Entwicklung eines klinischen Demonstrators für die computerunterstützte Orthopädische Chirurgie mit CT-Bildbasierten Individualschablonen

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

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

Zusammenfassung. Bei der Planung von Eingriffen in der orthopädischen Chirurgie kann der Orthopäde auf eine Vielzahl von bildgebenden Verfahren zurückgreifen, wie z.B. CT, MR, Ultraschall und Röntgenaufnahmen. Die jüngsten Entwicklungen im Bereich der computerunterstützten Chirurgie bieten verschiedene Lösungsansätze, um die hohe geometrische Genauigkeit der präoperativen Bildgebung und Planung für eine ebenso präzise intraoperative Ausführung zu nutzen. Am Helmholtz-Institut wurde dafür das Prinzip der Individualschablonen entwickelt. Hierbei werden individuell angepaßte Schablonen auf Basis von CT-Daten präoperativ gefertigt, die intraoperativ eine präzise Werkzeugführung für die geplanten Knochenbearbeitung darstellen. Die Realisierbarkeit des Konzeptes für verschiedene chirurgische Anwendungen wurde bereits in Laboruntersuchungen sowie in klinischen Applikationen demonstriert. Im folgenden werden Aspekte der Entwicklung eines integrierten klinischen Demonstrators zur chirurgischen Planung und Fertigung von Individualschablonen für periacetabuläre Umstellungsosteotomien dargestellt.

Schlüsselwörter: Individualschablonen, präoperative Planung, ergonomisches Systemdesign

1 Einleitung

Individualschablonen sind auf Basis von CT-Daten präoperativ erstellte Werkzeugführungen, die die räumliche Beziehung zwischen Werkzeug und Knochen über eine definierte Kontaktfläche zwischen Werkzeugführung und Knochen herstellen. Intraoperativ läßt sich die Referenzierung manuell gesteuert über taktiles und visuelles Feedback durch formschlüssiges Aufsetzen auf den Knochen erreichen [1][2][3].

Im Rahmen des EU Projektes IGOS (Image Guided Orthopedic Surgery „IGOS“, HC1026HC, Telematics Application Program) wird ein integrierter klinischer Demonstrator entwickelt, der Engpässe und Möglichkeiten eines klinischen Einsatzes von Individualschablonen für eine periacetabuläre Umstellungsosteotomie nach Tönnis aufzeigen soll [4].

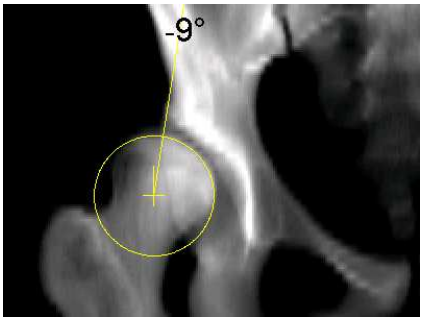

Abb. 1 Bestimmung des LCE-Winkels am künstlichen Röntgenbild

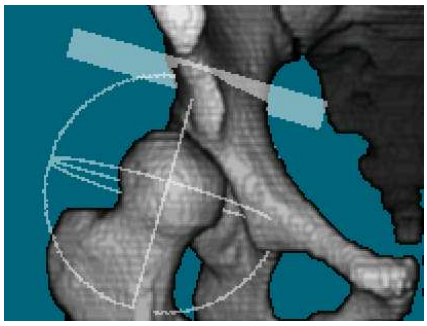

Abb. 2 Definition der Schnittebene für die Osteotomie des Darmbeins

2 Entwicklung eines computerunterstützten Operationsplanungssystemes

Der Demonstrator besteht aus einem computerunterstützten Bildverarbeitungssystem, das auf Basis von CT-Daten eine 3D Operationsplanung mit anschließender Fertigung von Individualschablonen ermöglicht [5].

Die Planungsplattform besteht aus handelsüblichen Komponenten, einer standard PC-Hardware (Pentium 133MHz++) sowie einer kleinen Kompaktfräseinheit. Bei der Realisierung des Benutzerinterfaces wurden die Gestaltungsrichtlinien der ISO 9241 berücksichtigt, sowie die Vorstellungen und Wünsche der Orthopäden als spätere Nutzer integriert. Durch die benutzerorientierte Dialoggestaltung des Planungssystems, die sich an der Terminologie des Benutzers und dem konventionellen Planungsablauf orientiert, kann das System mit geringem Schulungsaufwand eingesetzt werden. Die gesamte Schnittplanungssequenz wird dabei in die Teilbereiche Diagnose, Planung der Knochenmanipulationen, Simulation der Operation und Schablonenherstellung unterteilt.

2.1 Diagnose

Bei der computerunterstützten Diagnose werden die aus der konventionellen Operationsplanung bekannten operationsspezifischen Parameter bestimmt. Die für die Beckenosteotomie üblichen Parameter ACE- und LCE- Winkel werden konventionell an Röntgenbildern ermittelt. Diese Integralprojektionsaufnahmen werden aus dem CT-Datensatz mittels speziell entwickelten Algorithmen erzeugt (Abb.1). Die Differenz der pathologischen Werte zu den aus der Literatur bekannten anatomischen Werten von LCE und ACE Winkel läßt einen direkten Rückschluß auf die nötige Korrektur der dysplastischen Hüftpfanne zu. Eine höhere Genauigkeit verspricht jedoch ein Ermitteln der nötigen Korrekturwerte anhand einer 3D-Simulation der Operation.

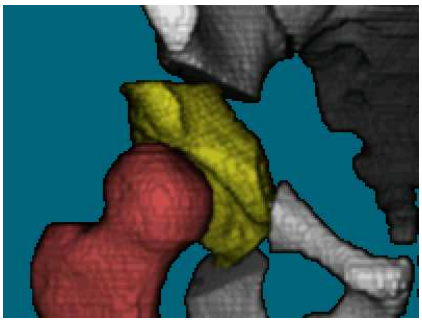

Abb. 3 Simulation der Triple-Becken-Osteotomie

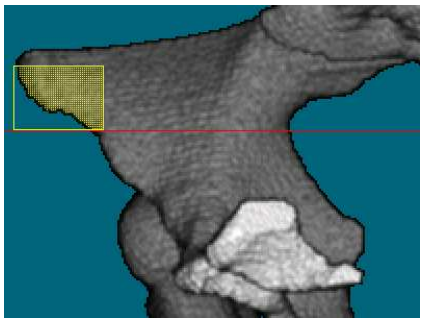

Abb. 4 Definition der Kontaktfläche für die Individualschablone

2.2 Planung der Osteotomien

Für die Planung der Osteotomien stellt das System dem Benutzer eine 3D Rekonstruktion der Knochenstruktur zur Verfügung, an der die Schnitte geplant werden. Die Definition der Schnittebenen ist durch medizinische Randbedingungen bestimmt. Einerseits birgt ein geringer Abstand der Osteotomie zur Hüftpfanne ein höheres Risiko einer avaskulären Nekrose, andererseits kann durch ein zu großes Acetabulum Fragment die freie Rotation behindert werden. Um diese Randbedingungen zu erfüllen, stellt das System eine Sicherheitskugel um den Femurkopf dar, an dem die Schnittebene tangential anliegt (Abb.2). Zur Definition der Schnittebene wird der Radius der Sicherheitskugel variiert und die Ebene um die sagitale und transversale Achse rotiert. Der Verlauf des Schnittes kann an einem Grauwertbild, welches die den Schnitt umgebenden Weichteile darstellt, überprüft werden.

2.3 Simulation der Knochenmanipulation

Um den Schnittverlauf der drei geplanten Osteotomien sowie die Mobilisierung und die intraoperativ notwendige Korrektur zu überprüfen, führt das System automatisch die geplanten Osteotomien durch, um das Acetabulum zu mobilisieren. Für die vollständige Mobilisierung des Acetabulums ist neben der Durchführung der Osteotomien die Trennung des Femurkopfes von der Hüftpfanne notwendig. Bei dysplastischen Hüftpfannen ist der Gelenkspalt durch die Auflösung der CT-Scanner nicht zwangsläufig auf den Tomogrammen sichtbar, so daß eine Trennung des Femurkopfes über eine Konturverfolgung nicht möglich ist. Hierfür wurden Algorithmen entwickelt, die in den Originalschichtbildern einen virtuellen Schnitt zwischen Femurkopf und Acetabulum durchführen und somit eine Trennung von Femur und Acetablum in den Tomogrammen ermöglichen. Die segmentierten Knochenstrukturen werden anschließend getrennt zu 3D Modellen rekonstruiert.

Abb. 5 Kompaktfräseinheit

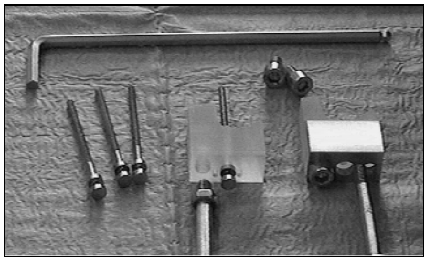

Abb. 6 Individualschablone

Durch die vollständige Mobilisierung des acetabularen Fragmentes ist der Benutzer in der Lage, die Rotation des Fragmentes durchzuführen und somit zu überprüfen, ob die geplante Schnittführung die erforderliche Umstellung ermöglicht (Abb.3). Des weiteren läßt sich auf diese Weise feststellen, in wie weit das Fragment gedreht werden muß, um eine gute Überdachung des Femurkopfes zu erreichen. Unterstützt wird der Chirurg dabei durch eine automatische Bestimmung der ACE- und LCE-Winkel, womit eine quantitative Aussage über die intraoperativ notwendige Korrektur möglich wird.

2.4 Schablonendefinition

Die Definition und Herstellung der Individualschablonen stellen den abschließenden Schritt der präoperativen Planung dar. Vom Arzt wird ein Schablonenrohling durch Auswahl aus einer Liste vorgegebener Rohling ausgewählt. Die Aufsatzrichtung der Schablone ergibt sich aus dem gewählten Operationszugang, wobei sie jedoch zusätzlich parallel zum Schnittverlauf verschoben werden kann. Während auf diese Weise die Kontaktfläche selektiert wird, stellt sich das Knochenmodell senkrecht zur Aufsatzrichtung dar, und der resultierende Kontaktbereich wird berechnet und angezeigt (Abb. 4).

Die für die Herstellung der Individualschablonen benötigten NC-Fräsfiles werden automatisch nach der Auswahl der Kontaktflächen generiert und auf einer angeschlossenen Kompaktfräseinheit zur Ausführung gebracht (Abb. 5).

2.5 Intraoperativer Einsatz

Die Individualschablonen sind autoclavierbar und können mit dem übrigen Operationsbesteck zur Operation bereitgestellt werden (Abb.6). Intraoperativ läßt sich die Referenzierung durch formschlüssiges Aufsetzen der Individualschablone auf den Knochen erreichen. Die aufgesetzte Schablone wird mit einem Fixierungsnagel gegen Verrutschen gesichert und dient der Werkzeugführung. Die Position der aufgesetzten Individualschablonen kann durch intraoperative Röntgenaufnahmen verifiziert werden. Bei klinischen Versuchen mit Individualschablonen konnten wir neben einer Verkleinerung des Zugangsweges, eine Verkürzung der Operationsdauer sowie eine Verringerung der Durchleuchtungszeiten feststellen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Anhand der 3D präoperativen Planung auf Basis von CT-Daten kann sich der Benutzer über die Möglichkeiten der konventionellen Operationsplanung hinaus, ein mentales Modell der vorliegenden biomechanischen Verhältnisse bilden. Des weiteren erlaubt dies eine exakte Planung der Knochenbearbeitung, wie z.B. von Osteotomien. Durch eine Simulationsumgebung können die geplanten Knochenmanipulationen durchgeführt werden und ein erster Eindruck der Auswirkungen vermittelt werden. Darüber hinaus bietet sich eine auf 3D Daten gestützte Korrekturplanung an. In Verbindung mit dem Prinzip der Individualschablonen steht ein intuitiv zu gebrauchendes und den ursprünglichen Arbeitsprozeß unterstützendes Hilfsmittel zur Verfügung, welches eine exakte intraoperative Umsetzung der präoperativ Planung ermöglicht.

Im Rahmen des IGOS II Projektes wird das Planungssystem derzeit um ein Planungsmodul für das Setzen von Pedikelschrauben bei Skolioseoperationen erweitert.

4 Literatur

1. Radermacher, K., Staudte, H.-W., Rau, G.: Computer Assisted Orthopaedic Surgery by Means of Individual Templates - Aspects and Analysis of Potential Applications. DiGioia III, A. et al. (eds.): Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, Carnegie Mellon University Pittsburgh, 1995, pp.451-463
2. Radermacher, K., Staudte, H.-W., Rau, G.: Computer Assisted Orthopedic Surgery By Means of Individual Templates. Proc.3rd European Conference on Engineering an Medicine, 1995, p.348
3. Radermacher, K., Rau, G., Staudte, H.-W.: Computer Integrated Orthopedic Surgery - Connection of Planning and Execution in Surgical Interventions. in: Taylor,R., Lavallée, St., Burdea, G., Moesges, R. (eds.): Computer Integrated Surgery, MIT-Press, Cambridge, MA, 1996, pp.451-463
4. Tönnis, D., A. Arnig, M. Bloch, A. Heinecke, K. Kalchschmidt, (1994): Triple Pelvic Osteotomy. J. of Ped. Orthopeadic Part B, Vol.3, No.1, pp. 54-67
5. Portheine, F.,Radermacher,K., Zimolong, A., Anton,M. ,Eichhorn, Ch., Staudte, H.-W., Rau, G.: Development of a clinical demonstrator for computer assisted orthopedic surgery with CT-image based individual templates - in: Lemke, Vannier, Inamura (eds.): Computer Assisted Radiology and Surgery, Elsevier, 1997, pp. 944 - 949