

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CASSINO
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Dipartimento di Meccanica, Strutture, Ambiente e Territorio

Tesi di Dottorato

Progetto Meccatronico di una Mano Robotica
ad Azionamento Pneumatico

Ing. Pierluigi Rea

Tutor: Prof. Ing. Giorgio Figliolini

XIX° Ciclo

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI CASSINO
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Dipartimento di Meccanica, Strutture, Ambiente e Territorio

Tesi di Dottorato

**Progetto Meccatronico di una Mano Robotica
ad Azionamento Pneumatico**

Ing. Pierluigi Rea -----

Tutor Prof. Giorgio Figliolini -----

Coordinatore Prof. Elio Sacco -----

XIX° Ciclo

Alla mia famiglia...

Summary

The overall mechatronic design of an innovative robotic hand, named Ca.U.M.Ha. (Cassino -Underactuated-Multifinger-Hand) is proposed and described in the present Ph.D. thesis.

Ca.U.M.Ha. robotic hand shows an anthropomorphic design since provided of four equal underactuated finger mechanisms and a simplified contrasting thumb, which are all joined to a rigid palm.

Each underactuated finger mechanism is composed by three phalanxes, which are actuated by a pneumatic cylinder actively and through two torsion springs passively, with the aim to obtain three overall d.o.f.s with one actuator only.

The transmission of motion from the pneumatic cylinder to the three phalanxes is performed by a linkage system, which is obtained by connecting in series, from the actuator to the distal phalanx, an offset slider-crank mechanism with two four-bar linkages. In particular, the rod of the pneumatic cylinder is joined with the piston of the offset slider-crank mechanism.

The kinematic synthesis of this linkage system has been formulated by optimizing the family of mechanisms, which are obtained by applying the Freudenstein's Equation. In particular, the optimization has been carried out by referring to the transmission angle.

Several computer simulations have allowed to test the proposed underactuated finger mechanism for the grasping of cylindrical objects with different sizes.

Moreover, in order to obtain an additional auto-adaptability of the phalanxes on the object to grasp, the pneumatic cylinders of the four underactuated finger mechanisms are operated in parallel by two 2/2 (two-way/two-position) and one 3/2 (three-way/two-position) digital valves. In particular, the 2/2 digital valves are installed one in supply and one in discharge and can be modulated in PWM (Pulse-Width-Modulation) by showing a behaviour similar to that of a three-way flow proportional valve.

In fact, the grasping of objects with different shapes is ensured by the independent action of the four underactuated finger mechanisms. Therefore, Ca.U.M.Ha. robotic hand show a good flexibility to grasp objects with different sizes and shapes, where the former feature is given by the particular design of the finger, while the latter feature is given by the particular design of the electropneumatic actuation system.

In order to obtain additional performances of Ca.U.M.Ha. robotic hand, a suitable force control system has been designed for controlling the actuation force, which is exerted by the four pneumatic cylinders of the underactuated finger mechanisms. In particular, this force control has been obtained by controlling the pressure in a suitable tank, which is connected to the pushing chambers of the four pneumatic cylinders. The closed-loop pressure control is performed by the same lay-out of the electropneumatic circuit. In addition, a pressure sensor on the tank for the feedback signal and the PWM modulation of both 2/2 pneumatic digital valves have been considered. In particular, a common PC, which is provided of a National Instruments electronic board and programmed through the Lab-View software, has been used as controller device.

Finally, a prototype of the Ca.U.M.Ha. robotic hand has been built and tested by showing the good performances in terms of robustness and flexibility during the grasping of objects with different sizes and shapes.

Indice

Introduzione	1
1 Caratteristiche Funzionali della Mano Umana	5
1.1 Introduzione	5
1.2 Architettura della mano umana	5
1.3 La struttura ossea	7
1.3.1 Le articolazioni metacarpo-falangee	7
1.3.2 Le articolazione inter-falangee	9
1.4 I tendini	11
1.4.1 Le guaine dei tendini	11
1.4.2 I tendini dei muscoli delle dita	12
1.5 I muscoli	17
1.5.1 Muscoli interossi e lombricali	17
1.5.2 L'estensione e flessione delle dita	18
1.6 Il sistema di controllo della mano umana	21
2 Caratteristiche Funzionali delle Mani Robotiche	24
2.1 Introduzione	24
2.2 Caratteristiche di un dito robotico	25
2.2.1 Stuttura meccanica e articolazioni	26
2.2.2 Il sistema di trasmissione	28
2.2.3 Il sistema di attuazione	31
2.3 Esempi di mani robotiche	33

2.3.1	High speed multifingered hand	33
2.3.2	DLR hand	37
2.3.3	Utah/Mit hand	41
2.3.4	Mano robotica Stanford / JPL	42
2.3.5	La mano robotica LARM hand	44
3	Mani Robotiche Sottoattuate	47
3.1	La sottoattuazione	47
3.1.1	La sottoattuazione nei meccanismi per dita robotiche	48
3.1.2	Soluzioni costruttive per realizzare la sottoattuazione	50
3.2	Mano robotica RTR sottoattuatori	57
3.3	Mano robotica sottoattuatori SARAH hand	60
3.4	Mano robotica TBM (Toronto-Bloorview-MacMillan)	63
4	Progetto della Mano Robotica Ca.U.M.Ha.	68
4.1	Introduzione	68
4.2	Il dito	69
4.2.1	Meccanismo adottato per la mano robotica Ca.U.M.Ha.	69
4.2.2	Determinazione dei parametri caratteristici	70
4.2.3	Analisi del moto di chiusura	72
4.2.4	Schema cinematico del dito articolato	75
4.3	Sintesi cinematica ed ottimizzazione del meccanismo del dito	77
4.3.1	Analisi e simulazione del moto di chiusura	89
4.3.2	Progetto meccanico del dito	94
4.3.3	Particolari costruttivi principali del dito robotico	96
4.4	Progetto meccanico della mano	103
4.5	Prototipi realizzati	109

5	Progetto del Sistema di Attuazione e Controllo	113
5.1	Introduzione	113
5.2	Controllo pressione in PWM	113
5.2.1	Tecnica di modulazione PWM	115
5.2.2	Il PWM applicato alle valvole digitali	118
5.2.3	Regolazione della pressione con il PWM	124
5.2.4	Banco prova sperimentale	126
5.3	Stumento virtuale di controllo sviluppato in ambiente LabView	132
5.3.1	Verifica del modulatore PWM virtuale	135
5.3.2	Determinazione sperimentale della caratteristica statica	138
5.3.3	La regolazione PID	140
5.4	Risultati sperimentali	143
6	Prototipo e Sperimentazione	151
6.1	Introduzione	151
6.2	Mano robotica Ca.U.M.Ha: il sistema mecatronico	151
6.2.1	Integrazione della meccanica e dell'elettronica: il prototipo	152
6.3	Controllo della pressione nella mano robotica	154
6.4	Prove di presa realizzate	160
	Conclusioni	165
	Bibliografia	169
	Elenco delle figure	179
	Elenco delle tabelle	189

Introduzione

La presente tesi di dottorato riguarda la progettazione mecatronica di una mano robotica ad azionamento pneumatico, denominata Ca.U.M.Ha. (Cassino-Underactuated-Multifinger-Hand). In generale, la progettazione mecatronica di un sistema risulta basata sull'integrazione di diverse tecniche e tecnologie afferenti al settore meccanico, elettrico, elettronico ed informatico. Infatti, in questo caso, la mano robotica Ca.U.M.Ha. presenta una struttura meccanica (palmo, dita articolate, pollice), un sistema di attuazione pneumatica (cilindri, valvole, regolatori), un sistema di controllo (scheda di controllo, PLC), sensori analogici e digitali (traduttore di pressione, switches elettrici). Le diverse parti del sistema mecatronico operano come un sistema integrato finalizzato alla presa di oggetti di diverse forme e dimensioni mediante manipolatori robotici, che ne consentono la movimentazione ed orientamento nello spazio di lavoro del robot. Inoltre, il sistema di controllo in anello chiuso permette una adeguata regolazione della forza di attuazione al fine di operare una presa sicura senza danneggiare l'oggetto in presa.

Negli ultimi decenni sono stati sviluppati numerosi prototipi di mani robotiche multi-dita aventi una struttura più o meno antropomorfa, ossia con struttura e funzionalità più o meno simile alla mano umana, la quale presenta una versatilità e destrezza difficilmente imitabili da un sistema mecatronico.

La manipolazione umana, infatti, consiste in movimenti precisi e lenti, ma anche di azioni dinamiche in cui la natura del contatto tra le dita e l'oggetto da manipolare cambia dinamicamente. L'uomo riesce a cogliere tutti i vantaggi di questa azione dinamica durante la manipolazione grazie ad un efficacissimo e multiforme sistema sensoriale. Non meno importante, anzi indispensabile, è l'unità di controllo e governo rappresentato dal cervello, capace di vagliare e processare moltissime informazioni e di affrontare problemi

decisionali e pianificativi. Tutto ciò viene poi legato da un costante e continuo scambio di informazioni tra i due sistemi, che consente di realizzare azioni manipolative di difficile imitazione da parte dei più sofisticati sistemi meccatronici. E' chiaro, quindi, che alla base dello sviluppo di mani robotiche c'è proprio l'emulazione dello schema logico di funzionamento della mano umana descritta nel Cap.1, alla quale si fa riferimento per lo sviluppo di mani robotiche e protesi di mano umane.

Una panoramica delle mani robotiche con caratteristiche salienti è riportata nel Cap.2. Questi prototipi sono stati realizzati focalizzando l'attenzione sull'accuratezza, sulla capacità di movimento e sulle azioni manipolative da compiere. Le mani robotiche ad elevata destrezza, a fronte di risultati funzionali a volte sorprendenti, presentano ancora molti aspetti critici, tra i quali, l'estrema complessità di costruzione e montaggio, la bassa integrabilità dei sistemi sensoriali. Per lo sviluppo di mani robotiche ad alte prestazioni è essenziale realizzare un dito che sia altamente performante.

Il problema affrontato nel Cap.3 è, quindi, quello di ottenere un movimento articolato delle dita, capace di adattarsi alla generica forma dell'oggetto, pur non potendo disporre di un numero elevato di attuatori per la movimentazione dei vari gradi di libertà. Si è dovuto, quindi, trovare una soluzione tale da aumentare l'adattabilità della mano robotica, mantenendo le dimensioni entro livelli accettabili. La soluzione proposta è quella di utilizzare una particolare tipologia di meccanismi, definiti meccanismi sotto-attuati. Un meccanismo viene detto sotto-attuato se il numero di attuatori è minore del numero di gradi di libertà. Quando questo concetto è applicato ad un organo di presa, esso conduce all'adattabilità, per cui una mano robotica, che adotta questa soluzione per la movimentazione delle dita, è in grado di avvolgere gli oggetti da afferrare e di adattarsi alla loro forma e dimensione. Pertanto, alcuni attuatori sono sostituiti da elementi elastici che possono essere considerati come attuatori passivi in quanto non gestiti dal sistema di controllo.

Nel Cap.4 viene descritto il progetto della mano robotica Ca.U.M.Ha., che presenta

quattro dita articolate con tre falangi ed un pollice di contrasto con una sola falange. Ciascun dito, pollice compreso, è azionato da un cilindro pneumatico a doppio effetto. Quindi, come descritto in precedenza, grazie alla sottoattuazione di ciascun dito articolato, i due gradi di libertà passivi gestiti dalle molle torsionali insieme al grado di libertà attivo attuato dal cilindro pneumatico, conferiscono una buona capacità di autoadattamento delle tre falangi delle dita sugli oggetti in presa. Tali caratteristiche del dito articolato sotto-attuato consentono, quindi, di effettuare la presa di oggetti aventi forme e dimensioni non regolari. Una ulteriore capacità di autoadattamento della mano robotica Ca.U.M.Ha. è ottenuta tramite un appropriato progetto del circuito elettropneumatico di azionamento. Le camere di spinta e di scarico dei quattro cilindri pneumatici delle dita articolate sotto-attuate sono comandate in parallelo, in maniera tale da gestire con un numero ridotto di segnali il maggior numero di g.d.l..

Al fine di controllare la pressione di azionamento degli attuatori pneumatici e quindi, indirettamente, la forza di presa, nel Cap.5 è riportato lo studio del sistema di attuazione e di controllo. La regolazione della pressione può essere realizzata attraverso un opportuno lay-out elettropneumatico. Nell'ottica di voler ottenere una regolazione della pressione di tipo alternativo rispetto a quella proporzionale e, in più, caratterizzata da costi di realizzazione molto bassi, la scelta delle valvole di azionamento è ricaduta su due valvole digitali 2/2 modulate in PWM (Pulse Width Modulation). I vantaggi di tale scelta sono legati sostanzialmente al basso costo delle valvole digitali ed alla relativa semplicità dell'elettronica di controllo, sebbene una contenuta frequenza di lavoro, e rilevanti non linearità rendono tali valvole meno performanti delle valvole proporzionali. Il controllo della forza di presa della mano è stato realizzato mediante un controllo della pressione presente nelle camere di spinta dei quattro attuatori delle dita.

Nel Cap.6 viene descritto il banco prova che ha permesso di testare l'efficacia dell'azione di presa da parte della mano robotica Ca.U.M.Ha.. Particolare attenzione è stata rivolta all'analisi sperimentale del sistema di controllo della pressione mediante il segnale rilevato

dal trasduttore di pressione, allo scopo di mostrare le differenze di funzionamento quando il sistema è montato su un serbatoio e quando il sistema deve azionare dei cilindri pneumatici operanti in parallelo.

In particolare, sul prototipo è stato montato il sistema di controllo della pressione descritto nel capitolo precedente in modo da avere un sistema mecatronico integrato nella struttura della mano.

L'integrazione del servosistema per il controllo pressione con la mano robotica Ca.U.M. Ha. è stata ottenuta apportando delle piccole modifiche. In primo luogo è stato sostituito il serbatoio da laboratorio con uno realizzato appositamente, in modo da poter collegare tutte le camere posteriori dei cilindri delle dita. Inoltre, sono state aggiunte due valvole pneumatiche, per gestire la camera anteriore dei cilindri e per azionare il pollice.

Cap. 1 Caratteristiche Funzionali della Mano Umana

1.1 Introduzione

La mano umana è uno strumento capace di compiere innumerevoli azioni grazie alla *prensione*, che è la sua funzione essenziale. In natura, dalla pinza del gambero, alla mano della scimmia, si trova la facoltà di prensione, ma in nessun altro come nell'uomo essa raggiunge questo grado di funzionalità. Ciò è dovuto alla possibilità del pollice di opporsi a tutte le altre dita. Nella scimmia, ad esempio, il pollice è opponibile, ma l'ampiezza di questa opposizione non raggiunge mai quella del pollice umano.

Dal punto di vista fisiologico, la mano rappresenta l' *estremità effettrice* dell'arto superiore, che costituisce il suo supporto e gli permette di presentarsi nella posizione più favorevole per una data azione, [Kapandji, 1974]. Tuttavia, la mano non è solo un organo d'esecuzione, ma anche un *ricevitore sensoriale* estremamente sensibile e preciso, le cui informazioni sono indispensabili per la sua stessa azione. Infine, per la conoscenza dello spessore e delle distanze che procura alla corteccia cerebrale, è il naturale completamento della vista a cui permette di controllare e di interpretare le informazioni.

1.2 Architettura della mano umana

La possibilità della mano di variare l'architettura delle dita è fondamentale per afferrare gli oggetti. Infatti, durante le fasi di presa, la mano adatta la sua forma e quella delle dita all'oggetto stesso. Su una superficie piana come un vetro mostrato in Fig. 1.1a, la mano si stende e si appiattisce entrando in contatto con l'eminenza thenar, in Fig 1.1b1,

con l'eminanza ipothenar Fig. 1.1b2, con la testa dei metacarpi Fig. 1.1b3, e la faccia palmare dei metacarpi, Fig 1.1b4. Solo la parte infero-esterna del palmo resta distante.

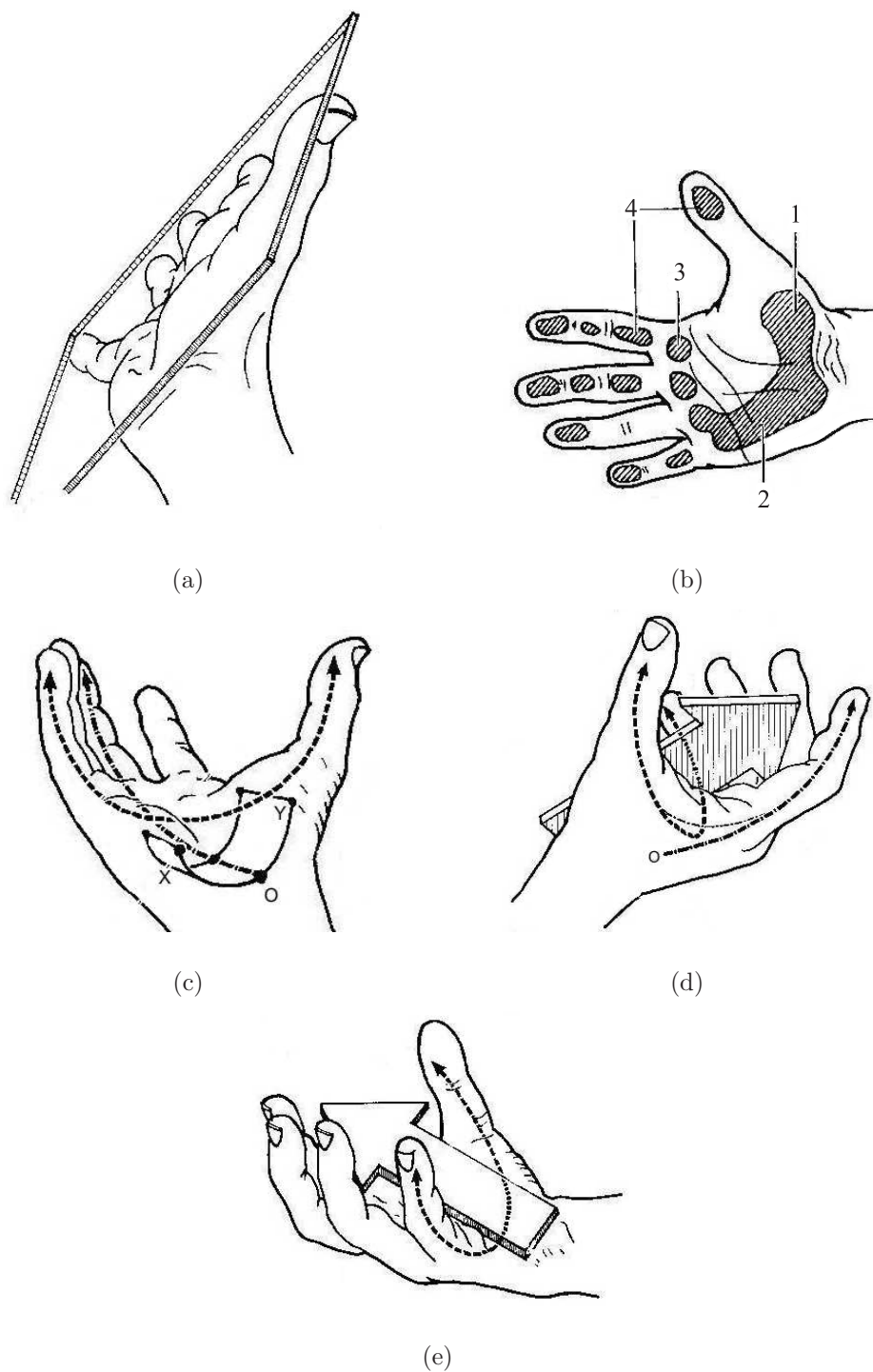


Fig. 1.1: Adattabilità della mano umana,[Kapandji, 1974].

Per afferrare un oggetto voluminoso, la mano si incava e compaiono degli archi secondo tre direzioni:

- nel senso trasversale (Fig.1.1c): l'arco carpico XOY corrisponde alla concavità del massiccio carpico;
- nel senso longitudinale (Fig.1.1d ed e): gli archi carpo-metacarpo-falangici assumono una disposizione raggiata a partire dal massiccio carpico (O), e sono costituiti, per ciascun dito, dal metacarpo e dalle falangi corrispondenti. La concavità di questi archi si orienta davanti al palmo;
- in senso obliquo: gli archi di opposizione al pollice con le altre quattro dita.

1.3 La struttura ossea

1.3.1 Le articolazioni metacarpo-falangee

Le articolazioni metacarpo falangee sono di tipo condiloideo, cioè hanno una sporgenza convessa allargata (ovoidale) entro una superficie concava anch'essa allargata, come mostrato in Fig.1.2a. Tali articolazioni possiedono due gradi di libertà:

- flesso estensione, in un piano sagittale, intorno all'asse YY' trasversale;
- inclinazione laterale, in un piano frontale, intorno all'asse XX', antero-posteriore.

La testa del metacarpo possiede una superficie articolare S_a riportata in Fig.1.2, convessa nei due sensi, più estesa e più larga nella parte anteriore che non posteriore.

La base della prima falange è ottenuta da una superficie S_b , concava nei due lati, con una superficie notevolmente inferiore rispetto alla S_a . Essa è prolungata in avanti da una superficie denominata fibrocartilagine glenoidea mostrata in Fig.1.2b2, questa piccola linguetta fibrosa inserita sul bordo anteriore della base falangea con una piccola incisione (3), forma una cerniera vera e propria. In effetti, nell'estensione, la faccia profonda della

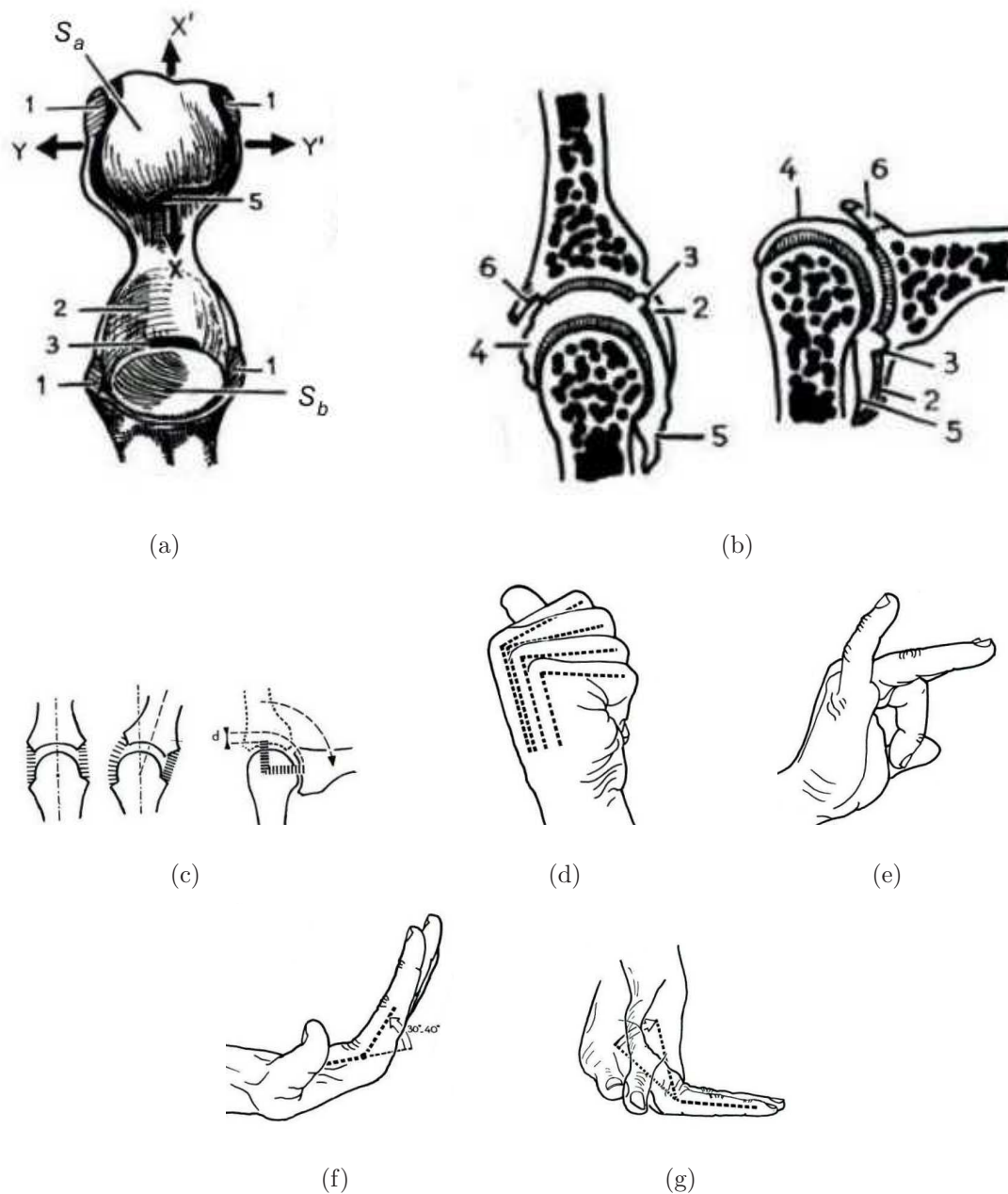


Fig. 1.2: Le articolazioni metacarpo falangee, [Kapandji, 1974].

fibrocartilagine mostrata in Fig. 1.2b, si trova a contatto della testa del metacarpo. Nella flessione invece, la fibrocartilagine sopravanza la testa e, ruotando intorno alla sua cerniera, scivola sulla faccia anteriore del metacarpo. Una condizione necessaria alla libertà di movimento è garantita da una lassità della capsula e della sinoviale. Questo

gioco è garantito grazie alla sporgenza posteriore (4) e anteriore (5) della capsula. Sulla parte posteriore della base falangea, si inserisce la linguetta (6) del tendine estensore. Sono presenti due tipi di legamenti:

- un legamento metacarpo-glenoideo, che controlla i movimenti della fibro cartilagine glenoide (Fig.1.2b2)
- un legamento laterale, in sezione nella Fig.1.2a1, che tiene in contatto le superfici articolari e limita i movimenti.

Siccome la loro inserzione metacarpale non avviene al centro di curvatura della testa (Fig.1.2b), ma leggermente dietro, ne consegue che i legamenti laterali non sono tesi nell'estensione, mentre sono tesi nella flessione. La lunghezza d in Fig.1.2, misura questo grado di tensione.

Nella fase di estensione (Fig.1.2c), i movimenti di lateralità sono agevoli e possono raggiungere valori tra 20° e 30° .

L'ampiezza della flessione (Fig.1.2d) è prossima ai 90° , ma bisogna notare che è crescente dall'indice fino al mignolo. Inoltre la flessione isolata di un dito è limitata (Fig.1.2e) dalla tensione del legamento palmare interdigitale. L'ampiezza dell'estensione attiva e passiva (Fig.1.2f ed g) è assai variabile a seconda dei soggetti e può raggiungere valori fino a 45° .

1.3.2 Le articolazione inter-falangee

Le articolazioni inter-falangee sono del tipo trocleare, cioè possiedono un solo grado di libertà. Esse si suddividono in:

- la testa della falange (Fig.1.3a e Fig.1.3bA), ha la forma di una puleggia e possiede un solo asse XX' di rotazione trasversale, attorno al quale si effettuano i movimenti di flesso-estensione;

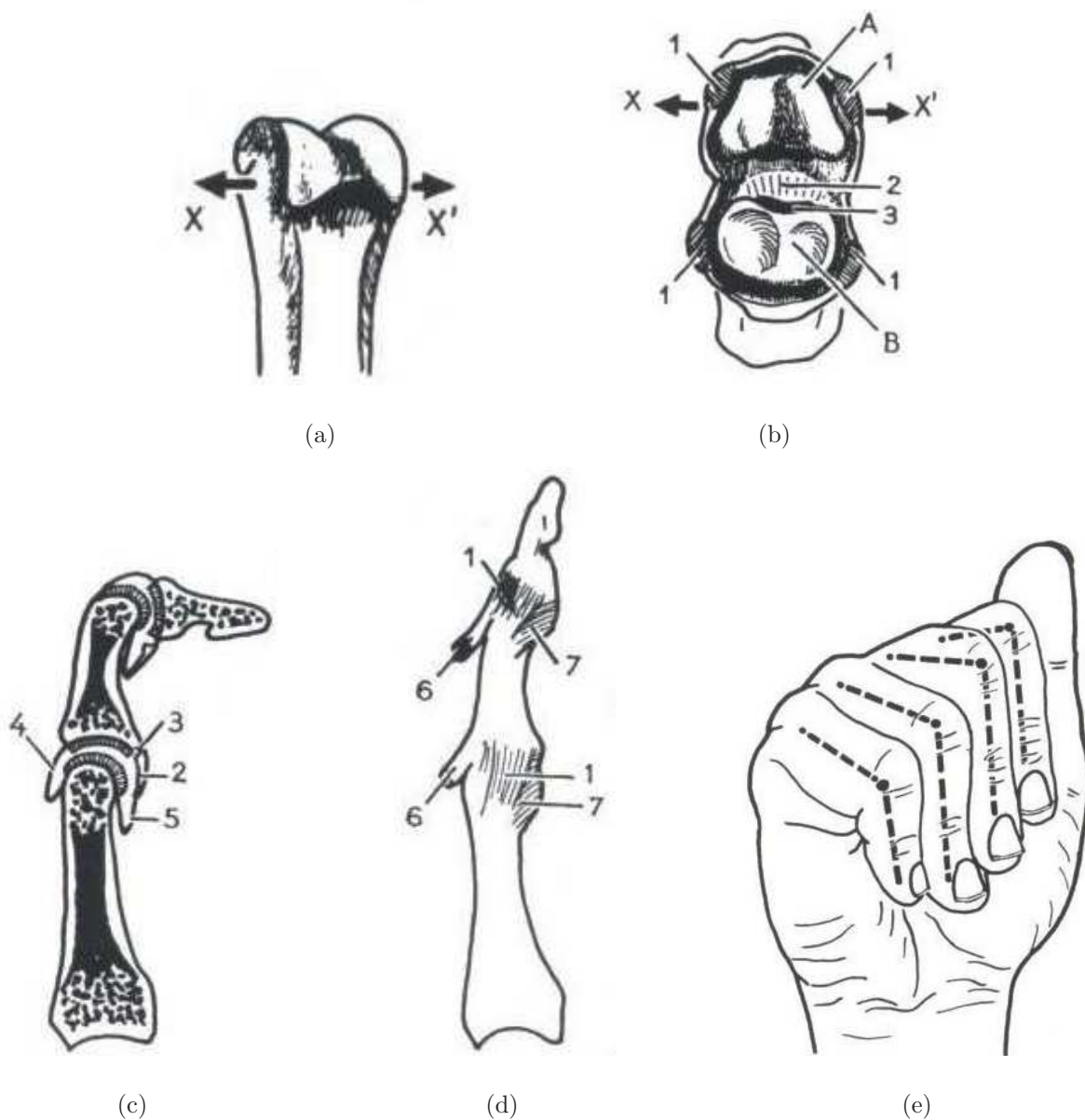


Fig. 1.3: Le articolazioni inter-falangee,[Kapandji, 1974].

- la base della falange distale (Fig.1.3bB) corrispondente, è scavata da due piccole cavità glenoidee.

Nella flessione (Fig.1.3c) la fibro-cartilagine glenoidea (2) è in contatto con la faccia anteriore della falange prossimale. In una visione laterale si possono distinguere (Fig.1.3d) oltre ai legamenti (1) le espansioni del tendine estensore (6) ed i legamenti falango-

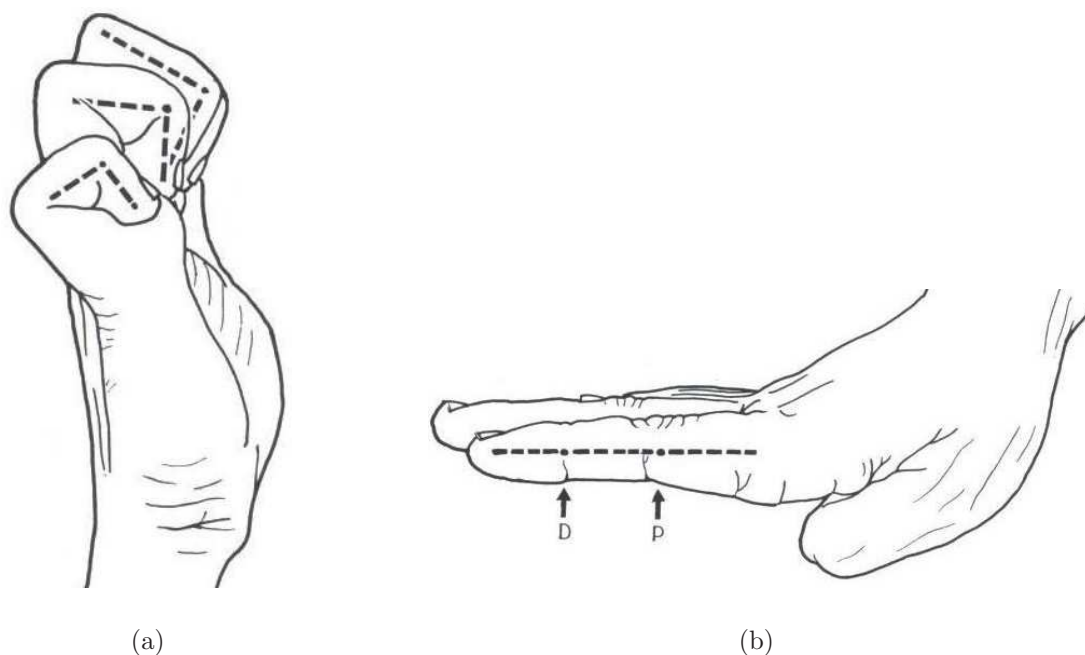


Fig. 1.4: Le articolazioni inter-falangee,[Kapandji, 1974].

glenoidei (7). L'ampiezza della flessione (Fig.1.3e) nelle articolazioni inter-falangee distali è leggermente inferiore a 90° , ed aumenta dal dito indice al mignolo fino ad arrivare ad un angolo pari a 135° . L'ampiezza della flessione (Fig.1.4a), nelle articolazioni inter-falangee prossimali è maggiore di 90° ed aumenta dal dito indice al mignolo. Come si può notare dalla Fig.1.4b l'ampiezza dell'estensione attiva nelle articolazioni inter-falangee distali e prossimali è nulla o molto contenuta, nell'ordine dei 5° .

1.4 I tendini

1.4.1 Le guaine dei tendini

Per percorrere le porzioni concave del loro tragitto, i tendini devono essere fissati allo scheletro da fascie fibrose, altrimenti, sotto l'effetto della tensione, si disporrebbero lungo la corda dell'arco scheletrico rendendo inefficace la contrazione stessa. A livello del polso, tra i due lati estremi è tesa una fascia fibrosa (Fig.1.5a e b) che crea il primo canale (denominato canale carpico) al di sotto del quale passano tutti i tendini flessori che dal-

l'avambraccio vanno alla mano. Nella sezione del canale carpico riportata in Fig.1.5c, sono evidenziati i due piani dei tendini flessori superficiali (2) e profondo (3), inoltre è riportato il tendine flessore lungo del pollice (4). Anche il tendine del grande palmare (5) e il nervo mediano (6) passano all'interno del canale carpico, mentre il nervo ulnare (7) passa in un canale esterno.

I tendini flessori, considerando ciascun dito, sono mantenuti da tre pulegge fibrose, mostrate nelle Figg.1.5a e d:

- la prima (8) leggermente sopra della testa del metacarpo;
- la seconda (9) sulla faccia anteriore della prima falange;
- la terza (10) sulla faccia anteriore della seconda falange.

È da notare in Fig.1.5d che le pieghe palmari, indicate con le frecce nere, sono situate al di sopra delle articolazioni corrispondenti, al contrario le pieghe dorsali, indicate dalle frecce bianche, sono situate al di sopra delle loro articolazioni. I tendini che passano tra questi canali sono tenuti insieme da un sistema di fibre oblique ed incrociate (11), che passano a ponte davanti all'articolazione. Tali guaine sierose, mostrate in Fig.1.6 permettono lo scivolamento dei tendini all'interno dei canali, come se fossero le guaine del filetto dei freni.

1.4.2 I tendini dei muscoli delle dita

Il corpo carnoso dei muscoli flessori delle dita è situato nella cavità interna del polso, nella parte anteriore dell'avambraccio; e quindi è costituito da muscoli estrinseci, in rapporto alla mano. È importante studiare il loro modo di terminazione e la loro azione.

In Fig.1.7 è riportato il flessore comune superficiale delle dita (non tratteggiato) che termina sopra P_2 , prima del muscolo profondo che è riportato con linea tratteggiata. Per garantire una corretta flessione delle falangi, i tendini devono incrociarsi nello spazio e,

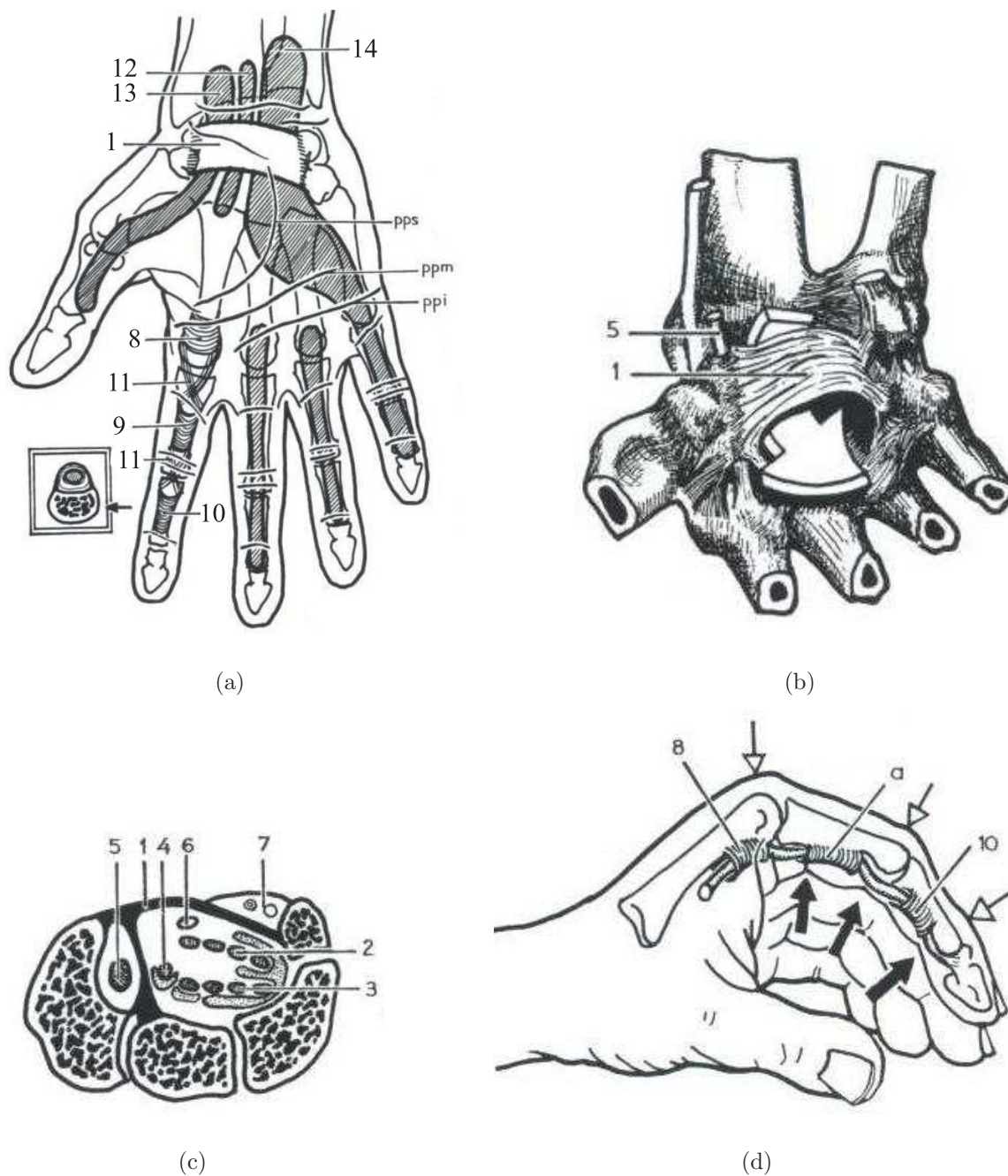


Fig. 1.5: Il percorso dei tendini,[Kapandji, 1974].

per evitare l'insorgere di componenti di forza laterali dannose, l'incrocio dei tendini deve essere fatto in maniera simmetrica. La soluzione che rispetta tale simmetria è riportata nelle Figg.1.8a e 1.8b. In tali figure infatti si nota come sia il tendine profondo a perforare il tendine superficiale, secondo gli schemi di anatomia classica. Il tendine superficiale si

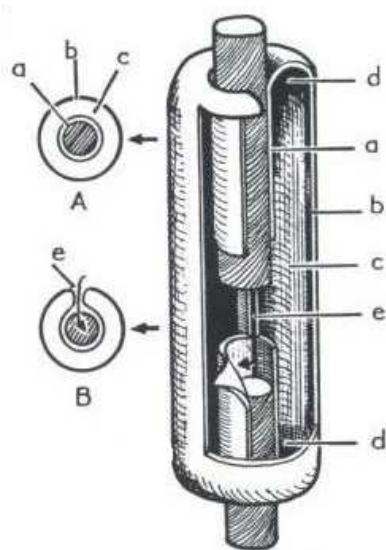


Fig. 1.6: Struttura della guaina di un tendine; a) guaina viscerale a contatto con il tendine; b) guaina parietale non a contatto con il tendine; c) cavità chiusa; d) estremità della guaina; e) diaframma longitudinale.,[Kapandji, 1974].

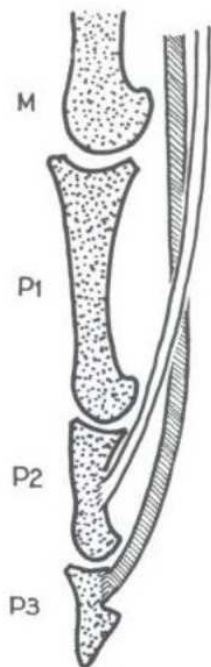


Fig. 1.7: I tendini dei muscoli flessori delle dita, [Kapandji, 1974].

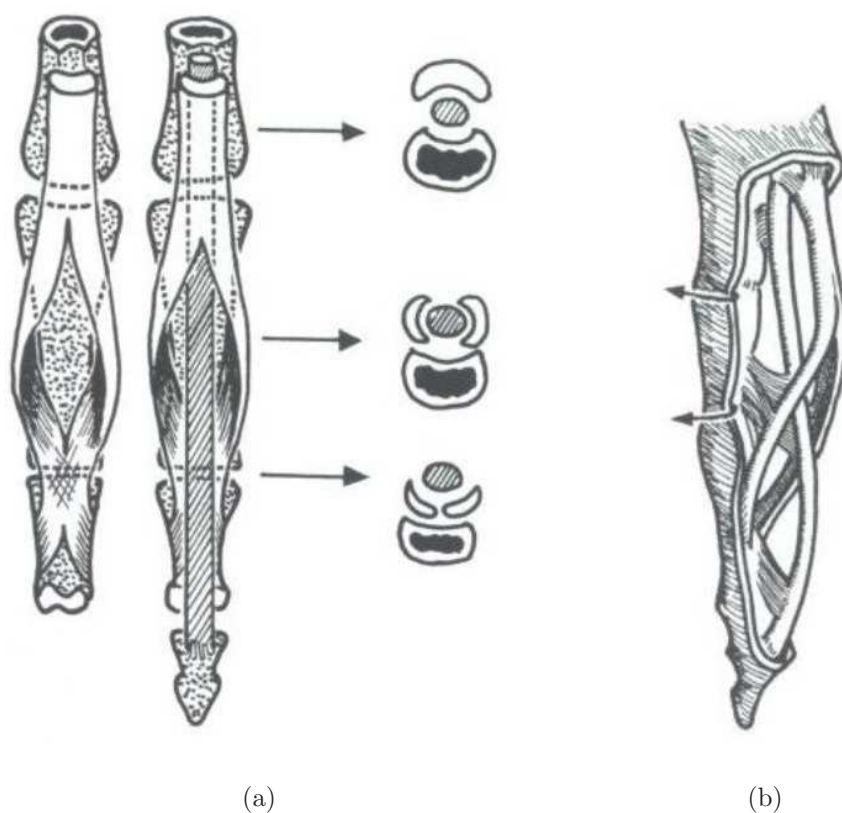


Fig. 1.8: Disposizione dei tendini dei muscoli flessori delle dita: a) vista frontale e sezione; b) vista 3-D dei collegamenti, [Kapandji, 1974].

sdoppia all'altezza dell'articolazione metacarpo-falangea in due linguette, che circondano i bordi del tendine profondo prima di riunirsi a livello dell'articolazione P_2P_1 , per inserirsi sulle facce laterali di P_2 , mostrato in Fig.1.7. In alternativa a questa perforazione di tendini, si poteva immaginare una soluzione meccanica diversa, ovvero far passare il tendine superficiale all'interno e il tendine profondo all'esterno. Così facendo però diminuirebbe l'efficacia della trazione del tendine superficiale, con conseguente diminuzione della forza di presa.

L'azione di questi due tendini si deduce dal loro punto di applicazione, il flessore comune superficiale (Fig.1.9a) è flessore della seconda falange e quindi:

- è inefficace sulla terza falange;

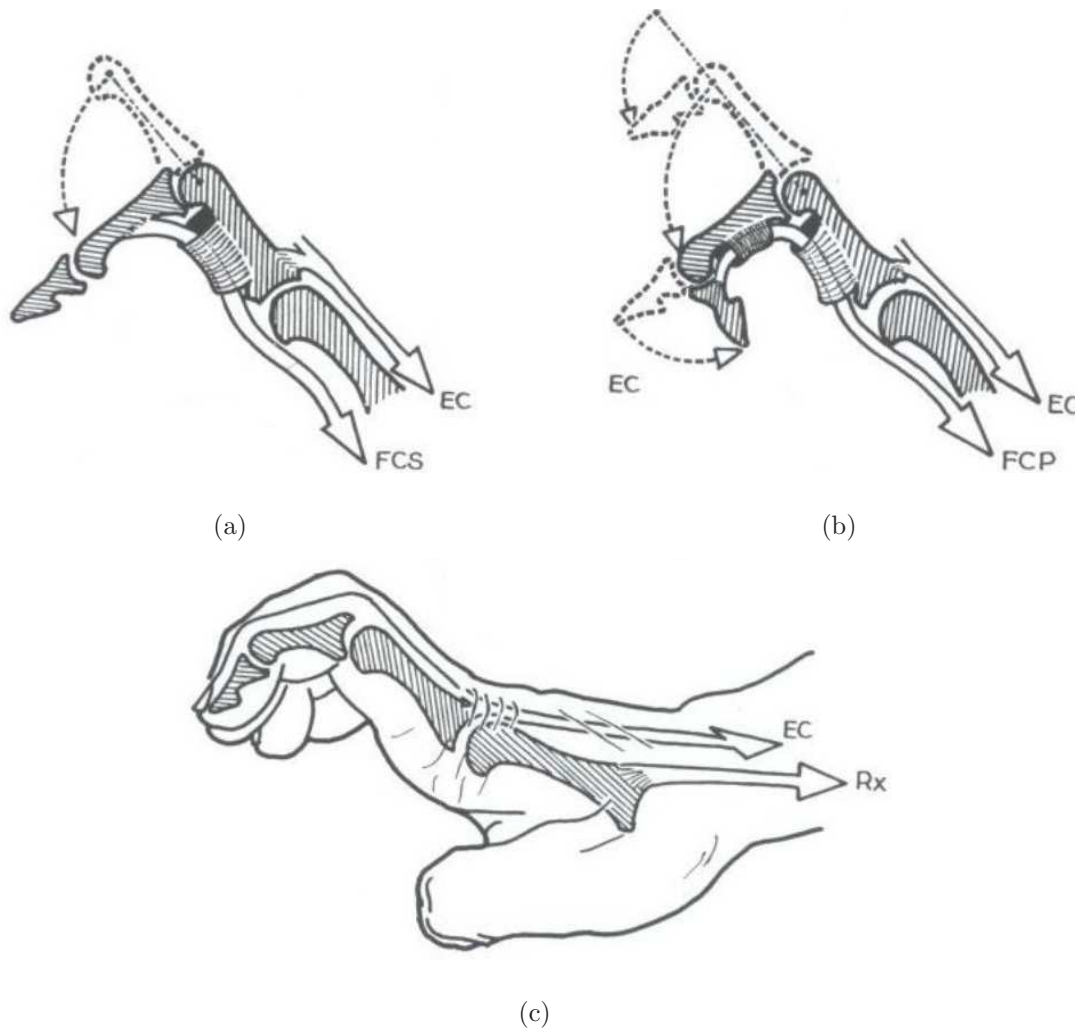


Fig. 1.9: I tendini flessori comuni, [Kapandji, 1974].

- è efficace sulla prima falange solo se la seconda è completamente flessa;
- la sua efficacia è massima quando la prima falange è tenuta in estensione dalla contrazione dell'estensore comune;
- la sua efficacia aumenta all'aumentare della flessione di P_2 .

Il flessore comune profondo si inserisce sulla base della terza falange (Fig.1.9b), con le seguenti caratteristiche:

- è flessore della terza falange, ma agisce molto rapidamente anche alla flessione di

P_2 , poiché non esiste un estensore selettivo di P_2 , infatti, per valutare la forza del flessore profondo bisogna mantenere ferma la seconda falange;

- quando i punti P_1 e P_2 sono portati manualmente a 90° il tendine flessore profondo diventa inefficace.

Malgrado le limitazioni elencate, i flessori rivestono un ruolo importante anche per la loro sinergia con i radiali (RX) e l'estensore comune (Ec), come mostrato in Fig.1.9c.

1.5 I muscoli

1.5.1 Muscoli interossi e lombricali

I muscoli interossi possono esercitare due azioni differenti: la lateralità e la flessione-estensione. Per quanto riguarda la possibilità di afferrare oggetti e manipolarli, solo la flessione-estensione risulta particolarmente interessante. Per comprendere l'azione dei muscoli interossi sulla flessione-estensione, bisogna descrivere innanzitutto la struttura dell'aponeurosi dorsale del dito, cioè della fascia fibrosa di collegamento muscolo tendine: dopo la linguetta che si inserisce (Fig.1.10a e Fig.1.10b) sul tubercolo laterale di P_1 , dal tendine interosso si genera una lamina fibrosa che passando sulla faccia dorsale di P_1 , continua nel suo omologo controlaterale: è la banda degli interossi (2). Vista dalla sua faccia profonda l'aponeurosi dorsale fa apparire questa banda come formata da una parte relativamente spessa (2) e da una parte più sottile (2'), le fibre oblique che si connettono sulle linguette laterali (7) dell'estensore comune. Al di sotto della borsa sierosa (9), si stacca la linguetta profonda (4) dell'estensore comune. Una terza espansione del tendine dell'interosseo forma una sottile linguetta (3) che va a connettersi con due gruppi di fibre sull'estensore:

- qualche fibra obliqua (10) verso la linguetta mediana forma la lamina triangolare;
- la maggior parte delle fibre si fondono per formare la benderella (12);

- tale benderella passa lateralmente ed è trattenuta da alcune fibre trasversali, definite espansione capsulare (11).

Per quanto concerne i muscoli lombricali (Fig.1.10d), essi si inseriscono sui bordi dei flessori profondi. Il loro tendine (13) si dirige in basso e verso l'interno.

1.5.2 L'estensione e flessione delle dita

L'estensione delle dita è dovuta all'azione combinata dell'estensione comune (EC) degli interossei (Ix), dei lombricali (Lx) ed anche in certa misura, dal flessore superficiale (FCS), che intervengono in rapporti di sinergia-antagonismo variabili seconda la posizione della metacarpo-falangea (MP) e del polso, mostrati in Fig.1.11. Si valuteranno gli aspetti dei vari tendini in maniera separata.

L'estensore comune: il grado di tensione delle diverse inserzioni dell'EC dipende dalla flessione delle falangi:

- durante la flessione isolata di P_3 riportata in Fig.1.11a, si nota come l'EC non agisce più direttamente su P_1 e P_2 :
- la flessione di P_2 riportata in Fig.1.11b ha due conseguenze, la prima provoca un allentamento delle bendellette (a) grazie allo spostamento delle bendellette (b), e come seconda allenta l'espansione (c), il che priva l'EC della sua diretta azione su P_1 .

Gli Interossei: gli Ix sono flessori di P_1 ed estensori di P_2 e P_3 , ma la loro azione sulle falangi dipende dal grado di flessione della MP e dallo stato di tensione dell'EC, se la (MP) in Fig.1.11d è in estensione dovuta alla contrazione dell'EC si ha:

- la banda (a) è attirata al di sopra della MP;
- le espansioni laterali (b) possono tendersi causando l'espansione di P_2 e P_3 .

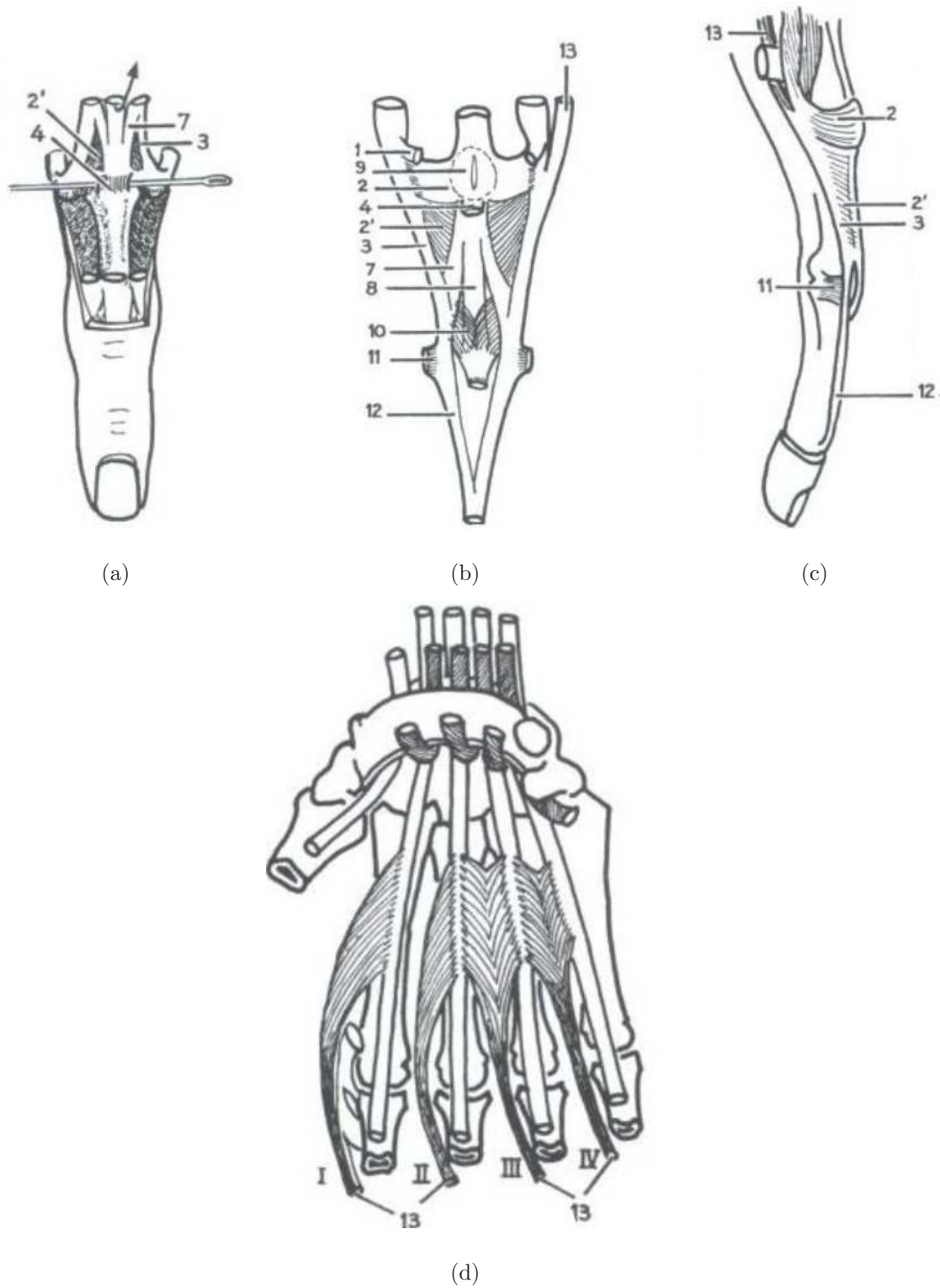


Fig. 1.10: Muscoli interossei e lombricali,[Kapandji, 1974].

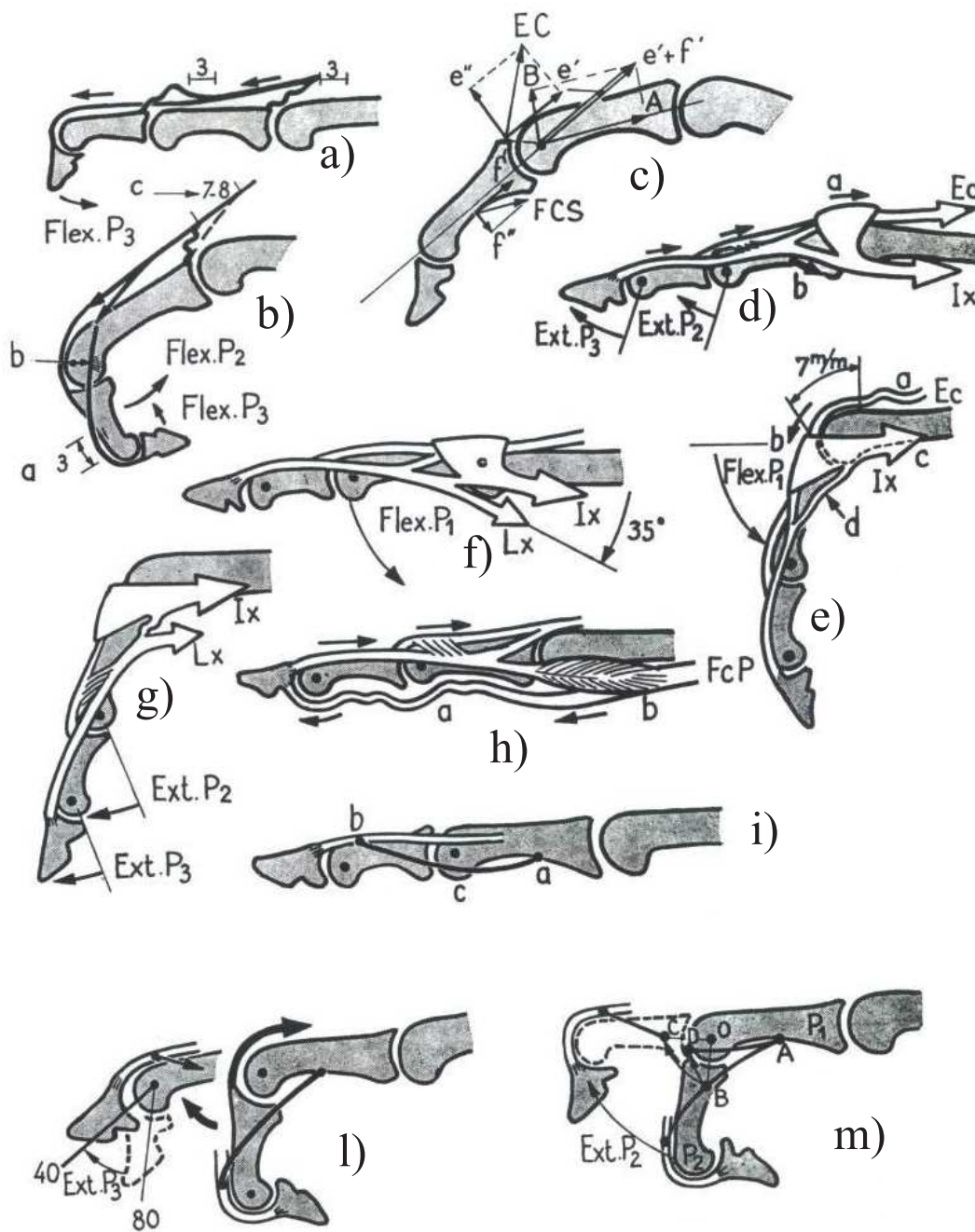


Fig. 1.11: L'estensione delle dita,[Kapandji, 1974].

Quando si ha la flessione della MP come in Fig.1.11e per rilassamento dell'EC e contrazione dei lombricali si nota che:

- la contrazione degli Ix, agendo sulla banda, piega con forza la MP, ma in questa configurazione le espansioni laterali perdono la loro efficacia su P_2 e P_3 ;
- al contrario l'EC aumenta la sua efficacia sugli stessi punti.

I lombricali: gli Lx sono flessori di P_1 ed estensori di P_2 e P_3 , ma al contrario degli Ix, la loro azione sulle falangi non dipende dal grado di flessione della MP. La loro efficacia è dovuta alla particolare posizione anatomica evidenziata in Fig.1.11f e g, inoltre i lombricali facilitano l'estensione di P_2 e P_3 allentando la porzione distale dei tendini del FCP, come mostrato in Fig.1.11h. Infine è importante notare che i lombricali contengono numerosi ricettori propriocettori, i quali raccolgono delle informazioni essenziali per coordinare il tono degli estensori e dei flessori.

Il legamento retinacolare: il legamento LR è mostrato in Fig.1.11i, esso è formato da fibre emanate dalla faccia palmare (a) di P_1 , è importante notare che le fibre del LR incrociano l'interfalangea prossimale (IPP) davanti al suo asse (c). Ne consegue che (Fig.1.11l l'estensione dell'IPP tende le fibre del LR e trascina l'estensione dell'IPD, della metà della sua corsa riducendo la sua flessione da 80 a 40°, come messo in evidenza in Fig.1.11m.

1.6 Il sistema di controllo della mano umana

Le funzioni della mano sono molteplici, comunque le più importanti sono quella sensitiva del tocco e quella della prensione. In Fig.1.12 è riportato uno schema di controllo della mano umana. Le informazioni sono scambiate tra il cervello, che funge da elemento di controllo, e la mano, che è l'elemento che compie le operazioni. Con la linea continua è rappresentato il percorso delle vie neurali di azionamento del muscolo, il quale compie lavoro solo attraverso la contrazione. Le linee punteggiate indicano le vie sensitive o esteroceettive superficiali.

Le linee tratteggiate indicano le vie sensitive o propriocettive profonde.

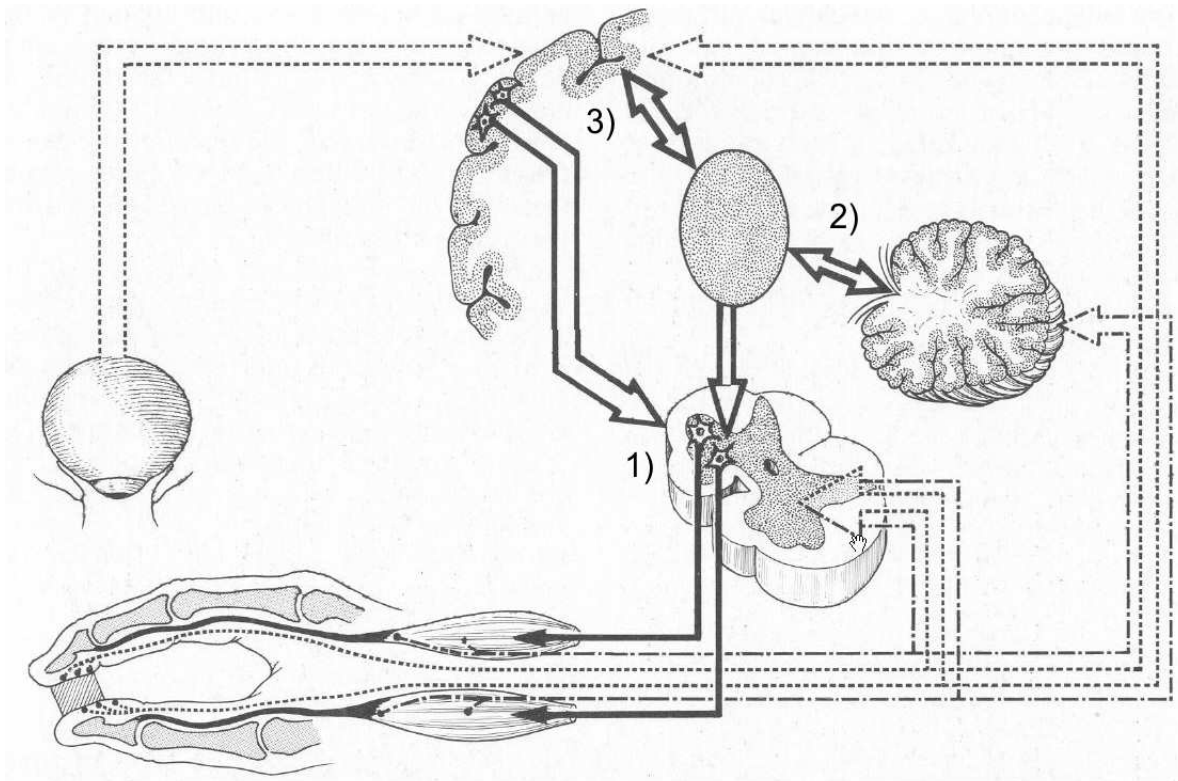


Fig. 1.12: Vista schematica delle vie neurali di azionamento della mano e delle vie sensitive.

Il trasferimento delle informazioni dal cervello ai muscoli avviene attraverso le sinapsi, cioè delle regioni del corpo umano attraverso le quali un impulso nervoso può trasferirsi da una cellula ad un'altra. Ci sono diverse sinapsi:

- nel midollo (1);
- nel cervelletto e nella regione del subcorticale (2);
- nella regione corticale (3).

Il controllo oculare infine, è necessario quando la sensazione è assente o insufficiente. La conoscenza da input sensoriale richiede la partecipazione della corteccia celebrale per l'elaborazione delle informazioni.

Ciò che conferisce alla mano un valore sensitivo eccezionale non è solo il grande numero

di corpuscoli sensibili presenti sulla superficie, ma anche la possibilità di aumento della relativa capienza di informazioni per mezzo di manovre volontarie di esplorazione come la manipolazione e tastare gli oggetti. Quindi, la mano può essere considerata come organo sensoriale.

In Tab.1.1 sono riportate alcune caratteristiche fondamentali della mano umana, ovviamente tali valori sono indicativi, in relazione alle enormi differenze che si possono avere tra un individuo ad un'altro. Tuttavia esse ci consentono di avere un'idea complessiva delle prestazioni alle quali dovrebbe ispirarsi una mano robotica che ne voglia imitare le caratteristiche.

Tab. 1.1: Caratteristiche principali della mano umana

Proprietà	
Numero di g.d.l.	22
Tipologie di presa	Prese di forza e di precisione
Massima Forza di presa	100 ÷ 500 N
Massima flessione	100 ° in funzione del giunto
Sensori presenti	$\simeq 17000$
Sensibilità propriocettiva	posizione, movimento, forza
Sensibilità esteroceettiva	pressione, forza, accelerazione, temperatura
Controllo proporzionale	possibilità di regolare la forza e la velocità in accordo con la tipologia di presa
Numero di flessioni massime	limitato alla fatica muscolare
Peso	$\simeq 400$ g
Mobilità del polso	2+1 g.d.l

Cap. 2 Caratteristiche Funzionali delle Mani Robotiche

2.1 Introduzione

Le mani robotiche ad elevata destrezza, a fronte di risultati funzionali a volte sorprendenti, presentano molti aspetti critici, tra i quali l'estrema complessità di costruzione e montaggio, la bassa integrabilità dei sistemi sensoriali, limiti evidenti di affidabilità ed idoneità all'impiego in ambienti critici, come ad esempio nelle applicazioni spaziali. Possibile causa di queste insoddisfacenti caratteristiche è un progetto meccanico del singolo dito inadeguato, ancora ispirato a concetti e soluzioni costruttive mutate dalla meccanica tradizionale, con pochi riferimenti reali a quei modelli biologici di cui si vorrebbe invece imitare le capacità, come mostrato in Fig.2.1.

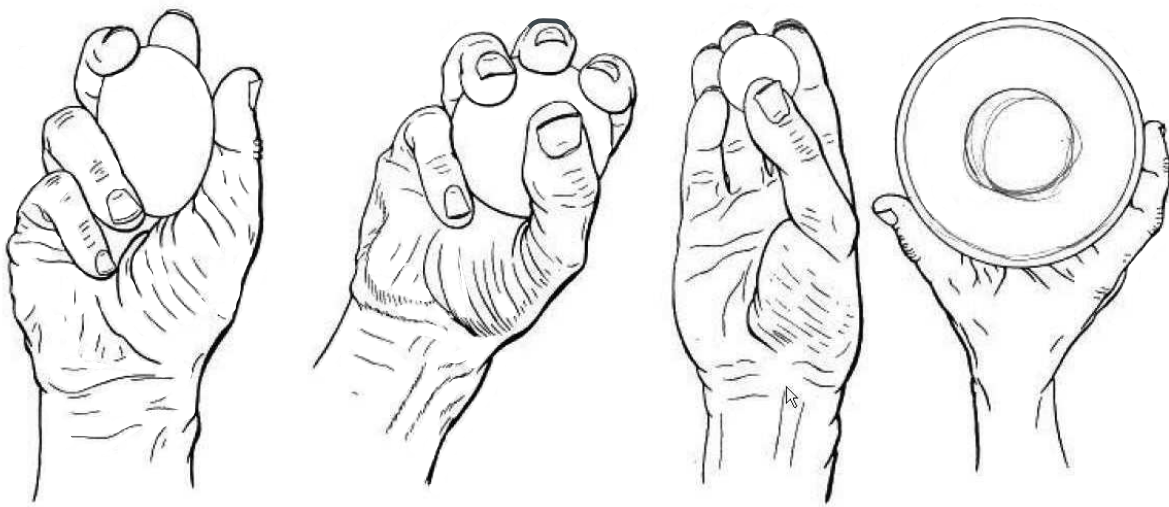


Fig. 2.1: Adattabilità della mano umana.

Nei seguenti capitoli saranno introdotte le caratteristiche delle principali mani robotiche presenti in letteratura e successivamente saranno introdotti i parametri di progetto che hanno condotto alla progettazione e alla realizzazione della mano robotica Ca.U.M.Ha. (Cassino-Underactuated-Multifinger-Hand).

In particolare, una mano robotica ad elevate prestazioni che si ispiri alla mano umana, dovrebbe avere le seguenti caratteristiche:

- possedere un alto numero di gradi della libertà (g.d.l.);
- essere capace di differenti tipi di presa, di precisione e di forza;
- impiegare una forza molto elevata durante la presa, ma allo stesso tempo dovrebbe essere capace dei movimenti di precisione;
- possedere un elevato numero di sensori, sia propriocettivi che esteroceettivi, per le misure differenti di forza, posizione, velocità, temperatura e così via;
- poter regolare la forza e la velocità secondo i differenti oggetti da afferrare e movimentare;
- stesso formato e peso della mano umana.

2.2 Caratteristiche di un dito robotico

Le caratteristiche fondamentali del sistema dito-attuazione di una mano robotica dipendono dalle scelte effettuate per la realizzazione dei vari sottosistemi che compongono la mano stessa. I sottosistemi fondamentali, nei quali può essere scomposto un dito robotico, sono:

- *la struttura meccanica e articolazioni;*
- *il sistema di trasmissione;*

- *il sistema di attuazione;*

L'analisi di questi sottosistemi illustrata nei prossimi paragrafi è volta ad evidenziare le differenze costruttive che si possono avere, nel caso in cui si voglia emulare lo schema della mano umana.

2.2.1 Struttura meccanica e articolazioni

La mano umana presenta una struttura di tipo endoscheletrica, cioè, le ossa, tenute insieme dai legamenti, fungono da supporto per i muscoli ed i tendini che servono ad azionare il dito stesso, come mostrato in Fig.2.2. Al contrario, nella maggior parte delle mani robotiche, la struttura è di tipo esoscheletrica, cioè rigida e cava, in modo tale da contenere all'interno il sistema di trasmissione. Un esempio di una struttura esoscheletrica è mostrato in Fig.2.3 e riportato in [Figliolini e Ceccarelli, 2002].



Fig. 2.2: Schema del dito con struttura endoscheletrica.

La concezione meccanica tradizionale usa soluzioni tecniche come perni e cuscinetti di vari tipo, funzionalmente adatte a moti rotatori di ampiezza illimitata, come evidenziato in [Lotti e Vassura, 2002]. I modelli biologici invece presentano un uso molto finalizzato di coppie cinematiche essenziali, di scorrimento o di rotolamento, destinati a moti relativi di ampiezza limitata, con integrazione funzionale di legamenti e tendini. Una soluzione meccanica che differisce dall'applicazione della cerniera classica è stata analizzata in [Jobin et al., 2004].

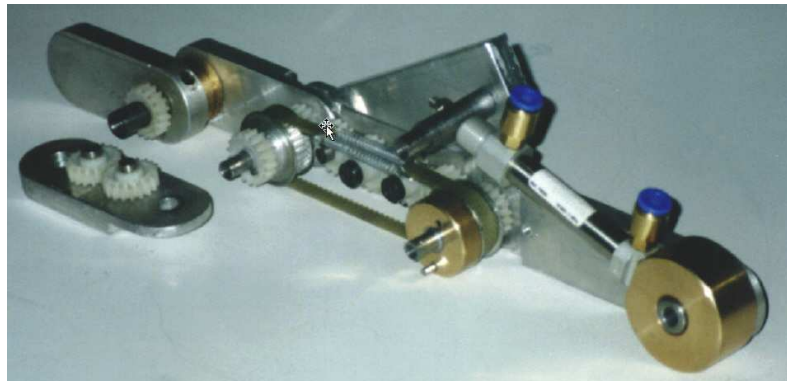


Fig. 2.3: Schema del dito con struttura esoscheletrica.

Con riferimento alle mani, le strutture articolate delle dita possono essere ottenute usando giunti abbastanza differenti dagli accoppiamenti classici basati sul disegno del perno e cuscinetto come riportato in Fig.2.4a. Le soluzioni alternative possono essere trovate secondo concetti differenti, suggeriti spesso dall'osservazione della natura. Si possono distinguere due classi di soluzioni:

- giunti in cui il movimento relativo fra i link rigidi adiacenti è ottenuto per mezzo di coppie cinematiche. Questo significa che si hanno superfici di contatto fra i due link e una discontinuità di materiale, come illustrato in Fig.2.4b, c e d;
- giunti in cui il movimento relativo è permesso tramite la deformazione di una parte compliant della struttura che collega in modo permanente i due link rigidi. In questo caso la parte compliant di collegamento può essere realizzata di materiale differente

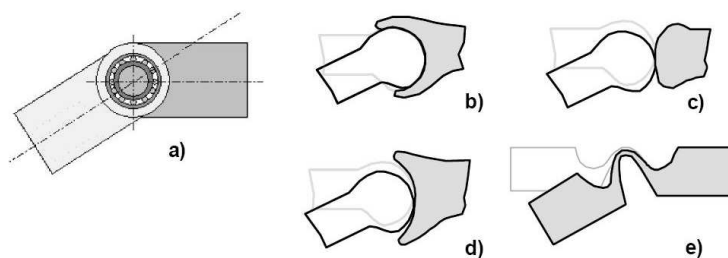


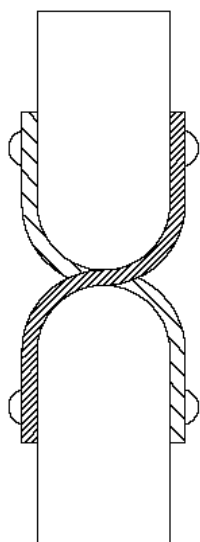
Fig. 2.4: Alcune tipologie di giunti per mani robotiche.

(per esempio molle in gomma o d'acciaio) o realizzato introducendo una conformità strutturale all'interno di una struttura continua (meccanismo compliant), come riportato in Fig.2.4e.

In Fig.2.5 è riportato lo schema di funzionamento di giunti a rotolamento di nuova concezione. Il progetto proposto mira ad unire insieme due caratteristiche importanti, le lamine flessibili rigide in un senso e lamini flessibili compliant nell'altro senso. Le fasce compliant sono precaricate, con conseguente preloading di tutte le lamine nel giunto. Esempi di giunti rotolanti sono riportati in Fig.2.5. Nel caso a) di Fig.2.5 è mostrato il principio di funzionamento, quando lungo un asse è posta una fascia flessibile rigida e lungo l'altro asse una fascia flessibile compliant, precaricate l'una contro l'altra. Tale sistema permette di ottenere un rotolamento di una superficie rispetto all'altra solo quando il valore di precarico è superato. Nel caso b) è mostrato il prototipo con una lamina di metallo in un senso e un O-ring nell'altro senso; il caso c) mostra il prototipo con le lamine di Dyneema (Fibra polietilenica, PE HT, con elevatissime caratteristiche meccaniche) in un senso e O-ring nell'altro; nell'ultimo caso è mostrato il prototipo con lamine di Dyneema in entrambi i sensi.

2.2.2 Il sistema di trasmissione

In molte mani robotiche il percorso dei tendini, dagli attuatori remoti fino ai giunti da azionare, viene guidato mediante treni di pulegge allo scopo di eliminare gli effetti dell'attrito; il modello biologico vede invece i tendini guidati entro guaine lubrificate, Fig.2.6. La soluzione con pulegge, nata dalla incapacità di sviluppare soluzioni tecnologiche di guaine a basso attrito, finisce per penalizzare i vantaggi intrinseci della trasmissione del moto con organi flessibili. Nelle Fig.2.7, Fig.2.8 e Fig.2.9 sono stati riportati alcuni sistemi che operano mediante la trasmissione a cavi.



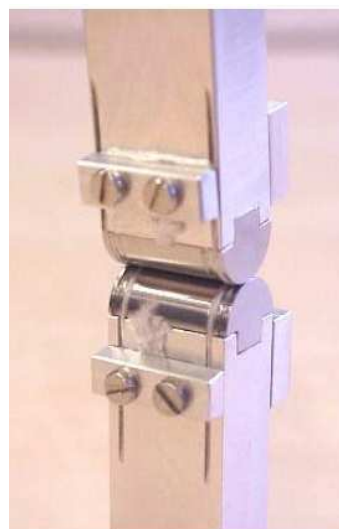
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 2.5: Esempi di giunti rotolanti; a) principio di funzionamento, lungo un asse è posta una fascia flessibile rigida e lungo l'altro asse una fascia flessibile compliant, precaricate l'una contro l'altra; b) prototipo con una lamina di metallo in un senso e un O-ring nell'altro senso; c) prototipo con le lamine di Dyneema (Fibra polietilenica HT) in un senso e O-ring nell'altro; d) prototipo con lamine di Dyneema in entrambi i sensi.

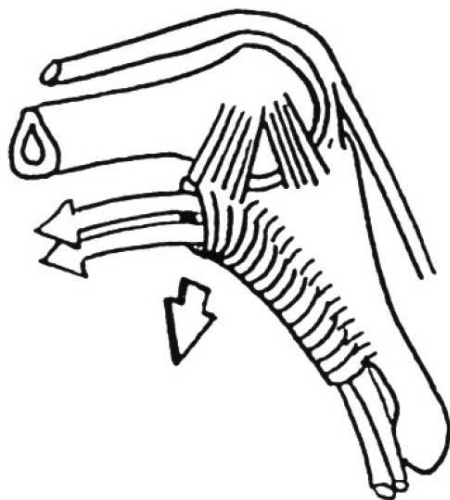


Fig. 2.6: Sistema di azionamento nelle mani umane.

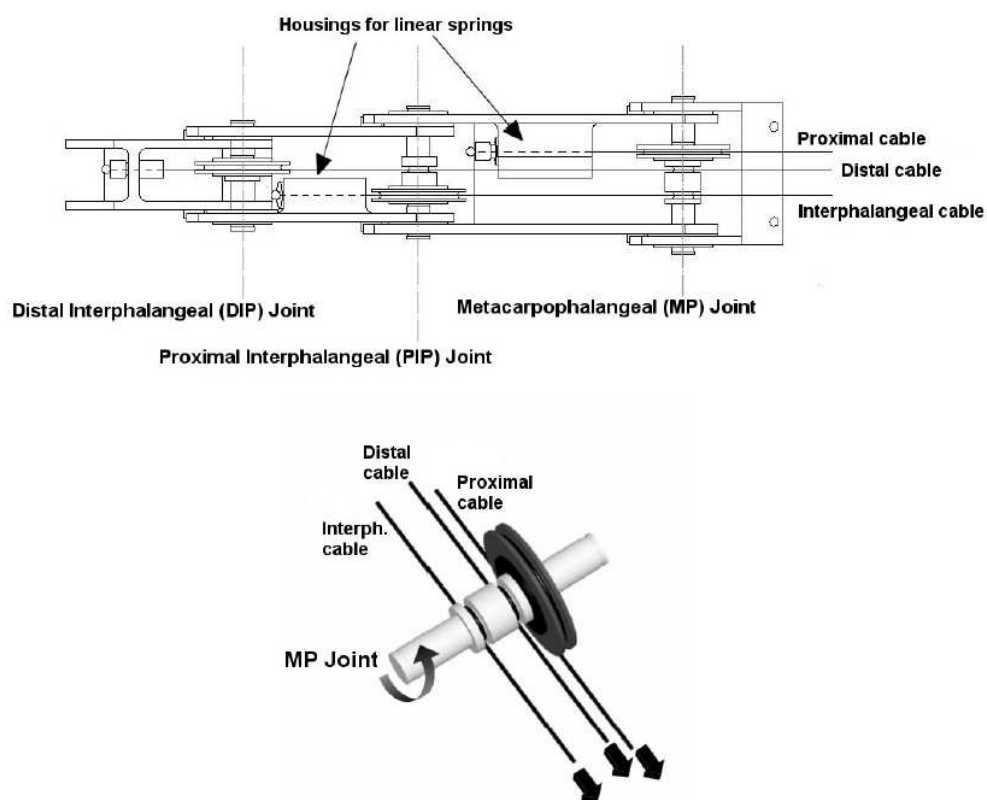


Fig. 2.7: Sistema di trasmissione mediante pulegge(Spring Hand).

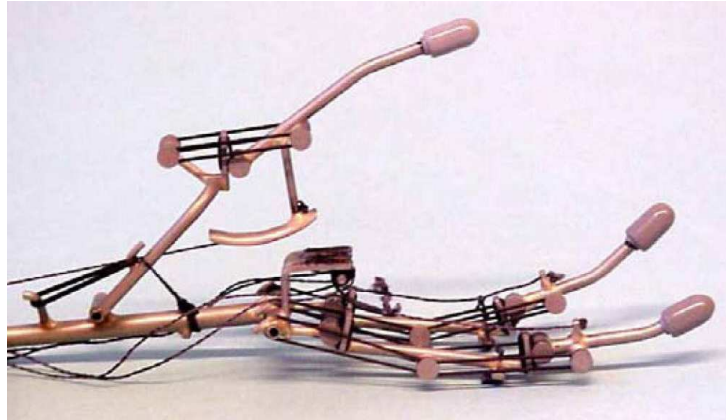


Fig. 2.8: Sistema di azionamento mediante cavi: prototipo costituito da due dita e un pollice.

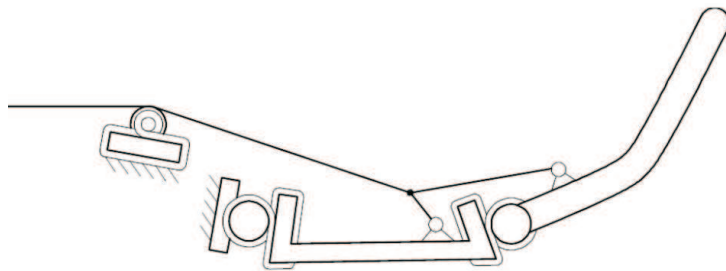


Fig. 2.9: Sistema di azionamento mediante cavi: schema cinematico del solo dito.

2.2.3 Il sistema di attuazione

L'utilizzo di un sistema di attuazione basato su attuatori elettromagnetici tradizionali (macroattuatori) limita notevolmente il numero di g.d.l., poiché è difficile disporre di più di uno o due attuatori per ogni dito all'interno della mano, come descritto in [Carrozza et al., 2002]. Il limitato numero di g.d.l. comporta l'impossibilità, da parte della mano, di avvolgersi intorno all'oggetto afferrato durante un generico compito di presa. Le caratteristiche geometriche rimangono invariate qualunque sia l'oggetto che l'utente desidera afferrare, come mostrato in [Figliolini e Ceccarelli, 1998]. Ne consegue che l'area di contatto tra oggetto e mano risulta limitata e di conseguenza il dispositivo deve esercitare una forza elevata per garantire una presa stabile. In figura sono stati riportati degli esempi di mani robotiche che utilizzano dei macro attuatori.

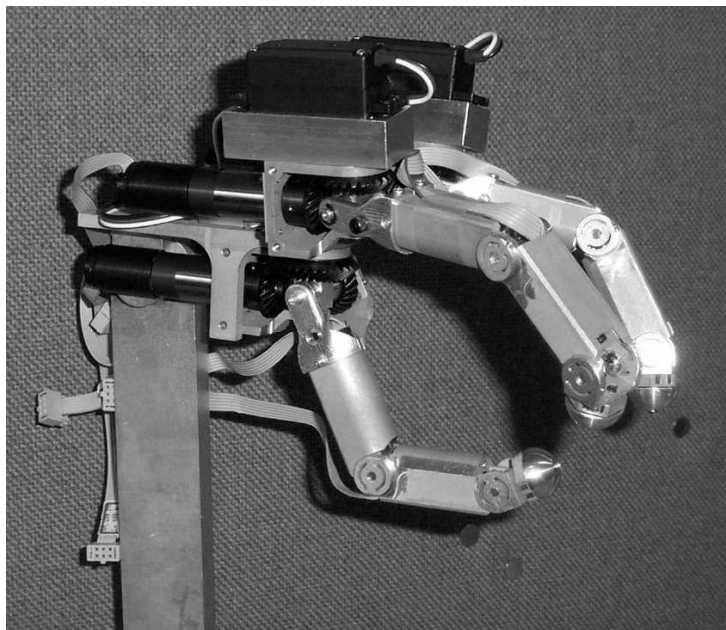


Fig. 2.10: Mano robotica Postech Hand V.

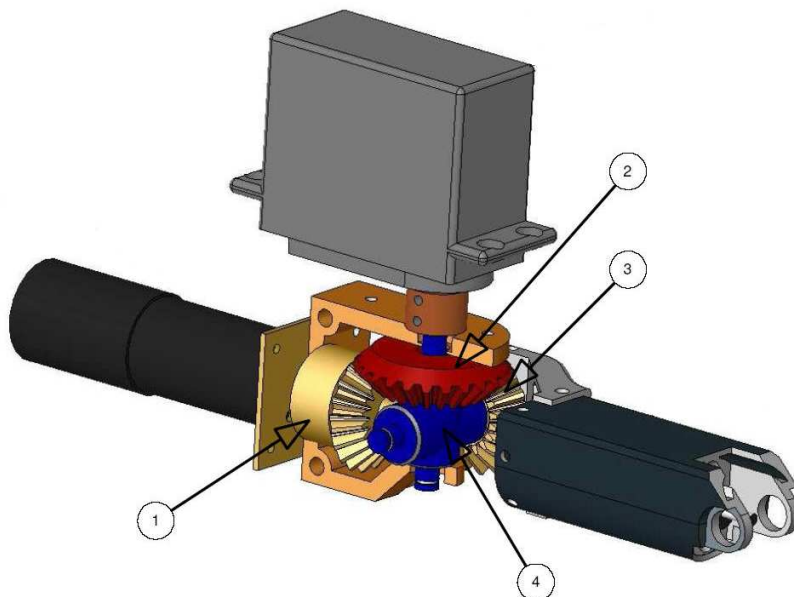


Fig. 2.11: Mano robotica Postech Hand V, particolare del macro attuatore.

2.3 Esempi di mani robotiche

Negli ultimi due decenni sono stati sviluppati numerosi prototipi di mani robotiche multidita con lo scopo di imitare la destrezza e l'abilità della mano umana. Questi prototipi sono stati realizzati focalizzando l'attenzione sull'accuratezza, sul range di movimento e sulle azioni manipolative. La manipolazione umana, infatti, è costituita da movimenti precisi e lenti, ma anche da azioni dinamiche in cui la natura del contatto tra le dita e l'oggetto da manipolare cambia dinamicamente. L'uomo riesce a cogliere tutti i vantaggi di questa azione dinamica durante la manipolazione grazie ad un efficacissimo e multiforme sistema sensoriale. Non meno importante, anzi indispensabile, è l'unità di controllo e governo rappresentato dal cervello, capace di vagliare e processare moltissime informazioni e di affrontare problemi decisionali e pianificativi. Tutto ciò viene poi legato da un costante e continuo scambio di informazioni tra i due sistemi, che consente di realizzare azioni manipolative di difficile imitazione da parte dei più sofisticati sistemi meccatronici. È chiaro, quindi, che alla base dello sviluppo di mani robotiche c'è proprio l'emulazione dello schema logico di funzionamento della mano umana, alla quale si fa riferimento per lo sviluppo di mani robotiche o protesi di mano umane. Nei prossimi paragrafi saranno analizzate le caratteristiche fondamentali di alcune tra le più rilevanti mani robotiche.

2.3.1 High speed multifingered hand

La High Speed Multifingered Hand è una mano robotica sviluppata presso l'Università di Tokyo e mostrata in Fig. 2.12. Al fine di ottenere delle buone prestazioni, per quanto riguarda manipolazioni veloci, è stata adottata una determinata filosofia per la realizzazione del progetto meccanico. I tre parametri fondamentali sui quali è stato basato l'intero progetto sono: l'accuratezza, le applicazioni con alte velocità ed accelerazioni ed il peso contenuto, come riportato in [Namiki et al., 2003]. Ciascuno di questi fattori influenza un particolare aspetto della manipolazione. Il peso contenuto, ad esempio, è

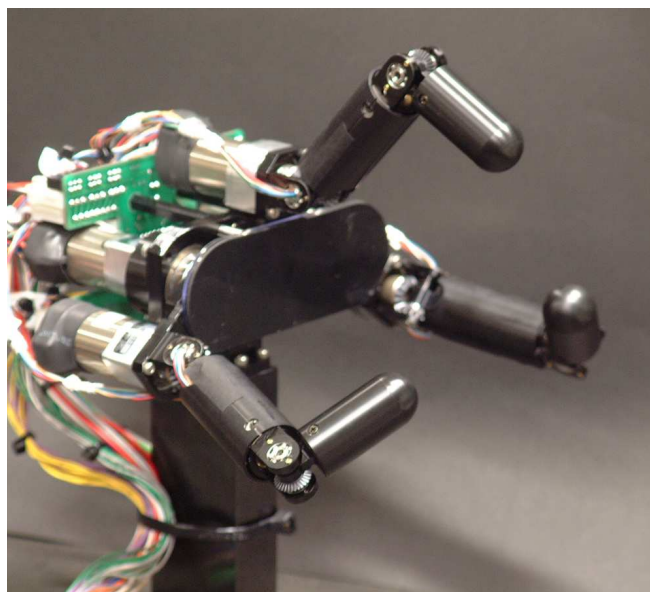


Fig. 2.12: High speed hand, [Ishikawa Namiki Komuro Laboratory, 2006].

richiesto quando si ipotizza un possibile utilizzo della mano robotica come end effector di un manipolatore. Allo stesso tempo masse e dimensioni contenute comportano effetti inerziali trascurabili, ciò consente di operare ad alte velocità ed accelerazioni per cui la mano può raggiungere velocità di chiusura dei giunti pari a 180° in 0.1 secondi, [Imai et al., 2004], permettendo in ogni caso un controllo stabile. La struttura meccanica è semplice, infatti ogni dito presenta solo 2 o 3 gradi di libertà. In particolare, come mostrato in Fig. 2.13, ogni dito è composto da due falangi a 2 gradi di libertà. Le due dita esterne hanno anche la possibilità di ruotare attorno al palmo ed opporsi al dito centrale solidale con la base fissa. In totale la mano robotica possiede otto coppie rotoidali.

La Fig. 2.13 mostra il disegno meccanico della mano robotica, o è composta da tre dita denominate dito destro, dito sinistro e dito indice, con riferimento alla Fig. 2.13a. I giunti compresi tra le falangi sono stati denominati interphalangeal joint (IP), i giunti tra la falange ed il palmo sono stati denominati metacarpophalangeal joint (MP), ed infine la possibilità delle due dita laterali di ruotare all'esterno è stata individuata dai giunti trapezio-metacharpal (TM), con riferimento all'anatomia umana come riportato in

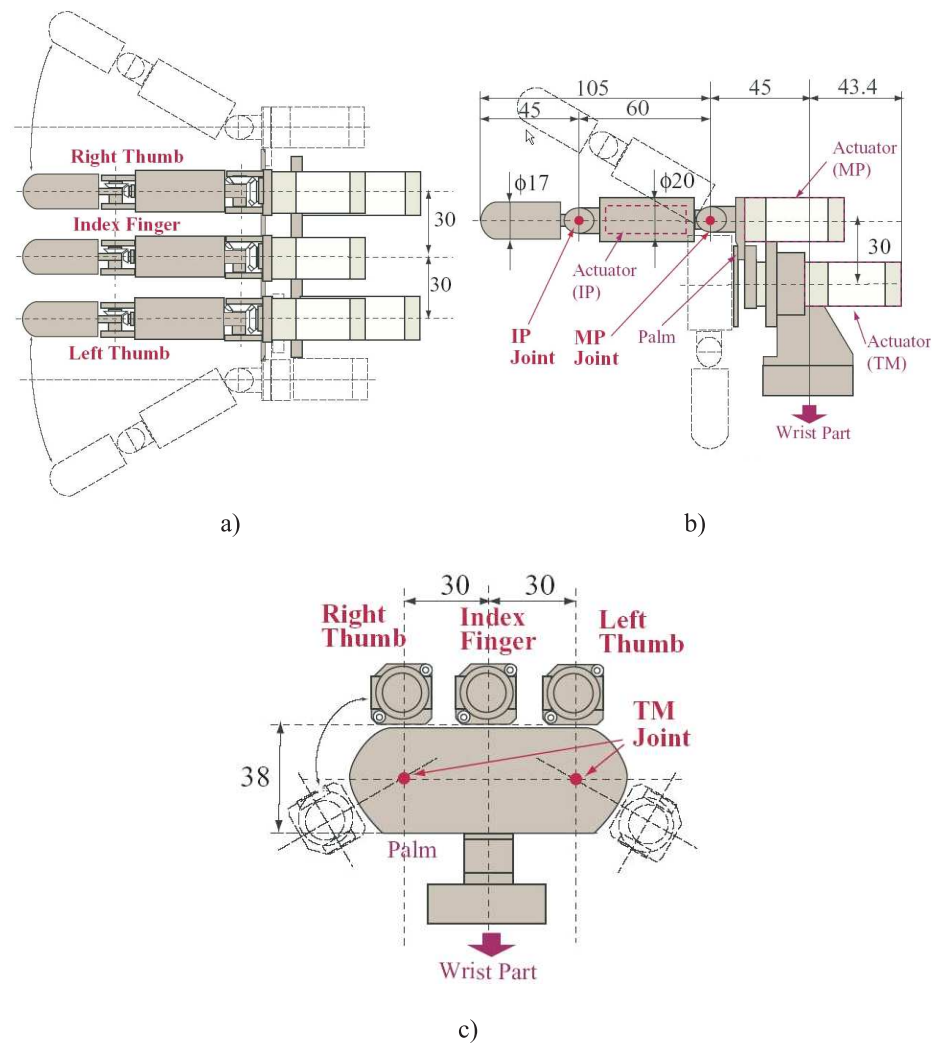


Fig. 2.13: Schema costruttivo della mano robotica ad alta velocità: a) vista dall'alto; b) vista laterale; c) vista frontale.

[Namiki et al., 2003].

Al fine di ottenere un meccanismo leggero, sono state usate tre sole dita, che rappresentano il minimo numero possibile che permette di avere una presa stabile. L'alto valore di adattabilità che scaturisce dal progetto meccanico e dalle scelte degli attuatori consente di ottenere manipolazioni statiche di alta precisione, come mostrato in Fig 2.14. L'azionamento dei giunti è di tipo elettrico realizzato attraverso motori brushless compatti, che uniti ad un sistema di trasmissione basato sull'utilizzo degli harmonic drive, direttamente

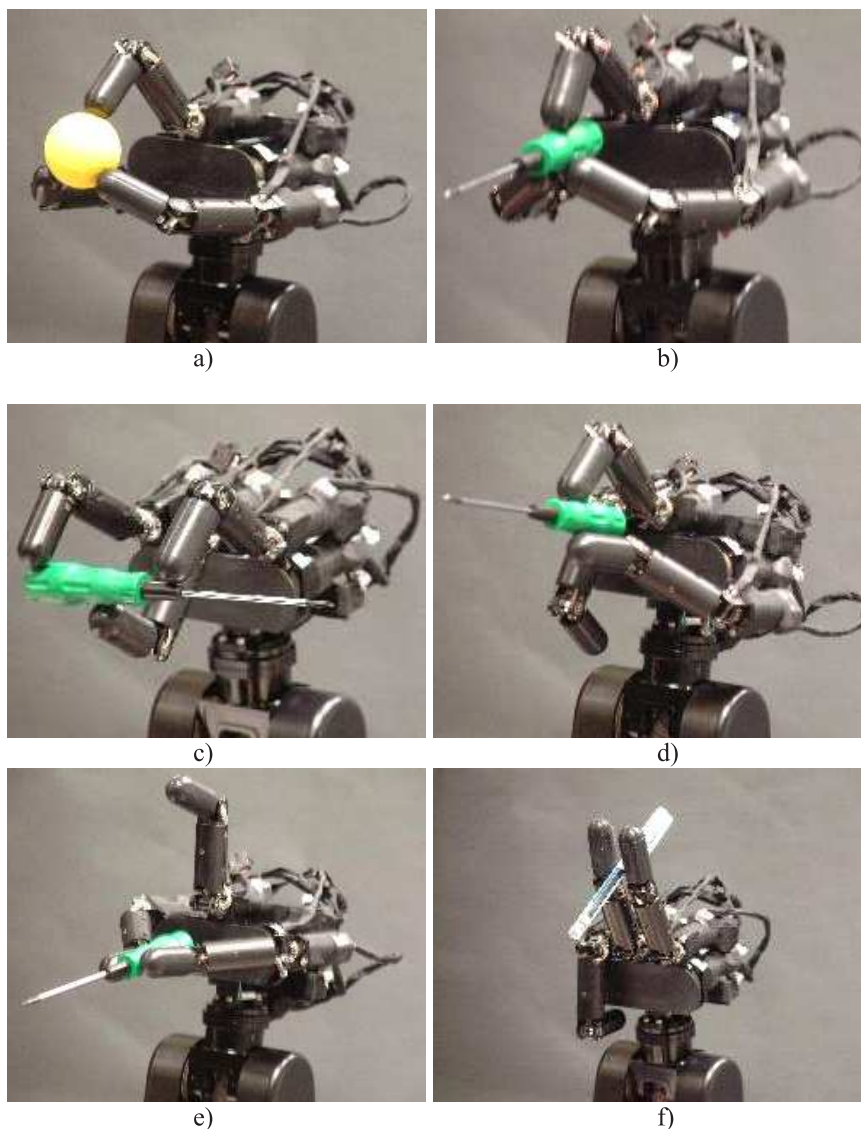


Fig. 2.14: Varie possibilità di presa: a) presa sferica circolare; b) presa circolare; c) presa prismatica; d) presa pollice-indice e) presa pollice-pollice f) presa laterale-laterale.

montati sul giunto, riescono a garantire un elevato rapporto di riduzione e giochi contenuti. Relativamente al controllo, la mano si avvale di un sofisticato sistema di sensorizzazione. Ogni attuatore incorpora degli encoder incrementali ad altissima risoluzione ($0,012^\circ$ per il giunto IP e $0,009^\circ$ per il giunto MP. Essi sono stati scelti in funzione delle elevate performances dinamiche della mano robotica. Inoltre, su ogni giunto sono posti anche

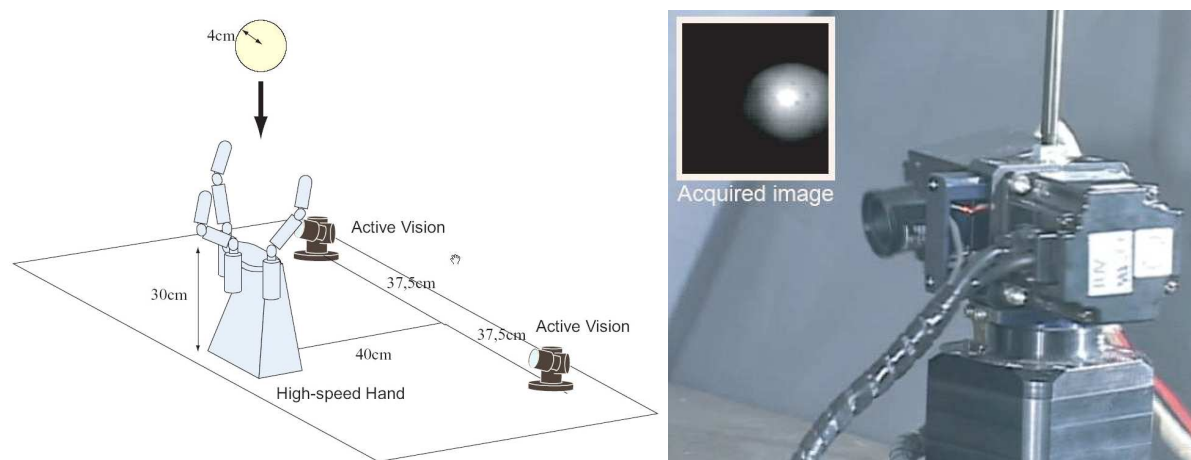


Fig. 2.15: Sistema di visione adottato: a) posizionamento relativo sistema di visione-mano; b) foto del sistema di visione e particolare dell'immagine acquisita.

degli strain gauges per la misura di coppia erogata e sull'estremità di ogni dito è installato un sensore per la misura di forza e coppia multi assiale. La determinazione della posizione dell'oggetto da afferrare è effettuata attraverso un sistema di visione esterno, come riportato in Fig. 2.15. Il sistema di visione adottato è ad alta risoluzione e alta velocità di inseguimento su colonnine parallele, denominato CPV (Column-Parallel high speed Vision system), composto da una coppia di fotocamere digitali montate su due teste auto orientabili (colonnine) gestite da un controllo separato, capace di riconoscere le primitive geometriche degli oggetti da manipolare e di inseguirne la traiettoria. Queste informazioni vengono inviate con una velocità di un kHz al sistema di controllo centrale, che dovrà tenerne in conto per il calcolo delle coppie che gli attuatori dovranno fornire.

I dati tecnici di maggiore rilevanza sono riportati in Tab.2.1.

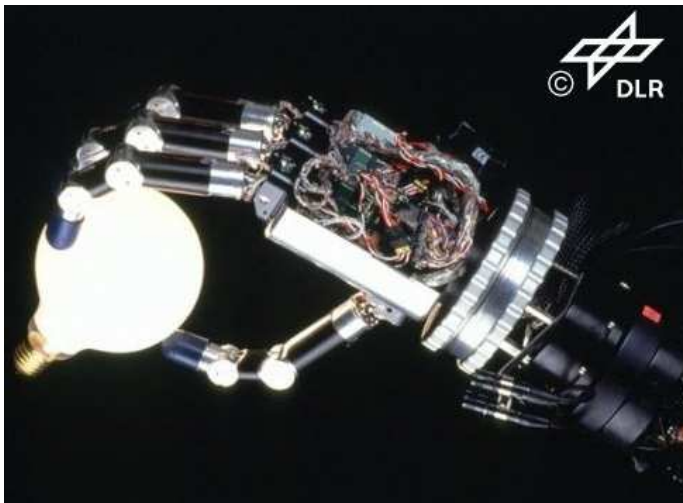
2.3.2 DLR hand

Nel 1997 è stata sviluppata presso il centro aerospaziale tedesco nell'Istituto di Robotica e Meccatronica la prima mano robotica articolata che integrava il sistema di attuazione e l'elettronica, come riportato in Fig. 2.16a.

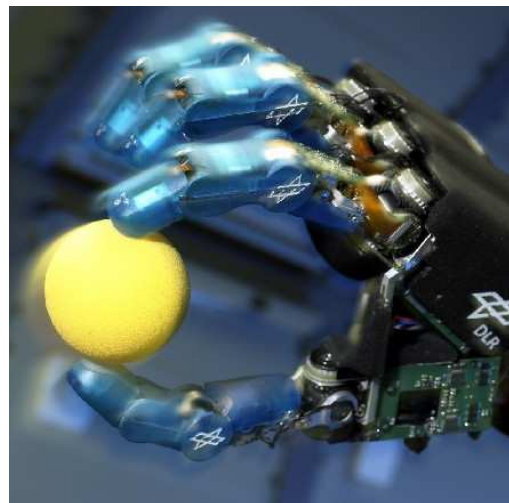
Tab. 2.1: Dati tecnici della Mano Robotica High Speed

Dati tecnici	
Numero di dita	3
Numero di g.d.l.	8
Numero di attuatori	8
Massima Forza	4 N

La mano robotica DLR I è stata considerata per diversi anni come la prima versione di prototipo di mano robotica che applicasse il concetto di mecatronica integrata, fornendo buone prestazioni di presa e manipolazioni, come riportato in [Butterfas et al., 2001] e [Borst et al., 2003]. Al fine di ottenere la massima flessibilità e prestazioni, la filosofia alla base del progetto era quella di integrare tutti i componenti, quali sensori ed attuatori, e di ridurre in maniera massiccia il cablaggio dei componenti. L'aspetto principale dello sviluppo di tale mano robotica è stato quello di ottenere una capacità di presa ed una



a)



b)

Fig. 2.16: Foto della mano DLR [DLR Institute, 2006]; a) DLR I; b) DLR II.

possibilità di manipolazione degli oggetti in maniera del tutto indipendente dalla presenza di un braccio robotico. La capacità di funzionamento senza l'ausilio di un braccio robotico era alla base della scelta di integrare completamente l'elettronica e gli attuatori all'interno del palmo della mano stessa.

I problemi di manutenzione della mano robotica DLR I e la possibilità di ridurre contemporaneamente il peso complessivo ed il costo del prototipo hanno portato allo sviluppo della mano robotica DLR II riportata in Fig. 2.16b. Infatti le dita e la base dei giunti sono state sviluppate in modo da avere una struttura di tipo *aperta*. Tale struttura è stata completata utilizzando delle cover che chiudono la parte esterna delle dita. Inoltre è stato possibile sostituire gli elementi finali delle dita al fine di avere differenti possibilità di presa per oggetti con differenti forme e dimensioni, senza dover riprogettare le dita. In totale la mano presenta un numero complessivo di gradi di libertà pari a tredici. Ogni dito è costituito da tre giunti indipendenti e ognuno è comandato da un attuatore, il grado di libertà aggiuntivo è legato alla possibilità di ruotare della base del pollice. Il sistema di attuazione è realizzato con motori brushless in corrente continua, che azionano degli harmonic drive posizionati nei giunti intermedi e con un sistema di ruote dentate coniche alla base delle dita. La mano robotica per teleoperazioni e operazioni di presa in autonomia richiede un insieme di sensori di forza e posizione. Ogni giunto è equipaggiato con un sensore di coppia potenziometrico, appositamente realizzato. Oltre ai sensori di coppia nei giunti ogni dito è equipaggiato con un sensore che può rilevare le forze F_x, F_y, F_z dirette lungo i tre assi e i tre momenti M_x, M_y, M_z agenti lungo essi, come riportato in Fig. 2.17.

Il calcolo delle forze agenti e dei momenti si ottiene applicando le seguenti formulazioni:

$$F_x = K_1(\epsilon_7 - \epsilon_9); F_y = K_2(\epsilon_7 - \epsilon_9); F_z = K_3[(\epsilon_1 - \epsilon_2) + (\epsilon_3 - \epsilon_4) + (\epsilon_5 - \epsilon_6)]; \quad (2.1)$$

$$M_x = K_4(\epsilon_3 - \epsilon_4 - \epsilon_5 - \epsilon_6); M_y = K_5(\epsilon_1 - \epsilon_2 - 1/2(\epsilon_3 - \epsilon_4 + \epsilon_5 - \epsilon_6)); M_z = K_6(\epsilon_7 - \epsilon_8 + \epsilon_9 - \epsilon_{10}) \quad (2.2)$$

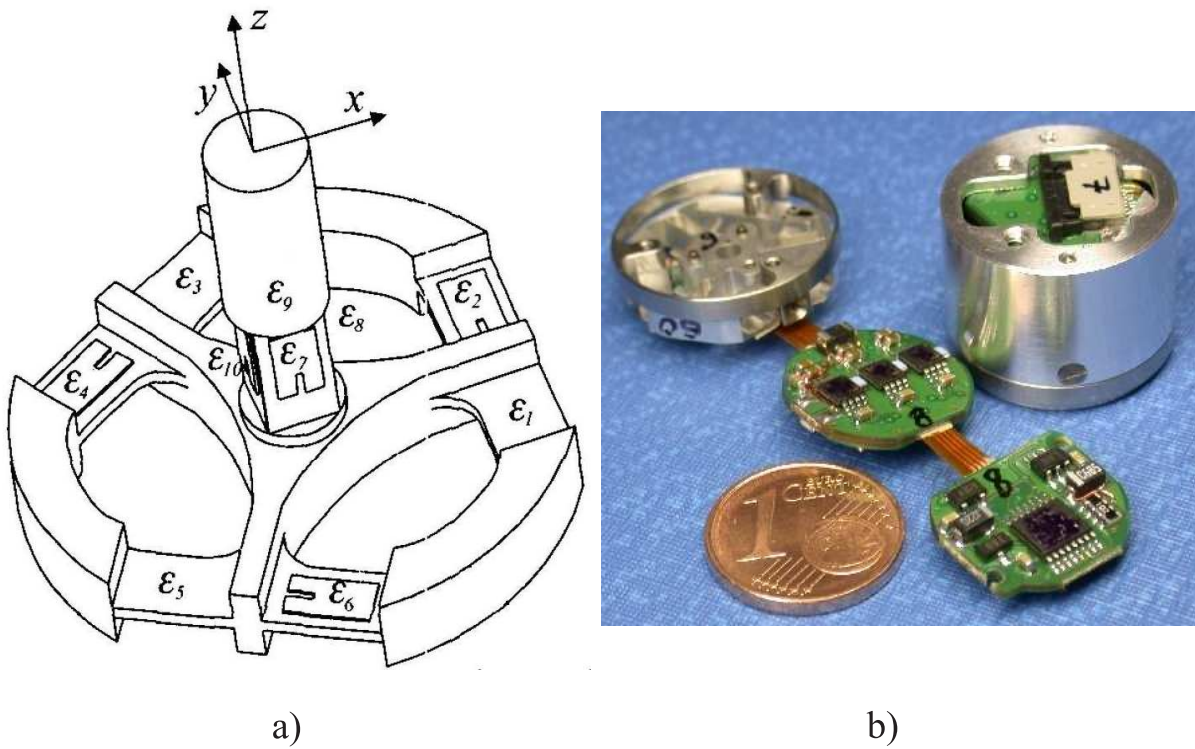


Fig. 2.17: Sensore montato all'estremità del dito della mano DLR II; a) struttura meccanica; b) foto.

Dove le costanti K_i sono dei parametri di progetto.

I dati tecnici di maggiore rilevanza sono riportati in Tab.2.2.

Tab. 2.2: Dati tecnici della Mano Robotica DLR

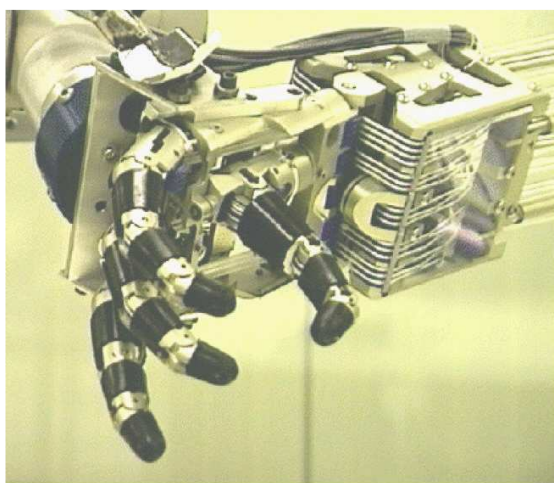
Dati tecnici	
Numero di dita	4
Numero di g.d.l.	13
Numero di attuatori	13
Massima Forza	30 N

2.3.3 Utah/Mit hand

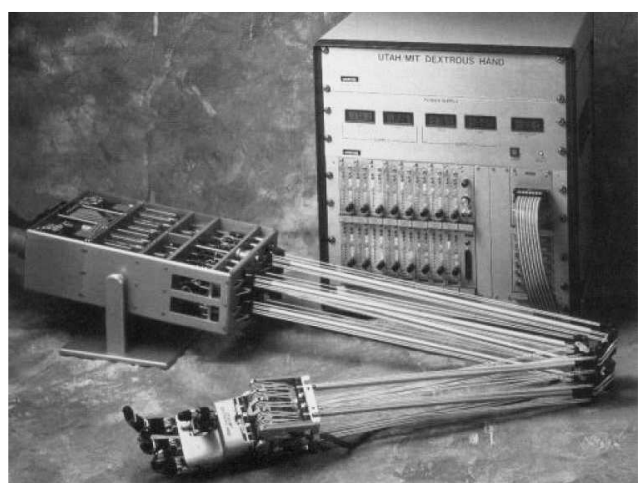
La mano robotica Utah/Mit hand è stata sviluppata presso il MIT (Massachusetts Institute of Technology) nell'ambito della ricerca sullo sviluppo di mani per la presa e la manipolazione degli oggetti, come riportato in [Jacobsen et al., 1986]. La mano robotica destrorsa dell'Utah/Mit presenta una struttura di tipo antropomorfa con 4 gradi di libertà per le dita e per il pollice, come mostrato in Fig. 2.18a. Il pollice è stato realizzato in maniera tale da essere sempre in opposizione ed inoltre la lunghezza delle sue falangi e la posizione dei giunti sono state alterate al fine di migliorare il sistema di trasmissione della forza.

I 16 gradi di libertà della mano sono attuati utilizzando un sistema a cavi antagonisti con 32 tendini polimerici indipendenti ed attuatori pneumatici, come mostrato in Fig. 2.18b. Gli attuatori scelti sono veloci, presentano un basso attrito ed inoltre generano relativamente delle forze elevate.

Il sistema di controllo della mano robotica dell'Utah/Mit è composto da un controllore che gestisce ognuno dei 16 g.d.l. gestendone la posizione mediante il controllo della tensione dei tendini. La mano robotica dell'Utah/Mit ha delle dimensioni esterne e una



a)



b)

Fig. 2.18: Mano robotica Utah/Mit hand.

modularità di progetto tali da farla assomigliare ad una mano umana. D'altro canto però il cablaggio dei tendini antagonisti ed il sistema di controllo sono complessi e richiedono una unità esterna separata. La mano è azionata mediante attuatori pneumatici a doppio effetto la cui camicia esterna è realizzata in vetro. La pressione di esercizio può variare da 4 fino a 6 bar e permette di sviluppare una forza massima di ≈ 31 N. All'interno dei giunti sono stati posizionati dei sensori ad effetto Hall che permettono di rilevare la posizione angolare di ogni singolo giunto. Con la stessa tipologia di sensori è stata rilevata anche la tensione dei tendini. Il polso è stato realizzato mediante un giunto universale tale da garantire delle rotazioni paragonabili a quelle della mano umana, presentando un angolo di rollio di 270° , un beccheggio di 90° , ed una imbardata pari a 30° .

Il sistema di trasmissione a tendini per garantire un azionamento efficiente delle dita richiede un sistema complesso di 288 pulegge. I dati tecnici di maggiore rilevanza sono riportati in Tab.2.3.

Tab. 2.3: Dati tecnici della mano robotica Utah/Mit hand

Dati tecnici	
Numero di dita	4
Numero di g.d.l.	16
Numero di attuatori	32
Forza Massima	31 N

2.3.4 Mano robotica Stanford / JPL

La mano robotica Stanford/JPL (Jet Propulsion Laboratory) è stata progettata da Kenneth J. Salisbury nell'ambito del suo dottorato di ricerca. Il peso della sola mano robotica è di circa 1.1 Kg, mentre il driver di azionamento pesa circa 5.5 Kg. La forza massima esercitabile può raggiungere i 45 N in un tempo di circa due minuti. Essa è costitui-

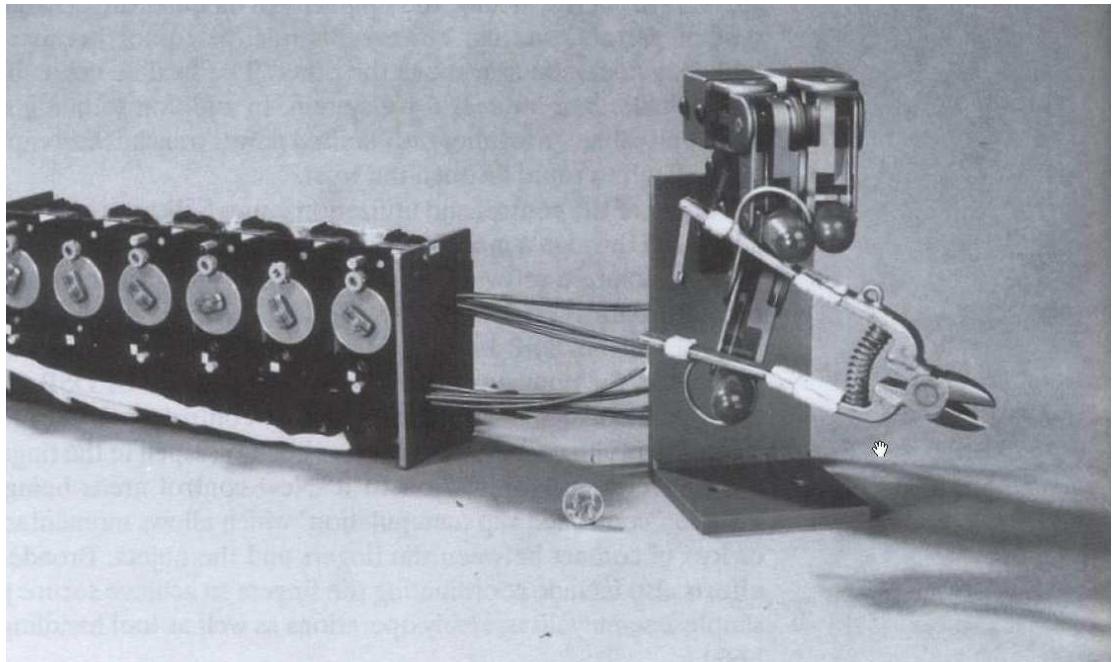


Fig. 2.19: Mano robotica stanford / JPL.

ta da due dita ed un pollice opponibile, nel complesso ha 9 g.d.l., come descritto in [Salisbury e Craig, 1981]. Ogni g.d.l. delle dita è gestito mediante dei cavi che scorrono in condotti lineari. La struttura delle dita è tale da essere modulare con un ridotto numero di parti. La posizione angolare delle falangi distali è rilevata mediante l'utilizzo di sensori di tipo strain gauge, mentre la posizione delle falangi prossimali è rilevata da encoder montati nei giunti e che permettono di avere un circuito di controllo ad anello chiuso. La parte terminale delle dita è stata realizzata in maniera tale da garantire una presa sicura. Come sistema di azionamento sono stati usati 12 servomotori con riduttore di velocità pari a 25:1. Ogni dito è composto da due giunti che conferiscono alle falangi prossimali una mobilità di 90° come moto di beccheggio imbardata. Le falangi distali invece possono compiere una rotazione di circa 135° . La seconda falange ha un range di mobilità maggiore per sopperire alla mancanza della terza falange. Questa soluzione costruttiva presenta dei vantaggi legati alla semplicità del dito modulare e ad un basso costo dei componenti. I dati tecnici di maggiore rilevanza sono riportati in Tab.2.4.

Tab. 2.4: Dati tecnici della mano robotica Stanford / JPL

Dati Tecnici	
Numero di dita	3
Numero di g.d.l.	9
Numero di attuatori	12
Massima Forza	45 N

2.3.5 La mano robotica LARM hand

La mano robotica Larm Hand è stata progettata presso il LARM (Laboratorio di Robotica e Meccatronica) dell'Università degli Studi di Cassino. Le caratteristiche fondamentali sulle quali è basato il progetto della mano robotica LARM con dita antropomorfe possono essere riassunte in tre aspetti, [Rodriguez et al., 2006]:

- meccanismo con 1 g.d.l. che riproduce la presa della mano umana su oggetti di forma regolare;
- progetto meccanico compatto e con elevata rigidità;
- basso costo.

La mano robotica LARM hand è costituita da tre dita contrapposte identiche, una delle quali è mostrata in Fig.2.20. Ogni dito ha 1 g.d.l, quindi nel complessivo si hanno 3 g.d.l.. Le dimensioni del prototipo sono pari a 1.5 volte quelle di una mano umana di dimensioni medie, come riportato in [Rodriguez et al., 2004]. Ogni dito è gestito da un motore in corrente continua, che attraverso due ingranaggi aziona il meccanismo del dito, come mostrato in Fig.2.21

I dati tecnici di maggiore rilevanza sono riportati in Tab.2.5. Al fine di avere un prototipo a basso costo e dal peso contenuto è stato utilizzato l'alluminio per la realizzazione

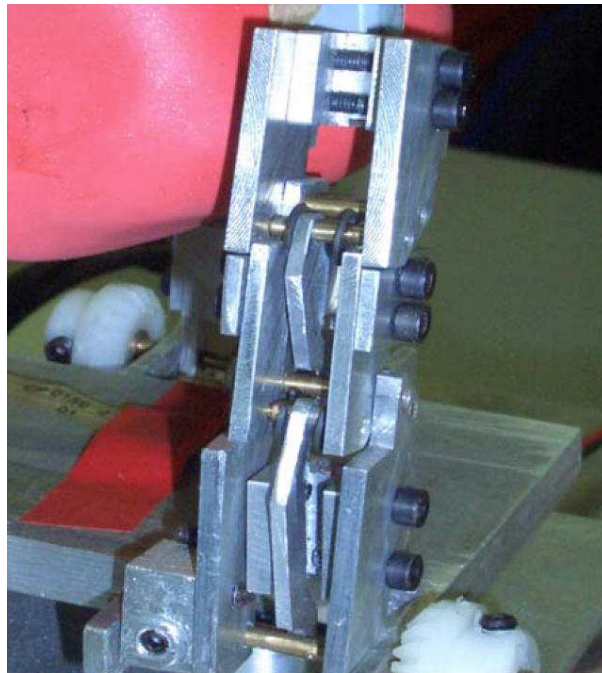


Fig. 2.20: Mano robotica Larm hand: particolare del dito.



Fig. 2.21: Mano robotica LARM hand in presa su un oggetto cilindrico.

dei componenti. La gestione dei motori in corrente continua è ottenuta mediante l'utilizzo di un modulo logico universale LOGO della Siemens. Per misurare la grandezza delle forze di presa, la mano robotica è stata sensorizzata utilizzando 10 sensori di forza del tipo

FSR150CP12, tali sensori sono stati montati sulle tre falangi di ogni dito e uno in posizione centrale in modo tale da rilevare la forza esercitata sul palmo della mano.

Tab. 2.5: Dati tecnici della Mano Robotica LARM hand

Dati Tecnici	
Numero di dita	3
Numero di g.d.l.	3
Numero di attuatori	3
Massima Forza	9 N

Cap. 3 Mani Robotiche Sottoattuate

3.1 La sottoattuazione

Le mani robotiche attualmente esistenti forniscono una buona funzionalità di presa, anche se, non sono in grado di replicare esattamente la capacità di presa propria della mano umana. Una scarsa adattabilità alle caratteristiche geometriche dell'oggetto non garantisce il mantenimento della presa in presenza di disturbi esterni (forza peso, forze di inerzia, carichi improvvisi, etc), per cui la presa rischia di non essere stabile. Molte mani robotiche sono dotate di un sistema di attuazione intrinseco, il quale, posto completamente all'interno della struttura della mano, governa simultaneamente il movimento delle dita e l'opposizione del pollice a livello delle articolazioni metacarpo-falangee. Questa scelta progettuale, unita ad un sistema di attuazione basato su azionamenti elettrici tradizionali (macroattuatori) limita notevolmente il numero di g.d.l., poichè non è possibile disporre di più di 1 o 2 attuatori all'interno della mano. La carenza di g.d.l. comporta l'impossibilità, da parte della mano, di avvolgersi intorno all'oggetto afferrato durante un generico compito di presa. Le caratteristiche geometriche della mano robotica rimangono invariate qualunque sia l'oggetto che si desidera afferrare, per cui ne consegue che l'area di contatto tra oggetto e mano risulta limitata, di conseguenza la mano in generale deve esercitare forze di presa più o meno elevate per garantire una presa stabile. In base a tali considerazioni, quindi, il problema è quello di ottenere un movimento articolato delle dita, capace di adattarsi alla generica forma dell'oggetto, pur non disponendo di un numero elevato di attuatori in grado di governare i vari g.d.l. Si tratta di trovare, quindi, una soluzione che permetta di migliorare l'adattabilità della mano robotica, mantenendo le dimensioni della mano robotica entro livelli accettabili. Una soluzione è quella di utiliz-

zare una particolare tipologia di meccanismi: i meccanismi sotto-attuati nei quali alcuni giunti attivi sono sostituiti da molle o battute meccaniche.

Un meccanismo viene detto sotto-attuato quando il numero di attuatori è minore del numero di gradi di libertà. Quando questo concetto è applicato ad un dito meccanico esso conduce all'adattabilità della presa. Una mano robotica che adotti questa soluzione per la movimentazione delle dita è in grado di avvolgere gli oggetti da afferrare e di adattarsi alla loro forma automaticamente, sebbene ciascun dito sia controllato da un numero di attuatori ridotto.

3.1.1 La sottoattuazione nei meccanismi per dita robotiche

Il problema proposto è quello di ottenere un movimento articolato delle dita del dispositivo, in modo da essere capace di adattarsi ad una generica forma dell'oggetto, pur non disponendo di un numero elevato di attuatori in grado di governare tutti i g.d.l. La soluzione proposta è quella di utilizzare una particolare tipologia di meccanismi, definiti in [Laliberté e Gosselin, 1998], meccanismi sotto-attuati.

Il controllo del dispositivo risulta essere piuttosto agevole in quanto l'adattamento avviene in maniera automatica e non richiede alcun controllo.

Un meccanismo sotto-attuato è caratterizzato da un numero di attuatori minore del numero di g.d.l., ossia gli attuatori vengono sostituiti da elementi elastici passivi (ad esempio molle) o fine corsa meccanici. Questi elementi sono piccoli, leggeri e permettono una riduzione del numero di attuatori. Essi possono essere visti come attuatori passivi che aumentano l'adattabilità passiva del meccanismo alla forma dell'oggetto afferrato, ma non possono e non devono essere gestiti dal sistema di controllo.

La corretta disposizione e la scelta delle caratteristiche funzionali degli elementi elastici o dei fine corsa meccanici garantisce una corretta esecuzione delle fasi di presa, come mostrato in Fig.3.1.

In una generica sequenza di presa, con l'oggetto in posizione fissa e dalla forma regolare, si possono distinguere nettamente le varie fasi, come mostrato in [Massa et al., 2001].

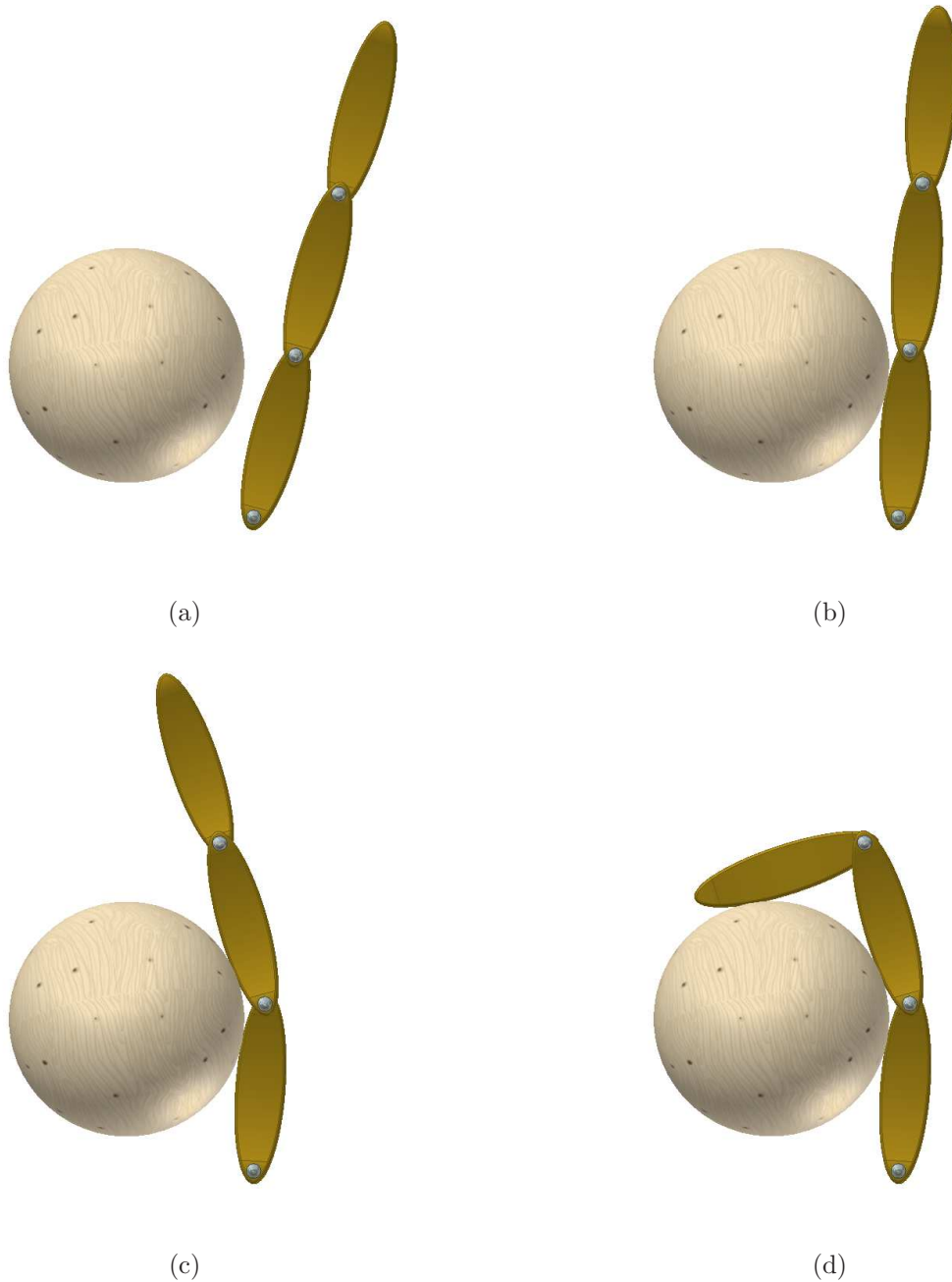


Fig. 3.1: Generica sequenza di presa su un oggetto di forma regolare: a) inizio della fase di presa; b) prima falange a battuta; c) seconda falange a battuta; d) terza falange a battuta.

In Fig.3.1a il dito è nella sua configurazione iniziale e nessuna forza esterna è presente. In Fig.3.1b la falange prossimale entra in contatto con l'oggetto. In Fig.3.1c la falange intermedia, dopo aver ruotato rispetto alla falange prossimale, si avvolge, a sua volta, intorno all'oggetto. Le prime due falangi non possono più muoversi, perché ostacolate dall'oggetto stesso. In Fig.3.1d, infine, il dito ha completato la fase di adattabilità all'oggetto, tutte e tre le falangi sono in contatto con esso.

In una generica sequenza di presa con l'oggetto in posizione fissa e dalla forma irregolare, si possono distinguere nettamente le varie fasi, come descritto precedentemente. Infatti, in Fig.3.2a il dito è nella sua configurazione iniziale e nessuna forza esterna è presente. In Fig.3.2b la falange prossimale entra in contatto con l'oggetto e si bloccherà in tale configurazione. In Fig.3.2c la falange intermedia, dopo aver ruotato rispetto alla falange prossimale, si avvolge, a sua volta, intorno all'oggetto fino ad arrivare alla configurazione di arresto. Le prime due falangi non possono più muoversi, perché sono ostacolate dall'oggetto considerato fisso. In Fig.3.2d, infine, il dito ha completato la fase di adattabilità all'oggetto, infatti tutte e tre le falangi sono in contatto con esso.

I meccanismi sotto-attuati permettono la presa di oggetti in un modo più naturale è più simile al movimento di presa realizzato dalla mano umana. La configurazione geometrica del dito è automaticamente determinata dai vincoli esterni associati alla forma dell'oggetto e non è necessaria l'attiva coordinazione delle varie falangi. E' importante notare che le sequenze mostrate in Fig.3.1 e 3.2 avvengono con un movimento continuo ottenuto con un solo attuatore.

3.1.2 Soluzioni costruttive per realizzare la sottoattuazione

Nell'ambito della robotica sono presenti differenti mani meccaniche basate su meccanismi sotto-attuati. Un'accurata analisi dello stato dell'arte mostra che le mani robotiche sotto-attuate possono essere differenziate in:

- *sottoattuazione basata sulla trasmissione a cavi*

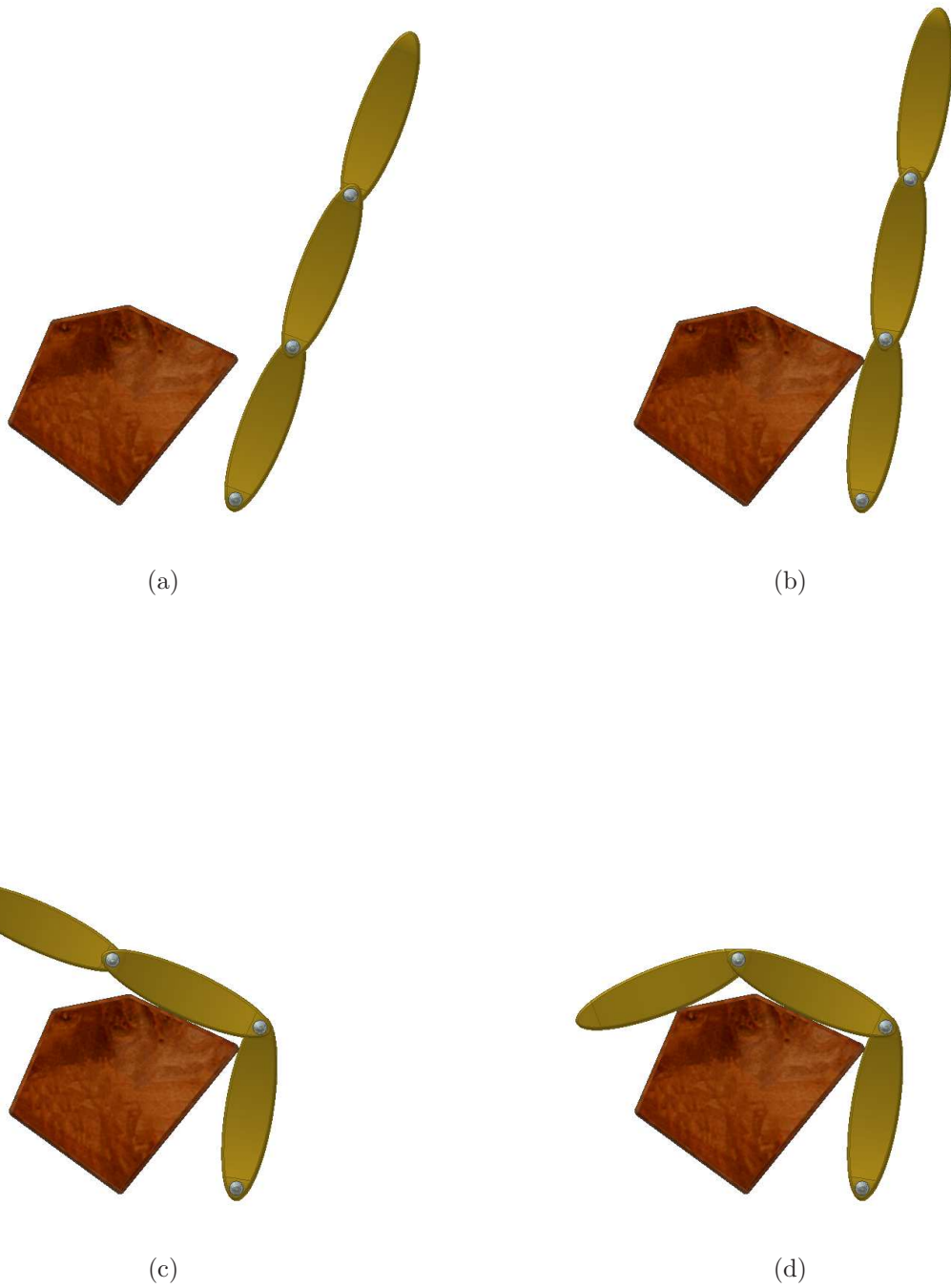


Fig. 3.2: Generica sequenza di presa su un oggetto di forma irregolare; a) inizio della fase di presa; b) prima falange a battuta; c) seconda falange a battuta; d) terza falange a battuta.

Un esempio di sottoattuazione basata sulla trasmissione a cavi è mostrata in Fig.3.3, la quale consiste in un sistema di cavi che, opportunamente tensionati, agiscono in maniera tale da chiudere le falangi delle dita. La mano robotica riportata è denominata Gaspar ed è presentata in [Crisman, 1996] e [Crisman et al., 1996].

- *sottoattuazione basata sulla trasmissione con link rigidi*

La sottoattuazione basata sulla trasmissione mediante link consiste in un meccanismo a più gradi di libertà che utilizzando opportunamente dei giunti passivi, riesce ad avvolgere completamente l'oggetto in presa, in modo tale da garantire una presa sta-

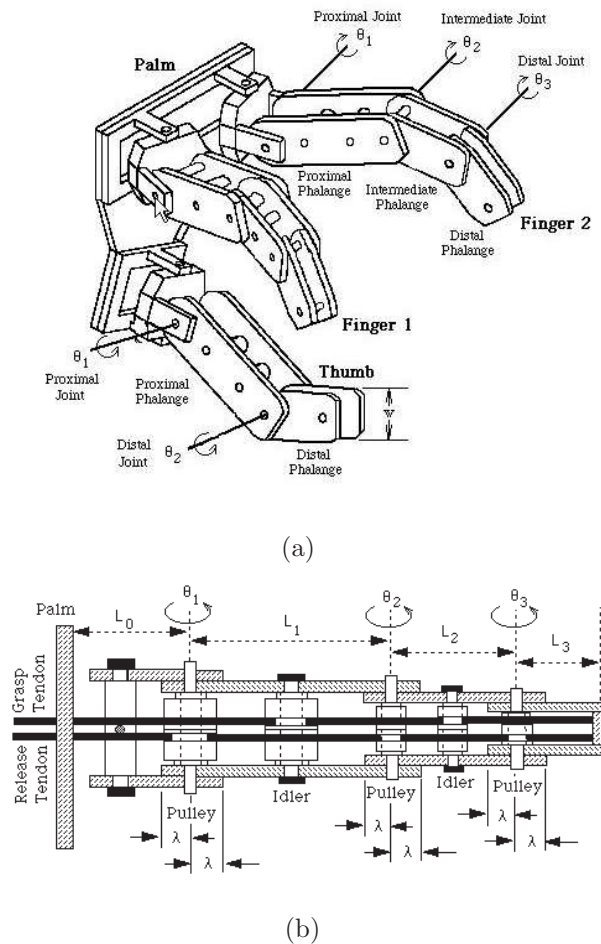


Fig. 3.3: Sotto-attuazione con un sistema a cavi; a) mano robotica Gaspar; b) particolare del sistema di trasmissione del dito.

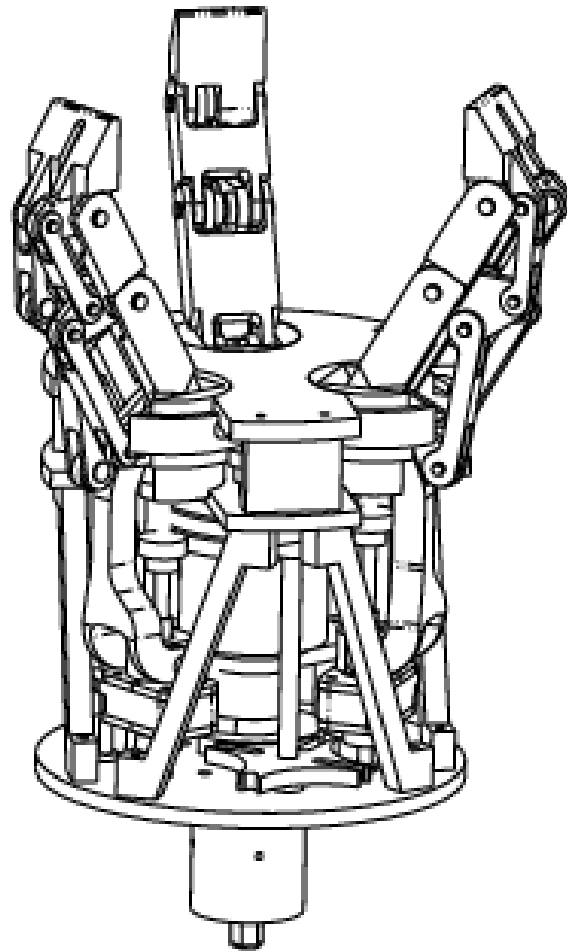


Fig. 3.4: Esempio di sotto-attuazione con meccanismo a link rigidi, SARAH hand.

bile. Un esempio che evidenzia tale sistema è riportato in Fig.3.4. Questa tipologia di mani è stata sviluppata in ambito industriale o per applicazioni spaziali con l'obiettivo di aumentare la funzionalità senza complicare eccessivamente la complessità del meccanismo, garantendo una migliore affidabilità.

- *sottoattuazione basata su meccanismi differenziali*

Un meccanismo differenziale è un dispositivo in cui il valore di tre ingressi dinamici distinti agisce in modo tale da bilanciarsi. Semplici esempi di differenziali sono la puleggia mobile ed il differenziale ad ingranaggi, come riportato in Fig.3.5.

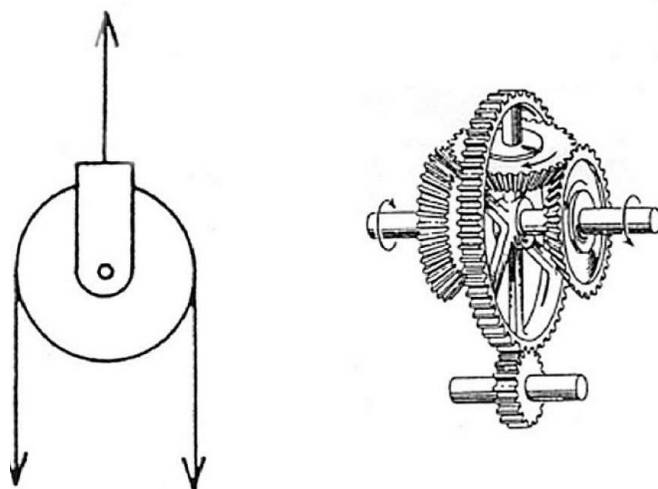


Fig. 3.5: Esempio di meccanismi differenziali.

Questi meccanismi differenziali hanno caratteristiche uniche come la capacità di governare molteplici g.d.l. con un solo attuatore combinandolo con freni, elementi elastici o fine corsa. Nella puleggia mobile, ad esempio, il movimento fornito dalla fune in alto viene ripartito sulle funi in basso in base ai carichi resistenti che queste devono sopportare. Il differenziale ad ingranaggi, utilizzato nelle autovetture, ripartisce la coppia dal motore a scoppio sulle due ruote motrici in base alla coppia resistente che agisce sulle ruote stesse. Applicando la stessa soluzione alle falangi di

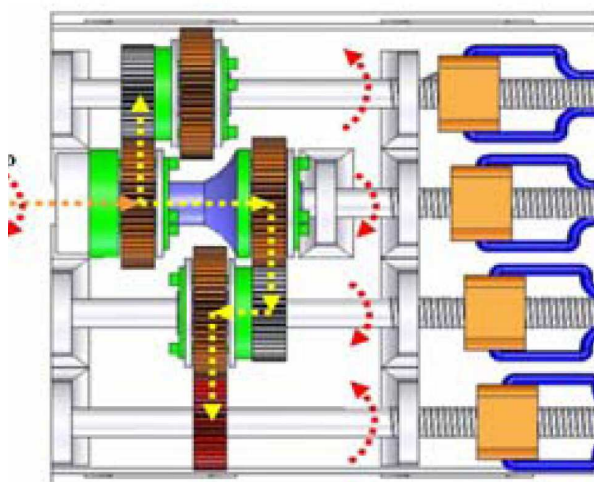


Fig. 3.6: Schema di un sistema di trasmissione con meccanismo differenziale.

mano robotica, è possibile distribuire l'attuazione su più articolazioni in relazione al carico resistente che ciascuna falange si trova a contrastare durante un compito di presa. Un sistema di trasmissione del tipo a meccanismo differenziale è stato utilizzato da [Nasser et al., 2006] ed è riportato in Fig.3.6.

- *sottoattuazione mista*

Un' applicazione interessante di un meccanismo misto è stata proposta da [Koganezawa et al., 2006].

La Fig. 3.7 mostra le parti fondamentali del rotismo epicicloidale, in cui sono visibili il solar gear (SG), i planetari (PG) e la corona esterna definita inner gear (IG). In Fig. 3.8a è possibile notare la soluzione mista che si ha combinando un meccanismo differenziale con un quadrilatero articolato incrociato.

I tre planetari sono connessi tra loro da un disco trasparente (carrier) sul quale è connesso il link 1 del meccanismo del dito. La Fig. 3.8 descrive una fase di presa di un solo dito. Il carrier è connesso ad una molla torsionale che impedisce la rotazione orbitale dei planetari. La rotazione oraria del solar gear SG induce

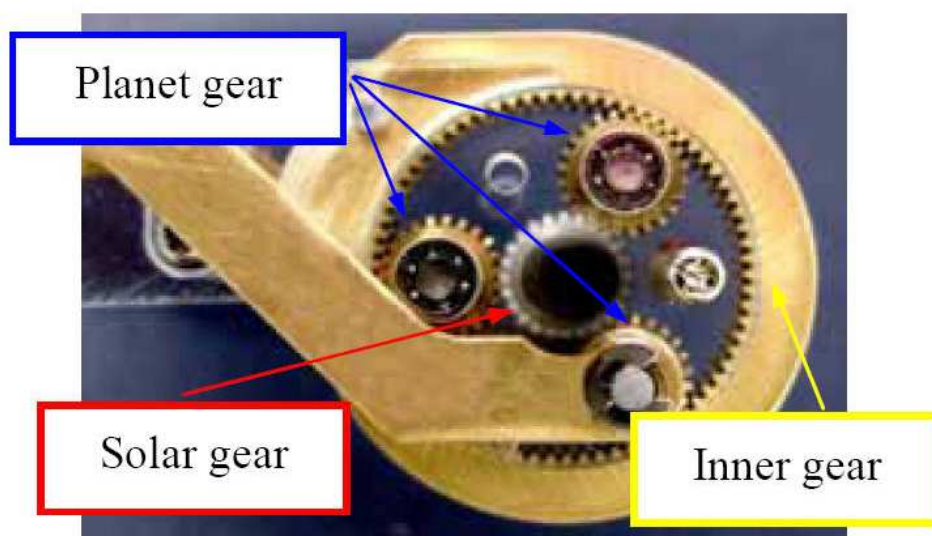


Fig. 3.7: Riduttore epicicloidale adottato.

una rotazione anti-oraria dell'inner gear IG, fino a quando il link 1 non entra in contatto con l'oggetto, come in Fig 3.8b. Di conseguenza, una ulteriore rotazione dell'IG non è permessa, poiché il link 1 è solidale con l'IG. I planetari non effettuano nessuna rivoluzione rispetto all' SG fino a quando la molla torsionale non si deforma. Una ulteriore rotazione del SG induce una rotazione dei planetari che provoca una deformazione della molla torsionale e di conseguenza la chiusura del dito in maniera da avvolgere completamente l'oggetto in presa, come mostrato in Fig. 3.8c.

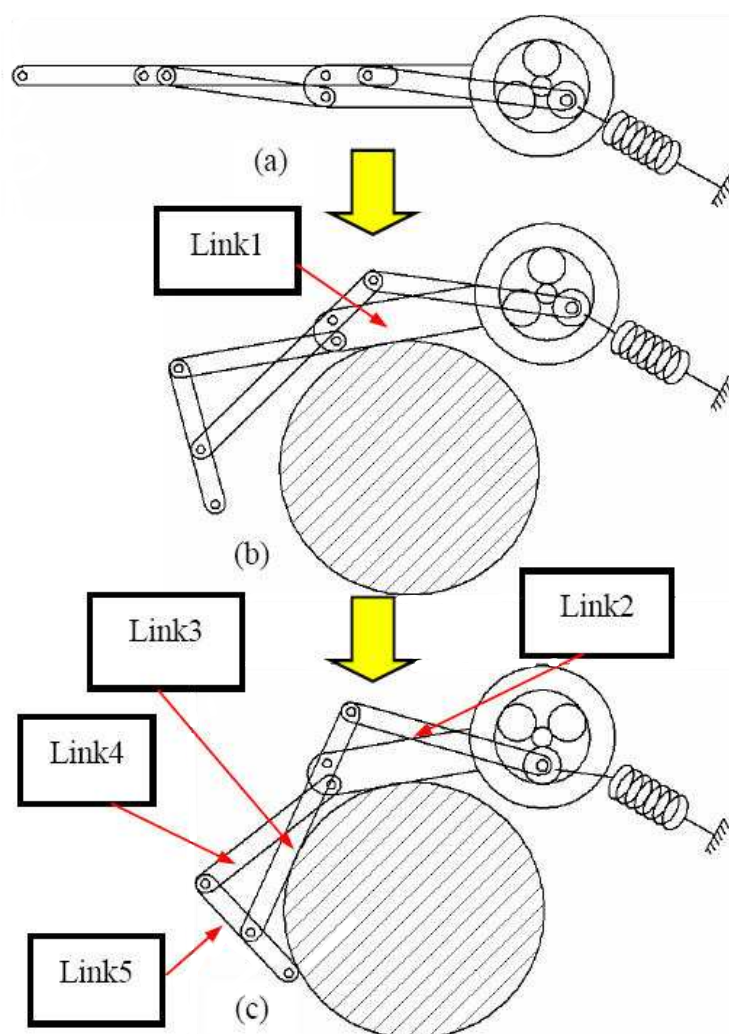


Fig. 3.8: Trasmissione mista con meccanismo differenziale e quadrilatero; a) accostamento; b) link 1 in battuta; c) link 3 e 5 in battuta.

3.2 Mano robotica RTR sottoattuata

Una mano robotica che deve essere utilizzata come protesi di mano umana deve soddisfare specifiche tecniche notevolmente restrittive, in quanto legate al fattore estetico, alla capacità di presa ed alla controllabilità. Tali specifiche devono essere rispettate tenendo conto delle dimensioni, delle coppie fornite dagli attuali motori elettrici (da integrare nella protesi) e delle necessità di sensorizzazione propriocettiva ed esteroceettiva. Lo stato dell'arte è al momento caratterizzato da protesi controllate mediante segnali elettromiografici (EMG) che sono prelevati direttamente dal braccio umano, da 1 a 4 gradi di libertà. A partire dal 1999, con lo scopo di aumentare la capacità della protesi di adattarsi alla forma dell'oggetto, il Centro INAIL RTR di Viareggio (LU) ha progettato 3 mani a dita articolate, aumentando i GdL a disposizione. Le tre mani (RTR I/II/III), prevedono un pollice a 2 falangi, e un indice e un medio a 3 falangi, che sono molto simili alla mano umana. Questi risultati sono stati ottenuti esplorando metodologie di progettazione bio-meccatronica che hanno condotto ad un aumento del grado di sottoattuazione.

La RTR1, mostrata in Fig.3.9, persegue l'aumento dei g.d.l. mediante il ricorso alla microattuazione integrata nelle falangi. Ci sono 6 g.d.l. direttamente controllati su di un totale di 8, con presa cilindrica.

I microattuatori lineari brushless sono controllati mediante i segnali dei sensori di forza 2D (strain gages), che sono posizionati sulle falangi distali, mentre i sensori di posizione ad effetto Hall sono installati nei giunti, [Carrozza et al., 2002]. Tuttavia, le schede di comando dei brushless sono piuttosto ingombranti, la disponibilità di segnali EMG di comando è scarsa e i microattuatori sono delicati e poco potenti, così si è deciso di aumentare i g.d.l. applicando il concetto della sottoattuazione.

In pratica la mano RTR2, mostrata in Fig.3.10, ha un solo attuatore che porta in trazione tre cavi, i quali si comportano ognuno come il tendine flessore profondo delle dita, flettendo le falangi. La RTR2 è inoltre dotata di un secondo attuatore che permette

di variare il piano di opposizione del pollice ottenendo anche la presa laterale. La sottoattuazione viene qui realizzata con 9 g.d.l. e 2 soli attuatori. Il controllo è realizzato con una piccola scheda a bordo della mano che utilizza le informazioni provenienti dai sensori di tensione sui cavi, dal sensore di posizione della slitta tendicavi, dal sensore di posizione alla base del pollice (che determina il piano di opposizione) e dal FSR posizionato nel polpastrello del pollice.

La RTR3, mostrata in Fig.3.11, applica ancora il concetto della sottoattuazione, con tre dita articolate, ma a pollice fisso; qui però il meccanismo differenziale alla base della sottoattuazione non si ottiene con un solo cavo per dito, ma con un cavo per ogni falange, come riportato in [Carrozza et al., 2004]. È stato messo a punto un protocollo di prova per valutare la forza in prese di precisione, la forza generalizzata di presa, la forza esercitata in prese laterali, la stabilità della presa e la resistenza allo scivolamento. I dati tecnici di

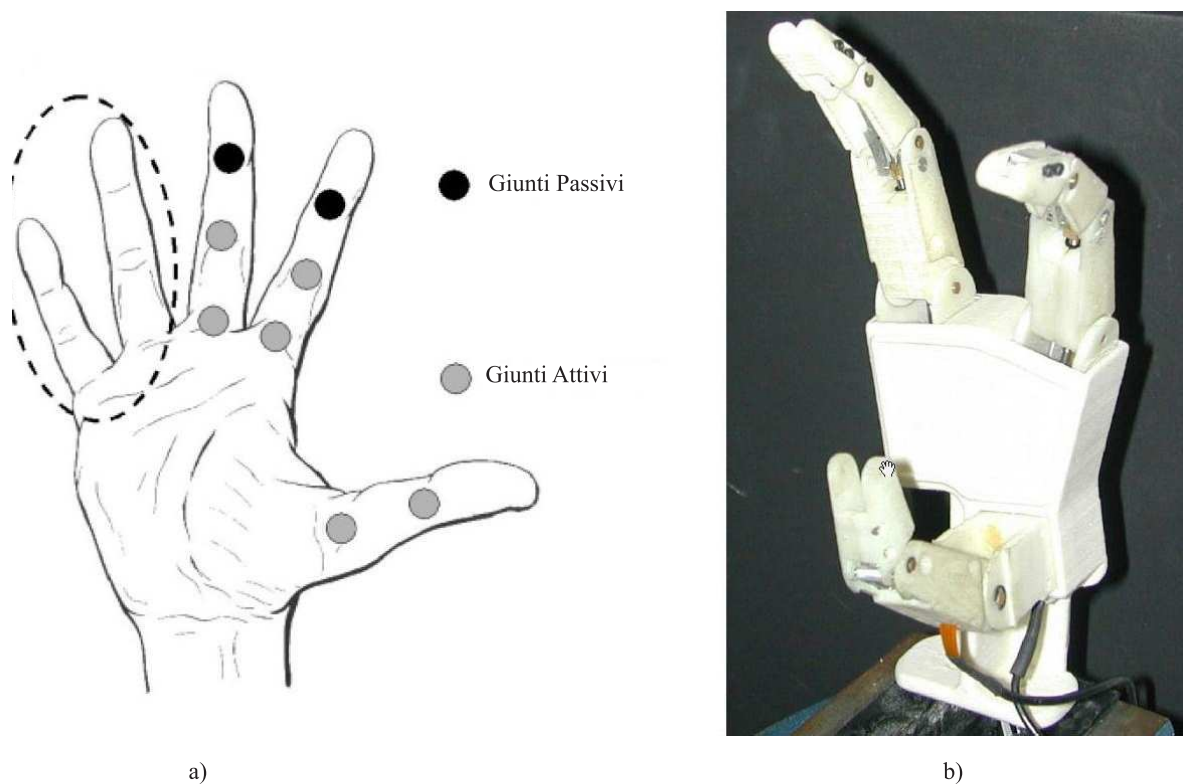


Fig. 3.9: Architettura e foto della mano RTRI.

maggiore rilevanza sono riportati in Tab.3.1.

Tab. 3.1: Dati tecnici della mano robotica RTR III “spring hand ”

Dati tecnici	
Numero di dita	3
Numero di g.d.l.	9
Numero di attuatori	2
Massima Forza	10 N

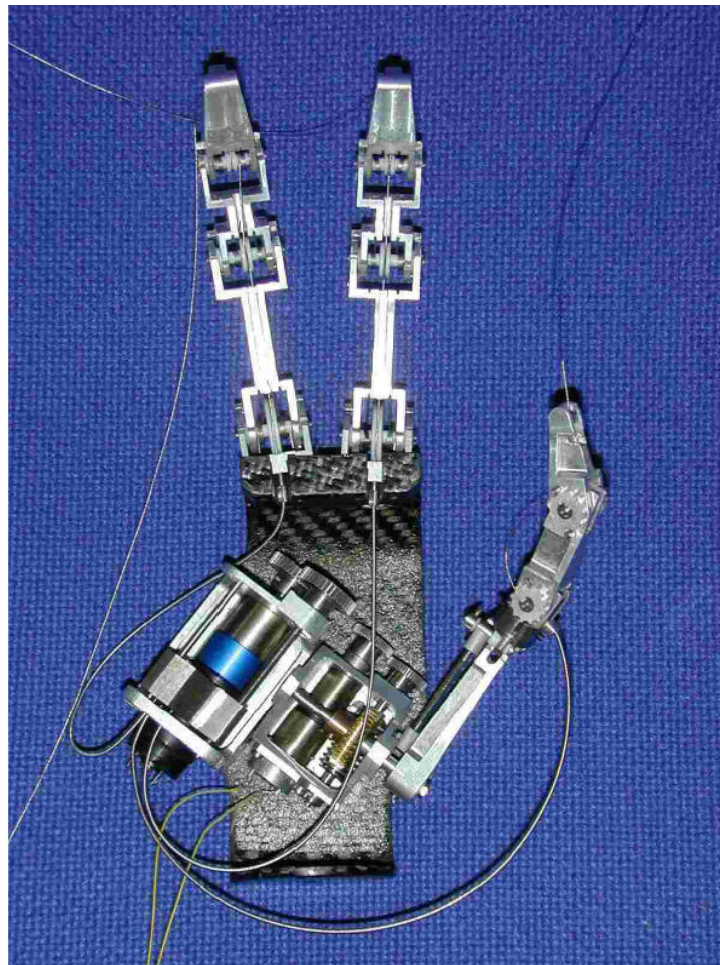


Fig. 3.10: Foto della mano RTR II.

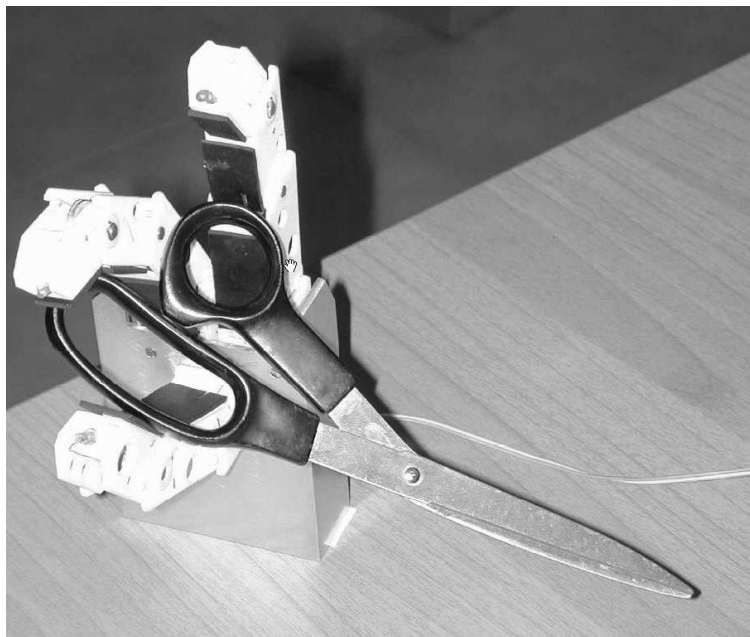


Fig. 3.11: Foto della mano RTR III.

3.3 Mano robotica sottoattuatorata SARAH hand

La mano SARAH Hand, mostrata in Fig.3.12, è una mano robotica sottoattuatorata sviluppata presso l'Università di Laval, in Canada come riportato in [Laliberté e Gosselin, 1998].

La prima versione della mano robotica sottoattuatorata SARAH è stata costruita nel 1996 realizzando un prototipo in alluminio. Tale mano ha 12 gradi di libertà ed è attuatora da tre motori brushless per l'apertura e la chiusura delle tre dita, e da tre motori in corrente continua per l'orientamento delle stesse. Attualmente sono state sviluppate diverse versioni della mano robotica SARAH. La seconda versione della mano robotica SARAH mostrata in Fig.3.13 ha 10 g.d.l. ed è attuatora da due soli sistemi di azionamento. Essa è costituita da tre dita uguali montate su una piattaforma comune. La posizione relativa tra le dita è opportunamente riconfigurabile in funzione della tipologia di presa. Il primo sistema di azionamento controlla l'apertura e la chiusura della dita, mentre il secondo sistema gestisce le posizioni relative tra le dita, al fine di aumentare la varietà di tipologie di presa. Ogni dito è costituito da tre falangi gestite da un sistema sottoattuatorato che



Fig. 3.12: Foto della mano SARAH con 12 g.d.l..

permette di avere un autoadattamento del dito alla forma dell'oggetto, come descritto in [Gosselin e Laliberté, 1998]. La falangi delle dita infatti possono disporsi automaticamente in maniera tale da avvolgere una molteplicità di superfici, comprese quella cilindrica e sferica. Ciascun dito ha tre gradi di libertà ed è gestito mediante un solo attuatore. Utilizzando la sottoattuazione si fornisce al dito una capacità di autoadattamento elevata.

L'ultima versione della mano SARAH è stata ottenuta modificando il sistema di attuazione, come mostrato in Fig.3.14 . Una delle parti più complesse del sistema di azionamento attraverso l'utilizzo dei motori è il meccanismo differenziale che serve a realizzare la sottoattuazione nelle tre dita. Un semplice sostituto dell'attuazione differenziale è l'attuazione pneumatica, in maniera tale che con un solo input si riescono ad ottenere tre output. Infatti tre cilindri pneumatici sono stati usati per la chiusura delle dita in combinazione con dei regolatori di flusso. La regolazione manuale di tali valvole permette di regolare la velocità di chiusura ed apertura delle dita. Il controllo della forza può essere realizzato mediante il controllo della pressione nelle camere di spinta degli attuatori. Ul-



Fig. 3.13: Foto della mano SARAH con 10 g.d.l., [Università di Laval, 2006].

teriori due attuatori pneumatici sono utilizzati per cambiare le configurazioni delle tre dita. Attualmente la mano può avere solo tre configurazioni discrete, che le permettono di realizzare una presa cilindrica, sferica o parallela, con due dita in contrapposizione. Per passare da una configurazione ad un'altra si usa uno switch a tre posizioni che dirige il flusso di aria nei cilindri in maniera tale da avere la configurazione desiderata.

I dati tecnici di maggiore rilevanza sono riportati in Tab.3.2.

Tab. 3.2: Dati tecnici della Mano Robotica SARAH con attuazione pneumatica

Dati Tecnici	
Numero di dita	3
Numero di g.d.l.	10
Numero di attuatori	5
Massima Forza	-



Fig. 3.14: Foto della mano SARAH con attuazione pneumatica.

3.4 Mano robotica TBM (Toronto-Bloorview-MacMillan)

La mano robotica TBM, mostrata in Fig.3.15, è stata realizzata con lo scopo di avere una protesi di mano umana con elevata funzionalità ed aspetto esteriore elegante, tale da essere usata come protesi di mano per bambini in età compresa tra i 7 e gli 11 anni, come riportato in [Dechev et al., 2001].

Le caratteristiche meccaniche salienti di questa mano robotica che le forniscono una capacità di adattarsi all'oggetto in presa possono essere riassunte nelle seguenti:

- il dito deve essere capace di chiudersi completamente;

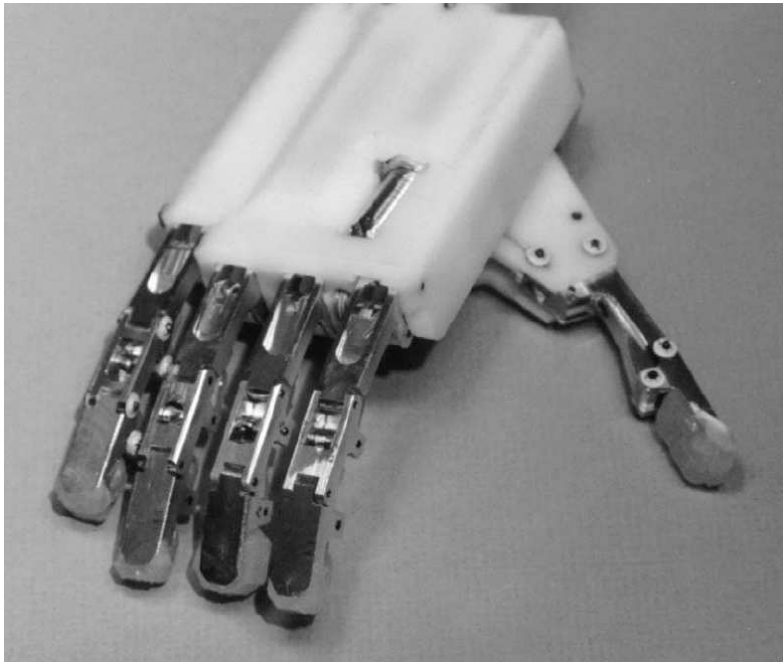


Fig. 3.15: Foto della mano TBM.

- ogni dito deve chiudersi indipendentemente dagli altri;
- il pollice deve avere una mobilità più ampia possibile, sia in avanti, che indietro.

L'adattabilità della mano TBM all'oggetto in presa è di tipo passivo, nel senso che non ci sono sensori o computers che coordinano la chiusura delle dita. Ciò è possibile grazie all'utilizzo di un meccanismo, che in funzione della forza di contatto tra il dito e l'oggetto, adatta la posizione relativa delle dita.

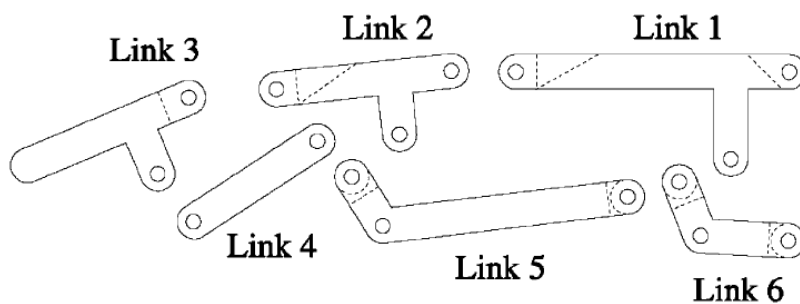


Fig. 3.16: Links del meccanismo non assemblato della mano TBM.

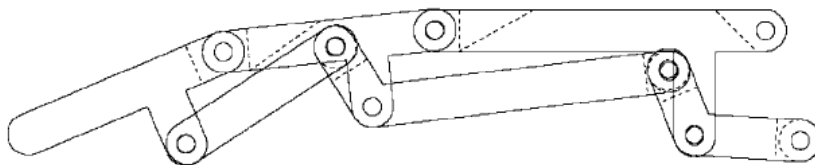


Fig. 3.17: Meccanismo assemblato della mano TBM.

Ogni dito è composto da sei links rigidi, come mostrato in Fig.3.16, ed assemblati nel meccanismo riportato in Fig.3.17. Quattro dita sono perfettamente uguali in modo da permettere una intercambiabilità delle parti e una manutenzione semplificata. I links 1,2 e 3 corrispondono alle falangi del dito umano. Il dito è connesso al palmo attraverso un giunto rotoidale sulla parte superiore del link 1, come illustrato in Fig.3.18.

Il dito è attuato dalla traslazione lungo l'asse delle x del "link 6 Pin" riportato in Fig.3.18. In questo modo il meccanismo del dito ha un solo g.d.l. ed in figura è illustrata la traiettoria del punto estremo del dito con linea tratteggiata. A differenza delle dita, il pollice ha due g.d.l. che gli permettono di chiudersi per afferrare gli oggetti e di muoversi lateralmente come mostrato in Fig.3.19. Realizzando un pollice con due g.d.l. si riesce ad ottenere un aumento delle prestazioni di presa ed una protesi molto versatile. E'

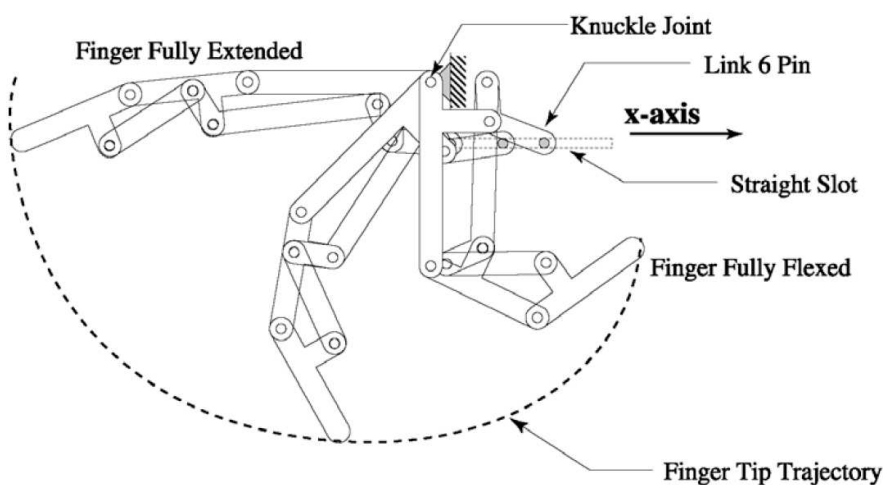


Fig. 3.18: Dito ad un grado di libertà della mano TBM.

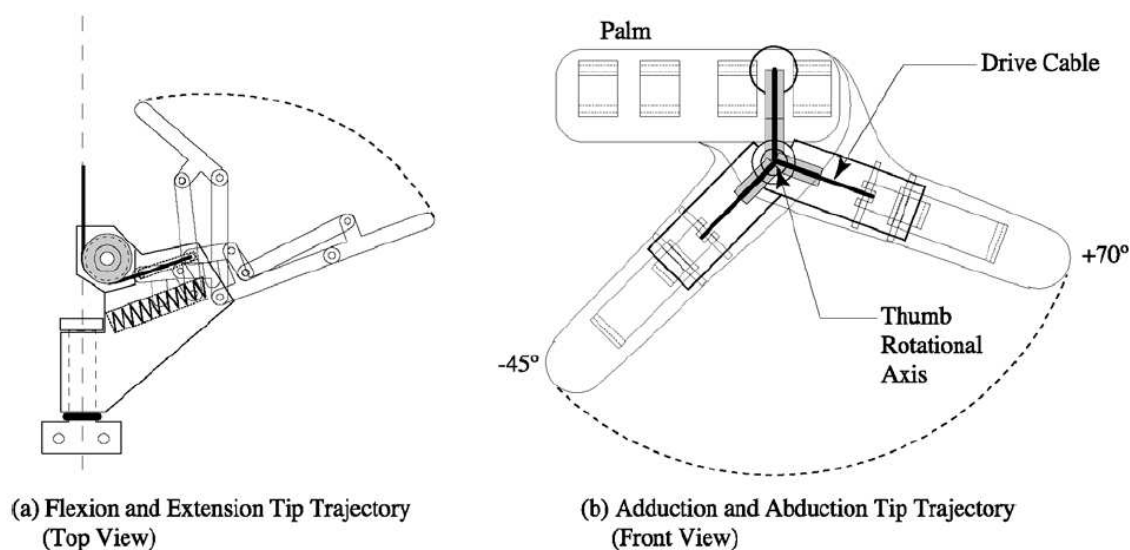


Fig. 3.19: Range di mobilità del pollice.

importante evidenziare che il secondo g.d.l. del pollice è gestito manualmente dall'utente della protesi, il quale può regolarla in funzione delle proprie necessità.

La mano TBM utilizza un solo motore per attuare tutti i meccanismi presenti all'interno della mano. Dato che è usato un solo motore, sono stati inseriti degli elementi elastici che permettessero la chiusura indipendente delle quattro dita e del pollice, come

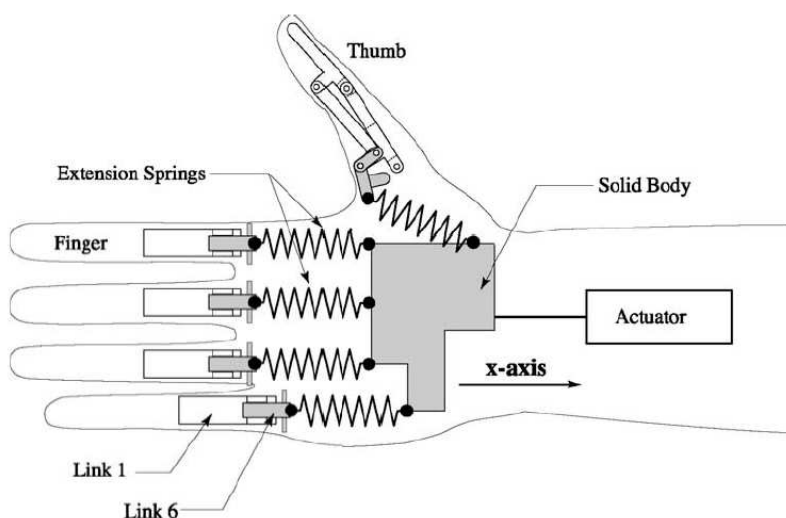


Fig. 3.20: Schema del sistema di sotto attuazione utilizzato.

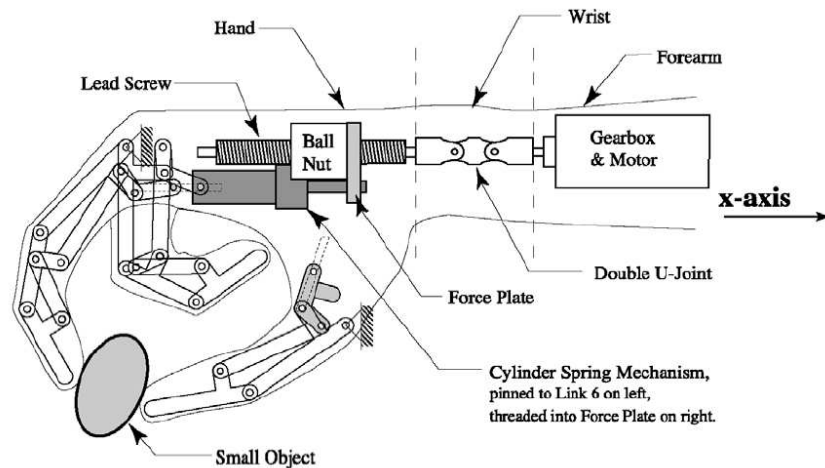


Fig. 3.21: Schema complessivo dell'azionamento della mano.

mostrato in Fig.3.20. Ogni dito è connesso con una molla ad estensione ad un corpo solido, il quale a sua volta è connesso all'attuatore. L'attuatore sollecita le molle attraverso il corpo solido nella direzione delle x positive. Se non ci sono oggetti in presa, le molle non si allungano, quindi traslano semplicemente permettendo alle dita di chiudersi.

Nel caso in cui sia presente un oggetto in presa di forma generica, le molle sotto l'azione del corpo rigido trasleranno fino a far arrivare il dito in contatto con l'oggetto. Nell'istante in cui il dito entra in contatto con l'oggetto, la molla comincia a deformarsi, poichè si supera il precarico. Tale deformazione permette al corpo solido di continuare a traslare, e alle altre dita di continuare a ruotare fino a quando non arrivano tutte in contatto, come si può notare in Fig.3.21.

Cap. 4 Progetto della Mano Robotica Ca.U.M.Ha.

4.1 Introduzione

La mano robotica Ca.U.M.Ha. (Cassino-Underactuated-Multifinger-Hand) presenta quattro dita articolate con tre falangi ed un pollice di contrasto con una sola falange. Ciascun dito, compreso il pollice, è azionato da un solo cilindro pneumatico a doppio effetto, quindi, in base alla sottoattuazione di ciascun dito articolato, i due gradi di libertà passivi sono gestiti da molle torsionali. Questa soluzione progettuale conferisce una buona capacità di autoadattamento delle tre falangi delle dita sugli oggetti in presa. Le caratteristiche del dito articolato sottoattuato consentono quindi di effettuare la presa di oggetti aventi forme e dimensioni non regolari.

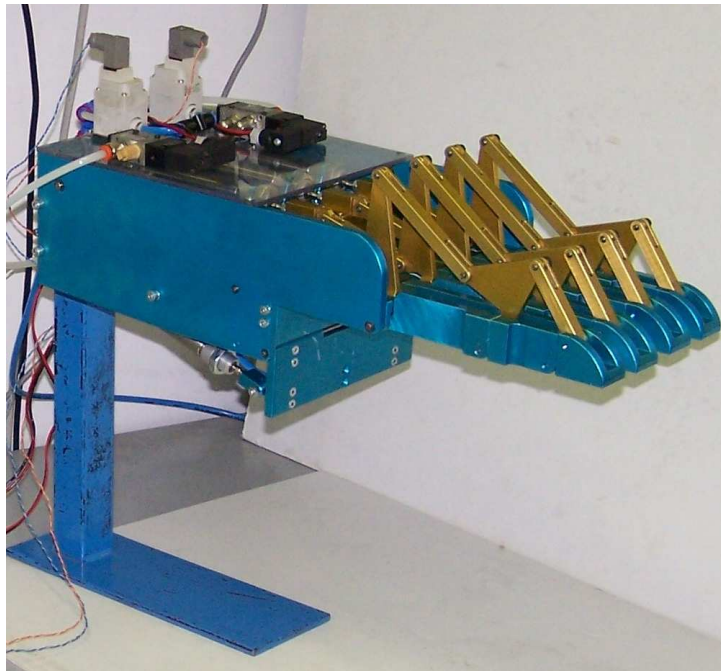


Fig. 4.1: Foto della mano robotica Ca.U.M.Ha.

Una ulteriore capacità di autoadattamento della mano robotica Ca.U.M.Ha. nella direzione ortogonale al piano operativo del meccanismo del dito è ottenuta tramite un appropriato progetto del circuito elettropneumatico di azionamento, con la finalità di sviluppare una soluzione a basso costo. Le camere di spinta e di scarico dei quattro cilindri pneumatici delle dita articolate sottoattuate sono comandate in parallelo mediante due valvole a tre vie, in maniera tale da gestire con un numero ridotto segnali, il maggior numero di g.d.l., come riportato in [Figliolini e Rea, 2006]. Con riferimento alle dita la mano robotica Ca.U.M.Ha. presenta dodici g.d.l., quattro dei quali sono attuati, mentre i restanti otto sono passivi. Grazie alla pneumatica ed al collegamento in parallelo dei cilindri pneumatici, i quattro g.d.l. attivi sono gestiti da un unico segnale di comando.

4.2 Il dito

Per la realizzazione della mano robotica Ca.U.M.Ha. (Cassino-Underactuated-Multifinger-Hand), la scelta della tipologia di sistema di trasmissione è ricaduta su di un meccanismo a link rigidi, come mostrato in Fig. 4.2. Le motivazioni che hanno indotto ad utilizzare tale meccanismo possono essere individuate nelle caratteristiche intrinseche del meccanismo stesso. Gli obiettivi principali da raggiungere sono stati:

- struttura di tipo endoscheletrica, con conseguente semplicità di montaggio;
- struttura meccanica robusta, versatile, e di semplice manutenzione.

4.2.1 Meccanismo adottato per la mano robotica Ca.U.M.Ha.

In base alle considerazioni sopra citate, è stato utile, ai fini dello sviluppo del presente lavoro, effettuare uno studio approfondito delle caratteristiche cinematiche del dito umano. La Fig. 4.2 mostra lo schema del dito indice della mano umana in configurazione completamente chiusa, infatti, ognuna delle tre falangi è completamente ruotata rispetto alla precedente. Il sistema di riferimento OXY è considerato rigidamente collegato al palmo

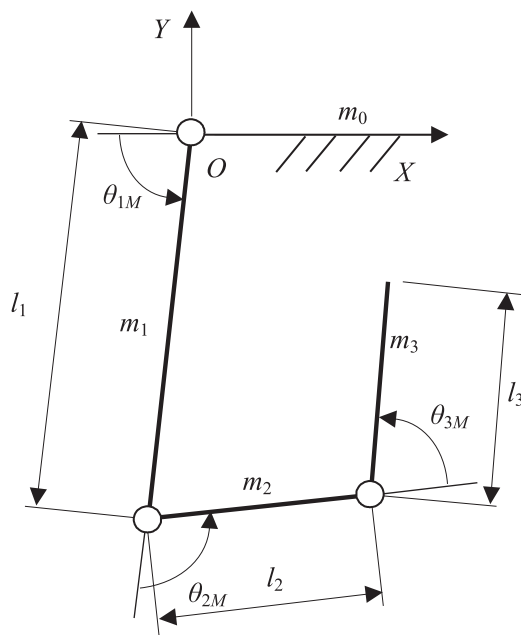


Fig. 4.2: Schema semplificato per il meccanismo della dito adottato

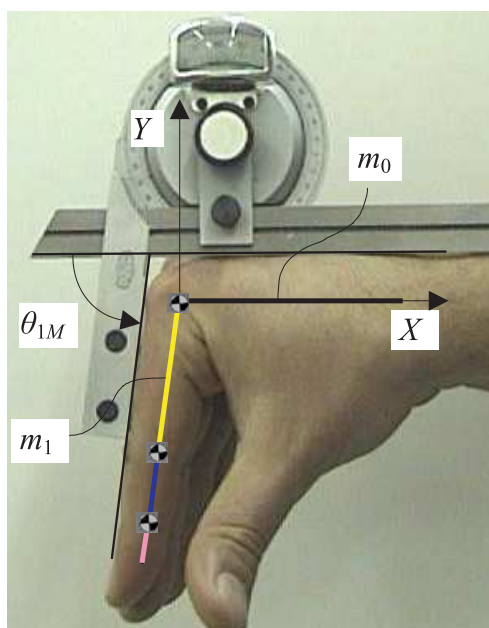
con la direzione positiva dell'asse X verso il polso, indicato con m_0 , mentre la direzione positiva dell'asse Y è perpendicolare al palmo. I parametri m_i , l_i e θ_{Mi} , per $i=1,2,3$, rappresentano rispettivamente le aste rigide, la lunghezza e la rotazione relativa massima della i -esima falange.

4.2.2 Determinazione dei parametri caratteristici

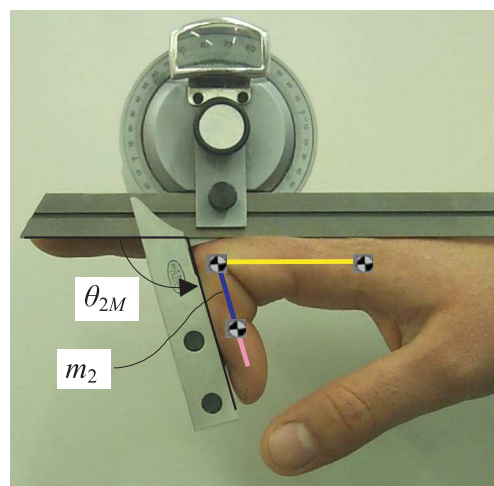
Il progetto meccanico del meccanismo del dito articolato sottoattuato è stato effettuato con riferimento alle principali dimensioni e configurazioni di presa del dito indice umano.

In prima approssimazione, il dito può essere schematizzato mediante un meccanismo a catena aperta con tre gradi di libertà, come mostrato in Fig.4.3, dove i link m_0 , m_1 , m_2 e m_3 , schematizzano parte del palmo, la prima, la seconda e la terza falange rispettivamente.

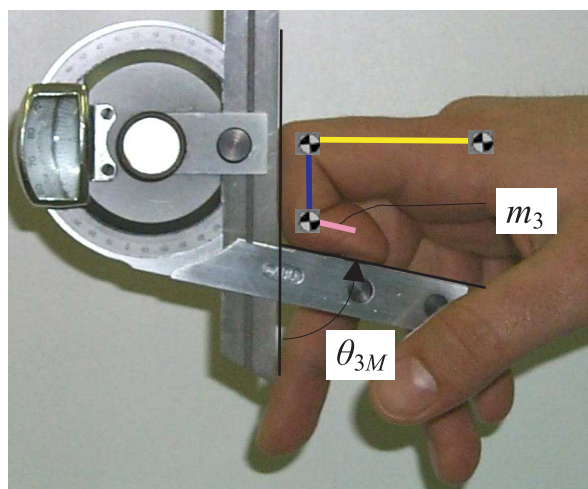
Le approssimazioni di questo modello derivano fondamentalmente dal fatto che le connessioni delle falangi non sono esattamente riconducibili a coppie rotoidali, bensì a coppie cinematiche superiori; il moto dell'ultima falange non è totalmente indipendente



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.3: Misura di massima dei range di movimento del dito indice della mano umana; a) rotazione della prima falange; b) rotazione della seconda falange; c) rotazione della terza falange.

da quello della falange intermedia e che il dito umano non compie soltanto movimenti piani.

Tuttavia, questo schema esemplificato rappresenta un primo utile riferimento per la misurazione, sul dito indice umano, delle lunghezze medie delle tre falangi e delle rotazioni massime, come riportato in [Figliolini et al., 2003] e mostrato in Fig.4.3. Data la diversità delle dimensioni delle dita umane che dipendono da caratteristiche fisiologiche come l'età, il sesso e la costituzione fisica, si è utilizzato come riferimento il dito indice maschile di un soggetto trentenne di costituzione fisica normale. Le proporzioni tra le lunghezze delle falangi e gli angoli di rotazione massime, sono in accordo con le proporzioni riportate in [Hamilton et al, 2002], [Kamper et al, 2002], [Sunil et al, 2003] e [Chiu et al, 2000].

In Tab.4.1 sono riportate le principali caratteristiche del dito umano rilevate sperimentalmente secondo la sequenza di Fig.4.3. Per la realizzazione del dito robotico è stato scelto un fattore di scala pari a 2. Inoltre il sistema di attuazione è concepito per operare solamente sulla prima falange, mentre per le altre due è previsto un adattamento passivo legato alla presenza di due molle torsionali.

4.2.3 Analisi del moto di chiusura

Il dito della mano Ca.U.M.Ha. è costituito da tre falangi, come mostrato in Fig. 4.4, a tre gradi di libertà complessivi. Per semplicità, non è stato riportato lo schema del meccanismo. Per garantire una elevata adattabilità del dito in fase di presa, le tre falangi

Tab. 4.1: Valori caratteristici adottati per il dito sottoattuato della mano robotica Ca.U.M.Ha.

Dati tecnici	falange 1	falange 2	falange 3
dito umano	$m_1=43$	$m_2=25$	$m_3=23$
dito robotico	$l_1=86$	$l_2=50$	$m_3=46$
rotazione massima	$\theta_{1M}=83^\circ$	$\theta_{2M}=105^\circ$	$\theta_{3M}=78^\circ$
attuazione	attiva	passiva	passiva

di lunghezza rispettivamente l_1 , l_2 e l_3 , sono munite di due molle torsionali S_1 e S_2 , in modo tale da realizzare due giunti passivi autoadattativi. In Fig. 4.5 è riportata una simulazione MatLab della sequenza di chiusura considerata per il dito indice umano. Sono inoltre riportate le traiettorie di chiusura relative ai giunti mobili. Tutte le traiettorie considerate sono rappresentate da archi di circonferenza. E' importante notare che in questa sequenza non ci sono oggetti in presa, quindi le falangi si piegano completamente fino ad arrivare al limite massimo di rotazione imposto dalla battuta meccanica.

Con riferimento alla Fig. 4.5 si possono individuare tre fasi distinte:

- *prima fase*, le tre falangi si piegano contemporaneamente fino a quando la prima falange non raggiunge la propria battuta meccanica o l'oggetto in presa;
- *seconda fase*, la prima falange è ferma e ruotano la seconda e la terza insieme. Il

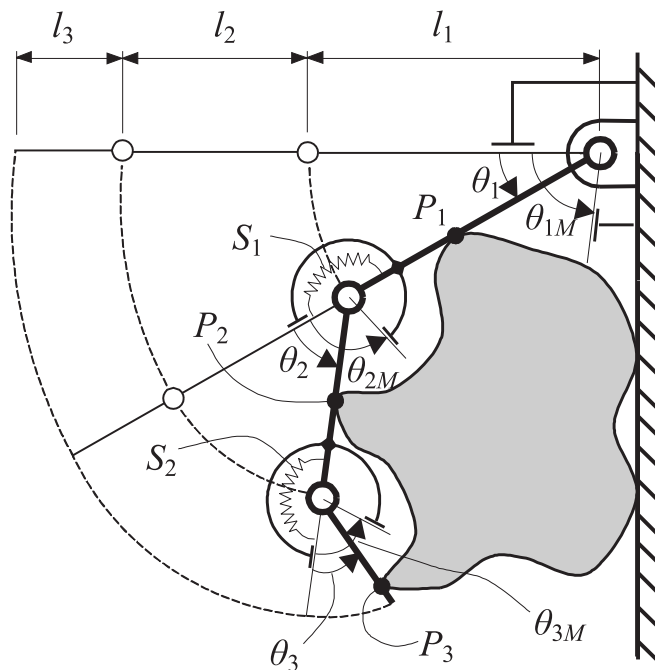


Fig. 4.4: Schema semplificato del meccanismo della dito adottato in presa su un oggetto di forma irregolare

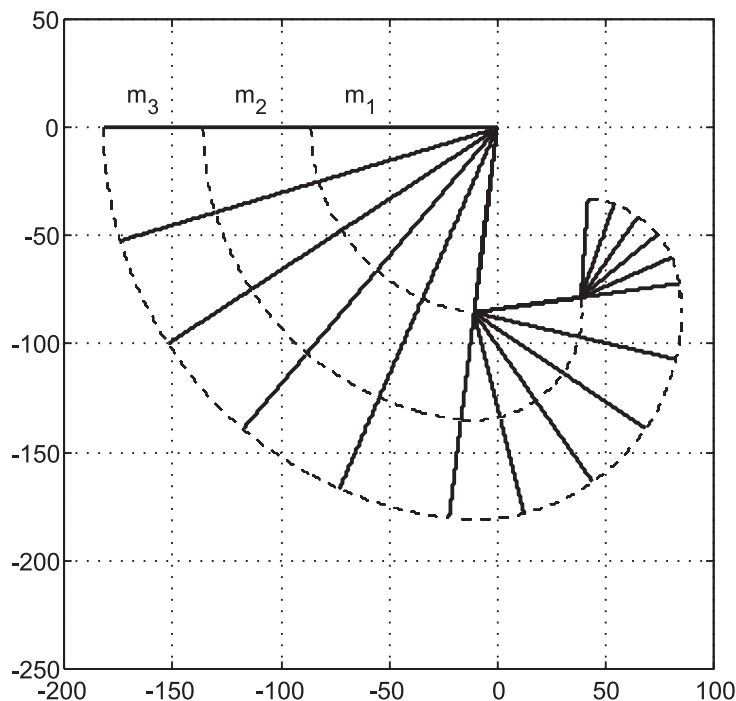


Fig. 4.5: Simulazione matlab della sequenza di chiusura del meccanismo considerato

sopraggiungere della battuta meccanica o dell'oggetto in presa fa terminare la corsa della seconda falange;

- *terza fase*, la terza falange ruota rispetto al suo giunto rotoidale fino al completamento della corsa massima.

Nel caso in cui la falange m_{i+1} entri in contatto prima della falange m_i , per $i=0,1,2$. La falange m_{i+1} rimane in contatto con l'oggetto mentre la falange m_{i+2} continua a chiudersi, (con la condizione che $m_{i+2} \leq m_3$).

La Fig. 4.6 mostra un'analisi della presa per oggetti cilindrici. Nel caso di Fig.4.6a è mostrata la presa con tre punti di contatto per l'oggetto più piccolo che può essere afferrato considerando i vincoli geometrici imposti. Se l'oggetto ha dimensioni leggermente superiori si ottiene la configurazione di presa mostrata in Fig.4.6b, nella quale si hanno solo due punti di contatto. All'aumentare delle dimensioni dell'oggetto esso viene spinto in alto fino ad incontrare il palmo orizzontale, che fornisce il terzo punto di contatto,

garantendo una presa stabile, come mostrato in Fig.4.6c. La falange m_3 comincia ad aprirsi fin quando si giunge nella configurazione limite di Fig.4.6d, nella quale si allinea con la falange m_2 . Con riferimento alle Fig.4.6.e ed f, si determinano le lunghezze del palmo $l_4 = 84$ mm ed $l_5 = 40$ mm, che saranno utilizzate per la realizzazione del palmo della mano, e discusse nel prossimo capitolo.

E' importante notare che questa analisi della presa è stata condotta con l'ipotesi di base che l'oggetto non sia fermo, cioè vincolato rigidamente al riferimento, ma che possa muoversi all'interno del range di lavoro del dito in maniera tale da garantire un ulteriore adattamento al fine di trovare la configurazione di serraggio migliore.

4.2.4 Schema cinematico del dito articolato

In base alle considerazioni sulla cinematica del dito umano, è stata proposta una soluzione che prevedesse l'uso di tre articolazioni, di cui una attiva e due passive. La Fig.4.7 mostra lo schema cinematico del dito articolato completo. Il meccanismo di trasmissione è composto da due quadrilateri articolati $ABCD$ e $BEFG$, ed un manovellismo ordinario deviato EHI , che sono connessi in serie dall'ultima falange fino alla guida prismatica. Sono evidenti le due molle torsionali S_1 e S_2 che agiscono sugli assi di rotazione relativi tra la prima e la seconda falange, e tra la seconda e la terza falange, rispettivamente. Queste molle torsionali gestiscono i due gradi di libertà passivi che, in accordo al principio di sottoattuazione, si aggiungono all'unico grado di libertà attivo azionato dal cilindro pneumatico. Analogamente al dito indice umano, il corretto funzionamento del dito articolato è determinato da appropriate rotazioni delle singole falangi, che sono garantite dalla presenza di opportune battute meccaniche, le quali consentono le rotazioni relative della prima falange rispetto al palmo, nell'intervallo $0-83^\circ$, una rotazione relativa della seconda falange rispetto alla prima, nell'intervallo $0-105^\circ$, e una rotazione relativa della terza falange rispetto alla seconda, nell'intervallo $0-78^\circ$.

In tal modo vengono evitate l'iperflessione e l'iperestensione del dito articolato e nel

contempo viene garantita la stessa configurazione di massima chiusura del dito indice

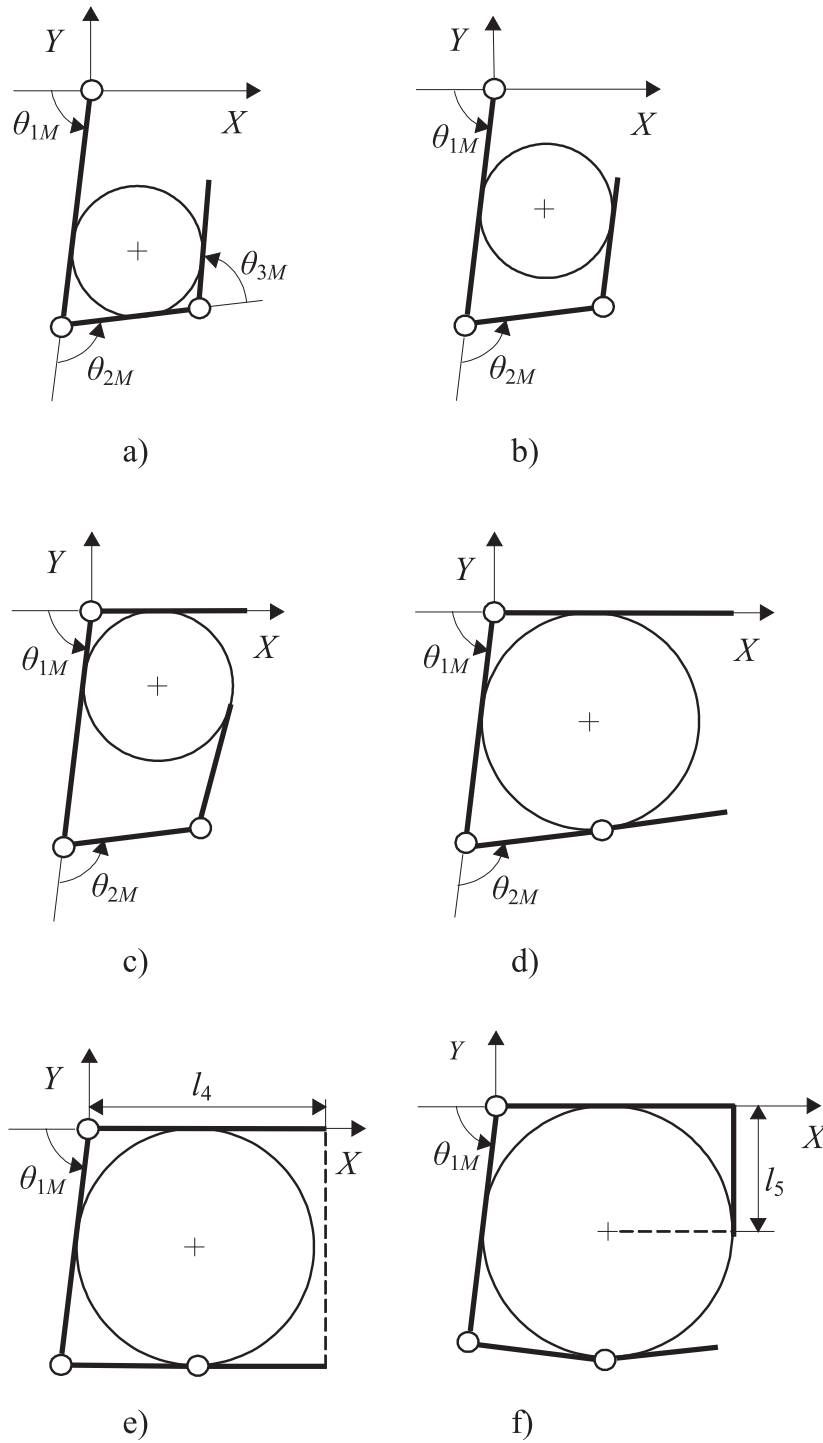


Fig. 4.6: Analisi della presa per oggetti cilindrici di varie dimensioni.

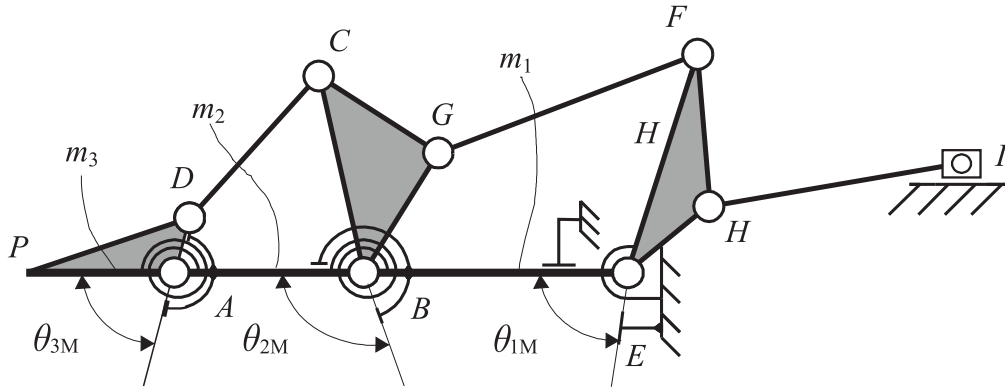


Fig. 4.7: Meccanismo del dito sottoattuato progettato.

umano. Naturalmente, qualsiasi altra configurazione intermedia tra quella di massima estensione, per cui gli angoli di rotazione relativa θ_1 , θ_2 e θ_3 sono uguali a zero, e quella di massima flessione o chiusura, per cui $\theta_1 = \theta_{1M}$, $\theta_2 = \theta_{2M}$ e $\theta_3 = \theta_{3M}$, è possibile solo quando la falange che precede quella in movimento risulta a contatto con l'oggetto da afferrare, poichè due dei tre gradi di libertà del dito articolato sottoattuato sono passivi e gestiti dalle molle torsionali.

4.3 Sintesi cinematica ed ottimizzazione del meccanismo del dito

La sintesi cinematica del meccanismo del dito riportato in Fig. 4.7 è stata effettuata utilizzando le equazioni di Freudenstein come descritto in [Freudenstein, 1955] e combinate con il concetto di *transmission defect* riportato in [Gosselin e Angeles, 1989], che può essere considerato come un indice di merito della trasmissione della forza. Il meccanismo di attuazione è stato considerato come un insieme di meccanismi in serie. La procedura di sintesi con relativa ottimizzazione dei parametri è stata eseguita a partire dal quadrilatero $ABCD$ che aziona la terza falange, fino ad arrivare al manovellismo di spinta, che è azionato dall'attuatore pneumatico.

Sintesi del quadrilatero articolato $ABCD$.

Con riferimento alla Fig.4.8, le equazioni di Freudenstein possono essere espresse nella forma

$$R_1 \cos \epsilon_i - R_2 \cos \rho_i + R_3 = \cos(\epsilon_i - \rho_i) \quad (4.1)$$

con $i = 1, 2, 3$ e

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{l_2}{a} \\ R_2 &= \frac{l_2}{c} \\ R_3 &= \frac{a^2 - b^2 + c^2 + l_2^2}{2ac} \end{aligned} \quad (4.2)$$

dove l_2 è la lunghezza della seconda falange AB , a , b e c , sono le lunghezze dei link AD , DC e CB rispettivamente e ϵ_i e ρ_i per $i = 1, 2, 3$ sono i valori degli angoli di ingresso e di uscita del quadrilatero articolato $ABCD$.

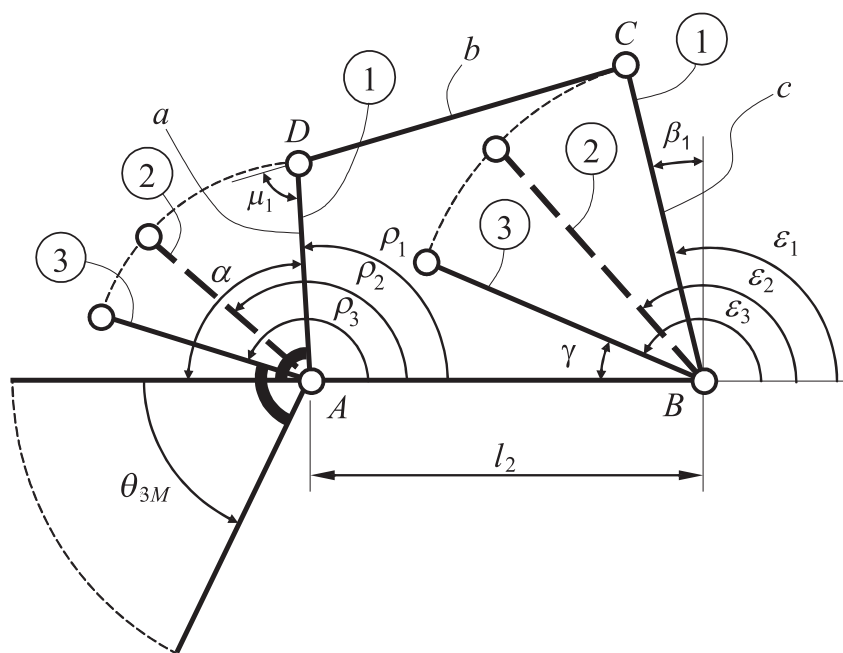


Fig. 4.8: Schema cinematico del quadrilatero $ABCD$

L'Eq.4.1 può essere risolta fornendo le tre coppie di valori degli angoli ϵ_i e ρ_i , che corrispondono alle tre configurazioni reciproche dei link BC e AD , considerando quindi il sistema come se fosse un generatore di funzione

$$\rho = F(\epsilon). \quad (4.3)$$

In totale devono essere assegnati sei parametri che corrispondono a tre configurazioni del quadrilatero articolato al fine di ottenere la sintesi del meccanismo.

Il problema della definizione degli angoli è stato scomposto in due parti ben distinte:

- definizione delle configurazioni limite;
- ottimizzazione della configurazione intermedia.

Relativamente al primo punto, per le configurazioni limite, corrispondenti alle 1 e 3 estreme della Fig.4.8, sono state effettuate considerazioni geometriche relative agli ingombri del meccanismo, illustrati nel prossimo paragrafo. Sono stati quindi assegnati i seguenti valori, poi verificati successivamente: $\alpha = 50^\circ$, per il link AD , $\gamma = 40^\circ$ e $\beta_1 = 25^\circ$ per il link BC . In questo modo, risultano assegnate le coppie di valori ($\epsilon_1 = 115^\circ, \rho_1 = 130^\circ$) e ($\epsilon_3 = 140^\circ, \rho_3 = 208^\circ$) che corrispondono alle configurazioni 1 e 3, ossia iniziale e finale della Fig.4.8. L'angolo ρ_3 è ottenuto dalla somma di $\rho_1 + \theta_{3M}$. Per risolvere l'Eq.4.1 è indispensabile assegnare anche la configurazione intermedia ϵ_2, ρ_2 , in modo che il sistema sia univocamente determinato.

L'individuazione della configurazione ϵ_2, ρ_2 è stata ottenuta mediante una procedura di ottimizzazione volta a massimizzare la trasmissione di forza dal meccanismo alla falange, utilizzando il concetto di *transmission index*, definito per la prima volta da [Sutherland e Roth, 1973]. Esso è un indice sulla qualità della trasmissione del moto. Per eseguire la procedura di ottimizzazione è stato utilizzato il *transmission quality*. Tale indice è stato definito da [Angeles e Bernier, 1987] ed utilizzato in [Gosselin e Angeles, 1989] per l'ottimizzazione dei meccanismi spaziali generatori di funzione. L'indice *transmission*

quality è definito come la radice della seguente quantità

$$z = \frac{1}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_3} \sin^2 \mu_1 d\epsilon, \quad (4.4)$$

dove μ è l'angolo di trasmissione del quadrilatero $ABCD$ e valutabile come

$$\mu_1 = \cos^{-1} \left(\frac{l_2^2 + c^2 - a^2 - b^2 - 2l_2c \cos(\pi - \epsilon)}{2ab} \right). \quad (4.5)$$

Il complemento dell'Eq.4.4 è rappresentato da

$$f_1 = z' = \frac{1}{\epsilon_3 - \epsilon_1} \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_3} \cos^2 \mu_1 d\epsilon \quad (4.6)$$

che è denominato *transmission defect*. Quindi si ha

$$z' + z = 1 \quad (4.7)$$

ovvero

$$0 < z' < 1 \quad (4.8)$$

Attraverso l'utilizzo dell'indice *transmission defect* riportato nell'Eq.4.6, come funzione obiettivo da minimizzare, è possibile ottenere l'ottimizzazione dell'indice *transmission quality*. La procedura di ottimizzazione è stata sviluppata attraverso l'utilizzo del pacchetto del Software Matlab Optimization Toolbox. Il problema di sintesi ottima consiste nel minimizzare la funzione obiettivo ($\min f(x)$) in Eq.4.6, i cui parametri geometrici sono ϵ_2 e ρ_2 , e la soluzione di primo tentativo utilizzata è $\epsilon_2 = 127.5^\circ$, $\rho_2 = 168^\circ$. Tali valori corrispondono ai valori medi tra gli angoli di inizio e fine configurazione del quadrilatero considerato. La Fig. 4.20 mostra l'evoluzione della funzione obiettivo f_1 in funzione del numero di iterazioni.

I valori ottimi per la configurazione intermedia ricavati dal Matlab a fine ottimizzazione sono $\epsilon_2 = 128.56^\circ$, $\rho_2 = 169.08^\circ$, e conseguentemente, risolvendo le Eqs.4.1 e 4.2, si ottiene $a = 22.58$ mm, $b = 58.34$ mm e $c = 70.98$ mm

La Fig.4.10 mostra l'andamento dell'angolo di trasmissione μ_1 rispetto all'angolo di input ϵ . I risultati ottenuti mostrano un valore dell'angolo di trasmissione soddisfacente, infatti esso è costantemente superiore ai 45° .

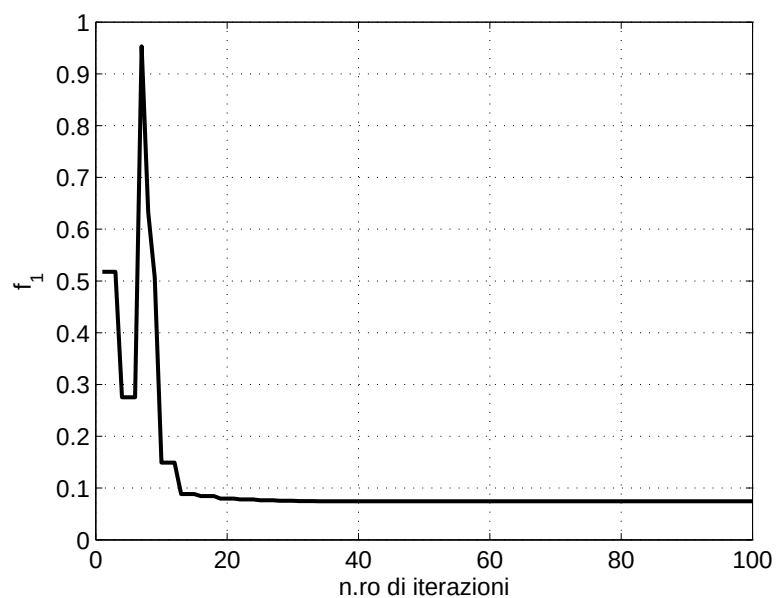


Fig. 4.9: Evoluzione della funzione obiettivo f_1 .

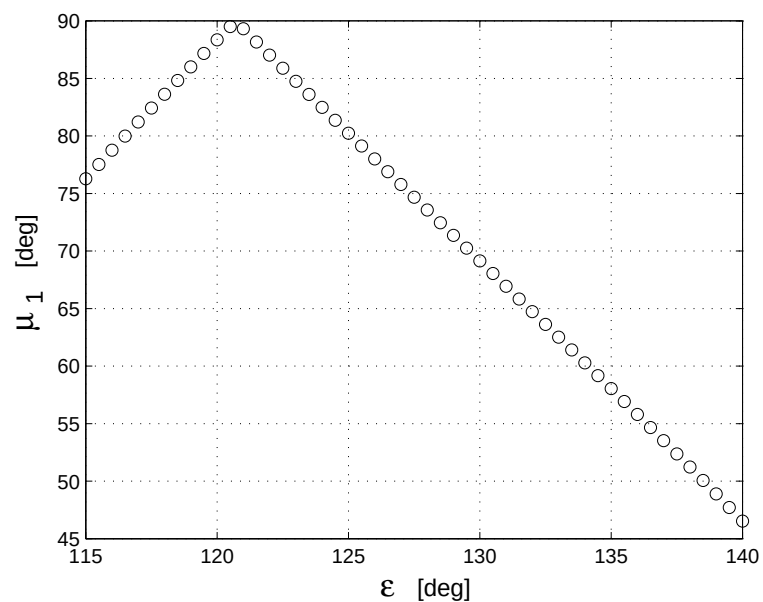


Fig. 4.10: Diagramma dell'angolo di trasmissione μ_1 del quadrilatero $ABCD$ per la soluzione ottenuta dalla sintesi ottima.

Sintesi del quadrilatero articolato $BEFG$.

Lo stesso metodo è stato applicato per la sintesi del quadrilatero articolato $BEFG$. Con riferimento alla Fig.4.11, le equazioni di Freudenstein possono essere espresse nella forma

$$R_1 \cos \psi_i - R_2 \cos \phi_i + R_3 = \cos(\psi_i - \phi_i) \quad (4.9)$$

con $i = 1, 2, 3$ e

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{l_1}{d} \\ R_2 &= \frac{l_1}{f} \\ R_3 &= \frac{d^2 - e^2 + f^2 + l_1^2}{2df} \end{aligned} \quad (4.10)$$

dove l_1 è la lunghezza della prima falange, d , e ed f , sono le lunghezze dei link BG , GF e FE rispettivamente, ψ_i e ϕ_i per $i = 1, 2, 3$ sono i valori degli angoli di ingresso e di uscita del quadrilatero articolato $BEFG$.

L'Eq.4.9 può essere risolta fornendo le tre coppie di valori degli angoli ψ_i e ϕ_i , per $i = 1, 2, 3$, che corrispondono alle tre configurazioni reciproche dei link EF e BG , ossia

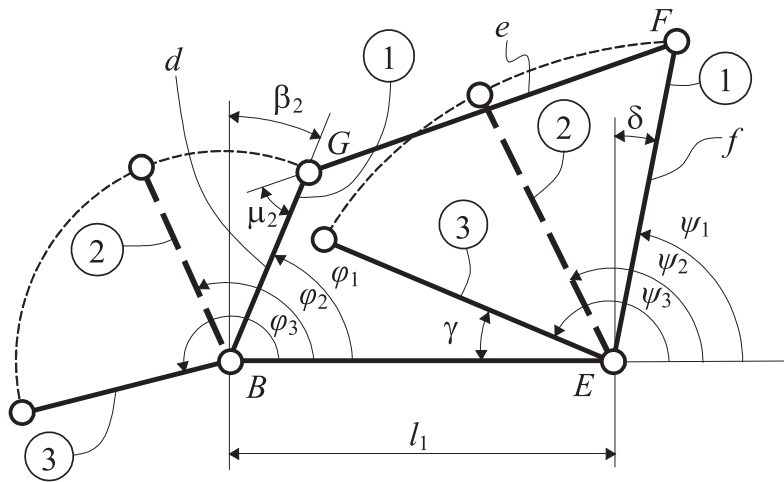


Fig. 4.11: Schema cinematico del quadrilatero $BEFG$

considerando il sistema come se fosse un generatore di funzione del tipo

$$\phi = F(\psi). \quad (4.11)$$

In totale, al fine di ottenere la sintesi del meccanismo devono essere assegnati sei parametri che corrispondono a tre configurazioni del quadrilatero articolato . Analogamente al paragrafo precedente, il problema della definizione degli angoli è stato scomposto in due parti distinte:

- definizione delle posizioni limite;
- ottimizzazione della posizione intermedia.

Relativamente al primo punto, per le posizioni limite corrispondenti alle configurazioni estreme 1 e 3 della Fig.4.11, sono state effettuate considerazioni geometriche relative agli ingombri del meccanismo, illustrati nel prossimo paragrafo. Sono stati quindi assegnati i seguenti valori: $\gamma = 40^\circ$, $\beta_2 = 30^\circ$ e $\delta = 10^\circ$. In questo modo, risultano assegnate le coppie di valori $(\psi_1 = 80^\circ, \phi_1 = 60^\circ)$ e $(\psi_3 = 140^\circ, \phi_3 = 190^\circ)$ che corrispondono alle configurazioni 1 e 3, ossia iniziale e finale in Fig.4.11. Per risolvere l'Eq.4.9, è indispensabile assegnare anche la configurazione intermedia ψ_2, ϕ_2 .

L'indice *transmission quality* che deve essere massimizzato è definito come la radice della seguente quantità

$$z = \frac{1}{\psi_3 - \psi_1} \int_{\psi_1}^{\psi_3} \sin^2 \mu_2 d\psi \quad (4.12)$$

dove μ_2 è l'angolo di trasmissione del quadrilatero che è dato dalla

$$\mu_2 = \cos^{-1} \left(\frac{l_1^2 + f^2 - d^2 - e^2 - 2l_1 f \cos(\pi - \psi)}{2de} \right) \quad (4.13)$$

Il complemento dell'Eq.4.12 è rappresentato da

$$f_2 = z' = \frac{1}{\psi_3 - \psi_1} \int_{\psi_1}^{\psi_3} \cos^2 \mu_1 d\psi \quad (4.14)$$

ed è denominato *transmission defect*. Quindi si ha

$$z' + z = 1 \quad (4.15)$$

ovvero

$$0 < z' < 1 \quad (4.16)$$

Attraverso l'utilizzo dell'indice *transmission defect* riportato nell'Eq.4.14, come funzione obiettivo da minimizzare, si è ottenuto l'ottimizzazione dell'indice *transmission quality*. La procedura di ottimizzazione è stata sviluppata attraverso l'utilizzo del Software Matlab Optimization Toolbox. I valori di partenza utilizzati nella procedura di ottimizzazione sono $\psi_2 = 110^\circ$, $\phi_2 = 125^\circ$. Tali valori corrispondono ai valori medi tra gli angoli di inizio e fine configurazione del quadrilatero considerato. La Fig. 4.19 mostra l'evoluzione della funzione obiettivo f_2 al variare del numero di iterazioni.

I valori ottimi per la configurazione intermedia ricavati dal Matlab a fine ottimizzazione sono $\psi_2 = 110.58^\circ$, $\phi_2 = 124.69^\circ$, e conseguentemente risolvendo le Eqs.4.9 e 4.10 si ottiene: $d = 53.39$ mm, $e = 96.30$ mm e $f = 104.96$ mm.

La Fig.4.13 mostra l'andamento dell'angolo di trasmissione μ_2 rispetto all'angolo di input ϵ . I risultati ottenuti mostrano un angolo di trasmissione che per alcuni valori di ψ

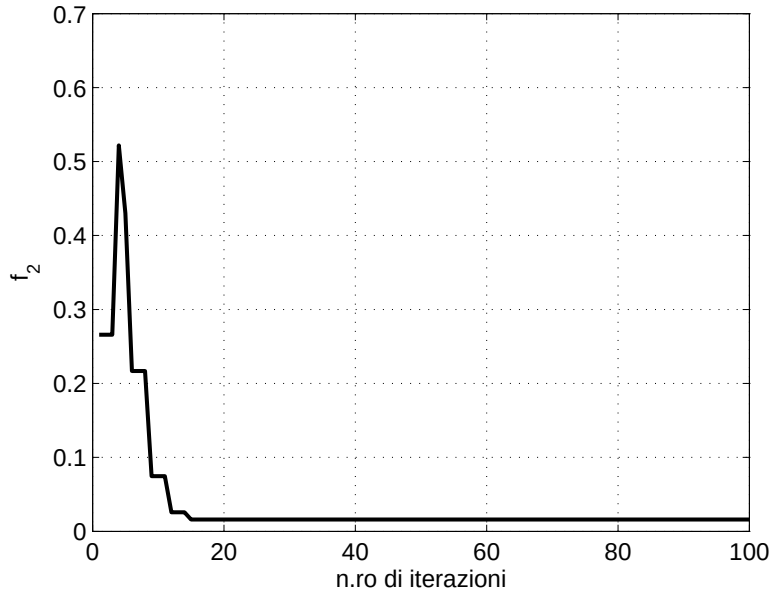


Fig. 4.12: Evoluzione della funzione obiettivo f_2 .

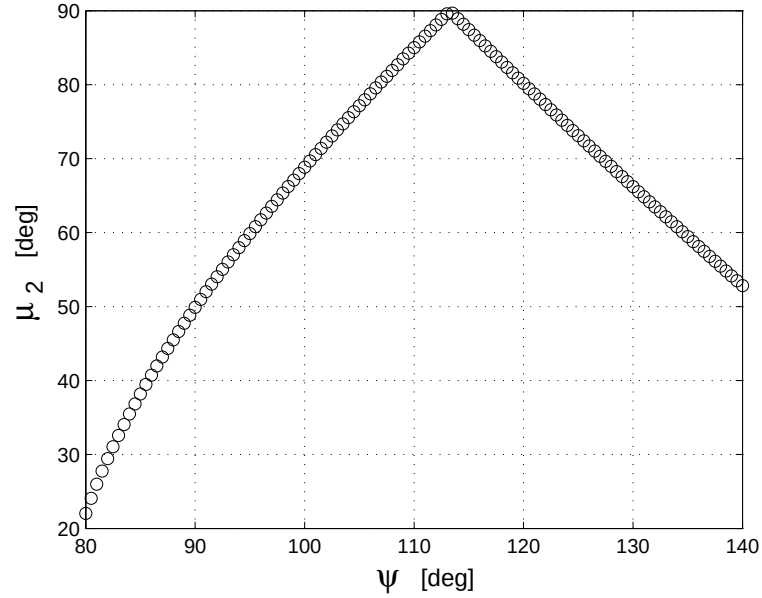


Fig. 4.13: Diagramma dell'angolo di trasmissione μ_2 del quadrilatero $BEFG$ per la soluzione ottenuta dalla sintesi ottima.

è minore di 45° . Tale condizione non è eccellente da un punto di vista della trasmissione della forza, ma se si considera che in tale range il dito è completamente esteso e quindi non in presa, tale valore può essere ritenuto ingegneristicamente accettabile

Sintesi del manovellismo EHI .

Lo stesso metodo è stato applicato per la sintesi del manovellismo deviato EHI . Con riferimento alla Fig.4.14, le equazioni di Freudenstein possono essere espresse nella forma

$$R_1(s_1 - x_1) \cos \lambda_i + R_2 \sin \lambda_i - R_3 = (s_i - x_i^2) \quad (4.17)$$

con $i = 1, 2, 3$ e

$$\begin{aligned} R_1 &= 2g \\ R_2 &= 2go_f \\ R_3 &= g^2 + o_f^2 - h^2 \end{aligned} \quad (4.18)$$

dove o_f è l'offset del manovellismo, g e h , sono le lunghezze dei link EH ed HI rispettivamente, e λ e x_i per $i=1,2,3$ sono i valori rispettivamente degli angoli di uscita e gli spostamenti di ingresso del manovellismo EHI .

L'Eq.4.17 può essere risolta fornendo le tre coppie di valori delle posizioni x_i e degli angoli λ_i , per $i=1,2,3$, che corrispondono alle tre configurazioni reciproche dei link HI ed EH , ossia considerando il sistema come se fosse un generatore di funzione del tipo

$$\lambda = F(x) \quad (4.19)$$

In totale devono quindi essere assegnati sei parametri che corrispondono a tre configurazioni del manovellismo, al fine di ottenere la sintesi del meccanismo. Analogamente ai paragrafi precedenti, il problema della definizione dei parametri è stato scomposto anche in questo caso in due parti ben distinte:

- definizione delle configurazioni limite;
- ottimizzazione della configurazione intermedia.

Relativamente al primo punto, le configurazioni limite, corrispondenti ad 1 e 3 della Fig.4.14, sono state effettuate considerazioni geometriche relative agli ingombri del mec-

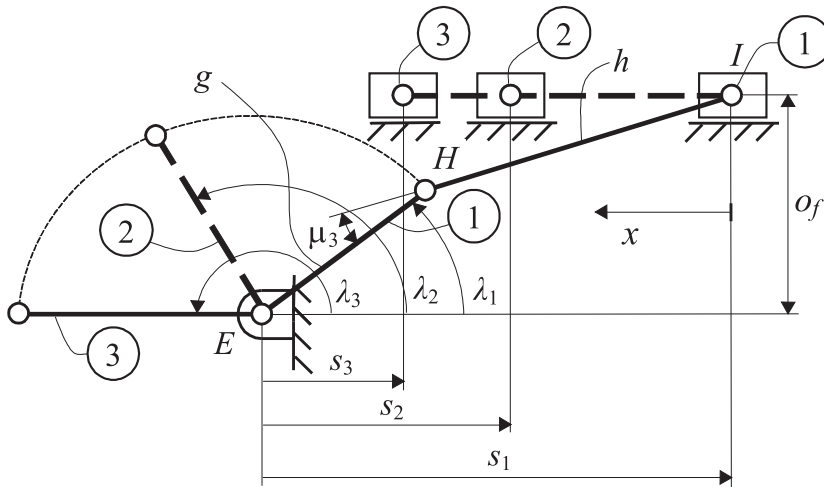


Fig. 4.14: Schema cinematico del manovellismo EHI .

canismo, illustrati nel prossimo paragrafo. Sono stati quindi assegnati i seguenti valori: $x_1 = 0$ mm, $\lambda_1 = 37^\circ$ e $x_3 = 75$ mm, $\lambda_3 = 180^\circ$, che corrispondono alle configurazioni 1 e 3, ossia iniziale e finale della Fig.4.14. Per risolvere l'Eq.4.17, è indispensabile assegnare anche la configurazione intermedia x_2, λ_2 , in modo che il sistema sia univocamente determinato.

L'indice *transmission quality*, che deve essere massimizzato, è definito come la radice della seguente quantità

$$z = \frac{1}{x_3 - x_1} \int_{x_1}^{x_3} \sin^2 \mu_3 dx \quad (4.20)$$

dove μ_3 è l'angolo di trasmissione del manovellismo, esprimibile dalla

$$\mu_3 = \cos^{-1} \left(\frac{(s_1 - x)^2 + O_f^2 - g^2 - h^2}{2gh} \right) \quad (4.21)$$

Il complemento dell'Eq.4.20 è rappresentato da:

$$f_3 = z' = \frac{1}{x_3 - x_1} \int_{x_1}^{x_3} \cos^2 \mu_x dx \quad (4.22)$$

ed è denominato *transmission defect*. Quindi si ha

$$z' + z = 1, \quad (4.23)$$

ovvero

$$0 < z' < 1. \quad (4.24)$$

Attraverso l'utilizzo dell'indice *transmission defect* riportato nell'Eq.4.22, come funzione obiettivo da minimizzare, si è svolta l'ottimizzazione dell'indice *transmission quality*. La procedura di ottimizzazione è stata sviluppata mediante analoga procedura con l'utilizzo del Software Matlab Optimization Toolbox. I valori di partenza utilizzati nella procedura di ottimizzazione sono $x_2 = 37,5$ mm, $\lambda_2 = 108,5^\circ$. Tali valori corrispondono ai valori medi tra gli angoli di inizio e fine configurazione del quadrilatero considerato. I valori ottimi per la configurazione intermedia ricavati dal Matlab a fine ottimizzazione

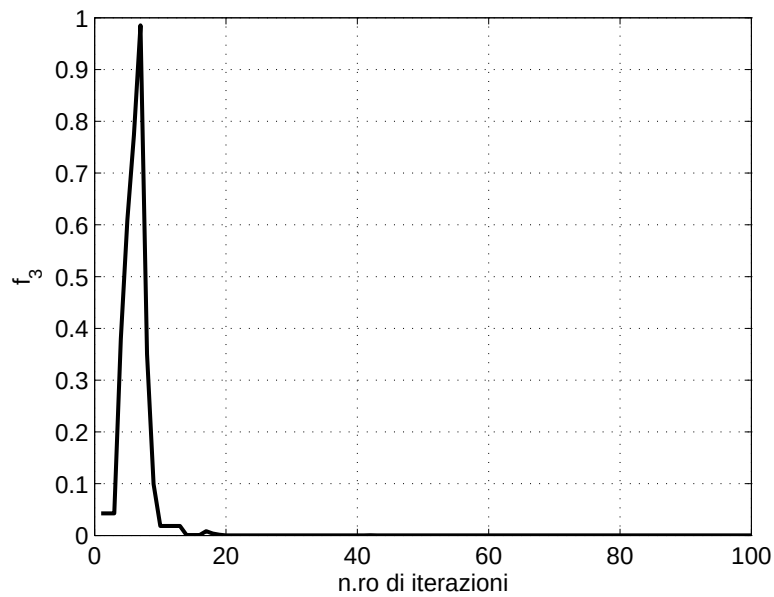


Fig. 4.15: Evoluzione della funzione obiettivo f_3 del manovellismo *EHI*.

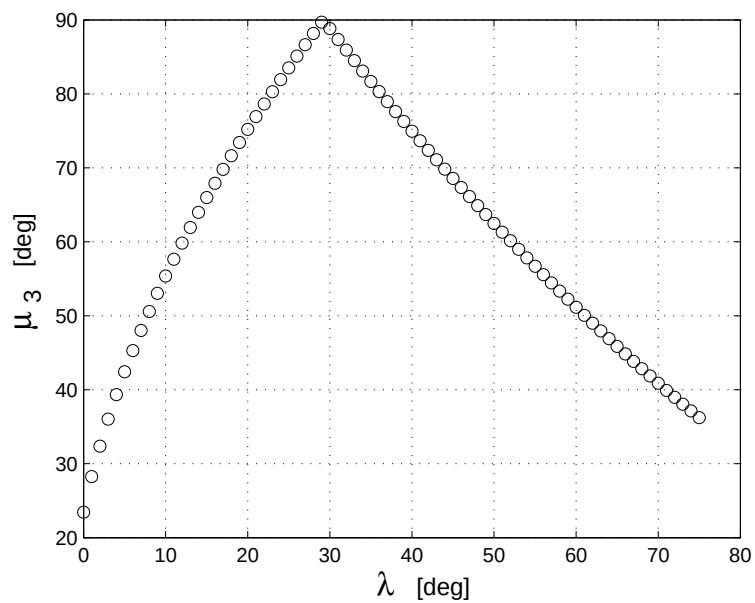


Fig. 4.16: Diagramma dell'angolo di trasmissione μ_3 del manovellismo *EHI* per la soluzione ottenuta con la sintesi ottima.

sono $x_2 = 37,4\text{ mm}$ e $\lambda_2 = 108,9^\circ$ e, conseguentemente risolvendo le Eqs.4.17 e 4.18, si ottiene $o_f = 43,48\text{ mm}$, $g = 35,77\text{ mm}$ e $h = 74,72\text{ mm}$.

La Fig. 4.15 mostra l'evoluzione della funzione obiettivo f_3 al variare del numero di iterazioni. La Fig.4.16 mostra l'andamento dell'angolo di trasmissione μ_3 rispetto all'angolo di output λ . I risultati ottenuti mostrano un valore dell'angolo di trasmissione che per un range di λ è minore di 45° . Tale condizione non è eccellente da un punto di vista della trasmissione della forza, ma se si considera che in questo range il dito comincia a muoversi e quindi non è in presa, i valori di μ_3 possono essere ritenuti accettabili.

4.3.1 Analisi e simulazione del moto di chiusura

A seguito della sintesi dimensionale per il meccanismo del dito con un algoritmo di ottimizzazione, è stata effettuata un'analisi cinematica del dito per simulare il moto di chiusura. Di seguito, si indicheranno i vertici dei quadrilateri con A_{1i} , A_{2i} , A_{3i} , A_{4i} in Fig. 4.17, per $i= 1,2,3$, essi sono connessi in serie mediante i link rigidi A_{41} , A_{31} , A_{22} , per la trasmissione del moto dalla falange prossimale m_1 , fino alla falange distale m_3 . L'analisi di posizione è stata effettuata rispetto al sistema di riferimento OXY , mediante il vettore di posizione $\mathbf{P}_{A_{4i}}$, per ogni i -esimo quadrilatero, con $i= 1,2$. Tale formulazione è stata sviluppata considerando i due quadrilateri in serie ed utilizzando le equazioni di chiusura.

$$\mathbf{P}_{A_{4i}} = \sum_{i=1}^n \mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{4i} \quad (4.25)$$

dove n rappresenta il numero dei quadrilateri.

Con riferimento al quadrilatero articolato riportato in Fig.4.17, le equazioni di chiusura possono essere scritte nella forma

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{2i} + \mathbf{r}_{3i} = \mathbf{r}_{1i} + \mathbf{r}_{4i} \quad (4.26)$$

dove $\mathbf{r}_{1i}$, $\mathbf{r}_{2i}$, $\mathbf{r}_{3i}$, $\mathbf{r}_{4i}$ rappresentano i vettori lungo i link.

Sviluppando le equazioni vettoriali (4.26) secondo un sistema di riferimento cartesiano OXY , si ottiene

$$r_{2i} \cos \theta_{2i} + r_{3i} \cos \theta_{3i} = r_{1i} \cos \theta_{1i} + r_{4i} \cos \theta_{4i} \quad (4.27)$$

$$r_{2i} \sin \theta_{2i} + r_{3i} \sin \theta_{3i} = r_{1i} \sin \theta_{1i} + r_{4i} \sin \theta_{4i} \quad (4.28)$$

dove $r_{1i}, r_{2i}, r_{3i}, r_{4i}$ sono le lunghezze dei vettori $\mathbf{r}_{1i}, \mathbf{r}_{2i}, \mathbf{r}_{3i}, \mathbf{r}_{4i}$. Al fine di ottenere il valore dell'angolo di uscita θ_{4i} , si può isolare il termine relativo all'angolo θ_{3i} dalle Eqs.4.27 e 4.28 come segue

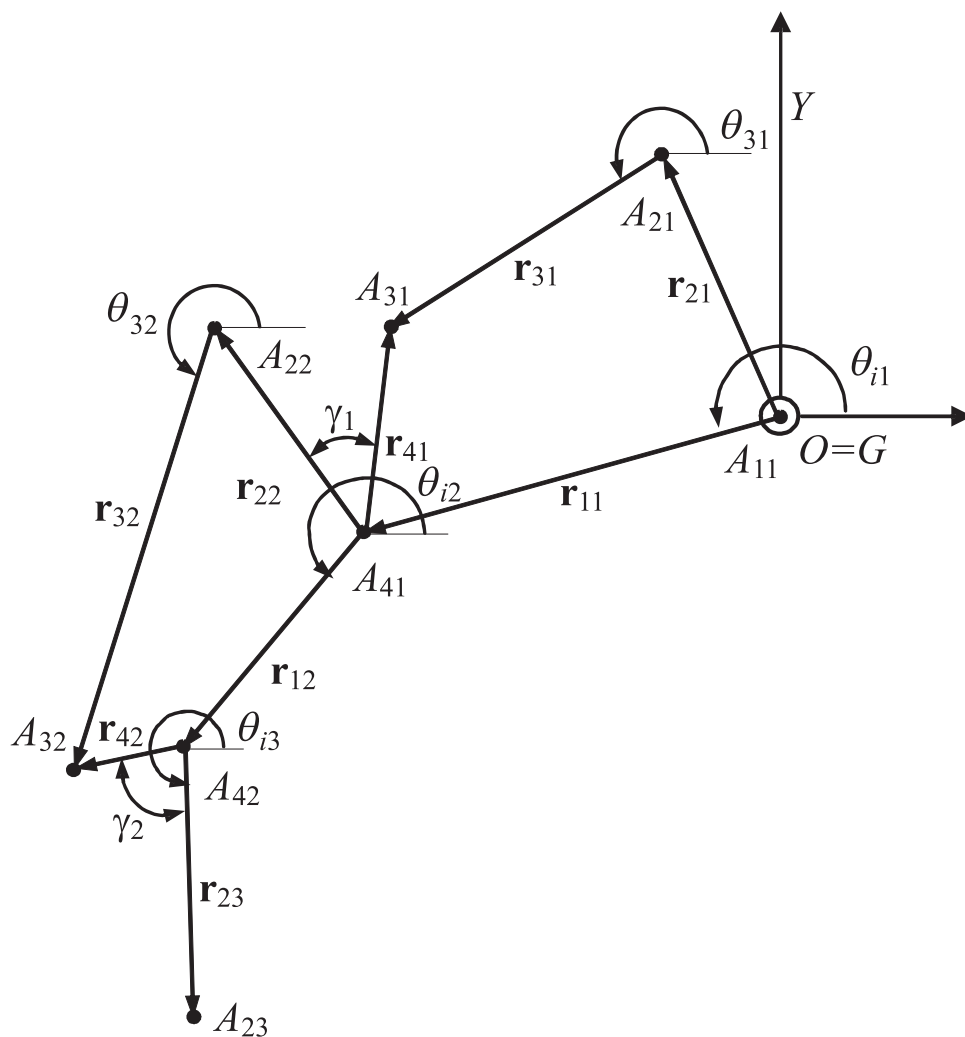


Fig. 4.17: Schema di riferimento per l'analisi di posizione del dito.

$$r_{3i} \sin \theta_{3i} = r_{1i} \sin \theta_{1i} + r_{4i} \sin \theta_{4i} - r_{2i} \sin \theta_{2i} \quad (4.29)$$

$$r_{3i} \sin \theta_{3i} = r_{1i} \sin \theta_{1i} + r_{4i} \sin \theta_{4i} - r_{2i} \sin \theta_{2i} \quad (4.30)$$

Quadrando e sommando i vari membri, e manipolando algebricamente le Eqs.4.29 e 4.30, si ottiene

$$A \cos \theta_{4i} + B \sin \theta_{1i} + C = 0 \quad (4.31)$$

dove

$$A = 2r_{1i}r_{4i} \cos \theta_{1i} - 2r_{2i}r_{4i} \cos \theta_{2i} \quad (4.32)$$

$$B = 2r_{1i}r_{4i} \sin \theta_{1i} - 2r_{2i}r_{4i} \sin \theta_{2i} \quad (4.33)$$

$$C = r_{1i}^2 + r_{2i}^2 - r_{3i}^2 - 2r_{1i}^2r_{2i}^2(\cos \theta_{1i} \cos \theta_{2i} + \sin \theta_{1i} \sin \theta_{2i}) \quad (4.34)$$

Per risolvere l'Eq.4.31, si utilizzano le seguenti relazioni trigonometriche

$$\sin \theta_{4i} = \frac{2 \tan(\theta_{4i}/2)}{1 + \tan^2(\theta_{4i}/2)} \quad (4.35)$$

e

$$\cos \theta_{4i} = \frac{1 - \tan^2(\theta_{4i}/2)}{1 + \tan^2(\theta_{4i}/2)} \quad (4.36)$$

Sostituendo le Eqs. 4.35 e 4.36 nella 4.31, si ottiene

$$(C - A)t^2 + 2Bt + (A + C) = 0 \quad (4.37)$$

dove

$$t = \tan \theta_{4i}/2. \quad (4.38)$$

Risolvendo rispetto al parametro t , si ottiene

$$t = \frac{-B + \sigma \sqrt{B^2 - C^2 + A^2}}{C - A} \quad (4.39)$$

dove $\sigma = \pm 1$ fornisce la scelta tra le due possibilità di assemblaggio del meccanismo.

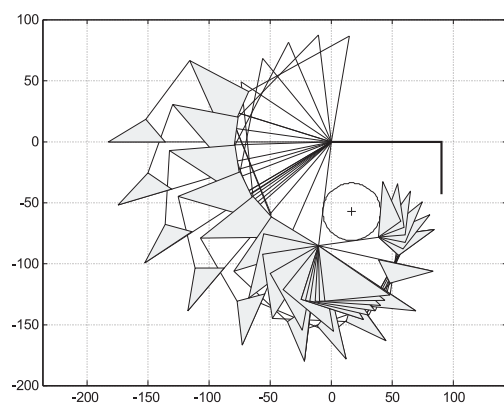
Dividendo l'Eq. 4.27 per l'Eq 4.28 e risolvendo rispetto a θ_{3i} , si ottiene

$$\theta_{3i} = \tan^{-1} \left[\frac{r_{1i} \sin \theta_{1i} + r_{4i} \sin \theta_{4i} - r_{2i} \sin \theta_{2i}}{r_{1i} \cos \theta_{1i} + r_{4i} \cos \theta_{4i} - r_{2i} \cos \theta_{2i}} \right] \quad (4.40)$$

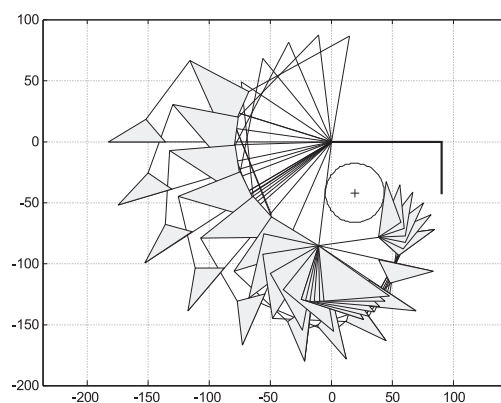
L'angolo $\theta_{2,i+1}$ del quadrilatero $(i+1)$ è dato da

$$\theta_{2,i+1} = \theta_{4i} + \gamma_i. \quad (4.41)$$

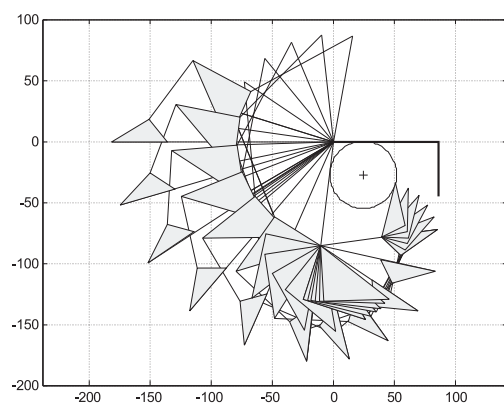
dove l'angolo γ_i è un angolo costante formato dai vettori $\mathbf{r}_{4i}$ e $\mathbf{r}_{2,i+1}$. Questa formulazione è stata implementata in Matlab al fine di ottenere dei plot che permettessero di simulare la sequenza di chiusura del meccanismo del dito nelle configurazioni di presa, come riportato in Fig.4.18. La configurazione di partenza è considerata con il dito completamente esteso lungo la direzione dell'asse X con verso negativo. La Fig.4.18(a) mostra la sequenza di presa sino all'afferraggio dell'oggetto con un raggio minimo pari a $D = 47$ mm. In questo caso, la configurazione del dito completamente chiuso è ottenuta per $\theta_j = \theta_{jM}$ dove $j = 1, 2, 3$. Le simulazioni riportate dalle Figs.4.18(b) a 4.18(f), sono ottenute per aumenti gradualmente del diametro dell'oggetto. La falange mediana rimane chiusa fino alla configurazione 4.18(d), per la quale il diametro è pari a $D=78$ mm. La falange prossimale



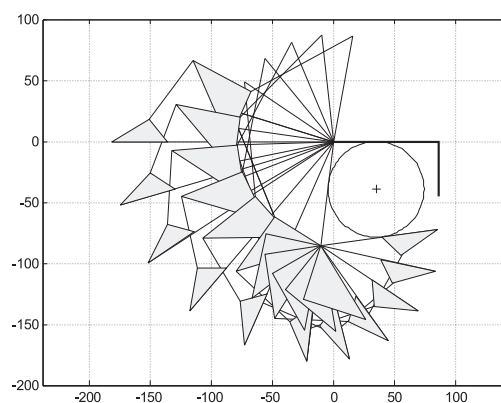
(a)



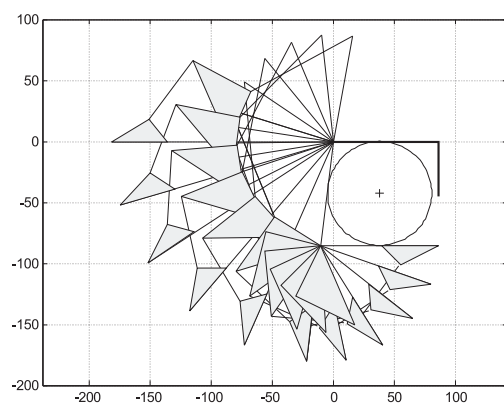
(b)



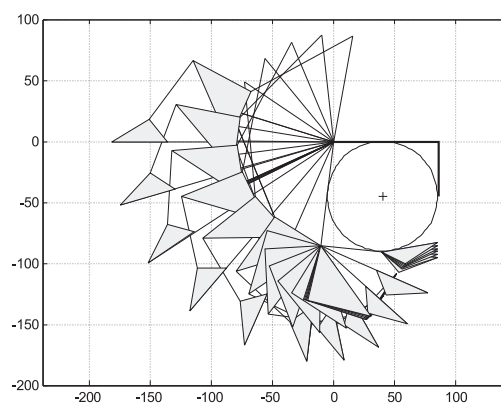
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 4.18: Simulazione in Matlab della sequenza di chiusura nel piano XY per differenti valori di diametro dell'oggetto in presa; a) $D = 47$ mm; b) $D = 48$ mm; c) $D = 55$ mm; d) $D = 78$ mm; e) $D = 85$ mm; f) $D = 90$ mm.

invece rimane chiusa fino alla configurazione di Fig.4.18(f) con un diametro dell'oggetto in presa pari a $D = 90$ mm. Gli oggetti che hanno un diametro superiore possono essere afferrati solo utilizzando il pollice di contrasto.

4.3.2 Progetto meccanico del dito

Con riferimento alla configurazione del dito completamente chiuso della Fig.4.19 il progetto meccanico del dito sottoattuato di Fig.4.4 è stato sviluppato considerando le dimensioni finali ottenute mediante le considerazioni riportate nei paragrafi precedenti, ossia, $a = 23$ mm, $b = 58$ mm e $c = 71$ mm del quadrilatero articolato $ABCD$; $d = 53$ mm, $e = 97$ mm e $f = 105$ mm per il quadrilatero articolato $BEFG$; $O_f = 43$ mm, $g = 36$ mm e $h = 75$ mm per il manovellismo di spinta deviato EHI . La lunghezza delle tre falangi è pari a $l_1 = 86$ mm, $l_2 = 50$ mm e $l_3 = 46$ mm. Ogni giunto è provvisto di battute meccaniche per evitare l'iper estensione e l'iper flessione del dito, in modo tale che nella configurazione del dito completamente chiuso si abbiano i seguenti angoli $\theta_{1M} = 83^\circ$, $\theta_{2M} = 105^\circ$ e $\theta_{3M} = 78^\circ$.

In Fig.4.20 si può notare la configurazione del dito completamente chiuso. In questa configurazione tutte e tre le falangi hanno raggiunto le loro rispettive battute meccaniche inferiori, e conseguentemente le molle torsionali sono completamente compresse, esplicando il massimo della coppia.

In Fig.4.21 si può notare invece la configurazione del dito completamente aperto. In questa configurazione, tutte e tre le falangi hanno raggiunto le loro rispettive battute meccaniche superiori e, a differenza del caso precedente, le molle torsionali non sono compresse ed esplicano una coppia pari solo al precarico del montaggio.

La Fig.4.22 mostra il disegno 3D esploso del dito articolato sottoattuato e lo schema cinematico in sovrapposizione. Sono evidenti le due molle torsionali S_1 e S_2 rispettivamente, la prima, la seconda e la terza falange, indicate con i numeri 1), 2) e 3) rispettivamente. Sul palmo orizzontale 4), sono fissati, la prima falange, la guida lineare della

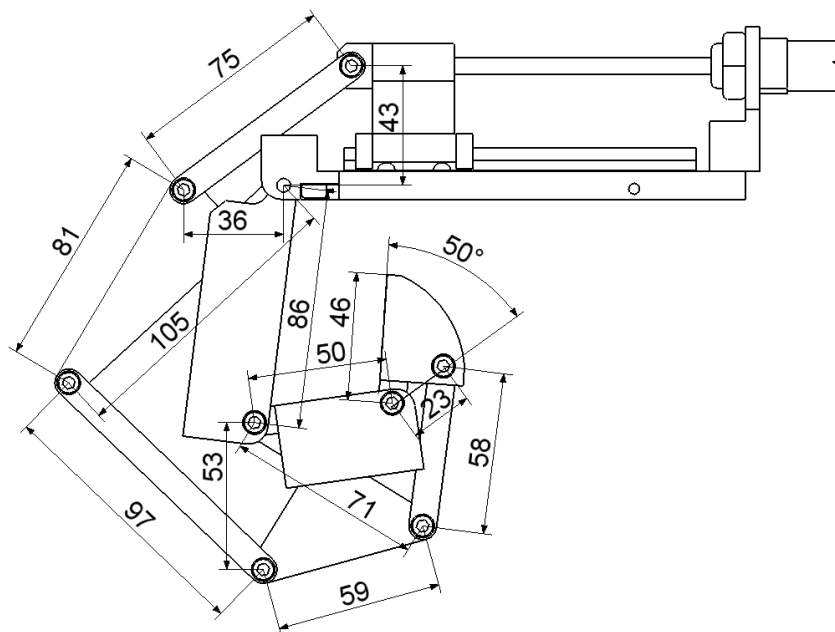


Fig. 4.19: Schema con le dimensioni dei link adottate per la realizzazione del dito.

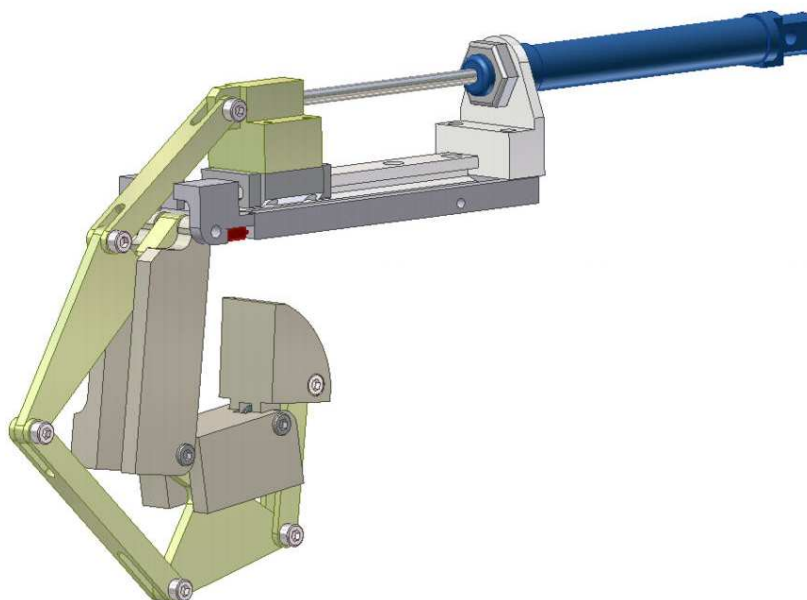


Fig. 4.20: Schema 3D del dito in configurazione completamente chiusa.

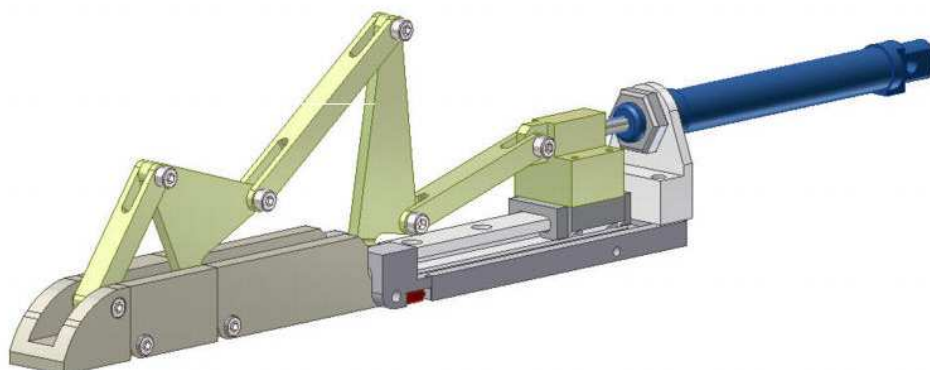


Fig. 4.21: Schema 3D del dito in configurazione completamente aperta.

SCHNEEBERGER, modello MNN 15-G1, il supporto per il cilindro pneumatico 6) ed il sistema di trasmissione della forza 5) dall'attuatore pneumatico al dito.

La Fig.4.23 mostra il disegno 3D del dito articolato sottoattuatorio e lo schema cinematico. E' possibile notare la posizione delle due molle torsionali S_1 e S_2 , che permettono la corretta chiusura ed apertura del meccanismo del dito. La scelta di tali molle è stata effettuata in base ad un dimensionamento di massima, con riferimento allo sequenza di chiusura riportata in Fig.4.18, in maniera tale che la terza falange sia l'ultima a chiudersi. La molla S_1 ha un diametro esterno $D_0 = 11$ mm, un diametro delle spire $d_0 = 0.8$ mm ed un numero di spire $n_{sp} = 6$. La molla S_2 ha un diametro esterno $D_0 = 11$ mm, un diametro delle spire $d_0 = 0.9$ mm ed un numero di spire $n_{sp} = 6$. In Fig.4.24 è mostrata la sezione del dito senza il meccanismo di attuazione. La particolare linea di sezione è stata scelta in maniera tale da visualizzare le sedi di alloggiamento delle molle torsionali e la posizione dello switch di prossimità delle prime quattro falangi.

4.3.3 Particolari costruttivi principali del dito robotico

Per la realizzazione di tutta la mano robotica è stato utilizzato l'alluminio Anticorodal unificato secondo la UNI 3751. Sono stati utilizzati dei prodotti semilavorati in barre e profilati. Le proprietà principali di questo materiale sono da ricondursi a:

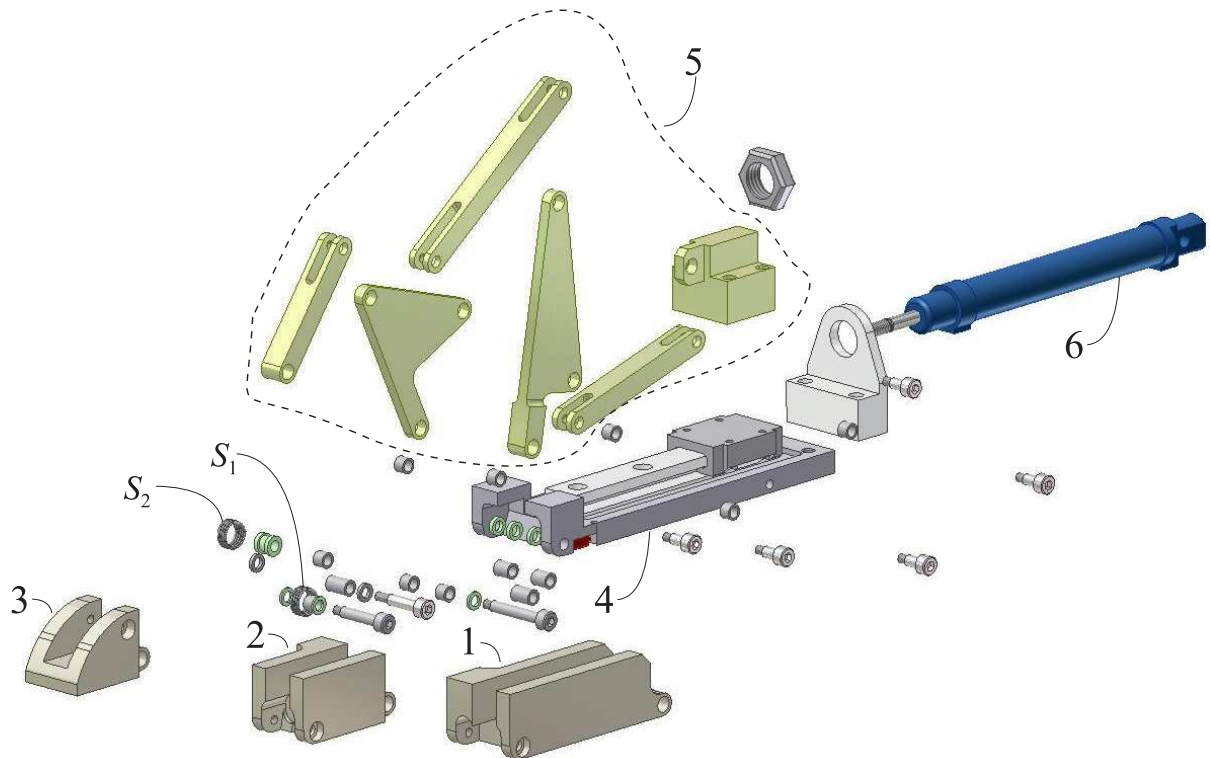


Fig. 4.22: Vista 3D esplosa del dito: S_1 e S_2 molle torsionali tra le falangi 1 e 2 e 2 e 3; 1) prima falange, 2) seconda falange, 3) terza falange, 4) palmo, 5) meccanismo di trasmissione, 6) attuatore pneumatico.

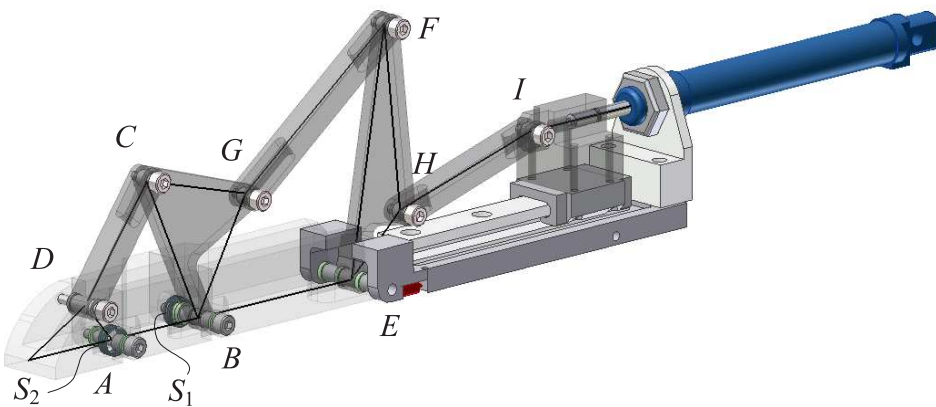


Fig. 4.23: Vista 3D del dito e schema cinematico.

- elevata resistenza alla corrosione;

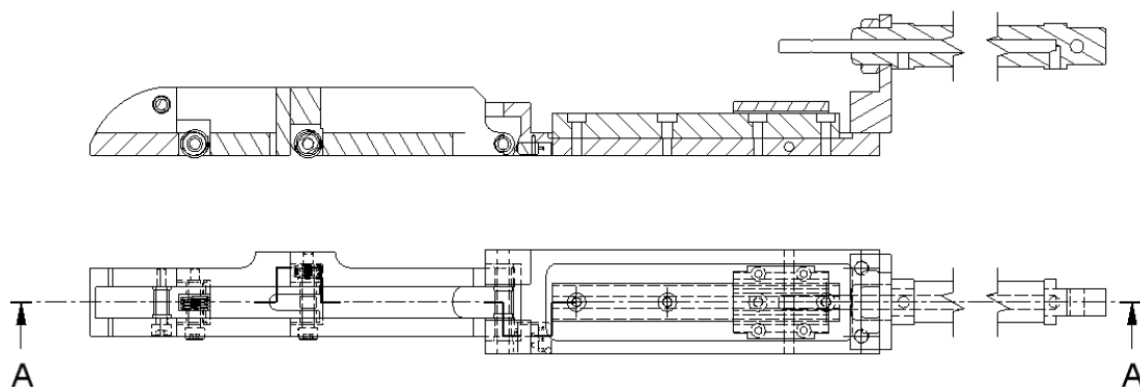


Fig. 4.24: Sezione del dito senza meccanismo di trasmissione.

- elevate caratteristiche meccaniche;
- buona plasticità;
- buona lavorabilità alle macchine operatrici;
- attitudine alla ossidazione anodica ed ossicolorazione.

Le applicazioni tipiche per questo alluminio sono relative a costruzioni auto-ferro-tranviarie, carrozzerie e strutture portanti.

Prima falange

La Fig.4.25 mostra tre viste della falange 1, in cui sono riportate le sole dimensioni esterne fondamentali. La prima falange è vincolata da un lato alla base del palmo, mentre dall'altro è vincolata alla seconda falange. La rotazione relativa tra la seconda falange e la prima può essere al massimo di 105° , mentre la rotazione relativa tra la prima falange ed il palmo può essere al massimo di 83° . Infatti, mediante le lavorazioni a controllo numerico, visibili in Fig.4.26, sono state realizzate due battute meccaniche che evitano l'iper-flessione e l'iper-estensione della prima falange rispetto alla seconda falange.

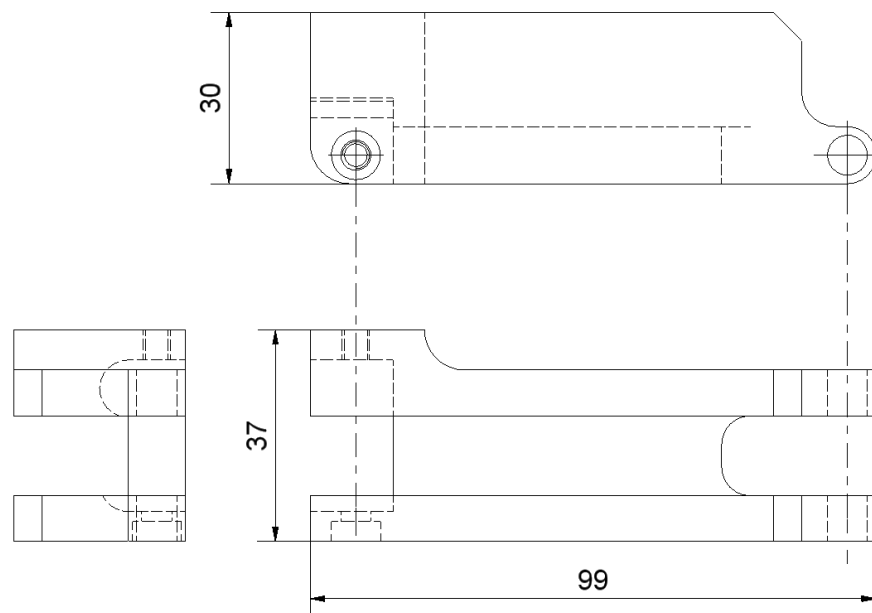


Fig. 4.25: Viste della Falange 1.

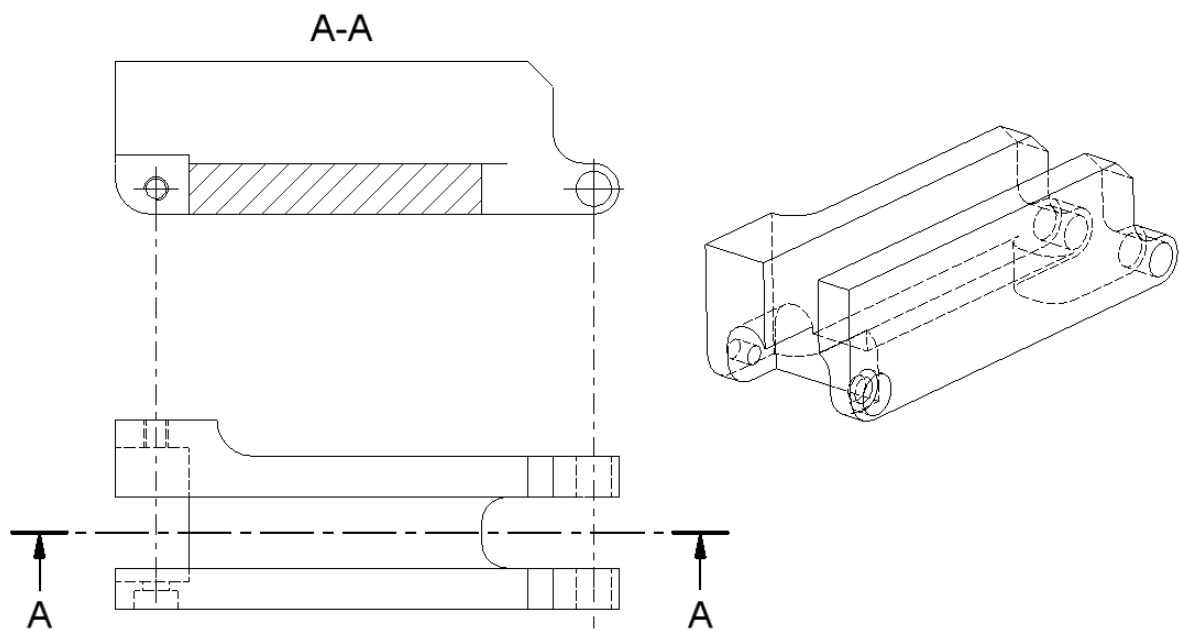


Fig. 4.26: Vista 3D e sezione della Falange 1.

Tab. 4.2: Principali caratteristiche fisico-meccaniche del materiale utilizzato.

Caratteristiche	
Peso specifico	2,69 kg/dm ³
Punto di fusione	552°C
Modulo di Elasticità	7000 kg/mm ²
Carico di rottura a trazione	11 ÷ 15 kg/mm ²
Carico al limite di snervamento	6 ÷ 10 kg/mm ²
Allungamento	20 ÷ 30 %
Durezza Brinell	30 ÷ 45 kg/mm ²

Seconda falange

La Fig.4.27 mostra tre viste della falange 2, in cui sono riportate le sole dimensioni esterne fondamentali. La seconda falange è vincolata da un lato alla prima falange attraverso una cerniera, mentre dall'altro è vincolata alla terza falange. La rotazione relativa tra la seconda falange e la terza può essere al massimo di 78°. Infatti mediante le lavorazioni a controllo numerico sono state realizzate due battute meccaniche che evitano l'iper-flessione e l'iper-estensione della seconda falange rispetto alla prima falange, come è possibile notare nella sezione riportata in Fig.4.28.

Terza falange

La Fig.4.29 mostra tre viste della falange 3, in cui sono riportate le sole dimensioni esterne fondamentali. La terza falange è vincolata solo da un lato alla seconda falange, mentre dall'altro lato è libera. La rotazione relativa tra la terza falange e la seconda può essere al massimo di 78°. Infatti mediante le lavorazioni a controllo numerico sono state realizzate due battute meccaniche che evitano l'iper-flessione e l'iper-estensione della terza falange rispetto alla seconda falange, come è possibile notare nella sezione riportata in Fig.4.30.

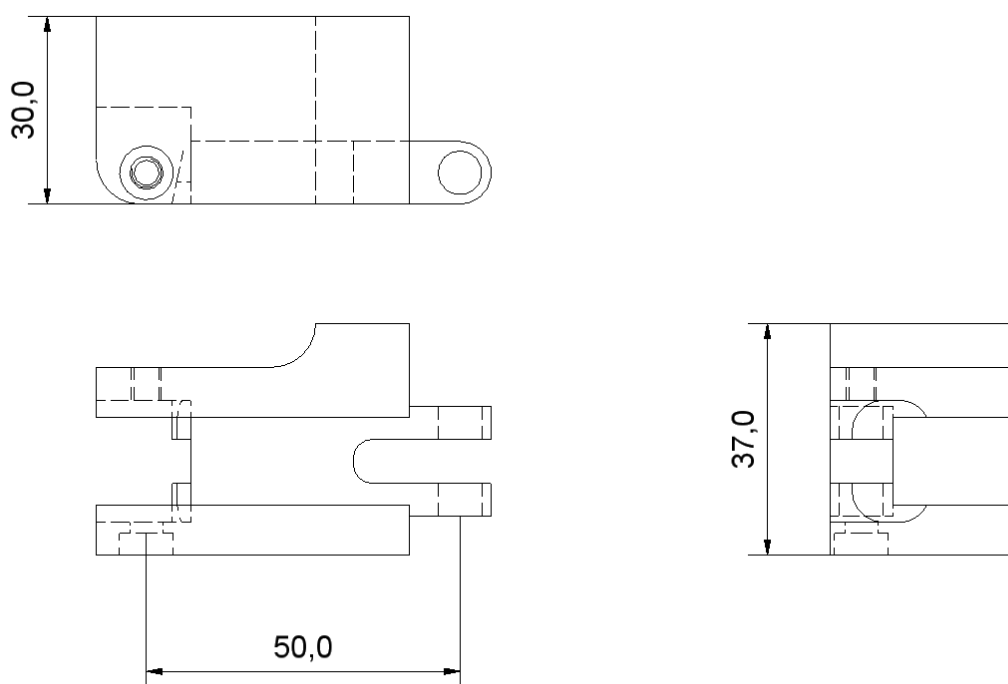


Fig. 4.27: Viste della Falange 2.

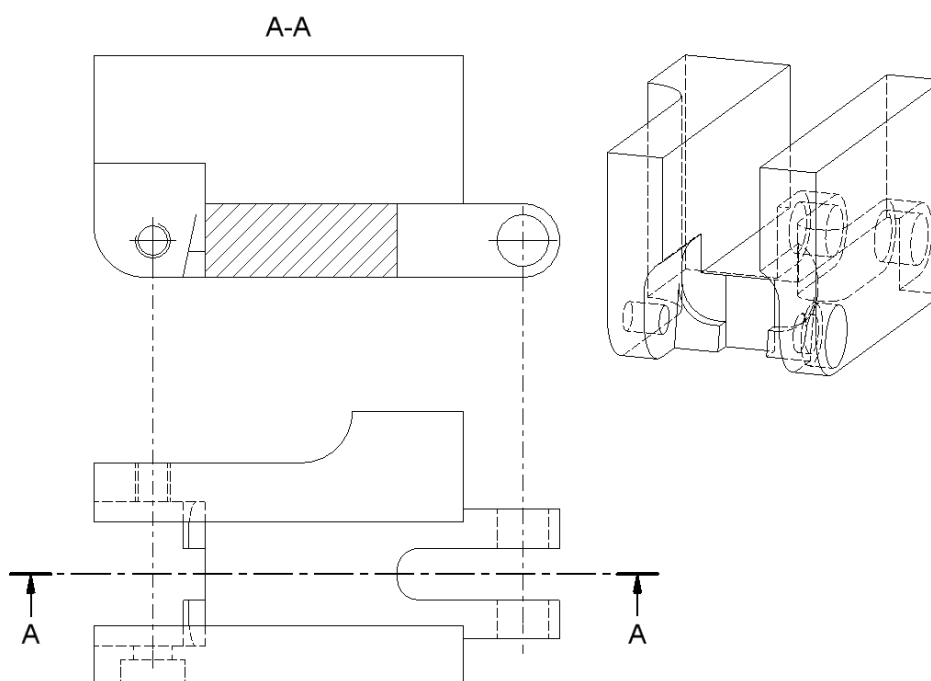


Fig. 4.28: Vista 3D e sezione della Falange 2.

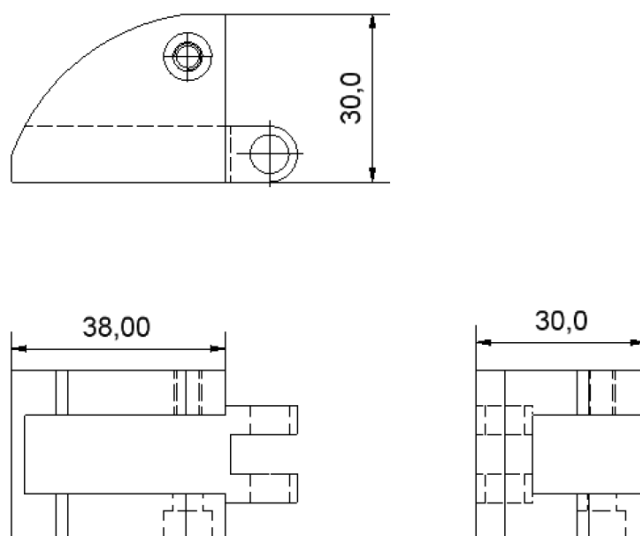


Fig. 4.29: Viste della Falange 3.

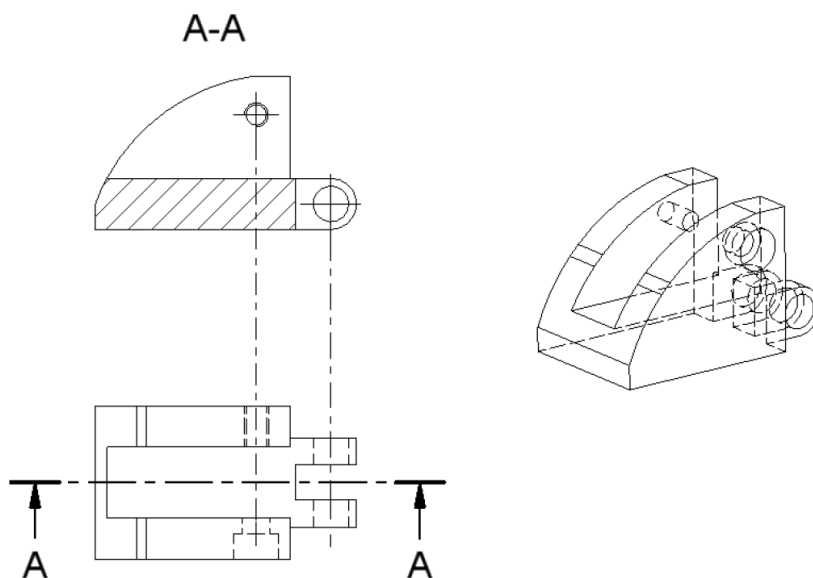


Fig. 4.30: Vista 3D e sezione della Falange 3.

Palmo

L'elemento centrale dell'intero progetto meccanico della mano è costituito dal palmo, esso infatti rappresenta l'elemento di congiunzione tra la struttura portante della mano e con funzione di sostegno e le dita, che hanno la funzione di presa. La Fig.4.31 mostra tre viste del palmo, in cui sono riportate le sole dimensioni esterne fondamentali. Il palmo ha il compito di sostenere le falangi, ospitare la guida lineare utilizzata, e garantire un movimento rettilineo dello stelo del pistone, il quale è vincolato al palmo dal lato opposto a quello dove sono fissate le falangi. Anche il palmo è stato realizzato in maniera tale da avere delle battute meccaniche tali da limitare la rotazione massima consentita alla prima falange. Tale battuta meccanica è visibile in Fig.4.32. La filosofia progettuale alla base dello sviluppo della Mano robotica mira a realizzare un sistema compatto, versatile, affidabile e modulare, con la possibilità di assemblare i pezzi e con manutenzione agevole. Sfruttando in pieno questi concetti di base, le dita sono state assemblate in quattro moduli separati funzionanti in maniera indipendente, che poi sono stati assemblati insieme in modo da realizzare un unico palmo orizzontale a quattro dita. La Fig.4.33 mostra la vista dal basso del palmo. E' visibile l'alloggiamento che serve ad ospitare lo switch di prossimità, il quale rileva se una delle quattro prime falangi è arrivata a battuta. Lo switch ha delle dimensioni molto contenute al fine di non interferire con la presa degli oggetti. Per impedire danneggiamenti accidentali del sensore, è stata progettata una lamina sottile che ha la funzione di coprire i quattro switch. La posizione della lamina è stata scelta in modo tale da non interferire con un eventuale oggetto in presa, ed inoltre è stata sagomata in modo tale da divenire una battuta meccanica che si aggiunge a quella del palmo.

4.4 Progetto meccanico della mano

La Fig.4.36 mostra il disegno 3D della mano robotica Ca.U.M.Ha. Sono evidenti le quattro dita uguali 1), i meccanismi di trasmissione delle dita 2), i quattro attuatori pneumatici

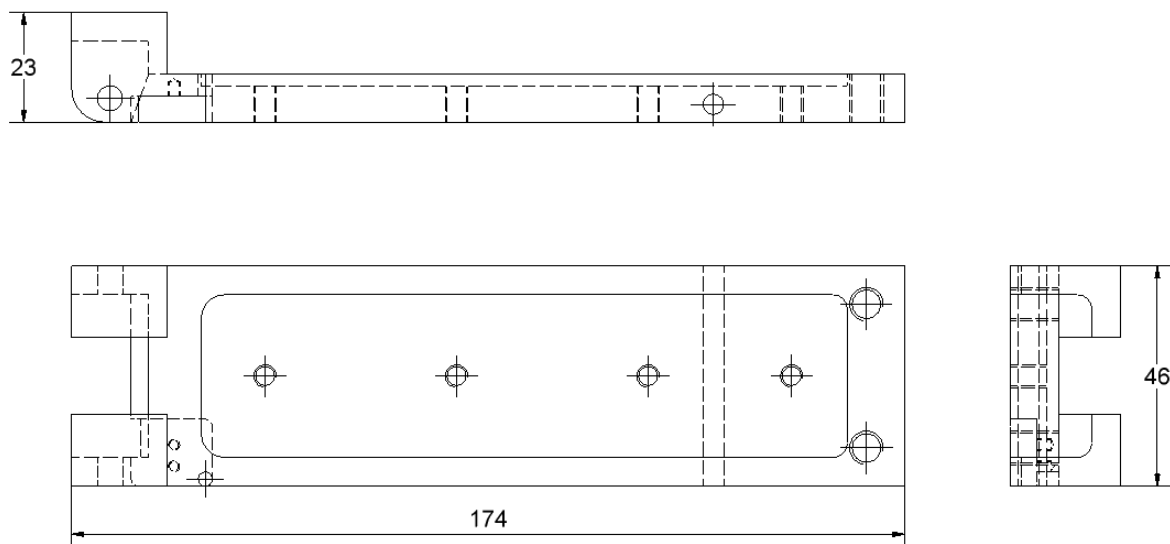


Fig. 4.31: Viste del palmo.

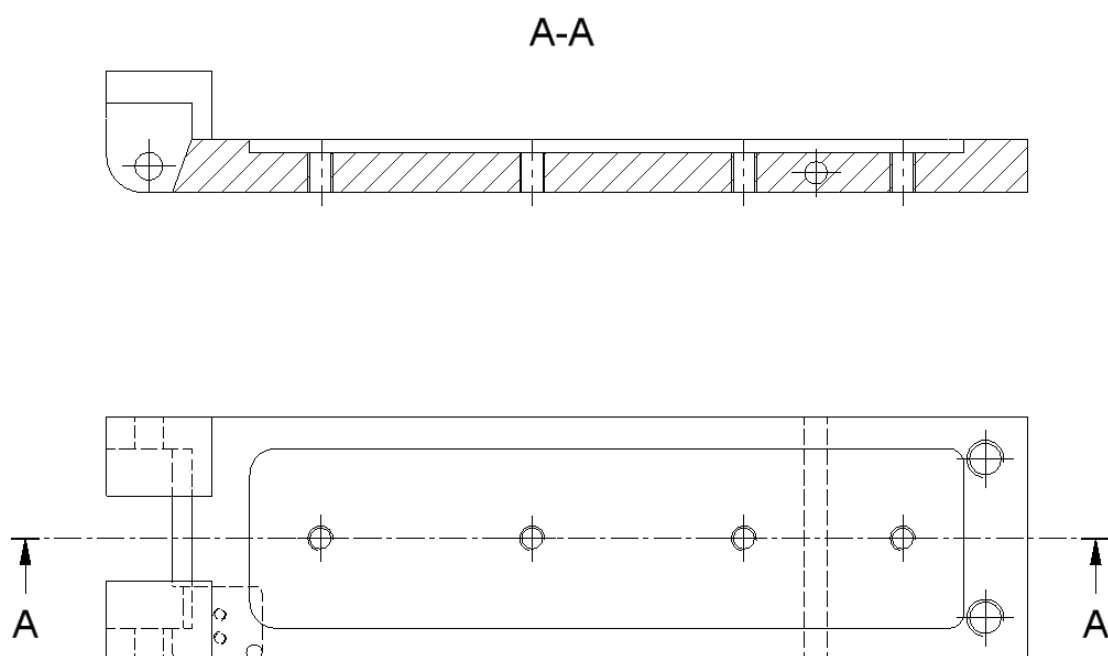


Fig. 4.32: Sezione del palmo.

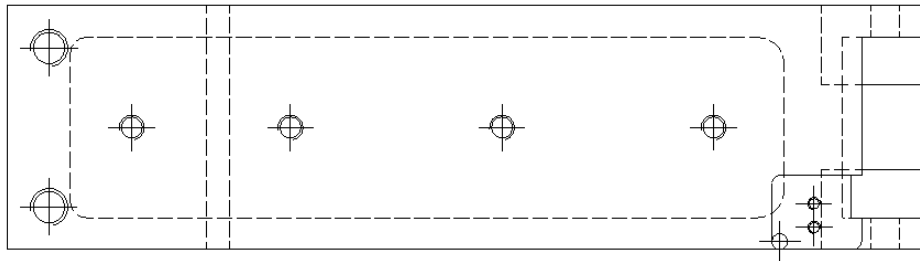


Fig. 4.33: Vista dal basso del palmo.

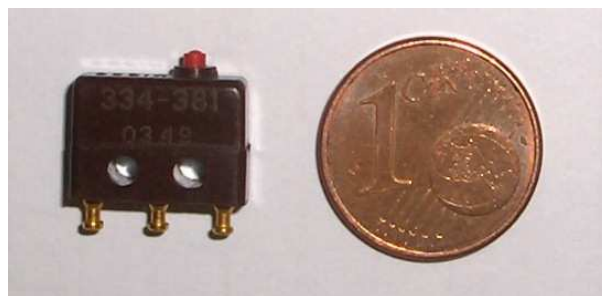


Fig. 4.34: Switch utilizzato.

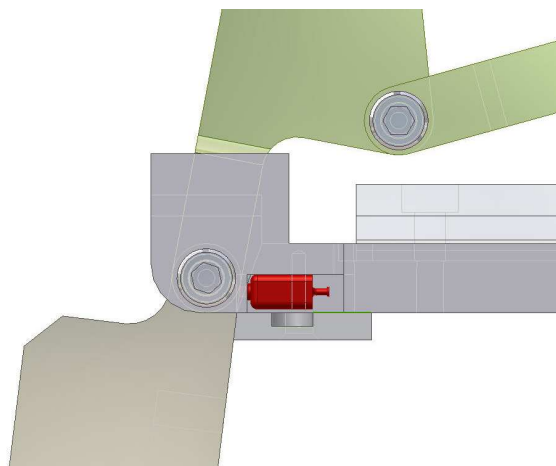


Fig. 4.35: Schema e posizionamento della piastra di protezione dello switch.

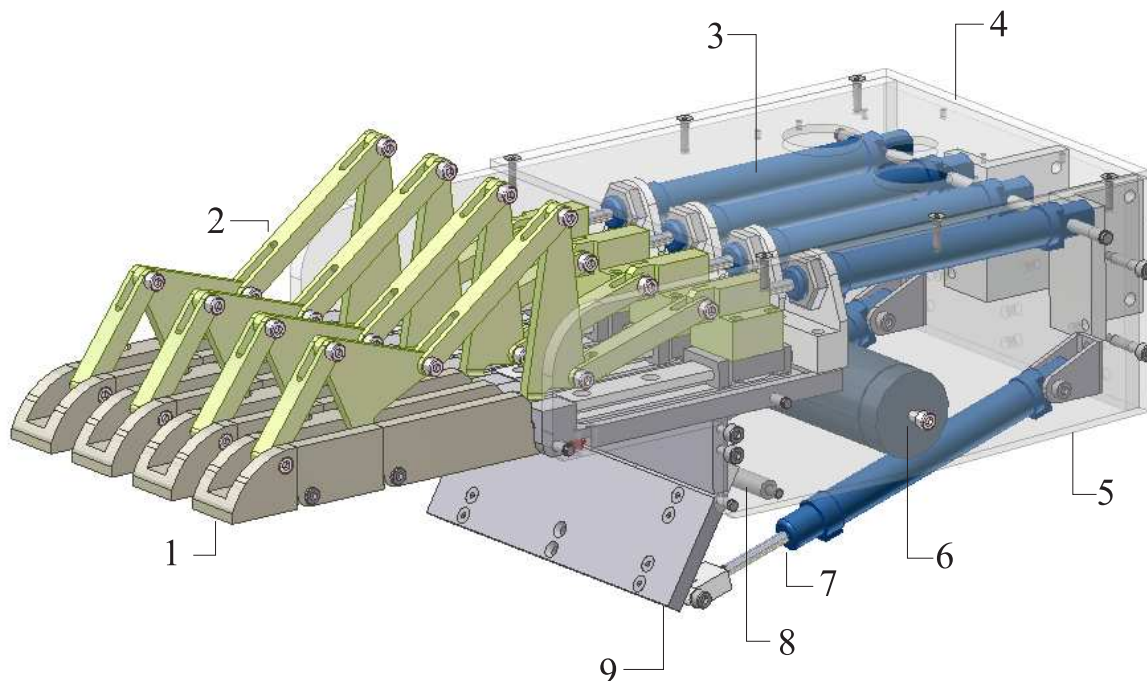


Fig. 4.36: Vista 3D della mano robotica; 1) dita, 2) meccanismo di trasmissione, 3) attuatori, 4) sistema di fissaggio, 5) piastre laterali, 6) serbatoio, 7) attuatore del pollice, 8) battuta meccanica, 9) pollice.

3), il supporto posteriore che permette di fissare la mano su vari sistemi 4), le piastre laterali di chiusura 5), il serbatoio pneumatico 6) che permette di uniformare la pressione nelle camere, uno dei due attuatori del pollice 7), la battuta meccanica 8) che serve per limitare la corsa del pollice ed infine il pollice stesso 9) realizzato in un unico pezzo.

La Fig.5.1 mostra il disegno 3D della struttura della mano robotica Ca.U.M.Ha. esplosa. La struttura della mano robotica è composta da tre piastre di alluminio opportunamente lavorate che racchiudono a loro interno tutti i componenti della mano.

Serbatoio

Al fine di distribuire la pressione nelle camere di spinta degli attuatori, è stato realizzato un serbatoio in acciaio all'interno del quale si controlla la pressione mediante un sensore della GS Sensor. Tale sensore ha il compito di rilevare sperimentalmente il valore della

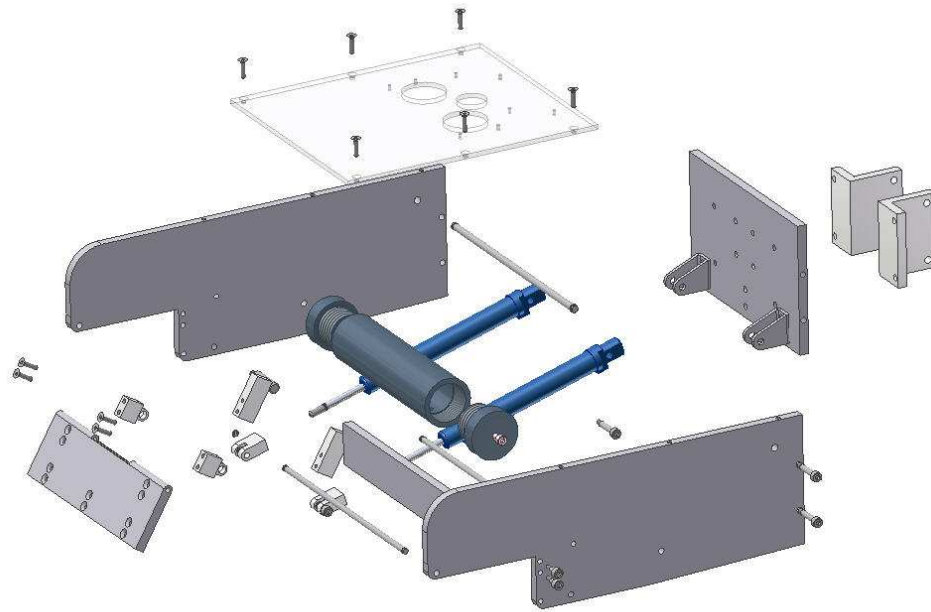


Fig. 4.37: Vista 3D esplosa della struttura della mano robotica.

pressione e di chiudere l'anello di controllo.

Sul serbatoio mostrato in Fig.4.38 sono presenti quattro fori in linea che hanno il compito di distribuire la pressione nelle quattro camere posteriori dei cilindri; e due fori posti in posizione centrale, il primo è connesso con la valvola di alimentazione, mentre il secondo è impegnato dal sensore. Inoltre, in Fig.4.38, è riportato lo schema del tappo utilizzato per chiudere le due estremità del serbatoio. Per integrare il serbatoio all'interno della mano robotica, sono stati realizzati due fori non passanti sui tappi, al fine di poter utilizzare il serbatoio come elemento portante della struttura della mano.

Pollice

La Fig.4.39 mostra il sistema di collegamento del pollice sulla struttura della mano. A differenza della mano umana, il pollice sviluppato per la Ca.U.M.Ha. ha solo una falange, poichè esso deve esercitare la sola azione di contrasto. L'attuazione è ottenuta mediante l'utilizzo di due cilindri vincolati direttamente alla piastra posteriore della mano. La po-

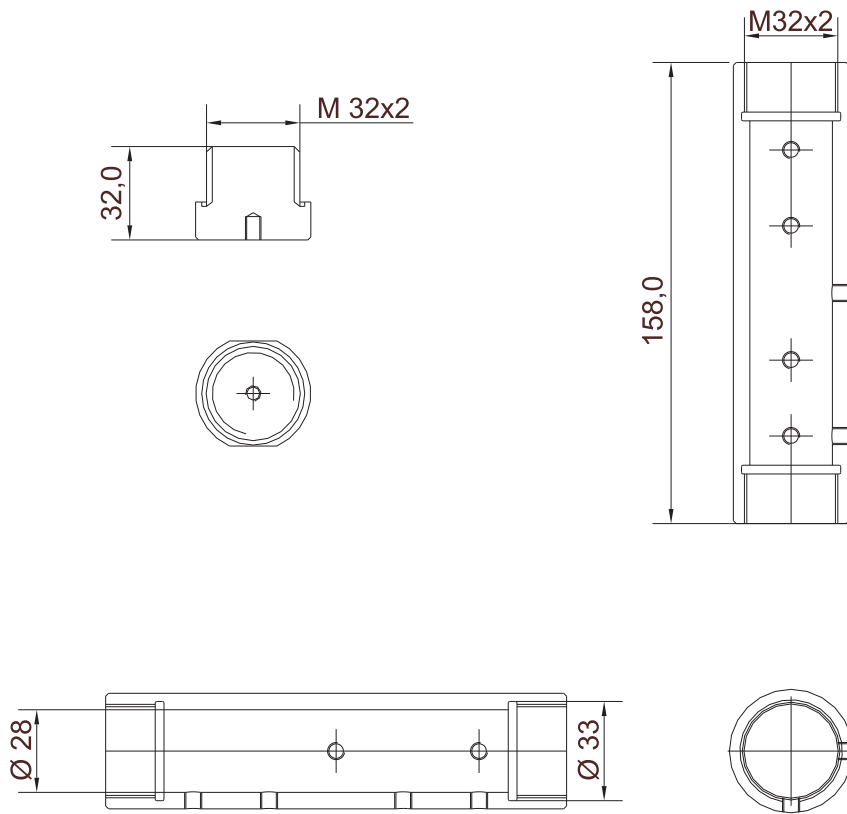


Fig. 4.38: Particolare del serbatoio e del tappo realizzato.

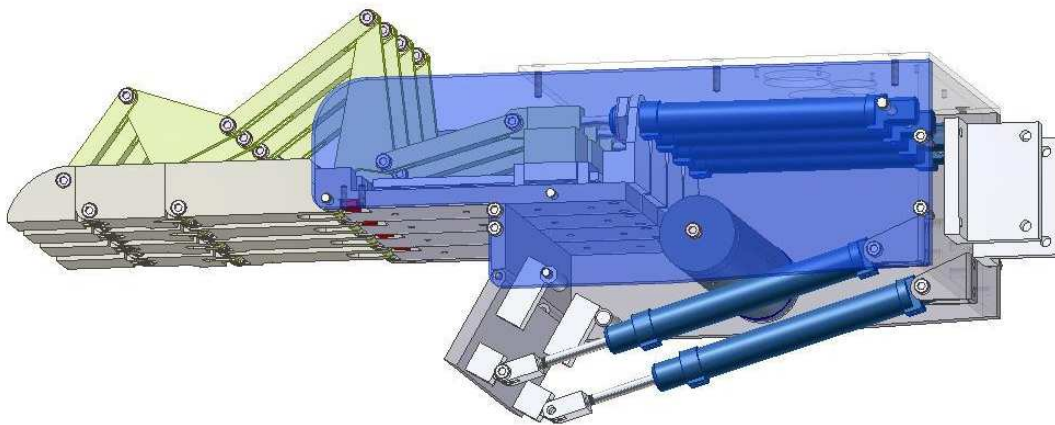


Fig. 4.39: Vista della collocazione del pollice.

sizione iniziale e la massima rotazione è ottenuta da battute meccaniche che garantiscono una rotazione massima del pollice pari a 30° .

4.5 Prototipi realizzati

Il progetto della mano robotica Ca.U.M.Ha. è stato sviluppato attraverso degli studi preliminari che hanno permesso di migliorare il progetto meccanico in modo da ridurre al minimo eventuali errori ed ottimizzare funzionalità e compattezza. In Fig.4.40 è riportato il primo prototipo realizzato in legno e plastica, il cui scopo è stato quello di fornire indicazioni di massima sulle dimensioni, gli ingombri e le caratteristiche complessive del meccanismo.

Successivamente, è stato realizzato un secondo prototipo, che è mostrato in Fig.4.41. Tale prototipo è stato realizzato completamente in legno e con un pollice opponibile costituito da due falangi. Il dito è stato attuato da un cilindro pneumatico, ed, in linea di massima, sono state fissate le dimensioni esterne delle tre falangi. La scelta dell'utilizzo di un pollice con due falangi, si è rilevato, molto interessante da un punto di vista della presa, dato che permetteva un miglior afferraggio dell'oggetto. D'altro canto però ciò avrebbe comportato l'utilizzo di quattro pistoni di attuazione per i quattro eventuali pollici, complicando notevolmente il sistema di attuazione. In alternativa si sarebbe potuto realizzare un unico pollice a due falangi opponibile alle quattro le dita. Alla fine, si è



Fig. 4.40: Primo prototipo realizzato.



Fig. 4.41: Secondo prototipo realizzato.

deciso di realizzare un pollice di contrasto in maniera semplificata, che si opponesse alle quattro le dita, ma senza creare interferenza meccanica. E' importante notare che data la versatilità del prototipo finale realizzato, è possibile modificare la forma e le dimensioni del pollice semplicemente sostituendo la falange, senza apportare modifiche al progetto complessivo.



Fig. 4.42: Terzo prototipo realizzato.

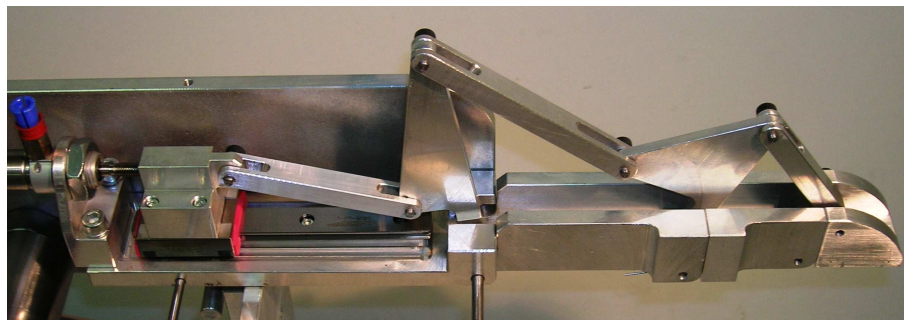


Fig. 4.43: Quarto prototipo del dito realizzato, versione definitiva.

Il terzo prototipo è stato realizzato in alluminio mediante lavorazioni con macchine a controllo numerico, come mostrato in Fig.4.42. Sono state testate le battute meccaniche e la sequenza di chiusura del meccanismo, in modo tale da ottimizzare le dimensioni delle molle torsionali. Attraverso alcune prove di presa, si è deciso di migliorare la trasmissione di forza dall'attuatore alle dita attraverso l'ottimizzazione dell'angolo di trasmissione, come descritto nei paragrafi precedenti. Ciò ha comportato però l'aumento della corsa dell'attuatore e quindi della dimensione della mano. L'aumento degli ingombri è accetta-

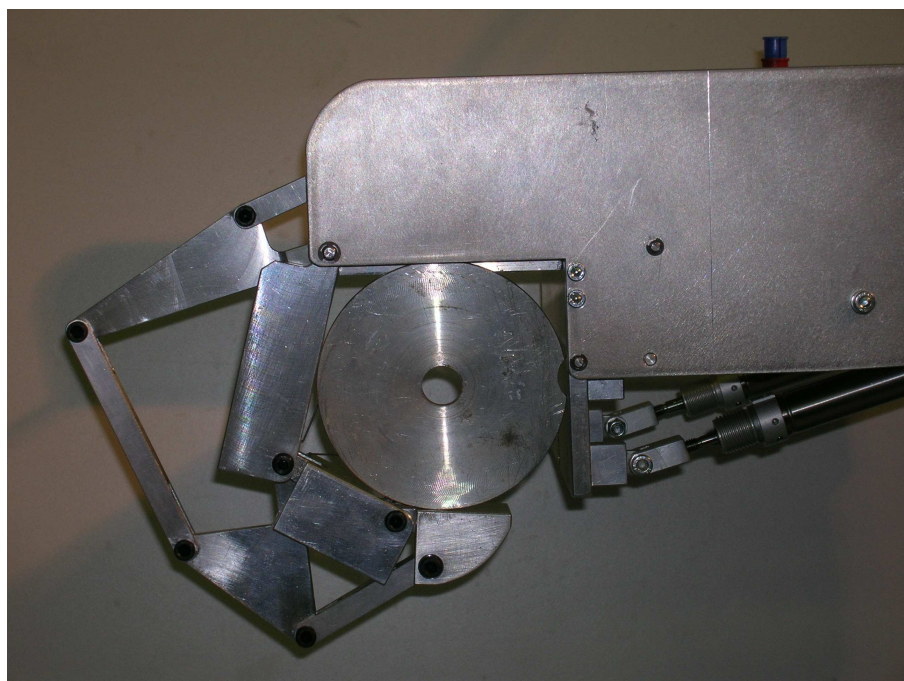


Fig. 4.44: Quarto prototipo del dito definitivo in una prova di presa.

bile dato che la capacità di presa è aumentata considerevolmente. Il quarto prototipo è stato infine realizzato sulla base dei prototipi realizzati in precedenza apportando continui miglioramenti ed ottimizzazioni. La Fig.4.43 mostra la quarta ed ultima versione del prototipo prima dell'anodizzazione. Infatti prima di procedere alla realizzazione delle altre tre dita, sono state condotte delle prove di presa per testare le modifiche apportate. La Fig.4.44 mostra uno dei test eseguiti mediante la presa di un disco di alluminio del diametro di 100 mm.

Cap. 5 Progetto del Sistema di Attuazione e Controllo

5.1 Introduzione

Il progetto mecatronico della mano robotica Ca.U.M.Ha. è basato sull'idea di realizzare una mano robotica robusta versatile ed a basso costo. In tale ottica è stato concepito e realizzato il sistema di azionamento e controllo. Infatti, la componentistica pneumatica adottata è interamente digitale, quindi a basso costo e gestita mediante segnali on-off, come mostrato in Fig.5.1. Quindi, la mano consta di sei attuatori pneumatici, quattro dei quali servono per azionare le dita, mentre i restanti due servono per gestire il pollice. Nei primi quattro cilindri, la camera posteriore è gestita mediante la tecnica PWM (Pulse-Width-Modulation), al fine di realizzare un controllo pressione, schematizzato in Fig.5.1a. Al contrario, la camera anteriore dei cilindri di attuazione delle dita è gestita mediante la valvola digitale V_3 . Infine, l'apertura e chiusura del pollice è operata mediante la valvola digitale V_4 .

5.2 Controllo pressione in PWM

La regolazione della pressione può essere realizzata creando un opportuno lay-out elettropneumatico per cui è possibile adottare diverse soluzioni. Nell'ottica di voler ottenere una regolazione della pressione di tipo alternativo a quella proporzionale e in più caratterizzata da costi di realizzazione molto bassi, la scelta della valvola di alimentazione è ricaduta su una coppia di valvole digitali 2/2 modulate. Tali valvole, munite di elettronica di controllo (modulatore e driver di potenza), riescono a modulare la portata di

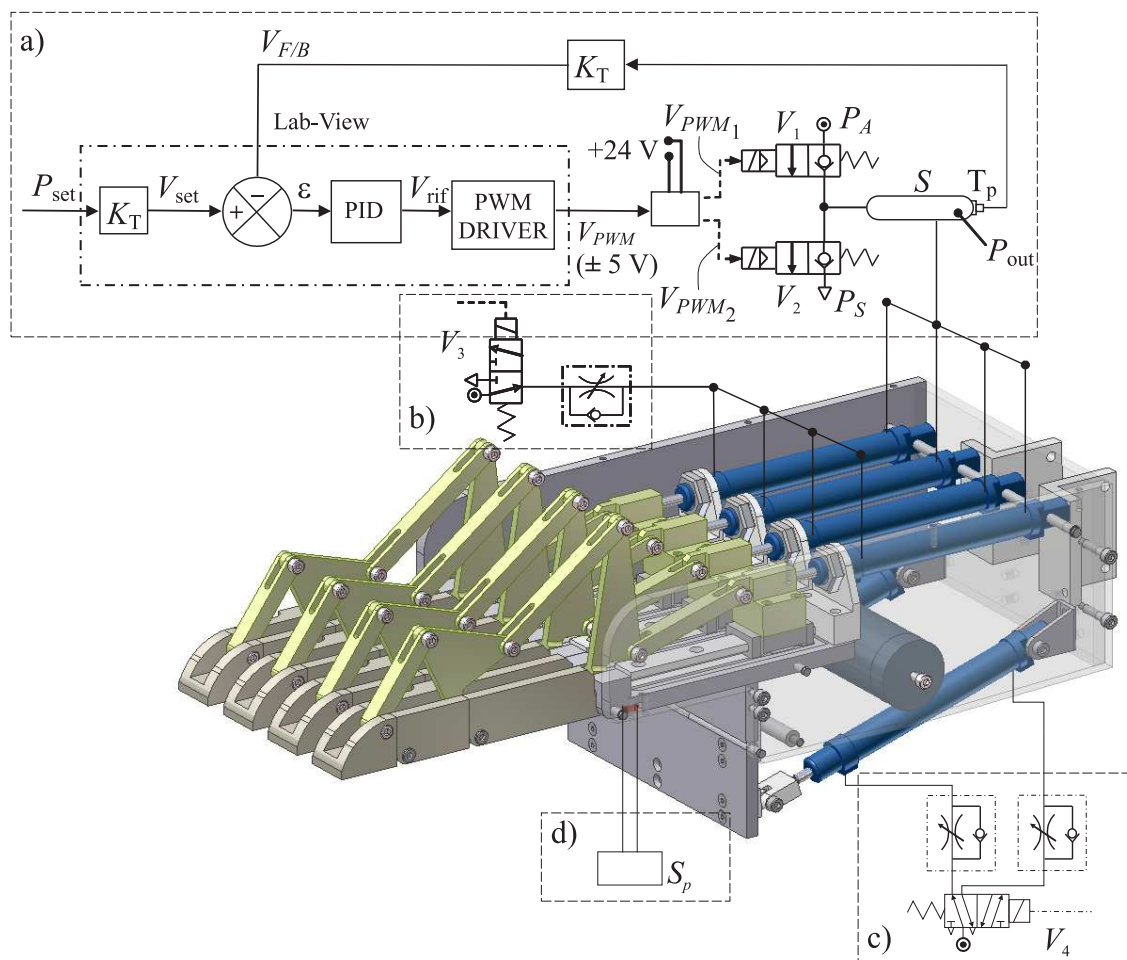


Fig. 5.1: Vista 3D della mano robotica con lo schema di controllo: a) controllo pressione con tecnica PWM; b) controllo pressione nella camera anteriore del cilindro; c) apertura e chiusura del pollice; d) gestione dei sensori di prossimità delle prime falangi

fluido transitante, attraverso la tecnica di modulazione PWM (Pulse-Width-Modulation), al fine di consentire, in uscita, una portata media variabile, che risulta equivalente ad una valvola proporzionale in flusso 3/2, come descritto in [Rea, 2002]. I vantaggi di tale scelta sono legati sostanzialmente al basso costo delle valvole digitali ed alla relativa semplicità dell'elettronica di controllo, il principale difetto è da imputare alla massima frequenza di lavoro, la quale assume valori abbastanza modesti facendo risultare tali valvole meno

performanti di quelle proporzionali.

In aggiunta, la gestione della forza di presa della mano è stata realizzata mediante un circuito di controllo della pressione presente nella camera di spinta dei quattro attuatori delle dita.

5.2.1 Tecnica di modulazione PWM

Attraverso l'utilizzo di appropriate tecniche di controllo, è possibile utilizzare componenti digitali economici in sostituzione dei tradizionali componenti proporzionali generalmente costosi. Semplici elettrovalvole digitali, infatti, possono controllare una portata quando il comando elettrico viene modulato, ad esempio, tramite la tecnica PWM (Pulse Width Modulation). La modulazione PWM è una tecnica che è solitamente utilizzata per il controllo di circuiti analogici attraverso degli output digitali. Essa trova impiego in una vasta gamma di applicazioni, che vanno dalla misura dei segnali (specie se ad alta frequenza), fino ai sistemi di regolazione delle velocità nei motori elettrici.

In generale, modulare una grandezza significa farne variare una delle sue caratteristiche secondo una legge prestabilita. Ad esempio, per un'onda sinusoidale, le grandezze caratteristiche sono: la frequenza, l'ampiezza e la fase, perciò si possono realizzare tre tipi di modulazioni diverse, [Benvenuto, 1984]:

- modulazione analogica;
- modulazione numerica;
- modulazione impulsiva.

I componenti pneumatici digitali hanno due sole posizioni di funzionamento, aperta e chiusa, questa caratteristica fa sì che, tra le tecniche di modulazione, quella che maggiormente si adatta a tale funzionamento è la modulazione impulsiva. Infatti, un'onda impulsiva è caratterizzata da un segnale compreso tra due livelli di tensione, che può essere associata agli stati logici di valvola chiusa e valvola aperta.

Nell'automazione pneumatica si è interessati a realizzare una regolazione continua della grandezza in esame. Ad ogni valore della grandezza, si associa un livello di tensione o corrente in maniera direttamente proporzionale, in modo da avere una variazione lineare da un minimo ad un massimo. Attraverso quest'operazione, si è trasformato un segnale generico, come pressione o portata, in un segnale elettrico, che rappresenta l'informazione da trasmettere, cioè quello che è definito segnale di riferimento.

In Fig.5.2 è possibile osservare lo schema di funzionamento di un modulatore. L'onda portante, che è costituita da un treno di impulsi costanti ed aventi tutti la stessa durata e la stessa frequenza, deve essere modulato affinché possa essere utilizzato come comando di una elettrovalvola digitale. Infatti, il modulatore ha il compito di far variare la durata degli impulsi dell'onda portante in maniera direttamente proporzionale all'ampiezza del segnale di riferimento.

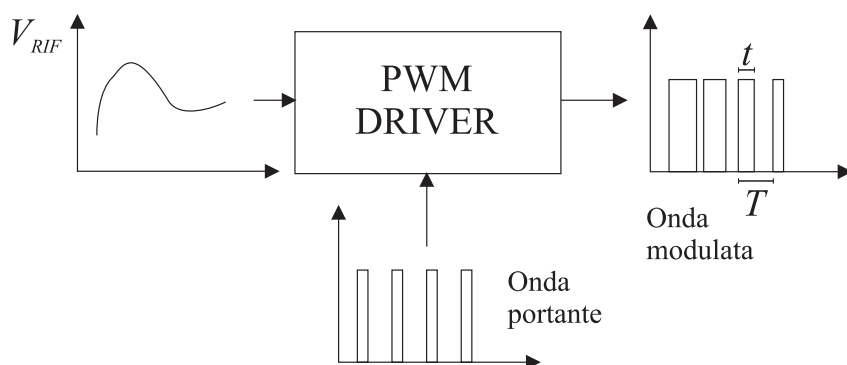


Fig. 5.2: Schema di funzionamento della modulazione PWM

Il risultato della modulazione PWM consiste nella generazione di un'onda impulsiva a frequenza costante e durata d'impulso variabile. L'elemento caratterizzante il duty-cycle, denominato in seguito *d.c.*, cioè il rapporto espresso in percentuale tra il tempo di durata del segnale t e il periodo di modulazione T , è dato dalla

$$d.c. = \frac{t}{T} 100 \quad (5.1)$$

La Fig.5.3 mostra un'onda modulata in PWM. Gli impulsi si ripetono con un periodo

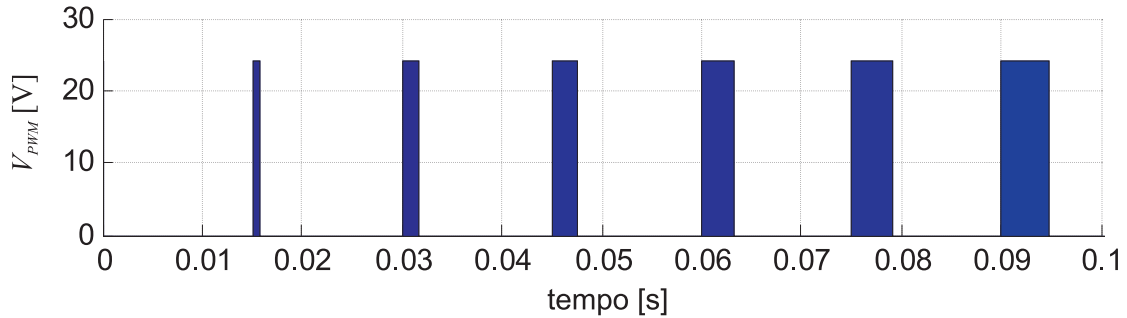


Fig. 5.3: Esempio di modulazione PWM.

di modulazione pari a $T = 15$ ms. La modulazione PWM consiste nel trasformare un segnale analogico di riferimento in uno digitale, e garantendo che l'informazione trasmessa sia equivalente all'originale. Questa trasformazione non può essere effettuata istante per istante, altrimenti si riprodurrebbe un segnale analogico senza che sia avvenuta la modulazione. Quindi il passaggio tra valore analogico ed il corrispettivo digitale è effettuato ad intervalli di tempo costanti T , che sono stabiliti a priori. La scelta del periodo T è fondamentale, deve essere sufficientemente piccolo in modo da cogliere le variazioni del segnale di riferimento in ingresso, ma non eccessivamente, poichè la valvola ha un periodo minimo di apertura e chiusura, al di sotto del quale non funziona.

La durata dell'impulso è direttamente proporzionale al valore del segnale di riferimento. Se in ingresso si ha una $V_{rif} = 0$, il tempo di apertura della valvola, che è rappresentato dalla durata dell'impulso, risulta pari a zero. Osservando la Fig.5.3 si nota che nel primo intervallo di $T = 15$ ms non c'è nessun impulso, quindi la valvola rimane chiusa per l'intero periodo. Al termine del primo periodo di modulazione il modulatore effettua un'acquisizione del segnale di riferimento. Se si è avuta variazione del segnale di riferimento, si noterà una variazioni del segnale impulsivo nel secondo periodo di modulazione, ossia nel periodo che va dall'istante $T = 15$ ms all'istante $T = 30$ ms. Dalla Fig.5.3, si nota la presenza di un segnale impulsivo il quale indica che il segnale di riferimento ha cambiato valore rispetto al precedente periodo di modulazione, in cui valeva

zero. All'aumentare del valore del segnale di riferimento, aumenta la durata dell'impulso, quindi, la valvola, che è comandata da quest'impulso, rimane aperta per un periodo sempre maggiore. Considerando i periodi di modulazione successivi, si nota che la durata dell'impulso è crescente, ossia che il valore del segnale di riferimento è in aumento. Un ulteriore aspetto da notare, è che il valore dei picchi dell'onda modulata è pari a 24 V DC, che corrisponde alla tensione di alimentazione di alcune elettrovalvole digitali, quindi questo segnale può essere utilizzato direttamente per azionare le elettrovalvole.

5.2.2 Il PWM applicato alle valvole digitali

Nel seguito, al fine di analizzare il funzionamento della tecnica PWM applicata alle valvole digitali pneumatiche, si riporta un esempio che prevede l'utilizzo di due valvole 2/2 montate in configurazione detta *incrociata*. Quando tali valvole sono opportunamente modulate in PWM, è possibile ottenere un funzionamento che approssima quello di una valvola proporzionale in flusso a tre vie. Lo schema di Fig.5.4 mostra lo schema circuitale.

In particolare, la valvola V_1 è collegata all'alimentazione e permette il passaggio della portata Q , mentre la valvola V_2 ha la funzione di scaricare la portata in eccesso rispetto al segnale di comando. Ad esempio, se in ingresso si ha un segnale di comando in tensione variabile nell'intervallo ± 10 V, ossia proporzionale al valore di portata che si desidera ottenere, al valore +10 V corrisponde il massimo della portata in alimentazione, (ossia valvola V_1 aperta e valvola V_2 chiusa). Viceversa, al valore -10 V corrisponde il massimo della portata in scarico, ossia la valvola V_1 e V_2 aperta. Se il valore della V_{rif} è compreso all'interno dell'intervallo ± 10 V le valvole sono modulate mediante la tecnica PWM. Il modulatore PWM ha una funzione caratteristica lineare, com'è mostrato in Fig.5.5, ossia il legame esistente tra la V_{rif} ed il rapporto t/T è di diretta proporzionalità.

Ad esempio, scelto un valore $V_{rif}=6$ V, ad esso corrisponderà un valore $t/T = 0,6$, che sta a significare che la valvola V_1 rimarrà aperta per un tempo pari al 60 %, del periodo di modulazione assunto. In questo modo la portata transitante complessiva che attraversa

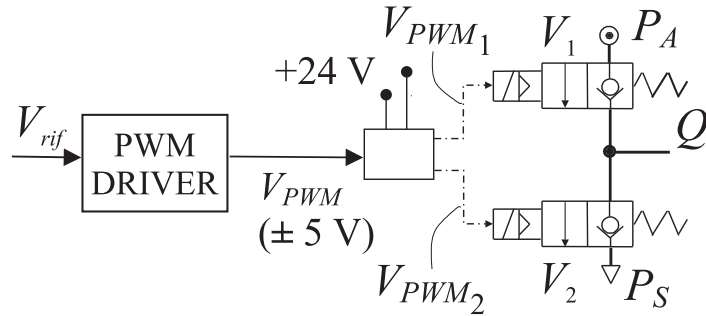


Fig. 5.4: Schema di valvole digitali azionate da un driver PWM.

la valvola è pari al 60%, di quella massima. Nel caso in cui il valore di V_{rif} sia pari a -6 V, il valore t/T corrispondente è pari allo -0,6%, ossia attraverso la valvola V_2 e transiterà aria per un tempo pari al 60%.

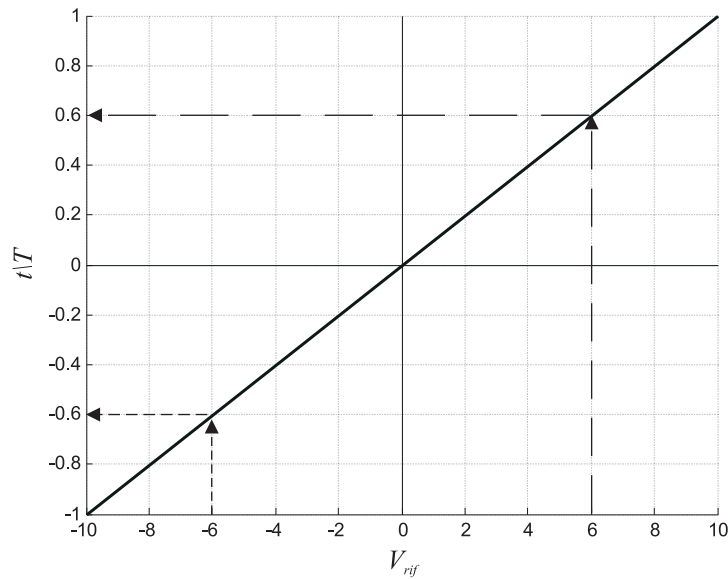


Fig. 5.5: Caratteristica del PWM Driver.

Le curve di portata in Fig.5.6 permettono di osservare come al variare della tensione di riferimento si abbia una variazione della portata transitante. Il grafico non è simmetrico rispetto all'asse delle ascisse, perché cambiano le condizioni di funzionamento della valvola. Nella parte superiore, la pressione di monte è costante, mentre quella di valle varia. Nel caso in cui l'aria attraversi la valvola V_2 , si considera che la portata sia negativa, e si ha

precisamente l'opposto, quindi la pressione di valle è costante, mentre quella di monte varia al passaggio del fluido.

La possibilità di ottenere valori diversi di portata da una valvola on/off, è legata al tipo di azionamento che si sta effettuando. Operando una modulazione del tempo di apertura, si ottiene una variazione della portata transitante complessiva, ossia si ha, secondo la curva considerata, una valvola con una dimensione effettiva della luce di passaggio crescente al crescere della tensione di riferimento.

Dalla formula di Cetop in condizioni soniche

$$Q_s = CP_m K_t \quad (5.2)$$

si evince che la pressione di monte P_m , in questo esempio è costante e pari a 7 bar, mentre il fattore correttivo della temperatura K_t è scelto in prima approssimazione unitario. La variazione di portata sonica Q_s fa variare la conduttanza interna C della valvola, quindi è come avere una valvola proporzionale in flusso.

In Fig. 5.4 è mostrato un sistema elettropneumatico in cui si ha un ingresso rappresentato da un livello di tensione V_{rif} ed un'uscita costituita dalla portata Q . Affinché il sistema sia utile per applicazioni industriali, il legame tra le due grandezze dovrebbe essere di tipo lineare. Il livello di tensione è elaborato dalla scheda di modulazione PWM che a sua volta opera una trasformazione di tipo lineare tra tensione e *d.c.*, come illustrato in Fig.5.7. Il diverso valore del tempo d'apertura della valvola permette di associare in condizioni ideali un legame caratteristico lineare anche tra il *d.c.* e il valore di portata transitante. Operando in questo modo si può ottenere un legame di diretta proporzionalità tra la tensione di riferimento e la portata in uscita. Il grafico di Fig.5.6 non è simmetrico rispetto all'asse delle ascisse, ciò comporta che in condizioni reali la retta di Fig.5.7, compresa nel quadrante con V_{rif} e le Q negative, dovrebbe avere una pendenza maggiore, ma sempre lineare.

Per descrivere il funzionamento di un modulatore PWM, si evidenziano tutti i passaggi

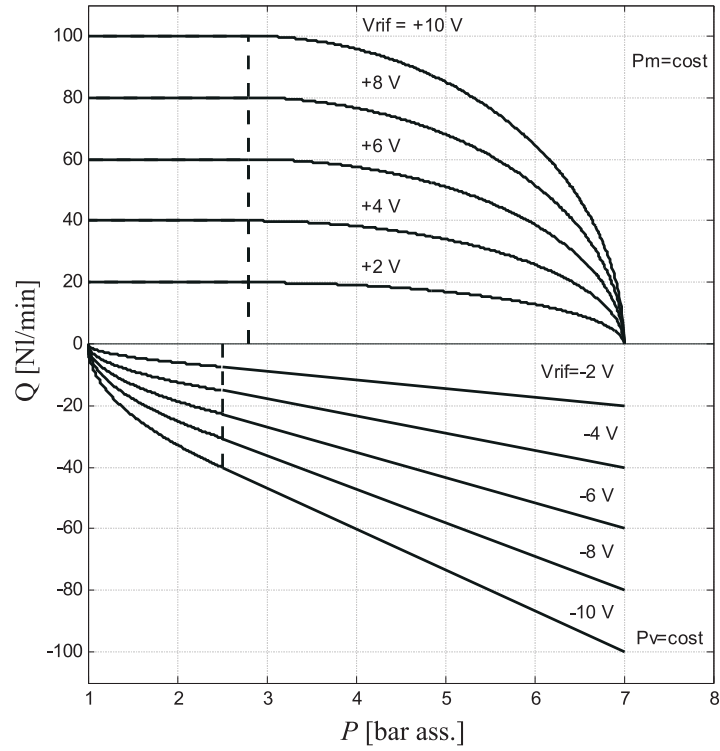


Fig. 5.6: Andamento della portata per differenti valori di V_{rif} .

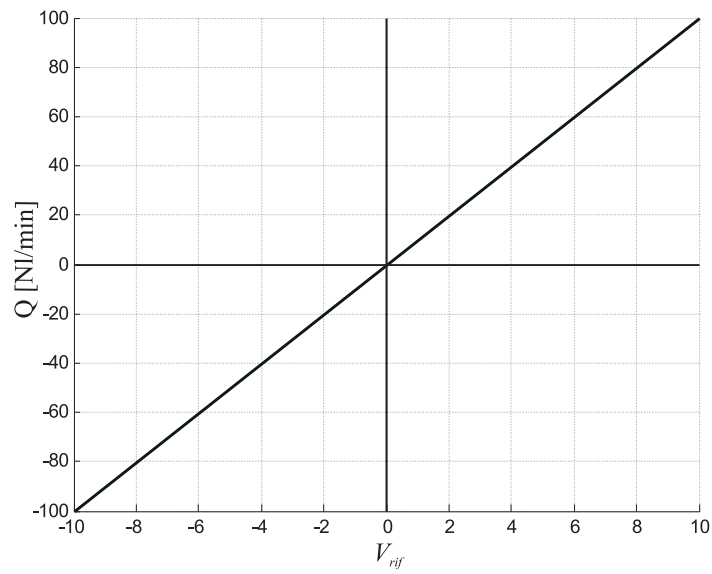


Fig. 5.7: Legame tra la tensione di riferimento V_{rif} e la portata Q , nel caso ideale

che si effettuano per arrivare ad avere un legame tra la V_{rif} e la portata Q transitante nel sistema.

In un funzionamento reale, la tensione di riferimento varia in continuazione, quindi è interessante studiare il comportamento dell'onda sinusoidale mostrata in Fig.5.8. La variazione del segnale di riferimento fa sì che il PWM driver agisca sull'onda portante variandone in continuazione la durata del segnale t , al fine di riprodurre in uscita le variazioni del segnale in ingresso. Se il valore della V_{rif} è pari a zero, allora il *d.c.* corrisponde a zero; ma quando il segnale ha valore 6 V come in Fig.5.8a), il valore del *d.c.* è pari al 60%, del periodo di modulazione T , come mostrato in Fig.5.8b). In tutti i casi in cui il valore è compreso tra il minimo ed il massimo, la variazione del duty-cycle è lineare, come del resto è mostrato in Fig.5.7. Aumentando il tempo d'apertura della valvola, ovviamente aumenta la portata transitante, in questo modo si riesce ad approssimare in maniera soddisfacente lo stesso andamento della tensione di riferimento in ingresso. Le portate istantanee Q_i , mostrate in Fig.5.8c), sono ripartite sul periodo di modulazione T in maniera da ottenere una portata media. Il valore di portata transitante all'interno della valvola dipende dalle condizioni di pressione che si hanno tra monte e valle. In Fig.5.8, infatti, è mostrato l'andamento delle portate al variare delle condizioni di pressione e di segnale di riferimento. Per realizzare le simulazioni del funzionamento della modulazione in ambiente MatLab, si è presa a riferimento la condizione in cui la pressione di valle sia quella sonica massima, considerando quindi di operare in condizioni di pressione di valle pari a 1 bar ass.

La Fig.5.8d) mostra l'andamento equivalente delle portate ripartite nel tempo. Come si può notare, si è ottenuta una curva sinusoidale che approssima in maniera discreta la variazione del segnale in ingresso. Nell'ultimo grafico citato, si nota un caratteristico andamento a gradino della portata transitante che è legato al periodo di modulazione fissato. Se si volesse migliorare l'andamento del profilo esterno delle portate rendendolo più graduale, bisognerebbe ridurre il periodo di modulazione fino a portarlo al minimo

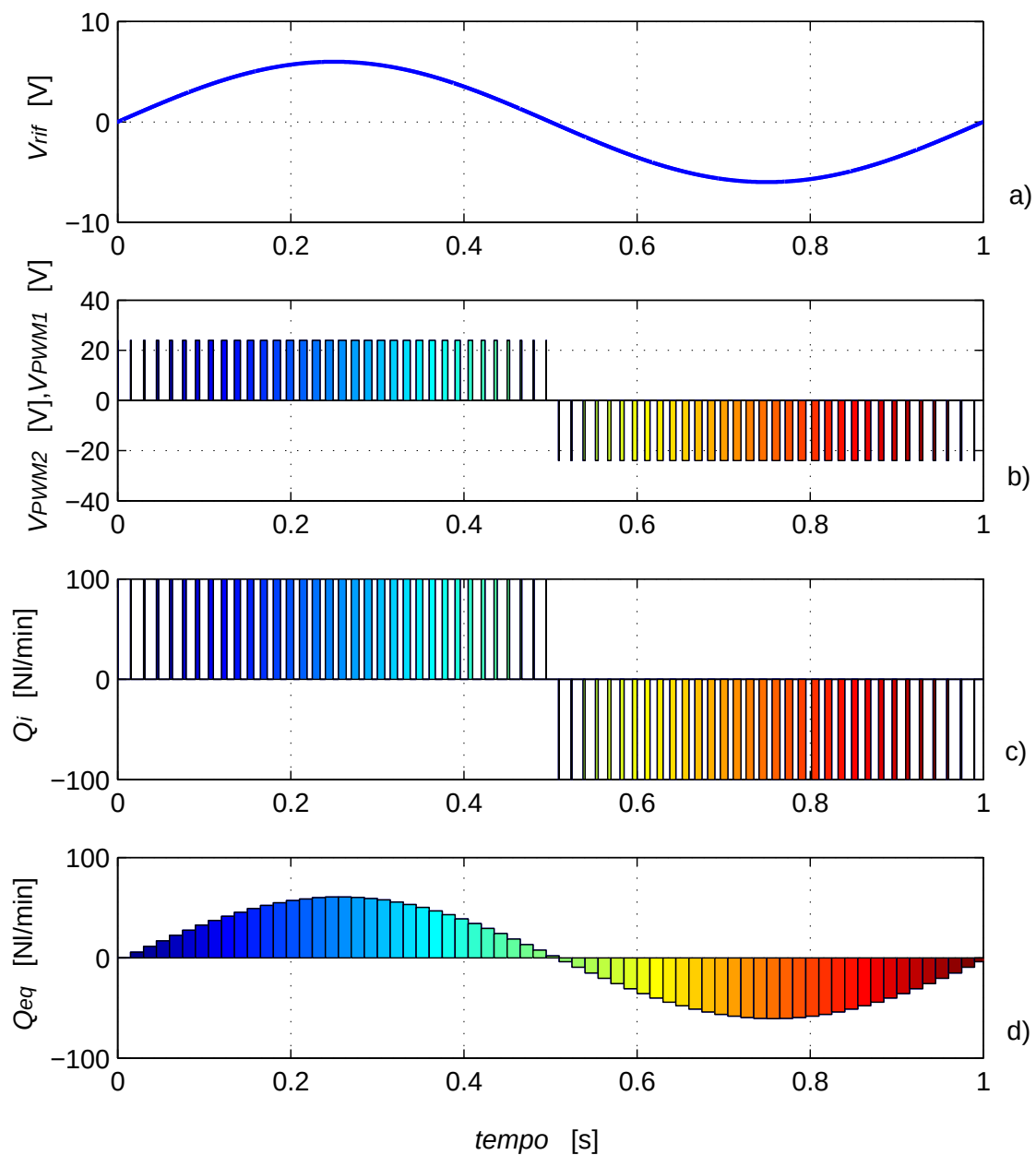


Fig. 5.8: Esempio di modulazione PWM: a) segnale di comando V_{rif} sinusoidale; b) segnale di comando delle valvole V_1 e V_2 ; c) andamento della portata istantanea; d) andamento della portata equivalente transiente nelle valvole

valore possibile. Tale limite è ovviamente legato alla condizione di funzionamento della valvola, avendo ognuna una frequenza massima di azionamento. Ne consegue che un buon progetto meccatronico del sistema interno di apertura della valvola e un valore di portata alto, sono gli elementi determinanti per scegliere un componente elettropneumatico per applicazioni in cui si preveda la modulazione del tempo di apertura. In Fig.5.5 è stato riportato il legame esistente tra la tensione di riferimento ed il rapporto t/T che ha un andamento lineare, in realtà però ciò è vero solo nel caso ideale, poiché se si considerano tempi di azionamento dell'ordine dei millesimi di secondo, si può non avere passaggio di fluido poiché la dinamica più o meno lenta del componente non lo permette. Questa zona è definita banda morta in virtù della mancanza di risposta. Il tempo di risposta determina quindi la percentuale di utilizzo del *d.c.*, ossia tempi di risposta brevi consentono di utilizzare praticamente tutto il campo di valori, mentre tempi di risposta lunghi, a parità di periodo di modulazione, consentono l'utilizzo di un campo di valori ristretto. Quindi, ne deriva, una maggior capacità di modulazione e una maggior precisione e velocità di intervento. Nel caso in cui l'intervallo di chiusura della valvola sia molto piccolo si verifica la situazione opposta, ossia la valvola rimane aperta e questa condizione è detta di saturazione.

5.2.3 Regolazione della pressione con il PWM

Applicando il sistema descritto nel paragrafo precedente nel lay-out di Fig.5.1a) si può ottenere il controllo della pressione nel serbatoio in anello chiuso, come mostrato in Fig.5.9 Conseguentemente dato, che le camere posteriori degli attuatori sono collegate al serbatoio, si ottiene il controllo della forza di attuazione delle dita.

L'obiettivo di un'azione di regolazione può essere definito come quello di portare un sistema a comportarsi in un modo desiderato, sulla base delle misure del suo stato attuale ed agendo in modo opportuno, [Veronesi, 2006]. Il sistema di regolazione ad anello chiuso (closed-loop), mostrato in Fig.5.9, è caratterizzato da un segnale di retroazione o feedback

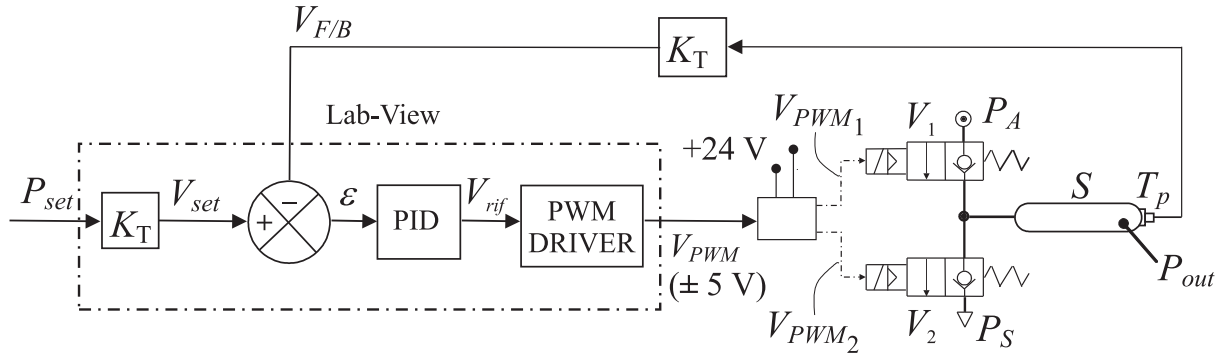


Fig. 5.9: Schema del circuito elettro-pneumatico per il controllo pressione in anello chiuso del serbatoio S .

ottenuto grazie alla presenza del trasduttore T_p . Questo misura la grandezza regolata P_{out} ed invia un segnale elettrico proporzionale al controllore, che confronta il segnale in ingresso con quello di retroazione $V_{F/B}$ e varia l'uscita in modo da minimizzare o annullare eventuali differenze. Lo scopo di un buon sistema di controllo è infatti quello di portare a zero l'errore a regime, malgrado l'influenza di eventuali disturbi, e di ottenere questo risultato nel minor tempo possibile.

La pressione P_{out} nel serbatoio S è controllata mediante le due valvole digitali V_1 e V_2 , le quali sono connesse rispettivamente alla pressione di alimentazione P_A ed alla pressione atmosferica P_S .

Le due valvole digitali approssimano il funzionamento di una valvola a tre-vie proporzionale in flusso, in modo da avere la regolazione della pressione nel serbatoio.

Tali valvole sono controllate da due tensioni V_{PWM1} e V_{PWM2} , le quali sono modulate in PWM a 24 V, in modo da alimentare direttamente le due valvole. Questi segnali ad onda quadra sono forniti dalla scheda elettronica realizzata appositamente per elaborare il segnale V_{PWM} . Infatti il segnale in tensione V_{PWM} che è generato via software, è compreso nel range ± 5 V. Pertanto esso deve essere separato in due segnali positivi ed amplificati nel campo $[0; + 24]$ V. Il segnale di retroazione è fornito dal trasduttore di pressione

montato direttamente sul serbatoio. Attraverso l'utilizzo del software LabView si effettua la chiusura dell'anello di retroazione mediante l'inserimento di un nodo sommatore che calcola la differenza tra il valore attuale della pressione e quello desiderato e genera un segnale di errore ε che è inviato al regolatore PID (proporzionale, integrativo e derivativo). Il blocco PID genera una tensione di riferimento V_{rif} che è elaborata dal modulatore PWM software. I segnali di controllo sono scambiati dal PC al banco sperimentale attraverso due schede elettroniche della National Instruments, la prima è installata a bordo del PC (PCI 6052-E), mentre la seconda è esterna (SCB-68).

5.2.4 Banco prova sperimentale

Il banco prova sperimentale per il controllo pressione in anello chiuso è stato realizzato in accordo con lo schema mostrato in Fig.5.9. In particolare, con riferimento alla Fig.5.10 il banco prova è composto da due valvole pneumatiche digitali 1) e 2) dell' SMC, modello VQ21A1-5Y0-C6-F-Q, un serbatoio 3) della Festo di 0.4 litri, un trasduttore di pressione 4) della GS Sensor, modello XPM5-10G, ed il suo sistema di condizionamento di segnale 5), un alimentatore 6), stabilizzato a 24 V, una scheda della National Instruments 7), modello SCB-68, ed una scheda elettronica 8) realizzata opportunamente per gestire le due valvole.

Il circuito elettronico riportato in Fig.5.11 permette di separare i segnali e di amplificarli nel campo di lavoro delle due valvole digitali. Infatti, in ingresso si ha un solo segnale V_{PWM} compreso nel campo ± 5 V, proveniente dalla scheda SCB-68, mentre in uscita si hanno i due segnali V_{PWM1} e V_{PWM2} entrambi nel range $[0, +24$ V]. Il circuito è composto da un fotodiodo FD , tre resistenze elettriche identiche R_1 , un mosfet M e un diodo D .

Descrizione della valvola SMC VQ21A1-5Y0-C6-F-Q

Nei sistemi pneumatici si utilizzano comunemente controlli di tipo digitale mediante elettrovalvole on/off, per la loro semplicità ed il basso costo, anziché un controllo analogico

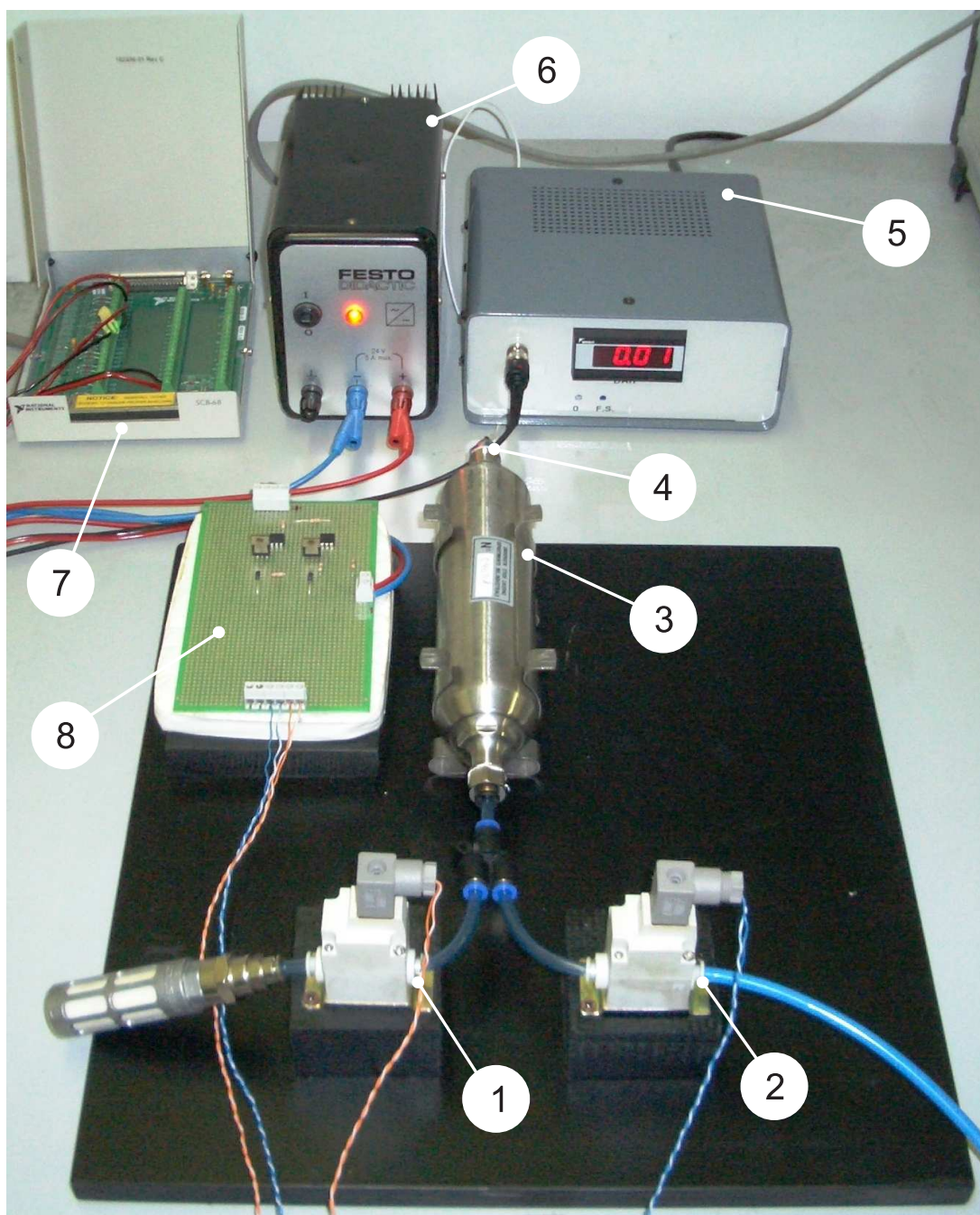


Fig. 5.10: Foto del banco prova realizzato per il controllo pressione: 1) valvola in scarico; 2) valvola in carico; 3) serbatoio; 4) trasduttore di pressione; 5) sistema di condizionamento; 6) alimentatore 7) scheda SCB-68 8) scheda elettronica realizzata appositamente.

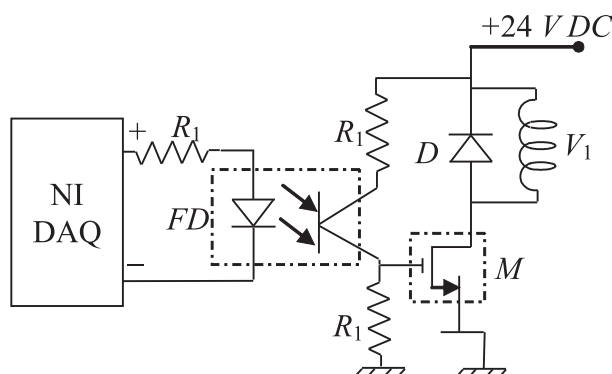


Fig. 5.11: Schema elettrico del circuito realizzato

mediante l'utilizzo di più complesse e costose valvole proporzionali. Le elettrovalvole digitali sono dispositivi semplici con due stadi di funzionamento: il passaggio di fluido è attivato mediante un segnale di comando elettrico che agisce sulla bobina di azionamento facendo muovere un otturatore, che a sua volta apre una luce di passaggio dell'aria. La valvola è aperta solo per la durata del segnale d'ingresso. Infatti, la forza magnetica agente sull'otturatore è in genere contrastata da una molla di richiamo che fa chiudere la luce di passaggio.

La Fig.5.12 mostra il simbolo grafico della valvola SMC. Si tratta di una valvola 2/2 unistabile, normalmente chiusa, con servopilotaggio pneumatico dell'azionamento elettrico. La soluzione costruttiva interna impedisce che si abbia un ritorno d'aria dall'utenza all'alimentazione nel caso in cui la pressione di quest'ultima diminuisca.

La presenza del servopilotaggio fa sì che in fase di apertura si sfrutti l'azione della

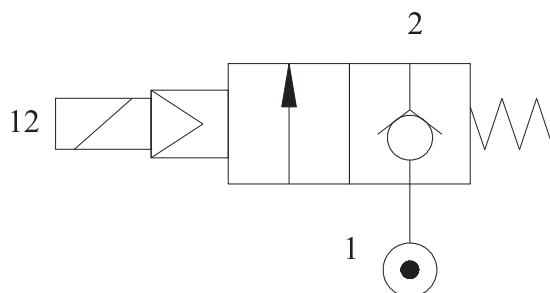


Fig. 5.12: Simbolo pneumatico della valvola SMC

pressione di alimentazione per migliorare le caratteristiche dinamiche.

In Fig.5.13 si può osservare la sezione esplosa della valvola SMC, che mette in evidenza le soluzioni costruttive adottate. Il corpo valvola 1) è stato realizzato con un procedimento di stampo di materiale plastico; la sua forma è interessante da un punto di vista costruttivo per gli innumerevoli accorgimenti adottati, che permettono di avere prestazioni dinamiche complessive al di sopra della media. Sulle bocche di ingresso e di uscita, evidenziate con le frecce, sono inseriti degli innesti a pressione che permettono un aggancio di tipo rapido al tubo di aria compressa. Nella parte superiore dell'inizio del condotto di uscita sono state realizzate quattro scanalature disposte in maniera radiale, che hanno il compito di favorire il passaggio di aria in fase di apertura della valvola. Per diminuire il peso complessivo in tutte le zone non indispensabili al funzionamento, sono state create delle cavità che hanno permesso un notevole risparmio di materiale.

Nella parte centrale del corpo valvola è stata creata una camera che consente di collegare la bocca di alimentazione con quella di uscita. La membrana 2) è realizzata in gomma ed ha la funzione di creare una camera per avere il pilotaggio del segnale di comando. L'aria, dopo aver riempito la camera inferiore, passando attraverso un piccolo orifizio presente nella membrana, alimenta anche la parte superiore. La fuoriuscita dell'aria dalla servocamera si ottiene attraverso l'otturatore in plastica 3), il quale ha anch'esso sulla parte superiore quattro scanalature che migliorano la fuoriuscita del fluido in fase di apertura. La bobina 10) è stata realizzata avvolgendo le spire di rame intorno ad un supporto cilindrico in materiale plastico 8), dal quale escono i terminali per il collegamento elettrico che sono connessi ad una scheda Speed-Up di controllo interna, dalla quale fuoriescono i cavi dell'alimentazione. All'interno della cavità della bobina è stato collocato un nucleo ferromagnetico 9) di forma cilindrica, che nella parte bassa ha una cavità che consente all'otturatore 5) di andare a battuta. Per poter chiudere il circuito magnetico, la bobina è stata inserita in un involucro metallico 7), poggiato su una piastrina in maniera tale da completare il circuito. La parte elettrica così assemblata è agganciata sul supporto mem-

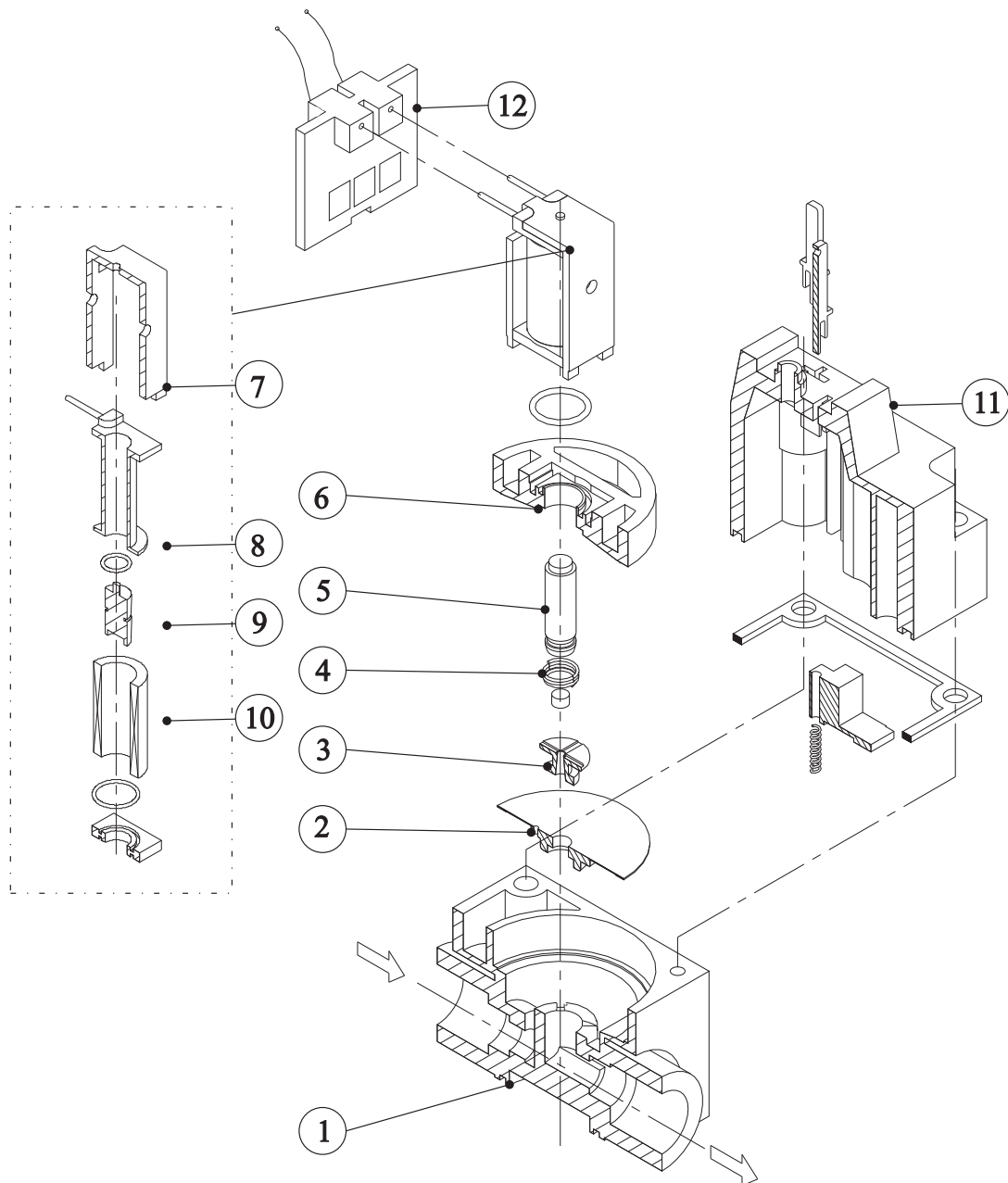


Fig. 5.13: Spaccato assonometrico della valvola SMC: 1) corpo valvola; 2) membrana; 3) otturatore principale; 4) molla; 5) otturatore secondario; 6) supporto membrana; 7) circuito magnetico; 8) supporto bobina; 9) nucleo; 10) bobina; 11) coperchio valvola; 12) circuito di Speed-Up

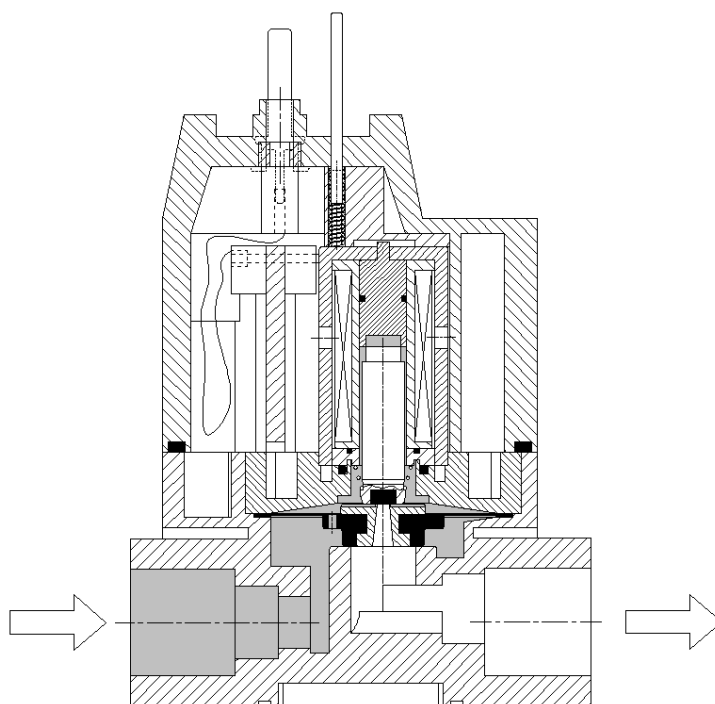


Fig. 5.14: Sezione della valvola dell'SMC chiusa.

brana 6) ed inserita all'interno del corpo valvola in modo da vincolare in maniera stabile la membrana alle pareti interne della camera. Per assorbire gli urti in fase di chiusura della valvola, è stata inserita una guarnizione in gomma sulla parte terminale dell'otturatore 5), il quale scorre all'interno del supporto bobina che realizza una camera cilindrica di scorrimento. La Fig.5.14 mostra che il fluido proveniente dall'alimentazione, riempie la camera superiore passando attraverso l'orifizio presente nella membrana, creando un equilibrio di pressioni tra le superfici superiore ed inferiore.

L'eccitazione della bobina provoca una forza magnetica che spinge l'otturatore verso l'alto causando la fuoriuscita di fluido dalla camera superiore attraverso l'ugello dell'otturatore principale. A questo punto la differenza di pressione tra la superficie superiore e quella inferiore, fa sì che la membrana sia spinta verso l'alto in modo tale da aprire la luce di passaggio maggiorata, Fig.5.15. Grazie a questo sistema si può avere una valvola con tempi di risposta molto bassi, dato che l'otturatore che viene mosso è di dimensioni esigue.

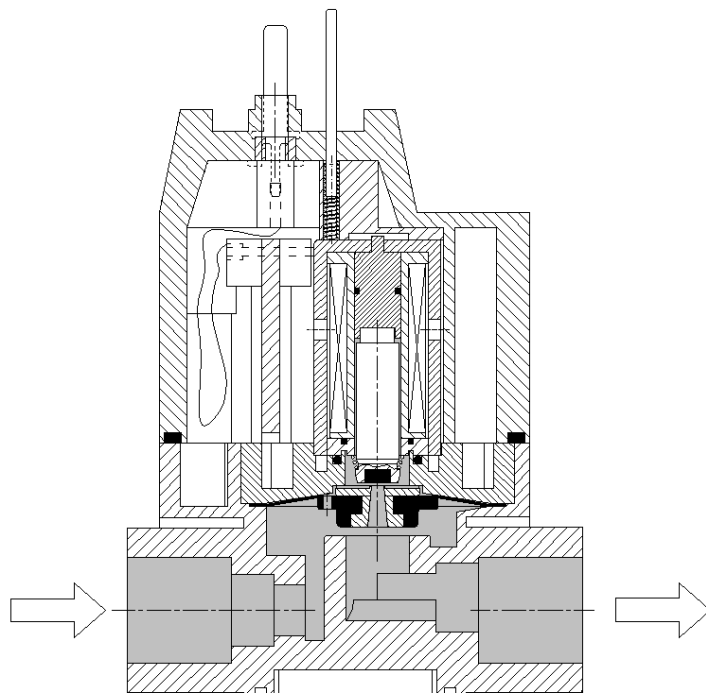


Fig. 5.15: Sezione della valvola dell'SMC aperta.

Inoltre, si hanno buone portate legate all'aumento della luce di passaggio del fluido.

5.3 Stumento virtuale di controllo sviluppato in ambiente Lab-View

In Fig.5.16 è riportato lo schema elettro-pneumatico del circuito complessivo gestito con il LabView. Sostanzialmente, i circuiti sono due, il primo è dedicato alla gestione delle dita, mentre il secondo gestisce l'azionamento del pollice. E' importante notare che in figura Fig.5.16, per quanto concerne lo schema di gestione delle dita, sono riportati i quattro attuatori collegati allo stesso serbatoio ed i quattro switch di prossimità collegati in serie. Il Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Work bench), è un software prodotto dalla National Instruments. Si tratta sostanzialmente di un linguaggio di programmazione grafica che utilizza icone invece di linee di testo per creare applicazioni. A differenza dei linguaggi di programmazione classici, testuali, in cui le istruzioni determi-

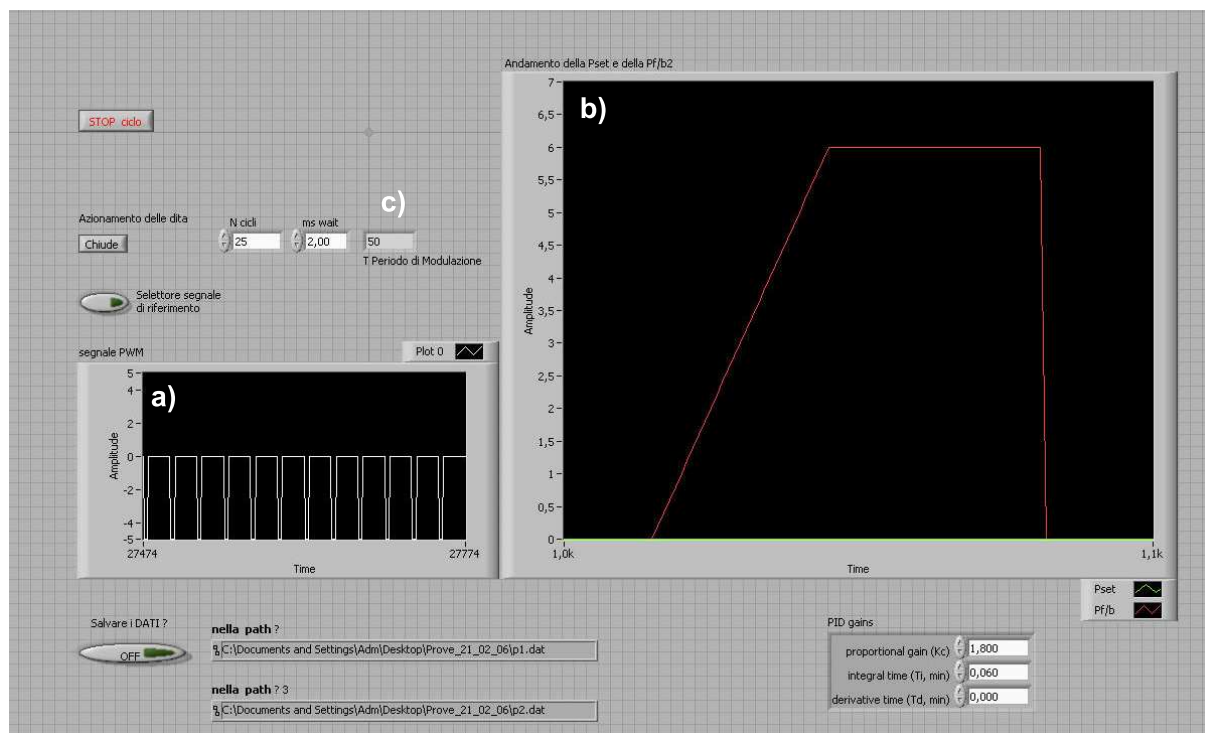


Fig. 5.17: Pannello frontale del Labview realizzato per la gestione della mano: a) segnale PWM inviato alla mano; b) diagramma della pressione P_{set} ; c) indicatore del periodo di modulazione.

mato grafico) che controlla gli oggetti nel pannello frontale attraverso la rappresentazione grafica delle funzioni. Gli stessi oggetti infatti, appaiono come terminali sul diagramma a blocchi. Gli oggetti invece presenti sullo schema a blocchi comprendono terminali, subVI, funzioni, costanti, strutture e collegamenti che trasferiscono i dati tra gli oggetti stessi. Con il LabView si riesce a gestire interamente l'elettronica installata a bordo della mano Ca.U.M.Ha. così da farle compiere le operazioni di presa.

Il programma è stato realizzato in tre blocchi fondamentali:

- controllo pressione in PWM delle camere posteriori dei cilindri delle dita, come evidenziato in [Figliolini e Rea, 2004];
- apertura e chiusura della valvola V_3 per il riempimento delle camere anteriori;

- apertura e chiusura del pollice mediante la valvola V_4 .

Relativamente al controllo della pressione nel serbatoio e quindi indirettamente nelle camere degli attuatori, le operazioni realizzate mediante il LabView possono essere classificate nel seguente modo:

- acquisizione contemporanea dello stato del sistema mediante la lettura della pressione del serbatoio e della pressione desiderata;
- correzione dell'errore mediante il PID;
- digitalizzazione dell'errore mediante la generazione del segnale di comando PWM;
- invio del segnale di comando alle valvole V_1 e V_2 .

5.3.1 Verifica del modulatore PWM virtuale

La modulazione del segnale V_{rif} in V_{PWM} , è stata ottenuta attraverso l'utilizzo di uno strumento virtuale (VI), ossia realizzando un modulatore PWM virtuale in ambiente Labview. Il modulatore PWM realizzato interamente via software, rappresenta uno dei tre blocchi principali del VI, che effettua l'acquisizione dei segnali dal banco prova e la regolazione in anello chiuso della pressione del servosistema. Data la necessità di effettuarne una validazione sperimentale, si è pensato di utilizzare uno strumento virtuale dedicato, ossia di realizzare il programma denominato Verifica-PWM.vi. In particolare è stato estratto il modulatore PWM dal programma generale, al fine di osservare separatamente l'andamento del segnale modulato V_{PWM} e del segnale in ingresso V_{SET} .

In Fig.5.19 è possibile osservare il diagramma a blocchi del programma che è stato realizzato, mentre nella Fig.5.20 è visibile il relativo pannello di controllo su cui si possono impostare le grandezze caratteristiche della modulazione. Per generare il segnale di tensione in ingresso è stato utilizzato un generatore di tensione analogico (generatore di

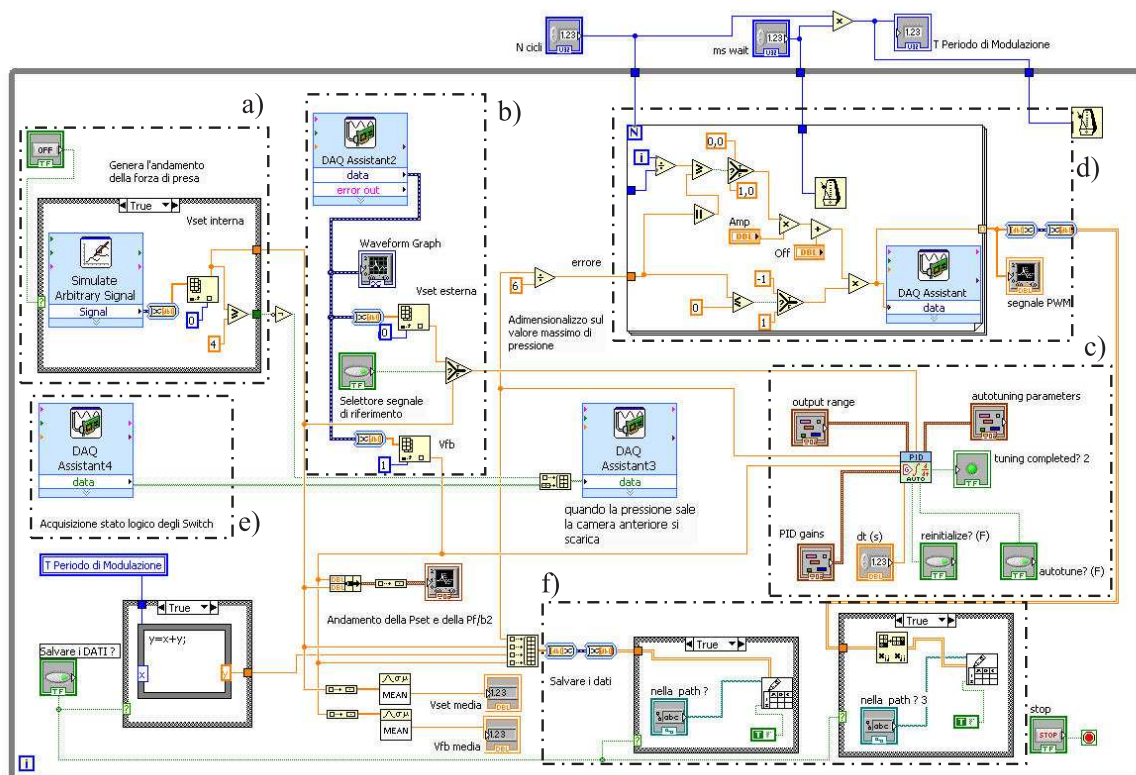


Fig. 5.18: Diagramma a blocchi del LabView relativo al pannello frontale: a) generazione del segnale di pressione; b) acquisizione dei segnali provenienti dai sensori; c) blocco PID; d) generazione del segnale PWM da inviare alle valvole V_1 e V_2 ; e) gestione degli switch e del pollice; f) acquisizione dei dati.

funzione) collegato ai canali di Analog Input (68 + e 67 -) del connettore NI SCB 68 da cui il segnale viene inviato alla scheda di acquisizione all'interno del pc. L'andamento di questo segnale è mostrato sul Pannello Frontale insieme all'andamento dell'onda quadra generata. Per effettuare una verifica sperimentale particolareggiata, è stata generata un'onda sinusoidale con una frequenza $f = 0,1$ Hz ed è stato impostato un periodo di modulazione $T = 50$ ms. I dati acquisiti, salvati in due files formato .dat, sono stati successivamente elaborati in ambiente MATLAB fornendo i due diagrammi sperimentali: tensione[V] / tempo[s] relativi, rispettivamente, alla V_{rif} e alla V_{PWM} . Questi, riportati in Fig.5.21, mostrano l'effettiva efficacia del modulatore virtuale realizzato. Infatti, al

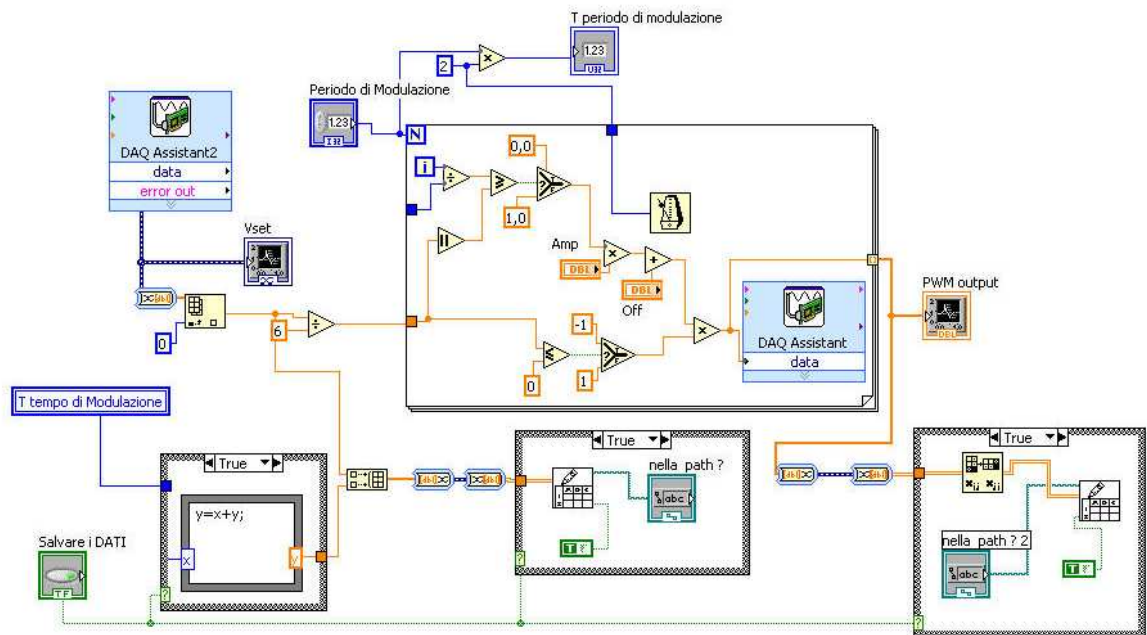


Fig. 5.19: Diagramma a blocchi del modulatore virtuale.

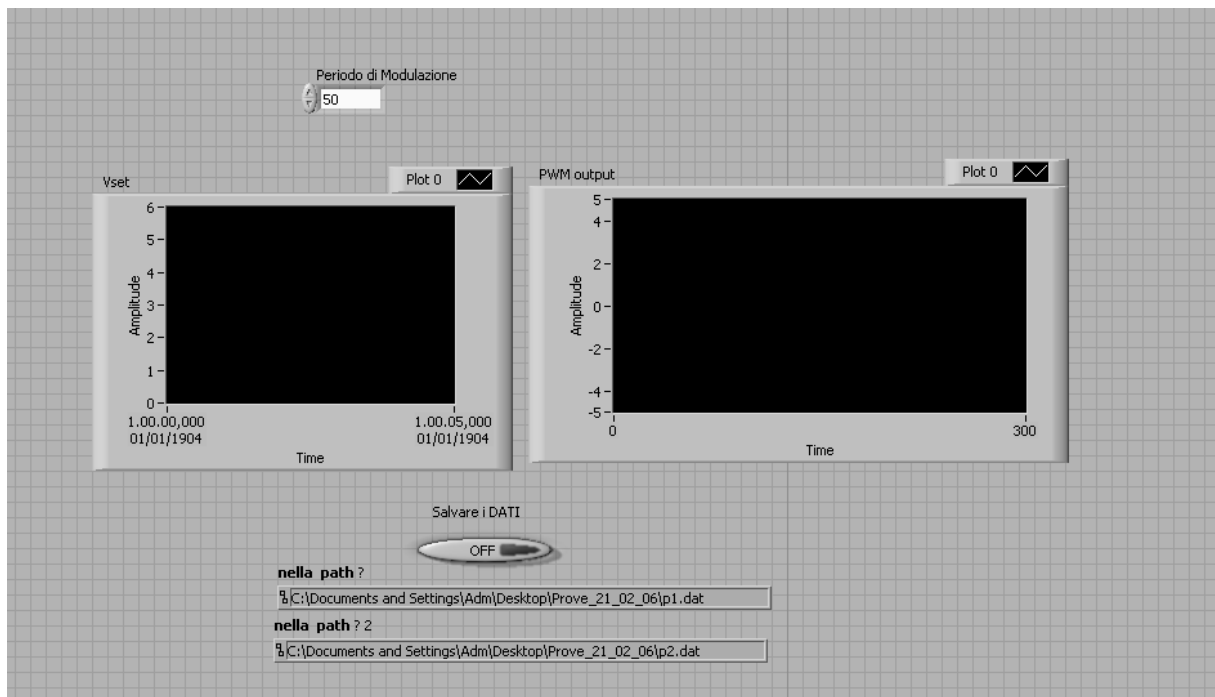


Fig. 5.20: Pannello frontale del modulatore virtuale.

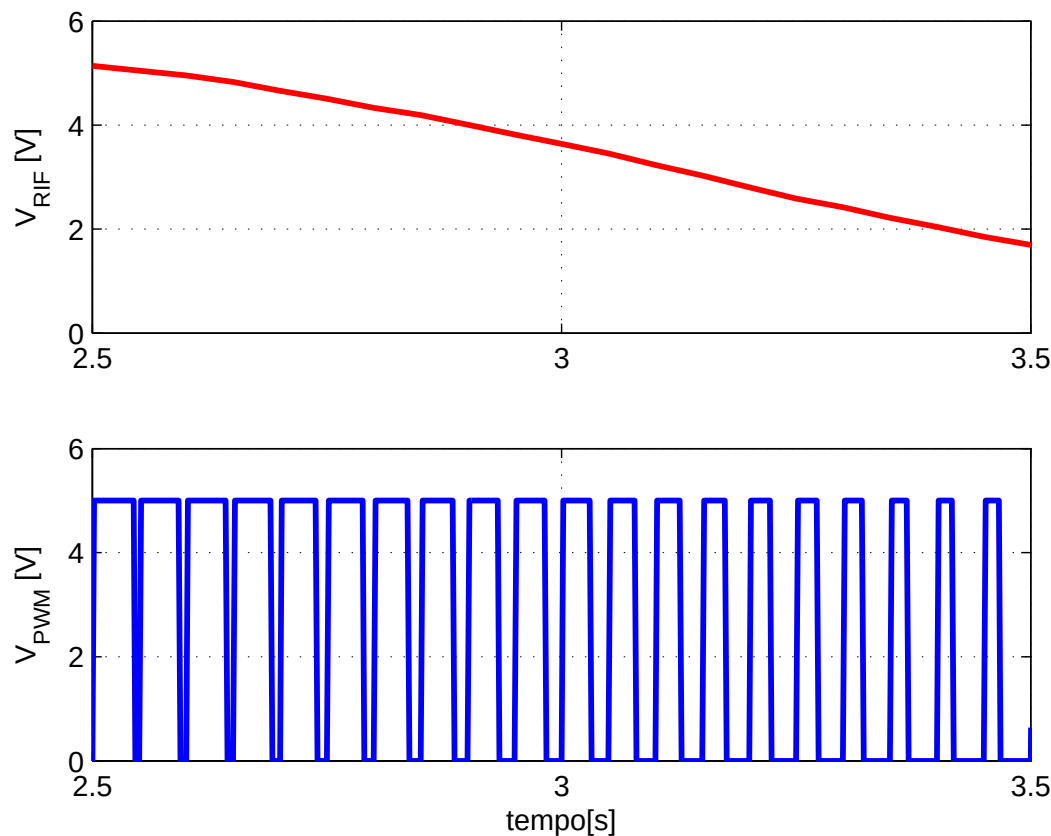


Fig. 5.21: Verifica sperimentale del funzionamento del modulatore virtuale.

variare del valore assunto dalla V_{rif} , si ha una conseguente variazione del *d.c.* del segnale modulato.

5.3.2 Determinazione sperimentale della caratteristica statica

Il comportamento di un servosistema è definito attraverso l'analisi delle sue prestazioni statiche e dinamiche. Il comportamento statico, in particolare, è definito dalla caratteristica statica, ossia dall'andamento del segnale di uscita $V_{F/B}$ in funzione del segnale di ingresso V_{SET} . Nel caso del servosistema in esame, questo andamento è stato ottenuto grazie ad una campagna di prove sperimentali effettuata facendo assumere al segnale in tensione V_{SET} un range di valori compresi tra 0,01 V e 6 V, tramite un generatore di ten-

Tab. 5.1: Valori sperimentali della caratteristica statica

V_{SET}	$V_{F/B}$ (up)	$V_{F/B}$ (down)
0,01	0,00	0,00
0,50	0,50	0,52
1,00	1,00	1,01
1,50	1,50	1,51
2,00	2,01	2,02
2,50	2,53	2,52
3,00	3,05	3,04
3,50	3,54	3,54
4,00	4,04	4,04
4,50	4,54	4,53
5,00	5,04	5,05
5,50	5,56	5,54
6,00	6,04	6,05

sione variabile. Le prove sono state realizzate assegnando alla V_{SET} prima valori crescenti e poi valori decrescenti. Si può notare che il valore massimo fatto assumere alla V_{SET} è 6 V poiché che 6 bar rappresenta la massima pressione di alimentazione. Pertanto si ha una corrispondenza di 1 bar/V. I risultati ottenuti, visibili nella Tab.5.1, sono stati riportati in ambiente MATLAB fornendo l'andamento della caratteristica statica riportata in Fig.5.22. Nel diagramma, sono riportati i valori assunti dalla V_{SET} sull'asse delle ascisse, mentre sull'asse delle ordinate quelli della $V_{F/B}$. Come è possibile osservare, le distribuzioni di punti ottenute dalle due prove effettuate, praticamente si sovrappongono e l'andamento è ben approssimato da una retta passante per l'origine. Si può quindi concludere che è stato verificato che la caratteristica statica del sistema è lineare.

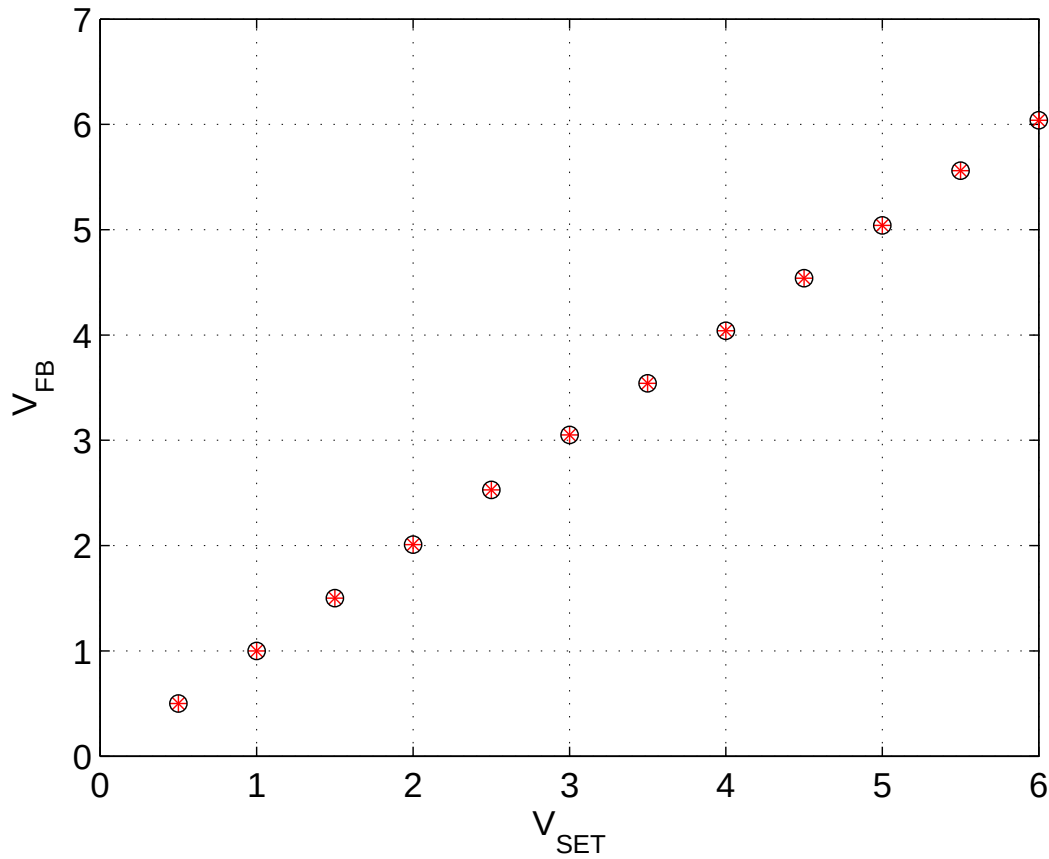


Fig. 5.22: Andamento della caratteristica statica.

5.3.3 La regolazione PID

Come già accennato precedentemente, controllare un sistema significa essenzialmente effettuare una regolazione su di esso. In generale indicando con $r(t)$ il valore che si vuole far assumere alla variabile controllata e con, $y(t)$ il valore effettivamente assunto da tale grandezza, risulta definita una funzione d'errore : $e(t) = r(t) - y(t)$. Lo scopo dell'azione del controllo è quello di applicare la migliore scelta possibile della funzione $u(t)$ (detta variabile di controllo) che:

- renda il sistema asintoticamente stabile;
- minimizzi il valor medio di $e(t)$ oppure di $|e(t)|$;

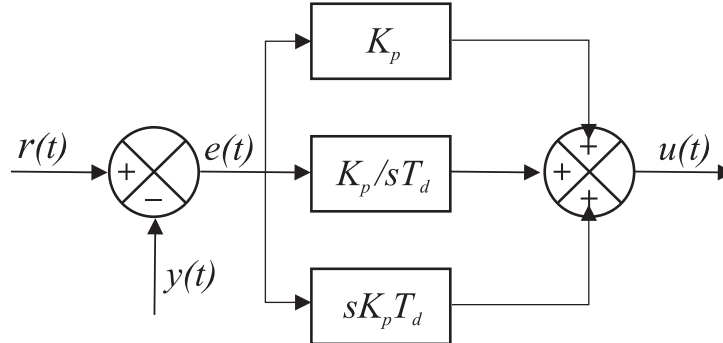


Fig. 5.23: Schema a blocchi di un controllore di tipo PID.

- riduca al livello minore possibile il tempo di risposta e le fluttuazioni intorno al valore asintotico in concomitanza di transitori di $r(t)$.

Le caratteristiche della funzione $u(t)$ dipendono essenzialmente dal tipo di controllore scelto a cui corrispondono. Di conseguenza si hanno diversi metodi di regolazione, tra cui, la regolazione PID che è caratterizzata da tre azioni di controllo combinate:

1. azione proporzionale;
2. azione derivativa;
3. azione integrativa.

In Fig.5.23 è riportato lo schema generale di un controllore di tipo PID.

L'uscita $u(t)$ risulta essere, quindi la seguente espressione:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (5.3)$$

dove K_P , T_D e T_i sono tre costanti positive. Il primo termine, K_P , è detto guadagno proporzionale. Il contributo del K_P è proporzionale all'errore e diminuisce man mano che questo si avvicina a zero. Quindi maggiore è l'errore e maggiore è l'azione di controllo. Attraverso la sola azione proporzionale però, l'uscita $u(t)$ non arriverà mai esattamente al

valore richiesto a meno di non far tendere K_P all'infinito. Infatti, usando un contributo esclusivamente proporzionale (P) si produce una differenza (offset) tra il valore richiesto e quello ottenuto. All'aumentare del K_P questa differenza diminuisce, ma dopo un certo valore, il sistema inizia ad oscillare diventando instabile. Per porre rimedio a questo problema è necessario aggiungere al K_P un termine aggiuntivo, detto contributo integrale K_i , che elimini a priori la presenza dell'offset. Questo coefficiente, denominato guadagno integrale, è pari a

$$K_i = \frac{K_p}{sT_i} \quad (5.4)$$

dove T_i è una costante detta tempo di reset. L'azione integrativa risulta essere proporzionale all'integrale dell'errore, perciò a segnali di riferimento costanti corrisponderà un errore nullo. L'effetto dell'integrazione è tanto più importante quanto più il valore di T_i è piccolo, ma allo stesso tempo, riducendo il valore di T_i , anche se il sistema risulta caratterizzato da una risposta più veloce al transitorio, si innescano anche forti oscillazioni. Il terzo termine del controllore PID è quello derivativo. Il contributo derivativo al controllo K_D tiene conto delle rapide variazioni dell'errore e cerca, di anticipare la futura azione correttiva tenendo conto delle variazioni dell'errore nei tempi più recenti. In pratica questo si concretizza in una riduzione delle oscillazioni. Il K_D o guadagno dell'azione derivativa è pari a

$$K_d = K_p T_D \quad (5.5)$$

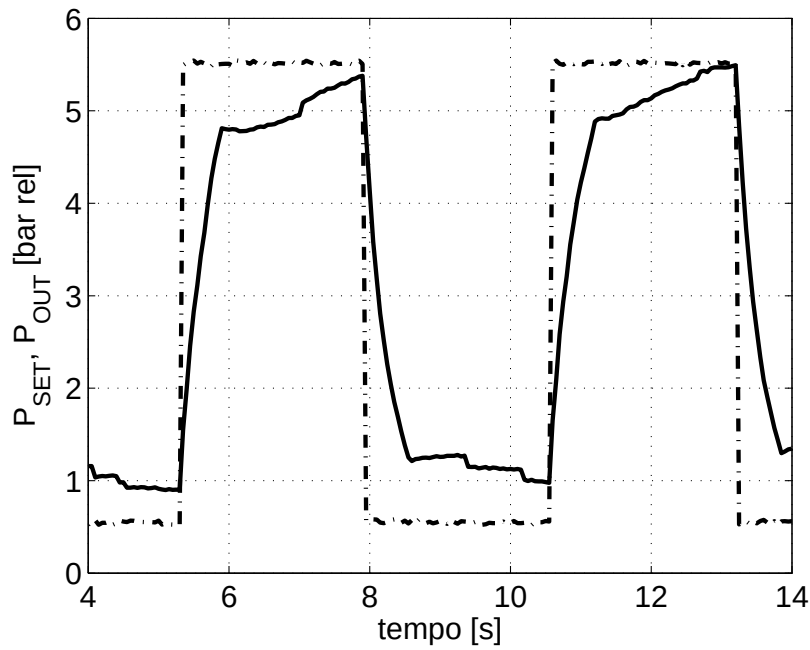
dove T_D è la costante tempo di derivazione. In definitiva quindi, il contributo derivativo permette di ridurre le oscillazioni spurie del sistema, evitando che questo oscilli troppo intorno al valore asintotico. D'altro canto, in presenza di un forte rumore esterno, contribuisce ad amplificarne l'effetto producendo un'instabilità addizionale al sistema.

In conclusione, il problema del progetto di un controllore PID si riduce alla scelta dei valori più opportuni per i parametri K_P , T_i e T_D . Tale scelta non è banale perché richiede la conoscenza dettagliata delle proprietà del processo che si vuole controllare.

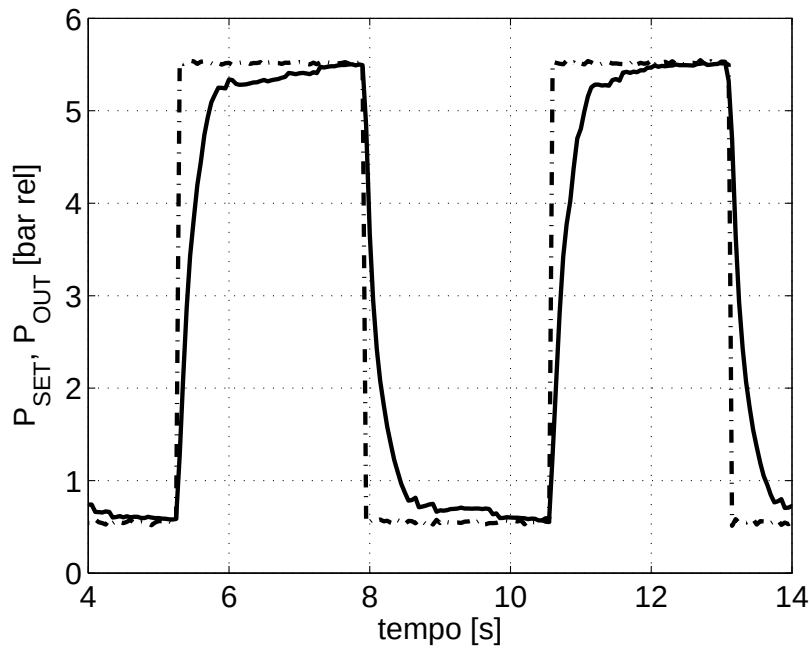
5.4 Risultati sperimentali

Le prestazioni statiche e dinamiche del servosistema per il controllo pressione in anello chiuso sono state analizzate utilizzando il banco prova di Fig.5.10, come riportato in [Figliolini e Rea, 2006]. Vari risultati sperimentali sono riportati in Fig.5.24 in maniera tale da evidenziare gli effetti del guadagno proporzionale K_p all'interno del blocco PID. In particolare, il segnale di riferimento P_{SET} e l'uscita in pressione P_{OUT} sono stati confrontati incrementando il valore del K_p da 0,3 a 2,4, come mostrato dalle Figg.5.24(a) a 5.25(b) rispettivamente. Considerando che il trasduttore di pressione T_p è caratterizzato da un guadagno statico $K_t = 1$ V/bar, i diagrammi delle pressioni di P_{SET} e P_{OUT} sono corrispondenti ai diagrammi delle tensioni V_{SET} e V_{OUT} rispettivamente. I diagrammi di Fig.5.24 mostrano degli andamenti non desiderabili nel caso di Fig.5.24(a) con $K_p = 0,3$ e di Fig.5.24(b) con $K_p = 0,9$, dato che il segnale di feed-back, non segue correttamente il segnale di riferimento. Aumentando il K_p fino al valore di 1,8, come mostrato in Fig.5.25a si ha un buon comportamento della risposta del sistema. Continuando ad aumentare il guadagno statico insorgono fenomeni di instabilità, evidenziati in Fig.5.25b.

Risultati sperimentali di risposta in frequenza in anello chiuso del servosistema per del controllo pressione sono stati ottenuti utilizzando il Gain-Phase-Analyzer, modello Solartron SI 1253. Tale strumento ha il compito di sollecitare il sistema a frequenze sempre maggiori e di valutarne la risposta complessiva. Tale analisi è realizzata nel dominio delle frequenze creando i diagrammi di Bode per il sistema in esame.



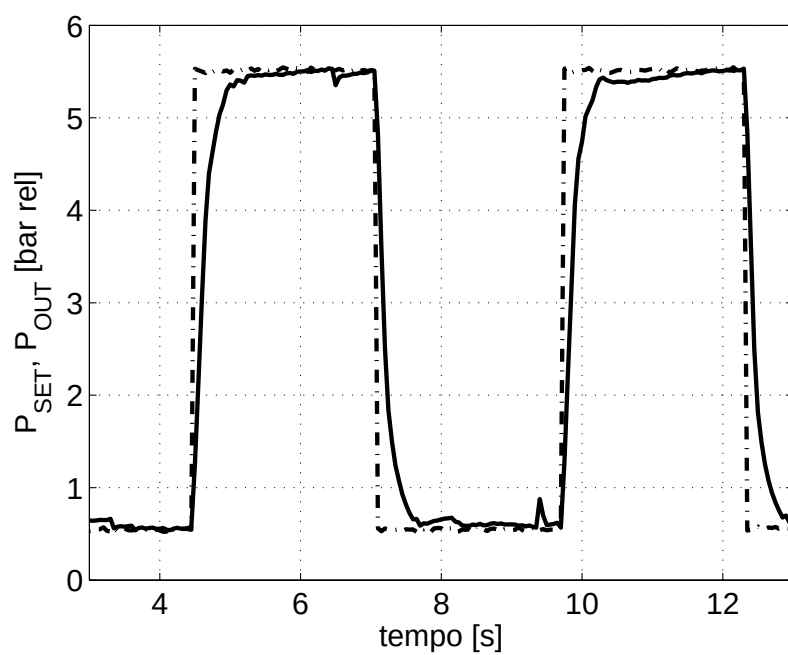
(a)



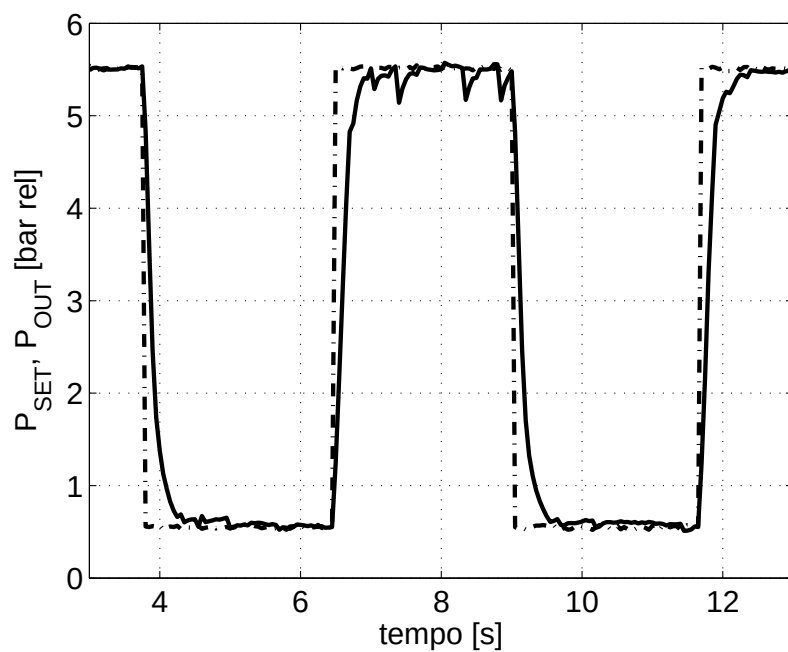
(b)

Fig. 5.24: Diagramma sperimentale delle pressioni P_{SET} e P_{OUT} al variare del K_p ;

a) $K_p = 0,3$; b) $K_p = 0,9$.



(a)



(b)

Fig. 5.25: Diagramma sperimentale delle pressioni P_{SET} e P_{OUT} al variare del K_p ;
a) $K_p = 1,8$; b) $K_p = 2,4$.

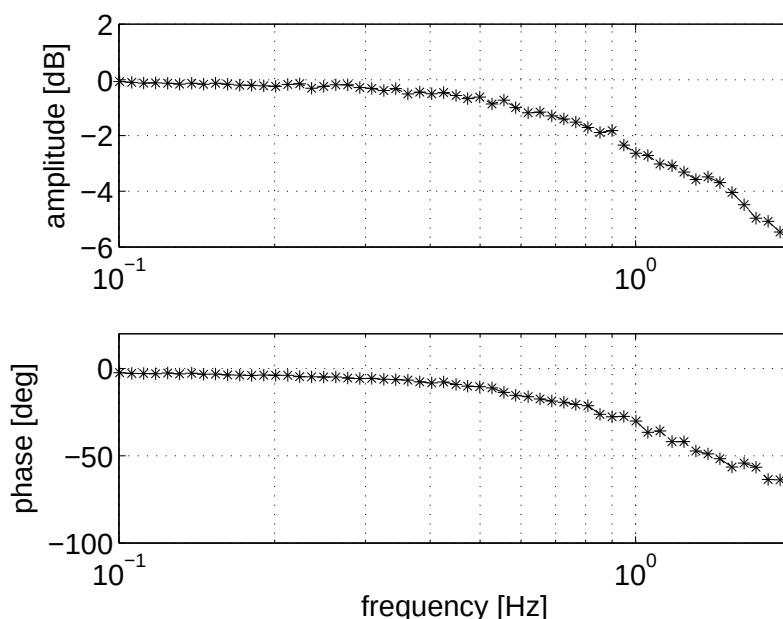


Fig. 5.26: Diagramma di Bode sperimentale con periodo di modulazione $T=50$ ms.

I diagrammi di Bode mostrati in Fig.5.26, 5.27 e 5.28 sono stati ottenuti per differenti periodi di modulazione del segnale PWM, nel primo caso $T = 50$ ms, nel secondo caso per $T = 100$ ms, mentre il terzo caso è stato ottenuto per $T = 200$ ms.

I diagrammi delle pressioni di P_{SET} e P_{OUT} rispetto al tempo sono stati acquisiti attraverso il Lab-View Data-Acquisition-System e sono riportati nelle Figg. da 5.29 a 5.31. Il segnale P_{SET} è riportato in linea continua, mentre il segnale P_{OUT} è riportato con linea tratto-punto. In particolare, la Fig.5.29(a) e la Fig.5.29(b), mostrano entrambe la risposta nel tempo in accordo a quanto evidenziato in Fig.5.26 ed 5.27, per un segnale P_{SET} sinusoidale con frequenza $f = 0,1$ Hz, valore medio $A_v = 3$ bar rel ed ampiezza $A=2$ bar rel. Sempre in accordo con i diagrammi di Bode illustrati nelle Figg.5.26 e 5.27, in Fig.5.31 è riportato un esempio di un segnale P_{SET} sinusoidale con frequenza $f = 0,5$ Hz, valore medio $A_v = 3$ bar rel ed ampiezza $A = 2$ bar rel. per entrambi i periodi di modulazione sono $T = 50$ ms e $T = 100$ ms. Un ultimo esempio riportato in Fig.5.31, mostra la risposta del sistema quando è sottoposto ad un segnale P_{SET} triangolare con

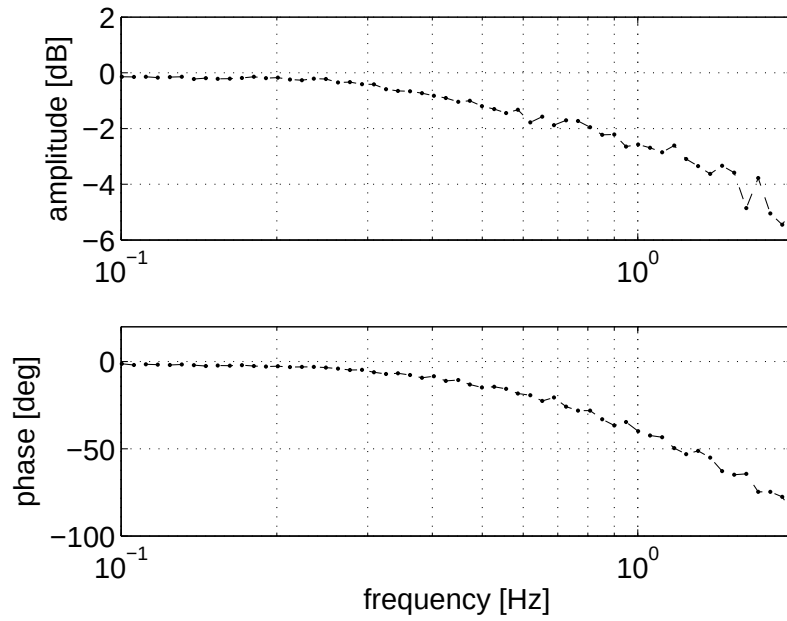


Fig. 5.27: Diagramma di Bode sperimentale con periodo di modulazione $T=100$ ms.

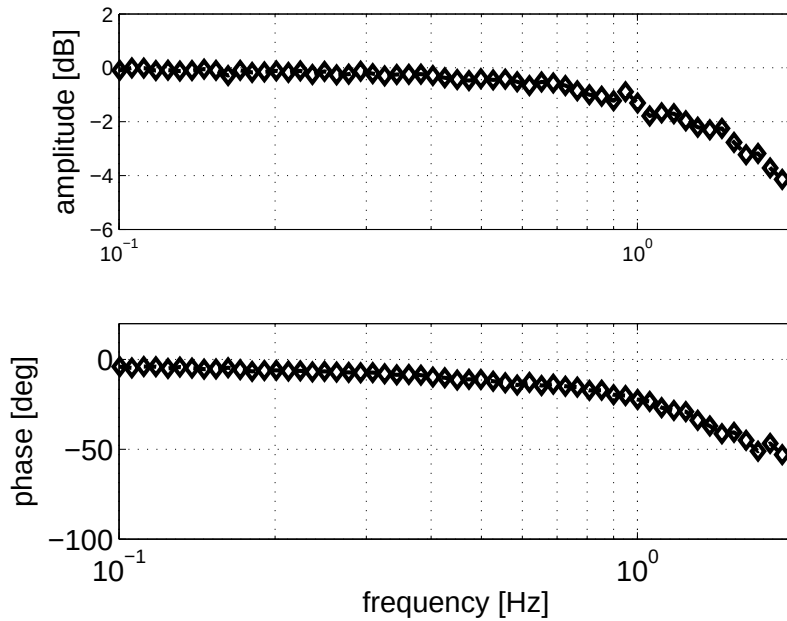
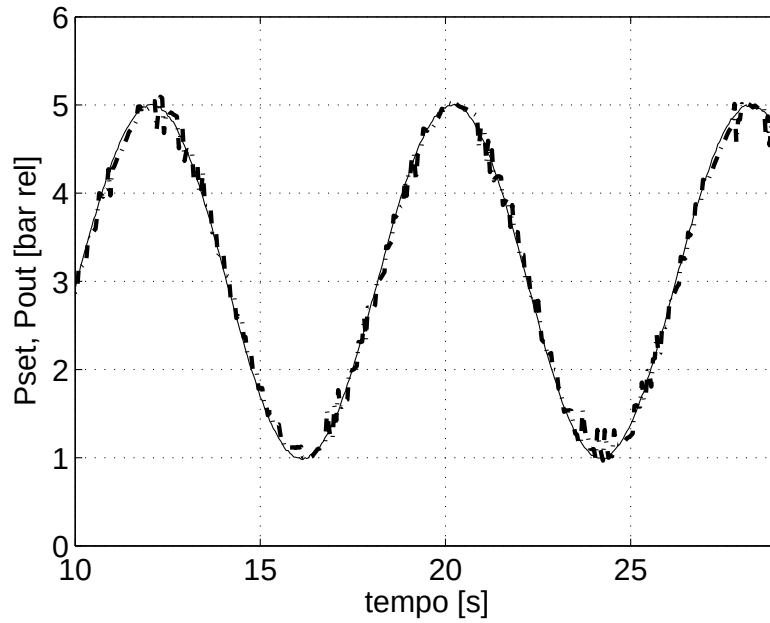
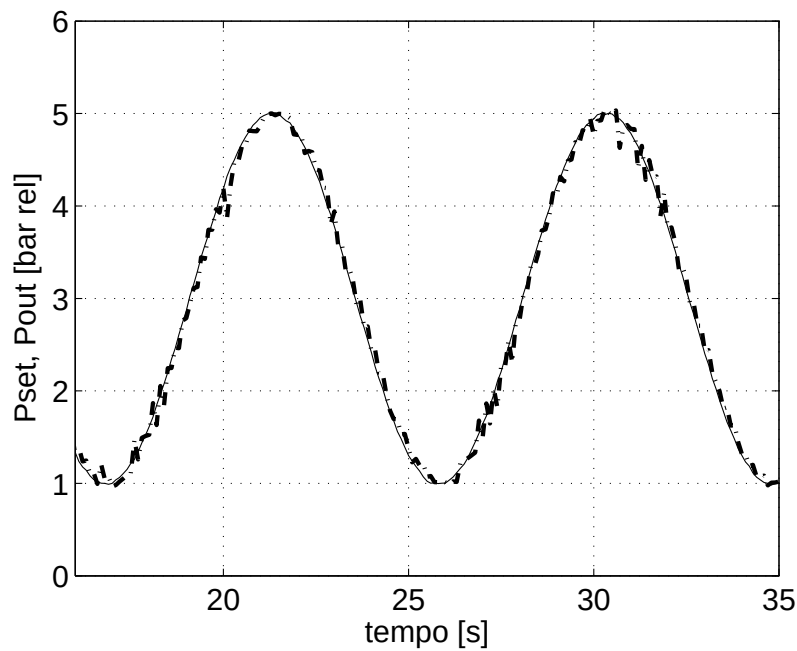


Fig. 5.28: Diagramma di Bode sperimentale con periodo di modulazione $T=200$ ms.

frequenza $f = 1,5$ Hz, valore medio $A_v = 3$ bar rel ed ampiezza $A = 2$ bar rel. per entrambi i periodi di modulazione di $T = 50$ ms e $T = 100$ ms.

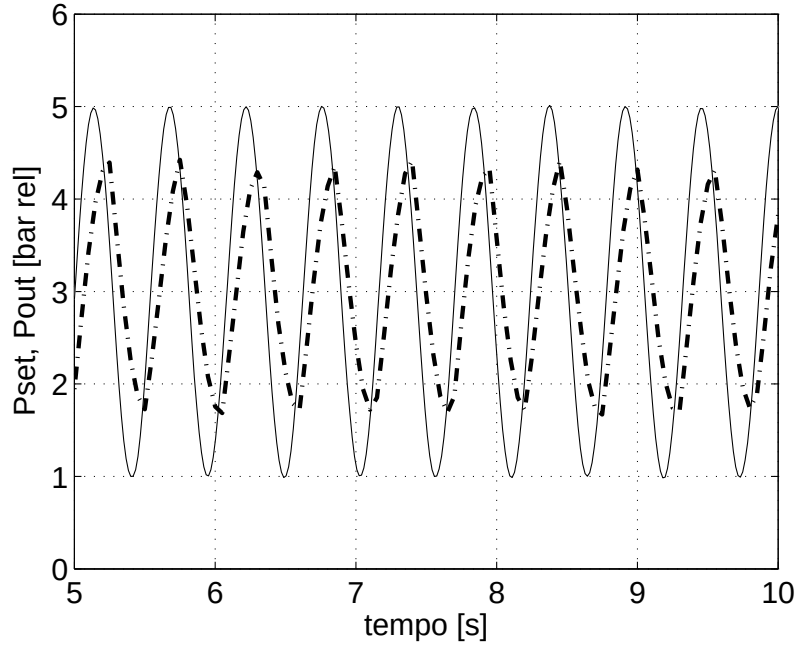


(a)

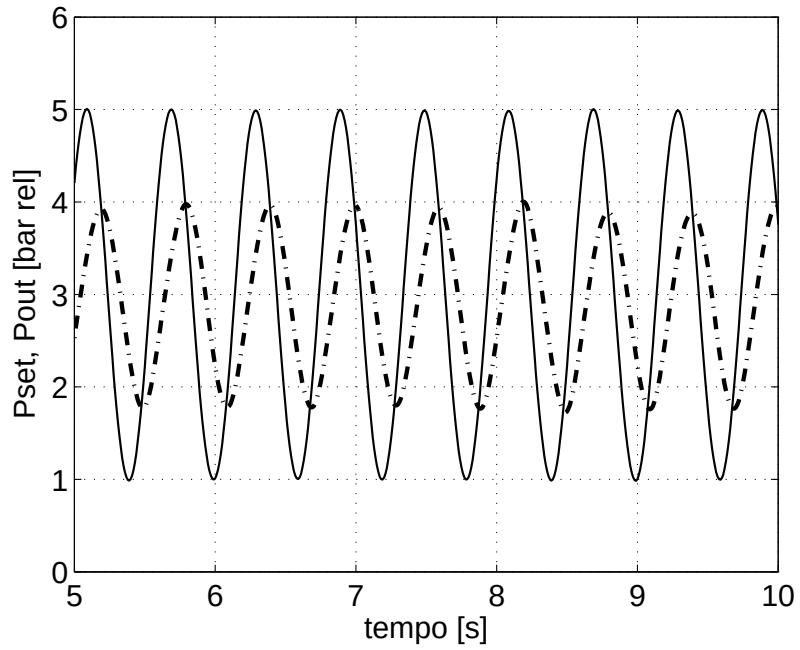


(b)

Fig. 5.29: Validazione sperimentale della risposta in frequenza nel dominio del tempo per un segnale di P_{SET} sinusoidale con $f=0,1$ Hz, $A_v = 3$ bar rel. e $A = 2$ bar rel.; a) $T = 50$ ms b) $T = 100$ ms.

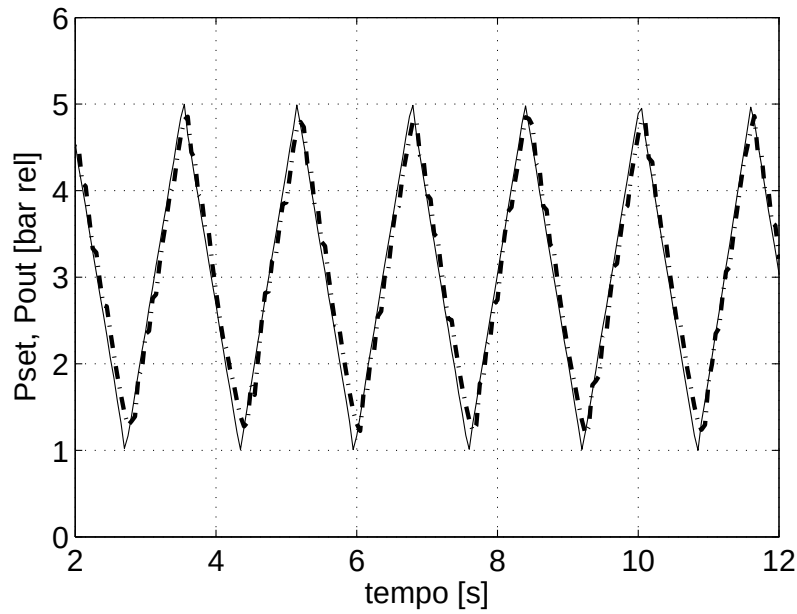


(a)

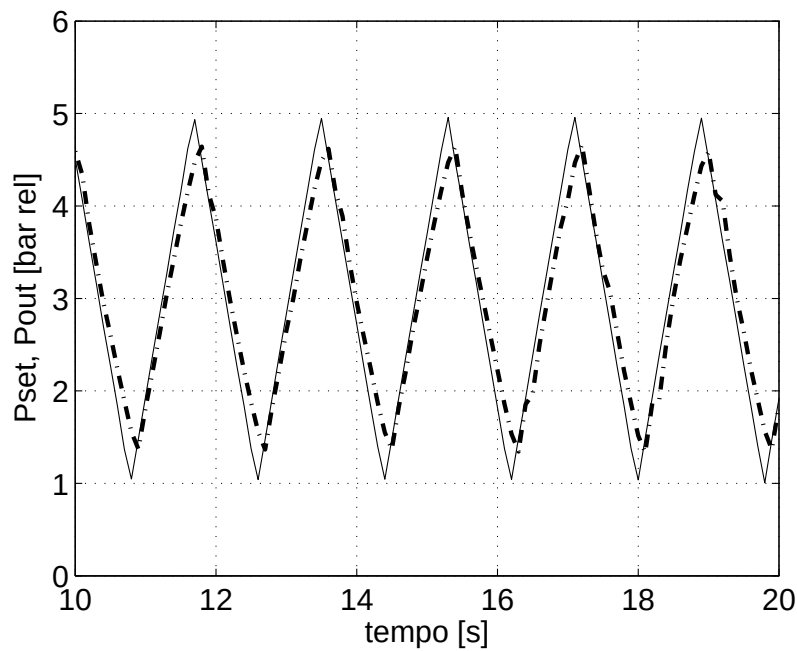


(b)

Fig. 5.30: Validazione sperimentale della risposta in frequenza nel dominio del tempo per un segnale di P_{SET} sinusoidale con $f = 1.5$ Hz, $A_v = 3$ bar rel. e $A = 2$ bar rel.; a) $T = 50$ ms b) $T = 100$ ms



(a)



(b)

Fig. 5.31: Validazione sperimentale della risposta in frequenza nel dominio del tempo per un segnale di P_{SET} triangolare con $f=1,5$ Hz, $A_v = 3$ bar rel. e $A = 2$ bar rel.; a) $T = 50$ ms b) $T = 100$ ms

Cap. 6 Prototipo e Sperimentazione

6.1 Introduzione

Per testare sperimentalmente le capacità di presa della mano robotica Ca.U.M.Ha. si è reso necessario realizzare un apposito banco prova. Ciò ha comportato alcune modifiche al prototipo. In questo capitolo si affrontano la caratterizzazione e l'allestimento del banco prova che ha permesso di testare l'efficacia dell'azione di presa da parte della mano robotica. Particolare attenzione è rivolta all'analisi sperimentale del sistema di controllo della pressione, allo scopo di mostrare le differenze di funzionamento quando il sistema è montato su un serbatoio come nel capitolo precedente e quando il sistema deve azionare dei cilindri pneumatici.

6.2 Mano robotica Ca.U.M.Ha: il sistema mecatronico

Un sistema mecatronico è un prodotto elettro-meccanico controllato elettronicamente. La progettazione di un sistema mecatronico impone di adottare una filosofia di integrazione di tecniche tradizionali e moderne tecnologie nel campo meccanico, elettrico, elettronico ed informatico. Progettare un sistema mecatronico infatti è molto più che aggiungere un controllore ad un sistema elettro-meccanico esistente.

Con il preciso intento di realizzare un sistema mecatronico per testare sperimentalmente le capacità di presa della mano robotica Ca.U.M.Ha, è stato realizzato il banco prova specifico mostrato in Fig.6.1. Sul prototipo è stato montato il sistema per il controllo della pressione descritto nel Cap. 5. Dalla Fig.6.1 sono evidenti la mano robotica 1) che integra il sistema per il controllo della pressione; la scheda elettronica 2) di interfaccia per la gestione del pollice e della camera anteriore dei cilindri, la scheda elettronica 3)

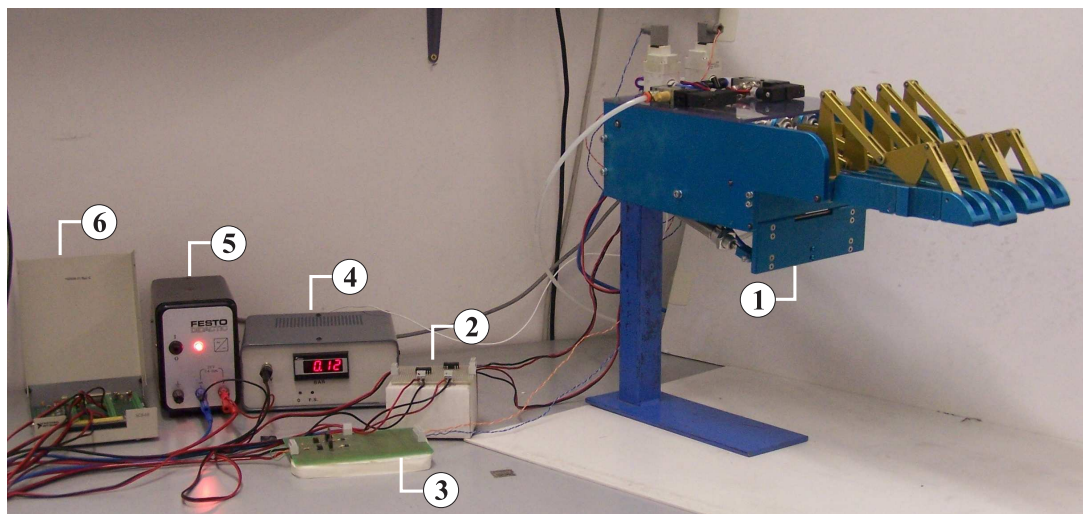


Fig. 6.1: Banco prova sperimentale realizzato per la Ca.U.M.Ha.; 1) mano robotica che integra il sistema di controllo della pressione; 2) scheda elettronica per la gestione del pollice e della camera anteriore dei cilindri; 3) scheda elettronica per la gestione delle due valvole modulate in PWM; 4) sistema di condizionamento del trasduttore di pressione; 5) alimentatore a 24 V DC; 6) scheda esterna SCB-68 della National Instruments

per la gestione delle due valvole modulate in PWM, il sistema di condizionamento 4) del trasduttore di pressione, l'alimentatore a 24 V DC 5) e scheda esterna 6), SCB-68 della National Instruments. Sono state apportate delle piccole modifiche che hanno permesso di integrare il sistema di attuazione con la mano robotica. Primo tra tutti, è stato sostituito il serbatoio da laboratorio con uno realizzato appositamente, in modo da poter collegare tutte le camere posteriori dei cilindri delle dita. Inoltre, sono state aggiunte due valvole pneumatiche, una 3/2 ed una 5/2 che servono per gestire la camera anteriore dei cilindri e per azionare il pollice, rispettivamente.

6.2.1 Integrazione della meccanica e dell'elettronica: il prototipo

E' importante mettere in risalto alcuni aspetti realizzativi del prototipo che hanno permesso di realizzare il sistema mecatronico. In Fig.6.2 è riportata la vista dall'alto della

mano robotica; la valvola V_1 , modulata in PWM, che ha la funzione di riempire il serbatoio è indicata con 1), mentre la valvola V_2 , modulata in PWM, che ha la funzione di svuotare il serbatoio è indicata con 2). L'apertura e chiusura del pollice è realizzata mediante la valvola V_4 indicata in figura con 3). Nel momento in cui si riempie la camera posteriore dei cilindri deve essere svuotata la camera anteriore attraverso la valvola V_3 , indicata con 4). Infine il meccanismo di trasmissione del moto 6) aziona le dita robotiche 7) per ottenere la chiusura della mano.

La Fig.6.3 mostra la vista dal basso della mano robotica in cui sono evidenziati gli attuatori del pollice 1), il serbatoio pneumatico 2) che funge anche da parte integrante della struttura e nel quale confluiscono i collegamenti pneumatici 3). Il meccanismo di azionamento del pollice 4) interagisce con il sistema 5) utilizzato per limitarne la corsa attraverso due battute meccaniche, in uscita e rientro. Gli switch 6) sono posizionati sotto il palmo in modo da essere azionati dalla prima falange. Date le dimensioni compatte degli switch e la loro fragilità è stato deciso di inserire un piccola piastrina di protezione

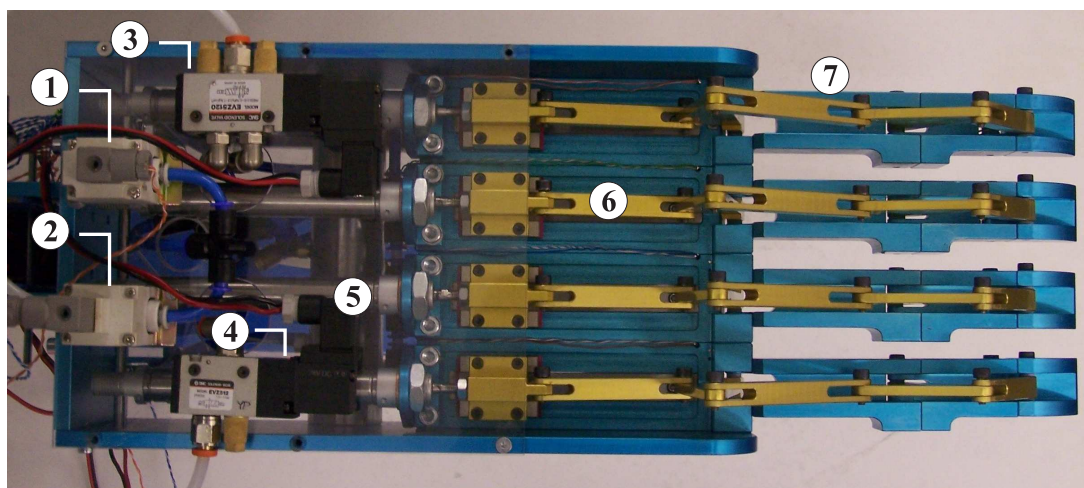


Fig. 6.2: Vista dall'alto della mano robotica; 1) valvola di carico V_1 ; 2) valvola di scarico V_2 ; 3) valvola per la gestione del pollice V_4 ; 4) valvola gestione camera anteriore dei cilindri V_3 ; 5) attuatori pneumatici; 6) meccanismo di trasmissione del moto; 7) dita robotiche.

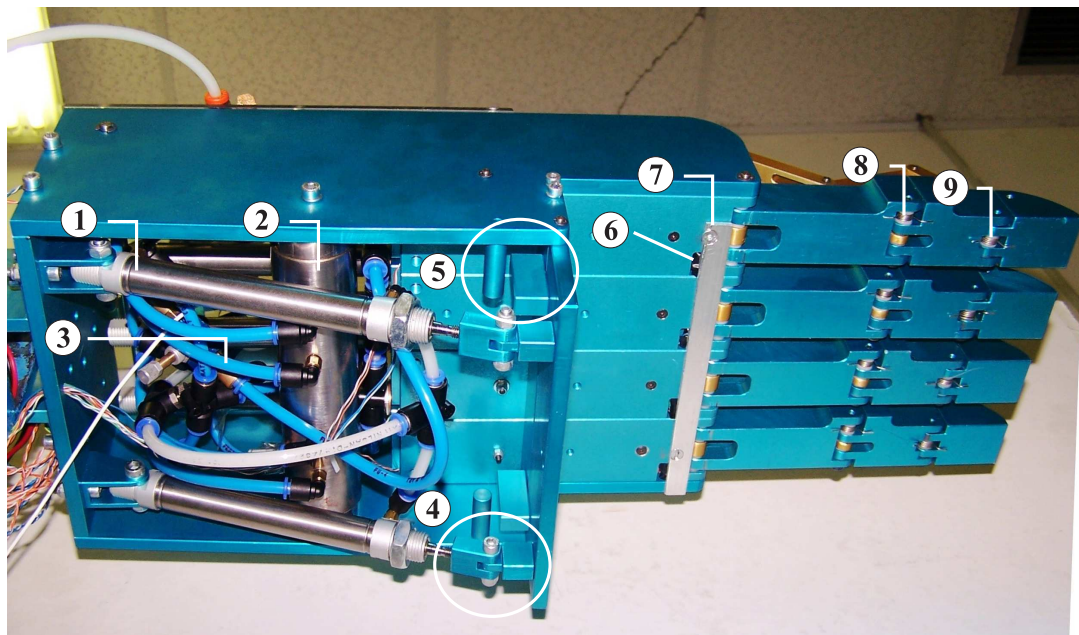


Fig. 6.3: Vista dal basso della mano robotica; 1) attuatori del pollice 2) serbatoio pneumatico; 3) collegamenti pneumatici; 4) meccanismo di azionamento del pollice; 5) sistema utilizzato per limitare la corsa del pollice; 6) posizione degli switch; 7) piastra di protezione degli switch; 8) e 9) molle torsionali.

7) che eviti contatti accidentali dell'oggetto in presa con gli switch stessi. Attraverso la vista dal basso è inoltre possibile notare la posizione delle due molle torsionali 8) e 9). La vista frontale della mano riportata in Fig.6.3 mostra le valvole che sporgono dalla parte superiore. Tale soluzione è stata adottata per garantire una semplice manutenzione, comunque il progetto meccanico è stato realizzato prevedendo anche che la piastra delle valvole possa essere montata al contrario, in modo da evitare queste sporgenze ed avere un sistema ancora più compatto ed integrato.

6.3 Controllo della pressione nella mano robotica

In particolare, i diagrammi sperimentali mostrati in Fig.6.5 mostrano gli andamenti temporali delle pressioni P_{SET} e P_{OUT} , e dell'errore ε , nel caso di controllo della pressione

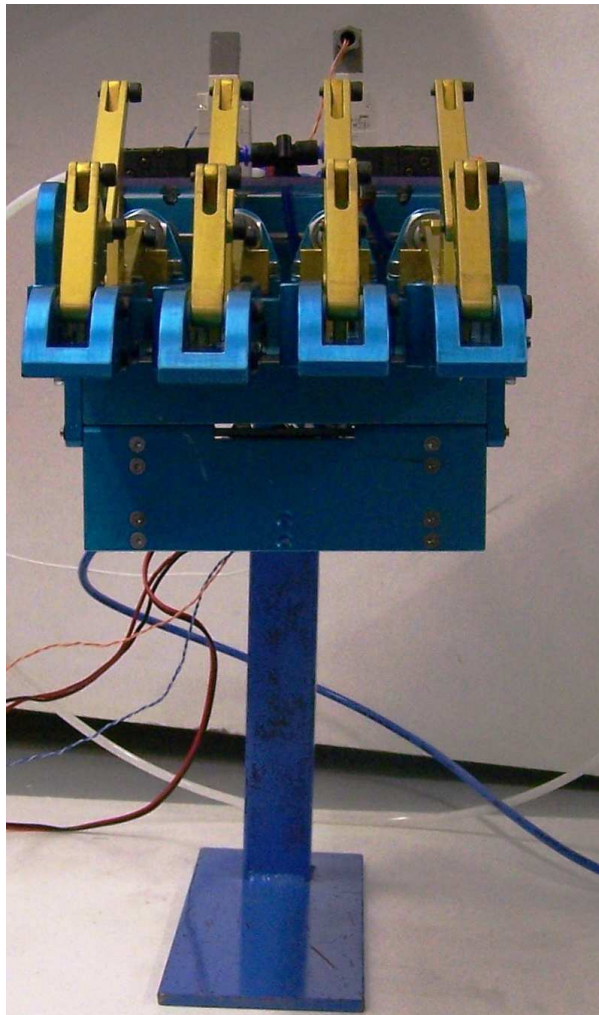


Fig. 6.4: Vista frontale della mano robotica

applicato alla mano Ca.U.M.Ha. In Fig.6.5, sono evidenti alcuni disturbi di pressione conseguenti alle variazioni di volume delle camere di spinta dei cilindri pneumatici, prima del raggiungimento della configurazione di presa. Tuttavia, si tratta di disturbi ad alta frequenza, come è evidente dall'andamento dell'errore, mentre il comportamento a regime è decisamente soddisfacente. L'entità dell'errore in fase di apertura della dita, che risulta non trascurabile, ma di scarsa importanza dal punto di vista applicativo, è principalmente dovuto ad una sovrappressione generata da una spinta alla pressione di 6 bar nel rispetto ad uno scarico strozzato tramite una modulazione PWM della valvola V_2 . Il valore dell'errore riportato in Fig.6.5, determina la generazione del segnale V_{PWM}

che può essere sia positivo che negativo. Infatti, se l'errore è positivo, vuol dire che il valore della P_{SET} è superiore al valore della P_{OUT} e quindi deve aprirsi la valvola V_1 , che determina un aumento di pressione tramite il segnale di comando V_{PWM1} , come mostrato in Fig.6.6. Al contrario, se l'errore è negativo, vuol dire che il valore della P_{SET} è minore del valore della P_{OUT} e quindi deve aprirsi la valvola V_2 , che determina una diminuzione della pressione, tramite il segnale di comando V_{PWM2} , come mostrato in Fig.6.8. La Fig.6.7 mostra un particolare della tensione V_{PWM} in cui l'errore di pressione ha repentini cambiamenti di segno. Infatti si può notare che i segnali V_{PWM1} e V_{PWM2} si alternano in maniera ciclica ogni 50 ms, che corrisponde al periodo di modulazione impostato nel modulatore virtuale. In particolare, i diagrammi sperimentali mostrati in Fig.6.9 mostrano gli andamenti temporali delle pressioni P_{SET} e P_{OUT} , e dell'errore ε , nel caso di controllo della pressione applicato alla mano Ca.U.M.Ha. con un oggetto in presa. L'analisi dei diagrammi mostra come l'andamento delle pressioni sia sostanzialmente simile, eccezione fatta per una leggera diminuzione delle oscillazioni dell'errore intorno allo zero.

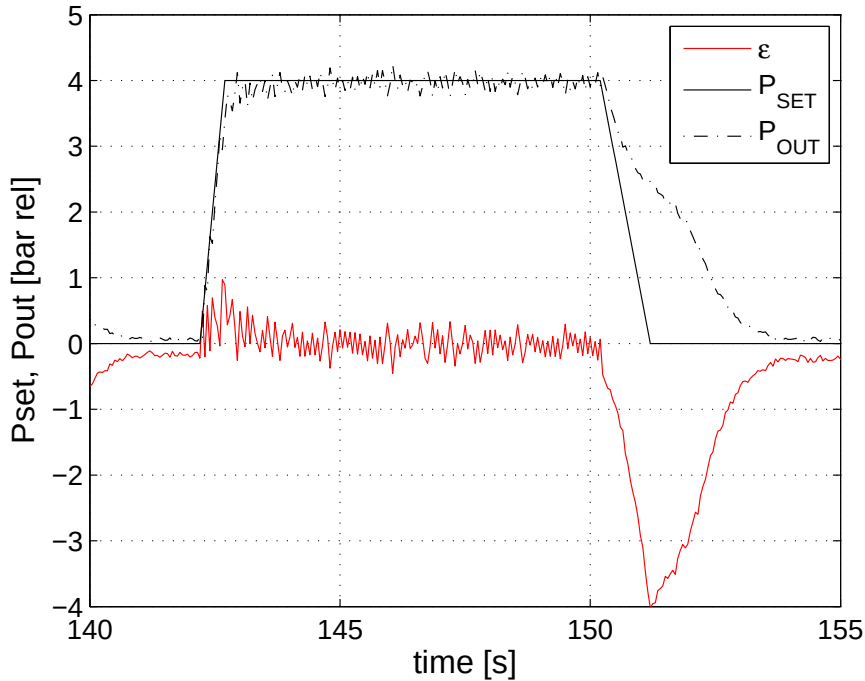


Fig. 6.5: Controllo pressione della mano robotica.

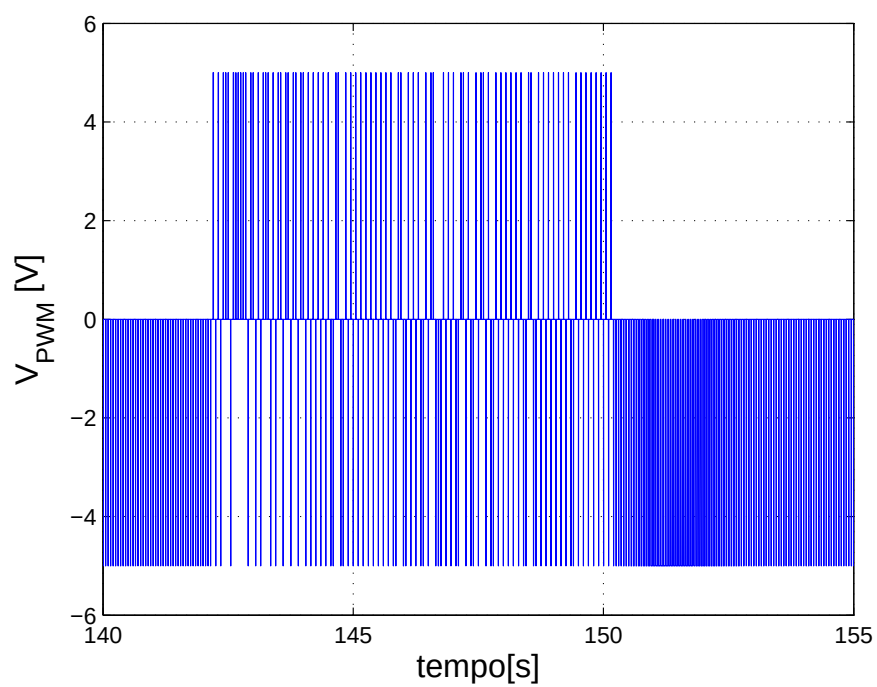


Fig. 6.6: Andamento della tensione V_{PWM} .

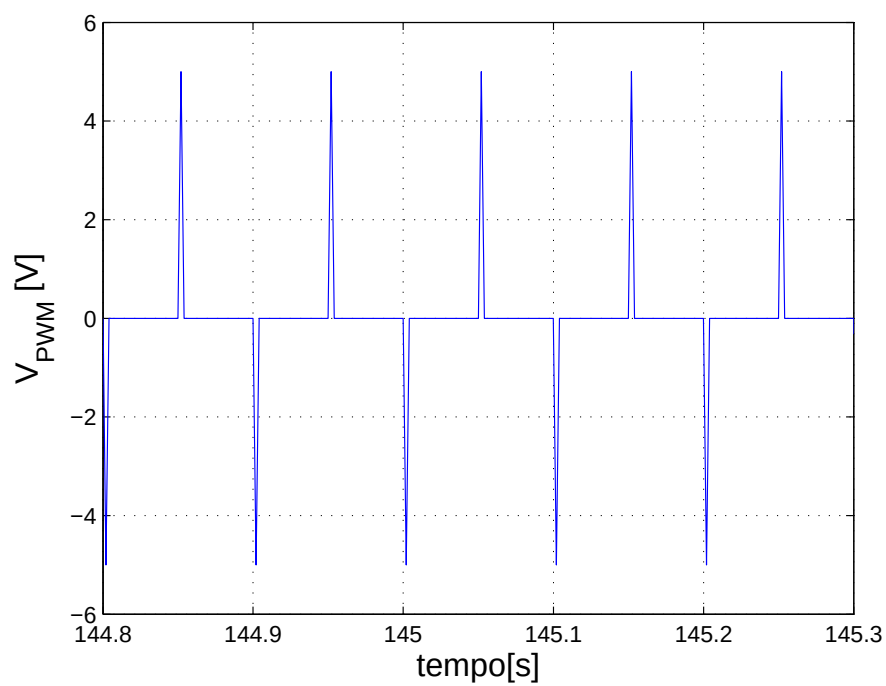


Fig. 6.7: Particolare dell'andamento della tensione V_{PWM} .

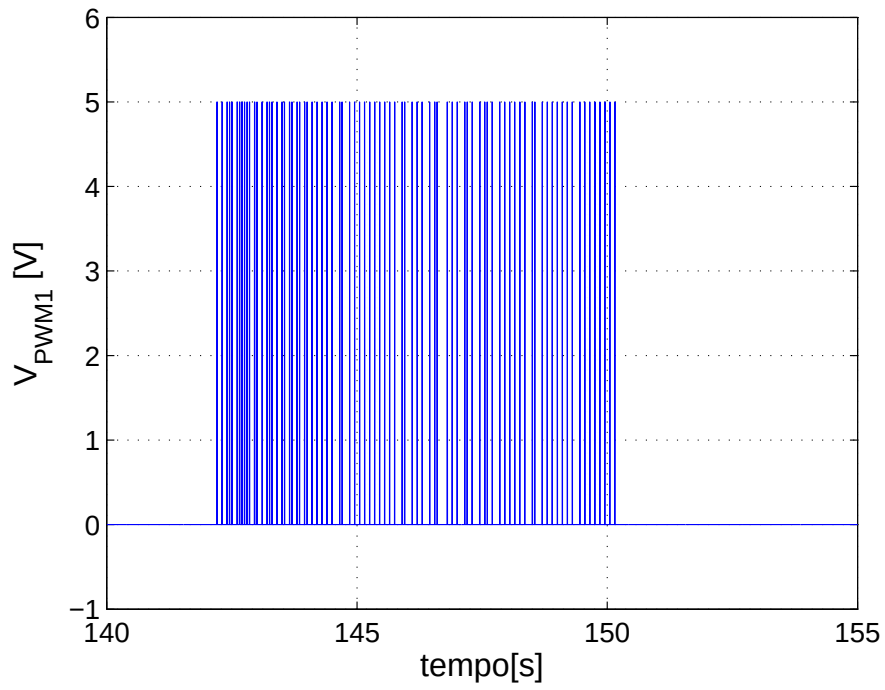


Fig. 6.8: Andamento della tensione V_{PWM1} .

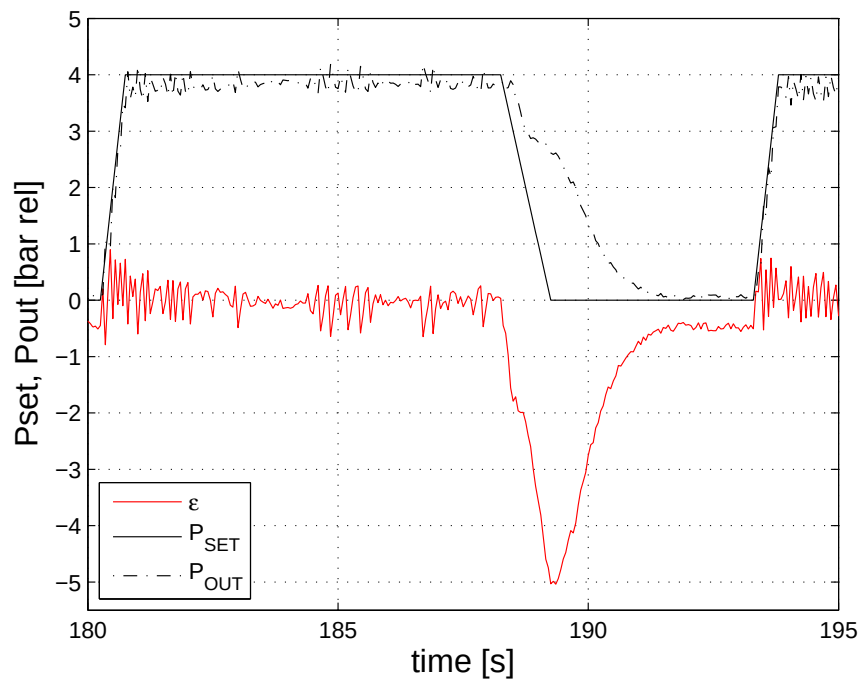


Fig. 6.9: Controllo pressione della mano robotica con oggetto in presa.

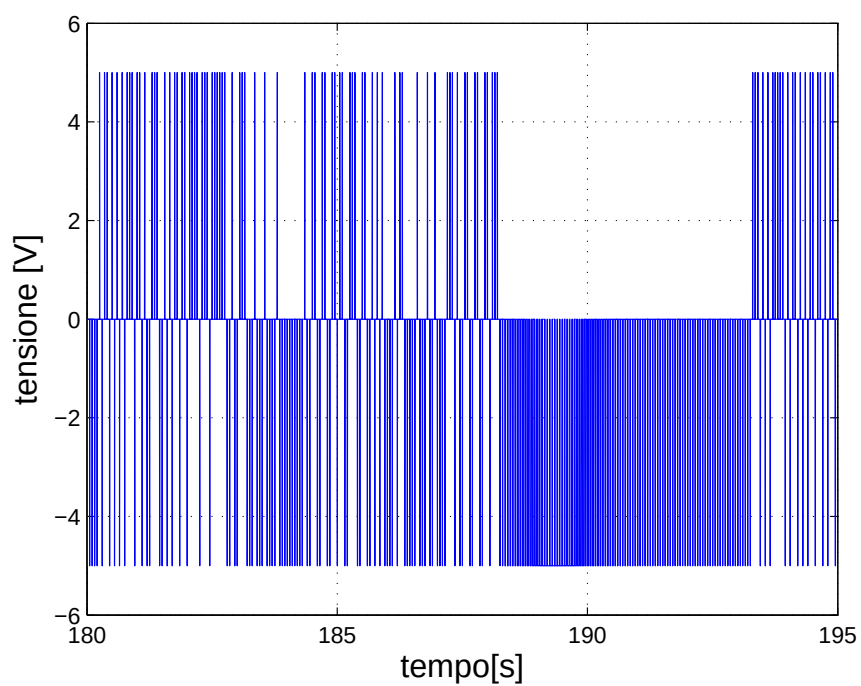


Fig. 6.10: Andamento della tensione V_{PWM} .

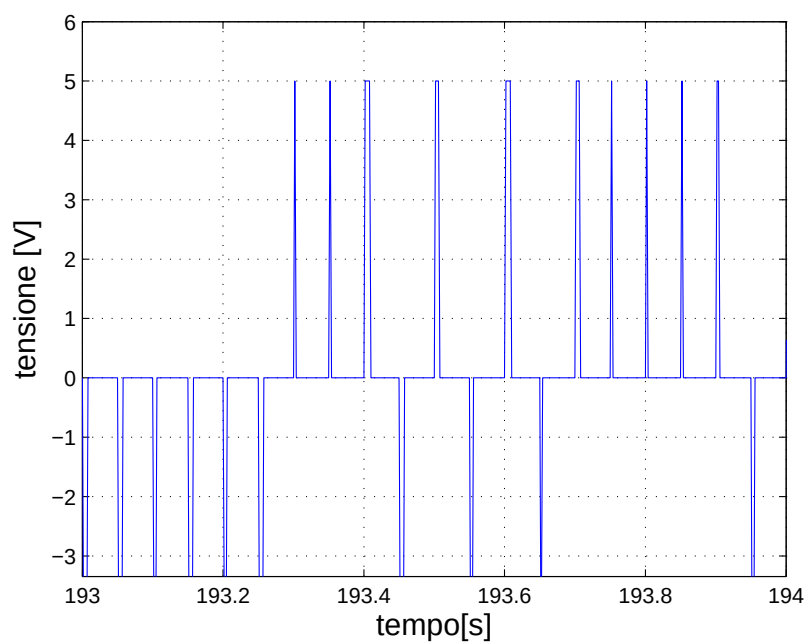


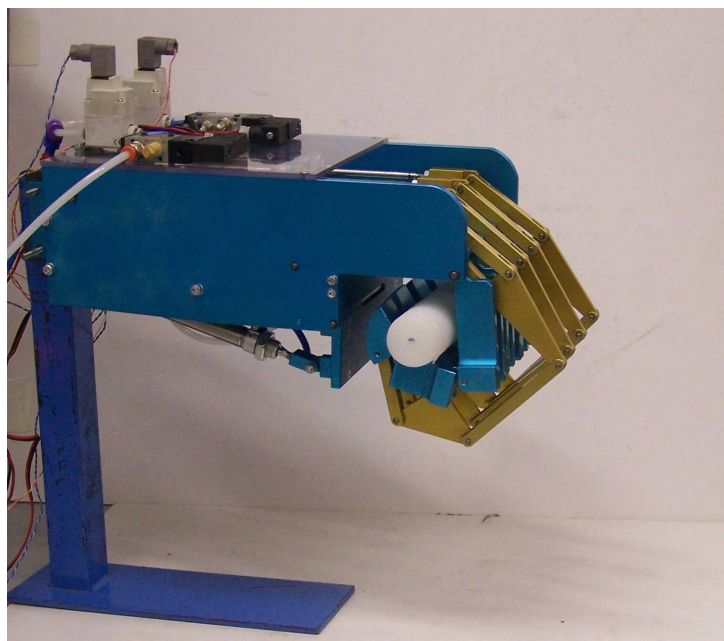
Fig. 6.11: Particolare del controllo pressione della mano robotica con oggetto in presa.

6.4 Prove di presa realizzate

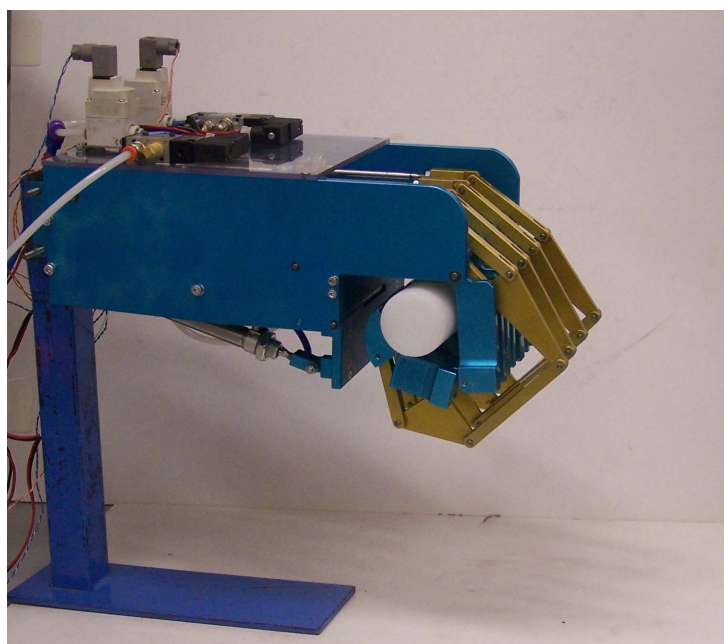
Per valutare la capacità di presa della mano robotica Ca.U.M.Ha. sono stati effettuati dei test volti a determinarne le effettive capacità. Le prime prove sono state effettuate con oggetti cilindrici in nylon appositamente lavorati al tornio per ottenere differenti diametri. La Fig.6.12a mette in risalto una particolare caratteristica di questa mano robotica, ovvero la capacità di afferrare oggetti di dimensioni contenute senza ricorrere all'utilizzo del palmo. Nella Fig.6.12b la presa dell'oggetto avviene grazie anche al supporto del palmo, sia nella parte orizzontale che verticale.

Nella Fig.6.13a la presa avviene su un oggetto cilindrico avente il diametro di 62 mm. La forza esercitata dalle dita è tale da spingere l'oggetto verso l'alto, a contrasto con il palmo di supporto. Nel caso di Fig.6.13b il cilindro ha dimensioni pari a 100 mm, è interessante notare come le dita si avvolgono intorno all'oggetto in presa garantendone un afferraggio stabile.

Le prove di presa di oggetti dalla forma regolare comportano la chiusura contemporanea di tutte e quattro le dita, quindi alcuni test devono essere condotti su oggetti di forma differente ed irregolare al fine di verificare l'effettiva adattabilità della presa all'oggetto. Come oggetto di presa in Fig.6.14a è stata scelta una mela dalla forma approssimativamente sferica. Come si può notare dalla figura, la mano ha afferrato l'oggetto adattandosi alla sua forma. Simili considerazioni possono essere ottenute anche analizzando le prese riportate nelle Figg.6.14b, 6.14c, 6.14d. Per la presa di oggetti di dimensioni contenute, sono impegnate solo due dita, mentre le altre due si chiudono completamente. L'aspetto da evidenziare nelle prove da Fig.6.14a fino alla Fig.6.14d è che realizzando un opportuno controllo pressione, si riesce ad afferrare oggetti cedevoli senza danneggiarli. Ulteriori prove sono state eseguite attraverso la presa di un elemento di forma irregolare, riportato in 6.15 che è stato afferrato sia lungo il lato maggiore che minore. E' molto interessante notare come le dita si autoadattino alla forma dell'oggetto.

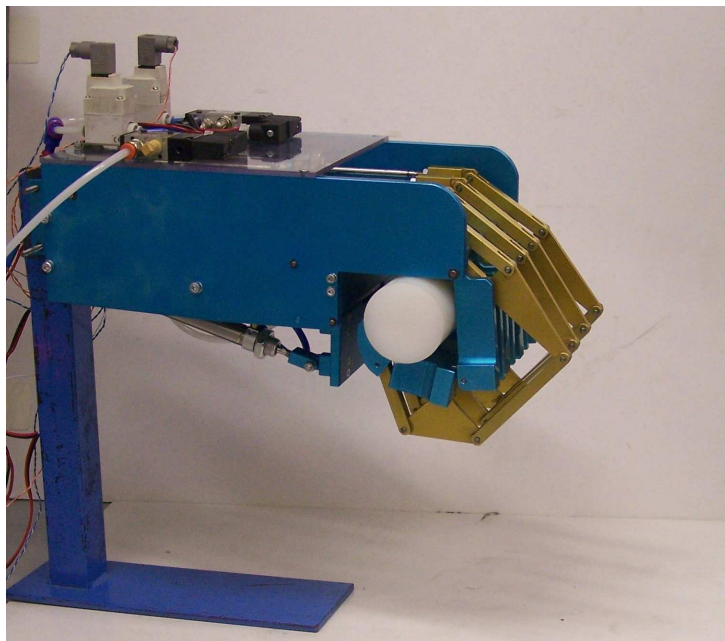


(a)

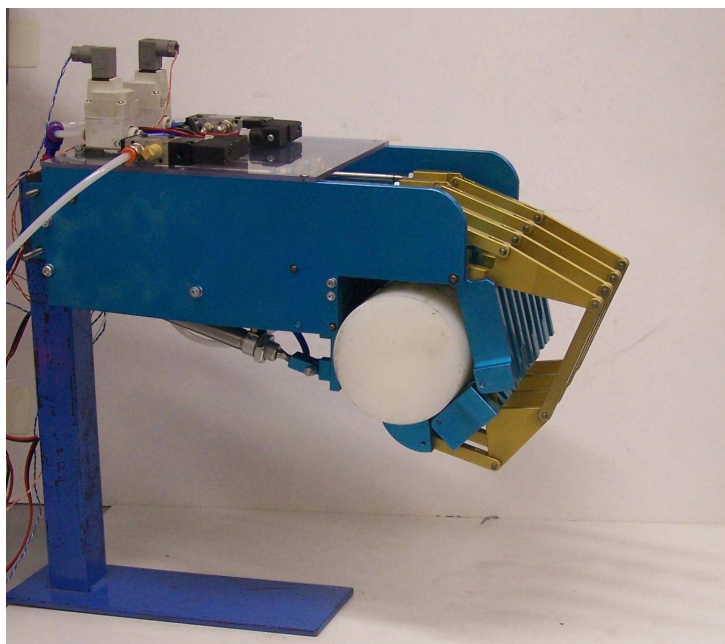


(b)

Fig. 6.12: Generica sequenza di presa su un oggetto di forma cilindrica; a) diametro dell'oggetto 41 mm; b) diametro dell'oggetto 51 mm.

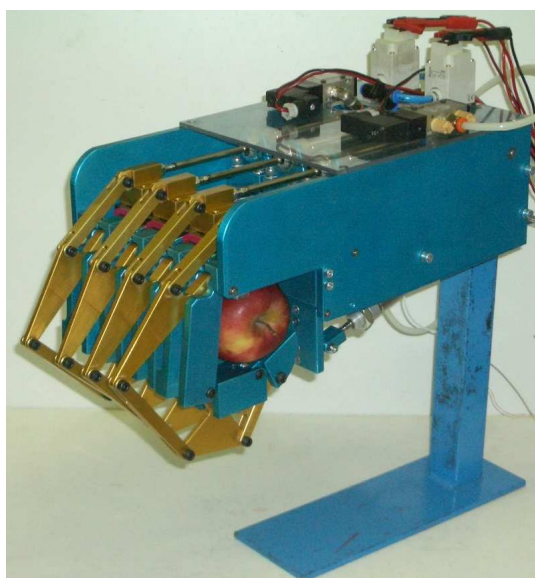


(a)

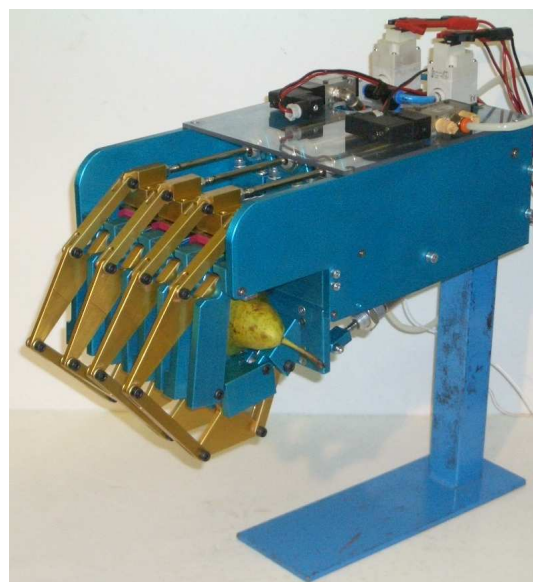


(b)

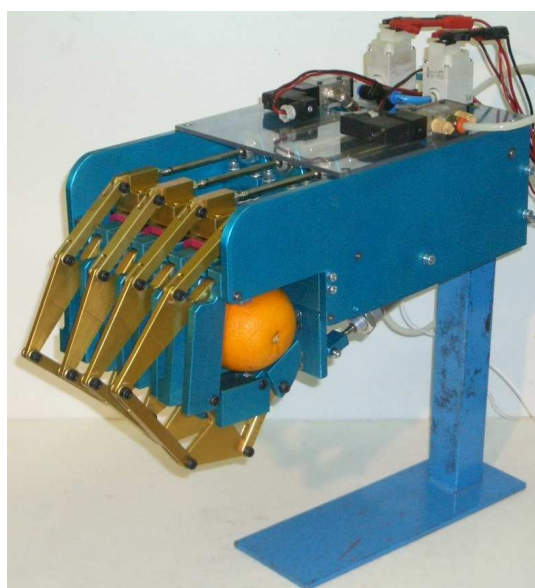
Fig. 6.13: Generica sequenza di presa su un oggetto di forma cilindrica; a) diametro dell'oggetto 62 mm; b) diametro dell'oggetto 100 mm.



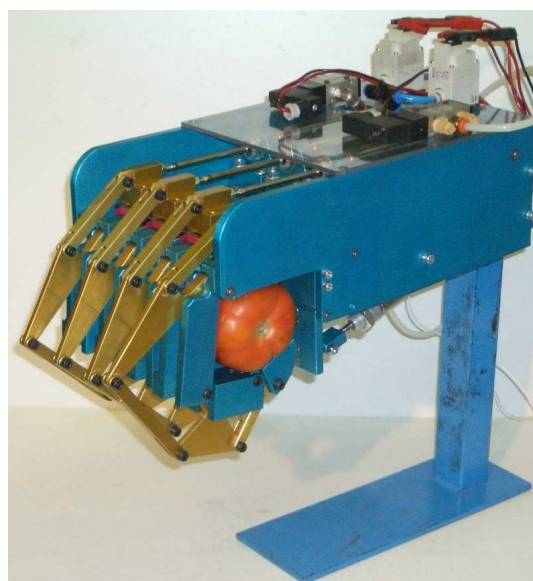
(a)



(b)

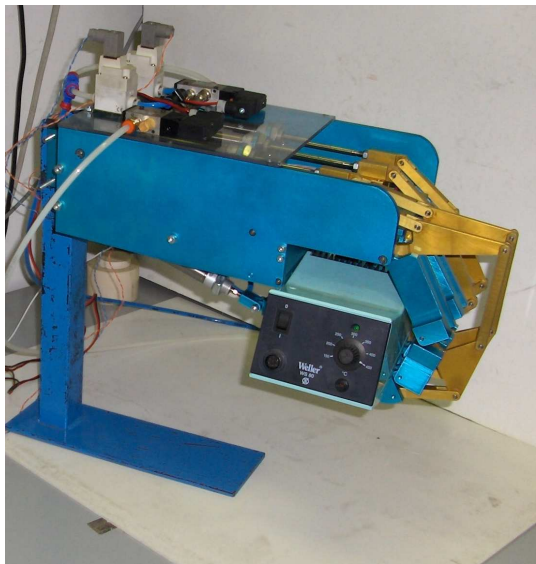


(c)

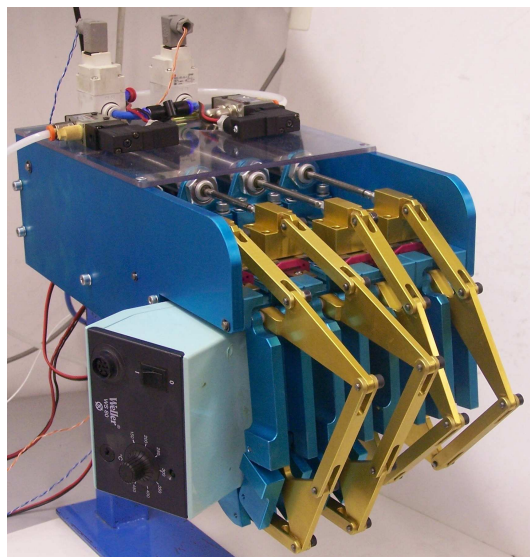


(d)

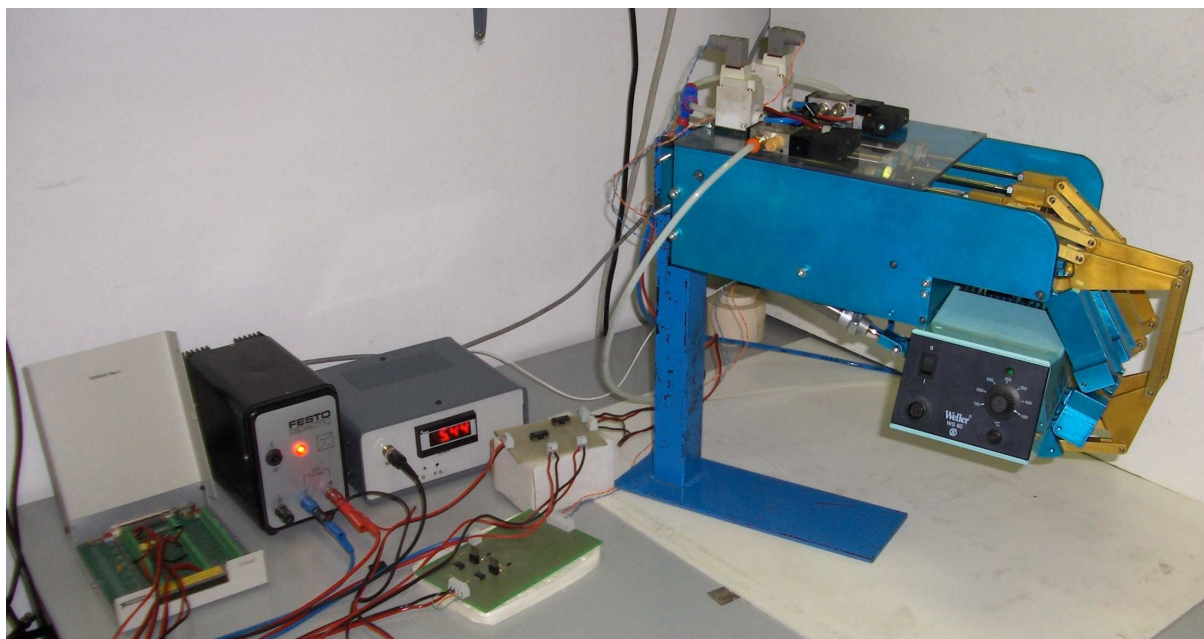
Fig. 6.14: Generica sequenza di presa su frutta ed ortaggio; a) mela; b) pera; c) arancio; d) pomodoro.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6.15: Presa di un oggetto di forma irregolare; a) esempio di presa lungo il lato maggiore; b) esempio di presa lungo il lato minore; c) panoramica del banco prova.

Conclusioni

In questa tesi di dottorato è stato affrontato il progetto mecatronico della mano robotica Ca.U.M.Ha (Cassino-Underactuated-Multifinger-Hand). Questa mano robotica è costituita da quattro dita uguali ed un pollice di contrasto.

L'analisi della mano umana introdotta nel primo capitolo, ha permesso di evidenziare gli aspetti più importanti ai quali le mani robotiche si ispirano per svilupparne le stesse potenzialità.

La manipolazione umana, infatti, consiste di movimenti precisi e lenti, ma anche di azioni dinamiche in cui la natura del contatto tra le dita e l'oggetto da manipolare cambia dinamicamente. La mano umana riesce a cogliere tutti i vantaggi di questa azione dinamica durante la manipolazione grazie ad un efficacissimo e multiforme sistema sensoriale, il quale, legato all'unità di controllo e di governo, rappresentato dal cervello, è capace di realizzare azioni manipolative di difficile imitazione da parte dei più sofisticati sistemi mecatronici. E' chiaro, quindi, che alla base dello sviluppo di mani robotiche c'è proprio l'emulazione dello schema logico di funzionamento della mano umana descritta nel Cap.1, alla quale si fa riferimento per lo sviluppo di mani robotiche o protesi di mano umane. Gli aspetti caratteristici fondamentali delle dita robotiche, possono essere riassunti in:

- *struttura meccanica e articolazioni.* La mano umana presenta una struttura di tipo endoscheletrica, cioè, le ossa, tenute insieme dai legamenti, fungono da supporto per i muscoli ed i tendini che servono ad azionare il dito stesso. Al contrario, nella maggior parte delle mani robotiche la struttura è di tipo esoscheletrica, cioè rigida e cava, in modo tale da contenere all'interno il sistema di trasmissione. La concezione meccanica tradizionale usa soluzioni tecniche come perni e cuscinetti di vari tipo, funzionalmente adatte a moti rotatori di ampiezza illimitata. I modelli bio-

logici, invece, presentano un uso molto finalizzato di coppie cinematiche essenziali, di scorrimento o di rotolamento, destinate a moti relativi di ampiezza limitata, con integrazione funzionale di legamenti e tendini;

- *il sistema di trasmissione.* In molte mani robotiche il percorso dei tendini, dagli attuatori remoti fino ai giunti da azionare, viene guidato mediante treni di pulegge allo scopo di eliminare gli effetti dell'attrito; il modello biologico vede invece i tendini guidati entro guaine lubrificate;
- *il sistema di attuazione.* L'utilizzo di un sistema di attuazione basato su attuatori elettromagnetici tradizionali (macroattuatori) limita notevolmente il numero di gradi di libertà (g.d.l.), poiché è difficile disporre di più di uno o due attuatori per ogni dito all'interno della mano. Il limitato numero di g.d.l. comporta l'impossibilità, da parte della mano, di avvolgersi intorno all'oggetto afferrato durante un generico compito di presa. Le caratteristiche geometriche rimangono invariate qualsiasi sia l'oggetto che l'utente desidera afferrare, ne consegue che l'area di contatto tra oggetto e mano risulta limitata. Di conseguenza il dispositivo deve esercitare una forza di presa elevata per garantire una presa stabile.

Per la progettazione della mano robotica Ca.U.M.Ha. si è dato particolare importanza a questi aspetti, in modo da ottenere una mano robotica con una elevata capacità di presa. L'elevata adattabilità della mano all'oggetto in presa, mantenendo le dimensioni del dispositivo entro livelli accettabili, è stata ottenuta utilizzando un meccanismo sotto-attuato a link rigidi. Tale scelta infatti ha permesso di aumentare le prestazioni della mano, e allo stesso tempo ha permesso di ridurre i costi. Sono stati infatti usati un numero di attuatori minore rispetto ai g.d.l. complessivi posseduti dalla mano. Il prototipo realizzato è in grado di avvolgere gli oggetti da afferrare e di adattarsi alla loro forma automaticamente, sebbene ciascun dito sia controllato da un numero di attuatori ridotto.

Il controllo del dispositivo risulta essere piuttosto semplice in quanto l'adattamento avviene in maniera automatica, e non deve essere gestito dall'unità di controllo.

Nel meccanismo sotto-attuato adottato alcuni attuatori sono stati sostituiti da molle torsionali e fine corsa meccanici. Questi elementi sono compatti, leggeri e permettono una riduzione del numero di attuatori. La loro funzione è stata quella di fungere da attuatori passivi, che aumentano l'adattabilità passiva del meccanismo alla forma dell'oggetto afferrato, ma senza la necessità di controllo aggiuntivo.

Per la realizzazione della mano robotica Ca.U.M.Ha, la scelta della tipologia di sistema di trasmissione è ricaduta su un meccanismo a link rigidi. Le motivazioni che hanno indotto a scegliere tale tipologia di meccanismo possono essere individuate nelle caratteristiche intrinseche del meccanismo a link rigidi. Gli obiettivi principali ottenuti nella realizzazione della Ca.U.M.Ha attraverso l'utilizzo di questo meccanismo sono:

- struttura di tipo endoscheletrica, con conseguente semplicità di montaggio;
- aspetto robusto, versatile, compatto, e con una certa semplicità di manutenzione.

La progettazione complessiva della mano robotica Ca.U.M.Ha. è stata affrontata nell'ottica di ottenere la massima integrabilità dei vari sottosistemi dei quali è composta. Ca.U.M.Ha. presenta quattro dita articolate con tre falangi ed un pollice semplificato con una sola falange, dove ciascun dito è azionato da un cilindro pneumatico a doppio effetto.

Le caratteristiche complessive della mano consentono quindi di effettuare la presa di oggetti aventi forme e dimensioni non regolari, infatti ogni dito è indipendente degli altri, e questo conferisce delle prestazioni eccellenti.

Il controllo della forza di presa è stato ottenuto attraverso la realizzazione di un servosistema per il controllo della pressione. Attraverso l'utilizzo del software di programmazione LabView e di opportune schede elettroniche di interfaccia, è stato realizzato il servosistema di controllo della pressione.

Nell'ottica di voler ottenere una regolazione della pressione di tipo alternativo a quella

proporzionale ed in più caratterizzata da costi di realizzazione molto bassi, la scelta della valvola di alimentazione è ricaduta su una tipologia di valvole digitali 2/2 (due vie/due posizioni di lavoro) modulate. Sono state utilizzate due valvole gestite attraverso la tecnica di modulazione PWM (Pulse Width Modulation). E' stato realizzato uno specifico programma in LabView che realizzasse la modulazione PWM e la gestione complessiva della mano. Attraverso tale tecnica si è ottenuta una portata di fluido transitante, variabile con continuità in modo equivalente ad una valvola proporzionale in flusso 3/2. I vantaggi di tale scelta sono legati sostanzialmente al basso costo delle valvole digitali ed alla relativa semplicità dell'elettronica di controllo. Le prestazioni del servosistema realizzato sono perfettamente comparabili con quelle dei servosistemi presenti in letteratura e che sfruttano la stessa tecnologia. Per effettuare i test sperimentali al fine di verificare le prestazioni della mano robotica Ca.U.M.Ha, è stato realizzato un banco prova apposito. Ciò ha comportato alcune modifiche al servosistema per il controllo della pressione, con il fine di integrare a bordo della struttura della mano tutti i dispositivi necessari. La prima operazione eseguita è stata sostituzione del serbatoio da laboratorio con uno realizzato appositamente, in modo da poter collegare tutte le camere posteriori dei cilindri delle dita ed inserire il trasduttore di pressione. Inoltre, sono state aggiunte due valvole pneumatiche, per gestire la camera anteriore dei cilindri e per azionare il pollice. Tali adattamenti hanno permesso di realizzare il sistema mecatronico completo.

I dati sperimentali, ottenuti sulla gestione della pressione nel serbatoio, mostrano il corretto funzionamento della mano durante le varie fasi di presa. Infatti sono stati condotti test di presa su vari oggetti di varia natura e con diverse forme e dimensioni. I risultati sono buoni in quanto la presa degli oggetti avviene in maniera stabile e precisa, senza danneggiare la superficie esterna degli stessi, anche nel caso in cui siano afferrati oggetti delicati.

Bibliografia

[Kapandji, 1974]

Kapandji I. A. (1974). *Fisiologia articolare, schemi commentati di meccanica umana*. Demi, Roma.

[Figliolini e Ceccarelli, 2002]

Figliolini G., Ceccarelli M., (2002). A Novel Articulated Mechanism Mimicking the Motion of Index Fingers, *International Journal of Robotica*, 20, pp.13–22.

[Jobin et al., 2004]

Jobin J.P., Buddenberg H.S., Herder J.L., (2004). An Underactuated Prothesis Finger Mechanism with Rolling Joints. *Proceedings of DETC ASME, 28th Biennial Mechanisms Conference*, Sept 28 - Oct 2, Salt Lake City, Utah.

[Carrozza et al., 2002]

Carrozza M.C., Massa B., Micera S., Lazzarini R., Zecca M. e Dario P. (2002). The Development of a Novel Prosthetic Hand Ongoing Research and Preliminary Results. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 7(2), pp.108-114.

[Lotti e Vassura, 2002]

Lotti F., Vassura G., (2002). Sviluppo di soluzioni innovative per la struttura meccanica di dita articolate per mani robotiche. *AIAS - Associazione nazionale per l'analisi delle sollecitazioni*, Settembre 2002, Parma.

[Figliolini e Ceccarelli, 1998]

Figliolini G., Ceccarelli M., (1998). A Motion Analysis for One d.o.f. Anthropomorphic

Finger Mechanism. *Proceedings of, 25th ASME Biennial Mechanisms Conference*, Sept 13-16, Atlanta Georgia.

[Namiki et al., 2003]

Namiki A., Imai Y., Ishikawa M., Kaneko M. (2003). Development of a High-Speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching. *Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, Nevada, pp.2666–2671.

[Imai et al., 2004]

Imai Y., Namiki A., Hashimoto K., Ishikawa M., (2004). Dynamic Active Catching Using a High-speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2004*, New Orleans, (USA), pp.1849-1854.

[Ishikawa Namiki Komuro Laboratory, 2006]

Ishikawa Namiki Komuro Laboratory, (2006).

[http : //www.k2.t.u – tokyo.ac.jp/fusion/HighspeedHand/index – e.html](http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/HighspeedHand/index-e.html).

[DLR Institute, 2006]

DLR, Institute of Robotics and Mechatronics, (2006).

[http : //www.dlr.de/rm/en/Desktopdefault.aspx/tabid – 398/](http://www.dlr.de/rm/en/Desktopdefault.aspx/tabid-398/).

[Butterfas et al., 2001]

Butterfas J., Grebenstein M.,Liu H., Hirzinger G. (2001). DLR hand II: Next Generation of a Dextrous Robot Hand. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2001*, Seoul, Korea, pp.109–114.

[Borst et al., 2003]

Borst C., Fisher Y., Haidacher S.,Liu H., Hirzinger G. (2003). DLR hand II: Experiments and Experiences with an Antropomorphic Hand. In *Proceedings of the 2003*

IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2003, Taipei, Taiwan, pp.702–707.

[Jacobsen et al., 1986]

Jacobsen S., Iversen E., Knutti D., Johnson R., Biggers K., (1986). Design of the Utah/M.I.T. Dextrous Hand. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1520–1532.

[Salisbury e Craig, 1981]

Salisbury J. K., Craig J. J., (1981). Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues. *Joint Automatic Control Conference*, Charlottesville, (USA), pp.17–19.

[Rodriguez et al., 2006]

Rodriguez N.E.N., Carbone G., Ceccarelli M. (2006). Optimal Design of Driving Mechanism in a 1 dof Antropomorphic Finger. *Mechanism and Machine Theory*, 41, pp.897–911.

[Rodriguez et al., 2004]

Rodriguez N.E.N., Carbone G., Ottaviano E., Ceccarelli M. (2004). An Experimental Validation of a Three - Fingered Hand with 1 dof Antropomorphic Fingers. *Intelligent Manipulation and Grasping, IMG 2004*, Genova, Italy, pp.285–290.

[Laliberté e Gosselin, 1998]

Laliberté T., Gosselin C., (1998). Simulation and Design of Underactuated Mechanical Hands. *Mechanisms and Machines theory*, 33(1/2) pp.39-57.

[Massa et al., 2001]

B. Massa, S. Roccella, R. Lazzarini, M. Zecca, M. C. Carrozza, P. Dario, (2001). Una Protesi di Arto Superiore Innovativa. *Ortho 2000*, Vol.3, n.4.

[Crisman, 1996]

Crisman J.D., (1996). Robot Arm End Effector, 1996. US Patent n. 5570920.

[Crisman et al., 1996]

Crisman J.D., Kanojia C., Zeid I., (1996). Gaspar: A flexible, Easily Controllable Robotic Hand. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 3(2), pp.32-38.

[Nasser et al., 2006]

Nasser S., Rincon D., Rodriguez M., (2006). Design of an Anthropomorphic Underactuated Hand Prosthesis with Passive-Adaptive Grasping Capabilities. *Conference on Recent Advances in Robotics, FCRAR*, May, n.2, pp.1-8.

[Koganezawa, 2004]

Koganezawa K., (2004). Artificial Finger with Shape-Fitting Mechanism. *Intelligent Manipulation and Grasping, IMG*, July 1-2, Genova, Italy, pp.103-109.

[Carrozza et al., 2004]

Carrozza M.C., Suppo C., Sebastianini F., Massa B., Vecchi F., Lazzarini R., Cutkosky M.R. e Dario P. (2004). The SPRING Hand: Development of a Self-Adaptive Prosthesis for Restoring Natural Grasping. *Journal of Autonomous Robot*, 16, pp.125-141.

[Gosselin e Laliberté, 1998]

Gosselin C., Laliberté T., (1998). Underactuated Mechanical Finger With Return Actuation. *U.S.Patent*, Patent number 5.762.390.

[Università di Laval, 2006]

Università di Laval, Laboratorio di robotica (2006).

[http : //wwwrobot.gmc.ulaval.ca/recherche/theme04 – a.html](http://wwwrobot.gmc.ulaval.ca/recherche/theme04-a.html).

[Dechev et al., 2001]

Deshev N., Cleghorn W.L., Naumann S., (2001). Multiple Fingher, Passive Adaptive Grasp Prosthetic Hand. *Mechanisms and Machines Theory*, 36(10) pp.1157-1173.

[Figliolini e Rea, 2006]

Figliolini G., Rea P., (2006). Overall Design of Ca.U.M.Ha. Robotic Hand. *Robotica*, 24 (3), pp.329–331.

[Figliolini et al., 2003]

Figliolini G., Rea P., Principe M., (2003). Mechatronic Design of Ca.U.M.Ha (Cassino-Underactuated-Multifinger-Hand). *12th RAAD Workshop on Robotics and Alpe-Adria-Danube Region*, Cassino, paper: 026RAAD03.

[Hamilton et al, 2002]

Hamilton R., Dunsmuir R.A., (2002). Radiographic Assessment of the Relative Lengths of the Bones of the Fingers of the Human Hand. *The Journal of Hand Surgery*, 27B(6), pp.546–548

[Kamper et al, 2002]

Kamper D. G., Hornby T.G., Zymer W.Z.(2002). Extrinsic Flexor Muscles Generate Concurrent Flexion of all Three Finger Joints. *Journal of Biomechanics*, 35(6), pp.1581–1589.

[Sunil et al, 2003]

Sunil T. M., Orth M. S., Orth D.N.B. (2003). Clinical Indicators of Normal Thumb Length in Adults. *The Journal of Hand Surgery*, 26, pp.489–493

[Chiu et al, 2000]

Chiu H-Y., Lin S-C., Su F.C., Wang S.T., Hsu H-Y. (2000). The Use of the Motion Analysis System for Evaluation of Loss of Movement in the Finger. *The Journal of Hand Surgery*, 25B(2), pp.195–199

[Freudenstein, 1955]

Freudenstein F., (1955). Approximate Synthesis of Four-Bar Linkages. *Transactions of the ASME*, 77, pp.853–861.

[Gosselin e Angeles, 1989]

Gosselin C., Angeles J., (1989). Optimization of Planar and Spherical Function Generators as Minimum-Defect Linkages. *Mechanism and Machine Theory*, 24, pp.293–307.

[Sutherland e Roth, 1973]

Sutherland G., Roth B., (1973). A Transmission Index for Spatial Mechanisms. *ASME Journal of Engineering Industry*, May 1973, pp.589–597.

[Angeles e Bernier, 1987]

Angeles J., Bernier A., (1987). The Global Least-Square Optimization of Function-Generating Linkages. *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, 109, pp.204–209.

[Rea, 2002]

Rea P., (2002). Analisi di una Valvola Digitale Modulata in PWM. *Tesi di Laurea*.

[Benvenuto, 1984]

Benvenuto R., (1984). *Telegrafia Telefonia Ponti Radio*. Ed. La Sovran.

[Veronesi, 2006]

Veronesi M., (2006). *Regolazione PID, Fondamenti teorici, Tecniche di taratura, applicazioni di controllo*. Ed. Franco Angeli

[Luo et al., 2004]

Luo M., Mei T., Wang X., Yu Y., (2004). Grasp Characteristics of an Underactuated Robot Hand. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2004*, New Orleans, (USA), pp.2236-2241.

[Birglen e Gosselin, 2005]

Birglen L., Gosselin C.M., (2005). Fuzzy Enhanced Control of an Underactuated Finger Using Tactile and Position Sensors. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2005*, Barcelona, (Spain) pp.2320-2325.

[Stellin et al., 2006]

Stellin G., Cappiello G., Roccella S., Carrozza M.C., Dario P., Metta G., Sandini G., Becchi F., (2006). Preliminary Design of an Anthropomorphic Dexterous Hand for a 2-Years-Old Humanoid: Towards Cognition. *The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2006.*, pp.290-295.

[Chevallereau et al., 2004]

Chevallereau C., Grizzle J.W., Moog C.H., (2004). Non Linear Control of Mechanical Systems with One Degree of Underactuation. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2004*, New Orleans, (USA), pp.2222-2228.

[Schultz et al., 2001]

Schultz S., Pylatiuk C., Bretthauer G., (2001). A New Ultralight Anthropomorphic Hand. *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2001*, Seoul, (Korea), pp.2437-2441.

[Wenzeng et al., 2004]

Wenzeng Z., Chen Q., Sun Z., Khao D., (2004). Passive Adaptive Grasp Multi-Fingered Humanoid Robot Hand with High Under-actuated Function. *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2004*, New Orleans, (USA), pp.2222-2228.

[Birglen et al., 2003]

Birglen L., Gosselin C.M., (2003). On the Force Capability of Underactuated Fingers. *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2003*, Taipei, (Taiwan) pp.1139-1145.

[Bicchi, 2000]

Bicchi A., (2000). Hands for Dexterous Manipulation and Robust Grasping: a Difficult

Road Toward Simplicity. *IEEE/ASME Transaction on Robotics and Automation*, 16(6), pp.652-662.

[Francisco, 2000]

Francisco J. V. C., (2000). Applying Principles of Robotics to Understand the Biomchanics, Neuromuscular Control and Clinical Rehabilitation of Human Digits. *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2000*, San Francisco, (USA), pp.270-275.

[Taylor e Schwartz, 1955]

Taylor C.L., Schwartz R.J., (1955). The Anatomy and Mechanics of the Human Hand. *Artificial Limbs*, 2 pp.22-35.

[Casolo e Lorenzi, 1990]

Casolo F., Lorenzi V., (1990). Criteri di scelta e Ottimizzazione di Modelli per la Simulazione del Dito Umano. *X Congresso Nazionale dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica ed Applicata (AIMETA-90)*, Pisa (Italy), pp.415-420.

[Raparelli et al., 2000]

Raparelli T., Mattiazzo G., Mauro S., Velardocchia M. , (2000). Pneumatic Anthropomorphic Hand. *Journal of Robotic Systems*, 17(1) pp.1-15.

[Birglen et al., 2004]

Birglen L., Gosselin C.M., (2004). Kinetostatic Analysis of Underactuated Fingers. *Transaction on Robotics and Automation*, 20(2), pp.211-221.

[Reggiani et al., 2005]

Reggiani B., Zucchelli A., Vassura G., (2005). Modellazione numerica di articolazioni cedevoli per dita di mani robotiche. *Associazione Italiana per l'analisi delle Sollecitazioni, XXXIV Convegno Nazionale*, paper n.ro 022.

[Lotti et al., 2004]

Lotti F., Tiezzi P., Vassura G., Biagiotti L., Melchiorri C., Palli G., (2004). UBH 3: A Biologically Inspired Robotic Hand. *Proc. of IEEE International Conference on Intelligent Manipulation and Grasping (IMG 04)*, Genova, Italy, pp. 39–45.

[Haulin e Vinet, 2003]

Haulin E.N., Vinet R., (2003). Multiobjective Optimization of Hand Prothesis Mechanisms *Mechanism and Machine Theory*, 38, pp.3–26.

[Lee et al., 2001]

Lee H.J., Yi B.J., Oh S.R., Suh I.H., (2001). Optimal Design and Development of a Five-Bar Finger with Redundant Actuation *Mechatronics*, 11, pp.27–42.

[Rea e Figliolini, 2005]

Rea P., Figliolini G., (2005). Synthesis and Optimization of an Underactuated Finger Mechanism. *9th SYROM, International Symposium on Theory of Machines and Mechanisms*, Bucharest (Romania), pp.747–752.

[Rash et al., 19991]

Rash G.S., Belliappa P.P., Wachowiak M.P., Somia N.N., Gupta A., (1999). A Demonstration of the Validity of a 3-D Video Motion Analysis Method for Mesuring Finger Flexion and Extension, *Journal of Biomechanics*, 32, pp.1337–1341.

[Yamano e Maeno, 2005]

Yamano I., Maeno T., (2005). Five Fingered Robot Hand using Ultrasonic Motors and Elastic Elements. *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2005*, Barcelona, (Spain), pp.2673-2678.

[Haulin et al., 2001]

Haulin E.N., Lakis A.A., Vinet R., (2001). Optimal Synthesis of a Planar Four-Link Mechanism used in a Hand Prosthesis *Mechanism and Machine Theory*, 36, pp.1203–1214.

[Su et al., 2003]

Su F-C., Kuo L.C., Chiu H.Y., Chen-Sea M.J., (2003). Video-Computer Quantitative Evaluation of Thumb Function using Workspace of the Thumb, *Journal of Biomechanics*, 36, pp.937–942.

[Yun et al., 2002]

Yun M.H., Eoh H.J., Cho J., (2002). A Two Dimensional Dynamic Finger Modeling for the Analysis of Repetitive Finger Flexion and Extension *Journal of Industrial Ergonomics*, 29, pp.231–248.

[Schweizer et al., 2003]

Schweizer A., Frank O., Ochsner P.E., Jacob H.A.C., (2003). Friction Between human Finger Tendons and Pulleys at High loads, *Journal of Biomechanics*, 36, pp.63–71.

[Pastorelli et al., 2005]

Pastorelli S., Figliolini G., Rea P. and Sorli M., (2006). Metodologie di Modellazione di Valvole a Due Vie ad Elevata Dinamica, *Associazione Italiana per l'analisi delle Sollecitazioni, XXXIV Convegno Nazionale*.

[Sorli e Quaglia, 1996]

Sorli M., Quaglia G. (1996). Applicazioni di Meccatronica, *C.L.U.T. Editrice*, Torino.

[Sorli et al., 2003]

Sorli M., Figliolini G., Pastorelli S., (2003). Modeling and experimental validation of a two-way pneumatic digital valve *Bath Workshop on Power Transmission e Motion Control*, TMC 2003, pp.291-305

[Figliolini e Rea, 2004]

Figliolini G., Rea P., (2004). Actuation Force Control of Ca.U.M.Ha. Robotic Hand Through PWM Modulated Pneumatic Digital Valves. *3rd FPNI - PhD Symposium on Fluid Power*, Terrassa (Spagna), pp.150–156.

[Figliolini e Rea, 2006]

Figliolini G., Rea P., (2006). Closed-Loop Pressure Control Through PWM Modulated Pneumatic Digital Valves. *8th International Conference on Mechatronics and Precision Engineering (COMEFIM'8)*, Cluj-Napoca (Romania), pp.2874–292.

Elenco delle figure

1.1	Adattabilità della mano umana,[Kapandji, 1974].	6
1.2	Le articolazioni metacarpo falangee,[Kapandji, 1974].	8
1.3	Le articolazioni inter-falangee,[Kapandji, 1974].	10
1.4	Le articolazioni inter-falangee,[Kapandji, 1974].	11
1.5	Il percorso dei tendini,[Kapandji, 1974].	13
1.6	Struttura della guaina di un tendine; a) guaina viscerale a contatto con il tendine; b) guaina parietale non a contatto con il tendine; c) cavità chiusa; d) estremità della guaina; e) diaframma longitudinale.,[Kapandji, 1974]. . .	14
1.7	I tendini dei muscoli flessori delle dita, [Kapandji, 1974].	14
1.8	Disposizione dei tendini dei muscoli flessori delle dita: a) vista frontale e sezione; b) vista 3-D dei collegamenti, [Kapandji, 1974].	15
1.9	I tendini flessori comuni, [Kapandji, 1974].	16
1.10	Muscoli interossi e lombricali,[Kapandji, 1974].	19
1.11	L'estensione delle dita,[Kapandji, 1974].	20
1.12	Vista schematica delle vie neurali di azionamento della mano e delle vie sensitive.	22
2.1	Adattabilità della mano umana.	24
2.2	Schema del dito con struttura endoscheletrica.	26
2.3	Schema del dito con struttura esoscheletrica.	27
2.4	Alcune tipologie di giunti per mani robotiche.	27

2.5	Esempi di giunti rotolanti; a) principio di funzionamento, lungo un asse è posta una fascia flessibile rigida e lungo l'altro asse una fascia flessibile compliant, precaricate l'una contro l'altra; b) prototipo con una lamina di metallo in un senso e un O-ring nell'altro senso; c) prototipo con le lamine di Dyneema (Fibra polietilenica HT) in un senso e O-ring nell'altro; d) prototipo con lamine di Dyneema in entrambi i sensi.	29
2.6	Sistema di azionamento nelle mani umane.	30
2.7	Sistema di trasmissione mediante pulegge(Spring Hand).	30
2.8	Sistema di azionamento mediante cavi: prototipo costituito da due dita e un pollice.	31
2.9	Sistema di azionamento mediante cavi: schema cinematico del solo dito. . .	31
2.10	Mano robotica Postech Hand V.	32
2.11	Mano robotica Postech Hand V, particolare del macro attuatore.	32
2.12	High speed hand, [Ishikawa Namiki Komuro Laboratory, 2006].	34
2.13	Schema costruttivo della mano robotica ad alta velocità: a) vista dall'alto; b) vista laterale; c) vista frontale.	35
2.14	Varie possibilità di presa: a) presa sferica circolare; b) presa circolare; c) presa prismatica; d) presa pollice-indice e) presa pollice-pollice f) presa laterale-laterale.	36
2.15	Sistema di visione adottato: a) posizionamento relativo sistema di visione-mano; b) foto del sistema di visione e particolare dell'immagine acquisita. .	37
2.16	Foto della mano DLR [DLR Institute, 2006]; a) DLR I; b) DLR II.	38
2.17	Sensore montato all'estremità del dito della mano DLR II; a) struttura meccanica; b) foto.	40
2.18	Mano robotica Utah/Mit hand.	41
2.19	Mano robotica stanford / JPL.	43
2.20	Mano robotica Larm hand: particolare del dito.	45

2.21	Mano robotica LARM hand in presa su un oggetto cilindrico.	45
3.1	Generica sequenza di presa su un oggetto di forma regolare: a) inizio della fase di presa; b) prima falange a battuta; c) seconda falange a battuta; d) terza falange a battuta.	49
3.2	Generica sequenza di presa su un oggetto di forma irregolare; a) inizio della fase di presa; b) prima falange a battuta; c) seconda falange a battuta; d) terza falange a battuta.	51
3.3	Sotto-attuazione con un sistema a cavi; a) mano robotica Gaspar; b) particolare del sistema di trasmissione del dito.	52
3.4	Esempio di sotto-attuazione con meccanismo a link rigidi, SARAH hand. .	53
3.5	Esempio di meccanismi differenziali.	54
3.6	Schema di un sistema di trasmissione con meccanismo differenziale. . . .	54
3.7	Riduttore epicicloidale adottato.	55
3.8	Trasmissione mista con meccanismo differenziale e quadrilatero; a) accostamento; b) link 1 in battuta; c) link 3 e 5 in battuta.	56
3.9	Architettura e foto della mano RTRI.	58
3.10	Foto della mano RTR II.	59
3.11	Foto della mano RTR III.	60
3.12	Foto della mano SARAH con 12 g.d.l..	61
3.13	Foto della mano SARAH con 10 g.d.l., [Università di Laval, 2006].	62
3.14	Foto della mano SARAH con attuazione pneumatica.	63
3.15	Foto della mano TBM.	64
3.16	Links del meccanismo non assemblato della mano TBM.	64
3.17	Meccanismo assemblato della mano TBM.	65
3.18	Dito ad un grado di libertà della mano TBM.	65
3.19	Range di mobilità del pollice.	66
3.20	Schema del sistema di sotto attuazione utilizzato.	66

3.21	Schema complessivo dell'azionamento della mano.	67
4.1	Foto della mano robotica Ca.U.M.Ha.	68
4.2	Schema semplificato per il meccanismo della dito adottato	70
4.3	Misura di massima dei range di movimento del dito indice della mano umana; a) rotazione della prima falange; b) rotazione della seconda falange; c) rotazione della terza falange.	72
4.4	Schema semplificato del meccanismo della dito adottato in presa su un oggetto di forma irregolare	73
4.5	Simulazione matlab della sequenza di chiusura del meccanismo considerato	74
4.6	Analisi della presa per oggetti cilindrici di varie dimensioni.	76
4.7	Meccanismo del dito sottoattuato progettato.	77
4.8	Schema cinematico del quadrilatero $ABCD$	78
4.9	Evoluzione della funzione obiettivo f_1	81
4.10	Diagramma dell'angolo di trasmissione μ_1 del quadrilatero $ABCD$ per la soluzione ottenuta dalla sintesi ottima.	81
4.11	Schema cinematico del quadrilatero $BEFG$	82
4.12	Evoluzione della funzione obiettivo f_2	84
4.13	Diagramma dell'angolo di trasmissione μ_2 del quadrilatero $BEFG$ per la soluzione ottenuta dalla sintesi ottima.	85
4.14	Schema cinematico del manovellismo EHI	86
4.15	Evoluzione della funzione obiettivo f_3 del manovellismo EHI	88
4.16	Diagramma dell'angolo di trasmissione μ_3 del manovellismo EHI per la soluzione ottenuta con la sintesi ottima.	88
4.17	Schema di riferimento per l'analisi di posizione del dito.	90
4.18	Simulazione in Matlab della sequenza di chiusura nel piano XY per differenti valori di diametro dell'oggetto in presa; a) $D = 47$ mm; b) $D = 48$ mm; c) $D = 55$ mm; d) $D = 78$ mm; e) $D = 85$ mm; f) $D = 90$ mm. . .	93

4.19	Schema con le dimensioni dei link adottate per la realizzazione del dito. . .	95
4.20	Schema 3D del dito in configurazione completamente chiusa.	95
4.21	Schema 3D del dito in configurazione completamente aperta.	96
4.22	Vista 3D esplosa del dito: S_1 e S_2 molle torsionali tra le falangi 1 e 2 e 2 e 3; 1) prima falange, 2) seconda falange, 3) terza falange, 4) palmo, 5) meccanismo di trasmissione, 6) attuatore pneumatico.	97
4.23	Vista 3D del dito e schema cinematico.	97
4.24	Sezione del dito senza meccanismo di trasmissione.	98
4.25	Viste della Falange 1.	99
4.26	Vista 3D e sezione della Falange 1.	99
4.27	Viste della Falange 2.	101
4.28	Vista 3D e sezione della Falange 2.	101
4.29	Viste della Falange 3.	102
4.30	Vista 3D e sezione della Falange 3.	102
4.31	Viste del palmo.	104
4.32	Sezione del palmo.	104
4.33	Vista dal basso del palmo.	105
4.34	Switch utilizzato.	105
4.35	Schema e posizionamento della piastra di protezione dello switch.	105
4.36	Vista 3D della mano robotica; 1) dita, 2) meccanismo di trasmissione, 3) attuatori, 4) sistema di fissaggio, 5) piastre laterali, 6) serbatoio, 7) attuatore del pollice, 8) battuta meccanica, 9) pollice.	106
4.37	Vista 3D esplosa della struttura della mano robotica.	107
4.38	Particolare del serbatoio e del tappo realizzato.	108
4.39	Vista della collocazione del pollice.	108
4.40	Primo prototipo realizzato.	109
4.41	Secondo prototipo realizzato.	110

4.42	Terzo prototipo realizzato.	110
4.43	Quarto prototipo del dito realizzato, versione definitiva.	111
4.44	Quarto prototipo del dito definitivo in una prova di presa.	111
5.1	Vista 3D della mano robotica con lo schema di controllo: a) controllo pressione con tecnica PWM; b) controllo pressione nella camera anteriore del cilindro; c) apertura e chiusura del pollice; d) gestione dei sensori di prossimità delle prime falangi	114
5.2	Schema di funzionamento della modulazione PWM	116
5.3	Esempio di modulazione PWM.	117
5.4	Schema di valvole digitali azionate da un driver PWM.	119
5.5	Caratteristica del PWM Driver.	119
5.6	Andamento della portata per differenti valori di V_{rif}	121
5.7	Legame tra la tensione di riferimento V_{rif} e la portata Q , nel caso ideale	121
5.8	Esempio di modulazione PWM: a) segnale di comando V_{rif} sinusoidale; b) segnale di comando delle valvole V_1 e V_2 ; c) andamento della portata istantanea; d) andamento della portata equivalente transitante nelle valvole	123
5.9	Schema del circuito elettro-pneumatico per il controllo pressione in anello chiuso del serbatoio S	125
5.10	Foto del banco prova realizzato per il controllo pressione: 1) valvola in scarico; 2) valvola in carico; 3) serbatoio; 4) trasduttore di pressione; 5) sistema di condizionamento; 6) alimentatore 7) scheda SCB-68 8) scheda elettronica realizzata appositamente.	127
5.11	Schema elettrico del circuito realizzato	128
5.12	Simbolo pneumatico della valvola SMC	128

5.13	Spaccato assonometrico della valvola SMC: 1) corpo valvola; 2) membrana; 3) otturatore principale; 4) molla; 5) otturatore secondario; 6) supporto membrana; 7) circuito magnetico; 8) supporto bobina; 9) nucleo; 10) bobina; 11) coperchio valvola; 12) circuito di Speed-Up	130
5.14	Sezione della valvola dell'SMC chiusa.	131
5.15	Sezione della valvola dell'SMC aperta.	132
5.16	Lay-Out del circuito elettro-pneumatico complessivo gestito mediante il software LabView.	133
5.17	Pannello frontale del Labview realizzato per la gestione della mano: a) segnale PWM inviato alla mano; b) diagramma della pressione P_{set} ; c) indicatore del periodo di modulazione.	134
5.18	Diagramma a blocchi del LabView relativo al pannello frontale: a) generazione del segnale di pressione; b) acquisizione dei segnali provenienti dai sensori; c) blocco PID; d) generazione del segnale PWM da inviare alle valvole V_1 e V_2 ; e) gestione degli switch e del pollice; f) acquisizione dei dati.	136
5.19	Diagramma a blocchi del modulatore virtuale.	137
5.20	Pannello frontale del modulatore virtuale.	137
5.21	Verifica sperimentale del funzionamento del modulatore virtuale.	138
5.22	Andamento della caratteristica statica.	140
5.23	Schema a blocchi di un controllore di tipo PID.	141
5.24	Diagramma sperimentale delle pressioni P_{SET} e P_{OUT} al variare del K_p ; a) $K_p = 0,3$; b) $K_p = 0,9$	144
5.25	Diagramma sperimentale delle pressioni P_{SET} e P_{OUT} al variare del K_p ; a) $K_p = 1,8$; b) $K_p = 2,4$	145
5.26	Diagramma di Bode sperimentale con periodo di modulazione $T=50$ ms.	146
5.27	Diagramma di Bode sperimentale con periodo di modulazione $T=100$ ms.	147
5.28	Diagramma di Bode sperimentale con periodo di modulazione $T=200$ ms.	147

5.29	Validazione sperimentale della risposta in frequenza nel dominio del tempo per un segnale di P_{SET} sinusoidale con $f=0,1$ Hz, $A_v = 3$ bar rel. e $A = 2$ bar rel.; a) $T = 50$ ms b) $T = 100$ ms.	148
5.30	Validazione sperimentale della risposta in frequenza nel dominio del tempo per un segnale di P_{SET} sinusoidale con $f=1,5$ Hz, $A_v = 3$ bar rel. e $A = 2$ bar rel.; a) $T = 50$ ms b) $T = 100$ ms	149
5.31	Validazione sperimentale della risposta in frequenza nel dominio del tempo per un segnale di P_{SET} triangolare con $f=1,5$ Hz, $A_v = 3$ bar rel. e $A = 2$ bar rel.; a) $T = 50$ ms b) $T = 100$ ms	150
6.1	Banco prova sperimentale realizzato per la Ca.U.M.Ha.; 1) mano robotica che integra il sistema di controllo della pressione; 2) scheda elettronica per la gestione del pollice e della camera anteriore dei cilindri; 3) scheda elettronica per la gestione delle due valvole modulate in PWM; 4) sistema di condizionamento del trasduttore di pressione; 5) alimentatore a 24 V DC; 6) scheda esterna SCB-68 della National Instruments	152
6.2	Vista dall'alto della mano robotica; 1) valvola di carico V_1 ; 2) valvola di scarico V_2 ; 3) valvola per la gestione del pollice V_4 ; 4) valvola gestione camera anteriore dei cilindri V_3 ; 5) attuatori pneumatici; 6) meccanismo di trasmissione del moto; 7) dita robotiche.	153
6.3	Vista dal basso della mano robotica; 1) attuatori del pollice 2) serbatoio pneumatico; 3) collegamenti pneumatici; 4) meccanismo di azionamento del pollice; 5) sistema utilizzato per limitare la corsa del pollice; 6) posizione degli switch; 7) piastra di protezione degli switch; 8) e 9) molle torsionali. .	154
6.4	Vista frontale della mano robotica	155
6.5	Controllo pressione della mano robotica.	156
6.6	Andamento della tensione V_{PWM}	157
6.7	Particolare dell'andamento della tensione V_{PWM}	157

6.8	Andamento della tensione V_{PWM1}	158
6.9	Controllo pressione della mano robotica con oggetto in presa.	158
6.10	Andamento della tensione V_{PWM}	159
6.11	Particolare del controllo pressione della mano robotica con oggetto in presa.	159
6.12	Generica sequenza di presa su un oggetto di forma cilindrica; a) diametro dell'oggetto 41 mm; b) diametro dell'oggetto 51 mm.	161
6.13	Generica sequenza di presa su un oggetto di forma cilindrica; a) diametro dell'oggetto 62 mm; b) diametro dell'oggetto 100 mm.	162
6.14	Generica sequenza di presa su frutta ed ortaggio; a) mela; b) pera; c) arancio; d) pomodoro.	163
6.15	Presa di un oggetto di forma irregolare; a) esempio di presa lungo il lato maggiore; b) esempio di presa lungo il lato minore; c) panoramica del banco prova.	164

Elenco delle tabelle

1.1	Caratteristiche principali della mano umana	23
2.1	Dati tecnici della Mano Robotica High Speed	38
2.2	Dati tecnici della Mano Robotica DLR	40
2.3	Dati tecnici della mano robotica Utah/Mit hand	42
2.4	Dati tecnici della mano robotica Stanford / JPL	44
2.5	Dati tecnici della Mano Robotica LARM hand	46
3.1	Dati tecnici della mano robotica RTR III “spring hand ”	59
3.2	Dati tecnici della Mano Robotica SARAH con attuazione pneumatica . . .	62
4.1	Valori caratteristici adottati per il dito sottoattuato della mano robotica Ca.U.M.Ha.	71
4.2	Principali caratteristiche fisico-meccaniche del materiale utilizzato.	100
5.1	Valori sperimentali della caratteristica statica	139