

Computergestützte 3D-Operationsplanung zur präoperativen Repositionierung von Knochenfragmenten bei komplizierten Knochenbrüchen

Kai Bestmann¹, Jan Ehrhardt², Daniel Briem³, Johannes Rürger³,
Stefan Müller¹, Heinz Handels²

¹Institut für Computervisualistik, Universität Koblenz, 56070 Koblenz

²Institut für Medizinische Informatik

³Klinik für Unfall-, Hand- und Wiederherstellungschirurgie

^{2,3}Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, 20246 Hamburg

Email: j.ehrhardt@uke.uni-hamburg.de

Zusammenfassung. In diesem Beitrag wird das Softwaresystem PROFRAPS zur virtuellen Repositionierung von Knochenfragmenten bei komplexen Frakturen vorgestellt. Mittels verschiedener Visualisierungstechniken, wie z.B. Farb- und Transparenzdarstellungen, wird die räumliche Zusammensetzung der Fraktur dem Anwender verdeutlicht. Die detaillierte Analyse eng beieinander liegender und verdeckter Fragmente wird dabei durch eine Explosionsdarstellung ermöglicht. Die Einzelschritte der vollständigen Repositionierung werden in einer Transformationshistorie dokumentiert und für die spätere intraoperative Umsetzung ausgegeben. Eine integrierte Kollisionserkennung gewährleistet stets gültige Fragmentpositionen. PROFRAPS wurde an zwei Trümmerfrakturen getestet. Eine quantitative Evaluation der Laufzeit ergab, dass die Kollisionserkennung auch für sehr komplexe Frakturen in Echtzeit erfolgt. Die vorgestellte Anwendung ermöglicht damit die detaillierte Planung der Fragmentrepositionierung für eine Operation, indem komplizierte Knochenbrüche präoperativ umfassend analysiert und virtuell repositioniert werden.

1 Einleitung

In zahlreichen medizinischen Anwendungen haben sich computergestützte Techniken für die Operationsplanung, –simulation und –durchführung in der chirurgischen Praxis etabliert [1, 2, 3]. Auch im Bereich der Unfallchirurgie existieren (teils kommerzielle) computergestützte Systeme, deren Einsatzgebiete jedoch häufig auf Standardeingriffe, wie z.B. einfache Schaft- oder Gelenkfrakturen, beschränkt sind [1, 4, 5, 6, 7]. Sie werden oftmals zur Unterstützung der intraoperativen Repositionierung und Fixierung unter Verwendung fluoroskopischer Bildgebung eingesetzt. Für die Planung komplizierter Knochenfrakturen, wie z.B. bei Trümmerbrüchen im Gelenkbereich, sind diese Anwendungen nur eingeschränkt einsetzbar.

Im klinischen Alltag der Unfallchirurgie werden bei Trümmerfrakturen zu meist Volumendaten mit Hilfe der Computertomographie erzeugt. Die Fraktur wird anschließend anhand der Schichtansichten des vorliegenden Volumens analysiert und die anstehende Operation geplant. Eine 3D-Visualisierung der Fraktur unterstützt einen Chirurgen bei diesen Aufgaben. Sie gibt dem Betrachter einen erweiterten Eindruck der räumlichen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Frakturteilen. Aber auch diese Darstellungsform weist Schwächen auf. Es existieren Frakturen, bei denen Knochenteile vollständig eingeschlossen und daher nicht sichtbar sind. Zudem gibt eine statische 3D-Ansicht zusammen mit Schichtbildern oftmals unzureichenden Aufschluss über die Komplexität der Positions- und Orientierungsabweichung von der natürlichen Position und Ausrichtung wieder. Um ein umfassendes Verständnis der Fraktursituation bei komplexen Trümmerbrüchen zu ermöglichen, sind daher eine erweiterte 3D-Visualisierung und eine interaktive Manipulation der Knochenteile bezüglich Darstellung und Positionierung sinnvoll.

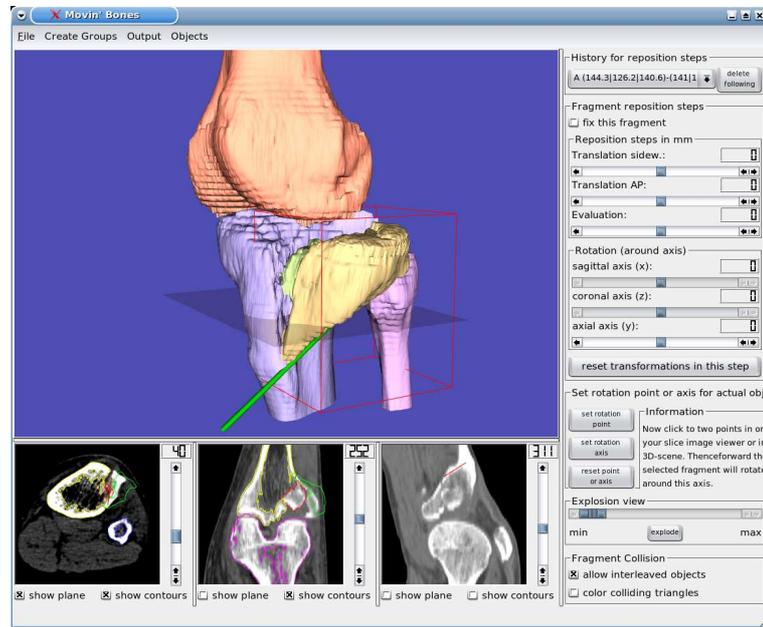
In der hier vorgestellten Arbeit wurde das Softwaresystem PROFRAPs zur präoperativen Planung von Gelenkfrakturen entwickelt. Mittels verschiedener Visualisierungstechniken wie z.B. der Transparenz- und Explosionsdarstellung wird die räumliche Konstellation und Beschaffenheit der Knochenfragmente verdeutlicht. Die Knochenfragmente können interaktiv repositioniert werden. Dabei werden die Repositionierungsschritte der Frakturteile vollständig dokumentiert und nach Abschluss der Planung in einer für den Arzt geeigneten Form ausgegeben. Durch die Verwendung von Kollisionserkennungsverfahren wird die Repositionierung in der virtuellen Szene erleichtert und die Gültigkeit der Fragmentpositionen sichergestellt.

2 Methoden

In einem Vorverarbeitungsschritt werden aus den CT-Datensätzen Oberflächenmodelle der einzelnen Knochenteile konstruiert. Diese werden zusammen mit den CT-Daten in die Anwendung (Abb. 1) eingeladen. Mittels verschiedener Visualisierungstechniken, wie z.B. Farb- und Transparenzdarstellungen, wird die räumliche Zusammensetzung der Fraktur dem Anwender verdeutlicht. Zusätzlich ermöglicht eine Explosionsdarstellung der gesamten Knochenfraktur die Übersicht über die vorhandenen Frakturteile und lässt zudem die Analyse eng beieinander liegender und verdeckter Fragmente zu (Abb. 2). Es besteht die Option, die orthogonalen Schichtansichten mit den Konturen der Knochenteile aus der veränderbaren 3D-Szene zu überlagern, wodurch eine Beziehung zwischen der für den Arzt gewohnten 2D- und der 3D-Darstellung hergestellt wird.

Die Repositionierung der Frakturteile erfolgt durch rigide Transformationen, wobei Rotationen um frei definierbare Punkte oder Achsen erlaubt werden. Rotationspunkte oder -achsen werden entweder in der 3D-Ansicht auf den Objektoberflächen oder in einer der orthogonalen Schichtansichten definiert. Die durchgeführten Transformationen einzelner oder gruppierter Objekte werden in

Abb. 1. Benutzeroberfläche von PROFRAPS: Links oben ist die 3D-Darstellung der gesamten Fraktur zu finden. Darunter befinden sich die drei verschiedenen Schichtenansichten, wobei die Konturen der Knochenfragmente jeweils überlagert dargestellt sind



einer Transformationshistorie hinterlegt. Dies ermöglicht die Bewegungsabläufe der Repositionierung nachträglich zu betrachten.

Wahlweise kann während der Transformation von Knochenfragmenten eine Kollisionserkennung zwischen den einzelnen Objekten durchgeführt werden. Dazu wurde die Softwarebibliothek V-Collide [8] mit VTK verknüpft. V-Collide wurde nach dem Vergleich mit anderen Kollisionsbibliotheken ausgewählt, da es mit triangulierten, beliebig komplexen *polygon-soups* umgehen kann und zugleich eine ausreichend schnelle Verarbeitung bietet. Die Kollisionserkennung gewährleistet eine gültige Fragmentposition während der Korrektur. Alternativ ist die Möglichkeit gegeben, Überschneidungen und Berührungspunkte von Fragmenten farblich hervorzuheben (Abb. 3).

Der Repositionierungsprozess einer Fraktur kann im XML-Format dokumentiert und gespeichert werden. Dabei werden alle Teiltransformationen und Darstellungseigenschaften der Knochenfragmente gesichert. Die Modell- und Volumendaten bleiben unverändert. Es besteht zudem die Möglichkeit pro Fragment die Teiltransformationen oder eine einzige durch Faktorisierung ermittelte Gesamttransformation der Repositionierung im HTML-Format auszugeben. In diese druckbare Ausgabe können beliebig viele, interaktiv wählbare 3D-Szenendarstellungen eingefügt werden. Ein Ausdruck dieses Reports kann während der Operation als Hilfestellung genutzt werden, ohne dass zusätzliche

Gerätschaften im Operationssaal notwendig sind. Er dient der Betrachtung der einzelnen Repositionierungsschritte und dem Verstehen der räumlichen Zusammenhänge.

3 Ergebnisse

PROFRAPS wurde anhand zweier Trümmerfrakturen getestet. Eine Fraktur des Knies bestand dabei aus fünf Fragmenten. Bei der zweiten Fraktur handelte es sich um eine Fraktur der Hüfte, bestehend aus acht Fragmenten. Die Anzahl der Dreiecke, aus denen die verwendeten 3D-Objekte bestanden, lag zwischen 6384 und 225516. Bei den Tests wurden verschiedene große und komplexe Knochenmodelle willkürlich durch die Szene bewegt. Der Repositionierungsprozess der Knochenfragmente konnte auch bei aktiver Kollisionserkennung in Echtzeit erfolgen. Hierbei wurden Berechnungszeiten von weniger als 0.001 Sekunden benötigt, wodurch eine Anbindung von haptischen Ein- und Ausgabegeräten möglich wird. Die optionale farbliche Markierung kollidierender Objektdreiecke bei Transformationen verursachte jedoch eine Frequenz von weit weniger als 25 Hz, da alle von der Kollision betroffenen Modelldreiecke ermittelt und neu dargestellt werden müssen.

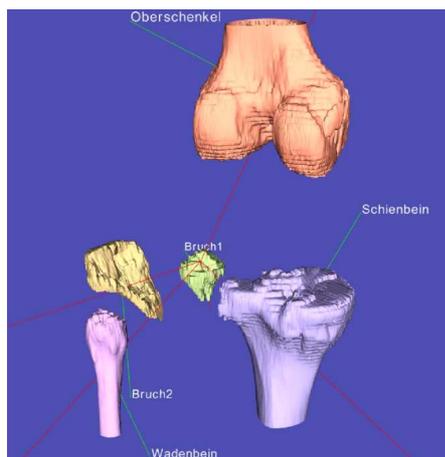


Abb. 2. Das Bild illustriert die Explosionsdarstellung einer Kniefraktur, in der die Fragmente auseinandergezogen und beschriftet werden. Zudem sind die Bewegungspfade der Fragmente, ausgehend von Szenenmittelpunkt, eingezeichnet.

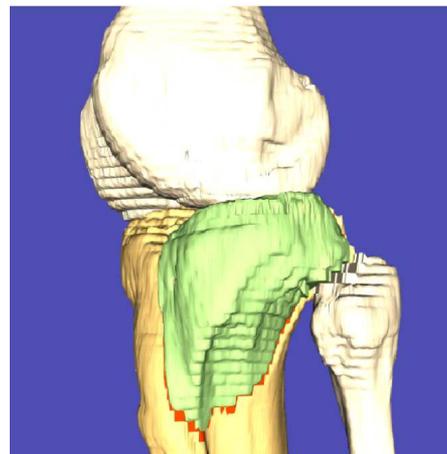


Abb. 3. Das linke Bild zeigt eine Szene, bei der kollidierende Dreiecke am Tibiaschaft mit der Farbe rot hervorgehoben werden.

4 Diskussion

PROFRAPS ermöglicht die Planung der einzelnen Schritte der Fragmentrepositionierung für eine Operation, indem komplizierte Knochenbrüche präoperativ analysiert und virtuell korrigiert werden. Dazu werden die Fragmente unterschiedlich dargestellt. Die Explosionsdarstellung findet bei den Medizinern großen Zuspruch, um eine Übersicht über die vorhandenen Fragmente zu gewinnen. Die Kollisionserkennung arbeitet in Echtzeit und erleichtert die Ermittlung von reproduzierbaren und gültigen Planungsergebnissen.

Der Zeitaufwand für die Segmentierung der Fraktursegmente und die 3D-Modellerstellung ist derzeit noch zu hoch, um die Anwendung im medizinischen Alltag anwenden zu können. Deshalb ist für diesen Prozess eine Optimierung geplant. Zudem gilt es die Qualität der 3D-Modelle zu verbessern, ohne dabei notwendige Informationen zu verlieren. Für die Lehre von Studierenden der Medizin außerhalb des Klinikalltags ist eine Nutzung bereits jetzt schon möglich.

In zukünftigen Arbeiten soll PROFRAPS um weitere Komponenten erweitert werden: die Anbindung haptischer Ein- und Ausgabegeräte [9], Verfahren zur automatischen Repositionierung und die Integration von Fixationsobjekten sowie Methoden, um den Interaktionsaufwand bei der Segmentierung der Fraktursegmente zu reduzieren.

Literaturverzeichnis

1. Schep NWL, Broeders IAMJ, van der Werken C. Computer assisted orthopaedic and trauma surgery: State of the art and future perspectives. *Injury* 2003;34(4):299–306.
2. Börner M, Lahmer A, Bauer A, Stier U. Experiences with the ROBODOC system in more than 1000 cases. *Procs CARS* 1998; 689–693.
3. Viceconti M, Lattanzi R, Antonietti B, et al. CT-based surgical planning software improves the accuracy of THR preoperative planning. *Med Eng Phys* 2003;25(5):371–377.
4. Gosling T, Westphal R, Hufner T, et al. Robot-assisted fracture reduction: A preliminary study in the femur shaft. *Med Biol Eng Comput* 2005;43(1):115–120.
5. Marschollek M, Teistler M, Bott OJ, et al. Pre-operative dynamic interactive exploration of complex articular fractures using a novel 3D navigation tool. *Methods Inf Med* 2006;45(4):384–388.
6. Joskowicz L, Milgrom C, Simkin A, et al. FRACAS: A system for computer-aided image-guided long bone fracture surgery. *Comput Aided Surg* 1998;3(6):271–288.
7. BrainLab AG. Kapellenstr. 12, Feldkirchen, Germany. VectorVision - Trauma; 2006.
8. Hudson TC, Lin MC, Cohen J, et al. V-COLLIDE: accelerated collision detection for VRML. In: *Procs VRML*. New York: ACM Press; 1997. 117–121.
9. Färber M, Drescher F, Ehrhardt J, et al. Integration von haptischen Ein-/Ausgabegeräten zur intuitiven Interaktion mit virtuellen Körpern in OP-Planungssysteme. In: *Procs GMDS*. Leipzig; 2006. 71–72.