ARTICOLO ORIGINALE

Giornale Italiano di Ortopedia e Traumatologia
2024;50:1-8; doi: 10.32050/0390-0134-N422



Esperienza preliminare in Chirurgia Muscoloscheletrica Oncologica "di precisione": *planning* e procedure chirurgiche TC-guidate e con navigazione intraoperatoria

Preliminary experience in Musculoskeletal Tumor "precision" Resection: CT-guided and intraoperative navigation for planning and surgical procedures

Jacopo Baldi[1] *(foto)*, Nicola Salducca[1], Barbara Rossi[1], Alessandro Luzzati[2], Simone Mazzoli[2], Elisa Checcucci[1], Fabrizio Centra[3], Vincenzo Anelli[3], Carmine Zoccali[4], Roberto Biagini[1]

[1] UOC Ortopedia Oncologica, IRCCS Istituto Nazionale Tumori Regina Elena, Roma; [2] IRCCS Istituto Ortopedico Galeazzi, Milano; [3] UOC Radiologia e Diagnostica per Immagini, IRCCS Istituto Nazionale Tumori Regina Elena, Roma; [4] Dipartimento di Scienze Anatomiche, Istologiche, Medicina Forense e Ortopedia, Università degli Studi Umberto I di Roma

Riassunto

Introduzione. In Ortopedia Oncologica, alla luce di prognosi sempre più favorevoli grazie alle terapie adiuvanti e di crescenti esigenze funzionali dopo resezioni *limb-salvage* con ricostruzioni sofisticate, il sistema di navigazione computerizzata consente la conversione di una chirurgia tradizionale, basata su reperi anatomici e sull'esperienza del Chirurgo, a una procedura estremamente precisa e riproducibile. In questo studio si riporta l'esperienza monocentrica nel trattamento di tumori muscoloscheletrici con supporto di un sistema avanzato di scansione TC mobile intraoperatorio combinato alla navigazione computer-assistita.

Materiali e metodi. Sedici pazienti sono stati arruolati in uno studio osservazionale descrittivo retrospettivo con diagnosi di neoplasia primitiva o metastatica di osso e parti molli, per il cui trattamento è stato previsto l'uso di un sistema di navigazione avanzato unito alla TC intraoperatoria al fine di ottenere margini ampi e minimizzare l'asportazione di tessuti sani.

Risultati. La precisione di localizzazione della lesione nonché la guida di strumentario dedicato hanno reso possibile in tutti i casi la definizione diretta e costante dei margini di resezione. Specie in sedi difficili, in nessun caso si è assistito al danneggiamento di grossi vasi e strutture nervose. Discussione. La TC intraoperatoria rappresenta l'evoluzione della navigazione chirurgica computer assistita; l'importanza di ottenere un margine "oncologicamente adeguato", specialmente in sedi anatomiche complesse è evidente in Letteratura, laddove una quota del 10-15% di margini inadeguati rappresenta un importante limite alla guarigione di questi pazienti.

Conclusioni. Un sistema integrato di navigazione TC guidata aumenta la precisione degli interventi chirurgici migliorando la qualità del margine e la possibilità di sopravvivenza di questi pazienti.

Parole chiave: *tumori muscoloscheletrici, navigazione, sarcoma, chirurgia, TC intraoperatoria*

Summary

Introduction. In Oncological Orthopedics, because of more favorable prognoses thanks to adjuvant therapies and increasing functional needs after limb-salvage resections and complex reconstructions,

Ricevuto: 30 dicembre 2023
Accettato: 21 marzo 2024

Corrispondenza
Jacopo Baldi
E-mail: jacopo.baldi@ifo.it

Conflitto di interessi
Gli Autori dichiarano di non avere alcun conflitto di interesse con l'argomento trattato nell'articolo.

Come citare questo articolo: Baldi J, Salducca N, Rossi B, et al. Esperienza preliminare in Chirurgia Muscoloscheletrica Oncologica "di precisione": *planning* e procedure chirurgiche TC-guidate e con navigazione intraoperatoria. Giornale Italiano di Ortopedia e Traumatologia 2024;50:1-8; https://doi.org/10.32050/0390- 0134-N422

© Copyright by Pacini Editore Srl

OPEN ACCESS

L'articolo è OPEN ACCESS e divulgato sulla base della licenza CC-BY-NC-ND (Creative Commons Attribuzione – Non commerciale – Non opere derivate 4.0 Internazionale). L'articolo può essere usato indicando la menzione di paternità adeguata e la licenza; solo a scopi non commerciali; solo in originale. Per ulteriori informazioni: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.it

a computer-assisted navigation system shifts a conventional surgery, based on anatomic finds and the surgeon's experience, in an extremely precise and reproducible procedure. This study reports a single-center experience in treatment of musculoskeletal tumors with the support of an advanced intraoperative CT scanning system combined with computer-assisted navigation.
Materials and methods. Sixteen patients were enrolled in a retrospective descriptive observational study with a diagnosis of primary or metastatic bone and soft tissues tumors; an intraoperative navigation system combined with intraoperative CT was engaged in order to obtain wide margins and minimize the removal of healthy tissue.
Results. The precision of localization of the lesion as well as the guidance of a dedicated instruments lead, in all cases, to directly and constantly define the resection margins. Especially in difficult locations, in no case a damage to large vessels and nervous structures were observed.
Discussion. Intraoperative CT represents the evolution of computer-assisted navigation; the importance of obtaining an oncologically adequate margin, especially in difficult anatomical locations, is well-known in Literature, where a 10-15% rate of inadequate margins represents an important limit to the recovery of these patients.
Conclusions. An integrated CT-guided navigation system increases the "precision" of surgical interventions by improving the quality of the margin and the possibility of survival of these patients.

Key words: *musculoskeletal tumors, navigation, sarcoma, surgery, intraoperative tomography*

Introduzione

I tumori delle ossa e dei tessuti molli rappresentano un gruppo di entità nosologiche rare ed eterogenee, e rappresentano una sfida diagnostica e terapeutica. Mentre la gestione delle lesioni benigne non evolutive spesso beneficia di osservazione clinico-strumentale e solo le forme aggressive necessitano di un intervento chirurgico, il trattamento dei sarcomi di solito si fonda sulla combinazione di chirurgia e terapie adiuvanti (chemioterapia e/o radioterapia). Sia per i sarcomi dell'osso che dei tessuti molli è necessario ottenere margini di resezione/escissione ampi, negativi ovvero esenti da neoplasia, come descritto da Enneking et al. [1,2]. L'adeguatezza dei margini in tutti i casi riduce il rischio di recidiva locale migliorando la prognosi sia in termini di rischio di metastatizzazione che di sopravvivenza globale [2]. L'applicazione della chirurgia computer assistita nel campo della chirurgia dei tumori (*Computer Assisted Surgery in Tumours Surgery* - CATS) ha iniziato a diffondersi negli ultimi anni; ben descritta, per l'apparato scheletrico, nella chirurgia dei tumori craniomaxillo-facciali, la chirurgia computerizzata è stata utilizzata finora in varie aree dell'ortopedia non oncologica, tra cui la chirurgia protesica, la ricostruzione del legamento crociato e il posizionamento delle viti peduncolari [3]. Potenzialmente utile in ogni tipologia di intervento chirurgico di resezione o escissione tumorale, trova un ruolo elettivo in procedure complesse in sedi difficili come per i tumori pelvici, sacrali e spinali [4,5]. La peculiarità della chirurgia computer assistita standard risiede nella possibilità di guidare intraoperatoriamente il Chirurgo, fornendo informazioni "*step by step*" sull'esatta localizzazione della neoplasia, la distanza tra questa e le strutture anatomiche circostanti per migliorare l'accuratezza del margine di resezione/escissione, ovvero minimizzando la discrepanza tra la resezione/escissione pianificata e quella ottenuta con la procedura definitiva [6-8]. La navigazione TC intraoperatoria, oltre a questi vantaggi, offre la possibilità, con un'acquisizione TC *offhand*, di verificare la pianificazione preoperatoria, confermandola o aumentandone, se necessario, l'accuratezza; questo soprattutto nei casi in cui la chirurgia coinvolge siti geometricamente e anatomicamente complessi come colonna vertebrale, bacino o osso sacro [9]. Nella moderna chirurgia oncologica ortopedica, visto il raggiungimento di prognosi sempre più favorevoli grazie alle terapie adiuvanti e la crescente richiesta di esigenze funzionali in una chirurgia non più demolitiva ma di salvataggio con ricostruzioni sofisticate, la CATS consente la conversione da un intervento chirurgico tradizionale "*no look*", basato sui punti di riferimento anatomici e sull'esperienza del Chirurgo, a una procedura estremamente precisa e riproducibile.
In questo studio presentiamo la nostra esperienza monocentrica come Centro di riferimento oncologico nel trattamento di tumori muscoloscheletrici sia primitivi (benigni e maligni) che metastatici utilizzando un sistema avanzato di scansione TC mobile intraoperatorio combinato alla navigazione computer-assistita.

Materiali e metodi

Da Maggio 2022 a Settembre 2023 (in accordo con un protocollo di studio dal titolo "Chirurgia Oncologica: Navigazione, Imaging Intraoperatorio e Realtà Virtuale" approvato dal Comitato Etico n° di protocollo 0005504.27-04-2022) 16 pazienti sono stati arruolati in uno studio osservazionale descrittivo retrospettivo con diagnosi di neoplasia primitiva o metastatica di osso e parti molli, per il cui trattamento è stata posta indicazione all'utilizzo di un sistema di navigazione avanzato unito alla TC intraoperatoria al fine di ottenere margini ampi e minimizzando

Tabella I. Casistica operatoria: pazienti arruolati, diagnosi e trattamento.

	Paziente	Data di nascita	Diagnosi	Tipologia di procedura
1	D.T.	28/08/1991	Angioma parti molli regione sovrascapolare sin.	Posizionamento TC guidato di elottrodi per elettrochemioterapia
2	D.C.	29/04/2008	Osteoma osteoide femore distale sin.	Resezione TC navigata + ricostruzione con innesti ossei massivi di BTMS
3	S.D.C.M.	15/04/1986	Osteocondroma periacetabolare dx	Resezione TC navigata
4	M.E.	14/01/1955	Voluminoso sarcoma pleomorfo indifferenziato emibacini sin.	Amputazione interileoaddominale + emisacrectomia sinistra
5	V.L.	14/09/1962	Osteosarcoma L1	Stabilizzazione vertebrale + vertebractomia L1 + ricostruzione con innesto osseo massivo di BTMS e placca in carbonio
6	B.R.	19/06/1961	Condrosarcoma G3 emibacino sin. con coinvolgimento acetabolare	Resezione emibacino ed extrarticolare d'anca + protesi *custom-made* di bacino e anca
7	R.P.	29/12/1959	Cordoma sacrale	Sacrectomia
8	G.V.	05/01/1948	Sarcoma pleomorfo indifferenziato coscia sin.	Inchiodamento endomidollare preventivo + escissione ampia con osteotomia parziale di femore
9	S.F.	27/12/2006	Condroblastoma epifisi prossimale tibia sin.	*Cutterage* della lesione + adiuvanti locali e riempimento con innesti ossei morcelizzati di BTMS
10	D.M.	07/04/2003	Cisti aneurismatica solida collo femore dx	*Cutterage* della lesione + adiuvanti locali e riempimento con innesti ossei morcelizzati di BTMS
11	L.A.	01/03/2007	Condroblastoma periacetabolare dx	*Cutterage* della lesione + adiuvanti locali e riempimento con innesti ossei morcelizzati di BTMS
12	R.M.	05/12/1967	Ca. apice polmonare infiltrante l'articolazione costo-vertebrale + emisoma vertebrale dx D2-D3	Stabilizzazione vertebrale + laminectomia ed emivertebrectomia D2-D3 dx + resezione polmonare atipica
13	M.N.	01/02/1978	Condroma sacrale radiotrattato	Sacrectomia
14	M.O.	10/02/1984	Condrosarcoma emibacino sin.	Amputazione interileoaddominale sin.
15	S.A.	03/07/2007	Ewing extrascheletrico III medio coscia dx	Inchiodamento endomidollare preventivo + escissione ampia con osteotomia parziale del femore e ricostruzione con innesto osseo massivo di BTMS
16	D.A.	23/12/1960	Tumore condromatoso atipico femore distale dx	Resezione navigata sotto guida TC + ricostruzione con innesto osseo massivo di BTMS

l'asportazione di tessuti sani (Tab. I). L'indicazione alla chirurgia TC assistita è stata condivisa e definita, per ognuno dei pazienti arruolati, in sede collegiale multidisciplinare con i membri del *Disease Management Team* (DMT) dei Sarcomi, e inclusa nel consenso informato all'intervento chirurgico previa discussione approfondita col Paziente nei casi selezionati. Un caso di osteoma osteoide è stato incluso nella presente casistica in quanto la lesione risultava persistente e sintomatica in esiti di chirurgia percutanea TC guidata inadeguata eseguita altrove.

Principi di tecnica chirurgica

Il paziente viene posizionato su un tavolo operatorio radiotrasparente (carbonio) nella posizione desiderata per consentire la procedura chirurgica. Viene poi allestito il campo operatorio (arto inferiore, bacino, arto superiore, etc.) (Fig. 1 A-C). Le fasi iniziali dell'intervento chirurgico procedono in modo convenzionale, eseguendo l'accesso chirurgico contemplato per la sede anatomica da trattare, secondo le consuete modalità della procedura di chirurgia oncologica prevista dal planning preoperatorio. Una

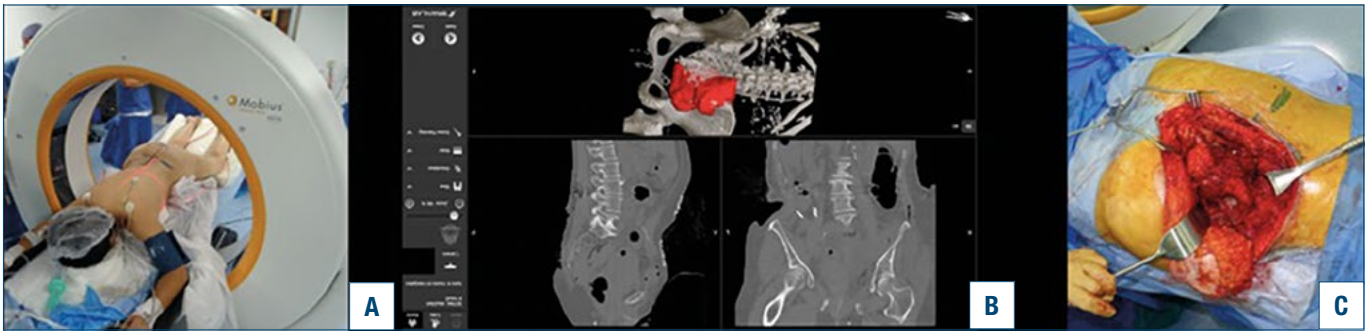


Figura 1. (A) Posizionamento del paziente e acquisizione di scansione TC preoperatoria; (B) *planning* preoperatorio; (C) preparazione dell'accesso chirurgico.

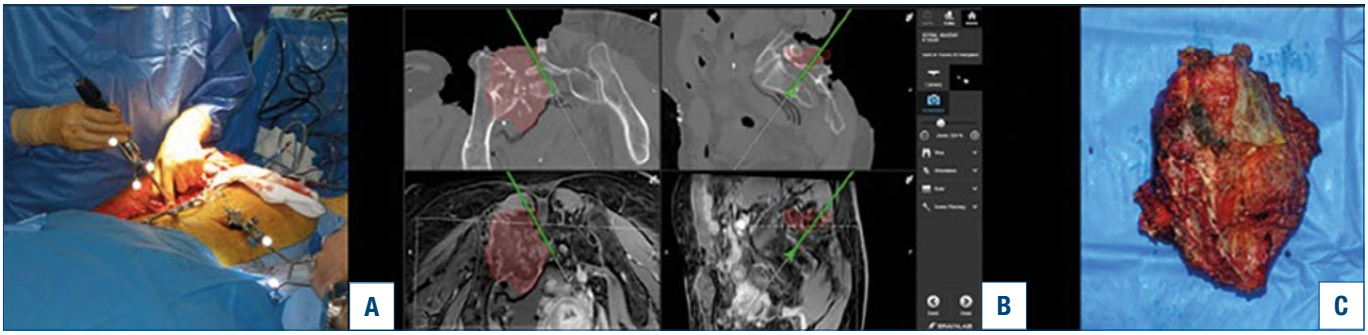


Figura 2. (A) Posizionamento del sistema di riferimento; (B) nuova scansione TC e navigazione della resezione mediante strumenti di precisione riconosciuti dal sistema di navigazione; (C) aspetto macroscopico del pezzo operatorio.

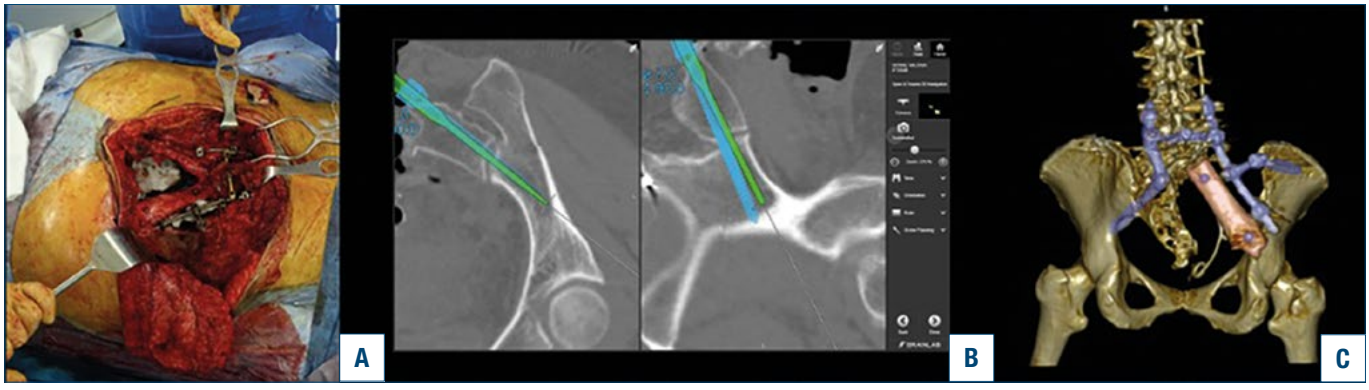


Figura 3. (A) Fase ricostruttiva e impianto di mezzi di sintesi; (B) verifica dell'accuratezza della ricostruzione e del posizionamento dei mezzi di sintesi; (C) ricostruzione 3D eseguito sulla base del controllo TC intraoperatorio finale.

volta preparato l'accesso, si procede al posizionamento di 2 chiodi di Steinmann da 4 mm di solito in sede ossea a qualche centimetro di distanza dal margine di resezione pianificato (purché solidale al sistema) e al successivo assemblaggio del sistema di riferimento (Fig. 2A). In questa fase, massima attenzione deve essere prestata al posizionamento della matrice riflettente che, per consentire una accurata visualizzazione in corso di navigazione, non deve avere ostacoli che si frappongano al sistema di lettura nella piattaforma di navigazione. L'AIRO® CT Scanner (Stryker/Brainlab, Monaco, Germania) viene utilizzato per eseguire la scansione dell'area di interesse, acquisendo immagini TC

a strato sottile del corrispondente sito anatomico. I dati acquisiti vengono trasferiti automaticamente alla piattaforma informatica di navigazione (Vectorvision; Brainlab). È possibile ripetere la scansione TC, con le stesse modalità sovradescritte, ogni qual volta l'operatore lo ritenesse necessario, al fine di orientare il sistema di navigazione in funzione dell'anatomia operatoria che, per definizione, è suscettibile di cambiamenti. Le immagini della lesione, acquisite con queste modalità, sono disponibili e consultabili su monitor dedicati e possono essere navigate mediante l'utilizzo di strumenti di puntamento e altri strumenti di navigazione dotati di marcatori infrarossi. Questo consente di localizzare la lesione, di visualizzarla su tutti i piani dello spazio e di controllare di volta in volta la sicurezza della traiettoria di resezione desiderata (Fig. 2 B, C). Al termine della procedura è possibile eseguire una nuova scansione TC postoperatoria per verificare l'accuratezza della procedura di resezione/escissione e della fase ricostruttiva (Fig. 3 A-C).
Il Sistema si interfaccia con il PACS di Istituto potendo acquisire l'*imaging* di diagnostica preoperatoria digitale qualora sia indicato eseguire un'eventuale fusione/integrazione con le immagini caricate in archivio e archiviando automaticamente tutte le procedure eseguite.

Risultati

L'utilizzo combinato della TC intraoperatoria collegata al sistema di navigazione si è dimostrata efficace nel garantire un'accurata visualizzazione tridimensionale della lesione in tutti i pazienti sottoposti a chirurgia, indipendentemente dalla sede anatomica del tumore e dalla posizione chirurgica. L'aiuto dello strumento di localizzazione, unitamente alla possibilità di introdurre nel campo di navigazione strumenti quali osteotomi, scalpelli, riconosciuti dallo stesso sistema, ha reso possibile, in tutti i casi la definizione diretta e costante dei margini di resezione verificando in tempo reale l'anatomia perilesionale. Specie in sedi anatomiche difficili per la vicinanza al tumore di strutture nobili, in nessun caso si è assistito al danneggiamento di grossi vasi e strutture nervose garantendo, in molti casi, il risparmio di tessuto sano altrimenti sacrificabile con procedura oncologica demolitiva tradizionale. Il sistema TC abbinato *d'emblée* ad un navigatore chirurgico di ultima generazione garantisce il mantenimento della risoluzione spaziale rispetto al sistema di rilevamento, senza rendere necessario il riconoscimento di reperi scheletrici, il cui posizionamento è invece richiesto secondo la tecnica tradizionale. Anche in fase ricostruttiva, quando è richiesta dalla procedura chirurgica, la TC intraoperatoria ha reso la procedura più accurata e sicura rispetto alle tecniche convenzionali: ha permesso di verificare l'adeguatezza di un *curettage* e il successivo riempimento; ha guidato l'impianto preciso di un innesto osseo massivo e la fissazione di mezzi di sintesi in ogni distretto scheletrico utilizzato; ha facilitato nel rachide l'introduzione di viti transpeduncolari in modo rapido e sicuro rispetto alla tecnica standard. In tutti i casi in cui è stata eseguita una resezione complessa i margini chirurgici sono stati oncologicamente adeguati come pianificato durante il *planning* pre-operatorio (Tab. I). In questi casi l'esame istologico definitivo sui pezzi operatori è sempre risultato oncologicamente adeguato secondo quanto descritto da Enneking et al. [1]. In tutti i casi è stato possibile conseguire l'obiettivo terapeutico proposto in sede di DMT e pianificato in sede di *planning* pre-operatorio. In nessun caso si è assistito a complicanze generali né locali postoperatorie immediate e precoci, quali ematomi, sieromi, fratture, infezioni, deficit vascolonervosi, etc.

Discussione

La chirurgia ortopedica oncologica, per la finalità intrinseca della radicalità a cui mira è, a differenza della chirurgia ortopedica convenzionale, invasiva per definizione; spesso richiede ampie resezioni ossee, esteso sacrificio di tessuti molli o di entrambi e ampie ricostruzioni con conseguente limitazione funzionale severa. Per molto tempo, il trattamento classico per i Pazienti con grandi tumori maligni degli arti, del bacino e del rachide è stata la chirurgia demolitiva. Negli ultimi decenni, grazie alla disponibilità di un *imaging* sempre più accurato, di protocolli efficaci di chemioterapia neo-/adiuvante, al miglioramento delle tecniche di ricostruzione e artroplastica, la maggior parte dei casi può essere trattata ricorrendo a procedure di *Limb salvage Surgery*. L'avvento di sistemi *software* e strumenti di navigazione ha consentito l'introduzione e lo sviluppo, anche nell'ambito dell'ortopedia oncologica, del concetto di chirurgia di precisione. La chirurgia di precisione trova il suo campo di utilizzo sia in fase demolitiva che ricostruttiva consentendo al paziente oncologico di ambire ad una riduzione della disabilità funzionale e psicologica.
La chirurgia assistita dalla navigazione si fonda sulla fusione delle informazioni strumentali del paziente e la sua anatomia attraverso l'uso del tracciamento e della registrazione delle immagini acquisite in fase preoperatoria e/o intraoperatoria. Qualsiasi strumento chirurgico con asse lineare può essere calibrato e tracciato dal sistema di navigazione. Le posizioni spaziali del puntatore di navigazione e degli strumenti chirurgici (come fresa ossea, trapano, sega ad ultrasuoni, etc.) possono essere tracciate in tempo reale in relazione all'anatomia del paziente, sulle immagini virtuali preoperatorie. La resezione può quindi essere eseguita utilizzando un osteotomo posizionato secondo l'orientamento guidato dalla sonda di navigazione oppure con il supporto di un osteotomo "navigato" in modo che la posizione e la profondità dello strumento possano essere apprezzata punto per punto durante la resezione [10,11].

L'approccio computer-assistito ha suscitato grande interesse tra i chirurghi ortopedici che lavorano in ambito oncologico da quando Krettek et al. [12] e Hu'fner et al. [13] hanno sperimentato, per primi, l'uso della navigazione basata sulla TC nella resezione di tumori pelvici e sacrali. Da quanto descritto, entrambi gli Autori hanno fatto ricorso a strumenti di navigazione per guidare l'orientamento delle osteotomie durante l'intervento chirurgico e hanno concluso che la chirurgia computer assistita è un potenziale strumento di miglioramento dell'accuratezza delle resezioni in sedi anatomicamente complesse.
Wong et al. [14,15] ricorrendo alla fusione di immagini TC/risonanza magnetica (RM) nella chirurgia dei tumori assistita da sistemi di navigazione ha osservato una delineazione dettagliata dei margini del tumore, consentendo una definizione precisa del piano di resezione ossea prevista dalla pianificazione preoperatoria. In un caso clinico, Wong et al. [16] hanno mostrato i risultati in un paziente sottoposto a resezione periacetabolare e successiva ricostruzione con protesi pelvica custom-made utilizzando la chirurgia computer assistita, che prevedeva, nel planning preoperatorio, sia i piani di resezione sia la posizione della protesi pelvica. La pianificazione della navigazione preoperatoria che includeva informazioni sulla resezione e sulla ricostruzione, in questo caso, era stata implementata da un sistema di navigazione intraoperatoria. La chirurgia dei tumori computer assistita aveva contribuito a migliorare quindi l'accuratezza di una resezione già pianificata e abbinare la ricostruzione di un difetto osseo complesso.
Cartiaux et al. [17], in uno studio sperimentale che vedeva coinvolti singolarmente quattro chirurghi ortopedici senior esperti, invitati a simulare su modelli plastici delle procedure standard di resezione pelvica, ha dimostrato che la loro capacità di ottenere un margine chirurgico di resezione di 10 mm (con una tolleranza superiore o inferiore di 5 mm) era solo del 52%; in uno studio successivo, la precisione delle osteotomie veniva significativamente migliorata dal ricorso ad un sistema di navigazione avanzato e ad osteotomi navigati (con uno scarto nell'accuratezza dell'osteotomia di 2,8 mm contro i 5,2 mm degli osteotomi tradizionali) [18].
Per minimizzare l'errore di registrazione, ossia il grado di discrepanza tra l'anatomia del paziente e le immagini virtuali acquisite, Cho et al.[19] hanno descritto una tecnica di resezione ossea assistita dalla navigazione che ha come principio di base il posizionamento preoperatorio di più fili di Kirschner a definire i margini di malattia. La successiva scansione TC, eseguita per l'accoppiamento delle posizioni dei fili di Kirschner (reperi anatomici) con i punti di riferimento nel sistema di immagini virtuali, ha reso possibile "navigare" la resezione minimizzando l'errore di registrazione a valori di circa 0,3-1,7 mm.
La TC intraoperatoria rappresenta una grande evoluzione rispetto ai sistemi tradizionali di navigazione: la possibilità di poter acquisire ripetutamente delle nuove immagini su cui impostare/riprogrammare la navigazione durante l'intervento, ogni volta che lo si ritiene necessario, consente di non perdere mai accuratezza, in ogni momento, della procedura chirurgica.
Dopo ogni acquisizione intraoperatoria delle immagini TC, l'accuratezza della registrazione è verificata attraverso una sonda di navigazione che fissa punti di riferimento su osso e parti molli. Questa verifica di accuratezza *real-time* tra anatomia intraoperatoria e immagini virtuali, indispensabile per poter condurre in modo sicuro l'intervento pianificato, è uno dei punti di forza della TC intraoperatoria associata ad un sistema di navigazione.
La registrazione dell'immagine intraoperatoria sul paziente non si fonda più solo sull'anatomia muscoloscheletrica; sebbene sia vero che, dopo l'incisione cutanea e la manipolazione chirurgica, i tessuti molli si deformeranno e la posizione anatomica in tempo reale cambierà rispetto a quella delle immagini virtuali preoperatorie, la TC consente, attraverso una nuova scansione, di orientare nuovamente il sistema di navigazione e l'operatore. In questo modo i chirurghi possono eseguire procedure estremamente accurate, non solo sull'osso ma anche sui tessuti molli.
L'interpretazione errata delle informazioni di navigazione può determinare una resezione imprecisa e influire negativamente sui risultati clinici. La possibilità di acquisire ed elaborare nuove immagini attraverso la TC intraoperatoria riduce questo *bias* mantenendo alto il livello di accuratezza in termini di sicurezza oncologica. Con un *feedback* visivo istantaneo, la navigazione intraoperatoria consente ai chirurghi di localizzare con precisione tutte le strutture anatomiche e patologiche. D'altra parte, la tecnologia implica ancora l'utilizzo di strutture di navigazione ingombranti, lunghi tempi di configurazione e la mancanza di strumenti di taglio affidabili per la navigazione; gli sviluppi futuri di questa metodica potrebbero prevedere l'utilizzo di un braccio robotizzato integrato con il navigatore e il tavolo chirurgico, e di un visore 3D con sommazione delle immagini e sovrapposizione alla visione del campo operatorio. Ulteriore svantaggio, al momento, è l'elevato prezzo del dispositivo e la necessità di un prolungato periodo di apprendimento sia dei chirurghi che del personale di Radiologia e di Sala Operatoria; va quindi idealmente riservato a Centri di riferimento con adeguata *expertise* in Ortopedia Oncologica.
L'importanza di ottenere un margine oncologicamente adeguato, specialmente in sedi anatomiche complesse (pelvi, sacro, vertebre, cingoli) è chiaramente riportato in Letteratura, mentre una quota del 10-15% di margini inadeguati riportata in varie revisioni di casistica rappresenta un importante limite alla guarigione di questi pazienti [20,21]. Quindi la possibilità di utilizzare un sistema di navigazione

portatile, aumentando la precisione degli interventi chirurgici migliora la qualità del margine e quindi la possibilità di sopravvivenza di questi pazienti [22]. Anche in caso di *curettage* e semplici ricostruzioni la TC intraoperatoria navigata migliora la qualità dei risultati previsti.
L'esiguità della casistica e l'eterogeneità della stessa (tumori sia benigni che maligni che contemplano approcci chirurgici differenti e con diversa necessità di margini adeguati) rappresentano il limite principale dello studio; tuttavia, si tratta di tumori rari e praticamente ubiquitari, la cui diagnosi di natura esula dall'evidenza di validità, scaturita da questa l'analisi preliminare, di un sistema a supporto e di perfezionamento dell'atto chirurgico di asportazione della neoplasia inteso come capacità manuale operatore-dipendente, indipendentemente dalla procedura chirurgica prevista per il singolo caso. L'ampliamento della casistica, un adeguato *follow-up* oncologico e una comparazione con tecniche chirurgiche standard (in termini di recidiva locale, tempi operatori, complicanze perioperatorie, etc.) con valutazione degli *outcomes* a medio e lungo termine saranno oggetto di ulteriori studi.

Conclusioni

Già evidenti negli ultimi anni i progressi nello sviluppo di strumenti di navigazione in chirurgia ortopedica, a nostro avviso, il livello di esperienza maturato nell'ambito della chirurgia ortopedica oncologica assistita da sistemi di navigazione è tale da rendere fortemente indicata l'introduzione della TC intraoperatoria con navigatore nella pratica chirurgica.
La TC Intraoperatoria abbinata nativamente ad un Navigatore Chirurgico di ultima generazione, che fonde in un unico strumento due tecnologie di comprovata efficacia (Tomografia Computerizzata e Sistema di Navigazione Intraoperatoria), permette di ottenere un controllo diretto, in tempo reale, delle procedure chirurgiche, con una precisione inferiore al millimetro. È ora possibile acquisire direttamente sul campo operatorio, in qualsiasi momento dell'intervento chirurgico, delle immagini TC ad alta definizione abbinandole al NC dedicato e fondendo il tutto con gli esami preoperatori già presenti nel sistema di archiviazione delle immagini.
Questa sofisticata tecnologia, integrata agli esami radiostrumentali preoperatori (TC, RM, TC PET, etc.) ottimizza la pianificazione chirurgica; questa così può essere discussa in sede multidisciplinare (DMT) con il Radioterapista per eventuali terapie adiuvanti locali, con l'Oncologo Medico, verificando, con Radiologo e Medico Nucleare, le eventuali aree vitali della neoplasia e modificando in base a questo il *planning* preoperatorio, e con l'Anatomopatologo che analizzerà infine la qualità oncologica dei margini chirurgici. Questa tecnologia consente di eseguire l'intervento chirurgico verificando direttamente sul campo operatorio, in tempo reale, la completezza e l'accuratezza della procedura chirurgica programmata (resezione ossea ed eventuale ricostruzione piuttosto che escissione di neoplasia delle parti molli). Al momento la TC intraoperatoria con Navigatore rappresenta la soluzione più avanzata e versatile in questo settore.

Contributo degli Autori

JB, NS, BR, AL, CZ hanno contribuito alla ideazione e stesura del manoscritto; CZ, AL, RB ideazione e revisione finale del testo; BR redazione editoriale; SM, EC, FC, VA stesura casistica e figure.

Funding

Lo studio riportato nella presente pubblicazione è stato finanziato dal Ministero Italiano della Salute, progetto RCR-2022-23682299 della Rete Italiana Apparato Muscolo-Scheletrico (RAMS).

Dichiarazione etica

Il contenuto è conforme alla legislazione vigente in materia di etica della ricerca.

Bibliografia

1 Gerrand C, Athanasou N, Brennan B, et al. UK guidelines for the management of bone sarcomas. Clin Sarcoma Res. 2016;6:1-21. https://doi.org/10.1186/s13569-016-0047-1

2 Choong P, Pang G. Cancer council Australia sarcoma guidelines working party. What are the factors influencing the extent of surgery in BSTTs? https://wiki.cancer. org.au/australiawiki/index.php?oldid=128421 cited 2019 Nov 13.

3 Mezger U, Jendrewski C, Bartels M. Navigation in surgery. Langenbeck's Arch Surg. 2013;398(4):501-514. https://doi.org/10.1007/s00423-013-1059-4

4 Wong KC, Kumta SM. Use of computer navigation in orthopaedic oncology. CurrSurg Rep. 2014;2:47. https://doi.org/10.1007/s40137-014-0047-0

5 Zheng G, Nolte LP. Computer-assisted orthopedic surgery: current state and future perspective. Front Surg. 2015;2:66. https://doi.org/10.3389/fsurg.2015.00066

6 Cheong D, Letson GD. Computer-assisted navigation and musculoskeletal sarcoma surgery. Cancer control. J. Moffitt Canc. Center. 2011;8:171-176. https://doi.org/10.1177/107327481101800304.

7 Wong KC, Kumta SM, Chiu KH, et al. Precision tumour resection and reconstruction using image-guided computer navigation. J Bone Joint Surg Br. 2007;89:943-947. https://doi.org/10.1302/0301-620X.89B7.19067

8 Cartiaux O, Docquier PL, Paul L, et al. Surgical inaccuracy of tumor resection and reconstruction within the pelvis: an ex-

perimental study. Acta Orthop. 2008;79(5):695-702. https://doi.org/10.1080/17453670810016731

9 Jeys L, Matharu GS, Nandra RS, Grimer RJ. Can computer navigation-assisted surgery reduce the risk of an intralesional margin and reduce the rate of local recurrence in patients with a tumour of the pelvis or sacrum? Bone Joint Lett J. 2013;95- B(10):1417-1424. https://doi.org/10.1302/0301-620X.95B10.31734

10 Jeys L, Matharu GS, Nandra RS, Grimer RJ. Can computer navigation-assisted surgery reduce the risk of an intralesional margin and reduce the rate of local recurrence in patients with a tumour of the pelvis or sacrum? Bone Joint J. 2013;95-B(10):1417-24. https://doi.org/10.1302/0301-620X.95B10.31734

11 So TY, Lam YL, Mak KL. Computer-assisted navigation in bone tumor surgery: seamless workflow model and evolution of tech- nique. Clin Orthop Relat Res. 2010;468(11):2985-91. doi:10. 1007/s11999-010-1465-7.

12 Krettek C, Geerling J, Bastian L, et al. Computer aided tumor resection in the pelvis. Injury. 2004;35(Suppl 1):S-A79-83. https://doi.org/10.1016/j.injury.2004.05.014

13 Hüfner T, Kfuri M Jr, Galanski M, et al. New indications for computer-assisted surgery: tumor resection in the pelvis. Clin Orthop Relat Res. 2004;426:219-25. https://doi.org/10.1097/01.blo.0000138958.11939.94.

14 Wong KC, Kumta SM, Chiu KH, et al. Precision tumour resec- tion and reconstruction using image-guided computer navigation. J Bone Joint Surg Br. 2007;89:943-7. https://doi.org/10.1302/0301-620X.89B7.19067

15 Wong KC, Kumta SM, Antonio GE, Tse LF. Image fusion for computer-assisted bone tumor surgery. Clin Orthop Relat Res. 2008;466:2533-41. https://doi.org/10.1007/s11999-008-0374-5

16 Wong KC, Kumta SM, Chiu KH, et al. Computer assisted pelvic tumor resection and recon- struction with a custom-made prosthesis using an innovative adaptation and its validation. Comput Aided Surg. 2007;12(4):225-32. https://doi.org/10.3109/10929080701536046.

17 Cartiaux O, Docquier PL, Paul L, Francq BG, Cornu OH, Delloye C, et al. Surgical inaccuracy of tumor resection and reconstruc- tion within the pelvis: an experimental study. Acta Orthop. 2008;79(5):695-702. https://doi.org/10.1080/17453670810016731.

18 Cartiaux O, Banse X, Paul L, et al. Computer-assisted planning and navigation improves cutting accuracy during simulated bone tumor surgery of the pelvis. Comput Aided Surg. 2013;18(1-2):19-26. https://doi.org/10.3109/10929088.2012.744096.

19 Cho HS, Oh JH, Han I, Kim HS. Joint-preserving limb salvage surgery under navigation guidance. J Surg Oncol. 2009;100(3):227-32. https://doi.org/10.1002/jso.21267

20 Dürr HR, Bakhshai Y, Rechl H, Tunn PU. Tumor resektion: Wie weit ist weit genug? [Resection margins in bone tumors: what is adequate?]. Unfallchirurg. 2014;117(7):593-9. German. https://doi.org/10.1007/s00113-013-2475-1. PMID: 25030958.

21 Guder WK, Hardes J, Nottrott M, Streitbürger A. Hemipelvektomie bei Sarkomen des Beckens [Hemipelvectomy for pelvic sarcomas]. Orthopade. 2019;48(9):760-767. German. https://doi.org/10.1007/s00132-019-03789-4. PMID: 31392386.

22 Choi H, Park Y, Lee S, et al. A portable surgical navigation device to display resection planes for bone tumor surgery. Minim Invasive Ther Allied Technol. 2017;26(3):144-150. https://doi.org/10.1080/13645706.2016.1274766. Epub 2017 Jan 13. PMID: 28084143.