Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Informatik
Institut für Simulation und Graphik

Animationen und Explorationstechniken zur Unterstützung der chirurgischen Operationsplanung

Dissertation

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

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

von: Dipl.-Inform. Konrad Mühler
geb. am 7. September 1979 in Magdeburg

Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Preim
Prof. Dr. Thomas Ertl
Prof. Dr. em. Karl Heinz Höhne

Magdeburg, den 28.06.2010

Mühler, Konrad (Dipl.-Inform.):
Animationen und Explorationstechniken zur Unterstützung der chirurgischen Operationsplanung
Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 28.06.2010.

Magdeburger Schriften zur Visualisierung

herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim
Institut für Simulation und Graphik,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Band 4

Konrad Mühler

Animationen und Explorationstechniken zur Unterstützung der chirurgischen Operationsplanung

Shaker Verlag
Aachen 2010

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., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9311-6
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

Für Emilia und Sandra

Zusammenfassung

Der Einsatz immer besserer medizinischer Visualisierungen in der chirurgischen Operationsplanung gewinnt zunehmend an Bedeutung. Ziel der Arbeit war daher die Entwicklung neuer Techniken zur Unterstützung des chirurgischen Operationsplanungsprozesses. Der Fokus lag auf Techniken der 3D-Exploration. Es konnte ein neuartiges Verfahren zur automatischen Bestimmung von Sichtpunkten in Szenen anatomischer Strukturen entwickelt und validiert werden. Die dadurch geschaffenen Grundlagen wurden genutzt, um optimale Kamerapfade in Animationen zu berechnen und ähnliche Sichtpunkte zusammenzufassen. Zur Darstellung zusätzlicher Informationen wurden zwei- und dreidimensionale Szenen mit textuellen Annotationen versehen. Die dabei entwickelten Techniken erlauben die automatische Annotation beliebiger Strukturen mit einer großen Bandbreite an verschiedenen Stilen. Weiterhin wurde ein Framework zur automatischen Generierung von Animationen entwickelt und mit den *Keystates* ein Konzept vorgestellt, das vor allem den komplexen Prozess der Definition von Animationsinhalten vereinfacht und einmal getroffene Visualisierungsentscheidungen wiederverwendbar macht.

Anwendung fanden die entwickelten Techniken in einem neuartigen chirurgischen Trainingssystem, dem LiverSurgeryTrainer. Durch dessen Entwicklung konnten viele der Techniken in einem praktischen Umfeld validiert werden. Die im Rahmen der Entwicklung gewonnen Erkenntnisse bezüglich der Gestaltung von Benutzeroberflächen für chirurgische Anwendungen konnte in einen ersten Style-Guide überführt werden.

Es wurde ein spezielles Toolkit für die verbesserte Erstellung chirurgischer Applikationen entwickelt, das Medical Exploration Toolkit. Zusammen mit der Entwicklungsplattform MeVisLab ist es mit dem METK möglich, nutzerfreundliche Applikationen für den klinischen Einsatz schnell und effektiv zu erstellen. Dabei kann der Funktionsumfang einer Applikation aus einem breiten Angebot aus verfügbaren Visualisierungs- und Explorationstechniken individuell zusammengestellt werden.

Abstract

The main scope of this thesis is the development of new techniques to support the surgical intervention planning. The focus concentrates on techniques for the exploration of anatomical 3d scenes. A new technique to select good viewpoints in such scenes automatically was invented and, e.g., used to generate good camera paths in animations and to cluster similar viewpoints. To provide additional textual information visualizations, techniques for automatic annotation of 2d and 3d scenes with a broad range of styles were developed.

Furthermore, a framework for the automatic generation of animations was established and the concept of keystates was introduced to facilitate the definition process of animations and the reuse of visualizations.

The developed techniques were integrated and evaluated in a new surgical training environment: the LiverSurgeryTrainer. The gained knowledge regarding the design of user interfaces of surgical applications was used to create a first style guide for such applications.

For the fast prototyping of medical applications, the Medical Exploration Toolkit was developed. Integrated in the development environment MeVisLab this toolkit supports an efficient prototyping of applications for clinical use with a lot of state of the art visualization and interaction techniques.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meinem Betreuer und Doktorvater Prof. Bernhard Preim danken. Er hat durch die Schaffung eines unvergleichlichen Arbeitsklimas und durch eine sehr praktische Orientierung in Wissenschaftsfragen nicht nur die vorliegende Arbeit sondern meinen gesamte Art zu forschen maßgeblich beeinflusst.

Ich danke allen aktuellen und ehemaligen Kollegen der Arbeitsgruppe Visualisierung, insbesondere Dr. Christian Tietjen und Jeanette Mönch. Christian Tietjen hat mit mir das METK auf die Beine gestellt und war stets ein kreativer Gesprächspartner. Jeanette Mönch hat mit mir den LiverSurgeryTrainer entwickelt und viele der in dieser Arbeit genutzten Datensätze segmentiert.

Danken möchte ich meinen ehemaligen Diplomanden Mathias Neugebauer, Markus Wolff und Stefan Hiller, die wesentlich zu dieser Arbeit beigetragen haben. Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung möchte ich für meine Finanzierung im Rahmen des FUSION-Projektes danken. Einen Großteil der softwaretechnischen Arbeit habe ich mit MeVisLab bewältigt. Für die Berteistellung und den umfassenden Support möchte ich dem Fraunhofer Institut MEVIS und MeVis Medical Solutions in Bremen danken; im Speziellen Christian Hansen, Dr. Felix Ritter, Olaf Konrad und Milo Hindenach. Bei der Vermittlung chirurgischer Grundlagen waren mir Prof. Karl Oldhafer, Christoph Logge und Dr. Gregor Stavrou geduldige und erfahrene Lehrer. Vieles, was ich über Leberoperationen weiß, konnte ich durch ihre Beschreibungen und die Beobachtung ihrer Operationen lernen.

Spezieller Dank gebührt meiner Schwester Friederike Mühler. Mit ihrer Anwendersicht als MTRA war sie mir bei vielen Fragen zur Nutzung radiologischer und chirurgischer Applikationen eine Inspiration. Ich danke meinen Eltern Ute und Roland Mühler. Sie haben mich auf meiner bisherigen Laufbahn bestmöglich unterstützt und viel von ihrer vorbildlichen Art des (wissenschaftlichen) Arbeitens an mich weitergegeben. Abschließend danke ich meiner Freundin Sandra Hartmann und meiner Tochter Emilia für ihre schier unglaubliche Fähigkeit, mich immer wieder durch ihre bloße Anwesenheit zu motivieren und aufzubauen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 1

1.1 Aufgaben und Fragestellungen der Arbeit 3

1.2 Ergebnisse und Beitrag der Arbeit 5

1.3 Aufbau der Arbeit 6

2 Grundlagen der Operationsplaunung und Ausbildung 9

2.1 Planung von Leberoperationen 9

2.1.1 Leberanatomie und chirurgische Eingriffe 10

2.1.2 Fallbeschreibung 14

2.1.3 Computerunterstützung bei der Planung 17

2.2 Planung von chirurgischen HNO-Eingriffen 18

2.3 Polygonale Patientenmodelle 18

2.4 Planungssysteme 20

2.4.1 Applikationen zur Leberoperationsplanung 23

2.4.2 Eine Applikation zur HNO-Operationsplanung 24

2.5 Gemeinsame Aspekte des chirurgischen Planungsworkflows . 27

2.5.1 Diagnose, Bildakquisition und Segmentierung 27

2.5.2 Individuelle Therapieplanung 29

2.5.3 Interdisziplinäre Diskussion 29

2.5.4 Patientenaufklärung 29

2.5.5 Chirurgischer Eingriff 30

2.5.6 Post-Operative Untersuchungen 30

2.5.7 Zusammenfassende Workflowanalyse 30

2.6 Computerunterstützte chirurgische Ausbildung 31

3 Automatische Generierung von Animationen 35
3.1 Einordnung und Anforderungen 36
3.2 Verwandte Arbeiten zur automatischen Animationsgenerierung 39
3.3 Ein skriptbasiertes Framework zur Animationsgenerierung . . 41
3.3.1 Paradigmen 41
3.3.2 Konzept der Skriptsprache 42
3.3.3 Beispiele für Animationen 45
3.4 Zusammenfassung und Analyse des Frameworks 47

4 Automatische Bestimmung von Sichtpunkten 49
4.1 Anforderungsanalyse und Einordnung 50
4.2 Grundlagen der Kamerasteuerung 54
4.3 Verwandte Arbeiten 55
4.3.1 Sichtpunktbestimmung in polygonalen Darstellungen 56
4.3.2 Sichtpunktbestimmung in direkten Volumendarstellungen 60
4.3.3 Bestimmung der Sichtbarkeit von Strukturen in polygonalen Darstellungen 61
4.3.4 Anwendungen von Verfahren zur Sichtpunktbestimmung 63
4.3.5 Diskussion und Zusammenfassung 64
4.4 Konzept der parametrisierbaren Kameraposition 65
4.4.1 Vorberechnungen 67
4.4.2 Genutzte Parameter 75
4.4.3 Berechnung guter Sichtpunkte zur Laufzeit 83
4.4.4 Beispiel 86
4.5 Evaluierung des Verfahrens 86
4.5.1 Durchführung 87
4.5.2 Ergebnisse und Diskussion der Evaluierung 87
4.6 Zusammenfassung und Ausblick 90
4.6.1 Anwendung des Verfahrens auf direkte Volumendarstellungen 90
4.6.2 Automatische Parametrisierung von Sichtpunkten . . 92

5 Anwendungen für automatische Sichtpunktbestimmungen 93
5.1 Gute Sichten auf mehrere Strukturen (Clustering) 94
5.2 Gute Sichten auf minimale Distanzen zwischen Strukturen . . 95
5.3 Automatische Bestimmung von Sichtpunkten im intra-operativen Szenario 99
5.4 Interaktives Blenden 101
5.4.1 Ermittlung verdeckender Strukturen 101
5.4.2 Visualisierung in der Interaktion 102
5.5 Zusammenfassung 102

6 Kamerafahrten für Animationen 105
6.1 Anforderungen an Kamerapfade 106
6.2 Verwandte Arbeiten 108
6.3 Planung von Kamerapfaden zwischen zwei Sichten 110
6.3.1 Informationsmaximierung 110
6.3.2 Kameraausrichtung 111
6.3.3 Zoomverhalten 112
6.3.4 Geschwindigkeit der Kamerabewegung 112
6.4 Zusammenfassung 115

7 Automatische Annotation medizinischer Darstellungen 117
7.1 Motivation 118
7.2 Anwendungsfelder und Anforderungsanalyse 119
7.2.1 Anwendungsfelder in medizinischen Visualisierungen 119
7.2.2 Grundlegende Anforderungen an Annotationen und stilistische Aspekte 121
7.2.3 Annotationstexte 122
7.3 Verwandte Arbeiten 123
7.3.1 2D Annotationstechniken 125
7.3.2 3D Annotationstechniken 126
7.3.3 Annotationen in medizinischen Systemen 131
7.3.4 Zusammenfassung der verwandten Arbeiten 131
7.4 Verfahren zur Beschriftung von 2D-Darstellungen 132
7.4.1 Grundalgorithmus zur Annotationsplatzierung in 2D-Darstellungen 133
7.4.2 Besondere Aspekte der Visualisierung von Annotationen in 2D-Schichtbildern 137

7.5 Verfahren zur Beschriftung von 3D-Szenen 141
7.5.1 Berechnung der Multi-IDBuffer 142
7.5.2 Bestimmung der Ankerpunkte 142
7.5.3 Annotation verdeckter Strukturen 144
7.5.4 Verhalten bei starker Vergrößerung 144
7.5.5 Gruppierung von 3D-Annotationen 145
7.5.6 Symbole in Annotationen 148
7.6 Evaluierung 148
7.7 Zusammenfassung und Ausblick 150

8 Wiederverwendbare Visualisierungen und Animationen 153
8.1 Motivation 154
8.2 Verwandte Arbeiten 156
8.2.1 Effiziente Erstellung von Visualisierungen 156
8.2.2 Wiederverwendung von Visualisierungen 157
8.2.3 Animations-Authoring 158
8.3 Konzept der Keystates 159
8.3.1 Informationen in einem Keystate 159
8.3.2 Erfassung der Informationen 160
8.3.3 Wiederverwendung von Keystates 163
8.3.4 Vergleichbare Konzepte 165
8.4 Anwendung von Keystates in der Interaktion 166
8.4.1 Automatische Generierung von Keystates 166
8.4.2 Anwendungsgebiete für Keystates 168
8.5 Animations-Authoring mit Keystates 168
8.5.1 Interaktionstechniken zum Animations-Authoring . . . 169
8.5.2 Animations-Übergänge 170
8.6 Beispielanwendungen für Keystates 172
8.7 Diskussion und Zusammenfassung 175

9 Das Medical Exploration Toolkit 179
9.1 Motivation und konzeptuelle Vorüberlegungen 180
9.1.1 Motivation des METK 180
9.1.2 Einordnung des METK 181
9.1.3 Konzeptuelle Vorüberlegungen 182
9.1.4 Anforderungen an chirurgische Applikationen 183
9.2 Verwandte Toolkits und Frameworks 184
9.2.1 Visualisierungs-Toolkits für die medizinische Anwendung 185
9.2.2 Die Entwicklungsumgebung MeVisLab 188
9.2.3 Diskussion und Einordnung existierender Lösungen . 190
9.3 Architektur des METK 191
9.3.1 Datenmanagement- und Kommunikations-Ebene . . . 193
9.3.2 Visualisierungsebene 196
9.3.3 Explorationsebene 198
9.4 Applikationsentwicklung mit dem METK 202
9.5 Evaluierung des METK 205
9.6 Zusammenfassung 207

10 Der LiverSurgeryTrainer 211
10.1 Projekthintergrund, Analyse und Zielsetzung 212
10.2 Konzept des LiverSurgeryTrainers 213
10.2.1 Anforderungsanalyse 214
10.2.2 Didaktisches Konzept 215
10.2.3 Aufbau und Funkionen 216
10.3 Evaluierung 225
10.3.1 Durchführung der Evaluierung 225
10.3.2 Ergebnisse der Evaluierung 227
10.3.3 Konsequenzen aus der Evaluierung 229
10.4 Spezielle Aspekte von Benutzerschnittstellen chirurgischer Applikationen 229
10.4.1 Style Guides in der Literatur 230
10.4.2 Besonderheiten chirurgischer Benutzerschnittstellen . 231
10.4.3 Umsetzung verschiedener exemplarischer Lösungen für chirurgische Benutzerschnittstellen 236
10.5 Zusammenfassung 243

11 Zusammenfassung und Ausblick 245
11.1 Kritische Anmerkungen und Ausblick 246
11.1.1 Internetbasierte Dienste 246
11.1.2 Evaluierung von Animationen 247

A Evaluierung der Annotationsdarstellungen 249