



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in INGEGNERIA MECCANICA

**DISPOSITIVI DI PRESA NEL SETTORE DELLA
ROBOTICA AVANZATA**

GRIPPING DEVICES IN THE ADVANCED ROBOTICS SECTOR

Relatore: Chiar.mo

Prof. Ing. Matteo Claudio Palpacelli

Tesi di Laurea di:

Alessandro Scataglini

A.A. 2019 /2020

*alla mia famiglia, la mia ragazza
ed i miei amici...*

Indice

ABSTRACT	7
INTRODUZIONE	9
CAPITOLO 1	
1.1 Organi di presa: tecnologie e caratteristiche	11
1.2 Classificazione in base al tipo di presa	12
1.2.1 Impactive gripper	14
1.2.2 Ingressive gripper	19
1.2.3 Astrictive gripper	21
1.2.4 Contigutive gripper	28
1.3 Classificazione in base al tipo di utilizzo	30
1.4 Classificazione in base al tipo di attuazione	31
CAPITOLO 2	
2.1 Gripper prismatico per uso aereo	36
2.1.1 Design e cinematica	37
2.1.2 Azionamento	38
2.1.3 Costruzione	39
2.1.4 Valutazione della pinza	40
CAPITOLO 3	
3.1 Inverted L-Arm	42
3.1.1 Progettazione	42
3.1.2 Carichi di compressione	44

3.1.3 Stress dovuti ad elevate deformazioni	45
3.1.4 Vantaggio meccanico variabile	45
3.2 Soft robot hand	48
3.2.1 Dispositivo	49
3.2.2 Realizzazione	50
3.2.3 Attuazione	51
3.2.4 Sensori	52
CAPITOLO 4	
4.1 Apprendimento auto-gestito mediante segmentazione	54
4.2 Segmentazione dell'istanza	54
4.3 Stima della posizione	55
4.4 Approccio auto-supervisionato del manipolatore di presa	56
4.5 Rete di auto-apprendimento nella stima della posa	56
4.6 Trasformazione di posizione	58
CONCLUSIONI	60
BIBLIOGRAFIA	62

Abstract

In questo documento troviamo un approfondimento sulle diverse tipologie di organi di presa (gripper) per manipolatori industriali attualmente esistenti sul mercato. Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di valutare e classificare le già esistenti tipologie di gripper al fine di proporre la soluzione migliore per ogni tipo di esigenza, offrendo inoltre nuove soluzioni in fase di studio per implementare maggiormente la personalizzazione del dispositivo ad ogni specifica esigenza. Il lavoro è diviso in quattro capitoli. Nel primo capitolo vengono fornite delle definizioni di base che caratterizzano gli organi di presa, mostrando e classificando le varie tipologie ed introducendo il concetto di presa automatizzata. Il secondo capitolo è uno studio dell'arte che introduce gripper utilizzabili in ambienti extra industriali come ad esempio in campo aeronautico. Il terzo capitolo è sempre uno studio dell'arte sullo sviluppo attualmente raggiunto nella progettazione di gripper morbidi applicabili alla robotica già esistente. Nel quarto capitolo viene proposta una ricerca su un metodo di auto-apprendimento nel grasping da applicare alla robotica esistente, imponendo un notevole miglioramento nella programmazione e nell'utilizzo dei robot nel settore dell'immagazzinamento, essendo i robot in grado di riconoscere i diversi oggetti e di comprendere la loro funzione e quindi la loro locazione.

Introduzione

Nell'attuale produzione industriale la robotica sta ricoprendo in modo sempre maggiore un ruolo centrale nelle varie attività produttive, dalla movimentazione di oggetti, al loro assemblaggio o disassemblaggio.

La parola automazione è stata introdotta nel 1940 da J. Diebold per descrivere il largo impiego di apparecchiature automatiche manifestatosi soprattutto nell'industria automobilistica. Oggi noi sappiamo che l'automazione è presente in ogni settore produttivo e non, basti considerare le tecnologie presenti nelle nostre case. Attualmente la definizione di automazione ci descrive l'utilizzo di tecnologie utili per sostituire o aiutare l'uomo nello svolgimento di operazioni fisiche e non, come decidere in modo intelligente quali operazioni vanno compiute e quali no. Il lavoro dell'operatore umano viene sostituito dai robot, ovvero strutture meccaniche flessibili e programmabili.

I robot che sostituiscono il lavoro dell'uomo nel linguaggio comune, sono descritti come un'apparecchiatura artificiale in grado di compiere determinate azioni in base ai comandi che gli vengono dati e alle sue funzioni, sia in base ad una supervisione diretta dell'uomo, sia autonomamente basandosi su linee guida generali, magari usando processi di intelligenza artificiale. A livello meccanico sono un insieme di corpi rigidi interconnessi da giunti meccanici, i quali formano una catena cinematica che permette un certo grado di articolazione.



FIG.1 Esempio di robot automatico

Esistono varie tipologie di manipolatori, differenti per tipo e numero di giunti, le più comuni tipologie sono: manipolatori a portale, manipolatori cartesiani, manipolatore cilindrico, SCARA o antropomorfo.

Ogni manipolatore termina con un polso meccanico sul quale vengono installati gli organi terminali per consentire la manipolazione di oggetti oppure per eseguire delle operazioni su pezzi di lavorazione.

Gli organi terminali o *end-effectors* possono essere distinti in due categorie: gli utensili di lavoro (tools) e gli organi di presa o pinze (gripper).

Gli utensili sono organi costruiti per svolgere determinate operazioni e lavorazioni come verniciatura a spruzzo, saldatura a punti o ad arco, taglio laser o a getto d'acqua, fresatura e trapanatura, incollaggio, avvitatura, testing, etc. In questo documento gli utensili non verranno trattati anche se ricoprono un ruolo importante nell'automazione industriale in particolare nel settore della robotica applicata alla produzione, verranno invece analizzate le varie tipologie di gripper.

Capitolo 1

1.1 Organi di presa: tipologie e caratteristiche

Gli organi di presa robotici, più comunemente chiamati gripper, sono la parte terminale della catena cinematica di un robot industriale ovvero l'effettivo collegamento tra robot ed oggetto da manipolare.

Una definizione di gripper è stata data da G. J. Monkman¹:

i gripper sono sottoinsiemi dei meccanismi di presa che forniscono un contatto temporaneo con l'oggetto da afferrare, assicurandone posizione ed orientamento durante la movimentazione. La presa è ottenuta per mezzo di forze prodotte da appositi elementi. Il termine gripper viene anche usato nel caso non ci sia effettivo serraggio, ma solo un contenimento o sostegno dell'oggetto.

Un gripper deve principalmente svolgere le seguenti azioni:

- Mantenere in condizioni statiche o dinamiche determinate forze e momenti.
- Permettere la variazione di posizione e orientamento dell'oggetto in relazione ad un sistema di riferimento.
- Assicurare temporaneamente una definita posizione e orientamento dell'oggetto relativamente ad un sistema di riferimento.
- Consentire operazioni tecniche specifiche richieste dalla particolare applicazione.

Ovviamente le specifiche che un dispositivo di presa deve soddisfare variano in base al campo di utilizzo. L'uso dei gripper non è limitato alla sola robotica industriale ma rappresenta un componente universale nei processi automatizzati. I principali campi applicativi che ne fanno uso sono: robotica industriale (presa e manipolazione di oggetti); macchine a controllo numerico (utensili); catene di assemblaggio (montaggio e imballaggio); manipolatori controllati da remoto (campo medico, aerospaziale, nautico); robotica di servizio (gripper antropomorfi).

I gripper per manipolatori industriali sono realizzati mediante organi prensili (dita/finger) che consentono di afferrare l'oggetto con l'apertura e la chiusura delle stesse. Ogni dispositivo per poter essere in grado di raggiungere qualunque punto dello spazio necessita di tre assi di movimento.

La movimentazione degli assi viene generalmente attuata mediante sistemi di azionamento tradizionali (elettrico, pneumatico e oleodinamico) anche se la recente tecnologia, legata alla necessità di ottenere

pinze sempre più leggere, sta portando all'introduzione di nuovi sistemi di azionamento che verranno presentati nei capitoli successivi.

Nei paragrafi seguenti viene effettuata una classificazione delle diverse tipologie di gripper in base ad elementi che caratterizzano i gripper stessi.

1.2 Classificazione in base al tipo di presa

I gripper possono essere classificati in quattro principali categorie come descritto nel testo [1]:

- IMPACTIVE : una forza meccanica è direttamente impressa sull'oggetto da due o più direzioni.
- INGRESSIVE : la presa viene tramite l'inserimento dell'organo di presa nell'oggetto, attraverso una o più superfici.
- ASTRICTIVE : una forza o un campo attrattivo vincola l'oggetto consentendone la presa.
- CONGIUNTIVE : il sostegno dell'oggetto avviene mediante una forza unidirezionale sviluppata dopo il contatto diretto non impattivo.

METODO DI PRESA	TIPO DI GRIPPER	ESEMPI TIPICI	TIPO DI MATERIALE
<i>IMPACTIVE</i>		Pinze, mani, morse	Oggetti rigidi
<i>INGRESSIVE</i>	Intrusive	Aghi, perni, chiodi	Oggetto flessibile: tessile, fibra di carbonio e vetro
	Non-intrusive	Ganci, velcro	Oggetto flessibile: tessile, fibra di carbonio e vetro
<i>ASTRICTIVE</i>	Aspirazione	Aspiratori	Oggetti non porosi, materiali rigidi
	Magneto-adesione	Campo elettrico	Materiali ferromagnetici
	Elettro-adesione	Campo elettrico	Materiali leggeri in fogli e microcomponenti
<i>CONTIGUTIVE</i>	Termici	Congelamento, fusione	Oggetto flessibile: tessile, fibra di carbonio e vetro
	Chimici	Adesivi Permatack	Fibre di carbonio con impregnazione di colla
	A fluido	Azione capillare, tensione superficiale	Oggetti piccoli e leggeri (microcomponenti)

TABELLA 1: Classificazione delle pinze in base al principio di funzionamento e adattabilità con diversi materiali.

La maggior parte dei gripper industriali sono di tipo *Impactive* o *Astrictive* (aspirazione ed elettromagnetici) grazie alla maggior flessibilità e al minor costo. Le altre tipologie vengono impiegate maggiormente in settori come l'industria tessile, alimentare ed elettronica.

I gripper di tipo *Ingressive* sono a loro volta divisi in due ulteriori classi (come è possibile vedere nella tabella precedente): *Intrusive* e *Non-Intrusive*, i primi penetrano attraverso il materiale mentre i secondi si limitano ad unirsi al pezzo stesso o ad agganciarlo.

In egual maniera gli *Astrictive* gripper possono essere divisi in tre sottogruppi: ad *Aspirazione*, *Magneto-Adesione*, *Elettro-adesione*. Nonostante l'*Elettro-adesione* sia adatta per quasi la maggior parte dei materiali, sia conduttori che no, è limitata ad oggetti molto leggeri a causa delle esigue forze di attrazione. I sistemi ad aspirazione sono adatti per qualsiasi tipo di materiale e forniscono una forza di presa molto più grande rispetto a quelli ad *Elettro-adesione* e ciò permette di afferrare oggetti più pesanti, necessitando però di un'adesione quasi perfetta tra organo di presa e oggetto da movimentare. Anche i sistemi a *Magneto-adesione* comportano una forza di presa non irrilevante ma il loro campo di utilizzo è circoscritto ai soli materiali ferromagnetici.

1.2.1 Impactive gripper

Costituiscono la tipologia di gripper più utilizzata a livello industriale, grazie alla larga varietà di prodotti commerciali e alla loro versatilità, considerando anche il vantaggio economico rispetto alle altre tipologie.

Il moto di questi gripper consiste nel convertire un movimento primario generato da un azionatore in un movimento delle pinze attraverso una catena cinematica, sfruttando quindi le leggi della meccanica classica (Newtoniana).

I tipici sistemi di automazione¹ sono:

- Azionamenti elettrici : servomotori, motori passo-passo, motori lineari o dispositivi piezoelettrici.
- Azionamenti pneumatici : pistoni ad aria compressa generalmente uniti ad un sistema meccanico con molle.
- Azionamenti idraulici : pistoni oleodinamici.
- Azionamenti magnetici : elettromagneti.

drive system / evaluation criteria					
	mechanical	pneumatic	hydraulic	magnetic	electric motor
high gripping force					
controllability					
energy transmission					
insensitivity to dirt					
maintenance					
emergency stop behaviour					
constructional size					
environmental influences					
costs					

FIG. 1 Proprietà degli azionamenti¹ (cerchio pieno=vantaggioso, cerchio vuoto=svantaggioso)

I tipici sistemi di automazione¹ sono:

- Sistemi articolati a leve
- Ingranaggi a vite e madrevite
- Meccanismi di guida a cuneo (Wedge-Hook)
- Sistemi a camme
- Meccanismi a pignoni e cremagliera
- Sistemi a cinghia e puleggia

I sistemi a leva sono costruiti mediante giunti meccanici che garantiscono loro un certo numero di gradi di libertà. I giunti possono garantire diversi tipi di movimento, ad esempio rotazionale, traslazionale (accoppiamento prismatico), sferoidale o elicoidale. La problematica legata a questo tipo di meccanismi sta nella necessità di avere un determinato gioco tra gli elementi per consentire il libero movimento e più grande sarà il gioco tanto minore sarà la precisione e la ripetibilità delle operazioni¹.

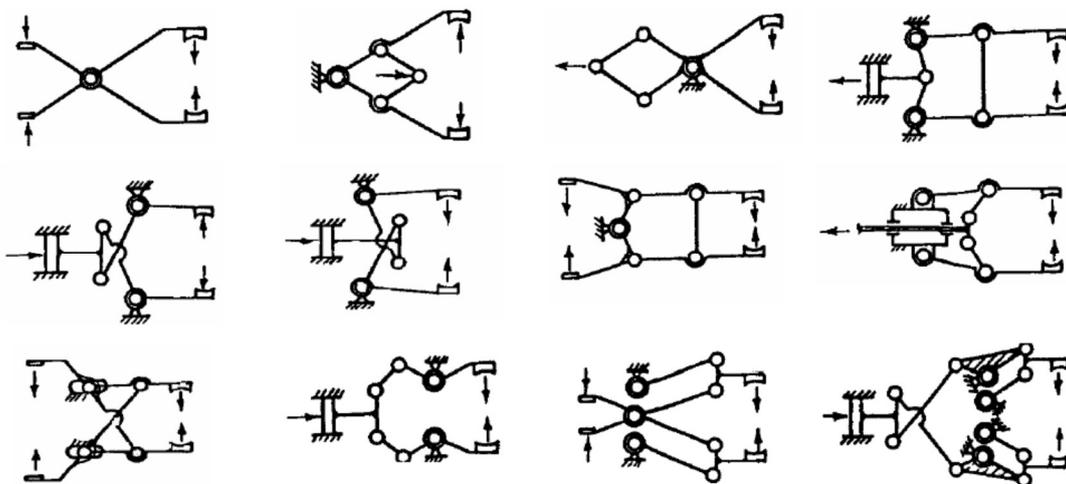


FIG. 2 Esempio di sistemi cinematici²

Secondo H. Schunk³ esistono due tecniche di presa principali: Force-lock e Form-lock.

	principle of function		force lock	form lock
gripping with one contact surface	adhesive grip			
	reverse grip			
gripping with more than one contact surface	force-fit			
	force-fit/form-fit			
	form-fit			

FIG. 3 Esempi di tipi di presa Force-lock e Form-lock

La sicurezza del serraggio e la forza di presa sono influenzati dal lasco introdotto dal gioco, dalla dinamica e dalla forma delle dita.

force-fit gripping	form-fit gripping	
$F = \frac{m \cdot g}{2\mu} \left(1 + \frac{a}{g}\right) \sin \frac{\alpha}{2} \cdot S$	$F_0 = m \cdot (a+g) \cdot S$	$F_0 = m \cdot (a+g) \cdot \frac{\tan \frac{\alpha}{2}}{2}$
$F_0 = \frac{5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ m/s}^2}{2 \cdot 0,1} \left(1 + \frac{6 \text{ m/s}^2}{10 \text{ m/s}^2}\right) \sin \frac{90^\circ}{2} \cdot 2$	$F_0 = 5 \text{ kg} \cdot (6 \text{ m/s}^2 + 10 \text{ m/s}^2) \cdot 2$	$F_0 = 5 \text{ kg} \cdot (6 \text{ m/s}^2 + 10 \text{ m/s}^2) \cdot \frac{\tan 45^\circ}{2} \cdot 2$
$F_0 = 565,7 \text{ N}$	$F_0 = 160 \text{ N}$	$F_0 = 80 \text{ N}$

FIG. 4 Confronto tra prese Force-fit e Form-fit

Force-lock : il bloccaggio avviene solamente tramite la forza di attrito che si crea tra l'oggetto e le griffe della pinza, ciò comporta la realizzazione delle pinze con materiali aventi elevato coefficiente d'attrito.

Form-lock : il bloccaggio si realizza con dita adattate alla forma dell'oggetto in modo tale che la forza si distribuisca su tutta la superficie di contatto, ciò permette una minore forza necessaria per la presa.

Come dimostrato, il valore della forza varia molto nelle diverse condizioni di presa. Tuttavia, in [1] viene fornita una formula generale che può essere adattata ad ogni tipologia di pinza di tipo Impactive per avere una stima della forza iniziale di presa:

$$F_G = \frac{m g f_s}{\mu n} \quad [\text{N}] \quad (1)$$

Dove :

- m massa dell'oggetto [Kg]
- g accelerazione di gravità [m/s²]
- f_s fattore di sicurezza
- μ coefficiente di attrito
- n numero di griffe

Generalmente gli Impactive gripper sono composti da due o più griffe che si muovono simmetricamente rispetto l'asse centrale, ad eccezione dei gripper a singola griffa mobile, mani robotiche e gripper ad espansione.

Esistono due tipi di movimento delle griffe: parallelo e angolare (radiale)^{1,2}.

Nelle pinze parallele le griffe rimangono sempre ortogonali alla base, il movimento è lineare e lineare lungo tutta la corsa. Troviamo gripper paralleli ad una sola griffa mobile, a due griffe con movimento sincrono o indipendente, ma anche tre o quattro griffe concentriche autocentranti.

Le pinze parallele a doppio effetto possono lavorare in apertura o in chiusura, rispettivamente compiendo una presa interna o esterna. Il valore della forza in apertura e chiusura per una stessa pinza è diversa, infatti la forza di presa interna è maggiore.

Le pinze angolari sono caratterizzate da un movimento delle griffe lungo un percorso curvilineo, attorno ad un punto fisso detto fulcro. L'apertura angolare massima può arrivare fino ai 180°, in questo caso la pinza prende nome di gripper radiale. Il movimento sviluppato puramente rotatorio le rende affidabili e con costi inferiori rispetto alla versione a griffe parallele. Anche per le griffe angolari esistono le versioni a doppio effetto, per prese interne ed esterne ed a singolo effetto con molla di sicurezza. L'apertura può essere simmetrica o antisimmetrica. Questa tipologia di griffe grazie all'apertura di 180° sono adatte per operazioni di montaggio e per la presa di oggetti su tavole rotanti o nastri trasportatori.



(a) Gripper parallelo a tre griffe ROHM



(b) Gripper angolare a due griffe SWG SCHUNK



(c) Gripper radiale a due griffe FESTO

FIG. 5 Esempi di gripper

1.2.2 Ingressive gripper

Sono tipologie di pinze che prevedono la penetrazione fino ad una determinata profondità dell'oggetto da afferrare mediante l'utilizzo di mezzi *intrusivi* come aghi, perni, chiodi o *non intrusivi*, che quindi non penetrano nel materiale, come ganci o velcri. Questa tipologia di pinze entra in contatto con una sola superficie dell'oggetto a differenza delle tecniche impactive che coinvolgono più superfici. Ovviamente questi gripper vengono utilizzati in presenza di materiali flessibili morbidi, fibrosi o porosi come tessuti o pannelli in fibra di carbonio o vetro. I requisiti dei gripper che questi materiali richiedono sono:

- Fornire la necessaria forza per il sostegno senza danneggiare il materiale
- Flessibilità per la presa di oggetti di varia forma e dimensione
- Alta precisione e affidabilità
- Alta frequenza di lavoro

La categoria più interessante da analizzare è quella degli Intrusive, questi dispositivi consistono in una distribuzione più o meno fitta di aghi fissati su una piattaforma planare, cilindrica o su un nastro. Il movimento opposto di due o più di queste strutture su un materiale permette agli aghi di penetrarlo consentendo la presa.

Generalmente i tipici gripper intrusivi sono dotati di un numero di aghi che varia tra i 10 e i 40. Questi aghi sono sottili, levigati e orientati in diverse direzioni. Il diametro degli aghi è solitamente compreso tra 0,5 mm e 4 mm. Le punte degli aghi sono generalmente arrotondate in modo da evitare un danneggiamento del materiale.

Esistono due principali movimenti per effettuare la presa di un materiale¹. Gli aghi possono essere allontanati mantenendo il materiale in tensione oppure fatti scorrere uno verso l'altro, entrambe le soluzioni sono rappresentate nella figura successiva.

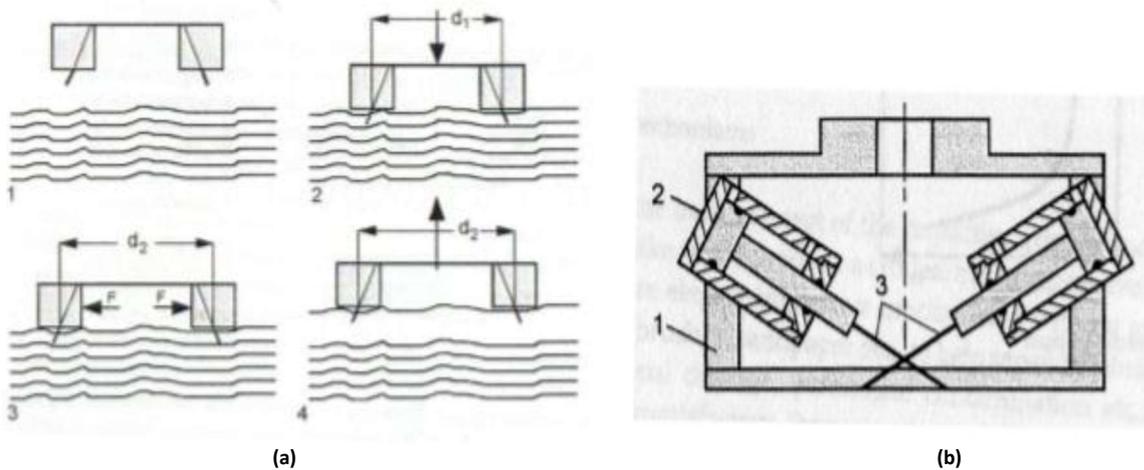


FIG. 6 a) Intrusive gripper per la separazione dei tessuti; b) Intrusive gripper a doppio pistone

La forza di presa è legata al numero di aghi, dalla loro tipologia, dalla loro distanza e dall'inclinazione. L'equazione (2) mette in relazione la forza di presa con l'inclinazione degli aghi. Si vede che la forza aumenta per angoli piccoli cioè con aghi molto inclinati.

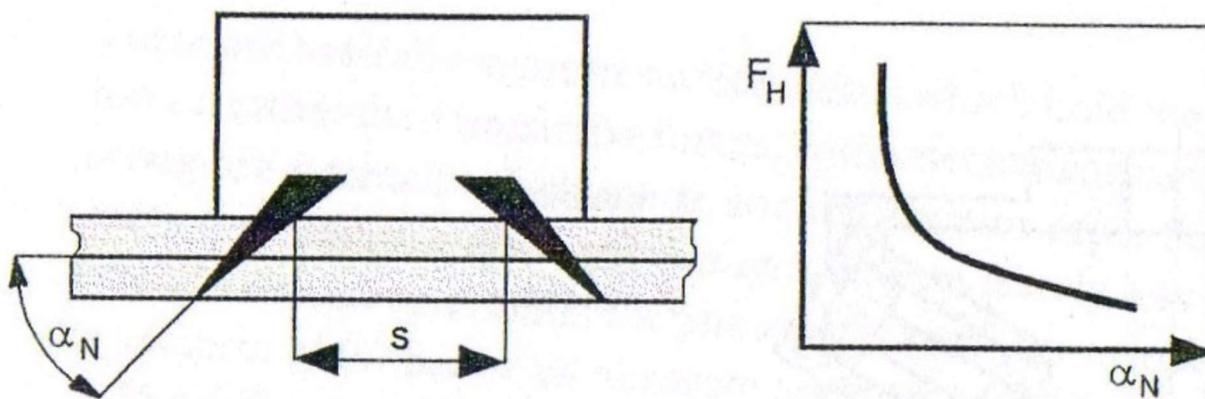


FIG. 7 Caratteristica forza-inclinazione aghi di un gripper intrusivo¹

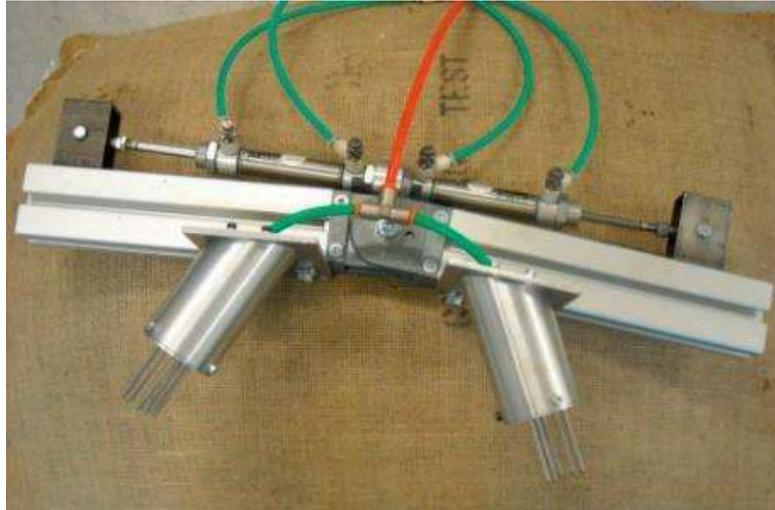


FIG. 8 Esempio di ingressive gripper attuato mediante leghe a memoria di forma

1.2.3 Astrictive Gripper

Si tratta di dispositivi in grado di afferrare e mantenere l'oggetto senza applicare una forza continua che comporterebbe una compressione dell'oggetto stesso. Un'altra differenza dalle altre tipologie di gripper risiede, nella continua necessità di alimentazione energetica che ne limita molto l'utilizzo a causa dei maggiori costi di esercizio. Fanno parte di questa categoria di gripper i sistemi ad *aspirazione*, *magneto-adesivi* ed *elettro-adesivi*.

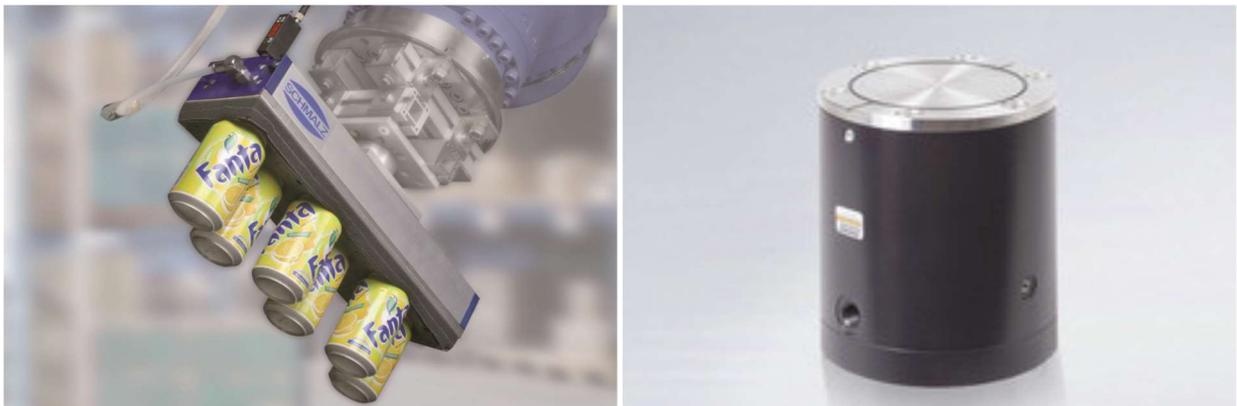


FIG. 9 Esempi di Astrictive Gripper

Sistemi ad aspirazione

Rappresentano la soluzione maggiormente utilizzata nell'industria moderna, sfruttando la creazione del vuoto (vacuum suction). I gripper che utilizzano questa tecnologia sono detti *suction gripper* e si possono caratterizzare in base al tipo di presa: una tipologia utilizza generatori del vuoto (*vacuum suckers*), l'altra invece aderisce mediante l'utilizzo di ventose (*passive suction cups*)⁴.

Prerogativa molto importante per questi gripper risiede nella capacità di poter sollevare sia oggetti voluminosi di grandi dimensioni, sia oggetti piccoli e leggeri come componenti elettronici permettendo il loro impiego anche nelle aziende produttrici di semiconduttori.

Il principio di funzionamento è molto semplice, una calotta flessibile (suction cup) viene compressa ermeticamente sulla superficie dell'oggetto. All'interno della calotta viene generata una pressione negativa e di conseguenza si sviluppa la forza necessaria per il sostegno dell'oggetto. I vacuum suckers generano il vuoto attraverso dei sistemi elettro-meccanici. La calotta flessibile del gripper a contatto diretto con l'oggetto è detta *suction head* e generalmente è di materiale elastomerico. Il vuoto può essere prodotto con uno dei seguenti metodi:

- pompe (vacuum pumps)
- generatori ad effetto Venturi (ejectors)
- soffiatori (vacuum blowers)
- cilindri pneumatici (pneumatic cylinders)

Utilizzando le **pompe** è possibile ottenere il massimo vuoto generabile, mantenendo bassi i valori del rumore e del costo operativo, in opposizione ad elevati costi iniziali e la necessità di accessori come ad esempio serbatoi d'aria. Inoltre il peso e la dimensione della pompa non ne consentono il montaggio diretto sulla pinza, costringendo all'utilizzo di tubi per il trasporto del vuoto (possibili perdite di efficienza lungo il percorso). I **generatori ad effetto Venturi** sono facilmente installabili con bassi costi iniziali ed offrono la possibilità di essere direttamente integrati nel gripper, ma hanno elevati costi di esercizio a causa della continua richiesta di aria compressa. I **soffiatori** producono bassi valori di vuoto, però sono facilmente controllabili e quindi impiegabili per la presa di oggetti porosi. I **sistemi ad aspirazione pneumatici** sono impiegati nelle operazioni di assemblaggio. Non necessitano di un flusso costante di aria compressa ma producono in maniera alternata un'aspirazione e una espulsione in base alla corsa del pistone.

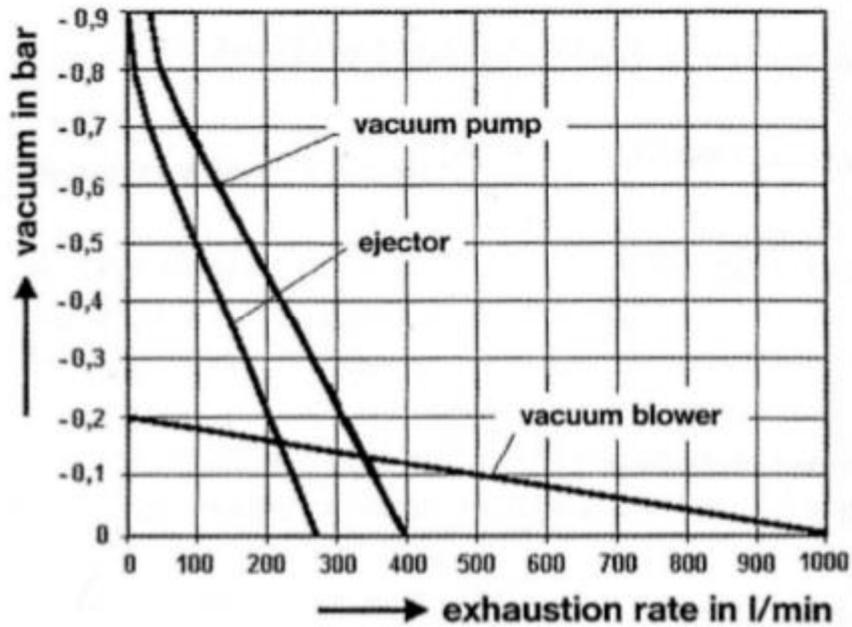


FIG. 10 Confronto tra i diversi sistemi di generazione del vuoto

La pressione (σ) esercita sull'oggetto è il rapporto tra la forza di presa (F) e la superficie attiva (A). Considerando gli effetti della gravità (g) e dell'accelerazione del robot (a) su un oggetto di massa (m).

Per un tipico gripper ad aspirazione, la forza iniziale statica di presa è data da :

$$F = (\sigma_0 - \sigma_u) \cdot A \quad [\text{N}] \quad (2)$$

dove:

- σ_0 pressione atmosferica [Pa];
- σ_u pressione del vuoto applicata [Pa];
- A area della superficie di contatto tra la ventosa e l'oggetto [m^2].

Come precedentemente detto, gli atractive gripper, necessitano di una costante e continua alimentazione, di conseguenza il consumo di potenza avviene sia durante la presa e sia durante la fase di ritenuta. Facendo il rapporto tra la potenza assorbita (P) e la pressione di ritenuta (σ) è possibile ricavare la portata volumetrica (Q).

Una volta effettuata la presa, inizia il movimento del robot, in questa maniera entrano in gioco numerosi altri effetti, come la deformazione della calotta che comportano una diminuzione dell'effettiva forza di presa. L'espressione seguente tiene in considerazione tutti gli effetti negativi.

$$F = (\sigma_0 - \sigma_u) \cdot A \cdot n \cdot \eta \cdot z \cdot \frac{1}{f_s} + mg \quad [\text{N}] \quad (3)$$

- n coefficiente di deformazione (0.6÷0.9)
- f_s coefficiente di sicurezza ($2 \leq f_s \leq 3$)
- z numero di suction cup
- η efficienza del sistema

La forza di presa dipende dall'area attiva che a sua volta è funzione della geometria della calotta. In condizioni statiche o lentamente variabili, il diametro (d) di una suction cup circolare è dato dalla seguente relazione:

$$d = 11.3 \sqrt{\frac{m \cdot g}{\sigma_u \cdot z}} \quad [\text{mm}] \quad (4)$$



FIG. 11 Esempi di ventose a vuoto

Nelle ventose il vuoto viene generato solamente comprimendo la calotta di materiale morbido contro una superficie liscia o leggermente curva dell'oggetto. La compressione può essere manuale, meccanica, ad azionamento pneumatico oppure elettrico. In questo caso la presa non dipende da nessuna fonte di alimentazione quindi viene considerata sempre sicura anche se eventuali perdite non possono essere compensate. Il rilascio dell'oggetto può avvenire tramite una valvola sulla calotta che permette la compensazione con la pressione atmosferica¹. Il limite principale è dovuto alla necessità di avere una superficie piana o leggermente curvata, non è quindi possibile afferrare oggetti con geometrie complesse.

Gripper magnetici

I gripper ad azione magnetica consentono solamente la presa di oggetti ferromagnetici.

Si dividono in due tipi:

- a magnete permanente (forma passiva): utilizzano magneti di forma e caratteristiche appositamente disegnate. Il magnete viene avvicinato o posto a contatto con l'oggetto permettendone la presa. Il rilascio avviene meccanicamente mediante il distanziamento forzato dei componenti. Una soluzione può essere quella di deviare il flusso magnetico ruotando la calamita oppure utilizzando un sistema pneumatico a leve che, agendo sul pezzo o sul magnete, ne permette il distacco.

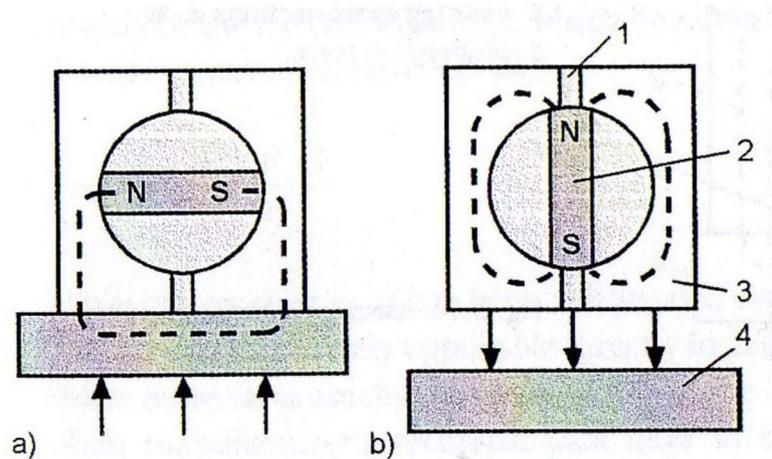


FIG. 12 Controllo meccanico del flusso magnetico. a) presa, b) rilascio.
1) supporto, 2) magnete permanente, 3) alloggiamento metallico, 4) oggetto.

Il vantaggio di questa tipologia di gripper è la capacità di mantenere la forza di presa in modo continuo anche in assenza di alimentazione. Rimane però il problema della magnetizzazione residua sull'oggetto che può provocare l'attrazione di altri materiali ferromagnetici. Questa attrazione può essere limitata rivestendo la superficie magnetica della pinza con un sottile strato di materiale polimerico. Un altro problema potrebbe essere causato dall'anticipo della presa ancora prima che la pinza venga in contatto con l'oggetto, causando un impatto tra oggetto e gripper che qualche volta può provocare il danneggiamento dei componenti.

- elettromagnete (forma attiva): il campo magnetico è generato elettricamente da una o più bobine avvolte su nuclei ad alta permeabilità magnetica. La forza di prensione può essere calcolata (nella sua forma più semplice) usando le formule elettromagnetiche convenzionali.

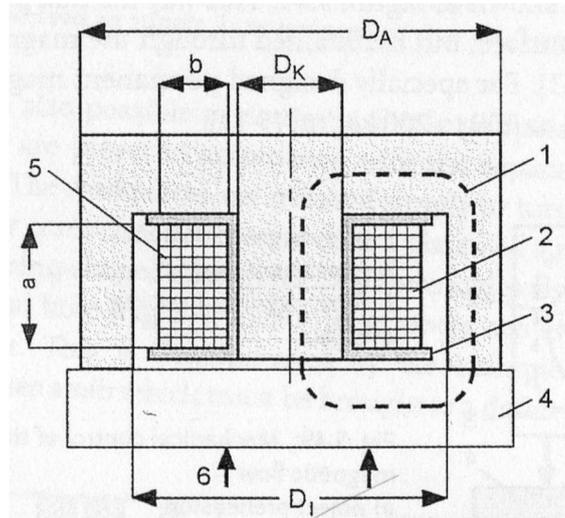


FIG. 13 Gripper elettromagnetico¹

La forza di presa che si genera è la forza data dalla seconda legge elementare di Laplace^{1,5}:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad [\text{N}] \quad (5)$$

- B campo magnetico [T]
- I intensità di corrente elettrica attraverso il conduttore [A]
- l lunghezza del conduttore [m]

Nell'espressione del calcolo del campo magnetico si evince la diretta proporzionalità tra B e H, mentre nella realtà si dovrebbe tenere conto della saturazione del mezzo ferromagnetico. La formula (7) permette di calcolare il campo di intensità magnetica H conoscendo il numero di avvolgimenti N, la corrente I e la lunghezza del percorso magnetico nel nucleo p.

$$H = \frac{N \cdot I}{p} \quad [\text{A/m}] \quad (6)$$

Unendo le formule (6),(7) possiamo ricavare la forza di presa in funzione solamente della corrente e di alcuni parametri di forma:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot I^2 \cdot l}{2p} \quad [\text{N}] \quad (7)$$

Dividendo per l'area è possibile ottenere la pressione esercitata sull'oggetto:

Per avere un'elevata forza di presa è necessario aumentare l'intensità del campo magnetico, ad esempio aumentando N, ciò però causa un aumento della costante di tempo τ con relativo aumento dei tempi di risposta.

Gli elettromagneti possono lavorare sia con corrente continua che con corrente alternata, ciò non cambia il fatto che sugli oggetti rimane una residua magnetizzazione che può causare ritardi nei tempi di risposta o problemi nelle lavorazioni successive.

Gripper elettroadesivi

In questa tipologia di gripper è il campo elettrico a fornire la necessaria forza per la movimentazione ed il sostegno di un oggetto, sfruttando i campi elettrostatici.

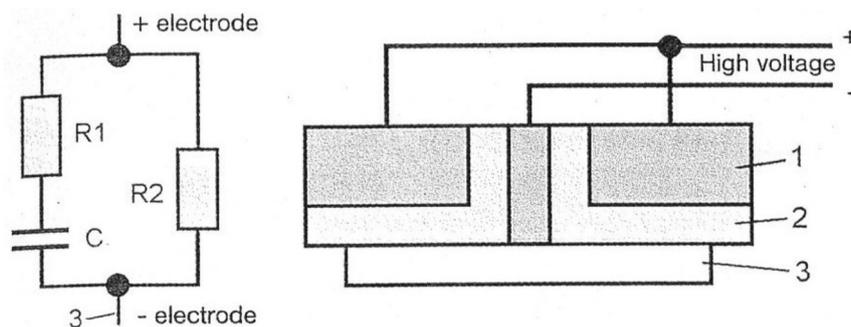


FIG. 14 Schema di un gripper elettroadesivo¹

Questa tipologia di gripper ha trovato grande impiego soprattutto nell'industria dei wafer di semiconduttori durante le lavorazioni.

Il dispositivo è composto da uno o più condensatori, in particolare nella FIG.14 il dispositivo è realizzato con l'utilizzo di due resistenze ed un condensatore. Dall'elettrostatica sappiamo che il valore della capacità di un condensatore piano con armature di area A distanti d con costante dielettrica relativa ϵ_r è data da:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad [F] \quad (8)$$

- ϵ_0 permeabilità magnetica del vuoto

Si può ottenere la forza di presa in funzione unicamente della differenza di potenziale applicata V e di parametri di forma:

$$F = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A \cdot V^2}{2 \cdot d^2} \quad [\text{N}] \quad (9)$$

Aumentando la differenza di potenziale ai capi del condensatore o aumentando la capacità è possibile incrementare la forza di presa. Come nei gripper magnetici, aumentando la forza, aumenta anche la costante di tempo e quindi il tempo di reazione.

Questa tecnica consente di afferrare sia oggetti ferromagnetici che oggetti non ferromagnetici, anche se la forza è minore rispetto a quella esercitata dai gripper magnetici.

Uno svantaggio è rappresentato dalla tensione di alimentazione molto elevata.

1.2.4 Contigutive gripper

Questa categoria di organi di presa prevedono un contatto diretto tra gripper ed oggetto da afferrare, creando una continuità tra la superficie attiva del gripper e quella dell'oggetto con l'ausilio di specifici materiali. In base al tipo di materiale d'apporto impiegato si possono distinguere due categorie di prese: la termoadesione e l'adesione via materiali chimici. [1]

Termoadesione

In questa tecnologia la termoadesione viene realizzata con l'inserimento di piccole gocce d'acqua tra la superficie attiva del gripper e la superficie dell'oggetto e poi congelate da un'improvvisa applicazione di azoto o biossido di carbonio liquido. Lo strato di ghiaccio che si forma funge da strato adesivo (ice bridge); la superficie congelata è mantenuta circa a -10° C. Per rilasciare l'oggetto basta riscaldare lo strato di ghiaccio.

Questa tecnica viene principalmente usata per i materiali che non soffrono le variazioni di temperatura, come ad esempio i materiali tessili.

La forza di presa effettiva può così essere calcolata:

$$F_{ad} = \frac{W_{sl}^{ad} \cdot A_r}{\delta} = \frac{\sigma_{lg}(1 + \cos\theta) \cdot A_r}{R_z} \quad [N] \quad (10)$$

dove:

- W_{sl}^{ad} lavoro di adesione [J/m²]
- δ spessore dello strato di materiale termico [m]
- ϑ angolo di contatto al punto triplo (coesistenza fase solida liquida e gassosa)
- A_r area effettiva di contatto [m²]
- R_z profondità media delle asperità della superficie [m]
- $\sigma_{gs}, \sigma_{sl}, \sigma_{lg}$ stress meccanici delle interfacce [N/m²]

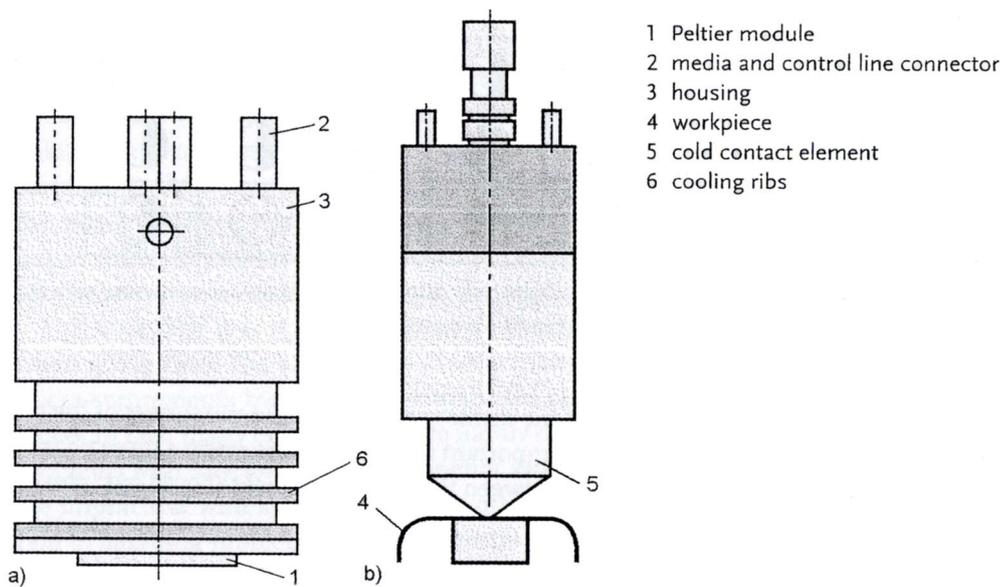


FIG. 15 Esempio di gripper termoadesivo¹

Adesione chimica

I sistemi a adesione chimica usano strati di materiale adesivo creato specificatamente per l'applicazione.

I materiali utilizzabili come adesivi sono numerosi. L'importante, ai fini della presa robotica, è soddisfare due requisiti: garantire un'adeguata forza di adesione e rendere facile e veloce la sostituzione quando le proprietà di adesione cessano. Le ultime ricerche chimiche sui polimeri hanno portato allo sviluppo di un materiale riutilizzabile (*Permatack*) che elevata forza adesiva.

Uno studio eseguito da Hall in *Feeding and Handling Aspects of an Automated System for Garment Manufacture* quantifica la perdita di adesività e quindi della forza di presa con la seguente equazione:

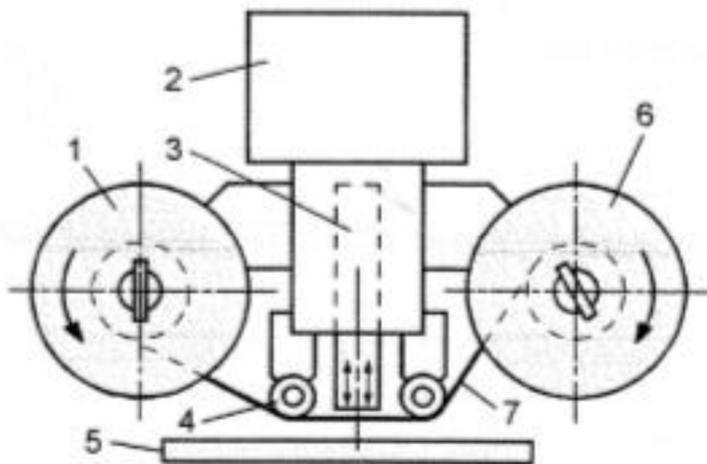
$$F = \alpha \cdot N^{-k} \quad [\text{N}] \quad (11)$$

dove:

- α costante dipendente dalla superficie di contatto e dalla contaminazione del materiale
- N numero di operazioni di rilascio
- k costante dipendente dal materiale ($k > 0$ in ambienti puliti)

Come descritto in [1] la pressione σ_0 è legata al tempo di adesione. La pressione iniziale σ_i diminuisce esponenzialmente in funzione del tempo di adesione t_0 .

Durante la storia sono stati depositati molti brevetti su questa tipologia di gripper, rimangono comunque due grandi svantaggi: il grande e costoso meccanismo per incrementare il nastro dopo ogni ciclo e la sostituzione periodica del nastro, la quale comporta uno stop nel ciclo di produzione con annessa perdita di produzione.



1. Bobina di alimentazione con molla
2. Attuatore
3. Slitta
4. Guida a nastro
5. Oggetto piano
6. Avvolgimento robotizzato
7. Nastro adesivo

FIG. 16 Gripper a nastro adesivo

1.3 Classificazione in base al tipo di utilizzo

Questa classificazione è legata al tipo di lavoro che i gripper possono svolgere:

- **Pinze per l'assemblaggio:** sono dotate di sensoristica di bordo per svolgere le operazioni con maggiore precisione come richiesto dall'operazione di assemblaggio, in modo tale da riuscire a compiere piccole variazioni in base alla necessità.
- **Pinze per la manipolazione:** utilizzate per portare un oggetto da un punto all'altro. La precisione richiesta nel compiere l'operazione è minore ma serve una maggiore forza di serraggio per evitare la caduta del componente e quindi un danneggiamento. Dunque, la forza deve essere in grado di vincere le inerzie legate al movimento del robot e la forza di gravità.

1.4 Classificazione in base al tipo di attuazione

Si definisce attuatore, quella parte del robot, che permette di movimentare i link, e quindi di attuare il moto desiderato. Esso è in grado di convertire una forma di energia primaria non controllata (elettrica, pneumatica, idraulica, potenziale, cinetica) in energia meccanica utile al funzionamento del robot generando forze e movimenti.

Gli attuatori sono in genere racchiusi nell'intelaiatura de robot e devono essere caratterizzati da compattezza e leggerezza, questo per ridurre ingombri, inerzia, etc.

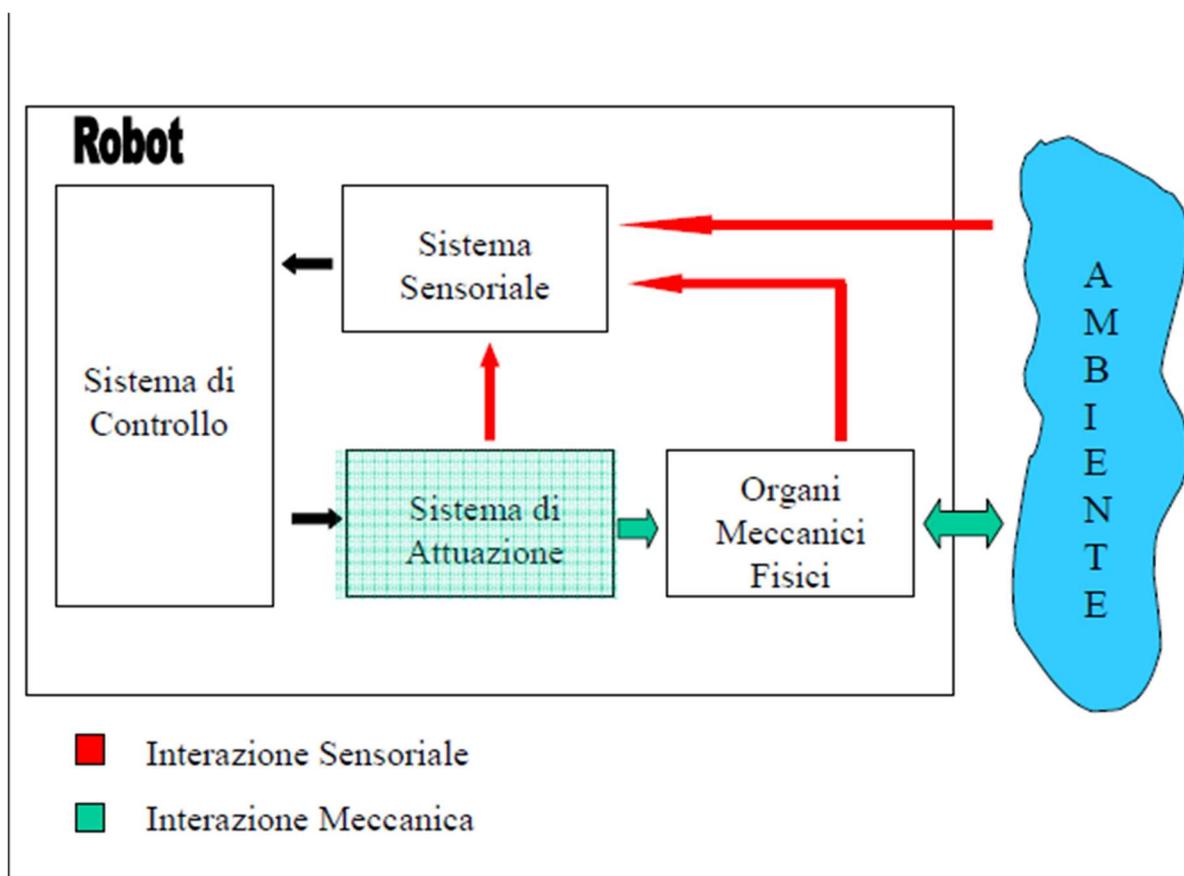


FIG. 17 Gestione attuazione robot

L'attuatore è composto da:

- **Motore:** trasforma l'energia primaria in energia meccanica
- **Riduttore:** permette di modificare i parametri cinematici/dinamici
- **Trasmissione:** trasmette il movimento dal riduttore fino al meccanismo finale

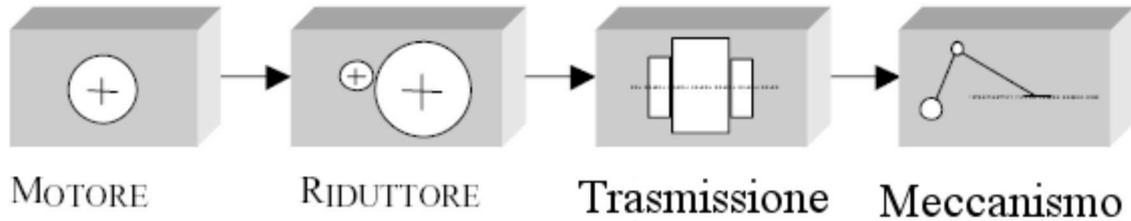


FIG. 18 Schema di un attuatore

Gli attuatori possono essere classificati in base al tipo di energia utilizzata:

- **Idraulica:** utilizzano come fluido di attuazione un liquido in pressione
- **Pneumatica:** utilizzano come fluido di attuazione aria compressa
- **Elettrica:** moto di elettroni da un alto a un basso potenziale elettrico

Attuatori idraulici lineari

Questa tipologia di attuatori utilizza come vettore di energia un fluido oleoso che con buona approssimazione è considerabile come incompressibile; ciò comporta:

- Possibilità di generare forze molto elevate
- Possibilità di seguire leggi di moto richieste con alta precisione, essendo l'olio un fluido incompressibile

Sono maggiormente dispendiosi rispetto a quelli pneumatici ma garantiscono potenze maggiori, anche con organi motori di dimensioni ridotte. Il loro maggiore impiego è nella costruzione di macchine che devono sollevare oggetti pesanti.



FIG. 19 Attuatori idraulici lineari

Attuatori pneumatici lineari

Utilizzano come fluido di energia l'aria compressa con vantaggi in termini di pulizia, sicurezza e insensibilità alle variazioni termiche. Però non si possono raggiungere pressioni troppo elevate, come negli attuatori idraulici, né si possono sviluppare forze eccessive. Gli svantaggi sono costituiti dalla comprimibilità dell'aria che rende difficile i controlli di posizione, dalla rumorosità del compressore e dalla necessità di aumentare la dimensione dei cilindri per ottenere forze maggiori. Questa tipologia di attuatori è utilizzata in particolare per applicazioni molto semplici, con manipolatori a due o tre gradi di libertà e per le esecuzioni ripetitive di tipo "pick and place".



FIG. 20 Attuatori pneumatici lineari

Attuatori elettrici

Un attuttore elettrico (motore elettrico) può essere considerato un trasformatore che converte l'energia elettrica in energia meccanica.

Per tutti i motori elettrici è valido il seguente schema:

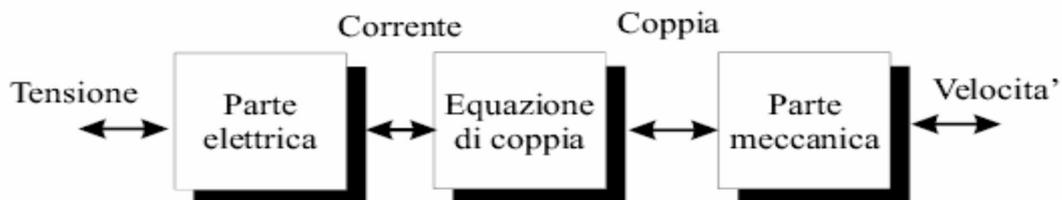


FIG. 21 Schema motore elettrico

I motori possono realizzati in diverse tipologie e quindi avere diversi tipi di funzionamento, possono essere classificati in:

- **Motore elettrico a collettore (corrente continua):** costituito da due circuiti elettromagnetici che interagiscono tra di loro per la generazione della coppia motrice.
- **Motore elettrico a magneti permanenti:** il circuito di eccitazione viene sostituito da magneti permanenti per ottenere motori ad elevate prestazioni nel campo delle piccole potenze.
- **Motore sincrono a magneti permanenti (Brushless):** è una macchina a corrente alternata caratterizzata dall'assenza di spazzole.

Questo documento non si occupa prevalentemente degli attuatori quindi per maggiori informazioni e dettagli è possibile consultare [7].

Nella tabella (2) successiva si riassumono i principali vantaggi e svantaggi delle tipologie di attuatori sopra citati.

TIPO	VANTAGGI	SVANTAGGI
Pneumatico	<ul style="list-style-type: none"> • Funzionamento semplice e affidabile sui sistemi di controllo discreto • Completa compatibilità in ambienti esplosivi e deflagranti • Assenza di perdite inquinanti • Elevata velocità di rotazione e di movimento lineare • Semplice regolazione della forza e della velocità • Collegamenti molto semplici 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessità di un impianto di compressione e rete di distribuzione • Rumorosità • Forza e coppia massime limitate • Necessità di un riduttore per ottenere coppie alte • Bassa precisione e dinamica nei sistemi di posizionamento
Idraulico	<ul style="list-style-type: none"> • Potenza specifica molto alta • Forza e coppie massime elevate • Possibilità di utilizzo in ambienti esplosivi e deflagranti • Buona precisione e dinamica nei sistemi di posizionamento • Semplice regolazione della forza e della velocità 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessità di centrale oleodinamica e collegamenti complessi • Rumorosità • Perdite inquinanti • Bassa velocità di rotazione e di movimento lineare
Elettrico	<ul style="list-style-type: none"> • Facilità di alimentazione e trasmissione dell'energia • Elevata velocità di rotazione e movimento lineare • Buona precisione e ottima dinamica nei sistemi di posizionamento • Assenza di perdite inquinanti • Collegamenti semplici 	<ul style="list-style-type: none"> • Complessa regolazione della forza e della velocità • Necessità di un riduttore per ottenere coppie elevate • Limitazioni di utilizzo in ambiente esplosivo

TABELLA 2: Vantaggi e svantaggi dei principali sistemi di attuazione⁸

Capitolo 2

2.1 Gripper prismatico per uso aereo

Data la sempre maggiore diffusione di veicoli a guida autonoma come droni militari o ad esempio quad per uso cinematografico, i quali devono interagire con l'ambiente esterno trovandosi nella situazione di afferrare oggetti, si è rivelata indispensabile la progettazione di un sistema di presa in grado di essere applicato su questi dispositivi e di essere comandato a distanza.

Attualmente la maggior parte della ricerca sui gripper si è concentrata sulla presa e sulla movimentazione per robot fissi o di maggiori dimensioni rispetto all'oggetto da afferrare. Inoltre, gli algoritmi utilizzati nei casi comuni non sono replicabili su dispositivi come droni, robot marini o spaziali.

Questa tipologia di robot si trova nella condizione di dover affrontare perturbazioni dovute a cause esterne e difficoltà a mantenere la stessa posizione per molto tempo. Per ovviare a questi problemi è stato progettato un gripper, il **PRISMATIC-REVOLUTE-REVOLUTE JOINT HAND**⁹, in grado di essere applicato e di funzionare su questi dispositivi. Questo gripper offre la possibilità di afferrare una vasta gamma di oggetti, di forma e dimensioni diverse. Nel corso della trattazione verrà mostrato il design del gripper, la sua cinematica e la sua valutazione finale, mostrando i range di forza che è in grado di applicare, l'errore e la tolleranza nel posizionamento.

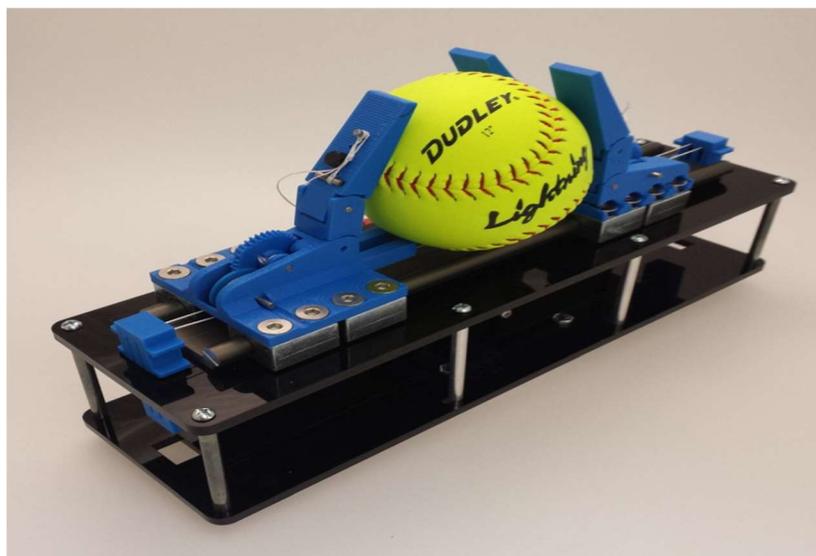


FIG. 22 Modello B della mano mentre afferra una palla da softball⁹

Nella FIG. 17 vediamo il prototipo del gripper mentre sta afferrando una palla da softball. Le articolazioni prismatiche consentono alle dita di adattarsi alle dimensioni dell'oggetto, mentre le articolazioni rotanti consentono alle dita di avvolgersi attorno all'oggetto.

2.1.1 Design e cinematica

Il design di questo gripper è stato dettato dalla necessità di combinare elementi di collegamento revoluti e prismatici, come mostrato nella FIG. 23.

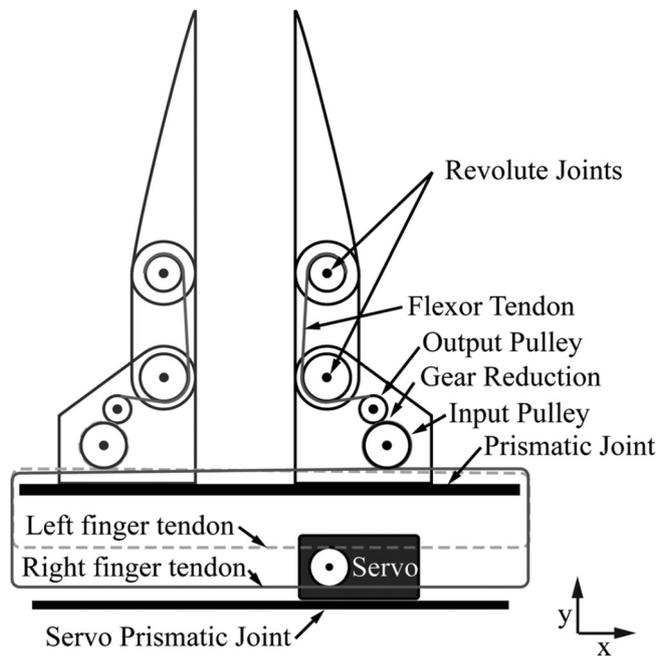


FIG. 23 Diagramma della cinematica delle dita⁹

La giustificazione dietro questa configurazione è delineata in FIG: 24: le configurazioni tipiche della mano producono regolarmente una forza esterna sugli oggetti durante la presa, che causerebbero un allontanamento del dispositivo dall'oggetto, invece con questa tipologia di configurazione si applicano solo forze interne sull'oggetto durante la presa. Questa combinazione di collegamenti prismatici e revoluti permette al gripper un range di dimensioni variabili consentendogli di adattarsi all'oggetto. Per quanto riguarda l'attuazione, volendola rendere il più semplice possibile, questa è ottenuta mediante l'utilizzo di un singolo attuatore, che esercita una forza (F_T) sul giunto prismatico e delle coppie proporzionali ($\tau = F_T/R$) sulle articolazioni rotanti. A differenza di una mano comune puramente revoluta, la cinematica dell'articolazione P-R-R e la configurazione iniziale delle dita, cioè perpendicolari al palmo, assicura che il movimento della punta delle dita sia parallelo o verso il palmo della mano. Questo vincolo di traiettoria della punta delle dita provoca delle forze di contatto sull'oggetto afferrato che durante la chiusura della

mano spingeranno ulteriormente l'oggetto nel palmo, riducendo così la possibilità di espellere l'oggetto prima che si sia ottenuta una presa sicura. Allo stesso modo, questa traiettoria nel movimento delle dita evita che, durante l'attuazione, la mano possa accidentalmente colpire l'ambiente circostante causando un allontanamento della mano dall'oggetto da afferrare o generare forze di reazione impreviste sul veicolo.

Inoltre, questa configurazione riduce lo sforzo laterale applicato sul veicolo durante la fase di presa.

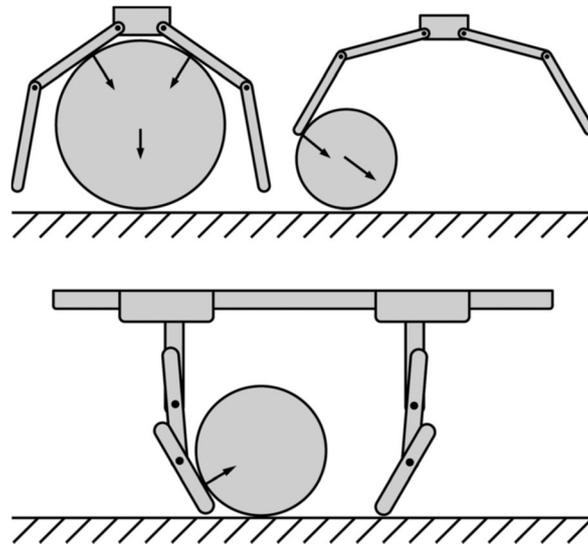


FIG. 24 Diagramma della cinematica delle dita⁹

2.1.2 Azionamento

Questa mano è progettata per essere azionata in modo tale che la forza dell'attuatore sia equamente ripartita tra ciascun dito e proporzionalmente ai giunti prismatici e rotanti. Inoltre, in base ai risultati dell'ottimizzazione del momento, se una forza specifica viene applicata al giunto prismatico, le coppie applicate ai giunti rotanti sono uguali. Questo schema di attuazione assicura che le dita centrino l'oggetto indipendentemente da dove è posizionato lungo l'articolazione prismatica e che una volta che le dita entrano in contatto, si avvolgono attorno all'oggetto, tirandolo più a portata di mano.

La forza in uscita è quindi calcolabile come espresso nella formula (13):

$$F_{OUT} = \frac{(N_2/N_1)}{(r_2/r_1)} \cdot F_{IN} \quad [N] \quad (12)$$

Dove:

- N_1, N_2 numero dei denti degli ingranaggi
- r_1 raggio puleggia ingresso
- r_2 raggio puleggia di uscita

L'estensione delle articolazioni rotanti di ciascun dito si ottiene tramite delle molle a torsione debole (0,0145 Nm/rad) incapsulate nei giunti. Sono state selezionate delle molle morbide per ridurre al minimo la quantità di forza richiesta all'attuatore per superare le molle durante la presa. A differenza delle articolazioni rotanti, quelle prismatiche vengono attuate mediante un tendine antagonista, come mostrato in FIG. 23.

2.1.3 Costruzione

Il corpo della mano in acrilico viene realizzato mediante taglio laser, con l'aggiunta di un distanziatore in acciaio e complementi in plastica acrilonitrile-butadiene-stirene (ABS). Le dita sono ottenute mediante stampa 3D. I giunti rotanti sono implementati con perni di centraggio in acciaio inseriti a pressione. Una molla di torsione in acciaio viene utilizzata come molla di richiamo per i giunti rotanti in ogni dito. Questa molla è precaricata per resistere alla flessione delle dita fino al contatto con l'oggetto. Il riduttore di ogni dito è ottenuto mediante Nylon stampato e tamburi stampati in 3D che ruotano su perni di acciaio in un alloggiamento stampato in 3D.

2.1.4 Valutazione della pinza

Questa pinza è stata valutata in modi differenti così da poterla confrontare con altri progetti e stabilirne la sua idoneità nell'utilizzo per le attività di presa aerea. Innanzitutto, quantifichiamo gli aspetti sul

comportamento nella presa misurando e forze di reazione dell'oggetto e la traiettoria dell'oggetto dal contatto iniziale fino all'ottenimento della presa.

La prima prova è stata effettuata mantenendo sia la pinza che l'oggetto fissi uno rispetto all'altro, questa condizione di prova permette di misurare la massima forza possibile che il veicolo può subire quando si effettua una presa su un oggetto di grandi dimensioni.

In seguito, è stata misurata la traiettoria dell'oggetto non vincolato mentre viene afferrato dalla mano fissa nello spazio.

Infine, per dimostrare le abilità di presa della mano quando è minimamente vincolata, come nel caso in cui è collegata ad un UAV (aeromobile a pilotaggio remoto), le viene fatto afferrare un set di oggetti.

I risultati complessivi mostrano una variabilità legata ad una serie di fattori dovuti al design della mano e all'errore di posizionamento iniziale. Il successo o il fallimento, quando si afferrano gli oggetti, dipendono principalmente da come il contatto iniziale fa muovere l'oggetto. La presa di oggetti rotondi fallisce quando il contatto iniziale li fa rotolare fuori dalla presa. Allo stesso modo, le prese degli utensili nella posizione di target falliscono quando il contatto iniziale fa scorrere o ruotare l'oggetto in una posizione indesiderata rispetto alla mano. Maggiore è la dimensione dell'oggetto più facile è la presa, poiché può avvenire da posizioni diverse ed il loro maggiore peso li rende meno propensi a spostarsi a seguito del contatto con le dita.

Concludendo, questa pinza ha il potenziale per essere utilizzata dai dispositivi UAV, ma è solo un possibile approccio alle sfide poste dalla presa aerea, ottenuta mediante l'utilizzo dell'attuale tecnologia nella costruzione di *End Effectors*.

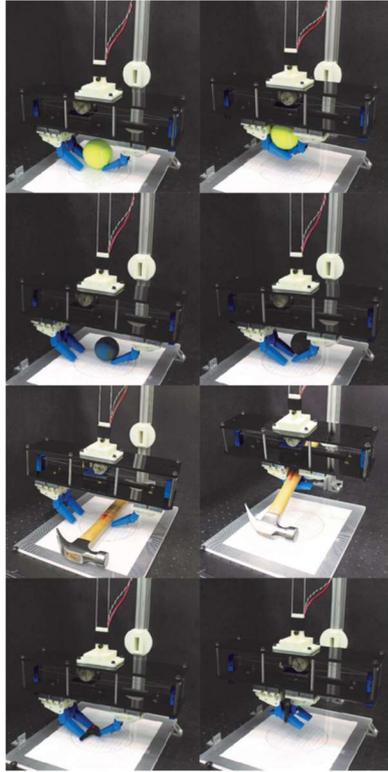


FIG. 25 Esempio di prese avvenute con successo (palla da tennis e martello) e di prese fallite (palla morbida e piccolo piolo)⁹

Capitolo 3

3.1 Inverted L-Arm¹¹

Questa tipologia di gripper è stata sviluppata per un uso in ambito medico, ma la sua progettazione e realizzazione ha trovato soluzioni che possono essere riprodotte in altri gripper per uso industriale.

La mano, come citato in [10], è una struttura anatomica complessa costituita da 27 ossa, 123 legamenti, 29 giunti e 34 muscoli. La complessità della sua anatomia le permette un'ampia capacità di compiere azioni quotidiane che richiedono coordinazione e destrezza. Quello che questo gripper intende fare è sfruttare i vantaggi dei meccanismi cedevoli (o conformi), cioè meccanismi che raggiungono il movimento attraverso la flessione, per la creazione di strumenti per la chirurgia minimamente invasiva.

Usare le flessioni per ottenere un movimento presenta delle sfide, tre delle quali sono particolarmente rilevanti:

- i meccanismi cedevoli non funzionano in modo adeguato a compressione;
- per certi intervalli di movimento rotazionale le sollecitazioni a flessione delle dita sono considerate proibitive per i materiali attualmente utilizzati;
- i cavi per la movimentazione, che si attaccano in punti fissi, variano notevolmente il vantaggio meccanico durante l'attivazione.

In questo elaborato vedremo come sono stati risolti questi problemi durante la fase di progettazione e realizzazione.

3.1.1 Progettazione

Il meccanismo in considerazione è costituito da due pinze a L contrapposte, bloccate su una base di flessione. La flessione delle pinze consente loro di agire in modo indipendente. Il meccanismo risulta essere molto semplice ma capace di aumentare le prestazioni degli attuali strumenti, migliorando il range di deflessione ed aggiungendo gradi di libertà ulteriori. Un basso numero di componenti consente inoltre di

diminuire le dimensioni del gripper fino a scale millimetriche, mantenendo comunque le funzioni e le prestazioni.

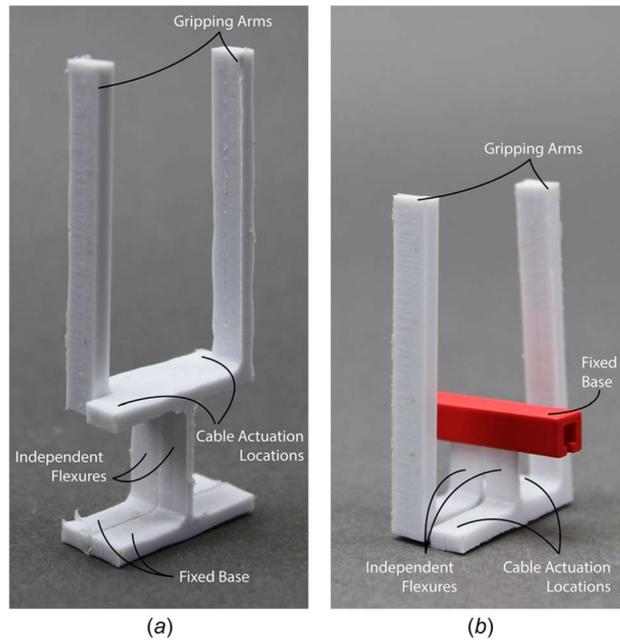


FIG.26 Inverted L-Arm¹¹

Il dispositivo ha due gradi di libertà, uno relativo al polso e uno alla pinza.

Come mostrato nella FIG. 27 le pinze ruotano indipendentemente attorno allo stesso asse di rotazione. La puleggia e le pinze sono rigidamente connessi e possono essere realizzati con un unico pezzo.

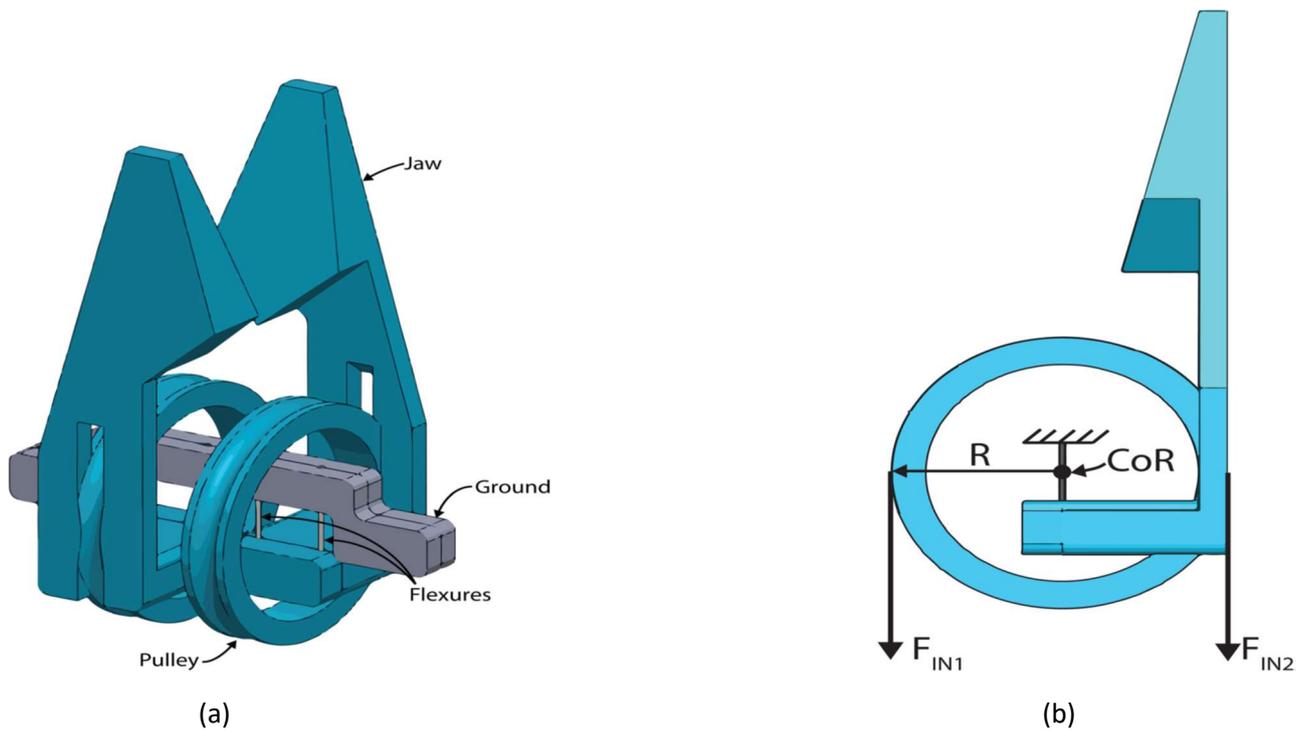


FIG. 27 (a) Inverted L-Arm (b) Schematizzazione della singola pinza

3.1.2 Carichi di compressione

La maggior parte dei robot minimamente invasivi utilizzati in campo medico presentano lo strumento chirurgico all'estremità dei grippers, questo anche grazie ad un precarico di compressione, ma questo potrebbe portare ad una curvatura dei grippers in caso di un carico troppo elevato.

Utilizzando il "metodo dell'inversione¹²" è possibile variare il design del braccio ad L (FIG. 1b). Questo metodo elimina il verificarsi di instabilità, ponendo gli elementi flessibili normalmente in compressione in trazione. Ciò che nella FIG. 1a comporta compressione, nella FIG. 1b porta alla trazione.

Generalmente, il meccanismo è costituito, dal basso verso l'alto, da una base, elementi flessibili e le pinze ad L (FIG.1a). In questo modo applicando un azionamento verso il basso, su entrambi gli estremi del segmento orizzontale delle pinze agirebbe una forza che porrebbe i flessibili in compressione.

Invece, nel meccanismo della FIG. 1b, descrivendolo dal basso verso l'alto si ha, le pinze ad L, il flessibile ed il collegamento al suolo (fixed base). Con questo design si ovvia al problema dell'inadeguatezza in caso di compressione.

3.1.3 Stress dovuti ad elevate deformazioni

Per ovviare al problema derivante dalle elevate deformazioni durante l'esercizio sono applicabili tre possibili modifiche che riguardano la geometria, le condizioni al contorno o le proprietà del materiale.

Queste tre condizioni possono essere variate indipendentemente per personalizzare una flessione, rendendola conforme ad un'applicazione specifica.

La geometria ad L è stata progettata per ridurre al minimo lo stress da flessione pur fornendo un'adeguata resistenza a trazione. La flessione del braccio ad L presenta condizioni al contorno per cui un lato flessibile è fissato a terra mentre l'altro lato è fissato alla pinza in movimento.

I materiali candidati per la costruzione del braccio sono acciai inossidabili, titanio, vetro metallico e la lega Nickel-Titanio (NiTi). La scelta è ricaduta sulla lega NiTi per la sua capacità di subire elevati sforzi prima di cedere e per la sua resistenza ad un'ampia gamma di movimenti diversi. La scelta di questo materiale ha permesso il superamento della seconda sfida posta dai gripper flessibili, permettendo al meccanismo L-Arm di raggiungere le grandi deflessioni richieste negli strumenti di microchirurgia poco invasiva (MIS).

3.1.4 Vantaggio meccanico variabile

Queste braccia sono attuate mediante l'utilizzo di cavi e per ovviare al problema legato alla posizione fissa dei cavi è stata progettata l'integrazione di una puleggia per ogni pinza in modo da mantenere costante il momento sulle braccia una volta azionato il meccanismo.

Il cavo viene fissato nella parte alta della puleggia e avvolto su ciascun lato.

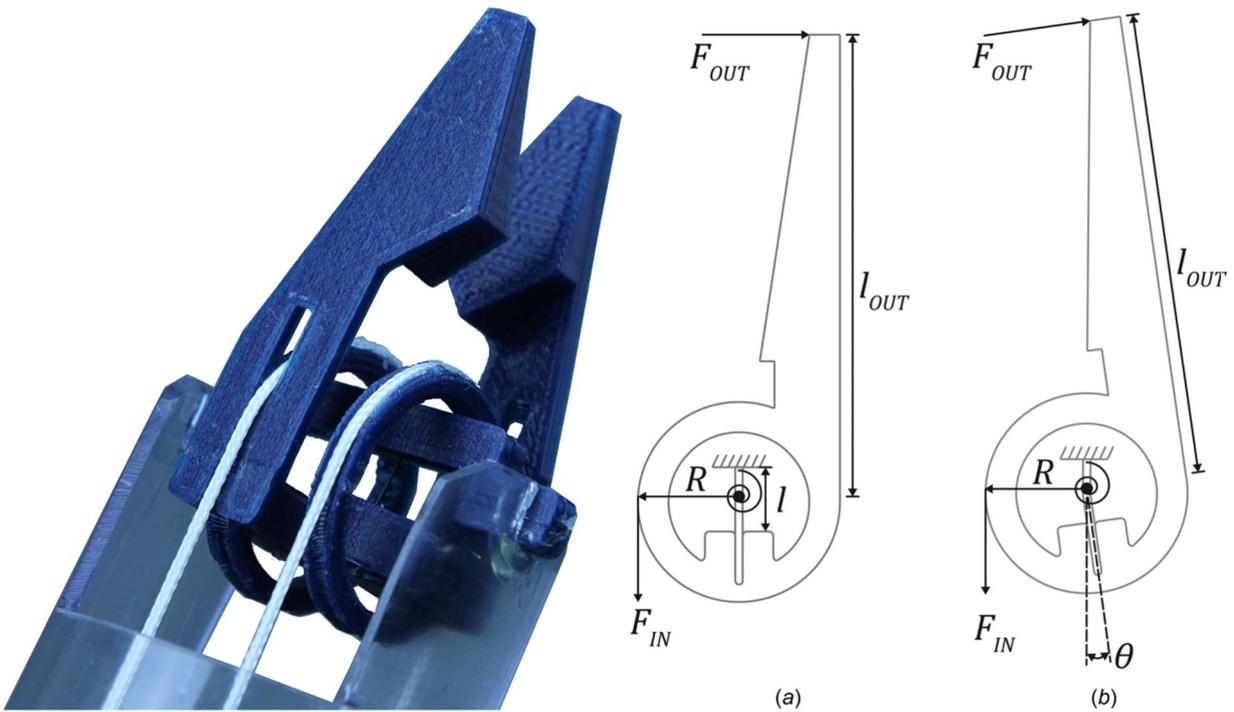


FIG. 28 Attuazione mediante cavi passanti su pulegge¹¹

Le forze F_{IN1} e F_{IN2} sono trasmesse dall'estremità posteriore dello strumento alle pinze tramite i cavi, posti in coppie contrapposte per trasmettere forze di trazione.

Questa soluzione integrata consente l'angolazione superiore a 90° per ogni pinza, sempre essendo in grado di azionare le pinze tramite il cavo.

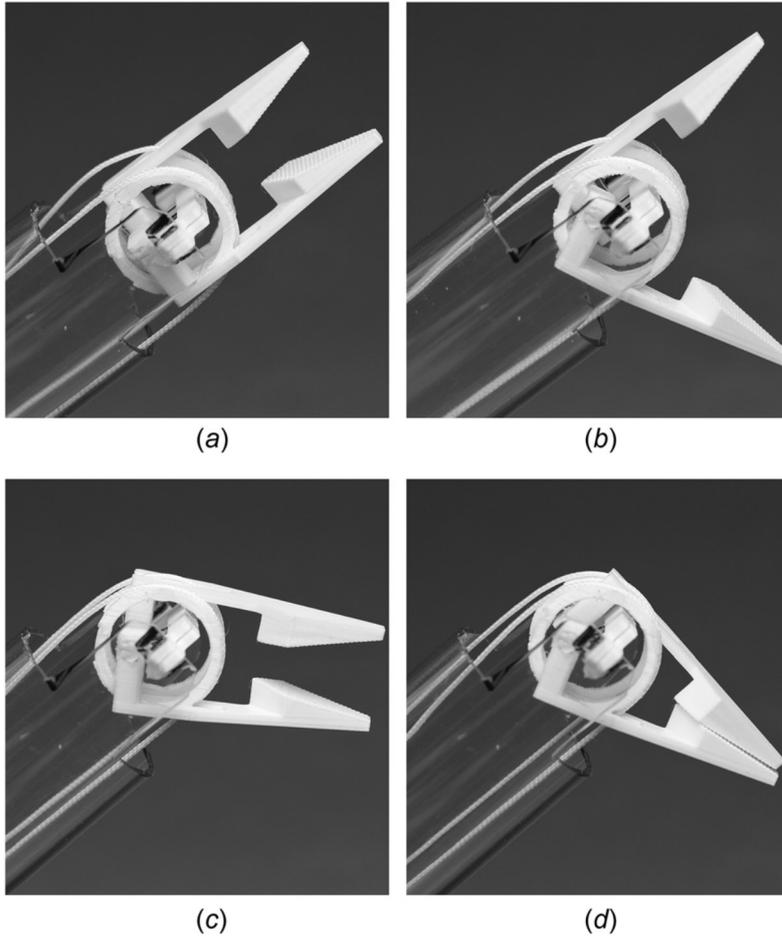


FIG. 29 Esempio di movimentazione dell'Inverted L-Arm

3.2 Soft robot hand¹³

Questo lavoro presenta una mano morbida capace di essere robusta e di afferrare ed identificare una vasta gamma di oggetti basandosi su misurazioni interne grazie ad un sistema combinato che autonomamente esegue le prese.

Il modulo del dito include, sulla punta, sensori di forza resistivi per il rilevamento dei contatti e, sensori di piegatura resistivi per misurare il profilo di curvatura del dito. I sensori di curvatura possono essere utilizzati per stimare la geometria dell'oggetto e quindi distinguere tra un insieme di oggetti afferrati.

Infine, un sistema a circuito chiuso utilizza una telecamera per rilevare le posizioni approssimative degli oggetti.

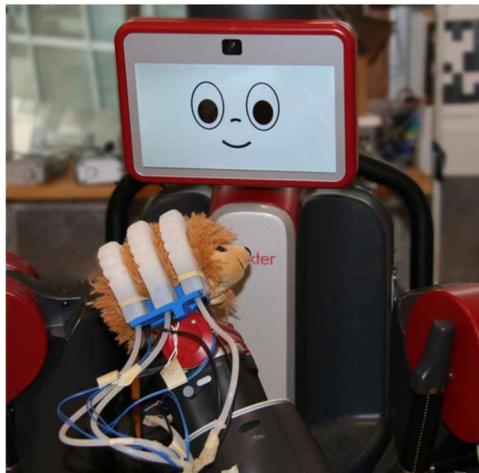


FIG. 30 Soft robotic hand mentre afferra un oggetto morbido¹³

I vantaggi legati all'utilizzo di mani robotiche morbide sono molteplici, infatti il design ed il materiale morbido di cui è costituita la mano conferisce una maggiore libertà di incertezza, sia per manipolare una vasta gamma di oggetti sia per conformarsi durante le interazioni con l'ambiente statico. Tradizionalmente, con mani robotiche rigide, per afferrare un oggetto, è necessario conoscere la geometria dell'oggetto da afferrare ed avere informazioni precise sulla posizione dell'oggetto. Con le mani morbide possiamo afferrare con una più semplice e intuitiva gestione dell'incertezza.

3.2.1 Dispositivo

Le dita sono modulari ed intercambiabili, permettendo così di realizzare diverse configurazioni di mano morbida in base alle esigenze (2,3,4 dita).

Ogni dito è stato progettato per assolvere ad ogni singolo compito sott'elencato:

- Capacità di rilevamento dello stato interno
- Rilevamento forza di contatto
- Curvatura costante in assenza di carico
- Altamente conforme e morbido per essere intrinsecamente più sicuro.

In particolare, è stato incorporato un sensore di piegatura resistivo su ogni dito, fissandolo nella parte inestensibile ed un sensore di forza all'estremità.

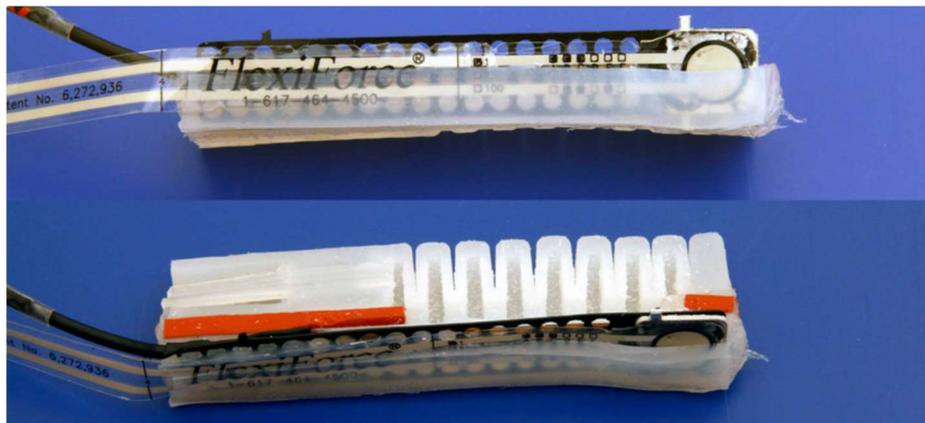


FIG.31 Illustrazione sensore resistivo e di forza¹³

3.2.2 Realizzazione

La fabbricazione del dito è ottenuta mediante un processo di colata in cera persa, lo stampo per la colata viene realizzato mediante la stampa 3D.

L'intero processo di produzione è rappresentato nella figura successiva.



(a) Modello con nucleo in cera



(b) Stampa per dito base



(c) Assemblaggio stampo per base dito



(d) Strato di vincolo



(e) Strato superiore per vincolo e
sensore



(f) Inserto

FIG. 32 Processo realizzazione di un dito¹³

3.2.3 Attuazione

Esistono diversi approcci per l'attuazione delle dita di una mano morbida. Una caratteristica dei soft-robot è che i sistemi attuatori sono integrati all'interno e distribuiti in tutto il corpo.

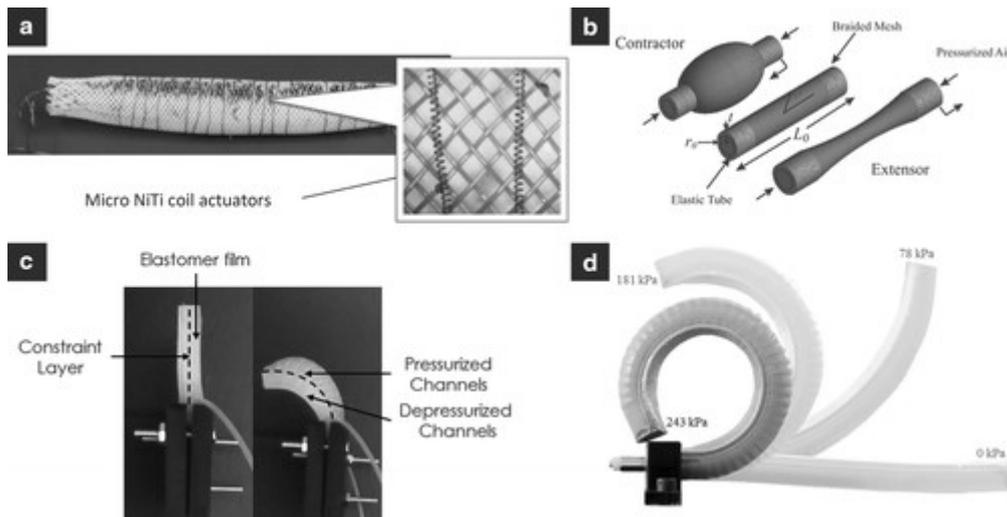


FIG. 33 Esempi di attuazione¹⁴

I principali tipi di attuatori, come descritto in [14] sono:

- ATTUATORI IN LEGA A MEMORIA DI FORMA:** il principio operativo si basa dietro la tecnologia della lega a memoria di forma (SMA) ed il filo di Nickel-Titanio (NiTi) che si contrae sotto l'effetto Joule.
- MUSCOLI ARTIFICIALI PNEUMATICI:** si tratta di un tubo elastico gonfiabile circondato da una rete intrecciata. A seconda del modello di trama della rete intrecciata, l'attuatore può essere progettato per contrarsi o estendersi sotto la pressione di ingresso.
- ATTUATORI DI ELASTOMERO FLUIDO (FEAS):** sono attuatori composti da gomma a bassa durometria e azionati da un fluido a bassa pressione (3-8 psi). Possono essere progettati per estensione, contrazione o torsione. Pressurizzando il fluido intrappolato a scorrere nei canali interni agli strati di elastomeri si induce uno stress all'interno del materiale elastico producendo deformazione localizzata. Possono essere alimentati in modo pneumatico o idraulico.
- FIBRE RINFORZATE:** si tratta di FEA meno flessibili e rinforzati con fibre che si interpongono tra gli attuatori FEA puramente elastomeri e i PAM. Utilizzano pressioni più elevate (25-35 psi) e quindi producono forze maggiori.

3.2.4 Sensori

Entrambi i sensori sono resistivi, perciò come il sensore viene premuto o piegato, la resistenza del sensore cambia. A causa della costruzione del sensore, la relativa variazione di resistenza aumenta all'aumentare della curvatura, portando il sensore ad una migliore precisione e risoluzione quando il diametro diminuisce (diametro di un cerchio tangente al sensore di piega in ogni punto).

La relazione tra il diametro del dito ed il valore del sensore è descritta nella FIG. 34.

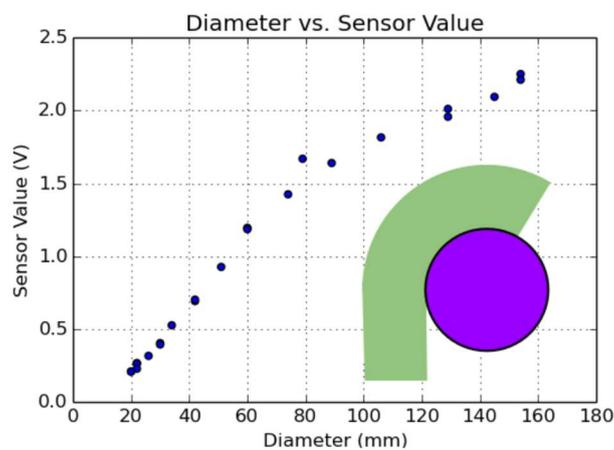


FIG. 34 Relazione tra diametro del dito e valore del sensore¹⁴



(a) Tubetto crema



(b) Bottiglia



(c) Arancia



(d) Tazza



(e) Pennarello



(f) Anello

FIG. 35 Esempi di presa¹⁴

Come mostrato nella figura precedente questo tipo di mano robotica è in grado di afferrare oggetti molto diversi tra loro sia nella forma che nella consistenza.

La differenza sostanziale tra una mano rigida ed una morbida sta nella capacità di afferrare oggetti delicati senza danneggiarli riuscendo ad adattare la forza e la forma durante la presa.

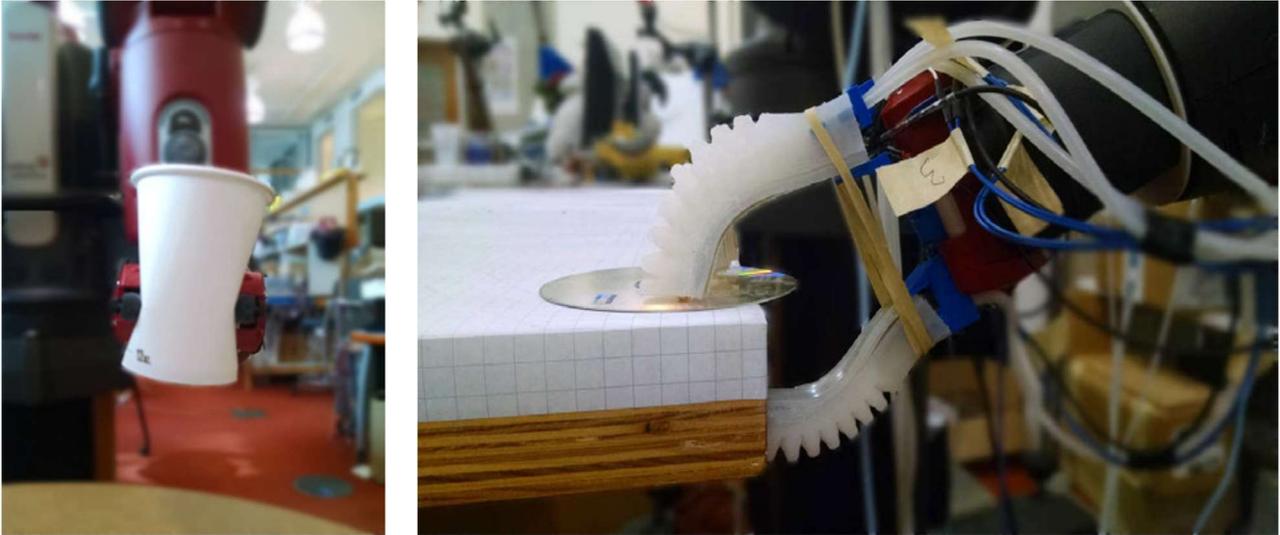


FIG. 35 Bicchieri di carta afferrato da una mano rigida e CD afferrato da una mano morbida¹⁴

Capitolo 4

4.1 Apprendimento auto-gestito mediante segmentazione dell'istanza¹⁵

L'industria di manipolatori di presa è basata sull'insegnamento manuale, cioè un manipolatore può afferrare l'oggetto in una posizione fissa dopo che gli è stato insegnato a farlo. Con lo sviluppo della visione artificiale molti metodi di presa basati sull'apprendimento e template matching sono diventati sempre più comuni. Per migliorare la stabilità e la precisione di presa è stato ideato un metodo basato sulla segmentazione delle istanze nel quale viene proposta una stima delle pose di apprendimento autogestito per afferrare oggetti con il manipolatore. L'approccio può essere diviso in tre fasi:

- Segmentazione dell'istanza;
- Stima della posizione;
- Trasformazione della posizione.

4.2 Segmentazione dell'istanza

Rispetto alla segmentazione semantica, la segmentazione dell'istanza distingue le istanze di oggetti. Un'istanza è un particolare oggetto di una determinata classe. Ogni istanza è separata dalle altre, ma condivide con gli altri oggetti della stessa classe le sue caratteristiche generali, attraverso la comune descrizione dei campi e dei metodi. In altre parole, include sia classificazione che segmentazione degli oggetti.

Per proporre un'istanza consapevole end-to-end di segmentazione semantica si uniscono il metodo della proposta di segmento ed il metodo di rilevamento degli oggetti in un sistema a segmentazione delle istanze detto "segmentazione dell'istanza completamente convoluzionale".

E' stato proposto il Mask R-CNN, cioè una rete neurale profonda volta a risolvere il problema di segmentazione delle istanze nell'apprendimento automatico o nella visione artificiale. Questo sistema presenta però svantaggi come la perdita di dettagli spaziali a causa del raggruppamento di oggetti che danneggia molto i risultati della segmentazione. Il sistema FCIS prevede classi, scatole e maschere contemporaneamente ed è completamente convoluzionale, cioè ispirata a processi biologici. Considerato che è ancora difficile per FCIS gestire i bordi delle istanze sovrapposte e la proposta di Mask R-CNN elimina gli spigoli vivi, la loro unione comporta una rete di segmentazione atta ad afferrare oggetti.

4.3 Stima della posizione

Si effettua con il rilevamento di oggetti e la segmentazione semantica per ottenere stime sulla posizione dell'oggetto. Ci sono due metodi basati sul diverso tipo di immagine acquisita. Un metodo utilizza le immagini RGB-D sfruttando il gradiente e normali funzioni per stimare la posa, un altro approccio utilizzato è quello della registrazione iterativa del punto di chiusura che abbina la classe della nuvola di punti del modello. Per le immagini RGB si utilizzano funzionalità come SIFT (Scale Invariant Feature Transform) o ORB per ottenere la posa tradizionale di oggetti altamente strutturati. Per il metodo RGB-D si utilizzano modelli 3D che comportano però un aumento dei tempi e dei costi, considerando anche un notevole investimento per le fotocamere RGB-D.

Il metodo RGB mostra prestazioni nel deep learning migliori sulla stima ma perde informazioni stereoscopiche.

Per lo sviluppo nel machine learning è stata progettata, in questo specifico caso, una rete di stima di posa autogestita per immagini RGB, perché essendo auto-supervisionato l'informazione stereoscopica e la distribuzione della massa sono considerate durante la stima. Questo sistema è il primo a prendere l'Output della segmentazione come Input nella seguente rete di stima delle pose ottenendo grandi prestazioni nell'afferrare oggetti con precisione.

4.4 Approccio auto-supervisionato del manipolatore di presa

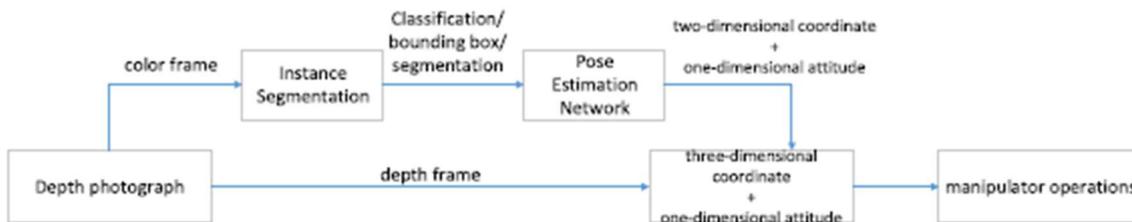


FIG. 36 Diagramma a blocchi dell'approccio di presa¹⁵

La segmentazione dell'istanza è composta dal rilevamento di oggetti e dalla segmentazione semantica.

La rilevazione dell'oggetto rileva le categorie ed il rettangolo di selezione degli oggetti nell'RGB l'immagine ottenuta con la telecamera di profondità. L'unione di tutti questi dati, implementati alla segmentazione semantica, delle dimensioni, dalle tipologie delle pinze e dall'immagine dal punto di posa forniscono le informazioni necessarie perché il manipolatore possa afferrare e posizionare oggetti automaticamente.

4.5 Rete di auto-apprendimento nella stima della posa

Una rete di auto-apprendimento supervisionato viene applicata per la stima della posa.

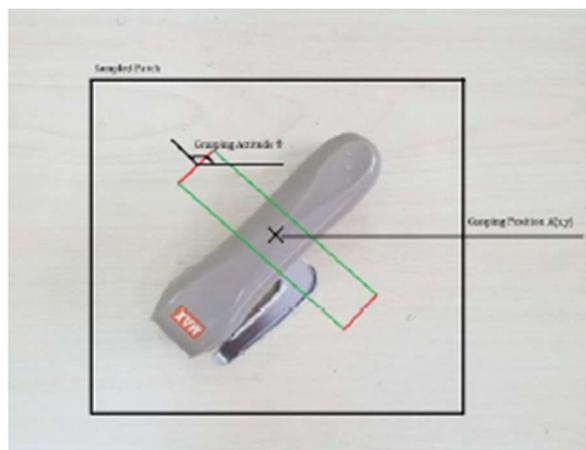


FIG. 37 Configurazione di presa¹⁵

Le linee nere rappresentano la patch campionata mentre le linee rosse la posizione delle pinze.

La comprensione della configurazione si basa su tre parametri:

- Posizione di presa $A(x,y)$
- Assetto di presa ϑ

La posizione di presa si trova al centro della patch campionata mentre la patch di presa è impostata su una dimensione fissa più grande rispetto alla proiezione delle pinze perché include il contesto in cui si trova l'oggetto. L'assetto di presa ha un range compreso tra 0° e 180° .

Quando viene fornita un'immagine, si campionano casualmente le posizioni di presa e si estraggono patch che vengono immesse nella rete per prevedere l'assetto di presa.

In questo processo di allenamento si utilizza Softmax, uno strumento che è in grado di calcolare la funzione di perdita, paragonando i dati del manipolatore con quelli di un essere umano.

Una volta che la presa è avvenuta, il sensore di pressione legge un valore costante, il manipolatore si solleva e la presa viene considerata avvenuta correttamente, altrimenti la presa viene etichettata come negativa. Questo processo di etichettatura positiva e negativa è necessaria per diminuire sempre più la supervisione da parte dell'uomo.

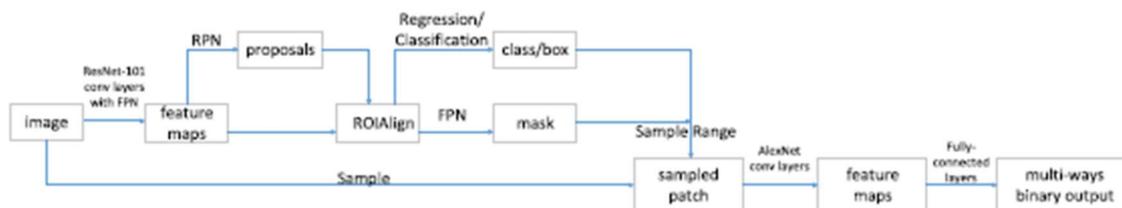


FIG. 38 Riquadro generale della rete¹⁵

4.6 Trasformazione di posizione

Affinché il manipolatore possa funzionare correttamente sono necessarie delle coordinate tridimensionali e l'assetto di presa sotto il manipolatore.

L'assetto di presa è ottenibile tramite la rete di stima mentre, bisogna trasformare la posizione di presa bidimensionale nella cornice colorata in posizione di presa tridimensionale. Teoricamente, ciò è possibile ottenendo informazioni dal frame colorato attraverso una calibrazione del frame per estrarre coordinate tridimensionali della posizione.



FIG. 39 Camera spaziale Kinect¹⁵

Presa Kinect (FIG. 39) come telecamera di profondità, usiamo un rettangolo per calibrare il frame e a profondità del colore del telaio, quindi misuriamo la corrispondenza lungo un lato per 10 volte e ricaviamo l_x e l_y (rapporto di distorsione medio) e le coordinate di un pixel nel frame ($X_C; Y_C$).

Messe in relazione otteniamo :

$$X_D = l_x \cdot X_C + b_x \quad (13)$$

$$Y_D = l_y \cdot Y_C + b_y \quad (14)$$

X_D e Y_D sono le coordinate del pixel nel riquadro di profondità mentre, b_x e b_y rappresentano le diagonali del rettangolo di profondità.

Ora mediante questa separazione di campionatura dei pixel è possibile ricavare lo spazio tridimensionale sotto la telecamera con le seguenti equazioni:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = Z_1 \cdot M_{in}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

M_{in} rappresenta una matrice diagonale che è fattore della telecamera.

Per semplificare ulteriormente il compito del manipolatore si vuole ottenere uno spazio tridimensionale sotto ad esso e per farlo si fa coincidere la coordinata Y della telecamera con l'asse Z del braccio.

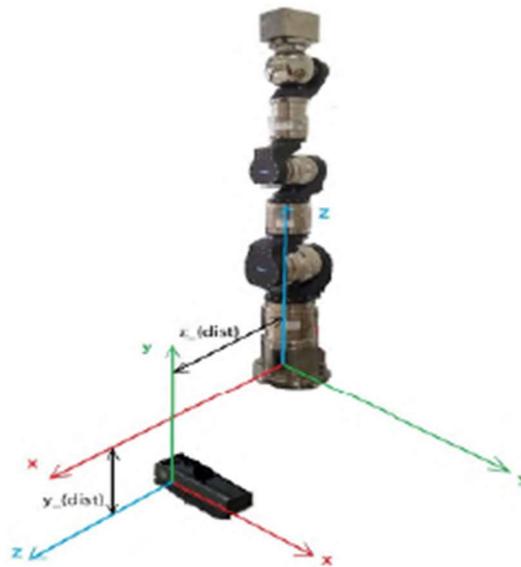


FIG. 40 Spazio sottostante la Kinect ed il manipolatore¹⁵

Mettendo in relazione (X_1, Y_1, Y_1) cioè le coordinate della posizione di presa sotto la Kinect e (X_2, Y_2, Z_2) cioè le coordinate del centro dell'oggetto sotto il manipolatore, è possibile ricavare $Y_{\{Dist\}}$ ovvero la distanza fra le origini dell'asse Y della Kinect e l'asse Z del braccio.

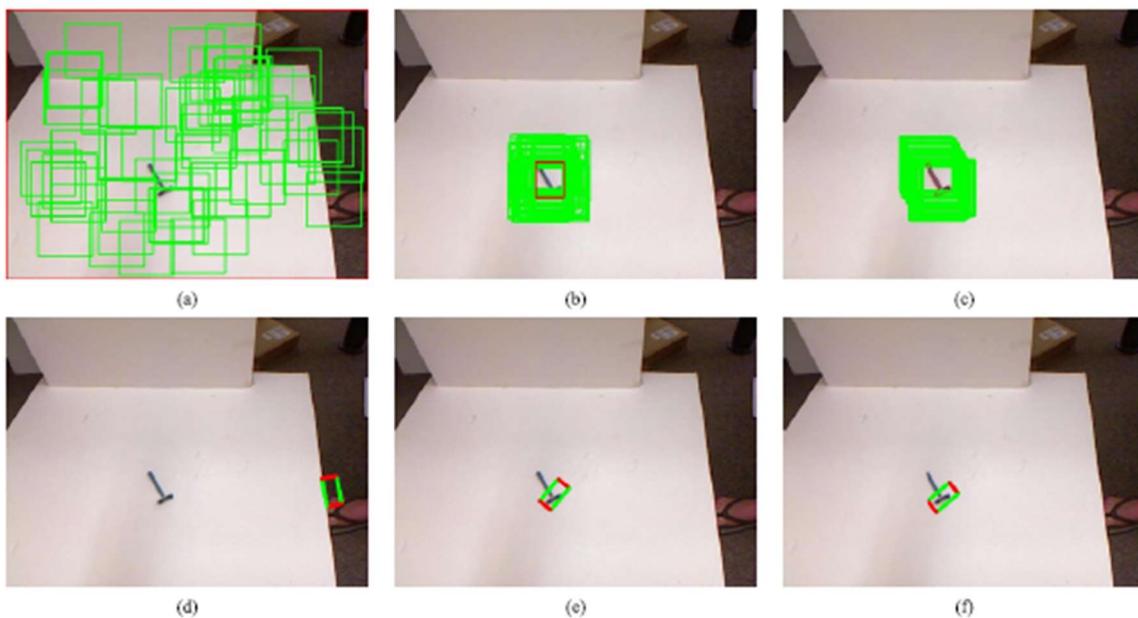


FIG. 41 Patch e risultati del metodo di campionamento¹⁵

Conclusioni

Questo elaborato evidenzia la vasta gamma di attuatori che si possono reperire sul mercato in base alle tecnologie che si vogliono utilizzare ed alle singole necessità, ciò significa che è sempre possibile trovare la soluzione migliore per l'applicazione desiderata.

In aggiunta, sono state mostrate altre tipologie di gripper non comuni, alcuni ancora in fase di progettazione, per l'utilizzo in campi extra-industriali che rivelano l'enorme studio dietro queste tecnologie. Tutto ciò è supportato da una sempre maggiore automatizzazione delle linee produttive, come ad esempio con le celle di assemblaggio completamente robotizzate che spingono la ricerca verso soluzioni sempre più flessibili e variabili in modo semplice e veloce. Questo è anche reso possibile con l'implementazione dei manipolatori con intelligenze artificiali in grado di sostituire quasi completamente l'uomo rendendo le macchine autosufficienti ed in grado di prendere decisioni in modo autonomo.

Bibliografia

- [1] R. S. H. S. Gareth J. Monkman, Stefan Hesse, Robot Grippers. Weinheim: WILEY-VCH, 2007.
- [2] C. Lanni, Caratterizzazione dell'impatto di presa e progettazione ottima di gripper," Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Cassino, 2007-2008.
- [3] H. S. A. Wolf, R. Steinmann, Grippers in Motion " *The Fascination of Automated Handling Tasks*". Germany: Springer, 2005.
- [4] T. M. Wang, Z.Y. Shi, D.Liu, Chen Ma and Z.H. Zang, " *An Accurately Controlled Antagonistic SMA Gripper*",China,2012
- [5] C. V. P. Mazzoldi, M. Nigro, Fisica Volume 2. Padova: EdiSES, 2007.
- [6] F. Castelli " *Organi di presa per manipolatori industriali* " Tesi di laurea, Università degli studi di Padova,A.A. 2012/2013
- [7] Fondamenti sui sistemi di Attuazione nella Robotica, *PhD. Ing. Folgheraiter Michele*, Corso di Robotica, Prof. Gini Giuseppina, 2006/2007
- [8] F. G. Scardino " *Dispositivo di presa attuato tramite leghe e memoria di forma*" Tesi di laurea, Politecnico di Torino, A.A. 2018/2019
- [9] Spencer B. Backus, Aaron M. Dollar, " *A Prismatic-Revolute-Revolute Joint Hand for Grasping From Unmanned Aerial Vehicles and Other Minimally Constrained Vehicles*", School of Engineering and Applied Sciences, Yale University, ASME.
- [10] Emily Seifert, Christopher Curry, Linsey Griffin, " *3D ANTHROPOMETRIC ASSESSMENT OF FUNCTIONAL HAND GRASPS FOR SURGEONS AND MEDICAL PROFESSIONALS*", University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA.
- [11] Jason Dearden, Clayton Grames, Brian D. Jensen, Spencer P. Magleby, Larry L. Howell, " *Invert L-Arm Gripper Compliant Mechanism*", ASME.
- [12] Guèrinot, A. E., Magleby, S. P., Howell, L. L., and Todd, R. H., 2005, " *Compliant Joint Design Principles for High Compressive Load Situations*,"ASME J. Mech. Des., 127(4), pp. 774–781.
- [13] Bianca S. Homberg, Robert K. Katzchamann, Mehmet R. Dogar, Daniela Rus, " *Robust Proprioceptive Grasping with a Soft Robot Hand*", Distributed Robotics Laboratory at MIT.
- [14] A. Marchese, R. Katschmann, and D. Rus, " *A recipe for soft fluidic elastomer robots*", Soft Robotics, 2015.
- [15] Xin Shu, Chang Liu, Tong Li, Chunkai Wang, Cheng Chi, " *A Self-Supervised Learning Manipulator Grasping Approach Based on Instance Segmentation*", 24 Ottobre 2018, International Journal.

