

Atti della Accademia Lancisiana

Anno Accademico 2023-2024

Vol. 68, n° 3, Luglio - Settembre 2024

Settimana per la Cultura

Premio "Giovanni Maria Lancisi" – Anno Accademico 2022-2023

09 aprile 2024

Tesi di Laurea: "Valutazione dell'accuratezza e della deviazione dal planning pre-operatorio di viti peduncolari posizionate tramite sistema di navigazione con immagini 3D in pazienti affetti da spondilolistesi degenerativa" (Sintesi)

N. Nardi

Introduzione e obiettivi

La fusione spinale è un intervento di artrodesi di una o più vertebre contigue. L'obiettivo di questa procedura è quello di incrementare il grado di stabilità vertebrale, correggere deformità e indurre una regressione della sintomatologia dolorifica causata da una patologia sottostante. Tra le attuali indicazioni all'intervento ritroviamo tutte le patologie che causano un'instabilità dei segmenti vertebrali come fratture traumatiche, fratture patologiche di origine oncologica od osteoporotica, degenerazioni ed erniazioni discali, spondilodisciti, spondilolistesi istmiche e spondilolistesi degenerative¹. Negli ultimi anni, in Italia, a causa dell'aumentata incidenza di queste patologie, abbiamo assistito ad un notevole aumento del tasso di ricorso alla chirurgia, in particolar modo agli interventi di fusione spinale. Dati simili sono stati riportati anche da studi effettuati in Europa o in America³⁻⁵. Un fattore importante correlato a questo fenomeno di incremento è l'aumento dell'aspettativa di vita^{2, 3, 6}. Difatti, tra tutti i sottogruppi eziologici delle patologie candidabili all'intervento, le malattie su base degenerativa sono state quelle che hanno portato a una maggiore richiesta di operazioni di fusione spinale.

L'aumento della richiesta e la necessità di un'estrema precisione della chirurgia vertebrale hanno incentivato lo sviluppo e l'impiego di sistemi tecnologici all'avanguardia in questo campo, primo tra tutti la navigazione intraoperatoria immagine guidata⁷.

I sistemi di navigazione intraoperatoria hanno assunto, da ormai più di un decennio, un ruolo fondamentale nella pratica della chirurgia vertebrale. Si tratta di macchinari progettati al fine di massimizzare la precisione e l'accuratezza negli interventi di fusione spinale e di ridurre, quanto più possibile, i malposizionamenti della strumentazione operatoria e le complicanze ad essi correlati.

Il primo obiettivo di questo studio è incentrato nella valutazione del grado di accuratezza delle viti peduncolari posizionate attraverso il sistema di navigazione guidato da immagini intraoperatorie acquisite tramite l'impiego del *Loop-X (BrainLab)*, in pazienti affetti da spondilolistesi degenerativa. Il secondo obiettivo è fondato sulla valutazione del grado di deviazione della posizione finale della vite peduncolare rispetto al planning pre-operatorio, utilizzando un sistema di misurazione lineare e angolare. Infine, si è

posto l'obiettivo di ricercare eventuali correlazioni tra questi due parametri, cercando di spiegare quale sia il ruolo del planning pre-operatorio in interventi di stabilizzazione vertebrale eseguiti tramite sistema di navigazione intraoperatoria.

Materiali e metodi

Il lavoro consiste in uno Studio osservazionale prospettico di coorte monocentrico svolto presso l'Unità Operativa Complessa (U.O.C.) di Ortopedia e Traumatologia della Fondazione Policlinico Universitario Campus Bio-Medico (F.P.U.C.B.M.). Il lavoro è stato approvato dal Comitato Etico (76/19 OSS ComEt CBM) della F.P.U.C.B.M.

Criteri di inclusione ed esclusione

Sono stati arruolati all'interno dello studio:

- pazienti di sesso maschile e femminile di età superiore ai 18;
- pazienti affetti da spondilolistesi degenerativa con indicazione al trattamento di decompressione e di stabilizzazione vertebrale;
- pazienti trattati a livello del rachide lombo-sacrale;
- pazienti sottoposti a intervento assistito da navigazione intraoperatoria;
- pazienti con TC operatorie di controllo senza artefatti metallici.

Sono stati esclusi dallo studio:

- pazienti sottoposti ad intervento di stabilizzazione eseguito senza l'impiego di viti peduncolari;
- pazienti sottoposti ad intervento di stabilizzazione vertebrale per patologie infettive, traumatiche od oncologiche;
- pazienti cui si è perso il salvataggio del planning pre-operatorio;
- pazienti cui non si è ottenuto un corretto "matching" tra TC intra e post-operatoria.

Sistema di navigazione

L'assetto del sistema di navigazione *Brainlab® (Curve® Navigation)* è costituito da un dispositivo mobile predisposto all'acquisizione d'immagini operatorie (*Loop-X*), da una *work station*, fornita di un *display* 4K con visualizzatore DICOM e di un *software* di navigazione integrato, e da un *tracker* ottico ad ampio campo che localizza il *reference frame* e la strumentazione fornita di matrici di riferimento.

Il *Loop-X* è un sistema robotizzato progettato per l'acquisizione di immagini 2D e 3D utilizzate in sede d'intervento e sfruttabili anche a scopi diagnostici. È fornito di una specifica console utilizzata per un controllo remoto a distanza che permette di manovrare il robot e di avviare il processo di acquisizione d'immagini anche al di fuori della sala operatoria. Le tipologie di immagini acquisibili mediante questo sistema comprendono le tradizionali radiografie e fluoroscopie e un modulo di TC *cone beam* che consente la ricostruzione di modelli anatomici 3D navigabili con lo specifico strumentario in sede d'intervento. La TC del *Loop-X* è progettata per ottenere ampie aree di scansione con una singola rotazione minimizzando l'irradiazione dei tessuti circostanti e per l'acquisizione di immagini di alta qualità con una minima diffusione di radiazioni.

La *work station* è il computer centrale fornito del *software* di navigazione che tramite il suo *display* 4k consente la visione dell'imaging 3D, precedentemente acquisito dal *Loop-X*, e ne permette l'esplorazione tramite l'utilizzo di appositi strumenti precedentemente calibrati con il *tracker* ottico. Presenta inoltre un *software* di pianificazione che consente al chirurgo di attuare un *planning* pre-operatorio per il posizionamento delle viti peduncolari e delle *cage* intersomatiche. All'interno della *work station* vengono caricati i dati di imaging preoperatori del paziente. Questi includono abitualmente radiografie standard della colonna lombare in piedi con proiezioni antero-posteriore (AP), latero-laterale (LL) e in flessione-estensione, risonanza magnetica (RM) e TC.

Tecnica chirurgica

Preparazione della sala operatoria

Il tavolo operatorio è posizionato al centro della sala operatoria. Viene usualmente utilizzato un tavolo *Jackson* a base singola che non presenta eventuali ostacoli che possano interferire con la mobilità del *Loop-X*. Il tavolo scelto è dotato di un sistema di movimentazione che consente di adeguare correttamente il piano d'appoggio del paziente e di un telaio di Wilson che consente di controllare l'allineamento della colonna vertebrale e di aprire gli spazi interlaminari per un migliore accesso al sito chirurgico. Sia il tavolo che il telaio sono radiotrasparenti al fine di minimizzare il tasso di artefatti che interferirebbero sulla qualità delle immagini acquisite intraoperatoriamente. Il *Loop-X* è ai piedi del paziente, posizionato in modo tale da potersi muovere lungo l'asse del tavolo operatorio raggiungendo il tratto di colonna da dover scansionare. Il monitor è localizzato lateralmente al *Loop-X* dalla parte opposta rispetto al chirurgo che deve eseguire l'inserimento delle viti peduncolari. Il visore ottico, tipicamente più distante rispetto alle altre componenti, è localizzato in alto e centralmente rispetto al campo operatorio. Questa posizione gli consente di avere nel suo campo di visione il *reference frame* inserito sul paziente e le matrici di riferimento collegate alla strumentazione chirurgica. Per ottenere un segnale di rilevamento stabile, la telecamera deve puntare verso il campo operatorio lungo una traiettoria lineare.

Posizionamento del paziente e preparazione del campo sterile

Il paziente viene sottoposto ad un'anestesia generale. Viene in seguito applicato un sistema di neuro-monitoraggio utilizzato per identificare un pericoloso avvicinamento alle radici nervose durante la creazione dei tunnel per l'inserimento delle viti peduncolari. Successivamente il paziente è posizionato prono sul tavolo operatorio supportato dal telaio di Wilson. Le anche e le ginocchia vengono leggermente flesse al fine di ridurre la tensione sulle radici nervose del tratto lombare e analogamente le braccia sono estese ed addotte per diminuire la trazione dei nervi del plesso brachiale.

Vengono inoltre inseriti due cuscinetti ricurvi di supporto per il torace e per l'addome, impiegati per migliorare la ventilazione del paziente e per diminuire la pressione ematica a livello del campo operatorio. Una volta posizionato, il paziente viene rivestito di teli sterili accuratamente avvolti al tavolo per evitare che possano interferire con i sistemi di collisione del *Loop-X*.

A questo punto viene preparato il campo operatorio. Esso deve necessariamente includere, oltre ai livelli spinali da trattare, le spine iliache postero-superiori e le creste iliache, per consentire il posizionamento del *frame* di riferimento. Una volta identificato il campo, vi viene apposto il telo sterile trasparente. Con una penna dermografica sterile vengono contrassegnati i punti di repere anatomici comprendenti i processi spinosi dei segmenti da trattare, le creste iliache, la spina iliaca postero-superiore e la linea interglutea. Si può a questo punto procedere con l'incisione chirurgica.

Posizionamento del frame di riferimento e scansione con TC cone beam

Il *frame* di riferimento è il dispositivo che consente al sistema di navigazione di localizzare correttamente la posizione del paziente all'interno del campo operatorio. Deve essere posizionato sul corpo del paziente prima dell'acquisizione delle immagini che verranno successivamente utilizzate per la navigazione intraoperatoria. Nelle procedure analizzate in questo studio, si è preferito ancorarlo a livello della cresta iliaca, nonostante ci sia la possibilità di posizionarlo anche a livello del processo spinoso della vertebra adiacente al segmento da trattare. Tale scelta è dettata dal fatto che in questa posizione c'è un minor rischio di poterlo spostare inavvertitamente durante l'esecuzione dell'intervento. Un eventuale spostamento condurrebbe a una perdita dell'accuratezza della navigazione con conseguente posizione errata dei punti di repere anatomici e posizionamento dell'impianto. Nel caso dovesse verificarsi una situazione simile si è costretti ad acquisire una nuova scansione TC. Una volta posizionato il *frame*, ci si assicura che abbia la giusta inclinazione per ottimizzare la sua rilevazione da parte del visore ottico tale da

garantire una navigazione fluida. L'ultimo passaggio prima di eseguire la scansione TC è il *check* di rilevamento che viene confermato sul *display* di navigazione Curve®. Nel caso in cui il frame non venisse rilevato si esegue una pulizia dei marcatori riflettenti e si riprova il check. Eseguita tale configurazione si procede con la scansione radiografica.

Durante il processo di acquisizione delle immagini il personale di sala esce fuori dalla camera operatoria. Un tecnico di radiologia prende il controllo da remoto del *Loop-X* tramite la console *wireless* e lo posiziona all'altezza del tratto di colonna da scansionare. Vengono prima eseguite delle radiografie AP e LL che sono visionate direttamente sul *display* della console e che vengono utilizzate per impostare le corrette aree di scansione. Subito dopo l'anestesista induce per pochi attimi uno stato di apnea e si esegue la TC *cone beam*. Il *Loop-X* verrà dunque riposizionato ai piedi del tavolo operatorio e le immagini verranno caricate sul sistema di navigazione per la ricostruzione tridimensionale. Le scansioni TC potranno essere studiate liberamente sui piani assiale, sagittale e coronale. In più si ha la possibilità di fondere tali scansioni con immagini pre-operatorie del paziente migliorandone ancor di più l'accuratezza. Il miglior *match* che può essere eseguito comprende la TC intraoperatoria e la RM pre-operatoria, in modo da ottenere la visione chiara sia delle strutture scheletriche che dei tessuti molli.

Planning pre-operatorio

Le scansioni TC ottenute vengono utilizzate per effettuare una pianificazione pre-operatoria della strumentazione che verrà impiegata durante l'intervento. Per eseguire tale procedimento viene utilizzato il software *Brainlab® Elements Spine Planning*. Il primo passo della pianificazione è la scelta della dimensione delle viti peduncolari da utilizzare. Essa si baserà sull'accurata valutazione dell'anatomia del paziente da parte del chirurgo. A questo punto il primo operatore pianifica manualmente la posizione e la traiettoria finale delle viti direttamente sul *display* del navigatore (Fig. 1). Sebbene il software consenta anche la pianificazione automatica, in questo studio è stata eseguita manualmente al fine di ottimizzare le dimensioni e il posizionamento della strumentazione caso per caso. Il sistema consente inoltre di pianificare e navigare le gabbie intersomatiche utilizzate per garantire il processo di fusione spinale (Fig. 1). Durante la preparazione del *planning* viene scelta la forma, la lunghezza e l'altezza anche di tale strumentazione. Una volta terminata, la pianificazione può essere visualizzata su più modalità di *imaging*, incluse scansioni TC, TC *cone beam* e RM.

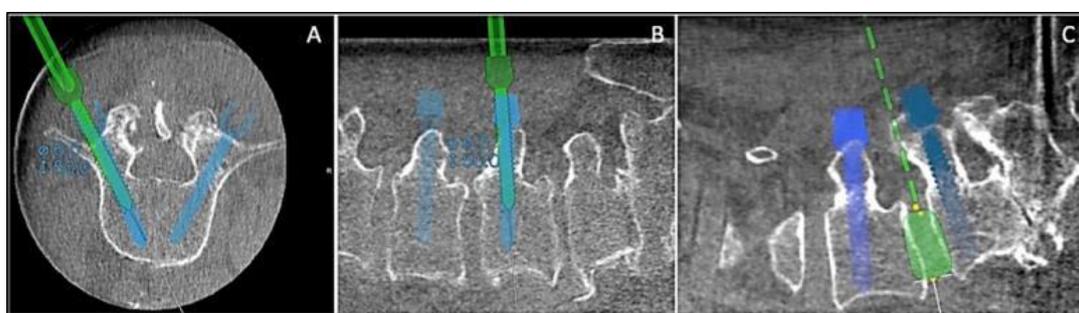


Fig. 1. *A: pianificazione e navigazione in tempo reale delle viti peduncolari, visione assiale; B: pianificazione e navigazione in tempo reale delle viti peduncolari, visione sagittale; C: pianificazione e navigazione della cage intersomatica, visione sagittale.*

Intervento chirurgico

Conclusa la fase di acquisizione delle immagini e la preparazione del *planning* operatorio, si procede con l'intervento di fusione spinale. Il punto di ingresso ottimale di ciascuna vite viene contrassegnato con una penna sterile sulla cute del paziente. Si eseguono due incisioni paravertebrali ai lati della colonna della lunghezza di 1-2 cm. Con incisioni di tale grandezza si è in grado di eseguire la stabilizzazione di un singolo livello vertebrale con un approccio mininvasivo. Incisi cute, sottocute e fascia muscolare viene utilizzata la

guida di perforazione navigata per rintracciare il corretto punto di entrata della vite nel peduncolo vertebrale e si conferma la possibilità di ottenere la traiettoria pianificata. A questo punto il posizionamento delle viti può essere eseguito con diverse tecniche (ad es. fili di *Kirschner*, aghi *Jamshidi*, strumenti elettrici). Nei pazienti arruolati in questo studio, le viti sono state fissate tramite la tecnica di perforazione peduncolare. Rispetto agli aghi *Jamshidi*, l'uso di una guida di perforazione navigata riduce il rischio di spostamento del filo di *Kirschner*. Inoltre, con questa tecnica, il trapano fornisce un *feedback* tattile in tempo reale mentre passa attraverso l'osso spongioso meno denso e resistente situato all'interno del peduncolo. Posizionata la guida di perforazione lungo la traiettoria desiderata, viene fissato un morsetto di neuro-monitoraggio alla guida stessa che consente un controllo dei segnali elettromiografici in tempo reale durante la fresatura. Affinché questo controllo sia ottimale, ci si coordina con l'anestetista per ottenere un basso grado di blocco neuromuscolare, poiché un'eccessiva curarizzazione interferirebbe con l'acquisizione del segnale elettromiografico. All'interno della perforazione appena eseguita si fa passare un filo di *Kirschner* per confermare di essere nella spongiosa peduncolare. I fili di *Kirschner* vengono lasciati in sede e si procede con la decompressione e il posizionamento della gabbia.

Per eseguire la decompressione vengono esposti gli elementi vertebrali posteriori. In base alla condizione del paziente si effettua una laminectomia mono o bilaterale, associata alla discectomia del segmento vertebrale malato. Anche in questa fase d'intervento ci si avvale di un puntatore navigato per garantire la massima precisione. Si inserisce a questo punto la gabbia intersomatica scelta nella fase di pianificazione e si passa al posizionamento delle viti peduncolari.

Le viti vengono inserite tramite dei cacciaviti, eventualmente navigati, lungo le perforazioni precedentemente eseguite. Prima di serrare la vite si effettua la rimozione del filo di *Kirschner*. Anche in questa fase ci si avvale del controllo elettromiografico, che se dovesse riscontrare segnali molto bassi condurrebbe all'esecuzione di un controllo della traiettoria della vite. Se inadeguata, la traiettoria verrà nuovamente pianificata. Si completa l'intervento con il posizionamento di aste di dimensioni adeguate inserite all'interno di specifiche guide poste sulla testa delle viti e bloccate con dei dadi. Una nuova scansione TC *cone beam* viene effettuata al fine di verificare il corretto posizionamento degli impianti.

Outcome

Accuratezza viti peduncolari

Tutti i pazienti inclusi in questo studio possiedono una TC di controllo eseguita al termine dell'intervento di stabilizzazione vertebrale. Tale scansione TC è stata utilizzata per la valutazione dell'accuratezza di ogni singola vite impiantata. Il grado di accuratezza è stato attribuito secondo le linee guida descritte dal "*Gertzbein and Robbins system*" (GRS)⁸, un sistema di classificazione che in base alla presenza di un'eventuale perforazione e alla sua estensione classifica le viti in cinque gradi differenti.

La classificazione è suddivisa in:

- grado A: la vite è contenuta completamente nel peduncolo vertebrale e non è presente alcun tipo di perforazione della corticale;
- grado B: la vite perfora la corticale con un'estensione < 2 mm;
- grado C: la vite perfora la corticale con un'estensione < 4 mm;
- grado D: la vite perfora la corticale con un'estensione < 6 mm;
- grado E: la vite perfora la corticale con un'estensione > 6 mm.

Il grado A è considerato un impianto di vite "perfetto". I gradi A+B sono considerati impianti di vite corretti e " clinicamente accettabili". I gradi inferiori sono considerati impianti di vite a potenziale rischio, essendo correlati alla possibile insorgenza di complicanze come lesioni di origine nervosa o vascolare. Per ciascuna vite che ha perforato la corticale è stato registrato l'orientamento della deviazione in senso medio-laterale e cranio-caudale.

Violazione delle faccette articolari

Tramite la TC di controllo acquisita al termine dell'intervento è stata eseguita la valutazione sul grado di violazione delle faccette articolari. L'analisi è stata effettuata seguendo la classificazione descritta da Yson et al.⁹. Ogni vite è stata classificata in:

- grado 0: la vite non viola la faccetta articolare;
- grado 1: la vite è in contatto o c'è il sospetto di contatto con la faccetta articolare;
- grado 2: la vite invade chiaramente la faccetta articolare.

Deviazione dal planning pre-operatorio

Per calcolare la deviazione dal *planning* pre-operatorio è stato necessario che ogni paziente fosse in possesso di due scansioni TC, la prima eseguita a seguito dell'inserimento del *reference frame* su cui il primo operatore effettua il *planning* pre-operatorio, e la seconda di controllo a cui il paziente viene sottoposto per la valutazione finale dell'impianto. Il calcolo dei parametri di deviazione è stato svolto sul computer centrale del sistema di navigazione. Un *software* specializzato ha permesso di eseguire una sovrapposizione delle TC con un sistema di "*curvature correction*" che ha garantito un *matching* millimetrico tra le due scansioni. Le analisi effettuate, una volta ottenuta tale sovrapposizione, sono state due: un'analisi delle deviazioni lineari di punta e testa della vite, e un'analisi della deviazione angolare assiale e sagittale della traiettoria della vite. Le deviazioni della punta e della testa delle viti dal posizionamento pianificato sono state valutate per la deviazione lineare lungo i seguenti tre assi: sulla proiezione assiale in direzione antero-posteriore e in direzione medio-laterale e sulla proiezione sagittale in direzione cranio-caudale (Fig. 2). Dopo avere calcolato la componente vettoriale di punta e testa su ogni singolo piano, abbiamo applicato la formula euclidea "*Deviazione lineare 3D = $d(x)^2 + d(y)^2 + d(z)^2$* " per calcolare la distanza nello spazio tridimensionale¹⁰.

La componente angolare è stata invece misurata tramite la valutazione dell'angolo costituito dall'asse centrale della vite nella sua posizione finale e dall'asse centrale della vite pianificata. La componente angolare è stata studiata solo bidimensionalmente sul piano assiale e sul piano sagittale (Fig. 2).

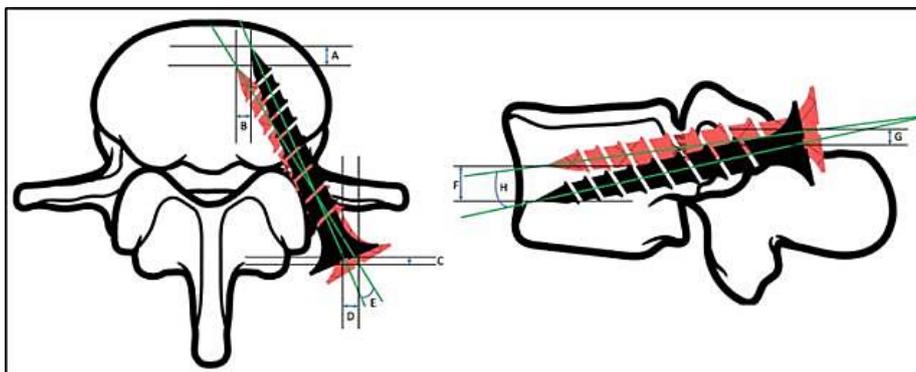


Fig. 2. Deviazioni tra vite posizionata (rossa) e vite pianificata (nera). **A:** deviazione antero-posteriore della punta della vite; **B:** deviazione medio-laterale della punta della vite; **C:** deviazione antero-posteriore della testa della vite; **D:** deviazione medio-laterale della testa della vite; **E:** deviazione angolare sul piano assiale; **F:** deviazione cranio-caudale della punta della vite; **G:** deviazione cranio-caudale della testa della vite; **H:** deviazione angolare sul piano sagittale.

Analisi statistica

L'analisi statistica è stata effettuata mediante SPSS (versione 26.0; SPSS Inc., Chicago, IL). Tutti i valori sono stati riportati come media \pm deviazione standard (DS). Il coefficiente di correlazione di *Pearson* è stato utilizzato per correlare i parametri di deviazione lineare o angolare su ogni piano con il GRS di ogni vite. Valori di $p < 0,05$ sono stati considerati statisticamente significativi. Un test di *Spearman* è stato eseguito

per valutare differenze significative tra la media dei parametri di deviazione e del GRS tra i singoli livelli spinali. Valori di $p < 0,05$ sono stati considerati statisticamente significativi.

Risultati

Aspetti demografici

Indici Popolazione	Valori
Numero	26
Sesso (M/F)	11 (42,3%) / 15 (57,7%)
Età (Media)	64,23 \pm 7,5 anni
BMI (Media)	26,52 \pm 3,43

Tab. 1. Dati demografici del campione studiato.

Da Dicembre 2021 sono stati arruolati nel seguente studio 26 pazienti affetti da spondilolistesi degenerativa e sottoposti a intervento di stabilizzazione vertebrale. Di tale campione l'età media della popolazione è di 64,23 \pm 7,5 anni, 11 pazienti sono di sesso maschile (42,3%) e 15 pazienti di sesso femminile (57,7%). Il BMI medio è di 26,52 \pm 3,43 (Tab. 1).

Dati chirurgici

In 18 pazienti la fusione è stata eseguita ad un singolo livello (69,23%), ai rimanenti 8 pazienti si è eseguita una stabilizzazione su due livelli (30,76%).

Tra i 26 pazienti arruolati nello studio sono state impiantate 120 viti peduncolari. I livelli di impianto comprendono L3, L4, L5 ed S1. Del campione totale, 5 pazienti sono stati sottoposti alla fusione del singolo livello L3-L4, 9 pazienti alla fusione L4-L5, 4 pazienti alla fusione L5-S1, 4 pazienti alla fusione di due livelli spinali comprendenti L4-L5-S1 e 4 pazienti alla fusione dei livelli L3-L4-L5. Sono state dunque impiantate un totale di 18 viti al livello di L3, 44 viti in L4, 42 viti in L5 e 16 viti al livello di S1 (Fig. 3).

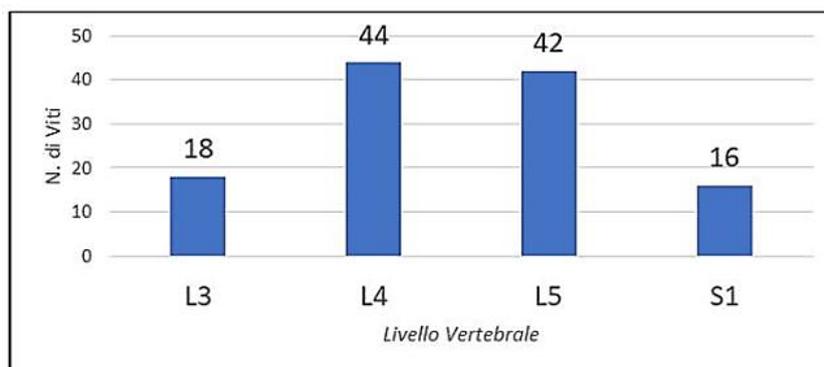


Fig. 3. Distribuzione delle viti nei vari livelli vertebrali.

Accuratezza delle viti

Delle 120 viti posizionate, 119 sono state valutate seguendo la classificazione di *Gertzbein e Robbins*. Una vite non è stata valutabile perché per motivi operatori la TC di controllo è stata eseguita prima di aver inserito la vite al posto del filo di *Kirschner*. Del totale, 94 viti sono state classificate di grado A (78,99%), 22 viti sono state classificate di grado B (18,49%), 3 viti sono state classificate di grado C (2,52%). Nessuna vite è stata classificata di grado D ed E. Sono state definite " clinicamente accettabili " (A+B) un totale di 116 viti (97,48%) (Tab. 2). Nessun paziente è andato incontro a complicanze intra e post-operatorie a seguito del posizionamento delle viti. Rispetto al livello vertebrale, in L3 delle 18 viti totali valutate 13 sono state classificate di grado A (72,22%), 5 di grado B (27,78%) e 0 di grado C; delle 44 valutate in L4, 26 sono state classificate di grado A (59,09%), 15 di grado B (34,09%) e 3 di grado C (6,82%); delle 41 valutate in L5, 39 sono state classificate di grado A (95,12%), 2 di grado B (4,88%) e 0 di grado C; le 16 valutate in S1 sono state tutte classificate di grado A (100%) (Fig. 4). Un test di *Spearman* ha dimostrato una correlazione tra il

grado di accuratezza e il livello spinale, $p < 0,001$. Delle 22 viti complessive classificate di grado B, che hanno dunque provocato le rotture della corticale, 17 hanno causato una perforazione laterale del peduncolo, 2 una perforazione mediale, 2 una perforazione craniale e 1 ha perforato latero-caudalmente il peduncolo. Per quanto riguarda le 3 viti classificate di grado C hanno causato tutte una perforazione laterale.

Livello	Numero viti	Grado a (n. / %)	Grado b (n. / %)	Grado c (n. / %)	Grado a+b (n. / %)
TOTALE	119	N.94 (78,99%)	N.22 (18,49%)	N.3 (2,52%)	N.116 (97,48%)
L3	18	N.13 (72,22%)	N.5 (27,78%)	N.0 (0%)	N.18 (100%)
L4	44	N.26 (59,09%)	N.15 (34,09%)	N.3 (6,82%)	N.41 (93,18%)
L5	41	N.39 (95,12%)	N.2 (4,88%)	N.0 (0%)	N.41 (100%)
S1	16	N.16 (100%)	N.0 (0%)	N.0 (0%)	N.16 (100%)

Tab. 2. Accuratezza totale e dei rispettivi livelli vertebrali.

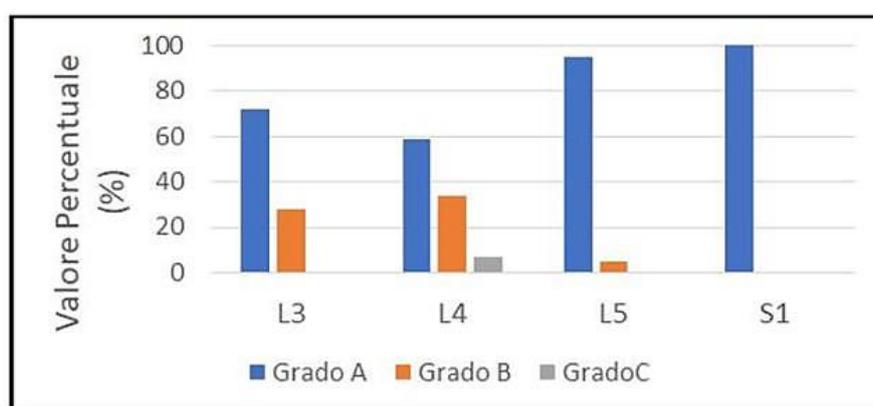


Fig. 4. Distribuzione percentuale del GRS per singolo livello.

Violazione della faccetta articolare

Delle 119 viti valutate secondo la classificazione di Yson, 116 (97,48%) sono state classificate di grado 0 non intaccando la faccetta articolare, 2 viti (1,72%) sono state classificate di grado 1 essendoci il sospetto di un contatto con la faccetta e 1 vite (0,86%) è stata classificata di grado 2 avendo toccato chiaramente la faccetta articolare. Le due viti di grado 1 sono state rispettivamente inserite al livello di L3 e al livello di L4. La vite di grado 2 è stata inserita a livello di L5.

Deviazione dal planning pre-operatorio

Delle 120 viti impiantate nei pazienti arruolati, 117 sono state analizzate per studiare la deviazione tra la posizione finale della vite e il *planning* pre-operatorio. Oltre alla vite non valutabile per il GRS, altre 2 viti non sono state sottoposte a questa valutazione per il mancato salvataggio del *planning* all'interno del computer centrale del sistema di navigazione.

Per quanto riguarda il parametro lineare, la deviazione media della punta della vite sul piano assiale in direzione latero-mediale è di 2,54 mm \pm 2,52, sul piano assiale in direzione antero-posteriore è di 2,9 mm \pm 2,8, sul piano sagittale in senso cranio-caudale 1,65 mm \pm 1,67. A partire da questi dati, è stata calcolata la deviazione tridimensionale della punta della vite che corrisponde a 4,92 mm \pm 3,27.

La deviazione media della testa della vite posizionata nel punto di entrata del peduncolo sul piano assiale in direzione medio-laterale è di 1,85 mm \pm 1,83, sul piano assiale in direzione antero-posteriore è di 3,58 mm

$\pm 3,14$, sul piano sagittale in senso cranio-caudale è di $1,72 \text{ mm} \pm 1,67$. La distanza nello spazio tridimensionale della testa della vite nel punto di entrata del peduncolo è $4,98 \text{ mm} \pm 3,22$.

La deviazione della componente angolare, riguardo la traiettoria della vite, sul piano assiale corrisponde a $3,58^\circ \pm 3,9$ mentre sul piano sagittale corrisponde a $3,85^\circ \pm 3,48$ (Tab. 3).

DEVIATIONE PUNTA DELLA VITE			
Dev. 2D assiale Medio-Laterale	Dev. 2D assiale Antero-Posteriore	Dev. 2D sagittale Cranio-Caudale	Dev. 3D
$2,54 \text{ mm} \pm 2,52$	$2,9 \text{ mm} \pm 2,8$	$1,65 \text{ mm} \pm 1,67$	$4,92 \text{ mm} \pm 3,27$
DEVIATIONE TESTA DELLA VITE NEL PUNTO DI ENTRATA DEL PEDUNCOLO			
Dev. 2D assiale Medio-Laterale	Dev. 2D assiale Antero-Posteriore	Dev. 2D sagittale Cranio-Caudale	Dev. 3D
$1,85 \text{ mm} \pm 1,83$	$3,58 \text{ mm} \pm 3,14$	$1,72 \text{ mm} \pm 1,67$	$4,98 \text{ mm} \pm 3,22$
DEVIATIONE ANGOLARE			
Dev. Angolare Assiale		Dev. Angolare Sagittale	
$3,58^\circ \pm 3,9$		$3,85^\circ \pm 3,48$	

Tab. 3. Valori medi di deviazione della punta delle viti posizionate, della testa delle viti posizionate e deviazioni angolari della traiettoria della vite.

Dopo aver ottenuto i risultati di deviazione lineare e angolare di ciascuna vite, è stata effettuata una correlazione di Pearson tra tutti i valori di deviazione delle viti con il corrispettivo grado di accuratezza (GRS). Sono state riscontrate correlazioni significative tra la deviazione 2D della testa sul piano assiale in senso antero-posteriore e il GRS $p = 0$, tra la deviazione 3D della testa nel punto di entrata del peduncolo e il GRS $p = 0,001$, tra la deviazione 2D della punta della vite sul piano assiale in direzione antero-posteriore e il GRS $p = 0,02$ e tra la deviazione 3D della testa nel punto di entrata del peduncolo e il GRS $p = 0,024$.

In seguito, sono state calcolate separatamente le medie della deviazione tridimensionale, sia della punta che della testa della vite, per ciascun livello vertebrale per valutare se ci fosse una correlazione significativa tra questi valori con i rispettivi livelli. Per quanto riguarda la punta della vite, la deviazione 3D media in L3 è di $4,12 \text{ mm} \pm 3,01$, in L4 di $4,69 \text{ mm} \pm 3,58$, in L5 di $5,25 \text{ mm} \pm 3,1$ e in S1 di $5,62 \text{ mm} \pm 3,09$. La deviazione 3D media della testa della vite nel punto di entrata è $4,35 \text{ mm} \pm 3$ in L3, $5,1 \text{ mm} \pm 3,36$ in L4, $5,32 \text{ mm} \pm 3,45$ in L5 e di $4,5 \text{ mm} \pm 2,4$. Tramite il test di Spearman è stata riscontrata una correlazione significativa tra il livello vertebrale e la deviazione lineare 3D della punta della vite, $p=0,032$. La stessa analisi eseguita con la deviazione lineare 3D della testa della vite nel punto di entrata del peduncolo non ha mostrato alcuna correlazione significativa, $p=0,463$.

Discussione

Il primo obiettivo posto all'interno del nostro studio è stato quello di valutare l'accuratezza e la sicurezza nel posizionamento di viti peduncolari tramite il sistema di navigazione guidato da immagini intraoperatorie, acquisite con l'impiego del Loop-X (BrainLab). Dai risultati delle analisi delle TC di controllo intraoperatorie, è emerso che il 97,48% delle viti posizionate con questa tecnica chirurgica sono definibili " clinicamente accettabili " (A+B). Solo il 2,52% (3 viti) è stato classificato di grado C, definibile a " potenziale rischio " e, nonostante ciò, non è stata riscontrata alcuna complicanza intra e post-operatoria. Nessuna vite è stata classificate di grado D o E. La valutazione di questi primi risultati ci consente di affermare come la procedura chirurgica eseguita con l'ausilio del sistema di navigazione della BrainLab sia estremamente accurata e sicura. Essendo la navigazione un ausilio chirurgico innovativo, ma allo stesso tempo utilizzato da ormai più di un decennio, risulta essere ben documentato da numerosi studi scientifici. I risultati ottenuti dalla nostra analisi risultano essere in linea con molti altri studi, i quali riportano percentuali di viti

impiantate clinicamente accettabili pari a circa il 95%¹¹⁻¹⁵. Questo lavoro è fondato sulla valutazione di viti inserite in pazienti affetti da spondilolistesi degenerativa del tratto lombo-sacrale. La letteratura riporta come, in generale, la navigazione intraoperatoria sia ormai una tecnica che garantisce ottimi risultati anche in interventi coinvolgenti tratti del rachide superiore e in patologie causanti deformazioni e instabilità vertebrali in una popolazione molto più giovane del nostro campione di studio¹⁶⁻¹⁸. È oltretutto ormai documentato che si tratta di una tecnica che in termini di accuratezza risulta superiore a quelle che l'hanno preceduta come la fluoroscopia^{15, 18-20}.

I sistemi di navigazione sono stati progettati e in seguito applicati nella pratica della chirurgia vertebrale con lo scopo di ridurre quanto più possibile i casi di mal posizionamento della strumentazione e le complicanze a questi ultimi correlate. Come riportato dalle varie classificazioni utilizzate per descrivere il grado di accuratezza delle viti^{8, 21}, perforazioni con un'estensione superiore ai 2 mm del peduncolo sono definibili a potenziale rischio. Nel nostro campione di studio, essendo state le viti inserite nel tratto lombo-sacrale e tramite un approccio percutaneo TLIF, le principali conseguenze originabili da un posizionamento poco accurato sono lesioni delle strutture nervose come le radici dei nervi del plesso lombare e il midollo spinale²². Basandosi sull'anatomia della colonna vertebrale, risulta facile comprendere come le radici nervose risultino a rischio di lesione per perforazioni del peduncolo in senso cranio-caudale invadendo il forame di coniugazione, mentre il midollo spinale risulta a rischio per perforazioni in direzione mediale che causano un'occupazione del canale vertebrale. Delle tre viti classificate di grado C comprese nel nostro studio, nessuna possiede questi orientamenti di deviazione, hanno infatti perforato tutte il peduncolo lateralmente. Dunque, nonostante siano considerate viti a rischio, il loro orientamento di perforazione diminuisce notevolmente la possibilità di poter provocare danni importanti. La stessa tendenza di deviazione è stata riscontrata anche nelle 22 viti classificate di grado B, in cui 17 di queste hanno causato una perforazione laterale del peduncolo. Questi dati ci permettono di affermare come la navigazione, anche nei casi in cui non raggiunga un posizionamento radiologicamente perfetto, consente comunque al primo operatore di potersi tenere a distanza dalle aree più sensibili e pericolose del campo chirurgico, assicurando un elevato grado di sicurezza nel posizionamento dell'impianto.

Dopo aver calcolato l'accuratezza di ogni vite, abbiamo effettuato un raggruppamento per ogni singola vertebra, cercando di indagare se ci fosse un eventuale correlazione tra GRS e livello spinale. Da questa valutazione è emerso che la percentuale di viti classificate di grado A posizionate in L3, L4, L5 ed S1 sia stata rispettivamente di 72,22%, 59,09%, 95,12% e del 100%. Tali dati hanno messo in luce come le viti dei livelli vertebrali più bassi abbiano un tasso di accuratezza maggiore rispetto a quelle dei livelli superiori. Ciò è giustificabile dal fatto che le dimensioni delle vertebre tendono ad aumentare in senso cranio-caudale lungo il rachide. Di conseguenza peduncoli di maggiori dimensioni consentono alla vite di essere più facilmente contenuta interamente all'interno della corticale.

Il secondo obiettivo che ci siamo posti è stato quello di effettuare una valutazione della deviazione della posizione finale della vite rispetto a quella pianificata manualmente nella prima parte dell'intervento. Lo scopo è quello di valutare quanto un'eventuale deviazione influenzi l'accuratezza finale della vite e quello di delineare il ruolo del *planning* pre-operatorio in questa operazione chirurgica. Abbiamo dunque deciso di calcolare la distanza lineare di punta e testa della vite prima in 2D su ogni singolo piano e poi tridimensionalmente al fine di poter analizzare e correlare ogni singola componente lineare e angolare della vite con il GRS. Dai risultati ottenuti è emerso come sia presente un discreto tasso di deviazione tridimensionale sia della punta che della testa della vite. Nonostante ciò, il 97,49% delle viti sono state posizionate correttamente. Da ciò si può affermare come tale deviazione non abbia influenzato l'esito finale dell'intervento in termini di accettabilità clinica. Nella letteratura scientifica sono diversi gli studi da cui è possibile fare le medesime deduzioni^{10, 14, 23}. Negli interventi di stabilizzazione vertebrale le cause di deviazione dal *planning* possono originare sia da fattori collegati al macchinario chirurgico, sia da fattori

correlati all'intervento. Tra i primi rientrano errori nel processo di registrazione o calibrazione dello strumentario navigato, spostamenti del frame di riferimento o errori nell'acquisizioni delle immagini. Tra quelli collegati all'intervento rientra, soprattutto nell'ambito di procedure eseguite con approccio percutaneo come quelle del nostro studio, l'impossibilità di raggiungere l'esatto punto d'ingresso pianificato per motivi anatomici (es. ingombro della cresta iliaca) o la volontarietà stessa del chirurgo di volersi discostare leggermente da quest'ultimo per adattarsi meglio al campo chirurgico¹⁴. In tali situazioni, di fatto, la navigazione intraoperatoria fornisce al chirurgo, tramite una visione in tempo reale della traiettoria, la capacità di poter aggiustare l'orientamento della vite per il suo corretto inserimento.

Uno studio analogo al nostro è stato quello di Jiang et al.¹⁰. Essi hanno eseguito la medesima valutazione su 254 viti inserite a livello toracico e lombosacrale. In questo caso, i valori di deviazione lineare 3D ottenuti sono stati di $3,6 \text{ mm} \pm 2,3$ per la punta della vite e di $4,2 \text{ mm} \pm 2,5$ per la testa. Secondo il GRS il 72% delle viti è stato classificato di grado A e il 28% di grado B. Anche se leggermente inferiori ai nostri, i valori di deviazione lineare della vite dal *planning* non hanno compromesso l'accettabilità clinica delle viti. Una sostanziale differenza da sottolineare presente tra i due studi è il tipo di ausilio chirurgico utilizzato. In questo studio, infatti, gli interventi sono stati eseguiti tramite l'utilizzo del sistema robotico *ExcelsiusGPS* (*Globus Medical Inc.*), mentre nel nostro caso è stato utilizzato un sistema di navigazione immagine guidato. Nel campo della chirurgia vertebrale, i robot sono i sistemi più innovativi ad essere stati introdotti per cercare di limitare anche la minima percentuale di errore che la navigazione non può evitare. Non c'è ancora la stessa entità di evidenze scientifiche che ci sono per la navigazione, ma dai risultati fin ora ottenuti sembra che i sistemi robotici siano i sistemi più all'avanguardia²⁴⁻²⁶.

Come per il GRS abbiamo effettuato una valutazione delle deviazioni 3D medie per ogni livello vertebrale e abbiamo eseguito un test di *Spearman* per valutare una correlazione tra il grado di deviazione e il livello vertebrale. Da questa analisi è risultato come il grado di deviazione 3D della punta della vite aumenti nei livelli vertebrali inferiori, pur mantenendo un'eccellente accuratezza (100% di A+B). Non è stata invece riscontrata la medesima correlazione con la deviazione della testa nel punto di entrata. Risultato analogo è stato riscontrato da Gubian et al.²⁷ che nel loro studio hanno mostrato come la deviazione media riscontrata in S1 fosse significativamente più elevata rispetto a quella dei livelli lombari, dimostrando come il grado di libertà della strumentazione operatoria aumenti nei livelli più bassi del rachide.

Dopo aver calcolato l'accuratezza di ogni vite e ciascun parametro della deviazione lineare 2D e 3D e della deviazione angolare, abbiamo eseguito un'analisi statistica per vedere se alcune di queste componenti avesse influenzato in qualche modo il grado di accuratezza delle viti. Da questa valutazione è emersa una correlazione tra il GRS e la deviazione della punta della vite, sia in direzione antero-posteriore 2D e sia sulla distanza 3D. Correlazione simile ma leggermente meno significativa è stata riscontrata con i medesimi valori della testa della vite. In effetti, tra i valori bidimensionali, la deviazione lineare in direzione antero-posteriore sia della punta che della testa della vite è risultata essere la più ampia. È dunque chiaro come nel nostro studio la deviazione, se pur presente, non abbia assunto valori tali da poter causare una riduzione clinicamente rilevante dell'accuratezza, ma tali risultati statistici ci premettono di comprendere come un eccessivo discostamento dalla pianificazione possa influenzare il corretto posizionamento della vite. Il margine di discostamento dal *planning* tende ad aumentare nei tratti più bassi della colonna. Nessuna correlazione è stata riscontrata tra GRS e deviazione angolare, che è risultata essere in linea con quella riscontrata in altri studi scientifici²⁸⁻³⁰.

Dall'analisi di tutti i risultati tratti da questo studio, possiamo affermare come le capacità e l'esperienza del chirurgo, implementate dalla navigazione, rimangono ancora i fattori più determinanti per la riuscita dell'intervento, mentre il *planning* assume una funzione di guida per il chirurgo stesso. Pur non risultando comunque necessario attenersi fedelmente alla pianificazione pre-operatoria, abbiamo appurato come discostarsene eccessivamente potrebbe compromettere il posizionamento della vite. Inoltre, la

correlazione significativa riscontrata tra la deviazione bidimensionale in senso antero-posteriore della testa e della punta delle viti con i GRS di grado inferiore ad A, ci consente di affermare che il metodo di valutazione impiegato in questo studio¹⁰, associato ai sistemi di classificazione ormai diffusi nella letteratura scientifica, consente di ottenere un *feedback* molto accurato e preciso riguardo gli esiti dell'intervento di stabilizzazione vertebrale.

Conclusione

Il sistema di navigazione con immagini acquisite intraoperatoriamente con l'utilizzo del *Loop-X (BrainLab)* ha mostrato un tasso di accuratezza estremamente elevato e ha consentito l'inserimento di viti peduncolari in totale sicurezza e precisione. Lo studio sulla deviazione della vite posizionata rispetto a quella pianificata ha dimostrato come il *planning* abbia la funzione di guida durante la fase d'inserimento della vite. Il chirurgo, grazie alle capacità e all'esperienza eseguita nel tempo, ricopre ancora un ruolo decisivo nell'esecuzione dell'intervento, considerando che il discostamento dell'inserimento della vite di discreta entità rispetto al *planning*, non compromette la riuscita dell'intervento. Infine, è possibile affermare che il metodo di valutazione quantitativa, associato ai sistemi di classificazione dell'accuratezza ormai diffusi in questo campo, riesce a conferire informazioni molto utili e specifiche sugli esiti dell'intervento di fusione spinale.

BIBLIOGRAFIA

1. Pathria M. Imaging of Spine Instability. *Semin Musculoskelet Radiol* 2005; 9: 88-99.
2. Cortesi P, Assietti R, Cuzzocrea F, et al. Epidemiologic and Economic Burden Attributable to First Spinal Fusion Surgery: Analysis From an Italian Administrative Database. *Spine (Phila Pa 1976)* 2017; 42: 1398-404.
3. Heck VJ, Klug K, Prasse T, et al. Projections From Surgical Use Models in Germany Suggest a Rising Number of Spinal Fusions in Patients 75 Years and Older Will Challenge Healthcare Systems Worldwide. *Clin Orthop Relat Res* 2023; 481: 1610-9.
4. Marc Du Bois, Marek Szpalski, Donceel P. A decade's experience in lumbar spine surgery in Belgium: sickness fund beneficiaries, 2000–2009. *Eur Spine J* 2012; 21: 2693-703.
5. Pannell WC, Savin DD, Scott TP, Wang JC, Daubs MD. Trends in the surgical treatment of lumbar spine disease in the United States. *Spine J* 2015; 15: 1719-27.
6. Sheikh SR, Thompson NR, Benzel E, et al. Can We Justify It? Trends in the Utilization of Spinal Fusions and Associated Reimbursement. *Neurosurgery* 2020; 86: E193-E202.
7. Mao JZ, Agyei JO, Khan A, et al. Technologic Evolution of Navigation and Robotics in Spine Surgery: A Historical Perspective. *World Neurosurgery* 2021; 145: 159-67.
8. Gertzbein SD, Robbins SE. Accuracy of Pedicular Screw Placement In Vivo. *Spine* 1990; 15: 11-4.
9. Yson SC, Sembrano JN, Sanders PC, Santos ERG, Ledonio CGT, Polly DW. Comparison of Cranial Facet Joint Violation Rates Between Open and Percutaneous Pedicle Screw Placement Using Intraoperative 3-D CT (O-arm) Computer Navigation. *Spine* 2013; 38: E251-E258.
10. Jiang B, Pennington Z, Zhu AZ, et al. Three-dimensional assessment of robot-assisted pedicle screw placement accuracy and instrumentation reliability based on a preplanned trajectory. *J Neurosurg Spine* 2020; 33: 519-28.
11. Ganguly R, Minnema A, Singh V, Grossbach A. Retrospective analysis of pedicle screw accuracy for patients undergoing spinal surgery assisted by intraoperative computed tomography (CT) scanner AIRO® and BrainLab© navigation. *Clin Neurol Neurosurg* 2020; 198: 106113.
12. Sundaram PPM, Oh JYL, Tan M, Nolan CP, Yu CS, Ling JM. Accuracy of Thoracolumbar Pedicle Screw Insertion Based on Routine Use of Intraoperative Imaging and Navigation. *Asian Spine J* 2021; 15: 491-7.
13. Liu A, Jin Y, Cottrill E, et al. Clinical accuracy and initial experience with augmented reality–assisted pedicle screw placement: the first 205 screws. *J Neurosurg Spine* 2022; 36: 351-7.
14. Liu JB, Wu JL, Zuo R, Li CQ, Zhang C, Zhou Y. Does MIS-TLIF or TLIF result in better pedicle screw placement accuracy and clinical outcomes with navigation guidance? *BMC Musculoskelet Disord* 2022; 23: 153.

15. Jing L, Wang Z, Sun Z, Zhang H, Wang J, Wang G. Accuracy of pedicle screw placement in the thoracic and lumbosacral spines using O-arm-based navigation versus conventional freehand technique. *Chin Neurosurg J* 2019; 5: 6.
16. 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: E56-E64.
17. Kosmopoulos V, Schizas C. Pedicle Screw Placement Accuracy. *Spine* 2007; 32: E111-E120.
18. Baldwin KD, Kadiyala M, Talwar D, Sankar WN, Flynn JM, Anari JB. Does intraoperative CT navigation increase the accuracy of pedicle screw placement in pediatric spinal deformity surgery? A systematic review and meta-analysis. *Spine Deform* 2022; 10: 19-29.
19. Perdomo-Pantoja A, Ishida W, Zygourakis C, et al. Accuracy of Current Techniques for Placement of Pedicle Screws in the Spine: A Comprehensive Systematic Review and Meta-Analysis of 51,161 Screws. *World Neurosurg* 2019; 126: 664-678.e3.
20. Alqurashi A, Alomar SA, Bakhaidar M, Alfiky M, Baeesa SS. Accuracy of Pedicle Screw Placement Using Intraoperative CT-Guided Navigation and Conventional Fluoroscopy for Lumbar Spondylosis. *Cureus* 2021; 13: e17431.
21. Rampersaud YR, Pik JHT, Salonen D, Farooq S. Clinical Accuracy of Fluoroscopic Computer-Assisted Pedicle Screw Fixation: A CT Analysis. *Spine* 2005; 30: E183-E190.
22. 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. *Neurosurg Focus* 2011; 31: E8.
23. Godzik J, Walker CT, Hartman C, et al. A Quantitative Assessment of the Accuracy and Reliability of Robotically Guided Percutaneous Pedicle Screw Placement: Technique and Application Accuracy. *Oper Neurosurg (Hagerstown)* 2019; 17: 389-95.
24. Hao D, Gao L, Huang D, et al. Radiological and Clinical Differences between Tinavi Orthopedic Robot and O-Arm Navigation System in Thoracolumbar Screw Implantation for Reconstruction of Spinal Stability. *Med Sci Monit* 2020; 26: e924770.
25. Khan A, Meyers J, Yavorek S, et al. Comparing Next-Generation Robotic Technology with 3-Dimensional Computed Tomography Navigation Technology for the Insertion of Posterior Pedicle Screws. *World Neurosurg* 2019; 123: e474-e481.
26. Zhou LP, Zhang RJ, Sun YW, Zhang L, Shen CL. Accuracy of Pedicle Screw Placement and Four Other Clinical Outcomes of Robotic Guidance Technique versus Computer-Assisted Navigation in Thoracolumbar Surgery: A Meta-Analysis. *World Neurosurg* 2021; 146: e139-e150.
27. Gubian A, Kausch L, Neumann JO, et al. CT-Navigated Spinal Instrumentations-Three-Dimensional Evaluation of Screw Placement Accuracy in Relation to a Screw Trajectory Plan. *Medicina (Kaunas)* 2022; 58: 1200.
28. Pojskić M, Bopp M, Nimsky C, Carl B, Saß B. Initial Intraoperative Experience with Robotic-Assisted Pedicle Screw Placement with Cirq® Robotic Alignment: An Evaluation of the First 70 Screws. *J Clin Med* 2021; 10: 5725.
29. Mathew J, Mok K, Goulet B. Pedicle violation and Navigational errors in pedicle screw insertion using the intraoperative O-arm: A preliminary report. *Int J Spine Surg* 2013; 7: e88-94.
30. Van Dijk JD, van den Ende RPJ, Stramigioli S, Köchling M, Höss N. Clinical Pedicle Screw Accuracy and Deviation From Planning in Robot-Guided Spine Surgery. *Spine* 2015; 40: E986-E991.

Dott. Niccolò Nardi, Corso di Laurea Magistrale in Medicina e Chirurgia, Facoltà Dipartimentale di Medicina e Chirurgia, Università Campus Bio-Medico di Roma

Sintesi della Tesi di Laurea discussa il 15/06/2023

Relatore: Prof. Rocco Papalia, Professore Ordinario di Malattie apparato locomotore, Università Campus Bio-Medico di Roma

Correlatore: Prof. Gianluca Vadalà, Professore Associato in Malattie dell'apparato locomotore, Università Campus Bio-Medico di Roma

Per la corrispondenza: nicco.nardi98@gmail.com