

Leitthema

Orthopäde 2006 · 35:1032–1037
 DOI 10.1007/s00132-006-0993-z
 Online publiziert: 19. August 2006
 © Springer Medizin Verlag 2006

Redaktion

C. Lüring, Bad Abbach
 J. Grifka, Bad Abbach

F. Langlotz¹ · L.-P. Nolte¹ · M. Tannast²

¹ MEM Forschungszentrum, Bern

² Klinik und Poliklinik für Orthopädische Chirurgie, Inselspital, Universität Bern

Grundlagen der computerassistierten Chirurgie

Seit Anfang der 1990er wurden technologische Konzepte, die in Form der sog. Stereotaxie bis dahin in der Neurochirurgie eingesetzt worden waren, durch schnelle Graphikcomputer und berührungsfreie Messsysteme zur präzisen Verfolgung von Operationsinstrumenten erweitert und für verschiedene Anwendungen in der orthopädischen Chirurgie zu ersten Prototypen von Navigationssystemen komplettiert [15].

Die Strategie, mit der neue Anwendungsgebiete dieser Technologie erschlossen wurden, orientierte sich dabei einerseits an den vorhandenen technologischen Möglichkeiten, andererseits jedoch auch am klinischen Bedarf, der sich im Wesentlichen durch die Fallzahlen eines bestimmten Eingriffs und die (un)genauigkeitsbedingten Komplikationsraten definierte. Damit erklärt sich, dass Anwendungen im Bereich der Wirbelsäulenchirurgie, namentlich der Platzierung von Pedikelschrauben [2, 21, 22], sowie der Implantation der azetabulären Endoprothesenkomponente beim totalen Hüftgelenkersatz Pionierfunktion zukam [8]. Die navigierte Unterstützung der Kniearthroplastik wurde erst in der Folge entwickelt und basierte zunächst auf den Prinzipien, die sich für die Wirbelsäule und die Hüfte als erfolgreich herausgestellt hatten. Um diese Zusammenhänge, sowie die Funktionsweise von computerassistierten Chirurgesystemen zu verstehen, ist es notwendig, sich zunächst mit ihrem konzeptionellen Aufbau und der Art und Weise,

wie ihre Komponenten miteinander agieren, vertraut zu machen.

Die Komponenten eines Navigationssystems

Drei Elemente eines jeden Navigationssystems können unterschieden werden [16]: Das therapeutische Objekt stellt das Ziel der operativen Behandlung dar und wird durch eine Referenzierungsbasis markiert, um es dem Navigator sichtbar zu machen. Über einen automatischen oder interaktiven Registrierungsschritt (s. unten) wird eine mathematische Verbindung zum virtuellen Objekt (einer Abbildung des therapeutischen Objekts) hergestellt, die es letztendlich erlaubt, die vom Navigator aufgenommene chirurgische Aktion im virtuellen Objekt wiederzugeben. Während das therapeutische Objekt verständlicherweise von der Art der zu navigierenden Operation bestimmt wird, sind in der Vergangenheit eine ganze Reihe von verschiedenen Technologien für die berührungsfreie, räumliche Erfassung von Positionen und unterschiedlichste bildgebende Verfahren zur Abbildung des Operationsziels in Navigationssystemen eingesetzt worden [16]. In den folgenden Abschnitten sollen die wichtigsten dieser Ansätze kurz beleuchtet werden.

Navigatoren

Optoelektronische Kameras

Am weitesten verbreitet sind heute optoelektronische Kamerasysteme, die auf Infrarotlichtbasis arbeiten. Alle chirurgi-

schen Instrumente, die in die Navigation integriert werden sollen, sind mit mehreren Infrarotlicht aussendenden Leuchtdioden (LED) oder Infrarotlicht reflektierenden Markern in Form von Kugeln oder Kreisscheiben ausgestattet. Im ersten Fall werden alle LED eines Instrumentensets per Batterie oder Kabel gespeist und in schneller Abfolge reihum aktiviert. Dies erlaubt es dem Kamerasystem, eine eindeutige Zuordnung eines registrierten Lichtblitzes zum sich dahinter verborgenden Instrument vorzunehmen. Bei den sog. passiven Kamerasystemen wird die beobachtete Szene durch eine Infrarotlichtquelle auf der Kamera beleuchtet und die Reflektionen aller Marker werden gleichzeitig erfasst. Durch den Vergleich mehrerer aufeinander folgender Bildsequenzen kann das Messsystem Marker detektieren, die sich synchron bewegen, also auf ein und demselben Instrument montiert sind. Um verschiedene Instrumente eindeutig voneinander unterscheiden zu können, werden individuelle Markeranordnungen gewählt.

Aus mathematischer Sicht verlangt ein solches Messkonzept mindestens 3 nicht linear angeordnete Marker oder LED pro beobachtetem Objekt, um dieses in allen 6 Freiheitsgraden des Raums eindeutig erfassen zu können. Aus Gründen der besseren Genauigkeit und um eine gewisse Redundanz zu gewährleisten, werden oftmals 4 Markierungen verwendet. Umgekehrt kann ein Digitalisierpointer (ein Instrument zum Aufnehmen von dreidimensionalen Punktkoordinaten) auch mit nur 2 Markern ausgestattet sein, wenn die-

Hier steht eine Anzeige.



Orthopäde 2006 · 35:1032–1037 DOI 10.1007/s00132-006-0993-z
© Springer Medizin Verlag 2006

F. Langlotz · L.-P. Nolte · M. Tannast

Grundlagen der computerassistierten Chirurgie

Zusammenfassung

Der Einsatz von Navigationssystemen in der orthopädischen Chirurgie und speziell in der Knieendoprothetik findet immer weitere Verbreitung. Dieser Beitrag stellt die grundlegenden technologischen Konzepte vor, auf denen moderne Computerassistenzsysteme beruhen, zeigt ihre Ausprägungen in den aktuell verwendeten Systemen auf und reißt verschiedene Entwicklungen an, die einen Einfluss auf zukünftige Produkte haben könnten.

Prinzipiell lassen sich in jedem Navigationssystem 3 Komponenten identifizieren. Das therapeutische Objekt ist diejenige ana-

tomische Struktur, die das Ziel der navigierten Operation darstellt. Das virtuelle Objekt ist ein Abbild des therapeutischen Objekts. Hier können radiologische oder vom Rechner generierte Darstellungen zu Einsatz kommen. Der Navigator schließlich dient zur Erfassung von Position und Lage von Instrumenten und Anatomie und stellt sicher, dass chirurgische Aktionen im Operationsfeld am Navigationsmonitor wiedergegeben werden können.

Schlüsselwörter

Computerassistierte Chirurgie · Navigation · Kniegelenkersatz

The foundations of computer assisted surgery

Abstract

Using navigation systems in general orthopaedic surgery and, in particular, knee replacement is becoming more and more accepted. This paper describes the basic technological concepts of modern computer assisted surgical systems. It explains the variation in currently available systems and outlines research activities that will potentially influence future products.

In general, each navigation system is defined by three components: (1) the therapeutic object is the anatomical structure that is operated on using the navigation system, (2)

the virtual object represents an image of the therapeutic object, with radiological images or computer generated models potentially being used, and (3) last but not least, the navigator acquires the spatial position and orientation of instruments and anatomy thus providing the necessary data to replay surgical action in real-time on the navigation system's screen.

Keywords

Computer assisted surgery · Navigation · Knee replacement

se Marker und die Pointerspitze auf einer Linie liegen, da für ein solches Instrument die Rotation um die Markerachse unerheblich ist.

Bei der Verwendung eines optoelektronischen Kamerasystems ist auf jeden Fall die freie Sicht der Kamera auf das Operationsfeld und die zu beobachtenden Instrumente zu gewährleisten. Besonders in Teams, die noch keine großen Erfahrungen mit der Navigation haben, erfordert dies ein gewisses Training.

Elektromagnetische Positionserfassung

Seit kurzem werden von einigen Herstellern Navigationssysteme angepriesen, die die Position von Instrumenten und Anatomie elektromagnetisch vermessen und das „Line-of-sight-Problem“ damit beseitigt haben sollen. Anstelle einer Kamera wird hier ein Magnetfeldgenerator verwendet, der ein homogenes elektromagnetisches Feld von ca. 50 cm Durchmesser erzeugt. Kleine Spulen, die auf den zu vermessenden Objekten montiert sind, erlauben es, die Position und Ausrichtung des jeweiligen Objekts innerhalb des Magnetfelds zu erfassen. Dieses Messprinzip wurde von verschiedenen Navigationssystemen bereits Mitte der 1990er Jahre propagiert [2]. Die damaligen Geräte zeigten jedoch eine sehr starke und unvorhersagbare Empfindlichkeit gegen jede Art von metallischen Objekten, die die Homogenität des erzeugten Magnetfelds störten und somit zu beträchtlichen Messungenauigkeiten führten [20]. Dieser Nachteil soll von den Elektromagnettrackern der neuesten Generation behoben worden sein. Wissenschaftliche Studien, die diesen Anspruch untermauern, sind nach unserem Wissensstand zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht verfügbar.

Virtuelles Objekt

Das virtuelle Objekt bildet die „Landkarte“, auf der der Navigationscomputer die chirurgischen Schritte in Echtzeit wiedergibt. Die ersten erfolgreich eingesetzten Navigationssysteme für die Wirbelsäulen- und Hüftchirurgie bedienten sich hierfür präoperativer Computertomographien (CT). Unter der normalerweise gültigen Annahme, dass sich die äuße-

Hier steht eine Anzeige.



re Form eines operierten Knochens nicht von derjenigen, die in einem zuvor aufgenommenen CT abgebildet ist, unterscheidet, konnte mit diesen „Bildkonserven“ eine sehr genaue Navigation gewährleistet werden.

CT-basierter Navigation

Die Herausforderung an den Chirurgen besteht bei der Verwendung präoperativer Bilddaten für die Navigation in der sog. Registrierung („Matching“). Dabei wird dem Computer die Verbindung zwischen dem Bildkoordinatenraum und der Lage des Patienten im Operationsaal mitgeteilt, was es ihm letztendlich erlaubt, die in der realen Welt ermittelten Instrumentenlagen an der korrekten, korrespondierenden Stelle im Bilddatensatz darzustellen. Ein Beispiel für ein solches Matching ist die Punktepaarregistrierung, bei der präoperativ im CT definierte Landmarken ihren intraoperativ mit einem Pointer abgetasteten Pendants zugeordnet werden.

Der große Vorteil solcher CT-basierter Navigationssysteme besteht darin, dass die mit Navigationsunterstützung durchzuführenden Operationsschritte vorgängig präzise am Monitor geplant werden können. So ist es im Falle der Knieendoprothetik beispielsweise möglich, die genaue Größe und Lage der Implantatkomponenten basierend auf dem CT-Datensatz festzulegen [6]. Dem Navigationssystem fällt dann während des Eingriffs die Aufgabe zu, die exakte Umsetzung dieser Planung zu ermöglichen.

Obwohl mehrere kommerziell erhältliche Geräte von verschiedenen Herstellern angeboten wurden, konnte sich die Knienavigation mittels präoperativer Bilddaten nicht durchsetzen. Zum einen stellt die Akquisition des CT eine üblicherweise nicht standardmäßige Untersuchung dar, die mit zusätzlicher Strahlenbelastung für den Patienten und zusätzlichen Kosten für die Klinik einhergehen. Andererseits hat sich jedoch gezeigt, dass die im Folgenden beschriebenen bildfreien Technologien besser in der Lage sind, das Kniegelenk in seiner Beweglichkeit zu modellieren und Navigationsunterstützung zu bieten, die auch die Situation am Bandapparat berücksichtigt.

Bildfreie Navigation

Genau genommen ist der Begriff „bildfreie Navigation“ irreführend, da auch bei diesen Systemen Darstellungen der operierten Anatomie als Navigationsgrundlage verwendet werden. Es handelt sich jedoch nicht um Daten, die durch die klassische medizinische Bildgebung erzeugt wurden, sondern um virtuelle Objekte, die von der Software intraoperativ aus Messdaten (vom Chirurgen erzeugt) generiert werden. In der Literatur wird daher auch die Bezeichnung „surgeon-defined anatomy“ [7] verwendet.

Nach erfolgtem operativem Zugang zur Anatomie und Platzierung der Referenzierungsbasis werden vom Chirurgen interaktiv verschiedene Strukturen dreidimensional (3D) erfasst. Dies kann durch das Abtasten von Landmarken mit dem Pointer, den Einsatz eines C-Bogens als Koordinatenerfassungsgerät [10] oder durch die passive Bewegung von Gliedmaßen geschehen [17]. Durch letzteres Verfahren lassen sich beispielsweise morphologische Parameter wie das Rotationszentrum eines Gelenks ermitteln. Aus den aufgenommenen Daten erstellt der Rechner dann ein Modell der betreffenden Strukturen. Ein solches Modell kann entweder nur die erfassten Informationen auf eine vordefinierte Art miteinander kombinieren und so ein vereinfachtes, abstraktes Abbild der Realität schaffen [14], oder aber aus statistischen Knochenatlanten entstehen [24].

Solche Atlanten beruhen auf detaillierten realen Daten von Individuen und bilden die Variabilität der Morphologie ab. Die vom Patienten erfassten Daten dienen dann dazu, die individuellen Ausprägungen und die Abweichungen vom statistischen Durchschnitt zu definieren und die korrekte Morphologie durch Verformung des Durchschnittsmodells zu erzeugen. Obwohl bislang ausschließlich Oberflächenatlanten in Navigationsprodukten implementiert sind, die die Knochenoberfläche durch Dreiecksnetze modellieren, darf in Zukunft erwartet werden, dass auch radiologische 3D-Atlanten verfügbar werden, die aus intraoperativ erfassten Daten synthetische CT generieren können [26].

Die Verwendung solcher „Surgeon-defined-anatomy-Modelle“ hat eine Rei-

he von Vorteilen. Zum einen fällt die Notwendigkeit weg, präoperative CT-Daten zu erfassen, sodass Prozesskosten und die Strahlenbelastung des Patienten gesenkt werden. Andererseits können durch die im Navigationssystem integrierten Rekonstruktionsalgorithmen aussagekräftige und anschauliche Modelle ohne den bei CT-basierten Systemen nicht immer unerheblichen Planungsaufwand erzeugt werden. Schließlich ist durch die Erfassung der für die Modellerstellung notwendigen Koordinaten mithilfe des Navigationssystems sichergestellt, dass sowohl generiertes Bild als auch die vom Navigator vermessenen Instrumente und Anatomien im gleichen Koordinatenraum vorliegen – der kritische Schritt der manuellen Registrierung von therapeutischem und virtuellem Objekt entfällt somit. Durch die intraoperative Modellerstellung kann zudem sichergestellt werden, dass das Kniegelenk in seiner vollen Beweglichkeit vom virtuellen Objekt abgebildet wird – eine Eigenschaft, die sich mit CT-basierten Systemen oft nur nach aufwändiger interaktiver Segmentierung der Bilddaten erringen lässt.

Berücksichtigung der Weichteilsituation

Das oben beschriebene dynamisches Modell erlaubt es dann, eine Bewegungssimulation in die intraoperative Planung einfließen zu lassen und die postoperative Situation am kollateralen Bandapparat vorher zu sagen. Es kann damit sichergestellt werden, dass das Knie nicht nur in seiner geometrischen Ausrichtung rekonstruiert wird [5, 12], sondern auch die gewünschte Stabilität des Gelenks gewährleistet wird [19]. Die objektive Erfassung der Weichteilsituation mithilfe von Drucksensoren könnte den Bandausgleich in Zukunft noch einfacher und präziser gestalten. Erste experimentelle Erfahrungen mit Prototypen liegen vor [4], sind zum jetzigen Zeitpunkt jedoch in dieser Form noch in keinem Navigationsprodukt implementiert.

Konsequenz

Die Anwendung der Navigation für die Knieendoprothetik findet heute eine im-

mer breitere Zustimmung. Mittlerweile sind Navigationssysteme in >30% der deutschen Kliniken für den totalen Kniegelenkersatz routinemäßig im Einsatz [18]. Dabei beschränkt sich die Indikation des Navigationseinsatzes nicht nur auf primäre Totalendoprothesen, sondern kann auch bei Revisionen [23] und der unikompartimentalen Versorgung [1, 11] hilfreich sein.

Im Gegensatz zur Anwendung bei anderen Eingriffen konnte eine Reihe von Studien nachweisen, dass die Computerassistenz deutlich bessere postoperative Ergebnisse ermöglicht [3, 5, 9, 13], die sogar statistisch signifikant sind [18].

Ausblick

Die genauere Ausrichtung der Implantatkomponenten, die Vermeidung von extremen Implantatfehlagen und die optimierte Berücksichtigung des Weichteilverhaltens des Knies legen den Schluss nahe, dass durch die Navigation auch langfristig bessere Ergebnisse erzielt werden können. Es konnte zudem nachgewiesen werden, dass eine sorgfältige Planung und Optimierung der Prozessabläufe beim Einsatz eines Navigationssystems nicht notwendigerweise mit einer deutlichen Verlängerung eines Eingriffs im Vergleich zum konventionellen Vorgehen einhergehen muss [25]. Es ist daher zu erwarten, dass sich die Anwendung der computerassistierten Chirurgie beim Kniegelenkersatz mittelfristig zum Goldstandard entwickeln dürfte.

Fazit für die Praxis

Heute im Operationssaal eingesetzte Navigationssysteme für die Kniegelenkchirurgie haben ihre Kinderkrankheiten auskuriert. Als Trackingtechnologie haben sich Geräte mit optoelektronischen Kameras etabliert. Elektromagnetische Systeme versprechen zwar eine Lösung des Sichtbarkeitsproblems, sind allerdings noch nicht lange genug am Markt verfügbar, um nachgewiesen zu haben, dass die Technologie in der typischen Umgebung eines Operationssaals zuverlässig funktioniert.

Etablierte Systeme können bei allen Arten der prothetischen Versorgung des

Kniegelenks eingesetzt werden und eine Vielzahl von Studien hat den Nachweis einer präziseren Implantatkomponentenausrichtung erbracht, von der auch langfristig bessere Ergebnisse im Vergleich zur konventionellen Versorgung erhofft werden können. Mit entsprechender Vorbereitung muss der Einsatz der Navigation nicht notwendigerweise durch längere Operationszeiten erkauft werden.

Korrespondierender Autor

Dr. phil. F. Langlotz



MEM Forschungszentrum
Stauffacherstraße 78,
CH-3014 Bern
Frank.Langlotz@MEMcenter.
unibe.ch

Interessenkonflikt. Es besteht kein Interessenkonflikt. Der korrespondierende Autor versichert, dass keine Verbindungen mit einer Firma, deren Produkt in dem Artikel genannt ist, oder einer Firma, die ein Konkurrenzprodukt vertreibt, bestehen. Die Präsentation des Themas ist unabhängig und die Darstellung der Inhalte produktneutral.

Literatur

1. Aldinger PR, Gill HS, Schlegel U et al. (2005) Ist die Navigation bei der Schlitzenprothese sinnvoll? Eine Pilotstudie am Leichenknie. *Orthopäde* 34: 1094–1102
2. Amiot LP, Labelle H, Deguise JA et al. (1995) Computer-assisted pedicle screw fixation. A feasibility study. *Spine* 20: 1208–1212
3. Anderson KC, Buehler KC, Markel DC (2005) Computer assisted navigation in total knee arthroplasty comparison with conventional methods. *J Arthroplasty* 20(Suppl 3): 132–138
4. Crottet D, Maeder T, Fritschy D et al. (2005) Development of a force amplitude and location sensing device designed to improve the ligament balancing procedure in TKA. *IEEE T Bio Med Eng* 52: 1609–1611
5. Decking R, Markmann Y, Fuchs J et al. (2005) Leg axis after computer-navigated total knee arthroplasty: a prospective randomized trial comparing computer-navigated and manual implantation. *J Arthroplasty* 20: 282–288
6. Delp SL, Stulberg SD, Davies B et al. (1998) Computer assisted knee replacement. *Clin Orthop Relat Res* 354: 49–56
7. Dessenne V, Lavallée S, Julliard R et al. (1995) Computer-assisted knee anteriore cruciate ligament reconstruction: first clinical tests. *J Imag Guid Surg* 1: 59–64
8. DiGioia AM 3rd, Jaramaz B, Colgan BD (1998) Computer assisted orthopaedic surgery: image guided and robotic assistive technologies. *Clin Orthop Relat Res* 354: 8–16
9. Haaker RG, Stockheim M, Kamp M et al. (2005) Computer-assisted navigation increases precision of component placement in total knee arthroplasty. *Clin Orthop Relat Res* 433: 152–159

10. Hofstetter R, Slomczykowski M, Krettek C et al. (2000) Computer-assisted fluoroscopy-based reduction of femoral fractures and antetorsion correction. *Comput Aided Surg* 5: 311–325
11. Jenny JY (2005) Navigated unicompartmental knee replacement. *Orthopedics* 28: 1263–1267
12. Jenny JY, Boeri C, Picard F, Leitner F (2004) Reproducibility of intra-operative measurement of the mechanical axes of the lower limb during total knee replacement with a non-image-based navigation system. *Comput Aided Surg* 9: 161–165
13. Kim SJ, MacDonald M, Hernandez J, Wixson RL (2005) Computer assisted navigation in total knee arthroplasty: improved coronal alignment. *J Arthroplasty* 20(Suppl 3): 123–131
14. Kunz M, Sati M, Langlotz F, Nolte LP (2001) Computergestützte Prothesenimplantation, Teil A: Grundlagen. In: Eulert J, Hassenpflug J (Hrsg) *Praxis der Knieendoprothetik*. Springer, Berlin Heidelberg New York, S 85–91
15. Langlotz F, Nolte LP (2003) Computer-assisted orthopaedic surgery – from theory to the operating room. *Techn Orthop* 18: 140–148
16. Langlotz F, Nolte LP (2004) Technical approaches to computer assisted orthopedic surgery. *Eur J Trauma* 30: 1–11
17. Leitner F, Picard F, Minfelde R et al. (1997) Computer-assisted knee surgical total replacement. In: Troccaz J, Grimson E, Moesges R (eds) *CVDMed-MRCAS, 97*. Springer, Berlin Heidelberg New York, S 629–637
18. Lüring C, Bähth H, Tingart M et al. (2005) Die navigationsgestützte Knieendoprothetik. *Dtsch Arztebl* 102: 2320–2325
19. Lüring C, Hüfner T, Perlick L et al. (2005) Weichteilmanagement bei der Varusgonarthrose – Der navigationsgestützte schrittweise mediale Bandrele. *Orthopäde* 34: 1118–1124
20. Meskers CG, Fraterman H, van der Helm FC et al. (1999) Calibration of the „Flock of Birds“ electromagnetic tracking device and its application in shoulder motion studies. *J Biomech* 32: 629–633
21. Merloz P, Tonetti J, Pittet L et al. (1998) Pedicle screw placement using image guided techniques. *Clin Orthop Relat Res* 354: 39–48
22. Nolte LP, Visarius H, Arm E, Langlotz F et al. (1995) Computer-aided fixation of spinal implants. *J Imag Guid Surg* 1: 88–93
23. Perlick L, Bähth H, Perlick C et al. (2005) Revision total knee arthroplasty: a comparison of post-operative leg alignment after computer-assisted implantation versus the conventional technique. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 13: 167–173
24. Stindel E, Briard JL, Merloz P et al. (2002) Bone morphing: 3D morphological data for total knee arthroplasty. *Comput Aided Surg* 7: 156–168
25. Walde TA, Burgdorf D, Walde HJ (2005) Process optimization in navigated total knee arthroplasty. *Orthopedics* 28: 1255–1258
26. Yao J, Taylor R (2003) Assessing accuracy factors in deformable 2D/3D medical image registration using a statistical pelvic model. *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2003)*, 14–17 October 2003, Nice, France. *IEEE Computer Society* 2003, ISBN 0-7695-1950-4, S 1329–1334