



Università di Genova

CORSO DI STUDIO IN INGEGNERIA ELETTRONICA

Tesi di laurea magistrale

Anno accademico 2025/26

17 luglio 2026

Analisi sperimentale tramite un sistema mecatronico dedicato di sensori tattili per la misura di effetti meccanici (i.e. sliding e scivolamento) attraverso traiettorie controllate

Candidato: Edoardo Raffo

Relatore: Prof. Maurizio Valle

Correlatori: Dott.ssa Chiara Micheli, Prof. Christian Gianoglio

Indice

1	Introduzione	5
1.1	Struttura	5
1.2	Contesto e motivazioni del lavoro di tesi	5
1.3	Obiettivi e contributi della tesi	7
2	Contesto della tesi	10
2.1	Ruolo della percezione tattile nella robotica	10
2.2	Tipologie di sensori tattili per applicazioni robotiche	11
2.3	Pelle elettronica: Il sensore tattile piezoelettrico	18
2.4	Scivolamento degli oggetti durante la presa	21
2.5	Fenomeni fisici associati allo scivolamento	23
2.6	Tecniche di rilevamento dello scivolamento	24
3	Metodologia	28
3.1	Robot cartesiano	28
3.2	Cella di carico	29
3.3	Sensore tattile	31
3.4	Ambiente software	34
3.4.1	Controllo del robot cartesiano tramite labVIEW	34
3.5	Protocollo sperimentale di acquisizione dei dati	44
3.6	Metodologia di analisi dei dati	47
3.7	Algoritmo di rilevamento dello scivolamento	51
3.8	Struttura dell'algoritmo	53
4	Risultati	60
4.1	Esempi di rilevamento dello scivolamento	64
4.2	Analisi sperimentale delle condizioni di prova	69
4.2.1	Analisi del tempo al variare della velocità	72

4.2.2	Analisi del tempo al variare della distanza di scivolamento	73
4.2.3	Analisi del tempo al variare della forza	75
4.3	Analisi dell'attività della matrice sensoriale	76
5	Conclusioni e possibili futuri sviluppi	79
5.1	Conclusioni	79
5.2	Validazione online dell'algoritmo	80
5.3	Integrazione sulla Hannes Hand	81

Sommario

La capacità di rilevare tempestivamente l'insorgenza dello scivolamento durante la manipolazione di un oggetto rappresenta un requisito fondamentale per lo sviluppo di sistemi robotici in grado di eseguire prese stabili, sicure e adattive. In tale contesto, i sensori tattili costituiscono uno strumento essenziale per acquisire informazioni sul contatto e implementare strategie di controllo ispirate al comportamento della mano umana. Il presente lavoro di tesi propone l'implementazione e la validazione sperimentale di un algoritmo per il rilevamento dello scivolamento basato su una matrice di sensori tattili piezoelettrici in polivinilidenfluoruro (PVDF). L'algoritmo elabora i segnali acquisiti dai sensori mediante tecniche di filtraggio e analisi temporale, individuando l'istante di insorgenza dello scivolamento. Le prestazioni del metodo sono state valutate confrontando il tempo di rilevamento ottenuto dai sensori con quello ricavato da una cella di carico, assunta come riferimento sperimentale. La validazione è stata condotta mediante una campagna sperimentale comprendente differenti condizioni operative, variando forza normale, velocità e distanza di scorrimento. Per ciascuna configurazione sono state eseguite prove ripetute, consentendo di analizzare l'accuratezza temporale del rilevamento, la ripetibilità dell'algoritmo e il contributo fornito sia dal singolo sensore sia dall'intera matrice tattile. È stata inoltre studiata la distribuzione spaziale dell'attività dei sensori durante lo scivolamento, evidenziando le modalità di propagazione dell'informazione tattile sulla superficie sensibile. I risultati ottenuti mostrano che l'algoritmo è in grado di individuare lo scivolamento con buona accuratezza e ripetibilità nelle diverse condizioni sperimentali investigate. L'utilizzo dell'intera matrice sensoriale migliora la robustezza del rilevamento rispetto all'impiego del singolo sensore, confermando l'efficacia dell'approccio proposto. I risultati ottenuti costituiscono inoltre una base per futuri sviluppi orientati all'integrazione dell'algoritmo in sistemi di controllo robotico operanti in tempo reale e alla validazione della metodologia su differenti piattaforme di manipolazione, favorendone l'impiego in applicazioni di manipolazione autonoma.

1 Introduzione

1.1 Struttura

La presente tesi sperimentale è articolata in quattro capitoli.

Il **Capitolo 1** introduce il contesto scientifico e tecnologico del lavoro svolto. Viene inizialmente discusso il ruolo della percezione tattile nei sistemi robotici, con particolare attenzione alle applicazioni di manipolazione. Successivamente, sono presentate le principali tipologie di sensori tattili impiegate in ambito robotico e viene approfondito l'utilizzo di sensori tattili piezoelettrici per applicazioni di pelle robotica. Il capitolo affronta quindi il problema dello scivolamento degli oggetti durante la presa e le principali tecniche di rilevamento presenti in letteratura, concludendosi con la definizione degli obiettivi e dei contributi della tesi.

Il **Capitolo 2** descrive la metodologia sperimentale adottata. In particolare, vengono illustrati l'architettura hardware e i sistemi utilizzati, comprendenti il robot cartesiano, la cella di carico e il sensore tattile. Sono inoltre descritti l'ambiente software di controllo e acquisizione dati, il protocollo sperimentale, le procedure di analisi dei dati e l'algoritmo di rilevamento dello scivolamento. Il capitolo si conclude con la descrizione della struttura dell'algoritmo e della chiusura del loop di controllo.

Il **Capitolo 3** è dedicato alla presentazione e all'analisi dei risultati sperimentali. Vengono riportati i test eseguiti, le prove di scivolamento condotte attraverso le prestazioni del sistema cartesiano. I risultati ottenuti vengono infine discussi in relazione agli obiettivi prefissati.

Il **Capitolo 4** riporta le conclusioni del lavoro, sintetizzando i principali risultati e contributi della tesi, e propone possibili sviluppi futuri del sistema e dell'algoritmo testato in condizioni controllate.

1.2 Contesto e motivazioni del lavoro di tesi

Il tatto è il senso preposto alla percezione degli stimoli che interessano la superficie esterna del corpo umano, attraverso il quale il sistema nervoso acquisisce informazioni sull'ambiente circostante e sulle interazioni fisiche con gli oggetti. L'organo principale responsabile della percezione tattile è la pelle, che consente il riconoscimento di diverse caratteristiche fisiche degli oggetti, quali forma, consistenza e rugosità, quando questi entrano in contatto con il corpo. La trasmissione delle informazioni

tattili dalla superficie cutanea al sistema nervoso centrale è resa possibile da complessi meccanismi neurofisiologici che hanno origine in cellule altamente specializzate, denominate meccanorecettori.

La possibilità di ripristinare una normale interazione con gli stimoli esterni in soggetti che hanno subito danni cutanei, neuropatie o amputazioni rappresenta un obiettivo di primaria importanza nel campo della riabilitazione e dell'ingegneria biomedica, in quanto comporta un significativo miglioramento della qualità della vita. In particolare, il recupero, anche parziale, delle funzionalità sensoriali e motorie contribuisce in modo determinante all'autonomia dell'individuo e al suo benessere psicofisico.

Sebbene il sistema tattile umano rappresenti il modello di riferimento per eccellenza, la sua elevata complessità, dovuta all'integrazione di recettori periferici, feedback sensoriale, controllo motorio e processi cognitivi, rende difficile isolare e analizzare quantitativamente il contributo delle singole componenti durante l'interazione con l'ambiente. Per questo motivo, nell'ambito della robotica vengono spesso impiegati benchmark sperimentali che consentono di studiare il comportamento del sistema in condizioni controllate, garantendo elevata riproducibilità e confrontabilità dei risultati. L'utilizzo di piattaforme robotiche permette infatti di valutare in modo sistematico algoritmi di controllo, strategie di manipolazione e sistemi di percezione tattile, costituendo un ponte tra lo studio della manipolazione umana e lo sviluppo di dispositivi artificiali.

Negli ultimi decenni, i significativi progressi sia nei settori dell'elettronica che della biomeccanica hanno reso possibile lo sviluppo di dispositivi biomedicali sempre più sofisticati, con particolare riferimento alle protesi per amputazioni degli arti superiori. In particolare, le protesi di ultima generazione sono in grado di ripristinare parzialmente le funzionalità motorie mediante l'impiego di sistemi di controllo basati sui segnali elettromiografici (EMG) acquisiti dai muscoli residui dell'utente. Tali segnali vengono elaborati per stimare le intenzioni di movimento e generare i comandi necessari all'attuazione della protesi, consentendo un controllo più preciso e un utilizzo maggiormente naturale del dispositivo, nonché ponendo le basi per l'integrazione di strategie di controllo e feedback sempre più avanzate.

Nonostante l'elevato livello di sviluppo raggiunto dalle tecniche di controllo motorio, uno dei principali limiti delle protesi moderne rimane l'assenza di un feedback sensoriale adeguato [1]. La mancanza di informazioni relative al contatto, alla forza applicata e alle proprietà delle superfici con cui la protesi interagisce rende l'esecuzione dei compiti di manipolazione meno precisa e naturale. Ciò comporta un

aumento del carico cognitivo per l'utilizzatore e una riduzione dell'efficacia complessiva del dispositivo, rappresentando una delle principali cause di abbandono delle protesi.

In questo contesto si inserisce lo sviluppo di sistemi di pelle elettronica (electronic skin o e-skin), basati su matrici di sensori tattili progettati per rilevare stimoli meccanici esterni, convertirli in segnali elettrici ed elaborarli al fine di generare informazioni utili per il feedback sensoriale [2], [3].

Un sistema di percezione tattile per applicazioni protesiche può essere schematizzato in tre moduli principali:

- un sistema di rilevamento degli stimoli meccanici;
- un circuito elettronico per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali;
- un sistema di feedback per la trasmissione dell'informazione all'utilizzatore.

Dal punto di vista ingegneristico, tali sistemi devono soddisfare requisiti stringenti in termini di compattezza, basso consumo energetico, ridotta latenza e capacità di elaborazione dei dati in tempo reale [4].

Un ulteriore aspetto critico riguarda il numero e la disposizione dei sensori, che dovrebbero approssimare, per quanto possibile, l'elevata densità e la distribuzione spaziale dei meccanocettori presenti nella mano umana, compatibilmente con i vincoli di costo, peso e dissipazione termica tipici dei dispositivi indossabili [5].

Il presente lavoro di tesi si colloca in questo contesto, con l'obiettivo di utilizzare un sistema di pelle elettronica e l'elettronica associata per l'acquisizione e l'elaborazione dei segnali tattili, ponendo particolare attenzione ai vincoli tipici dei sistemi a risorse limitate, che rappresentano uno degli aspetti critici per l'integrazione efficace di tali soluzioni in dispositivi protesici indossabili.

1.3 Obiettivi e contributi della tesi

L'obiettivo principale del presente lavoro di tesi è lo studio e lo sviluppo di una metodologia che consenta la validazione di un algoritmo per la rilevazione dello scivolamento (slip detection) durante l'interazione fisica tra un sistema robotico e un oggetto, mediante l'impiego di sensori tattili. La capacità di

individuare tempestivamente l'insorgenza dello scivolamento rappresenta un requisito fondamentale per migliorare la stabilità della presa e l'affidabilità dei sistemi di manipolazione robotica, in particolare in applicazioni di robotica collaborativa e protesica.

Uno dei principali contributi della tesi consiste nella progettazione e realizzazione di un setup sperimentale dedicato allo studio sistematico del fenomeno dello scivolamento. Il setup sperimentale sviluppato integra un robot cartesiano, una matrice di sensori tattili piezoelettrici in PVDF, una cella di carico e un sistema di acquisizione sincronizzato, consentendo di eseguire prove ripetibili e controllate nelle quali è possibile variare i principali parametri di interazione, quali forza normale, velocità e distanza di scivolamento. La disponibilità di tale piattaforma sperimentale ha permesso di acquisire dati affidabili e confrontabili, creando le condizioni necessarie per l'analisi del fenomeno e per la successiva validazione dell'algoritmo.

Utilizzando il setup realizzato, è stata condotta una campagna sperimentale finalizzata alla caratterizzazione dei segnali acquisiti durante le diverse fasi dell'interazione tra il sensore tattile e l'oggetto. In particolare, i segnali provenienti dai sensori PVDF sono stati confrontati con le misure fornite da una cella di carico, utilizzata come riferimento sperimentale per identificare l'istante di insorgenza dello scivolamento. Tale confronto ha consentito di analizzare la correlazione tra le variazioni delle forze di contatto e le caratteristiche dei segnali tattili associate all'evento di slip.

Lo studio sistematico dei dati acquisiti ha costituito la base per l'adattamento di un algoritmo di slip detection adeguato alle caratteristiche dei sensori impiegati e progettato per essere compatibile con una futura implementazione in tempo reale. L'algoritmo implementato è stato quindi sottoposto a validazione sperimentale mediante il setup sperimentale realizzato, verificandone la capacità di riconoscere correttamente l'insorgenza dello scivolamento nelle diverse condizioni operative investigate. I risultati ottenuti hanno consentito di valutare l'accuratezza, la ripetibilità e la robustezza, confermando l'efficacia dell'approccio proposto.

In sintesi, i principali contributi della tesi possono essere ricondotti a tre aspetti complementari. Il primo obiettivo è l'implementazione e la validazione sperimentale di un algoritmo di rilevamento dello scivolamento derivato dalla letteratura, verificandone l'efficacia nel contesto applicativo considerato e valutandone le potenzialità per una futura integrazione in sistemi di manipolazione robotica operanti

in tempo reale. Il secondo riguarda l'adattamento e la configurazione di una piattaforma sperimentale dedicata allo studio sistematico del fenomeno dello scivolamento, che ha consentito di eseguire campagne di prova ripetibili e controllate. Il terzo obiettivo consiste nella caratterizzazione sperimentale dei segnali acquisiti dai sensori tattili PVDF durante le diverse condizioni di contatto e scivolamento.

2 Contesto della tesi

2.1 Ruolo della percezione tattile nella robotica

La percezione tattile riveste un ruolo fondamentale non solo in ambito protesico, ma anche in robotica avanzata, in particolare nei sistemi di manipolazione e nell'interazione uomo–robot. Nei robot dotati di capacità di manipolazione autonoma, il tatto consente di integrare le informazioni visive con dati locali sul contatto, permettendo al sistema di adattare in tempo reale la forza di presa, rilevare eventi imprevisti quali lo scivolamento e garantire un'interazione più sicura ed efficace con l'ambiente circostante e con l'essere umano.

In particolare, un sistema robotico deve essere in grado di modulare le forze di contatto in funzione delle proprietà dell'oggetto manipolato, quali peso, rigidità e attrito superficiale. I sensori tattili permettono di rilevare la distribuzione delle pressioni e l'insorgenza di fenomeni di scivolamento, rendendo possibile l'implementazione di strategie di controllo in retroazione per la regolazione dinamica della forza di presa. In assenza di un'adeguata percezione tattile, il controllo della manipolazione risulta fortemente limitato: il robot può applicare forze eccessive, con il rischio di danneggiare l'oggetto, oppure forze insufficienti, causando la perdita della presa [6].

La percezione tattile non opera in modo isolato, ma risulta particolarmente efficace quando integrata con altre modalità sensoriali, quali la visione e la propriocezione. Le ricerche più recenti si orientano infatti verso sistemi percettivi multimodali, in grado di compensare le limitazioni di ciascun canale sensoriale e di migliorare la robustezza complessiva del sistema, specialmente in contesti dinamici e non strutturati [7].

Attraverso il contatto fisico, il robot può stimare proprietà quali forma, consistenza, rugosità e conformazione degli oggetti, informazioni difficilmente ottenibili mediante la sola visione. Le tecniche di esplorazione tattile attiva consentono al sistema robotico di selezionare in modo strategico i movimenti e i punti di contatto, migliorando l'efficienza e l'accuratezza dei processi di riconoscimento. Questo approccio risulta particolarmente vantaggioso in ambienti non strutturati o in presenza di oggetti sconosciuti [8]. I dati tattili possono inoltre essere utilizzati per aggiornare in tempo reale i modelli di interazione fisica tra il robot e l'ambiente, favorendo comportamenti più flessibili e robusti.

Negli ultimi anni, l'integrazione della percezione tattile con tecniche di machine learning ha aperto nuove prospettive per l'apprendimento di abilità motorie complesse, quali la manipolazione avanzata e l'uso di utensili. In questo contesto, il tatto rappresenta una fonte informativa essenziale per l'acquisizione di competenze ispirate al comportamento umano e per il miglioramento delle capacità adattive dei sistemi robotici [9].

Il sistema analizzato in questa tesi è costituito da una matrice di sensori piezoelettrici in grado di convertire lo stress meccanico in segnali elettrici per ciascun sensore. Tali segnali vengono acquisiti da un circuito elettronico dedicato, elaborati localmente e successivamente trasmessi sotto forma di pacchetti di dati mediante un protocollo di comunicazione seriale. Il lavoro di tesi si concentra pertanto sull'analisi della struttura e del funzionamento della pelle elettronica e dell'elettronica di acquisizione ed elaborazione dei segnali, mentre gli aspetti legati alla conversione delle informazioni in feedback non rientrano negli obiettivi del presente studio.

2.2 Tipologie di sensori tattili per applicazioni robotiche

Il presente sottocapitolo analizza le principali tipologie di sensori tattili e illustra i principi di funzionamento dei sensori tattili, i loro vantaggi e le limitazioni associati alle diverse tecnologie attualmente disponibili.

A differenza dei sensori di forza convenzionali, che forniscono esclusivamente una misura della forza risultante applicata, i sensori tattili sono progettati per acquisire informazioni distribuite sull'interfaccia di contatto, quali pressione locale, distribuzione della forza, vibrazioni e stato del contatto. L'impiego di materiali deformabili e conformabili nella realizzazione dello strato sensibile consente inoltre al sensore di adattarsi alla geometria degli oggetti con cui interagisce, migliorando la qualità delle informazioni acquisite e rendendo possibile un'interazione aptica più simile a quella del sistema tattile umano.

A differenza dei sensori di forza tradizionali, i sensori tattili consentono ai robot di acquisire informazioni fisiche quali forza, pressione, contatto e vibrazioni e, in alcuni casi, grazie alle proprietà dei materiali che costituiscono l'interfaccia sensoriale, di adattarsi alle forme irregolari degli oggetti, permettendo interazioni aptiche più simili a quelle umane. I sensori tattili possono essere classificati in base a diversi criteri: il principio di funzionamento (ad esempio ottici, induttivi, capacitivi, a ultrasuoni, ecc...), il

tipo di segnale (attivi o passivi, a seconda che richiedano o meno alimentazione), la grandezza fisica misurata (meccanica, termica) oppure la modalità di interazione (di contatto o senza contatto) [2].

Nel seguito vengono descritte le principali tipologie di sensori tattili, insieme alle loro caratteristiche principali. Particolare attenzione è dedicata ai sensori piezoelettrici, oggetto di studio e di applicazione nel presente lavoro di tesi.

Sensori resistivi

I sensori tattili resistivi rappresentano una delle tecnologie più diffuse nell'ambito del tactile sensing robotico grazie alla loro semplicità strutturale, al basso costo di realizzazione e alla possibilità di essere integrati su superfici estese. Il loro principio di funzionamento si basa sulla variazione della resistenza elettrica indotta da una sollecitazione meccanica esterna, generalmente sotto forma di pressione o deformazione locale del materiale sensibile. Da un punto di vista fisico, tale comportamento è riconducibile all'effetto piezoresistivo, definito come la variazione della resistività elettrica di un materiale in funzione del suo stato di deformazione. Questo fenomeno è ampiamente sfruttato nella realizzazione di sensori di forza e pressione destinati ad applicazioni robotiche, biomedicali e industriali.

Dal punto di vista elettronico, i sensori resistivi sono caratterizzati da una catena di acquisizione relativamente semplice. La configurazione più comune prevede l'utilizzo di un partitore di tensione, che consente di convertire la variazione di resistenza del sensore in una variazione di tensione facilmente acquisibile dai sistemi di misura. Nelle applicazioni che richiedono maggiore accuratezza e stabilità, viene invece impiegato il ponte di Wheatstone, spesso associato a un amplificatore strumentale al fine di migliorare il rapporto segnale-rumore e ridurre la sensibilità alle variazioni della tensione di alimentazione. Nel caso di matrici tattili costituite da numerosi elementi sensibili, l'acquisizione dei dati è generalmente realizzata mediante architetture a righe e colonne con tecniche di multiplexing. Sebbene tale soluzione permetta di ridurre il numero di connessioni elettriche necessarie, introduce fenomeni di cross-talk e la presenza di resistenze parassite che possono compromettere la precisione della misura, come evidenziato in numerosi studi relativi ai sistemi di tactile sensing per applicazioni robotiche.

Le prestazioni dei sensori resistivi vengono comunemente valutate attraverso parametri quali sensibilità, range dinamico, linearità, isteresi, tempo di risposta e stabilità nel tempo. La sensibilità è generalmente definita come la variazione relativa della resistenza elettrica in funzione della pressione applicata e rappresenta uno dei parametri più importanti nella caratterizzazione del dispositivo. In molti sensori basati su materiali compositi o polimerici è possibile ottenere elevati livelli di sensibilità alle basse pressioni; tuttavia, all'aumentare del carico applicato possono manifestarsi fenomeni di non linearità e saturazione della risposta. Uno dei principali limiti di questa tecnologia è rappresentato dall'isteresi meccanica, causata dal comportamento viscoelastico dei materiali impiegati, che determina differenze tra le curve di carico e scarico. A ciò si aggiungono possibili fenomeni di deriva temporale dovuti al rilassamento meccanico del materiale sensibile e all'invecchiamento della struttura, aspetti che possono influenzare la ripetibilità delle misure nel lungo periodo.

Nonostante tali limitazioni, i sensori tattili resistivi continuano a essere largamente utilizzati grazie ai numerosi vantaggi che offrono. Essi presentano infatti una struttura relativamente semplice e facilmente scalabile, costi di produzione contenuti, elettronica di lettura poco complessa, ridotti consumi energetici e un'elevata compatibilità con substrati flessibili. Inoltre, la possibilità di realizzare matrici sensoriali di grandi dimensioni ne favorisce l'impiego in applicazioni che richiedono la copertura di ampie superfici sensibili. Queste caratteristiche rendono i sensori resistivi una soluzione particolarmente interessante per sistemi robotici e dispositivi biomedicali nei quali è necessario trovare un compromesso efficace tra prestazioni, complessità progettuale e costi di implementazione [2].

Sensori capacitivi

I sensori capacitivi permettono di avere alta risoluzione grazie alla loro elevata sensibilità, alla buona stabilità nel tempo e alla capacità di rilevare variazioni di pressione estremamente ridotte. Il loro principio di funzionamento si basa sulla variazione della capacità elettrica di un condensatore in seguito all'applicazione di una sollecitazione meccanica esterna. In generale, la capacità di un condensatore dipende dall'area delle armature, dalla distanza che le separa e dalla costante dielettrica del materiale interposto. Nei sensori tattili capacitivi, la pressione applicata modifica uno o più di questi parametri,

generando una variazione di capacità che può essere correlata alla forza o alla pressione esercitata sulla superficie sensibile.

Nelle architetture più diffuse per applicazioni robotiche, il dielettrico è costituito da materiali elastomerici deformabili. Quando una forza esterna viene applicata al sensore, lo spessore dello strato dielettrico diminuisce provocando un aumento della capacità elettrica. In configurazioni più avanzate, la deformazione può inoltre modificare la struttura interna del materiale dielettrico, alterandone la permittività relativa e contribuendo ulteriormente alla variazione del segnale capacitivo. Grazie a questo meccanismo, i sensori capacitivi risultano particolarmente efficaci nella rilevazione di basse pressioni e di piccoli cambiamenti nelle condizioni di contatto.

Dal punto di vista elettronico, tali dispositivi richiedono una catena di acquisizione più complessa rispetto ai sensori resistivi, poiché la variazione di capacità deve essere convertita in un segnale elettrico facilmente misurabile. Le tecniche maggiormente utilizzate comprendono oscillatori RC o LC, nei quali la capacità viene convertita in una variazione di frequenza, circuiti a ponte capacitivo, sistemi basati sul tempo di carica e scarica e convertitori capacitivi-digitali (Capacitance-to-Digital Converters, CDC). Questi ultimi rappresentano oggi la soluzione più diffusa, in quanto consentono un'elevata risoluzione, buona immunità al rumore e una facile integrazione con sistemi di acquisizione digitali. Un aspetto particolarmente critico nella progettazione dei sistemi capacitivi riguarda tuttavia la presenza di capacità parassite e la sensibilità alle interferenze elettromagnetiche, fenomeni che possono influenzare significativamente la precisione della misura. Per questo motivo vengono frequentemente adottate tecniche di schermatura elettrica, layout differenziali e strategie di compensazione dedicate.

Le prestazioni dei sensori capacitivi vengono generalmente valutate attraverso parametri quali sensibilità, linearità, risoluzione spaziale, isteresi, deriva termica e rapporto segnale-rumore. Rispetto ai sensori resistivi, essi presentano una migliore stabilità nel tempo e una minore isteresi, caratteristiche che contribuiscono a garantire una maggiore ripetibilità delle misure. Inoltre, l'elevata sensibilità alle basse pressioni e la possibilità di realizzare matrici ad alta densità consentono di ottenere sistemi tattili con elevata risoluzione spaziale. Tuttavia, la risposta del sensore può diventare non lineare all'aumentare della pressione applicata, a causa della progressiva saturazione della compressione del materiale elastomerico. A ciò si aggiungono la maggiore complessità dell'elettronica di lettura e la necessità di

gestire accuratamente gli effetti delle capacità parassite e dei disturbi elettromagnetici, aspetti che richiedono una progettazione più sofisticata rispetto a quella dei sensori resistivi.

Nonostante tali criticità, i sensori capacitivi rappresentano una delle soluzioni più promettenti per la realizzazione di sistemi tattili artificiali di nuova generazione. Essi trovano infatti ampia applicazione nella robotica avanzata, nelle *electronic skin*, nei dispositivi indossabili e nelle interfacce uomo-macchina. In ambito robotico vengono utilizzati per la realizzazione di superfici tattili ad alta risoluzione capaci di rilevare la distribuzione delle pressioni di contatto, identificare eventi di contatto e, in alcune configurazioni, contribuire alla rilevazione dello scorrimento superficiale. Ulteriori applicazioni comprendono protesi sensorizzate, touchscreen avanzati e sistemi biomedicali per il monitoraggio della pressione di contatto. Grazie alla combinazione di elevata sensibilità, ridotta isteresi e alta risoluzione spaziale, questa tecnologia continua a rappresentare uno dei principali riferimenti nello sviluppo di sistemi tattili ispirati alla pelle umana [6].

Sensori ottici

I sensori tattili ottici si basano sulla modulazione di un segnale luminoso in seguito alla deformazione di una superficie sensibile. In tali dispositivi, una sorgente luminosa illumina un materiale elastico trasparente e la pressione applicata modifica le condizioni di propagazione della luce attraverso fenomeni di riflessione, diffusione o scattering. Le variazioni luminose vengono successivamente rilevate mediante fotodiodi o sistemi di acquisizione di immagini, consentendo di ricostruire la distribuzione delle pressioni di contatto e, in alcuni casi, la geometria dell'oggetto interagente.

Una delle configurazioni più diffuse in ambito robotico utilizza elastomeri trasparenti associati a telecamere interne, che permettono di monitorare le deformazioni della superficie sensibile attraverso tecniche di visione artificiale. Grazie a questo approccio, i sensori ottici offrono un'elevata risoluzione spaziale, un'eccellente sensibilità alle deformazioni locali e la capacità di ricostruire mappe di pressione particolarmente dettagliate. Inoltre, risultano intrinsecamente immuni alle interferenze elettromagnetiche.

Tra i più noti troviamo i sensori GelSight. Essi utilizzano uno strato di elastomero deformabile illuminato

internamente e una telecamera per acquisire immagini della deformazione della superficie di contatto, consentendo di ricostruire con elevata risoluzione la geometria dell'oggetto e di stimare informazioni quali forza, distribuzione della pressione e scivolamento [10].

Tuttavia, tali vantaggi sono accompagnati da una maggiore complessità del sistema rispetto ad altre tecnologie di tactile sensing. Le prestazioni dipendono infatti dalla stabilità dell'illuminazione, dalla qualità ottica dei materiali impiegati e dalla corretta calibrazione geometrica del sistema. Inoltre, la necessità di elaborare immagini in tempo reale comporta un aumento dei requisiti computazionali, dei consumi energetici e dell'ingombro complessivo del dispositivo. Nonostante queste limitazioni, i sensori ottici rappresentano una soluzione particolarmente interessante per applicazioni di manipolazione avanzata e per lo sviluppo di sistemi tattili tuttavia, risultano ingombranti e poco adattabili.

Sensori magnetici e basati su campi

I sensori tattili magnetici si basano sulla variazione di un campo magnetico causata da una deformazione meccanica della struttura sensibile. Generalmente, tali dispositivi integrano uno o più magneti permanenti all'interno di un materiale elastico e un sensore magnetico, come un dispositivo basato sull'effetto Hall o sulla magnetoresistenza. Quando una forza viene applicata alla superficie sensibile, la deformazione del materiale modifica la posizione relativa tra il magnete e il sensore, producendo una variazione del campo magnetico che può essere correlata alla forza o alla pressione applicata .

Grazie a questa configurazione, i sensori magnetici offrono una buona sensibilità agli spostamenti, elevata robustezza meccanica e un'ottima stabilità nel tempo. Inoltre, la possibilità di realizzare strutture completamente sigillate li rende particolarmente adatti ad ambienti industriali caratterizzati dalla presenza di polvere, umidità o agenti contaminanti. Tuttavia, le loro prestazioni possono essere influenzate da campi magnetici esterni e la risoluzione spaziale ottenibile risulta generalmente inferiore rispetto a quella dei sensori ottici. Nonostante tali limitazioni, i sensori magnetici rappresentano una soluzione interessante per applicazioni di rilevamento del contatto, misura di forza e integrazione in gripper robotici destinati ad ambienti operativi gravosi [8].

Sensori piezoelettrici

I sensori piezoelettrici si basano sull'effetto piezoelettrico diretto, fenomeno fisico per cui alcuni materiali cristallini o polimerici generano una carica elettrica in risposta a una sollecitazione meccanica. Tale proprietà consente la conversione diretta di una deformazione, o di uno stress applicato, in un segnale elettrico misurabile, rendendo questi sensori particolarmente adatti alla ricostruzione del senso del tatto [2], [6].

Tra i materiali piezoelettrici più comunemente utilizzati si annoverano i cristalli ceramici, come il titanato-zirconato di piombo (PZT), e i polimeri piezoelettrici, quali il polivinilidenfluoruro (PVDF). I materiali ceramici offrono elevata sensibilità e stabilità, mentre i polimeri presentano una maggiore flessibilità meccanica, risultando particolarmente idonei all'integrazione in strutture deformabili come le pelli elettroniche [7].

Dal punto di vista prestazionale, i sensori piezoelettrici si distinguono per l'elevata sensibilità alle variazioni rapide di forza e per l'ampia banda passante, caratteristiche che consentono di rilevare con precisione fenomeni dinamici e transitori. La loro eccellente risposta in frequenza e l'elevato rapporto segnale-rumore in presenza di eventi impulsivi.

Una delle caratteristiche fondamentali dei sensori piezoelettrici è il comportamento di tipo AC-coupled. La carica elettrica generata è infatti associata alle variazioni della sollecitazione meccanica e non al suo valore statico. Di conseguenza, in presenza di una forza costante il segnale tende a decadere nel tempo fino a raggiungere valori prossimi allo zero, rendendo questa tecnologia inadatta alla misura diretta di pressioni statiche o quasi-statiche. Sebbene tale aspetto possa rappresentare una limitazione in alcune applicazioni, nel campo del tactile sensing costituisce spesso un vantaggio significativo. I sensori piezoelettrici risultano infatti particolarmente efficaci nella rilevazione di eventi transitori quali il contatto iniziale tra due superfici, la presenza di vibrazioni locali, i fenomeni di stick-slip e l'insorgenza dello scivolamento durante le operazioni di presa e manipolazione.

Ulteriori vantaggi di questa tecnologia includono la semplicità della struttura meccanica, la buona robustezza operativa, la possibilità di miniaturizzazione e la compatibilità con materiali flessibili come il PVDF, ampiamente utilizzato per la realizzazione di sensori tattili conformabili.

Inoltre, la presenza di rumore alle basse frequenze e la complessità nell'interpretazione dei segnali generati da carichi variabili richiedono una progettazione accurata sia del sensore sia dell'intera catena di acquisizione.

Un aspetto distintivo dei sensori piezoelettrici è la loro elevata risposta dinamica, che li rende particolarmente efficaci nella rilevazione di variazioni rapide di forza, vibrazioni e micro-scorrimenti tra superfici a contatto. Per questo motivo, tali sensori trovano largo impiego in applicazioni quali il riconoscimento delle texture superficiali e la rilevazione dello scivolamento (slip detection) durante la manipolazione robotica [1], [8].

In assenza di variazioni della sollecitazione meccanica, la carica generata tende a disperdersi nel tempo, determinando un decadimento del segnale elettrico. Questo comportamento rende tali sensori meno adatti al monitoraggio prolungato di carichi costanti, ma ne conferma l'efficacia nel controllo dinamico delle interazioni di contatto [6], [9].

Grazie a queste caratteristiche, i sensori piezoelettrici rappresentano una soluzione particolarmente interessante per la realizzazione di sistemi tattili distribuiti, in cui una matrice di elementi sensoriali consente di acquisire informazioni locali sul contatto e sulle sollecitazioni dinamiche [2], [3].

Oltre alle tecnologie descritte, esistono numerose altre tipologie di sensori tattili sviluppate per applicazioni robotiche, come i sensori basati su fibre ottiche di Bragg (Fiber Bragg Grating, FBG), sensori magnetici, capacitivi, induttivi e ottici, ciascuna caratterizzata da specifici vantaggi e limitazioni in termini di sensibilità, risoluzione, robustezza e complessità di integrazione. Una trattazione esaustiva di tutte le tecnologie disponibili esula tuttavia dagli obiettivi del presente lavoro. Per questo motivo, in seguito l'attenzione sarà rivolta esclusivamente ai sensori piezoelettrici in PVDF, impiegati nel sistema sperimentale sviluppato e utilizzati per l'implementazione e la validazione dell'algoritmo di rilevamento dello scivolamento.

2.3 Pelle elettronica: Il sensore tattile piezoelettrico

Per riprodurre le funzionalità tattili della pelle umana in sistemi artificiali e robotici, risulta necessario sviluppare una pelle artificiale in grado di simulare le proprietà meccaniche e sensoriali del tessuto

cutaneo biologico mediante l'integrazione di componenti elettronici. Il concetto di pelle elettronica risale agli anni Settanta, periodo in cui le prime ricerche si concentrarono sull'elettronica flessibile di base e sulla realizzazione di sensori tattili elementari, caratterizzati da capacità di rilevamento limitate. Nonostante le prestazioni ridotte, tali prototipi hanno rappresentato il punto di partenza per lo sviluppo delle moderne pelli elettroniche.

I progressi conseguiti negli ultimi decenni nei campi della nanotecnologia, dell'elettronica flessibile e della scienza dei materiali hanno consentito lo sviluppo di pelli elettroniche avanzate, dotate di capacità di rilevamento multimodale. Questi sistemi risultano in grado di misurare simultaneamente grandezze fisiche quali pressione, temperatura e umidità, nonché, in alcuni casi, parametri chimici ambientali [7]. Nella progettazione di una pelle artificiale con prestazioni ispirate a quelle della pelle umana, la scelta dei materiali e delle tecnologie di fabbricazione riveste un ruolo centrale. In particolare, flessibilità ed elasticità costituiscono requisiti fondamentali per garantire l'adattabilità del sensore a superfici complesse e deformabili, oltre a preservare l'integrità funzionale del dispositivo durante sollecitazioni meccaniche ripetute.

Alla base delle moderne pelli elettroniche si colloca il concetto di elettronica estensibile, un ambito di ricerca in rapida espansione grazie alla sua applicabilità in numerosi settori tecnologici. L'elettronica estensibile si fonda sull'integrazione di dispositivi elettronici e circuiti su substrati elastomerici, capaci di flettersi, comprimersi, torcersi e allungarsi senza compromettere le prestazioni elettriche del sistema [6].

Tale approccio consente di ottenere un contatto conforme tra il sensore e la superficie di interazione, migliorando il rapporto segnale/rumore rispetto ai tradizionali sensori rigidi e incrementando l'accuratezza della misura.

Tra i materiali più comunemente impiegati per garantire flessibilità si annoverano diversi elastomeri, tra cui:

- polidimetilsilossano (PDMS);
- stirene-etilene-butilene-stirene (SEBS);
- poliuretano.

Nella sperimentazione oggetto di questa tesi è stata utilizzata una pelle elettronica rivestita in Dragon Skin 10, un elastomero siliconico bicomponente prodotto da Smooth-On e ampiamente impiegato nelle applicazioni di soft robotics e tactile sensing. Questo materiale appartiene alla famiglia delle gomme siliconiche platino-catalizzate ed è caratterizzato da elevata flessibilità, deformabilità e resistenza meccanica. Grazie alla sua ridotta durezza (Shore 10A), il Dragon Skin 10 è in grado di conformarsi facilmente alle superfici di contatto, distribuendo in modo uniforme le pressioni applicate e migliorando la trasmissione delle deformazioni verso gli elementi sensibili integrati nella struttura. Tali caratteristiche lo rendono particolarmente adatto alla realizzazione di rivestimenti tattili e pelli artificiali per sistemi robotici, nei quali è richiesta una buona capacità di adattamento geometrico unita a elevata durabilità nel tempo.

Questi materiali permettono elevati allungamenti meccanici e consentono al sensore di adattarsi a geometrie complesse, mantenendo un contatto stabile e conforme con la superficie di interesse. Inoltre, la combinazione di elastomeri con riempitivi conduttivi o con strati funzionali attivi consente la realizzazione di microstrutture sensibili ad alta risoluzione, migliorando ulteriormente le prestazioni complessive del sistema [6].

Alla luce di quanto esposto, nel presente lavoro di tesi è stata utilizzata una pelle artificiale progettata presso l'Università di Genova, all'interno del laboratorio CosmicLab, per il rivestimento delle dita umane. La pelle elettronica formante il dito in oggetto è costituita da una matrice di otto sensori piezoelettrici incapsulati all'interno di un guanto siliconico. Dal punto di vista fisico, il funzionamento dei sensori piezoelettrici si basa sull'effetto piezoelettrico diretto, per cui una sollecitazione meccanica applicata al materiale genera una carica elettrica proporzionale alla forza esercitata.

$$Q = d_{33}F \quad (1)$$

dove d_{33} è il coefficiente piezoelettrico del materiale nella direzione di polarizzazione e F è la forza normale applicata al sensore.

I sensori generano otto segnali elettrici distinti, acquisiti mediante un'interfaccia elettronica dedicata, anch'essa sviluppata presso il CosmicLab, che consente il condizionamento del segnale analogico, la

sua conversione in formato digitale e la successiva trasmissione tramite interfaccia seriale.

Nel proseguo dell'elaborato verranno approfonditi i principi di funzionamento dei sensori piezoelettrici e delle architetture elettroniche di lettura associate, con particolare attenzione alle soluzioni progettuali adottate per l'implementazione di sistemi di pelle robotica ad alte prestazioni.

2.4 Scivolamento degli oggetti durante la presa

Durante le operazioni di manipolazione, una delle principali sfide per i sistemi robotici e protesici è il mantenimento di una presa stabile sugli oggetti. Lo scivolamento rappresenta un evento critico che può compromettere il controllo della presa, conducendo alla perdita dell'oggetto o al suo danneggiamento. Negli esseri umani, la prevenzione dello scivolamento è affidata a sofisticati meccanismi di feedback sensoriale mediati dai recettori tattili cutanei, in grado di rilevare variazioni delle componenti tangenziali delle forze di contatto e di rispondere dinamicamente alle vibrazioni generate dall'interazione tra le superfici [2], [6].

Nei sistemi robotici e nelle protesi di arto superiore, la capacità di rilevare precocemente lo scivolamento è fondamentale per implementare strategie di controllo adattivo della presa. A differenza della sola misura della forza normale, il rilevamento dello scivolamento richiede sensori in grado di rispondere a stimoli dinamici ad alta frequenza, tipicamente associati all'interazione tangenziale tra la superficie dell'oggetto e il sensore tattile [7], [1]. Diverse review della letteratura confermano che l'analisi di segnali ad alta frequenza, spesso mediante trasformazioni nel dominio delle frequenze, costituisce un approccio efficace per la rilevazione dello scivolamento incipiente nei sistemi robotici [8].

Dal punto di vista fisico, lo scivolamento non si manifesta immediatamente come un moto macroscopico, ma inizia sotto forma di micro-scorrimenti locali, caratterizzati dalla comparsa di vibrazioni ad alta frequenza associate alla transizione tra attrito statico e dinamico. Dal punto di vista meccanico, la condizione di contatto stabile è governata dal limite di attrito statico, oltre il quale si innesca lo scorrimento relativo tra le superfici.

$$F_t \leq \mu_s N (\text{attrito statico})$$

$$F_t = \mu_d N (\text{attrito dinamico})$$

dove F_t rappresenta la forza tangenziale, N la forza normale e μ_s, μ_d i coefficienti di attrito statico e dinamico.

La rilevazione tempestiva di tali segnali consente di modificare la forza di presa prima che lo scorrimento diventi macroscopico, migliorando la stabilità e l'affidabilità della manipolazione. Per questo motivo, un sistema di sensing tattile efficace deve essere in grado di discriminare tra stati di contatto stabile e condizioni di scivolamento incipiente [6], [9].

In questo contesto, i sensori piezoelettrici rivestono un ruolo di particolare rilievo. Grazie alla loro elevata sensibilità alle variazioni rapide di sollecitazione meccanica, essi risultano particolarmente adatti alla rilevazione delle vibrazioni e delle micro-deformazioni superficiali associate allo scivolamento. Rispetto ad altre tecnologie di sensori tattili, quali sensori resistivi o capacitivi, i trasduttori piezoelettrici presentano una risposta dinamica intrinsecamente rapida e un'ampia larghezza di banda, caratteristiche essenziali per il rilevamento degli eventi transitori che precedono lo scivolamento completo [1], [3].

È tuttavia importante sottolineare che la flessibilità intrinseca del PVDF non è principalmente finalizzata all'adattamento diretto alla superficie degli oggetti manipolati, bensì alla corretta integrazione del sensore all'interno del dispositivo.

Il PVDF presenta inoltre una risposta in frequenza particolarmente adatta alla rilevazione delle vibrazioni generate dallo scivolamento relativo tra superfici a contatto, rendendolo una scelta efficace per la rilevazione di eventi di scivolamento in applicazioni di sensing tattile [1]. Studi recenti evidenziano come la struttura fisica del sensore, così come lo spessore e le proprietà meccaniche degli strati morbidi associati, influenzino direttamente la sensibilità e la qualità del segnale acquisito durante eventi di scivolamento [8].

Dal punto di vista ingegneristico, il segnale generato da un sensore piezoelettrico durante lo scivo-

lamento risulta caratterizzato da un contenuto spettrale ricco di componenti ad alta frequenza, la cui ampiezza e distribuzione dipendono dalle proprietà superficiali dell'oggetto, dal coefficiente di attrito e dalla velocità di scorrimento. L'analisi di tali segnali nel dominio del tempo e della frequenza, mediante tecniche di filtraggio e trasformazioni quali la Fast Fourier Transform (FFT), consente di sviluppare algoritmi di rilevamento dello scivolamento robusti ed efficienti [8].

Un ulteriore vantaggio dei sensori piezoelettrici risiede nella loro capacità di operare come sensori passivi, generando un segnale elettrico direttamente in risposta alla sollecitazione meccanica, senza la necessità di un'alimentazione continua. Questo aspetto risulta particolarmente vantaggioso nella progettazione di sistemi di pelle robotica ad alta densità di sensori, dove il consumo energetico e la complessità dell'elettronica di interfaccia rappresentano fattori critici [3], [4].

Tuttavia, la natura intrinsecamente dinamica della risposta piezoelettrica comporta alcune limitazioni, in particolare l'impossibilità di misurare forze statiche o lentamente variabili. Per questo motivo, nei sistemi di presa avanzati, i sensori piezoelettrici dedicati al rilevamento dello scivolamento vengono spesso integrati con altri sensori tattili, quali sensori di pressione o di forza normale, al fine di ottenere una percezione tattile multimodale più completa e affidabile [7], [3].

In conclusione, il rilevamento dello scivolamento rappresenta una funzione chiave per il controllo avanzato della presa nei sistemi robotici e protesici. I sensori piezoelettrici, grazie alla loro elevata sensibilità dinamica, ampia banda di frequenza e compatibilità con pelli elettroniche flessibili, costituiscono una soluzione tecnologica particolarmente efficace per la slip detection, consentendo l'implementazione di strategie di controllo reattivo ispirate al comportamento del sistema sensoriale umano [[2], [6], [4].

2.5 Fenomeni fisici associati allo scivolamento

Lo scivolamento tra due superfici a contatto non rappresenta un fenomeno istantaneo, ma un processo progressivo che si sviluppa attraverso differenti fasi. Prima che l'oggetto inizi a muoversi macroscopicamente rispetto alla superficie di presa, si verifica infatti una condizione nota come **incipient slip**, nella quale solo una parte dell'area di contatto entra in movimento, mentre la restante continua a ri-

manere in aderenza. Durante questa fase coesistono quindi zone in attrito statico e zone in attrito dinamico, dando origine ai primi micro-scorrimenti locali.

L'alternanza tra fasi di adesione (stick) e di rapido scorrimento (slip) genera il cosiddetto fenomeno di **stick-slip**, caratterizzato da rapide variazioni delle forze tangenziali e dalla comparsa di vibrazioni meccaniche che si propagano attraverso il punto di contatto. Tali vibrazioni costituiscono una delle principali firme fisiche associate all'insorgenza dello scivolamento e risultano particolarmente evidenti prima che si manifesti un movimento macroscopico dell'oggetto.

Dal punto di vista del segnale, questi fenomeni si traducono nella comparsa di componenti dinamiche e di contenuto spettrale ad alta frequenza, la cui ampiezza dipende da numerosi fattori, tra cui le proprietà tribologiche delle superfici, il coefficiente di attrito, la forza normale applicata, la velocità relativa e la rugosità dei materiali. Oltre alle vibrazioni, durante l'incipient slip possono manifestarsi variazioni locali delle forze normali e tangenziali, nonché rapide modifiche della distribuzione delle pressioni all'interno dell'area di contatto.

Proprio queste variazioni rappresentano le principali informazioni sfruttate dagli algoritmi di rilevamento dello scivolamento. A seconda della tecnologia sensoriale impiegata, gli algoritmi possono infatti ricercare differenti "firme" dello slip, quali variazioni delle forze di contatto, impulsi vibrazionali, componenti ad alta frequenza oppure modifiche di opportuni parametri statistici del segnale. La scelta della tecnica di rilevamento dipende quindi sia dal fenomeno fisico che si intende osservare sia dalle caratteristiche del sensore utilizzato.

Per questo motivo, nel corso degli anni sono state sviluppate differenti metodologie di elaborazione dei segnali, ciascuna orientata a valorizzare specifiche caratteristiche associate allo scivolamento. Le principali tecniche adottate in letteratura sono descritte nel paragrafo seguente.

2.6 Tecniche di rilevamento dello scivolamento

Nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tecniche di rilevamento dello scivolamento, che si differenziano per il principio di elaborazione del segnale, la complessità computazionale e le prestazioni ottenibili. Le principali metodologie possono essere ricondotte a metodi basati su soglie, analisi delle vibrazioni, tecniche di elaborazione nel dominio della frequenza e approcci basati su algoritmi di

apprendimento automatico [6], [9].

Metodi basati su soglie

Tra gli approcci più semplici rientrano i metodi basati sul confronto tra una grandezza caratteristica del segnale e una soglia prefissata. I parametri maggiormente utilizzati comprendono l'ampiezza del segnale, la sua derivata temporale, il valore RMS o altri indicatori statistici calcolati su finestre temporali. Il superamento della soglia viene interpretato come indice dell'insorgenza dello scivolamento [9], [11]. Tali metodi presentano una ridotta complessità computazionale e risultano facilmente implementabili in sistemi di controllo operanti in tempo reale. Tuttavia, la loro efficacia dipende non solo dalla corretta scelta delle soglie, ma anche dalla tipologia di sensore impiegato e dalle caratteristiche dei segnali acquisiti. Inoltre, eventi quali il semplice contatto, piccoli urti o vibrazioni generate durante la manipolazione possono produrre variazioni del segnale simili a quelle associate allo scivolamento, rendendo talvolta difficile discriminare il reale evento di slip mediante il solo utilizzo di soglie prefissate.

Metodi basati sull'analisi delle vibrazioni

Un secondo approccio, ampiamente adottato in letteratura, sfrutta le vibrazioni generate durante il fenomeno di stick-slip, che caratterizza le prime fasi dello scivolamento. Tali micro-vibrazioni producono componenti dinamiche del segnale che possono essere rilevate con elevata sensibilità mediante sensori piezoelettrici, grazie alla loro ampia risposta in frequenza e alla capacità di misurare rapide variazioni delle sollecitazioni meccaniche [3], [12].

L'analisi delle vibrazioni consente di individuare precocemente l'insorgenza dello scivolamento, risultando particolarmente efficace nelle applicazioni di manipolazione robotica. Tuttavia, la presenza di vibrazioni dovute ad altre sorgenti o alle dinamiche del sistema può rendere più complessa la discriminazione dell'evento di slip.

Sebbene questo approccio risulti particolarmente efficace, occorre considerare che le vibrazioni acquisite dal sensore non sono necessariamente dovute al solo scivolamento. Esse possono infatti essere

generate anche dalla dinamica del manipolatore, dai motori, dalle trasmissioni meccaniche o dagli urti durante il movimento del robot. Di conseguenza, l'algoritmo deve essere in grado di distinguere le vibrazioni effettivamente associate allo slip da quelle prodotte dal sistema di manipolazione stesso.

Tecniche di elaborazione nel dominio della frequenza

Per migliorare la robustezza del rilevamento, numerosi studi propongono l'elaborazione dei segnali nel dominio della frequenza mediante tecniche quali la Fast Fourier Transform (FFT) o trasformate tempo-frequenza, come la trasformata wavelet [3], [12].

L'analisi spettrale permette di evidenziare componenti in frequenza caratteristiche dello scivolamento, migliorando la capacità di distinguere tale fenomeno rispetto ad altri eventi di contatto. Rispetto ai metodi basati esclusivamente sul dominio temporale, questi approcci offrono generalmente una maggiore robustezza, a fronte però di una maggiore complessità computazionale.

Metodi basati sull'apprendimento automatico

Negli ultimi anni hanno assunto crescente importanza gli approcci basati su algoritmi di apprendimento automatico, nei quali il riconoscimento dello scivolamento viene affidato a classificatori addestrati mediante dati sperimentali. Tra le tecniche maggiormente utilizzate figurano Support Vector Machine, Random Forest e reti neurali, in grado di apprendere automaticamente le caratteristiche distintive dei segnali tattili [8], [9].

Tali approcci consentono di ottenere elevate prestazioni anche in presenza di condizioni operative variabili e differenti tipologie di oggetti. Tuttavia, richiedono dataset di addestramento rappresentativi e una maggiore capacità computazionale, che può limitarne l'impiego in applicazioni embedded e in sistemi di controllo con vincoli temporali stringenti. Un'ulteriore criticità riguarda la raccolta dei dati di addestramento: acquisire dataset contenenti un numero elevato di eventi di slittamento correttamente etichettati risulta infatti un processo complesso e dispendioso, poiché tali eventi devono essere riprodotti in modo controllato e ripetibile nelle diverse condizioni sperimentali. Questa difficoltà può limitare

la capacità di generalizzazione dei modelli e rappresenta uno dei principali ostacoli alla diffusione di tali tecniche nelle applicazioni robotiche.

Approccio adottato nel presente lavoro

Alla luce delle tecniche descritte, nel presente lavoro è stato adottato un approccio basato sull'analisi diretta dei segnali acquisiti da una matrice di sensori piezoelettrici in polivinilidenfluoruro (PVDF). In particolare, è stato implementato un algoritmo ispirato all'approccio proposto da Gentile et al. [11], successivamente adattato alle caratteristiche del sensore impiegato e della piattaforma sperimentale sviluppata nell'ambito della presente tesi.

La scelta di tale metodologia è stata motivata dalla sua semplicità implementativa, dalla ridotta complessità computazionale e dalla possibilità di una futura integrazione in sistemi di controllo robotico operanti in tempo reale. L'utilizzo di sensori PVDF, caratterizzati da un'elevata sensibilità alle variazioni dinamiche della sollecitazione meccanica, risulta inoltre particolarmente indicato per la rilevazione delle vibrazioni associate allo scivolamento.

L'attività sperimentale descritta nei capitoli successivi è stata quindi finalizzata alla caratterizzazione dei segnali acquisiti durante lo scivolamento e alla validazione sperimentale dell'algoritmo implementato, valutandone le prestazioni al variare delle principali condizioni operative.

3 Metodologia

3.1 Robot cartesiano

Un robot cartesiano (figura 1) è un sistema di movimentazione automatizzato in cui gli assi di movimento sono disposti secondo il sistema di coordinate cartesiane (X, Y, Z). Ogni asse consente uno spostamento lineare indipendente, permettendo al robot di raggiungere qualsiasi punto all'interno del suo volume di lavoro tramite combinazioni di movimenti rettilinei. Questa architettura garantisce elevata precisione, semplicità di controllo e buona ripetibilità, rendendo i robot cartesiani particolarmente adatti ad applicazioni industriali quali pick-and-place, assemblaggio, lavorazioni Computerized Numerical Control (CNC) e automazione di processo.

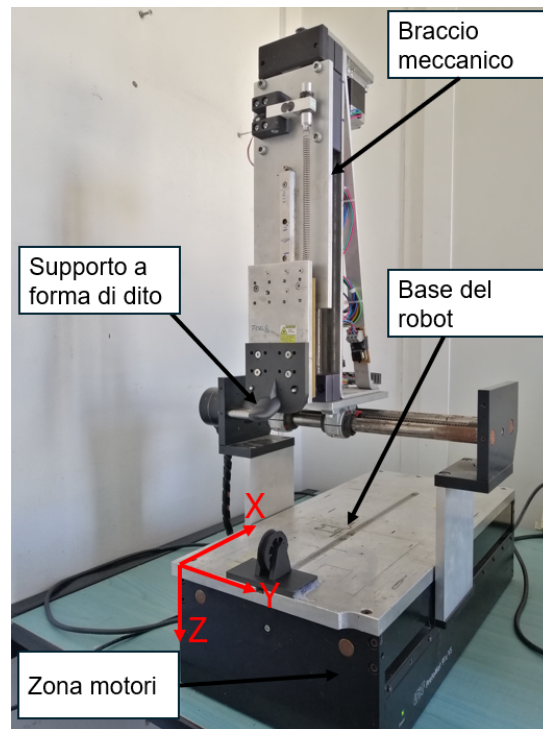


Figura 1: Robot cartesiano utilizzato per il lavoro dentro il laboratorio CosmicLab presso l'Università di Genova.

Il sistema di movimentazione impiegato è un robot cartesiano a tre assi (X, Y, Z), caratterizzato da una cinematica a traslazioni lineari indipendenti e ortogonali. Ciascun asse è azionato da motori passo-passo, pilotati tramite controllo digitale, che consentono un posizionamento preciso e ripetibile e la definizione accurata dei profili di velocità. L'architettura cartesiana permette una mappatura diretta tra

spazio di lavoro e spazio degli attuatori, semplificando il modello cinematico e riducendo la complessità del controllo rispetto a sistemi a cinematica articolata. L'asse Z è dedicato al movimento verticale dell'end-effector ed è progettato per garantire un'elevata risoluzione sullo spostamento, mentre gli assi X e Y consentono il posizionamento planare e la calibrazione geometrica del sistema.

Il robot è gestito da un sistema di controllo centralizzato, che consente la programmazione dei movimenti e la sincronizzazione temporale delle operazioni. Il sistema è integrato con un Data Acquisition System (DAQ) di National Instruments, utilizzato per l'acquisizione dei segnali analogici provenienti dai sensori, per il loro condizionamento e digitalizzazione. Il controllo del robot, la gestione dell'acquisizione dati e la visualizzazione in tempo reale dei segnali sono implementati tramite un'interfaccia grafica sviluppata in NI LabVIEW, operante su un host PC. Tale integrazione hardware–software consente la sincronizzazione tra il moto del robot e l'acquisizione dei dati, garantendo coerenza temporale e affidabilità delle misure. La struttura meccanica rigida del sistema e la separazione funzionale degli assi contribuiscono a ridurre giochi meccanici, accoppiamenti indesiderati e vibrazioni, assicurando stabilità del moto, ripetibilità delle traiettorie e qualità dell'acquisizione, elementi fondamentali per una metodologia sperimentale controllata.

3.2 Cella di carico

Una cella di carico è un trasduttore elettromeccanico progettato per convertire una forza applicata in un segnale elettrico misurabile. Questo tipo di sensore sfrutta tipicamente estensimetri (strain gauge) saldati su un elemento elastico: quando viene applicata una forza, l'elemento si deforma leggermente e la resistenza degli estensimetri cambia in proporzione a questa deformazione. Questa variazione di resistenza viene poi convertita in un segnale elettrico proporzionale alla forza applicata tramite un ponte di Wheatstone e circuiti di condizionamento del segnale. Le celle di carico sono utilizzate in numerosi ambiti, tra cui pesatura industriale, prova materiali, robotica e sistemi mecatronici avanzati, offrendo precisione e affidabilità nelle misurazioni di forze statiche e dinamiche. Nel contesto della robotica e delle applicazioni di controllo di forza, non si utilizzano spesso singoli sensori unidirezionali, ma piuttosto sensori multi-asse in grado di misurare forze e momenti lungo più direzioni contempora-

neamente. Un esempio tipico è il sensore force/torque a sei componenti (F_x , F_y , F_z , T_x , T_y , T_z), noto anche come six-axis force/torque transducer o multi-axis load cell.

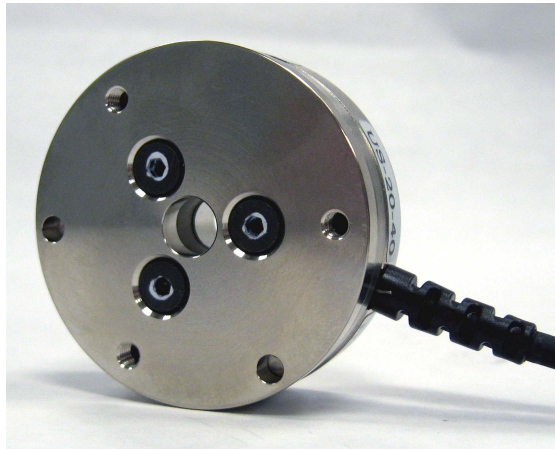


Figura 2: Modello di cella di carico usata per il lavoro.

Il sensore utilizzato in questo lavoro è un cella di carico a capacità da circa 900 Kg di tipo multi-asse **ATI 9105-TW Mini 40SS-R** (in figura 2) prodotto da ATI Industrial Automation. Questo dispositivo è parte della serie Mini40, un gruppo di sensori force/torque progettato per misurare le forze e i momenti lungo tutte e tre le direzioni cartesiane, risultando particolarmente adatta per applicazioni robotiche, ricerca in aptica e controllo della manipolazione.

Il sensore si basa su un transelettro meccanico monolitico in acciaio ad alta resistenza, lavorato con tecniche di precisione e implementato con estensimetri al silicio per garantire un elevato rapporto segnale-rumore rispetto alle tradizionali celle con estensimetri a film metallico. Questa caratteristica migliora la qualità del segnale, facilitando la distinzione di variazioni di forza piccole e veloci, particolarmente rilevanti nelle applicazioni di scivolamento.

Il sensore misura tutte e sei le componenti cartesiane (forze F_x , F_y , F_z e momenti T_x , T_y , T_z), rendendolo adatto per la valutazione dettagliata delle interazioni tattili in sistemi robotici. Questo tipo di sensore è spesso utilizzato nell'analisi di contatto e forza nelle dita di mani robotiche, nella robotica collaborativa e nei sistemi di controllo di forza avanzati.

3.3 Sensore tattile

Nel presente paragrafo sono analizzati i materiali piezoelettrici utilizzati per applicazioni di sensing tattile, con particolare riferimento al polivinilidene fluoruro (PVDF), selezionato come materiale attivo per la realizzazione della pelle elettronica oggetto dello studio.

Il comportamento dei materiali piezoelettrici può essere descritto mediante le equazioni costitutive che mettono in relazione le grandezze meccaniche e quelle elettriche. In particolare, l'effetto piezoelettrico rappresenta un fenomeno di accoppiamento elettromeccanico lineare tra tensione meccanica, deformazione, campo elettrico e spostamento elettrico.

Le equazioni costitutive possono essere espresse nella forma:

$$S = s^E T + d^t E \quad (2)$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (3)$$

dove (S) rappresenta il vettore delle deformazioni, (T) il vettore delle tensioni meccaniche, (E) il campo elettrico applicato e (D) lo spostamento elettrico. La matrice (s^E) descrive la cedevolezza elastica del materiale a campo elettrico costante, la matrice (d) contiene i coefficienti piezoelettrici e la matrice (ε^T) rappresenta la permittività dielettrica misurata a tensione meccanica costante.

La prima equazione descrive l'effetto piezoelettrico inverso, nel quale un campo elettrico genera una deformazione meccanica del materiale. La seconda equazione descrive invece l'effetto piezoelettrico diretto, sfruttato nelle applicazioni di sensing, in cui una sollecitazione meccanica induce una polarizzazione elettrica e la conseguente generazione di carica sulle superfici del materiale.

Nel caso del fluoruro di polivinilidene (PVDF), utilizzato nel presente lavoro come elemento sensibile della pelle elettronica, la struttura molecolare viene orientata mediante processi di stiramento meccanico e polarizzazione elettrica. Tale procedura conferisce al materiale proprietà piezoelettriche anisotrope e definisce un sistema di riferimento costituito dalla direzione di stiramento, dalla direzione trasversale e dalla direzione di polarizzazione, coincidente con lo spessore del film.

Per le applicazioni di sensing tattile, la modalità operativa maggiormente utilizzata è quella associata

alla generazione dello spostamento elettrico lungo la direzione di polarizzazione. In tale configurazione, una deformazione meccanica applicata al film di PVDF produce una variazione di carica elettrica proporzionale alla sollecitazione subita. Questo principio costituisce il fondamento del funzionamento dei sensori impiegati nel presente lavoro.

Le equazioni costitutive evidenziano inoltre una caratteristica fondamentale dei materiali piezoelettrici: la carica generata è associata alle variazioni della sollecitazione meccanica e non al suo valore statico. Di conseguenza, i sensori basati su PVDF risultano particolarmente adatti alla rilevazione di eventi dinamici quali vibrazioni, impatti, fenomeni di stick-slip e condizioni di slittamento incipiente, che rappresentano l'oggetto principale dell'attività sperimentale descritta in questa tesi.

La pelle elettronica sviluppata è costituita da una matrice di sensori tattili piezoelettrici, o patch sensoriale, realizzata mediante un processo di serigrafia. La matrice è composta da un numero variabile di unità sensoriali indipendenti, tipicamente da 4 fino a 16 sensori (vedi figura 3), organizzati secondo una configurazione regolare.



Figura 3: Matrice di sensori usata per il lavoro.

Ciascun sensore è costituito da uno strato attivo di polimero ferroelettrico P(VDF-TrFE), interposto tra due elettrodi metallici (figura 4). Questa configurazione consente di sfruttare il funzionamento del materiale in modalità spessore, massimizzando la sensibilità alla pressione normale applicata.

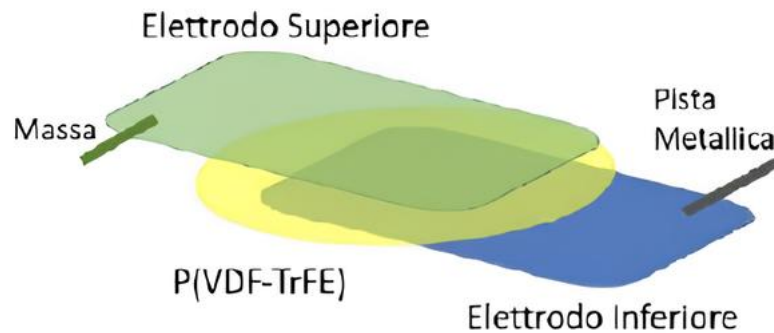


Figura 4: Struttura di un singolo sensore, uno strato di P(VDF-TrFE) intraposto tra due elettrodi.

Il processo di produzione della matrice sensoriale si basa su tecniche di stampa serigrafica. In una prima fase, gli elettrodi inferiori vengono depositati mediante serigrafia su un substrato plastico trasparente e flessibile, in formato tipo DIN A4. Successivamente, viene serigrafato lo strato di polimero ferroelettrico P(VDF-TrFE), che costituisce l'elemento attivo del sensore. Una volta depositato lo strato polimerico, si procede alla serigrafia degli elettrodi superiori, completando così la struttura a strati del trasduttore piezoelettrico.

Le piste metalliche di collegamento, anch'esse realizzate tramite stampa, consentono l'interfacciamento elettrico tra la matrice di sensori e l'elettronica di lettura. Tali piste vengono successivamente protette mediante nastro conduttivo, al fine di ridurre la sensibilità al rumore elettrico esterno e migliorare l'affidabilità del segnale acquisito. Un ulteriore strato di lacca polimerizzabile ai raggi UV viene applicato come rivestimento protettivo delle aree sensibili, proteggendo il sensore da agenti esterni e sollecitazioni meccaniche indesiderate.

Una fase fondamentale del processo produttivo è la polarizzazione del polimero ferroelettrico. Durante questa procedura, i dipoli elettrici inizialmente orientati in modo casuale all'interno dei cristalliti del materiale vengono allineati lungo la direzione dello spessore, rendendo il materiale piezoelettricamente attivo e consentendo la conversione delle sollecitazioni meccaniche in segnali elettrici misurabili.

Una volta completata la fabbricazione, la matrice di sensori viene accoppiata all'elettronica di interfaccia attraverso le piste metalliche serigrafate. Successivamente, l'intera patch sensoriale viene incapsulata in uno strato di silicone elastomerico, al fine di renderla indossabile e di adattarla alla geometria

della superficie di applicazione. In particolare, nel caso di applicazioni su dita della mano, la matrice viene ricoperta da uno strato cilindrico protettivo che ne consente l'adesione alla falange dell'indice, migliorando il comfort e la robustezza meccanica del sistema.

L'incapsulamento svolge un duplice ruolo: da un lato protegge i sensori e le piste di collegamento da danneggiamenti meccanici e agenti esterni; dall'altro contribuisce a distribuire le sollecitazioni di contatto sullo strato attivo, migliorando la qualità e la ripetibilità delle misure tattili.

L'elaborazione e l'interpretazione del segnale nei sistemi di pelle elettronica avvengono attraverso un'Interfaccia Elettronica (IE) dedicata al condizionamento e all'acquisizione del segnale, nonché mediante unità di elaborazione digitale. In questo contesto, i materiali di rilevamento e le caratteristiche elettriche del sensore svolgono un ruolo determinante nel definire le prestazioni complessive del sistema.

Il sottosistema di interfaccia elettronica è responsabile dell'adattamento del segnale in uscita dal sensore, tipicamente a bassi livelli di tensione, per renderlo compatibile con un circuito di conversione analogico-digitale (ADC). Nei trasduttori piezoelettrici, la presenza di capacità parassite — derivanti dall'accoppiamento con controelettrodi, componenti adiacenti, materiali strutturali o, nel caso di array a matrice attiva, dalle interconnessioni e dai transistor di commutazione — rappresenta un fattore critico. Tali effetti parassiti determinano un'attenuazione del segnale di tensione generato dall'elemento piezoelettrico e una degradazione della risoluzione spaziale nella ricostruzione della distribuzione delle deformazioni, limitando le prestazioni complessive del sistema di pelle artificiale.

La simulazione del comportamento dei recettori biologici mediante sensori elettronici artificiali rappresenta pertanto una sfida ingegneristica complessa.

3.4 Ambiente software

3.4.1 Controllo del robot cartesiano tramite labVIEW

Il software LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) è stato utilizzato come ambiente di sviluppo per la realizzazione del sistema di acquisizione dati e di controllo sperimentale. In particolare, LabVIEW ha consentito la gestione sincrona dell'acquisizione dei segnali provenienti

dai sensori tattili e dalla cella di carico, nonché il controllo del robot cartesiano impiegato nei test di scorrimento controllato. I segnali analogici sono stati campionati a una frequenza opportunamente selezionata in funzione delle caratteristiche dinamiche dei fenomeni di interesse, in particolare delle vibrazioni associate agli eventi di scivolamento.

La piattaforma ha inoltre permesso l'implementazione di meccanismi di triggering hardware e software per garantire l'allineamento temporale tra l'avvio dell'acquisizione dei segnali e l'esecuzione dei movimenti del robot, assicurando una corretta sincronizzazione tra le misure tattili, le forze di contatto rilevate dalla cella di carico e le condizioni cinematiche del sistema. Tale sincronizzazione risulta fondamentale per l'analisi comparativa dei segnali e per l'individuazione accurata dell'istante di insorgenza dello scivolamento.

Il software di controllo e acquisizione dati è stato sviluppato in ambiente LabVIEW ed è strutturato secondo un'architettura modulare. Il programma si compone principalmente di due sezioni funzionali principali, che operano in modo coordinato e sincrono.

La prima sezione è dedicata al controllo del movimento del robot cartesiano e implementa la logica della macchina a stati finiti (FSM), responsabile della gestione delle diverse fasi operative del sistema e della generazione dei comandi di posizione lungo gli assi cartesiani.

La seconda sezione è invece destinata alla lettura, acquisizione ed elaborazione dei segnali provenienti dalla load cell e dai sensori tattili, utilizzata per la misura della forza di contatto tra il robot e i sensori. I dati acquisiti vengono elaborati in tempo reale e resi disponibili sia per le logiche di controllo sia per la visualizzazione da parte dell'operatore.

A supporto di tali sezioni, il front panel integra grafici, indicatori numerici e tabelle, che consentono il monitoraggio continuo delle principali grandezze di interesse, permettendo una supervisione completa dell'evoluzione del sistema durante l'esecuzione delle prove sperimentali.

Il software sviluppato in ambiente LabVIEW è finalizzato al controllo e alla gestione operativa del robot mediante un'interfaccia grafica (front panel) progettata per garantire flessibilità e semplicità d'uso. Il sistema consente sia il controllo manuale sia l'esecuzione di procedure automatizzate. In modalità manuale, l'utente può comandare direttamente il movimento del robot lungo i tre assi cartesiani (x, y, z), permettendo un posizionamento preciso all'interno dello spazio di lavoro. Parallelamente, sono

state implementate due routine automatiche.

La prima, denominata “**Auto Z**”, prevede lo spostamento automatico del robot lungo la direzione positiva dell’asse z fino al raggiungimento di una soglia di forza predefinita, acquisita tramite una cella di carico; al raggiungimento di tale condizione, il sistema arresta il movimento, garantendo un controllo sicuro dell’interazione. La seconda routine, indicata come “**Slide**”, è stata sviluppata per l’automazione della fase di acquisizione dati: il robot esegue ciclicamente, per un numero di iterazioni N impostabile, una traiettoria predefinita, assicurando la ripetibilità delle condizioni sperimentali.

Inoltre, il sistema integra una funzione di “**Go Home**”, che consente al robot di ritornare automaticamente alla posizione di riferimento (origine degli assi), generalmente coincidente con la configurazione iniziale all’avvio del sistema. Le funzionalità descritte verranno approfondite nei paragrafi successivi.

Movimento base del robot cartesiano

Il controllo del robot cartesiano è implementato mediante interfaccia sviluppata in LabVIEW, consentendo l’invio manuale di comandi di posizionamento lungo i tre assi cartesiani x, y e z. Il sistema di riferimento è definito ponendo l’origine (0,0,0) nell’angolo superiore destro della base del robot (figura 5). A partire da tale configurazione, ogni movimento viene espresso come uno spostamento incrementale lungo uno specifico asse.

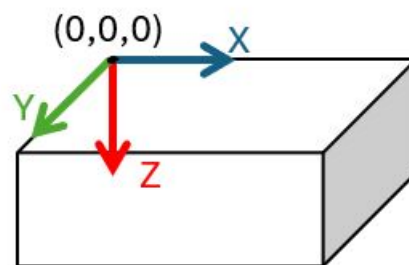


Figura 5: Sistema di riferimento cartesiano del robot e convenzione del segno positivo degli assi considerando solo la base del robot.

L’interazione con il robot avviene tramite il front panel di LabVIEW: per comandare un movimento,

l'utente inserisce un valore numerico (espresso in millimetri) nell'apposito campo relativo all'asse desiderato e successivamente preme il pulsante di invio ("**Send**"). Il sistema accetta il comando solo se esso risulta differente dal comando precedentemente eseguito, evitando così l'invio ridondante di istruzioni identiche. Una volta validato, il robot esegue uno spostamento pari al valore impostato lungo l'asse selezionato.

Il comando inviato viene inoltre tradotto in una stringa di controllo in formato G-code semplificato e visualizzato nella sezione "**Sent Command**" del front panel. Ad esempio, un comando di spostamento di 12 mm lungo l'asse z viene rappresentato come "g1z12". Analogamente, l'inserimento di un valore pari a 20 mm lungo l'asse x produce un comando del tipo "g1x20", che determina lo spostamento incrementale del robot lungo la direzione positiva dell'asse considerato (figura 6).

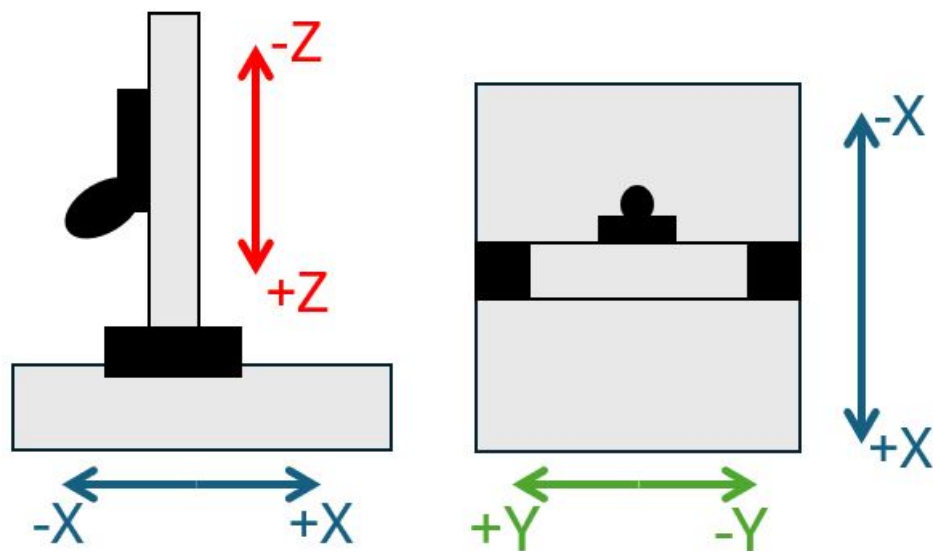


Figura 6: Rappresentazione degli spostamenti incrementali lungo gli assi cartesiani.

Durante il funzionamento, qualora il robot non sia impegnato nell'esecuzione di un comando, è possibile attivare la procedura di ritorno all'origine mediante il pulsante "Go Home". Questa funzione consente di riportare il robot nella posizione iniziale (0,0,0), garantendo un rapido ripristino della configurazione di riferimento iniziale.

Routine Auto Z

L'attivazione della modalità automatica di discesa lungo l'asse z avviene tramite il pulsante **"Auto"** presente nel front panel di LabVIEW. Una volta avviata, il sistema entra in una routine di controllo incrementale che comanda al robot una discesa progressiva lungo la direzione positiva dell'asse z, mediante passi discreti.

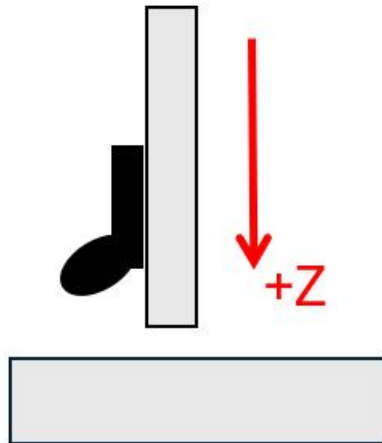


Figura 7: Movimento del robot durante la discesa automatica.

Ad ogni iterazione, il robot esegue uno spostamento incrementale lungo l'asse z, proseguendo la discesa fino all'interazione con il sensore di forza (load cell). Durante questa fase, il sistema continua a monitorare il valore della forza rilevata dal sensore: una volta stabilito il contatto, il robot effettua ulteriori piccoli spostamenti nella stessa direzione, incrementando progressivamente la forza applicata. La routine viene arrestata automaticamente quando il valore della forza misurata supera una soglia prefissata, definita a priori in fase di configurazione del sistema. Il superamento di tale soglia rappresenta la condizione di arresto del processo, garantendo che il robot interrompa la discesa evitando sollecitazioni eccessive sul sistema meccanico o sul sensore stesso.

Al termine della procedura, il robot mantiene la posizione raggiunta e torna in uno stato di attesa per qualche secondo prima di partire con la routine successiva.

Qui di seguito la macchina a stati di questa parte del programma.

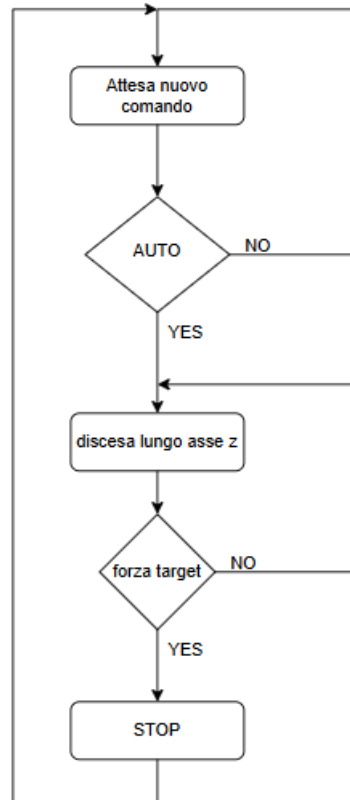


Figura 8: Macchina a stati della routine di discesa automatica.

Routine di Slide per raccolta automatica dei dati

La routine di slide è progettata per automatizzare la raccolta dati durante prove di scorrimento controllato (scivolamento) tra il robot e l'oggetto. Tramite il front panel di LabVIEW, l'utente può definire due parametri principali: il numero totale di cicli N (numero di slide) e l'ampiezza dello spostamento lungo l'asse x (espressa in millimetri) che determina i millimetri di slide da eseguire ad ogni ciclo.

La procedura viene avviata a partire da una condizione iniziale in cui il robot è in contatto con la load cell, applicando una forza controllata secondo quanto descritto nella routine precedente (figura 8). Una volta impostati i parametri, il sistema esegue automaticamente una sequenza di movimenti, ripetuta per N iterazioni consecutive, garantendo elevata ripetibilità del test (figura 9).

In particolare, ad ogni iterazione il robot esegue una sequenza predefinita di movimenti incrementali:

1. spostamento lungo l'asse z in direzione positiva per stabilire il contatto con la superficie

2. spostamento lungo l'asse x in direzione positiva di un valore pari a "mm slide" eseguendo uno scivolamento
3. spostamenti per riposizionare il robot nella posizione iniziale e eseguire un nuovo scivolamento

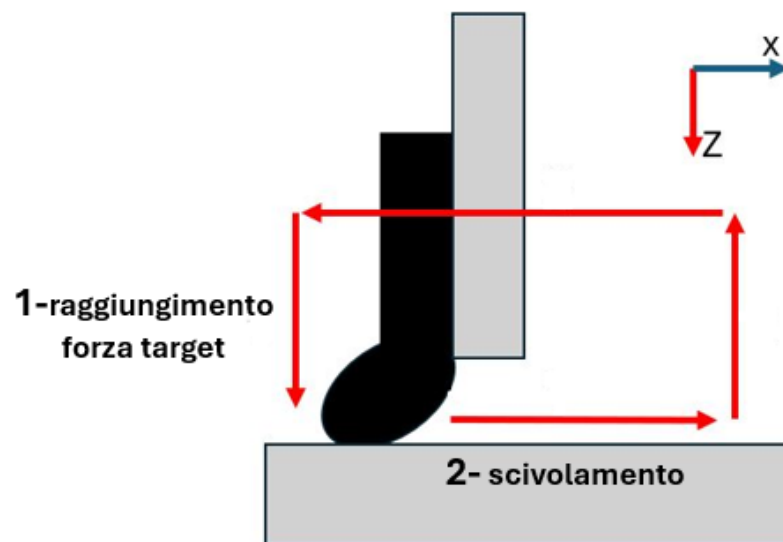


Figura 9: Sequenza di movimenti eseguiti dal robot durante un singolo ciclo della routine di slide per la simulazione dello scivolamento.

Questa sequenza consente di simulare il fenomeno di scivolamento controllato dell'oggetto, mantenendo al contempo il contatto con il sensore e introducendo una fase di parziale riallineamento del manipolatore al termine di ogni ciclo. Il valore "mm slide" è definito dall'utente e rappresenta l'entità dello scorrimento imposto. Lo spostamento per riportare il robot in posizione dopo lo scivolamento è stato fissato a 5 mm lungo l'asse z e ha la funzione di modulare il contatto rilasciando momentaneamente il dito per poi ristabilire il contatto tornando al punto di partenza, evitando accumuli di errore e garantendo condizioni ripetibili tra un ciclo e il successivo.

Dal punto di vista implementativo, la sequenza di comandi viene eseguita all'interno di un ciclo iterativo, in cui ad ogni iterazione (N) viene inviato un comando di movimento distinto al robot sotto forma di stringa per ogni movimento eseguito dal robot dentro al ciclo. Questo approccio consente di riutilizzare la logica di controllo manuale precedentemente descritta, estendendola a una modalità automatica basata su sequenze predefinite.

Al termine delle N iterazioni, il robot si arresta nella posizione finale e rimane in attesa di un nuovo comando da parte dell'utente.

Qui di seguito la macchina a stati di questa parte del programma.

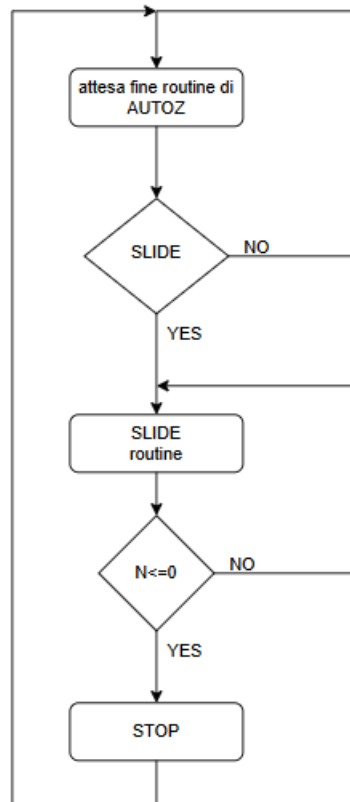


Figura 10: Macchina a stati della routine di slide.

Interfaccia utente e funzionalità del programma

In Figura 11 è descritto il front panel del programma, che costituisce l'interfaccia grafica sviluppata per il monitoraggio e il controllo dell'intero sistema robotico. L'interfaccia è stata progettata per consentire all'operatore una gestione intuitiva delle funzionalità implementate, fornendo al tempo stesso una visualizzazione completa dei parametri di funzionamento e dello stato del sistema.

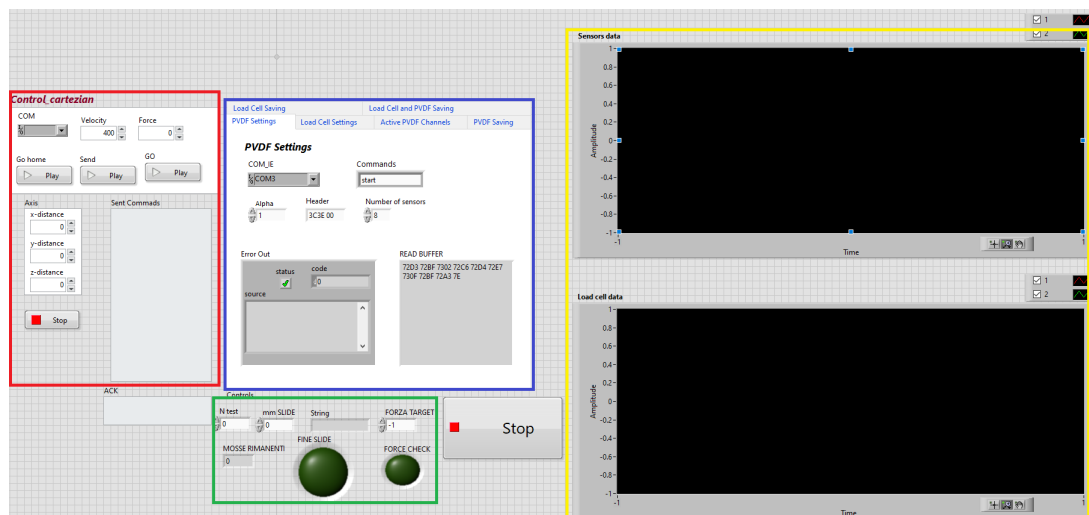


Figura 11: Front panel del programma LabVIEW diviso secondo le funzionalità: in rosso i comandi per controllare il cartesiano, in blu tutte le finestre per il set up dei sensori e salvataggio dei dati, in verde i parametri per il set up delle routine, in giallo i grafici dei sensori.

Nel pannello principale sono presenti grafici dedicati alla visualizzazione in tempo reale dei segnali acquisiti dai diversi sensori integrati nel sistema, consentendo il monitoraggio continuo delle grandezze misurate durante il funzionamento del robot. È inoltre presente una sezione dedicata alla gestione dei movimenti del robot, realizzata mediante controlli numerici e pulsanti che permettono di modificare i parametri cinematici e comandare manualmente i diversi assi del robot.

Ulteriori controlli consentono la configurazione delle routine automatiche precedentemente descritte, permettendo all'utente di impostarne i principali parametri operativi prima dell'esecuzione. In particolare, mediante il pulsante Auto, il robot esegue automaticamente e in successione le routine AutoZ e Slide, senza richiedere ulteriori interventi da parte dell'operatore.

Il Front Panel include inoltre una sezione organizzata tramite differenti finestre dedicate alla configurazione dei sensori, alla calibrazione dei dispositivi acquisitori e alla gestione del salvataggio dei dati sperimentali raccolti durante le prove. Tale struttura modulare consente di separare logicamente le diverse funzionalità del software, migliorando la leggibilità dell'interfaccia e semplificando le operazioni di configurazione e acquisizione dati.

Il comportamento del software è descritto mediante una macchina a stati finiti, che rappresenta in modo sintetico la logica di funzionamento del programma e le transizioni tra le diverse modalità operative. Nella Figura 12 è riportato lo schema complessivo della FSM implementata in LabVIEW, attraverso la

quale vengono gestiti i diversi stati del sistema e le routine automatiche del robot.

La macchina a stati è strutturata principalmente in tre stati operativi fondamentali. Il primo stato riguarda il controllo base del robot mediante comandi impartiti direttamente dal Front Panel: l'operatore può gestire manualmente i movimenti del robot e modificare i parametri principali attraverso i controlli presenti nell'interfaccia grafica. Il secondo stato viene attivato schiacciando il pulsante Auto, che avvia la modalità automatica di discesa del robot secondo la routine AutoZ precedentemente descritta. Infine, una volta raggiunto il valore di forza desiderato rilevato dai sensori, il sistema effettua la transizione verso il terzo stato operativo, corrispondente alla routine di Slide, nella quale il robot esegue il movimento di scorrimento mantenendo le condizioni operative impostate.

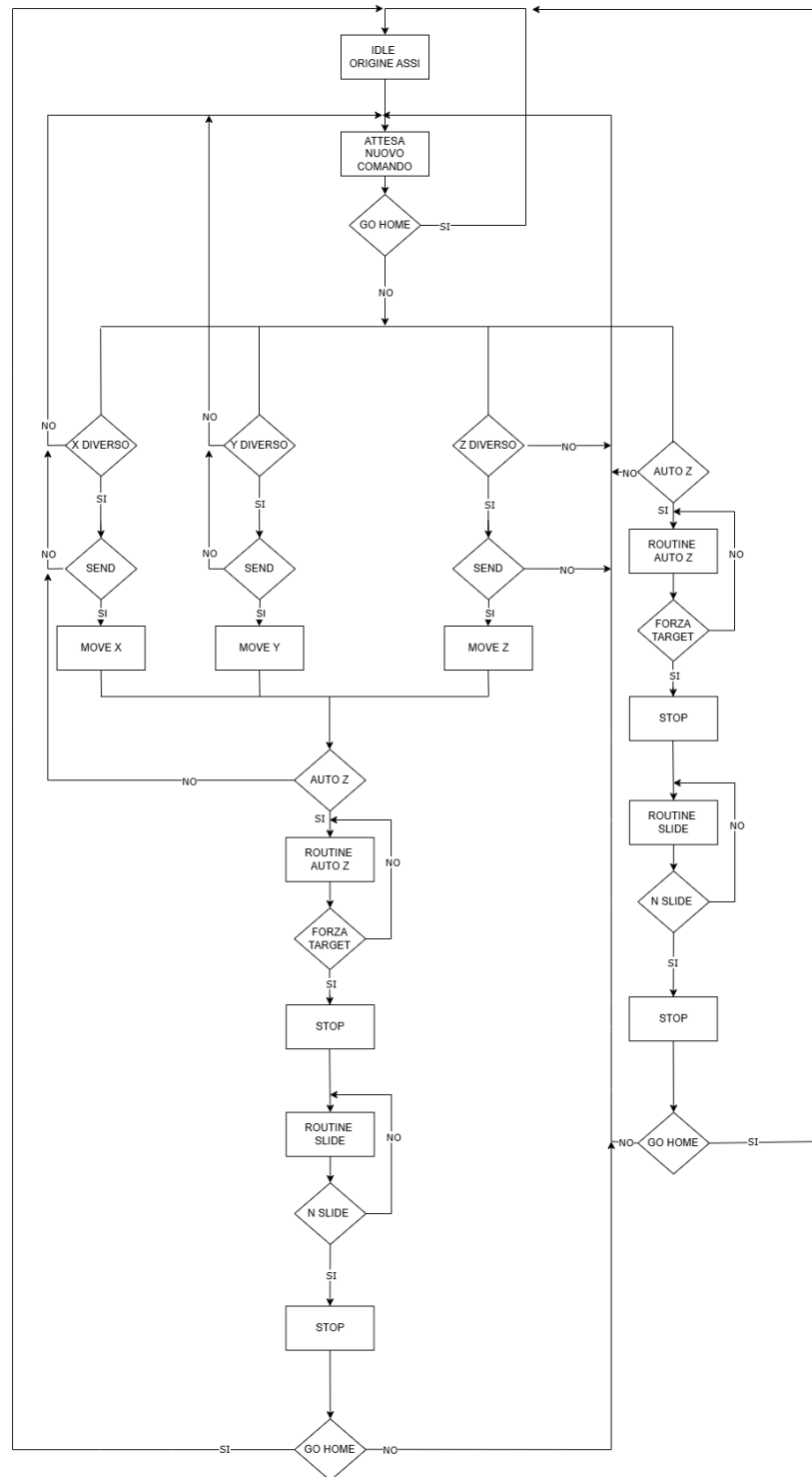


Figura 12: Macchina a stati di tutto il sistema del robot cartesiano.

3.5 Protocollo sperimentale di acquisizione dei dati

Il sensore del set up sperimentale è fatto per essere indossato da una mano umana o robotica, nel nostro caso sul robot cartesiano è stato installato un supporto a forma di dito per simulare un uso

coerente con la realtà. Il dito così progettato scorre sopra un supporto di acido polilattico (PLA), stampato in 3D sotto al quale si trova la cella di carico.

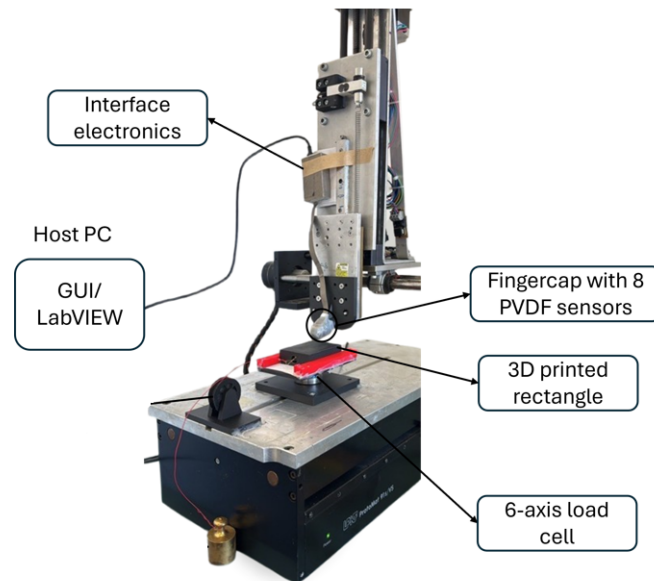


Figura 13: Schema del setup sperimentale per raccogliere i dati.

È stato definito un protocollo sperimentale per l'acquisizione dei dati al fine di valutare il comportamento del sistema robotico al variare delle principali condizioni operative. In particolare, le prove sperimentali sono state eseguite modificando, i parametri di forza applicata, velocità di scorrimento e distanza percorsa durante il movimento (slide) come definito nel protocollo di sperimentazione.

Nella sperimentazione sono stati fissati i seguenti valori (basso, medio e alto) per i tre parametri in oggetto che rappresentano una situazione simile ad un contesto reale.

In particolare, per la distanza di slide sono stati considerati tre valori: $5mm$ per il livello basso, $10mm$ per il livello medio e $20mm$ per il livello alto. La velocità di avanzamento del robot è stata imposta mediante il parametro di velocità del controllore, utilizzando tre livelli nominali pari a 200, 400 e 800. Tali valori rappresentano parametri interni del sistema e non corrispondono direttamente a una velocità espressa in unità fisiche. Tali impostazioni corrispondono approssimativamente a velocità di $2,4mm/s$, $5,6mm/s$ e $7,2mm/s$, quest'ultime ottenute per estrapolazione dai comandi ai motori del robot. Infine, relativamente alla forza applicata, è stato definito un livello di forza bassa pari a un valore inferiore a 5 N, come forza media un valore tra 5 N e 10 N e come forza alta un valore superiore a 10 N, questo perché la banda rilevante per il tattile è tra 0, 5 e 10 N.

Parametro	Intensità parametro	Valore
Forza applicata	bassa	$X < 5 \text{ N}$
Forza applicata	medio	$5 \text{ N} < X < 10 \text{ N}$
Forza applicata	alto	$X > 10 \text{ N}$
Distanza di scivolamento	bassa	5 mm
Distanza di scivolamento	medio	10 mm
Distanza di scivolamento	alto	20 mm
Velocità robot	bassa	2.4 mm/s
Velocità robot	medio	5.6 mm/s
Velocità robot	alto	7.2 mm/s

Tabella 1: Tabella riassuntiva del protocollo sperimentale per le prove

Combinando tutte le possibili configurazioni dei tre parametri considerati, forza, velocità e distanza, ciascuno caratterizzato da tre differenti livelli operativi, si ottiene un totale di $3^3 = 27$ combinazioni sperimentali complessive. Per ciascuna configurazione sono state effettuate almeno 10 acquisizioni, al fine di garantire la ripetibilità delle misure e migliorare l'affidabilità statistica dei dati raccolti. Il dataset finale risulta quindi costituito da una collezione complessiva di 270 test sperimentali, ottenuti dall'insieme di tutte le combinazioni operative considerate e delle relative ripetizioni.

In tabella 2 sono riportate tutte le possibili combinazioni dei test eseguiti, ottenute variando sistematicamente i tre parametri sperimentali.

Condizione	Intensità forza	Distanza slide	Velocità robot
1-LLL	bassa	bassa	bassa
2-LLM	bassa	bassa	media
3-LLH	bassa	bassa	alta
4-LML	bassa	media	bassa
5-LMM	bassa	media	media
6-LMH	bassa	media	alta
7-LHL	bassa	alta	bassa
8-LHM	bassa	alta	media
9-LHH	bassa	alta	alta
10-MLL	media	bassa	bassa
11-MLM	media	bassa	media
12-MLH	media	bassa	alta
13-MML	media	media	bassa
14-MMM	media	media	media
15-MMH	media	media	alta
16-MHL	media	alta	bassa
17-MHM	media	alta	media
18-MHH	media	alta	alta
19-HLL	alta	bassa	bassa
20-HLM	alta	bassa	media
21-HLH	alta	bassa	alta
22-HML	alta	media	bassa
23-HMM	alta	media	media
24-HMH	alta	media	alta
25-HHL	alta	alta	bassa
26-HHM	alta	alta	media
27-HHH	alta	alta	alta

Tabella 2: Tabella riassuntiva di tutte le prove eseguite

3.6 Metodologia di analisi dei dati

Terminata la fase di acquisizione, i dati raccolti sono stati sottoposti a una prima verifica qualitativa. I segnali ottenuti sono risultati completi e sufficientemente puliti, consentendo il passaggio dalla fase di raccolta alla fase di analisi e interpretazione dei risultati.

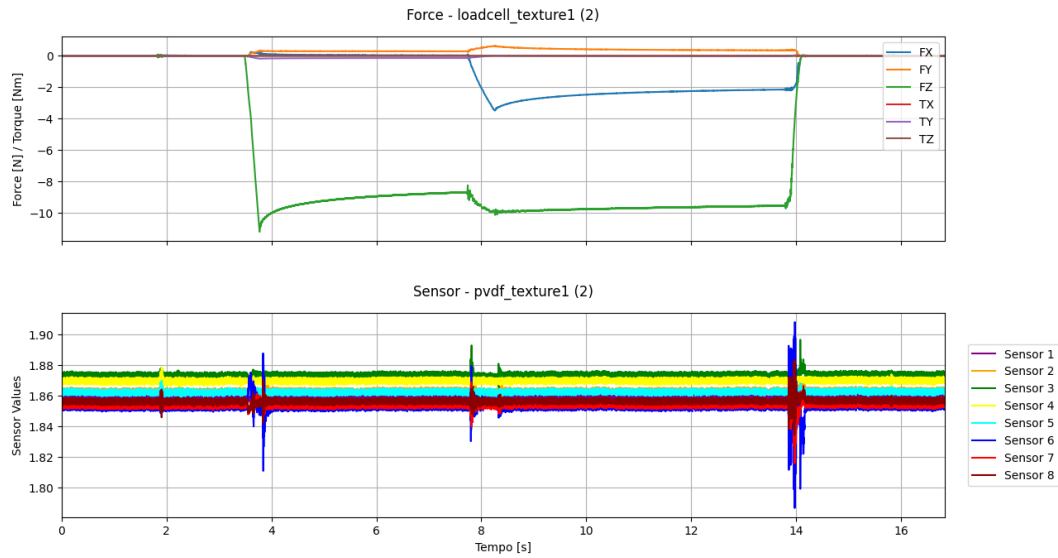


Figura 14: Grafico esempio dei dati raccolti attraverso la cella di carico(sopra) e i sensori PVDF(sotto).

Il grafico mostra simultaneamente i segnali provenienti dalla load cell e dagli otto sensori piezoelettrici PVDF. L'allineamento temporale delle due acquisizioni consente di confrontare direttamente le informazioni provenienti dalla cella di carico con quelle provenienti dai sensori tattili. L'analisi evidenzia chiaramente tre eventi principali:

- **Contatto iniziale:** Intorno ai 4s si osserva una variazione dinamica della componente normale F_z , che indica l'instaurarsi del contatto tra il campione e la superficie. Nello stesso istante i sensori PVDF presentano un impulso ben definito dovuto alla rapida deformazione del materiale sensibile.
- **Evento di scivolamento:** Intorno ai 8s compare una seconda perturbazione nei segnali piezoelettrici. Tale evento corrisponde all'inizio dello scivolamento relativo, dovuto alla forza tangenziale, tra le superfici e genera vibrazioni e variazioni locali delle pressioni di contatto che vengono rilevate dai sensori PVDF. La presenza simultanea della variazione nelle forze misurate dalla load cell e della risposta dei sensori tattili conferma la correlazione tra i due eventi.
- **Rilascio del contatto:** Intorno ai 14s la forza normale torna rapidamente a zero indicando la separazione delle superfici. Anche in questo caso tutti i sensori PVDF mostrano un impulso

transitorio associato alla rimozione del carico meccanico. La netta distinzione dei tre eventi dimostra che il sistema di acquisizione è in grado di rilevare correttamente le principali fasi dell'interazione tra il campione e la superficie di contatto.

L'obiettivo principale di questa fase sperimentale consiste nell'individuazione dell'istante di inizio dello slittamento tra il dito del robot in Dragon Skin 10 e la superficie in PLA su cui striscia, utilizzando come riferimento le misure fornite dalla load cell e confrontandole successivamente con la risposta dei sensori PVDF.

A tal fine vengono analizzate le tre componenti di forza misurate dalla load cell, indicate rispettivamente con F_X , F_Y e F_Z . Le componenti F_x e F_y , appartenenti al piano tangenziale di contatto, vengono utilizzate per calcolare la forza tangenziale risultante F_t se la forza è diversa da 0 indica l'inizio dello scivolamento. F_t è definita come:

$$F_t = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (4)$$

La componente F_Z , associata alla forza normale esercitata sul campione, viene invece impiegata per stimare la forza di attrito limite disponibile al contatto. Tale grandezza viene ottenuta moltiplicando la forza normale per il coefficiente di attrito μ . Il coefficiente di attrito tra i due materiali Dragon Skin 10 e PLA è stato stimato a partire da dati reperiti in letteratura come riportato da [13]. A seguito dei test fatti è stato fissato il valore di $\mu = 0.30$. Moltiplicando F_z per il coefficiente di attrito otteniamo F_a definita come forza di attrito limite ovvero resistenza che si oppone all'inizio del movimento tra due superfici.

$$F_a = \mu F_Z \quad (5)$$

Una volta calcolate le due grandezze, viene costruito un grafico nel quale il tempo costituisce l'asse delle ascisse, mentre sull'asse delle ordinate vengono rappresentate sia la forza tangenziale (F_t) sia la forza di attrito limite (F_a). L'attenzione è rivolta all'individuazione del punto di intersezione tra le due curve, condizione che corrisponde al raggiungimento del limite di attrito disponibile. Tale istante viene assunto come riferimento per identificare l'inizio dello scivolamento rilevato dalla loadcell. Avendo

stimando il coefficiente d'attrito che potrebbe essere minore o maggiore, quindi l'istante dell'effettivo scivolamento potrebbe essere stato sovra o sottostimato.

L'istante temporale individuato mediante l'analisi della load cell viene successivamente riportato sui grafici dei segnali acquisiti dai sensori PVDF. Questo confronto consente di verificare la relazione temporale tra l'evento meccanico di scivolamento e la risposta del sistema di sensing, valutando se il sensore sia in grado di rilevare il fenomeno prima, contemporaneamente o successivamente rispetto alla misura fornita dalla load cell.

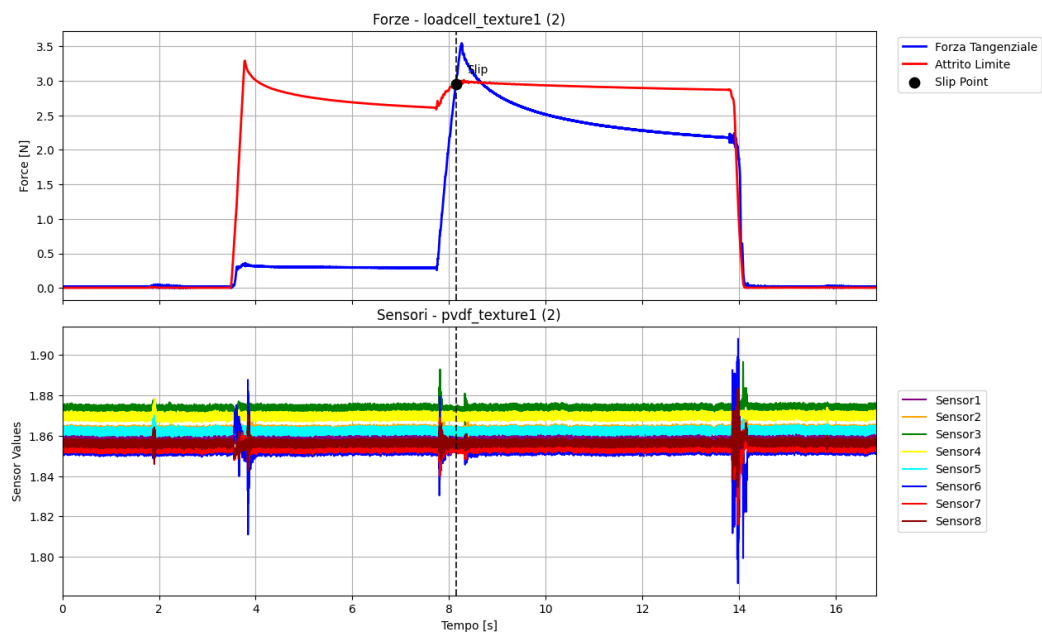


Figura 15: Prime considerazioni su dati raccolti attraverso la loadcell con riferimento a figura 14.

Durante la fase iniziale del contatto il sistema si trova in condizioni di aderenza e la forza tangenziale rimane inferiore al limite di attrito disponibile. Con l'avanzare del movimento, la forza tangenziale aumenta progressivamente fino a raggiungere il valore massimo sostenibile dall'attrito statico. L'intersezione tra le due curve rappresenta il punto in cui: $F_t = F_a$ ovvero la condizione limite oltre la quale il contatto non è più in grado di mantenere l'aderenza.

La linea verticale tratteggiata nera individua temporalmente questo istante e viene interpretata come l'evento di scivolamento. Il marcatore nero evidenzia il punto di intersezione tra le due curve e consente di identificare con precisione il tempo di slittamento utilizzato come riferimento per le successive analisi sui segnali tattili. Osservando il grafico inferiore si nota inoltre come, in prossimità dello stesso istante

temporale, alcuni sensori PVDF mostrino variazioni significative del segnale, indicando una risposta coerente con l'evento di scivolamento individuato dalla load cell.

Parallelamente viene realizzata una mappa spaziale del sensore, con l'obiettivo di verificare la distribuzione delle risposte registrate durante le prove. Questa analisi permette di controllare la coerenza tra la posizione effettiva del contatto e il sensore che presenta le ampiezze maggiori, fornendo una valutazione qualitativa del comportamento spaziale del sistema di sensing. Con riferimento alla mappa 16 il verso del movimento del dito inizia dal sensore S6 e termina al sensore S5. La matrice dei sensori è posizionata sul supporto in modo tale che il sensore S6 corrisponda alla punta del dito.

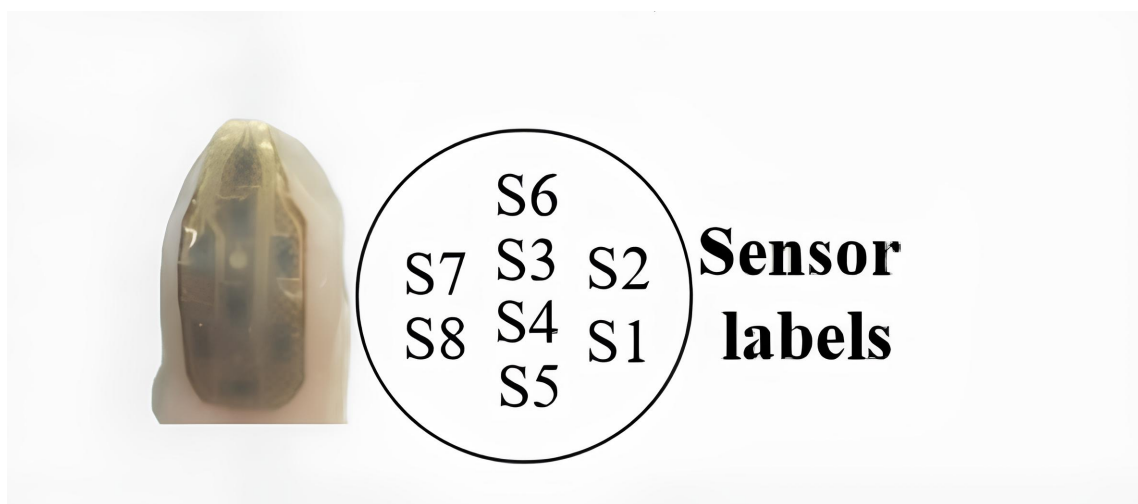


Figura 16: Foto del sensore usato per il test con relativa mappa spaziale dei sensori.

Infine, viene condotta un'analisi comparativa dell'intero insieme di acquisizioni disponibili. Lo scopo è individuare eventuali pattern ricorrenti che si manifestano sistematicamente prima dell'inizio dello slittamento. L'identificazione di caratteristiche comuni tra prove differenti può fornire indicazioni utili per la definizione di criteri di rilevamento precoce del fenomeno e per lo sviluppo di metodologie predittive basate sui segnali provenienti dai sensori PVDF.

3.7 Algoritmo di rilevamento dello scivolamento

La capacità di rilevare tempestivamente l'insorgenza di fenomeni di scivolamento rappresenta uno degli aspetti fondamentali per il controllo di mani robotiche e protesiche. In assenza di un adeguato

sistema di rilevamento, una variazione imprevista delle condizioni di contatto tra dita e oggetto può determinare la perdita della presa e il conseguente fallimento del compito di manipolazione.

Per affrontare tale problematica, nel presente lavoro è stato adottato l'algoritmo di touch-and-scivolamento detection proposto da Gentile et al. nel 2020, sviluppato originariamente per il controllo di mani protesiche equipaggiate con sensori tattili monoassiali a basso costo [11].

A differenza di numerosi approcci presenti in letteratura, basati sull'impiego di sensori multiassiali, trasformate nel dominio delle frequenze, tecniche wavelet oppure algoritmi di machine learning, la metodologia proposta da Gentile et al. utilizza esclusivamente l'informazione relativa alla componente normale della forza di contatto. Tale scelta consente di ridurre significativamente il costo computazionale e di rendere l'algoritmo compatibile con sistemi embedded caratterizzati da risorse limitate. Inoltre l'algoritmo era stato progettato per essere utilizzato su sensori semplici a basso costo con la sola informazione di forza normale.

Il principio fisico alla base dell'algoritmo deriva dal modello stick-slip, largamente utilizzato per descrivere l'interazione tra due superfici a contatto. Secondo tale modello, durante il movimento relativo tra le superfici si alternano fasi di adesione (stick) e fasi di scorrimento (slip). Questa alternanza produce micro-vibrazioni che si riflettono direttamente sul segnale proveniente dal sensore tattile.

L'idea fondamentale consiste quindi nell'identificare tali vibrazioni osservando le variazioni temporali della componente normale della forza. Quando l'oggetto rimane fermo rispetto alla superficie di contatto, il segnale presenta un andamento relativamente stabile; al contrario, durante uno scivolamento si osservano rapide variazioni che possono essere utilizzate come indicatore dell'evento.

Un ulteriore contributo dell'algoritmo consiste nella distinzione tra il primo contatto tra il sensore e l'oggetto (touch detection) e il successivo fenomeno di scivolamento (scivolamento detection). Tale distinzione permette di evitare falsi rilevamenti dovuti alla semplice applicazione della forza di presa.

L'approccio proposto è stato originariamente validato mediante sensori Force Sensing Resistor (FSR) acquisiti a 2 kHz e ha mostrato elevate prestazioni in termini di accuratezza di classificazione e ridotti tempi di elaborazione, rendendolo particolarmente adatto ad applicazioni real-time.

Nel presente lavoro la struttura generale dell'algoritmo viene mantenuta invariata, mentre la soglia decisionale utilizzata per la classificazione degli eventi di scivolamento viene ricalibrata sul sensore

impiegato nel sistema sperimentale sviluppato.

3.8 Struttura dell'algoritmo

L'algoritmo di rilevamento dello scivolamento è costituito da una sequenza di elaborazioni eseguite sul dataset acquisito dal sensore tattile precedentemente. Lo schema generale può essere rappresentato mediante la seguente sequenza:

1. lettura dati rilevati del sensore tramite dataset
2. filtraggio
3. touch detection
4. calcolo derivata
5. classificazione mediante soglia α
6. output slip/no-slip

Filtraggio del segnale

Il segnale acquisito dal sensore è soggetto alla presenza di rumore elettronico e di piccole oscillazioni non correlate al fenomeno di scivolamento. Per ridurre tali componenti indesiderate, l'algoritmo calcola una media mobile su finestre di cinque campioni consecutivi.

La tensione media viene determinata mediante:

$$v_{mean} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 v_i \quad (6)$$

dove v_i rappresenta il valore acquisito dal sensore e v_{mean} il segnale filtrato utilizzato nelle successive elaborazioni.

Nel lavoro preso in esame il campionamento viene effettuato a 2 kHz e tale valore è stato utilizzato nei nostri test.

Identificazione del contatto

Prima di procedere alla ricerca dello scivolamento è necessario verificare l'effettiva presenza del contatto tra sensore e oggetto. Durante una fase preliminare di calibrazione viene acquisito il valore medio del sensore in condizioni di riposo: v_{rest} . Successivamente viene calcolata la differenza: $\Delta v = v_{rest} - v_{mean}$. Il contatto viene considerato presente quando: $\Delta v > \delta$ dove δ rappresenta la minima variazione rilevabile dal sensore.

Questa fase permette di distinguere il semplice contatto iniziale dagli eventi di scivolamento successivi.

Calcolo della derivata

Una volta rilevato il contatto, l'algoritmo valuta la rapidità di variazione del segnale. La derivata discreta viene calcolata utilizzando una differenza all'indietro:

$$v'_{mean} = \frac{v_{mean}(i) - v_{mean}(i - 1)}{\Delta_t} \quad (7)$$

dove Δ_t rappresenta il tempo di campionamento.

La derivata costituisce il parametro principale utilizzato per identificare gli eventi di scivolamento. Durante lo scorrimento dell'oggetto sulla superficie sensibile si generano infatti rapide oscillazioni che producono valori elevati della derivata.

Determinazione della soglia α mediante analisi ROC

La classificazione finale richiede la definizione di una soglia decisionale α . Nel lavoro preso a modello, tale soglia viene ottenuta attraverso un'analisi Receiver Operating Characteristic (ROC), metodologia ampiamente utilizzata per valutare le prestazioni di sistemi di classificazione binaria.

L'analisi ROC permette di confrontare:

- True Positive Rate (TPR)

- False Positive Rate (FPR)

al variare della soglia considerata. Per ciascun valore candidato di α vengono calcolati:

- True Positive (TP)
- False Positive (FP)
- True Negative (TN)
- False Negative (FN)

e successivamente:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (8)$$

La curva ROC viene ottenuta riportando il TPR in funzione del FPR.

Il valore ottimale di α corrisponde generalmente al punto più vicino all'angolo superiore sinistro del grafico, condizione che garantisce contemporaneamente elevata sensibilità ed elevata specificità.

Poiché il sistema sperimentale utilizza una diversa tecnologia sensoriale, è necessario eseguire una nuova procedura di calibrazione. A tale scopo, è stato fornito un dataset dal laboratorio contenente esclusivamente eventi di scivolamento. I valori reperiti in questo dataset vengono utilizzati per costruire la curva ROC e determinare il valore di soglia più appropriato per il sensore in oggetto.

Decisione finale

La classificazione dell'evento viene effettuata confrontando il valore della derivata con la soglia α :

INPUT	OUTPUT
$v'_{mean} \geq \alpha$	slip = 1
$v'_{mean} < \alpha$	slip = 0

Tabella 3: Tabella riassuntiva per il riconoscimento dello scivolamento

L'uscita dell'algoritmo consiste pertanto in una variabile binaria che indica la presenza o l'assenza di uno scivolamento.

In conclusione, per fornire una visione d'insieme del funzionamento dell'algoritmo, la Figura 17 riporta il flowchart completo che sintetizza le principali fasi di elaborazione descritte nel presente capitolo.

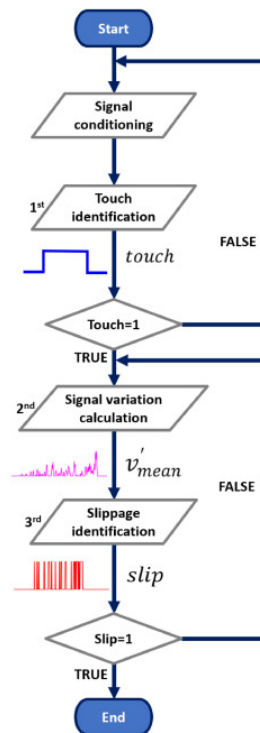


Figura 17: Flowchart dell'algoritmo usato nel lavoro preso come esempio [11]

Adattamento dell'algoritmo al sistema sperimentale sviluppato

L'algoritmo presentato nel lavoro originale è stato utilizzato come riferimento per adattarlo al sistema di rilevamento dello scivolamento adottato nel presente lavoro. Tuttavia, durante la fase di implementazione sono emerse alcune differenze significative tra i sensori utilizzati dagli autori (sensori piezorresistivi) e il sensore piezoelettrico impiegato nella presente attività sperimentale. Per tale motivo è stato necessario introdurre alcune modifiche alla procedura originale.

Nel lavoro di riferimento la rilevazione dello slittamento viene effettuata attraverso il calcolo della deriva-

ta del segnale filtrato. Nella nostra sperimentazione è stato deciso di utilizzare direttamente il segnale grezzo acquisito dal sensore, previa rimozione della componente continua (DC offset). Questo perché il sensore piezoelettrico ha già intrinsecamente nel suo segnale l'informazione della derivata. Pertanto non è necessario fare la derivata della forza perché essa è già contenuta nel segnale direttamente in uscita dal PVDF.

Di conseguenza, la classificazione non viene effettuata sulla derivata del segnale ma direttamente sull'ampiezza dei picchi presenti nel segnale stesso. La fase di filtraggio mediante media mobile è stata mantenuta esclusivamente per la rilevazione del contatto iniziale, mentre non viene utilizzata nella fase di rilevamento dello scivolamento.

Determinazione sperimentale della soglia α

Per la costruzione della curva ROC sono stati utilizzati segnali acquisiti durante prove contenenti esclusivamente eventi di scivolamento. Dopo la rimozione del DC offset, i picchi associati agli eventi di slip sono stati identificati e utilizzati per generare le label della classificazione binaria. In particolare, i campioni appartenenti ai picchi di slittamento sono stati etichettati come classe positiva (slip = 1), mentre le porzioni di segnale riconducibili al rumore di fondo sono state etichettate come classe negativa (slip = 0).

Una prima soglia preliminare è stata utilizzata esclusivamente per la generazione delle label. Successivamente, variando sistematicamente il valore della soglia decisionale, sono stati calcolati i corrispondenti valori di True Positive Rate e False Positive Rate necessari per la costruzione della curva ROC. Il valore finale di α è stato quindi determinato a partire dalla curva stessa, selezionando il punto caratterizzato dal miglior compromesso tra sensibilità e specificità, analogamente a quanto descritto nel lavoro originale.

Inizialmente si è ottenuto un valore preliminare di α pari a circa $\alpha = 0.009245$ attraverso una semplice analisi statistica del dataset di scivolamento, dopo aver rimosso il DC offset dal segnale e aver considerato esclusivamente le componenti positive. Tuttavia, questo valore non rappresentava ancora la soglia definitiva dell'algoritmo, ma solamente un punto di partenza per la generazione delle label

necessarie alla costruzione della curva ROC.

Il dataset utilizzato era composto esclusivamente da eventi di scivolamento. Sono stati identificati come eventi positivi i campioni corrispondenti ai picchi di scivolamento, mentre le regioni di baseline sono state considerate eventi negativi. A partire da queste label è stata quindi costruita la curva ROC, variando progressivamente la soglia di decisione e calcolando per ciascun valore la sensibilità e la specificità del classificatore.

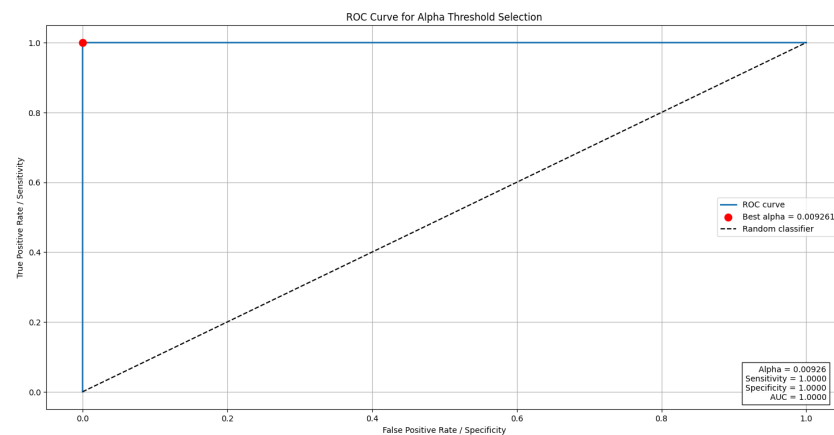


Figura 18: Grafico della curva ROC. Il valore α viene usato per distinguere la differenza tra evento di slip e non slip.

La soglia ottimale è stata individuata tramite il massimo indice di Youden, ottenendo un valore finale di: $\alpha = 0.00926089$. I risultati ottenuti sono:

- Sensitivity = 1.0000
- Specificity = 1.0000
- False Positive Rate = 0.0000
- AUC = 1.0000

Ad un primo esame questi risultati possono sembrare eccessivamente favorevoli. Tuttavia, il motivo è legato alla natura del dataset utilizzato per la stima della soglia. I picchi del dataset utilizzato erano riferiti solamente ad eventi di scivolamento. Dopo la rimozione dell'offset, i picchi associati agli eventi di scivolamento risultano nettamente separati dal rumore di fondo. Di conseguenza esiste una soglia in grado di discriminare completamente le due classi senza generare né falsi positivi né falsi negativi.

Anche nel lavoro preso a modello [11] si osserva che la curva ROC presenta prestazioni praticamente perfette. Pertanto, il comportamento osservato nella presente tesi risulta coerente con quanto riportato in letteratura, pur utilizzando una diversa tecnologia sensoriale.

La reale capacità di generalizzazione dell'algoritmo dovrà essere verificata successivamente mediante validazione online e test su dati indipendenti, dove le condizioni sperimentali risultano meno controllate rispetto al dataset utilizzato per la costruzione della curva ROC.

L'analisi ROC ha consentito di individuare un valore di soglia adeguato per la discriminazione degli eventi di scivolamento all'interno del dataset sperimentale fornito dal laboratorio.

4 Risultati

Il presente capitolo descrive la validazione sperimentale dell'algoritmo sviluppato per il rilevamento dello scivolamento mediante sensori tattili piezoelettrici in PVDF. L'obiettivo dell'analisi è verificare la capacità dell'algoritmo di identificare correttamente l'evento di scivolamento e di valutarne le prestazioni nelle diverse condizioni sperimentali investigate. Prima di procedere alla validazione dell'algoritmo, sono state effettuate alcune analisi preliminari mediante Short-Time Fourier Transform (STFT) e cross-correlation, finalizzate a caratterizzare il comportamento dinamico dei segnali acquisiti e a valutare la correlazione temporale tra la risposta dei sensori tattili e quella della cella di carico. Tali analisi hanno inoltre fornito indicazioni utili per la definizione e la successiva interpretazione dei risultati sperimentali. La STFT permette di monitorare l'evoluzione temporale del contenuto spettrale del segnale e di individuare eventuali variazioni nelle componenti in frequenza associate all'insorgenza dello slittamento. La STFT è uno strumento di analisi dei segnali che consente di studiare come lo spettro in frequenza di un segnale varia nel tempo. A differenza della trasformata di Fourier classica, che fornisce solo una descrizione globale delle frequenze presenti, la STFT suddivide il segnale in brevi intervalli temporali (finestre) e applica la trasformata di Fourier a ciascun segmento. In questo modo si ottiene una rappresentazione tempo-frequenza che evidenzia sia quali componenti in frequenza sono presenti, sia quando esse si manifestano nel tempo, risultando particolarmente utile per l'analisi di segnali non stazionari come quelli associati a fenomeni dinamici e transitori. L'analisi STFT non è stata utilizzata per identificare una specifica frequenza caratteristica dello slittamento, bensì per verificare se gli eventi meccanici osservati durante l'esperimento producessero variazioni apprezzabili nel contenuto frequenziale dei segnali PVDF. Di seguito è riportato un esempio significativo dove viene riportata l'analisi STFT.

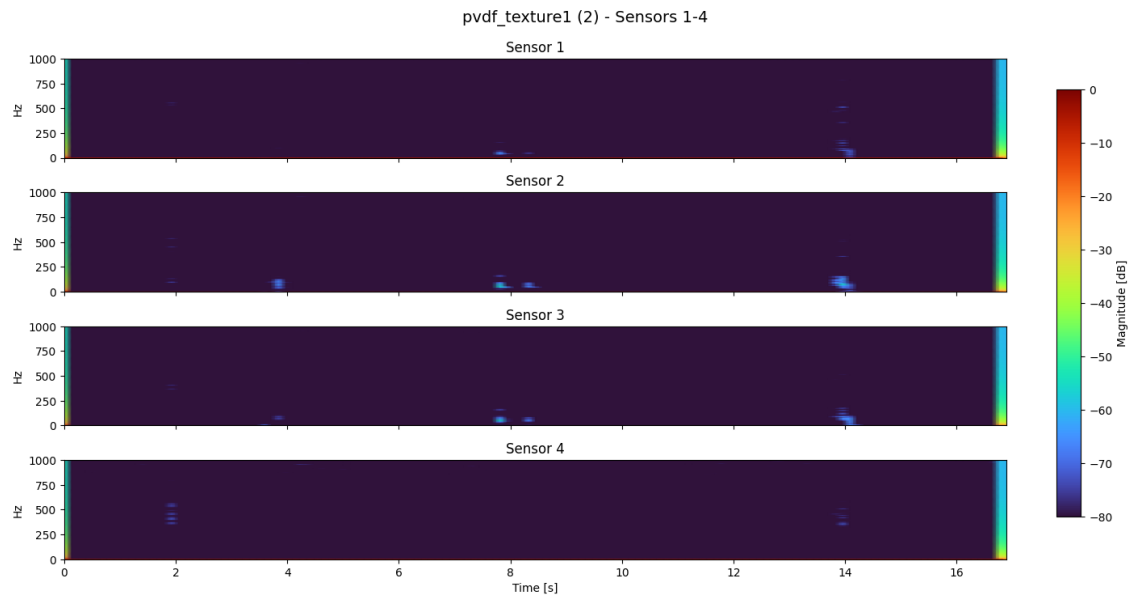


Figura 19: Analisi STFT dei sensori da 1 a 4 con riferimento a figura 14.

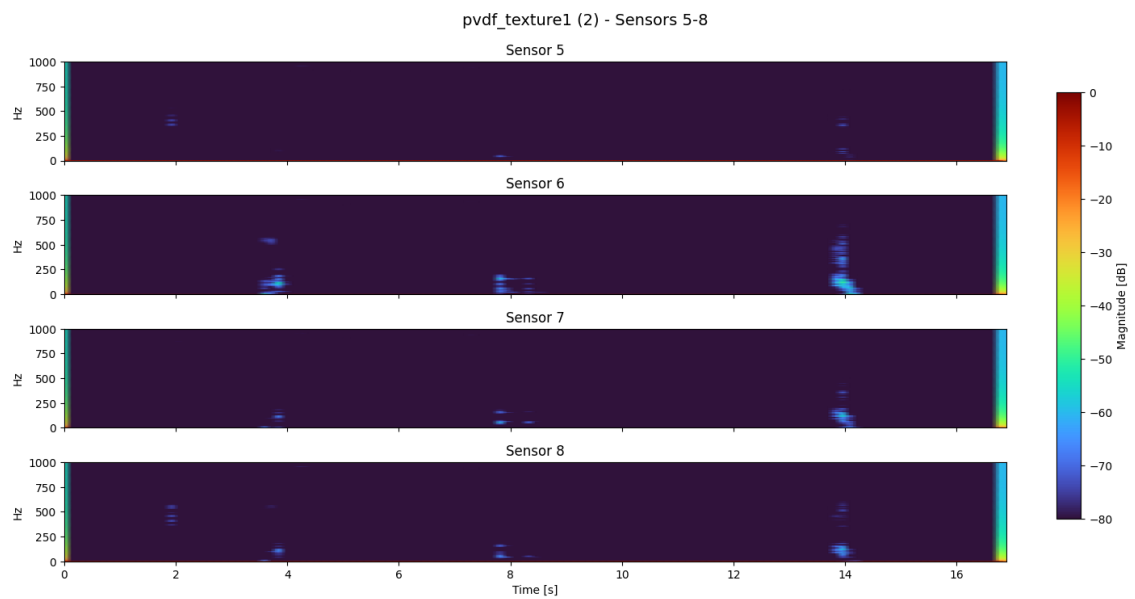


Figura 20: Analisi STFT dei sensori da 5 a 8 con riferimento a figura 14.

Dall'osservazione degli spettrogrammi si nota che, in corrispondenza degli istanti in cui avvengono eventi significativi dell'esperimento (contatto iniziale, scivolamento e rilascio), compaiono simultaneamente variazioni energetiche in più sensori. Tali variazioni si manifestano come concentrazioni localizzate di energia distribuite su diverse frequenze a partire da $-60dB$ e risultano temporalmente allineate tra i vari canali. Sebbene non sia stata individuata una banda di frequenza univocamente

associabile allo slittamento, la STFT conferma che quando si verifica un evento meccanico rilevante il contenuto frequenziale dei segnali PVDF subisce una modifica evidente. Questo comportamento suggerisce che i sensori siano effettivamente sensibili alle variazioni delle condizioni di contatto e che l'informazione relativa allo slittamento sia contenuta nel segnale acquisito.

In una fase successiva viene calcolata la cumulative sum dei segnali PVDF, al fine di evidenziare eventuali variazioni cumulative della risposta nel tempo. La cumulative sum (o somma cumulativa) è una trasformazione che consiste nel sommare progressivamente i valori del segnale nel tempo, in modo che ogni campione rappresenti la somma di tutti i campioni precedenti. Questo permette di enfatizzare andamenti lenti e variazioni persistenti del segnale, rendendo più evidenti eventuali trend, drift o cambiamenti strutturali che potrebbero non essere immediatamente visibili nel segnale originale. Dopo un'opportuna normalizzazione, ciascun segnale viene confrontato con il corrispondente riferimento acquisito dalla load cell mediante una procedura di cross-correlation analysis. La cross-correlation è una tecnica che misura la similarità tra due segnali in funzione dello scorrimento temporale di uno rispetto all'altro. In pratica, consente di valutare quanto un segnale sia simile a un altro e di identificare l'eventuale ritardo (delay) con cui uno dei due segnali risponde rispetto all'altro. Questa analisi consente quindi di quantificare il grado di correlazione tra i segnali e di individuare eventuali ritardi temporali o relazioni significative tra la risposta del sensore e il fenomeno meccanico osservato, risultando particolarmente utile per verificare la coerenza dinamica tra misura PVDF e riferimento della load cell.

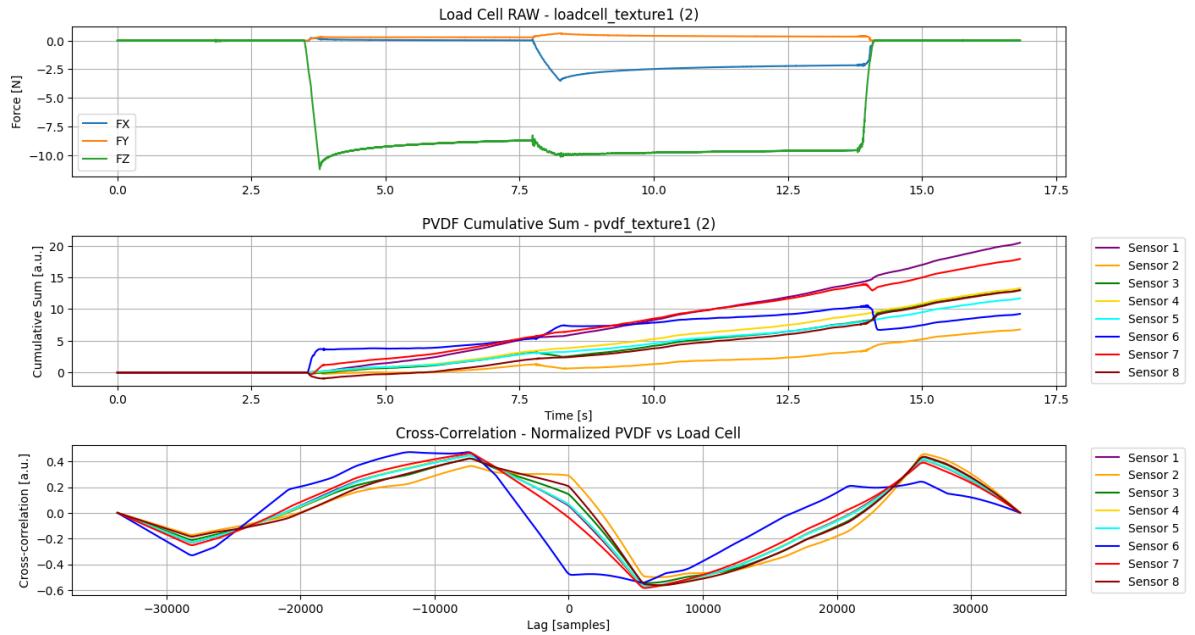


Figura 21: Prime considerazioni sui dati raccolti attraverso i sensori PVDF applicando cumulative sum e cross correlation con riferimento alla figura 14.

Nel grafico centrale si osserva che tutti i sensori mostrano un andamento molto simile, indice di una risposta coerente del sistema sensoriale durante l'esperimento.

Nel grafico inferiore si osserva che tutte le curve presentano una forma simile, con massimi e minimi localizzati in regioni temporali comparabili. Questo risultato suggerisce che i sensori piezoelettrici non rispondono in modo casuale, ma seguono l'evoluzione del fenomeno meccanico rilevato dalla load cell. L'analisi conferma quindi che i segnali PVDF contengono informazioni utili per la rilevazione dello slittamento e possono essere impiegati come base per lo sviluppo di algoritmi automatici di slip detection.

Per ciascun sensore è stata calcolata la funzione di cross-correlazione tra il segnale PVDF elaborato mediante cumulative sum e la componente normale della forza (F_z) acquisita dalla load cell. Dall'analisi dei risultati si osservano coefficienti di correlazione massimi in modulo compresi tra circa 0.50 e 0.58 per tutti gli otto sensori considerati. Tale comportamento evidenzia una risposta relativamente uniforme dell'intera matrice sensoriale e suggerisce la presenza di una correlazione tra l'evoluzione temporale dei segnali PVDF e la forza normale applicata.

I lag associati ai massimi della funzione di cross-correlazione risultano compresi tra circa 2.8 s e 3.5

Sensore	Max corr	Lag
1	0.572	5889 samples (2.9445 s)
2	0.498	6694 samples (3.3470 s)
3	0.543	5982 samples (2.9910 s)
4	0.572	5945 samples (2.9725 s)
5	0.566	5941 samples (2.9705 s)
6	0.534	5690 samples (2.8450 s)
7	0.580	5843 samples (2.9215 s)
8	0.560	6986 samples (3.4930 s)

Tabella 4: Risultati dell'analisi di cross-correlazione tra i segnali dei sensori PVDF e la forza normale (F_z). Per ciascun sensore sono riportati il massimo valore assoluto della correlazione e il relativo lag temporale.

s. È importante sottolineare che tali valori non rappresentano un ritardo fisico del sensore rispetto alla load cell, ma sono influenzati dalla differente natura dei segnali confrontati. In particolare, il segnale PVDF è stato preventivamente elaborato mediante operazione di cumulative sum, che introduce un comportamento integrativo e modifica significativamente la sua dinamica temporale rispetto al segnale di forza originale.

L'analisi conferma comunque l'esistenza di una relazione temporale tra le grandezze misurate dai due sistemi di acquisizione e fornisce un'indicazione qualitativa della coerenza tra le informazioni provenienti dalla pelle elettronica e quelle ottenute dalla load cell di riferimento.

La validazione è stata condotta utilizzando il dataset acquisito durante la campagna sperimentale descritta nel Capitolo 2. Per ciascuna prova, l'istante di scivolamento individuato dall'algoritmo è stato confrontato con il riferimento ottenuto dalla load cell.

Successivamente è stata analizzata la ripetibilità delle misure, mediante l'elaborazione statistica dei tempi di rilevamento, e le prestazioni ottenute considerando sia il contributo del singolo sensore sia l'utilizzo dell'intera matrice tattile al variare delle grandezze impostate nelle misure sperimentali.

4.1 Esempi di rilevamento dello scivolamento

Al fine di verificare qualitativamente il corretto funzionamento dell'algoritmo sviluppato, vengono illustrati alcuni esempi rappresentativi del rilevamento dello scivolamento ottenuti utilizzando i dati acquisiti durante la campagna sperimentale. In tutti i casi l'istante di slittamento individuato dall'algoritmo

viene confrontato con il comportamento dei segnali acquisiti dalla load cell e dai sensori tattili in PVDF, permettendo di valutare la coerenza temporale tra il riferimento meccanico e la risposta del sistema tattile.

In una prima fase è stato analizzato il comportamento dell'algoritmo utilizzando esclusivamente il segnale proveniente da un singolo sensore PVDF. Questa configurazione consente di valutare la capacità del singolo elemento sensibile di individuare l'evento di slittamento senza beneficiare delle informazioni spaziali fornite dagli altri sensori della matrice.

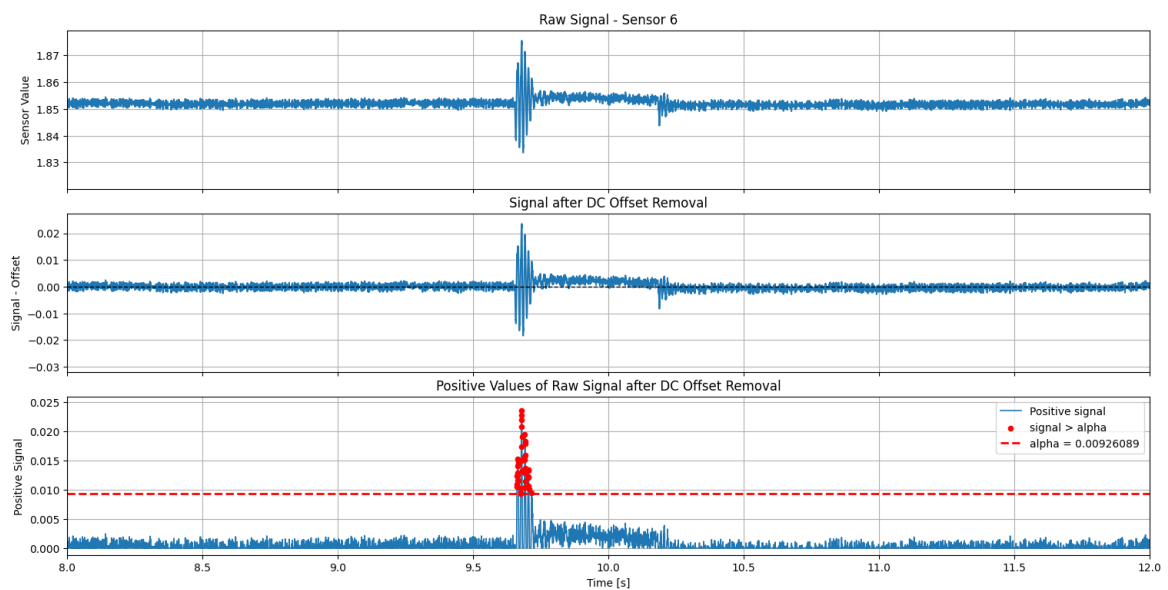


Figura 22: Grafico algoritmo applicato al singolo sensore (numero 6) alla singola prova durante lo scivolamento.

Come mostrato in Figura 22 i grafici rappresentano in ordine dall'alto verso il basso:

- Il segnale "raw" del singolo sensore come riportato sulla reale linea temporale.
- lo stesso segnale "raw" filtrato dell'offset (componente DC del segnale)
- gli eventi positivi del segnale, dopo il filtraggio offset, sui quali attraverso α viene deciso se l'evento rilevato è scivolamento o no

Le prove effettuate hanno la stessa struttura, quindi i sensori PVDF reagiscono ad ogni cambiamento non costante e di conseguenza anche gli eventi di tocco e rilascio superano la soglia α . Nella figura 22 lo scivolamento avviene nell'intorno del secondo 10.

Il segnale del sensore presenta una variazione significativa in corrispondenza dell'inizio dello scivolamento. L'algoritmo identifica tale variazione evidenziando con dei puntini rossi ciò che supera il valore α e determina l'istante di rilevamento.

Come da figura 22, ogni evento che supera la soglia è individuato come scivolamento, evidenziato con dei puntini rossi per ogni valore che supera la soglia.

È tuttavia possibile osservare come la risposta del singolo sensore dipenda dalla posizione del contatto e dalla propagazione locale delle sollecitazioni meccaniche all'interno della pelle tattile. Di conseguenza, il tempo di rilevamento può presentare leggere variazioni tra prove differenti o tra diverse condizioni sperimentali, pur mantenendo una buona corrispondenza con l'evento fisico di scivolamento.

Successivamente l'algoritmo è stato testato considerando simultaneamente tutti gli otto sensori PVDF presenti sulla superficie tattile. In questo caso il rilevamento dello scivolamento non dipende esclusivamente dalla risposta di un singolo elemento sensibile, ma sfrutta le informazioni distribuite sull'intera matrice, aumentando la robustezza dell'analisi.

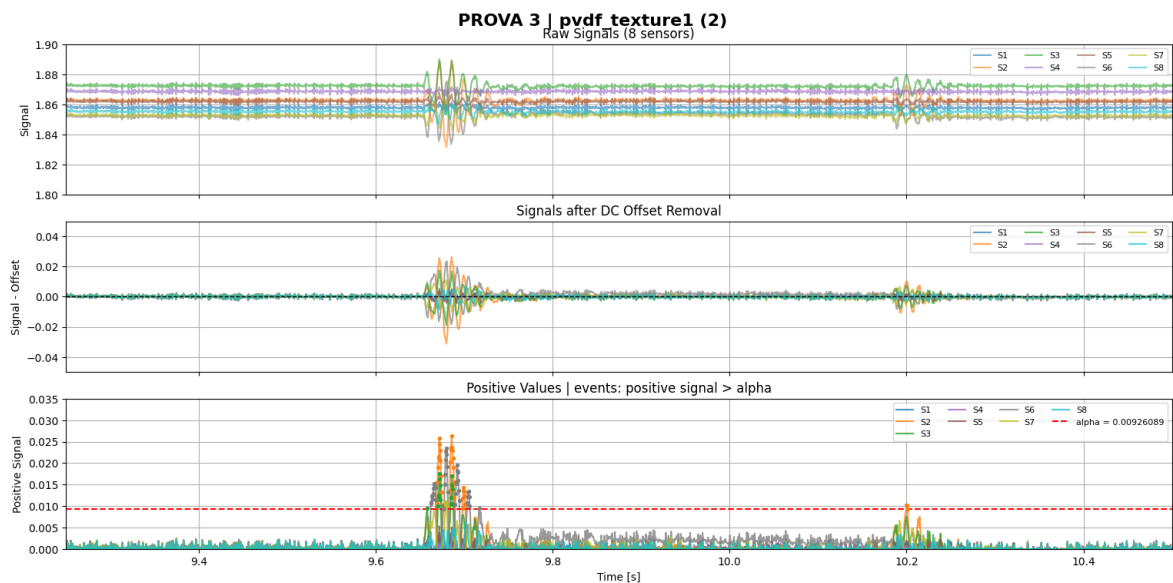


Figura 23: Grafico algoritmo applicato su tutti i sensori su una singola prova durante lo scivolamento.

La Figura 23 evidenzia come, durante lo scivolamento, i diversi sensori rispondano con intensità e tempi leggermente differenti, riflettendo la distribuzione delle deformazioni causate dal contatto.

L'utilizzo dell'intera matrice consente inoltre di compensare eventuali ritardi locali o risposte meno marcate di alcuni sensori, garantendo una rilevazione più stabile e meno sensibile alle variazioni della

posizione di contatto o delle condizioni operative.

Dopo aver verificato qualitativamente il corretto funzionamento dell'algoritmo, è stata eseguita una valutazione quantitativa delle sue prestazioni. A tale scopo è stato calcolato, per ciascuna prova sperimentale, il ritardo temporale tra l'istante di scivolamento individuato dalla load cell, assunto come riferimento, e quello rilevato dall'algoritmo (inteso come l'evento più vicino alla linea verticale nera tratteggiata).

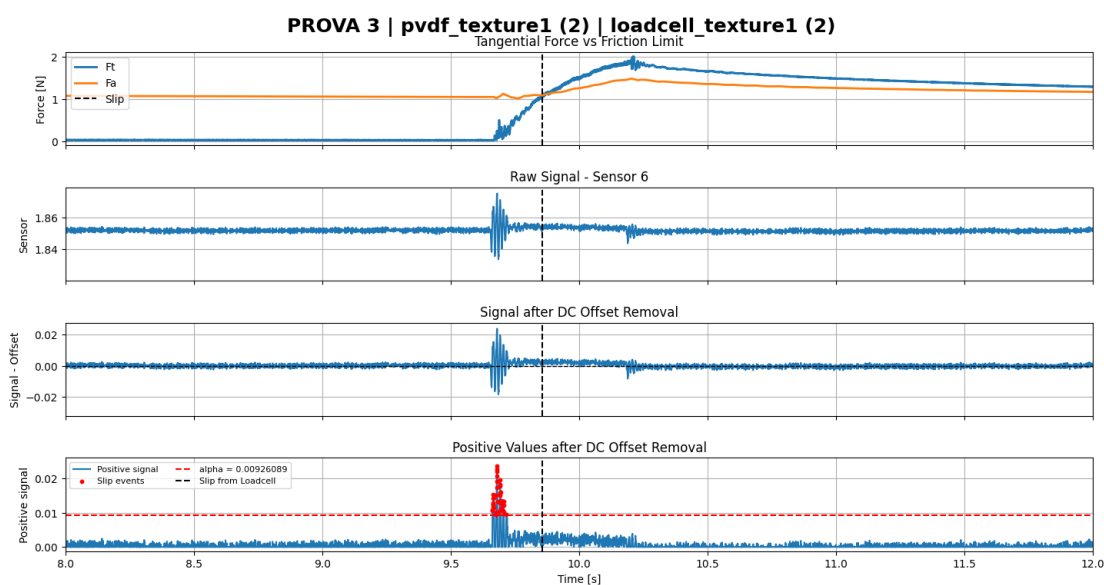


Figura 24: Grafico algoritmo riferito al singolo sensore numero 6 e confronto con grafici della loadcell durante lo scivolamento.

Come da figura 24 possiamo notare nella sequenza dall'alto verso il basso i seguenti grafici:

- Dati della loadcell con punto di riconoscimento dello scivolamento (vedi 3.6).
- Il segnale "raw" del singolo sensore riportato sulla linea temporale.
- Il segnale "raw" filtrato dell'offset (componente DC del segnale)
- Filtrato l'offset si considerano solamente gli eventi positivi del segnale e su quelli attraverso α viene deciso se l'evento rilevato è scivolamento o no

Come da figura 24 possiamo notare che l'algoritmo riconosce l'evento e lo classifica come scivolamento e viene stampato anche il ritardo dello scivolamento nel grafico. Il ritardo temporale dell'algoritmo è

stato definito come la differenza tra l'istante di rilevamento dello scivolamento individuato dai sensori PVDF e l'istante di riferimento ricavato dalla load cell. Quest'ultima è stata assunta come riferimento sperimentale poiché consente di identificare il verificarsi dello slittamento mediante l'analisi delle forze agenti durante il contatto. Il ritardo è quindi espresso come:

$$\Delta t = t_{PVDF} - t_{LoadCell} \quad (9)$$

Valori negativi indicano un rilevamento anticipato da parte dei sensori PVDF rispetto al riferimento della load cell, mentre valori positivi corrispondono a un rilevamento successivo:

- $\Delta < 0$ PVDF reagisce prima rispetto al riferimento della loadcell
- $\Delta = 0$ PVDF reagisce nello stesso istante di tempo rispetto al riferimento della loadcell
- $\Delta > 0$ PVDF reagisce dopo rispetto al riferimento della loadcell

Infine questa analisi è stata ripetuta anche per i restanti sensori PVDF.

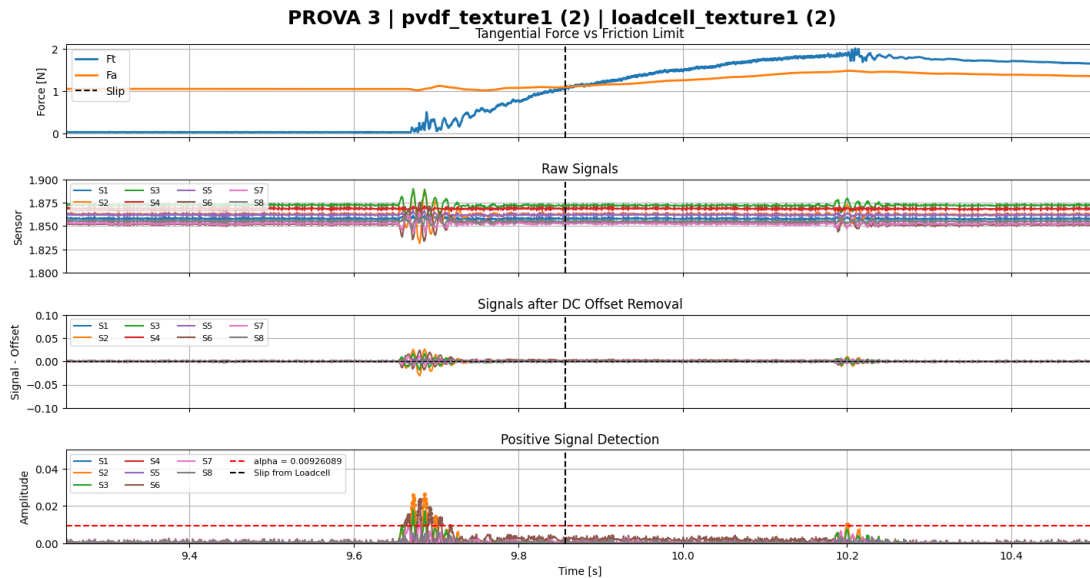


Figura 25: Grafico algoritmo applicato a tutti i sensori con riferimento forza della loadcell durante lo scivolamento.

La Figura 25 mostra le prestazioni ottenute considerando simultaneamente tutti i sensori della matrice tattile. Rispetto al caso precedente, l'utilizzo delle informazioni provenienti dall'intera superficie

sensibile consente di rendere il rilevamento meno dipendente dalla risposta del singolo elemento e maggiormente rappresentativo del comportamento complessivo del sistema.

Nel complesso, sia l'analisi qualitativa sia quella quantitativa confermano la capacità dell'algoritmo di individuare correttamente l'evento di slittamento nelle diverse condizioni sperimentali investigate, fornendo una base affidabile per le successive analisi statistiche sul comportamento dei sensori tattili.

4.2 Analisi sperimentale delle condizioni di prova

Al fine di valutare le prestazioni dell'algoritmo in diverse condizioni operative, è stata condotta un'analisi sull'intero dataset acquisito durante la campagna di misura. Per ciascuna delle condizioni investigate sono state effettuate 10 prove ripetute, consentendo di valutare sia l'accuratezza del rilevamento dello scivolamento sia la ripetibilità delle misure ottenute.

Per analizzare la propagazione dello scivolamento sulla superficie tattile è stato definito un parametro temporale rappresentativo, calcolato come l'intervallo di tempo, durante l'evento, tra l'attivazione del primo sensore PVDF che supera la soglia prefissata e quella dell'ultimo sensore. Tale grandezza consente di descrivere la velocità con cui il fenomeno si propaga sull'intera matrice sensoriale come evidenziato dalla figura 26. Il coefficiente d'attrito sovrastima l'istante di scivolamento rilevato dalla cella di carico, probabilmente avviene quando termina la grande variazione della forza tangenziale, ovvero quando la derivata diventa quasi costante. Per spiegare più nel dettaglio questo fenomeno serviranno future analisi mirate.

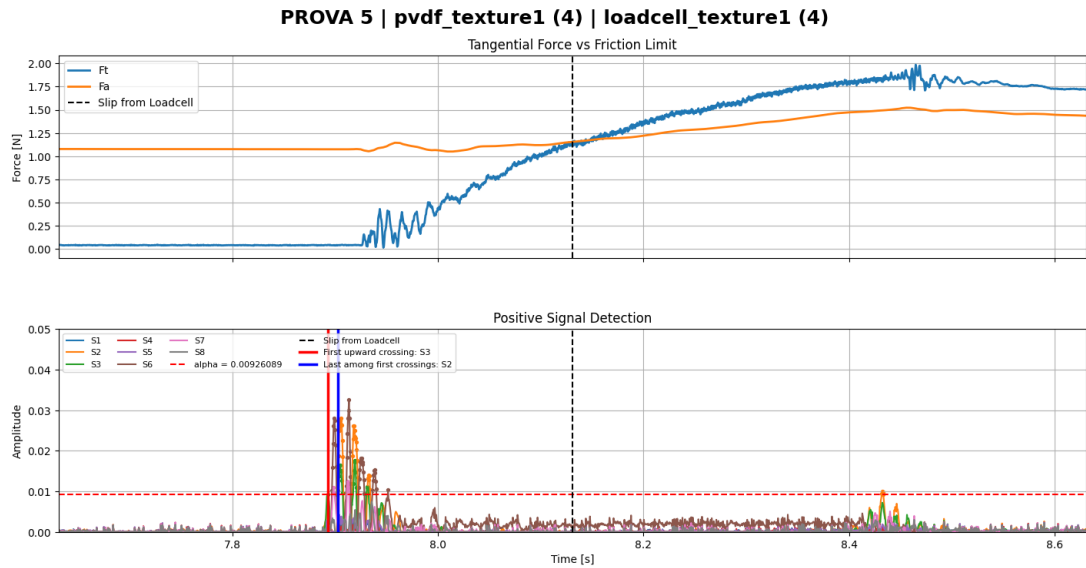


Figura 26: Grafico della procedura di estrazione del tempo di propagazione dello slittamento compreso tra le due linee colorate.

La Figura 26 mostra un esempio del procedimento adottato per l'estrazione di questo parametro. Nel grafico superiore è riportato il confronto tra la forza tangenziale F_t e il limite di attrito F_a , utilizzato per individuare l'istante di inizio dello scivolamento, evidenziato dalla linea verticale tratteggiata. Nel grafico inferiore sono rappresentati i segnali elaborati degli otto sensori PVDF, insieme alla soglia di rilevamento α . Le linee verticali colorate identificano rispettivamente il primo sensore che supera la soglia (in rosso) e l'ultimo sensore (in blu) durante l'evento. La differenza temporale tra questi due istanti costituisce il valore successivamente utilizzato nell'analisi quantitativa delle prove.

Ripetendo la procedura descritta per tutte le acquisizioni, è stato possibile ottenere il tempo di propagazione dello slittamento per ciascuna delle dieci ripetizioni previste nelle ventisette condizioni sperimentali. I valori ottenuti sono riportati nella Figura 27, dove ogni gruppo di colonne rappresenta una specifica combinazione di forza applicata, distanza di scivolamento e velocità.

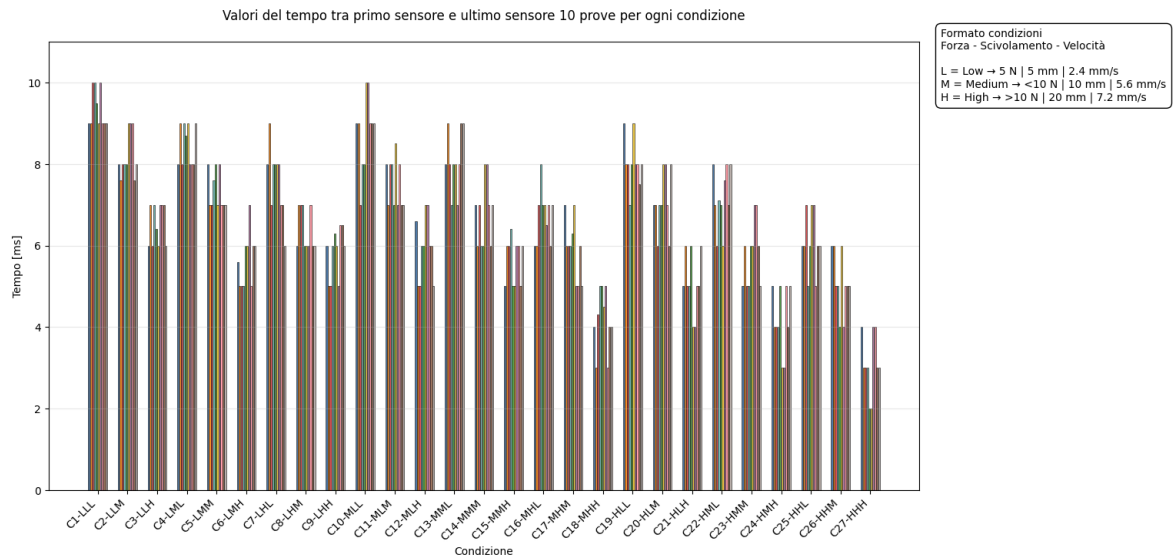


Figura 27: Grafico tempo di propagazione dell'attivazione dei sensori PVDF nelle 27 condizioni sperimentali con riferimento alla tabella 2.

Dall'osservazione della Figura 27 emerge innanzitutto una buona ripetibilità delle misure, le dieci prove appartenenti alla stessa condizione presentano valori molto simili tra loro e una variabilità contenuta. Questo conferma la buona riproducibilità della procedura sperimentale e dell'algoritmo di elaborazione, evidenziando come il parametro temporale estratto risulti stabile tra acquisizioni successive effettuate nelle medesime condizioni operative. L'analisi complessiva del grafico evidenzia come il tempo di propagazione dello scivolamento tra il primo e l'ultimo sensore non sia costante, ma vari in funzione delle condizioni sperimentali considerate, assumendo valori compresi indicativamente tra $3ms$ e $10ms$.

Questa differenza indica, che la propagazione dello scivolamento all'interno della matrice sensoriale, è influenzata dai parametri sperimentali adottati e che il fenomeno non può essere descritto mediante un tempo caratteristico univoco.

Poiché ciascuna condizione sperimentale rappresenta una diversa combinazione di forza, distanza di scorrimento e velocità, dall'osservazione della figura 27 non è possibile attribuire le variazioni osservate al contributo di uno specifico parametro. Per questo motivo, nei paragrafi successivi i risultati vengono analizzati mantenendo costanti due parametri e variando esclusivamente il terzo, così da valutarne separatamente l'influenza sul tempo di propagazione dello scivolamento.

Tali esempi consentono di evidenziare i principali trend osservati, mentre le stesse considerazioni risultano valide anche per le restanti combinazioni analizzate.

4.2.1 Analisi del tempo al variare della velocità

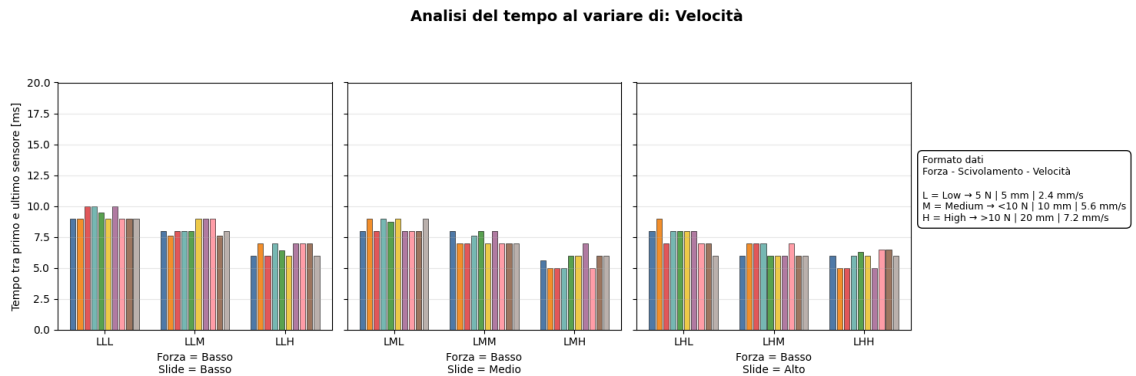


Figura 28: Grafico tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore PVDF al variare della velocità. In ogni sottogruppo rimangono costanti i restanti parametri: forza e scivolamento

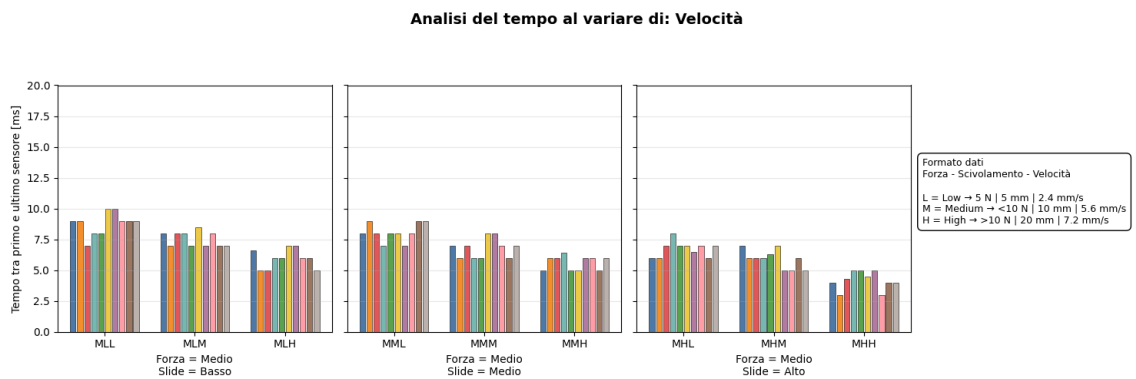


Figura 29: Grafico tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore PVDF al variare della velocità. In ogni sottogruppo rimangono costanti i restanti parametri: forza e scivolamento

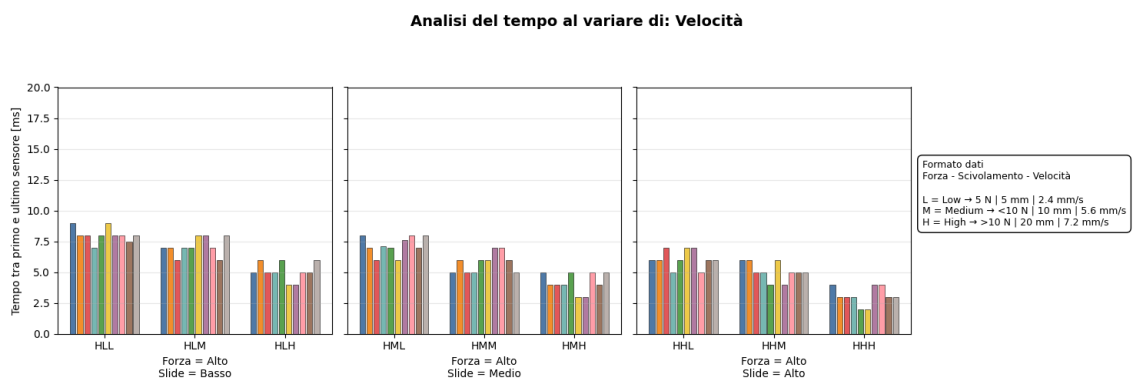


Figura 30: Grafico tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore PVDF al variare della velocità. In ogni sottogruppo rimangono costanti i restanti parametri: forza e scivolamento

Le figure 28, 29, 30 mostrano l'andamento del tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore mantenendo costante la forza e la distanza di scivolamento e variando esclusivamente la velocità. Nei tre subplot sono riportate le diverse combinazioni di forza e scivolamento, mentre le tre colonne rappresentano rispettivamente velocità bassa, media e alta.

All'aumentare della velocità il tempo di propagazione tende a diminuire. Tale comportamento è osservabile nella maggior parte delle configurazioni sperimentali, indipendentemente dalla forza e dalla distanza di scivolamento considerate. La riduzione del tempo è coerente perchè uno scivolamento più rapido produce un'attivazione più ravvicinata dei sensori lungo la superficie tattile.

4.2.2 Analisi del tempo al variare della distanza di scivolamento

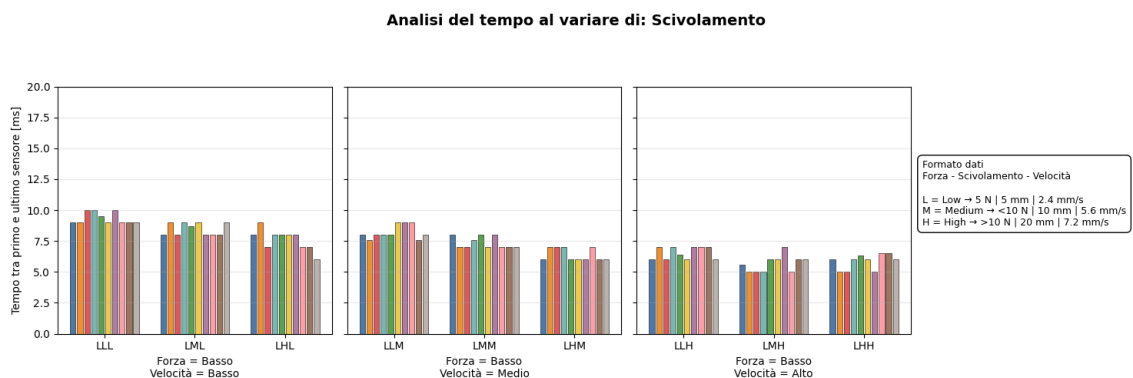


Figura 31: Grafico tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore PVDF al variare della distanza di scivolamento. In ogni sottogruppo rimangono costanti i restanti parametri: forza e velocità

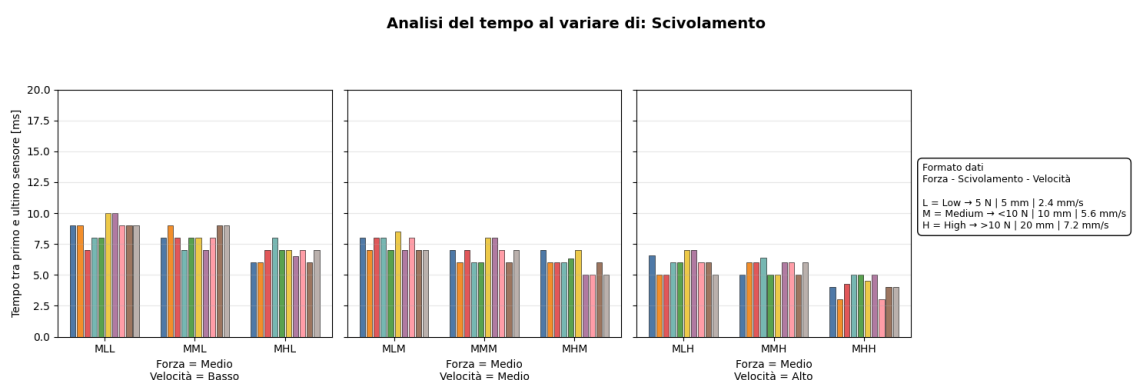


Figura 32: Grafico tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore PVDF al variare della distanza di scivolamento. In ogni sottogruppo rimangono costanti i restanti parametri: forza e velocità

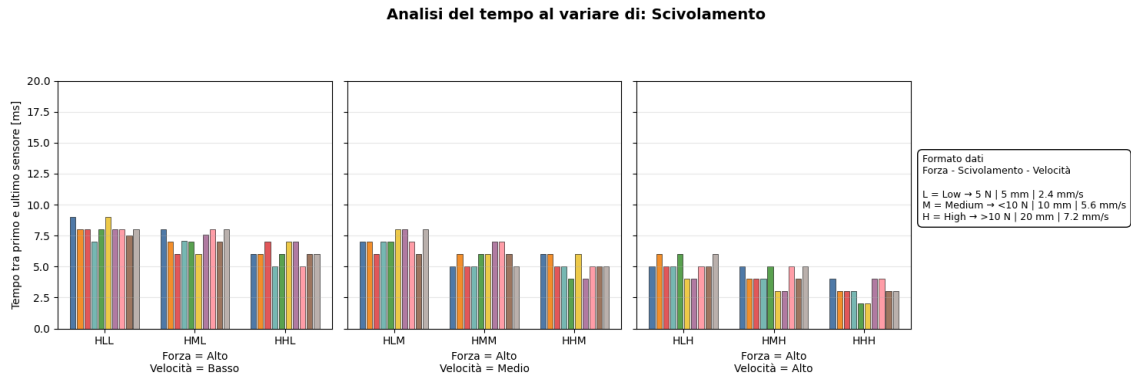


Figura 33: Grafico tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore PVDF al variare della distanza di scivolamento. In ogni sottogruppo rimangono costanti i restanti parametri: forza e velocità

Le figure 31, 32, 33 riportano il tempo di propagazione mantenendo costante la forza e la velocità e variando esclusivamente la distanza di scivolamento. I tre subplot rappresentano i diversi livelli di velocità, mentre le colonne corrispondono alle tre distanze considerate.

Dall'analisi del grafico si osserva che, all'aumentare della distanza di scivolamento, il tempo misurato tende generalmente a diminuire. Tale comportamento non deve tuttavia essere interpretato come un ritardo nell'insorgenza dello scivolamento, ma dovrebbe verificarsi in un istante pressoché costante a parità delle altre condizioni sperimentali.

Il decremento osservato indica che, una volta iniziato lo scivolamento, il contatto tra il sensore e l'oggetto continua a generare attivazioni sulla matrice tattile durante il successivo movimento relativo. Di conseguenza, il parametro temporale estratto dall'algoritmo risulta influenzato non solo dall'istante di inizio dello scivolamento, ma anche dall'evoluzione del contatto nelle fasi successive di strisciamento. Il parametro utilizzato dall'algoritmo risente della persistenza del contatto durante il moto relativo tra le superfici, rendendo meno netta la distinzione tra l'istante iniziale di scivolamento e le successive fasi di strisciamento, e questo rappresenta un limite del sistema. L'algoritmo risulta pertanto efficace nel rilevare la presenza dello scivolamento, ma presenta una limitata capacità di discriminare il momento esatto di insorgenza dello scivolamento rispetto alla successiva fase di contatto dinamico. Tale aspetto rappresenta un interessante spunto per futuri sviluppi, per introdurre nuovi criteri di elaborazione in grado di distinguere con maggiore accuratezza l'evento iniziale di scivolamento dalla successiva fase di strisciamento.

4.2.3 Analisi del tempo al variare della forza

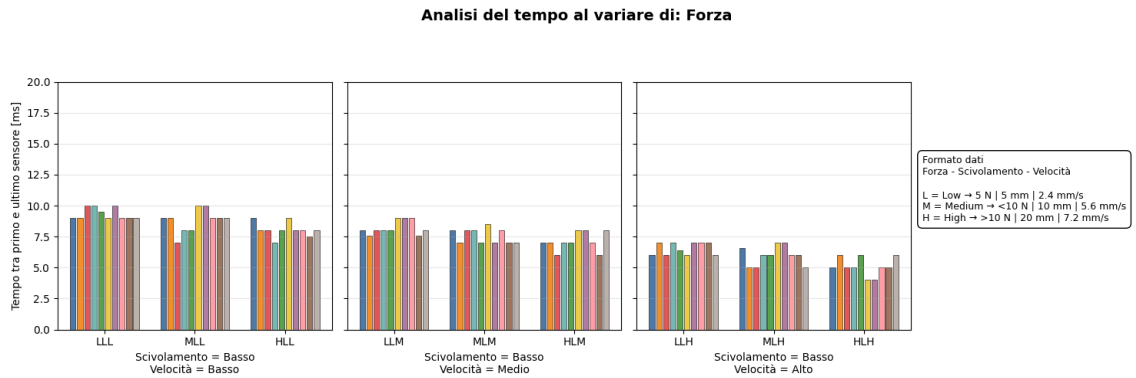


Figura 34: Grafico tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore PVDF al variare della forza. In ogni sottogruppo rimangono costanti i restanti parametri: velocità e scivolamento

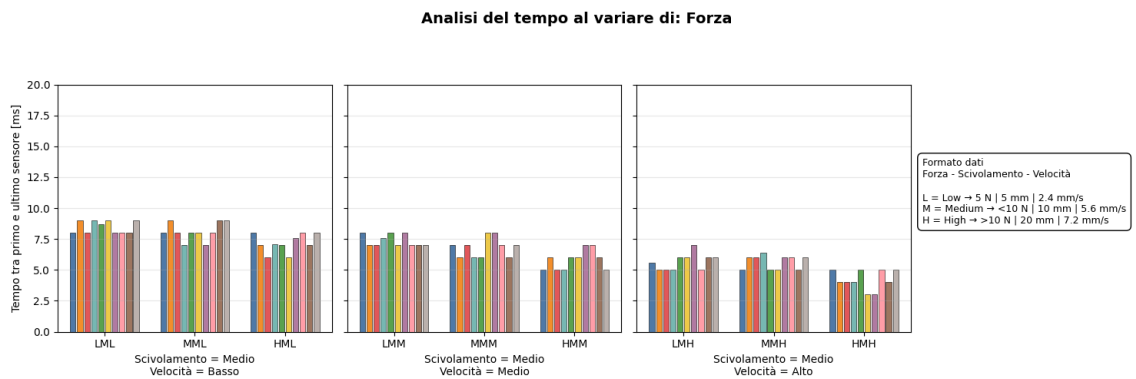


Figura 35: Grafico tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore PVDF al variare della forza. In ogni sottogruppo rimangono costanti i restanti parametri: velocità e scivolamento

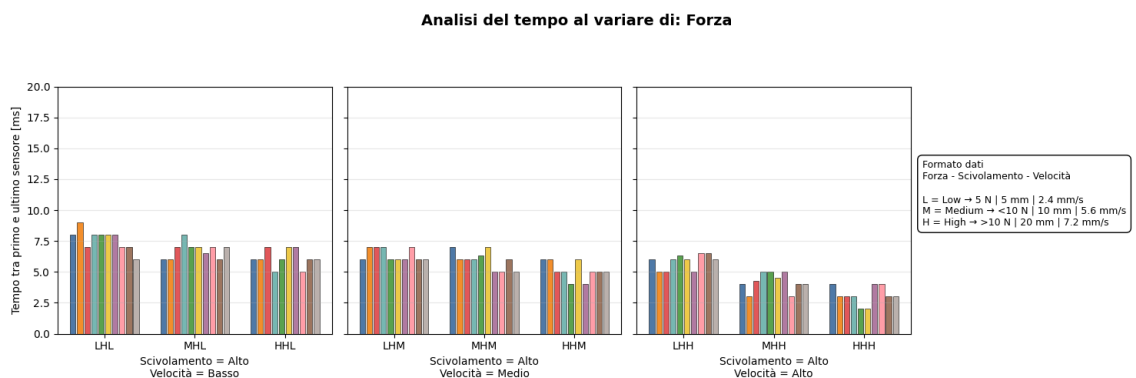


Figura 36: Grafico tempo intercorso tra l'attivazione del primo e dell'ultimo sensore PVDF al variare della forza. In ogni sottogruppo rimangono costanti i restanti parametri: velocità e scivolamento

Le Figure 34, 35 e 36 mostrano infine il confronto ottenuto mantenendo costanti la distanza di scivolamento e la velocità, facendo variare esclusivamente la forza applicata. I tre subplot rappresentano le diverse combinazioni di distanza di scorrimento e velocità, mentre le colonne corrispondono ai tre livelli di forza.

A differenza dei casi precedenti, la forza non presenta un'influenza particolarmente marcata sul tempo di propagazione. I valori ottenuti nelle tre condizioni risultano generalmente molto vicini e, nella maggior parte dei casi, le differenze osservate sono confrontabili con la normale variabilità sperimentale. Non emerge quindi un trend crescente o decrescente chiaramente definito, suggerendo che, nelle condizioni analizzate, la forza eserciti un effetto limitato rispetto a quello osservato per la velocità e la distanza di scivolamento.

Dal punto di vista teorico, un incremento della forza normale comporterebbe un ritardo nell'insorgenza dello slittamento, poiché la forza tangenziale deve superare una soglia di attrito più elevata prima che abbia inizio il moto relativo tra le superfici. L'assenza di un andamento chiaramente definito può essere attribuita alle caratteristiche dei sensori piezoelettrici in PVDF utilizzati. I sensori sono sensibili principalmente alle variazioni dinamiche della forza e non alla sua componente statica, quindi la loro risposta dipende dall'entità della variazione del carico applicato. È plausibile che, a forze normali più elevate, il sensore produca un segnale di ampiezza maggiore e risulti più reattivo agli eventi dinamici associati allo scivolamento, mentre a forze inferiori la risposta risulti meno intensa e il rilevamento dell'evento possa avvenire con un leggero ritardo. Questo comportamento può contribuire a compensare il ritardo nello scivolamento atteso dal punto di vista meccanico, rendendo meno evidente l'influenza della forza sul tempo di propagazione misurato.

4.3 Analisi dell'attività della matrice sensoriale

Oltre alla valutazione delle prestazioni dell'algoritmo di rilevamento dello scivolamento, è stata fatta un'analisi della distribuzione spaziale dell'attività dei sensori della matrice tattile. Lo scopo di questa analisi è individuare quali elementi risultino maggiormente coinvolti nel fenomeno di scivolamento e valutare come l'informazione si trasmetta attraverso la superficie sensibile.

Per ogni prova sperimentale sono stati analizzati i segnali provenienti dagli otto sensori PVDF, identificando il sensore con la maggiore attività durante lo scivolamento.

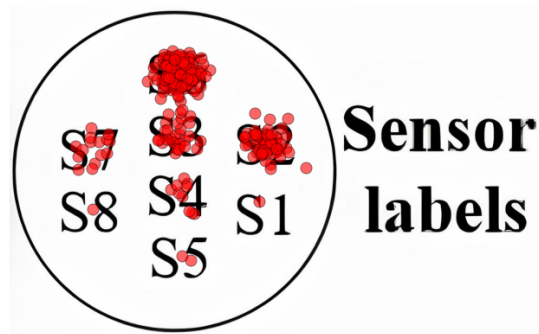


Figura 37: Grafico heatmap (mappa di calore) della matrice del PVDF (vedasi figura 16) del sensore più attivo durante lo scivolamento su tutto il dataset.

La figura 37 mostra la distribuzione complessiva dell'attività dei sensori ottenuta considerando l'intero dataset sperimentale. La heatmap (mappa di calore) indica la frequenza con cui ciascun sensore è risultato il più attivo durante lo slittamento. Per ogni prova eseguita viene estrapolato il valore del sensore con intensità più alta al momento dell'evento di scivolamento per riportarlo nella mappa.

L'attività, come da figura 37, non risulta uniformemente distribuita sulla matrice tattile. Alcuni sensori mostrano infatti un'attività significativamente maggiore rispetto ad altri (i sensori S6 S2 S3), indicando che determinate aree della superficie sensibile risultano maggiormente coinvolte durante il contatto e lo scorrimento dell'oggetto.

Tale comportamento è attribuibile sia alla distribuzione delle deformazioni meccaniche all'interno della pelle tattile sia alle caratteristiche del sistema sperimentale, che possono determinare diverse sollecitazioni dei singoli elementi sensibili in funzione delle condizioni operative.

Nel complesso, la heatmap conferma che la matrice sensoriale presenta un comportamento coerente e ripetibile, evidenziando la presenza di regioni maggiormente coinvolte a causa della posizione del dito sul supporto del robot.

Per approfondire ulteriormente le informazioni ottenute dalla heat map, è stata realizzata una rap-

presentazione che consente di distinguere il contributo dei sensori nelle diverse fasi dell'evento di scivolamento. In particolare, sono stati evidenziati separatamente i sensori che si attivano per primi, quelli rilevati come ultimi e l'insieme di tutti i sensori coinvolti durante le dieci ripetizioni della medesima condizione.

Condizione 7 - C7-LHL (Forza bassa - Scivolamento alto - Velocità bassa)

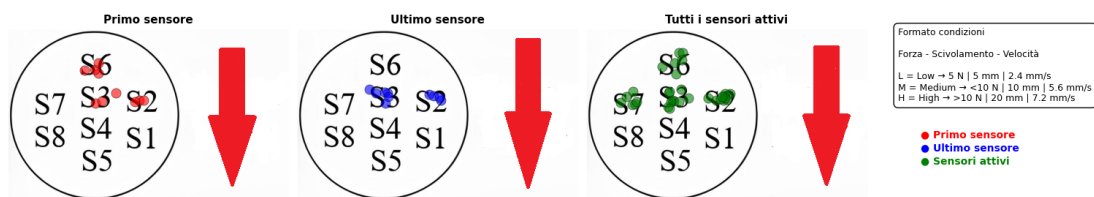


Figura 38: Distribuzione dei sensori PVDF coinvolti nello slittamento per la condizione 7 (forza bassa scivolamento alta velocità bassa). Le frecce rosse indicano la direzione del moto

La Figura 38 mostra un esempio relativo alla condizione sperimentale n.7 (LHL). Nel primo riquadro sono evidenziati in rosso i sensori che, nelle diverse prove, sono i primi a superare la soglia di rilevamento. Nel secondo riquadro, in blu, sono riportati i sensori che si attivano per ultimi, mentre nel terzo riquadro, in verde, è rappresentato l'insieme di tutti i sensori coinvolti nell'evento di scivolamento.

L'analisi conferma quanto già osservato nella heat map complessiva: l'attivazione dei sensori non è distribuita uniformemente sull'intera matrice tattile, ma tende a concentrarsi nelle stesse aree prima osservate. Sebbene possano variare il primo e l'ultimo sensore attivato in funzione della specifica prova, i sensori maggiormente coinvolti durante lo scivolamento rimangono pressoché gli stessi. Questo comportamento si ripete anche nelle altre condizioni sperimentali analizzate, evidenziando la presenza di una regione della pelle tattile sistematicamente interessata dall'evento di scivolamento.

La configurazione sperimentale potrebbe influenzare la propagazione osservata: il dito non esercita una pressione uniforme su tutta la matrice ed il sensore S6 è posizionato sulla punta del dito del supporto del robot, quindi è il primo punto di contatto durante lo scivolamento.

5 Conclusioni e possibili futuri sviluppi

5.1 Conclusioni

Il presente lavoro ha consentito di validare sperimentalmente un algoritmo per il rilevamento dello scivolamento mediante una matrice di sensori tattili piezoelettrici in PVDF, utilizzando un setup sperimentale dedicato e una campagna di acquisizione dati.

I risultati sperimentali presentati nel Capitolo 3 hanno evidenziato una buona corrispondenza tra l'istante di scivolamento individuato dall'algoritmo e il riferimento ottenuto dalla load cell, confermando la capacità del metodo proposto di identificare correttamente l'evento di scivolamento nelle diverse condizioni sperimentali investigate. L'analisi ha inoltre mostrato una buona ripetibilità delle misure, evidenziata dalle ridotte differenze delle prove ripetute e dalla presenza di trend coerenti al variare della forza normale, della distanza di scorrimento e della velocità di movimento.

L'analisi della matrice sensoriale ha inoltre permesso di caratterizzare il comportamento dei sensori durante il fenomeno di scivolamento, evidenziando una distribuzione spaziale non uniforme dell'attività e una propagazione temporale dell'informazione attraverso i diversi elementi della pelle tattile. Tali risultati confermano che l'approccio proposto consente non soltanto di individuare l'evento di slittamento, ma anche di descriverne il comportamento dinamico mediante l'analisi dell'intera matrice sensoriale. Nel complesso, il contributo più significativo del presente lavoro ha permesso di valutare quantitativamente le prestazioni del sistema e di individuare relazioni consistenti tra le condizioni operative e la risposta dei sensori attraverso un dataset ampio e ripetibile. La ripetibilità dei risultati ottenuti rappresenta infatti un elemento fondamentale, in quanto conferma l'affidabilità della metodologia sperimentale adottata e la consistenza delle analisi effettuate.

L'analisi dei risultati ha permesso di individuare alcuni trend significativi. In particolare, è stato osservato che l'aumento della velocità di scorrimento tende a ridurre il ritardo tra il rilevamento effettuato dai sensori PVDF e il riferimento ottenuto dalla load cell, suggerendo una maggiore sensibilità dei sensori piezoelettrici agli eventi dinamici caratterizzati da rapide variazioni della deformazione. Al contrario, condizioni caratterizzate da forze normali più elevate hanno evidenziato una maggiore dispersione dei ritardi misurati, probabilmente dovuta alla più complessa dinamica del contatto e alle inevitabili

variabilità del sistema sperimentale.

L'analisi della matrice sensoriale ha inoltre mostrato che l'attività dei sensori non risulta uniformemente distribuita sulla superficie tattile. Alcuni elementi della matrice partecipano con maggiore frequenza al rilevamento dello scivolamento, mentre altri risultano meno coinvolti, evidenziando come il fenomeno interessi la superficie sensibile in modo non omogeneo. Questo è dovuto anche al posizionamento della matrice sul dito presente sul robot. La valutazione della sequenza di attivazione del primo e dell'ultimo sensore ha inoltre confermato che lo scivolamento si propaga progressivamente attraverso la matrice, anziché coinvolgere simultaneamente tutti gli elementi sensibili.

Un ulteriore risultato significativo riguarda la ripetibilità delle misure. Per ciascuna delle condizioni sperimentali investigate, le prove ripetute hanno mostrato valori tra loro molto simili. Questo aspetto rappresenta uno dei risultati più rilevanti del presente lavoro, poiché dimostra che le differenze osservate tra le varie configurazioni sperimentali sono riconducibili principalmente alle modifiche dei parametri di prova e non a fenomeni casuali o a una limitata stabilità del sistema di misura.

I risultati ottenuti hanno quindi dimostrato la fattibilità dell'approccio proposto per il rilevamento dello scivolamento mediante sensori tattili in PVDF. Sebbene gli obiettivi prefissati siano stati raggiunti, restano aperte alcune prospettive di sviluppo volte a consolidarne ulteriormente l'efficacia e ad ampliarne il campo di applicazione. In particolare, i futuri sviluppi possono essere ricondotti a due aspetti fondamentali: da un lato la validazione dell'algoritmo in tempo reale, mediante la sua integrazione nel sistema di controllo del robot, e dall'altro la verifica della sua trasferibilità su piattaforme robotiche differenti. Tali attività consentirebbero di valutare sia l'operatività del metodo in condizioni applicative reali sia il suo grado di generalizzazione rispetto a differenti configurazioni hardware e a differenti strategie di manipolazione.

5.2 Validazione online dell'algoritmo

In tale configurazione, il riconoscimento dello scivolamento potrebbe essere effettuato correlando le variazioni del segnale acquisito dai sensori con la macchina a stati che governa il ciclo operativo del robot. Poiché il controllore conosce in ogni istante lo stato operativo del manipolatore, risulta possibile discriminare gli eventi previsti, quali il contatto iniziale e il rilascio dell'oggetto, da eventi anomali

riconducibili a uno scivolamento indesiderato. In particolare, variazioni del segnale rilevate durante le fasi di contatto o di rilascio verrebbero interpretate come conseguenza delle normali interazioni tra il gripper e l'oggetto, mentre variazioni significative osservate durante la fase di scorrimento, in assenza di comandi di presa o di rilascio, potrebbero essere attribuite all'insorgenza dello scivolamento.

L'integrazione dell'algoritmo con il sistema di controllo consentirebbe pertanto di ridurre l'incidenza dei falsi rilevamenti associati agli eventi previsti dal ciclo di manipolazione e di rendere il riconoscimento dello slittamento maggiormente robusto e affidabile. Una volta identificato l'evento di scivolamento, il sistema potrebbe generare un opportuno segnale di feedback destinato al controllore del robot, rendendo possibile l'implementazione di strategie correttive automatiche, quali l'adattamento della forza di presa o la modifica dei parametri di controllo del manipolatore.

La validazione sperimentale di tale architettura in condizioni operative reali costituirebbe il naturale completamento del presente lavoro e rappresenterebbe un passo significativo verso l'impiego del sistema in applicazioni di manipolazione autonoma, nelle quali il rilevamento tempestivo dello scivolamento costituisce un requisito fondamentale per garantire affidabilità, robustezza e sicurezza durante l'interazione con oggetti di diversa natura.

Secondo me la cosa più interessante, oltre al real time, è cambiare la dinamica di scivolamento per renderla il più possibile verosimile

Ulteriore sviluppo futuro, oltre alla prova real time, sarebbe cambiare la dinamica di scivolamento per renderla il più possibile verosimile cambiando il coefficiente di attrito in quanto stimato e non verificato sperimentalmente.

5.3 Integrazione sulla Hannes Hand

Un ulteriore sviluppo del presente lavoro potrebbe riguardare la validazione dell'algoritmo su una piattaforma robotica differente, mediante la sua implementazione sulla piattaforma robotica Hannes al fine di verificarne la trasferibilità e la robustezza rispetto a differenti configurazioni hardware e modalità di manipolazione.

L'obiettivo sarebbe quello di installare i sensori tattili PVDF sulla mano robotica e riprodurre prove sperimentali analoghe a quelle sviluppate nel presente lavoro, analizzando il comportamento dell'al-

goritmo durante eventi di slittamento controllati. Tale attività consentirebbe di verificare la coerenza dei risultati ottenuti con quelli ricavati mediante il gripper utilizzato nel presente lavoro, valutando se le caratteristiche dei segnali associate allo scivolamento risultino confermate anche in presenza di una cinematica più complessa e di differenti modalità di presa.

La disponibilità di una piattaforma antropomorfa permetterebbe inoltre di investigare l'influenza della distribuzione dei punti di contatto, della configurazione delle dita e delle strategie di presa sul processo di rilevamento dello slittamento, fornendo indicazioni utili sia per la validazione dell'algoritmo sia per l'eventuale definizione di criteri di taratura indipendenti dalla specifica piattaforma robotica.

La verifica delle prestazioni dell'algoritmo su sistemi robotici differenti rappresenterebbe quindi un passo importante verso la dimostrazione della sua generalizzabilità, nonché della sua applicabilità in scenari di manipolazione autonoma caratterizzati da configurazioni hardware eterogenee. Nel complesso, gli sviluppi proposti delineano un naturale proseguimento dell'attività di ricerca svolta. La validazione dell'algoritmo in tempo reale e la verifica della sua trasferibilità su differenti piattaforme robotiche costituirebbero infatti due passaggi complementari per consolidarne l'affidabilità e favorirne l'impiego in sistemi di manipolazione autonoma sempre più complessi e versatili.

Riferimenti bibliografici

- [1] M. I. Tiwana, S. J. Redmond, and N. H. Lovell. A review of tactile sensing technologies with applications in biomedical engineering. *Sensors and Actuators A: Physical*, 179:17–31, 2012.
- [2] R. S. Dahiya, G. Metta, M. Valle, and G. Sandini. Tactile sensing—from humans to humanoids. *IEEE Transactions on Robotics*, 26(1):1–20, 2010.
- [3] L. Seminara et al. Piezoelectric polymer transducers for tactile sensors and artificial skin. *Sensors and Actuators A: Physical*, 263:421–437, 2017.
- [4] B. Aksoy et al. Shielded soft force sensors for tactile applications. *Nature Communications*, 13(4649), 2022.
- [5] M. S. Sarwar et al. Touch, press and stroke: A soft capacitive sensor skin. *Scientific Reports*, 13(17390), 2023.
- [6] R. S. Dahiya and M. Valle. *Robotic Tactile Sensing: Technologies and System*. Springer, 2013.
- [7] M. H. Lee and H. R. Nicholls. Tactile sensing for mechatronics—a state of the art survey. *Mechatronics*, 9(1):1–31, 1999.
- [8] X. Wang et al. Electronic skin for sensing and feedback in prosthetic applications. *Microsystems & Nanoengineering*, 8(113), 2022.
- [9] R. A. Romeo and L. Zollo. Methods and technologies for the development of tactile sensing in robotic hands. *IEEE Access*, 8:127299–127322, 2020.
- [10] Wenzhen Yuan, Siyuan Dong, and Edward H. Adelson. Gelsight: High-resolution robot tactile sensors for estimating geometry and force. *Sensors*, 2017.
- [11] Cosimo Gentile, Francesca Cordella, Cesar Ramos Rodrigues, and Loredana Zollo. Touch-and-slippage detection algorithm for prosthetic hands. *Mechatronics: The Science of Intelligent Machines*, 2020.

- [12] M. Yaacoub, R. Khalifeh, C. Gianoglio, A. Ibrahim, and L. Seminara. Frequency domain investigation of the indentation response of a soft pvdf-based tactile sensor, 2025.
- [13] Rebecca Berthold, Jessica Burgner-Kahrs, Matthias Wangenheim, and Stephanie Kahms. Investigating frictional contact behavior for soft material robot simulations. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2023.