

Università di Pisa - corso di laurea magistrale in Ingegneria Biomedica

CHIRURGIA ASSISTITA DAL CALCOLATORE
Dispensa del corso del Prof. Vincenzo Ferrari AA 2016-17

**INTRODUZIONE: DALLA CHIRURGIA TRADIZIONALE
A QUELLA ASSISTITA DAL CALCOLATORE**

Dagli appunti di:
Mattia Celia Magno

Introduzione alla chirurgia vista dal punto di vista dell'ingegnere

La chirurgia è un ramo delle scienze mediche che si occupa di curare le malattie, le lesioni e le deformità con metodi operativi o manuali. In generale il chirurgo agisce fisicamente sulla struttura del corpo a fine diagnostico, preventivo o terapeutico.

L'etimologia del termine fornisce ulteriori informazioni riguardo al punto cardine delle aree mediche di interesse, cioè quelle che quantomeno storicamente, richiedevano l'uso delle mani. La parola deriva dal latino *chirurgia* e dal greco *χειρουργία*, la quale è composta da due parti *χείρ* *χειρός* «mano» e *ἔργον* «opera».

Con lo sviluppo delle conoscenze, delle tecnologie e delle specificità di approccio a determinate malattie la chirurgia generale è stata divisa in più branche specialistiche: alcune specifiche per un organo o apparato (cardiochirurgia); altre con la stessa finalità (chirurgia ricostruttiva); altre ancora dedicate alla stessa patologia generale (chirurgia oncologica); oppure caratterizzate da tecniche peculiari (chirurgia laparoscopica, endoscopica o robotica).

La chirurgia abbraccia potenzialmente tutte quelle procedure che hanno a che fare con cambiamenti topologici dell'anatomia o più in generale che richiedono un'interazione a livello fisico con l'anatomia stessa. Esistono comunque terapie in cui non vi è un cambiamento topologico ma c'è solo interazione fisica, come ad esempio nella radioterapia dove non si ha un accesso diretto e cambiamento topologico ma si interagisce comunque fisicamente con l'anatomia.

Da un punto di vista ingegneristico si auspicherebbe di avere un processo di terapia chirurgica analogo ad un qualsiasi progetto industriale, cioè, date le risorse a disposizione (equipe chirurgica e attrezzatura medica) ed il committente (paziente), si sviluppa un progetto (workflow chirurgico) e lo si esegue.

Purtroppo, in questo ambito, è difficile e spesso impossibile strutturare in dettaglio molti aspetti.

Percorso storico della chirurgia

Una delle prime tecniche chirurgiche è la trapanazione del cranio (risalente a 12'000 anni fa), veniva eseguita dai "medici" del villaggio e si basava sulla credenza di un "male" da fare fuoriuscire dal corpo sofferente.

I progressi della chirurgia sono stati molto lenti, all'inizio del primo millennio strumenti e tecniche erano ancora primitivi ed il mestiere del chirurgo era letteralmente improvvisato.

Piccoli miglioramenti arrivarono alla fine del 1600 con l'uso del calore per disinfettare gli strumenti ma la mortalità e le sofferenze che subivano i pazienti erano problemi irrisolvibili per i mezzi dei tempi.

L'impossibilità di ricorrere ad anestesia ed il rischio altissimo di infezione (non esistevano gli antibiotici), la rendevano una pratica pionieristica e ad altissimo rischio. Tutti gli interventi chirurgici che avevano lo scopo di risolvere problemi addominali si chiudevano con un esito quasi totalmente

univoco: la morte del paziente. Identica sorte per chi tentava interventi toracici o alle articolazioni. Soprattutto le infezioni mietevano vittime nella quasi totalità dei casi.

A metà del 1800 ci fu la prima svolta: l'etere per anestetizzare i pazienti.

Uno degli interventi chirurgici più frequenti dell'epoca era l'amputazione degli arti: la guerra, l'assenza di antibiotici per contrastare le infezioni, gli effetti collaterali di malattie incurabili, rendevano spesso impossibile risparmiare l'arto di un ammalato.

La sopportazione di tale intervento senza anestesia era molto limitata. L'introduzione dell'anestesia portò vantaggi sia per i pazienti (eliminava il dolore) sia per i medici (potevano operare in tranquillità). Si sperimentarono nuove sostanze, alcune divennero validi analgesici e la chirurgia fece passi avanti enormi, anche se restava un altro grande ostacolo: le infezioni.

La pulizia delle mani e della cute del paziente da operare furono trascurate per secoli. I tentativi di introdurre antimicrobici era screditato e visto con diffidenza poiché ancora non si era dimostrata l'esistenza di microbi e batteri.

Nonostante ciò, i processi chirurgici progredivano e diventavano routine, come il trattamento dell'appendicite o la rimozione di un tumore (1884) ed in seguito furono definite tecniche per rimuovere organi malati o loro parti.

I vari tentativi di limitare le infezioni hanno migliorato la riuscita degli interventi, ma solo l'avvento degli antibiotici consentì di definire sicura la chirurgia e morire d'infezione iniziava a diventare un evento raro.

La chirurgia, come la conosciamo oggi, esiste da circa due secoli. Prima dell'800 non vi era alcuna regola né procedimento scientifico che regolasse le operazioni chirurgiche dell'uomo sull'uomo.

In quel periodo si sviluppò una frattura tra medicina e chirurgia: i medici, generalmente associati alla facoltà di medicina di qualche università; i chirurghi organizzati in corporazioni con gradi e licenze, una sorta di aristocrazia chirurgica. Oltre a questi vi erano anche i "barbieri chirurghi" che, oltre ad occuparsi del loro "core business" tradizionale, praticavano anche piccola chirurgia, e addirittura vendevano unguenti e tisane, salassavano, medicavano piaghe, incidevano ascessi e cavavano denti.

Oggi medicina e chirurgia sono ovviamente di nuovo unite e insegnate all'interno dello stesso corso di laurea. Il clinico non chirurgo tratta la patologia farmacologicamente, rimandando al chirurgo l'eventuale risoluzione del problema con intervento.

Processo che porta dai sintomi alla terapia

La diagnosi serve a riconoscere una malattia o una psicopatologia in base a dei sintomi o dei "segni", i primi manifestazioni soggettive presenti nel paziente, i secondi evidenti al medico. L'insieme dei sintomi e segni di cui alcuni specifici detti patognomonic ed altri più o meno generici, caratterizza il quadro clinico di una malattia.

Il concetto di diagnosi ha vari significati, si va da un'accezione ristretta di identificazione di una patologia ad un'accezione ampia di identificazione di un fenomeno sulla base dell'individuazione dei fattori che la caratterizzano (storia del soggetto, sintomi fisici e psichici, modalità comportamentali,

attività mentale, informazioni ottenute con varie modalità di valutazione). L'insieme dei metodi di diagnosi si chiama diagnostica. La diagnostica è detta "strumentale" quando si avvale di apparecchiature o strumenti particolari come nella diagnostica per immagini (es. ecografia, endoscopia, radiologia, ecc.) o "clinica" quando si basa sull'esame diretto del paziente da parte del medico.

Più in dettaglio, la diagnosi elaborata dal medico è il risultato di più step: anamnesi (un'indagine sulla storia clinica del paziente il quale viene interrogato direttamente o viene desunta dal racconto dei familiari); semeiotica (l'esame del paziente alla ricerca dei sintomi e dei segni presenti); valutazione del quadro clinico con comparazione con malattie caratterizzate dai medesimi segni e sintomi; diagnostica differenziale (discriminazione tra le patologie analoghe che vengono progressivamente eliminate in base alla presenza o assenza di altri sintomi e segni).

Una volta definita la diagnosi è possibile stabilire se la malattia è curabile e con quale tipo di terapia: farmacologica, dietetica, chirurgica, ecc. e la prognosi (un giudizio di previsione su quello che sarà il probabile esito dell'evento patologico).

Le terapie sono classificate in terapie farmacologiche; terapie chirurgiche; terapie preventive (o profilassi); terapie di sostegno (o supportive); terapie riabilitative e palliative (alleviano i sintomi ma non sono finalizzate alla guarigione).

Spesso si abbinano le terapie chirurgiche e farmacologiche, ad esempio nel caso di alcune problematiche si effettuano interventi chirurgici per posizionare farmaci affinché se ne massimizzi l'efficacia durante il rilascio.

Problematiche della chirurgia

Nella gran parte delle procedure tradizionali manuali (ma anche quelle mininvasive) l'intervento si può strutturare in tre parti. Per prima cosa si crea l'accesso chirurgico, andando perlopiù a danneggiare tessuti sani, dopodiché una volta raggiunta l'area da trattare si eseguirà la procedura vera e propria. Alla fine sarà necessario richiudere l'accesso chirurgico.

Nelle "chirurgie di superficie" i danni sui tessuti sani sono limitati, mentre nella chirurgia "a cielo aperto" si ricorre ad un accesso di dimensioni necessarie sia per permettere di arrivare alle strutture d'interesse che per vedere l'anomia e si avrà quindi: maggior rischio di infezioni alle ferite; maggiore dolore; maggiore perdita ematica; difficoltà legate ai tessuti connettivi che devono essere scollati e alle possibili varianti anatomiche; distruzione di tessuti sani; possibilità di aderenze viscerali post-operatorie a causa della procedura (le aderenze sono fasci di tessuto fibroso che si formano fra tessuti, organi o articolazioni a seguito di un trauma o di un intervento chirurgico, possono essere considerate come delle cicatrici interne che connettono aree anatomiche normalmente non collegate. Si formano nello stesso modo attraverso cui si formano le cicatrici e ne sono costituite dallo stesso tipo di tessuto. Queste possono dar luogo a complicanze post-operatorie e rendere particolarmente difficoltoso un nuovo intervento nella stessa zona).

Nel corpo umano il tessuto che mantiene insieme tutti "i componenti" è il tessuto connettivo ed è uno dei quattro tipi fondamentali di tessuto che compongono l'organismo. I tessuti connettivi, che

consentono alle varie strutture di restare in posizione, rendono complesso l'accesso all'interno del corpo.

Il chirurgo, per eseguire l'intervento, si andrà a trovare di fronte strutture diverse (ad esempio arterie, vene, fasci muscolari). In funzione delle strutture che potrebbe incontrare studia qual è il passaggio (l'accesso) migliore, quali sono le strutture che conviene affrontare per causare un minor danno possibile e quali sono i cosiddetti piani anatomici da scollare (un piano anatomico è la superficie di interfaccia tra due strutture diverse).

Riguardo l'anatomia chirurgica, un altro aspetto molto importante da considerare è quello legato al fatto che le anatomie non sono tutte uguali e le varianti anatomiche di ogni paziente possono fare la differenza in un intervento. Oltre alle modificazioni morfologiche presenti durante l'accrescimento e la senescenza e ad alcune differenze tra i sessi e tra le diverse etnie, in anatomia si sente spesso parlare di variante o variazione anatomica. La definizione di variante anatomica è utilizzata per definire la morfologia di una particolare struttura che si discosta dall'anatomia osservata nella maggior parte dei soggetti. Diversamente dalle anomalie congenite, che sono considerate per definizione patologiche, le varianti anatomiche sono considerate rientranti in un quadro di normalità. È tuttavia evidente che le varianti anatomiche possono interferire con le procedure diagnostiche ed operative e quindi condizionare significativamente la prognosi e il risultato finale. Per questi motivi esse devono essere adeguatamente indagate, conosciute e riconosciute.

Tra le varianti più comuni ci sono quelle che riguardano il sistema vascolare.

Focalizzandoci sugli aspetti più operativi, è innegabile che alcune peculiari conformazioni anatomiche possano aumentare il rischio di danno iatrogeno durante le procedure chirurgiche, cioè se non individuate, il chirurgo potrebbe effettuare degli errori durante l'intervento poiché con la pianificazione della procedura non si aspettava di trovare l'anatomia configurata in modo diverso. Infine le variazioni della morfologia tipiche dei processi di invecchiamento possono accentuare le difficoltà cliniche sconfinando in un'area tra l'anatomia normale e l'anatomia patologica.

Per questi motivi la variante anatomica dovrebbe essere sempre individuata nella fase di pianificazione dell'intervento in modo di poter correttamente adattare l'approccio chirurgico allo specifico paziente.

Chirurgia non solo con le mani: la laparoscopia

Al fine di limitare i danni alle strutture sane per creare l'accesso chirurgico sono state sviluppate alternative mininvasive.

La più importante è la laparoscopia, un metodo, relativamente recente, di esplorazione che permette di visualizzare l'interno del corpo. Per queste procedure è utilizzato un endoscopio costituito da un'ottica allungata (che entra nel corpo) collegata a una camera (che solitamente rimane all'esterno) che acquisisce immagini nello spettro del visibile riprodotte su uno schermo posto di fronte al chirurgo. La chirurgia laparoscopica può essere utilizzata sia per fini diagnostici (chirurgia laparoscopica esplorativa), sia per l'esecuzione di interventi chirurgici.

Con la laparoscopia a differenza di quanto avviene con la chirurgia tradizionale, non è necessaria l'apertura dell'addome (laparotomia) per avere accesso alla cavità peritoneale. Per effettuare questo tipo di intervento sono infatti sufficienti poche piccole incisioni nell'addome che con diametro tra 3 e 10 mm.

Nel caso in cui sia la camera che gli strumenti siano fatti passare attraverso la stessa porta d'accesso si parla di SILS (Single Port Laparoscopic Surgery). In questo caso l'incisione è spesso eseguita in corrispondenza dell'ombelico.

La camera è utilizzata per visualizzare il campo chirurgico permettendo al chirurgo di vedere chiaramente all'interno del corpo non direttamente con i propri occhi, ma tramite un monitor. Attraverso gli altri accessi sono introdotti strumenti chirurgici allungati con i quali il chirurgo deve operare manipolando le varie strutture guardando sullo schermo.

Il tempo di guarigione dalla chirurgia laparoscopica è generalmente più veloce.

I vantaggi della laparoscopia rispetto agli interventi di chirurgia a cielo aperto tradizionale sono:

- L'intervento di laparoscopia è caratterizzato da una notevole riduzione del trauma chirurgico. Ciò è da attribuirsi al fatto che le ferite chirurgiche sulla parete addominale sono drasticamente ridotte rispetto alla tradizionale ferita chirurgica.
- Un intervento chirurgico effettuato in laparoscopia comporta un dolore post-operatorio inferiore rispetto a quello tradizionale;
- La non apertura dell'addome si traduce anche in un minor trauma per gli organi addominali, risulta quindi decisamente migliore il decorso post-operatorio e anche la ripresa della funzionalità intestinale avviene in tempi più rapidi;
- Negli interventi in laparoscopia le perdite ematiche sono inferiori, sia perché le ferite sono meno estese, sia perché l'intervento laparoscopico richiede un'accurata emostasi in corso d'intervento (con un sanguinamento importante non sarebbe possibile avere una visione ottimale perché il sangue oscurerebbe la camera);
- Con la laparoscopia è ridotto il rischio di infezione delle ferite, rischio ovviamente maggiore negli interventi "aperti".
- Con la laparoscopia risultano ridotte le possibilità di aderenze viscerali post-operatorie.
- Risulta facilitata anche la ripresa di un normale regime alimentare (la dieta diventa libera già dal terzo giorno dopo l'intervento);

Per quanto riguarda la morbilità e la mortalità post-operatorie, i dati disponibili indicano una sostanziale sovrapposibilità fra laparoscopia e chirurgia tradizionale. Gli interventi di particolare complessità effettuati in laparoscopia possono risultare più lunghi, inoltre per complicanze varie un intervento di chirurgia mininvasiva si può trasformare in un intervento di chirurgia aperta a causa di una problematica chirurgica insorta, ad esempio dovuta ad una variante anatomica non rilevata in preparazione all'intervento.

D'altro canto, la sua esecuzione non è affatto banale, poiché il chirurgo si trova a lavorare in alcune condizioni sfavorevoli:

- Vista bidimensionale, con conseguente riduzione della percezione della profondità;
- Amplificazione del tremore della mano dovuta all'utilizzo di strumenti allungati;
- Instabilità della camera;
- Percezione tattile nulla;
- Ritorno di forza limitato;



- Riduzione dell'ergonomia e della destrezza dovuta all'impiego di strumenti che passando per la porta d'accesso sono vincolati da un fulcro sferico e permettono quindi solo 4 gradi di libertà (5 se si considera l'apertura e chiusura della pinza). Questa limitazione nei gradi di libertà (con uno strumento manuale sono 6) non consente all'operatore di poter ottenere tutte le pose e di conseguenza alcuni task chirurgici come le suture sono più complesse se non impossibili.
- Si riscontra una minore destrezza nei movimenti a causa dell'effetto fulcro creato dalla parete addominale. L'operatore deve muovere gli strumenti nella direzione opposta al target mostrato sul monitor. In sostanza la direzione impressa dalla mano deve essere opposta a quella che si avrà sull'estremità dello strumento.

Quindi si hanno dei vantaggi per i pazienti ma dei grandi svantaggi per i chirurghi.

Lo step successivo è la chirurgia laparoscopica eseguita da robot comandati da chirurghi, che vedremo più avanti nel corso.

Procedure eseguite sotto guida ai raggi X

Grazie alla scoperta dei raggi X alla fine del 1800 la chirurgia ha fatto grossi passi avanti perché grazie a questa tecnologia è stato possibile vedere dentro il corpo senza creare l'accesso chirurgico.

I raggi x sono la prima forma di imaging medico scoperta e implementata. Danno un'immagine di tipo proiettivo, cioè gli elettroni che escono dal corpo sono proiettati sul pannello detettore fornendo una distribuzione spaziale delle caratteristiche e del tasso di attenuazione del fascio di raggi x nei tessuti.

I

Inizialmente i raggi X sono stati utilizzati principalmente per procedure diagnostiche, oggi grazie ad essi è stato possibile sviluppare tecniche chirurgiche alternative alla chirurgia tradizionale.

I dati di imaging sono utilizzati per guidare biopsie, per posizionare correttamente cateteri, protesi vascolari e per ridurre fratture o guidare interventi ortopedici.

Tra queste procedure vi sono i trattamenti endovascolari. Avvengono sotto controllo di apparecchiature radiologiche a raggi X. L'accesso chirurgico è effettuato tagliando o pungendo in corrispondenza di vasi come le arterie femorali. Sono eseguiti in anestesia spinale o locale ed il trattamento endovascolare è meno traumatizzante per il paziente della chirurgia tradizionale e risulta vantaggioso, in quanto riduce la severità dell'intervento chirurgico ed i rischi connessi con l'apertura dell'addome. Cateteri, fili guida e protesi sono gestiti dall'operatore manualmente dall'esterno sotto guida ai raggi X. Comportano una mortalità inferiore a quella del trattamento in chirurgia aperta. Un esempio di tale tipologia di interventi è il trattamento degli aneurismi per via endovascolare (acronimo in inglese EVAR).

In questo caso, il chirurgo ha perso la vista diretta dell'anatomia, la possibilità di interagire direttamente con l'anatomia con le proprie mani e si ha una vista ai raggi X, però i vantaggi sono molteplici.

Image Guided Surgery (IGS)

Sia con le immagini endoscopiche acquisite da una singola camera, come in laparoscopia, sia con le radiografie tradizionali, come nelle procedure endovascolari, le immagini utilizzate sono bidimensionali proiettive ed in tempo reale. L'avere immagini in tempo reale permette di seguire

istante per istante lo strumentario chirurgico rispetto all'anatomia ma non si ha l'informazione lungo la terza dimensione.

Esistono poi tecniche di chirurgia guidate dalle immagini che sfruttano immagini volumetriche (3D) spesso non in tempo reale come TC e RM.

Le tecniche chirurgiche guidate immagini volumetriche sono state rese possibili dall'introduzione di moderne modalità di imaging, computer e dispositivi di tracciamento. Altrettanto importanti nell'evoluzione di questa disciplina sono stati gli sviluppi nella ricostruzione, visualizzazione, segmentazione e registrazione tridimensionale (3D) delle immagini (concetti che vedremo più avanti). Sebbene l'uso di routine dell'intervento guidato dalle immagini (IGS - Image Guided Surgery o IGI - Image Guided Intervention) sia decisamente recente, è nato da tecniche neurochirurgiche stereotassiche con una storia molto più lunga (descritta poco più avanti).

Con IGS ci si riferisce perlopiù a procedure guidate da immagini volumetriche non acquisite in tempo reale, in tal caso i passi principali da compiere sono i seguenti:

- I. Raccogliere i dati e le immagini (generalmente sotto forma di immagini tomografiche pre-operatorie); su queste identificare le componenti anatomiche da raggiungere e quelle da evitare.
- II. Localizzare in tempo reale la posizione dello strumentario chirurgico;
- III. Registrare il sistema di riferimento del sistema di localizzazione con i dati pre-operatori;
- IV. Visualizzare la posa dello strumentario coerentemente alle immagini pre-operatorie;
- V. Tenere conto delle differenze morfologiche e topologiche tra i dati pre-operatori e la realtà intra-operativa.

I concetti dell'IGS sono stati sviluppati, testati e perfezionati da oltre cento anni. La prima applicazione medica conosciuta di imaging a raggi X è stata effettuata con intento terapeutico, non diagnostico. A soli 8 giorni dalla pubblicazione del primo documento di Roentgen sull'imaging a raggi X nel 1895, JH Clayton, un chirurgo a Birmingham in Inghilterra, ha usato una stampa a bromuro di una radiografia per rimuovere un ago da cucito dalla mano di una donna. Appena un mese dopo, John Cox, professore di fisica alla McGill University di Montreal, con rimosse successo un proiettile dalla gamba di una vittima in base ad una radiografia (e l'immagine fu utilizzata come prova durante il processo contro l'uomo che aveva sparato alla vittima).

Storia della stereotassi

Horsley e Clark, nel 1908, pubblicarono un articolo su un dispositivo che incarnava diversi concetti fondamentali dell'IGS.

Questo dispositivo era un telaio da applicare sulla testa di un soggetto (in questo caso una scimmia) fissato usando punti di riferimento anatomici esterni, come i canali uditivi e i cerchi orbitali. Tali punti di riferimento servivano non solo per l'ancoraggio del dispositivo, ma anche per permetterne un allineamento coerente tra soggetti diversi. Il dispositivo permetteva l'introduzione degli elettrodi nel cranio e consentiva di spostarli in posizioni predefinite all'interno di uno spazio cartesiano definito dal frame.

Horsley e Clark definirono il loro dispositivo per diverse applicazioni, in particolare come dispositivo per definire uno spazio tridimensionale all'interno di una struttura anatomica per guidarvi uno strumento. Grazie al loro strumento introdussero poi il concetto di atlante spaziale del cervello. In un atlante si presuppone che determinate strutture o funzioni (celebrali in questo caso) siano collocate in particolari posizioni che si ripetono tra i soggetti (a meno di un fattore di scala). Questa idea ha anticipato l'imaging tomografico di oltre 50 anni.

La stereotassi e, più tardi, la chirurgia guidata da immagini, sono sorte nel campo della neurochirurgia e non in altri campi terapeutici per due motivazioni principali. La prima è che il cervello è l'unico organo racchiuso interamente in una struttura rigida e ciò consente, in prima approssimazione, di poter considerare anch'esso come una struttura rigida permettendo quindi una certa coerenza con le immagini pre-operatorie. La seconda ragione è che il tessuto cerebrale è in gran parte non ridondante e non rigenerativo, ed è quindi molto importante poter raggiungere il target creando il minor danno possibile al tessuto attraversato nel percorso, il quale potrebbe essere più importante del target stesso.

La disponibilità dei frame stereotassici e di immagini proiettive ai raggi X ha portato Spiegel (nel 1947) a sviluppare la prima vera e propria guida stereotassica con immagini. Il dispositivo, che richiama la struttura progettata da Horsley and Clark, permetteva di ottenere due immagini ortogonali una anteroposteriore (AP) e l'altra latero laterale (LL). Il telaio fu costruito con materiale radio opaco in modo tale da essere visibile nelle immagini insieme all'anatomia del paziente. Per determinare le 3 coordinate di un determinato punto dell'anatomia era necessario identificarlo in entrambe le proiezioni. Il punto, identificato nelle 3 dimensioni rispetto al frame stereotassico, poteva essere raggiunto con lo strumento agendo opportunamente con i registri presenti nel dispositivo.

Il ruolo della tomografia computerizzata e il personal computer

L'invenzione della tomografia computerizzata (prima TAC poi TC), nel 1973 da parte di Hounsfield, consentì l'acquisizione diretta di informazioni tridimensionali volumetriche dell'anatomia.

Prima della CT, per tutti i tipi di immagini mediche, le immagini venivano formate direttamente su strumenti di supporti di visualizzazione specifici, come ad esempio la pellicola fotografica, indipendentemente dal fatto che la procedura riguardasse radiografie, angiografie o ultrasuoni. Un'immagine CT rappresenta la distribuzione dei coefficienti di attenuazione $\mu(x, y)$ di una fetta acquisita lungo un determinato piano rispetto al paziente (quando un fascio di raggi X attraversa il corpo viene attenuato dalle differenti strutture anatomiche, permettendo di distinguere i tessuti sulla base del loro coefficiente di attenuazione, assegnato univocamente ad ognuno di essi). L'insieme dei dati raccolti dai rivelatori è una mappa di coefficienti di attenuazione voxel per voxel (volumetric pixel). Quindi, con la CT, le immagini esistono prima come numeri e poi vengono convertite per le pellicole radiografiche o per display.

Con la CT un obiettivo può essere determinato in modo inequivocabile senza ricorrere alle due immagini X. La presenza di immagini volumetriche ha permesso ai chirurghi di prendere in considerazione nuove applicazioni. Si iniziò ad usare la stereotassia basata su CT per gli interventi chirurgici oltre le classiche ablazioni cellulari per i disturbi del movimento e delle convulsioni. Chirurgia tumorale, vascolare e funzionale sono stati tutti facilitati utilizzando le informazioni provenienti da immagini tomografiche.

Un ulteriore passo tecnologico cruciale per le procedure guidate da immagini è stato determinato dallo sviluppo e dalla disponibilità dei personal computer. Sebbene alcuni sistemi di neurochirurgia usassero già prima sistemi informatici, richiedevano sistemi informatici specializzati ed enormi quantità di dati da ridurre pre elaborare nella console del sistema di imaging tomografico.

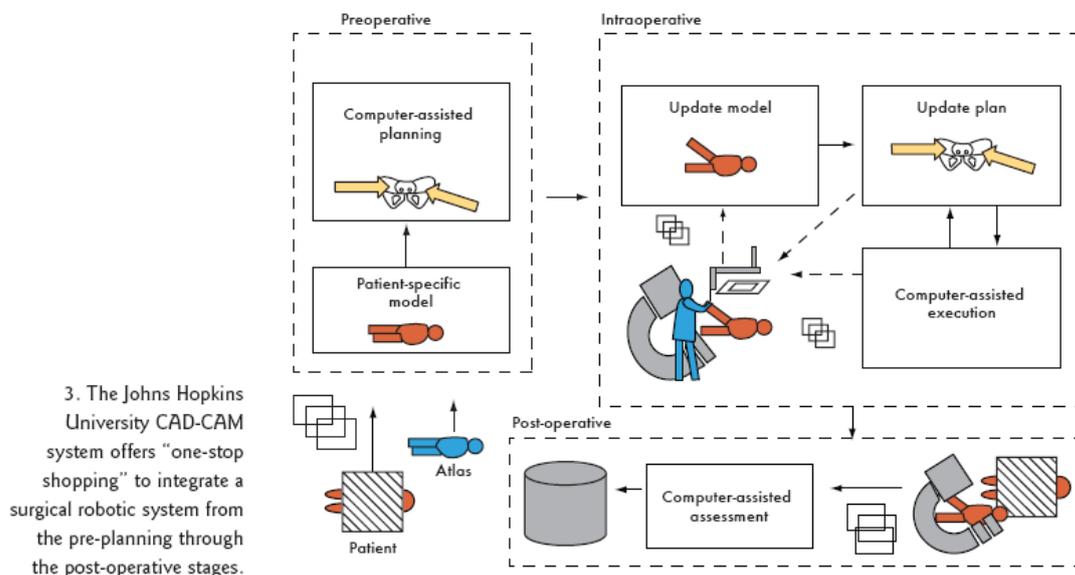
Prima dell'invenzione della CT, la stereotassi consisteva nel localizzare l'obiettivo dell'intervento nelle immagini per poi andarlo ad identificare nello spazio fisico. Nella metà degli anni '80, avendo a disposizione immagini volumetriche, s'intuì che il flusso del processo poteva essere invertito. Il nuovo metodo consiste nel determinare la posizione dello strumento chirurgico nello spazio fisico e mostrarla coerentemente sulle immagini. Questo ha reso la scelta delle traiettorie da prendere un processo attivo

nella sala operatoria ed ha permesso di usare attivamente tutte le informazioni dell'immagine (e non singoli punti) quando la decisione è presa direttamente in sala o modificata rispetto a quanto pianificato prima della procedura.

Questa metodiche (che vedremo in dettaglio nel corso) necessita di immagini tomografiche, un localizzatore/tracker tridimensionale e una metodologia di registrazione delle immagini nel sistema di riferimento del localizzatore affinché siano coerenti col paziente.

Workflow degli interventi assistiti dal calcolatore

Un intervento assistito da computer può essere astratto in termini generali e diviso nelle fasi descritte di seguito. L'implementazione dei sistemi per chirurgia assistita dal calcolatore prevedono un sottoinsieme o, in rari casi, tutte le fasi descritte di seguito.



- Fase pre operatoria, in essa si eseguono più sotto fasi:
 - I. Si acquisiscono le immagini radiologiche del paziente utili per eseguire la procedura ed inoltre si esaminano le informazioni non paziente specifiche, cioè informazioni che sono valide per tutti i pazienti contenute ad esempio in atlanti. Tutte queste informazioni opportunamente elaborate forniscono un modello paziente specifico delle parti anatomiche di interesse per l'intervento.
La modellazione del paziente può essere sviluppata tenendo conto, oltre che delle immagini e degli atlanti, di tutte le informazioni a disposizione sul paziente. Ad esempio, le proprietà meccaniche delle varie strutture anatomiche (note in letteratura oppure proprietà meccaniche paziente specifiche);
 - II. I chirurghi effettuano una pianificazione dell'intervento tenendo conto del workflow della procedura e sfruttando tutte le informazioni hanno a disposizione, cioè il modello paziente specifico.
- Fase intra operatoria: le informazioni elaborate in precedenza sono registrate con il paziente e sfruttate dal chirurgo durante la procedura come guida. In alcuni casi si può avere un aggiornamento della pianificazione poiché durante la procedura possono verificarsi delle complicanze (ad esempio bisogna dover ricalcolare il posizionamento di una protesi) oppure più

semplicemente poiché ci sono deformazioni dell'anatomia per effetto di movimenti (ad esempio quelli fisiologici come il respiro) oppure variazioni topologiche dovute alla chirurgia;

- Fase post operatoria: si validano i modelli utilizzati sulla base dei risultati. A tal fine tal volta si utilizzano ulteriori immagini post operatorie (ad esempio per confrontare dov'è stata realmente impiantata la protesi rispetto a quanto pianificato). La validazione degli esiti viene fatta anche per dare garanzie al paziente mostrandogli l'accuratezza dei risultati e per avere garanzie legali di aver eseguito tutto correttamente. Sulla base di tutte le informazioni acquisite durante e dopo l'intervento, i modelli e le procedure possono essere affinate per migliorare i risultati nelle procedure future.

Nomenclatura: acronimi

La tematica della chirurgia assistita dal calcolatore non riguarda solo la chirurgia guidata dalle immagini. Estremizzando, per assurdo, potremmo farvi rientrare gran parte delle procedure oggi eseguite poiché i calcolatori si trovano ovunque. Cerchiamo di seguito di fare un minimo di chiarezza definendo gli acronimi utilizzati più frequentemente nell'ambito.

Le pratiche di terapia guidata dalle immagini (IGT - Image Guide Therapy) si possono suddividere in terapie chirurgiche e non chirurgiche. Le terapie chirurgiche sono definite con almeno due acronimi, IGI -Image Guided Interventions- e IGS -Image Guided Surgery-. Un caso particolare è quello della radioterapia guidata dalle immagini (IGRT Image Guided Radio Therapy) la quale può appartenere ad entrambe le classi, chirurgiche e non, poiché può essere eseguita anche in situazioni intraoperatorie, cioè per mezzo di un accesso chirurgico.

Come già puntualizzato non esiste solo la chirurgia guidata dalle immagini del paziente, c'è anche quella cosiddetta "model based" che sfrutta modelli (atlanti) opportunamente parametrizzati sul paziente. Oppure vi rientrano anche altri aspetti della chirurgia come quelli legati alla simulazione per finalità di pianificazione o di formazione.

In generale la chirurgia assistita dal calcolatore (acronimo CAS in inglese) può essere chiamata anche: CIS - Computer Integrated Surgery, si utilizza il termine integrated perché sta a significare che la chirurgia non è assistita ma il computer è un mezzo tecnologico che integra di fatto l'operato del chirurgo; o CAI - Computer Assisted Interventions.

L'insieme più grande è il TGT - Technology Guided Therapy che comprende tutte le tecnologie complesse dal punto di vista chirurgico che non comprendono solo il calcolatore. La chirurgia robotica, a cui accenneremo durante il corso, la possiamo far ricadere all'interno di questo insieme più grande.

Si invitano gli studenti a segnalare inesattezze, errori e parti non chiare!

