Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Informatik
Institut für Simulation und Graphik

Interaktive und dynamische Visualisierung für die chirurgische Ausbildung und Interventionsplanung

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommen durch die Fakultät für Informatik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von: Dipl.-Ing. Ragnar Bade
geb. am 06.05.1978 in Jena

Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Preim
Prof. Dr. Helwig Hauser
Prof. Dr. Heinz Handels

Magdeburg, den 11. Juni 2008

Bade, Ragnar (Dipl.-Ing.):
Interaktive und dynamische Visualisierung für die chirurgische Ausbildung und Interventionsplanung
Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 11. Juni 2008.

Magdeburger Schriften zur Visualisierung

Band 2

Ragnar Bade

Interaktive und dynamische Visualisierung für die chirurgische Ausbildung und Interventionsplanung

Shaker Verlag
Aachen 2008

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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2008

Copyright Shaker Verlag 2008
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7616-4
ISSN 1865-7397

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

Zusammenfassung

Computerunterstützte Interventionsplanung für chirurgische Eingriffe kann die Qualität, Quantität und auch Machbarkeit komplizierter Eingriffe verbessern. Computerunterstützung erfolgt dabei bei der Bildaufnahme mit modernen CT- und MRT-Geräten, der Analyse und Extraktion von Informationen aus den aufgenommenen Bilddaten, der angemessenen Visualisierung und Präsentation dieser Daten sowie bei der Therapieentscheidungsfindung, zum Beispiel durch Abschätzung und Simulation von zu erwartenden Therapieergebnissen. Herausforderungen für die Computerunterstützung stellen unter anderem die Reduktion von Artefakten aus Bildaufnahme und Bildanalyse sowie die standardisierte dynamische Visualisierung patientenspezifischer Bilddaten dar.

Im Rahmen dieser Arbeit werden Techniken zur Extraktion von qualitativ hochwertigen Oberflächenmodellen für die Visualisierung der durch Bildanalyse gewonnenen dreidimensionalen Patientenanatomie untersucht sowie Techniken zur standardisierten dynamischen Präsentation und effizienten interaktiven Exploration der dreidimensionalen Daten analysiert.

Darauf aufbauend werden zwei effiziente Verfahren für die aufgabenangepasste Extraktion von Oberflächenmodellen aus Bildanalyseergebnissen entwickelt. Weiterhin werden Interaktionstechniken zur effizienten Exploration der dreidimensionalen Patientenanatomie evaluiert und es wird ein skriptbasiertes Verfahren zur Unterstützung der interaktiven Exploration und zur Erzeugung standardisierter dynamischer Visualisierungen vorgestellt.

Abschließend werden alle erarbeiteten Methoden, Techniken und Erkenntnisse in der Konzeption und Entwicklung eines Lernsystems für die chirurgische Interventionsplanung in der Leberchirurgie zusammengeführt.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand in direkter und indirekter Zusammenarbeit mit einer Vielzahl an Kollegen, Studenten und Kooperationspartnern. Für deren intensive und freundschaftliche Zusammenarbeit möchte ich mich herzlich bedanken. Mein besonderer Dank gilt Prof. Bernhard Preim, der mir immer durch seine wissenschaftliche Unterstützung und sein aktives Vorbild ein inspirierender Doktorvater war.

Bedanken möchte ich mich bei allen Kollegen, mit denen ich inhaltlich zusammenarbeiten konnte. Mein Dank geht vor allem an Arno Krüger, Steffen Oeltze, Konrad Mühler, Jeanette Cordes, Alexandra Baer, Christian Tietjen und Jana Dornheim. Arno Krüger und Steffen Oeltze bereicherten die Arbeit durch zahlreiche inspirierende Ideen und Diskussionen. Unter anderem haben sie sich als Alpha-Tester bei den Evaluationsstudien engagiert und trugen damit entscheidend zu deren erfolgreichem Gelingen bei. Konrad Mühler trug bereits mit seiner Diplomarbeit die Arbeit an adaptiven skriptbasierten Animationen praktisch voran. Konrad Mühler zusammen mit Jeanette Cordes haben meine Ideen zum LiverSurgeryTrainer aufgegriffen und tragen mit ihrer Kompetenz in der Softwareentwicklung und Lernpsychologie zu dessen Weiterentwicklung bei. Mit Alexandra Baer und Christian Tietjen verbindet mich das Interesse an illustrativer Visualisierung, welches in den Visualisierungen des LiverSurgeryTrainer mehrfach zum Ausdruck kommt.

Inhaltlich und praktisch wurde die Arbeit bei der Konzeption und Entwicklung des LiverSurgeryTrainer in großen Teilen durch die Diplomarbeiten von Sebastian Mirschel, Ivonne Riedel und Lars Schmitt unterstützt. Zur Artefaktreduktion in medizinischen Oberflächenmodellen trugen die Diplomarbeiten von Jens Haase und Christian Schumann einen großen Anteil bei. Weiterführende Arbeiten bei der Netzgenerierung und Flusssimulation wurden durch Dr. Stefan Zachow am ZIB unterstützt.

Großer Dank geht an Prof. Karl J. Oldhafer. Ich bin ihm und seinem Team am AKH Celle nicht nur zu Dank verpflichtet, weil er uns freundlich in seinen OP aufnahm, uns Filmaufnahmen von Operationen ermöglichte und aufbereitete Fälle für den LiverSurgeryTrainer bereitstellte, sondern auch dafür, dass er mit großer Hingabe die Entwicklung auf medizinischer Seite stark unterstützte. Dies trug erheblich zur Entwicklung eines Systems bei, welches auch von Ärzten ernst genommen werden kann.

Ich möchte mich außerdem bei MeVis Research für die Aufarbeitung und Bereitstellung von Fällen für das Lernsystem sowie für zur Verfügung gestellte erweiterte Komponenten der MeVisLab-Bibliothek (insbesondere der WEM-Bibliothek) bedanken. Mein Dank geht besonders an Dr. Felix Ritter, Olaf Konrad, Florian Link und Milo Hindennach, welche mich als Koautoren unterstützten und/oder mir bei der Umsetzung in MeVisLab beistanden.

Besonderer Dank geht auch an meine Frau Andrea und meine Kinder Jeldrik und Jenna, die auch außerhalb der „üblichen“ Arbeitszeiten Verständnis für meine Arbeit aufbrachten und mich unterstützten. Lieben Dank an euch.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
- 1.1 Visualisierung . . . 2
- 1.2 Interaktion . . . 3
- 1.3 Ausbildung und Training . . . 4
- 1.4 Fragestellung und Aufgaben . . . 4
- 1.5 Gliederung . . . 5

2 Computerunterstützte Interventionsplanung und chirurgische Ausbildung **7**
- 2.1 Vorbetrachtungen . . . 7
- 2.2 Leberoperationsplanung . . . 8
  - 2.2.1 Medizinischer Hintergrund . . . 8
  - 2.2.2 Computerunterstützte Planung . . . 10
- 2.3 Planung von Neck Dissections . . . 11
- 2.4 3D-Osteotomieplanung . . . 14
- 2.5 Computerunterstützte Anatomieausbildung . . . 16
  - 2.5.1 VoxelMan . . . 16
  - 2.5.2 Digital Anatomist . . . 16
  - 2.5.3 AnatomyBrowser . . . 17
  - 2.5.4 ZoomIllustrator und 3D Puzzle . . . 18
- 2.6 Allgemeine CBTs in der Medizin . . . 19
  - 2.6.1 CASUS . . . 19
  - 2.6.2 Dogs 'n Drugs . . . 20
  - 2.6.3 CAMPUS . . . 20
- 2.7 Chirurgiesimulatoren . . . 21
  - 2.7.1 Karlsruhe Endoscopic Surgery Trainer . . . 22
  - 2.7.2 Leberchirurgiesimulation . . . 22
  - 2.7.3 Hysteroscopy Simulator . . . 22
- 2.8 Zusammenfassung . . . 24
  - 2.8.1 Herausforderungen der computerunterstützten Interventionsplanung . . . 24
  - 2.8.2 Herausforderungen der computerunterstützten Ausbildung . . . 25

3 Artefaktreduktion in medizinischen Oberflächenmodellen: *Grundlagen* **27**
- 3.1 Warum binäre Segmentierung? . . . 28
- 3.2 Probleme bei der Oberflächenextraktion . . . 29
  - 3.2.1 Konturkorrespondenzproblem . . . 29
  - 3.2.2 Oberflächenextraktion aus binären Bilddaten . . . 30

3.3 Zielsetzung und Herangehensweise . . . 31
3.4 Verwendete Notation . . . 32
3.4.1 Nachbarschaften . . . 32
3.4.2 Explizite vs. Implizite Integration . . . 32
3.5 Bestimmung von Krümmungsmaßen . . . 33
3.6 Datenstrukturen für polygonale Oberflächennetze . . . 37
3.6.1 Explizite Repräsentation . . . 37
3.6.2 Indizierte Eckpunkt- und Kantenlisten . . . 37
3.6.3 *Winged-Edge* Repräsentation . . . 38
3.6.4 *Halfedge* Repräsentation . . . 39
3.6.5 Effiziente Repräsentation für die diskrete Krümmungsberechnung . . . 39

4 Strategien zur Artefaktreduktion 41
4.1 Glättung von binären Segmentierungsmasken . . . 41
4.1.1 Tiefpass-Filterung . . . 41
4.1.2 Fuzzy Boundaries . . . 42
4.1.3 Sub-Voxel Interpolation . . . 43
4.1.4 Level-Sets . . . 44
4.2 Artefaktreduktion bei der Oberflächenextraktion . . . 44
4.2.1 Trilineare Interpolation . . . 44
4.2.2 Sub-Voxel Interpolation . . . 45
4.2.3 Approximation mit impliziten Oberflächen . . . 45
4.2.4 Kombinierte Oberflächenextraktion und Glättung . . . 45
4.3 Glättung von extrahierten Oberflächenmodellen . . . 46
4.3.1 Laplace-Glättung . . . 47
4.3.2 Laplace+$\mathcal{HC}$-Glättung . . . 48
4.3.3 Taubin's λ-μ-Glättung . . . 49
4.3.4 Mean Curvature Flow - Glättung . . . 50
4.3.5 Mean- und Median-Glättung der Normalen . . . 51
4.3.6 Merkmalserhaltende Glättung . . . 53
4.3.7 Subdivision Surfaces . . . 55
4.3.8 Vergleich von Glättungsverfahren . . . 56
4.4 Zusammenfassung und Diskussion . . . 57

5 Evaluation von Glättungsverfahren 59
5.1 Objektanalyse und -klassifizierung . . . 59
5.1.1 Kompakte Objekte . . . 60
5.1.2 Flache Objekte . . . 61
5.1.3 Elongierte Objekte . . . 61
5.2 Anforderungen an die Glättung . . . 62
5.3 Kriterien für die Bewertung der Glättungsergebnisse . . . 63
5.3.1 Bewertung der Glattheit . . . 63
5.3.2 Bewertung der Genauigkeit . . . 64
5.3.3 Bewertung der praktischen Anwendbarkeit . . . 64
5.4 Evaluation: Konzept und Durchführung . . . 65
5.4.1 Glättungsverfahren und Parametrisierung . . . 65
5.4.2 Auswahl der Oberflächenmodelle . . . 68
5.4.3 Ausgewählte Bewertungskriterien . . . 69

5.5 Umsetzung und Implementierung . . . 69
5.5.1 Implementierungskonzept . . . 70
5.5.2 Modularisierung der Glättungsverfahren . . . 70
5.5.3 Durchführung . . . 73
5.6 Ergebnisse . . . 74
5.6.1 Glättungsergebnisse kompakter Objekte . . . 74
5.6.2 Glättungsergebnisse flacher Objekte . . . 76
5.6.3 Glättungsergebnisse elongierter Objekte . . . 79
5.7 Glättungsempfehlungen . . . 81
5.8 Diskussion und Fazit . . . 82

6 Voxelbegrenzte Oberflächennetzglättung 85
6.1 Vorbetrachtungen . . . 85
6.2 Begrenzung der Glättungsbewegung . . . 86
6.2.1 Cell-Size Constraint . . . 86
6.2.2 Cell-Center Constraint . . . 86
6.2.3 Cell-Edge Constraint . . . 87
6.2.4 Diamond Constraint . . . 87
6.3 Umsetzung und Implementierung . . . 88
6.3.1 Constraints Submodul . . . 88
6.3.2 Umsetzung des Diamond Constraint . . . 89
6.4 Ergebnisse . . . 90
6.5 Zusammenfassung und Diskussion . . . 92

7 Approximation von Oberflächenmodellen segmentierter Gefäßstrukturen 95
7.1 Vorbetrachtungen . . . 95
7.2 Verwandte Arbeiten . . . 96
7.2.1 Modellfreie Extraktion von Oberflächenmodellen . . . 96
7.2.2 Modellbasierte Erzeugung von Oberflächenmodellen . . . 96
7.2.3 Fazit . . . 97
7.3 Approximation von Gefäßstrukturen mit MPUIs . . . 97
7.3.1 MPUIs . . . 97
7.3.2 Punktwolkenextraktion . . . 98
7.3.3 Automatische Parameterwahl . . . 101
7.4 Umsetzung . . . 102
7.5 Ergebnisse . . . 102
7.6 Zusammenfassung und Diskussion . . . 104

8 Effiziente 3D-Navigation 107
8.1 Problem- und Anforderungsanalyse . . . 107
8.1.1 Problemanalyse . . . 107
8.1.2 Anforderungsanalyse . . . 110
8.2 3D-Rotationstechniken – Stand der Technik . . . 111
8.2.1 Chen's Virtual Trackball . . . 111
8.2.2 Bell's Virtual Trackball . . . 112
8.2.3 Shoemake's Virtual Trackball . . . 113
8.2.4 Two-Axis Valuator Trackball . . . 114

8.2.5 Two-Axis Valuator with Fixed Up-vector . . . 115
8.2.6 Zusammenfassung . . . 115
8.3 Evaluation von Rotationstechniken . . . 116
8.3.1 Vorarbeiten und Stand der Forschung . . . 116
8.3.2 Evaluationskonzept . . . 117
8.3.3 Statistische Analyse . . . 120
8.3.4 Ergebnisse und Diskussion . . . 120
8.4 Kritische Anmerkungen und Ausblick . . . 123

9 Dynamische Visualisierung und Interaktion 125
9.1 Aufgaben und Möglichkeiten dynamischer Visualisierungen . . . 126
9.2 Dynamische Visualisierung patientenspezifischer Daten . . . 127
9.3 Verwandte Arbeiten . . . 129
9.3.1 Dynamische *Story Telling Informed* Visualisierungen . . . 130
9.3.2 Ansätze adaptiver dynamischer Visualisierungen . . . 132
9.3.3 Dynamische Visualisierungen in Anwendungen . . . 133
9.4 Skriptkonzept für adaptive dynamische Visualisierungen . . . 133
9.4.1 Hierarchisches Konzept . . . 133
9.4.2 Befehlssyntax und Aufbau der Skriptsprache . . . 134
9.4.3 Ersetzungsregeln . . . 138
9.4.4 Funktionalität des Skriptinterpreters . . . 141
9.5 Anwendungsszenarien des Skriptkonzeptes . . . 141
9.5.1 Generierung standardisierter Ansichten und Animationen . . . 143
9.5.2 Dynamische Visualisierung im Interaktionskontext . . . 145
9.6 Zusammenfassung und kritische Anmerkungen . . . 146

10 Computerunterstütztes Training der Leberoperationsplanung 149
10.1 Motivation . . . 149
10.1.1 Trainings- und Ausbildungsbedarf bei der Interventionsplanung . . . 150
10.1.2 Herausforderungen der Interventionsplanung in der Leberchirurgie . . . 150
10.2 Anforderungen und Ziele . . . 151
10.2.1 Ziele . . . 151
10.2.2 Zielgruppenspezifische Anforderungen . . . 151
10.2.3 Anforderungen aus dem medizinischen Lerninhalt . . . 152
10.2.4 Lerntheoretische Anforderungen . . . 153
10.3 Konzept des LIVERSURGERYTRAINER . . . 153
10.3.1 Falldatenbank und Datenbasis . . . 154
10.3.2 Fallbearbeitung . . . 154
10.3.3 Interaktive Patientenakte . . . 155
10.3.4 Hilfekonzept . . . 156
10.3.5 Implementierungsaspekte . . . 158
10.4 Implementierungsvarianten . . . 159
10.5 Interaktions- und Visualisierungsaspekte . . . 161
10.5.1 Fallauswahl . . . 161
10.5.2 3D-Visualisierung patientenspezifischer Daten . . . 166
10.5.3 Interaktion in 3D-Szenen . . . 168
10.6 Zusammenfassung . . . 168

11 Fazit und Ausblick **171**
11.1 Beitrag zur Reduktion von Artefakten in medizinischen Oberflächenmodellen 171
11.2 Beitrag zur effizienten 3D-Navigation . . . 172
11.3 Beitrag zur interaktiven dynamischen Visualisierung . . . 173
11.4 Beitrag zur computerunterstützten chirurgischen Ausbildung . . . 174
11.5 Ausblick . . . 174
11.5.1 Extraktion von qualitativ hochwertigen Oberflächenmodellen . . . 175
11.5.2 Interaktion und Navigation in 3D-Visualisierungen . . . 175
11.5.3 Dynamische Visualisierung patientenspezifischer Daten . . . 175
11.5.4 LiverSurgeryTrainer . . . 175

Literaturverzeichnis **177**

A Ergebnisdiagramme der Evaluation der Glättungsverfahren **197**
A.1 Oberflächenmodell der Leber . . . 198
A.1.1 Symmetrische Hausdorff-Distanz . . . 198
A.1.2 Volumenerhalt . . . 199
A.1.3 Rechenzeit . . . 200
A.2 Oberflächenmodell des Lymphknotens . . . 201
A.2.1 Symmetrische Hausdorff-Distanz . . . 201
A.2.2 Volumenerhalt . . . 202
A.2.3 Rechenzeit . . . 203
A.3 Oberflächenmodell des Beckens . . . 204
A.3.1 Symmetrische Hausdorff-Distanz . . . 204
A.3.2 Volumenerhalt . . . 205
A.3.3 Rechenzeit . . . 206
A.4 Oberflächenmodell des Halsmuskels . . . 207
A.4.1 Symmetrische Hausdorff-Distanz . . . 207
A.4.2 Volumenerhalt . . . 208
A.4.3 Rechenzeit . . . 209
A.5 Oberflächenmodell des Gefäßbaumes . . . 210
A.5.1 Symmetrische Hausdorff-Distanz . . . 210
A.5.2 Volumenerhalt . . . 211
A.5.3 Rechenzeit . . . 212
A.6 Oberflächenmodell der A. carotis . . . 213
A.6.1 Symmetrische Hausdorff-Distanz . . . 213
A.6.2 Volumenerhalt . . . 214
A.6.3 Rechenzeit . . . 215