitanza differenziale tra elettrodi capacitivi adiacenti per determinare la posizione del dito o dell'oggetto conduttivo con una maggiore precisione.

Per garantire che l'oggetto conduttivo si accoppi a più di un elemento, ciascun elettrodo deve essere sufficientemente piccolo da permettere al dito di sovrapporsi al suo bordo esterno.

Esistono due tipi di sensori lineari:

- Sensori lineari a modello normale;
- Sensori lineari a modello intrecciato.

Come già affermato in precedenza con un sensore lineare con elettrodi rettangolari (Figura 3.6), la linearità è limitata a causa del rapporto tra la larghezza quadrata e l'area di contatto del dito.

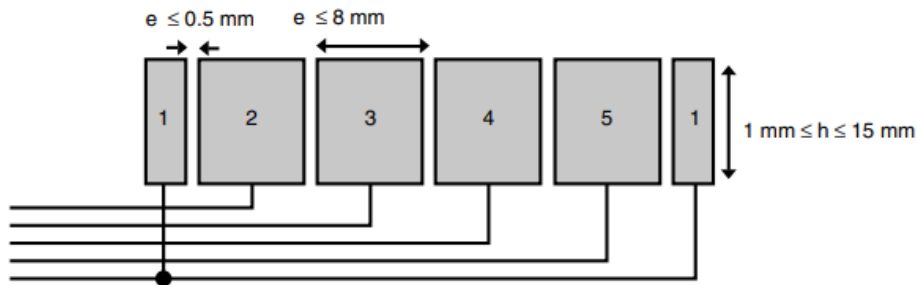


Figura 3.6: Sensore a modello lineare, dove "e" rappresenta lo spazio tra due elettrodi, "h" è l'altezza dell'elettrodo e "w" è la larghezza [20]

La dimensione e lo spazio degli elettrodi sono parametri validi indipendentemente dal numero di elettrodi utilizzati. Tuttavia, se si desidera ottenere sensori lineari più ampi, è possibile aumentare il numero di elettrodi.

La linearità di un modello normale è limitata dal rapporto tra la larghezza del quadrato e l'area di contatto del dito. Per migliorare la linearità, ottenere una transizione più fluida tra gli elementi e aumentare la risoluzione, si consiglia di utilizzare un modello interlacciato.

L'utilizzo di elettrodi interdigitati può ulteriormente migliorare l'output delle coordinate lineari attraverso un aumento del sovrapporsi tra gli elettrodi, come è descritto in Figura 3.7. Ciò comporta la necessità di meno canali per ottenere un output di coordinate lineari [6].

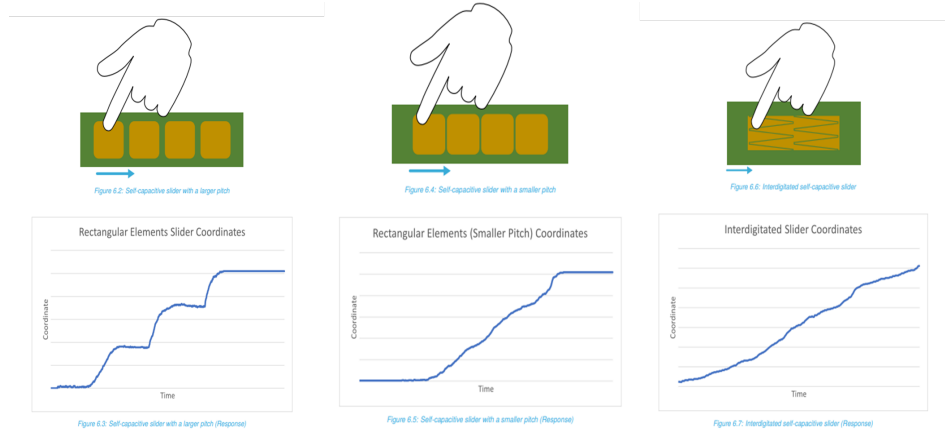


Figura 3.7: Andamento nel tempo della capacità in rapporto ai differenti passi [6]

3.3 Definizione del tocco

In relazione allo studio dell'implementazione del sensore su un gripper robotico è bene definire cosa si intende per "tocco". Nel presente lavoro, si delinea il concetto di "tocco" in relazione all'utilizzo di un sensore capacitivo all'interno di un gripper robotico che simula, in certa misura, le azioni di una mano umana, quali afferrare e posizionare oggetti di varie tipologie. Nel contesto specifico, il concetto di tocco è rappresentato come il contatto tra il sensore e un materiale di diversa natura, sia esso conduttivo o isolante, senza che il materiale stesso eserciti una forza significativa sul sensore.

L'analogia tra il contatto umano e il contatto con materiali generici si basa sul fatto che entrambi possono generare variazioni di capacità rilevabili da un sensore capacitivo. Quando un oggetto, sia esso un dito umano o un materiale isolante o conduttivo, entra in contatto con gli elettrodi del sensore, si verifica una modifica nel campo elettrico circostante che influisce sulla capacità del sensore.

Nel caso del contatto umano, la conducibilità elettrica del corpo umano permette al sensore di rilevare una variazione di capacità. Il corpo umano agisce come un conduttore e la sua presenza modifica il campo elettrico generato dagli elettrodi del sensore. Pertanto, il sensore è in grado di interpretare questa variazione di capacità come un segnale di contatto.

D'altra parte, anche i materiali isolanti o conduttivi diversi dal corpo umano possono influenzare il campo elettrico generato dagli elettrodi del sensore. Anche se non possiedono la stessa conducibilità del corpo umano, questi materiali sono in grado di alterare il campo elettrico, generando una variazione di capacità rilevabile dal sensore. In altre parole, il sensore risponde alla presenza di un materiale nel suo campo elettrico, indipendentemente dalla sua conducibilità.

Questa similitudine deriva dal fatto che il sensore capacitivo rileva le variazioni di capacità causate dal contatto, sia esso con un dito umano o con materiali isolanti o conduttivi. Il sensore non distingue intrinsecamente il tipo di materiale coinvolto, ma interpreta le variazioni di capacità come segnali di contatto. Ciò conferisce al sensore la flessibilità di rilevare e distinguere la presenza del contatto, indipendentemente dalle specifiche proprietà del materiale con cui avviene il contatto.

Questa caratteristica della relazione tra contatto umano e contatto con materiali generici è particolarmente utile in applicazioni in cui è necessario interagire con diversi materiali, consentendo al sensore capacitivo di adattarsi e fornire una risposta coerente e affidabile indipendentemente dalla natura del materiale coinvolto nel contatto.

È importante sottolineare che, nonostante il tocco con materiali di diverse tipologie venga considerato, l'obiettivo principale è quello di valutare la capacità del sensore capacitivo nel rilevare e interpretare il tocco in generale, indipendentemente dalla tipologia di materiale impiegato.

3.4 Materiali impiegati

Nella realizzazione dei sensori sono state impiegate due diverse tipologie di materiali con caratteristiche fisiche distinte: lo spray conduttivo *Graphic 33* della Kontakt Chemie [9] e il carbon black.

Lo spray conduttivo (Figura 3.8) è stato utilizzato per creare una superficie conduttiva sui sensori. Questo materiale, applicato tramite uno spray apposito, forma uno strato sottile e uniforme che permette la conduzione di corrente e la rilevazione delle variazioni di capacità.

Nella realizzazione di sensori elettronici, lo spray conduttivo rappresenta un materiale ampiamente utilizzato per creare superfici conduttive su diversi substrati. Questo particolare tipo di materiale conduttivo è disponibile in forma di uno spray che viene applicato sulla superficie desiderata.

Una delle sue caratteristiche più importanti è la sua capacità di aderire a diversi materiali, come plastica, vetro, ceramica e metalli. Ciò consente di utilizzare lo spray conduttivo per creare superfici conduttive su una vasta gamma di sub-



Figura 3.8: Spray conduttivo *Graphic 33*

strati, rendendolo un'opzione versatile per la realizzazione di sensori e dispositivi elettronici.

Lo spray conduttivo offre numerosi vantaggi. Innanzitutto, è relativamente semplice da utilizzare, richiedendo solitamente una semplice applicazione tramite spruzzo. Inoltre, la sua natura sottile consente di creare rivestimenti uniformi e di spessore controllato sulla superficie di interesse.

Il carbon black, invece, è stato impiegato per conferire proprietà conduttive al materiale di base dei sensori. Questo particolare tipo di carbonio, noto per le sue proprietà di conduzione elettrica, è stato mescolato al materiale di base durante il processo di fabbricazione dei sensori. Ciò ha permesso di ottenere una superficie sensibile alle variazioni di capacità e adeguatamente conduttiva per il corretto funzionamento dei sensori [1].

Quando il carbon black viene incorporato nel materiale di base del sensore capacitivo, le sue particelle conduttive formano una rete tridimensionale all'interno della matrice isolante. Questa rete conduttiva consente al sensore di rilevare e misurare le variazioni di capacità, poiché il tocco o la presenza di un oggetto sulla superficie del sensore influiscono sulla capacità complessiva del sistema.

Lo spray conduttivo è un materiale pronto all'uso, che può essere applicato direttamente sulla superficie desiderata del sensore. Al contrario, l'utilizzo immediato del carbon black non è possibile in quanto richiede un processo di fabbricazione più complesso.

Il processo di fabbricazione degli elettrodi mediante l'utilizzo dello spray conduttivo implica una procedura relativamente semplice. Inizialmente, si prende un foglio di carta millimetrata, sul quale viene applicato lo spray conduttivo tramite spruzzatura. Successivamente, si procede al taglio degli elettrodi desiderati, seguendo le linee tracciate sulla carta millimetrata. Questo processo permette di ottenere gli elettrodi necessari per l'assemblaggio del sensore capacitivo.

Per quanto riguarda il processo di produzione degli elettrodi in carbon black, è stata impiegata una miscela di carbon black *Printex® XE2-B* della Wacker al 10% (Figura 3.9a) con aggiunta di silicone *Wacker Silpuran® 6000/05 A/B* di Orion (PDMS) (Figura 3.9b).

Inizialmente, il carbon black si presenta sotto forma di sfere, che devono essere trasformate in una forma utilizzabile per il sensore. A tal fine, le sfere di carbon black vengono disciolte in un solvente appropriato, come l'alcol isopropilico (IPA). Questo processo di dissoluzione consente di ottenere una soluzione di carbon black, che può successivamente essere miscelata con il PDMS per creare una miscela omogenea.

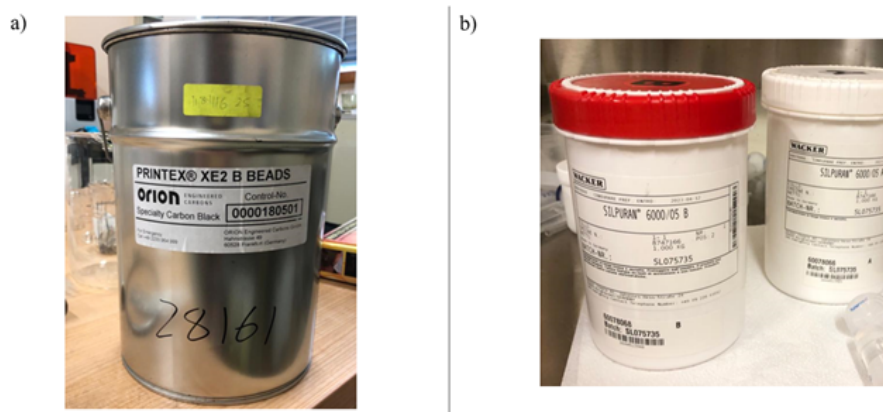


Figura 3.9: a) Carbon Black e b) PDMS

Dopo aver preparato la soluzione di carbon black nell'alcol isopropilico (IPA), la stessa viene inserita nel mixer a una velocità di 2000 rpm per un periodo di tre minuti. Successivamente, la soluzione viene nuovamente posta nel mixer per un ulteriore minuto, dopo l'aggiunta di una quantità supplementare di IPA. In questa fase, il PDMS, che è disponibile in due componenti (A e B), viene introdotto nella miscela e nuovamente miscelato nel mixer per una durata di due minuti.

Successivamente, la miscela risultante viene applicata uniformemente su un substrato di *Elastosil® Film 2023* della Wacker, avente uno spessore di 200 μm . Questo processo avviene attraverso l'utilizzo di una macchina di colata TQC Sheen AB3655, mediante la tecnica di *blade casting*, in cui il composto conduttivo viene steso sul substrato a una velocità costante di 1 mm/s. Attraverso questa procedura, si ottiene alla fine del processo un foglio di carbon black avente uno spessore di 200 μm .

Dopo la realizzazione del foglio di carbon black, questo viene posto a riposo sotto una cappa chimica da laboratorio per un periodo di due ore al fine di prevenire la formazione di bolle indesiderate. Al termine di questo periodo di ri-

poso, il foglio viene quindi sottoposto a un processo di consolidamento tramite polimerizzazione nel forno. Questa fase prevede l'esposizione del foglio al calore a una temperatura di 120°C per una durata di 20 minuti, al fine di garantire una completa polimerizzazione del materiale e garantire la stabilità e l'integrità del processo.

3.5 Processo di fabbricazione (taglio)

Il foglio contenente il materiale conduttivo è stato opportunamente fissato su un biadesivo e successivamente applicato su un substrato di PMMA, il quale ha svolto la funzione di supporto. Utilizzando una taglierina laser, è stata regolata la potenza in modo da consentire il taglio selettivo della forma desiderata degli elettrodi, senza incidere sul substrato sottostante.

Una volta completato il taglio della maschera degli elettrodi, è stata eseguita l'eliminazione delle parti in eccesso, garantendo così che il sensore fosse pronto all'uso sul substrato precedentemente tagliato.

Nella Figura 3.10 è riportato l'elettrodo in sezione.



Figura 3.10: Sezione elettrodo

Nella Figura 3.11 sono illustrati i sensori realizzati mediante l'applicazione dello spray conduttivo.

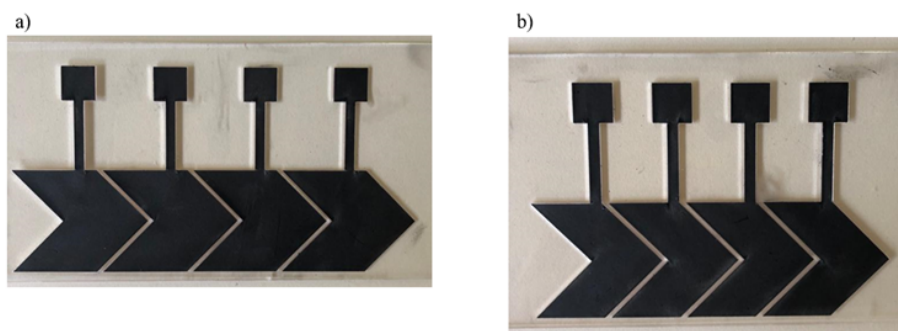


Figura 3.11: Sensori con spray conduttivo di tipo a) K_{10} e b) K_3

Per quanto concerne il foglio di carbon black, una volta completato il processo di cura nel forno, esso diventa pronto all'uso. Analogamente, anche gli elettrodi in questo caso vengono tagliati utilizzando una taglierina laser (Figura 3.12) su un supporto precedentemente fissato al foglio contenente gli elettrodi.

All'interno della taglierina laser sono stati settati i parametri di taglio relativi alla velocità di taglio, alla potenza del laser ed alla frequenza del fascio laser. Impostando questi parametri in modo corretto è possibile quindi tagliare il materiale desiderato senza incidere il substrato, oppure non effettuare un taglio completo del materiale ma limitarsi a tagliarlo solo per metà del suo spessore. In questo caso sono stati settati i seguenti parametri:

- **PMMA:** velocità del taglio laser 10%, potenza 70%, frequenza del fascio 100%.
- **Elettrodi fatti con la miscela di silicone e carbon black:** velocità del taglio laser 28%, potenza 2%, frequenza del fascio 100%.
- **Elettrodi fatti sulla carta:** velocità del taglio laser 40%, potenza 20%, frequenza del fascio 50%.

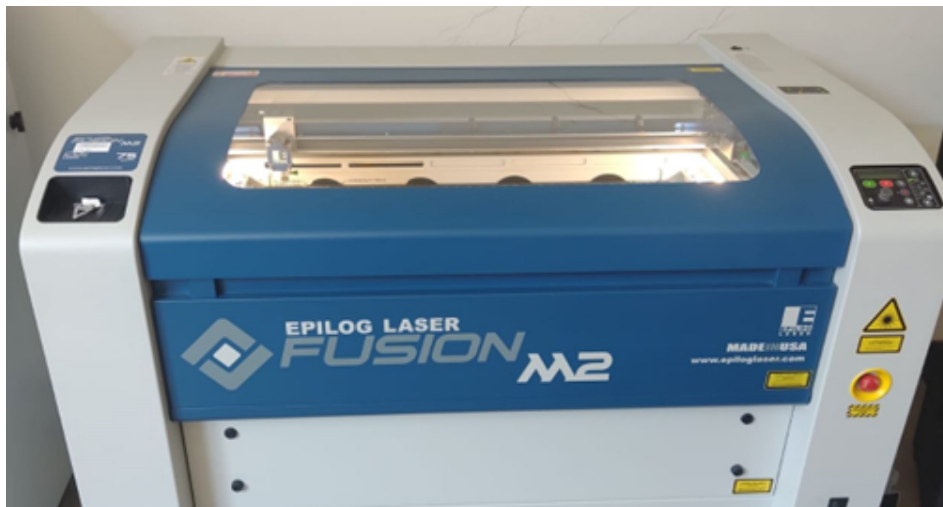


Figura 3.12: Taglierina Laser utilizzata

Capitolo 4

Campagna sperimentale

L'obiettivo principale della caratterizzazione sperimentale è ottenere informazioni accurate e affidabili sul comportamento del sensore in diverse condizioni e sotto diversi input. Ciò consente di comprendere le relazioni causa-effetto, identificare limiti di funzionamento, ottimizzare le prestazioni, valutare l'affidabilità e valutare la conformità rispetto a specifiche.

4.1 Acquisizione dati

Per effettuare la misurazione della capacità è stato utilizzato il modulo di interfaccia MPR121. È necessario valutare il range di funzionamento del dispositivo prima di eseguire qualsiasi misurazione, come evidenziato da [16]. L'intervallo di funzionamento valido della sorgente di carica dell'elettrodo è definito da una tensione minima di 0,7 V e una tensione massima di ($V_{CC} - 0,7$ V).

Pertanto, per un valore specifico di V_{CC} , l'intervallo di tensione accettabile per l'ADC ((Analog-to-Digital Converter)), che rappresenta la tensione visibile all'interfaccia digitale, può essere calcolato come segue:

$$ADC_{low} = \frac{0.7}{V_{CC}} * 1024$$
$$ADC_{high} = \frac{V_{CC}-0.7}{V_{CC}} * 1024$$

In questa situazione, con $V_{CC} = 3,3$ V, l'intervallo dell'ADC è illustrato nella Tabella 4.1 di seguito.

Qualsiasi valore ADC al di fuori dell'intervallo mostrato è considerato non valido e le impostazioni devono essere regolate affinché rientrino in tale intervallo. Nel caso in cui la variazione della capacità sia importante per un'applicazione, dopo

V_{DD}	ADC_{high}	ADC_{low}	ADC_{mid}
3,3	806,7879	217,2121	512

Tabella 4.1: Intervallo ADC

aver determinato l'uscita corrente, il tempo di carica e la tensione di alimentazione, è possibile utilizzare le seguenti equazioni. L'intervallo valido per la capacità viene calcolato utilizzando i valori minimi e massimi degli ADC nell'equazione di capacità. Sostituendo le equazioni ADC basse e alte nell'equazione di capacità si ottengono le equazioni per i valori minimi e massimi di capacità, i quali sono:

$$C_{low} = \frac{I * T}{V_{CC} - 0.7}$$

$$C_{high} = \frac{I * T}{0.7}$$

L'intervallo programmabile per la corrente I varia da 1 μA a 63 μA , mentre l'intervallo programmabile per il tempo T varia da 0,5 μs a 32 μs . Tuttavia, poiché non vi è stata la necessità di modificare le impostazioni interne dell'MPR121, verranno utilizzati i valori di default, ovvero $I = 16 \mu A$ e $T = 0,5 \mu s$. Al fine di mantenere la linearità della sorgente di corrente interna, la tensione sull'intervallo suggerito dell'ingresso di rilevamento deve essere compresa tra 0,7 V e $V_{DD} - 0,7$ V. Utilizzando questi limiti di impostazione nell'equazione sopra menzionata, è possibile calcolare l'intervallo misurabile C , come descritto in Tabella 4.2.

V_{DD}	C_{high} [pF]	C_{low} [pF]
3,3	11,429	3,077

Tabella 4.2: Intervallo capacità

Poiché l'ADC è a 10 bit, l'equazione per il risultato della lettura dell'ADC è la seguente:

$$ADC_{counts} = \frac{I * T}{C} * \frac{1}{V_{CC}} * 1024$$

Riorganizzando l'equazione sopra, la capacità C può essere calcolata come di seguito:

$$C = \frac{I * T}{ADC_{counts}} * \frac{1}{V_{CC}} * 1024 = \frac{k}{ADC_{counts}}$$

dove $k = 2,4824 \cdot 10^{-9} \text{ F}$.

Per condurre la caratterizzazione del sensore, è stato sviluppato un sistema di lettura della capacità utilizzando il modulo d'interfaccia MPR121. Al fine di ottenere dati significativi, sono stati impiegati i primi quattro canali di lettura disponibili.

L'utilizzo di questi quattro canali permette di coprire un'ampia area del sensore e di rilevare la variazione di capacità in corrispondenza di diverse posizioni. Ciò consente di valutare in modo accurato la relazione tra la capacità misurata e la posizione del tocco sul sensore.

Ogni canale di lettura è stato configurato in modo da fornire un valore ADC rappresentativo della capacità rilevata. I valori di ADC ottenuti sono stati successivamente convertiti in capacità utilizzando le equazioni appropriate.

Di seguito, in Figura 4.1, è riassunto lo schema del circuito, che si completa con l'impiego di un Arduino *Mega 2560* come microcontrollore (MCU) .

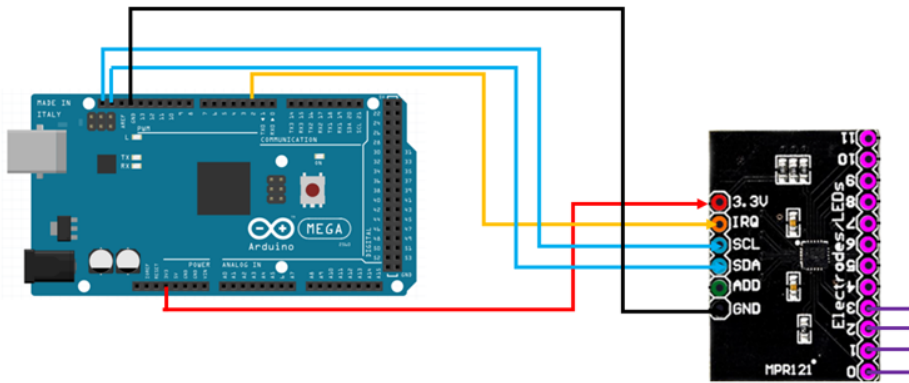


Figura 4.1: Collegamenti Arduino Mega con MPR 121

4.2 Caratterizzazione sperimentale

Nella presente sezione, saranno esposte le geometrie costruite, le diverse architetture testate e i risultati sperimentali ottenuti.

4.2.1 Architettura del sensore

L'obiettivo è caratterizzare il sensore e stabilire una relazione tra la capacità misurata e la posizione del tocco sul sensore.

In generale i principali strati di un sensore sono:

- **Strato attivo:** è responsabile della rilevazione del fenomeno fisico o delle grandezze misurate dal sensore ed è costituito dall'elettrodo di carbon black/spray conduttivo (può essere assimilabile alla Figura 3.10).
- **Strato isolante:** si trova tra lo strato attivo e lo strato conduttivo e serve a isolare e proteggere lo strato attivo dagli effetti esterni. Lo strato isolante può essere realizzato con materiali dielettrici o isolanti che impediscono il passaggio di corrente elettrica.
- **Strato conduttivo:** consente il passaggio di corrente elettrica all'interno del sensore. Può essere costituito da materiali conduttivi che forniscono un percorso di conduzione per la corrente elettrica generata o rilevata dallo strato attivo.
- **Strato di protezione:** può essere presente uno strato di protezione aggiuntivo che copre gli strati precedenti per proteggere il sensore dagli agenti esterni, come l'umidità, la polvere o gli agenti chimici.

Sulla base di questa suddivisione, sono state sviluppate tre diverse architetture del sensore, ognuna delle quali è stata sottoposta a dei test al fine di caratterizzarne il funzionamento. Ogni architettura presenta caratteristiche distintive determinate dalla presenza o assenza di specifici strati sul sensore.

Le tre architetture del sensore sono le seguenti:

1. **Architettura con elettrodo isolato:** il sensore è collegato al substrato e viene applicato uno strato isolante di *Elastosil® Film 2023* della Wacker sulla sua superficie. Lo spessore dello strato isolante è di $200\ \mu\text{m}$ (Figura 4.2).



Figura 4.2: Architettura con elettrodo isolato

2. **Architettura con elettrodo isolato e collegamento a terra:** oltre allo strato isolante, sono presenti due strati aggiuntivi. Uno strato di materiale conduttivo costituito da Kapton alluminizzato costituisce il collegamento a terra, mentre uno strato superficiale di Kapton funge da strato di protezione (Figura 4.3).

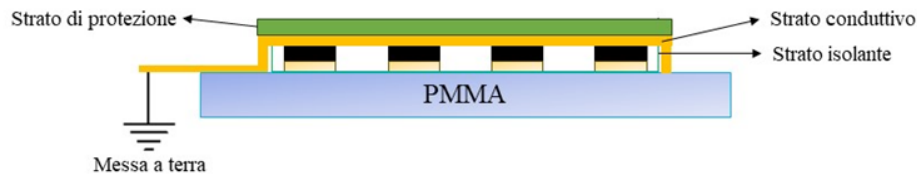


Figura 4.3: Architettura con elettrodo isolato e collegamento a terra

3. **Architettura con elettrodo isolato e conduttore flottante:** è simile alla seconda, ma in questo caso lo strato di materiale conduttivo non è collegato a terra, rimanendo flottante (Figura 4.4).



Figura 4.4: Architettura con elettrodo isolato e conduttore flottante

Nella Figura 4.5 e Figura 4.6 viene presentato il sensore fisicamente realizzato.

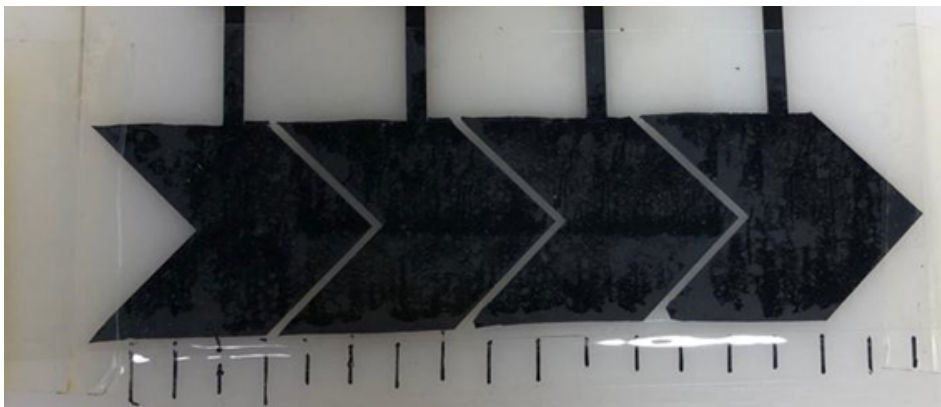


Figura 4.5: K_{10} : architettura con elettrodo isolato

4.3 Tipologie di test

Per ciascuna delle tre architetture sono state testate tre diverse tipologie di tocco:

1. Tocco con il dito;

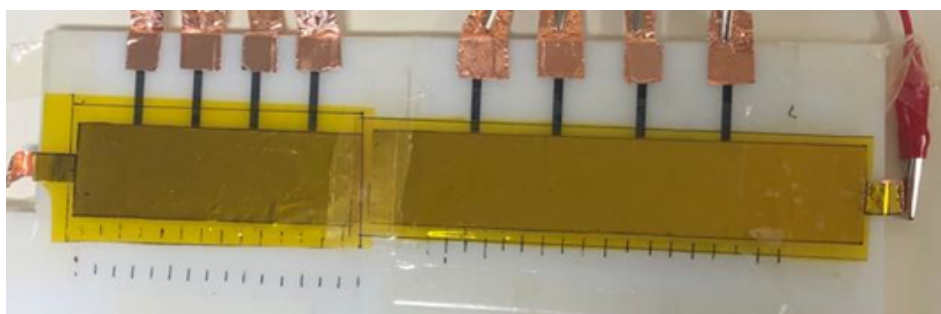


Figura 4.6: Sensore con tutti gli strati descritti

2. Tocco con materiale conduttivo;
3. Tocco con materiale isolante.

Al fine di simulare l'interazione con materiali isolanti e conduttivi nel contesto del sensore, sono state adottate specifiche strategie. Per rappresentare un materiale isolante, sono state utilizzate bacchette tagliate dal PMMA con uno spessore di 6 mm, mantenute nella loro forma originale senza alcun rivestimento aggiuntivo. Al contrario, per emulare il comportamento di un materiale conduttivo, le bacchette di PMMA sono state rivestite con del nastro di rame (Figura 4.7).



Figura 4.7: Bacchetta isolata (sinistra) e bacchetta conduttiva (destra)

Per ciascuna delle tre architetture, l'elettrodo è stato suddiviso in strisce di spessore 6 mm che coprono l'intera lunghezza dell'elettrodo stesso. Questo è stato fatto al fine di garantire una copertura completa dell'elettrodo e permettere una misurazione accurata della capacità lungo tutto il suo percorso.

I test sono stati condotti simulando il tocco mediante il posizionamento delle bacchette o del dito sulla posizione desiderata, mantenendole ferme sull'elettrodo per un certo periodo di tempo.

Ciascuna tipologia di test è stata ripetuta tre volte per garantire la consistenza e l'affidabilità dei risultati. In totale, sono stati effettuati 27 test per ciascun singolo elettrodo, considerando le tre tipologie di tocco e le tre ripetizioni.

Complessivamente, sono stati effettuati numerosi test per ottenere una caratterizzazione completa del sensore, fornendo dati affidabili sulla relazione tra capacità misurata e posizione del tocco.

4.3.1 Preprocessing dei dati

Durante il processo di caratterizzazione, sono state misurate le capacità parassite dei circuiti per assicurare un'accurata valutazione delle variazioni di capacità. Le capacità parassite sono state misurate per ciascun circuito e successivamente è stata calcolata la media dei valori ottenuti. Al fine di rendere i dati più facilmente utilizzabili, i valori delle capacità sono stati normalizzati nell'intervallo compreso tra 0 e 1. Questa normalizzazione consente di confrontare e utilizzare i valori in modo più efficace. Successivamente, sulla base di questi valori normalizzati, è stata calcolata la variazione di capacità per valutare l'entità delle variazioni tra diverse condizioni o posizioni.

I dati sono stati acquisiti utilizzando il software *Data Streamer* di Excel, che rappresenta una solida soluzione per la registrazione e l'analisi dei dati. *Data Streamer* di Excel è un add-in per Microsoft Excel che consente di acquisire, registrare e visualizzare dati in tempo reale provenienti da diverse fonti, inclusi dispositivi hardware esterni come Arduino. È una potente e versatile funzionalità che facilita la raccolta di dati e l'analisi dei risultati all'interno dell'ambiente familiare di Excel.

È stato effettuato il collegamento tra il *Data Streamer* di Excel e Arduino utilizzando lo script *Data Stream* di Bare Conductive al fine di acquisire e registrare dati di capacità.

Bare Conductive è un'azienda specializzata nello sviluppo di tecnologie interattive, comprese soluzioni basate su Arduino. La libreria utilizzata è la "Bare Conductive MPR121 Library", che consente di interfacciarsi con il chip MPR121.

La libreria Bare Conductive MPR121 semplifica notevolmente l'utilizzo del sensore MPR121 con Arduino. Fornisce funzioni per la configurazione dei parametri del sensore, come la soglia di rilevamento del tocco, nonché per la lettura dei dati di capacità da ogni canale del sensore. Inoltre, la libreria offre anche funzioni per la gestione degli eventi di tocco, consentendo di rilevare e rispondere ai tocchi sul sensore in modo semplice ed efficiente.

Al fine di garantire la precisione nella raccolta dei dati, si è configurato Arduino in modo che effettuasse un ciclo di acquisizione ogni due secondi. Ciò ha consentito di registrare i valori di capacità a intervalli di due secondi, offrendo così un

tempo sufficiente per posizionare accuratamente il dito o la bacchetta sull'elettrodo prima di ogni acquisizione.

Una volta avviata l'acquisizione dei dati, i valori di capacitività misurati da Arduino sono stati trasmessi e visualizzati in tempo reale nella scheda "Data Streamer" di Excel. Grazie all'integrazione tra il Data Streamer di Excel e lo script di Arduino, è stato possibile monitorare costantemente i valori di capacitività registrati nel corso del tempo.

Durante il processo di acquisizione dei dati, è stata prestata particolare attenzione alla corretta configurazione del software Data Streamer al fine di garantire una corretta registrazione dei dati provenienti dal sensore utilizzato per la misurazione. Sono state selezionate le impostazioni di campionamento più appropriate per ottenere una frequenza di campionamento adeguata e ottenere misurazioni accurate.

Il numero di acquisizioni o campionamenti corrisponde al numero di discretizzazioni effettuate per ciascun elettrodo. Infatti, sono state effettuate 16 acquisizioni per l'elettrodo K_3 e 20 acquisizioni per l'elettrodo K_10 .

Durante ogni ciclo di acquisizione, si sono registrati 16 valori per l'elettrodo K_3 e 20 valori per l'elettrodo K_10 . Questi valori rappresentano le misurazioni di capacitività effettuate ad intervalli di tempo specifici, come definito nello script di Arduino.

Successivamente, i dati raccolti sono stati elaborati utilizzando gli strumenti di analisi e calcolo forniti da Excel.

4.4 Analisi sperimentale

Per ciascuna tipologia di tocco, sono stati condotti tre test separati utilizzando i quattro canali di acquisizione. Durante questi test, è stato selezionato un determinato numero di discretizzazioni per ciascun elettrodo.

Per ciascuna delle tre architetture, i test sono stati suddivisi in tre tipi: "Isolato" (isolato), "Not Grounded" (non collegato a terra) e "Grounded" (collegato a terra). Sono stati eseguiti tre test per ogni combinazione architettura-tocco, e i dati risultanti sono stati registrati in un foglio di lavoro di Excel.

Successivamente, i dati sono stati elaborati utilizzando Excel. L'analisi dei dati è stata condotta calcolando la media dei valori per ciascun canale di lettura. Per ottenere la media, è stato considerato l' n -esimo valore di ogni canale, dove n varia da 1 al numero di discretizzazioni effettuate. Nel caso dell'elettrodo K_3 , il numero di discretizzazioni è pari a 16, mentre per l'elettrodo K_10 è di 20.

Per calcolare la media, è stata effettuata la somma dei valori n -esimi di ciascun canale e il risultato è stato diviso per il numero totale di test effettuati. L'equazione utilizzata per calcolare la media è la seguente:

$$\Delta C_i = \frac{\sum_{n=1}^3 \bar{C}_i}{3}$$

Successivamente, su questa media è stata applicata la normalizzazione per ogni canale utilizzando l'equazione:

$$\Delta C_N = \frac{\Delta C_i - \Delta C_i(0)}{\text{Max}(\Delta C_i) - \text{Min}(\Delta C_i)}$$

Dove:

- ΔC_i rappresenta il valore di variazione di capacità per ogni discretizzazione i ;
- $\Delta C_i(0)$ rappresenta il valore di variazione di capacità iniziale per la discretizzazione i ;
- $\text{Max}(\Delta C_i)$ rappresenta il valore massimo di variazione di capacità tra tutte le discretizzazioni;
- $\text{Min}(\Delta C_i)$ rappresenta il valore minimo di variazione di capacità tra tutte le discretizzazioni;
- N rappresenta il numero totale di canali di acquisizione.

La normalizzazione dei valori delle discretizzazioni consente di standardizzare i dati e facilitare le successive analisi e confronti tra i diversi elettrodi e le diverse tipologie di tocco.

Segue una presentazione dei risultati suddivisi per tipo di tocco e tipo di sensore utilizzati.

La rappresentazione grafica dei risultati normalizzati per i sensori, ottenuti con carbon black e spray conduttivo, offre una visione chiara delle differenze di risposta tra le due configurazioni. Questa analisi comparativa fornisce informazioni preziose per valutare l'efficacia dei materiali utilizzati nella realizzazione del sensore e può essere un punto di partenza per ulteriori ottimizzazioni e miglioramenti nella progettazione dei sensori conduttivi.

Attraverso l'analisi dei risultati, è possibile valutare e confrontare le risposte del sensore in relazione alle diverse modalità di tocco. Questo permette di identificare eventuali differenze significative nel comportamento del sensore in base alla tipologia di tocco applicata.

4.4.1 K_3 e K_10 Isolato

Nel contesto dell'analisi condotta, vengono presentati i risultati ottenuti per le due tipologie di sensore, i quali sono stati protetti da uno strato isolante di silicone della Wacker con uno spessore di $200\ \mu\text{m}$, descritto in Figura 4.2.

Quando il materiale conduttivo tocca lo strato isolante sopra il sensore, si verifica una variazione nella capacità del sensore a causa dell'effetto capacitivo generato dal materiale conduttivo. Questa variazione può essere misurata dal sensore e interpretata come la presenza del materiale conduttivo.

I risultati sono riportati nelle Figure 4.9 e 4.8.

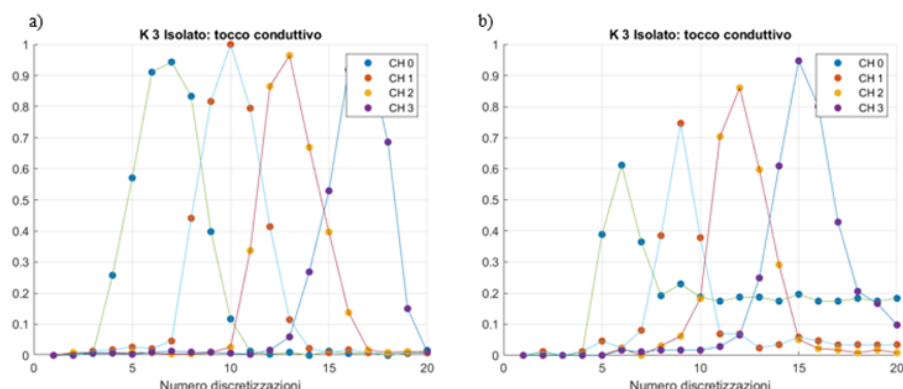


Figura 4.8: K_3 Isolato: tocco conduttivo a) Carbon Black b) Spray ¹

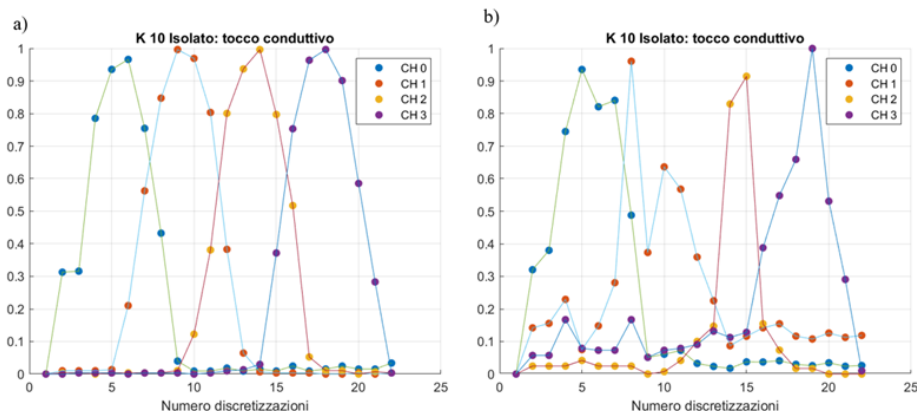


Figura 4.9: K_10 Isolato: tocco conduttivo a) Carbon Black b) Spray ¹

¹Il numero di discretizzazioni è da intendere come posizione del tocco effettuato. Per il sensore K_10 fare riferimento alla Figura 5.2, mentre per il K_3 fare riferimento alla Figura 5.1

Nelle Figure 4.11 e 4.10 è illustrato il tocco isolante. Se il sensore coperto da uno strato isolante viene toccato da un materiale isolante, ci si aspetta una risposta ridotta o nulla in termini di variazione di conducibilità. Poiché il materiale isolante non trasmette la carica elettrica, la presenza di questo tocco potrebbe non influenzare significativamente la conducibilità del sensore.

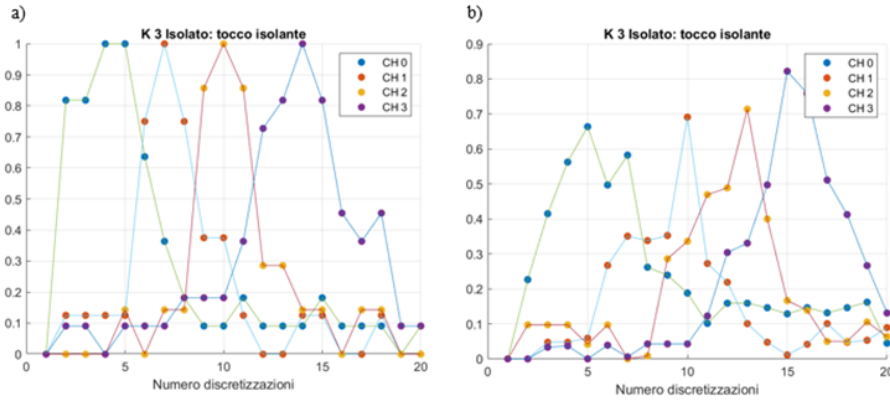


Figura 4.10: K_3 Isolato: tocco isolante a) Carbon Black b) Spray 1

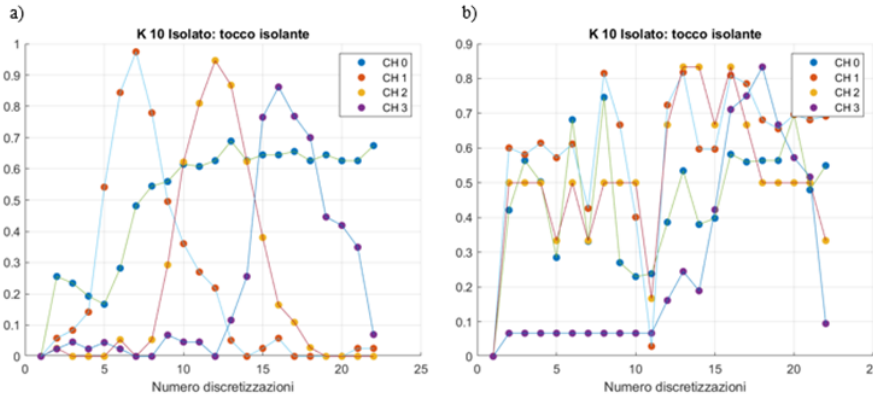


Figura 4.11: K_{10} Isolato: tocco isolante a) Carbon Black b) Spray 1

Infine, se un sensore capacitivo coperto da uno strato di materiale isolante viene toccato con un dito umano, ci si può aspettare una risposta capacitiva ridotta rispetto al caso in cui il sensore fosse toccato direttamente dal dito umano senza lo strato isolante. Ciò è dovuto al fatto che il materiale isolante agisce come una barriera che riduce l'interazione capacitiva tra il sensore e il dito. La risposta è comunque paragonabile a quella che si ha in presenza di un tocco con materiale conduttivo. Nelle figure 4.13 e 4.12 sono presentati tali risultati.

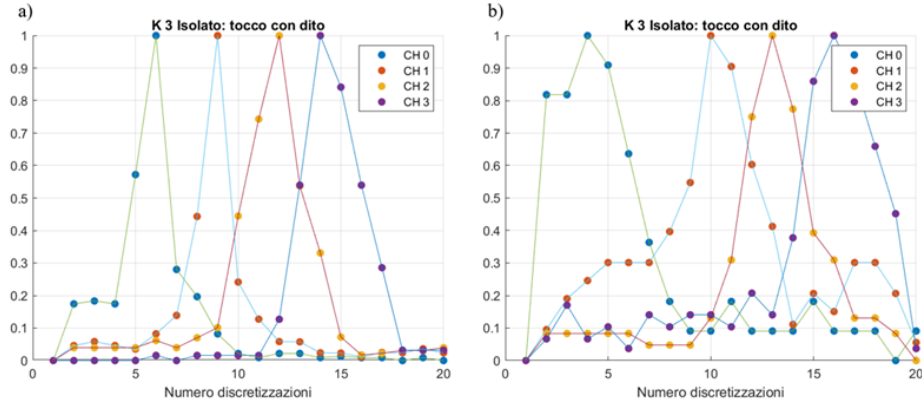


Figura 4.12: K_3 Isolato: tocco con dito a) Carbon Black b) Spray 1

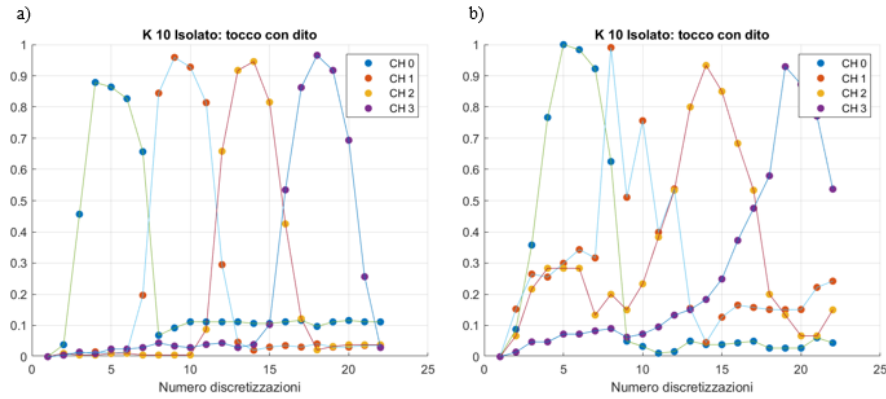


Figura 4.13: K_{10} Isolato: tocco con dito a) Carbon Black b) Spray 1

4.4.2 K_3 e K_{10} Not Grounded

Un sensore "not grounded" si riferisce a un sensore che non è collegato a terra o a un riferimento di tensione comune. La Figura 4.4 già presentata descrive dettagliatamente l'architettura del sensore.

È importante considerare che l'assenza di un collegamento a terra può anche rendere il sensore più suscettibile a rumori e disturbi elettrici, limitando la sua precisione e affidabilità in alcune situazioni. Pertanto, quando si utilizza un sensore "not grounded", è necessario valutare attentamente le condizioni ambientali e le fonti di interferenza potenziali per ottenere misurazioni accurate e affidabili.

In questo caso, infatti, lo strato conduttivo intermedio è collegato a terra, e ciò potrebbe influire sul comportamento del sensore capacitivo. La connessione a

terra è importante per creare un riferimento di tensione stabile e consentire una corretta misurazione della capacità tra gli elettrodi.

Senza una connessione a terra dello strato conduttivo, potrebbe verificarsi un'interferenza elettrica o un'instabilità del segnale. Ciò potrebbe compromettere la capacità del sensore di rilevare e discriminare in modo accurato i tocchi o le interazioni sulla sua superficie.

In questa situazione si validerà l'utilizzo di un sensore con uno strato isolante seguito da uno strato conduttivo non collegato a terra e un ulteriore strato dielettrico. Ci si aspetta che la risposta del sensore possa essere schermata oppure che l'esistenza dei singoli canali non venga rilevata.

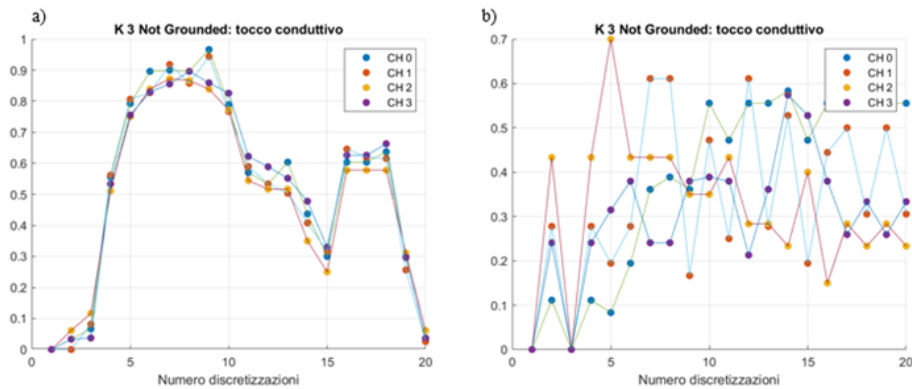


Figura 4.14: K_3 Not Grounded: tocco conduttivo a) Carbon Black b) Spray 1

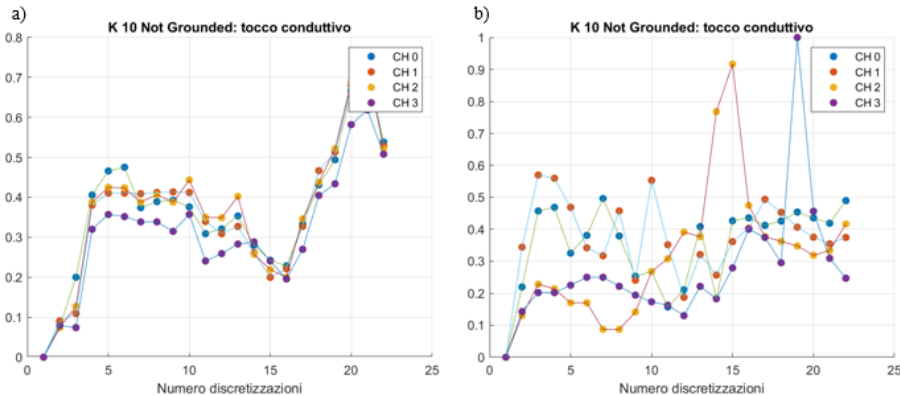


Figura 4.15: K_{10} Not Grounded: tocco conduttivo a) Carbon Black b) Spray 1

Quando il sensore viene toccato da un materiale conduttivo (Figure 4.15 e 4.14), si vede una risposta che riflette l'effetto della conducibilità di tale materiale

e della sua interazione con lo strato conduttivo. Questa interazione può causare una variazione nelle caratteristiche elettriche del sensore, che può essere rilevata come una risposta misurabile. In questo caso, un sensore toccato da un materiale conduttivo non apprezza la variazione di ogni canale e vede il sensore come costituito da un unico elettrodo.

Quando il sensore viene toccato da un materiale isolante (Figure 4.17 e 4.16), ci si aspetta una risposta che sia principalmente influenzata dall'effetto dello strato dielettrico. Lo strato dielettrico può influire sulla capacità di conduzione del sensore e, di conseguenza, sulla sua risposta in presenza di un materiale isolante.

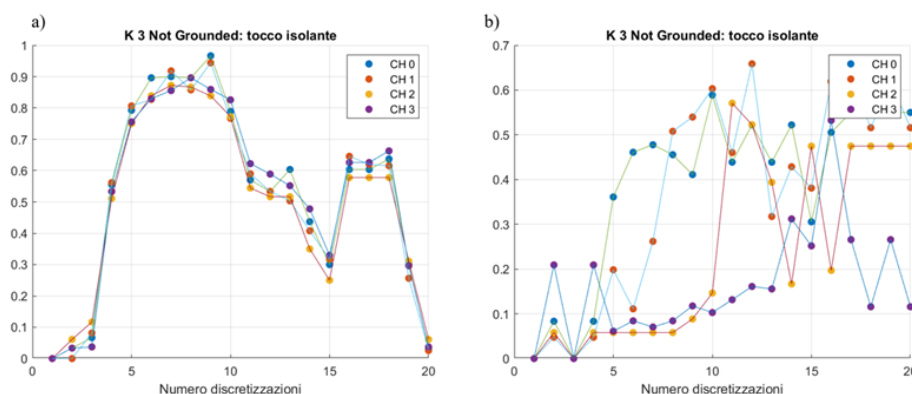


Figura 4.16: K_3 Not Grounded: tocco isolante a) Carbon Black b) Spray 1

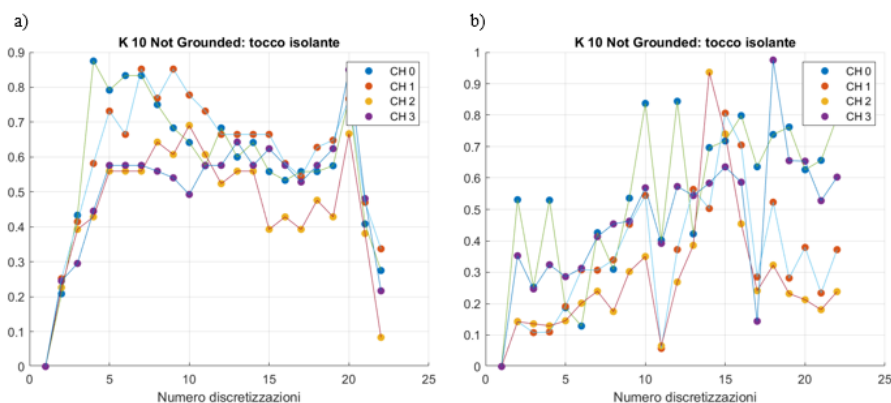


Figura 4.17: K_10 Not Grounded: tocco isolante a) Carbon Black b) Spray 1

Quando il sensore viene toccato direttamente con un dito (Figure 4.19 e 4.18), la risposta sarà influenzata dalla conducibilità del corpo umano e dalla sua interazione con gli strati isolanti e conduttivi presenti nel sensore.

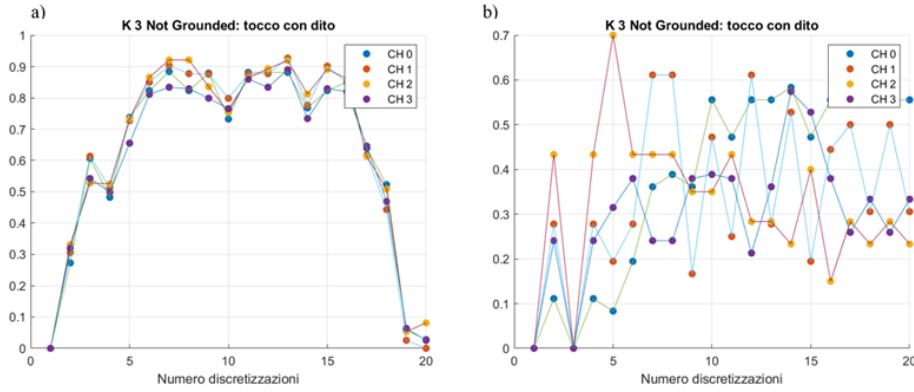


Figura 4.18: K_3 Not Grounded: tocco con dito a) Carbon Black b) Spray 1

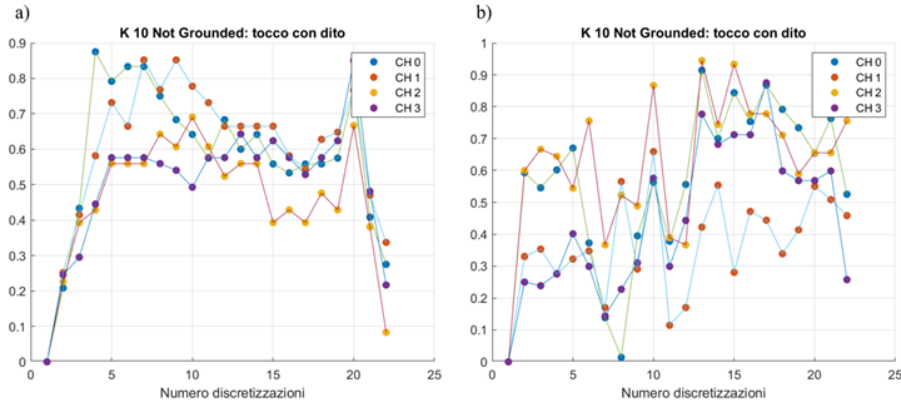


Figura 4.19: K_{10} Not Grounded: tocco con dito a) Carbon Black b) Spray 1

4.4.3 K_3 e K_{10} Grounded

Un sensore capacitivo di tipo "grounded" è un dispositivo in cui lo strato conduttivo presente tra due strati isolanti è elettricamente connesso a terra. Questa configurazione consente al sensore di rilevare con maggiore precisione e sensibilità i materiali dielettrici.

Quando un materiale dielettrico viene a contatto con il sensore capacitivo "grounded", si verifica una variazione nella capacità elettrica tra gli elettrodi del sensore. Questa variazione di capacità è influenzata dalla permittività dielettrica del materiale, che rappresenta la sua capacità di immagazzinare energia elettrica quando sottoposto a un campo elettrico.

I materiali dielettrici, come ad esempio la plastica o la gomma, tendono ad avere una permittività dielettrica più elevata rispetto ai materiali conduttivi, come il metallo. Di conseguenza, quando il sensore capacitivo "grounded" viene toccato

da un materiale dielettrico, si verifica una maggiore variazione di capacità rispetto al tocco di un materiale conduttivo.

La connessione elettrica a terra dello strato conduttivo svolge un ruolo chiave nel rilevamento accurato dei materiali dielettrici. Questa connessione permette al sensore di avere un punto di riferimento stabile e di rilevare con precisione la variazione di capacità causata dal tocco del materiale isolante. La connessione a terra crea una sorta di "ponte" che avvicina l'elettrodo di terra ai canali del sensore, migliorando l'accoppiamento capacitivo e facilitando la rilevazione delle variazioni di capacità.

Di conseguenza, un sensore capacitivo "grounded" può riconoscere in modo più distinto e affidabile i materiali dielettrici rispetto ai materiali conduttivi. Tuttavia, è importante tenere conto di altri fattori, come la configurazione specifica del sensore, la sensibilità del circuito e la distanza tra gli elettrodi, al fine di ottenere risultati ottimali nella rilevazione dei materiali dielettrici.

Nel caso in cui un sensore capacitivo di tipo "grounded" viene toccato con un materiale conduttivo (Figure 4.21 e 4.20), ci si può aspettare una variazione nella capacità elettrica tra gli elettrodi del sensore. Tuttavia, questa variazione potrebbe essere relativamente minore rispetto al contatto con un materiale dielettrico.

Questo perché il materiale conduttivo ha la capacità intrinseca di condurre l'elettricità e la sua interazione con il sensore capacitivo "grounded" potrebbe non provocare una variazione significativa della capacità. Ciò si spiega dal fatto che il materiale conduttivo è in grado di dissipare rapidamente la carica elettrica andando a ridurre l'effetto capacitivo generale rispetto al contatto con un materiale dielettrico.

Nelle Figure 4.21 e 4.20 è descritto l'andamento del sensore quando toccato da un materiale conduttivo.

Quando si tocca un sensore capacitivo di tipo "grounded" con un materiale isolante (Figure 4.23 e 4.22), è probabile che si verifichino variazioni nella capacità del sensore. Questo fenomeno è dovuto all'influenza del materiale isolante sul campo elettrico tra gli elettrodi del sensore, nonostante il materiale isolante stesso non conduca corrente.

La capacità di rilevare tali variazioni dipende dalla capacità del materiale isolante di alterare il campo elettrico. Poiché il materiale isolante non permette il passaggio della corrente, la sua presenza può comunque influenzare il campo elettrico, generando una distribuzione di carica o un effetto dielettrico. Questo, a sua volta, può provocare una variazione nella capacità del sensore.

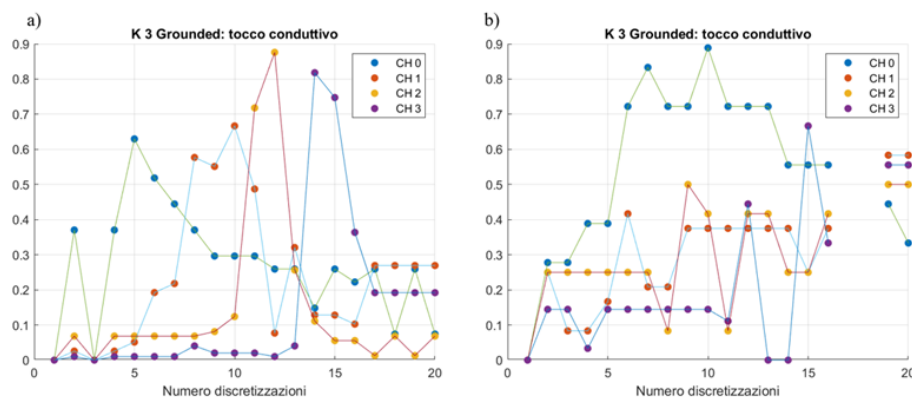


Figura 4.20: K_3 Grounded: tocco conduttivo a) Carbon Black b) Spray 1

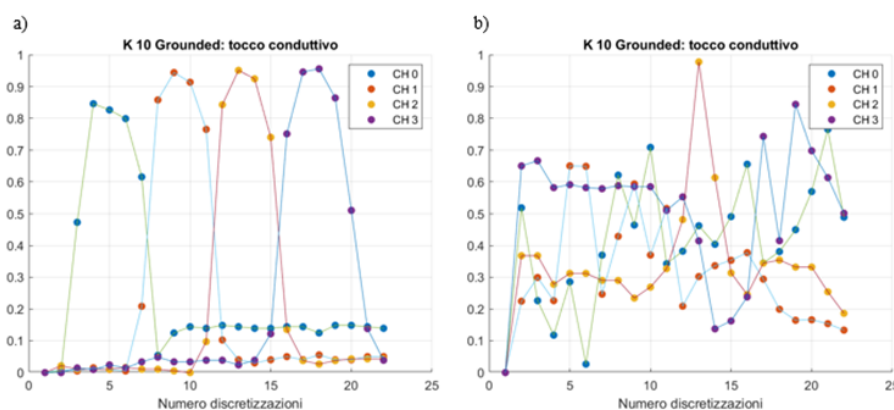


Figura 4.21: K_10 Grounded: tocco conduttivo a) Carbon Black b) Spray 1

È importante sottolineare che l'effetto del materiale isolante dipende dalle sue specifiche proprietà, come la costante dielettrica, lo spessore e la forma. Materiali isolanti con diverse caratteristiche possono influire in modo diverso sul campo elettrico e sulla capacità del sensore.

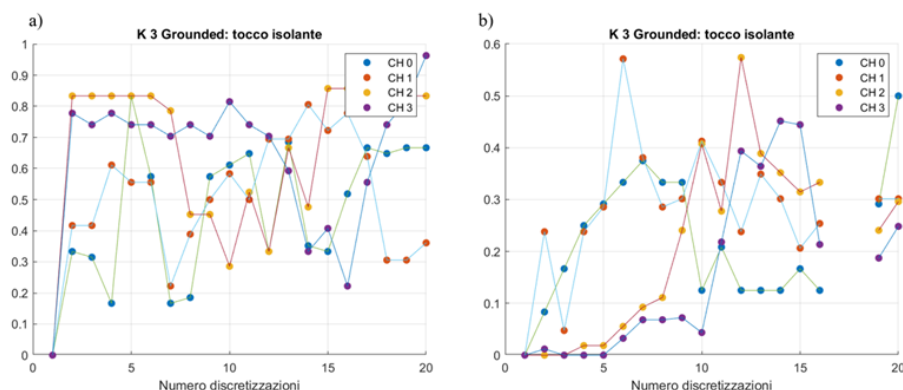


Figura 4.22: K_3 Grounded: tocco isolante a) Carbon Black b) Spray 1

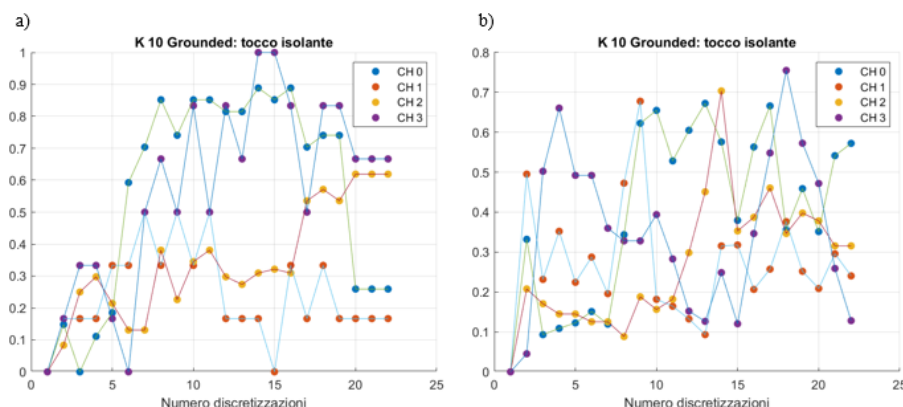


Figura 4.23: K_{10} Grounded: tocco isolante a) Carbon Black b) Spray 1

Quando un sensore "grounded" viene toccato da un dito umano (Figure 4.25 e 4.24), ci si aspetta di osservare una significativa variazione nella capacità del sensore. Questo fenomeno è attribuibile alla conducibilità del corpo umano e all'interazione meccanica tra il dito e il sistema del sensore.

Quando il dito umano entra in contatto con il sensore "grounded", si crea un collegamento elettrico tra il corpo umano e il punto di riferimento a terra del sensore. Poiché il corpo umano funge da conduttore, permette il passaggio di corrente attraverso il sensore, creando un percorso per il flusso di energia elettrica.

L'interazione meccanica tra il dito umano e il sensore provoca un avvicinamento dell'elettrodo di terra ai canali del sensore. Tale avvicinamento influisce sulla distribuzione del campo elettrico all'interno del sensore, determinando una variazione nella capacità complessiva del sistema.

La presenza del dito umano provoca una variazione nella capacità del sensore "grounded". Questa variazione può essere rilevata attraverso la misurazione della capacità del sensore stesso e utilizzata per identificare e rilevare il tocco del dito umano.

Tuttavia, è importante considerare che la risposta del sensore può essere influenzata da diversi fattori. La sensibilità del sensore, ad esempio, può influire sulla precisione della rilevazione.

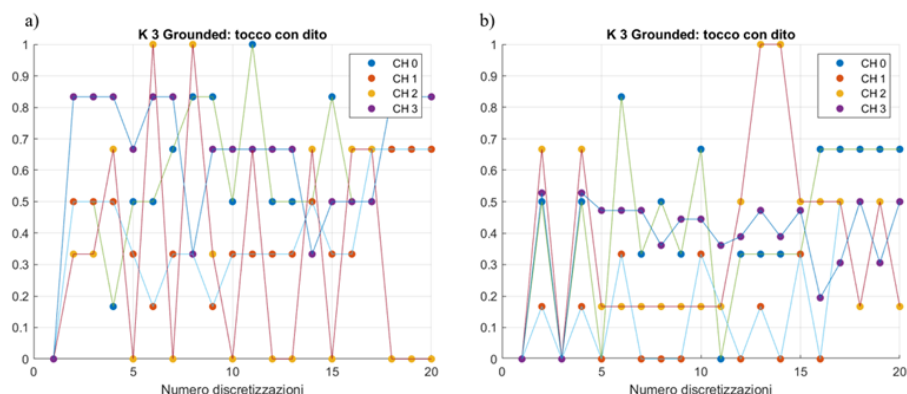


Figura 4.24: K_3 Grounded: tocco con dito a) Carbon Black b) Spray 1

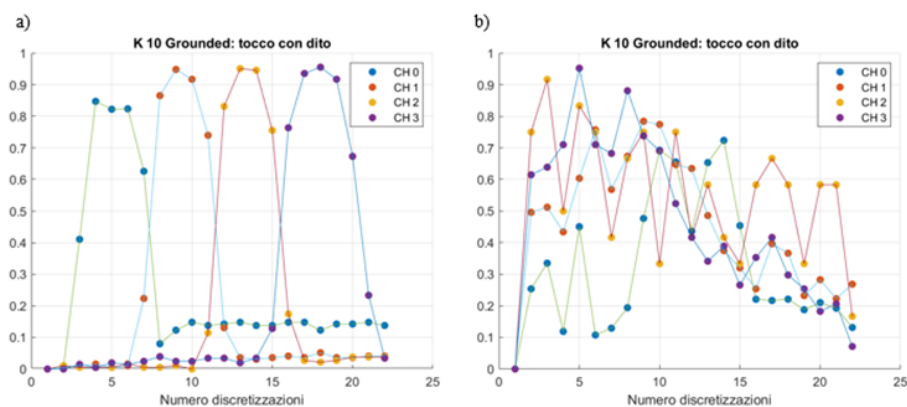


Figura 4.25: K_{10} Grounded: tocco con dito a) Carbon Black b) Spray 1

4.5 Discussione dei risultati

La metodologia dei sensori spray utilizzata in questo lavoro non ha fornito risultati soddisfacenti, indicando la necessità di una maggiore elaborazione del processo di

fabbricazione. Pertanto, la discussione si concentrerà esclusivamente sui sensori costituiti da elettrodi in carbon black.

Osservando i risultati ottenuti, si possono fare alcune considerazioni. In particolare, il sensore K_{10} mostra variazioni di capacità più dolci e collinari rispetto al sensore K_3 , che presenta picchi distinti in corrispondenza del massimo di ogni canale. Questa differenza è attribuibile al fatto che l'area 2 (fare riferimento alla Figura 3.4), condivisa con gli elettrodi adiacenti, è pressoché inesistente nel sensore di tipo K_3 , il che porta la variazione di capacità a passare dal suo punto massimo al successivo punto attraverso un picco.

Per quanto riguarda le diverse architetture dei sensori, nel sensore di tipo isolato si osservano variazioni di capacità visibilmente apprezzabili. Tuttavia, il tocco effettuato con materiale conduttivo e dito umano risulta essere il più significativo in termini di risposta.

D'altra parte, il sensore di tipo "not grounded" non ha fornito risultati significativi in termini di risposta per nessuno dei materiali testati. Questo conferma l'ipotesi che l'assenza di un collegamento a terra dello strato conduttivo intermedio potrebbe aver determinato una schermatura del segnale e un'incapacità di rilevare le variazioni dei diversi canali.

Infine, ci si aspettava che il sensore di tipo "grounded" fosse in grado di distinguere in modo più preciso il tocco con materiale isolante rispetto alle altre due architetture. Tuttavia, l'effettiva variazione di risposta non è stata apprezzata come previsto, poiché le proprietà del materiale dielettrico che tocca il sensore svolgono un ruolo fondamentale nell'interazione e possono influenzare la capacità del sensore di rilevare le variazioni.

In conclusione, la discussione dei risultati evidenzia la necessità di ulteriori studi per migliorare il processo di fabbricazione dei sensori e per valutare le diverse architetture al fine di ottenere prestazioni ottimali. Sono richieste approfondite indagini sulle proprietà dei materiali e sulle interazioni specifiche tra i sensori e il tocco, al fine di comprenderne appieno il comportamento e massimizzarne le potenzialità nelle applicazioni future.

Capitolo 5

Analisi Posizionale

I risultati ottenuti nel capitolo precedente saranno ora utilizzati per sviluppare una metodologia finalizzata alla determinazione della posizione relativa all'interno del sensore, basandosi sulla misurazione della variazione di capacità rilevata sugli elettrodi. Pertanto, è necessario calcolare la misurazione della capacità sugli elettrodi.

Dalla ricerca condotta in precedenza, è stato stabilito che i sensori a base di carbon black presentano una risposta più accurata quando vengono toccati da materiali capacitivi. Di conseguenza, è stata presa la decisione di utilizzare i risultati ottenuti dai sensori a base di carbon black nel caso isolato quando toccati da materiale conduttivo come base per la metodologia proposta. Questa scelta è motivata dal fatto che il tocco capacitivo fornisce una misurazione più precisa rispetto al tocco con materiali isolanti o al tocco con il dito.

Proseguendo con lo sviluppo della metodologia, si prevede di analizzare e interpretare i dati relativi alla variazione di capacità misurata sugli elettrodi dei sensori in carbon black quando vengono toccati con materiali capacitivi.

L'obiettivo è quello di stabilire una correlazione tra la variazione di capacità rilevata e la posizione relativa all'interno del sensore, al fine di ottenere una stima precisa della posizione in base ai dati di capacità registrati.

Attraverso un'elaborazione e un'analisi accurata dei dati, sarà possibile definire un modello o un algoritmo che permetta di determinare la posizione all'interno del sensore in base alle misurazioni di capacità ottenute sugli elettrodi. Ciò consentirà di sfruttare appieno le proprietà dei sensori in carbon black e del tocco capacitivo per ottenere una misurazione precisa della posizione all'interno del sensore.

Nel contesto di questa ricerca, è stato sviluppato un approccio personalizzato per correlare la variazione di capacità registrata con l'area coperta sui singoli elettrodi. Per ottenere questa correlazione personalizzata, è stato seguito il seguente procedimento:

1. **Raccolta dei dati:** sono stati raccolti dati sperimentali che comprendono la variazione di capacità registrata su ciascun canale e l'area corrispondente coperta sui singoli elettrodi. Questi dati sono stati ottenuti utilizzando il sensore MPR121 e le relative misurazioni. Nelle Figure 5.2 e 5.1 sono apprezzabili le differenti aree dei sensori.
2. **Analisi dei dati:** i dati raccolti sono stati analizzati per identificare le relazioni tra la variazione di capacità e l'area coperta. È stato osservato che ogni valore di capacità registrato corrisponde a un'area specifica coperta sui singoli elettrodi.
3. **Creazione di una funzione di correlazione:** per creare una funzione di correlazione personalizzata, sono stati utilizzati strumenti software come Excel. Sulla base dei dati sperimentali, è stato esplorato l'andamento dei valori di capacità in relazione alle diverse aree coperte. Sono state testate diverse funzioni matematiche, come polinomi di grado variabile, per approssimare al meglio la relazione tra variazione di capacità e area coperta.
4. **Ottimizzazione dei coefficienti:** utilizzando le funzioni matematiche selezionate, sono stati calcolati i coefficienti che minimizzano l'errore tra i valori stimati di capacità e i valori effettivamente misurati. Questo processo di ottimizzazione può essere eseguito utilizzando strumenti software come il metodo dei minimi quadrati.
5. **Valutazione della correlazione:** una volta ottenuti i coefficienti ottimizzati, è stata valutata la qualità della correlazione tra variazione di capacità e area coperta. Sono state utilizzate metriche di valutazione come il coefficiente di determinazione (R^2) per valutare quanto bene la funzione di correlazione approssimi i dati sperimentali.

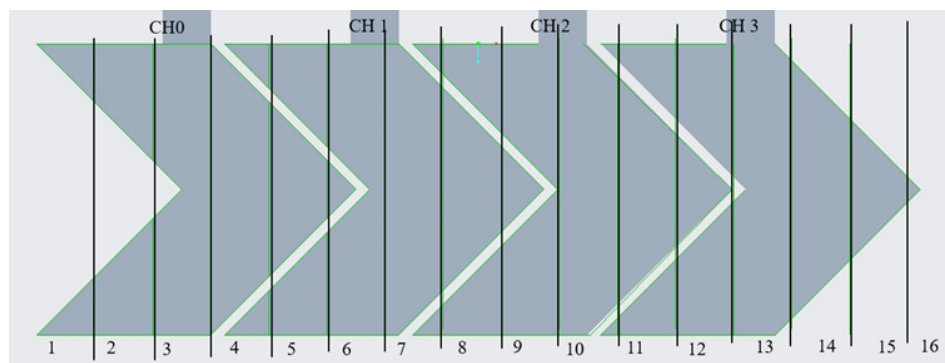


Figura 5.1: K_3 Discretizzato

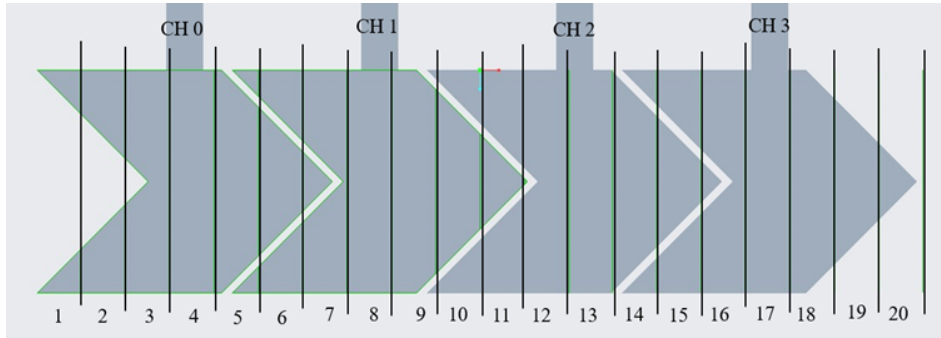


Figura 5.2: K_{10} Discretizzato

Ciascun sensore è stato suddiviso in segmenti di lunghezza pari a 6 mm. Nel caso del sensore K_3 abbiamo ottenuto 16 discretizzazioni, mentre nel caso del sensore K_{10} abbiamo ottenuto 20 discretizzazioni.

La variazione di capacità per ogni canale può essere calcolata sottraendo il valore iniziale dalla media dei valori per quel canale. Possiamo rappresentare questa operazione con l'equazione:

$$\Delta C_i = C_{avg_i} - C_{0_i}$$

dove:

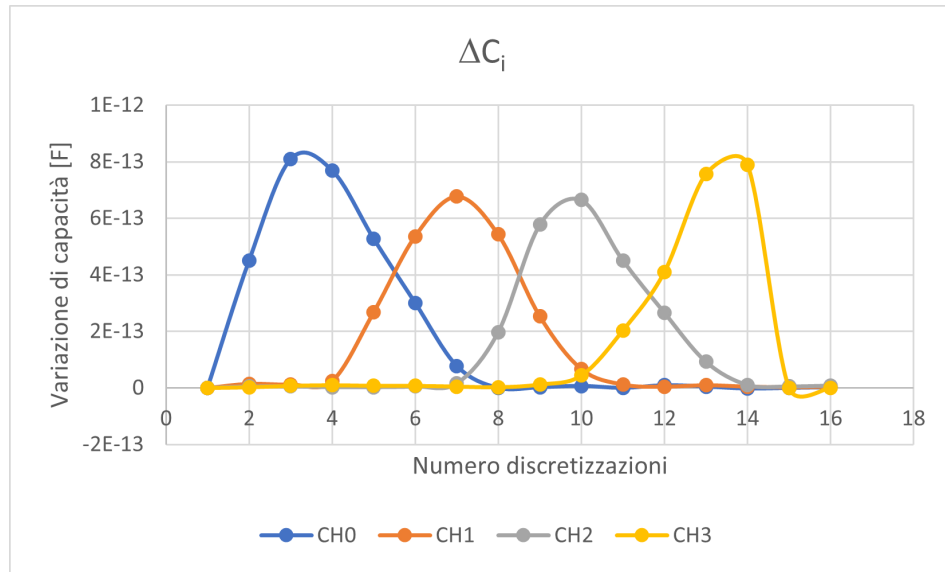
- ΔC_i rappresenta la variazione di capacità per il canale i ;
- C_{avg_i} rappresenta la media dei valori di capacità per il canale i ;
- C_{0_i} rappresenta il valore iniziale di capacità per il canale i .

Dove i può assumere i valori da 1 a 4, in quanto ci si riferisce ai quattro canali del sensore.

È previsto che i valori di variazione di capacità più elevati si verifichino nella zona centrale specifica di ciascun sensore (Area 2).

I valori delle variazioni di capacità per il sensore K_{10} sono indicati nella Figura 5.4, mentre quelle relative al sensore K_3 sono indicati nella Figura 5.3.

Nella Tabella 5.1 e nella Tabella 5.2 sono riportati i valori effettivi delle variazioni di capacità per ogni canale in relazione alla posizione sull'elettrodo.

Figura 5.3: Variazione di capacità sensore K_3

	CH0	CH1	CH2	CH3
1	0	0	0	0
2	4,49762E-13	1,47E-14	5,18E-15	2,39E-15
3	7,66338E-13	1,22E-14	5,18E-15	7,19E-15
4	8,08996E-13	2,46E-14	2,59E-15	9,59E-15
5	6,89479E-13	2,67E-13	2,59E-15	7,19E-15
6	3,00929E-13	5,36E-13	5,18E-15	7,19E-15
7	7,79656E-14	6,76E-13	1,56E-14	4,79E-15
8	0	5,42E-13	1,98E-13	2,39E-15
9	2,32938E-15	2,54E-13	5,77E-13	1,2E-14
10	6,96893E-15	6,7E-14	6,65E-13	4,35E-14
11	0	1,22E-14	4,51E-13	2,03E-13
12	9,2971E-15	4,89E-15	2,66E-13	4,1E-13
13	4,64336E-15	9,79E-15	9,25E-14	7,56E-13
14	-2,31779E-15	4,89E-15	1,04E-14	7,9E-13
15	0	2,44E-15	5,18E-15	0
16	2,32038E-15	4,89E-15	7,78E-15	0

Tabella 5.1: Valori variazioni di capacità K_3

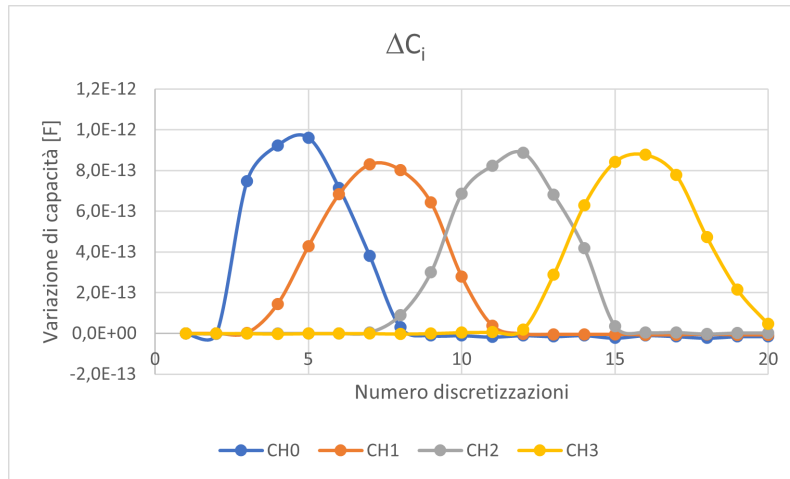


Figura 5.4: Variazione di capacità sensore K_{10}

	CH0	CH1	CH2	CH3
1	0	0	0	0
2	0	0	-2,6E-15	0
3	7,5E-13	2,38E-15	0	0
4	9,2E-13	1,45E-13	0	-2,4E-15
5	9,6E-13	4,28E-13	0	0
6	7,1E-13	6,84E-13	0	0
7	3,8E-13	8,3E-13	5,21E-15	0
8	3,0E-14	8,03E-13	9,03E-14	-2,4E-15
9	-1,0E-14	6,43E-13	3E-13	0
10	-1,0E-14	2,79E-13	6,85E-13	4,82E-15
11	-1,7E-14	3,85E-14	8,25E-13	7,23E-15
12	-1,0E-14	-2,4E-15	8,88E-13	1,93E-14
13	-1,5E-14	-4,8E-15	6,82E-13	2,88E-13
14	-1,0E-14	-4,8E-15	4,19E-13	6,31E-13
15	-2,2E-14	-4,8E-15	3,67E-14	8,43E-13
16	-1,0E-14	-7,1E-15	5,21E-15	8,78E-13
17	-1,5E-14	-7,1E-15	5,21E-15	7,78E-13
18	-2,2E-14	-4,8E-15	-2,6E-15	4,74E-13
19	-1,5E-14	-7,1E-15	2,6E-15	2,15E-13
20	-1,5E-14	-7,1E-15	2,6E-15	4,62E-14

Tabella 5.2: Valori variazioni di capacità K_{10}

Si osserva facilmente che ogni valore misurato sull'asse delle ordinate risulta associato a una specifica area coperta dai sensori. La capacità misurata per ciascun canale corrisponde a un valore dell'area specifico su ogni elettrodo. Al fine di determinare la correlazione tra variazione di capacità e area coperta, si è focalizzato l'analisi sul singolo elettrodo, valutando le diverse aree ad esso associate.

Nello specifico, è stato utilizzato il software PTC Creo per suddividere il sensore K_{10} e il sensore K_3 rispettivamente in 20 e 16 sezioni, ciascuna delle quali rappresentava un'area chiaramente definita.

Durante l'osservazione delle divisioni effettuate, è stato possibile constatare che alcune delle sezioni coprivano più di un elettrodo, comportando così la presenza di aree diverse all'interno di un singolo canale. È risultato evidente che nel sensore K_3 , ciascun elettrodo era completamente coperto da 6 sezioni/aree, mentre nel sensore K_{10} ogni elettrodo era coperto da 7 sezioni/aree. Di conseguenza, è stato possibile stabilire che ogni valore di capacità riportato nei grafici (Tabella 5.1 e Tabella 5.2) corrispondeva a un'area specifica.

Le aree corrispondenti sono state calcolate tramite il suddetto software e i risultati sono stati riportati in Tabella 5.3 e 5.4.

Area [mm^2]	CH0	CH1	CH2	CH3
1	36	-	-	-
2	108	-	-	-
3	170	-	-	-
4	144,3	22	-	-
5	72	91	-	-
6	10	160	-	-
7	-	150,7	16	-
8	-	89	74	-
9	-	20	146	-
10	-	3	169	-
11	-	-	105	58
12	-	-	33	129
13	-	-	-	180
14	-	-	-	128
15	-	-	-	93
16	-	-	-	50,1

Tabella 5.3: Aree K_3

Area [mm^2]	CH0	CH1	CH2	CH3
1	36	-	-	-
2	108	-	-	-
3	171	-	-	-
4	180	-	-	-
5	155	6,43	-	-
6	84	79	-	-
7	16	150,7	-	-
8	-	180	-	-
9	-	173,4	1,4	-
10	-	113,5	50	-
11	-	40,9	122,06	-
12	-	-	178	-
13	-	-	180	-
14	-	-	142	22
15	-	-	70	93
16	-	-	8	162
17	-	-	-	180
18	-	-	-	166
19	-	-	-	100
20	-	-	-	27,5

Tabella 5.4: Aree K_{-10}

Al fine di ottenere un andamento grafico rappresentativo della variazione di capacità durante il tocco, sono state calcolate le variazioni di capacità. Tuttavia, a causa delle ridotte dimensioni delle variazioni di capacità, espresse nell'ordine dei pF, risulta difficile lavorare direttamente con tali valori per scopi di correlazione. Pertanto, per determinare la correlazione, è stato adottato un approccio diverso. Si è inizialmente calcolata la media dei valori degli ADC_{counts} per ogni canale. Successivamente, tramite analisi grafica, è stata individuata la curva polinomiale che meglio si adattasse ai risultati sperimentali. I valori di capacità vengono successivamente calcolati attraverso la trasformazione precedentemente spiegata, che permette di convertire gli ADC in unità di Farad.

Dall'analisi dei dati sperimentali, è stato individuato un modello di regressione polinomiale di sesto grado che approssima al meglio l'andamento della relazione tra la variazione di capacità e l'area coperta. Questo modello è riportato per entrambi i sensori nella Figura 5.5 e nella Figura 5.6 ed assume la forma di un polinomio del tipo:

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 x^2 + \alpha_3 x^3 + \alpha_4 x^4 + \alpha_5 x^5 + \alpha_6 x^6$$

dove $f(x)$ rappresenta ADC_{counts} , x l'area coperta e $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ sono i coefficienti del polinomio.

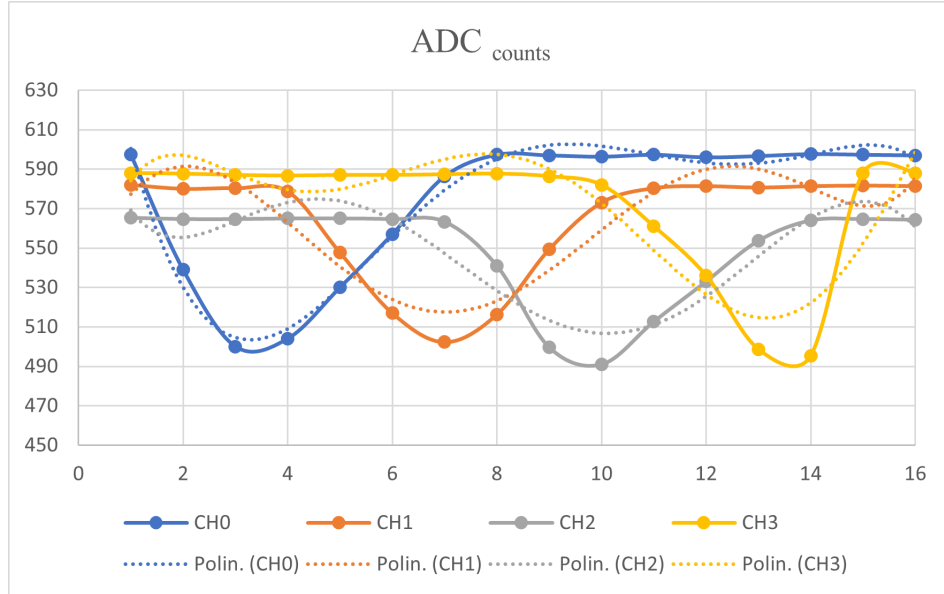


Figura 5.5: Andamento polinomiale di sesto grado (K_3)

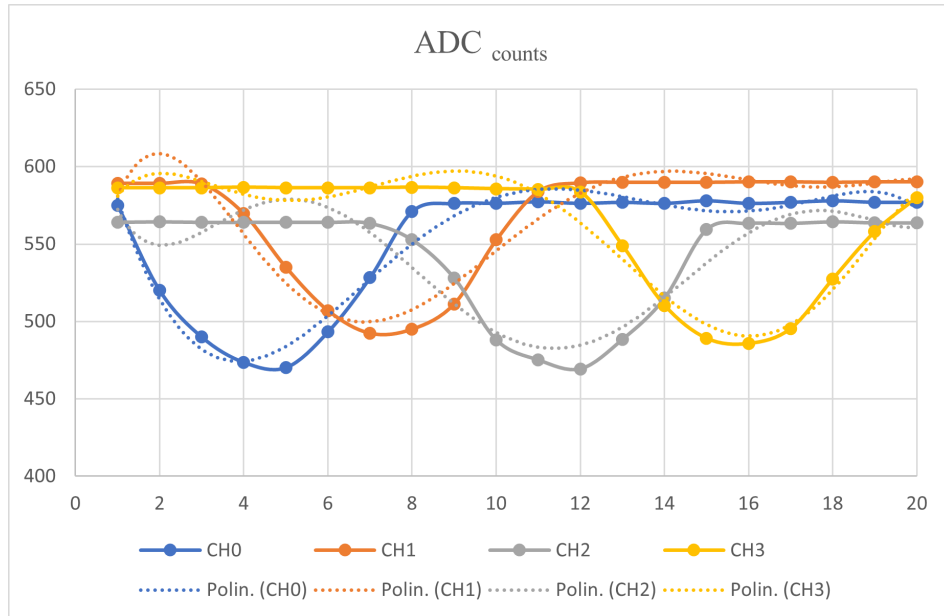


Figura 5.6: Andamento polinomiale di sesto grado (K_10)

I valori specifici dei coefficienti, ottenuti tramite l'analisi dei dati sperimentali mediante il software Excel, sono riportati in Tabella 5.5 e Tabella 5.7.

	CH0	CH1	CH2	CH3
α_0	730,07	532,4	640,75	503,74
α_1	-164,13	61,996	-116,95	136,28
α_2	36,42	-17,64	55,43	-70,065
α_3	-1,9177	0,1617	-10,968	15,618
α_4	-0,1658	0,3185	0,9946	-1,6657
α_5	0,0197	-0,0295	-0,041	0,083
α_6	-0,0005	0,0008	0,0006	-0,0016

Tabella 5.5: Coefficienti polinomiali K_3

	CH0	CH1	CH2	CH3
R^2	0,9594	0,9358	0,8973	0,9553

Tabella 5.6: Coefficiente di determinazione K_3

	CH0	CH1	CH2	CH3
α_0	682,55	463,1	667,24	518,78
α_1	-124,36	181,92	-149,51	99,9074
α_2	21,788	-75,509	65,449	-44,642
α_3	-0,6012	12,116	-11,96	8,5976
α_4	-0,1138	-0,9105	1,0132	-0,784
α_5	0,0088	0,0325	-0,0399	0,0331
α_6	-0,0002	-0,0004	0,0006	-0,0005

Tabella 5.7: Coefficienti polinomiali K_{10}

	CH0	CH1	CH2	CH3
R^2	0,9848	0,8818	0,8669	0,8006

Tabella 5.8: Coefficiente di determinazione K_{10}

Questi coefficienti consentono di descrivere l'andamento degli ADCcounts in funzione dell'area coperta secondo il polinomio di sesto grado. È importante tenere presente che i coefficienti sono specifici per il modello di regressione e per i dati utilizzati per il calcolo.

L'errore di predizione, riportato nella Tabella 5.6 per il sensore K_3 e nella Tabella 5.8 per il sensore K_10 , è stato calcolato utilizzando Excel, che ha fornito anche il valore di R^2 associato all'equazione del polinomio di regressione. Il coefficiente R^2 , noto come coefficiente di determinazione, misura la proporzione di varianza della variabile dipendente (ADC_{counts}) che può essere spiegata dalle variazioni nella variabile indipendente (area).

Il valore di R^2 varia da 0 a 1, dove 0 indica che il modello non è in grado di spiegare alcuna variazione nella variabile dipendente, mentre 1 indica una perfetta adattabilità del modello ai dati, in cui tutte le variazioni nella variabile dipendente possono essere spiegate dalle variazioni nella variabile indipendente.

In altre parole, R^2 rappresenta la proporzione della varianza della variabile dipendente che può essere prevista o spiegata dal modello di regressione utilizzato. Un valore di R^2 più vicino a 1 indica una migliore capacità del modello di spiegare le variazioni nella variabile dipendente.

Un R^2 alto implica che una percentuale considerevole della variazione nella capacità può essere spiegata utilizzando il modello polinomiale di sesto grado. Questo indica una forte correlazione tra le variabili indipendenti (aree) e la variabile dipendente (ADC), suggerendo che il modello sia in grado di catturare in modo accurato le relazioni tra di esse.

Tuttavia, il metodo proposto precedentemente manifesta una validità limitata ad un insieme specifico di dati e non può essere generalizzato a un set di dati generico. Pertanto, è necessario sviluppare un modello ingegneristico intrinsecamente valido e applicabile in modo generale a qualsiasi set di dati.

È stata rilevata una notevole somiglianza dell'andamento dei dati, specialmente per il sensore denominato K_10 , con una curva trapezoidale. L'analisi dei dati sperimentali e la caratterizzazione delle aree relative a ciascuna discretizzazione per ogni canale hanno suggerito che il valore di capacità raggiunga il tratto orizzontale della curva trapezoidale in corrispondenza delle aree di maggiore estensione dell'elettrodo, ossia le regioni centrali.

Al fine di ottenere una validazione più generica e affidabile, si è adottato l'approccio metodologico seguente. Inizialmente, è stata condotta un'approfondita analisi delle relazioni tra le diverse discretizzazioni e gli elettrodi coinvolti per valutare l'effetto specifico di ciascun elettrodo sulle aree di interesse.

Successivamente, è stata definita una curva trapezoidale in corrispondenza delle aree di maggior estensione, per ogni canale, si abbia la presenza del tratto orizzontale per la curva trapezoidale. Tale definizione si è basata sui dati riportati nella

Tabella 5.3 e nella Tabella 5.4, che indicavano le dimensioni relative delle aree per ciascun canale.

In un secondo tempo, i valori sperimentali e quelli approssimati dalle curve trapezoidali definite sono stati rappresentati graficamente sullo stesso grafico. Questa rappresentazione visiva ha consentito di valutare l'aderenza delle curve trapezoidali ai dati sperimentali.

La curva trapezoidale è stata quindi utilizzata come rappresentazione della correlazione tra i dati sperimentali e quelli teorici. Questo metodo differisce dallo studio precedente, in cui la correlazione era specifica per un insieme di dati particolare.

La curva trapezoidale è relativa ad ogni canale ed è definita dalle seguenti equazioni:

$$y(x) = \begin{cases} \frac{(x-a)}{(b-a)} * h & \text{per } x \in [a; b) \\ h & \text{per } x \in [b; c] \\ \frac{(d-x)}{(d-c)} * h & \text{per } x \in (c; d] \end{cases}$$

Dove:

- $y(x)$ rappresenta il valore della variabile y in funzione della variabile x ;
- a : è il punto di inizio della salita;
- b : è il punto di massima pendenza;
- c : è il punto di inizio della discesa;
- h : è l'altezza specifica che determina l'andamento della curva;
- x rappresenta la variabile indipendente, il numero di discretizzazioni nel contesto specifico.

I parametri a , b , c , d e h definiscono la forma e le caratteristiche della curva trapezoidale, consentendoci di adattarla alle specifiche esigenze dell'applicazione.

I tratti orizzontali della curva trapezoidale sono stati definiti in base alla loro posizione alle discretizzazioni e alle aree di ogni elettrodo all'interno di esse permettendo alla curva trapezoidale di adattarsi in modo specifico ai valori osservati e alle caratteristiche dei dati.

Infatti, l'utilizzo di questa curva trapezoidale come modello di correlazione generale offre flessibilità ai diversi contesti di studio. Ciò consente di ottenere una rappresentazione più accurata della correlazione tra i dati sperimentali e i valori teorici, indipendentemente dal set di dati considerato.

Di seguito vengono presentati i risultati relativi al sensore K_{10} nella Figura 5.7 , mentre nella Figura 5.8 i dati relativi al sensore K_3 .

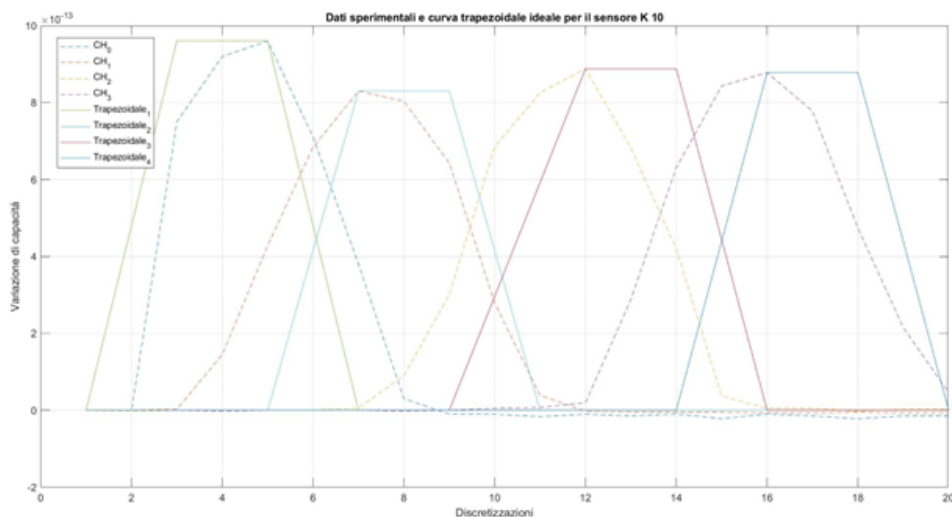


Figura 5.7: Curve trapezoidali e dati sperimentali del sensore K_{10}

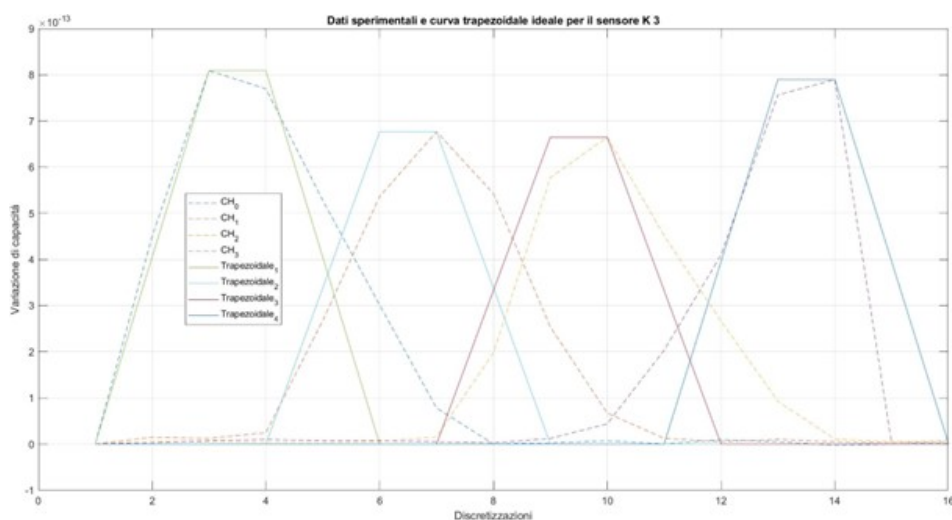


Figura 5.8: Curve trapezoidali e dati sperimentali del sensore K_3

Nelle tabelle seguenti (Tabella 5.9 e Tabella 5.10) vengono presentati i valori dei coefficienti per ogni canale riferiti ad ognuna delle diverse tipologie di elettrodo.

	a	b	c	d	h
CH0	1	3	5	7	9,6E-13
CH1	5	7	9	11	8,3E-13
CH2	8	12	14	16	8,8E-13
CH3	14	16	18	20	8,78E-13

Tabella 5.9: Valori coefficienti trapezoidali di K_{10}

	a	b	c	d	h
CH0	1	3	4	6	8,06E-13
CH1	4	6	7	9	6,76E-13
CH2	7	9	10	12	6,65E-13
CH3	11	13	14	16	7,89E-13

Tabella 5.10: Valori coefficienti trapezoidali di K_3

Infine, sono stati calcolati diversi indicatori di errore, tra cui l'errore quadratico medio (RMSE), l'errore medio assoluto (MAE) e il coefficiente di determinazione (R^2), per valutare quantitativamente l'adattabilità delle curve trapezoidali ai dati sperimentali per ciascun canale.

Per calcolare gli indicatori di errore, seguono le formule utilizzate:

1. **Errore quadratico medio (RMSE):**

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Y_{true} - Y_{pred})^2}{n}}$$

Dove:

- Y_{true} sono i valori sperimentali;
- Y_{pred} sono i valori teorici;
- n è il numero totale di punti.

2. **Errore medio assoluto (MAE):**

$$MAE = \frac{\sum(Y_{true} - Y_{pred})}{n}$$

3. **Coefficiente di determinazione (R^2):**

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_{true} - Y_{pred})^2}{\sum(Y_{true} - \bar{Y}_{true})^2}$$

Dove $\bar{Y}_{true}$ è la media dei valori sperimentali.

In generale, i valori contenuti nella Tabella 5.12 e nella Tabella 5.11 ci forniscono informazioni sull'errore nella stima della capacità rilevata rispetto ai dati sperimentali. Valori più bassi indicano una migliore precisione del modello. Il coefficiente di determinazione (R^2) ci fornisce un'indicazione della bontà dell'adattamento del modello ai dati sperimentali, con valori più vicini a 1 che indicano una migliore adattabilità.

	RMSE	MAE	R^2
CH0	0,8502	0,3843	0,9095
CH1	0,9236	0,5166	0,8316
CH2	0,8661	0,4749	0,843
CH3	1,1205	0,4641	0,8156

Tabella 5.11: Errori del sensore K_3

	RMSE	MAE	R^2
CH0	1,5443	0,7705	0,7964
CH1	1,2895	0,6414	0,8127
CH2	1,9133	1,0603	0,615
CH3	2,086	1,0667	0,5577

Tabella 5.12: Errori del sensore K_10

Sulla base di queste analisi, possiamo osservare che i canali CH0 e CH1 presentano una correlazione moderata tra i dati sperimentali e i valori stimati, con valori di R^2 di 0,7964 e 0,8127 rispettivamente. Tuttavia, i canali CH2 e CH3 mostrano una correlazione più debole, con valori di R^2 di 0,615 e 0,5577 rispettivamente. Questo suggerisce che i modelli utilizzati potrebbero richiedere ulteriori miglioramenti o adattamenti per ottenere una migliore adattabilità ai dati sperimentali per i canali CH2 e CH3.

Questa metodologia ha consentito di ottenere una validazione più generica e affidabile della correlazione tra i valori sperimentali e le curve trapezoidali definite

per ciascun canale. L'analisi quantitativa degli errori ha fornito una misura oggettiva dell'accuratezza dell'approssimazione e ha permesso un confronto significativo delle prestazioni dei diversi canali.

Avendo ben chiara la correlazione tra l'area e la posizione locale sul singolo canale, possiamo procedere con il calcolo dell'area correlata alla posizione.

Una volta determinate queste aree centrali, è possibile procedere all'interrelazione tra i dati sperimentali e la curva trapezoidale ipotizzata, allo scopo di calcolare l'errore tra di essi.

Successivamente, ci posizioniamo nel punto desiderato in cui vogliamo calcolare la posizione e calcoliamo la somma delle discretizzazioni fino a quel punto, relative al singolo elettrodo.

Per ottenere la posizione locale sul singolo elettrodo, eseguiamo il seguente procedimento:

1. Calcoliamo il rapporto tra la somma delle discretizzazioni fino al punto desiderato ($Area_{discretizzazione}$) e l'area di ogni discretizzazione propria di quel canale ($Area_{elettrodo}$).
2. Moltiplichiamo il rapporto per 100 per ottenere la percentuale dell'elettrodo coperto fino a quella discretizzazione.

$$Posizione_{\%} = \frac{Area_{discretizzazione}}{Area_{elettrodo}} * 100$$

3. Moltiplichiamo la percentuale per la lunghezza del relativo elettrodo per ottenere la posizione locale sul singolo elettrodo.

$$Posizione_{relativa} = Posizione_{\%} * Lunghezza_{elettrodo}$$

In questo modo, otteniamo la posizione relativa all'interno del singolo elettrodo basata sull'area coperta.

Riassumendo, il processo per fornire il modello in cui la capacità rilevata durante il tocco su ciascun canale è correlata alla posizione può essere suddiviso nei seguenti passaggi:

1. Identificazione degli elettrodi coinvolti e analisi dell'influenza di ciascun elettrodo sulle diverse discretizzazioni e sulle relative aree di interesse.
2. Definizione della curva trapezoidale come modello di correlazione tra la capacità rilevata e la posizione. La curva trapezoidale è caratterizzata da parametri specifici come il punto di inizio della salita, il punto di massima pendenza, il punto di inizio della discesa e il punto di fine della curva trapezoidale.

3. Confronto grafico tra i dati sperimentali e i valori stimati dalla curva trapezoidale. Questa visualizzazione ci permette di valutare visivamente quanto bene il modello si adatta ai dati sperimentali.
4. Calcolo di diversi indicatori di errore, come l'errore quadratico medio (RMSE), l'errore percentuale medio (MPE) e il coefficiente di determinazione (R^2), per valutare quantitativamente la bontà dell'adattamento del modello ai dati sperimentali.

Attraverso questi passaggi, si sviluppa un modello di correlazione che ci permette di stimare la capacità rilevata in base alla posizione del tocco su ciascun canale. Questo approccio fornisce una rappresentazione più generica e valida della correlazione tra i dati sperimentali e il modello teorico, consentendo di ottenere una migliore comprensione e analisi dei dati di interesse.

Una volta individuata una correlazione che lega i valori della variazione di capacità (y) al numero di discretizzazioni (x) posso, avendo informazioni sulle aree coperte da diversi canali per ogni discretizzazione, essere in grado di determinare sia il valore della variazione di capacità (y) conoscendo il numero di discretizzazioni (x), sia il numero di discretizzazione corrispondente a un valore specifico di variazione di capacità.

In altre parole, utilizzando la correlazione identificata, possiamo effettuare una mappatura tra i valori di capacità rilevati e i numeri di discretizzazione corrispondenti. Questo ci consente di ottenere una stima della variazione di capacità per una data configurazione di numeri di discretizzazione o di determinare il numero di discretizzazione associato a un determinato valore di capacità. Tale relazione fornisce una maggiore comprensione del legame tra i valori di capacità e i numeri di discretizzazione, consentendo una più precisa interpretazione dei dati sperimentali e una migliore manipolazione delle informazioni ottenute.

Successivamente, per determinare la posizione locale sull'elettrodo, consideriamo le aree coperte su ciascun canale per ogni discretizzazione. È importante tenere presente che le aree sono espresse rispetto al sistema di riferimento assoluto dell'elettrodo, ma l'obiettivo è trovare la posizione relativa sul singolo canale.

Per ottenere la posizione relativa sul canale successivo al CH0, occorre spostare il sistema di riferimento. Dopo aver calcolato la posizione sul canale, sottraiamo da tale posizione il valore della posizione relativa al canale precedente. In questo modo, otteniamo la posizione relativa al singolo canale, tenendo conto dello spostamento tra i canali.

Questo metodo ci permette di determinare sia il valore della capacità (o degli ADC_{counts}) su ogni canale, sia la posizione relativa sul singolo canale rispetto all'area coperta. È importante considerare attentamente il sistema di riferimento

e gli spostamenti tra i canali per ottenere una stima accurata della posizione sulla superficie dell'elettrodo.

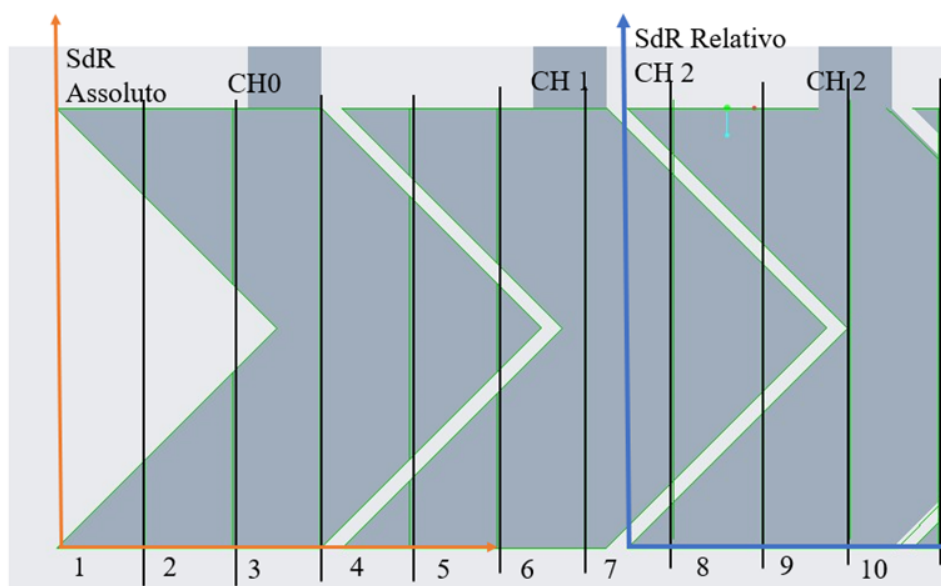


Figura 5.9: Differenza tra sistema di riferimento assoluto e relativo

Nella Figura 5.9 viene illustrato un esempio relativo all'elettrodo *CH2*. Si osserva che l'elettrodo ha inizio nella discretizzazione 7, tuttavia non copre l'intera discretizzazione ma solo una parte di essa. Questa situazione richiede l'eliminazione di una porzione del segmento che nella discretizzazione 7 non fa parte del sistema di riferimento dell'elettrodo *CH2*.

L'obiettivo di tale operazione è quello di ottenere una rappresentazione più accurata della posizione relativa sul singolo elettrodo. Poiché la posizione delle aree è considerata rispetto al sistema di riferimento assoluto dell'elettrodo, è necessario rimuovere il segmento che non appartiene all'elettrodo *CH2* per ottenere una migliore comprensione della posizione relativa sull'elettrodo.

Capitolo 6

Conclusione e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi si è concentrato sullo sviluppo di un sensore capacitivo progettato per essere integrato sui gripper robotici al fine di migliorare la presa degli oggetti. Durante la ricerca, sono state utilizzate due diverse metodologie di fabbricazione, lo spray conduttivo e il carbon black, per creare il sensore capacitivo. Inoltre, il sensore è stato testato in tre diverse configurazioni: isolata, non collegata a terra e collegata a terra.

I risultati ottenuti hanno dimostrato che i sensori di tipo isolato offrono risposte più precise, indipendentemente dal materiale con cui il sensore viene toccato, sia esso conduttivo o un dito umano. D'altra parte, i sensori non collegati a terra non hanno fornito risultati significativi, in linea con le aspettative. Al contrario, i sensori collegati a terra hanno mostrato una possibile rilevazione di tocchi con materiali dielettrici, tuttavia è necessaria un'ulteriore indagine sulle caratteristiche dei materiali dielettrici che entrano in contatto con il sensore.

Attraverso l'analisi dei dati sperimentali, è stato possibile discutere il funzionamento del sensore capacitivo e sviluppare un modello in grado di correlare in modo accurato la variazione di capacità misurata con la posizione assoluta e relativa all'interno del sensore stesso. Questo modello rappresenta una base solida per stimare la posizione degli oggetti all'interno del gripper robotico sulla base delle misurazioni di capacità, consentendo una presa più precisa e affidabile.

Inoltre, le prove eseguite nel corso di questa trattazione potrebbero essere perfezionate attraverso l'uso di un banco prova specifico, che consenta una maggiore precisione e ripetibilità dei risultati.

È stato osservato che il sensore è sensibile alla forza applicata durante il tocco; pertanto, si potrebbe considerare l'ingegnerizzazione di un sensore capacitivo di forza. Questo tipo di sensore potrebbe essere realizzato con strati di materiali diversi, più deformabili rispetto a quelli utilizzati finora, consentendo misurazioni di capacità e forza all'interno dello stesso dispositivo.

Un'ulteriore possibilità di sviluppo potrebbe essere l'utilizzo della tecnologia dei dispositivi elettroadesivi, sfruttando l'elettrodo sia come sensore che come dispositivo di elettroadesione. Questo approccio consentirebbe di combinare la capacità di misurazione con la capacità di aderire all'oggetto da parte del sensore.

Bibliografia

- [1] B. Marinho et al. “*Electrical conductivity of compacts of graphene, multi-wall carbon nanotubes, carbon black, and graphite powder,*” *Powder Technol*, vol. 221, pp. 351–358. doi: 10.1016/j.powtec.2012.01.024. May 2012.
- [2] J. Guo et al. “*Toward Adaptive and Intelligent Electro adhesives for Robotic Material Handling,*” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 2, no. 2, pp. 538–545. doi: 10.1109/LRA.2016.2646258. Apr 2017.
- [3] N. Berdozzi et al. “*Rapid Fabrication of Electro-Adhesive Devices With Inkjet Printed Electrodes,*” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 5, no. 2, pp. 2770–2776. doi: 10.1109/LRA.2020.2972838. Apr 2020.
- [4] R. Chen et al. “*Bio-Inspired Shape-Adaptive Soft Robotic Grippers Augmented with Electro adhesion Functionality,*” *Soft Robot*, vol. 6, no. 6, pp. 701–712. doi: 10.1089/soro.2018.0120. Dec 2019.
- [5] Atmel. *Buttons, Sliders and Wheels Sensor Design Guide*.
- [6] Azoteq. *AZD125 - Capacitive Sensing Design Guide*. Nov 2022.
- [7] Baxter e L.K. *Capacitive Sensors: Design and Applications*. Hoboken. 1996.
- [8] C. M. C. Controzzi M C. C. *The Human Hand as an Inspiration for Robot Hand Development*. Springer. 2014.
- [9] Kontakt Chemie. URL: %7Bhttp://www.kontaktchemie.com/koc/KOCproductdetail.csp?division=&product=GRAPHIT%2033&ilang=en&plang=en.%E2%80%9D%7D.
- [10] J. Guo, J. Leng e J. Rossiter. “*Electro adhesion Technologies for Robotics: A Comprehensive Review,*” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 2, pp. 313–327. doi: 10.1109/TRO.2019.2956869. Apr 2020.
- [11] Honeywell. *Dielectric Constant Table*. Jun 2011.
- [12] R. Ma e A. Dollar. “*Yale OpenHand Project: Optimizing Open-Source Hand Designs for Ease of Fabrication and Adoption,*” *IEEE Robot Autom Mag*, vol. 24, no. 1, pp. 32–40. doi: 10.1109/MRA.2016.2639034. Mar 2017.

- [13] M. Maleki. *Interfacing MPR121 Capacitive Touch Sensor Module with Arduino*. <https://electropeak.com/learn/interfacing-mpr121-capacitive-touch-sensor-module-with-arduino/>. 2023.
- [14] M. K. C. Melchiorri. *Springer Handbook of Robotics*. Berlin. 2008.
- [15] C. Schoffmann, Z. Erickson e H. Zangl. “CapSense: A Real-Time Capacitive Sensor Simulation Framework for Physical Human-Robot Interaction,” *IEEE Robot Autom Lett*, vol. 7, no. 4, pp. 9929–9936. doi: 10.1109/LRA.2022.3191942. Oct 2022.
- [16] Freescale Semiconductor. “AN3889: MPR121 Capacitance Sensing Settings,” Mar 2010.
- [17] Freescale Semiconductor. *Proximity Capacitive Touch Sensor Controller*. 2009.
- [18] X. Shan e L. Birglen. “Modeling and analysis of soft robotic fingers using the fin ray effect,” *Int J Rob Res*, vol. 39, no. 14, pp. 1686–1705. doi: 10.1177/0278364920913926. Dec 2020.
- [19] J. Shintake, V. Cacucciolo e D. Floreano. *Soft Robotic Grippers, Advanced Materials*, vol. 30, no. 29, p. 1707035. doi: 10.1002/adma.201707035. Jul 2018.
- [20] STMicroelectronics. *AN2869 Guidelines for Designing Touch Sensing Applications*. 2012.
- [21] J. Vetelino e A. Reghu. «Introduction to Sensors. CRC Press». In: (2017). doi: 10.1201/9781315218274.
- [22] D. Wang. *FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Application*. Jun 2021.