

CHIRURGIA ASSISTITA DAL CALCOLATORE
Appunti dal corso del Prof. Vincenzo Ferrari AA 2015-16

ACCENNI DI CHIRURGIA ROBOTICA

Dagli appunti di:

Giulia Mosconi

Chirurgia Robotica

Con il termine “chirurgia robotica” si indica l’utilizzo di sistemi robotici nelle procedure chirurgiche. La chirurgia robot-assistita è volta a superare i limiti delle metodiche preesistenti, per migliorare l’accuratezza della chirurgia e/o per ridurre l’invasività della procedura al paziente.

Esistono diversi tipi di robot impiegati in svariati ambiti medici quali la chirurgia generale, ortopedica, maxillofacciale, neurochirurgia ed altri ancora; il metodo migliore per distinguerli e classificarli, è sulla base dell’automatismo che essi hanno.

Sono stati sviluppati robot completamente automatici che implementano il concetto CAD/CAM: un progettista su un software CAD (Computer-Aided Design) disegna il progetto, segue una fase di elaborazione assistita (Computer-Aided Manufacturing) e l’operatore ha il solo compito di settare e supervisionare il sistema.

Esistono poi robot nei quali c’è un certo livello di interazione con il chirurgo che possono essere detti collaborativi. Si hanno esempi di robot collaborativi anche fuori dall’ambito medico, si pensi ad esempio alle automobili con il sistema anti-slittamento. In questo caso è il guidatore a premere l’acceleratore, ma se è su un terreno con bassa aderenza, il sistema collabora con lui limitando in modo automatico la potenza trasmessa alle ruote, per evitare possibili slittamenti che potrebbero comprometterebbero la guida.

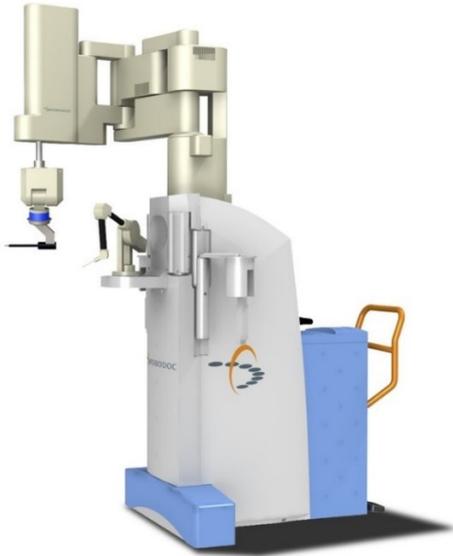
Un’ultima tipologia sono i sistemi teleoperati, nei quali il controllo è demandato completamente all’operatore. Questi sistemi permettono di aumentare le capacità dell’utente di lavorare a distanza, amplificando magari la sua destrezza, ma il loro livello di automatismo è nullo. Si pensi ad esempio ad un escavatore: esso è guidato totalmente dall’operatore e ne amplia notevolmente le capacità, sia in termini di forza che di rapidità nell’esecuzione del task.

Ricapitolando, nell’ambito della chirurgia robotica distinguiamo tra:

- Robot completamente autonomi
- Robot collaborativi
- Sistemi teleoperati.

Robot Completamente Autonomi

- **ROBODOC**



Il primo esempio di robot proposto in chirurgia risale al 1980 ed è un robot completamente autonomo nel quale è implementato il concetto della lavorazione CAD/CAM. Il Robodoc ha fatto la storia della chirurgia robotica ma attualmente è poco diffuso. Esso prende come dato di ingresso l'immagine TC del paziente e, a partire da questa, il chirurgo pianifica l'intervento in modo ottimale, decidendo come applicare la protesi articolare.

Intervento di protesi d'anca

Nella sua prima versione, il Robodoc veniva impiegato solo per interventi di protesi d'anca:

<http://thinksurgical.com/video>

Il robot si occupa di fresare il canale all'interno del femore. Lo stelo (che va dentro il femore), nella tecnica tradizionale, è inserito manualmente. Il chirurgo decide prima dell'intervento dimensioni e curvatura dello stelo, dopo di che lo inserisce aiutandosi con un martello. Inizialmente questa tipologia di impianti dava dei problemi:

1. Dislocazione dello stelo (qualche tempo dopo l'intervento, lo stelo poteva sfilarsi).
2. Rottura dell'osso in sede operatoria (per evitare la dislocazione dello stelo, il chirurgo poteva esercitare troppa forza sullo stelo (con il martello) per avere maggiore adesione, finendo a volte col rompere l'osso).

Per ovviare a questi problemi, è stato pensato di creare un incavo all'interno del femore adatto per lo specifico impianto. L'idea è di sagomare l'osso (lavorandolo internamente) al fine di ottenere un profilo che combaci perfettamente con quello dello stelo, in modo da avere un'aderenza sufficiente senza rischiare rotture.

- **Registrazione**

Prima di acquisire un'immagine TC del paziente, il chirurgo inserisce dei pin sull'osso in maniera invasiva. In seguito, una volta creato l'accesso chirurgico in sala, il robot è solidarizzato al femore e questi pin sono acquisiti con un puntatore. Grazie alla presenza di questi riferimenti, è possibile ottenere un primo allineamento dell'immagine pre-operatoria rispetto al SDR del robot. A questa prima registrazione per punti corrispondenti, segue una procedura di registrazione di raffinamento per superfici.

- **Creazione del Canale e Inserimento dello Stelo**

In seguito il robot fresa in automatico il femore, sulla base della posizione che si vuol far assumere allo stelo e sulla base della sua forma, al fine di creare un canale adatto al tipo di stelo. Dunque quando si va ad inserire la protesi, non è il martello dell'ortopedico che crea la strada, ma c'è già un canale modellato. All'operatore è fornito un telecomando che permettergli di fermare il robot qualora qualcosa non stia funzionando a dovere.

NOTA: Non è stato fatto uso di alcun localizzatore, la registrazione è fatta direttamente mettendo un puntatore sulla punta del robot e spostandola lungo la superficie dell'osso. L'obiettivo è riferire l'immagine TC rispetto al SDR del robot, quindi la digitalizzazione dei punti può essere fatta direttamente con un puntatore solidale al robot e di conseguenza solidale al SDR utilizzato in sala. In questo caso il robot è utilizzato come un localizzatore meccanico.

Questo tipo di robot non ha avuto diffusione poiché troppo invasivo rispetto alla procedura standard. Oggi sono state studiate nuove geometrie per gli steli, con forme diverse in funzione della specifica anatomia del paziente che minimizzano il rischio di rottura del femore.

Oggi, nella tecnica tradizionale, il chirurgo taglia il femore e inserisce lo stelo. Con il robot deve fissare il robot rispetto al femore e inserire dei pin nell'osso per eseguire la registrazione. Oggi il robot aumenterebbe la durata dell'intervento rendendo la procedura più invasiva. Il robot darebbe dei miglioramenti in termini di accuratezza nel posizionamento dell'impianto, ma il suo impiego per questa tipologia di protesi non avrebbe oggi senso.

Intervento di protesi al ginocchio

Lo stesso robot ROBOTOC è impiegato oggi per interventi di protesi al ginocchio. In questa tipologia di intervento si deve fresare l'estremità dell'osso e poi applicare la protesi rispettando i vincoli cinematici dell'articolazione paziente. Il video mostra il Robodoc all'opera in un intervento di protesi al ginocchio:

<https://www.youtube.com/watch?v=qdthohE10eM>

Prima dell'intervento c'è una fase di settaggio in sala: è necessario registrare il SDR del robot rispetto al SDR della TC al fine di eseguire tagli e fresature in modo coerente. Dall'immagine TC pre-operatoria, si ricostruisce un modello virtuale della superficie dell'osso. In sala, dopo aver creato l'accesso chirurgico e aver avvitato il robot sull'osso per creare un link rigido tra i due, il chirurgo acquisisce alcuni punti della superficie dell'osso con un puntatore. Il software provvede a registrare la superficie virtuale precedentemente ricostruita dall'immagine TC, con i punti acquisiti in sede intra-operatoria. Dopo aver effettuato un controllo di ragionevolezza (sanity check) per verificare la corretta registrazione dei due SDR, il robot (dotato di un utensile in grado di fresare) lavora l'osso secondo quanto pianificato. Da notare che questo robot, concettualmente, lavora allo stesso modo di una fresa a controllo numerico che si può trovare in qualunque officina.

Robot Collaborativi

- **RIO/MAKO**

Una soluzione robotica molto diffusa è quella che prevede di eseguire interventi di protesi di ginocchio e di anca con robot collaborativi. In questo caso la macchina è pensata per lavorare insieme all'uomo. Un esempio è il robot Rio dell'azienda Mako:

https://www.youtube.com/watch?v=fSU_R9mgeSg

<https://www.youtube.com/watch?v=t46mSQOo0IM>

Intervento di protesi d'anca

- Pianificazione e Registrazione

A differenza del Robodoc, il Rio/Mako sfrutta un ulteriore sistema di riferimento oltre a quello della macchina. In sala operatoria sono presenti almeno due SDR principali: quello del robot e quello del localizzatore.

Inizialmente è prevista una fase di pianificazione nella quale, da un'immagine TC del paziente, sono determinati tutti i dati anatomici necessari per eseguire la procedura (in particolare si ricavano lunghezze e inclinazioni delle strutture interessate).

L'intervento inizia con una registrazione del femore: si inserisce nell'osso una vite, sulla quale si applica un frame (sensore a 6 GDL), e si effettua una registrazione di superficie del femore acquisendo dei punti con un puntatore. L'algoritmo di registrazione ha lo scopo di sovrapporre e far corrispondere, la nuvola di punti pre-operatoria con quella intra-operatoria acquisita con il digitalizzatore. Terminata questa operazione, si va ad individuare, con un sistema di navigazione tradizionale (cioè con il puntatore del sistema di localizzazione), quale deve essere con un certo grado di approssimazione, il piano di taglio.

- Inserimento dello Stelo

Si prepara il campo chirurgico e si inserisce una sega più o meno lungo il piano di taglio precedentemente identificato. Questa fase non è guidata da robot, poiché non è importante il punto esatto nel quale effettuare il taglio, ma l'importante è andare a determinare dove sarà posizionato lo stelo (che viene impiantato con tecnica tradizionale allargando il canale con una raspa ed utilizzando poi il martello per inserirvi l'impianto). Diversamente dal Robodoc, non viene creato un canale pre-modellato all'interno del femore, e quindi potrebbe esserci un po' di imprecisione rispetto a quanto pianificato.

A questo punto il chirurgo, tramite un localizzatore ottico in grado di individuare i sensori precedentemente posizionati e registrati sul paziente, va a verificare posizione ed orientamento della testa dello stelo. In seguito a questo controllo, si adatteranno sia l'orientamento della capsula, sia le dimensioni e l'orientamento del colletto che sta fra la testa della protesi e lo stelo al fine di ottenere la cinematica dell'articolazione desiderata.



La navigazione consente di verificare, rispetto a quanto pianificato, il centro di rotazione, quanto è l'offset laterale, quant' è la lunghezza della gamba e così via. Anche il bacino è registrato digitalizzando dei punti, questo poiché è fondamentale andare a ristabilire l'esatto centro di rotazione anche al bacino stesso. Si noti che per l'inserimento dello stelo il robot non è utilizzato, è utilizzato solo il sistema di navigazione.

- Inserimento della Coppa

Prima di procedere con la fresatura dell'acetabolo, deve essere eseguita una verifica di calibrazione della punta del robot. È fondamentale fare ulteriori controlli di ragionevolezza (sanity check) andando sui punti e verificando che ci sia corrispondenza. Il robot, una volta posizionato, allinea in automatico l'asse della fresa lungo la traiettoria desiderata, ma la fase di avanzamento è guidata dal chirurgo, il robot allinea solamente la fresa lungo la giusta direzione. Anche la fase di inserimento della coppa acetabolare è guidata dal robot, che allinea la capsula esattamente con l'orientamento e l'inclinazione desiderati e poi, quello che è demandato al medico, è l'utilizzo del martello. Il Rio/Mako inoltre aiuta il chirurgo a capire quando l'impianto è totalmente e correttamente inserito.

Questo tipo di approccio è molto gradito dai chirurghi perché permette loro di avere la padronanza dell'intervento e al tempo stesso di avere la precisione della guida.

RENAISSANCE/MAZOR

Il Renaissance dell'azienda israeliana Mazor è un altro robot che può essere definito collaborativo. In caso di danneggiamento di qualche vertebra o disco nella colonna del paziente, sono eseguite delle procedure di stabilizzazione per eliminare la mobilità di alcune porzioni della colonna attraverso l'inserimento di impianti. Questi interventi, anche detti di fusione spinale, prevedono l'inserimento di viti nei peduncoli delle vertebre e il successivo vincolo tra le stesse tramite una barra avvitata alle teste delle viti. In questo modo il sistema viti-barre va immobilizzare tra di loro le vertebre, togliendo da un lato parte della funzionalità alla colonna ma migliorando decisamente le qualità di vita del paziente. Da notare che in passato, prima dell'avvento delle ortesi, questi interventi di fissaggio venivano eseguiti anche su anca e ginocchio. Anche in questo caso non restituivano la mobilità all'articolazione ma almeno eliminavano il dolore. Per la colonna non si è ancora superata questa fase, si deve ancorò essere eseguito: ad occhio nudo, sotto guida ai raggi X dime chirurgiche paziente specifiche. Quest'ultima soluzione, che si sta affacciando ora sul mercato, permette di inserire le viti nella colonna del paziente in maniera precisa, ma le dime possono essere utilizzate solo in chirurgia aperta, mentre il robot, di seguito descritto, può essere impiegato anche in interventi di chirurgia mini-invasiva.

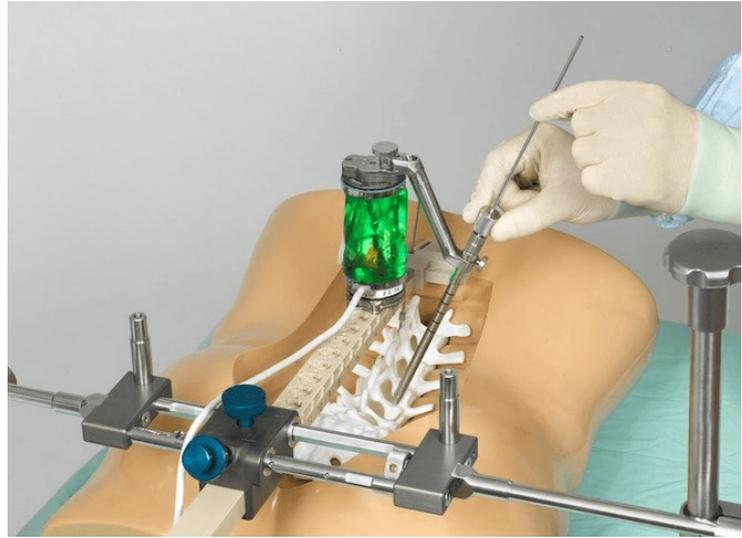
Pianificazione

Prima dell'esecuzione dell'intervento, c'è una fase di pianificazione. Si comincia realizzando una ricostruzione 3D del modello delle vertebre a partire da immagini TC, in seguito alla quale il software permette di inserire virtualmente le viti variando posizione e traiettoria. Questa pianificazione è trasmessa al sistema di controllo del robot, il quale è composto da una base

d'appoggio ed un sistema cilindrico a motori dotato di una cannula, che può essere mossa assumendo varie posizioni ed orientamenti rispetto alla base.

Montaggio

La base del robot va fissata rispetto alla colonna del paziente ed esistono vari tipi di montaggio. È possibile fare un taglio sulla schiena e fissare la base direttamente sul processo spinoso, applicandola su più vertebre. Un'alternativa è quella di montare il robot sul letto, però in questo modo, in caso di spostamento del paziente, si perderebbe la registrazione (descritta al punto successivo).



Registrazione

Una volta fissata la base del robot, si procede con la registrazione: si tratta di una registrazione 3D-2D per allineare l'immagine pre-operatoria con il SDR del robot. Il chirurgo monta sulla base una griglia con elementi radiopachi in posizione nota. Si acquisisce poi un'immagine RX con un arco a C (si possono usare due punti di vista per avere maggior precisione). Ed infine è eseguita un algoritmo di registrazione 3D-2D tra le immagini TC e le immagini RX sfruttando la griglia di calibrazione al fine di riportare l'immagine pre-operatoria TC nel SDR del robot, che deve essere montato in posizione nota rispetto alla base.

Da notare che solitamente si procede con la registrazione di una singola vertebra, vi si inseriscono le viti e dopodiché si passa alla registrazione delle successive e così via (questo poiché le vertebre sono mobili tra loro) .

Inserimento dell'Impianto

Una volta effettuata la registrazione, il robot orienta la cannula secondo la direzione pianificata opportunamente registrata. Il chirurgo può inserire gli elementi di riduzione per far passare dentro il canale la punta del trapano. In questo caso non si può parlare di una vera e propria collaborazione, perché il chirurgo non può forzare il robot, il medico si limita ad inserire il trapano lungo la cannula di foratura sorretta dalla macchina.

Al seguente link alcune video che illustrano i passaggi appena descritti:

<http://www.mazorrobotics.com/surgeons/how-it-works/>

Sistemi Teleoperati

- **Da Vinci**

Il robot da Vinci, dell'azienda statunitense Intuitive Surgical, è un sistema teleoperato. A differenza dei robot visti in precedenza, è ampiamente diffuso e applicato a diversi tipi di specialità:

- Chirurgia Generale e Vascolare
- Chirurgia Uro-Ginecologica
- Chirurgia Toracica
- Cardiochirurgia
- Chirurgia Pediatrica
- Otorinolaringoiatria

È un robot è adatto a lavorare sui tessuti molli ed è generalmente impiegato per eseguire una chirurgia mini-invasiva, principalmente dell'addome e del torace. Ha trovato grande impiego grazie ai numerosi vantaggi offerti da questa macchina in confronto alla chirurgia laparoscopica tradizionale manuale.

Limiti della chirurgia laparoscopica

La chirurgia laparoscopica tradizionale è endoscopica, cioè si esegue l'intervento inserendo all'interno dell'anatomia una telecamera e vedendo l'interno del corpo del paziente non direttamente con i propri occhi, ma tramite un monitor. Attraverso altri accessi vengono introdotti strumenti chirurgici allungati con i quali il chirurgo deve operare guardando sullo schermo. Nel caso in cui sia la camera che gli strumenti siano fatti passare attraverso la stessa porta d'accesso si parla di SILS (Single Port Laparoscopic Surgery).

In generale la chirurgia laparoscopica, grazie ad una sensibile riduzione del trauma sui tessuti molli, determina i seguenti vantaggi:

- Minore degenza ospedaliera
- Minor dolore post-operatorio
- Ridotto rischio di infezioni
- Minor sanguinamento
- Ridotta necessità di trasfusioni
- Più rapido ritorno a tutte le normali attività quotidiane
- Migliore risultato estetico.

ma la sua esecuzione non è affatto banale, poiché il chirurgo si trova a lavorare nelle seguenti condizioni:

- Vista bidimensionale (e conseguente riduzione della percezione della profondità)
- Riduzione dell'ergonomia e della destrezza

- Amplificazione del tremore della mano dovuta all'utilizzo di uno strumento lungo
- Impiego di strumenti con soli 4 GDL
- Instabilità della camera
- Feedback tattile nullo
- Ritorno di forza limitato.

Si noti che in chirurgia aperta è possibile orientare una pinza lungo tutti e 6 i GDL (e con l'apertura e chiusura della pinza stessa si sale a 7 GDL); lavorando invece con una pinza laparoscopica, i GDL si riducono a 4 (5 con apertura e chiusura della pinza) e di conseguenza non è possibile avere tutte le pose della pinza desiderate. Questa limitazione rende molto difficili alcuni task chirurgici come le suture.

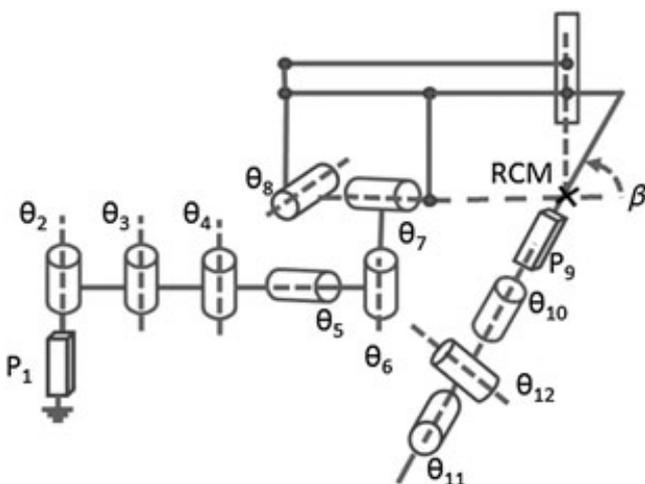
Il robot Da Vinci permette di ovviare a queste problematiche.

Architettura e funzionamento del robot da Vinci

Il robot è composto da due o tre bracci (a seconda del modello), più uno per la telecamera. Da un punto di vista funzionale, il chirurgo, dalla sua postazione, gestisce con le mani due manipoli e di conseguenza due bracci e i relativi end-effector. Durante l'intervento l'operatore può decidere quale fra i vari bracci guidare e passare da uno all'altro in corso d'opera.

La catena cinematica di ciascun braccio del robot è composta da vari giunti, i primi dei quali sono giunti passivi, mentre i restanti sono attivi. La parte terminale dei bracci, quella dotata di giunti attivi, è vincolata a muoversi garantendo un movimento pivotale rispetto

ad un punto (RCM) indentificato sullo stelo degli strumenti chirurgici. Tramite un freno è possibile sbloccare i giunti passivi al fine di poter spostare manualmente il centro di rotazione in corrispondenza della porta d'accesso creata nell'anatomia del paziente.



Sulla parte terminale di ciascun braccio vi è un supporto per alloggiarvi uno strumento chirurgico specifico per questo robot. Lo strumento ha uno stelo allungato, come nel caso degli strumenti laparoscopici tradizionali, ma in gran parte di questi strumenti (come nel caso di pinze o forbici) vi sono dei giunti che implementano il cosiddetto "Endo-Wrist" che

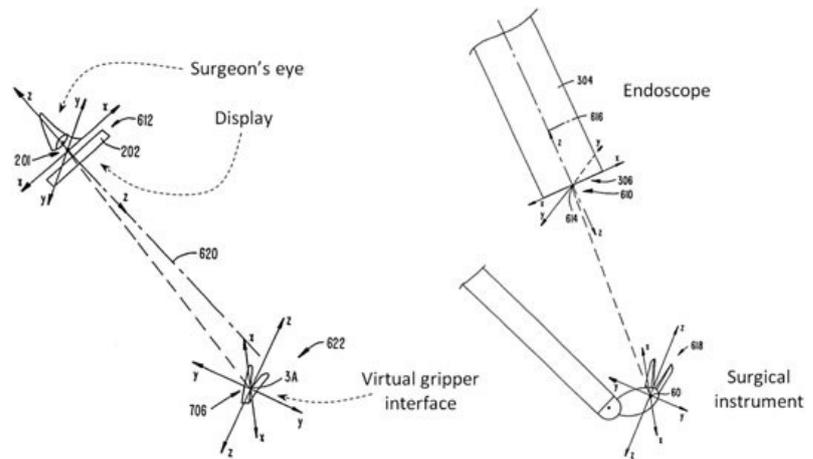
permettere movimenti lungo tutti e 6 i GDL. I 2 GDL in più rispetto allo strumento laparoscopico tradizionale, sono dati da due giunti cilindrici posti in prossimità della cima dello strumento.



Il chirurgo gestisce il robot da una console remota (che solitamente si trova a pochi metri dal paziente, all'interno della stessa stanza).

Il chirurgo gestisce un'impugnatura per ciascuna mano, all'interno delle quale inserisce il pollice e l'indice. Lo strumento chirurgico (pinza o forbice) è gestito come se le branche dello strumento corrispondessero all'indice ed al pollice di chi lo sta guidando. C'è un meccanismo di mappatura che permette di trasferire i movimenti delle dita del chirurgo in modo coerente all'end-effector del robot. In questo modo il medico opera con movimenti che gli sono del tutto naturali e dall'altra parte il robot fa movimenti tali da replicare, con uno strumento che passa attraverso un centro di rotazione, i movimenti che fa il chirurgo.

Il chirurgo che guarda un visore binoculare incassato nella console. La posizione dell'occhio del chirurgo rispetto alle mani rispecchia approssimativamente quello dell'endoscopio rispetto allo strumento. Lo scenario chirurgico che l'operatore ha davanti agli occhi è coerente, con un certo grado di approssimazione, con la posizione delle mani rispetto ad esso. Ulteriori vantaggi sono il filtraggio dei tremori della mano e la possibilità di scalare i movimenti eseguiti dall'end-effector rispetto a quelli delle mani (questa funzionalità può essere utile, ad esempio, quando si vanno a suturare vasi molto piccoli).



Un limite del Da Vinci è che non offre alcun tipo di ritorno di forza. Il chirurgo decide pertanto di eseguire determinati movimenti (che comportano forze di reazione tra lo strumento con i tessuti, con il filo da sutura...) esclusivamente sulla base dell'informazione visiva e sulla base dell'esperienza.

Da notare che l'implementazione di un sistema robotico dotato di ritorno di forza sull'impugnatura comporterebbe la necessità di avere:

- Un sistema in grado di stimare la forza di reazione in punta (ottenuta magari con celle di carico miniaturizzate);

- Gestire grossi problemi di instabilità poiché: il sistema di controllo del robot è di tipo “human in the loop” e pertanto il ritorno di forza fornito all’utente sull’impugnatura potrebbe determinare lo spostamento dell’impugnatura stessa, che a sua volta determinerebbe lo spostamento dell’end-effector, innescando così vibrazioni ed instabilità.

Nonostante questa limitazione, il robot permette di ottenere maggior destrezza rispetto alla laparoscopia tradizionale manuale ed ha pertanto trovato ampia diffusione.