

Interaktive 3D-Segmentierung

Tobias Kunert, Mark Hastenteufel, Christoph Giess, Carlos Cardenas, Marco Knödler
und Hans-Peter Meinzer

Deutsches Krebsforschungszentrum
Abt. Medizinische und Biologische Informatik
Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg
T.Kunert@DKFZ-Heidelberg.de

Abstract: Das Projekt Q3a des SFB 414 konzentriert sich auf die Verbesserung von Methoden zur interaktiven Segmentierung von anatomischen Strukturen. Regionen- und konturbasierte Segmentierungsverfahren werden mit einer interaktiven Handhabung verknüpft. Durch den Einsatz von haptischen Eingabegeräten kann eine Freihandsegmentierung unterstützt werden. Die Entwicklung einer Arbeitsumgebung für die Segmentierung wird durch einen Framework erleichtert. Eine offene Schnittstelle läßt die Integration weiterer Segmentierungsverfahren zu.

1 Einleitung

Die rechnergestützte Planung von chirurgischen Eingriffen in den verschiedenen Anwendungsgebieten soll eine patientenindividuelle Beurteilung von operativen Alternativen ermöglichen. Die Qualität der Operationsplanung steht dabei in engem Zusammenhang mit den computerbasierten Methoden zur Segmentierung und Manipulation von Volumendaten.

Die vorliegende Forschungsarbeit konzentriert sich auf die Verbesserung von Methoden zur interaktiven Segmentierung von anatomischen Strukturen zur weitergehenden Operationsplanung. Zur Segmentierung von medizinischen Bildaufnahmen werden ausgewählte regionen- und konturbasierte Ansätze angewandt und mit einer interaktiven Handhabung verknüpft. Neben den eigentlichen Segmentierungsverfahren fließen ferner Korrekturmechanismen in die Funktionalität ein, die ein schnelles Nachbessern von offensichtlichen Fehlsegmentierungen erlauben. Unter anderem kann dadurch auch der Einsatz eines kraftreflektierenden Eingabegerätes für die Segmentierung genutzt werden. Er ergänzt die oben aufgeführten Verfahren um eine präzise und kontrolliert durchgeführte Freihandsegmentierung.

Weiterhin wird die Entwicklung einer Arbeitsumgebung für die Segmentierung durch ein Framework erleichtert. Eine offene Segmentierungsschnittstelle ermöglicht die Integration von weiteren, problemspezifischen Segmentierungsmethoden.

2 Stand der Forschung

Für eine Regionensegmentierung werden neben Grauwertdifferenzen lokale Texturmerkmale verwendet, welche Gewebeeigenschaften besser erfassen können. Neben den von Haralick eingeführten, aus der Cooccurrence-Matrix berechneten Texturmaßen [HSD73] werden neuerdings oft Wavelettransformationen eingesetzt. Eine erste Anwendung der Wavelettransformation für die Texturanalyse wird von [Ma89] vorgestellt. Mit deren Hilfe werden für die Segmentierung verschiedene Texturmaße konstruiert [Bu97, Gh97, CK92, WSD99]. Sie werden allerdings für eine automatische Clusteranalyse verwendet. Erst in [HBP00] wird ein texturbasiertes Region-Growing vorgestellt, das Cooccurrence-Matrizen und die Wavelettransformation verwendet.

Deformierbare Modelle [MT96, DM00] führen zu konturbasierten Segmentierungsverfahren. Die klassischen Snakes [KWT88] und auch deren Weiterentwicklungen, z.B. [MT00], lassen verschiedene Interaktionsarten zu. Mit anderen Modellen wie den Geodesic Active Contours [CCC93, MSV95] ist eine Interaktion nur schwer zu erreichen. Die Live-Wire Methode [FUS98] zeichnet sich durch ihr einfaches Interaktionsmodell besonders aus. Die Grundlage bildet allerdings eine graphenbasierte Formulierung des Segmentierungsproblems. Die genannten Verfahren wurden für die dreidimensionale Segmentierung von Volumendaten weiterentwickelt [Co91, MT99, De94, FU00].

Um das haptische Eingabegerät anzusteuern, ist eine Kraftberechnung auf den Volumendaten notwendig. Die bekannten Verfahren setzen allerdings bereits segmentierte Daten voraus. Problematisch ist auch, dass die direkte Berechnung [AS96, MGS96] zu einer mangelnden Stabilität führen kann [MGS96]. Ein indirektes Rendering [MBG99, KSW99], das die Daten zuvor in ein Oberflächenmodell überführt, setzt ebenfalls segmentierte Daten voraus. Eine Freihandsegmentierung ist mit diesen Verfahren nicht möglich.

Zur Entwicklung von Bildverarbeitungssystemen sind Werkzeuge wie Khoros oder IDL verfügbar. Diese stellen zwar verschiedenste Algorithmen bereit, sind aber nur schwer um weitere, insbesondere interaktive Komponenten zu erweitern. Für die Erstellung interaktiver, graphischer Systeme existieren Frameworks wie z.B. [Ga91]. Diese bieten aber nur eine eingeschränkte, für medizinische Fragestellungen ungeeignete Funktionalität.

3 Material und Methoden

3.1 Regionensegmentierung

Lokale Texturmerkmale können ein Volume-Growing-Verfahren robuster gestalten und Gewebeeigenschaften mitunter besser erfassen als die Grauwerte selbst. Daher wurde ein allgemeines, interaktives Vektor-Volume-Growing sowie eine erweiterbare Komponente zur Erfassung lokaler Texturmerkmale entwickelt [Ha00].

Die Merkmalsvektoren werden mit statistischen Maßen erster und zweiter Ordnung (Cooccurrence-Matrizen) sowie mit aus der Wavelettransformation abgeleiteten Maßen

berechnet. Mit Hilfe der Wavelettransformation können lokale Frequenzen untersucht bzw. Texturanalysen auf unterschiedlichen Skalen durchgeführt werden. Für die Wavelettransformation standen uns Bibliotheken vom IAKS, Karlsruhe, und von MeViS-Technology, Bremen zur Verfügung.

Daneben wurde mittels C-Means-Algorithmus eine Clusteranalyse als Vorverarbeitungsschritt für eine interaktive Segmentierung untersucht. Ebenfalls wurde eine interaktive, histogrammbasierte Segmentierung im Merkmalsraum ermöglicht. Es können verschiedene lokale Texturmerkmale gegeneinander aufgetragen und Punktwolken innerhalb des Merkmalraumes interaktiv selektiert werden.

3.2 Kontursegmentierung

Deformierbare Konturmodelle sind besonders dazu geeignet, mit Artefakten behaftete Bilder, wie sie in der Medizin im allgemeinen anzutreffen sind, zu segmentieren. Die Verfahren werden in der klinischen Routine vor allem aufgrund einer ungeeigneten Benutzerschnittstelle nicht eingesetzt. Als wesentliche Schwachstellen wurden die schwierige Wahl der Parameter und die unzureichenden Interaktions- bzw. Korrekturmechanismen identifiziert.

In einem ersten Schritt wurden daher geeignete Interaktions- und Korrekturmechanismen entworfen [KHM01]. Als Orientierung dienten uns die Werkzeuge, die sich in der Klinik im Einsatz befanden. Wir haben uns für ein Interaktionsmodell entschieden, wie es manuellen Segmentierungswerkzeugen (z.B. unter Verwendung von Streckenzügen oder interpolierten Kurven) zugrunde liegt, weil dies aufgrund der Tatsache, dass die meisten Anwender damit bereits vertraut sind, die größte Akzeptanz erwarten ließ.

Im darauf folgenden Schritt wurde ein Konturmodell aufgestellt, das das Interaktionsmodell unterstützt und die Wahl der Parameter wesentlich vereinfacht. Das Modell zerlegt die gesamte Kontur in einzelne Abschnitte, die sich aus einzelnen Konturpunkten ergeben, die der Anwender interaktiv festlegt. Da die Abschnitte unabhängig voneinander deformiert werden, kann die Kontur beliebig nachbearbeitet werden.

Im letzten Schritt wurde ein interaktives Werkzeug für die Kontursegmentierung erstellt. Um die anatomische Struktur vom umliegenden Gewebe abzugrenzen, können einzelne Konturpunkte vom Anwender interaktiv gesetzt werden. Es lassen sich jederzeit neue Konturpunkte einfügen und bereits vorhandene verschieben oder auch entfernen. Die Kontur wird währenddessen verzögerungsfrei aktualisiert, weshalb die Auswirkungen einer jeden Interaktion sofort ersichtlich sind.

3.3 Haptik in der Segmentierung

Die genaue Positionierung eines Zeigers in der 3D-Visualisierung ist für die Initialisierung der Segmentierungsverfahren und auch für die Freihandsegmentierung sehr wichtig. Die visuelle Information reicht dazu nicht aus, weshalb Methoden zum Einsatz von haptischen Eingabegeräten untersucht wurden [GEM00, GEG99].

Für das haptische Rendering wird das Volumen als ein viskoses Medium modelliert, in dem jeder Bewegung Kräfte entgegenwirken, die proportional zur Dichte des Volumens sind. Zusätzlich werden in dem Volumen vorhandene Oberflächen berücksichtigt, die

ebenfalls eine entgegengesetzte Kraft bewirken. Dazu werden ausschließlich die Volumendaten verwendet. Falls bereits segmentierte Daten verfügbar sind, erfolgt die Berechnung auf distanztransformierten Daten. Die Kräfte sind außerhalb des Objektes auf den Objektrand gerichtet und innerhalb auf das Objektzentrum.

Da sowohl das haptische Rendering als auch die dreidimensionale Visualisierung sehr aufwendig sind, wurde die Rechenlast unter Verwendung des im Projekt Q3 erstellten Bildverarbeitungsservers [GEH00] auf mehrere Rechner verteilt.

3.4 Offene Segmentierungsschnittstelle

Die Entwicklung einer Arbeitsumgebung für den Einsatz in der klinischen Routine ist sehr aufwendig. Deshalb wurde ein Framework entwickelt, der ein generelles Grundgerüst für Applikationen in diesem Kontext zur Verfügung stellt [Ca00]. Dieses Grundgerüst kann an genau definierten Stellen erweitert werden, um zu einer problemspezifischen Lösung mit verhältnismäßig geringem Aufwand zu gelangen. Die Applikationen können sowohl stand-alone als auch innerhalb des CHILI-Teleradiologiesystems [ESB98] ausgeführt werden.

Mit Hilfe einer Segmentierungsschnittstelle ist es möglich, weitere Segmentierungswerkzeuge in eine bestehende Arbeitsumgebung einzubinden. Die Benutzerschnittstelle für die Parametereinstellungen wird automatisch generiert, so dass der Algorithmen-Entwickler sich ausschließlich auf seine Aufgabe konzentrieren kann [CDM99].

4 Ergebnisse

4.1 Regionensegmentierung

Eine Evaluation auf Ultraschalldaten (Herz), CT-Daten (Leber) sowie getaggtten MR-Daten (Herz) zeigte keine generellen Vorteile der texturbasierten Verfahren gegenüber skalaren Verfahren [HCH01]. Für jedes Bild wurde eine Referenzsegmentierung durch einen medizinischen Anwender durchgeführt. Um die Verfahren zu evaluieren, wurden für verschiedene Parameterkombinationen des Vektor-Region-Growings (>100) die Sensitivität und die Spezifität mit Bezug auf die Referenzsegmentierung, sowie die Rechenzeit bestimmt.

An einigen Bilddaten, wie z.B. CT-Daten mit Leber-Herzgrenze sowie bei getaggtten MR-Daten, welche durch die Tagging-Linien eine charakteristische Textur aufweisen, lieferte ein texturbasiertes Region-Growing jedoch bessere Ergebnisse als ein skalares, welches häufig zum Auslaufen führte.

Ein Hauptnachteil der texturbasierten Segmentierung liegt in der höheren Rechenzeit gegenüber skalaren Verfahren, was gerade für eine interaktive Segmentierung bedeutsam ist. Einen weiteren Nachteil stellt die große Anzahl von Parametern (Merkmal, Fenstergröße, Grauwertquantifizierung, u.a.) dar, welche an eine konkrete Problemstellung anzupassen und vom Anwender schwer zu beherrschen sind.

4.2 Kontursegmentierung

Das für die Kontursegmentierung entwickelte Werkzeug zeichnet sich vor allem durch seine einfachen Interaktions- und Korrekturmechanismen aus. Mit diesen ist der Anwender in der klinischen Routine meist schon vertraut. Das Feedback erlaubt ihm, Fehlsegmentierungen sofort zu erkennen und diese leicht zu korrigieren. Wichtig ist auch, dass das Werkzeug universell eingesetzt werden kann.

Mit Hilfe eines Satzes von klinischen Bildaufnahmen verschiedener Modalität wurde das Werkzeug evaluiert. Die Aufnahmen wurden von acht Mitarbeitern unserer Arbeitsgruppe sowohl mit dem semi-automatischen Verfahren als auch manuell segmentiert. Zum einen wurden der benötigte Zeitaufwand untersucht. Eine signifikante Zeitersparnis konnte allerdings nicht festgestellt werden. Zum anderen wurden die Abweichungen gegenüber einer Referenzkontur ermittelt. Diese bewegten sich im Mittel zwischen ein und zweieinhalb Pixeln. Obwohl die Teilnehmer eine höhere Genauigkeit des semi-automatischen Verfahrens beobachtet hatten, konnte diese nicht nachgewiesen werden. Möglicherweise haben die Referenzkonturen das Ergebnis verfälscht, weil diese durch eine manuelle Segmentierung gewonnen worden waren.

4.3 Haptik in der Segmentierung

Für die Ansteuerung des haptischen Eingabegerätes sind Verfahren entwickelt worden, die aus den Volumendaten zu übertragende Kräfte berechnen und ein stabiles Verhalten während der Interaktion zeigen [GEM00, GEG99]. Dies konnte erstmalig an Volumendaten gezeigt werden, die zuvor nicht segmentiert wurden. Das haptische Eingabegerät läßt sich somit zum Zwecke der Freihandsegmentierung einsetzen.

Auch das hybride, haptische Rendering ist ein neuartiger Ansatz, der die gemeinsame Darstellung von Volumendaten und Oberflächenmodellen erlaubt. Er ist insbesondere für die Navigation in röhrenförmigen Strukturen wie beispielsweise Blutgefäßen oder Bronchien geeignet. Die Rechenlast von haptischen Rendering und 3D-Visualisierung konnte auf mehrere Rechner verteilt werden. Durch die Verwendung von CORBA konnte auf proprietäre Kommunikationsprotokolle verzichtet werden.

Gemeinsam mit dem Projekt H1 wurde der Prototyp für die Vermessung des Herzklappenringes (Annulus) um eine haptische Eingabe erweitert. Weiterhin konnte diese auch für die Gefäßbaum-Segmentierung [TVC01] in der Leber-Chirurgie demonstriert werden [Gi00].

4.4 Offene Segmentierungsschnittstelle

Der Entwicklungsaufwand konnte durch das Framework gesenkt werden [Ca00]. Die offene Schnittstelle ermöglicht die Anbindung neuer Segmentierungsverfahren und unterstützt dies insbesondere durch eine automatische GUI-Generierung [GCM00, CDM99]. Die mit dem Framework entwickelten Applikationen können als PlugIn in dem CHILI-Teleradiologiesystems ausgeführt werden.

In Zusammenarbeit mit dem Projekt Q2 ist eine Arbeitsumgebung für die Segmentierung von Herzdaten [HSG01] entstanden. In einem gemeinsamen Projekt mit Kinderkardiologen des Children's Hospital in Boston wird das Framework ebenfalls

verwendet. Für die Leber- und Nierenchirurgie wurde in unserer Abteilung mit Hilfe des Framework eines Operationsplanungssystems entwickelt, welches bereits erfolgreich klinisch genutzt wird [LGD99].

5 Diskussion

Die texturbasierte Segmentierung ist gegenüber skalaren Verfahren sehr rechenaufwendig und durch eine große Anzahl von Parametern nur schwer zu kontrollieren. Um dennoch in der klinischen Routine eingesetzt zu werden, ist beispielsweise eine Datenbank erforderlich, die modalitäts- und organspezifische Werte für die Parameter bereithält.

Die konturbasierte Segmentierung mittels deformierbarer Modelle konnte durch das eingeführte Interaktionsmodell wesentlich vereinfacht werden. Momentan untersuchen wir, inwieweit sich die Ergebnisse einer Schichtaufnahme auf die angrenzenden übertragen lassen, um den Segmentierungsaufwand weiter zu senken. Problematisch ist, dass sich das Gewebe in einer einzelnen Aufnahme häufig nicht differenziert genug darstellt und nicht immer vollständig voneinander getrennt werden.

Eine Evaluation von interaktiven Segmentierungsverfahren muss neben bekannten Kriterien (Rechenzeit, Genauigkeit) sicherlich noch weitere berücksichtigen. Beispielsweise hat die Benutzerschnittstelle einen nicht unerheblichen Einfluss darauf, ob das Verfahren von den Anwendern eingesetzt wird. Da eine solche Evaluation sehr aufwendig sein kann, sind Methoden und Werkzeuge zur Unterstützung sehr wünschenswert.

Der Entwicklungsaufwand für eine klinische Arbeitsumgebung wird durch das Framework verringert. Durch das Feedback und neue Anforderungen, die von klinischer Seite kommen, ist das Framework einer stetigen Weiterentwicklung unterworfen.

6 Danksagung

Von MeVis Technology aus Bremen wurde uns freundlicherweise die MT-WICE Bibliothek zur Berechnung der Wavelettransformation zur Verfügung gestellt. Die Forschungsarbeit wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 414 „Informationstechnik in der Medizin – Rechner- und sensorgestützte Chirurgie“ gefördert.

Literaturverzeichnis

- [AS96] Avila, R.S., Sobierajski, L.M. A Haptic Interaction Method for Volume Visualization. Proc. Visualization '96, San Francisco, CA, (1996) 197–204+485
- [Bu97] Busch, Ch. Wavelet Based Texture Segmentation of Multi-Modal Tomographic Images. Computer and Graphics 21(3) (1997) 347–358
- [Ca00] Cárdenas, C., Braun, V., Hassenpflug, P., Thorn, M., Hastenteufel, M., Kunert, T., Vetter, M., Fischer, L., Lamade, W., Meinzer H.P. Ein Framework für die Implementierung von Anwendungssystemen zur Verarbeitung und Visualisierung von

- medizinischen Bildern. Bildverarbeitung für die Medizin 2001, Springer, Berlin (2000) 142–146
- [Co91] Cohen, L.D. On Active Contour Models and Balloons. CVGIP: Image Understanding 53(2) (1991) 211–18
- [CCC93] Caselles, V., Catté, F., Coll, T. A Geometric Model for Active Contours in Image Processing. Numerische Mathematik 66(1) (1993) 1–32
- [CDM99] Cárdenas, C.E., Demiris, A.M., Meinzer H.P. Automated Generation of Visual Elements for Image Processing Algorithms. Int. Conf. on Visual Computing, India, Goa (1999)
- [CK92] Chang, T., Kuo, C.C. Tree-structured Wavelet Transform for Textured Image Segmentation. Proc. SPIE 1770 (1992) 394–405
- [De94] Delingette, H. Simplex Meshes: A General Representation for 3D Shape Reconstruction. Technical Report 2214, INRIA (1994)
- [DM00] Delingette, H., Montagnat, J. Topology and Shape Constraints on Parametric Active Contours. Technical Report 3880, INRIA (2000)
- [ESB98] Engellmann, U., Schröter, A., Baur, U., Schwab, M., Werner, O., Makabe, M.H., Meinzer, H.P. Openness in (Tele-) Radiology Workstations: The CHILI PlugIn Concept. CAR'98 - Computer Assisted Radiology and Surgery, Elsevier, Amsterdam (1998) 437–442.
- [FU00] Falcão, A.X., Udupa, J.K. A 3D Generalization of User-Steered Live-Wire Segmentation. Medical Image Analysis 4(4) (2000) 389–402
- [FUS98] Falcão, A.X., Udupa, J.K., Samarasekera, S., Sharma, S. User-Steered Image Segmentation Paradigms: Live Wire and Live Lane. Graphical Models and Image Processing 60 (1998) 233–260
- [Ga91] Gamma, E. Objektorientierte Software-Entwicklung am Beispiel von ET++. Doktorarbeit ETH Zürich (1991)
- [Gh97] Fatemi Ghomi, N. Performance Measures for Wavelet-Based Segmentation Algorithms. Doktorarbeit University of Surrey, Guildford, UK (1997)
- [Gi00] Giess C. Neue Verfahren für die computergestützte Operationsplanung: Haptisches Rendering und Verteilte Bildverarbeitung. Technical Report 121, DKFZ Heidelberg, Abt. MBI (2000)
- [GCM00] Giess, C., Cardenas, C.E., Meinzer, H.P. Generierung von plattformunabhängigen Benutzerschnittstellen für einen CORBA basierten Bildverarbeitungsserver. Bildverarbeitung für die Medizin 2000, Springer, Berlin (2000) 208–212
- [GEG99] Giess C., Evers H., Glombitza G., De Simone R., Hafeld S., Meinzer H.P. Haptic Volume Rendering as Prerequisite for Surgical Planning. Proc. First International Workshop on Haptic Devices in Medical Applications, Universität Karlsruhe, Institut für Prozessrechentchnik, Automation und Robotik, Karlsruhe (1999) 102-108
- [GEH00] Giess, Ch., Evers, H., Heid, V., Meinzer, H.P. Design of a Distributed CORBA Based Image Processing Server. Medicine Meets Virtual Reality 2000 - Technology and Informatics 70, IOS Press, Amsterdam (2000) 86–88
- [GEM00] Giess C., Evers H., Meinzer H.P. Haptisches Rendering in der Operationsplanung. Bildverarbeitung für die Medizin 2000, Springer, Berlin (1999) 440–444
- [Ha00] Hastenteufel M. Softwarekomponenten zur texturanalytischen Segmentierung medizinischer Bilddaten für die computergestützte Operationsplanung. Technical Report 119, DKFZ Heidelberg, Abt. MBI (2000)
- [HBP00] Hao, X., Bruce, Ch., Pislaru, C., Greenleaf, J.F. A Novel Region Growing Method for Segmenting Ultrasound Images. Proc. IEEE Int. Ultrasonics Symposium 2000, Puerto Rico (2000)
- [HCH01] Hastenteufel, M., Cardenas, C., Hassenpflug, P., Glombitza, G., Meinzer H.P. Evaluierung von interaktiven, texturanalytischen Segmentierungsverfahren, Bildverarbeitung für die Medizin 2001, Springer, Berlin (2001) 232–236

- [HSD73] Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I. Texture Features for Image Classification. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics* 3(6) (1973) 610–621
- [HSG01] Heimann, T., Schroeder, A., Giess, C., Boese, J.M., Vahl, C.F., Hagl S. Integrierte visuelle und haptische Darstellung von Blutflüssen an Herzklappen. *Bildverarbeitung für die Medizin 2001*, Springer, Berlin, (2001) 122–126
- [KHM01] Kunert, T., Heiland, M., Meinzer, H.P. Interaktive Segmentierung von zweidimensionalen Datensätzen mit Hilfe von Aktiven Konturen. *Bildverarbeitung für die Medizin 2001*, Springer, Berlin (2001) 257–261
- [KSW99] Körner, O., Schill, M., Wagner, C., Bender, H.J., Männer, R. Haptic Volume Rendering with an Intermediate Local Representation. *Proc. First International Workshop on Haptic Devices in Medical Applications*, Universität Karlsruhe, Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik, Karlsruhe (1999) 79–84
- [KWT88] Kass, M., Witkin, A., Terzopoulos, D. Snakes: Active Contour Models. *Int. J. Computer Vision* 1(4) (1988) 321–331
- [LGD99] Lamadé W., Glombitza, G., Demir, A.M., Cárdenas, C., Meinzer, H.P., Richter, G., Lehnert, Th., Herfarth, Ch. Virtuelle Operationsplanung in der Leberchirurgie. *Chirurg* 70, (1999) 239–245
- [Ma89] Mallat, St. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11 (1989) 674–693
- [MBG99] Münchenberg, J., Brief, J., Grabowski, H., Kübler, C., Hassfeld, S., Raczkowski, J., Rembold, U., Wörn, H. An Intuitive Operation Planning System for Craniofacial Surgery. *Proc. First International Workshop on Haptic Devices in Medical Applications*, Universität Karlsruhe, Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik, Karlsruhe, (1999) 94–101
- [MGS96] Mor, A.B., Gibson, S., Samosky, J.T. Interacting with 3-Dimensional Medical Data Haptic Feedback for Surgical Simulation. *Proc. First PHANToM Users Group Workshop*, Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory, Dedham, MA, (1996)
- [MSV95] Malladi, R., Sethian, J.A., Vemuri, B.C. Shape Modeling with Front Propagation: A Level Set Approach. *Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17(2) (1995) 158–175
- [MT96] McInerney, T., Terzopoulos, D. Deformable Models in Medical Image Analysis: A Survey. *Medical Image Analysis* 1(2) (1996) 91–108
- [MT99] McInerney, T., Terzopoulos, D. Topology Adaptive Deformable Surfaces for Medical Image Volume Segmentation. *IEEE Trans. Medical Imaging* 18(10) (1999) 840–850
- [MT00] McInerney, T., Terzopoulos, D. T-Snakes: Topology adaptive snakes. *Medical Image Analysis* 4 (2000) 73–91
- [TVC01] Thorn, M., Vetter, M., Cardenas, C., Hassenpflug, P., Fischer, L., Grenacher, L., Richter, G.M., Lamade, W., Meinzer, H.P. Interaktives Trennen von Gefäßbäumen am Beispiel der Leber. *Bildverarbeitung für die Medizin 2001*, Springer, Berlin (2001) 147–151.
- [WSD99] Wouwer van de, G., Scheunders, P., Van Dyck, D. Statistical Texture Characterization from Discrete Wavelet Representation. *IEEE Trans. Image Processing* 8(4) (1999) 592–598