3D–Modellierung eines Scaphoides zur computergestützten Operationsplanung

R.H. van Lengen,[a] H. Moock,[a] C. Braun,[b] T. Baumbach,[b] J. Stahl[b]

[a]Computergraphik und Geometrische Datenverarbeitung
Universität Kaiserslautern
Postfach 3049, D-67653 Kaiserslautern
lengen@informatik.uni-kl.de

[b]Abt. für Unfall- Hand- und Wiederherstellungschirurgie
Universitätskliniken des Saarlandes
D-66421 Homburg/Saar
chcbra@med-rz.uni-sb.de

Die minimal invasive Osteosynthese ist eine spezielle Operationstechnik, die u.a. bei der Behandlung von Frakturen des Scaphoides zur Anwendung kommt. Dabei wird von außen ohne Freilegen des Knochens eine Schraube zur Fixation angebracht. Diese Vorgehensweise reduziert das Risiko typischer Komplikationen, wie beispielsweise Pseudoarthrose oder Osteonekrose. Die Bestimmung der optimalen Schraubenposition erweist sich allerdings aufgrund der komplexen Form des Scaphoides als äußerst problematisch. Insbesondere gilt es zu vermeiden, daß der Schraubenkanal teilweise außerhalb des Knochens verläuft. Ziel dieses Gemeinschaftsprojekts ist die Entwicklung eines computerbasierten Systems zur präoperativen Planung und Verifikation des Kanalverlaufs.

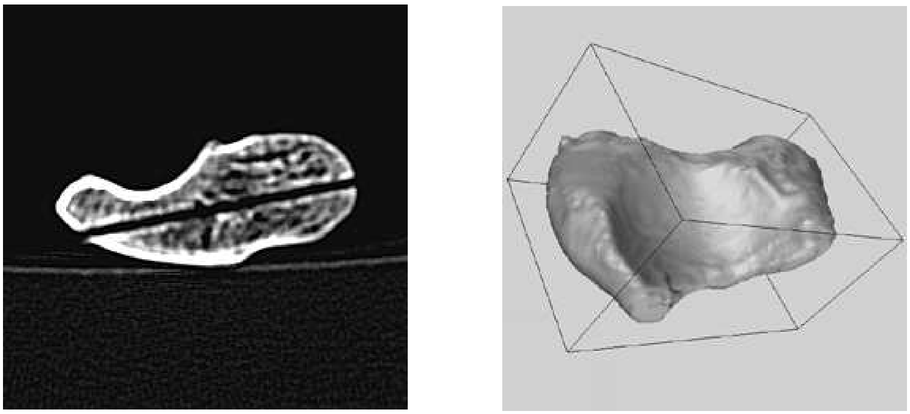
Keywords: Osteosynthese, 3D-Rekonstruktion, Scaphoid, Operationsplanung

1 Einleitung

Bei der minimal invasiven Osteosynthese, einer speziellen Operationstechnik die u. a. bei der Behandlung von Frakturen des Scaphoides zum Einsatz kommt, wird von außen ohne Freilegen des Knochens eine Schraube zur Fixation angebracht. Diese Vorgehensweise bringt aus medizinischer Sicht gewisse Vorteile, die allerdings durch die problematische Bestimmung der optimalen Schraubenposition relativiert werden. Die ausgesprochen komplexe Form des Scaphoides erschwert die Festlegung eines vollständig im Knocheninneren verlaufenden Schraubenkanals. Abbildung 1 zeigt die 3D-Rekonstruktion eines Scaphoides und demonstriert die optimale Plazierung der Schraube am Beispiel einer Magnetresonanztomographie.

Primäre Zielsetzung des Projekts ist die Entwicklung eines Softwaresystems, das es dem Mediziner erlaubt bei einem akuten Fall schnell und effizient eine präoperative Planung, d. h. die Positionierung der Schraube bzw. die Verifikation des Schraubenkanals, durchzuführen. Zu diesem Zweck können in Abhängigkeit von der Datenerhebung CT- und MRT-Aufnahmen, ein aus CT- und MRT-Aufnahmen rekonstruiertes 3D-Modell oder ein vom behandelnden Arzt auf Basis von Erfahrungswerten bzw. von Röntgenaufnahmen erzeugtes 3D-Modell herangezogen werden.

Von zentraler Bedeutung für das System ist die Generierung eines 3D-Modells des zu behandelnden Scaphoides, die im folgenden Kapitel beschrieben wird. Der Aufbau und die Arbeitsweise des Systems ist Gegenstand des dritten Abschnitts. Im letzten Kapitel wird kurz auf die Einsatzmöglichkeiten und die künftige Weiterentwicklung eingegangen.



a) b)

Abbildung 1: (a) Scaphoid mit optimalem Schraubenkanal. (b) 3D-Rekonstruktion eines Scaphoides.

2 Dreidimensionale Modellgenerierung

Die entscheidende Rolle bei der computergestützten Operationsplanung nimmt die dreidimensionale Modellgenerierung ein, die damit die wichtigste Systemkomponente ist. Ausgangspunkt für die Entwicklung geeigneter Algorithmen bilden CT- und MRT-Schichtsequenzen mehrerer aus Leichen entnommener Scaphoiden, wobei sich jede Sequenz aus ca. 35 Einzelaufnahmen zusammensetzt. Zur Vermeidung von Bewegungsartefakten und zur Schaffung eines einheitlichen Bezugssystems wurden die Scaphoiden vor der Aufnahme in Gelatine eingebettet.

Durch Anwendung eines geeigneten Tiefpaßfilters wurde zunächst das in den Rohdaten enthaltene Rauschen unterdrückt. Die anschließende Kantendetektion [1] mit Hilfe eines Standardverfahrens der digitalen Bildverarbeitung bestimmt aus jeder Schichtaufnahme die Kontur des Scaphoides, die sich unter Umständen verzweigen oder in zwei isolierte Konturen aufteilen kann. Auf Basis dieser Konturinformationen lassen sich mittels der beiden folgenden Techniken 3D-Rekonstruktionen des Scaphoides generieren:

a.) Triangulation der einzelnen Konturen [2]

b.) Interpolation bzw. Approximation von Tensorproduktflächen [3].

In beiden Fällen ist eine anschließende Datenreduktion vorteilhaft, um dem Anwender die interaktive Bearbeitung des 3D-Modells zu erleichtern.

Sind in einem konkreten Fall CT- bzw. MRT-Aufnahmen verfügbar, so erlaubt die geschilderte Vorgehensweise die Generierung eines 3D-Modells. Im Hinblick auf das zu realisierende Softwaresystem muß darüberhinaus für den behandelnden Arzt die Möglichkeit bestehen, auch beim Fehlen dieser Informationen ein Modell zur Operationsplanung zu erstellen. Zu diesem Zweck werden die aus den aufbereiteten Schichtaufnahmen rekonstruierten 3D-Modelle der präparierten Scaphoiden klassifiziert und zum Aufbau einer Typologie herangezogen. Jeder Typklasse wird ein Repräsentant zugeordnet, der beim späteren Einsatz des Systems als Ausgangsmodell dient und vor dem Planungsprozeß speziell vom Arzt an den aktuellen Fall angepaßt werden muß.

3 Rechnergestützte Operationsplanung

Die Durchführung der Operationsplanung kann sowohl auf Basis zweidimensionaler Schichtdaten (2D-Planung) als auch unter Verwendung eines 3D-Modells (3D-Planung) erfolgen. Die weitere Vorgehensweise hängt davon ab, ob dem behandelnden Arzt CT- bzw. MRT-Aufnahmen zur Verfügung stehen (s. Abb. 3).

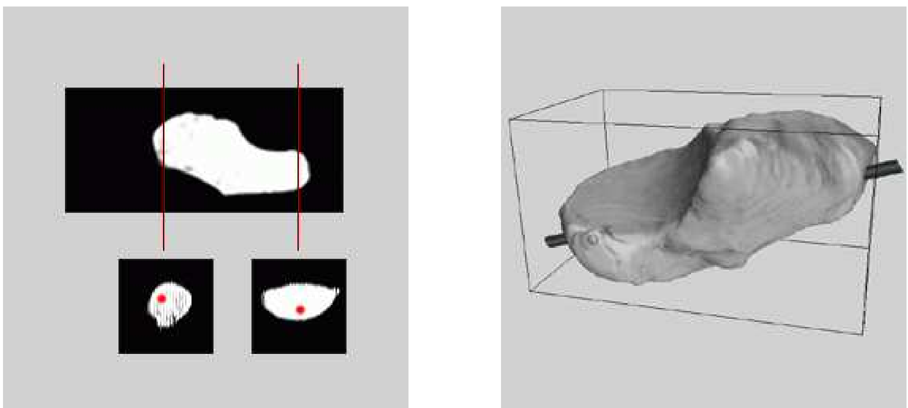
Vorhandene Aufnahmen werden nach einer entsprechenden Aufbereitung entweder direkt zur 2D-Planung verwendet oder zur Generierung eines 3D-Modells eingesetzt, an dem anschließend die 3D-Planung ausgeführt werden kann.

Für den Fall das keine Aufnahmen angefertigt werden können, muß der Chirurg zunächst auf Grundlage von Erfahrungswerten bzw. Röntgenbildern den Typ des zu behandelnden Knochens unter Zuhilfenahme der vom System bereitgestellten Klassifikation (s. Kapitel 2) bestimmen. Der Repräsentant der ausgewählten Klasse kann vom Arzt manuell angepaßt werden, um eine weitgehende Übereinstimmung des Modells mit dem Scaphoiden zu erzielen. Das auf diese Weise entstandene Modell ist direkt für die 3D-Planung geeignet. Darüberhinaus lassen sich aus dem 3D-Modell Schichten in beliebiger Orientierung gewinnen, die auch eine 2D-Planung ermöglichen.

Die Anpassung bzw. Veränderung des standardisierten Modells erfolgt entweder lokal durch interaktives Verschieben von Dreieckspunkten bzw. Kontrollpunkten bei Freiformflächen oder global durch den Einsatz von FFD-Blöcken (engl.: *Free Form Deformation*). Diese Verfahren werden in einen graphischen Editor integriert, der neben Standardfunktionalitäten wie Skalieren, Verschieben oder Drehen auch das Anfertigen beliebiger Anschnitte des Volumenmodells beinhaltet.

Über die Modellmanipulation hinaus wird dieser Editor auch für die eigentliche Operationsplanung genutzt. Im zweidimensionalen Fall werden hierzu die folgenden Funktionalitäten angeboten (vgl. Abb. 2):

- Positionierung der Schraube in den Zielpunkten der Knochenpole
- Berechnung der Schnittflächen des Schraubenkanals mit den restlichen Schichten
- Visuelle und automatische Verifikation der Lage und Orientierung des Schraubenkanals, z. B. minimale Distanz der Schraube zur Knochenkontur.



a) b)

Abbildung 2: (a) Vordere und hintere Planungsebene mit eingezeichneten Bohrungen. (b) Scaphoid mit Schraube (3D-Rekonstruktion).

Für die 3D-Planung bietet der Editor die Möglichkeit die Schraube im dreidimensionalen Raum frei zu positionieren und damit im 3D-Modell optimal anzubringen. Im Anschluß daran erfolgt eine visuelle oder automatische Überprüfung, ob der Schraubenkanal das Knocheninnere nicht verläßt. In der Regel kann davon ausgegangen werden, daß die Operationsplanung zunächst an Hand zweidimensionaler Schichten durchgeführt wird und danach eine Feinabstimmung im dreidimensionalen Raum stattfindet.

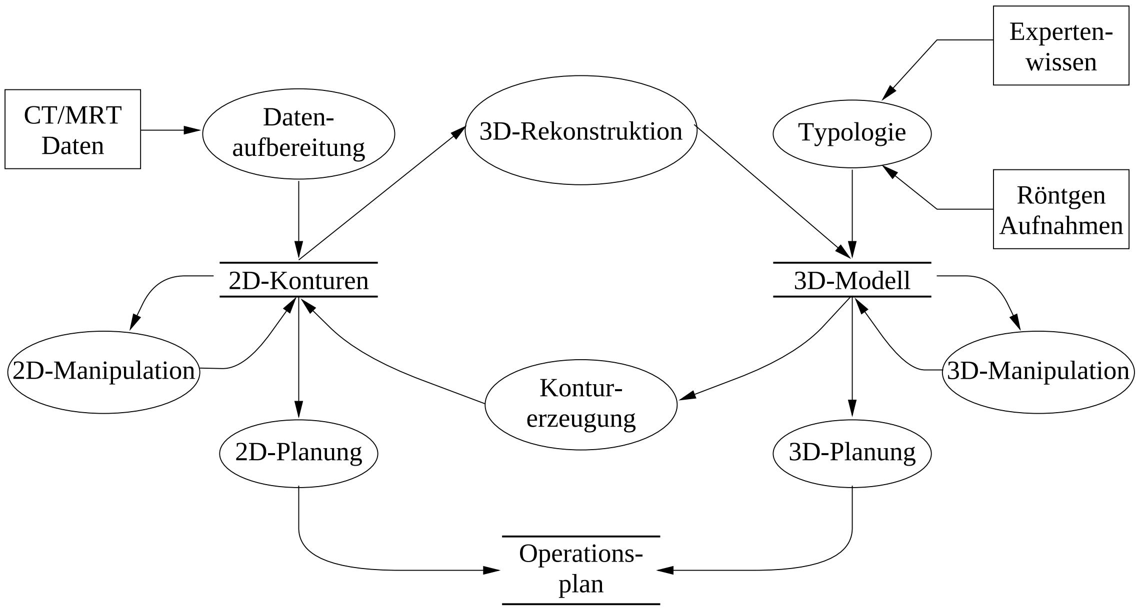


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Systemaufbaus.

4 Ausblick

Bei dem vorgestellten Softwaresystem handelt sich um ein vielversprechendes Werkzeug zur computergestützten Simulation der minimal invasiven Osteosynthese des Scaphoides. Das System wurde so konzipiert, daß der Einsatz zur Operationsplanung bei der Behandlung von Frakturen auch in anderen Bereichen möglich ist. In einem weiteren Entwicklungsschritt ist an die vollautomatische Bestimmung der optimalen Schraubenposition gedacht.

Literatur

[1] William K. Pratt. *Digital Image Processing*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, January 1978.

[2] J.D. Boissonnat. Shape Reconstruction from Planar Cross–Sections. *Computer Graphics & Image Processing*, 44:1–29, September 1988.

[3] Gerald Farin. *Curves and Surfaces for CAGD*. Computer Science and Scientific Computing. Academic Press, Inc., Boston, 3rd. edition, 1992.