

Grenzen der CT-basierten Computernavigation in der Wirbelsäulen Chirurgie

Zusammenfassung

Computerassistierte und navigationsgesteuerte Operationsverfahren haben ihre erste Applikation im Bereich der Wirbelsäulen Chirurgie gefunden. Inzwischen sind die Basisprinzipien auf andere Operationsverfahren, wie Verschraubung am Becken und Navigation an Röhrenknochen, erweitert worden.

Allen Verfahren gemeinsam ist, dass sie mit Ausnahme der C-Arm-Navigation auf dreidimensionalen (3D-) Datensätzen beruhen. Die Gewinnung und Aufbereitung der Daten, wie auch die Planung, erfordern verschiedene Einzelschritte, die alle letztendlich die spätere Genauigkeit und den Erfolg der Navigation gewährleisten müssen. Die Einzelschritte bis hin zur Navigation und deren Fehlermöglichkeiten, aber auch deren mögliche Ursachen werden dargestellt.

Schlüsselwörter

Computerassistierte und navigationsgesteuerte Operationsverfahren · 3D-Datensätze

Computerassistierte und navigationsgesteuerte Operationsverfahren haben ihre erste Applikation im Bereich der Wirbelsäulen Chirurgie gefunden [1]. Die klinischen Anwendungen haben sich zunächst auf die Lendenwirbelsäule beschränkt und zeigten eine Verbesserung der Präzision der transpedikulären Schraubenlagen [2, 3, 4].

Zwischenzeitlich sind diese Basisprinzipien der Computernavigation auf verschiedene Operationsverfahren erweitert worden, so wird beispielsweise versucht auch die übrigen Abschnitte der Wirbelsäule navigationsgesteuert zu instrumentieren [5, 6]. Andere Gruppen beschäftigen sich mit der navigierten Verschraubung am Becken [7] oder der computerunterstützten Navigation an Röhrenknochen [8] inklusive der Verriegelung von Marknägeln.

Grundlage bzw. Voraussetzung aller computerunterstützten Navigationsverfahren – mit Ausnahme der C-Arm-Navigation – ist, dass zunächst ein 3D-Datensatz (CT oder MRT) erhoben werden muss. Dieser stellt die Grundlage aller weiteren Schritte dar, hat aber bereits die Einschränkung, dass Veränderungen des Skeletts nach Abschluss der Untersuchung, z. B. durch Lagerung des Patienten, Lagewechsel von Fragmenten o. ä. nicht mehr erfasst werden können.

Der nächste folgende Schritt ist die Rekonstruktion (Aufbereitung) dieses Datensatzes, um ihn für die Navigation verwenden zu können. Nach dieser Maßnahme, welche im Wesentlichen in der manuellen Auswahl eines geeigneten

Schwellenwerts und Kontrasts besteht, kann dieser Datensatz für die Planung der späteren Navigation genutzt werden (präoperative Planung).

Mit diesem so aufbereiteten Datensatz kann dann intraoperativ der Abgleich zwischen der virtuellen Welt (Datensatz im Rechner) und der realen Welt (Patient auf dem Operationstisch) erzielt werden.

Erst wenn dieser Abgleich geglückt ist, beginnt die eigentliche Navigation. Die Grenzen der Computernavigation ergeben sich aus den einzelnen Teilschritten und aus den Systemkomponenten. Im folgenden werden diese dargestellt.

Systemkomponenten

Alle Navigationssysteme basieren auf der Hardwarebasis sog. Workstationrechnern, deren Sinn und Zweck es ist, in möglichst kurzer Zeit und während der Operation in einem sog. Realtime-Modus den rekonstruierten CT-Datensatz, jeweils in 3D-Qualität darzustellen.

Die Rechengeschwindigkeit beeinflusst direkt die intraoperative Darstellungsweise. Je leistungsfähiger der Rechner ist und je höher die Kapazität des Systems ist, desto besser können dreidimensionale Datensätze dargestellt werden.

Priv.-Doz. Dr. F. Gebhard
Abteilung für Unfallchirurgie,
Hand- und Wiederherstellungschirurgie,
Universität Ulm, 89070 Ulm
E-Mail: florian.gebhard@medizin.uni-ulm.de

The limits of CT-based computer navigation in spinal surgery

Abstract

Computer-assisted and navigation-based therapeutic tools have found their first application in the field of spinal surgery. Meanwhile, the basic principles have been extended to other procedures, such as screw osteosynthesis of the pelvis and navigation of long bones.

Commonly, all procedures except C-arm navigation are based on three-dimensional data sets. Data acquisition and processing as well as planning require specific steps, which should guarantee adequate accuracy and successful navigation. All steps up to intraoperative navigation and potential pitfalls in every part of the interaction are demonstrated, with reasons of undesired results presented.

Keywords

Computer-assisted navigation-based surgical procedures · 3-D data sets



Abb. 1 ▲ Intraoperativer Aufbau eines Navigationssystems (hier: Surgigate, Medivision) während einer dorsalen Instrumentation an der Halswirbelsäule. Im Vordergrund die Kabel, mit denen jedes Instrument an das System angeschlossen werden muss

Einschränkend muss hier aber erwähnt werden, dass derzeit in der Regel nur eine Polygraphik (Oberflächendarstellung) zur Verfügung steht. Der Datensatz an sich würde aber auch eine komplette Dreidimensionalität erlauben (Voxelgraphik, Volumengraphik).

Das klinische Problem besteht nun darin, dass die Wirbelsäulenavigation entwickelt wurde für den Bereich der Lendenwirbelsäule. In diesem Bereich ist es in der Regel ausreichend, 3 Wirbelkörper im CT-Datensatz wiederzufinden, d. h. je ein Wirbel kranial und kaudal des oder der frakturierten Wirbelkörper ist ausreichend. Anhand dieser meist 90–100 CT-Schichten kann die Lokalisation und Planung der Wirbelkörper prä- wie auch intraoperativ ausreichend durchgeführt werden.

Im Gegensatz hierzu hat die klinische Erfahrung jedoch gezeigt, dass es im thorakalen Bereich erforderlich ist, wesentlich mehr Wirbelkörper im CT-Datensatz zu haben, um eine exakte Höhenlokalisierung für das Matching zu erreichen. So müssen thorakal prinzipiell die nächsten beiden kaudalen Wirbelkörper zu dem zu navigierenden untersten Wirbelkörper mit erfasst werden, da die Überlappung der thorakalen Dornfortsätze nach kaudal wesentlich ausgeprägter ist als lumbal. Hier werden in der Regel mindestens 5–7 Wirbelkörper erfasst, wozu Schichtzahlen von deutlich über 200 erforderlich sind. Dabei ist allerdings eine Obergrenze durch das jeweilige Navigationssystem vorgegeben.

In dem von uns verwendeten System kann beispielsweise ein CT mit

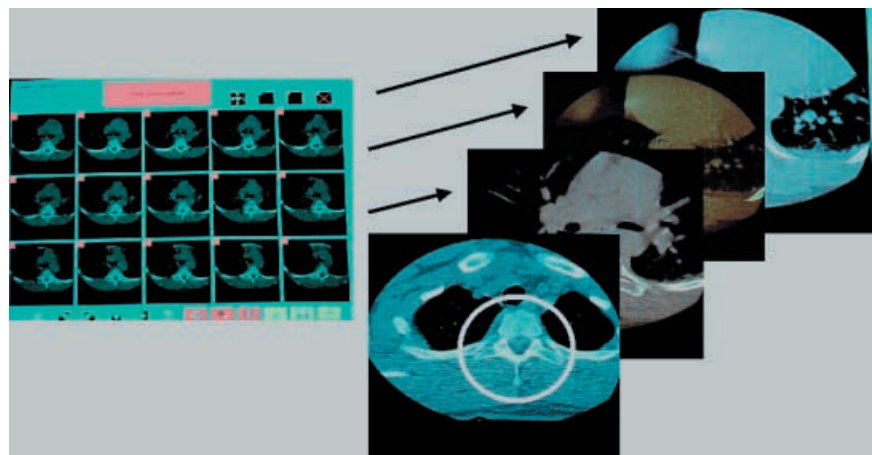


Abb. 2 ▲ Präoperativer CT-Datensatz einer thorakalen Wirbelsäulenfraktur ohne ausreichendes Zoomen. In den CT-Schichten ist gut zu erkennen, dass der interessierende Bereich der Wirbelsäule (Kreis) nur einen geringen Anteil der dargestellten Strukturen umfasst

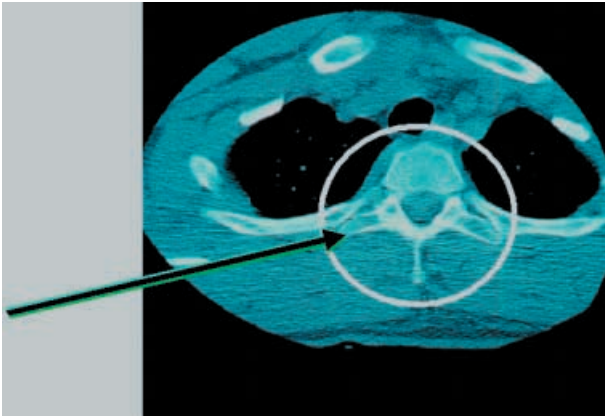


Abb. 3 ◀ **Erforderlicher Zoombereich für ein Navigations-CT an der thorakalen Wirbelsäule**

maximal 250 Schichten rechnerisch bearbeitet werden. Daraus ergeben sich nun 2 Lösungsmöglichkeiten:

- entweder durch einen sehr hohen Schichtabstand eine sehr große Strecke der Wirbelsäule zu scannen, wobei gleichzeitig dann die Detailtreue an der Oberfläche nachlässt,
- oder sich auf kurze Schichtabstände und damit hohe Auflösung zu konzentrieren, was dann aber im Bereich der thorakalen Wirbelsäule aus oben genannten Gründen nicht möglich ist.

Intraoperativ beeinflussen die Systemkomponenten entscheidend den navigierbaren Raum. Die Kameraausrichtung bzw. das von der Kamera erfasste Feld begrenzt die Bewegungsmöglichkeiten im OP. Es gibt Systeme, bei denen nur ein röhrenförmiges Feld mit einem Durchmesser von 50 cm getracked wird, andere Systeme sind in der Lage, ein würfelförmiges Feld mit einer Kantenlänge von 1,5 m zu verfolgen. Im letzteren Falle ist die Bewegungsfreiheit selbstverständlich viel größer (Abb. 1).

Die Objektverfolgung erfolgt mehrheitlich optoelektronisch im Infrarotbereich. Zwei Prinzipien sind hier konkurrierend:

- aktive LED auf den Instrumenten, hohe Genauigkeit, geringer Verschleiß aber damit viele Kabelverbindungen im Operationsgebiet (s. Abb. 1);
- passive Reflektoren auf den Instrumenten und damit kabellose Instrumente, u. U. reduzierte Genauigkeit und Verschleiß durch Oberflächenabrieb.

Datentransfer

Wie bereits mehrfach erwähnt, steht und fällt die Qualität eines Navigationsdatensatzes mit dessen Vollständigkeit und dessen Umfang. Die Voraussetzung für eine computergestützte navigierte Wirbelsäulenoperation ist der Transfer der CT-Daten in den Navigationsrechner. Die Voraussetzung hierfür ist, dass eine Kompatibilität der beiden Systeme besteht.

Es ist zwar theoretisch so, dass sich die Datensätze der CT am sog. DICOM-Standard orientieren, die tägliche Praxis zeigt jedoch, dass es hierbei Untertypen (Dialekte) gibt, die letztendlich in Anpassungsschwierigkeiten der Systeme münden.

Beim Transfer des Datensatzes ist es erforderlich, dass man von Anfang an auf eine korrekte Erstellung der CT-Daten achtet, da die meisten Navigationssysteme Spiralen mit überlappenden Schichten o. ä. nicht auswerten können. Das Scanfeld muss bei der Untersuchung adaptiert („field of view“) bzw. gezoomt werden (Abb. 2) und damit primär an das CAS-System adaptiert werden. Spätestens hier beginnt oft die erste Problematik, da dieser Datensatz ent-

scheidend für die Rekonstruktion der Knochenoberfläche ist und damit für auch für alle weiteren Schritte.

Artefakte und nicht interessierende Skelettabschnitte (Abb. 3) beeinflussen die spätere Qualität des zur Navigation genutzten und aufbereiteten (Planung) Datensatzes.

Beim Transfer muss dann auch bekannt sein, wie viele Schichten gemacht wurden, um zu überprüfen, ob die gleiche Anzahl von Schichten auch auf dem Navigationsrechner angekommen sind. Sollte dies nicht der Fall sein, gibt es Schwierigkeiten in der Höhenlokalisierung, da fehlende Schichten zur Verkürzung der Abstände führen. Daraus resultiert ein mathematisch nicht korrektes Rechenmodell, sodass auch die falsche Höhe eines Wirbelkörpers die Navigation negativ beeinflusst.

Es dürfen keine Daten ausser reinen CT-Schichten übertragen werden (z. B. Scouts etc.) sonst kann keine 3D-Rekonstruktion erstellt werden.

Planung und Matching

Um, wie bereits ausgeführt, den intraoperativen Abgleich zwischen virtueller Welt (CT-Datensatz) und der realen Welt (Patient auf dem Operationstisch) zu erstellen, müssen dem Navigationssystem zunächst wiederauffindbare Punkte definiert werden. Dies wird subsumiert unter dem Begriff „Paired-point-Matching“. Diese Methode benutzt nicht den 3D-rekonstruierten Datensatz und ermöglicht daher immer gleiche Qualität, unabhängig von der Knochenqualität. Es gibt mittlerweile auch Systeme, die auf ein präoperatives Definieren dieser Punkte verzichten können.

Vor der Planung des Matchings muss die Oberfläche des Knochens de-

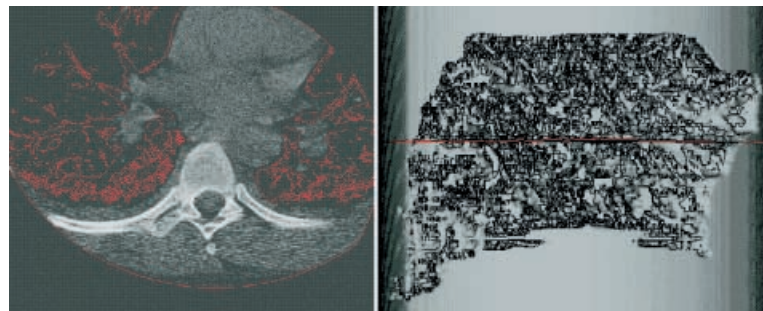


Abb. 4 ▲ **Rohdatensatz zur Planung auf dem Navigationsrechner. Zunächst erfasst (rot umrandet) ist der Weichteilanteil, daher auch im 3D-Modell (rechts) keine Darstellung von knöchernen Strukturen**

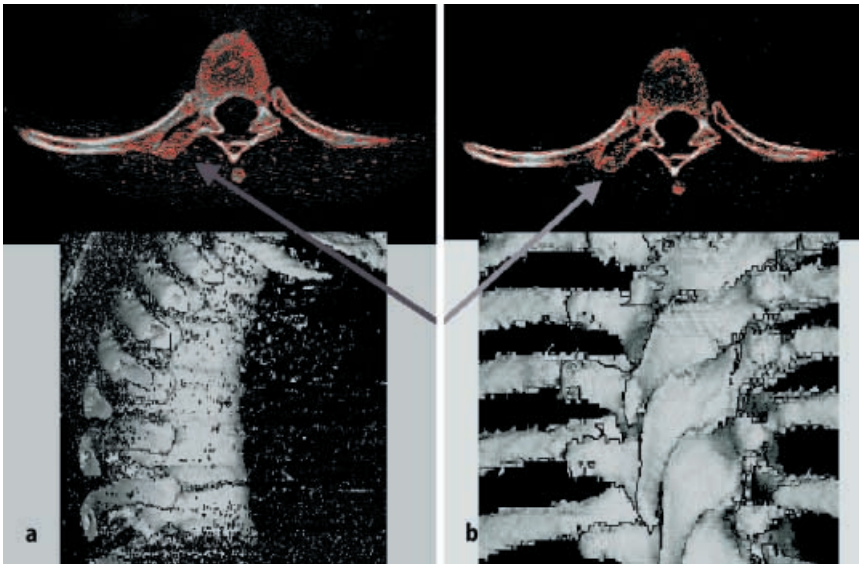


Abb. 5a,b. ▲ Einfluss des Schwellenwertes (threshold) auf die Rekonstruktion der Oberfläche. a Die Oberfläche des Querfortsatzes erscheint ausreichend erfasst (rote Umrandung), im 3D-Modell viele Artefakte. b Die Oberfläche des Querfortsatzes ist nicht ausreichend erfasst, keine klare Kontur erkennbar (rote Umrandung), im 3D-Modell ungenaue Oberfläche, für das Surfacematching nicht geeignet – Gefahr der sog. Verkipfung des Datensatzes

finiert werden, dies geschieht über einen sog. Schwellenwert („threshold“, Abb. 4). Dieser muss insbesondere bei Artefakten oder osteoporotischem Knochen manuell gewählt werden, denn eine nicht korrekt errechnete Oberfläche führt zu gefährlichen Fehlern im Navigationssystem. Zu erkennen ist dies präoperativ an der Konturierung des kortikalen Knochen während der Wahl des Schwellenwertes (Abb. 5). Ist der Wert zu hoch gewählt, wird osteoporotischer und weniger dichter Knochen unterdrückt und somit eine falsche Oberfläche errechnet.

In allen Systemen müssen diese Punkte für das „Paired-point-Matching“ dergestalt im Rechner definiert werden, dass gewährleistet ist, dass sie intraoperativ mit einer ausreichenden Wahrscheinlichkeit auch wieder aufgefunden werden können. Die Identifikation solcher Vermessungspunkte („landmarks“) gelingt im Bereich der Lendenwirbelsäule (LWS) durch die prominenten Processus articulares wesentlich einfacher als beispielsweise im Bereich der Brustwirbelsäule (BWS).

In diesem Zusammenhang ist es sehr wichtig darauf zu achten, dass diese drei Punkte möglichst eine 3D-geometrische Fläche aufspannen, da bei Lokalisation in einer Ebene bzw. auf einer Geraden eine beliebige Zuordnung zu jedem Wirbelkörper möglich wäre.

Die chirurgische Exposition des zu operierenden Wirbelsäulenabschnitts ist in der klinischen Praxis für die Navigation in etwas umfangreicherem Maße erforderlich, als man es bislang praktiziert hat. Zunächst muss in allen Fällen der zu navigierende Wirbelkörper eindeutig definiert werden. Ein Navigationssystem kann nicht entscheiden, welcher Wirbelkörper vorliegt, d. h., man muss zunächst sicher sein, dass man den richtigen Wirbelkörper matcht. Zu diesem Zweck ist sogar in der Regel eine Durchleuchtung erforderlich.

Dann werden Schritt für Schritt die geplanten Punkte am nicht frakturierten Wirbelkörper abgegriffen, nachdem zu-

nächst eine Markierung (data reference base) angebracht wurde (Abb. 6a). Das primär erreichte sog. Matchingergebnis ist die mathematische Annäherung der 3–4 abgegriffenen Punkte mit der Oberfläche des Datensatzes.

Eine Verbesserung der Genauigkeit in der Abstimmung der beiden Situationen „reale Welt (Operation)“ und „virtuelle Welt (Datensatz)“ wird erreicht, indem zusätzlich ein sog. Surfacematching (Oberflächenmatching) hinzugefügt wird. Hierbei werden weitere 12 oder mehr Punkte auf der Oberfläche des Wirbelkörpers abgegriffen. Diese zusätzliche Punktwolke wird mit den bereits zuvor gewonnenen Daten verrechnet und in Übereinstimmung mit dem anvisierten Wirbelkörper gebracht (s. Abb. 6b).

Im Gegensatz zum Paired-point-Matching basiert das Surfacematching direkt auf dem 3D-Datensatz, welcher in seiner Qualität abhängig ist von den Dichtedifferenzen aller abgebildeter Knochenanteile. Sind die Dichteunterschiede sehr groß, z. B. durch Rippen des knöchernen Thorax bei nicht ausreichend gezoomtem Bild, so ergibt sich für das Navigationssystem automatisch durch den Segmentierungsprozess eine Trennungsschärfe für die Strukturen niedriger Dichte (osteoporotischer Knochen – Weichteile) (s. Abb. 5).

Beim Surfacematching gibt es folgende Probleme: Das Surfacematching basiert im Gegensatz zum Paired-point-Verfahren auf dem errechneten 3D-Modell. Eine unpräzise errechnete 3D-Oberfläche macht das Navigieren unmöglich und sogar gefährlich. Bei sehr weichem Knochen kann beim Oberflä-

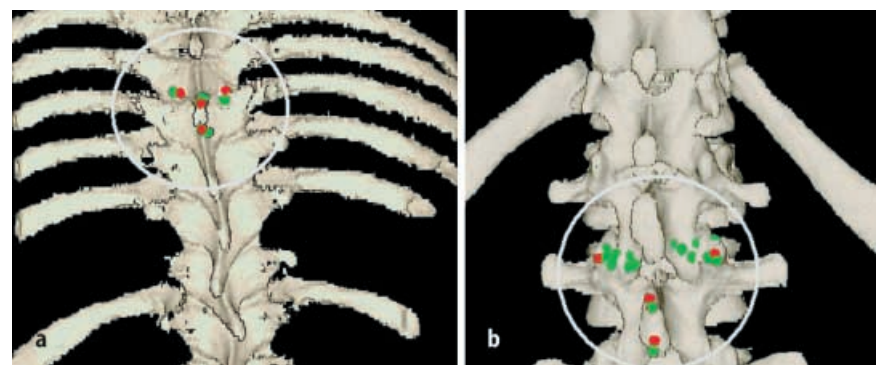


Abb. 6a,b. ▲ Korrektes Paired point matching (a), die roten Punkte entsprechen der präoperativen Planung, die grünen zeigen die intraoperative Identifizierung der vorgegeben „landmarks“. b Korrektes Surface-Matching mit symmetrischer Darstellung der an der Oberfläche des Knochen digitalisierten Punkte (grün)

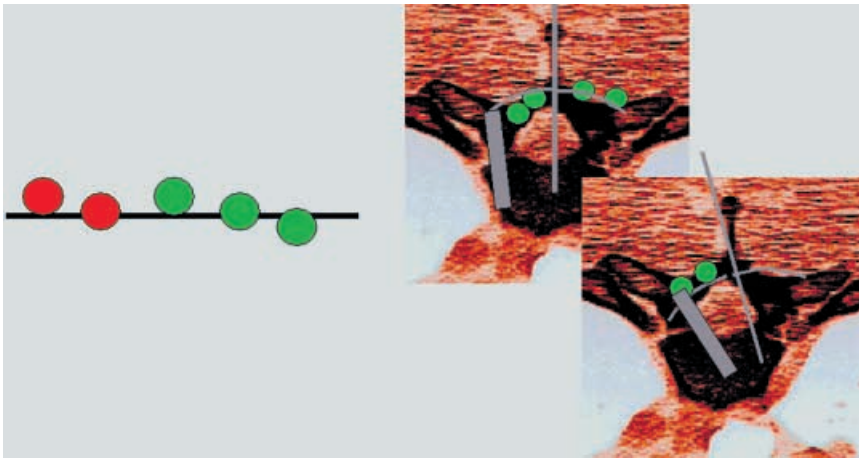


Abb. 7 ▲ Prinzip der sog. rechnerischen Verkipfung des Datensatzes. Die digitalisierten Punkte werden nicht der Oberfläche des Wirbelkörpers zugeordnet, sondern in die Tiefe gerechnet. Dadurch erscheint für das Navigationssystem der Wirbelkörper um diesen Winkel verkippt zu sein. Die intraoperative Anzeige orientiert sich dann an einer falschen Position des Wirbelkörpers, was eine Schraubenfehlage zur Folge hat

chenabtasten das Tastinstrument (pointer) in den Knochen einsinken, so dass eine falsche Oberfläche digitalisiert wird, ebenso kann natürlich auch bei zu viel Weichteilen nur die Weichteilstruktur und nicht die Knochenoberfläche digitalisiert werden. Die erfassten Punkte werden dann beispielsweise auf einer Seite des Wirbels in das Wirbelinnere gerechnet (Abb. 7). Auf diese Weise kommt es zu einem mathematischen Verkippen des realen Wirbelkörpers und der virtuellen Darstellung (Abb. 8). Dies mündet dann, trotz korrekt signalisiertem Matchingergebnis und damit einer korrekt angezeigten Navigation nach Planung, in einer Fehlnavigation (Abb. 9a).

Die klinische Erfahrung hat gezeigt, dass es im Bereich der lumbalen Wirbelsäule relativ einfach ist, für den klinisch Erfahrenen das Matchingergebnis auf Korrektheit zu überprüfen.

Im thorakalen Bereich ist die Gefahr sehr groß, dass es zu einem Fehlmatching kommt mit einer mathematischen Verkipfung des Wirbelkörpers (s. Abb. 9b). Ursachen sind, neben der fehlerhaften Wahl des „threshold“, auch die hier wenig markanten „landmarks“. Nur die „Verification“, d. h. überprüfen der Position eines navigierten Instruments in Bezug zur Knochenoberfläche und die klinische Erfahrung kann dies verhindern.

Wenn das Matchingergebnis ausreichend war, d. h. eine akzeptable Genauigkeit erzielt werden konnte und die sog.

Verifikation plausibel war, kann navigiert werden.

Zur Navigation besteht die Möglichkeit präoperativ, bei einigen Systemen auch intraoperativ, die gewünschte Schraubenlage zu planen. Diese Planung ist von hohem Nutzen, da der Operateur sich am Datensatz genauestens den Frakturtyp und den Mechanismus der Fraktur analysieren kann. Diese Analyse kann dann in die Strategie des operativen Vorgehens einschließlich Implantatwahl einfließen.

Navigation

Wenn das Matching erfolgreich war, kann mit den sog. „getrackten“ Instru-

menten navigiert werden. Dabei ist von entscheidender Bedeutung, dass sich beide erforderlichen Komponenten, nämlich Referenzelektrode und Instrument, immer im sichtbaren Bereich der Kamera befinden. Insbesondere wenn sich die Referenzelektrode nicht mehr im sichtbaren Bereich der Kamera befindet oder eine Überdeckung auftritt, kann nicht mehr navigiert werden. Hierbei hat sich gezeigt, dass Kabelsysteme den Nachteil haben, dass durch die Anwendung und Führung der Kabel es zu Überdeckungen kommt, sodass die Navigation behindert werden kann. Kabellose Systeme sind hier klar im Vorteil.

Beim Navigieren spätestens stellt sich dann auch in der Regel heraus, ob die Position der Referenzelektrode (DRB) hinreichend gut gewählt wurde, um z. B. eine Überdeckung von Instrumenten und Elektrode zu vermeiden, je nachdem welche Position am Pedikel gerade aufgesucht wird. Ein möglicher Ausweg bei fehlplatzierter DRB ist dann nur noch das Verschieben der Kamera oder ein erneutes Matching nach Versetzen der DRB.

Bei der intraoperativen Navigation gibt es je nach Modell prinzipiell 2 Modi, einmal die Realtimedarstellung, d. h. jede aktuelle Position von Patient und Instrument wird digitalisiert und visualisiert, und der sog. Guidance-Modus, bei dem eine präoperative Planung erfolgt ist, die dann aufgesucht werden muss und damit den Operateur entsprechend seiner operativen Planung leitet. Prinzipiell ist für die intraoperative Navigation zu sagen, dass diese nur an un-

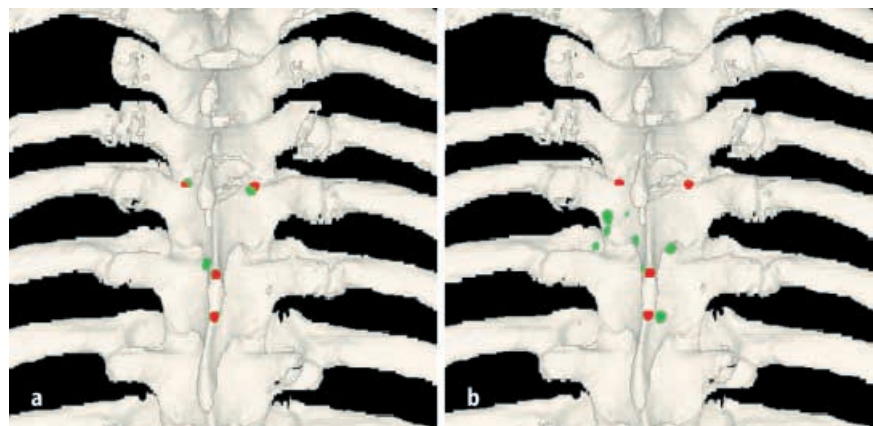


Abb. 8a, b. ▲ Intraoperative Darstellung der Verkipfung im Surfacematching. Die korrekt gefundenen Punkte im Paired-point-Matching (a), sind nach dem Surfacematching verschoben (b), gleichzeitig erscheinen die digitalisierten Punkte im Knochen zu verschwinden und sind teilweise nur andeutungsweise zu sehen

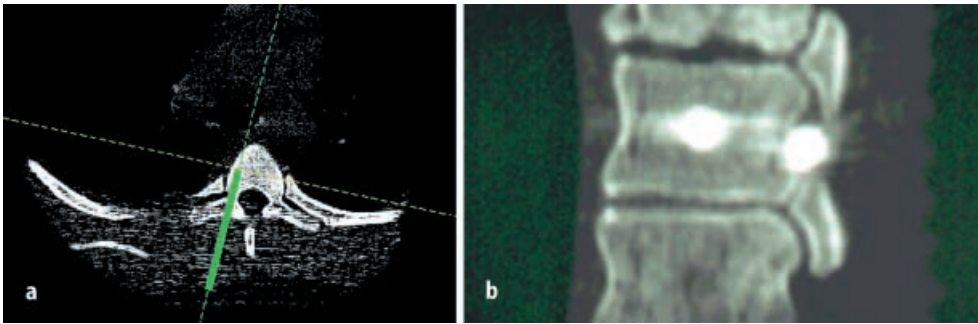


Abb. 9 ▲ Durch mathematische Verkippung verursachte abweichende Schraubenlage. Intraoperativ wird eine vermeintlich richtige Lage visualisiert, die CT-Kontrolle zeigt jedoch eine Parallelverschiebung der Schraubenposition als Folge der rechnerischen Verkippung der Lage des Wirbelkörpers im Raum

versehrten Wirbelkörpern durchgeführt werden sollte.

Frakturierte Wirbelkörper können nicht navigiert werden, da die intraoperative Lage aufgrund der indirekten Reposition, z. B. Wechsel aus Rückenlage im CT in Bauchlage im Operationssaal, nicht mit dem präoperativen CT übereinstimmt. Eine intraoperative Anpassung des präoperativen Datensatzes ist dann nicht mehr möglich.

Fazit für die Praxis

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind die Limitationen der Computernavigationen in folgenden Punkten zu sehen:

- Eingeschränkte Rechnerkapazität begrenzt den zur Verfügung stehenden Bildausschnitt bzw. begrenzt die maximal verfügbaren CT-Schichten.
- Scanprotokolle und Artefakte beeinflussen die präoperative Planung.
- Der CT basierten Navigation wird der präoperative Datensatz zu Grunde gelegt, intraoperativ durchgeführte Reposition wirken sich auf diesen Datensatz nicht aus, was zur Folge hat, dass nur unversehrte Wirbelkörper navigiert werden können.
- Das intraoperative Matchingergebnis kann trotz korrekt angezeigter Referenzzahl nicht mit der Realität übereinstimmen, sodass durch mathematische Verkippungen der Wirbelkörperlage im Raum Fehlnavigationen ausgelöst werden können. Das Erkennen dieser Situation ist nur durch einen sog. Verifikationsmodus und einem erfahrenen Chir-

urgen, u. U. erst nach nochmaliger Durchleuchtungskontrolle möglich.

- Die intraoperative Darstellung berücksichtigt derzeit überwiegend die Oberflächendarstellung, eine semitransparente 3D-Darstellung der Wirbelkörper z. B. ist noch nicht generell möglich.
- Die intraoperative Erfassung von repositionsbedingten Änderungen des präoperativen CT-Datensatzes ist nicht möglich.
- Die Anwendung der computergestützten Navigation setzt eine grosse technische und klinische Erfahrung voraus, um gegen eine Fehlinformation des Systems gewappnet zu sein.

Für die Zukunft erscheint es naheliegend zu sein, dass der klinische Einsatz von Navigationsrechnern an Voraussetzungen gebunden wird, die auch für roboterunterstützte Anwendungen vorgeschlagen werden.

Im einzelnen sind dies:

- standardisierte Einweisungen durch die Hersteller,
- ggf. wissenschaftlich begleitende Kurse durch die Fachgesellschaft (DGU, DGOT),
- Anwendung an Facharztstatus und entsprechende Qualifikation gebunden,
- Hospitation in Anwenderzentren,
- prospektive Dokumentation aller Patienten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass diese Systeme eine zukünftige wichtige Entwicklung sind, die einen Beitrag zur Qualitätsverbesserung leisten können insbesondere im Bereich der Becken- und Wirbelsäulenchirurgie. Die

Notwendigkeit der präoperativen Planung dient der genauen Analyse der Fraktur und ist daher für die operative Strategie von großem Nutzen.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt verlangen die Systeme allerdings vom Operateur ein hohes Maß an Fach- und Sachkenntnis der Grundlagen und Theorien der Systeme. Die intraoperative Anwendung setzt ein hohes Maß an kritischer Prüfung der angezeigten Werte voraus, sowie die Möglichkeit jederzeit auf ein konventionelles Verfahren umzusteigen.

Literatur

1. Nolte LP (1995) Computer-aided fixation of spinal implants. *J Imag Guid Surg* 1:88–93
2. Girardi FP (1999) The placement of lumbar pedicle screws using computerised stereotactic guidance. *J Bone Joint Surg Br* 81:825–829
3. Kamimura M (1999) Accurate pedicle screw insertion under the control of a computer-assisted image guiding system: laboratory test and clinical study. *J Orthop Sci* 4:197–206
4. Berlemann U (1997) Planning and insertion of pedicle screws with computer assistance. *J Spinal Disord* 10:117–124
5. Richter M (2000) Computer-assisted surgery in posterior instrumentation of the cervical spine: an in-vitro feasibility study. *Eur Spine J* 9 [Suppl 1]:65–70
6. Bolger C, Wigfield C (2000) Image-guided surgery: applications to the cervical and thoracic spine and a review of the first 120 procedures. *J Neurosurg* 92 [Suppl 2]:175–180
7. Haas NP, Stockle UC, Hoffmann R (1999) Acetabulum surgery. Development, current status and prospects. *Zentralbl Chir* 124:999–1003
8. Marmulla R, Niederdelmann H (1998) Computer-assisted bone segment navigation. *J Craniomaxillofac Surg* 26:347–359