Präoperative Planung und Planungsumsetzung in der computerunterstützten orthopädischen Chirurgie

F. Portheine[1], A. Zimolong[1], K. Radermacher[1], M. Anton[2],
Ch. Eichhorn[2], H.-W. Staudte[2], G. Rau[1]

[1] Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik
an der RWTH Aachen, Pauwelsstr. 20, D-52074 Aachen
[2] Abt. für Orthopädische Chirurgie, Kreiskrankenhaus Marienhöhe Würselen, D-52146 Würselen
port@hia.rwth-aachen.de

In der computerunterstützten orthopädischen Chirurgie lassen sich unterschiedliche Verfahren für die intraoperative Umsetzung von Resultaten der präoperativen Planung finden. Entscheidend für die Einsatzmöglichkeiten sind jedoch neben klinischen und technischen Kriterien ergonomische Aspekte entscheidend. Anhand einer Aufgaben- und Arbeitsanalyse können diese Engpässe aufgespürt werden. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingung wurde das Konzept der Individualschablonen entwickelt [1,5,6], welches im folgenden vorgestellt werden soll. Dabei wird sowohl auf das für die Erstellung der Schablonen notwendige Diagnose- und Planungsmodul eingegangen, sowie über Erfahrungen mit dem integrierten NC-Frässystem berichtet.

Keywords: Individualschablonen, präoperative Planung, ergonomisches Systemdesign

Einleitung

Mit der Entwicklung der computerunterstützten Chirurgie kommt es verstärkt zu einer Integration von Hochtechnologien in den chirurgischen Arbeitsablauf. Dieses trägt wesentlich dazu bei, daß die weitreichenden diagnostischen Möglichkeiten effizienter für die Durchführung von Eingriffen genutzt werden könnten. Der Chirurg kann bereits bei der präoperativen Planung auf eine Vielzahl von Informationsquellen, wie z.B. CT-, MR- und Ultraschallbilder des Patienten, zurückgreifen und diese untereinander oder mit allgemeingültigen Daten, wie z.B. von Prothesen oder biomechanischen Modellen, verknüpfen. Die Verfahren für die intraoperative Umsetzung lassen sich nach der Rolle des Chirurgen bei der Steuerung und Überwachung in passive, semi-aktive und aktive Systeme unterteilen [2,3].

Bei der Auswahl des geeigneten intraoperativen Verfahrens wird sich der Chirurg im wesentlichen für Techniken entscheiden, die ein gegebenes therapeutische Problem mit einem Höchstmaß an Effizienz lösen. Dabei bestimmt sich die Effektivität des Verfahrens nicht nur aus klinischen und technischen Kriterien, sondern auch ergonomische Aspekte haben einen wesentlichen Einfluß. In der computerunterstützten Chirurgie besteht der klassische Kreislauf der Informationsverarbeitung

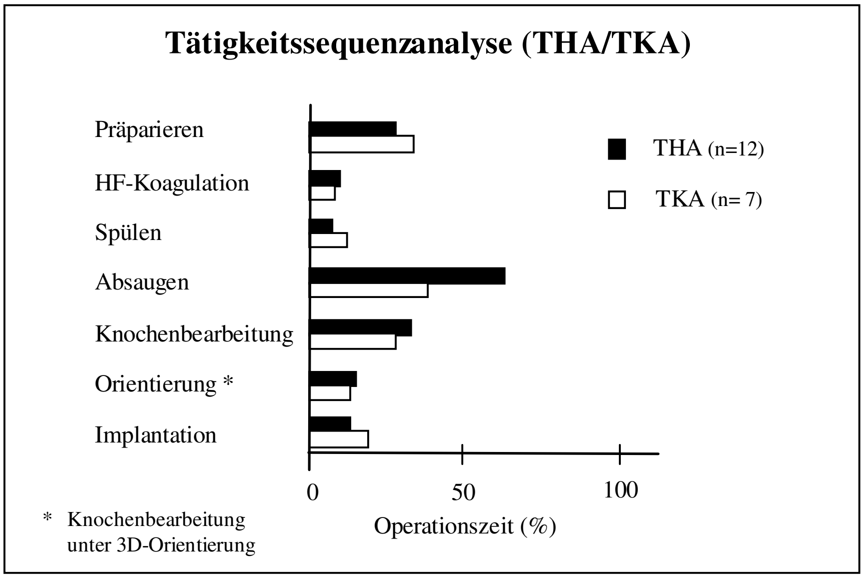


Fig. 1: Tätigkeitssequenzanalyse typischer orthopädischer Eingriffe

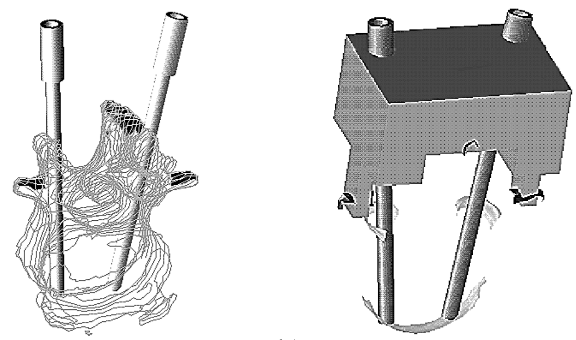
aus den Teilbereichen Perzeption (Aufnahme der Daten, Modellierung), Planung und Festlegung der Strategie beim Eingriff und Durchführung (vgl.[3]). Dabei ist der Mensch ein wesentlicher Teil dieses Kreislaufs, so daß seine Fähigkeiten und Leistungsgrenzen der mentalen Informationsverarbeitung und die von außen einwirkenden Parameter nachhaltig den Prozeß und das Resultat bestimmen. Es ist daher essentiell, daß die Auswahl der technischen Hilfsmittel und die daraus resultierenden Umstrukturierung des Vorgehens zur Lösung des therapeutischen Problems sich an einer umfassenden Aufgaben- und Arbeitsanalyse orientieren [4].

Einer der Engpässe bei chirurgischen Eingriffen entsteht durch die vom Chirurgen ständig durchzuführende geometrische Referenzierung seines aus Expertenwissen und präoperativer Planung gebildeten mentalen Modells mit dem Operationssitus. Bei der Analyse eines typischen konventionellen Eingriffs zeigte sich aber, daß Aktivitäten, welche im direkten Zusammenhang mit Aufgaben der Orientierung stehen, nur etwa 10-15% der gesamten Operationszeit in Anspruch nehmen. Auf diesem Hintergrund fällt die Argumentation für ein technisches System schwer, welches den Arzt bei der Orientierung unterstützt, dafür aber in der interventionellen Handhabung wesentlich mehr Zeit verbraucht. Der Einsatz eines solchen Systems wäre nur durch ein deutlich verbessertes klinisches Resultat zu rechtfertigen, was sich in der Praxis nur durch umfangreiche Studien nachweisen läßt. Zusätzlich ist zu bedenken, daß mit der Einführung zumindest in der Anfangsphase eine gesteigerte Fehlerwahrscheinlichkeit zu verzeichnen ist.

Im Rahmen des EU-Projektes IGOS (Image Guided Orthopedic Surgery „IGOS“, HC1026HC, Telematics Applications Program) sollen Richtlinien und Verfahren ausgearbeitet werden, welche eine qualitative Bewertung neuartiger Techniken zur bildgeführten Umsetzung von Eingriffen in der Orthopädie erlauben. Neben der Ausarbeitung allgemeiner Testkriterien und -verfahren im Bereich der Ergonomie ist unsere Arbeitsgruppe dafür zuständig, das Prinzip der Individualschablonen bis zur klinischen Validierung am Beispiel einer Tripel-Beckenosteotomie zu entwickeln.

Das Prinzip der Individualschablonen

Bevor es zur intraoperativen Umsetzung der Planungsresultate kommt, muß eine Referenzierung der einzelnen Koordinatensysteme von Planungssystem, Operationssitus (z.B. Knochen) und Ausführendem (z.B. Chirurg oder Roboter) durchgeführt werden. Bei konventionellen Eingriffen führt der Arzt diesen Schritt während der Orientierung am Situs aus, welche auch als *mentale Referenzierung* bezeichnet werden kann. Für alle technischen Systeme stellt die Referenzierung hingegen einen komplexen Prozeß dar, welcher in der Regel für den Chirurgen zusätzliche Arbeitsschritte erforderlich macht. Daher geht der Trend hin zu anatomiebasierten Methoden der Referenzierung, die auf eine mechanische oder optische Abtastung der Objektoberfläche oder Video-, Röntgen- und Ultraschallbilder des Operationssitus basieren kann. Eine Referenzierung über im Knochen fixierte künstliche Marker hat den Nachteil, daß eine Voraboperation zur Implantation der Marker notwendig ist.



a) b)

Fig. 2: a) Definition der räumlichen Anordnung von Vertebra, der drei Kontaktflächen und der Bohrhülsen. b) „Speichern“ der räumlichen Zuordnungen in einer Individualschablone.

Bei der Verwendung von Individualschablonen läßt sich die Referenzierung manuell gesteuert über taktiles und visuelles Feedback durch formschlüssiges Aufsetzen auf den Knochen erreichen. Die Kontaktfläche zwischen Schablone und Knochen wurde in der präoperativen Planung bestimmt und die räumliche Lage und Orientierung von Werkzeugführungen wie z.B. Bohrhülsen im Verhältnis zu dieser Fläche festgelegt (siehe Fig. 2). Diese Planungsergebnisse werden in den Individualschablonen „eingefroren“. Individualschablonen bieten die folgenden Vorteile:

- Konventionelle intraoperative Bilderfassungsverfahren sind zu Kontrollzwecken weiterhin verwendbar.
- Da der Gebrauch von Schablonen in der orthopädischen Chirurgie weit verbreitet ist, wo sie im wesentlichen im Bereich der Extremitäten eingesetzt werden, um z.B. eine möglichst genaue Schnittführung zu erreichen, ist die Bedienung der Individualschablonen intuitiv, die intraoperative Interaktion mit ungewohnten technischen Hilfsmitteln unnötig.
- Der konventionelle Arbeitsablauf bleibt weitgehend erhalten.
- Der Arzt kann sich ganz auf den Eingriff konzentrieren und muß seine Aufmerksamkeit nicht auf verschiedene Referenzsysteme (z.B. Situs / Anzeigegerät) verteilen. Dadurch wird eine zusätzliche mentale Belastung durch perzeptive und kognitive Arbeit vermieden.

- Ein Fixateur zur Vermeidung von Bewegungen des Knochens in Relation zum Führungsmittel ist unnötig, da über den Passitz eine laufende Referenzierung stattfindet.
- Die Schablonen können optional auf konventionelle Weise am Knochen fixiert werden.
- Durch die Werkzeugführung werden die Freiheitsgrade des Werkzeugs auf 1D oder 2D beschränkt. Dadurch steigt die Kontrollierbarkeit und die Genauigkeit der Durchführung.

Erzeugung der Individualschablonen

Die Anpassung der Schablonen erfolgt mittels halbautomatischer computergestützter Fertigungsverfahren auf Basis von CT-Daten. Dabei werden die erstellten Planungsgeometrien auf einer NC-Fräse zur Ausführung gebracht und ein negatives Abbild der Kontaktfläche in einen vorgefertigten Block aus Polycarbonat (PC) gefräst. Frühere Studien zeigten, daß das Fräsen der Kontaktfläche hinsichtlich Genauigkeit gegenüber Rapid-prototyping Verfahren, wie z.B. Stereolithografie, zu bevorzugen ist [5]. Für die Handhabung am Situs wird ein wiederverwendbares, speziell vom Typ der Operation abhängiges, mechanisches Adaptersystem mit integrierter Werkzeugführung eingesetzt (siehe Fig. 3).

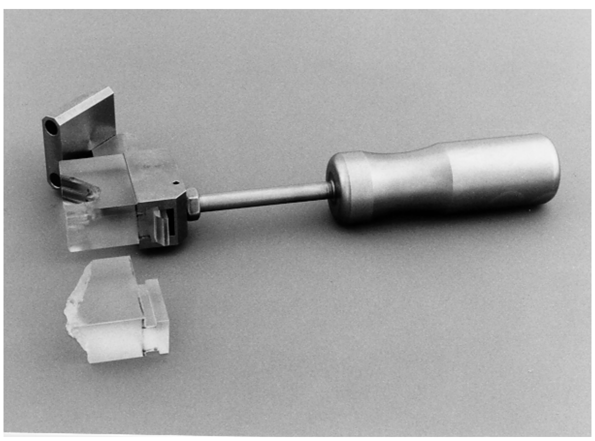


Fig. 3: komplettes Adaptersystem für Individualschablonen mit Haltegriff, Bohrhülsen und Schablone

Durchgeführte Untersuchungen zur Positioniergenauigkeit und dem damit verbundenen taktilen Feedback zeigen, daß die Qualität der Schablonen stark von der Form der Kontaktfläche sowie vom Schichtabstand der CT-Aufnahme abhängt. Daneben beeinflussen noch eine Reihe von Parametern des Fräsprozesses, wie z.B. Vorschub und Fräskopfdurchmesser, das Resultat [6].

Die computergestütze operationsspezifische Diagnose und Planung wird, basierend auf 3D-rekonstruierten CT-Daten und nach Angabe der indizierten Operation, schrittweise durchgeführt. Dabei orientieren sich die Interaktionssequenzen an bekannten medizinischen Begriffen und Vorgehensweisen. Speziell für die Überprüfung der Indikation bei einer Tripel-Beckenosteotomie werden zunächst die üblichen a.p.- und faux-pofil Aufnahmen aus dem CT-Datensatz generiert und ACE- sowie LCE-Winkel gemessen (siehe Fig. 4) [7]. Dabei unterstützen operationsspezifische Makros halbautomatisch den Diagnoseprozeß. Die entsprechenden Meß- und Referenzgeometrien können auch für weitere biomechanischen Analysen in die 3D-Rekonstruktion der Knochenstruktur übertragen werden.

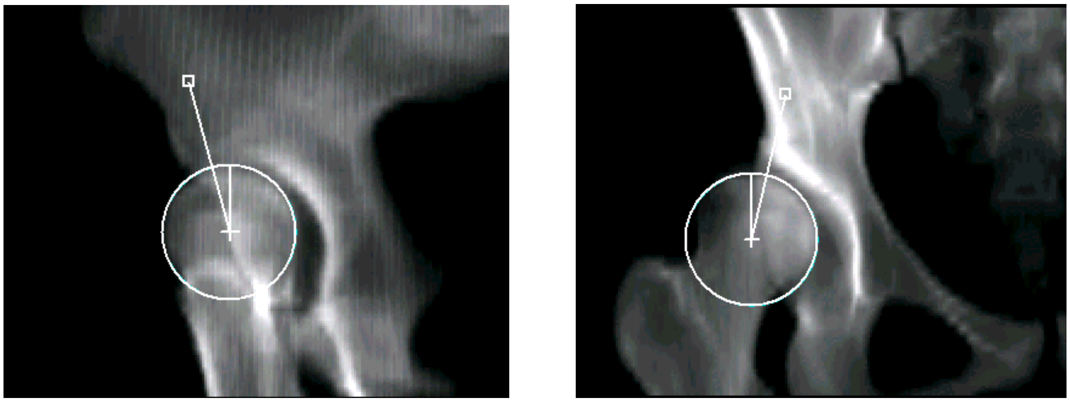


Fig. 4: künstliche Röntgenbilder (faux-profil, a.p.) für die Bestimmung des ACE- und LCE-Winkels

Im Operationsplanungsmodul wird die Lage und Orientierung der Schnittebenen sowie die Kontaktflächen der Individualschablonen definiert. Grundlage für die Darstellung von 3D Modellen des Knochens ist die 3D-Rekonstruktion der CT-Schichtaufnahmen mittels speziell optimierter Interpolationsalgorithmen. Für die Visualisierung verbunden mit der Möglichkeit der dynamischen Echtzeitmanipulation von Objekten stehen schnelle Algorithmen mit reduzierter Auflösung im Vordergrund, welche die CT-Schichten über eine flächenbasierte Interpolation [8] in ein kubisches binäres Knochenvolumen überführen und mittels Raytracing visualisieren.

Die Planung erfolgt in zwei Schritten: zunächst wird die Schnittebene in Lage und Orientierung festgelegt (siehe Fig. 5a). Anschließend wird die Lage der Kontaktfläche der Schablone längs dieser Ebene definiert, wobei die eingriffsspezifischen Randbedingungen berücksichtigt werden. Die Knochenstruktur wird dazu in Aufsatzrichtung dargestellt (siehe Fig. 5b). Für den gewählten Bereich der Kontaktfläche erfolgt dann eine mathematische apriori Abschätzung der Eindeutigkeit und Genauigkeit des Formschlusses. Ist die Kontaktfläche festgelegt, wird ein NC-Fräsfile generiert und auf einer Kompaktfräse zur Ausführung gebracht. Die Schablonen sind autoklavierbar und werden mit dem übrigen Operationsbesteck zur Operation bereitgestellt.

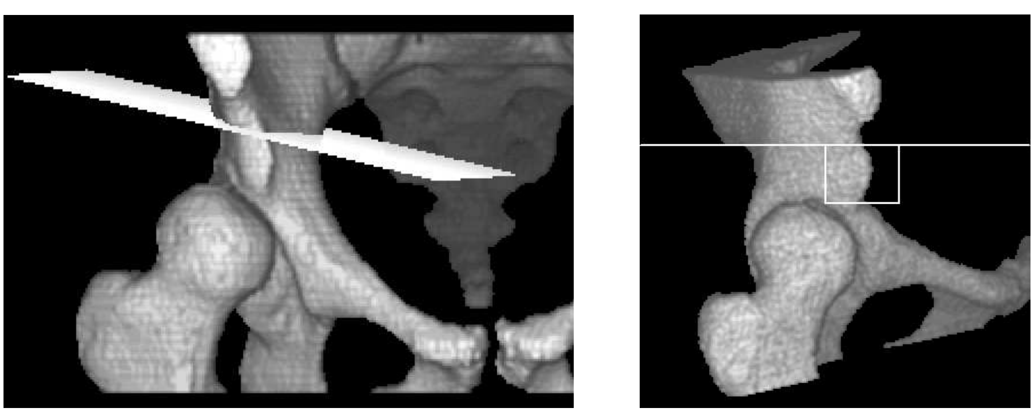


Fig. 5: a) Festlegung der Schnittebene, b) Definition der Lage der Kontaktfläche

Zusammenfassung und Ausblick

Individualschablonen stellen ein intuitiv zu gebrauchendes und den ursprünglichen Arbeitsprozeß erhaltendes Hilfsmittel dar, welches eine exakte Umsetzung der präoperativen Planung ermöglicht. In Verbindung mit einem auf den Chirurgen als Benutzer zugeschnittenen und an seine Terminologie, fach- und eingriffsspezifische Vorgehensweise angepaßten Planungs- und Diagnosemodul kann auf einfache Art und Weise die effiziente Verwertung von präoperativen 3D-Bildinformationen bei der Durchführung von Eingriffen ermöglicht werden. Im Hinblick auf weitere Applikation, z.B. im Bereich der Knieendoprothetik, sollen die Leistungsmerkmale des Planungs- und Diagnosemoduls erweitert werden. Ferner sind zusätzliche Werkzeuge zur Analyse der biomechanischen Gegebenheiten in Vorbereitung.

Im Rahmen unserer Arbeiten innerhalb des EU-Projektes IGOS wird neben der Entwicklung eines in der klinischen Routine einsetzbaren Demonstrators auch die klinische Validierung vorbereitet und durchgeführt.

Literatur

[1] Radermacher, K., H.-W. Staudte, G. Rau, (1993): Computer Assisted Matching of Planning and Execution in Orthopedic Surgery. 15th Ann. Int. Conf. IEEE EMBS, pp. 946-947

[2] Taylor, R.H., Lavallée, St., Brudea, G.C., Mösges, R.W. (1996): Computer Integrated Surgery, MIT Press

[3] Cinquin, P, E. Bainville, C. Barbe, E. Bittar, V. Bouchard, I. Bricault, G. Champleboux, M. Chenin, L. Chevalier, Y. Delnondedieu, L. Desbat, V. Dessenne, A. Hamadeh, D. Henry, N. Laieb, S. Lavallée, J.M. Levebvre, F. Leitner, Y. Menguy, F. Padieu, O. Péria, A. Poyet, M. Promayon, S. Rouault, P. Sautot, J. Troccaz, P. Vassal (1995): Computer Assisted Medical Interventions. IEEE EMB Magazine, Vol. 14, No. 3,pp.254-263

[4] Rau, G., Radermacher, K., Thull, B., Pichler, C. v., (1996): Aspects of an Ergonomic System Design of a Medical Worksystem. in: Taylor,R. et al. (eds.), Computer Integrated Surgery, MIT-Press, Cambridge, MA, pp.203-221

[5] Radermacher, K., G. Rau, H.-W. Staudte, (1996): Computer Integrated Orthopedic Surgery - Connection of Planning and Execution in Surgical Interventions. in: R.H. Taylor et al. (eds.): Computer Integrated Surgery, MIT-Press, Cambridge, MA, pp.451-463

[6] Radermacher, K., H.-W. Staudte, G. Rau, (1996): CT-Imagebased Planning and Execution of Interventions in Orthopedic Surgery Using Individual Templates. in: Nolte, L.-P., R. Ganz: CAOS - Computer Assisted Orthopaedic Surgery. Hogrefe & Huber Publ. (to appear)

[7] Toennis, D., A. Arning, M. Bloch, A. Heinecke, K. Kalchschmidt,(1994): Triple Pelvic Osteotomy. J. of Ped. Orthopaedics Part B, Vol.3, No.1, pp. 54-67

[8] Raya, S.P., Udupa, J.K. (1990): Shape-Based Interpolation of Multidimensional Objects, IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 9 No. 1, March 1990