

## Progetto **IR - Industrial Robotics**

*Progetto di Ricerca & Sviluppo  
"IR - Industrial Robotics" finalizzato all'analisi del panorama  
tecnologico e relativa adozione in ambito industriale, con  
riferimento alla robotica avanzata  
come strumento per favorire l'automazione nel  
paradigma della digital transformation*

# **Manipolazione avanzata attraverso un robot tattile-reattivo**

## INTRODUZIONE

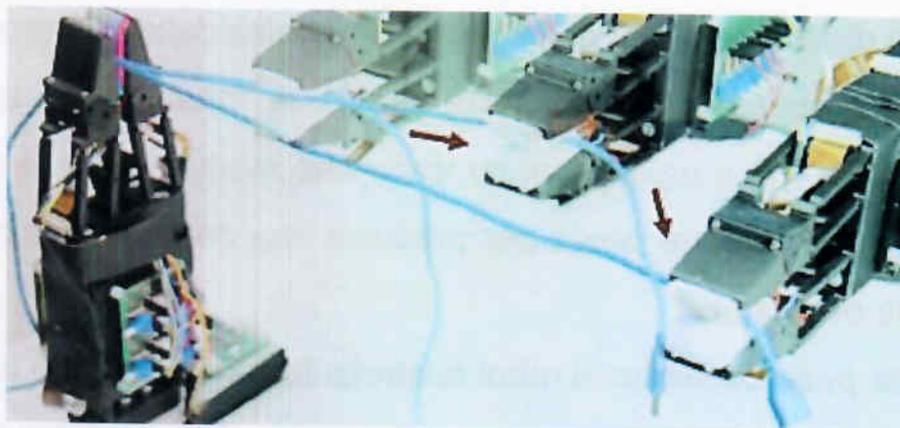
La manipolazione dei cavi flessibili è importante sia per gli ambienti industriali che per quelli domestici. In questo progetto, analizziamo una struttura di percezione e controllo per consentire ai robot di svolgere il compito di manipolare un cavo. Facciamo affidamento ad un sensore tattile basato sulla visione, detto Gel Sight, per stimare la posizione del cavo nell'impugnatura e le forze di attrito durante lo scorrimento del cavo. Decomponiamo il comportamento del cavo manipolato in due controller tattili:

- 1) Cable grip controller, dove un controller PD combinato con un integratore leaky è responsabile della regolazione della forza di presa per mantenere le forze di scorrimento frizionali vicino a un valore adeguato;
- 2) Cable pose controller, in cui un controller LQR basato su un modello lineare di apprendimento delle dinamiche di scorrimento del cavo ha il compito di mantenere il cavo centrato e allineato sulla punta delle dita per evitare che il cavo cada.

Questo comportamento è abilitato da una pinza reattiva progettata con capacità di controllo della forza e della posizione dotata di sensori tattili ad alta risoluzione. Con il framework proposto, vediamo che il robot può seguire un metro di cavo in una configurazione casuale dall'inizio alla fine. Verifichiamo inoltre che il sistema a circuito chiuso si adatta a cavi con materiali e spessori diversi, che si muovono a velocità target diverse.

## ROBOTICA AVANZATA

Questo progetto definisce la manipolazione tattile di cavi e funi. In particolare, esaminiamo il compito di prendere un'estremità di un cavo con una pinza e seguirla all'altra estremità con una seconda pinza, come mostrato di seguito. Si può pensare a questo compito con la complessità aggiuntiva che i cavi sono deformabili e non sono fissati rigidamente all'ambiente. Questa abilità è importante per molte attività che comportano la manipolazione di oggetti deformabili nell'ambito industriale, come legare nodi o maneggiare cablaggi.



Il monitoraggio del cavo è impegnativo e interessante perché richiede il controllo della forza di presa (per consentire uno scorrimento regolare del cavo), nonché il controllo della posizione di presa (per evitare che il cavo cada dalle dita della pinza). Una motivazione chiave è che né la configurazione del cavo nella pinza, né le forze sul cavo nella presa, sono direttamente osservabili con sensori di visione, ma possono essere osservate con sensori tattili.

Ci avviciniamo alla manipolazione del cavo dividendo il comportamento in due obiettivi: 1) Controllo della presa del cavo, che monitora la forza di presa per mantenere le forze di attrito entro un intervallo utile; e 2) Controllo della posizione del cavo, che regola la configurazione del cavo da centrare e allineare con le dita. Per svolgere questo compito, si integra un sistema con i seguenti moduli:

- Pinza tattile-reattiva a ganasce parallele con capacità di controllo della forza e della posizione, dotata di sensori tattili basati su Gel Sight che forniscono un controllo della larghezza di banda della presa a 60 Hz.
- Percezione tattile, stimando in tempo reale la posa del cavo nella pinza, la forza di attrito che tira dalla pinza e la qualità delle impronte tattili.
- Cable grip controller: la pinza regola la forza di presa combinando un controller PD e un integratore leaky che modula la forza di attrito sul cavo e fornisce forze di presa per produrre impronte tattili di qualità sufficiente per la percezione.
- Cable pose controller: il robot controlla la configurazione del cavo sulle dita della pinza con un controller LQR, basato su un modello lineare appreso della dinamica del cavo scorrevole.

Si valuta il sistema completo nel compito di seguire i cavi per vari cavi, scorrevoli a velocità diverse e si confrontano diversi algoritmi di base. Il sistema riesce a seguire cavi diversi dall'inizio alla fine della coda con pochissimi errori.

## APPLICAZIONI TECNICHE

In questa sezione, passiamo in rassegna i lavori correlati sulla manipolazione dei cavi utilizzando la visione o il feedback tattile. Esaminiamo anche altre applicazioni di controllo dei sensori tattili basati sulla visione.

### ***Manipolazione del cavo e adattamento al contorno***

La manipolazione di oggetti simili a fili ha attirato l'attenzione nella comunità della robotica con compiti tra cui legare nodi o rimodellare il filo. Nel passato è stato proposto un metodo per annodare in aria con un robot a due braccia e più dita. L'attività di annodatura è rappresentata come una sequenza di passaggi che consiste in movimenti della mano e movimenti del braccio di supporto senza risposta nel sensore. Inoltre, è stato sviluppato un sistema robotico basato sull'apprendimento per riprodurre la configurazione della fune dimostrata da un essere umano ed un controller basato sulla visione per la presa e la manipolazione dei cavi USB, che consente al robot di afferrare e allineare automaticamente i cavi USB nelle scanalature. Per concludere, è stata implementata un'attività di inserimento cavi con feedback tattile. Tutti questi lavori hanno in comune il fatto di fare affidamento su una presa stabile del cavo, ma non sfruttano lo scorrimento del cavo.

L'inseguimento del cavo è correlato al contorno che è stato ampiamente studiato ed è rilevante ad esempio per la pulizia, l'ispezione o la lucidatura della superficie. Precedentemente è stato proposto un approccio ibrido visione/controllo della forza per le attività che seguono il contorno planare, in cui

la visione viene utilizzata per misurare il contorno e controllare gli angoli. Poi è stato sviluppato un controller che segue il contorno planare utilizzando sensori Tactip per rilevare l'orientamento e la posizione del bordo. La maggior parte dei lavori che seguono il contorno non comporta l'afferrare l'oggetto poiché fa parte dell'ambiente rigido, il che semplifica la dinamica del compito. Il più vicino al presente progetto è un approccio di apprendimento rafforzativo per chiudere un sacchetto di plastica a chiusura lampo con sensori BioTac, richiedendo sia di afferrare che di seguire il bordo del sacchetto. In contrasto con il nostro approccio, si usano azioni discrete e forza di presa costante.

### ***Sensore tattile basato sulla visione per il controllo***

I sensori tattili basati sulla visione utilizzano una fotocamera per catturare la deformazione della loro superficie di contatto con immagini ad alta risoluzione, che possono codificare informazioni sulla geometria locale, forze e possibilmente scivolare. Queste caratteristiche geometriche codificano il potenziale per controllare le interazioni di contatto. Le applicazioni esistenti finora sono:

- attività di inserimento USB dalla stima della posa dell'oggetto basata su pose casuali dal sensore Gel Sight.
- nuvola di punti 3D del sensore Gel Sight in un filtro di Kalman per registrare meglio la posizione di un cacciavite in un'attività di perforazione.
- immagini tattili dei sensori Gel Sight e Gel Slim utilizzate per valutare la qualità di una presa e scegliere una presa adeguata.

- funzioni estratte dalle immagini di Tactip per stabilizzare la presa di una Shadow Modular Grasper.
- metodo di controllo predittivo basato sul modello tattile per riposizionare un oggetto.

Le informazioni sulla forza nella maggior parte dei sensori tattili basati sulla visione provengono dal monitoraggio del movimento dei marker sulla superficie del sensore. E' stato progettato un sensore tattile Finger Vision e ha dimostrato che le informazioni sulla forza estratte sono utili per controllare la presa di un coltello che taglia le verdure. A seguire è stato proposto un algoritmo di rilevamento dello scivolamento incipiente con il sensore Gel Slim, utilizzato per avvitare un tappo su una bottiglia con forza di presa adattiva online. Infine è stato utilizzato un modello appreso per stimare i disallineamenti quando si imballano oggetti in una scatola con Gel Slim, per gestire i contatti esterni.

L'obiettivo del compito di seguire il cavo è quello di utilizzare una pinza robotica per afferrare l'inizio del cavo con la forza adeguata e quindi controllare la pinza per seguire il contorno del cavo fino all'estremità finale. L'estremità iniziale del cavo viene inizialmente afferrata saldamente da un'altra pinza fissa durante il processo successivo al cavo. Alla pinza mobile è consentito riafferrare il cavo riportandolo alla pinza fissa, con conseguente coordinamento a due mani con una delle mani fisse. Questo metodo può essere generalizzato a cavi con proprietà diverse (forma, rigidità, rugosità superficiale).

Per affrontare questo compito, sono necessari i seguenti quattro elementi hardware:

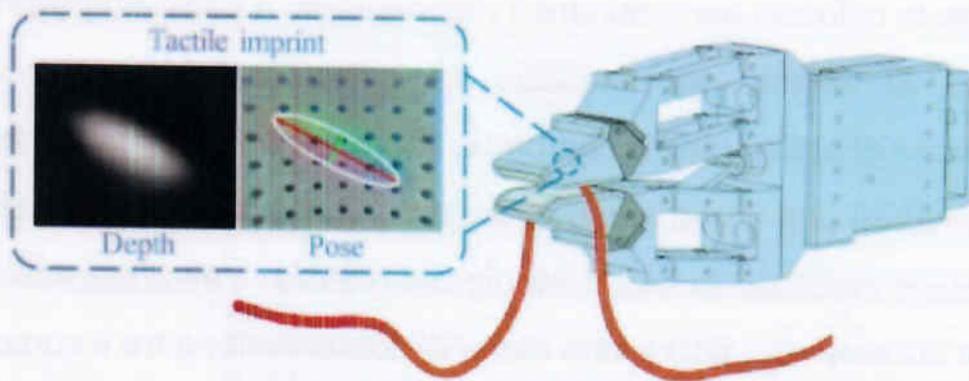
- sensore tattile per misurare in tempo reale la posizione e l'orientamento del cavo afferrato
- sensore tattile per misurare la quantità di forza di attrito durante lo scorrimento in tempo reale
- pinza reattiva veloce per modulare la forza di presa in funzione dell'attrito misurato
- braccio robot reattivo veloce per seguire l'orientamento del cavo misurato e mantenere la posizione del cavo misurata al centro della pinza.

## METODICA SCIENTIFICA

L'idea chiave del nostro progetto è usare il controllo tattile per monitorare e manipolare la posizione e le forze sul cavo tra le dita. Il concetto è illustrato nella figura seguente. Dividiamo il controller tattile in due parti:

- 1) Controllo dell'impugnatura del cavo in modo che il cavo si alterni tra afferrato saldamente e scorrevole senza intoppi;
- 2) Controllo della posizione del cavo in modo che il cavo rimanga centrato e allineato con le dita durante la trazione e lo scorrimento.

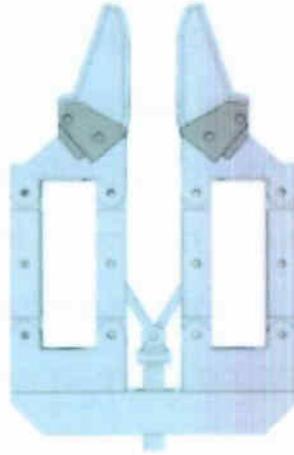
In questa sezione, descriviamo l'implementazione del controller tattile introducendo la pinza reattiva, il sistema di percezione tattile, la modellazione del cavo e i due controller.



### **Hardware**

La maggior parte delle pinze robotiche non offre una larghezza di banda sufficiente per il controllo del feedback in tempo reale. A tal fine fu progettata una pinza parallela con 2 dita (con un sensore Gel Sight rivisto), meccanismi di guida

parallela conformi e collegamenti a manovella azionati da un servomotore (Dynamixel XM430-W210-T, Robotis) come mostrato nella figura sottostante.



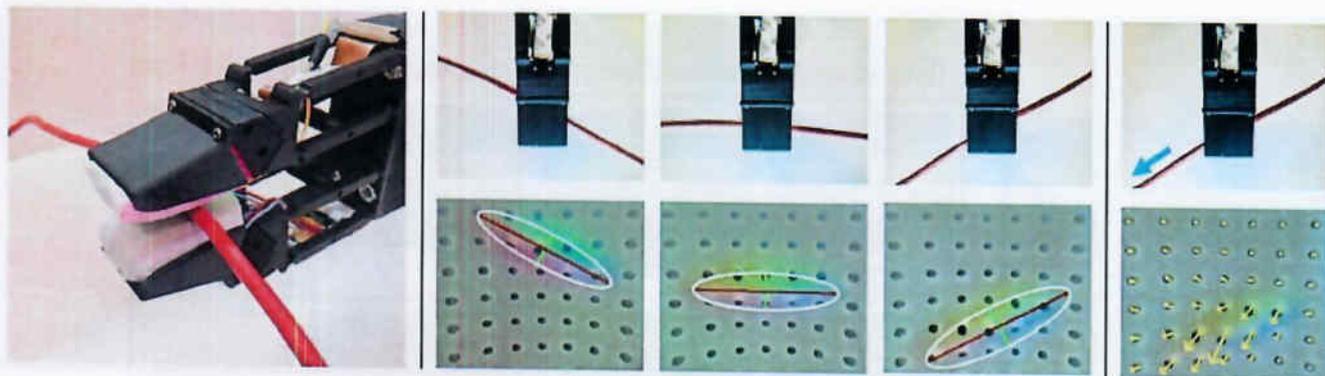
I meccanismi a parallelogramma sono ampiamente utilizzati per ottenere lo spostamento laterale e i meccanismi a manovella a scorrimento sono ampiamente utilizzati per azionare il meccanismo a parallelogramma per le pinze parallele. Si usano per facilitare la presa parallela. Per realizzare un meccanismo di azionamento compatto, si utilizza un sistema azionato da tendini. Un'estremità di una corda (cavo) è legata a un disco del motore che è fissato sul servomotore installato in una custodia del motore. L'altra estremità della corda è legata al cursore. Si utilizza una molla di compressione tra il cursore e la scatola del motore con pretensionamento che forma un sistema di scorrimento-corda-molla. Un'estremità della manovella è collegata al cursore e l'altra è accoppiata al bilanciere del meccanismo a parallelogramma. Il dito è attaccato all'accoppiatore del meccanismo a parallelogramma. La corda spinge il

corsore verso il basso, azionando il meccanismo del parallelogramma tramite il leveraggio della manovella e producendo lo spostamento laterale desiderato del dito. Due dita assemblate simmetricamente attorno al cursore producono una pinza parallela.

Il meccanismo a parallelogramma rigido contiene 28 pezzi che rendono il loro montaggio noioso e dispendioso in termini di tempo. Tipicamente si ridisegna il collegamento con i giunti di flessione per semplificare il meccanismo. Questo processo produce il meccanismo di guida parallela conforme equivalente al parallelogramma rigido, riducendo i 28 pezzi a una singola parte e offrendo la stessa funzionalità cinematica. La dimensione complessiva del prototipo finale ha lunghezza 260 mm, larghezza 140 mm e spessore 85 mm a riposo.

### **Percezione**

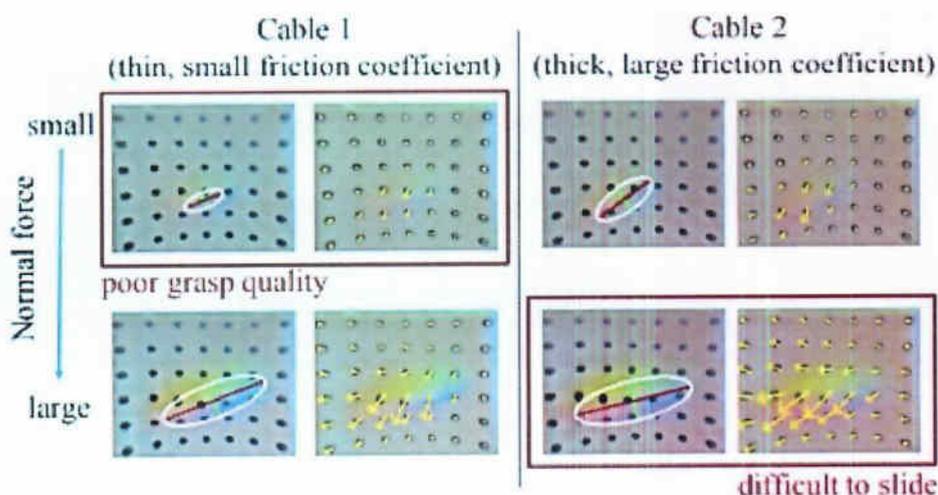
La figura rappresentata di sotto illustra il processo per estrarre la posizione del cavo, la forza del cavo e la qualità della presa dalle immagini tattili.



Innanzitutto, vengono calcolate immagini di profondità da immagini Gel Sight con Fast Poisson Solver. Quindi, si estrae la regione di contatto impostando la soglia dell'immagine di profondità. Infine, si utilizza la Principal Component Analysis (PCA) sulla regione di contatto per ottenere l'asse principale dell'impronta del cavo sul sensore.

Viene utilizzato il rilevamento dei blob per localizzare il centro dei marker neri nelle immagini tattili. Poi un algoritmo di corrispondenza per associare le posizioni dei marker tra i frame, con un termine di regolarizzazione per mantenere la fluidità del flusso di spostamento del marker. Si calcola la media del campo di spostamento del marker ( $D$ ), che è approssimativamente proporzionale alla forza di attrito.

Ancora, si valuta la qualità della presa ( $S$ ) in base al fatto che l'area della regione di contatto sia maggiore di una certa area. L'impronta tattile di scarsa qualità (piccola regione di contatto) darà una stima della posa rumorosa e incerta. Aumentando la forza di presa, come mostrato in figura, si può aumentare la qualità della presa.



## Controllo

L'obiettivo del controller dell'impugnatura è quello di modulare la forza di presa in modo tale che 1) la forza di attrito rimanga entro un valore ragionevole per lo scorrimento del cavo (troppo piccolo e il cavo cade, troppo grande e il cavo si blocca), e 2) monitorare il tattile qualità del segnale. Utilizziamo una combinazione di controller PD e integratore leaky. Il controller PD utilizza il valore medio dello spostamento del marker (D) (forza di attrito approssimativa) come feedback e lo regola su un valore target predefinito (Dt). Il controller PD è espresso come:

$$u_{pd}[n] = K_p e[n] + K_d (e[n] - e[n-1])$$

$$e[n] = D[n] - D_t[n]$$

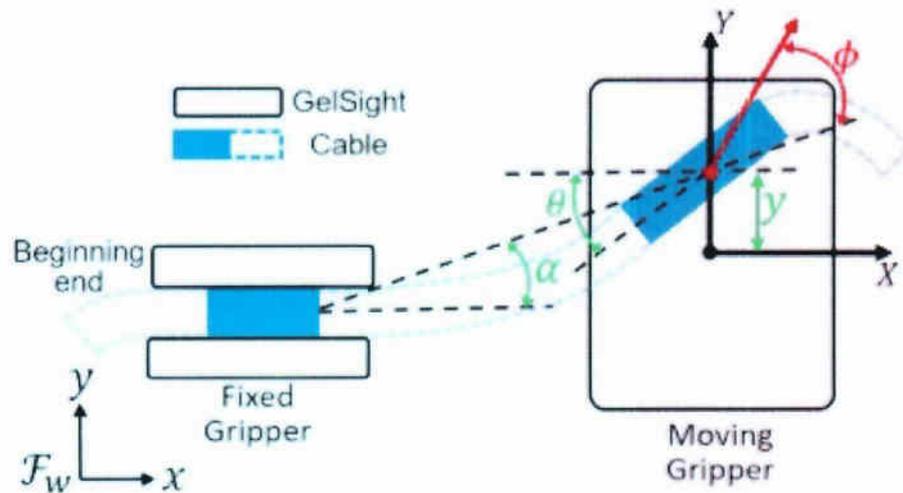
dove  $K_p$  e  $K_d$  sono i coefficienti per il proporzionale e termini derivati, e  $D[n]$  è il valore medio misurato di spostamento del marker. L'integratore leaky solleva  $D_t$  del Controller PD se la qualità del segnale (S) è scarsa come segue:

$$D_t[n] = \alpha D_t[n-1] + (1 - \alpha)(1 - S)$$

$$S = \begin{cases} 1 & \text{if good quality} \\ 0 & \text{if poor quality} \end{cases}$$

dove  $\alpha$  è la perdita in ogni fase temporale e S è l'indicatore della qualità del segnale.

Modelliamo la dinamica del cavo-pinza come un problema di trazione planare. Come mostrato nella figura di cui sotto, la regione del cavo a contatto con il sensore tattile (rettangolo blu a destra) è rappresentata come un oggetto 2D.



Parametrizziamo la sua posizione e l'orientamento rispetto all'asse X della cornice del sensore con  $y$  e  $\theta$ . Definiamo ulteriormente l'angolo  $\alpha$  tra il centro del cavo sulla pinza mobile e l'orientamento della pinza fissa (rettangolo blu a sinistra). Questi tre parametri  $[y \ \theta \ \alpha]$  definiscono lo stato del sistema di presa del cavo. Definiamo infine l'input di controllo sul sistema  $\varphi$  come la direzione di trazione rispetto all'angolo  $\alpha$  (etichettato con freccia rossa).

Poiché una superficie di gel deformabile ha dinamiche di attrito complesse, utilizziamo un metodo basato sui dati per adattare un modello dinamico lineare piuttosto che i primi principi. Lo stato del modello è  $x = [y \ \theta \ \alpha]^T$ , l'ingresso di controllo  $u = [\varphi]$  e il modello dinamico lineare:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

dove A e B sono i coefficienti lineari del modello.

Per raccogliere i dati in modo efficiente, utilizziamo un semplice controller proporzionale (P) come controller di base integrato con un rumore uniforme per il

processo di raccolta dei dati. Il controller P controlla la velocità del TCP del robot sull'asse y e lasciamo costante la velocità sull'asse x. Il controllore è espresso nell'equazione di seguito, dove  $K_p$  è il coefficiente del termine proporzionale e  $N[n]$  è il rumore casuale campionato da una distribuzione uniforme  $[-0.01, 0.01]$ . L'intuizione di questo controller di base è che quando il robot (sensore) si muove nella direzione positiva  $\sim y$ , il cavo viene tirato nella direzione opposta  $- \sim y$  e torna al centro del sensore.

$$v_y[n] = K_p^v y[n] + N[n]$$

Raccogliamo circa 2000 punti dati con un singolo cavo eseguendo diverse traiettorie con diverse configurazioni di cavi iniziali. Usiamo l'80% dei dati per la regressione lineare delle matrici A e B e convalidiamo il risultato con il resto.

L'obiettivo del controller della posa del cavo è mantenere la posizione del cavo al centro del sensore Gel Sight ( $y^* = 0$ ), l'orientamento del cavo deve essere parallelo all'asse X ( $\theta^* = 0$ ) e l'inclinazione del cavo tirato anche parallelo all'asse X ( $\alpha^* = 0$ ). La traiettoria nominale del controller di posa del cavo ( $x[n]^*$ ,  $u[n]^*$ ) è quindi costante e uguale a  $([0 \ 0 \ 0]^T, [0])$ , cioè regolazione intorno allo zero.

Formuliamo un controllore LQR con le matrici A e B dal modello lineare e risolviamo per il guadagno di feedback ottimale K, che a sua volta ci fornisce l'ingresso di controllo ottimale  $u^-[n] = -Kx[n]$ . I parametri del controller LQR che utilizziamo sono  $Q = [1, 1, 0.1]$  e  $R = [0, 1]$ , poiché regolare y e  $\theta$  (assicurandosi che il cavo non cada) è più importante che regolare  $\alpha$  (mantenere il cavo dritto).

## CONCLUSIONI

In questo progetto, presentiamo un quadro di percezione e controllo per affrontare il compito di seguire il cavo. I principali contributi del lavoro sono:

- La percezione tattile utilizza il sensore Gel Sight per stimare la posa del cavo e la forza di attrito approssimativa durante lo scorrimento e fornire la qualità del segnale tattile in tempo reale. Queste caratteristiche tattili sono rilevanti per molte altre attività di controllo tattile.
- Design della pinza reattiva con meccanismi di guida parallela e manovella scorrevole che consentono la modulazione della forza di presa a 60 Hz.
- Cable Grip Controller: Controller PD e integratore leaky per la pinza per mantenere un attrito adeguato e una buona qualità del segnale tattile. Il controller bilancia la forza di presa per ottenere buone impronte tattili e uno scorrimento fluido.
- Cable Pose Controller: Il modello lineare adattato ai dati descrive la dinamica della pinza del cavo proiettandola su un problema di trazione planare. Un controller LQR regola il cavo al centro del dito durante lo scorrimento. L'implementazione di successo del controller basato su modello nel compito che segue il cavo e il suo adattamento a diversi cavi e velocità di seguito, dimostra che è possibile utilizzare modelli e controller semplici per manipolare oggetti deformabili sfruttando un buon feedback tattile.

Ci sono diversi aspetti del sistema che possono essere migliorati:

- 1) La frequenza del segnale tattile (30Hz) e il loop di controllo della pinza (60Hz) possono essere potenzialmente portati rispettivamente a 90Hz e 200Hz;
- 2) Osserviamo che è difficile tirare indietro il cavo quando cade sul bordo del dito, a causa della superficie convessa del sensore Gel Sight. La forma del sensore del dito potrebbe essere ottimizzata meglio per migliorare le prestazioni;
- 3) Sarebbe interessante esplorare altri modelli e controller. L'apprendimento rafforzativo basato su modello con un approssimatore di funzione più complesso potrebbe essere una buona soluzione per questo compito per gestire con maggiore precisione le dinamiche della pinza del cavo. Le strutture di percezione e controllo qui proposte potrebbero consentire di affrontare compiti robotici più complessi.