

**UNIVERSITA' DI PISA**



UNIVERSITÀ DI PISA

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

*Corso di laurea in Ingegneria Biomedica*

Tesi di Laurea specialistica

**MODELLAZIONE E CONTROLLO DI UN GIUNTO MINIATURIZZATO AD  
ATTUAZIONE IDRAULICA PER CHIRURGIA MININVASIVA**

**Relatori:**

Prof. Paolo Dario

Prof. Cesare Stefanini

**Candidato:**

Alice Tonazzini

Anno Accademico 2010-2011

*Alla mia sorellona*

## Prefazione

Lo scopo del presente lavoro di tesi, effettuato nell'ambito di una collaborazione tra Scuola Superiore Sant'Anna e Intuitive Surgical Inc. (azienda leader nel campo della robotica chirurgica), è stato lo studio di un sistema di attuazione elettro-idraulica per un tool laparoscopico, in alternativa alla classica attuazione a cavi.

In dettaglio, un modello matematico dinamico a parametri concentrati è stato sviluppato per il sistema e implementato in ambiente Matlab Simulink: si è così creato uno strumento software con una duplice utilità, sia di aiuto alla progettazione (grazie alla possibilità di variare i parametri fino ad ottenere il comportamento desiderato) sia di simulazione realistica dell'apparato fisico.

Ulteriori obiettivi del lavoro sono stati la scelta e la realizzazione di una strategia di controllo in posizione del sistema (altamente non lineare a causa della presenza di forze di attrito e della caratteristica flusso-pressione). L'utilizzo di un algoritmo proporzionale-integrativo-derivativo (PID) si è rivelato il giusto compromesso tra efficacia e semplicità; i parametri del PID sono stati ricavati attraverso la tecnica Automate Tune Variation (ATV), elaborata da Astron e Haggund ed evoluzione delle precedenti regole di Ziegler e Nichols. E' stato necessario valutare le performances del controllore applicando degli andamenti prefissati (gradino, rampa, senoide) del segnale di riferimento in ingresso, nonché testare la robustezza del PID in condizioni lontane da quelle nelle quali era stato tarato (variazione di massa, applicazione di forze di disturbo).

La creazione di un prototipo e la relativa validazione del modello sono state la naturale conclusione del lavoro, sia per testare l'effettiva efficacia descrittiva del modello sia per concretizzare la proposta di un innovativo sistema di attuazione per applicazioni in chirurgia robotica.

# Indice

<b>Capitolo 1</b>	<b>Chirurgia minimamente invasiva e computer assistita</b>	p.1
1.1	Chirurgia minimamente invasiva	
1.2	Limiti delle performances chirurgiche	
1.3	Chirurgia computer assistita	
1.3.1	Classificazione dei sistemi CAS	
1.3.2	Il robot Da Vinci	
1.4	Il problema dellattuazione e della trasmissione di potenza in uno strumento per MIS	
1.4.1	Attuazione a cavi in uno strumento per MIS	
1.4.2	Obiettivi nella progettazione di sistemi di attuazione innovativi per applicazioni mininvasive	
1.5	Specifiche tecniche per la progettazione di un meccanismo di attuazione per MIS	
1.6	Giunto espandibile a catena	
1.6.1	Descrizione del meccanismo	
1.6.2	Sistema di attuazione idraulica del meccanismo	
<b>Capitolo 2</b>	<b>Sviluppo di uno strumento software per la progettazione e la simulazione del sistema di attuazione del giunto</b>	p.21
2.1	Modellazione di un sistema: informazioni generali e terminologia	
2.2	Ipotesi generali e aspetti fluidodinamici importati	
2.3	Matlab e Simulink: informazioni generali e utilizzo in modellazione	
2.3.1	Caratteristiche chiave di Simulink	
2.3.2	Modellare e simulare un processo dinamico con Simulink	
2.4	<b>Modellazione del sistema e implementazione in Simulink</b>	

- 2.4.1 Motore e pompa
- 2.4.2 Servovalvola
- 2.4.3 Attuatore lineare e giunto

## **Capitolo 3 Scelta dei componenti e simulazioni del sistema open loop**

p. 60

### **3.1 Motore e pompa**

- 3.1.1 Identificazione dei parametri del sottosistema motore-pompa
- 3.1.2 Simulazione del funzionamento del sottosistema 'motore-pompa'

### **3.2 Servovalvola**

- 3.2.1 Identificazione dei parametri del sottosistema 'servovalvola'
- 3.2.2 Simulazione del funzionamento del sottosistema 'servovalvola'

### **3.3 Attuazione lineare e meccanismo**

- 3.3.1 Identificazione dei parametri dei sottosistemi 'Attuatore lineare' e 'meccanismo'
- 3.3.2 Simulazione del funzionamento dei sottosistemi 'attuatore lineare' e 'meccanismo'

### **3.4 Comportamento open loop del sistema globale**

- 3.4.1 Valutazione dei transitori idraulici

## **Capitolo 4 Strategia di controllo: scelta, implementazione e valutazione**

p. 76

### **4.1** Descrizione di un generico sistema di controllo

### **4.2** Descrizione di un sistema di controllo per il meccanismo elettroidraulico

### **4.3** Regolatore PID

- 4.3.1 Azioni di controllo di base
- 4.3.2 Tuning dei parametri del PID

- 4.4** Valutazione delle performances del controllore
  - 4.4.1 Analisi delle performances in condizioni ideali
  - 4.4.2 Analisi di robustezza
  - 4.4.3 Considerazioni conclusive sull'analisi delle performances

**Capitolo 5 Setup sperimentale e validazione del modello** p.106

- 5.1** Descrizione dei componenti del prototipo
- 5.2** Caratterizzazione di motore e pompa
- 5.3** Caratterizzazione dell'elettromagnete
- 5.4** Caratterizzazione della dinamica della valvola
- 5.5** Caratterizzazione del sistema cilindro-pistone

**Conclusioni** p. 125

**Bibliografia** p. 126

**Appendici** p. 129

# Capitolo 1

## Chirurgia minimamente invasiva e computer assistita

L'introduzione delle tecniche minimamente invasive e dell'imaging medicale hanno portato ad una rivoluzione nel campo delle performances chirurgiche; nonostante questo rimangono importanti i limiti che il chirurgo incontra durante un intervento.

La chirurgia robotica e computer assistita si prefigura come potenziale mezzo per superare questi limiti, fornendo informazioni aggiuntive, maggiori abilità e supporto al chirurgo nelle varie fasi da affrontare (diagnostica, pianificazione pre-operatoria, simulazione ed esecuzione intra-operatorie, training).

In questo ambito, lo sviluppo di meccanismi di attuazione innovativi miniaturizzati è volto ad ottenere una più efficiente trasmissione della potenza meccanica all'end effector ed una elevata precisione di posizionamento.

### 1.1 Chirurgia minimamente invasiva

La chirurgia minimamente invasiva (MIS o endoscopic surgery) è una metodica che permette di effettuare operazioni attraverso piccole incisioni nel corpo del paziente.

Sviluppatasi a partire dai primi anni '90 come alternativa alla chirurgia tradizionale, essa è frutto dell'integrazione delle moderne tecniche chirurgiche (a loro volta nate dall'introduzione di analgesici, antisettici, anestetici ed antibiotici) e di strumenti endoscopici di precisione: l'utilizzo di endoscopi per la visualizzazione di organi interni (es. colonscopia) ha ormai una lunga storia ed è affiancato, in MIS, dall'utilizzo di altri strumenti chirurgici atti non solo ad esaminare ma anche ad effettuare operazioni in diverse parti del corpo.

Questo si è tradotto nella nascita di molti campi distinti all'interno dell'endosurgery: alcuni esempi sono l'artroscopia, l'angioscopia e la laparoscopia (Tab. 1.1).

Field	Procedure	Description
Colonoscopy		Examination and tumor identification in rectum and colon
Arthroscopy		Examination and repair of skeletal or joint disorders
Angioscopy		Examination and un-clogging of blood vessels
Laparoscopy	Cholecystectomy Inguinal hernia repair Appendectomy Colectomy	Endoscopic surgery performed on abdominal organs Gall bladder removal Repair of hernia Removal of vermiform appendix Removal of part or all of the colon

Tabella 1.1 Alcuni campi della MIS e, in particolare, alcune procedure laparoscopiche

La laparoscopia è una tecnica mininvasiva diventata predominante in gran parte delle operazioni di routine alla zone pelvica e addominale (ad esempio, il 95% delle colecistectomie è effettuato tramite MIS): attraverso piccole porte di accesso, dette trocar (Fig.1.1a), vengono inseriti nel corpo del paziente degli strumenti chirurgici miniaturizzati (generalmente pinza, porta-ago e forbici) e un endoscopio (Fig 1.1b); lo spazio di lavoro viene creato insufflando nella cavità ad una data pressione gas CO<sub>2</sub> (gas non reattivo né nocivo e facilmente eliminabile dall'organismo attraverso il sistema respiratorio) e viene illuminato da fibre ottiche o LEDs (Fig.1.2).

La telecamera dell'endoscopio è collegata ad un monitor esterno, in cui il chirurgo può vedere, ingrandite, le immagini della cavità operatoria.



Figura 1.1 (a) Trocar, device chirurgico tubolare per l'incisione e il mantenimento di una porta d'accesso alla cavità: esso impedisce la fuoriuscita del gas insufflato; (b) Pinza endoscopica

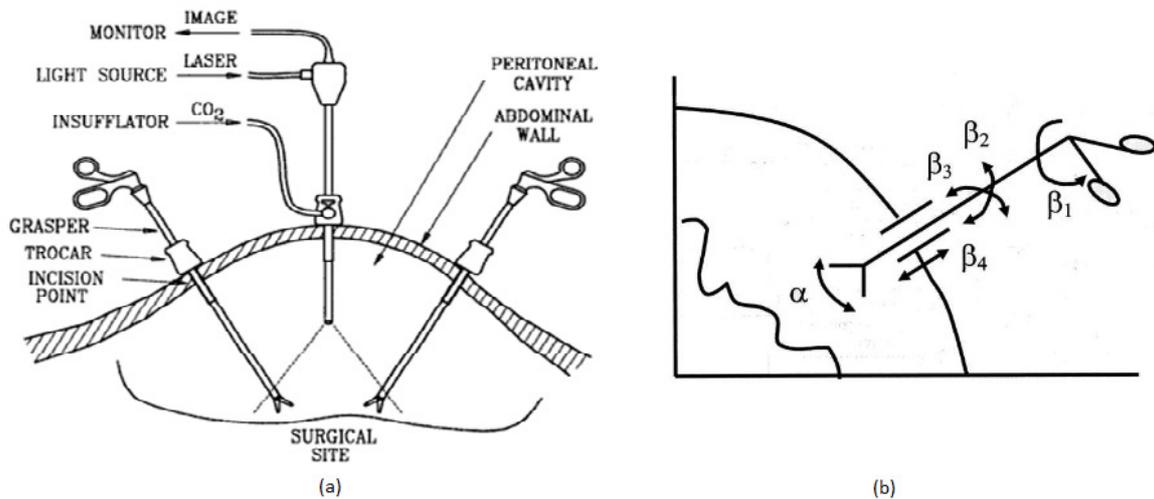


Figura 1.2 (a) Set-up interno di una laparoscopia nella regione addominale; (b) Gradi di libert  permessi dal trocar

Il principale vantaggio della chirurgia minivasiva   la ridotta invasivit , che si traduce in minori rischi e sofferenza per il paziente, piccole cicatrici, ridotta ospedalizzazione e, di conseguenza, costi pi  contenuti.

Se messe a confronto con la chirurgia aperta, le procedure MIS costituiscono una vera e propria rivoluzione. In chirurgia tradizionale, la guida degli strumenti   effettuata sotto la diretta visuale del chirurgo, sul quale si chiude il feedback di controllo (Fig.1.3):   sufficiente che la coordinazione visuo-motoria sia di fatto su un solo asse (asse 'occhio-mano' = asse 'strumento-paziente').

Al contrario, in MIS,   necessaria una vera e propria attivit  di triangolazione da parte del chirurgo, il quale guida gli strumenti (asse 'mano/strumento-paziente') guardando il monitor (asse 'occhio-monitor') (Faraz A. & Payandeh S., 2000).

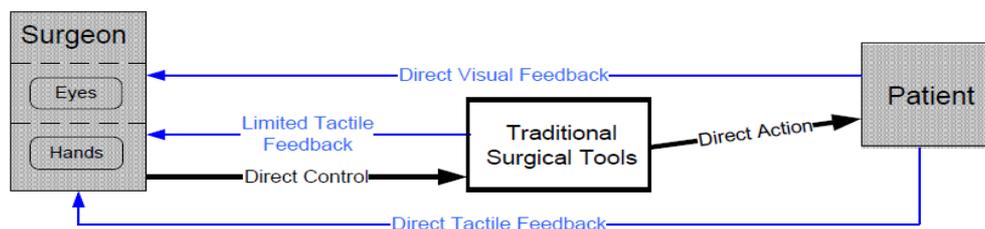


Figura 1.3 Schema descrittivo dei protagonisti e delle azioni di una operazione chirurgica tradizionale

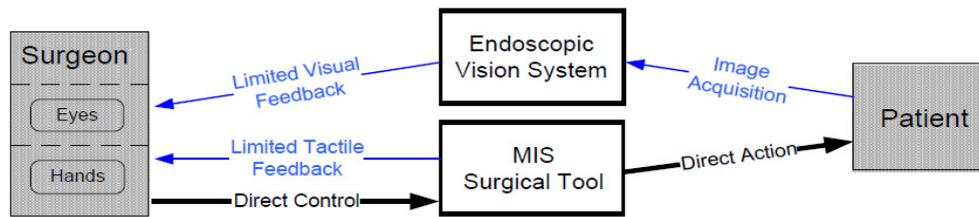


Figura 1.4 Schema descrittivo dei protagonisti e delle azioni di una operazione chirurgica mininvasiva

## 1.2 Limiti delle performances chirurgiche

La qualità della performance chirurgica diminuisce in maniera proporzionale ai limiti percettivi e motori incontrati dal chirurgo.

Durante un'operazione in 'open surgery', il medico non può vedere sotto la superficie esposta e ciò che è visibile dall'apertura chirurgica spesso non è sufficiente per comprendere l'intera anatomia; questo comporta una localizzazione del sito problematico non accurata, specialmente se esso si trova all'interno di un volume, e l'impossibilità di definire traiettorie di lavoro esatte. Queste limitazioni sono ancora più accentuate in caso di approccio mininvasivo.

In chirurgia endoscopica esistono 3 grosse categorie di problemi: visualizzazione, manovrabilità e sensibilità tattile.

Oltre alle difficoltà che si incontrano per ottenere un'immagine pulita attraverso un sistema video tubolare (con telecamera in posizione prossimale o distale), il feedback visivo soffre della mancanza di stereoscopia e di scarsa risoluzione e contrasto; inoltre presenta un campo di vista ridotto, caratterizzato da una bassa fedeltà dei colori alla realtà.

La necessità di effettuare l'operazione attraverso piccole incisioni limita i movimenti chirurgici possibili e i gradi di libertà: il punto di incisione sulla pelle del paziente agisce come un vincolo che permette solo 3 movimenti rotazionali e uno assiale (Fig. 1.2b); i problemi inerenti a questa configurazione sono: l'effetto 'fulcro' (inversione della cinematica: se la punta dello strumento deve andare a destra, la mano del chirurgo che la guida deve dirigersi a sinistra), la scalatura dei movimenti (dipendente da quanto lo strumento è inserito dentro il corpo) e l'orientamento fisso (i punti dello spazio di lavoro possono essere raggiunti con una sola direzione dello strumento, poiché esso può ruotare unicamente rispetto al suo asse) (Dario P., 2009-2010).

A questo si aggiunge una limitazione della sensibilità tattile e delle forze applicate. A causa della lunghezza dello strumento, della presenza di attrito e di giochi tra i giunti, il modulo e la direzione

delle forze applicate sull'impugnatura dal chirurgo non coincidono con quelle effettivamente applicate sui tessuti; la percezione delle superfici e dei piccoli movimenti (come le pulsazioni di una arteria) viene completamente persa, mentre invece rimane una alterata capacità di avvertire le forze di presa (*grasping*) (Faraz A. & Payandeh S., 2000).

### **1.3 Chirurgia computer assistita**

Lo sviluppo di nuove tecniche di acquisizione ed elaborazione di immagini mediche e di una strumentazione 'intelligente'-robotica e mecatronica- hanno reso possibile il miglioramento delle performances chirurgiche e l'esecuzione di nuove procedure prima non realizzabili: nasce la chirurgia computer assistita (CAS), frutto dell'integrazione delle nuove tecnologie abilitanti con le consolidate tecniche MIS.

Per CAS si intendono tutti i metodi e sistemi atti ad aiutare il chirurgo nell'uso razionale e quantitativo dei dati multimodali a disposizione (per lo più immagini), con l'obiettivo di pianificare ed effettuare interventi guidati (Lavallée S. et al., 2000).

Questa sinergia tra uomo e macchina viene impiegata in diverse fasi: nella fase preoperatoria (con la modellazione dell'anatomia e la simulazione), nell'assistenza intraoperatoria passiva (tramite l'uso di sistemi informativi e navigatori) e attiva (sistemi robotici e mecatronici), nella formazione di giovani chirurghi (il cui training può essere guidato e quantitativamente valutato); è importante porre l'accento sulla funzione di 'assistenza' al chirurgo: in chirurgia computer assistita la macchina non ha lo scopo di sostituirsi all'uomo, ma di aiutarlo a svolgere compiti difficili meglio di quanto non possa fare da solo (Taylor R.H. et al., 1996).

In questo orizzonte si sono sviluppati molteplici rami a cui fanno capo molte specializzazioni mediche: ad esempio chirurgia ortopedica computer assistita, neuro navigazione, stereotassi frameless; al di là dei vari campi di applicazione, queste diverse procedure presentano problematiche simili e possono essere ricondotte ad un unico framework esplicativo (Fig.1.5)

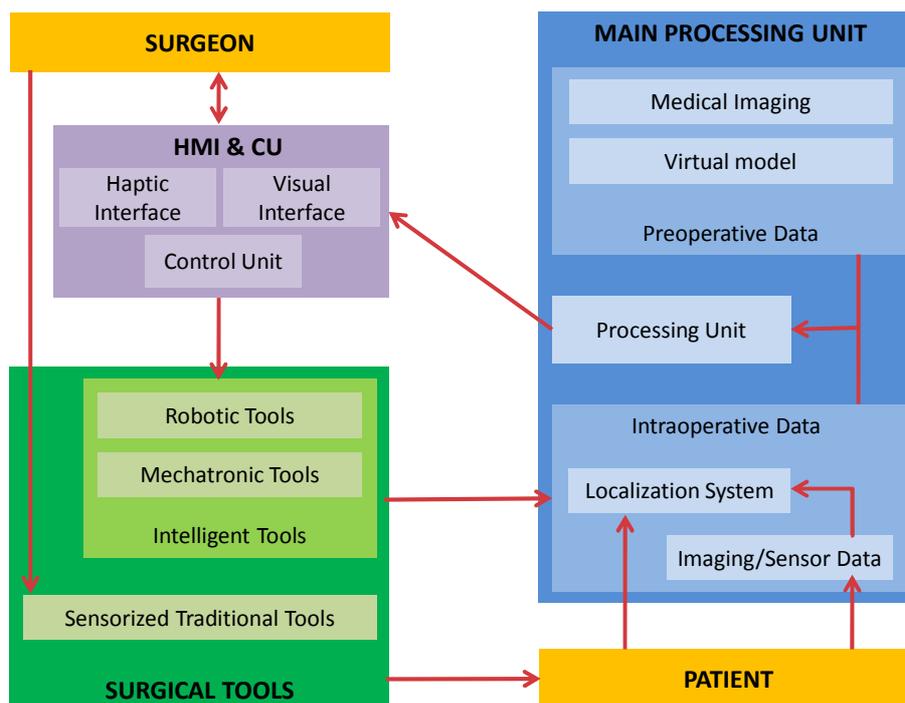


Figura 1.5 Schema funzionale di CAS

Sono 3 i blocchi interconnessi che permettono l'azione sul paziente.

1. **Interfaccia chirurgo-macchina:** tramite questa il chirurgo consulta le informazioni visive e aptiche (visual & haptic interface) e agisce sull'unità di controllo (alla quale convergono le informazioni elaborate dall'unità di processamento e dalla quale partono ordini per gli strumenti robotici o mecatronici); in questo modo il sistema aumenta le informazioni a disposizione (il modulo 'visual' agisce indipendentemente da quello 'haptic') e, tramite l'unità di controllo, agisce da filtro attivo ai comandi del medico, inibendone o reinterpretandone i più critici;
2. **Strumenti chirurgici:** se tradizionali, agiscono sul paziente direttamente manovrati dal chirurgo; se programmabili (robotici e/o mecatronici), sono comandati da unità di controllo in base al volere del medico e alle informazioni pervenute; gli strumenti che agiscono sul paziente sono sensorizzati e possono essere localizzati, diventando parte integrante dei dati intraoperatori;
3. **Unità di processamento principale:** questa integra i dati intraoperatori (provenienti dai sistemi di imaging e localizzazione e concernenti lo stato e la posizione degli strumenti rispetto al paziente e al sito chirurgico) con quelli preoperatori (immagine preoperatorie e modelli virtuali) e riversa informazioni elaborate a livello di interfaccia HMI e unità di controllo.

### 1.3.1 Classificazione dei sistemi CAS

I sistemi utilizzati in chirurgia computer assistita possono essere classificati in base alla modalità con cui avviene l'accesso al sito chirurgico e in base al tipo di interazione presente tra chirurgo e paziente.

L'accesso al sito chirurgico può avvenire in maniera tradizionale, o attraverso piccole incisioni (modalità mininvasiva) oppure mediante cavità e lumi naturali; un esempio che rientra in quest'ultima tipologia è la tecnica sperimentale N.O.T.E.S (Natural Orifice Transluminal Endoscopic Surgery): è possibile effettuare una operazione nell'area addominale utilizzando un endoscopio flessibile inserito attraverso un orifizio naturale (es. bocca, uretra, ano) e fatto passare nella cavità di lavoro mediante una incisione interna allo stomaco. Altri esempi sono rappresentati dai sistemi di chirurgia endocapsulare, con i quali è possibile analizzare visivamente e prelevare tessuti del sistema digerente (esofago, stomaco, intestino).

La modalità con cui il chirurgo agisce sul paziente permette invece la seguente tipizzazione: sistemi passivi, sistemi teleoperati, sistemi interattivi e sistemi autonomi.

I sistemi passivi non hanno attuazione: il chirurgo può sfruttare l'interfaccia visiva per manovrare gli strumenti tradizionali, avvalendosi delle elaborazioni dell'unità di processamento. Ne è un esempio lo StealthStation System, che elabora un modello 3D del sito chirurgico da imaging tomografico o MRI e lo adatta all'anatomia del paziente durante l'operazione, incrementandone la precisione e l'accuratezza (Fig 1.6a).

I sistemi autonomi non necessitano del chirurgo se non come supervisore dell'azione degli strumenti robotici e meccatronici: questi sono comandati dalla sola unità di controllo, la quale a sua volta riceve informazioni utili dall'unità di processamento; Robodoc e CyberKnife, sistemi robotici utilizzati rispettivamente nella protesizzazione totale di anca e ginocchio e in radiochirurgia oncologica, operano autonomamente a partire dalle informazioni anatomiche preoperatorie (Fig. 1.6c).

I sistemi teleoperati permettono al medico di agire sugli strumenti robotici e meccatronici attraverso l'interfaccia uomo macchina e l'unità di controllo, sfruttando dati solo intraoperatori; lo schema funzionale di un robot teleoperato è riportato in figura 1.7.

I sistemi robotici interattivi utilizzano tutti i blocchi dello schema funzionale di fig. 1.5: ad esempio, l'atroscoPIO MIAS Mec, grazie all'integrazione di una sensoristica avanzata con modelli 3D

dell'anatomia del paziente (elaborati su dati preoperatori), ha la capacità di individuare e prevenire possibili collisioni.

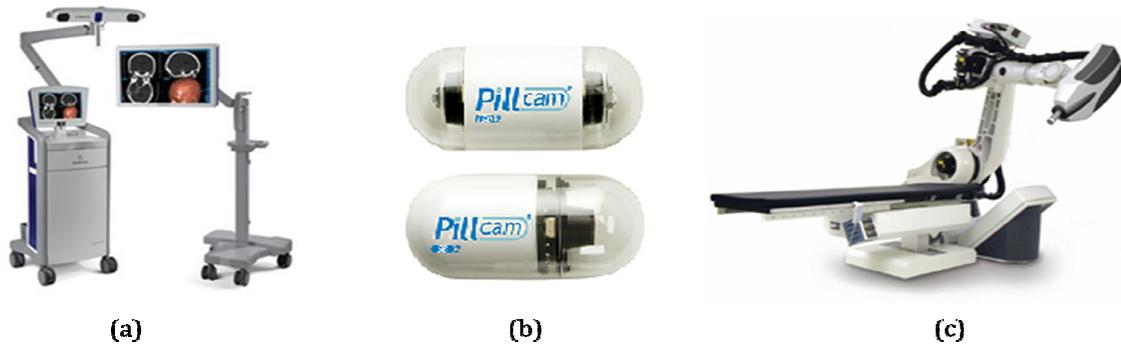


Figura 1.6 (a) StealthStation System; (b) Capsula endoscopica Pillcam; (c) CyberKnife

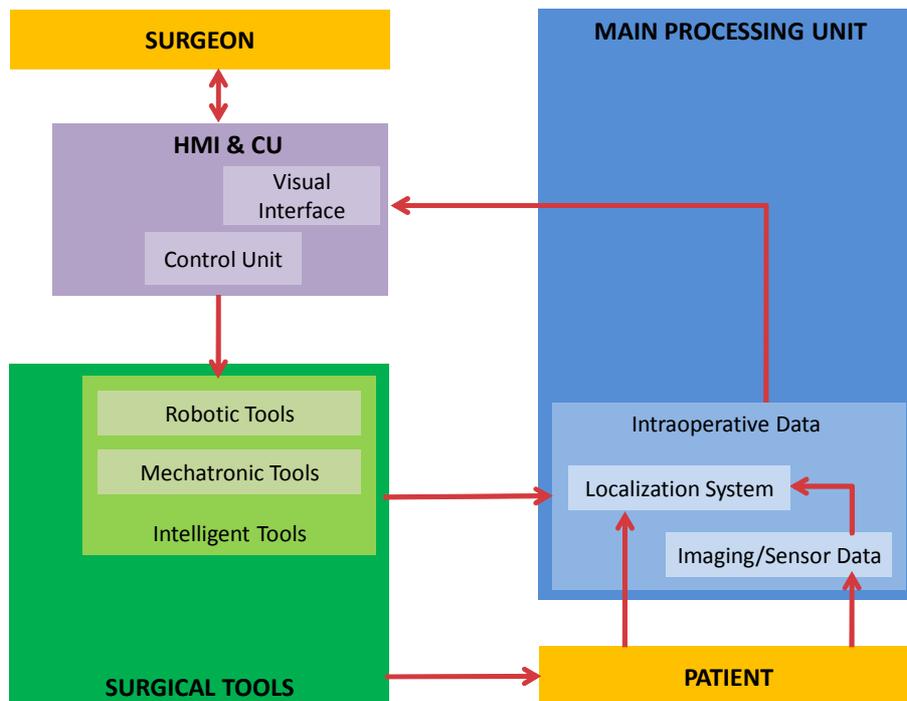


Figura 1.7 Schema funzionale di sistema CAS teleoperato

### 1.3.2 Il robot Da Vinci

Il sistema chirurgico Da Vinci, prodotto della Intuitive Surgical Inc., è un sistema teleoperato per operazioni mininvasive nelle aree pelvica, addominale e toracica.

E' costituito da una consolle ergonomica, una piattaforma con 4 bracci robotici, un avanzato apparato di visione e strumenti endoscopici Endowrist.

Il chirurgo lavora alla consolle (parte 'master' del sistema) guardando le immagini ingrandite del sito chirurgico attraverso un visore stereoscopico strutturato in modo da dare una visione immersiva del campo chirurgico e degli strumenti; l'endoscopio 3D ha 2 canali di visione indipendenti associati a 2 monitor a colori ed è controllato in modo da poter variare il campo visivo (zoom in, zoom out, rotazione) al comando del medico (manuale o mediante pedale); il processamento delle immagini permette l'abbattimento del rumore e la visualizzazione del target anatomico con la naturale profondità di campo, un buon contrasto e ingrandimento.

Attraverso 2 master controller (simili ad esoscheletri a 7 gradi di libertà) manipolabili in maniera estremamente naturale e simile ai tradizionali gesti chirurgici, il movimento di ciascuna mano viene filtrato (eliminazione del tremore fisiologico), scalato e tradotto real time in azioni degli strumenti miniaturizzati all'interno del corpo del paziente (parte 'slave' del sistema teleoperato) (Fig.1.8).

L'inversione cinematica, normalmente riscontrabile in MIS operando con strumenti rigidi attraverso un'incisione-fulcro, viene compensata in modo che un movimento in una certa direzione della mano del chirurgo si trasformi in un movimento scalato dello strumento all'interno del paziente nella stessa direzione.

La piattaforma, costituente la parte 'slave' del sistema, è facilmente trasportabile vicino al tavolo operatorio ed è formata da 4 bracci elettromeccanici che agiscono sul paziente. Tre bracci tengono e manovrano gli strumenti chirurgici: essendo il sistema bimanuale, 2 sono associati alle mani destra e sinistra del chirurgo, il terzo è di assistenza e può essere utilizzato in alternativa a uno dei precedenti; il quarto braccio, in posizione centrale, attua l'endoscopio e ne controlla il movimento.

Ciascun braccio robotico è planare e dotato di 3 giunti assiali; ad eccezione del braccio dedicato all'endoscopio, tutti gli altri hanno una guida con cui posizionare e fissare gli strumenti Endowrist (Fig. 1.9): in totale ad ogni braccio robotico sono associati 3 rotazioni +1 traslazione=4 gradi di libertà passivi (nel senso che la configurazione di ciascuno è determinata all'inizio dell'operazione e poi bloccata).



Figura 1.8 Console ergonomica del Da Vinci (destra); Master controller attuati dal chirurgo e corrispondente movimento degli strumenti robotici (sinistra)

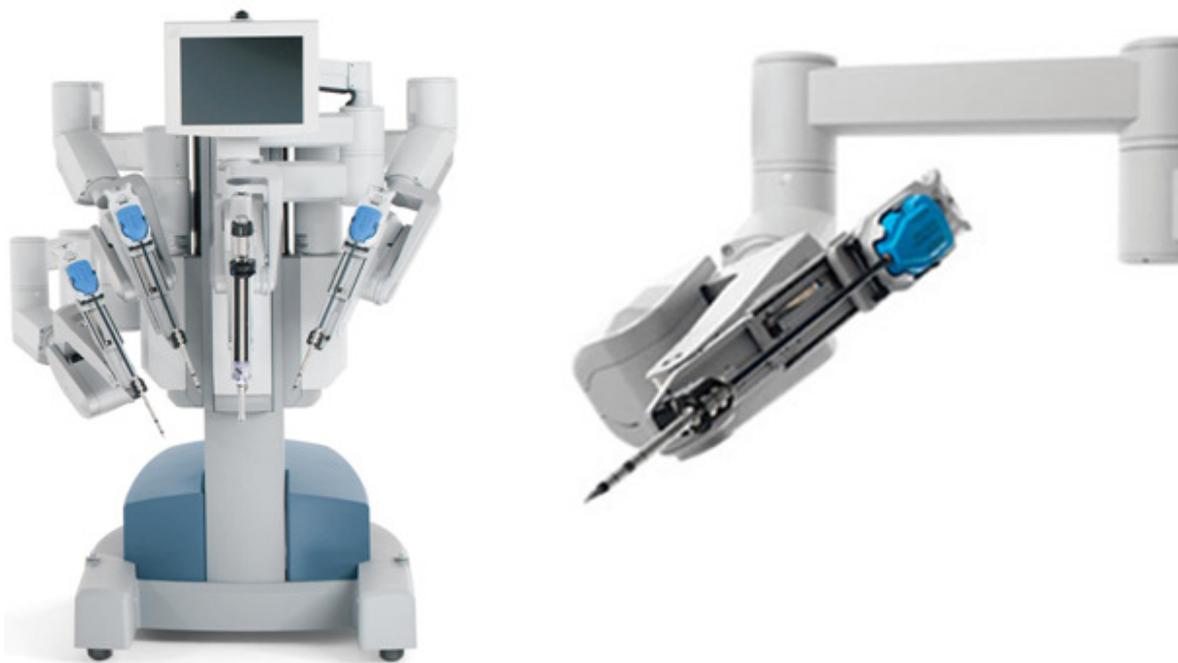


Figura 1.9 Parte 'slave' del Da Vinci (sinistra); braccio robotico e Endowrist (destra)

La strumentazione chirurgica Endowrist incorpora tutti i gradi di libertà di un polso, è attuata a cavi e può essere sterilizzata e riutilizzata per un numero determinato di interventi; sulla punta, l'end effector può assolvere la funzione di pinze, porta aghi, elettrocauterizzatore, divaricatore e altro a seconda del tipo di performance chirurgica necessaria: ciascun strumento è intercambiabile durante l'operazione.



Figura 1.10 Diversi tipi di end effector

I 6 cavi in punta sono in grado di implementare pitch, yaw ( $\pm 90^\circ$ ) e grip dell'end effector; il grip è risultato della differenza di yaw nelle chele dell'end effector e può arrivare ad un massimo di  $150^\circ$  di apertura; poiché il pitch dello strumento determina la variazione della lunghezza dei cavi con un effetto risultante anche sullo yaw (accoppiamento dei 2 gdl), è necessaria una compensazione lineare della rotazione di uno rispetto all'altro.

Lo strumento, oltre ai 3 gdl attivi sovrascritti attuati a cavi, può ruotare su se stesso (roll), traslare avanti e indietro e ruotare rispetto al punto di inserzione (pitch e yaw esterni), per un totale di altri 4 gradi di libertà attivi attuati dall'esterno; per realizzare queste ultime rotazioni (utili nella regolazione dell'inclinazione dello strumento nel trocar), non potendo essere utilizzato un tradizionale giunto sferico a causa dell'interferenza meccanica con il busto del paziente, si ricorre al centro remoto di rotazione (RCM) (Fig. 1.11).

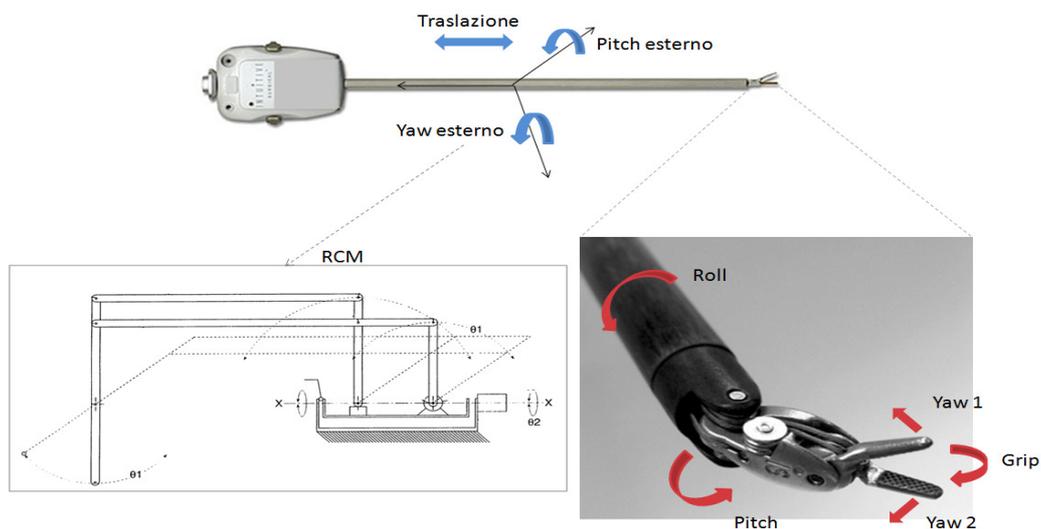


Figura 1.11 Endowrist e gradi di libertà attivi esterni (blu) e interni (rosso); RCM

In figura 1.11 è riportato l'intero Endowrist, compreso l'involucro esterno che contiene le pulegge dei cavi di attuazione e che si accoppia con la parte non disabile del braccio robotico; sono

evidenziati in celeste i gradi di libertà attivi esterni e in rosso i gradi di libertà attivi interni dello strumento.

Esistono Endowrist di diametri pari a 5 e 8 mm, con cavi di acciaio inox molto flessibili di diametro 0.35 mm, capaci di una forza tensile di circa 30 N (Dario P., 2009-2010).

Il sistema robotico Da Vinci viene utilizzato in urologia, ginecologia, chirurgia cardiotoracica, chirurgia generale e del colon-retto.

## **1.4 Il problema dell'attuazione e della trasmissione di potenza in uno strumento per MIS**

Le unità funzionali di un sistema robotico sono:

- Organi meccanici: giunti, struttura meccanica, alla cui parte terminale (end effector) è affidata l'esecuzione di un compito;
- Organi sensoriali: propriocettivi (stato interno del robot: posizione e velocità) ed esteroceettivi (ambiente esterno: forza, prossimità, visione);
- Organi di controllo: algoritmi per il controllo di posizione, velocità o forza, in relazione alle informazioni percettive a disposizione;
- Organi di attuazione: elettrici, idraulici o pneumatici;
- Organi di governo e calcolo: programma di lavoro, controllo ad alto livello esplicito attraverso Interfaccia uomo-macchina (Fig. 1.12).

Focalizzando sulla parte meccanica, una delle caratteristiche principali a cui è legata l'efficienza dell'intero sistema è la trasmissione all'end effector dell'azione meccanica sviluppata dagli attuatori.

Anche nello specifico ambito della robotica medica, la trasmissione meccanica dalla parte prossimale a quella distale dello strumento e la cinematica risultante costituiscono una problematica fondamentale da affrontare, con le aggiuntive difficoltà di precisi limiti geometrici e stringenti necessità di sicurezza.

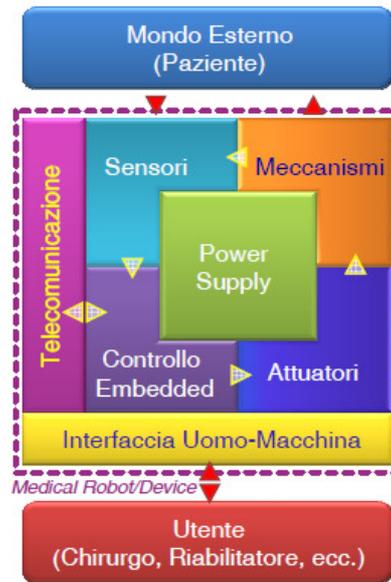


Figura 1.12 Unità funzionali di un device medicale

### 1.4.1 Attuazione a cavi in uno strumento per MIS

Adottata nel robot Da Vinci e largamente utilizzata anche altrove, l'attuazione mediante cavi e pulegge risulta pratica e di semplice realizzazione; i vantaggi sono: flessibilità dei cavi (grande varietà di architetture possibili), dimensioni molto ridotte, relazione semplice e proporzionale tra forza applicata al cavo e momento risultante sul giunto.

D'altro canto lo svantaggio principale consiste nel fatto che essa non consente elevate prestazioni in termine di forze esercitabili; se infatti si considera un giunto attuato con un cavo di sezione  $A_c$  e pulegge di raggio  $r_p$ , si può dimostrare che la coppia a flessione a cui la punta del giunto riesce a resistere è limitata dalla massima tensione del cavo e risulta 1/10 della forza che la struttura (di diametro  $D$  e momento di inerzia  $J_s$ ) potrebbe teoricamente sopportare (Fig. 1.13) (CRIM Lab, Scuola Superiore Sant'anna, 2010).

Considerando la dipendenza della resistenza del cavo dalla sezione trasversale, la massima tensione del cavo è limitata ed è inoltre soggetta a diminuire nell'utilizzo ripetuto dello strumento.

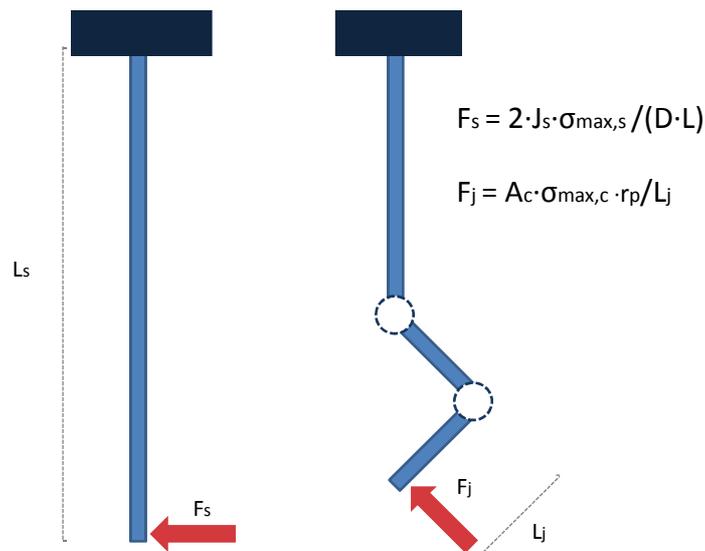


Figura 1.13 Confronto tra le forze esercitabili da un end effector rigido e uno attuato a cavi

## 1.4.2 Obiettivi nella progettazione di sistemi di attuazione innovativi per applicazioni mininvasive

Con particolare riferimento ai sistemi robotici per chirurgia mininvasiva, l'attuazione dei vari gradi di libertà dell'end effector deve essere affrontata in termini di:

- massima forza/momento trasmesso,
- velocità e precisione del movimento,
- dimensioni dei collegamenti e massimo range di movimento,
- rigidità elevata e compattezza del sistema,
- affidabilità.

A questo proposito, nell'ambito di una collaborazione tra Laboratorio CRIM e Intuitive Surgical Inc., sono state sviluppate diverse soluzioni nuove per l'attuazione efficiente di una struttura articolata e miniaturizzata, alternative al classico (e limitato) uso di cavi; le caratteristiche innovative di queste sono riassumibili nei seguenti aspetti/sotto-obiettivi comuni:

1. dimensione trasversale variabile: capacità di sfruttare una dimensione trasversale variabile a livello del giunto durante l'attuazione, ad esempio per aumentare il braccio della forza e dunque il momento trasmissibile;

2. aumento della forza mediante convertitori di moto a livello del giunto: ad esempio attraverso l'utilizzo di elementi rigidi (riducono il moto) o di sistemi a camere in pressione che sfruttano lo spazio che si forma durante la variazione della posizione del giunto;
3. trasmissione del moto flessibile: capacità del sistema di attuazione di essere facilmente adattabile ad un braccio robotico.

Per ulteriori particolari tecnici a proposito delle singole soluzioni si rimanda alla trattazione specifica (Martinelli I e Menchicchi M, tesi di laurea, Università di Pisa, 2009-2010).

## **1.5 Specifiche tecniche per la progettazione di un meccanismo di attuazione per MIS**

Le linee guida alla progettazione di un meccanismo sono state sviluppate a partire da alcuni requisiti-base, necessari a garantire l'efficienza, la compatibilità e l'adattabilità del prodotto finale all'utilizzo in uno strumento mininvasivo.

La progettazione preliminare è indirizzata all'attuazione di 1 solo grado di libertà, ma l'obiettivo finale è un sistema di attuazione che si adatti ad un numero di gdl  $\geq 3$ .

**Movimento** Il giunto ad 1 gdl deve garantire uno spostamento angolare dell'end effector fino a  $\pi$  rad rispetto al sistema di riferimento solidale al braccio robotico in cui è incassato. La velocità angolare di lavoro deve essere 1.5 rad/s.

**Forze** Il giunto deve poter resistere a forze e momenti tipici di un'operazione chirurgica:  $F_z=50$  N,  $F_{xy}=5$  N,  $M_f=0.5$  Nm, rilevate sull'asse del braccio e sul piano ad esso perpendicolare (Lehman A.C. et al., 2008) (Berkelman P. & Ma J., 2009).

**Dimensioni** Nella fase di inserimento nel corpo del paziente, il giunto deve passare nel trocar e dunque avere un diametro di massimo 5 mm.

**Precisione di posizionamento** Il meccanismo deve avere una rigidità elevata di 0.25 Nm/° (la rigidità risulta fondamentale per questo genere di applicazioni in quanto è necessario garantire che le deformazioni non eccedano un limite massimo ammissibile.) e il gioco di montaggio di massimo 2°; il sistema, attuato da un servosistema, deve essere controllato closed loop, in modo da poter compensare eventuali errori.

**Sicurezza** Deve essere possibile la sterilizzazione in autoclave; la presenza di cavità e interstizi, in cui la permanenza di materiale organico potrebbe favorire lo sviluppo di batteri, deve essere minimizzata.

**Temperatura** La temperatura di lavoro è  $(30 \pm 10)^\circ$  ma il materiale, durante la sterilizzazione deve poter sopportare la permanenza per 40 minuti in un ambiente a temperatura  $130^\circ$ .

**Durata** La durata deve essere  $\geq$  alla durata di un giunto attuato a cavi: 10000 cicli di lavoro, che corrispondono a circa 10 operazioni chirurgiche (Arata J. et al., 2005).

**Ambiente di lavoro** Il giunto deve lavorare all'interno del corpo del paziente e dunque il materiale utilizzato per la sua costruzione deve poter sopportare eventuali fenomeni di corrosione, dannosi per lo strumento quanto per i tessuti interni.

Il meccanismo è attuato a fluido: il circuito di attuazione, visto l'ambiente di lavoro e le problematiche di sicurezza, deve lavorare con liquido non tossico e ad una pressione tale per cui, in caso di guasto, una eventuale perdita non danneggi i tessuti circostanti; tale fluido deve fungere da elemento di riduzione di attrito e di usura, essendo interdetta l'aggiunta di altri lubrificanti.

Le specifiche sono riassunte nella tabella 1.2:

Ingombro diametrico a riposo	5 mm
$F_z$	50 N
$F_{xy}$	5 N
$M_f$	0,5 Nm
$T_e$	$(30 \pm 10) ^\circ\text{C}$
$T_a$	130 $^\circ\text{C}$
Rigidezza	0,25 Nm/ $^\circ$
Gioco	2 $^\circ$
Durata	10 000 cicli

Tabella 1.2 Specifiche per la progettazione di un sistema di attuazione per MIS

## 1.6 Giunto espandibile a catena

In seguito verrà approfondita la struttura di un meccanismo espandibile a catena ad 1 grado di libertà, progettato per l'impiego in MIS (Martinelli I e Menchicchi M, tesi di laurea, Università di Pisa, 2009-2010), la cui attuazione idraulica è argomento di questo lavoro di tesi.

### 1.6.1 Descrizione del meccanismo

Il meccanismo può attuare 1 grado di libertà ed è costituito da una struttura espandibile a catena variabile, cioè composta da una serie di elementi uguali ('elementi catena'): opportunamente movimentati, essi vanno a formare una serie di celle rigide solidali con il corpo da movimentare (end effector EE), le quali ruotano sospinte dall'elemento della cella non ancora formata (Fig. 1.14).

Le celle sono componibili e scomponibili a seconda della direzione del moto: è possibile effettuare sia il movimento di andata che quello di ritorno (chiusura e apertura della pinza); in configurazione chiusa gli elementi sono allineati all'interno del braccio, permettendo così l'inserimento tramite trocar.

In figura 1.15 sono rappresentati 3 elementi catena E1, E2, E3 e il primo elemento del meccanismo, in configurazione di lavoro; ciascun elemento-catena è composto da 2 travi incernierate all'estremità r; il collegamento con il precedente elemento avviene tramite la cerniera fissa in p; l'estremità q di ciascun elemento catena si inserisce in un sistema di supporto e guida delle maglie: questo è costituito da un perno sagomato in modo che le estremità q delle

maglie formate si inseriscano in cave circolari a distanza angolare costante, le quali le trascinano nel movimento di rotazione (Fig.1.16a).

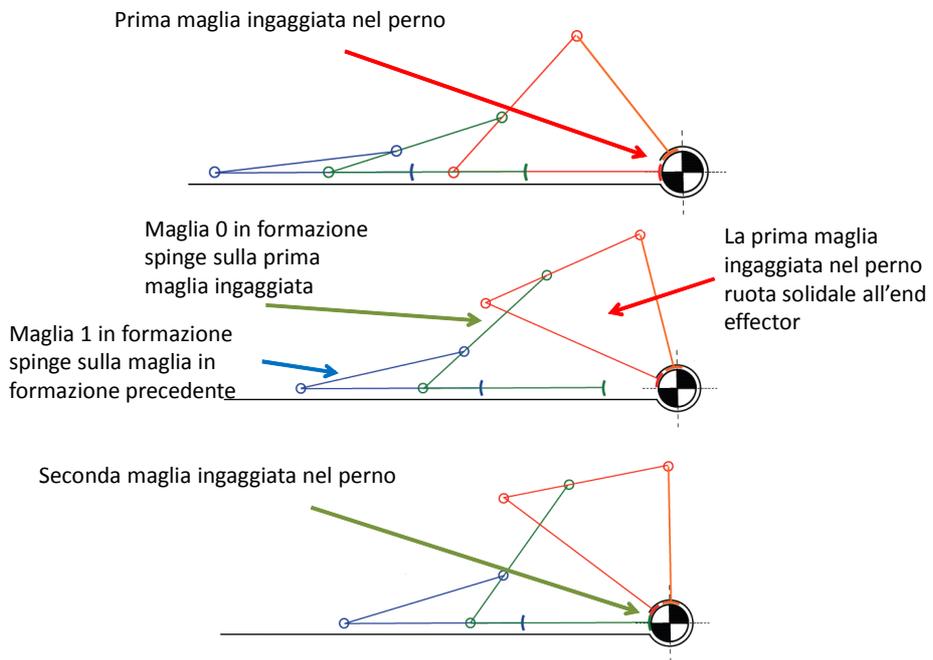


Figura 1.14 Funzionamento del meccanismo espandibile a catena

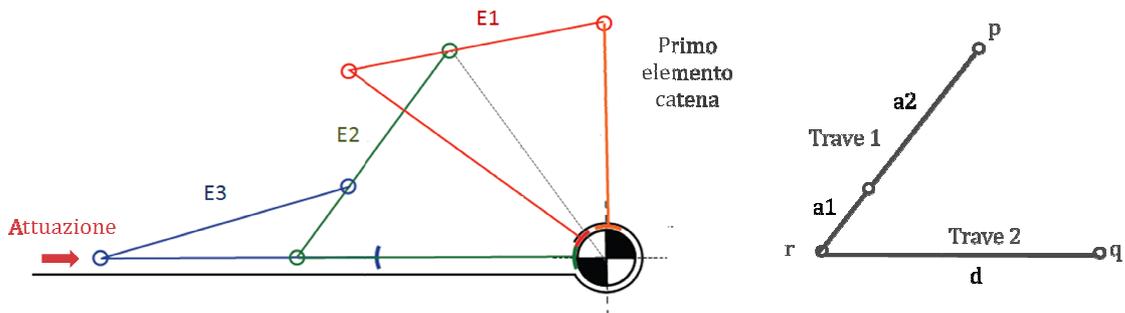


Figura 1.15 Elementi catena

Poiché il moto relativo di 2 maglie collegate comporta che le 2 parti superiori e inferiori si intersechino, la conformazione di queste è tale che non ci sia compenetrazione (Fig 1.16b-c).

Il sistema è ciclico nel senso che la maglia i-esima ingaggiata nel perno forma un angolo tra la trave 1 e la trave 2 che la compongono uguale a quello che forma la maglia precedente (Fig.1.17).

Dal punto di vista cinematico non si ha la stessa ciclicità: il numero delle maglie si riduce progressivamente con l'ingaggio graduale delle stesse nel perno centrale: i cicli cinematici di

ciascun elemento catena (dalla formazione all'ingaggio nel perno centrale) differiscono tra loro e l'entità di questa differenza, inizialmente minima, va aumentando all'aumentare della rotazione dell'end effector  $\Theta_f$ .

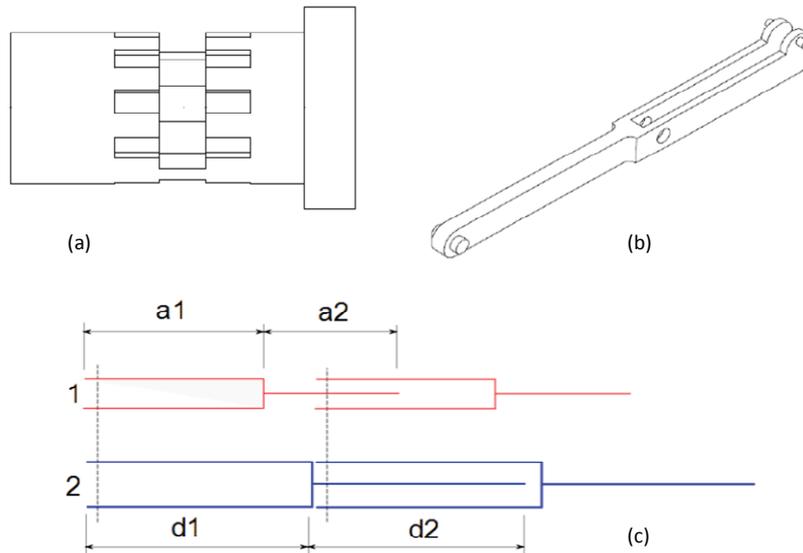


Figura 1.16 (a) Perno con alloggiamenti sagomati per ospitare le estremità q delle maglie formate; (b) trave 1; (c) Schematizzazione della struttura di trave 1 e trave 2

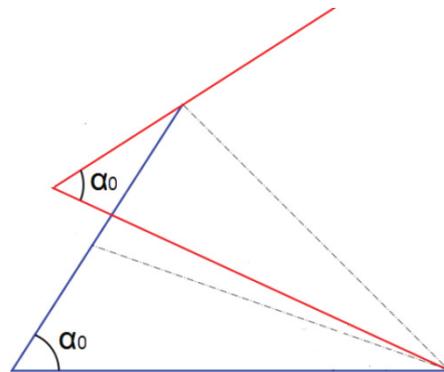


Figura 1.17 Ciclicità della struttura ingaggiata nel perno

## 1.6.2 Sistema di attuazione idraulica del meccanismo

Il sistema di attuazione idraulica per il meccanismo illustrato nel paragrafo precedente è costituito dai seguenti componenti:

- Motore brushless, il quale fornisce energia meccanica alla pompa;
- Pompa, la quale trasforma l'energia meccanica fornita dal motore in energia idraulica, attingendo acqua (fluido incompressibile) da un serbatoio;
- Valvola a spola (valvola direzionale) simmetrica a 4 vie, la quale realizza il collegamento tra più rami del circuito, in maniera dipendente dalla posizione dello stelo (e degli otturatori ad esso solidali) al suo interno;
- Elettromagnete a doppio effetto, il quale attua linearmente la valvola (nella fattispecie lo stelo della valvola) in base a dei segnali di controllo; poiché costituito da una bobina e da un nucleo ferromagnetico che trasla al suo interno, variando la corrente in ingresso è infatti possibile far assumere all'otturatore precise posizioni, in modo da poter controllare direzione del flusso e la portata;
- Sistema cilindro-pistone: il pistone traduce la pressione differenziale tra le 2 camere del cilindro in un moto traslatorio.

Nel loop di controllo è prevista la presenza di un controllore, il quale è in grado di guidare la valvola mediante l'elettromagnete, in base all'elaborazione delle informazioni fornite da un sensore di posizione (Fig.1.18).

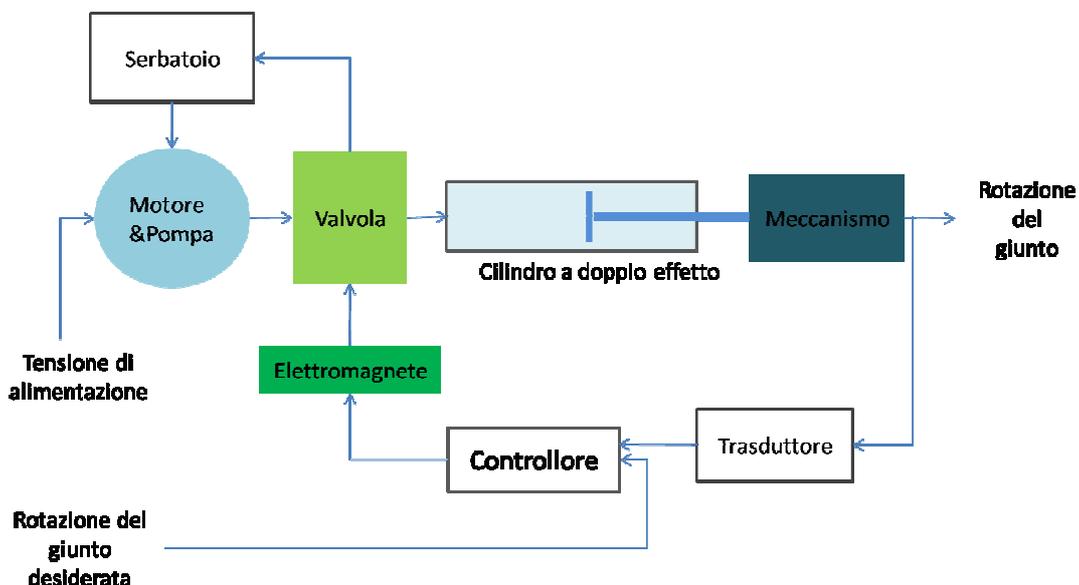


Figura 1.18 Sistema di attuazione a fluido closed loop