

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

CAMPUS DI CESENA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

TITOLO DELL'ELABORATO

INTEGRAZIONE DELLE IMMAGINI
ECOTOMOGRAFICHE
NEI SISTEMI DI CHIRURGIA ROBOTICA:
STATO DELL'ARTE E SVILUPPI FUTURI

Elaborato in

Informatica Medica

Relatore
Giovanni Arcuri

Presentata da
Jonathan Pitocchi

Sessione I
Anno Accademico 2013-2014

Parole chiave:
Chirurgia mini-invasiva
Chirurgia robotica
Sistema "Da Vinci"
Eco-tomografia
Integrazione

INTRODUZIONE

Il XX° secolo ha rappresentato uno dei periodi più ricchi di scoperte e di innovazioni nel campo della sanità e della medicina, grazie all'invenzione di dispositivi e apparecchiature che hanno consentito all'uomo di raggiungere obiettivi e risultati davvero significativi e a volte inaspettati. Tante cose sono state fatte e tante altre sono da fare, tant'è che il secolo attuale, considerato il secolo della biologia, sarà sicuramente caratterizzato da un progresso ancora più marcato in tutti quei settori legati alla salute e alla vita.

Ma l'innovazione è solo uno degli aspetti dello sviluppo tecnologico, sempre più fondamentale infatti sta diventando l'integrazione tra tecnologie già esistenti che, in quanto tali, offrono possibilità nuove, ma a 'portata di mano'.

La medicina in particolar modo è uno degli ambienti adatti per quello che, in inglese, viene definito 'marriage of technologies', ovvero l'unione, nel senso proprio di integrazione, tra dispositivi differenti.

Facendo riferimento alle suddette considerazioni, questo elaborato si propone di analizzare la fusione di due tecnologie diverse, ma allo stesso modo rivoluzionarie.

Da un lato abbiamo la chirurgia robotica (*Robotic Assisted Surgery*), reputata ormai la nuova frontiera della chirurgia mini-invasiva, dall'altro invece l'ecotomografia, che in molti ipotizzano poter divenire lo 'stetoscopio' del futuro.

La prima tecnica, in utilizzo ormai da più di un decennio in tutto il mondo, è riuscita a imporsi in poco tempo come trattamento *gold standard* per moltissimi interventi mini-invasivi (prostatectomia radicale, nefrectomia parziale) e attualmente sta trovando sempre più spazio in altre procedure chirurgiche, come quelle cardiotoraciche e quelle ginecologiche.

L'analisi di imaging ecografico invece, grazie alla sua totale innocuità per il paziente, viene considerata come esame di filtro (da qui l'analogia con lo stetoscopio) rispetto ad altre analisi più complesse (TAC, risonanza magnetica).

L'ultra-sonografia perciò appare come il supporto più adatto per gli interventi di

Robotic Assisted Surgery, permettendo ai chirurghi di eseguire operazioni di massima precisione e accuratezza. Inoltre, grazie ai sistemi sempre più avanzati, la possibilità di avere immagini 3-D in alta qualità e visualizzazioni da diverse angolazioni rappresenta un buon punto di partenza per abbassare ulteriormente i rischi legati a errori umani.

Il primo capitolo dell'elaborato riassume i concetti fondamentali dell'ecografia, fornendo le informazioni necessarie per comprendere meglio i principi che stanno alla base dell'integrazione con la chirurgia robotica. Allo stesso modo, il secondo capitolo presenta lo scenario in cui si inserisce la *Robotic Assisted Surgery*, facendo riferimento alla tecnologia del Sistema "Da Vinci", l'unica attualmente utilizzata in questo campo. Il terzo capitolo entra invece nel merito del 'marriage' tecnologico, trattando dell'analisi di alcuni casi applicativi particolarmente significativi e dei possibili sviluppi futuri di quest'integrazione. Infine, nel quarto capitolo, conclusioni e panoramica sull'utilizzo del "Da Vinci" in Italia e nel mondo.

INDICE

•	Introduzione	
•	Capitolo 1. Ecografia:fondamenti	1
	1.1 Elementi di fisica degli ultrasuoni.	1
	1.2 La propagazione: riflessione, rifrazione e assorbimento. . .	4
	1.3 L'ecografo.	5
	1.4 Principi di funzionamento.	7
	1.5 Sistemi di scansione.	9
	1.6 Tipologie di visualizzazione.	10
	1.7 Amplificazione e compenso di profondità.	12
	1.8 La modalità 3-D.	12
	1.9 Effetto doppler.	13
	◦	
•	Capitolo 2. La chirurgia robotica	16
	2.1 Cenni storici.	16
	2.2 Il sistema "Da Vinci".	18
	2.3 Vantaggi e svantaggi della chirurgia robotica	28
	2.4 Scenari applicativi.	29
•	Capitolo 3. L'integrazione	31
	3.1 Advanced Robotic Technology(ART).	31
	3.2 Ambiti applicativi:Prostatectomia radicale.	35
	3.3 Ambiti applicativi:Nefrectomia parziale.	38
	3.4 Ambiti applicativi:Pancreasectomia.	42
	3.5 Ambiti applicativi:la chirurgia epatica.	47

3.6 Possibili sviluppi futuri.	50
• Capitolo 4. Conclusioni	54
4.1 Il “Da Vinci” nel mondo.	54
4.2 Il “Da Vinci” in Italia.	57
Bibliografia e Sitografia	62

Capitolo 1

Ecografia: fondamenti

L'ecografia è una tecnica di indagine diagnostica che utilizza radiazioni ultrasonore (con frequenze superiori ai 20 kHz) e che attualmente, a differenza delle altre apparecchiature basate su radiazioni ionizzanti, sembra non avere effetti negativi per il paziente che viene sottoposto all'esame. Il funzionamento si basa sull'emissione del cosiddetto *eco* e sulla capacità del trasduttore di riuscire a captare gli ultrasuoni riflessi, custodi dell'informazione utile alla creazione dell'immagine eco-tomografica.

1.1 Elementi di fisica degli ultrasuoni

Il fenomeno di trasmissione del suono è basato sul trasferimento di energia che avviene nella propagazione di un'onda. Le onde acustiche sono delle vibrazioni, ovvero un susseguirsi di fronti di compressione e di rarefazione che eccitano lo stato di quiete di un mezzo elastico (aria, acqua), propagandosi con velocità differenti a seconda del mezzo stesso. È evidente quindi che in assenza di materia (vuoto) la generazione del suono è impossibile vista la mancanza di particelle eccitabili. In generale le onde sono caratterizzate dalla *direzione dell'oscillazione* e dalla *direzione di propagazione*; questo ci permette di classificarle in due categorie: si parla di *onde trasversali* (transverse wave) quando le due direzioni sono ortogonali, viceversa, se le direzioni sono parallele, si parla di *onde longitudinali* (longitudinal wave). In figura 1.1 è possibile vedere un confronto. Ad ogni suono è associata una frequenza (n° di oscillazioni al secondo), ad un suono acuto corrispondono frequenze più alte, mentre nel caso di un suono più basso le frequenze sono decisamente meno elevate.

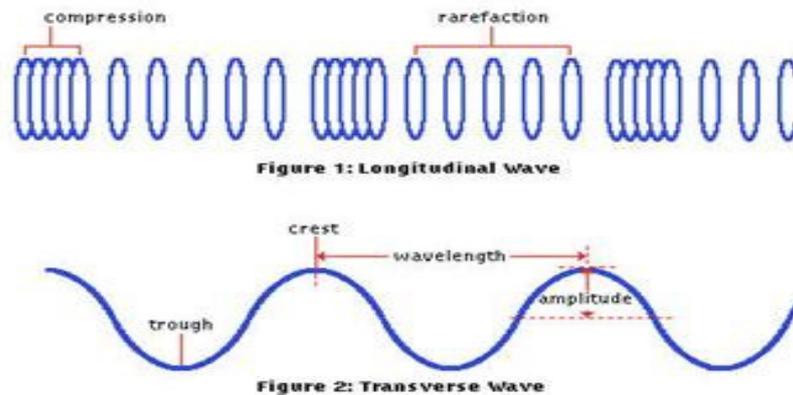


Figura 1.1: Onde longitudinali e trasversali

In generale di un'onda sonora è possibile definire diverse grandezze fondamentali:

- la *frequenza* (ν): numero di oscillazioni compiute nell'unità di tempo.
Unità di misura: hertz (Hz), corrispondente ad un ciclo al secondo.
- il *periodo* (T): durata dell'oscillazione completa. Unità di misura secondi (s). È l'inverso della frequenza ($T=1/\nu$).
- la *lunghezza d'onda* (λ): distanza tra due picchi o creste. Unità di misura metri (m).
- l'*intensità* (I): rapporto tra la potenza trasportata dall'onda e la superficie su cui essa incide. Unità di misura (Watt/m^2).
- la *velocità di propagazione* (V): velocità con la quale l'onda si propaga nel mezzo. Unità di misura metri al secondo (m/s). Vale anche la relazione:

$$V=\lambda\nu \quad (1.1)$$

Gli ultrasuoni in particolare hanno frequenze superiore ai 20 kHz ed è proprio per questo motivo che l'orecchio umano non riesce a percepirli (il timpano non riesce a vibrare a queste frequenze e così il segnale non arriva al cervello). In realtà nella diagnostica (figura 1.2) si utilizzano frequenze dell'ordine dei Megahertz, basandosi sul principio fisico per il quale riesco a vedere solo quegli

oggetti che hanno dimensioni comparabili alle lunghezze d'onda con le quali lavoro. Ricavando λ dalla formula 1.1, si nota subito il rapporto di proporzionalità inversa con v . Se aumento la frequenza, la lunghezza d'onda diminuisce e riesco a vedere oggetti sempre più piccoli, anche se questo porta ad avere un assorbimento maggiore degli ultrasuoni.

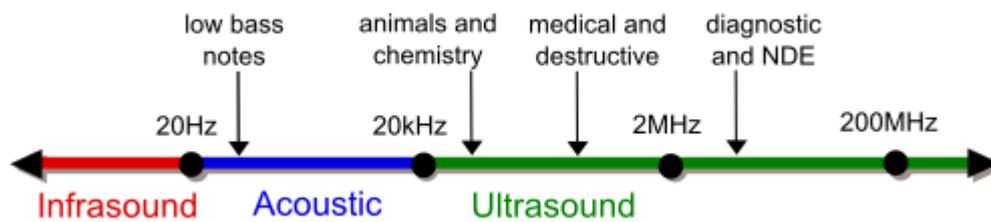


Figura 1.2: suddivisione onde sonore e loro utilizzo

Definiamo anche il concetto di *impedenza acustica* (Z), che rappresenta una proprietà del mezzo fondamentale in quanto condiziona fortemente la velocità di propagazione del suono e quindi anche degli ultrasuoni utilizzati in ecografia.

$$Z=V\rho \quad (1.2)$$

Dove V è la velocità di propagazione nel mezzo e ρ è la densità del materiale, Z è espressa in $\text{kg/ m}^2 \text{ s}$.

VANTAGGI degli ultrasuoni:

- possibilità di essere diretti in fascio. Al contrario delle vibrazioni vocali, che sono onde sferiche, gli ultrasuoni possono essere direzionati per far colpire solo una porzione di spazio,
- capacità di essere riflessi anche da oggetti di piccole dimensioni,
- totale innocuità per il paziente.

SVANTAGGI:

- bassa propagazione nei mezzi gassosi,
- problemi legati ai fenomeni di assorbimento.

1.2 La propagazione: riflessione, rifrazione e assorbimento

Come tutti i fenomeni ondulatori anche gli ultrasuoni sono soggetti a *riflessione*, *rifrazione* e *assorbimento*. Nella figura 1.3 sono mostrati i fenomeni di rifrazione e riflessione di un'onda nel momento in cui essa incontra una superficie di discontinuità (passaggio da un mezzo ad un altro, con conseguente variazione della velocità di propagazione).

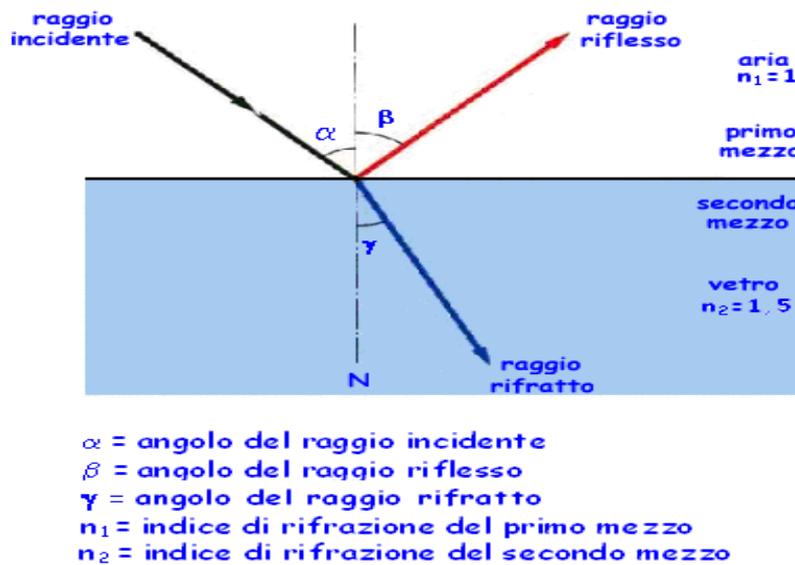


Figura 1.3: fenomeno di rifrazione e riflessione di un'onda

La differenza di impedenze presente all'interfaccia dei due mezzi provoca una deviazione dell'onda che prosegue il suo cammino (*rifrazione*), ma generalmente con un angolo diverso da quello di incidenza, secondo la **legge di Snell**:

$$\sin \alpha / \sin \gamma = n_2 / n_1 = V_1 / V_2 \quad (1.3)$$

dove V_1 e V_2 sono le velocità di propagazione nei due mezzi. Una piccola parte dell'onda invece viene *riflessa* con lo stesso angolo di incidenza e torna verso la sorgente che l'ha generata. Il coefficiente di riflessione, definito come rapporto tra energia riflessa ed energia incidente è dato da:

$$R = (Z_1 - Z_2)^2 / (Z_1 + Z_2)^2 \quad (1.4)$$

dove Z_1 e Z_2 sono le impedenze acustiche relative alle due zone a diversa densità. L'energia trasmessa ovviamente sarà pari a **1-R**.

1.3 L'ecografo



Figura 1.4: apparecchiatura ecografica

Sostanzialmente l'ecografo (come mostrato in figura 1.4) è costituito da tre elementi principali: la *sonda* o *trasduttore* che trasmette e riceve il segnale, il *sistema elettronico centrale* che pilota il trasduttore ed elabora il segnale di ritorno e il *sistema di visualizzazione* (in genere un monitor od un oscilloscopio). Elemento essenziale è il trasduttore che genera fisicamente gli ultrasuoni a partire dalla corrente alternata di rete (50 Hz) tramite effetto *piezoelettrico*. Cuore della sonda infatti è il cristallo piezoelettrico che, se deformato meccanicamente, riesce a generare un ΔV sulla superficie (e viceversa). Infatti una pressione esercitata perpendicolarmente al cristallo genera una differenza di potenziale tra le due facce. Tale fenomeno è definito come *effetto piezoelettrico diretto*. Allo stesso modo una differenza di potenziale applicata sulle due facce opposte del cristallo genera una deformazione meccanica. Il fenomeno è chiamato *effetto piezoelettrico inverso*. Una volta eccitato il cristallo comincia a vibrare ad una frequenza propria, generando così onde di compressione e rarefazione che costituiscono gli ultrasuoni. L'esame ecografico in genere sfrutta pacchetti di segnale di breve durata (*impulsi* di 2 oscillazioni), per questo motivo

oltre al cristallo è presente un *strato di materiale di smorzamento* che garantisce un'emissione pulsata. Durante la fase di trasmissione gli elettrodi eccitano il cristallo che comincia a vibrare emettendo ultrasuoni. A questo punto il trasduttore si mette in ascolto degli echi che quando raggiungono la sonda deformano il cristallo, creando un ΔV captato dagli elettrodi. Il materiale di smorzamento è essenziale anche in questa fase perché blocca le oscillazioni del cristallo in modo che subito dopo aver ricevuto un eco sia pronto per riceverne un altro.

Il sistema centrale di elaborazione comprende due elementi distinti: la sezione dedicata alla trasmissione e quella relativa alla ricezione e trattamento del segnale. Nel primo caso la funzione svolta è quella di creare il fronte d'onda desiderato applicando diversi ritardi ai segnali che andranno ad eccitare i diversi cristalli (*beamforming*). In ricezione dovrà essere applicata una sincronizzazione inversa prima della fase di elaborazione. Un clock interno regola l'intera dinamica dei ritardi.

L'elaborazione comprende tutte le seguenti attività: pre-amplificazione, compensazione del guadagno, demodulazione, conversione A/D, memorizzazione e conversione in segnale video.

Il monitor consente invece di visualizzare in scala di grigi (ecografia) o a colori (eco Doppler) il risultato dell'elaborazione. In particolare per l'esame ecografico l'immagine è in scala di grigi e il colore codifica l'intensità dell'eco ricevuto.

1.4 Principi di funzionamento

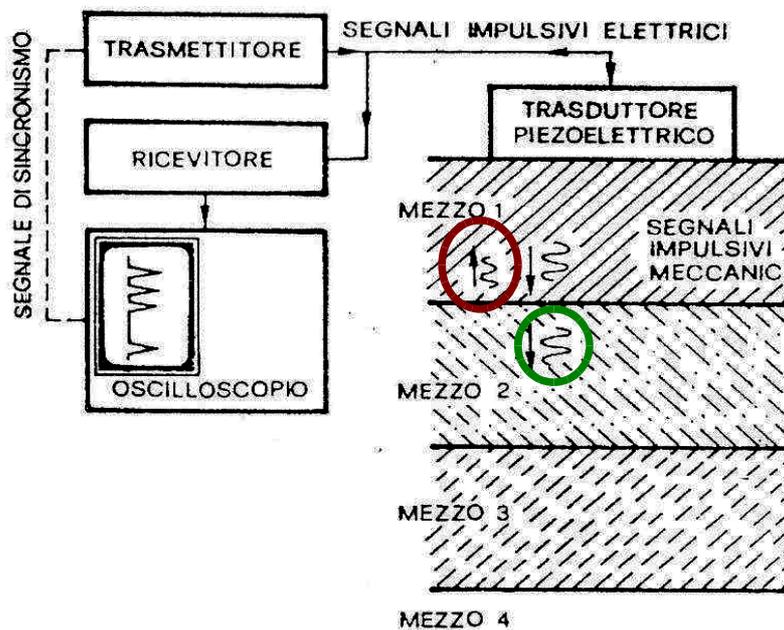


Figura 1.5:schema a blocchi di un ecografo

Abbiamo già detto che gli ultrasuoni sono emessi sotto forma di impulsi, cioè pacchetti di vibrazioni. Quando la vibrazione meccanica incontra un ostacolo (interfaccia fra tessuti diversi, discontinuità nel tessuto, cavità ripiene di liquido, calcificazioni, bolle d'aria, corpi estranei) lungo il cammino di propagazione, **una parte dell'energia viene riflessa ed una parte trasmessa**. (Figura 1.5)

Lo stesso trasduttore che ha emesso l'impulso ultrasonico quando è investito da vibrazioni meccaniche (segnali d'eco ultrasonici) fornisce un segnale elettrico proporzionale a quello meccanico. Infatti l'oscilloscopio genera uno spike in corrispondenza dell'eco tanto più ampio quanto più elevata è l'intensità dell'eco ricevuto. In base al tempo trascorso tra quando ho emesso il suono e quando ricevo l'onda riflessa, posso facilmente risalire alla profondità dell'oggetto che ha generato l'eco (*effetto sonar*). Infatti:

$$d=tv /2 \quad (1.5)$$

dove d è la profondità (m), t è il tempo (s), v è la velocità di propagazione nel mezzo (che possiamo considerare costante e pari alla velocità del suono nell'acqua, 1540 m/s) e il fattore 2 sta ad indicare il fatto che il tempo misurato

comprende sia l'andata che il ritorno dell'onda. Questa è la prima informazione che concorre alla costruzione dell'immagine ecografica. La seconda è la posizione degli echi rispetto all'asse che determina la posizione laterale nello spazio. La risoluzione spaziale della sonda è la distanza minima di due sorgenti poste a distanza ravvicinata per cui è possibile discriminarne gli echi prodotti e pertanto è espressa in mm. Essa è determinata dalla componente assiale e da quella laterale. (figura 1.6)

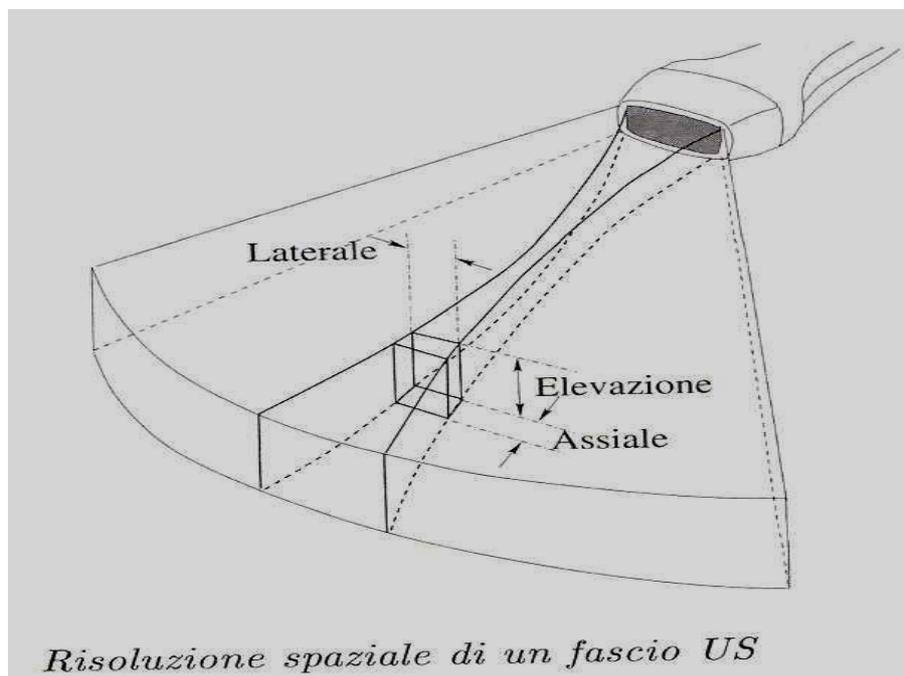


Figura 1.6: risoluzione spaziale

La risoluzione *laterale* è la distanza minima che riesco a riconoscere su una direzione ortogonale alla linea di scansione. Essa dipende fortemente dalla focalizzazione del fascio. Se infatti il fascio è conico e non si restringe, la zona investita dagli ultrasuoni aumenta e la risoluzione laterale diminuisce. Il modo migliore per evitare questo è proprio l'aumento della *focalizzazione*, in modo meccanico (tramite lenti che funzionano come quelle ottiche) o in modo elettronico controllando i ritardi degli impulsi trasmessi. Quest'ultima è la soluzione più utilizzata in quanto consente una focalizzazione dinamica (basta agire sui tempi di ritardo) in opposizione a quella meccanica che dipende dal tipo di lente. La risoluzione *assiale* invece è la distanza minima che riesco a

riconoscere lungo una direzione parallela all'asse di trasmissione degli ultrasuoni. La massima risoluzione assiale teorica è determinata dalla lunghezza d'onda (λ) e dal numero di cicli dell'impulso (N_c). Essa non potrà infatti essere superiore alla metà della lunghezza spaziale dell'impulso (SPL) definita come:

$$SPL = \lambda N_c \quad (1.6)$$

Ne consegue che per aumentare la risoluzione è necessario diminuire il numero di cicli dell'impulso o aumentare la frequenza. Quest'ultima soluzione implica però una maggiore attenuazione nel mezzo diminuendo quindi la profondità di campo (trade-off). La proporzionalità diretta tra frequenza del segnale e attenuazione è implicita nella legge di *Lambert-Beer*:

$$I/I_0 = e^{-kl} \quad (1.7)$$

La legge considera l'attenuazione subita da un'onda nell'attraversamento di un volume di spessore l . Tale attenuazione è data dal rapporto tra I , l'intensità dell'onda uscente dal volume e I_0 , l'intensità dell'onda incidente. La costante k rappresenta il coefficiente di assorbimento ed è proporzionale alla frequenza dell'onda.

1.5 Sistemi di scansione

I sistemi di scansione sono caratterizzati dal formato dell'immagine che a sua volta deriva dal tipo di trasduttore che si usa durante l'indagine.

1. *Scansione lineare*: presenta una forma dell'immagine rettangolare grazie ad una sonda costituita da gruppi di 5 o 6 elementi facenti parte di una cortina di cristalli (da 64 a 200) posti in maniera contigua. Vengono eccitati in successione in maniera da formare una scansione lineare.
2. *Scansione settoriale*: ci garantisce un formato dell'immagine settoriale. Nel caso di un settoriale meccanico (singolo cristallo o anulare) la scansione viene data tramite un sistema di ingranaggi che fa oscillare il cristallo di un settore (di solito 90°). Durante l'oscillazione il cristallo viene eccitato con una certa tempistica, in maniera da inviare gli impulsi

ultrasuoni, ricevere gli echi di ritorno e quindi permettere di creare l'immagine ultrasonora all'interno del campo di vista.

3. *Scansione convex*: con formato dell'immagine a tronco di cono e trasduttori convessi in cui i cristalli vengono eccitati esattamente come nel trasduttore lineare, ma il campo di vista sarà a tronco di cono dato che i cristalli sono posizionati su una superficie curva.

1.6 Tipologie di visualizzazione

Esistono diverse modalità di visualizzazione dell'immagine ecografica su monitor, le principali sono:

- *A-mode (Amplitude Modulation)*. Rappresenta la modalità più semplice ma allo stesso tempo più povera di informazione. Il segnale eco è visualizzato in un diagramma tempo/ampiezza, in cui l'asse temporale può essere pensato come la linea di un oscilloscopio. L'ampiezza dei picchi generati è proporzionale all'intensità degli echi ricevuti, mentre la distanza temporale tra diversi picchi rappresenta la distanza spaziale tra le corrispondenti sorgenti degli echi. (Figura 1.7)
- *B-mode (Brightness Modulation)*. L'informazione è rappresentata attraverso un'immagine bidimensionale costituita da pixel, nella quale la luminosità di ogni pixel è proporzionale all'intensità dell'eco ricevuto (figura 1.8). Le coordinate dell'immagine sono direttamente mappate alla sezione di tessuto analizzata dall'ecografo, infatti tale area è spesso riferita come piano immagine (image plane). Come nel caso A-mode, l'informazione di ritardo dell'eco viene utilizzata per calcolare la profondità della sorgente. (Figura 1.7)

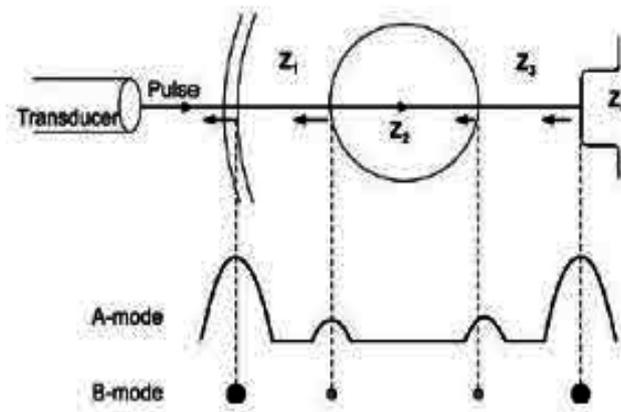


Figura 1.7: A-mode e B-mode

- *TM-mode o M-mode (Time-Motion mode)*. Analogamente alla tecnica B-Mode l'informazione è rappresentata attraverso un'immagine bidimensionale. La dimensione spaziale laterale tuttavia è sostituita dal parametro tempo. Viene utilizzata allo scopo di visualizzare sullo schermo in tempo reale la posizione variabile di un ostacolo attraverso l'eco da esso prodotta. (Figura 1.8) La tecnica trova applicazione principalmente in cardiologia, dove la variazione di posizione nel tempo dei riflettori è indicativa delle fasi di sistole e diastole. In tal modo è possibile tenere traccia delle modificazioni strutturali e cinetiche della parete ventricolare.

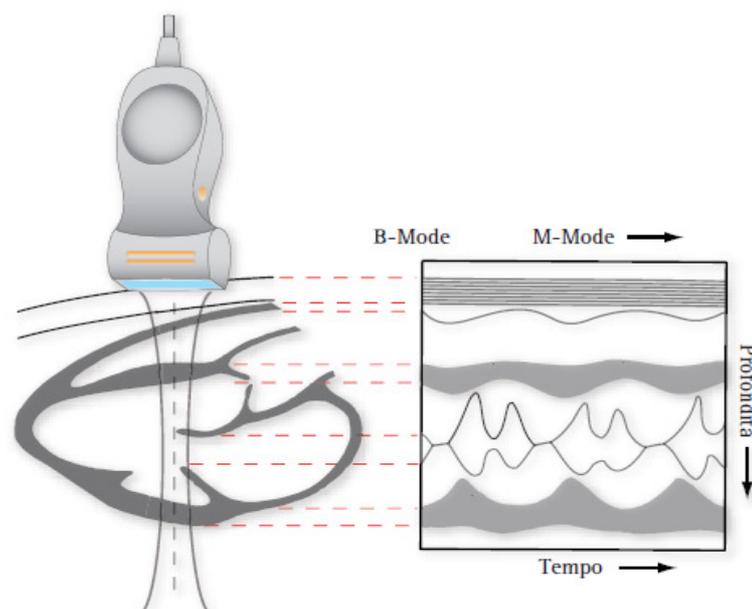


Figura 1.8: M-mode

1.7 Amplificazione e compenso di profondità

Negli ecografi moderni, prima di passare alla fase di elaborazione, durante la quale è possibile agire direttamente sul segnale utile che consente la formazione dell'immagine ecografica, c'è la possibilità di modificare 'ad hoc' parametri come l'amplificazione degli echi ed il compenso di profondità, garantendo una qualità dell'indagine più elevata. In caso di echi deboli infatti (zone del tessuto molle che sono caratterizzate da impedenze acustiche molto simili tra di loro) gli echi ricevuti hanno un'ampiezza ridotta rispetto all'eco incidente. La tensione generata dal cristallo a seguito dell'eco di ritorno di conseguenza è molto bassa (segnale più facilmente soggetto a disturbi), per questo motivo deve essere amplificata prima di essere inviata ai sistemi di elaborazione e quindi di visualizzazione. Oltre a questo, durante l'esame la scansione viene ripetuta diverse volte per mettere in evidenza le strutture più eco-gene e ottenere così informazioni più significative (limito gli errori e magari riesco a far risaltare gli echi deboli). Con un ragionamento analogo posso ovviare al fenomeno di assorbimento e quindi di attenuazione del segnale attraverso un'operazione di *compensazione*. Quello che si fa perciò è amplificare maggiormente gli echi lontani rispetto a quelli più vicini grazie ad un sistema di amplificazione dove il guadagno aumenta in funzione del tempo (*T.G.C. Time Gain Compensation*) e cioè in funzione della profondità di penetrazione.

1.8 La modalità 3-D



Figura 1.9:ecografia 3-D

L'evoluzione più recente è rappresentata dalla tecnica tridimensionale che, a differenza della classica immagine bidimensionale, è basata sull'acquisizione, mediante una sonda apposita, di un 'volume' di tessuto esaminato. La porzione da indagare viene acquisita e digitalizzata in frazioni di secondo, dopo di che può essere esaminata sia in

bidimensionale, come esame di infinite 'fette' del campione (sui tre assi x, y e z), oppure in rappresentazione volumetrica, con l'esame del tessuto o dell'organo da studiare, il quale appare sul monitor come un solido che può essere fatto ruotare intorno ai tre assi. In tal modo si riesce a mettere in evidenza con particolare chiarezza il suo reale aspetto nelle tre dimensioni, avendo la possibilità di apprezzare meglio la morfologia e il 'volume' effettivo dell'oggetto studiato. Se si aggiunge a tutto questo il concetto di visualizzazione 'real time', la tecnica ci permette anche di visualizzare il movimento nello spazio, ad esempio un feto che si sposta nel liquido amniotico. (Figura 1.9)

1.9 Effetto Doppler

La frequenza che si osserva da una sorgente di onde acustiche a frequenza costante, dipende dal moto relativo tra sorgente e ricevitore e a seconda del movimento della sorgente verso il ricevitore o del ricevitore verso la sorgente si rilevano onde di frequenza differente rispetto alla principale. Perciò quando si verifica uno spostamento della sorgente verso il punto di ricezione, in quel punto si rileva un'onda a frequenza più elevata rispetto a quella che si rileverebbe se la sorgente fosse ferma; se al contrario la sorgente dell'onda si allontana dal punto di ricezione la frequenza rilevata risulta più bassa di quando è ferma. Analoghe considerazioni si possono fare se a spostarsi è il punto di ricezione; questo effetto è noto come "effetto Doppler".

In ambito diagnostico l'effetto Doppler si basa sul cosiddetto Doppler shift, cioè la misura della variazione di frequenza tra onda emessa e onda ricevuta. Si consideri ad esempio un vaso sanguigno, al cui interno si trovano in movimento vari corpuscoli, tra i quali anche i globuli rossi. Inviando un fascio di ultrasuoni, con un determinato angolo θ rispetto all'asse del vaso stesso, questo colpirà il globulo rosso in movimento, generando un'onda di risposta che verrà letta dal ricevitore ad una frequenza diversa da quella originale creando una differenza di misura della frequenza, detta appunto Doppler shift. Conoscendo la frequenza a cui opera la sonda, la velocità di propagazione dell'onda ultrasonora e l'angolo

di insonazione (angolo θ generato dal fascio di ultrasuoni rispetto all'asse del vaso), si può risalire alla velocità del flusso (flussimetri), secondo questa formula (1.8):

$$v = \frac{f_d c}{2 f_0 \cos \theta}$$

dove

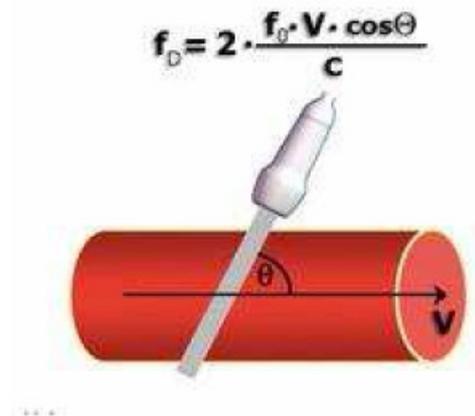
f_d = frequenza con Doppler shift

f_0 = frequenza inviata dalla sonda

v = velocità globulo rosso

$\cos \theta$ = coseno dell'angolo tra direzione del flusso e direzione degli ultrasuoni

c = velocità di propagazione degli ultrasuoni nel sangue



Dalla formula si evince subito che se l'angolo θ è pari a 0° , direzione degli ultrasuoni parallela al flusso, il coseno sarà 1 e quindi la velocità calcolata sarà fedele alla reale. Mano a mano che l'angolo di insonazione aumenta, si riduce la stima della velocità. Basti pensare che con un angolo pari a 60° la velocità stimata è pari al 50% del reale e al di sopra di 60° la riduzione della stima è tale che non può essere compensata da correzioni matematiche, perciò:

- $\theta = 90^\circ$ non è apprezzabile alcun segnale Doppler
- $\theta = 0^\circ$ condizione ottimale
- $40^\circ < \theta < 60^\circ$ condizione di lavoro

Ecodoppler

Il funzionamento di un'apparecchiatura ecodoppler, si basa in linea di principio sulla modalità B-mode e sulle tecniche del Doppler pulsato (il trasduttore funge sia da sorgente che da emettitore, proprio come abbiamo già visto), poiché tecnicamente integra l'informazione relativa ai flussi con l'immagine bidimensionale in tempo reale. Se il segnale proveniente da un determinato campione non presenta alcuna variazione di frequenza rispetto all'originale, la sua visualizzazione in B-mode avverrà attraverso una scala di grigi, viceversa se

viene rilevata una variazione del segnale ricevuto, rispetto alla frequenza del segnale inviato, si va a rappresentare sull'immagine una porzione di figura nera. Tale regione identifica il contorno del vaso, la cui informazione relativa al flusso verrà poi codificata con le diverse tecniche color flow. In questo modo si riesce ad avere una mappatura delle velocità tramite una codifica di colori. Convenzionalmente, il colore rosso è attribuito alle strutture in avvicinamento alla sonda, il blu per quelle in allontanamento, mentre ci sono altri colori per identificare un flusso laminare piuttosto che turbolento. Questa tecnica risulta davvero utile per valutare l'insufficienza valvolare (se misuro delle componenti di velocità a cavallo della valvola tramite flussimetro o ecodoppler quando la valvola dovrebbe essere chiusa, allora vuol dire che la sua funzionalità è compromessa) oppure per valutare la stenosi di un vaso (presenza di flusso turbolento quando normalmente dovrebbe essere laminare). (Figura 1.10)

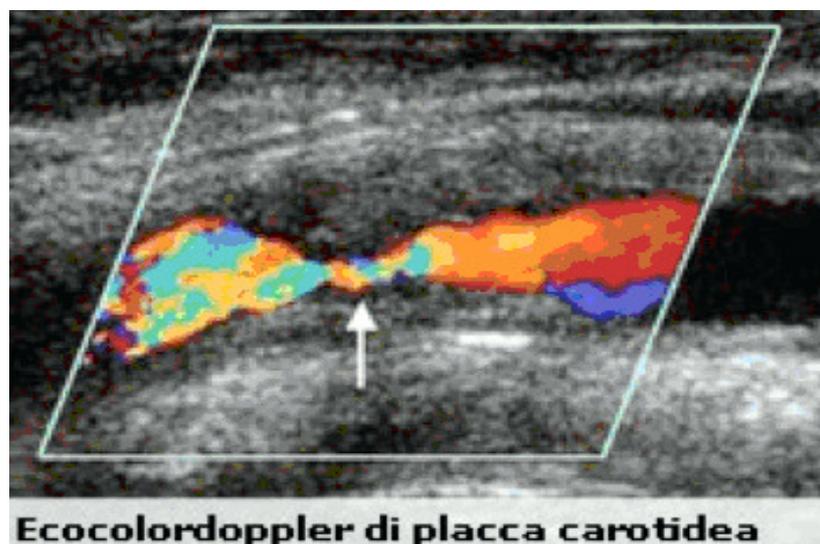


Figura 1.10: esempio di ecocolor Doppler

Capitolo 2

La chirurgia robotica

La chirurgia robotica rappresenta l'ultimissima evoluzione nel campo delle tecniche mini-invasive. Sicuramente la chirurgia ha subito notevoli cambiamenti nel corso della sua personalissima storia, ma il secolo scorso ha visto una notevole accelerazione nel processo di trasformazione radicale che ancora oggi la riguarda. L'idea stessa del chirurgo che apre, seziona e sutura sembra ormai anacronistica, visto che si tende sempre più a *minimizzare i disagi dovuti all'intervento e massimizzare il successo terapeutico*, senza dover ricorrere ad una incisione più o meno ampia e traumatica dei piani superficiali per accedere con sicurezza ed efficacia al campo operatorio. Ed è proprio perseguendo questo obiettivo che sono stati fatti i primi passi nel campo della mini-invasività, partendo dall'endoscopia fino ad arrivare alle ormai attuali operazioni laparoscopiche. Infine l'avvento della *Robotic Assisted Surgery* ha portato nuova linfa in un settore che, malgrado tutto, era ancora lontano dal raggiungere il suo 'momento di gloria'.

2.1 Cenni storici

La chirurgia robotica nasce e si sviluppa inizialmente nell'ambito della telemedicina, come mezzo di supporto alla tele-chirurgia. La possibilità di operare pazienti in zone di calamità o di guerra senza mettere a repentaglio la vita del chirurgo ha spinto numerose aziende ed enti ad investire per la ricerca in questa direzione, in particolar modo il concetto di tecnologia di tele-presenza robotica è nato grazie agli sforzi collaborativi dello Stanford Research Institute (SRI), del Dipartimento della Difesa Americano e della NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). L'impulso principale era costituito dalla necessità di essere in grado di fornire cure operatorie immediate ai soldati feriti

sul campo di battaglia. Per questo motivo i prototipi avevano bracci robotici che potevano essere montati su un veicolo corazzato per facilitare la chirurgia a distanza sul campo di battaglia. Subito dopo questa tecnologia venne commercializzata e i robot cessarono di essere dispositivi soltanto passivi in chirurgia, per diventare strumenti che potevano essere attivamente controllati nelle camere operatorie civili. Il primo successo della tele-chirurgia, diventato una pietra miliare per tutti i pionieri e per coloro che prevedono si vada verso la *globalizzazione* della chirurgia, risale al 2001. Il muro della distanza venne infranto in maniera drastica poiché fu portato a termine un intervento chirurgico da New York alla Francia. I medici riuscirono ad operare con un ritardo di tempo inferiore a 200 ms tra i controlli a New York e l'azione degli strumenti sul paziente a Strasburgo. Furono usati due sistemi di comunicazione a fibre ottiche per connettere sia l'alimentazione video che un collegamento telefonico. L'operazione, denominata 'Lindbergh', dal pilota che per primo compì la traversata atlantica, fu una colecistectomia, la paziente una donna. L'intervento fu un vero successo e in seguito si svilupparono dei veri e propri servizi di chirurgia a distanza, ma visti i tanti pareri contrastanti delle comunità mediche internazionali la chirurgia robotica cominciò a svilupparsi come settore a parte, riscuotendo sicuramente maggiori approvazioni, ma rimanendo comunque al centro di alcune critiche.

Il primo robot chirurgico, il **Puma 560**, veniva usato in neurochirurgia per eseguire trattamenti dei tumori al cervello, sotto il controllo della *tomografia assiale computerizzata* (uno dei primi casi di integrazione tecnologica con i robot). In seguito si svilupparono altri sistemi nell'ambito della chirurgia operatoria (**PROBOT**) e dell'Ortopedia (**ROBODOC**).

Grazie al forte interesse suscitato da queste primissime tecnologie, ben presto numerose aziende iniziarono ad investire le loro risorse economiche nello sviluppo di nuovi prototipi, dando vita così ad una vera e propria 'battaglia commerciale' che alla fine ha lasciato 'incolumi' solo due case produttrici: la

Computer Motion (Goleta, CA) e la Intuitive Surgical Inc. (Mountain View, CA), sono quelle che hanno avuto il maggior successo, avendo progettato e commercializzato numerosi esemplari dei propri robot. La prima azienda ha prodotto i sistemi **AESOP** e **ZEUS**, approvati dalla Food and Drug administration (FDA), rispettivamente nel 1997 e nel 2001.

Il sistema AESOP era essenzialmente un braccio robotico comandato vocalmente che doveva manovrare la telecamera durante l'intervento chirurgico, garantendo una precisione migliore negli spostamenti e tempistiche ridotte.

Con Zeus invece il sistema assume sempre più l'assetto che ancora oggi conserva, essendo costituito da tre bracci robotici controllati a distanza e installati sul tavolo chirurgico e da una workstation chiamata consolle. Termini come tecnologia 'Microwrist' TM e visione stereoscopica entrano a tutti gli effetti nel mondo della chirurgia robotica, fino a diventarne dei punti forza.

La Intuitive Surgical Inc. invece produce il robot "Da Vinci", che ha ricevuto l'approvazione della FDA nel 2000. La Intuitive Surgical nel corso degli anni ha acquisito fette sempre maggiori di mercato, arrivando attualmente ad avere il monopolio nella vendita dei robot chirurgici, specialmente dopo l'acquisizione dei diritti della Computer Motion.

2.2 Il Sistema "Da Vinci"

Il Sistema "Da Vinci" si compone di tre elementi principali:

1. una consolle di comando, sulla quale siede il chirurgo;
2. un carrello mobile su cui sono installati quattro bracci robotici;
3. una colonna attrezzata per la chirurgia endoscopica mini-invasiva (monitor, strumenti, accessori vari).

L'intero apparato è progettato in maniera tale da garantire il massimo comfort per il clinico e per il paziente. In pratica il chirurgo opera rimanendo seduto di fronte alla consolle di comando, dove ha una visione magnificata del campo operatorio, mentre, vicino al paziente, i bracci robotici riproducono, attraverso gli strumenti su di esso installati, miniaturizzati e precisissimi, i movimenti delle

sue mani. (Figura 2.1)

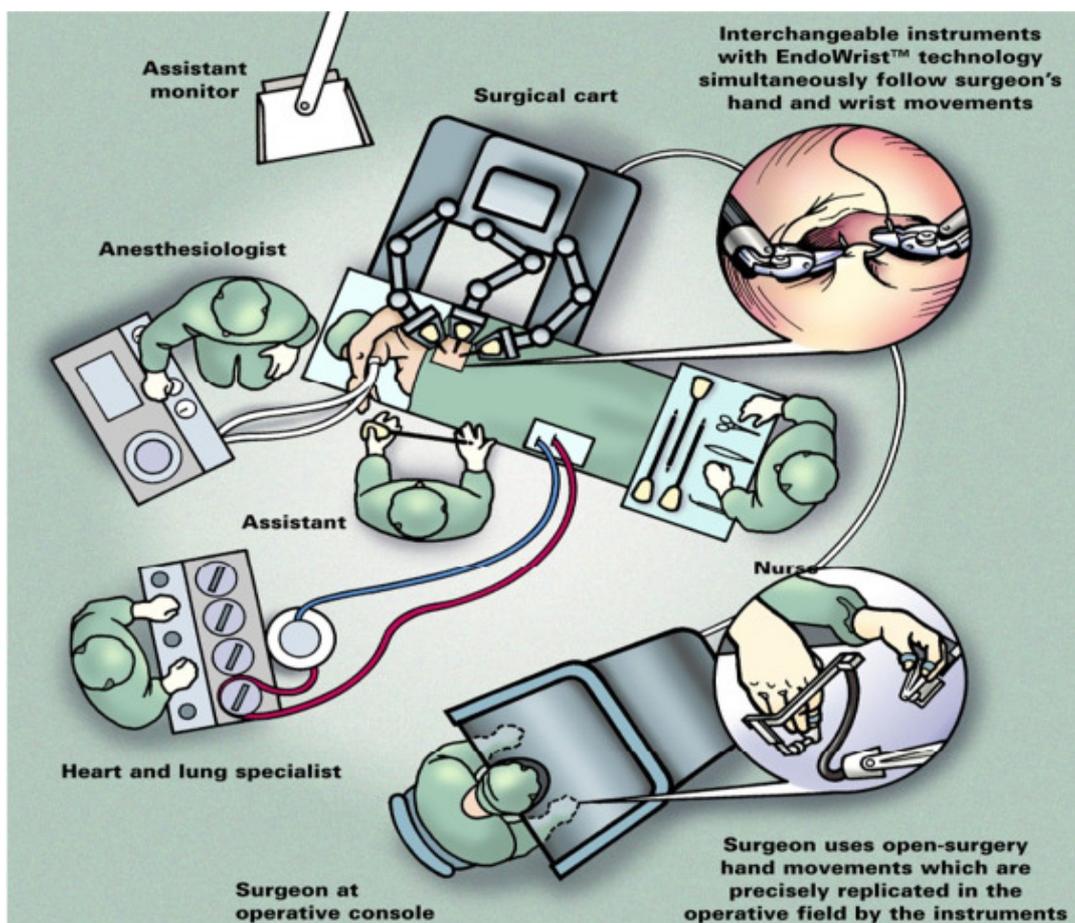


Figura 2.1: Schema di una sala operatoria

La consolle di comando



Può essere considerata il cervello del sistema robotico perché è da qui che vengono coordinati tutti i movimenti dei bracci robotici. (Figura 2.2)

La consolle chirurgica è posizionata al di fuori del campo sterile e consente principalmente di garantire l'allineamento occhi-mani tramite opportuno posizionamento di manipolatori e oculari.

Figura 2.2: la consolle di comando

Il chirurgo appoggia gli avambracci sulla consolle, scaricando quindi il peso degli stessi, inserisce la testa in un apposito vano, appoggiando la fronte e direzionando lo sguardo nei due oculari posti al centro del vano stesso. Questo gesto è il trigger che provoca l'attivazione del sistema, facendolo passare dallo stato di attesa (stand-by) a quello di attività. Infila quindi le dita delle mani in appositi strumenti (master) il cui modulo di controllo trasforma il segnale da meccanico in elettrico e lo trasmette tramite appositi attuatori ai bracci meccanici. (Figura 2.3)



Figura 2.3: i master

I “master” sono due sistemi meccanici, simili a joystick, che il chirurgo muove nello spazio di azione della consolle e che consentono di controllare il movimento degli strumenti robotici, filtrando anche quegli errori che derivano dai tremori delle mani del chirurgo. Gli strumenti robotici riproducono i movimenti che il chirurgo imprime ai master secondo un rapporto spaziale di 1:1, 1:3 o 1:5. Tale rapporto viene impostato in corso d’opera dal chirurgo e può variare in relazione al tipo di manovre da eseguire anche durante lo stesso intervento. Quanto più sarà necessario eseguire movimenti piccoli e precisi (es.: microsuture) tanto più alto sarà il rapporto impostato; viceversa, quanto più sarà necessario eseguire movimenti ampi (es.: dissezioni e dislocazioni), tanto più basso sarà questo rapporto. La corrispondenza esatta dei movimenti è gestita da un software dedicato in grado di determinare in ogni istante le coordinate

spaziali assolute di posizione degli strumenti.

Ulteriori comandi posizionati sia agli estremi del supporto per gli avambracci, sia sulla pedaliera completano la funzionalità della console (5 pedali che offrono la possibilità di manovrare la telecamera, focalizzare l'immagine, disattivare gli strumenti, azionare la coagulazione dell'elettro-bisturi o muovere l'eventuale braccio ausiliario).

Il sistema di visione InSite ® costituisce uno dei punti caratteristici di questo sistema. Si tratta di un endoscopio ad alta risoluzione con visione tridimensionale. All'interno della cannula dell'endoscopio sono alloggiati due canali ottici, che trasmettono, attraverso due videocamere separate e indipendenti, l'immagine del campo operatorio a due monitor ad alta risoluzione. L'immagine è inoltre elaborata da un sistema di accentuazione del contrasto marginale e di riduzione del rumore elettronico di fondo.

Il chirurgo ha la sensazione di esser quasi immerso nel campo operatorio, con una forte percezione della sua tridimensionalità. Tale effetto si ottiene grazie ai due monitor montati nella console, ognuno dei quali trasmette l'immagine proveniente da ogni singolo canale a ciascun occhio separatamente. La naturale profondità di campo, ottenuta grazie a questo artificio, il contrasto particolarmente elevato e la magnificazione, consentono una discriminazione spaziale assolutamente superiore a quella ottenibile con un sistema di visione tradizionale bidimensionale.

L'inquadratura del campo operatorio è controllata direttamente dall'operatore che può modificarla attivando il braccio robotico endoscopico tramite il pedale di comando. Azionando i due "master", è possibile spostare la posizione dell'ottica indietro e in avanti, a destra e a sinistra, in alto e in basso.

E' da rilevare che la qualità di visione e la tridimensionalità della stessa, oltre a consentire l'esecuzione di manovre delicate anche in spazi ristretti, può, in molte circostanze, compensare la mancanza di feedback tattile del sistema, come nella valutazione della tensione di rottura dei fili di sutura.

Uno schermo touchscreen è montato sulla barra soffice su cui il chirurgo poggia gli avambracci durante la procedura chirurgica, serve per controllare ed impostare il sistema (calibrare il sistema di visione, impostare il rapporto di movimento, ecc) e per determinarne l'accensione, l'avvio, l'arresto di emergenza e lo spegnimento, oltre che per gestire eventuali consolle accessorie o sistemi di proiezione di imaging. L'operatore della console chirurgica ha inoltre la possibilità di passare dalla vista a schermo intero ad una modalità a più immagini (visualizzazione TilePro™), che mostra l'immagine 3D del campo operatorio insieme ad altre due immagini (ecografo, ECG...) fornite da ingressi ausiliari. (Figura 2.4)

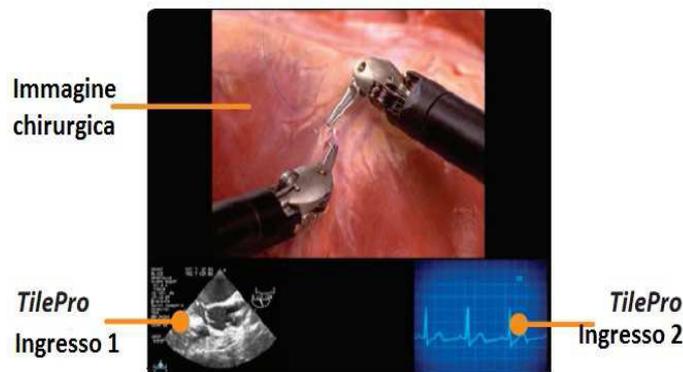


Figura 2.4: Visualizzazione TilePro™

Il carrello mobile

Il carrello mobile è il componente operativo del sistema "Da Vinci", avendo la funzione principale di sostenere i bracci robotici comandati dal chirurgo e di reggere la videocamera. (Figura 2.5)

La tecnologia utilizzata è di tipo '*centro remoto*'. Il centro remoto è un punto fisso nello spazio attorno al quale si muovono le braccia del carrello. In questo modo si consente al sistema di manipolare gli strumenti e gli endoscopi all'interno del campo operatorio minimizzando la pressione esercitata sul paziente. Questo componente mobile, una sorta di scheletro portatile montato su due ruote, si interfaccia con la consolle di comando grazie ad una serie di cavi in fibre ottiche, benché negli ultimi anni si stiano facendo studi sulla possibilità di utilizzare collegamenti wire-less.



Figura 2.5: il carrello con le 4 braccia robotiche

Ciascun braccio è costituito da due parti. Una parte snodata il cui posizionamento viene impostato all'inizio dell'intervento e così rimane durante tutta l'operazione ed una parte motorizzata che viene comandata direttamente dalla consolle. Su ognuno dei bracci è montato, grazie ad un sistema a 'baionetta', uno strumento che viene 'autorizzato' e riconosciuto dal robot. Il braccio non numerato nell'immagine è quello che regge e controlla l'ottica endoscopica. I bracci operativi 1 e 3 rappresentano generalmente la mano sinistra e quella destra del chirurgo e vengono definiti perciò *bracci principali (set up joints)*. Infine il braccio 2 costituisce una sorta di ausilio all'opera di chi siede alla consolle, che può utilizzarlo per eseguire manovre complementari come l'assistenza per una sutura continua o la contro-trazione. Quest'ultimo braccio è stato progettato proprio per sostituire la figura dell'assistente che dovrebbe lavorare all'interno del campo sterile. Molto importante invece è il *secondo operatore* che sta vicino al carrello mobile e si occupa della sostituzione degli strumenti (grazie ad un meccanismo intelligente che garantisce una sostituzione sicura ed efficiente durante l'intervento). Per garantire la sicurezza del paziente, le azioni dell'operatore al tavolo chirurgico hanno sempre la precedenza sulle azioni dell'operatore alla consolle. Il punto forte del sistema robotico "Da Vinci"

è sicuramente l'utilizzo della tecnologia EndoWrist®. (Figura 2.6)

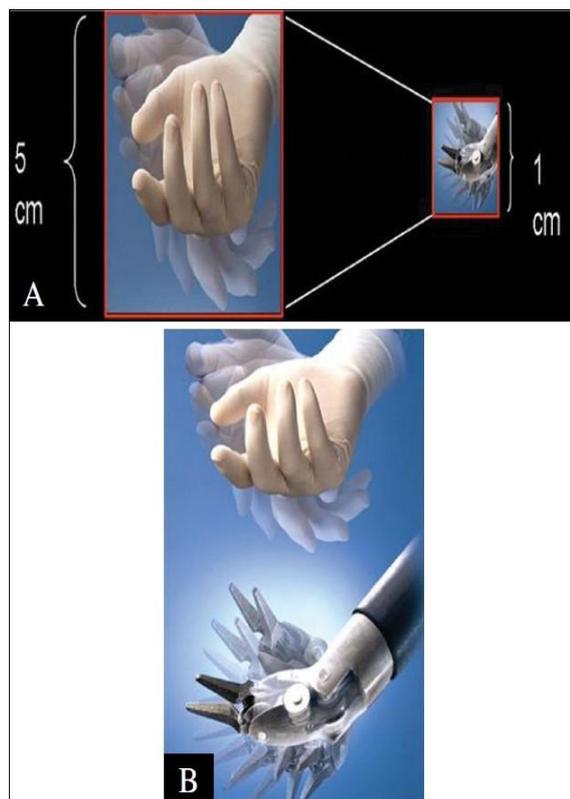


Figura 2.6: tecnologia EndoWrist®

Oltre ad offrire una vasta gamma di strumenti intercambiabili a seconda della destinazione d'uso definita (clampaggi, suture, manipolazioni di tessuti), la Intuitive Surgical ha progettato questi stessi strumenti in modo da garantire la massima manovrabilità possibile, attraverso una modellazione basata sul polso umano. Secondo l'azienda produttrice il sistema EndoWrist® consente al robot di raggiungere un grado di precisione chirurgica anche superiore alle capacità umane. Di fatto, grazie alla struttura realizzata con micro-tiranti in acciaio che riproducono la funzione e la direzione delle articolazioni del polso, è possibile riprodurre, all'interno del campo operatorio, sulla punta di strumenti del calibro di 5-8 mm, tutti i movimenti realizzabili con una mano. Gli strumenti consentono rotazioni da 90° a 360° su 7 gradi di libertà (*DOF, degrees of free*), permettendo traslazione, rotazione, primo snodo della testa dello strumento, secondo snodo della sola parte applicata della testa dello strumento e capacità di presa della parte applicata della testa dello strumento. Grazie al meccanismo di

soppressione del tremore e al rapporto scalare dell'ampiezza dei movimenti inoltre è stato possibile limitare sempre più gli errori di movimento che affliggevano la più tradizionale tecnica laparoscopica. (figura 2.7)

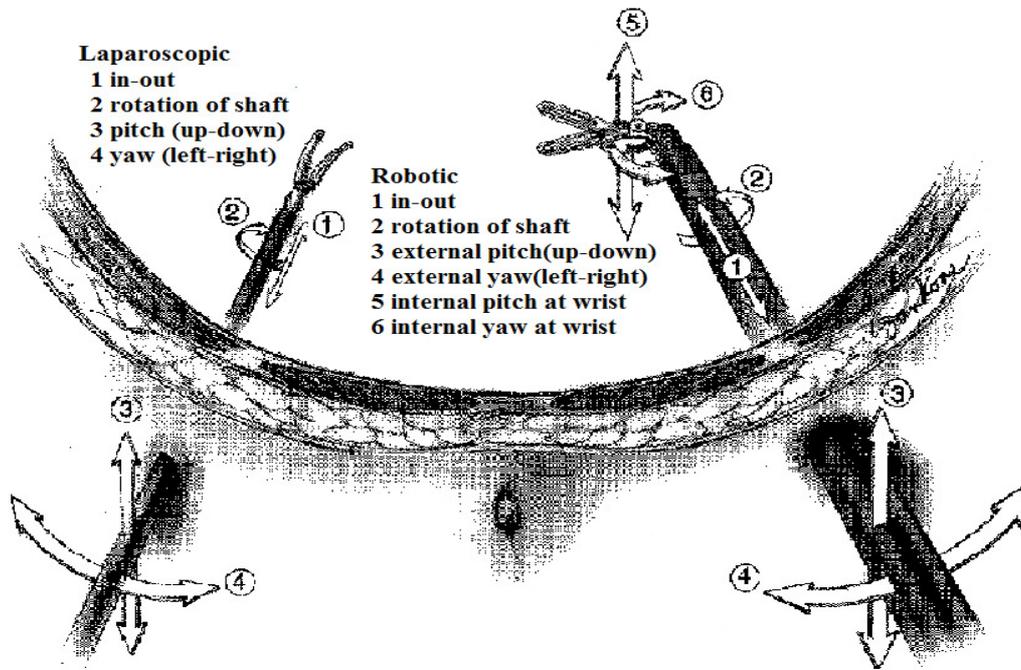


Figura 2.7: DOF in laparoscopic and robotic surgery

Il carrello visione

Il carrello visione è il cuore pulsante del sistema "Da Vinci". Contiene la centrale di elaborazione e l'attrezzatura video. (Figura 2.8)



Comprende un monitor *touchscreen* da 24 pollici e ripiani regolabili per attrezzature chirurgiche ausiliarie opzionali, quali le unità elettrochirurgiche e gli insufflatori. Nell'ultima versione del sistema sono poi disponibili, tra le altre, la funzione *Telestration* che consente al chirurgo di effettuare annotazioni direttamente sull'immagine chirurgica.

Figura 2.8: il carrello visione chirurgica.

Doppia consolle

Il successo del sistema "Da Vinci" ha permesso lo sviluppo di tecniche sempre più sofisticate per ottenere risultati ancora migliori. Attualmente è possibile predisporre una seconda consolle opzionale che consente a due chirurghi di collaborare durante una procedura.

La seconda consolle dispone di tutte le caratteristiche della prima, a cui si sommano funzioni aggiuntive, per esempio si possono attivare i puntatori virtuali o altri strumenti che supportano l'operatore durante l'intervento. Il puntatore virtuale è un oggetto grafico tridimensionale di forma conica che, se attivato, appare in sovrimpressione sull'immagine video in tempo reale consentendo al chirurgo esperto di indicare ed illustrare specifiche regioni anatomiche visualizzate durante l'intervento chirurgico. Entrambi i chirurghi, utilizzatori delle due consolle, condividono la stessa visione 3D HD del campo operatorio, hanno la possibilità di gestire alternativamente il movimento dell'endoscopio installato sul braccio telecamera e di commutare il controllo di ogni singolo strumento, installato su una delle tre braccia operative del carrello paziente. Un sistema avanzato di interfono integrato agevola le comunicazioni tra i due operatori in consolle e con gli assistenti al tavolo operatorio.

(Figura 2.9)



Figura 2.9: la doppia consolle permette di raggiungere un grado di precisione davvero notevole, limitando ulteriormente i rischi per il paziente

La possibilità di operare in sinergia con un altro chirurgo garantisce anche il corretto apprendimento delle procedure cliniche, riducendo la “learning curve” (curva di apprendimento) da parte degli specialisti che desiderano approcciarsi alla tecnica chirurgica robotica. L'enorme rivoluzione apportata dal sistema "Da Vinci" nel mondo delle scienze mediche suscitò moltissima diffidenza nella comunità dei chirurghi, da sempre abituati a 'lavorare' in un certo modo e soprattutto con certi strumenti. Per questo motivo la Intuitive Surgical ha posto grande attenzione alla problematica dell'apprendimento e dell'addestramento. Ad oggi è possibile predisporre di simulatori virtuali (pacchetti hardware e software) che consentono ai chirurghi giovani e meno giovani di migliorare la propria abilità con il robot. Il simulatore prevede una varietà di esercizi incentrati allo sviluppo di abilità specifiche (gestione dei comandi della console, corretto sfruttamento di tutte le potenzialità degli strumenti robotici, etc...). Alla fine di ogni esercizio il sistema assegna un punteggio all'operatore, consentendogli di migliorare i risultati ottenuti monitorando di volta in volta i propri progressi. (Figura 2.10)



Figura 2.10: skill simulator

2.3 Vantaggi e svantaggi della chirurgia robotica

Come già affermato nell'introduzione, la *Robotic Assisted Surgery* cerca di riprendere tutti gli aspetti positivi che stanno alla base della chirurgia laparoscopica con l'intento di perfezionarli e migliorarli, riconquistando tutto ciò che era stato perso con l'introduzione delle tecniche mini-invasive. I vantaggi riguardano allo stesso modo la figura del clinico che quella del paziente. Per quanto concerne il chirurgo, il robot "Da Vinci":

- aumenta il comfort durante l'operazione chirurgica grazie all'ergonomia della consolle, senza far diminuire la precisione dell'intervento;
- offre la possibilità di vedere il campo operatorio in tre dimensioni e di utilizzare movimenti *naturali* simili a quelli delle mani e delle braccia (diversamente dalla chirurgia laparoscopica);
- riesce a filtrare i tremori delle mani e del braccio;
- elimina l'effetto fulcro, tipico della laparoscopia, consentendo al chirurgo di eseguire movimenti più normali, tipici della chirurgia *open*;
- consente un'estrema facilità di accesso ad anatomie 'difficoltose';
- incrementa notevolmente la precisione nella procedura demolitiva e in quella ricostruttiva.

Dal punto di vista del paziente invece, anche a secondo del tipo di intervento a cui si è sottoposti, questa nuova tecnologia:

- prevede incisioni più piccole (tecnica mini-invasiva) e quindi meno dolore;
- limita le perdite di sangue e quindi la necessità di trasfusioni;
- riduce la sofferenza post-operatoria;
- riduce la probabilità di infezione (in media del 2-3%) praticamente a zero;
- riduce i tempi di recupero e quindi favorisce un più rapido ritorno alla normalità;
- riduce l'ospedalizzazione con un risparmio non trascurabile dal punto di vista economico (costi diminuiti del 33%).

Per quanto riguarda gli svantaggi invece essi si focalizzano intorno a tre aree:

1. il costo del sistema, sia iniziale per il macchinario (quasi 2 milioni di euro) e la strumentazione, sia per il sostenimento del sistema; poiché gli strumenti sono parzialmente riutilizzabili, i costi sono sostanziali (utilizzo limitato a 10 volte). Fortunatamente la formazione è generalmente inclusa nel costo di acquisto della macchina.
2. questioni legate al set up del robot e alla sua logistica: problemi durante il settaggio del sistema, dal punto di vista degli errori che si commettono e dei tempi che si impiegano (inizialmente tutto è legato alla mancanza di esperienza, e i problemi tendono a diminuire man mano che aumenta la manualità della equipe di sala); problemi legati alla comunicazione tra chirurgo che opera e il resto del team chirurgico in sala operatoria (particolarmente il secondo chirurgo), per via della distanza fra primo operatore e resto del team;
3. Il sistema robotico e la strumentazione possono dare ai chirurghi un falso senso di sicurezza ed essere fuorvianti dal punto di vista della percezione, poiché il computer e le procedure robotiche creano situazioni che sono superficialmente simili, ma sostanzialmente diverse dalle procedure tradizionali. Un primo esempio della differenza consiste, infatti, nella mancanza di feedback tattile, ancora non presente e in fase di studio in questi sistemi.

2.4 Scenari applicativi

Il sistema "Da Vinci", dapprima utilizzato solo in particolari procedure, in breve tempo è diventato un supporto essenziale in un gran numero di interventi, anche abbastanza complessi, specialmente in quelle operazioni dove i campi operatori sono limitati e di difficile accesso, le strutture fisse e delicate e le manovre chirurgiche necessitano di elevata precisione e accuratezza.

In letteratura si trovano diversi riferimenti, vale la pena sottolinearne alcuni:

- ✓ **chirurgia toracica e cardiovascolare:** resezione polmonare, rivascularizzazione cardiaca, sostituzione valvolare;
- ✓ **chirurgia generale:** patologia funzionale e neoplastica di esofago, stomaco, pancreas, fegato e vie biliari, intestino e colon-retto; trattamento dell'obesità patologica;
- ✓ **otorinolaringoiatria:** tumori della laringe e della tiroide, roncopatie, resezione base lingua;
- ✓ **urologia**(campo di maggior successo): espianto renale da donatore vivente; nefrectomia radicale; reimpianto ureterale; giunto-plastiche; prostatectomia radicale robotica *nerve sparing* (**Gold standard:** migliore rimozione del tumore, maggiore continenza, incremento della potenza sessuale, riduzione del dolore, riduzione delle perdite ematiche e delle complicazioni);
- ✓ **ginecologia:** isterectomie e linfadenectomie pelviche; patologie del pavimento pelvico, come i prolapsi uro-genitali;
- ✓ **pediatria.**

Capitolo 3

L'integrazione: la nuova frontiera dello sviluppo tecnologico

Dopo aver descritto separatamente nei capitoli precedenti le due tecnologie (*ecografia* e *Robotic Surgery*) in questo capitolo entriamo nel merito del lavoro di tesi. Dapprima le indagini ecografiche, come pure le varie tecniche di imaging (TAC, RM) venivano utilizzate come semplice supporto in fase di preparazione all'intervento (il chirurgo voleva 'vedere' attraverso le bioimmagini dove sarebbe andato ad operare). In seguito però si è voluta aumentare la complessità, progettando sistemi in grado di acquisire e fornire immagini real-time durante la procedura stessa, in modo tale da costituire una sorta di patrimonio informativo in più per l'operatore (il campo operatorio non è indagato solamente dalle lenti delle videocamere, ma anche dagli ultrasuoni). Ovviamente l'indagine ecografica, vista la sua totale non invasività per il paziente, si presta naturalmente come degna collega di lavoro della chirurgia robotica.

3.1 Advanced Robotic Technology (ART)

Abbiamo già sottolineato l'importanza assunta dall'imaging ecografico nelle procedure chirurgiche convenzionali, ma è soprattutto con l'avvento della chirurgia laparoscopica che sono stati fatti i primi passi avanti in questa integrazione. Uno dei primissimi tentativi è stato l'utilizzo di trasduttori laparoscopici ad ultrasuoni per gli interventi più delicati in urologia. La tecnologia ad ultrasuoni intrachirurgica ben presto è diventata uno strumento fondamentale nelle mani del chirurgo. Tuttavia le soluzioni di prima generazione prevedevano la forte dipendenza dell'operatore, seduto sulla consolle e quindi lontano dal paziente, dall'assistente che stava nel campo sterile. Il chirurgo in pratica doveva guidare l'assistente nel manovrare la sonda attraverso l'incisione.

Dopo ogni movimento veniva controllato il posizionamento del trasduttore ed eventualmente la sonda veniva ridirezionata secondo le necessità del chirurgo. In questa sorta di botta e risposta continuo il clinico vedeva il trasduttore in una schermata e doveva passare ad un'altra visualizzazione per poter osservare le immagini acquisite, rendendo ancora più complicato tutto il processo operatorio. É in questo contesto che nel marzo 2011 Analogic Corporation ha introdotto sul mercato il cosiddetto **Advanced Robotic Technology (ART)**, abbattendo completamente tutti i limiti presenti nella tecnologia ad ultrasuoni intrachirurgica di prima generazione. ART comprende diversi componenti, tutti progettati appositamente per rendere l'acquisizione e l'integrazione con la chirurgia robotica davvero efficiente: il sistema *Flex Focus 700* per la visualizzazione di immagini ecografiche, la sonda *ProArt*, il trasduttore *3DART* e il *Robotic Stationary Transducer Arm (RST)*.

Il Sistema Flex Focus



Il sistema Flex Focus (Figura 3.1) implementa tutte le normali funzioni di un ecografo, ma è stato progettato appositamente per garantire la massima qualità dell'immagine, grazie ad un monitor ad alta risoluzione e alla Motion Compensated Angular Compound Imaging (MACI), che permette di ottenere visualizzazioni real-time in alta definizione. Analogic Corporation ha migliorato ulteriormente il suo prodotto grazie alla *Quantum Technology*, aprendo così nuovi orizzonti nel campo degli

ultrasuoni. Il *Flex Focus 800* in questo modo offre una risoluzione dell'immagine ancora maggiore, con la possibilità di pre-setting di alcuni parametri di visualizzazione in maniera facile e veloce. Ma soprattutto attraverso la modalità *Vector Flow Imaging* (Figura 3.2) è possibile vedere e

calcolare la velocità del flusso sanguigno in tutte le direzioni e tutti gli angoli.

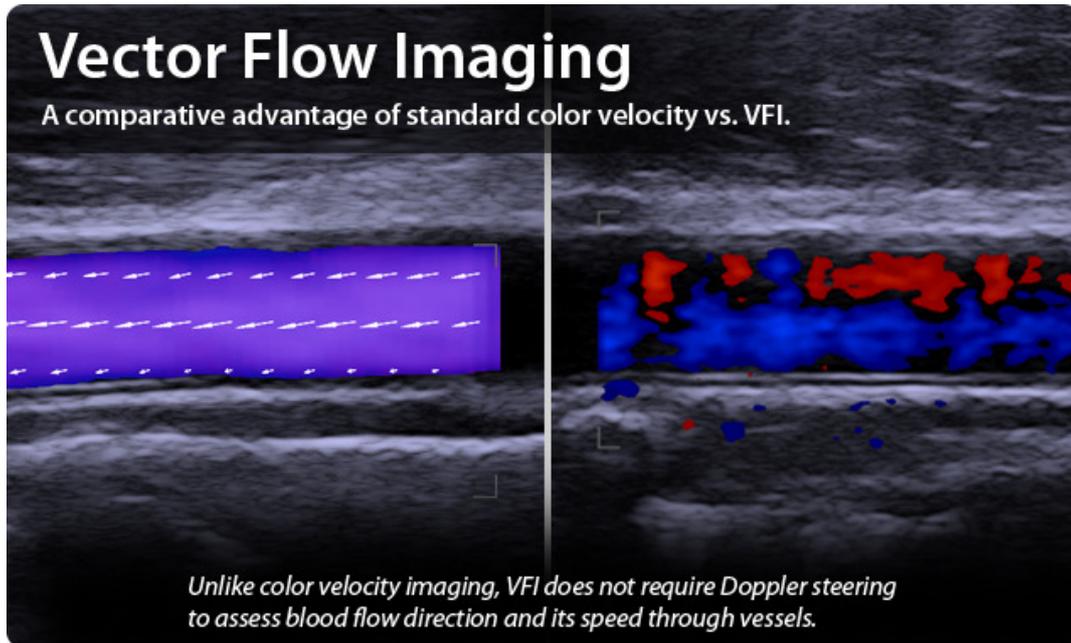


Figura 3.2: modalità VFI

Come abbiamo visto nel capitolo 1, i sistemi convenzionali di color-doppler possono determinare velocità e direzione del flusso di sangue solo lungo la direzione del fascio di ultrasuoni. Questo problema di solito è risolto inclinando il trasduttore o il fascio stesso. Il primo approccio può spesso modificare la velocità, incrementandola, visto che si tende a spingere sulle pareti del vaso; entrambi comunque misurano solo una parte della velocità, come si vede da questa formula (3.1):

$$v_z = |v| \cos \Theta = (f_p c) / (f_t 2) \quad (3.1)$$

dove Θ è l'angolo tra il fascio ed il vettore flusso, f_p è la frequenza stimata e f_t è la frequenza del trasduttore.

Con un angolo di 60° , una velocità di 1 ms^{-1} corrisponde a 0.5 ms^{-1} ; con uno di 80° corrisponde a 0.17 ms^{-1} . Perciò il *Colour Flow Imaging (CFI)* non ci permette di fare misure quantitative e non può essere utilizzato per diagnosi basate su un valore ben preciso della velocità. La modalità VFI invece usa una tecnica chiamata *oscillazione trasversale* per superare l'ostacolo della dipendenza dall'angolo. Viene creata una componente effettiva dell'oscillazione

ultrasonora perpendicolare al fascio d'onda trasmesso (che è un'oscillazione nella direzione trasversale). VFI genera così un pattern 2D di interferenze grazie al segnale che riceve. Questo consente al sistema di calcolare non solo la componente assiale (come nel tradizionale color-doppler), ma anche quella trasversale. (Figura 3.3)

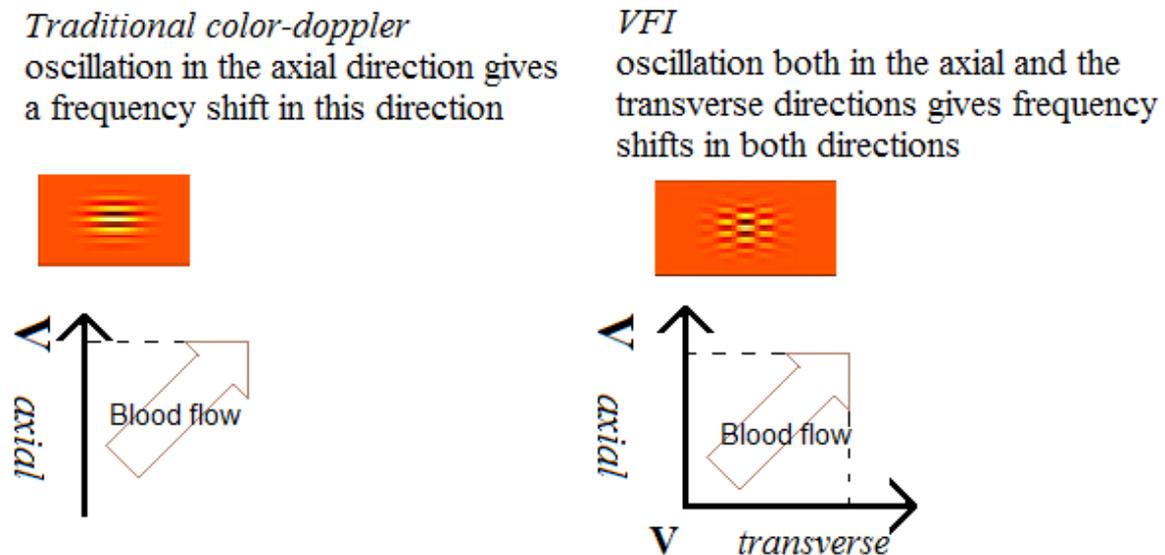


Figura 3.3: color-doppler e VFI a confronto

La sonda ProArt

Figura 3.4: la sonda ProArt



La sonda ProArt (figura 3.4) si integra perfettamente con i bracci del robot chirurgico "Da Vinci", in modo tale da ridare completamente il controllo dello strumento al chirurgo seduto sulla consolle. Funziona in tutto e per tutto come i trasduttori visti nel capitolo 1, tuttavia, proprio per poter essere utilizzata durante gli interventi di *Robotic Assisted Surgery*, il trasduttore è miniaturizzato (pesa appena 25 grammi). Tramite il montaggio a baionetta la sonda viene agganciata ai bracci robotici che, come

abbiamo visto, sono guidati dall'operatore con i comandi della work-station. Grazie alla tecnologia EndoWrist® inoltre i gradi di flessione aumentano da 4

(sonde di prima generazione) a 7, così il trasduttore può essere messo praticamente in qualunque posizione voglia il clinico. Infine grazie alla 3DART probe è possibile ottenere visualizzazioni 3D, massimizzando l'utilità di questa tecnologia.

3.2 Ambiti applicativi: Prostatectomia radicale

La prostatectomia radicale è un trattamento diffuso per la neoplasia prostatica localizzata, in pazienti con aspettativa di vita superiore a dieci anni. La prima prostatectomia radicale robotica (RALP) è stata eseguita nel maggio 2000 da Binder, un chirurgo esperto, che non aveva mai eseguito interventi laparoscopici, che lavorava a Francoforte (Germania). In breve tempo questa tecnica si è imposta come trattamento di riferimento, anche in sostituzione alla precedente prostatectomia radicale laparoscopia (LRP). Esistono diversi studi in cui si confrontano RALP e LRP, tuttavia in nessuno emergono conclusioni definitive riguardo i 2 approcci: i risultati perioperatori e quelli oncologici risultano nella maggior parte dei casi equivalenti.

Cenni di tecnica chirurgica

Il primo tempo dell'intervento consiste nella creazione del pneumoperitoneo: la cavità addominale deve essere riempita di anidride carbonica per creare una camera di lavoro per gli strumenti chirurgici robotici. Una incisione di 1 cm a livello sopra-ombelicale consente di posizionare sotto visione diretta ed in maniera del tutto atraumatica il primo trocar robotico attraverso il quale si inserisce l'ottica che permetterà al chirurgo di eseguire l'intervento.

Si inseriscono successivamente in cavità peritoneale i successivi 5 trocar operativi, di cui tipicamente 3 gestiti dal primo operatore e 2 dall'assistente. (Figura 3.5)

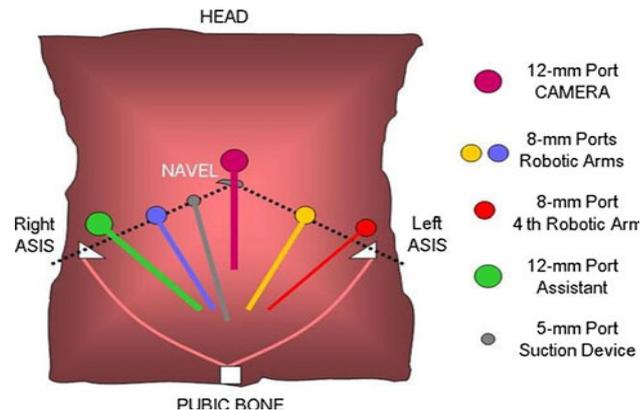


Figura 3.5: disposizione trocar nella RALP

Il primo tempo operatorio è rappresentato dall'isolamento delle vescicole seminali, attraverso una piccola breccia eseguita nel peritoneo parietale che riveste il cavo del Douglas, al di sopra dell'intestino retto. Questo approccio permette una perfetta visualizzazione delle vescicole seminali ed in particolare sia dei vasi sanguigni che dei nervi che le avvolgono. Queste ultime strutture vengono rigorosamente conservate e si ha cura di non usare mai energia termica per non danneggiare il ricco plesso nervoso peri-vescicolare da dove transitano rami nervosi diretti ai corpi cavernosi del pene e responsabili dell'erezione peniena. Completato l'isolamento delle vescicole seminali, dalla cavità peritoneale si accede allo spazio pelvico dove è localizzata la prostata.

La rimozione della prostata avviene per via anterograda, partendo cioè dal collo vescicale che viene separato dalla base della prostata avendo cura di conservare il più possibile l'integrità delle fibre muscolari del collo vescicale stesso le quali partecipano al meccanismo della continenza urinaria. Completata questa manovra, si raggiungono le vescicole seminali precedentemente isolate. Completato l'isolamento della prostata si procede alla sezione del plesso venoso di Santorini ed alla sua successiva sutura emostatica con punti posti sotto visione diretta e ponendo la massima attenzione alla preservazione della integrità dello sfintere uretrale esterno, muscolo principale responsabile della continenza urinaria.

Si procede poi a sezionare l'uretra a livello dell'apice prostatico e a questo punto il pezzo operatorio prostatico, completamente liberato, viene estratto

dall'addome attraverso una porta operativa.

L'intervento procede con la accurata cura della emostasi: ogni eventuale piccola fonte di sanguinamento viene controllata sempre e per quanto possibile con mini clip e mini punti di sutura.

L'anastomosi uretro-vescicale viene eseguita con una sutura in continua che garantisce una tenuta eccellente e rapida ripresa della continenza urinaria. Si posiziona un catetere vescicale e viene eseguita prova di tenuta dell'anastomosi stessa. Si posizionano nello scavo pelvico 1-2 piccoli tubi di drenaggio, che permettono il monitoraggio di eventuali perdite di sangue, di urine o di linfa.

Vantaggi dovuti all'integrazione

Il principale obiettivo della prostatectomia radicale è quello di riuscire a rimuovere la prostata, cercando di preservare la normale continenza urinaria e i plessi nervosi che garantiscono la funzionalità sessuale.

L'integrazione con gli ultrasuoni entra in gioco in questa parte dell'operazione perchè essi vengono utilizzati proprio per delineare i plessi neuro-vascolari. Il chirurgo deve sapere dove inizia e finisce l'organo in quanto il taglio di uno di questi plessi può provocare disfunzioni davvero gravi. È importante individuare e salvaguardare queste strutture che devono essere mantenute integre proprio per evitare danni collaterali.

L'eco-tomografia gioca un ruolo fondamentale anche nell'identificazione di particolari punti chiave, come ad esempio le aree della prostata poco pulite o poco distinguibili. Durante la rimozione della prostata non c'è un piano di *scollamento* (dissezione) ben definito. Gli ultrasuoni aiutano i chirurghi (non solo quelli più giovani, ma anche quelli con più esperienza) a visualizzare questi piani in real-time.

Un altro problema può essere quello dell'individuazione dell'apice della prostata, che di solito risiede sotto l'osso pubico, essendo così impossibile da vedere. L'utilizzo della sonda ProArt supporta il clinico grazie all'acquisizione di immagini in diretta. I vantaggi per il paziente sono significativi. Poter vedere

dov'è situato l'apice della prostata riduce il rischio di errori e consente una dissezione più pulita. Un altro aspetto positivo per il paziente è sicuramente la minor durata dell'intervento, con gli ultrasuoni infatti la dissezione risulta decisamente più rapida. Essendo un'integrazione relativamente nuova, gli studi che riguardano l'impatto dell'ultra-sonografia intrachirurgica sull'intervento di RALP sono appena iniziati e devono ancora essere completati, tuttavia i primi dati sono davvero impressionanti.

Secondo uno studio guidato dal dottor Patel, direttore del *Global Robotic Institute* al *Florida Hospital* di Orlando (Florida) e pioniere della prostatectomia radicale robotica (con più di 5000 interventi eseguiti), su un campione di 404 uomini, il 91% sottoposto alla procedura RALP integrata ha ripreso la normale funzionalità sessuale e ritentiva dopo 18 mesi dall'operazione; nella maggioranza dei casi i sintomi di ripresa si sono manifestati già dopo 6 mesi. Sebbene ancora sia presto per esprimere pareri definitivi su questa particolare integrazione nel caso di RALP, i dati infondono molta speranza e spingono ad andare avanti con le varie applicazioni.

3.3 Ambiti applicativi: Nefrectomia parziale

La nefrectomia parziale consiste nell'asportazione di una parte del rene malato (neoplasie, tumori), con il risparmio della parte sana dell'organo. Di solito viene eseguito per neoplasie renali di dimensioni inferiori ai 4-5 cm. Anche in questo caso è lecito fare un confronto con la nefrectomia parziale laparoscopica, ma rispetto alla tecnica precedente, stavolta i risultati sono più chiari e significativi. Anzi negli ultimi tempi gli interventi di nefrectomia parziale robot-assistita si stanno ponendo sempre più come valida alternativa alla nefrectomia parziale laparoscopica per il trattamento di tumori renali.

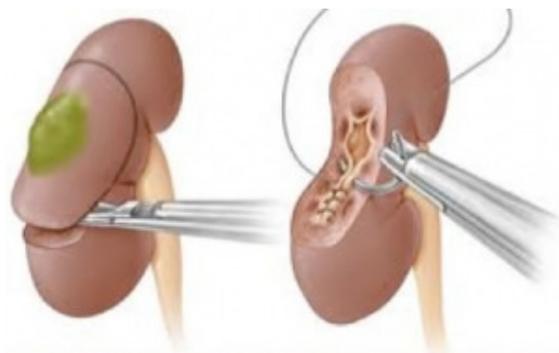
Dai primi studi di comparazione delle due tecniche chirurgiche si evince che la nefrectomia parziale robot-assistita rappresenta un'alternativa sicura e applicabile alla nefrectomia parziale laparoscopica, dal momento che porta a

esiti oncologici precoci equivalenti o comparabili a quelli osservati con il tradizionale approccio laparoscopico.

Inoltre la tecnica robot-assistita porterebbe a perdita ematica intra-operatoria significativamente inferiore e farebbe registrare una riduzione del 33% del tempo di ischemia calda (tempo in cui l'organo è privato dell'apporto ematico, ma rimane a temperatura corporea); quest'ultimo fattore potrebbe portare al massimo mantenimento della riserva renale. Fatto ancora più importante è che nel caso di nefrectomia robot-assistita, la complessità del tumore non influenza i parametri operatori e che i tempi di ospedalizzazione diminuiscono notevolmente (secondo studi condotti e pubblicati nel settembre 2009 dal dottor Stifelman, direttore di chirurgia robotica al *Langone Medical Center* della *New York University*).

Cenni di tecnica chirurgica

Il paziente è in anestesia generale ed in posizione obliqua sul fianco contralaterale al rene interessato. Vengono posizionati un trocar per l'ottica, altri due trocar per le braccia del robot e altre due per il chirurgo al tavolo operatorio. Dopo aver inciso la doccia parietocolica (parte del peritoneo che ricopre il colon ascendente), si accede al rene che viene liberato dal grasso della loggia renale. Il tumore viene identificato. Si procede quindi all'isolamento degli elementi del peduncolo vascolare. L'arteria e la vena vengono clampate e si procede a dissezione, in campo esangue della neoplasia. (Figura 3.6) Una doppia sutura sul letto di resezione consente di eseguire la chiusura dei vasi arteriosi e venosi.



© Mayo Foundation for Medical Education and Research. All rights reserved.

Figura 3.6: dissezione parziale renale

(sotto: immagine da carrello monitor sistema "Da Vinci")



Vantaggi dovuti all'integrazione

Uno dei problemi che l'operatore sente maggiormente in caso di interventi così delicati è la mancanza di propriocezione. Nella chirurgia tradizionale, durante l'operazione, il chirurgo poteva palpare l'area interessata con il dito per determinare ad esempio dove fosse un'arteria. Ovviamente questo con la chirurgia robotica non è più possibile, tuttavia gli ultrasuoni riescono a compensare la perdita di propriocezione. A seconda dei bisogni del clinico, la sonda può essere inserita nell'addome fornendo non solo una visualizzazione più chiara dell'organo e delle linee guida di riferimento tramite il Doppler imaging, ma permettendo al chirurgo di 'ascoltare' i vasi sanguigni.

Il primo passo da eseguire durante la nefrectomia parziale è la dissezione dell'ilo (nel quale passano i vasi renali). È importante identificare tutte le arterie durante la dissezione perché il chirurgo le deve isolare, interrompendo il flusso di sangue all'organo. I reni infatti sono altamente vascolarizzati e ricevono 1,2 litri di sangue al minuto (1/5 del volume di sangue corporeo). Se non venisse fermato l'apporto di sangue al rene durante l'incisione il paziente potrebbe avere perdite cospicue, fino a diventare ipoteso. È possibile utilizzare la modalità Doppler della sonda ProArt per determinare l'approvvigionamento di sangue nell'area intorno alla parte di rene affetta da tumore. A questo punto ci sono due possibilità. Si può utilizzare un clamp vascolare per chiudere temporaneamente tutte le arterie e isolare l'organo, tuttavia c'è un limite di tempo massimo oltre il quale i nefroni non possono sopravvivere senza apporto di sangue e a volte, in

caso di tumori molto grandi, questo limite può essere superato. Oppure si può fare un clamping selettivo delle sole arterie che portano il sangue all'area interessata alla dissezione. La difficoltà risiede nella complessità del circolo vascolare renale in quanto le arterie si diramano in vasi sempre più piccoli (arterie secondarie, terziarie, quaternarie) man mano che si avvicinano al rene. Un chirurgo esperto può riuscire a risparmiare quelle ramificazioni più piccole durante il clamping selettivo evitando un'ischemia renale totale. Nel fare questo possono venire in aiuto ancora una volta la sonda e la sua funzionalità Doppler per determinare, ad esempio, se quella specifica parte di organo è ancora irrorata di sangue oppure no nel caso in cui vengano clampati i vasi terziari giusti.

Gli ultrasuoni possono fornire anche una mappatura della neoplasia. Trovare una massa tumorale di 1-2 cm in un rene, che può arrivare ad una lunghezza di 12-13 cm senza contare lo strato di 2-3 cm di grasso che lo circonda, può risultare difficile e lungo. L'eco-tomografia ci mostra l'intero organo e l'esatta posizione del tumore, grazie alla modalità TilePro del monitor e della consolle che ci consente di visualizzare le due immagini (quella dell'ottica e quella della sonda) sullo stesso schermo.

Un'altra fase in cui l'integrazione risulta quasi fondamentale è quella di verifica dei margini del tumore. Con l'imaging ecografico il chirurgo riesce a individuarli perfettamente sull'organo e quindi, con l'elettro-cauterizzazione, può marcare questi margini in modo da avere delle linee di riferimento fisse durante la dissezione. Tutto questo porta grandissimi benefici anche al paziente in quanto il clinico sa esattamente dove fare l'incisione per estrarre la parte tumorale e si riduce moltissimo la probabilità di asportare tessuto renale sano. Infine la tecnologia della Analogic Corporation può essere adoperata dopo l'intervento, per verificare che il rene sia irrorato correttamente e che nulla sia stato inavvertitamente reciso.

Ma i vantaggi riguardano anche quei pazienti che hanno dei problemi particolari. Per esempio nei soggetti che hanno placche aterosclerotiche nelle arterie renali,

esiste la possibilità di rompere le placche stesse durante il clamping vascolare. La placca fratturata in questo modo potrebbe provocare un blocco del flusso emodinamico in un'altra zona e portare l'organo alla morte, senza che chi opera si accorga di niente. L'utilizzo di ultrasuoni alla fine della nefrectomia riesce a togliere qualsiasi dubbio sulla normale ripresa del circolo sanguigno renale.

Un'altra categoria di pazienti che può trarre grande beneficio dall'integrazione presa in esame è quella di coloro che hanno già subito interventi al rene.

Questi soggetti tendono ad avere diverse adesioni intorno alla zona dell'ilo e può risultare difficile 'lavorare' se ci sono cicatrici con molto tessuto denso e fibroso. In questo caso si può mettere la sonda nella vena cava o nell'aorta, muoverla lateralmente intorno al rene per visualizzare le arterie renali e aiutare così il chirurgo nella dissezione.

In conclusione i benefici derivanti dall'integrazione tra chirurgia robotica (che già di per sé ha offerto diversi spunti innovativi in questa procedura) e imaging ecografico fanno ben sperare per i futuri sviluppi nella nefrectomia parziale e nel campo della chirurgia renale.

3.4 Ambiti applicativi: Pancreasectomia

La pancreasectomia è un intervento chirurgico che prevede l'asportazione totale o parziale del pancreas in caso di tumori pancreatici benigni o maligni. Il cancro del pancreas è la quarta causa di morte per tumore nel mondo occidentale: circa 10 nuovi casi all'anno ogni 100 mila persone; anche per questo motivo le procedure come quella descritta stanno diventando sempre più importanti. L'intervento chirurgico infatti rappresenta ancora oggi l'arma principale nel trattamento del carcinoma pancreatico. Purtroppo solo dal 5% al 20% di tutti i tumori pancreatici sono radicalmente resecabili alla diagnosi, inoltre, malgrado le tecniche di imaging diagnostico sempre più avanzate, questa neoplasia arriva, nel 70-80% dei casi, all'osservazione del medico in fase tardiva, quando la malattia è già o localmente avanzata o diffusa ed è precluso il trattamento chirurgico. A tutto questo si aggiunge il fatto che il tipo di intervento dipende

dalla sede del pancreas colpito, dalle dimensioni del tumore e dalla necessità di ottenere margini di resezione liberi da malattia. Pertanto, mentre in alcuni casi è possibile la preservazione di parte del pancreas (*pancreasectomia distale, duodeno-cefalo-pancreasectomia*), in altri casi la ghiandola pancreatica deve essere completamente rimossa (*pancreasectomia totale*) con conseguente quadro di insufficienza pancreatica e diabete mellito.

Cenni di tecnica chirurgica

La *duodeno-cefalo-pancreasectomia (DCP)* è la procedura chirurgica standard per questo tumore, anche perché la maggior parte dei casi si localizza nella testa del pancreas. L'intervento consiste nell'asportazione della testa del pancreas. Per ragioni anatomiche, la testa del pancreas deve essere rimossa insieme al duodeno, alla porzione terminale della via biliare (coledoco) e alla cistifellea. (Figura 3.7)

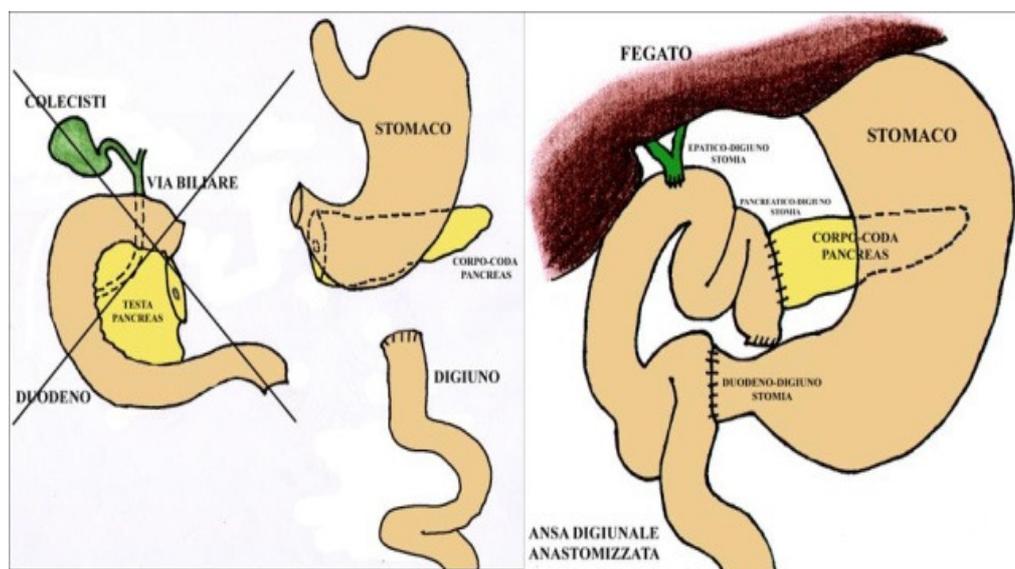


Figura 3.7: *duodeno-cefalo-pancreasectomia (DCP)*

L'intervento comporta le seguenti fasi:

- esplorazione del pancreas e degli organi circostanti, per verificare i reperti degli esami diagnostici preoperatori,
- liberazione del pancreas dalle aderenze coi tessuti circostanti. Questa fase può essere molto delicata per le aderenze, di tipo tumorale o di tipo infiammatorio, che possono essere presenti tra il pancreas e le vene e le

- arterie che decorrono a stretto contatto con la ghiandola,
- sezione della via biliare, del duodeno, della prima ansa digiunale e del pancreas a livello del passaggio tra testa e corpo della ghiandola,
 - asportazione del pezzo operatorio, costituito da testa del pancreas-duodeno- via biliare terminale,
 - ricostruzione degli organi sezionati, attraverso l'unione di un'ansa digiunale al pancreas residuo, alla via biliare residua ed alla prima porzione duodenale. La sutura tra pancreas e intestino, per le caratteristiche del pancreas, è la più delicata ed è la fonte delle maggiori complicazioni postoperatorie.

La *pancreasectomia distale (o sinistra)* viene eseguita invece per i tumori o le infiammazioni croniche localizzate nella parte denominata corpo-coda del pancreas. Per questo motivo, nella maggior parte dei casi, la procedura comporta anche l'asportazione della milza, dato che questo organo ha una posizione anatomica in stretta vicinanza con la coda del pancreas.

In questo intervento si seziona il pancreas a livello del passaggio tra testa e corpo e si rimuove la parte sinistra dell'organo. Non sono necessarie altre suture o ricostruzioni. In caso di tumori benigni, questo intervento può essere eseguito con la tecnica laparoscopica, e nella maggior parte dei casi è possibile preservare la milza. (Figura 3.8)

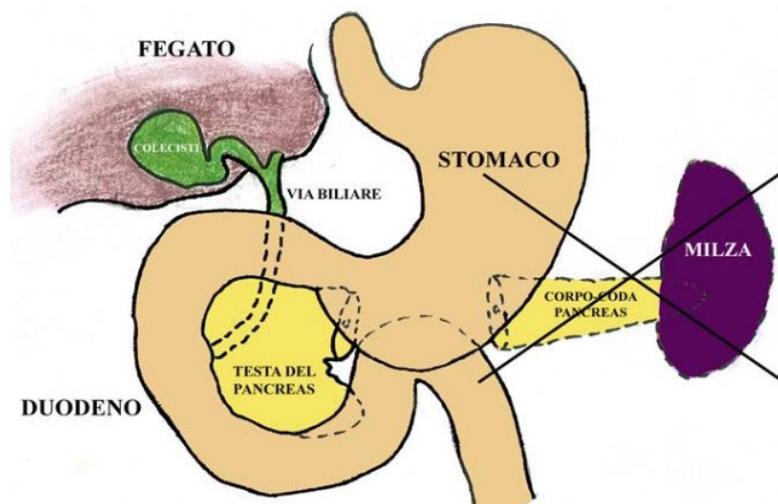


Figura 3.8: pancreasectomia distale

L'intervento di *pancreasectomia totale* viene eseguito raramente, solo quando il tumore cresce lungo tutto il pancreas oppure quando è multifocale e non è possibile perciò conservare una parte della ghiandola.

La procedura consiste nell'asportazione di tutto il pancreas. Per ragioni anatomiche, la testa del pancreas deve essere rimossa insieme al duodeno, alla porzione terminale della via biliare (coledoco) e alla colecisti. L'intervento comporta le seguenti fasi:

- esplorazione del pancreas e degli organi circostanti, per verificare i reperti degli esami diagnostici preoperatori;
- liberazione del pancreas dalle aderenze coi tessuti circostanti. Questa fase può essere molto delicata per le aderenze, di tipo tumorale o di tipo infiammatorio, che possono essere presenti tra il pancreas e le vene e le arterie che decorrono a stretto contatto con la ghiandola;
- sezione della via biliare, del duodeno, della prima ansa digiunale;
- asportazione del pezzo operatorio, costituito da pancreas-duodeno-via biliare terminale,
- ricostruzione degli organi sezionati, attraverso l'unione di un'ansa digiunale alla via biliare residua e alla prima porzione duodenale. (Figura 3.9)

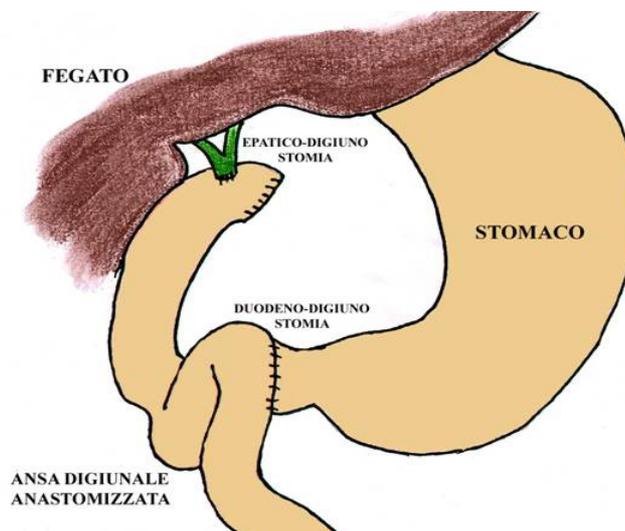


Figura3.9: Schema della ricostruzione dopo pancreasectomia totale

Vantaggi dovuti all'integrazione

Come abbiamo visto, la pancreasectomia parziale, per le caratteristiche anatomiche dell'organo, viene schematicamente suddivisa in chirurgia del pancreas distale ed in chirurgia della testa del pancreas. La prima, chirurgia del pancreas distale, è tecnicamente meno complessa e non necessita di eseguire alcun tipo di ricostruzione alla fine della resezione e per tale motivo è stata la prima ad essere affrontata sia in laparoscopia che in chirurgia robotica. L'utilizzo del "Da Vinci" ha migliorato ulteriormente le possibilità tecniche di questo tipo di resezione aggiungendo una migliore stabilità del campo operatorio, una più precisa e meticolosa dissezione ed una visione tridimensionale che senza dubbio rappresenta una delle caratteristiche più importanti del robot. Per quanto riguarda le pancreasectomie DCP (della testa) la letteratura scientifica è davvero molto ricca, tuttavia non è stato eseguito alcuno studio che abbia confrontato la tecnica tradizionale con quella laparoscopica o robotica quindi di valore tale da poter evidenziare una superiorità scientificamente provata dell'una tecnica rispetto all'altra.

A prescindere da queste ultime considerazioni, l'integrazione tra *Robotic Assisted Surgery* ed ecotomografia, nel caso di pancreasectomie (di qualunque tipo esse siano), risulta ancora una volta davvero sorprendente. Come visto nel caso della nefrectomia e della prostatectomia, l'utilizzo degli ultrasuoni consente al chirurgo una visione nitida e pulita della parte malata, vantaggio ancora più evidente nel caso di prostatectomia distale o della testa, in quanto la resezione deve essere più precisa e limitata a certe zone della ghiandola. Visto che in alcuni interventi il pancreas deve essere liberato insieme a parti di intestino o ad altri organelli (colecisti), l'integrazione offre al clinico la possibilità di individuare e delineare meglio queste strutture. Inoltre la presenza di immagini ecografiche a supporto dell'operato del chirurgo rende tutta la procedura molto più rapida, riducendo anche i tempi di guarigione. In definitiva, anche se questo 'marriage of technologies', nel caso delle pancreasectomie, è alle prime armi, i

risultati fanno ben sperare per possibili sviluppi futuri nella chirurgia pancreatica.

3.5 Ambiti applicativi: la chirurgia epatica

Anche se inizialmente la chirurgia mini-invasiva del fegato ha affrontato uno scetticismo largamente diffuso, negli ultimi dieci anni è stato possibile esplorare l'approccio laparoscopico in chirurgia epatica con risultati sorprendenti e attualmente, questo stesso approccio, è diventato il "gold standard" per molti tipi di resezione. Lo sviluppo della chirurgia robotica agevola ulteriormente il compito del chirurgo, in particolare negli interventi più delicati, vista la possibilità di angolare gli strumenti robotici rispetto all'assialità degli strumenti laparoscopici (tecnologia EndoWrist®). Sono quindi caduti tutti i dogmi fondamentali della chirurgia epatica che, tuttavia, rimangono capisaldi nelle resezioni che non possono essere affrontate per via laparoscopica, per volume della lesione tumorale o per il coinvolgimento delle strutture vascolari principali. I numerosi riferimenti in letteratura dimostrano che oggi la chirurgia epatica mininvasiva è una delle branche chirurgiche che più beneficiano dei vantaggi specifici della strumentazione robotica. L'utilizzo del "Da Vinci" consente di eliminare i due limiti principali dell'approccio laparoscopico, ossia la fatica e l'interferenza tra i movimenti degli operatori, in quanto l'operatore controlla direttamente dalla consolle la telecamera e almeno due degli strumenti operatori, lasciando libero il campo operatorio per gli strumenti degli aiuti. Per quanto riguarda i limiti già visti nell'utilizzo del robot, essi non sono di interesse clinico. La durata della preparazione della sala operatoria per iniziare l'intervento nella esperienza iniziale allunga sensibilmente i tempi operatori che, con l'esperienza e la pratica abituale, possono essere riportati nei limiti della normalità. Il problema fondamentale è indubbiamente il costo, tuttavia i vantaggi dovuti alla riduzione delle complicanze postoperatorie e della degenza non sono trascurabili e giustificano pienamente l'utilizzo del robot.

Cenni di tecnica chirurgica

La *resezione epatica* consiste nell'asportazione di una porzione più o meno estesa del fegato ed è ad oggi la prima opzione di cura per numerosi tumori del fegato. Rappresenta infatti il primo approccio terapeutico nel caso di: tumori primitivi benigni, tumori primitivi maligni del fegato (epatocarcinoma), tumori secondari del fegato (metastasi), malattie benigne e maligne delle vie biliari. La possibilità di asportare porzioni più o meno ampie senza compromettere la funzione del fegato residuo dipende dalla particolare anatomia dei vasi sanguigni e biliari all'interno del fegato. Il fegato è suddivisibile in otto distinte porzioni dette segmenti epatici. (Figura 3.10)

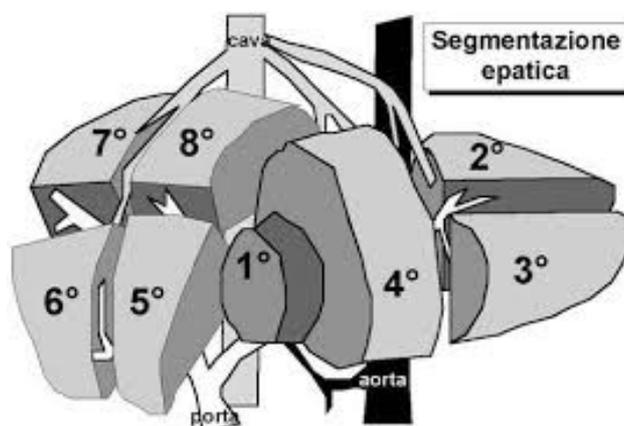


Figura 3.10: segmentazione epatica

I vasi sanguigni e biliari, entrano nel fegato in un'unica area detta ilo epatico e si biforcano immediatamente per irrorare le due metà dell'organo, *emi-fegato destro* e *sinistro*, che sono autonome l'una dall'altra; all'interno di ogni emi-fegato poi i vasi si dividono ulteriormente per irrorare i segmenti, quattro per l'emi-fegato destro e tre per quello sinistro; esiste infine un segmento autonomo, detto *lobo caudato*, che si trova posteriormente ai due grandi lobi. Grazie a questa particolare struttura del fegato si possono effettuare svariati tipi di resezione epatica a seconda del singolo caso. È possibile asportare: un emi-fegato (*lobectomia o epatectomia destra o sinistra*); un segmento (*segmentectomia*); due segmenti contigui (*bisegmentectomia o settoriectomia*);

più segmenti, anche distanti tra loro (*segmentectomie multiple*); parti di segmento (*subsegmentectomia o resezione a cuneo*). Ogni intervento si differenzia dagli altri per dimensione della porzione di fegato asportato, con conseguente diversa complessità tecnica e rischi nel periodo post-operatorio (es. emorragia, infezioni, insufficienza epatica). L'entità della resezione epatica dipende dalla sede e dalle dimensioni della lesione da rimuovere: in alcuni casi anche lesioni di piccole dimensioni, ma poste a stretto contatto con strutture vascolari principali, possono richiedere l'asportazione dell'intero settore o del lobo epatico che è vascolarizzato da quel vaso. In ogni caso saranno gli esami strumentali eseguiti nel pre-operatorio (TAC con mezzo di contrasto, risonanza magnetica, ecografia con studio Doppler della vascolarizzazione epatica) e nell'intra-operatorio (*ecografia epatica intraoperatoria*) che permetteranno di diagnosticare con precisione la sede, i rapporti con le strutture vascolari, le dimensioni e, nella maggior parte dei casi, la natura della lesione, e quindi indirizzeranno il chirurgo al tipo di resezione da effettuare.

Vantaggi dovuti all'integrazione

Anche nel caso di resezioni epatiche, l'integrazione con l'ecografia intraoperatoria è uno strumento indispensabile per identificare le strutture vascolari intra-epatiche, definire la suddivisione dei segmenti epatici ed eseguire resezioni con margine sano di sicurezza rispetto al tumore, ovviare alla mancanza di propriocezione tattile che, in alcuni casi, aiuta il chirurgo nelle procedure di *'open surgery'*. L'utilizzo della sonda robotica ProArt infatti consente al clinico di definire in maniera esatta la localizzazione della lesione, di disegnare una precisa mappa delle linee di resezione, permette, grazie al suo alto grado di risoluzione, di identificare lesioni di dimensioni anche inferiori al centimetro sfuggite alla diagnostica pre-operatoria e rappresenta una guida alla resezione consentendo di visualizzare in tempo reale i piani e quindi le strutture (vascolari e biliari) che vengono coinvolte nelle linee di sezione, permettendo di

evitare sezioni inutili di vasi, ottenendo un notevole risparmio di parenchima (tessuto epatico), riducendo i danni a carico del parenchima residuo e migliorando il recupero post-operatorio del paziente.

In conclusione, la chirurgia robotica in campo epatobiliare è l'evoluzione naturale dell'approccio mini-invasivo, inoltre l'integrazione con la tecnica di imaging ecografico permette alla *Robotic Assisted Surgery* di rendere ancora più efficace e promettente questo tipo di approccio

3.6 Possibili sviluppi futuri

Abbiamo visto fino ad ora le applicazioni principali di un'integrazione tra tecnologie davvero promettente. Non è sbagliato dire che questa combinazione di sistemi abbia avvantaggiato soprattutto lo sviluppo della chirurgia robotica, aprendo la strada per l'utilizzo del "Da Vinci" in tantissimi ambiti che in passato non sarebbero nemmeno mai stati considerati, proprio grazie al contributo dell'ultrasonografia.

I possibili scenari di utilizzo sono davvero tanti e in molti casi ancora sotto studio. Una delle applicazioni future in cui sicuramente questo 'marriage of technologies' avrà successo è quello delle miomectomie in chirurgia ginecologica. La miomectomia è una procedura per rimuovere i fibromi uterini, che sono crescite cancerose che spesso appaiono nell'utero. L'obiettivo del chirurgo durante la miomectomia è quello di agire sulla causa dei sintomi che causano i fibromi e ricostruire l'utero. L'Advanced Robotic Technology può essere di supporto al chirurgo durante l'identificazione del mioma uterino, (figura 3.7) perchè da questo dipende l'efficacia e la sicurezza dell'intervento.

In questo modo si riduce notevolmente la probabilità di lesionare la parte sana dell'utero, abbassando i rischi per il paziente e garantendo tempi di guarigione decisamente minori. La miomectomia robotica infatti è fatta solitamente senza

degenza ospedaliera e il recupero in genere dura pochi giorni o poche settimane.



Figura 3.7: fibroma uterino

Ma gli utilizzi non si fermano qui, perchè in molti prevedono che ben presto sarà la chirurgia stessa ad avere bisogno di integrazioni di questo genere, in settori quali la chirurgia cardiaca, pediatrica e generale.

Oltre a questo si può anche affermare che presto i sistemi di *computer assisted surgery* (CAS), quali il "Da Vinci", evolveranno probabilmente secondo lo scenario riportato in Figura 3.8, che ben rappresenta transazioni e funzioni già oggi parzialmente realizzate:

- percezione, realizzata mediante l'acquisizione di informazioni da modalità (TAC, RMN, ecc.). Comprende anche la ricostruzione 3D e la segmentazione dell'immagine;
- modellizzazione (paziente virtuale), che comprende la creazione di modelli biomeccanici, anatomici e funzionali dei pazienti, la creazione di modelli di procedura chirurgica, la fusione di immagini provenienti da modalità diverse per uno stesso paziente o per pazienti diversi o tra paziente e modello;
- simulazione, sia per gli atti del chirurgo sia per la predizione di tali atti;
- pianificazione, che comprende l'ottimizzazione delle procedure, la definizione interattiva delle procedure e la simulazione per la pianificazione;
- attuazione, che comprende i sistemi di navigazione, la robotica, la

- telerobotica, la microrobotica;
- temi trasversali, quali la sicurezza dei sistemi (hardware e software), l'interfaccia uomo-macchina e la valutazione clinica;
- implementazione della funzione tattile (haptics) mediante la quale il chirurgo è in grado di “sentire” sui master la reazione del tessuto / organo alla forza esercitata;
- sviluppo dei sistemi di fusione di immagini (Fusion) provenienti da diverse fonti e modalità (ecografie, TAC, risonanze, ecc.) direttamente sulla consolle;
- sviluppo delle funzioni di network di professionisti specializzati sull'utilizzo del sistema per condividere anche in tempo reale le informazioni sull'intervento e interagire di conseguenza;
- integrazione impiantistica di tali sistemi con gli altri presenti nella sala operatoria in modo da ottimizzare il posizionamento e il funzionamento di tutti i sistemi di diagnosi e terapia necessari per una determinata procedura chirurgica;
- sviluppo di funzioni di simulazione in grado di realizzare “in vitro” la procedura chirurgica scelta.

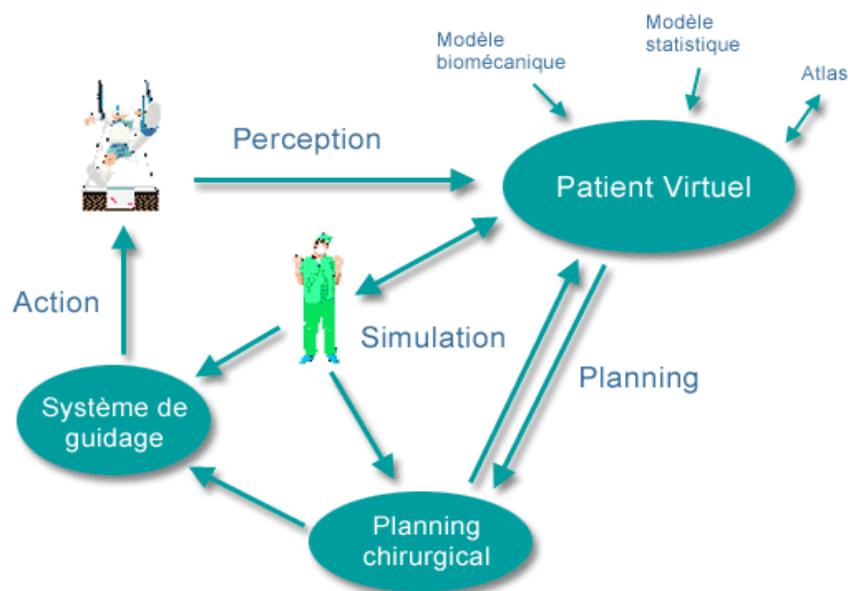


Figura 3.8: possibili scenari futuri

Capitolo 4: Conclusioni

Abbiamo visto come l'integrazione tra apparecchiature già esistenti stia diventando sempre più importante nel processo di sviluppo tecnologico. In particolare abbiamo analizzato il 'marriage' (l'unione) tra l'indagine di imaging ecografico e il sistema di chirurgia robotica "Da Vinci". I vantaggi sono numerosissimi in quanto l'integrazione, per come è stata affrontata in questo percorso di tesi, non richiede lo sviluppo di nuovi dispositivi, bensì l'appropriato utilizzo di quelli già presenti nei sistemi sanitari nazionali. Il limite principale resta comunque l'acquisizione di queste tecnologie e quindi il costo delle stesse: abbastanza contenuto quello dell'Advanced Robotic Technology (sonda ProArt e sistema di visualizzazione Flex Focus), decisamente meno sostenibile e ammortizzabile quello del "Da Vinci". Tuttavia, in un periodo in cui il mondo della sanità in generale e in particolar modo quella nel nostro paese è soggetta a tagli e manovre finanziarie, i numeri che riguardano la chirurgia robotica in Italia fanno ben sperare.

4.1 Il "Da Vinci" nel mondo

Il trend di crescita dei sistemi "Da Vinci" installati in Italia rispecchia tutti i dati relativi allo sviluppo della medesima tecnologia su scala mondiale. Ad oggi sono 2966 i robot operativi, con più di 523.000 interventi effettuati. (Figura 4.2)

Negli USA risiede praticamente il 67% di questo patrimonio tecnologico e infatti la maggior parte delle casistiche prende come riferimento la chirurgia robotica americana.

É soprattutto in America che la Intuitive Surgical ha ricevuto la stragrande maggioranza delle critiche riguardo il proprio prodotto, in particolare sul fatto di aver ottenuto una velocissima approvazione da parte della FDA (Food and Drug Administration, l'ente governativo statunitense che si occupa del controllo e

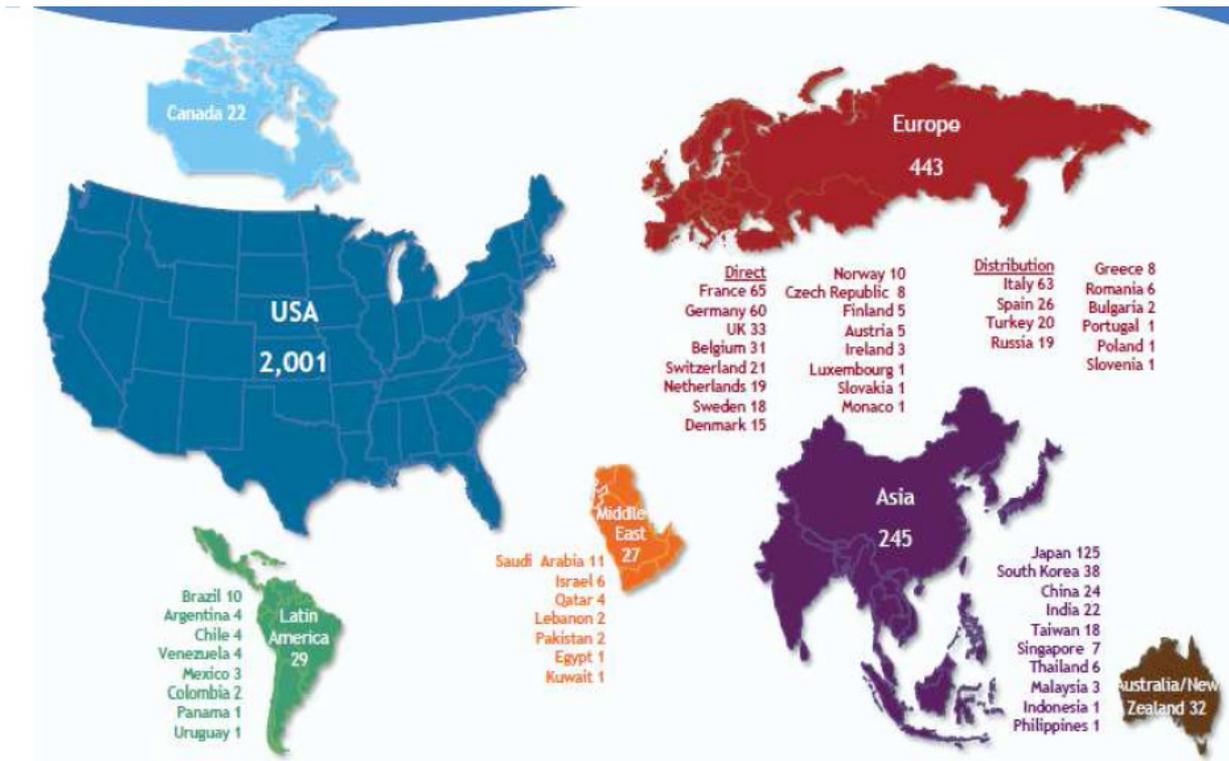


Figura 4.2: il “Da Vinci” nel mondo,2012

della regolamentazione dei prodotti alimentari, farmaceutici e dei dispositivi medici) con un procedimento semplificato noto come "premarket notification" (notifica preliminare alla commercializzazione) che si basa sul presupposto che il prodotto proposto sarebbe simile a prodotti già approvati in precedenza. La *Intuitive* è stata anche accusata di fornire un addestramento inadeguato e di incoraggiare le strutture sanitarie a ridurre il numero di procedure supervisionate prima che a un medico sia consentito di utilizzare il sistema senza supervisione.

Malgrado le diverse cause correlate a tali eventi, i numeri riguardo le operazioni eseguite con la chirurgia robotica assistita parlano chiaro.

Nel 2012 infatti sono state effettuate approssimativamente 450000 procedure in tutto il mondo con un incremento del 24% rispetto al 2011. (Figura 4.3)

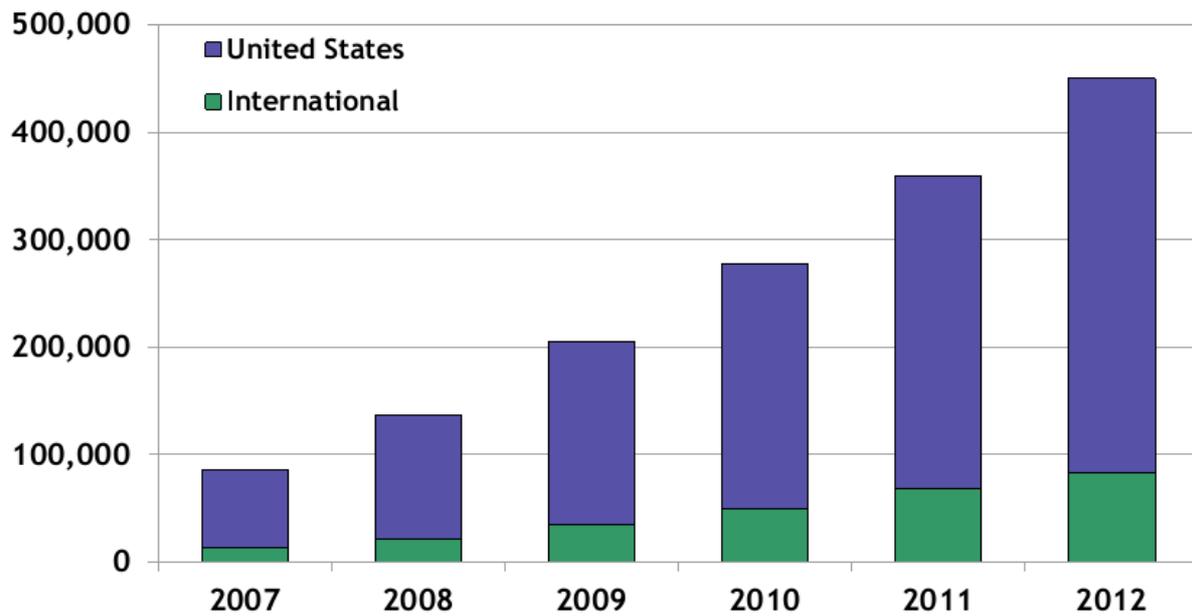


Figura 4.3: trend di crescita fino al 2012 degli interventi

eseguiti con il robot “Da Vinci.

In particolare la casistica a livello mondiale per specialità è suddivisa come illustrato nel grafico (Figura 4.4):

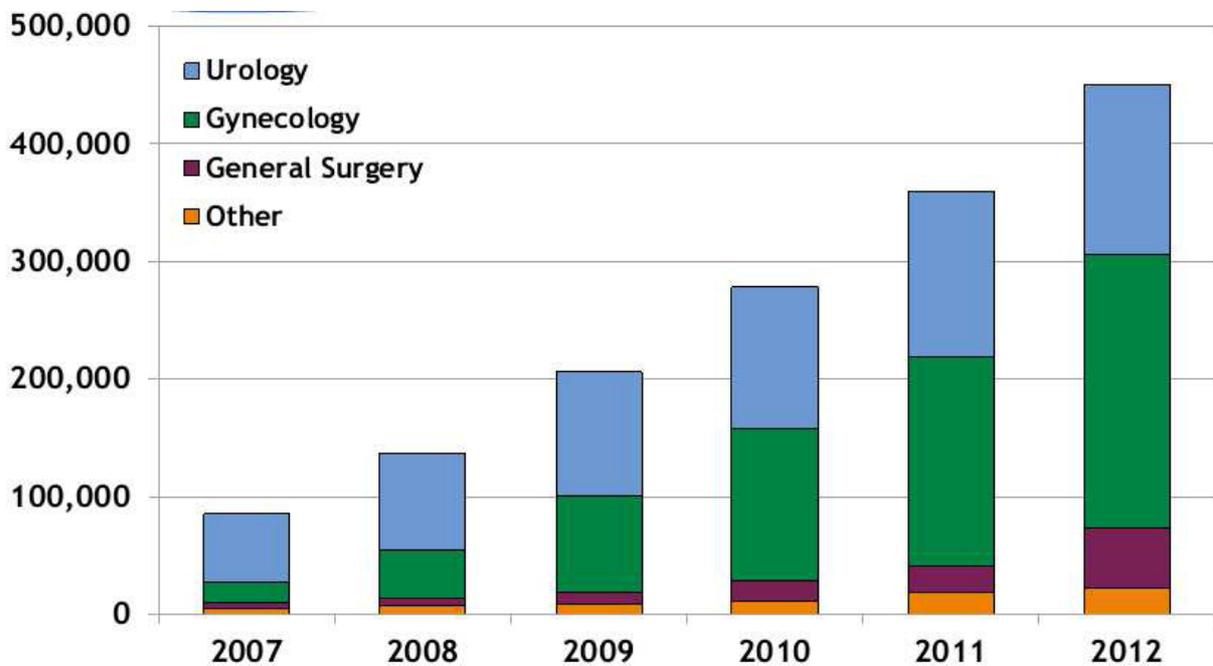


Figura 4.4: interventi suddivisi per specialità

Prostatectomia radicale

Abbiamo detto che la prostatectomia radicale è uno degli interventi d'elezione per la chirurgia robotica. Ad oggi, negli Stati Uniti, l'80% delle prostatectomie vengono eseguite con l'ausilio del sistema chirurgico Da Vinci.

Dal 2012 negli Stati Uniti si è osservata una diminuzione del numero di prostatectomie robotiche effettuate, causa maggiore diffusione dello screening preventivo; a livello internazionale si conferma invece il trend di crescita. (Figura 4.5)

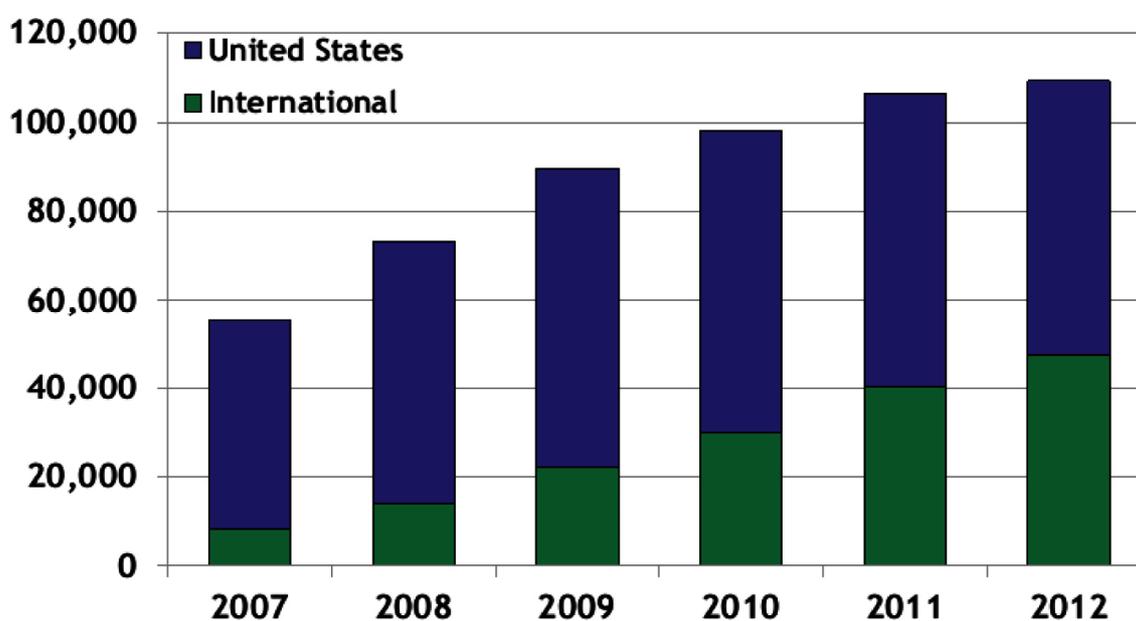


Figura 4.5: le procedure di prostatectomia radicale nel mondo

4.1 Il "Da Vinci" in Italia

Il robot "Da Vinci" è una tecnologia ad elevati costi di acquisto (€ 1.680.000 circa), utilizzo (€ 1.000 per intervento circa) e manutenzione (€ 145.000 annui circa). La sua eventuale acquisizione, anche per ospedali di medie-grandi dimensioni, deve rientrare all'interno di un progetto di investimento a lungo termine sul piano clinico, professionale e di sistema: ricerca e sviluppo delle tecniche chirurgiche innovative, sviluppo professionale delle proprie equipe chirurgiche, innalzamento del proprio servizio a centro di eccellenza.

Inoltre, anche per quello che riguarda le tariffe DRG con le quali vengono rimborsati gli interventi di chirurgia robotica, l'Italia ad oggi si trova ad un punto morto. Gli interventi di prostatectomia radicale ad esempio sono tariffati con DRG 306 e 307 (con e senza complicanze rispettivamente). La tariffa varia da regione a regione: comunque è possibile stimare una tariffa tra € 4.000 e € 4.500. Tale valore non appare assolutamente adeguato alla nuova tecnologia (attualmente una commissione della Società Italiana di Urologia è al lavoro per contribuire a una migliore definizione del problema legato alla tariffazione della chirurgia robotica). In pratica i rimborsi per le procedure di Assisted Robotic Surgery non sono considerati nei tariffari regionali e nel calcolare il valore della prestazione si fa riferimento ai costi del medesimo intervento eseguito con la chirurgia tradizionale o al più con quella laparoscopica. Non è possibile perciò nemmeno stimare il numero minimo di operazioni necessarie per recuperare l'investimento fatto durante l'acquisto del robot.

Malgrado tutto l'Italia ultimamente ha visto aumentare sensibilmente il numero di sistemi installati e anche il numero di operazioni eseguite con esso, fino a diventare uno dei paesi all'avanguardia nell'utilizzo della chirurgia robotica, con molti centri di eccellenza e diverse scuole di chirurgia robotica.

Ad oggi in Italia risultano installati **64** sistemi "Da Vinci" (33 al Nord, 20 al Centro, appena 11 al Sud e nelle isole), incluse alcune postazioni con doppia consolle e due robot che sono utilizzati per scopi interamente didattici (nelle scuole di chirurgia robotica di Grosseto e Verona). (Figura 4.1)

L'Italia perciò, con i suoi 64 esemplari, è al secondo posto in Europa e quarta nel mondo dopo i 2000 degli USA, i 138 del Giappone e i 69 della Francia. All'Italia seguono la Germania con 61 apparecchi, la Corea del Sud con 39 e l'Inghilterra con 36. È ovvio che questi dati confermano che il nostro paese è davvero all'avanguardia nella chirurgia robotica, ma anche il numero di interventi eseguiti è estremamente significativo. Con il robot "Da Vinci" la scuola di chirurgia italiana ha conseguito diversi successi mondiali: primo trapianto di

rene in Europa; prelievo di rene da vivente e impianto su ricevente; tiroidectomia per via ascellare; prima isterectomia, al mondo, con accesso singolo ombelicale; cardiocirurgia pediatrica. Dal 1999, anno di arrivo in sala operatoria del primo robot “Da Vinci”, i casi trattati sono stati 50 mila, sempre più, anche in considerazione della crescita del numero di robot diffusi in tutto il territorio nazionale. E i chirurghi che lo adoperano sono circa 400, assistiti da 3.500 anestesisti, strumentisti e infermieri. Insomma, l'exploit del prodotto della Intuitive Surgical Inc. in Italia presenta risultati impressionanti, con percentuali di crescita annuale degli interventi che hanno sfiorato il 50%.

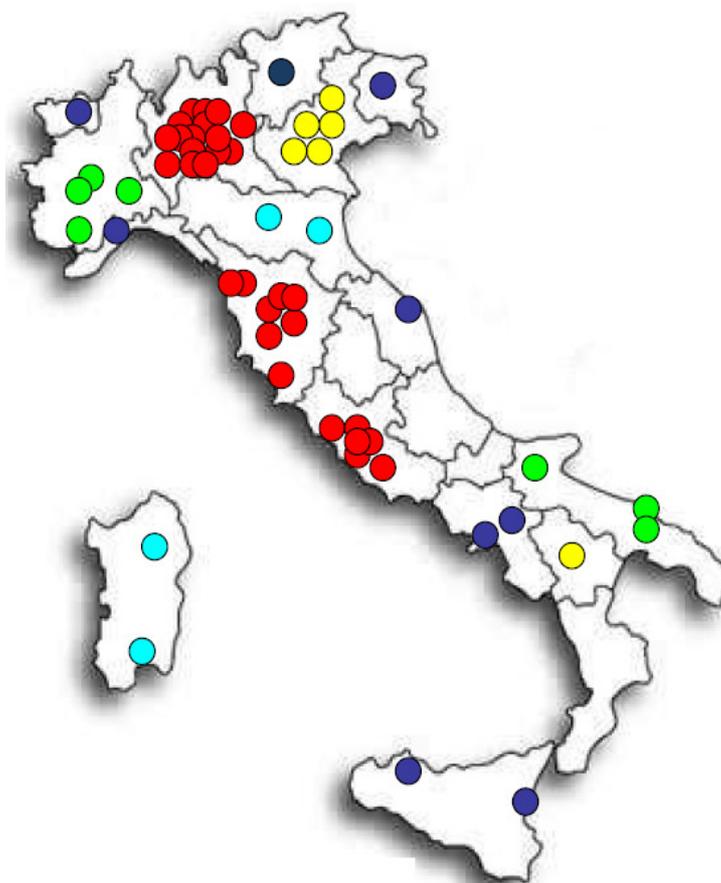


Figura 4.1: panoramica sui sistemi installati in Italia

Interventi effettuati annualmente (dati forniti da abmedica):

- 2010: 4.758 (+48%)
- 2011: 6.957 (+46%)
- 2012: 9.400 (+35%)

- 2013: 13.200 (+40%)

Interventi 2013, per area geografica:

- Nord: 56%
- Centro: 35%
- Sud e Isole: 9%

Interventi 2013, per specialità:

- Urologia: 67% del totale. (Il 20% delle prostatectomie è effettuato con il Sistema da Vinci; in USA, l'80%)
- Generale: 26%
- Ginecologia: 10%
- Otorino: 4%
- Cardiotoracica: 3%

In conclusione, dati a parte, è importante capire se si tratti di un investimento che può portare un beneficio significativo sulla salute dei pazienti e per questo occorre un sistema di valutazione degli esiti da parte di un organismo imparziale, sopra le parti. A tale proposito, in Italia c'è l'idea di creare un Registro nazionale sugli interventi di robotica. Per molti specialisti però la robotica è stata e rimane il futuro della chirurgia, anche se non mancano ovviamente coloro che si dimostrano scettici nei confronti di una tecnologia così nuova e rivoluzionaria sotto tanti aspetti.

Bibliografia e Sitografia

1. *Ultrasound Opens New Doors in Robotic Surgery*. Lisa Fratt-Health Imaging, sponsored by Bk Medical.
2. *Da Vinci Si HD surgical System*. Intuitive surgical, Ab medica
3. *VFI-Technology to change the Way You Work*. Bk Medical-Analogic Ultrasound
4. *BK Medical Introduces Flex Focus 700 Ultrasound System with Interventional Radiology Capabilities at the ECR*. Bk Medical
5. *Ultrasonic colour Doppler imaging*. David H. Evans, Jørgen Arendt Jensen and Michael Bachmann Nielsen. Interface Focus published only 2013
6. Marchionni G. *Elastosonografia: principi di funzionamento e applicazioni*. Tesi in Ingegneria Clinica, a.a. 2012-2013
7. *Innovating the Future of Ultrasound Technology*. Bk Medical brochure.
8. Bergamin G. *Analisi dei sistemi ecodoppler*. Tesi in ingegneria biomedica-Padova, a.a. 2011-2012
9. *COMPARISON OF REAL-TIME IN VIVO SPECTRAL AND VECTOR VELOCITY ESTIMATION*. Mads Møller Pedersen, Michael Johannes Pihl, Per Haugaard, Michael Bachmann Nielsen, Jørgen Arendt Jensen. *Ultrasound in Med. & Bio*. Vol. 38

10. Annechiarico M. Tesi di dottorato in “*Trattamento chirurgico mini-invasivo robot-assistito degli aneurismi viscerali: una nuova prospettiva di cura?*”. a.a 2009-2010
11. *The da Vinci robotic system for general surgical applications: a critical interim appraisal*. Johannes Bodnera, Florian Augustina, Heinz Wykypiel, John Fisha, Gilbert Muehlmann, Gerold Wetscherb, Thomas Schmida. SWISS MED WKLY 2005
12. Osservatorio regionale per l’innovazione, *La chirurgia robotica: il robot da Vinci Da Vinci*, Emilia Romagna, DOSSIER 167-2008.
13. Maida G. *THE DA VINCI SURGICAL ROBOT CLINICAL OPERATING ASSESSMENT*. Tesi di dottorato in scienze biomediche, a.a. 2011-2012
14. *Surgical Robots for Minimally Invasive Procedures*. Autor: Maxon Motor ag, Martin Rüegg
15. *Telemedicina e robotica: preparare la strada alla globalizzazione della chirurgia*. S. Senapati, A.P. Advincula- *Giorn. It. Ost. Gin. Vol. XXVIII - n. 4 Aprile 2006*
16. *Specific learning curve for port placement and docking of da Vinci Surgical System: one surgeon’s experience in robotic-assisted radical prostatectomy*. F. Dal Moro, S. Secco, C. Valotto, W. Artibani, F. Zattoni- *J Robotic Surg. DOI 10.1007/s11701-011-0315-2*

17. *Prostatectomia robotica e laparoscopica: revisione critica dei dati esistenti*. Vincenzo Ficarra, M.D. Professor of Urology-© 2010 American Urological Association, Education and Research Inc., Lincicum, MD - AUA Update Series 2010
18. http://www.info.asl2abruzzo.it/centro_regionale_tumori/re.html
19. http://www.accademia-lancisiana.it/r_santoro_febb_14.htm
20. <http://www.oggisalute.it/2013/12/robot-da-vinci-il-futuro-e-il-presente-della-chirurgiai-dati-gli-utilizzi-e-i-primati-italiani/>
21. http://www.roboticschool.it/rassegna/2012/19.03.2012_aumentano_in_italia_gli_interventi_chirurgici_assistiti.pdf
22. <http://www.andreagavazzi.net/it-attivita-chirurgica-dettaglio.php?id=9>
23. http://www.uroauc.it/index.php?option=com_content&view=article&id=102:la-nefrectomia-parziale-robot-assistita&catid=35:web-tv&Itemid=89
24. http://www.jaypeejournals.com/eJournals/ShowText.aspx?ID=252&Type=FREE&TYP=TOP&IN=_eJournals/images/JPLOGO.gif&IID=29&isPDF=NO