Die realistische haptische Interaktion mit anatomischen Modellen für die Simulation der Felsenbeinchirurgie

A. Petersik[1], B. Pflesser[1], U. Tiede[1], K. H. Höhne[1] und R. Leuwer[2]

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, [1]Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin, [2]HNO-Klinik,
Email: petersik@uke.uni-hamburg.de

Zusammenfassung. Es wird ein neuer Ansatz für die realistische haptische Interaktion mit anatomischen Modellen vorgestellt.
Das haptische Rendering basiert auf einer Kollisionserkennung, die mehrere Werkzeugpunkte berücksichtigt, um eine realistische Werkzeug-Objekt-Interaktion zu ermöglichen. Sowohl die haptische als auch grafische Darstellung werden mit Subvoxel-Genauigkeit berechnet. Dadurch können die Modelle in jeder beliebigen Vergrößerung untersucht werden. Die haptischen Kräfte werden mit einer Frequenz von 6kHz berechnet und an ein Force-Feedback-Gerät übermittelt. Im Vergleich zu klassischen Single-Point basierten Verfahren führt diese einzigartige Kombination aus Multi-Point-Ansatz und Subvoxel-Genauigkeit zu sehr realistischen und detaillierten haptischen Eindrücken.
Eine Hauptanwendung der hier vorgestellten Algorithmen ist ein Simulator für die Felsenbein-Chirurgie. Mit einem simulierten Fräser kann Knochen mit realistischem "Look and Feel" abgetragen und so der Zugang zum Mittelohr interaktiv studiert werden.

1 Einleitung

Die Simulation von chirurgischen Eingriffen mittels Computer ist ein stark wachsendes Gebiet in der medizinischen Bildverarbeitung. Das liegt einerseits daran, dass heute detaillierte anatomische Computermodelle existieren [1] und anßdererseits entsprechende Virtual Reality Hardware [2] verfügbar ist. Die meisten heutigen Simulationssysteme konzentrieren sich auf die elastische Deformation von Weichteilgewebe. Die Simulation von Bohr- und Fräsvorgängen an festen Strukturen ist dagegen weniger untersucht und hat ganz andere Anforderungen: Sowohl Genauigkeit als auch Auflösung muss entsprechend groß sein, um z.B. an der komplexen Anatomie des Felsenbeins arbeiten zu können. Entsprechende hochauflösende Verfahren für nicht-deformierendes Schneiden wurden in [3] vorgestellt.

Die realistische haptische Simulation von Werkzeuginteraktion kann mit den heute meist eingesetzten Single-Point-basierten Algorithmen für das haptische Rendering nicht gelöst werden. Ziel dieser Arbeit war es, Algorithmen zu entwickeln, die die in [4] vorgestellte subvoxelgenaue Auflösung auch für das haptische

Rendering verfügbar machen, um somit eine realistische haptische Interaktion mit beliebig komplexen anatomischen Modellen zu ermöglichen. Weiterhin war es notwendig, geeignete Algorithmen zu entwickeln, die realistische Kräfte während des Bohrens berechnen. Als Anwendung dieser Algorithmen wurde ein System entwickelt, welches die realistische Simulation von Felsenbeinoperationen mit stereoskopischer Darstellung und haptischem Feedback ermöglicht.

2 Methoden

Folgende Eigenschaften sind für das realistische haptische Rendering in dem Felsenbein-Chirurgie-Simulator wichtig.

- Die Kollisionserkennung sollte auf einem Multi-Point Ansatz basieren, um eine realistische Werkzeug-Objekt-Interaktion zu ermöglichen
- Um ein realistisches haptisches Feedback während der Bohroperation zu bekommen, muss ein haptisches Verfahren entwickelt werden, welches die Kräfte beim Bohren realistisch simuliert.

2.1 Repräsentation der Daten

Das zugrundeliegende Computermodell benutzt eine voxelbasierte Repräsentation, die z.B. aus CT-Daten erzeugt werden kann. Für den Felsenbein-Chirurgie-Simulator sind entsprechende Strukturen, wie Hammer, Amboss, Gesichtsnerv etc. segmentiert worden. Um eine detaillierte Visualisierung der Daten zu erreichen, werden die Oberflächen einer Struktur in diesem Modell über einen Ray-Casting Algorithmus mit Subvoxel-Genauigkeit bestimmt [4]. Dies führt zu glatten und detaillierten Oberflächen, sowohl in der visuellen, als auch in der haptischen Darstellung. Um die modifizierten Strukturen in dem voxelbasierten Modell ebenfalls mit großer Genauigkeit zu repräsentieren, wurde ein Algorithmus implementiert, der die durch die Werkzeuge herausgeschnittenen Bereiche in einem zusätzlichen Volumen subvoxelgenau ablegt [3].

2.2 Haptisches Rendering

Für die Kollisionserkennung mit den Werkzeugen wurde ein Verfahren benutzt, das auf dem in [5] gezeigten aufbaut, jedoch in vielen Punkten verbessert und an die Subvoxel-Genauigkeit angepasst wurde. Bei dem Verfahren werden mehrere Oberflächenpunkte eines Werkzeuges auf Kollision geprüft. Wenn es zur Kollision kommt, wird für jeden Kollisionspunkt ein Vektor bestimmt, der zu einer kollisionsfreien Stelle führt. Der Mittelwert aller gefundenen Kollisionsvektoren führt zu einer kollisionsfreien Position für das gesamte Werkzeug. Die letzte kollisionsfreie Position für das Werkzeug wird dabei jeweils als sogenannter Proxy gespeichert, um für solche Positionen eine Rückstellkraft berechnen zu können, an denen sich das Werkzeuge tiefer innerhalb einer Struktur befindet. An solchen Stellen können dann für die meisten Oberflächenpunkte keine kollisionsfreien Stellen mehr gefunden werden. Dies tritt insbesondere bei der Benutzung sehr kleiner Werkzeuge häufig auf. Der Proxy erlaubt es durch Suche zwischen Werkzeug und Proxy zu einer Position zu kommen, wo die Kollisionskraft durch den oben beschriebenen Algorithmus wieder berechnet werden kann.

2.3 Berechnung der Kräfte während der Volumenmodifikation

Um während des Fräsvorganges eine realistische Kraft zu berechnen, werden mehrere Parameter berücksichtigt:

- Je größer die Bohrgeschwindigkeit, desto größer die Bohrkraft
- Je mehr Material entfernt wird, desto größer die Bohrkraft
- Die Richtung der Bohrkraft ist abhängig von der Position des entfernten Materials und der Bewegungsrichtung des Werkzeuges.

Zusätzlich wird durch das Aufmodulieren von Schwingungen auf die Bohrkraft, das Gefühl des echten Bohrens imitiert.

3 Ergebnis

Mit den hier vorgestellten Algorithmen ist es möglich, beliebig komplexe, voxelbasierte Modelle visuell und haptisch zu "begreifen" und mit diesen Modellen bohrend und fräsend zu interagieren. Die hohe Genauigkeit und Auflösung wird durch die subvoxelgenaue Bestimmung der Strukturoberflächen erreicht. Da die Bohroperationen ebenfalls subvoxelgenau modelliert werden, ist sehr genaues Arbeiten auch mit sehr kleinen Werkzeugen möglich. Der Multiple-Point-Kollisionserkennungsalgorithmus führt im Gegensatz zu einem Single-Point-Algorithmus zu einem wesentlich realistischeren haptischen Gefühl. Besonders für die realistische Simulation von Interaktion mit Werkzeugen ist die Multi-Point-Methode unverzichtbar. Das Aufmodulieren von Bohrgeräuschen auf das Werkzeug führt zu einem sehr realistischen Eindruck. Durch eine stereoskopische Darstellung mit Rot/Grün- oder Shutterbrillen wird die räumliche Wahrnehmung weiter verbessert. Das System läuft auf einem Compaq SP750 mit zwei Pentium III Xeon 866MHz und 2GB Hauptspeicher. Dabei wird bei 26 Kollisionspunkten auf dem Werkzeug eine haptische Updaterate von 6kHz erreicht. Auch das visuelle Update der modifizierten Region geschieht mit einer mittleren Frequenz von 8Hz. Somit ist eine interaktive Benutzung sichergestellt.

4 Schlussfolgerungen

Das hier vorgestellte System erlaubt eine sehr realistische bohrende und fräsende Interaktion mit beliebig komplexen anatomischen Modellen. Insbesondere für die Vermittlung von anatomischen Gegebenheiten kann es sehr gut eingesetzt werden. Ein erstes System ist ein Simulator für die Felsenbeinchirurgie. Hierbei kann die Kombination aus stereoskopischer visueller Darstellung, haptischem Feedback und Interaktion wesentliche Aspekte einer Felsenbein-OP vermitteln [6].

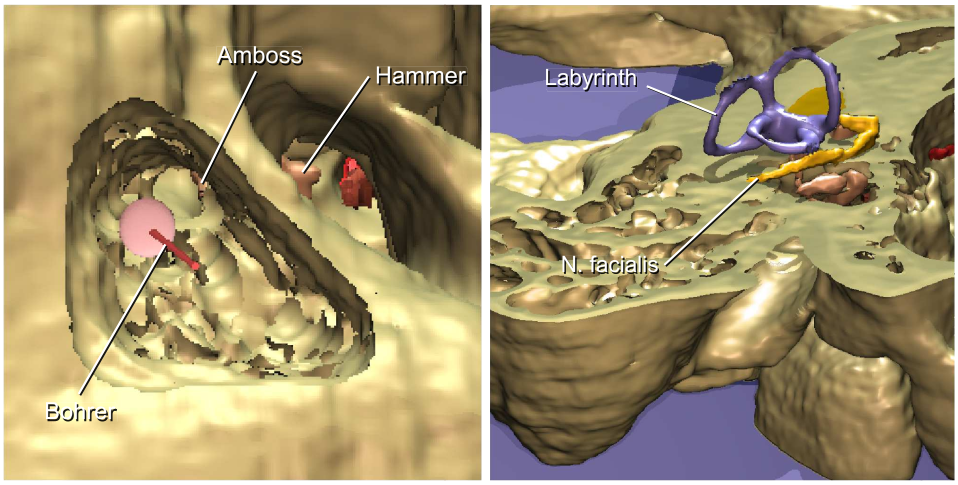

Abb. 1. Simulation einer Felsenbein-OP. Der Patient befindet sich in horizontaler Lage, durch den Gehörgang kann man den Hammer sehen.

Dabei geht es weniger darum, das handwerkliche Fräsen und Bohren an sich zu lernen, als vielmehr den Zugangsweg zum Mittelohr kennenzulernen. Durch die Arbeit an diesem jederzeit und unbegrenzt verfügbaren "Präparat" kann der angehende Chirurg oder Student Landmarken und empfindliche Bereiche, wie z.B. den Gesichtsnerv und die Gehörknöchelchen durch eigene Präparation inspizieren. Der Simulator stellt daher eine ideale Ergänzung zu den heutzutage immer seltener durchgeführten Übungen an realen Präparaten dar.

References

1. A. Pommert, K. H. Höhne, B. Pflesser et al, "Creating a high-resolution spatial/symbolic model of the inner organs based on the Visible Human," *Med. Image Anal.*, vol. 5, no. 3, pp. 221–228, 2001.
2. T. M. Massie and J. K. Salisbury, "The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects," *ASME Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 1994*, vol. 1, pp. 295–301, 1994.
3. B. Pflesser, U. Tiede, K. H. Höhne, and R. Leuwer, "Volume based planning and rehearsal of surgical interventions," in *Computer Assisted Radiology and Surgery, Proc. CARS 2000* , vol. 1214 of *Excerpta Medica International Congress Series*, pp. 607–612, Amsterdam: Elsevier, 2000.
4. U. Tiede, T. Schiemann, and K. H. Höhne, "High quality rendering of attributed volume data," in *Proc. IEEE Visualization '98*, pp. 255–262, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1998.
5. W. A. McNeely et al, "Six degree-of-freedom haptic rendering using voxel sampling," *Computer Graphics (SIGGRAPH99 Proceedings)*, pp. 401–408, 1999.
6. R. Leuwer, B. Pflesser, and M. Urban, "Die stereoskopische Simulation ohrchirurgischer Eingriffe an einem neuartigen 3D-Computermodell," *Laryngo-Rhino-Otol.*, vol. 80, pp. 298–302, 2001.