

Interaktive 3D-Volumenvisualisierung und Integration von Softwaremodulen

Christoph Giess, Tobias Kunert, Mark Hastenteufel, Volker Braun, Michael Klemke,
Kilian Lorenz, Marc Heiland, Harald Evers, Hans-Peter Meinzer

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

Abstract: Das Projekt Q3 des SFB 414 befasst sich mit Methoden zur interaktiven Volumenvisualisierung und der Integration von Softwaremodulen. Zur Erhöhung der klinischen Akzeptanz wurden vorhandene Visualisierungsverfahren optimiert, neuartige haptische Eingabegeräte integriert sowie ein CORBA-basierter Bildverarbeitungsserver entworfen. Eine Visualisierungs-Umgebung stellt die Verfahren für die klinische Routine zur Verfügung.

1 Einleitung

Moderne dreidimensionale Schichtbildaufnahmen erlauben den Medizinern eine detaillierte Sicht in den menschlichen Körper zur Diagnostik und Operationsplanung. Schichtbildaufnahmen können mit oberflächen- oder volumenbasierten Visualisierungsverfahren dreidimensional dargestellt werden. Eine Navigation in solchen Volumendaten erfordert neuartige Mensch-Maschine-Schnittstellen, da hier mit einer dreidimensionalen Welt interagiert wird. Die Verfahren zur Volumenvisualisierung erfordern bisher spezielle High-End Grafikworkstations. Weil diese im klinischen Umfeld selten verfügbar sind, wird ein Einsatz der Verfahren in der klinischen Routine verhindert. Um die Akzeptanz zu erhöhen, sollte die Volumenvisualisierung speziell für Low-Cost Plattformen optimiert werden. Wo dennoch nicht auf Rechenleistung verzichtet werden kann, können leistungsfähige Server eingesetzt werden.

Das Projekt Q3 des SFB 414 beschäftigt sich mit diesen Themen. Ein Schwerpunkt lag in der Entwicklung einer einfach zu bedienenden Mensch-Maschine-Schnittstelle, da diese als ein deutlicher Schwachpunkt bestehender Anwendungen identifiziert wurde. Damit einher ging die Optimierung aller Verfahren auf Low-Cost-Plattformen, so dass die entwickelten Methoden problemlos und kostengünstig in der Klinik evaluiert werden können. Die im vorangegangenen Abschnitt des SFB 414 entwickelte Client/Server Architektur zur Visualisierung und Segmentierung wurde auf CORBA umgestellt. Durch diesen Standard wird der Zugriff auf die Dienste wesentlich vereinfacht.

Im vorliegenden Artikel werden die einzelnen bearbeiteten Forschungsthemen und Ergebnisse des Projektes Q3 des Sonderforschungsbereiches 414 beschrieben.

2 Stand der Forschung

Die Medizin stellt ein breites Einsatzgebiet für haptische Eingabegeräte dar. Es dominieren vor allem Simulatoren für die verschiedensten Eingriffe. Diese reichen von Augenoperationen [KSW99] über Biopsien [CCT99] bis hin zur Kieferchirurgie [SNS99]. Die Kraftberechnung findet dabei meist anhand von Oberflächendaten statt. Werden Volumendaten eingesetzt, bedingen die Algorithmen eine vorherige Segmentierung und erweisen sich trotz zusätzlicher Glättung teilweise als instabil [AS96, MGS96].

Neben den in unserer Abteilung entwickelten Verfahren zur verteilten Bildverarbeitung findet derzeit nur noch eine Entwicklung an der Universität Graz statt. Deren Systeme DIPS und DICE [Ba98, Ob98] zielen jedoch nicht auf interaktive Applikationen in lokalen Netzwerken, sondern auf die automatische Verarbeitung von SAR-Daten über das Internet ab. Andere verteilte Ansätze, wie sie beispielsweise durch das OpenGIS Konsortium oder in DICOM verfolgt werden, ermöglichen zwar den Austausch von Bilddaten, sind jedoch auf 2D-Daten beschränkt und definieren keine Bildverarbeitung. Das gleiche gilt für CORBAmed.

3 Material und Methoden

3.1 Farbgetreue Visualisierung von Ultraschallbildern

Eine optimale Befundung von Herzklappeninsuffizienzen ist mit transösophagealem, getriggertem 3D-Doppler Ultraschall möglich. Die visuelle Aufbereitung der dabei akquirierten Daten wurde mit dem OpenGL Volumizer realisiert [HEH00]. Für eine optimale Skalierbarkeit der Visualisierung auf unterschiedlicher Hardware fand die Multipipe Utility Library (MPU) Verwendung. Die Kombination beider Ansätze ermöglichte eine Volumenvisualisierung von funktionalen Ultraschalldaten mit einer Wiederholrate von 10 Bildern/s. Die Visualisierung ist interaktiv anpassbar, so dass die Darstellung der Morphologie und des Flusses frei gewählt werden kann. Um detailliertere Einsichten in die Vitien zu erhalten, ist zusätzlich ein Clipping der morphologischen Informationen möglich. Die Anforderungen bezüglich Hard- und Software ließen jedoch einen klinischen Einsatz dieser Applikation nicht zu.

3.2 OpenGL Optimierung

Die Erfahrung aus der Visualisierung der Doppler-Ultraschalldaten zeigte, dass der Einsatz von Visualisierungsverfahren in klinischer Routine deren Ausführbarkeit auf Low-Cost-Architekturen erfordert. Das in der letzten Projektphase entwickelte Verfahren der hybriden Visualisierung [WMN96] erreichte jedoch nur auf leistungsstarken Graphikworkstations akzeptable Bildwiederholraten. Eine detaillierte Analyse des Verfahrens ergab, dass dabei nicht die Berechnung sondern allein die Darstellung des bereits vorberechneten volumengerenderten Bildes inklusive z-Buffer

die Ursache war. Für die Darstellung selbst existieren 28 Implementierungsmöglichkeiten. Bei einer Untersuchung aller dieser Möglichkeiten [Gi01] auf 10 verschiedenen Systemen wurde das effektivste Verfahren ermittelt, welches bis zu Faktor 100 schneller als das langsamste ist. Die damit erzielbare Geschwindigkeit ist jedoch nicht für interaktive Systeme ausreichend. Weitere Optimierungen sind bei der Darstellung von einfachen Oberflächenobjekten möglich. So kann dort auf das Schreiben des z-Buffers während der Scankonvertierung verzichtet werden, sofern die Applikation die Sortierung der Oberflächenelemente selbst übernimmt. Damit läßt sich auf vielen Systemen bereits eine deutliche Geschwindigkeitssteigerung erzielen. Benötigt die Applikation nur die Überlagerung eines einzelnen Objektes, z.B. der Eingabepointer, kann die lokale Änderung zweier aufeinanderfolgender Bilder ausgenutzt werden. Mittels Scankonvertierung wird der zu ändernde Bereich bestimmt und auf ein Minimum reduziert. Mit Hilfe dieser Optimierungen läßt sich auch auf PC-Systemen die hybride Visualisierung einsetzen.

3.3 Schatten als Navigationshilfe

Zum Testen der Akzeptanz eines Operationsplanungssystems mit haptischer Eingabe wurde der Prototyp auf verschiedenen Kongressen und Messen dem Fachpublikum präsentiert. Die meisten der Testpersonen äußerten dabei, dass sie Probleme mit der Orientierung in der virtuellen Umgebung hätten. Die relative Position des Eingabegerätes zu den virtuellen Objekten konnte von ihnen nicht richtig beurteilt werden. Die Ursache liegt darin begründet, dass dem Benutzer zweidimensionale Bilder mit unterspezifizierter 3D-Information dargereicht werden. Die Verwendung von Schatten als ein Mittel zur verbesserten Interaktion wurde dabei als realistisches Verfahren eingeschätzt. Zur Erzeugung von Schatten wurde eine Lichtquelle simuliert, deren Position identisch mit der zweiten Lichtquelle des Volume Renderers ist. Bei diesem Verfahren standen einem hohen Berechnungsaufwand nur geringe Informationen über die räumliche Tiefe gegenüber. Das zweite Verfahren verwendet eine Lichtquelle in unendlicher Entfernung über dem zu visualisierenden Raum und projiziert somit Schatten auf den Boden. In einem Versuch wurde das Verfahren von 35 Personen getestet [GTM00]. Von Psychologen häufig gefundene geschlechterspezifische Unterschiede wurden bei dieser Interaktion nicht erkannt. Die Analyse der erhobenen Daten ergab jedoch einen signifikanten Unterschied in der Bearbeitungszeit zwischen den Verfahren ohne und mit Schatten. Das Verfahren mit Schattenwurf schnitt dabei besser ab. Ein parallel zum Versuch durchgeführtes Interview führte zu einem ähnlichen Ergebnis. 50% der Teilnehmer, die den Versuch ohne Schatten durchführten, klagten über Orientierungsprobleme gegenüber 12%, die Schatten als Hilfsmittel zur Verfügung hatten.

3.4 Haptisches Volumenrendering

Die Anbindung eines haptischen Eingabegerätes erforderte eine Kraftberechnung auf Volumendaten. Alle bisher dazu eingesetzten Algorithmen benötigen vorsegmentierte Daten, um Benutzern ein taktiles Feedback zu geben. Dies läßt sich innerhalb eines Operationsplanungssystems nicht einsetzen, da die Segmentierung selbst mittels

haptischer Eingabe durchgeführt werden soll. Die im Rahmen des Projektes entwickelten Algorithmen lassen genau diese Interaktion zu [GEM99a, GEG99].

Einer dieser Algorithmen basiert auf einem, dem Volume Rendering ähnlichen Verfahren. Es interpretiert die Volumendaten zum einen als viskose Flüssigkeit und bestimmt zum anderen potentielle Oberflächenobjekte. Dieses Verfahren erlaubt die taktile Präsentation beliebiger Volumendaten. Im Projekt Q2 wurde das Verfahren in leicht abgewandelter Form zur Visualisierung von 4D-Fludaten des menschlichen Herzens eingesetzt, die mittels MRT aufgenommen wurden [HSG01]. In einer Erweiterung lassen sich die volumetrisch berechneten Kräfte mit Kräften von Oberflächenobjekten verbinden, womit auch ein hybrides taktiles Rendering analog zur visuellen Form realisiert ist. Auf die Verwendung des z-Buffers der Volumenvisualisierung konnte für die Kraftberechnung verzichtet werden. Jedoch werden Parameter der Visualisierung eingesetzt um ein, der graphischen Repräsentation kohärentes taktiles Feedback zu erzeugen. Bereits geringe Abweichungen von dieser Darstellung sind bemerkbar und werden von den Anwendern als so stark störend bezeichnet, dass ein Einsatz unmöglich ist.

Das zweite entwickelte Verfahren ist speziell auf längliche Objekte, wie z.B. Blutgefäße zugeschnitten, die sich in vielen Anwendungen wiederfinden. Diese zeichnen sich meist durch eine gute Kontrastierung aus, was eine für dieses Verfahren vorausgesetzte Segmentierung vereinfacht. Mittels einer Kombination zweier 3D-Distanztransformationen wird eine Navigation innerhalb der gewählten Struktur realisiert. Auch hier ist die Überlagerung von Oberflächenobjekten gegeben.

3.5 Client/Server Bildverarbeitung CORBA

Die in der vorhergehenden Antragsphase entwickelte Client/Server-Schnittstelle erwies sich als effizient, um rechenintensive Algorithmen einer Vielzahl von leistungsschwachen Clients zur Verfügung zu stellen [MM99]. Als komplex stellte sich jedoch deren Anwendung für den Applikationsentwickler dar. Um die Integration dieser Verfahren in bestehende Systeme zu vereinfachen, wurde der Server unter Verwendung von CORBA als Middleware neu entworfen [GEM00]. Untersuchungen aktueller CORBA-Implementierungen ergaben einen geringen Overhead, womit eine effiziente Übertragung von Bilddaten inklusive ihrer Konvertierung ermöglicht wird. Das neue System stellt dabei keine Portierung dar, sondern kombiniert die Fähigkeiten von CORBA mit dem Konzept des Bildverarbeitungsservers. Aus diesem Grund wurde die 1:n Beziehung zwischen Server und Client zugunsten einer n:m Beziehung erweitert. In diesem verteilten Bildverarbeitungssystem können Clients auf die Funktionalität verschiedener Server zugreifen, ohne dass ihnen diese Verteilung bewusst wird.

Der Bildverarbeitungsserver ist in diesem System für die Erzeugung von Bildobjekten, die Verwaltung von Algorithmen sowie den Bildaustausch mit anderen Servern zuständig. Die angebotenen Algorithmen lassen sich in diskrete Operationen und Sessions unterteilen. Deren Einsatz basiert auf der Wiederverwendbarkeit des zu verarbeitenden Bildes sowie der Parameteranzahl und dient zur Minimierung des Datenaustausches. Der Zugriff auf die Bilddaten erfolgt ausschließlich lesend durch die Bildverarbeitungsalgorithmen. Dies gewährleistet einen konsistenten Zustand beim gleichzeitigen Zugriff mehrerer Clients auf ein Bild, ermöglicht den Einsatz des Servers

für die Gruppenarbeit und sorgt für eine hohe Stabilität des Servers. Die Implementierung als Multithreaded-Applikation erlaubt eine gleichzeitige Ausführung mehrerer Algorithmen ohne explizite Parallelisierung. Unter Anwendung des Dynamic Invocation Interfaces (DII) läßt sich eine asynchrone Kommunikation realisieren.

Durch konsequenten Einsatz der CORBA-Technologie konnte die Anzahl der Codezeilen des Bildverarbeitungsservers auf 1/3 reduziert werden, wobei sich gleichzeitig die Anzahl der eingebundenen Algorithmen sowie die Funktionalität deutlich erhöhte. Auch hier wurde der konsequente Übergang zu Low-Cost-Plattformen beschritten. Das System ist auf vier verschiedenen UNIX-Derivaten sowie den verschiedenen Windows-Betriebssystemen ohne spezielle Anpassung lauffähig.

3.6 Integration von Softwaremodulen

Ein Ziel bei der Entwicklung aller Softwaremodule des SFB 414 bestand in einer einfachen, projektübergreifenden Integration. So wurde das Modul zum haptischen Volumenrendering als Teil des verteilten Bildverarbeitungsservers realisiert [GEM99b] und steht auf diesem Wege als verteilter Dienst mehreren Clients zur Verfügung. Der Zugriff erfolgt hierbei wiederum mittels einer CORBA-Schnittstelle, was einen Anschluss an verschiedenste Systeme vereinfacht.

Auch die weiteren, im Rahmen dieses Projektes entwickelten Methoden finden ihre Anwendung in drei anderen Projekten. Die Komponente zum Raytracing wird sowohl in einem Programm zur Visualisierung und Quantifizierung von transösophagealen 3D-Doppler-Ultraschalldaten (Projekt H1) als auch zur Visualisierung von Segmentierungsergebnissen (Projekt Q3a) verwendet.

Die Verfahren des haptischen Renderings dienen als Basis des im Projekt Q2 realisierten Programmes zur haptischen Analyse von Flußdaten des menschlichen Herzens. Die im Projekt Q3a entwickelte Technik zur Generierung von Benutzerschnittstellen wurde adaptiert und findet als generisches Frontend des verteilten Bildverarbeitungsservers Anwendung [GCM00].

In dem Visualisierungs-PlugIn für das Teleradiologiesystem CHILI wurden die Verfahren integriert, die sich als relevant für die klinische Routine herausgestellt haben, die in die bestehende Infrastruktur leicht einzubinden sind und die notwendige Stabilität zeigen. Bei der Gestaltung der Benutzerschnittstelle wurde auf die Erfahrungen zurückgegriffen, die mit den Prototypen gewonnen wurden.

4 Ergebnisse

Mit den entwickelten Verfahren zum haptischen Rendering wurden die Grundlagen für Anwendungen der Haptik in der Operationsplanung gelegt, wie z.B. haptische Segmentierung oder Planung von Gewebeschnitten. Erstmals wurde ein Algorithmus zur Kraftberechnung auf unsegmentierten Daten vorgestellt, was für eine haptische Segmentierung Voraussetzung ist. Es entstand eine CORBA-Schnittstelle zu den Funktionen des haptischen Renderings, um eine Verteilung der Rechenlast zu ermöglichen.

Die vorhandene Client/Server Architektur wurde unter Verwendung von CORBA umgesetzt und hinsichtlich einer besseren Verteilung der Rechenlast erweitert. Durch Verwendung von CORBA, der einzigen hersteller- und plattformunabhängigen Middleware, kann der Server ohne Anpassung auf verschiedenen Plattformen (IRIX, Solaris, Linux, Windows) eingesetzt werden. Der Zugriff auf den Bildverarbeitungsserver gestaltet sich für Anwendungsentwickler durch die Verwendung von CORBA wesentlich einfacher, nicht zuletzt wegen der großen Auswahl an Programmiersprachen zur Implementierung der Clients. Im Gegensatz zu existierenden, auf Batchbetrieb basierenden Systeme ist mit unserer Client/Server Architektur eine interaktive Steuerung möglich.

Nach unseren Erfahrungen ist für den Einsatz von Visualisierungsverfahren in der klinischen Routine die Ausführbarkeit auf Low-Cost-Plattformen erforderlich. Hierfür wurden die Visualisierungskomponenten optimiert. Zwar verdoppelt sich die Leistungsfähigkeit der Hardware alle 18 Monate, doch zum einen nehmen im selben Maße die zu verarbeitenden Daten zu (z.B. Multi-Slice CT, hochauflösender 4D Ultraschall) und zum anderen sind die Optimierungen der Low-Cost-Grafikhardware meist auf 3D-Spiele zugeschnitten und nicht im vollen Umfang für medizinische Anwendungen brauchbar. Auch werden medizinische Visualisierungen zunehmend für mobile Clients (Notebooks, Palmtops) interessant, welche nicht über entsprechende Grafikhardware verfügen.

Bei einer Untersuchung der Navigierbarkeit in Volumendaten gelangten wir zu der Erkenntnis, dass die Verwendung von Schattenwurf von Navigationspointern die Orientierung der Benutzer erheblich unterstützt.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Um eine höhere klinische Akzeptanz der in der vorherigen SFB-Phase entwickelten Verfahren zu erreichen, wurden Optimierungen an der Volumenvisualisierung und eine Verbesserung der Mensch-Maschine-Schnittstelle vorgenommen. Die Optimierung der Verfahren erfolgte hinsichtlich der Ausführbarkeit auf Low-Cost-Plattformen. Neue, haptische Eingabegeräte wurden integriert und mögliche Anwendungsszenarien evaluiert. Der Bildverarbeitungsserver wurde auf den CORBA-Standard portiert und gewährleistet dadurch eine bessere Verteilung der Rechenlast und einen einfacheren Zugriff durch Anwendungsentwickler.

Die Entwicklung neuer klinisch einsetzbarer Verfahren befindet sich immer in einem Spannungsfeld von Innovation und Flexibilität auf der einen Seite sowie Stabilität und Kontinuität auf der anderen. So ist eine Vielzahl informatisch neuer Methoden für den klinischen Einsatz völlig ungeeignet. Aus diesem Grund müssen die Ergebnisse dieses Projektes von zwei Seiten hinterfragt werden: 1. Ist dieses Verfahren klinisch einsetzbar? 2. Gibt es bessere Verfahren zur Lösung dieses Problems?

Das mittels Open Inventor implementierte Verfahren der farbgetreuen Visualisierung von Doppler-Ultraschalldaten hat sich aufgrund der verwendeten Plattform nicht für die routinemäßige Untersuchung bewähren können. Die Verwendung der eigenen Visualisierungskomponente ist zwar hinsichtlich der Leistung unterlegen, wird jedoch in der Praxis akzeptiert.

Welches Verfahren zur Optimierung der hybriden Visualisierung in einer Applikation eingesetzt wird, muss von dem Applikationsentwickler in Abhängigkeit der jeweiligen Anforderung seines Programmes entschieden werden. Eine Standardimplementierung kann für keines der beiden Verfahren gegeben werden, da diese stark von der Form der darzustellenden Objekte abhängt.

Wie sich die Visualisierung in den kommenden Jahren entwickeln wird, wird zum einen durch die sich schnell verändernde Hardware bestimmt und zum anderen, ob es gelingt eine standardisierte Programmierschnittstelle zu schaffen.

Die Untersuchung von Navigationshilfsmitteln für virtuelle Umgebungen berücksichtigt den Bereich der heute eingesetzten Desktopsysteme nur rudimentär. Die Analyse des Einflusses von Schatten stellt nur einen kleinen Anteil der möglichen Hilfsmittel dar. Hier wären weitere Untersuchungen notwendig, die jedoch psychologisches Expertenwissen voraussetzen.

Die für ein haptisches Rendering notwendigen Grundlagen der Kraftberechnung wurden gelegt und ihre Eignung in einer Vielzahl von Prototypen nachgewiesen. Einer weiteren Entwicklung und größeren Verbreitung stehen eine Vielzahl von unterschiedlichen Standards zur Ansteuerung dieser Geräte gegenüber.

Während verteilte Applikationen in der Forschung seit Jahren zum Alltag gehören, sind sie sowohl im klinischen als auch kommerziellen Umfeld nahezu unbekannt. Gründe dafür sind der erhöhte Administrations- und Schulungsaufwand. Dazu kommen höhere Entwicklungskosten sowie die beschränkte Bandbreite der verfügbaren Netzwerke, welche beide weitere Hürden für einen praktischen Einsatz darstellen.

Das Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen des SFB 414 „Informationstechnik in der Medizin - Rechner- und sensorgestützte Chirurgie“ gefördert.

Literaturverzeichnis

- [AS96] Avila RS, Sobierajski LM: A Haptic Interaktion Method for Volume Visualization. In: R. Yagel et al. Visualization'96 Proceedings. (1996) 197–204+485
- [Ba98] Bachmann D: A Distributed Image Processing Backend. Diplomarbeit TU Graz, Institut für Maschinelles Sehen (1998)
- [CCT99] Cleary K, Carignan C, Traynor L: Realistic Force Feedback Spine Biopsy Simulator. In: R. Dillmann et al. (Hrsg): Proceedings of The First International Workshop on Haptic Devices in Medical Applications. Uni Karlsruhe (1999)
- [GCM00] Giess Ch, Cardenas C, Meinzer HP: Generierung von plattformunabhängigen Benutzerschnittstellen für einen CORBA basierten Bildverarbeitungsserver. In: Horsch A, Lehmann T (Hrsg): Bildverarbeitung für die Medizin 2000, Springer, Berlin (2000) 208–212
- [Gi01] Giess Ch: Neue Verfahren für die computergestützte Operationsplanung: Haptisches Rendering und Verteilte Bildverarbeitung Technical Report 121/2001 Deutsches Krebsforschungszentrum, Abteilung MBI (2001)
- [GEG99] Giess Ch, Evers H, Glombitza G, De Simone R, Haßfeld S, Meinzer HP: Haptic Volume Rendering as Prerequisite for Surgical Planning. In: R. Dillmann, T. Salb (Hrsg): Proceedings of The First International Workshop on Haptic Devices in Medical Applications, Universität Karlsruhe, Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik, Karlsruhe (1999) 102–108

- [GEM99a] Giess Ch, Evers H, Meinzer HP: Haptisches Rendering in der Operationsplanung. In: H. Evers et al. (Hrsg): Bildverarbeitung für die Medizin 1999, Springer, Berlin (1999) 400–444
- [GEM99b] Giess Ch, Evers H, Meinzer HP: The use of CORBA in haptic systems - a requirement for future applications. In: J.K. Salisbury, M.A. Srinivasan (Hrsg): Proceedings of the Third PHANToM Users Group Workshop, AI Lab Technical Report No. 1675 and RLE Technical Report No. 633, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA (1999) 25–28
- [GEM00] Giess Ch, Evers H, Meinzer HP: Design of a Distributed CORBA Based Image Processing Server. In: J.D. Westwood, H.M. Hoffman et. al. (Hrsg): Medicine Meets Virtual Reality 2000, IOS Press, Amsterdam (2000) 86–88
- [GTM00] Giess Ch, Töpfer S, Meinzer HP: Can shadows improve haptic interaction in virtual environments? In: Harders M, Huber S (Hrsg): Selected Readings in Vision and Graphics; Vol. 8, Hartung-Gorre, Konstanz (2000) 49–53
- [HEH00] Heid V, Evers H, Henn C, Glombitza G, Meinzer HP: Interactive Realtime Doppler-Ultrasound Visualization of the Heart. In: Medical Imaging 2000, SPIE (2000)
- [HSG01] Heimann T, Schroeder A, Giess Ch, Boese JM, Vahl CF, Hagl S: Integrierte visuelle und haptische Darstellung von Blutflüssen an Herzklappen. In: H. Handels, A. Horsch et. al. (Hrsg): Bildverarbeitung für die Medizin 2001, Springer, Berlin (2001) 122–126
- [KSW99] Körner O, Schill M, Wagner C, Bender J, Männer R: Haptic Volume Rendering with an Intermediate Local Representation. In: R. Dillmann et al. (Hrsg): Proceedings of The First International Workshop on Haptic Devices in Medical Applications. Uni Karlsruhe (1999) 79–84
- [MGS96] Mor AB, Gibson S, Samosky JT: Interacting with 3-Dimensional Medical Data - Haptic Feedback for Surgical Simulation. In: J.K. Salisbury et. al. Proceedings of the First PHANToM Users Group Workshop (1996)
- [MM99] Mayer A, Meinzer HP: High performance medical image processing in client/server-environments. *Comput Methods Programs Biomed* 1999 Mar;58(3) (1999) 207–17
- [Ob98] Oberhuber M: Distributed High-Performance Image Processing on the Internet. Diplomarbeit TU Graz, Institut für Maschinelles Sehen (1998)
- [SNS99] Schulz A, Neumann P, Siebert D, Krauss M, Faulkner G, Tolxdorf T: Haptisch-visuelle Benutzerschnittstelle für die kieferchirurgische Operationsplanung. In: H. Evers et al. (Hrsg.) Bildverarbeitung für die Medizin 1999, Springer (1999) 167–171
- [WMN96] Wolsiffer K, Mayer A, Niebsch R, Evers H, Meinzer HP: Die Integration des Heidelberger Raytracers in OpenGL zur integrierten Segmentierung und Visualisierung dreidimensionaler medizinischer Volumendaten. In: Lehmann Th, Scholl I, Spitzer K (Eds). Bildverarbeitung für die Medizin. Proceedings des Aachener Workshops am 8. und 9. November 1996. Aachen: Verlag der Augustinus Buchhandlung (1996) 143–148.