

NAVIGAZIONE SPINALE BASATA SU IMMAGINI TC PRE-OPERATORIE: EVOLUZIONE DELLA TECNICA, APPLICAZIONI, VANTAGGI E LIMITI

Dottorando: Dr. Demo Eugenio Dugoni

Tutor: Prof. Maurizio Domenicucci

XXXI ciclo di Dottorato di Ricerca in Tecnologie Innovative nelle Malattie dello Scheletro,
della Cute e del Distretto Oro-Cranio-Facciale di Sapienza Università di Roma

INTRODUZIONE

Negli ultimi venti anni la tecnologia ha giocato un ruolo fondamentale nello sviluppo della chirurgia immagine-guidata, in particolare in chirurgia vertebrale. Nonostante questo, le tecniche di navigazione spinale non sono ancora diffusamente utilizzate. Durante le procedure strumentate di chirurgia vertebrale, la tecnologia più comunemente impiegata consiste nell'imaging intra-operatorio 2-D realizzato con l'impiego dell'amplificatore di brillantezza senza il supporto di un sistema di navigazione. Meno frequenti risultano invece l'utilizzo dell'imaging 3-D fluoroscopico, l'impiego di scansioni TC preoperatorie ed infine il ricorso a procedure assistite da un sistema di navigazione.

Cenni storici

La navigazione spinale nacque con l'intento di rendere più sicure e meno invasive le procedure di chirurgia vertebrale strumentata. Risale a 20 anni fa l'introduzione di sistemi di navigazione chirurgica basati sull'acquisizione di immagini TC preoperatorie: rappresentò il primo tentativo, nell'ambito delle procedure strumentate di chirurgia vertebrale, finalizzato all'ottimizzazione del posizionamento delle viti peduncolari e alla riduzione dell'esposizione del paziente e del personale di sala operatoria alle radiazioni ionizzanti. Questa metodica risultò tuttavia eccessivamente complicata e non ottenne consenso su larga scala da parte della classe medica. L'indagine anatomica basata su immagini intra-operatorie 2-D ottenute mediante l'utilizzo dell'amplificatore di brillantezza rimane ancora oggi la tecnica più comune, nonostante ne siano riconosciuti i limiti nel fornire informazioni relative alla terza dimensione, essenziali per un corretto e preciso posizionamento delle viti peduncolari.

La prima applicazione clinica conclusa con successo risale al 1995 e consisteva nel posizionamento di viti peduncolari nelle vertebre lombari (1).

Negli anni successivi la metodica è stata applicata nel trattamento chirurgico di numerose patologie degenerative, malformative, traumatiche e neoplastiche di tutto il rachide, non solo di quello lombare.

NAVIGAZIONE SPINALE: DESCRIZIONE DELLA TECNICA

Navigazione basata su immagini TC preoperatorie

La metodica si basa su immagini TC preoperatorie. La scansione avviene secondo protocolli stabiliti e consiste fondamentalmente in una TC diretta (non ricostruita) per tessuti molli, a strato sottile (1.5mm al massimo), con FOV ristretto al massimo per inquadrare solo le vertebre del tratto di colonna interessato, eliminando il più possibile i tessuti circostanti. Quando è necessario studiare un tratto di colonna molto lungo che comprenda il passaggio da una curva in lordosi ad una cifosi, può essere preferibile dividere l'esame in due acquisizioni per ottenere sempre un'immagine centrata della colonna vertebrale. Questa prima fase, di acquisizione delle immagini, è fondamentale e rappresenta il punto di partenza cruciale per le fasi successive. La scansione TC avviene in posizione supina come una "normale" tomografia della colonna vertebrale. Negli anni passati si praticavano scansioni in posizione prona, molto scomode per il paziente a volte impossibili da eseguire, con il razionale di simulare la posizione chirurgica e non perdere accuratezza nella fase di navigazione intraoperatoria. Oggi questo non è più necessario grazie allo sviluppo dei software dedicati alla navigazione spinale. La seconda fase cruciale della metodica è la registrazione, all'interno del navigatore, dell'anatomia del paziente. Questo avviene con il paziente in posizione (solitamente prona) sul tavolo chirurgico, utilizzando, come spiegato precedentemente, immagini acquisite in una posizione differente (supina). In questa fase si stabilisce una relazione spaziale tra immagini TC preoperatorie e la corrispondente anatomia intraoperatoria. Attraverso questa relazione il navigatore stabilisce una serie di coordinate 3D in tempo reale. Utilizzando un algoritmo matematico un punto specifico dell'immagine TC preoperatoria viene "matchato" con il corrispondente punto anatomico nel campo chirurgico. Questo è il procedimento che viene

dunque chiamato registrazione e che deve essere eseguito con la massima attenzione per ottenere una corrispondenza tra immagini TC ed anatomia del paziente con un errore che non superi la frazione di millimetro. Non esiste un numero di punti prestabilito su cui eseguire il matching, in generale più punti si accoppiano maggiore sarà l'accuratezza della navigazione. I software moderni hanno permesso di ridurre al massimo il numero di punti senza incidere sulla precisione, rendendo la fase di registrazione molto più semplice e veloce.

Tutti i sistemi di navigazione comprendono un computer chiamato work station che si interfaccia con un localizzatore ottico a doppia telecamera. Il localizzatore ottico, attraverso la luce infrarossa, comunica la posizione di uno strumento, chiamato probe, al computer work station. Il localizzatore ottico trasmette luce infrarossa a catarifrangenti disposti sul campo operatorio e montati sugli strumenti chirurgici che la riflettono indietro. Queste informazioni vengono trasferite al computer che può calcolare l'esatta posizione della punta dello strumento così come dei punti anatomici ossei sui quali questa viene poggiata. I landmarks ossei sulla superficie esposta di colonna vertebrale rappresentano i punti di riferimento per la navigazione. Ogni singola vertebra è un corpo fisso per questa ragione non c'è variazione spaziale dei punti anatomici registrati ad un singolo livello vertebrale in relazione alla posizione del corpo.

Inizialmente gli algoritmi per la neuronavigazione cranica sono stati applicati alla metodica spinale con risultati non sempre soddisfacenti. Negli ultimi anni sono stati sviluppati algoritmi dedicati che hanno semplificato ed ampliato le applicazioni della navigazione spinale. La fase di registrazione in questo tipo di navigazione è di due tipologie: paired-based (PB) e surface-based (SB). La prima si basa sulla scelta, da parte del chirurgo, di specifici punti sulle immagini TC preoperatorie che andranno poi accoppiati esattamente con gli stessi punti sulla colonna vertebrale del paziente in fase intraoperatoria. La seconda tipologia di registrazione si basa

sulla digitalizzazione della superficie di una vertebra attraverso l'acquisizione di un certo numero di punti in fase intraoperatoria che vengono accoppiati con un modello di superficie della vertebra creato dal computer sulla base delle immagini TC del paziente. A differenza della prima non richiede la preselezione di punti sulle immagini preoperatorie. Tra le due metodiche sicuramente la PB risulta più veloce, circa 10-15 secondi contro i 2 minuti per vertebra della SB, ma la possibilità di errore è maggiore poiché può essere molto difficile registrare i punti scelti dal chirurgo sulle immagini TC preoperatorie.

Quando la fase di registrazione è completa, il probe può essere posizionato in qualsiasi punto del campo operatorio e tre immagini TC separate appaiono sul monitor del computer workstation.

Navigazione basata su immagini fluoroscopiche

Questa metodica si basa sull'acquisizione intraoperatoria di due immagini fluoroscopiche di una vertebra, una antero-posteriore ed una laterale, che vengono direttamente trasferite al computer workstation. Il monitor del navigatore mostrerà immagini di fluoroscopia all'interno delle quali saranno visibili il probe e tutti gli strumenti "navigati". I software moderni permettono di accoppiare le due immagini di fluoroscopia iniziali alle immagini TC preoperatorie del paziente, potendo, a quel punto navigare su immagini TC e non fluoroscopiche. Questa metodica ha il nome di CT-fluoro matching.

Navigazione basata su immagini TC intraoperatorie

Questa metodica utilizza immagini TC ottenute mediante l'utilizzo di un apparecchiatura O-arm acquisite dopo il posizionamento del paziente sul tavolo operatorio. Le immagini vengono

direttamente trasferite alla work station permettendo una navigazione diretta senza bisogno di una fase di registrazione.

Vantaggi generali

La chirurgia spinale navigata ha numerosi vantaggi rispetto alla chirurgia tradizionale.

Primo, permette una notevole riduzione della radio esposizione degli operatori e dei pazienti.

Confrontata con altri tipi di chirurgia del sistema muscolo-scheletrico la chirurgia vertebrale può essere definita ad alta esposizione alle radiazioni ionizzanti. In uno studio comparativo Gebhard et al. hanno dimostrato come la dose di radiazioni a cui sono esposti gli operatori di sala operatoria fosse significativamente più bassa nella chirurgia spinale navigata rispetto alla tradizionale fluoro-assistita, qualunque fosse il tipo di registrazione usata ad esempio TC matching, 2D o 3D fluoro-matching (8). L'evidenza di una riduzione dell'esposizione ai raggi X del paziente non è così netta in particolare nella navigazione basata su TC preoperatoria che contribuisce ad aumentare notevolmente la dose assorbita dal paziente.

Secondo, la navigazione spinale riduce i tempi operatori, soprattutto negli interventi estesi a molti livelli vertebrali o nella patologia complessa (scoliosi o altre deformità spinali).

Terzo, poter ricostruire sul navigatore un modello tridimensionale basato sulle immagini preoperatorie del paziente permette al chirurgo di "navigare" ogni vertebra sul piano coronale, assiale e sagittale allo stesso tempo. I software più moderni permettono di effettuare anche delle simulazioni biomeccaniche della colonna vertebrale del paziente, determinanti per il planning chirurgico (9). Poter eseguire un planning chirurgico preoperatorio così dettagliato significa migliore riuscita dell'intervento e migliore outcome del paziente, in particolare nei costrutti lunghi. Altro vantaggio importantissimo di poter usare un modello di simulazione 3D è quello di poter determinare con estrema precisione alcuni

landmarks anatomici cruciali quali, ad esempio, l'orientamento e le dimensioni dei peduncoli potendo così ottimizzare al massimo la direzione e la dimensione della vite peduncolare ottenendo maggiore stabilità del costruito e la miglior resa in termini di bilanciamento sagittale.

Tuttavia, l'utilizzo di questo tipo di planning preoperatorio resta una metodica ancora poco utilizzata poiché dispendiosa in termini di tempo.

Quarto, la visualizzazione tridimensionale intraoperatoria dell'anatomia vertebrale del paziente fornisce una serie di vantaggi per il chirurgo quali: poter scegliere il miglior punto d'ingresso e la migliore traiettoria della vite peduncolare, riducendo notevolmente il rischio di lesioni neurovascolari e di perforazione della corticale del peduncolo e consentendo di adattare perfettamente l'avvitamento peduncolare all'anatomia del paziente talvolta con traiettorie molto convergenti o poco convenzionali delle viti che il chirurgo, senza il supporto di una visione tridimensionale in tempo reale, avrebbe molte difficoltà a seguire; poter scegliere le dimensioni (diametro e lunghezza) ottimali della vite, aumentando, anche in questo modo, la tenuta di quest'ultima; poter effettuare correzioni di traiettoria step by step guidate dalle immagini 3D in tempo reale; in ultimo la "navigazione" dell'anatomia del paziente permette, nelle fasi demolitive dell'intervento di decidere l'estensione di una laminectomia, somatecomia o discectomia.

L'eventuale mal posizionamento della vite nel peduncolo potrebbe comportare complicanze quali dolore, ematomi, infezioni, emorragie, pseudoaneurismi, perforazione del polmone, dell'uretere, dell'intestino e dell'esofago, deficit neurologici motori o sensitivi (26-30), lesioni della radice nervosa (30-33) e del midollo spinale (34) e deficit neurologici (35).

Dal punto di vista economico, il mal posizionamento di una vite peduncolare può comportare costi aggiuntivi correlati all'inevitabile incremento della durata sia della procedura chirurgica

che dell'ospedalizzazione, ai re-interventi necessari alla rimozione, sostituzione e riposizionamento delle viti e al percorso di follow-up che affrontano i pazienti che hanno subito il danno

Pitfalls

L'utilizzo della navigazione in chirurgia spinale presenta tuttavia alcuni svantaggi. Il più importante è una curva di apprendimento piuttosto lunga per il chirurgo, come riportato da Bai et al. e da Sasso et al. (10, 11). L'aspetto fondamentale di questa learning curve consiste nell'utilizzare e direzionare degli strumenti chirurgici guardando uno schermo. All'inizio dell'apprendimento anche la fase di registrazione può essere complessa e richiedere molto tempo. In particolare, in chirurgia mini-invasiva, dove per la registrazione si utilizza anche l'amplificatore di brillantezza (non potendo eseguire un matching di superficie come nella chirurgia open), cioè nel cosiddetto CT-fluoro matching, i tempi, nelle fasi iniziali dell'esperienza, sono ancora più lunghi.

Oltre al chirurgo, la curva d'apprendimento riguarda anche radiologi e tecnici di radiologia. La navigazione spinale richiede acquisizioni TC secondo determinati protocolli, scansioni assiali massimo di 1-2 mm continue e non sovrapposte con Kernel per i tessuti molli. La scansione non deve comprendere il tavolo della TC, includere solo la vertebra niente coste o creste iliache. Il protocollo è più o meno costante nella sua applicazione eccetto casi in cui la scansione deve essere necessariamente adattata al paziente. In particolare, nei pazienti con gravi deformità o grossi disallineamenti vertebrali da trauma non è sempre facile limitare il FOV (field of interest) alla sola vertebra.

Altro aspetto fondamentale è che la navigazione spinale deve necessariamente essere considerata come una implementazione alla conoscenza anatomica del chirurgo e mai sostituirla.

INTRODUZIONE ALLO STUDIO

Numerose tecniche di navigazione spinale sono state sviluppate negli ultimi anni con lo scopo di ridurre errori e complicanze legati alla chirurgia vertebrale strumentata.

Il nostro sforzo è stato quello di sviluppare l'utilizzo di quella che è forse la più semplice di queste metodiche cioè la navigazione basata su immagini TC preoperatorie, partendo dal principio che tale tecnica è sicuramente la più accessibile a tutti (non essendo gravata da costi elevatissimi) e sfruttando le potenzialità offerte dai software più moderni.

La nostra esperienza si avvale di ormai quasi 100 casi con applicazioni in patologia traumatica, malformativa e degenerativa di tutti i segmenti del rachide.

Questa casistica unita al confronto con altri Centri italiani all'avanguardia nell'utilizzo della navigazione spinale ci sta permettendo di apprezzarne i vantaggi e tracciarne i limiti

MATERIALI E METODI

In un periodo compreso tra luglio 2014 e luglio 2018 sono stati eseguiti presso la Neurochirurgia del Policlinico Umberto I – Sapienza Università di Roma 118 interventi di stabilizzazione vertebrale con viti in navigazione spinale basata su immagini preoperatorie.

I casi analizzati comprendono solo quelli in cui è stato utilizzato il navigatore in tutte le fasi di inserimento della vite per un totale di 90, escludendo quelli nei quali è stato possibile solo un utilizzo parziale di tale metodica.

La popolazione analizzata è stata classificata in base al tratto di colonna stabilizzato e quindi suddivisa in 4 gruppi: tratto cervicale, tratto toracico alto, tratto toraco-lombare e tratto sacrale. Le patologie incluse sono state di carattere degenerativo, malformativo, traumatico e tumorale. Sono stati inclusi tutti gli interventi di stabilizzazione con approccio posteriore

escludendo i casi eseguiti con approccio esclusivamente anteriore (anche se con tecnica navigata).

Tutti i pazienti sono stati sottoposti a controllo TC post-operatorio.

L'accuratezza del posizionamento della vite è stata valutata con il Laine's grading system. Tale metodica di valutazione creata per le viti peduncolari, è stata adattata anche alla valutazione delle viti nelle masse laterali e alle viti sacro-iliache, utilizzando gli stessi criteri di contenimento della struttura, perforazione della corticale, vite esterna alla struttura. Per ogni paziente sono state osservate le complicanze relative all'eventuale mal posizionamento delle viti, le revisioni chirurgiche dell'impianto precoci ed a distanza con un follow-up da 3 mesi a 3 anni.

Descrizione della metodica di navigazione

In tutti i casi è stata utilizzata una navigazione spinale basata su immagini TC preoperatorie. L'acquisizione delle immagini è stata eseguita in posizione supina con TC Toshiba Aquilion® a 16 strati. È stata effettuata una scansione diretta per tessuti molli a strato sottile con spessore massimo di 2 mm e con il field of view (FOV) il più ristretto possibile per centrale nell'immagine solo la vertebra in tutti i suoi elementi (apofisi spinosa, apofisi trasverse e corpo vertebrale) eliminando i tessuti circostanti. Le immagini TC sono state poi caricate sulla work station del navigatore con supporto DVD o pendrive USB.

In tutti i casi è stato eseguita una stabilizzazione vertebrale a cielo aperto con tecnica tradizionale.

L'utilizzo della fluoroscopia è stato limitato solo alle fasi d'impostazione dell'intervento ovvero: individuazione della vertebra sulla quale montare il sistema di riferimento spinale

(composto da una reference clamp e da un reference array) del navigatore, estensione della scheletrizzazione, controllo radiologico finale ad intervento eseguito.

Tutti gli interventi sono stati eseguiti in posizione prona.

La scheletrizzazione degli elementi posteriori della vertebra è stata ottenuta con estrema accuratezza cercando di esporre nel miglior modo possibile i landmarks anatomici su cui effettuare la registrazione. La registrazione dei punti è stata eseguita, in tutti i casi, con tecnica surface-based.

Nei casi di chirurgia del rachide toracico e lombosacrale è stato utilizzato sempre uno strumentario da stabilizzazione vertebrale dedicato e precalibrato per il navigatore. Nei casi di chirurgia cervicale questo non è stato possibile per la mancanza, ad oggi, di strumentari da stabilizzazione vertebrale cervicale dedicati alla navigazione. Sono stati utilizzati strumentari “tradizionali” con gli adattatori universali forniti dall’azienda produttrice del navigatore.

Le fasi dell’avvitamento sono state eseguite tutte in navigazione, dalla scelta del punto d’ingresso della vite, alla sua traiettoria e dimensioni (diametro e lunghezza).

La patologia trattata varia da degenerativa a traumatica, malformativa e tumorale. I casi sono stati raggruppati in base al tratto di colonna stabilizzato. La necessita di questa distinzione, a nostro avviso, nasce dalle peculiarità anatomiche di ciascun tratto della colonna vertebrale (cervicale, dorsale e lombosacrale) e di conseguenza della tecnica chirurgica.

RISULTATI

Su di un totale di 572 viti la percentuale di viti con grado di Laine 1 è stata del 60% nei quattro gruppi. Il restante 40% è composto da gradi 2 e 3. (tab.1)

La percentuale più elevata di viti posizionate con grado di Laine 1 si è raggiunta nei gruppi “tratto cervicale” e “tratto sacrale” con valori rispettivamente del 93% e del 100%. Nei restanti due gruppi tale percentuale ha raggiunto valori del 58% nel “tratto toracico alto” e del 56% nel “tratto toraco-lombare”. (tab.2)

Nessun paziente ha subito, entro il periodo di follow-up, interventi per revisione dell’impianto a causa del mal posizionamento di una vite.

In nessun caso si sono verificate complicanze intraoperatorie legate alla procedura di posizionamento delle viti.

	CASI	VITI(masse letarli+peduncoli+sacro-iliache)
TRATTO CERVICALE	5	30
TRATTO TORACICO ALTO	33	222
TRATTO TORACO-LOMBARE	48	312
TRATTO SACRALE	4	8
TOTALE	90	572

Tab. 1: casistica totale con totale delle viti impiantate

	TOTALE VITI	GRADO DI LAINE 1	PERCENTUALE
TRATTO CERVICALE	30	28	93%
TRATTO TORACICO ALTO	222	130	58%
TRATTO TORACO-LOMBARE	312	177	56%
TRATTO SACRALE	8	8	100%

Tab. 2: grado di Laine analizzato nei quattro gruppi

DISCUSSIONE

Durante le procedure strumentate di chirurgia vertebrale, la tecnologia più comunemente impiegata consiste nell'imaging intra-operatorio 2-D realizzato con l'impiego dell'amplificatore di brillantezza senza il supporto di un sistema di navigazione. Meno frequenti risultano invece l'utilizzo dell'imaging 3-D fluoroscopico, l'impiego di scansioni TC preoperatorie ed infine il ricorso a procedure assistite da un sistema di navigazione.

I sistemi di navigazione intra-operatoria forniscono informazioni utili che possono costituire un reale supporto per il chirurgo durante la procedura. Il principio di funzionamento consiste nella creazione di una mappa di punti sul paziente corrispondenti all'anatomia di interesse. Durante la procedura le posizioni degli strumenti vengono visualizzate in tempo reale sulla ricostruzione virtuale dell'anatomia del paziente.

Nel caso in cui venga impiegato il solo arco a C senza il supporto del sistema di navigazione, il posizionamento della vite all'interno del peduncolo risulta funzione delle informazioni visive fornite dalla guida fluoroscopica, soprattutto nel caso in cui si sia optato per una soluzione minivasiva, il che comporta un'esposizione ad elevate dosi di radiazioni ionizzanti sia per il paziente che per il personale di sala operatoria (45;46;57).

È inoltre documentata in letteratura una compromissione e conseguente riduzione della sterilità del campo operatorio associata all'utilizzo dell'arco a C, con conseguente incremento del rischio di contaminazione ed infezione della ferita chirurgica (43), eventi che nel 4% dei casi si traducono in infezioni post-operatorie (44).

La fluoroscopia intra-operatoria basata sull'acquisizione di proiezioni 2-D dell'anatomia del paziente fornisce scarse informazioni circa la direzione in profondità delle viti peduncolari ed il suo impiego risulta dunque limitato dall'assenza di un'indicazione precisa nel caso di

eventuale scorretto posizionamento dell'impianto. In letteratura si riporta una percentuale di accuratezza compresa tra il 72% ed il 92% mediante l'impiego del solo arco a C senza il supporto di un sistema di navigazione (17-21). Ciò comporta costi aggiuntivi e rappresenta un onere significativo a carico del SSN e nella prospettiva della società.

Impatto sociale

L'eventuale mal posizionamento di una vite all'interno del peduncolo può risultare in complicanze quali dolore, ematomi, infezioni, emorragie, pseudoaneurisma, perforazione del polmone, dell'uretere, dell'intestino e dell'esofago, paralisi (26-30), lesioni della radice del nervo (30-33) e del midollo spinale (34) e deficit neurologici (35). La prossimità anatomica dei peduncoli vertebrali alle radici dei nervi spinali e alle strutture vascolari (l'aorta, la vena cava e le diramazioni dei vasi), espone infatti tali strutture ad un elevato rischio di lesione (47;48). La direzione del peduncolo e la posizione della vite al suo interno possono infatti non essere adeguatamente sotto controllo a causa dell'impossibilità di avere una completa ed ampia visuale di accesso (49).

In letteratura è riportata un'incidenza di lesioni alle radici nervose pari al 14.9% dei casi e di infarto del midollo spinale nello 0.75% dei casi (34), eventi che potenzialmente possono risultare in para/quadriplegia (26-30;34;35).

Nel caso in cui il mal posizionamento di una vite nel peduncolo non venga individuato, può risultare necessario un secondo intervento per la revisione dell'impianto (50). Una review della letteratura (dal 1999 al 2011) mostra un'incidenza pari all'1% di interventi di revisione finalizzati alla correzione di viti posizionate scorrettamente (25). È importante sottolineare come la maggiore morbilità associata all'inaccurato posizionamento delle viti peduncolari sia in realtà correlata alla procedura di revisione, dal momento che il rischio di incorrere in deficit

neurologici risulta incrementato del 41% rispetto ai primi interventi ed è significativamente maggiore nei pazienti in età pediatrica rispetto ai pazienti adulti (35).

Le complicanze associate ad errori nel posizionamento delle viti peduncolari possono essere acute o ritardate, temporanee o permanenti e possono risultare anche letali per il paziente.

Impatto economico

Le principali voci di spesa aggiuntiva associate ad errori o imprecisioni nel posizionamento di una vite peduncolare sono rappresentate dai costi sostenuti per:

- la necessità di acquisizione di immagini addizionali, per consentire la stima della terza dimensione;
- l'incremento della durata sia della procedura chirurgica che dell'ospedalizzazione del paziente;
- i re-interventi necessari alla rimozione, sostituzione e riposizionamento delle viti da revisionare;
- il percorso di follow-up che devono affrontare i pazienti che hanno subito il danno.

Nella prospettiva della società, le perdite di produttività per assenza dal posto di lavoro durante il periodo di riabilitazione post-operatoria rappresentano il 26% della spesa totale e costituiscono la principale voce di costo (51).

CONCLUSIONE

La navigazione in chirurgia vertebrale nasce per rendere le procedure più sicure e meno invasive. Questa metodica presenta ad oggi numerosi vantaggi rispetto a quella tradizionale quali, la riduzione dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti e dei tempi chirurgici, migliora il planning chirurgico preoperatorio, perfeziona ed ottimizza le fasi dell'intervento chirurgico rendendo a volte più "semplice" la chirurgia.

L'impatto sociale ed economico dell'impiego della metodica è oggi riconosciuto dalla letteratura internazionale.

Il limite della tecnica è rappresentato da una curva di apprendimento abbastanza lunga.

BIBLIOGRAFIA

1. Wood M, Mannion R. A Comparison of CT- based Navigation Techniques for Minimally Invasive Lumbar Pedicle Screw Placement. *Journal of Spinal Disorders & Techniques* 2011;24(1).
2. Van de Kelft E, Costa F, Van der Planken D, Schils F. A Prospective Multicenter Registry on the Accuracy of Pedicle Screw Placement in the Thoracic, Lumbar, and Sacral Levels With the Use of the O-arm Imaging System and StealthStation Navigation. *Spine* 2012;37(25):E1580-7.
3. Hodges SD, Eck JC, Newton D. Analysis of CT-based Navigation System for Pedicle Screw Placement. *Orthopedics* 2012;35(8):e1221-e1224.
4. Sembrano JN, Polly DW, Ledonio CG, Santos ER. Intraoperative 3-dimensional imaging (O-arm) for assessment of pedicle screw position: Does it prevent unacceptable screw placement? *International Journal of Spine Surgery* 6[1], 49-54. 12-1-2012.
5. Schouten R, Lee R, Boyd M, Paquette S, Dvorak M, Kwon BK, et al. Intra-operative cone-beam CT (O-arm) and stereotactic navigation in acute spinal trauma surgery. *Journal of clinical neuroscience : official journal of the Neurosurgical Society of Australasia* 19[8], 1137-1143. 8-1-2012.
6. Wood MJ, Mannion RJ. Improving accuracy and reducing radiation exposure in minimally invasive lumbar interbody fusion. *Journal of Neurosurgery: Spine* 2010 Apr 20;12(5):533-9.

7. Larson AN, Santos ERG, Polly DWJ, Ledonio CGT, Sembrano JN, Mielke CH, et al.
Pediatric Pedicle Screw Placement Using Intraoperative Computed Tomography and 3-Dimensional Image-Guided Navigation. *Spine* 2012;37(3).
8. Oertel MF, Hobart J, Stein M, Schreiber V, Scharbrodt W. Clinical and methodological precision of spinal navigation assisted by 3D intraoperative O-arm radiographic imaging. *Journal of Neurosurgery: Spine* 2011 Jan 28;14(4):532-6.
9. Ishikawa Y, Kanemura T, Yoshida G, Matsumoto A, Ito Z, Tauchi R, et al.
Intraoperative, full-rotation, three- dimensional image (O-arm)GÇôbased navigation system for cervical pedicle screw insertion. *Journal of Neurosurgery: Spine* 2011 Jul 15;15(5):472-8.
10. Nottmeier EW, Young PM. Image- guided placement of occipitocervical instrumentation using a reference arc attached to the headholder. *Neurosurg* 2010;66(3 Suppl Operative):138-42.
11. Kim J-S, et al. Pedicle screw fixation under navigation guidance based on O-arm. *The Internet J of Minimally Invas Spinal Technology* 2010;July(Suppl.3):53.
12. Ailawadhi P, Agrawal D, Satyarthee GD, et al. Use of O-arm for spinal surgery in academic institution in India: Experience from JPN apex trauma centre. *Neurology India* 2011;59(4):590-3.
13. Park P, Foley KT, Cowan JA, et al. Minimally invasive pedicle screw fixation utilizing O-arm fluoroscopy with computer- assisted navigation: Feasibility, technique, and preliminary results. *Surg Neurol Int* 2010;1(44).
14. Kosmopoulos V, Schizas C. Pedicle Screw Placement Accuracy: A Meta-analysis. *Spine* 2007;32(3).

15. LedonioCG, PollyJ, VitaleMG, WangQ, Richards BS. Pediatric Pedicle Screws: Comparative Effectiveness and Safety. A Systematic Literature Review from the Scoliosis Research Society and the Pediatric Orthopaedic Society of North America Task Force. *The Journal of Bone & Joint Surgery* 2011 Jul 6;93(13):1227-34.
16. Hicks JM, Singla A, Shen FH, Arlet V. Complications of Pedicle Screw Fixation in Scoliosis Surgery: A Systematic Review. *Spine* 2010;35(11).
17. Sakai Y, Matsuyama Y, Nakamura H, Katayama Y, Imagama S, Ito Z, et al. Segmental Pedicle Screwing for Idiopathic Scoliosis Using Computer-assisted Surgery. *Journal of Spinal Disorders & Techniques* 2008;21(3).
18. Rajasekaran S, Vidyadhara S, Ramesh P, Shetty AP. Randomized Clinical Study to Compare the Accuracy of Navigated and Non-Navigated Thoracic Pedicle Screws in Deformity Correction Surgeries. *Spine* 2007;32(2).
19. Han W, Gae ZL, Wang JC, et al. Pedicle screw placement in the thoracic spine: a comparison study of computer-assisted navigation and conventional techniques. *Orthopedics* 2010;33(8).
20. Schizas C, Thein E, Kwiatkowski B, et al. Pedicle screw insertion: Robotic assistance versus conventional c-arm fluoroscopy. *Acta Orthopaedica Belgica* 2012;78(2):240- 5.
21. Tian W, Liu YJ, Liu B, et al. [Clinical contrast of cervical pedicle screw fixation assisted by C-arm fluoroscopy or 3D navigation system]. *[Chinese J Surg]* 2006;44(20):1399-402.
22. Asuncion CB, Bezos DR, Garcia PG. [Cost analysis of the use of an operating room with O-arm and navigation]. *Spanish Health Economics Conference (AES) - 18th- 21st June, Santander, Spain. 2013.*

23. Sanborn MR, Thawani JP, Whitmore RG, Shmulevich M, Hardy B, Benedetto C, et al. Cost-effectiveness of confirmatory techniques for the placement of lumbar pedicle screws. *Neurosurgical Focus* 2012 Jun 29;33(1):E12.
24. Costa F, Porazzi E, Restelli U, et al. Economic study: a cost-effectiveness analysis of an intraoperative compared with a preoperative image-guided system in lumbar pedicle screw fixation in patients with degenerative spondylolisthesis. *Spine J.* 2014 Aug 1;14(8):1790-6. doi: 10.1016/j.spinee.2013.10.019. Epub 2013 Oct 31.
25. Gautschi OP, Schatlo B, Schaller K, Tessitore E. Clinically relevant complications related to pedicle screw placement in thoracolumbar surgery and their management: a literature review of 35,630 pedicle screws. *Neurosurgical Focus* 2011 Sep 30;31(4):E8.
26. Anda S, Akhus S, Skaanes KO, et al. Anterior perforations in lumbar discectomies—a report of four cases of vascular complications and a CT study of the prevertebral lumbar anatomy. *Spine* 1991;16:54-60.
27. Fujita T, Kostuik JP, Huckell CB, et al. Complications of spinal fusion in adult patients more than 60 years of age. *Orthopedic Clinics of North America* 1998;29(4):669-78.
28. Jendrisak MD. Spontaneous abdominal aortic rupture from erosion by a lumbar spine fixation device: a case report. *Surgery* 1986;99(5):631-3.
29. Stewart JR, Barth KH, Williams GM. Ruptured lumbar artery pseudoaneurysm: an unusual cause of retroperitoneal haemorrhage. *Surgery* 1983;94:592-4.
30. Diaz JH, Lockhart CH. Postoperative quadriplegia after spinal fusion for scoliosis with intraoperative awakening. *Anesth Analg* 1987;66(10):1039-42.

31. Heyde CE, Böhmer H, ElSaghir H, Kayser R. Erste Erfahrungen mit dem intraoperativen Wurzelmonitoring durch das INS-1-System an der lumbosakralen Wirbelsäule. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 2003;141(01):79-85.
32. Deen HG, Birch BD, Wharen RE, Reimer R. Lateral mass screw rod fixation of the cervical spine: a prospective clinical series with 1-year follow-up. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 3[6], 489-495. 11-1-2003.
33. Daube JR. Intraoperative monitoring by evoked potentials for spinal cord surgery: the pros. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1989;73(5):374-7.
34. Orchowiski J, Bridwell KH, Lenke LG. Neurological Deficit From a Purely Vascular Etiology After Unilateral Vessel Ligation During Anterior Thoracolumbar Fusion of the Spine. *Spine* 2005;30(4).
35. Hamilton DK, Smith JS, Sansur CA, Glassman SD, Ames CP, Berven SH, et al. Rates of New Neurological Deficit Associated With Spine Surgery Based on 108,419 Procedures: A Report of the Scoliosis Research Society Morbidity and Mortality Committee. *Spine* 2011;36(15).
36. Gonzalez AA, Jeyanandarajan D, Hansen C, Zada G, Hsieh PC. Intraoperative neurophysiological monitoring during spine surgery: a review. *Neurosurgical Focus* 2009 Oct 1;27(4):E6.
37. Silbermann J, Riese F, Allam Y, Reichert T, Koeppert H, Gutberlet M. Computer tomography assessment of pedicle screw placement in lumbar and sacral spine: comparison between free-hand and O-Arm based navigation techniques. *Eur Spine J* 2011; 20(6):875-81

38. Shin MH, Ryu KS, Park CK. Accuracy and safety in pedicle screw placement in the thoracic and lumbar spines: Comparison study between conventional C-arm fluoroscopy and navigation coupled with O-arm (registered trademark) guided methods. *J Korean Neurosurg Soc* 2012;52(3):204-9.
39. Zhang J, Weir V, Fajardo F, et al. Dosimetric characterization of a cone-beam O-arm™ imaging system. *J X-Ray Sci Technol* 2009;17(4):305-17.
40. Burch S, et al. Comparison of radiation exposure to the spine surgeon during pedicle screw placement using the O-arm System and StealthStation Navigation vs. C-arm Standard fluoroscopy. 2010 May 1-2010 May 1; 2010.
41. Cowan JAJ, Dimick JB, Wainess R, Upchurch GRJ, Chandler WF, La Marca F. Changes in Utilization of Spinal Fusion in the United States. *Neurosurgery* 2006;59(1).
42. Thongtrangan I, Le H, Park J, Kim DH. Minimally invasive spinal surgery: a historical perspective. *Neurosurg Focus* 2004;15(16(1)):E13.
43. Biswas D, Bible JE, Whang PG, Simpson AK, Grauer JN. Sterility of C-arm Fluoroscopy During Spinal Surgery. *Spine* 2008;33(17).
44. Lapsley HM, Vogels R. Quality and cost impacts: prevention of post-operative clean wound infections. *Int J Health Care Qual Assur Inc Leadersh Health Serv* 1998;11(6-7):222-31.
45. Smith HE, Welch MD, Sasso RC, et al. Comparison of radiation exposure in lumbar pedicle screw placement with fluoroscopy vs computer-assisted image guidance with intraoperative three-dimensional imaging. *J Spinal Cord Med* 2008;31(5):532-7.
46. Hart R, Komzak M, Barta R, et al. Reduction of Radiation Exposure by the Use of Fluoroscopic Guidance in Transpedicular Instrumentation. *Acta Chirurgiae Orthopaedicae et Traumatologiae Cechoslovaca* 2011;78(5):447-50.

47. Watanabe K, Yamazaki A, Hirano T, Izumi T, Sano A, Morita O, et al. Descending Aortic Injury by a Thoracic Pedicle Screw During Posterior Reconstructive Surgery: A Case Report. *Spine* 2010;35(20).
48. Weinstein JN, Rydevik BL, Rauschnig W. Anatomic and technical considerations of pedicle screw fixation. *Clin Orthop Relat Res* 1992;Nov(284):34-46.
49. Wegener B, Birkenmaier C, Fottner A, Jansson V, Durr HR. Delayed perforation of the aorta by a thoracic pedicle screw. *Eur Spine J* 2008;17(Suppl 2):351-4.
50. Esses SI, Sachs BL, Dreyzin V. Complications associated with the technique of pedicle screw fixation. A selected survey of ABS members. *Spine* 1993;18(15):2231-8.
51. Tosteson ANA, Skinner JS, Tosteson TD, Lurie JD, Andersson GB, Berven S, et al. The Cost Effectiveness of Surgical Versus Nonoperative Treatment for Lumbar Disc Herniation Over Two Years: Evidence From the Spine Patient Outcomes Research Trial (SPORT). *Spine* 2008;33(19).
52. Kim CW, Lee YP, Taylor W, Oygar A, Kim WK. Use of navigation-assisted fluoroscopy to decrease radiation exposure during minimally invasive spine surgery. *The spine journal : official journal of the North American Spine Society* 8[4], 584-590. 7-1- 2008.
53. Sclafani JA, Regev GJ, Webb J, Garfin SR, Kim CW. Use of a quantitative pedicle screw accuracy system to assess new technology: Initial studies on O-arm navigation and its effect on the learning curve of percutaneous pedicle screw insertion. *SAS Journal* 5[3], 57-62. 9-1-2011.
54. Wang MY, Lerner J, Lesko J, McGirt MJ. Acute Hospital Costs After Minimally Invasive Versus Open Lumbar Interbody Fusion: Data From a US National Database With 6106 Patients. *Journal of Spinal Disorders & Techniques* 2012;25(6).

55. Costa F, Ortolina A, Attuati L, Cardia A, Tomei M, Riva M, Balzarini L, Fornari M.
Management of C1-2 traumatic fractures using an intraoperative 3D imaging-based navigation system. *J Neurosurg Spine*. 2014 Nov 21:1-6. [Epub ahead of print].
56. Francesco Costa, Gianluigi Dorelli, Alessandro Ortolina, Andrea Cardia, Luca Attuati, Massimo Tomei, Davide Milani, Luca Balzarini, Fabio Galbusera, Emanuela Morengi, Maurizio Fornari. Computed Tomography-Based Image-Guided System in Spinal Surgery: State of the Art Through 10 Years of Experience. *Operative Neurosurgery*. Volume 0. Number 0 (2015).
57. J.Villard, Y.M.Ryang, A.K.Demetriades,
A. Reinke, M. Behr, A. Preuss, B. Meyer, F. Ringel. Radiation Exposure to the Surgeon and the Patient During Posterior Lumbar Spinal Instrumentation. *SPINE* Volume 39, Number 13, pp 1004-1009 (2014).
58. T.J.Gianaris, G.M.Helbig, E.M.Horn. Percutaneous pedicle screw placement with computer-navigated mapping in place of Kirschner wires. *J Neurosurg Spine* 19:608–613, 2013.
59. Tobias A. Mattei, Daniel R. Fassett. Letter to the editor. The O-arm revolution in spine surgery. *J Neurosurg: Spine* / Volume 19 / November 2013.