

Università di Pisa



Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Meccanica

Sintesi

**PROGETTAZIONE E SVILUPPO DI UNA MANO  
ROBOTICA SOTTO-ATTUATA PER ROBOT UMANOIDE  
BIPEDA**

Relatori:

*Prof. Marco Beghini  
DMNP  
Università di Pisa*

*Prof.ssa Maria Chiara Carrozza  
Laboratorio ARTS  
Scuola Superiore Sant'Anna*

Candidato:

Marco Controzzi

Sessione di Laurea del 17/12/2008

## SOMMARIO

Lo scopo di questo lavoro è la progettazione e lo sviluppo di una mano robotica antropomorfa che possa essere integrata sul robot bipede SABIAN. L'esame dello stato dell'arte verte sulle mani robotiche per robot umanoidi presenti nella letteratura scientifica, con particolare attenzione ai meccanismi di trasmissione. L'obiettivo è quello di progettare una mano facilmente controllabile con un ridotto numero di attuatori che sia in grado di realizzare operazioni di presa anche in ambiente non strutturato e gestualità avanzata. Un'accurata analisi della trasmissione sotto-attuata e l'individuazione di indici globali di performance ha permesso di strutturare una procedura di ottimizzazione volta alla prevenzione dei fenomeni di instabilità della presa. Il dimensionamento del sistema di estensione passivo segue sulla base del *Know-How* dell'ARTS-lab, che unitamente al controllo, si prefigge lo scopo di replicare la dinamica del dito umano nella fase di chiusura prima della presa. Il lavoro si è concluso con la progettazione della mano e dell'unità di attuazione, puntando l'attenzione all'integrazione dei sensori nella struttura, e la realizzazione delle dita.

## ABSTRACT

The aim of this work is to design and develop an anthropomorphic robotic hand to be integrate into the SABIAN Humanoid Robot. The state of the art analysis encompasses a review on robotic hands developed in the past decades with particular attention on actuation schemes and transmission routings. The objective is to design an underactuated robotic human-like hand, with grasping and gesture capabilities. The analysis of the proposed underactuated finger scheme leads to optimization procedure aimed at finding the optimal values of pulleys radii for the tendon driven transmission. The design of extension transmission system, able to mimic the natural motion of the human fingers, is based on ARTS-Lab Know-how. Finally, the mechanical design of the robotic finger is carried out in order to integrate an sensory embedded system in the structure.

## 1 INTRODUZIONE

Il progetto *Sabian (Sant'Anna Biped humANoid)* nasce dalla collaborazione tra *ARTS-Lab* della *Scuola Superiore Sant'Anna* e il *Takanishi-Lab* della *Weseda University* al fine di promuovere le attività di ricerca che mirano a costruire un nuovo rapporto tra uomo e macchine nella società avanzata. Tale collaborazione si concretizza nello sviluppo di un robot capace di fornire assistenza domestica alle persone anziane e di intrattenere l'uomo nella sua vita quotidiana. Il robot dovrà quindi interagire attivamente con l'uomo mostrando doti espressive e gestualità avanzate, condividere lo stesso spazio di lavoro e muoversi come un essere umano. La base di partenza è il robot sviluppato presso il *Takanishi-Lab*, *Wabian-2* in figura 1, robot umanoide di ultima generazione equipaggiato con un sistema di controllo in grado di replicare la camminata umana. Il robot utilizza un sofisticato sistema di bilanciamento che, coordinando in modo opportuno il movimento delle gambe e del busto, è in grado di mantenerlo in equilibrio.



Figura 1: Wabian-2

## 1.1 Obiettivi

Il lavoro di tesi consiste nella progettazione e nello sviluppo di una mano robotica antropomorfa in grado di realizzare operazioni di presa di oggetti in ambiente non strutturato, produrre gestualità avanzata, che sia integrata con il braccio robotico del Sabian, appositamente sviluppato nei laboratori ARTS, e che possa essere controllata attraverso algoritmi semplici. I passi seguiti per la realizzazione del progetto sono:

- Analisi dello stato dell'arte delle mani robotiche alla luce delle specifiche di progetto, scelta del sistema di trasmissione più idoneo e razionalizzazione dei Gradi di libertà (GdL) alla luce del task richiesto;
- Analisi e ottimizzazione della trasmissione agonista al fine di promuovere una presa stabile dell'oggetto prevenendo il *Roll Back Phenomena* individuato in [3], tipico dei sistemi di presa sotto-attuati;
- Dimensionamento della trasmissione antagonista passiva sulla base del *Know-How* del laboratorio ARTS al fine di replicare la dinamica del dito umano secondo quanto pubblicato in [2];
- Progettazione mecatronica delle dita con particolare attenzione all'integrazione dei sensori e dimensionamento del gruppo di attuazione.

## 1.2 Stato dell'arte

Negli ultimi decenni sono stati sviluppati numerosi prototipi di mani robotiche multi-dita con lo scopo di imitare la destrezza e le abilità della mano umana. Le linee di ricerca sono

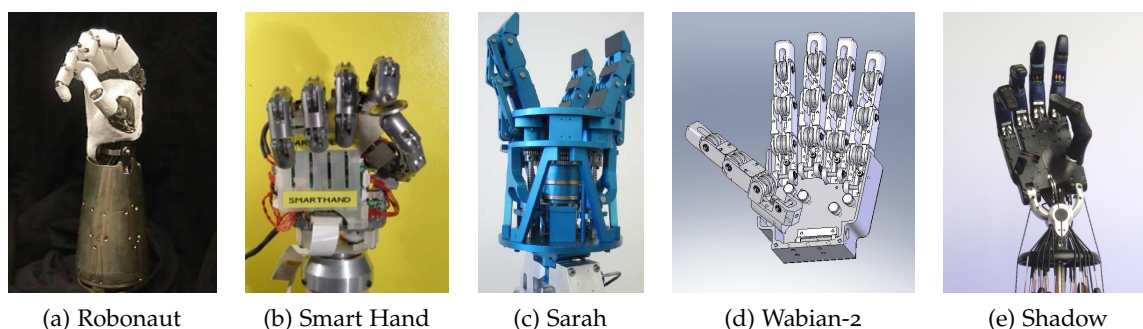


Figura 2: Mani robotiche

tra le più svariate, tra cui gli impieghi spaziali, gli studi sulla manipolazione e le protesi cibernetiche 2. La mano robotica *Robonaut* è stata sviluppata presso il *NASA Johnson Space Center* con lo scopo di ridurre l'intervento umano in operazioni extra veicolari; consta di 12 gradi di libertà per un totale di 21 giunti distribuiti al fine di ottimizzare la presa di utensili. L'attuazione è remota, disposta nell'avambraccio. Le dimensioni sono comunque superiori a quelle umane. In ambito protesico, il laboratorio *ARTS* ha sviluppato *Smart Hand*. La mano ha 16 giunti ed è attuata attraverso 4 motori contenuti completamente nella cavità palmare. L'adattabilità della mano agli oggetti è resa possibile grazie all'impiego della trasmissione sotto-attuata, dimensionata (unitamente ad un algoritmo di controllo) al fine di produrre un moto di chiusura simile a quello della mano umana. La *Sarah Hand* è un *gripper* sotto-attuato con trasmissione a *link* rigidi sviluppato presso il *Laboratoire de robotique* dell'Università di Laval, la cui progettazione si è concentrata sulla prevenzione del *Roll Back Phenomena*, pubblicato in [3]. La mano robotica *Shadow*®, della *Shadow Robotics Company*, si distingue per l'impiego di attuatori pneumatici di tipo *McKibben*®, molto simili al funzionamento del muscolo umano. Attualmente la mano robotica montata sul robot *Wabian-2* ha scarse funzionalità poichè il gruppo di lavoro si è concentrato sullo sviluppo degli arti inferiori dato l'obiettivo di costruire un ausilio per lo studio delle disabilità motorie. La mano è attuata attraverso 3 motori disposti in remoto posti nell'avambraccio, realizzando gesti semplici ma senza capacità prensili. La mano robotica, oggetto del presente lavoro, trae spunto da quelle illustrate in precedenza, ma possiede degli aspetti sicuramente innovativi. I requisiti funzionali tra i quali i principali sono i seguenti:

- impiego della mano in ambiente non strutturato;
- scarso spazio vincolato dalle misure antropometriche;
- necessità di ottimizzare il peso per permettere al robot di mantenersi in equilibrio;
- la necessità di essere controllata attraverso algoritmi semplici;

Queste esigenze hanno indirizzato la scelta del sistema di trasmissione verso i meccanismi sotto-attuati, e della motorizzazione verso micro-motori elettrici in corrente continua.

## 2 ANALISI BIO-MECCANICA

La progettazione della mano robotica parte da un'analisi fisiologica e bio-meccanica della mano, che può essere considerata l'*end-effector* del braccio e lo strumento di interazione ed esplorazione dello spazio circostante. Al fine di sviluppare un modello della mano robotica, il più vicino possibile a quello della mano umana, tre aspetti preliminari devono essere considerati:

**VINCOLI ANTROPOMETRICI** Le dimensioni della mano robotica devono essere paragonabili a quella della mano umana, ma data la necessità di rendere contenuti i costi del prototipo, le falangi sono state realizzate secondo i dati forniti per il dito indice, sulla base del 50 percentile di un soggetto femminile di nazionalità giapponese di età approssimativa di 25 anni.

**GRASP VS MANIPULATION** Il task richiesto prevede operazioni di presa senza manipolazione fine degli oggetti. Ciò permette di ridurre la complessità del modello riducendo il GdL necessari allo scopo.

**INTERAZIONE CON L'UOMO** Il robot deve essere in grado di comunicare attraverso gesti, per cui ogni dito deve muoversi indipendentemente.

### 2.1 Razionalizzazione dei gradi di libertà

La mano umana possiede ben 22 GdL, attuati attraverso circa 40 muscoli di cui la maggior parte collocati in remoto nell'avambraccio. Le dita, ad esclusione del pollice, possiedono 4 GdL e possono essere schematizzate con una catena cinematica seriale aperta di 3 link e 3 giunti di cui uno è una coppia cinematica superiore. Il pollice possiede un ulteriore GdL permettendo movimenti di anteposizione/retroposizione essenziali per svolgere l'opposizione (figura 3 a). Prescindendo da task di manipolazione fine, possiamo operare notevoli semplificazioni alla mano robotica volti ridurre i GdL necessari, riducendo così la complessità dell'unità di attuazione e del controllo (figura 3 b). La soluzione è stata individuata nella scelta di una trasmissione sotto-attuata, che permette di avere molti GdL (anche se non direttamente controllabili) con pochi attuatori.

La flessione del singolo dito è ottenuta attraverso un attuttore, mentre l'estensione è passiva e ottenuta attraverso una molla a compressione contenuta nel palmo della mano (si noti in figura 3c). Ciò permette di muovere indipendentemente ogni dito promuovendo le operazioni di gestualità. I movimenti di abduzione/adduzione radiale e ulnare del dito indice, anulare e mignolo sono comandati da un unico motore attraverso un sistema di trasmissione a tendini agonista-antagonista. Questo ulteriore GdL è stato introdotto per promuovere una presa stabile di oggetti di dimensione diverse. Il pollice possiede un solo GdL di Abduzione/Adduzione secondo un piano preferenziale di presa ruotato rispetto all'asse distale della mano. Complessivamente la mano è attuata attraverso 7 motori, di cui 6 disposti nell'avambraccio del robot e 1 direttamente nel palmo della mano.

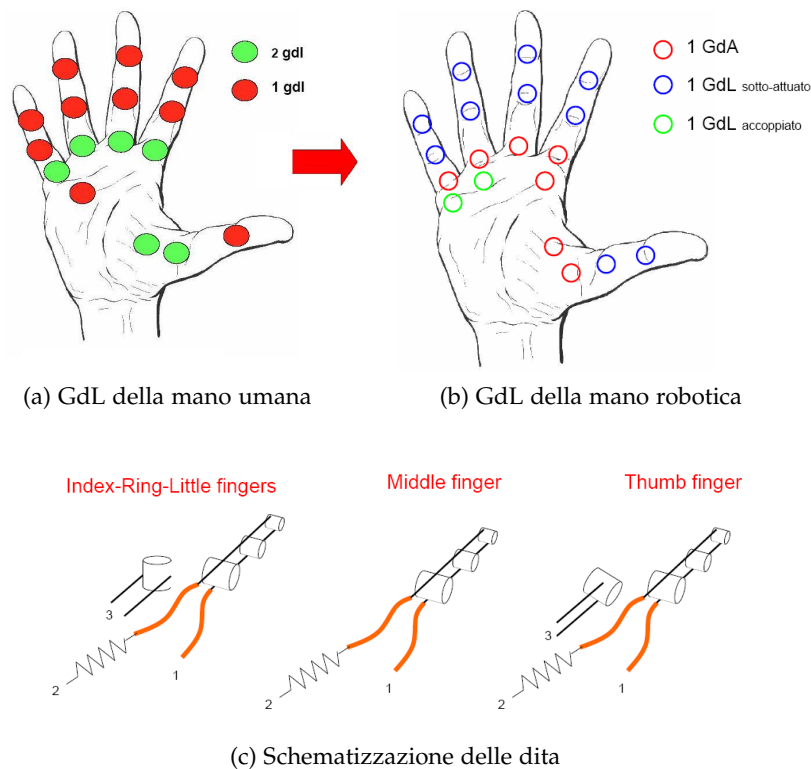


Figura 3: Razionalizzazione dei GdL e schematizzazione delle dita

### 3 LA SOTTO-ATTUAZIONE NELLE MANI ROBOTICHE

Il dito a tre falangi sotto-attuato è in grado di adattarsi spontaneamente alla forma dell'oggetto in presa (Figura 4), utilizzando un numero di attuatori inferiore al numero di giunti che porta ad una notevole semplificazione sia della trasmissione meccanica che del controllo. La sotto-attuazione può essere realizzata mediante trasmissione a *link* rigidi o attraverso una trasmissione flessibile tendine-pulegge folli. La seconda è da preferirsi in applicazione di robotica umanoide dato che sussiste l'esigenza di mantenere pesi, dimensioni e ingombri ridotti dell'*end-effector*. Per il corretto funzionamento del meccanismo si rende necessaria l'adozione di una trasmissione antagonista che realizzi l'estensione del dito. Non sempre però la configurazione di presa risulta stabile e talvolta il movimento continuo dell'attuatore porta alla repulsione dell'oggetto in presa (fenomeno di instabilità noto come *Roll Back Phenomena*). Tale fenomeno può essere scongiurato attraverso l'analisi del *wrench*<sup>1</sup> di contatto su tutto il *workspace* del dito, prescindendo così dal tipo di oggetto in presa.

#### 3.1 Analisi della trasmissione

L'analisi statica del dito sotto-attuato, durante la presa, è stata indagata sostituendo l'oggetto afferrato con le singole forze di contatto, attraverso l'equazione 1, dove  $f$  rappresenta

<sup>1</sup> ovvero l'insieme delle sollecitazioni sull'oggetto prodotte dal dito robotico [1], [3]

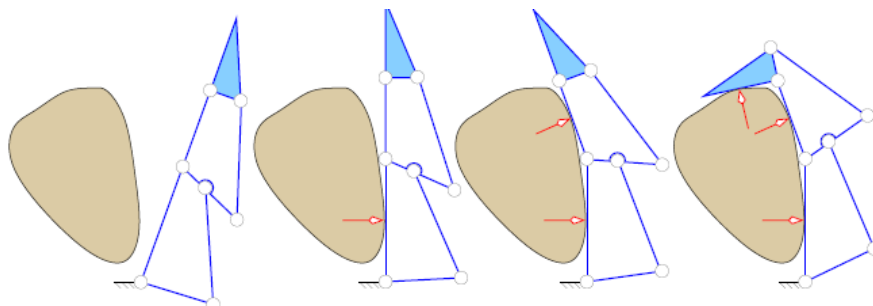


Figura 4: Adattamento spontaneo del dito alla forma dell'oggetto

il *wrench* di contatto. La soluzione è nota dalla conoscenza della matrice Jacobiano  $J$  in cui sono contenuti i dati relativi alla configurazione del dito e i dati geometrici relativi al contatto, preliminarmente modellato come contatto puntuale senza attrito. La matrice di trasmissione  $T$  contiene le informazioni relative alla sotto-attuazione dipendenti dal tipo di trasmissione scelta, che nel caso in esame del sistema a tendini-pulegge folli, risultano essere i raggi delle pulegge.

$$f = J^{\dagger T} T^{\dagger T} t \quad (1)$$

L'analisi prevede di simulare il contatto considerando tutte le possibili posizioni del punto di contatto (ovvero le quote) lungo le falangi e tutto lo spazio a giunti del dito robotico. Qualora una delle forze normali di contatto sia negativa si è assunto, cautelativamente, che il contatto fosse perso e quindi la presa tendente all'instabilità. L'obiettivo è quello massimizzare le componenti positive del *wrench* di contatto, che si traduce nella scelta ottima dei raggi delle pulegge, al fine di prevenire il *Roll Back Phenomena*.

### 3.2 Definizione degli indici e ottimizzazione della trasmissione

Per valutare l'idoneità della trasmissione a sviluppare un *wrench* positivo, prescindendo dalla geometria dell'oggetto da afferrare, è stato necessario introdurre tre indici globali di prestazione che saranno il cuore della procedura di ottimizzazione del sistema di trasmissione, traducendo in termini matematici la stabilità della presa per prevenire il *Roll Back Phenomena*.

**INDICE DI COPERTURA** La capacità del dito robotico di produrre un *wrench* completo (definito positivo) nel suo *work space* è valutata attraverso questo indice, considerando tutte le quote di contatto e tutto lo spazio ai giunti, compatibilmente con i limiti meccanici. La forma integrale è rappresentata dalla relazione:

$$\chi = \frac{\int_W \delta(C, \vartheta) dC d\vartheta}{\int_W dC d\vartheta}$$

con  $\delta(C, \vartheta)$  delta di Kronecker definito da

$$\delta(C, \vartheta) = \begin{cases} = 1 & \text{se } f_i > 0 \\ = 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

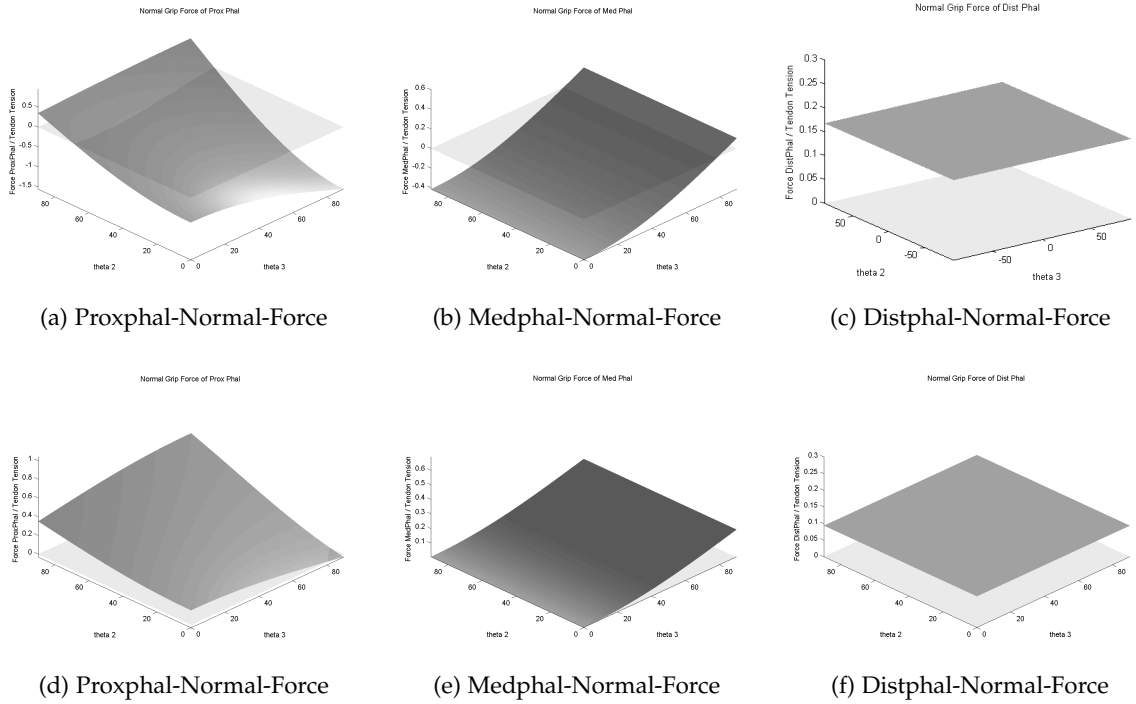


Figura 5: Visualizzazione delle azioni normali di contatto. (a-c) Dimensionamento che può portare all'insorgenza del Roll Back Phenomena. (d-e) Risultati ottenuti attraverso l'ottimizzazione.

**INDICE DI STABILITÀ** Per valutare quanto il dito sia prossimo alla perdita di un contatto su una falange è stato necessario analizzare la componente minima del *wrench* di contatto (per non perdere di generalità normalizzata rispetto alla tensione del tendine  $T$ ) quando questo si realizza nella sua forma completa.

$$\sigma = \frac{\int_W \min_i(f_i) \delta(C, \vartheta) dC d\vartheta}{\int_W T dC d\vartheta}$$

**INDICE DI ISOTROPIA** Per promuovere una presa stabile è necessario che le forze di contatto siano simili tra loro. L'isotropia del *wrench* è inoltre importante per non danneggiare l'oggetto in presa. Per la valutazione di tale indice è necessario confrontare le varie componenti con il valore massimo del *wrench* di contatto.

$$I = \frac{\int_W \frac{\sum_i f_i}{\max_i f_i} \delta(C, \vartheta) dC d\vartheta}{3 \int_W dC d\vartheta}$$

Il problema si presta ad un'ottimizzazione numerica. Per raggiungere tale scopo ci si è avvalsi della funzione `fmincon` del `MATLAB OPTIMIZATION TOOLBOX`. La procedura si basa sulla massimizzazione di una funzione obiettivo (rappresentata da uno degli indici sopra definiti) contenuta in una `FUNCTION` dedicata. La procedura di calcolo è comandata da un file indipendente, che contiene i limiti superiori e inferiori delle variabili ricercate e il punto di partenza. In questo caso è necessario inserire i valori minimi dei raggi delle



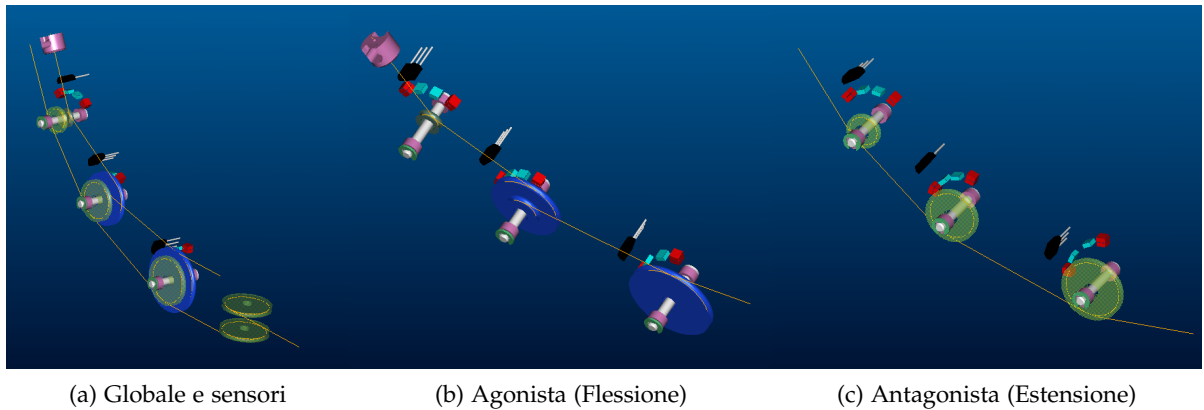


Figura 7: Percorso cavi

pulegge (dipendenti dal diametro minimo di avvolgimento dei tendini adottati) e i valori massimi (nel rispetto dei vincoli dimensionali e di ingombro di ciascun dito).

### 3.3 Dimensionamento della trasmissione di estensione

La fase di analisi successiva all'ottimizzazione della presa prevede l'integrazione con l'algoritmo precedentemente sviluppato nei laboratori ARTS, pubblicato in [2], volto alla sintesi di un controllo in grado di far chiudere il dito robotico come il dito umano. Ciò si rende necessario per il corretto approccio del dito all'oggetto in presa massimizzando quindi il *workspace* utile di presa ed evitando che il dito si presenti all'oggetto in configurazioni non idonee alla presa. La trasmissione di estensione è stata dimensionata introducendo i parametri ottimizzati secondo, la fase precedente, nell'algoritmo già sviluppato e verificando che la traiettoria dell'estremità distale non fosse molto distante dalla spirale logaritmica tipica del movimento antropomorfo (Figura 6). Noto il sistema di trasmissione agonista e le proprietà d'inerzia del dito robotico è possibile ricavare i parametri caratteristici del sistema di estensione passivo (raggi delle pulegge, rigidità molla di estensione e precarico) tale per cui l'estremità distale del dito descrive una polinomiale determinata. La simulazione ultima è stata ottenuta attraverso il MATLAB ROBOTIC TOOLBOX, una volta definiti i parametri caratteristici di Denavit-Hartenberg.

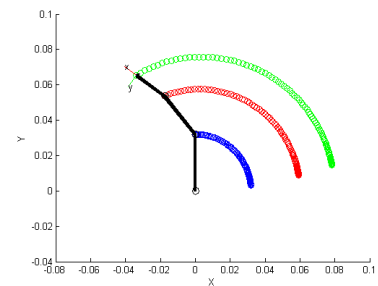


Figura 6: Simulazione del moto di chiusura

## 4 PROGETTAZIONE

La progettazione della trasmissione a tendini, mediante cavi che scorrono dentro guaine, permette di ridurre il peso e la complessità della mano senza eccessive perdite indotte dall'attrito, se le curvature durante il loro percorso vengono limitate. Le falangi sono state progettate prediligendo l'integrazione dei sensori nella struttura e cercando, per quanto

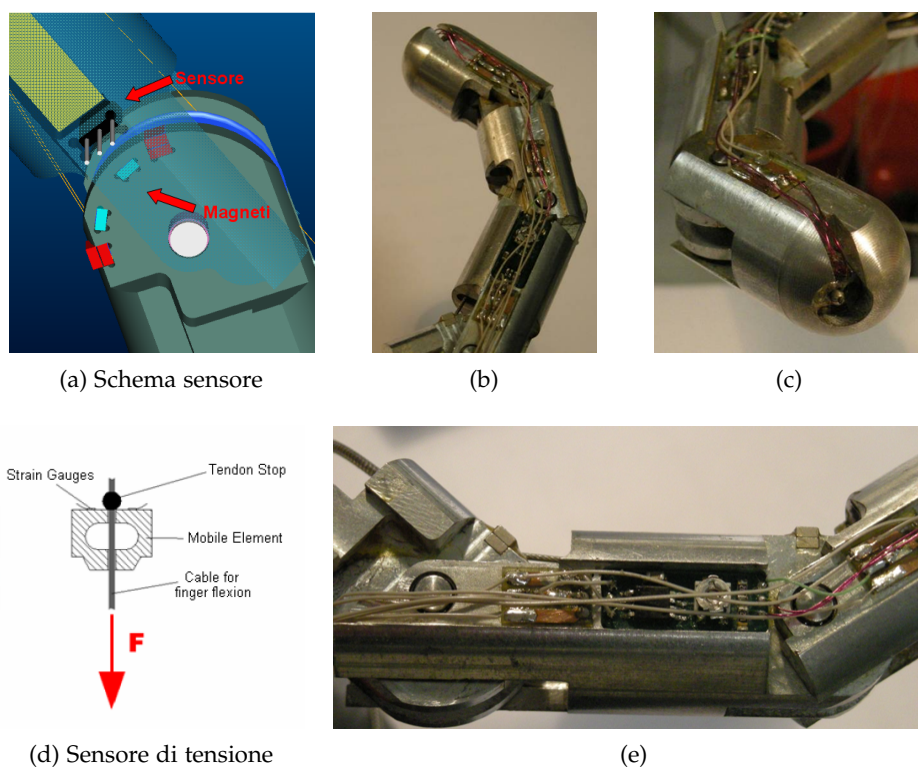


Figura 8: Set di sensori e integrazione nella struttura e prototipo di dito realizzato presso l'officina interna della Scuola Superiore Sant'Anna.

possibile, di ridurre il peso complessivo della mano. L'impiego della lega di alluminio serie 7075 (Ergal) permette di mantenere contenuti i pesi assicurando comunque una buona resistenza dei componenti. Le verifiche strutturali sono state condotte importando il modello CAD su ANSYS in formato .igs. Le dimensioni ridotte hanno condizionato la scelta dei componenti commerciali. L'adozione di cuscinetti a sfere è stata scartata alla luce del basso coefficiente di capacità statica. L'uso di boccole *Iglide*® permette comunque di minimizzare l'attrito durante l'esercizio avendo cura, durante la scelta, di seguire le prescrizioni fornite dal produttore.

#### 4.1 Integrazione dei sensori

##### 4.1.1 Sensori propriocettivi

I sensori propriocettivi su ogni giunto, permettono di ottenere un *feedback* sul controllo della presa fornendo informazioni sulla posizione relativa delle falangi. Sono stati adottati sensori a semiconduttori basati sull'effetto Hall capaci di tradurre la variazione di campo magnetico (prodotto dal movimento della falange cui sono collegati dei magneti permanenti) in un segnale proporzionale all'angolo del giunto. Come si nota dalla figura 8a il sensore propriocettivo disposto su ogni giunto è costituito da un sensore ad effetto Hall disposto sulla *i-esima* falange e da una serie di magneti disposti circonferenzialmente sulla falange *(i-1)-esima*, con un gap *d* di dimensioni non maggiori a quelle consigliate nel

*datasheet* (Figura 8 a).

#### 4.1.2 Sensori di tensione

Ai fini dell'implementazione del controllo appare evidente l'importanza di un *feedback* sulla sollecitazione del tendine flessore. A tale scopo è stato rivisto il sensore di tensione progettato per le precedenti mani basato sulla risposta di due *strain gages* a seguito della deformazione di una struttura in acciaio (AISI 630) (Figura 8 d).

#### 4.2 Unità di attuazione

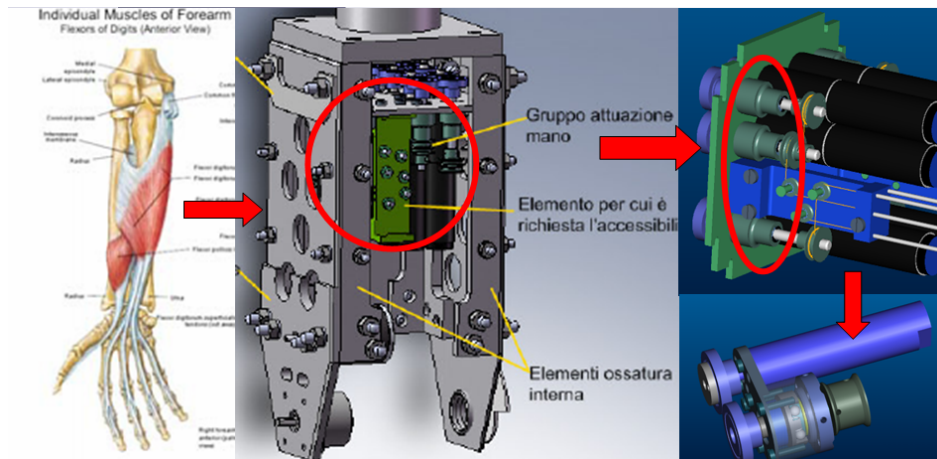
Come nell'organo umano, l'85 % del gruppo di attuazione è contenuto nell'avambraccio del robot, riducendo il momento ribaltante che grava sulla stabilità del bipede. La disposizione asimmetrica del gruppo di attuazione ha contribuito a ridurre gli elementi fuori diagonale degli ellissoidi di inerzia migliorando la dinamica del braccio del robot. La scelta di adottare micro-motori elettrici a spazzole nasce dall'esigenza di avere un'elevato rapporto potenza/peso, mantenere contenuti i costi. Dato che il gruppo di attuazione è ottimizzato per la fase di presa, non è richiesta la costanza della coppia dal motore in ampi range di velocità, quindi il dimensionamento dei motori è stato effettuato imponendo la chiusura del dito in 1.2 sec. e garantendo che il tendine flessore sia sollecitato con una forza di 200 N. Al fine di ridurre il consumo di energia e per questioni legate alla sicurezza è stato progettato un opportuno meccanismo di irreversibilità meccanico integrato nell'unità di attuazione (Figura 9 a).

#### 4.3 Realizzazione delle dita

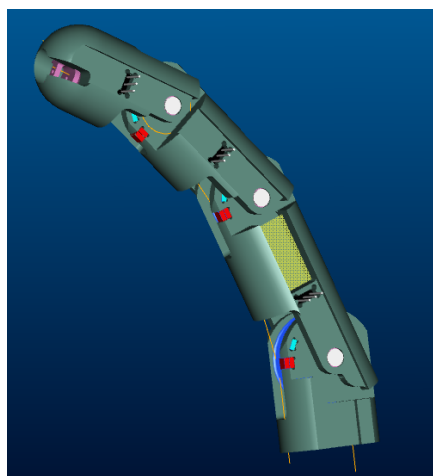
Il progetto si è concluso con la stesura dei disegni tecnici quotati di ciascun componente della mano che hanno permesso la realizzazione delle dita (Figure 8 b-c-e). Vista la natura prototipica del progetto, la realizzazione è stata effettuata nell'officina interna della Scuola Superiore Sant'Anna. Per lo scopo è stato utilizzato un centro di lavoro CNC a 5 assi marca KERN©.

### 5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

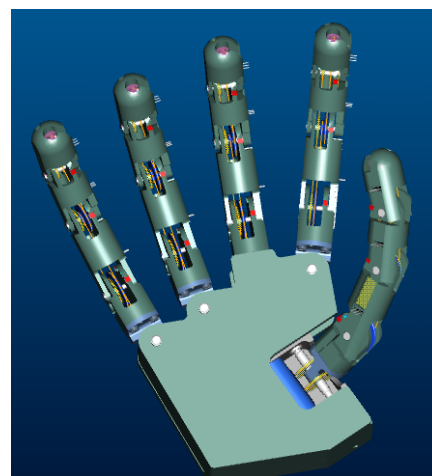
In conclusione il lavoro di tesi ha portato alla progettazione bio-meccatronica di una mano robotica antropomorfa, attuata attraverso un numero ridotto di attuatori, integrata con il braccio robotico progettato per il *SABIAN*. Le dita sono state realizzate presso l'officina interna dell'ARTS-lab; le attività future riguardano la realizzazione dell'unità di attuazione unitamente al braccio robotico, il montaggio e il collaudo. Si svilupperà un opportuno algoritmo di controllo finalizzato alla presa di oggetti e successivamente saranno necessarie prove sperimentali sulle effettive capacità prensili.



(a) Dal braccio umano al gruppo di attuazione



(b) Dito robotico



(c) Mano robotica

Figura 9: Sotto assemblati CAD

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Matthew T. Mason and J. Kenneth Salisbury Jr., *Robot hands and the mechanics of manipulation*, Cambridge, MA, USA, 1985. MIT Press (Cited on page 4.)
- [2] L. Zollo, S. Roccella, E. Guglielmelli, M. C. Carrozza and Paolo Dario, *Biomechatronic Design and Control of an Anthropomorphic Artificial Hand for Prosthetic and Robotic Applications*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 12, No. 4, August 2007. (Cited on pages 1 and 7.)
- [3] L. Birglen and C.M. Gosselin, *Kinetostatic analysis of underactuated fingers*, Robotics and Automation, IEEE Transactions on volume 20, pages 211-221, 20 April 2004. (Cited on pages 1 and 2.)