Realistische haptische Simulation materialabtragender chirurgischer Eingriffe

Von der Carl-Friedrich-Gauß-Fakultät für Mathematik und Informatik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig
zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

von	Dipl.-Inform. Andreas Petersik
aus	(Geburtsort) Braunschweig
1. Referent:	Prof. Dr. Friedrich M. Wahl
2. Referent:	Prof. Dr. Karl Heinz Höhne
eingereicht am:	14. März 2007
mündliche Prüfung am:	02. Juli 2007

Fortschritte in der Robotik **Band 11**

Technische Universität Braunschweig
Institut für Robotik und Prozessinformatik
Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl (Hrsg.)

Andreas Petersik

Realistische haptische Simulation materialabtragender chirurgischer Eingriffe

---

Shaker Verlag
Aachen 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6451-2
ISSN 1431-7222

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Problemstellung und Zielsetzung 4

1.2 Gliederung der Arbeit 5

2 Stand der Forschung **7**

2.1 Visualisierung medizinischer Volumendaten 7

2.1.1 Tomographische Daten 7

2.1.2 Segmentation der Daten 9

2.1.3 Oberflächenbasierte Visualisierung 10

2.1.4 Volumenbasierte Visualisierung 10

2.1.4.1 Volumenbasiertes Oberflächenrendering mit Subvoxelauflösung . . 11

2.1.4.2 Volume Rendering 12

2.2 Volumenmodifikation 14

2.3 Computerhaptik 15

2.4 Kraftrückkopplungsgeräte 15

2.4.1 Entwicklungsgeschichte 16

2.4.2 Kontrollstrategien 17

2.4.3 Kommerziell verfügbare Geräte 17

2.4.4 Funktionsweise der Phantom-Kraftrückkopplungsgeräte 18

2.4.4.1 Anforderungen an die haptische Frequenz 19

2.5 Grundlagen des haptischen Renderings 20

2.5.1 Penalty-basierte Methoden 22

2.5.2 Constraint-basierte Methoden 23

2.6 Kollisionserkennung für ein Werkzeug 24

2.6.1 Konfigurationsraum-Ansatz 25

2.6.2 Oberflächenbasierte Verfahren 26

2.6.3 Volumenbasierte Verfahren 28
2.7 Simulation von Kräften beim Materialabtrag 31
2.8 Existierende Chirurgiesimulatoren 32
2.8.1 Simulatoren für die minimalinvasive Chirurgie 32
2.8.2 Simulatoren für materialabtragende Chirurgie 35

3 Material und Methoden **39**
3.1 Verwendete Datensätze 41
3.2 Werkzeugrepräsentation 41
3.3 Bestimmung der Kraftrichtung I: Freiraum-Such-Methode 45
3.4 Bestimmung der Kraftrichtung II: Kollisions-Such-Methode 47
3.5 Berechnung des Vektorbetrags mit dem Projektionsverfahren 48
3.6 Erweitertes Proxy-Verfahren 51
3.7 Haptische Simulation von Materialabtrag 55
3.7.1 Look-Forward-Methode 55
3.7.2 Oberflächenmethode 57
3.7.2.1 Verbessern der Kontaktsituation 59
3.8 Simulation von Werkzeugvibrationen 60

4 Implementierung **61**
4.1 Integration des haptischen Renderings in das VOXEL-MAN System 62
4.2 Transformation des Arbeitsraumes in das Volumen 63
4.3 Laufzeitoptimierungen 66
4.4 Entwicklung einer Testumgebung 68

5 Ergebnisse und Anwendungen **71**
5.1 Algorithmen 71
5.2 Simulationssystem 72
5.3 Anwendungen 73
5.4 Operationstraining 73
5.4.1 Anwendung in der HNO-Chirurgie 75
5.4.1.1 Datenaufbereitung 77
5.4.1.2 Funktionalität 79
5.4.1.3 Ergebnis 80
5.4.2 Anwendung in der Zahn-, Mund- und Kieferchirurgie 81
5.4.2.1 Virtuelle Wurzelspitzenresektion 81

5.4.2.2 Virtuelle Teilkronenpräparation 82
5.5 Operationsplanung 83
5.6 Validierung 84
5.6.1 Technische Validierung 84
5.6.2 Anwendungsbezogene Validierung 85
5.6.2.1 Validierung durch WSR-Simulation am Schweineschädel 85
5.6.2.2 Validierung durch Bewegungsanalyse 86

6 Schlussfolgerungen **87**
6.1 Ausblick 88

Literaturverzeichnis **100**

A Daten verschiedener Kraftrückkopplungsgeräte **101**

B UICL-Befehle für das Haptikmodul **103**
B.1 Geometriebefehle 103
B.2 Parameter für Kräfte 104
B.3 Debugging 105
B.4 Sonstige Befehle 105

C Beispielfilm **107**

Stichwortverzeichnis **107**

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Arbeitsgruppe *VOXEL-MAN* des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Karl Heinz Höhne für die zahlreichen Diskussionen, Anregungen und Hinweise während meiner Arbeit. Ohne den von ihm gewährten Freiraum und die Möglichkeit, meine Ergebnisse mit anderen Wissenschaftlern auszutauschen, wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Herrn Prof. Dr. Friedrich M. Wahl möchte ich besonders für die engagierte Betreuung von Seiten des Fachbereichs Informatik der Technischen Universität Braunschweig danken. Seine Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge haben wesentlich zur jetzigen Form der Arbeit beigetragen.

Allen meinen Kollegen der Arbeitsgruppe *VOXEL-MAN* danke ich für die freundliche, fruchtbare und sehr spannende Zeit während der Entwicklung der Chirurgiesimulatoren *TempoSurg*, *DentalSurg* und *SinuSurg*. Dr. Ulf Tiede möchte ich für die Einführung in das VOXEL-MAN System, besonders bezüglich der Visualisierungsverfahren, danken. Im Rahmen der Implementierung der von mir entwickelten Algorithmen wurden auch an seiner Implementierung teils erhebliche Änderungen notwendig. Bernhard Pflesser möchte ich für die von ihm entwickelten Algorithmen zur Volumenmodifikation und die für diese Arbeit notwendigen Anpassungen danken. Dr. Andreas Pommert möchte ich für das geduldige und intensive Korrekturlesen und die vielen Hinweise zu früheren Versionen danken.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Rudolf Leuwer und Herrn Prof. Dr. Dr. Max Heiland ohne deren medizinischen und chirurgischen Sachverstand die Entwicklung der chirurgischen Simulatoren nicht möglich gewesen wäre. Julia Breckwoldt, Andreas Eigenmann, Dr. Torsten Grindel, Marina Haupt, Dr. Wiebke Sibbersen, Dr. Norman von Sternberg und Ann-Kathrin Westendorf haben im Rahmen ihrer medizinischen Dissertationen die entwickelten Verfahren eingesetzt und somit maßgeblich zu deren Verbesserung, Weiterentwicklung und Stabilität beigetragen.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn David Spiggle, Herrn Detlef Theis und Herrn Wolfgang Sauer von der Firma *Spiggle & Theis Medizintechnik GmbH*, die den Chirurgiesimulator vermarkten und somit die entwickelten Verfahren auch außerhalb der Wissenschaft zugänglich machen.

Schließlich danke ich meiner Frau Judith für ihr Verständnis meiner häufigen Abwesenheit während dieser Zeit.

Zusammenfassung

In der Luftfahrt ist die Verwendung von Simulatoren schon seit Jahrzehnten fester Bestandteil der Ausbildung. Dabei müssen Piloten schwierige und in der Praxis seltene Gefahrensituationen regelmäßig in einem Flugsimulator trainieren. Die so gewonnene Routine lässt die Piloten später auch mit realen Gefahren erheblich sicherer umgehen.

Auch in der Medizin rückt die Verwendung von Simulatoren für das Erlernen komplexer Fähigkeiten zunehmend ins Blickfeld. In der Literatur finden sich dazu ganz überwiegend Entwicklungen, die sich auf die Simulation von minimal invasiven Eingriffen beziehen. Dabei wird typischerweise der visuelle Eindruck des Eingriffs modelliert, seltener auch das damit verbundene Gefühl („Haptik“) der deformierenden Einwirkung von punktförmigen Werkzeugen auf Weichteilgewebe. Verfahren, die materialabtragende Eingriffe an komplexen starren Körpern wie zum Beispiel Knochen mit ausgedehnten Werkzeugen (Bohrer, Fräser) simulieren, gibt es bisher erst in Ansätzen.

In der vorliegenden Arbeit soll deshalb ein System entwickelt werden, das das *haptische Rendering*, d. h. das Fühlbarmachen von Strukturen und Werkzeuginteraktionen mittels geeigneter Kraftrückkopplungsgeräte, für die Simulation von bohrenden und fräsenden Eingriffen in virtuellen anatomischen Modellen ermöglicht. Das algorithmische Hauptproblem besteht dabei in der Kollisionserkennung und der Berechnung der daraus resultierenden Kräfte. Besondere Schwierigkeiten ergeben sich aus den Anforderungen nach einer hohen räumlichen Auflösung einerseits und der für eine realistische Haptik nötigen hohen zeitlichen Auflösung mit einer Wiederholfrequenz im Bereich von 1000 Hz andererseits. Darüber hinaus müssen Verfahren entwickelt werden, die trotz der limitierten Kraft der zur Verfügung stehenden Kraftrückkopplungsgeräte einen der Realität nahe kommenden haptischen Eindruck vermitteln.

Die meisten existierenden Verfahren der Kollisionserkennung basieren auf Oberflächenmodellen, wie sie auch in der klassischen Computergrafik verwendet werden. Der Rechenaufwand steigt bei diesen Verfahren mit der Komplexität der Szene stark an. Kollisionen mit hochauflösenden anatomischen Modellen, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, lassen sich mit solchen Verfahren auf Standardrechnern bisher nicht mit der notwendigen Geschwindigkeit und räumlichen Auflösung berechnen.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein neues Verfahren zur Kollisionserkennung zwischen einem ausgedehnten Werkzeug und einem Volumenmodell entwickelt. Dieses Volumenmodell basiert dabei im Gegensatz zu anderen volumenbasierten Verfahren auf einer Technik, die die subvoxelgenaue Bestimmung der Objektoberflächen für segmentierte Objekte erlaubt und somit sehr detaillierte Isointensitätsoberflächen liefert. Für die Kollisionserkennung wird ein bekanntes Verfahren erwei-

tert, welches das Werkzeug diskretisiert durch Oberflächenpunkte und Suchvektoren darstellt. Durch Kollisionstests mit den Oberflächenpunkten und das Suchen der Objektoberflächen entlang der Suchvektoren lässt sich die Kraftrichtung für die zu berechnende Kraft approximieren. Das Problem der möglichst exakten Bestimmung des Kraftbetrages wird durch ein Projektionsverfahren gelöst, das den Betrag mit großer Genauigkeit und Geschwindigkeit approximieren kann. Erstmalig wird ein *haptischer Proxy*, also ein virtuelles Zwischenobjekt, das immer an den Objektoberflächen verbleibt und Objekte nicht durchdringen kann, auch im Volumenmodell eingeführt, was dazu führt, dass auch durch dünne Objekte nicht hindurch gedrückt werden kann.

Um den Materialabtrag zu simulieren, werden zwei Verfahren zur Berechnung der dabei entstehenden Kräfte entwickelt. Das erste Verfahren benutzt den naheliegenden Ansatz, die Materialverteilung um das Werkzeug herum zu bestimmen und daraus eine Gegenkraft zu berechnen. Da die verfügbaren Kraftrückkopplungsgeräte die berechneten starken Kräfte nicht wiedergeben können, laufen die simulierten materialabtragenden Eingriffe allerdings viel zu schnell ab. Als Lösung wird ein geometrisches Verfahren entwickelt, in dem der Proxy immer an der abzutragenden Materialoberfläche verweilt und der Materialabtrag nur über eine relativ zum Proxy zu verschiebende Modifikationsregion gesteuert wird. Damit wird die Geschwindigkeit des Materialabtrages einstellbar. Um weitere Charakteristika materialabtragender Werkzeuge zu simulieren, werden die berechneten Kräfte um Effekte wie Vibrationen erweitert.

Die entwickelten Methoden wurden in mehreren Simulatoren für die Felsenbeinchirurgie sowie für die Zahnheilkunde implementiert, die zum Teil bereits vermarktet werden. Für eine Validierung des vorgestellten Ansatzes liegen neben den subjektiven Erfahrungen zahlreicher Anwender verschiedener medizinischer Fachrichtungen auch zwei unabhängige Studien vor (Zirkle et al., Laryngoscope, Volume 117 (2), February 2007, Sternberg et al., Int. J. Oral Maxillofac. Surg., Volume 36, Issue 5, 2007). Mit den vorgestellten Methoden ist es damit trotz der beschränkten Möglichkeiten der eingesetzten Kraftrückkopplungsgeräte erstmals gelungen, eine realistische Simulation der bei bohrenden und fräsenden Eingriffen auftretenden haptischen Eindrücke zu erreichen.

Abstract

Since several decades, flight simulators are extensively used for pilot training in the aviation industry. Using such systems, pilots regularly have to practice difficult and dangerous situations. The thus gained skills enable them to cope with real emergency situations much more safely.

In the area of surgery, the use of simulators for learning complex and risky interventions receives increasing attention. The review of the state of the art shows that current research is concentrating on simulators for minimally invasive surgery. The described approaches are mostly mimicing the visual appearance of the surgical scene, less frequently also the haptic impression of a tool tip interacting with soft tissue. Approaches which are capable to simulate material removal of solid structures, e. g. the ablation of bone with a rotating burr, exist only in their infancy.

The goal of this work was therefore to develop algorithms and systems for the haptic rendering of material removal procedures, in which an extended tool like a burr interacts with complex bony structures. The main algorithmic problems consist in the detection of collisions and the calculation of the resulting forces. As an additional challenge, both a high spatial and a high temporal resolution with a haptic update rate of more than 1000 Hz are required for a realistic impression. Furthermore, methods must be developed which allow for a realistic haptic impression in spite of the very limited forces of today's commercially available force feedback devices.

Most of the existing algorithms for collision detection are based on surface models as they are used in classical computer graphics. With such approaches, the computational costs increase with the number of triangles in the scene. Collisions with high-resolution models as they are required in this work cannot be calculated by those approaches on standard PC hardware with the required performance.

For this reason, the presented work proposes a new approach for collision detection between an extended tool and a volumetric anatomical model. In contrast to other volumetric models, the model used here is based on a technique which allows the calculation of the surfaces of segmented objects with subvoxel resolution and thus leads to very detailed isosurfaces. For collision detection, a known approach is extended which represents the tool as a discretized array of surface sample points and search vectors. By checking the surface sample points for collisions and searching for the object's surface along the search vectors, the direction of the restoring force can be approximated. The problem of calculating the magnitude of the force is solved with a vector projection method yielding high precision and speed. For the first time the approach of a haptic proxy, an intermediate virtual object which cannot penetrate other objects, is used in a volumetric model. This leads to a realistic haptic impression even for very thin objects.

For simulating realistic forces during material removal, two different approaches are presented. The first one uses the obvious approach to calculate a drilling force based on the material distribution around the tool. However, since commercial force feedback devices are not capable of rendering the high resulting forces, the calculated forces must be scaled down, which leads to lower forces and thus a high material removal rate which is not realistic. Therefore, a geometrical approach was developed with a haptic proxy that remains on the surface of the object under modification. By allowing the proxy to dive into the object by an adjustable amount, the progression speed can be controlled. Typical effects of different tools are simulated by adding e. g. vibrations depending on speed and type of the tool.

The developed algorithms were implemented in simulation systems for petrous bone surgery and dentistry, respectively. As confirmed by numerous users from different medical fields, these systems provide a realistic haptic feedback. Usefulness of the described applications is validated in two independent studies (Zirkle et al., Laryngoscope, Volume 117 (2), February 2007, Sternberg et al., Int. J. Oral Maxillofac. Surg., Volume 36, Issue 5, 2007). With the presented methods, it is thus possible for the first time to simulate bone removal procedures with realistic haptic feedback.