

Progetto e Sviluppo di una Protesi di Arto Superiore Innovativa

B. Massa, S. Roccella, R. Lazzarini, M. Zecca, M. C. Carrozza, P. Dario

Centro INAIL RTR, Viareggio / ARTS Lab, Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa

I. ABSTRACT

Le attuali protesi di arto superiore, disponibili in commercio, sono semplici pinze con uno o due gradi di libertà. Nonostante alcuni amputati ritengano queste performance accettabili, esiste un ampio spazio per aumentare le funzionalità di questi dispositivi. L'articolo presenta un approccio innovativo per la progettazione e lo sviluppo di protesi di arto superiore basato su meccanismi sotto-azionati; descrive, inoltre, lo sviluppo di un primo prototipo di protesi di mano caratterizzato da nove gradi di libertà ed attuato da due motori elettromagnetici.

Keywords: protesi, meccanismo differenziale, meccanismo sotto-azionato, riabilitazione

II. INTRODUZIONE

Basandoci su studi statistici condotti negli Stati Uniti possiamo affermare che esistono circa 1.000.000 di amputati nel mondo. Queste amputazioni hanno, generalmente, cause patologiche (insufficienza arteriosa, tumori) o traumatiche (incidenti, ferite di guerra).

Per l'amputato, la perdita di un arto superiore ha una duplice conseguenza:

1. una drastica riduzione della funzionalità; poiché il soggetto non è più in grado di eseguire gran parte compiti di presa e manipolazione.
2. l'insorgere di problemi a livello psicologico; poiché l'amputazione compromette l'estetica e la cosmesi dell'arto superiore.

Nonostante negli ultimi 30 anni siano apparse sul mercato protesi di mano sempre più evolute, è risultato che circa il 35% di amputati non usa la propria mano protesica regolarmente.

I fattori principali che causano una disaffezione, da parte dell'amputato, nei confronti della protesi sono essenzialmente tre:

1. **Scarsa funzionalità** del dispositivo; le protesi di mano attualmente in commercio sono in realtà semplici pinze caratterizzate da 1 o al massimo 2 gradi di libertà [G.d.L] (contro i 23 della mano umana).
2. **Scarsa cosmesi**; il basso numero di G.d.L comporta l'esecuzione di movimenti di presa non naturali.
3. **Scarsa controllabilità**; nonostante l'uso di protesi mioelettriche, il controllo di questi dispositivi richiede un notevole addestramento ed un alto livello di attenzione durante l'uso (le protesi commerciali sono

dotate di una sensorizzazione limitata e non prevedono *feedback* all'utente).

In questo articolo verrà proposto un approccio progettuale innovativo, basato su meccanismi sotto-azionati, in grado di risolvere le problematiche sopra elencate. Verrà inoltre descritto il progetto e lo sviluppo di un prototipo di protesi per arto superiore innovativa.

III. L'APPROCCIO PROGETTUALE

A. Protesi Commerciali

Le protesi di mano attualmente in commercio non garantiscono una sufficiente funzionalità di presa, infatti, non sono in grado di replicare la capacità di adattarsi all'oggetto afferrato propria della mano umana (vedi Figura 1). Una scarsa adattabilità alle caratteristiche geometriche dell'oggetto non garantisce il mantenimento della presa in presenza di disturbi esterni (forza peso, carichi improvvisi, ecc...): la presa non è stabile.

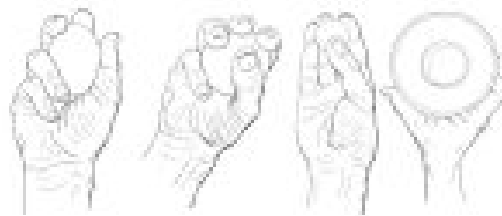


Figura 1: Adattabilità della mano umana

Le protesi di mano sono dotate di un solo G.d.L che governa, simultaneamente, il movimento delle dita e l'opposizione del pollice a livello delle articolazioni metacarpo-falangee. Nelle protesi più evolute (le protesi mioelettriche) il movimento è generato da un attuatore elettromagnetico posto all'interno della mano è controllato dal segnale mioelettrico prelevato sulla superficie del moncone.

L'approccio progettuale, per affrontare il problema dell'attuazione delle protesi, può essere schematizzato nel seguente modo:



Figura 2: Approccio progettuale classico

Le protesi di mano mioelettriche, per essere impiantate su amputati con differenti livelli di amputazione, sono dotate di un sistema di attuazione *intrinseco*; posto completamente all'interno della struttura della mano, in questo modo il dispositivo può essere adottato anche per livelli di amputazione prossimali (ad es. disarticolazione del polso). Questa scelta progettuale unita ad un sistema di attuazione basato su attuatori elettromagnetici tradizionali (*macroattuatori*) limita notevolmente il numero di G.d.L., poiché non è possibile disporre 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 protesi 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.

Un'alta forza di presa si traduce in elevate forze di attrito all'interfaccia dito-oggetto e permette di eseguire una presa stabile.

Concludendo possiamo affermare che le protesi convenzionali realizzano una presa stabile grazie all'utilizzo di attuatori tradizionali (*macroattuatori*), gli unici in grado di fornire una forza di presa adeguata.

L'approccio progettuale appena descritto porta allo sviluppo di dispositivi con 1 o 2 G.d.L., capaci di esercitare forze di presa fino a 100 N.

Questo tipo di ausilio presenta però i limiti descritti precedentemente: scarsa funzionalità, scarsa cosmesi e scarsa controllabilità.

Una soluzione potrebbe essere quella di aumentare il numero di attuatori al fine di permettere una maggiore capacità di adattamento, l'adozione di un'attuazione intrinseca limita però lo spazio disponibile ed impedisce l'applicazione di questa soluzione, a patto di considerare tipologie tradizionali di attuazione.

B. Sotto-attuazione

Il problema è quindi quello di ottenere un movimento articolato delle dita del dispositivo, capace di adattarsi alla generica forma dell'oggetto, pur non potendo disporre di un numero elevato di attuatori in grado di governare i vari G.d.L.

Si tratta di trovare una soluzione che permetta di aumentare l'adattabilità della protesi, mantenendo le dimensioni del dispositivo entro livelli accettabili

La soluzione proposta è quella di utilizzare una particolare tipologia di meccanismi: i meccanismi *sotto-azionati*.

Un meccanismo viene detto sotto-azionato quando il numero di attuatori è minore del numero di gradi di libertà.

Quando questo concetto è applicato ad un dispositivo protesico esso conduce all'adattabilità: una protesi di mano, 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 (vedi Figura 3)



Figura 3: La sotto-attuazione

La soluzione progettuale proposta permette una riduzione degli ingombri e dei pesi del dispositivo a favore di una migliore estetica e di un maggior comfort per il protesizzato; il controllo del dispositivo risulta essere piuttosto semplice in quanto l'adattamento avviene in maniera automatica, e non deve essere controllata dall'amputato.

IV. LA SOTTO-ATTUAZIONE

A. Introduzione

Abbiamo detto che un meccanismo sotto-azionato è caratterizzato da un numero di attuatori minore del numero di G.d.L., in pratica 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 controllati dall'amputato.

La corretta disposizione e la scelta delle corrette caratteristiche funzionali degli elementi elastici e dei fine corsa meccanici garantisce un corretto svolgimento del compito di presa (vedi Figura 4)

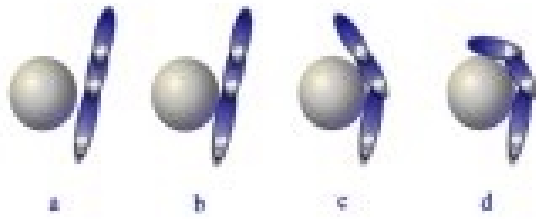


Figura 4: Sequenza di presa

In (a) il dito è nella sua configurazione iniziale e nessuna forza esterna è presente. In (b) la falange prossimale entra in contatto con l'oggetto. In (c) 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 (d), infine, il dito ha completato la fase di adattabilità all'oggetto, tutte e tre le falangi sono in contatto con esso.

I meccanismi sotto-azionati permettono la presa di oggetti in un modo più naturale e più simile al movimento di presa realizzato dalla mano umana. La configurazione geometrica del dito è, in ogni momento, automaticamente determinata dai vincoli esterni associati all'oggetto e non è necessaria l'attiva coordinazione delle varie falangi. È importante notare che la sequenza mostrata in Figura 4 avviene con un movimento continuo di un solo attuttore.

B. Stato dell'arte

In ambito robotico sono presenti differenti mani meccaniche (*end-effector*) basate su meccanismi sotto-azionati. Un'accurata analisi dello stato dell'arte mostra come si possano differenziare le mani sotto-azionate in:

1. Sotto-azionamento basato su trasmissione a cavi (vedi Figura 5)

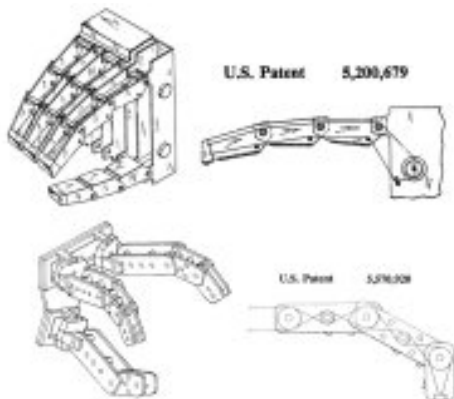


Figura 5: Mani sotto-azionate a cavi

2. Sotto-azionamento basato su trasmissione a *link* rigidi (vedi Figura 6)

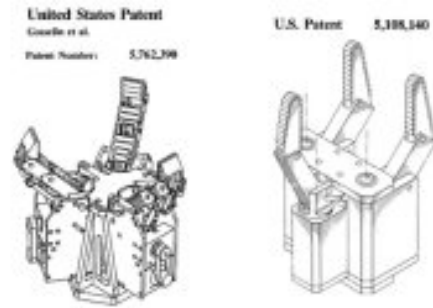


Figura 6: Mani sotto-azionate a link rigidi

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 del dispositivo.

C. Il meccanismo differenziale

Il cuore di un qualsiasi meccanismo sotto-azionato è il meccanismo differenziale.

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 a ingranaggi presente in ogni autovettura (vedi Figura 7)

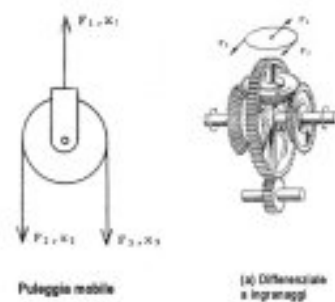


Figura 7: Meccanismi differenziali

Questi meccanismi differenziali hanno caratteristiche uniche come la capacità di governare molteplici G.d.L. con un solo attuttore combinandolo con freni, elementi elastici o fine corsa.

Nella puleggia mobile, ad esempio, il movimento fornito dalla fune 1 viene ripartito sulle funi 2 e 3 in base ai carichi resistenti che queste funi devono sopportare. Il differenziale a 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 una protesi di mano, 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.

V. LA PROTESI SOTTO-AZIONATA

Per verificare l'applicabilità di questo approccio progettuale nell'ambito della sostituzione funzionale è stata progettato un primo prototipo di mano sotto-azionata.

Il meccanismo è realizzato mediante una trasmissione a cavi ed è basato su un modello denominato *Soft Gripper* sviluppato da S. Hirose del Tokyo Institute of Technology.

A. Il modello *Soft Gripper*

Il modello *Soft Gripper* (vedi Figura 8) prevede lo sviluppo di un dito composto da un numero N di *link* L (le falangi) liberi di ruotare intorno ad una serie di assi A .

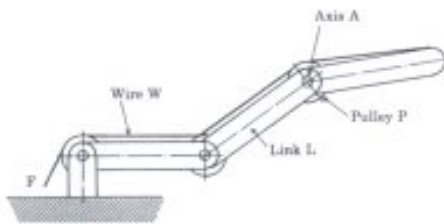


Figura 8: Il modello *Soft Gripper*

Una puleggia è disposta su ogni asse A ed è libera di ruotare intorno ad esso. Un cavo W , vincolato al primo link corre lungo tutto il meccanismo avvolgendosi intorno ad ogni puleggia.

Considerando gli attriti trascurabili una forza di trazione F sul cavo W genera una coppia, proporzionale al raggio della puleggia, in corrispondenza di ogni asse A .

Un meccanismo come quello appena descritto, garantisce un adattamento delle falangi all'oggetto con cui entra in contatto; è dotato di N G.d.L. ed è governato da un solo attuatore che esercita una forza di trazione sul cavo.

Dimensionando opportunamente il diametro delle pulegge è possibile variare la distribuzione di forze all'interfaccia dito-oggetto.

B. Applicazione del modello *Soft Gripper*

Il prototipo di mano sotto-azionata sfrutta il modello *Soft Gripper* per tutte le dita: indice, medio e pollice.

Indice e medio sono costituiti da tre falangi (vedi Figura 9), le pulegge montate su ciascun asse sono state dimensionate in modo tale da garantire l'equilibrio statico durante una presa di punta (presa che coinvolge solamente l'ultima falange).

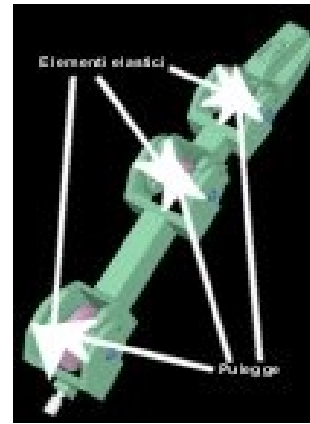


Figura 9: Struttura meccanica del dito indice e medio

Il cavo, avvolto intorno a ciascuna puleggia, governa il movimento di flessione del dito; il movimento di estensione è realizzato mediante l'utilizzo di elementi elastici. All'altezza di ciascuna articolazione è, infatti, presente una coppia di molle torsionali che garantiscono il ritorno elastico.

Il pollice è realizzato sfruttando lo stesso modello ma è composto da due sole falangi e dalle rispettive articolazioni

VI. PROGETTO E SVILUPPO DEL PROTOTIPO DI PROTESI DI MANO SOTTO-AZIONATA

A. Il modello solido

Il dispositivo (vedi Figura 10) è stato progettato mediante un modellatore solido 3D (Pro Engineer 2000i™), l'utilizzo di questo programma ha permesso di verificare la migliore disposizione relativa delle tre dita simulando la presa di oggetti virtuali.

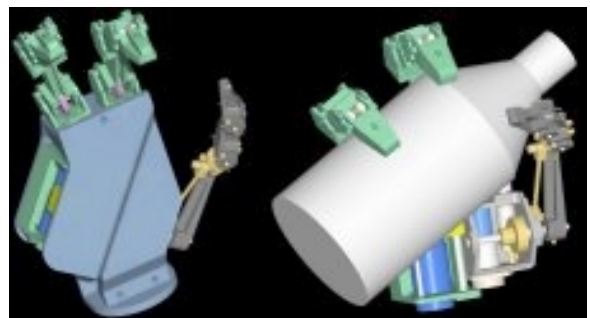


Figura 10: Modello 3D della protesi sotto-azionata

B. Progetto della protesi

La mano (vedi Figura 11) è composta da tre dita: indice medio e pollice; in quanto tre dita rappresentano la più semplice configurazione in grado di garantire una presa stabile nello spazio tridimensionale anche in condizioni di attrito limitato tra dita e oggetto.

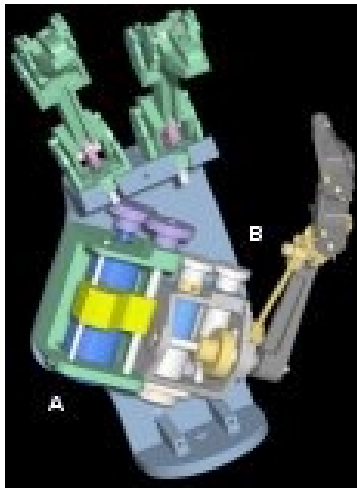


Figura 11: Modello solido della protesi

Il dispositivo è dotato di 9 G.d.L. (vedi Tabella 1) ed è attuato da due motori elettromagnetici (Minimotor™). L'attuatore A governa il movimento di flessione-estensione di tutte le dita mentre l'attuatore B permette la movimentazione del pollice. Grazie all'attuatore B la mano può effettuare due tipi di presa:

1. presa palmare o cilindrica
2. presa laterale

Il sistema di attuazione A è dotato di un meccanismo (basato su molle a compressione) in grado di bilanciare indice e medio durante la presa di oggetti non perfettamente cilindrici, garantendo il contatto di entrambe le dita sull'oggetto afferrato.

N. dita	3
G.d.L.	9
N. attuatori	2
Max Forza di presa	25 N
Tipi di presa	2

Tabella 1: Caratteristiche generali della protesi

C. Sviluppo della protesi

È stato sviluppato un primo prototipo mediante FDM (Fused Deposition Modeling) (vedi Figura 12).



Figura 12: Prototipo in ABS della protesi di mano

Questo processo crea oggetti tridimensionali in resina ABS (acrylonitrile/butadiene/styrene). Questa tecnica di prototipazione rapida permette di testare e simulare le caratteristiche funzionali della protesi senza i vincoli di tempo e di costo propri dei metodi classici di prototipazione.

VII. SVILUPPI FUTURI E CONCLUSIONI

A. Sviluppi futuri

Il progetto della protesi di mano sotto-azionata prevede ulteriori sviluppi volti ad aumentarne la funzionalità. Innanzitutto verrà sviluppato un prototipo mediante lavorazione a controllo numerico (CNC).

Attualmente il progetto si sta focalizzando sulla sensorizzazione; è prevista una sensorizzazione sia forza sia in posizione. L'applicazione di un adeguato sistema sensoriale servirà per ottimizzare il controllo della protesi che verrà realizzato mediante segnale elettromiografico (EMG). Il controllo sarà di tipo *proporzionale* in quanto la velocità di movimento delle dita risulterà proporzionale all'ampiezza del segnale EMG prelevata sulla superficie del moncone. L'amputato potrà, inoltre, decidere il livello della forza di presa da imprimere all'oggetto afferrato grazie alla presenza di sensori di forza integrati nella struttura.

B. Conclusioni

In questo articolo è stato presentato un approccio innovativo per la progettazione di protesi di arto superiore volto alla realizzazione di dispositivi semplici ed affidabili capaci di adattarsi alle caratteristiche morfologiche dell'oggetto afferrato. L'approccio si fonda sull'utilizzo di meccanismi sotto-azionati e sulla loro applicazione nell'ambito della sostituzione funzionale.