

Die Querschnittsprojekte des SFB 414

Hans-Peter Meinzer

Deutsches Krebsforschungszentrum Abt. Medizinische und Biologische Informatik
Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg
H.P.Meinzer@DKFZ.de

Abstract: Der Sonderforschungsbereich SFB 414 ‚Rechnergestützte Chirurgie‘ besteht aus drei Säulen. Das sind zum Einen die Herzprojekte, als Referenz für Weichteile, zum Anderen die craniofazialen Projekte für die knöchernen Strukturen und die Querschnittsprojekte, die gemeinsame und übergreifende Werkzeuge entwickeln, die womöglich in beiden Anwendungsbereichen nützlich sein können. Im folgenden werden jeweils zunächst die Absichten und Ziele der fünf Q-Projekte erläutert und die Ergebnisse der letzten Monate dokumentiert.

1 Q1 Aufbereitung medizinischer Bilddaten

Das Projekt Q1 steht am Anfang der Verarbeitungskette zur Entwicklung von Anwendungen in der computergestützten Chirurgie. Aufgabe des Projektes ist es, Bilddaten für den Sonderforschungsbereich zu akquirieren und radiologisch – zusammen mit verarbeiteten Bilddaten - zu begutachten. Weiterhin werden grundlegende Methoden der Aufbereitung entwickelt und evaluiert, bevor diese in die Herz- und Kopfprojekte transferiert werden, wo sie für eine anwendungsspezifische Entwicklung benötigt werden.

Diese Methoden umfassen die Artefaktreduktion zur direkten Verbesserung der gewonnen Bilddaten der Modalitäten CT, MRT und Ultraschall. Die entwickelten Verfahren zur Artefaktkompensation im CT sollen um weitere modellierte Fehlerquellen ergänzt und mit Hilfe angepasster Reduktionsverfahren auf andere Aufnahmetechniken übertragen werden. Insbesondere ist die Artefaktbildung bei MRT-Aufnahmen bewegter Objekte (z.B. schlagendes Herz) zu untersuchen und zu kompensieren.

In einem nächsten Schritt werden die Informationen der verschiedenen Modalitäten in der Bilddatenfusion (Bildregistrierung) zusammengefasst: Es wurde ein Verfahren sowohl zur starren (engl.: rigid), als auch zur elastischen Bildregistrierung entwickelt. Damit ist es möglich Bilddaten der Modalitäten MRT und CT so zu überlagern, dass die unterschiedlichen Gewebekontraste, die aus den physikalischen Unterschieden der Bildgebung resultieren, in einem einzigen Bild sichtbar werden und somit die diagnostischen Möglichkeiten deutlich erweitern. Speziell akquirierte Daten werden nun fusioniert und anschließend hinsichtlich ihrer Genauigkeit und sowohl der diagnostischen als auch der chirurgischen Relevanz radiologisch begutachtet.

Weiterhin werden Methoden zur Erstellung von oberflächen- oder volumenbasierten Netzmodellen für die virtuelle Operationsplanung entwickelt und evaluiert. Diese dienen in einem ersten Schritt zum Aufbau virtueller Patientenmodelle, die in einem nächsten Schritt interaktiv manipuliert werden können. Für diese Manipulation entwickelt das Projekt Q1 Verfahren zum Verschieben, Schneiden und zur Deformation der Netzmodelle.

2 Q2 Methodenevaluation

In diesem Querschnittsprojekt werden für die Herzprojekte die bildgebenden Methoden der kardialen Flussvisualisierung (3D-Doppler, MR), der Bewegungsanalyse (4D-Echo, tissue Doppler, MR tagging), der Erkennung myokardialer Texturveränderungen (MR) und der Volumetrie (4D-Echo, MR, EBT) an exakt definierten Modellen (Phantome, Großtier-, Langendorff-Modell) evaluiert. Für die Kopfprojekte wird die Anwendung eines interaktiven Robotersystems bei knochenverlagernden Eingriffen im Großtierversuch hinsichtlich Genauigkeit, Bedienbarkeit und Sicherheit getestet. Alle untersuchten Methoden dienen der Operationsunterstützung. Entwickelt werden sollen zudem Software und Methoden zur myokardialen Perfusionsanalyse (3D-Echo, MR, EBT), zur optischen Modellierung (Endoskopie, Angiographie), zur Erstellung eines haptischen Atlas (Großtier) sowie zur Einbindung interaktiver optischer/akustischer Warnsysteme in 4D-Datensätzen

Die mehrdimensionale Untersuchung von Patienten, die an Herzklappeninsuffizienzen (undichten Herzklappen) leiden, stellt eine wesentliche Innovation in der Indikationsstellung, Planung und Verlaufskontrolle dar. Während früher zweidimensionale Angiographie- und Dopplerverfahren lediglich eine Semiquantitation der Rückflußvolumina (Jets) zuließen, gestattet die dreidimensionale Quantifizierung mittels 3D-Echo eine weitaus präzisere Diagnostik. Insbesondere eröffnete das neue Verfahren den Blick auf die zugrundeliegenden Pathologien: So führen verschiedene Mitralklappenschädigungsmuster zu korrespondierenden Jetgeometrien. Als weitere Möglichkeit zur volumetrischen Bestimmung von Regurgitationsjets kommt die Magnetresonanztomographie in Frage. Hierbei können Flußgeschwindigkeits-Informationen winkelunabhängig und ohne notwendige Erreichbarkeit geeigneter Schallfenster erhoben werden. Alternative volumetrische Verfahren (Computertomographie, EBCT, Angiographie, Szintigraphie) verwenden Kontrastmittel oder sind auf geometrische Annahmen angewiesen, um aus 2D-Daten mehrdimensionale Informationen zu schätzen. Das Ziel dieses Teilprojekts war eine Methodenentwicklung zur experimentellen Evaluierung der beiden klinisch relevanten Verfahren 3D-Echokardiographie und Magnetresonanztomographie zur volumetrischen Bestimmung und zur qualitativen Darstellbarkeit von Herzklappen-Insuffizienzjets.

Abgesehen von einzelnen Anwendungen in der Orthopädie, findet der Einsatz von Robotern in der operativen Medizin erst zögernd statt. Telemanipulatoren und Haltehilfen dagegen finden weitere Verbreitung. Die Gründe dieser Diskrepanz liegen in der mangelnden systematischen Untersuchung der Gesamtkette von Ereignissen, die

autonome Roboteraktionen komplex erscheinen lassen. Ziel dieser Untersuchung war daher, alle wichtigen Bestandteile der Prozesskette zu evaluieren.

Haptische Eingangsdaten stellen die Grundlage zur Modellierung und Simulation von Deformationen, Bewegungen etc., die in anderen Teilprojekten des SFB414 untersucht werden, dar. Zur Zeit werden diese Eingangsparameter geschätzt, da keine biologischen Tabellen vorliegen. Ziel dieser Untersuchung war es daher, diese Lücke zu schließen und einen haptischen Atlas zu erstellen. In 172 Zug- und Druckversuchen wurde an allen interessierenden Gewebetypen am Schwein die mechanischen Eigenschaften bestimmt. Hierzu kam eine Materialprüfmaschine (Z2.5, Zwick) zum Einsatz. Spannung, Dehnung, und E-Moduln wurden bestimmt. Für alle interessierenden Gewebe konnten die mechanischen Eigenschaften ermittelt werden. Basisdaten für haptische Modellierung und Simulation wurden im Tierexperiment erhoben. Diese Daten werden den anderen Projekten zur Verfügung gestellt.

3 Q3 Interaktive Volumenvisualisierung und Integration von Softwaremodulen

Die Arbeiten zur interaktiven Visualisierung und Segmentierung von Volumendaten wurden fortgeführt. Das zur Beschleunigung der Volumenvisualisierung erarbeitete Konzept des Koordinatenpuffers wird genutzt, um durch beliebige Schnittebenen definierte Subvolumen auszublenden und die Quantifizierung von Strukturen zu erleichtern. Ferner wurde eine Komponente für die farbgetreue Visualisierung von Doppler-Ultraschalldaten entwickelt. Die Methoden zur interaktiven Segmentierung wurden im Hinblick auf die problemorientierten Ansätze der H- und K-Projekte ergänzt. Dabei wird die Kollisionsdetektion und eine kraftreflektierte Eingabe berücksichtigt. Die Softwareschnittstelle erhält durch die Implementierung als Framework eine dynamische Konfigurierbarkeit, um die Applikationen an die Anforderungen in der Herzchirurgie und kranio-fazialen Chirurgie gezielt anzupassen.

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 Systemen 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.

Der zweite Teil des Projekts (Q3A) 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.

4 Q5 Modellierung von Gewebestrukturen zur Darstellung operativer Veränderungen

In diesem Teilprojekt werden Gewebestrukturen auf der Basis segmentierter und fusionierter Radiologiedaten modelliert, um anschließend medizinisch relevante Strukturen und Eingriffe in einer risikominimierenden grafischen Simulation darstellen zu können. Ziel ist die exakte Nachbildung häufig auszuführender chirurgischer Eingriffe. Die Methoden sollen an den Beispielen der Kopf- und Herzchirurgie erprobt und evaluiert sowie anschließend in das in Teilprojekt K1 entwickelte Operationsplanungssystem integriert werden.

Hierzu wird ein Simulationssystem für Weichteilgewebe erstellt, welches an Hand einer Distraction evaluiert werden soll. Eine Distraction des Unterkiefers wird durchgeführt, wenn der Unterkiefer unsymmetrisch geformt ist oder sonstige Anomalien aufweist. Um einen Distraktor geeignet auswählen zu können, muss somit zunächst die vorhandene Anomalie festgestellt werden. Dies geschieht mit Hilfe eines Systems zur Symmetriebetrachtung, bei dem über die Detektion eines Defizits ein Implantat vorberechnet werden kann.

Parallel hierzu wird ein Modell des Weichgewebes des menschlichen Gesichts entwickelt, welches als mehrschichtiges Modell ausgeführt wird. Die Finite-Elemente-Methode wird gewählt, um ein hochgenaues Referenzmodell zu erzeugen, welches in komplexen Fällen und zur Evaluation schnellerer Modelle eingesetzt werden soll. Zur Implementierung des schnelleren Modells wird ein Feder-Masse-Ansatz gewählt, welcher ebenfalls mehrschichtig ausgeführt wird. Mit Hilfe dieser Modelle soll ein universelles System zur Simulation von Weichteilgewebe erstellt werden. Dieses Modells soll im Gegensatz zu existierenden Modellen mehrschichtig ausgelegt und patientenindividuell sein.

Um die Risiken, welche jeder operative Eingriff mit sich bringt, für die Patienten so gering wie möglich zu halten, werden diese analysiert, am Computer modelliert und können so dem medizinischen Anwender grafisch und haptisch vermittelt werden. Unter Benutzung dieses Risikomodells ist es möglich, im Rahmen der rechnerbasierten Simulation die für einen chirurgischen Handgriff zu erwartenden Risiken automatisch modellbasiert am Rechner zu minimieren.

Die Ergebnisse der bisher genannten Modellierungs- und Simulationsschritte werden dem Chirurgen direkt im Operationsfeld zur Verfügung gestellt, um eine optimale Übertragung der präoperativ erzielten Ergebnisse auf die intraoperative Umsetzung zu erhalten. Ein brillenbasiertes System der Erweiterten Realität wird verwendet, um die präoperativ berechneten Daten zu visualisieren und mit dem Patienten zu überlagern.

5 Q6 Datensicherheit und Systemsicherheit für medizinische Informationsverarbeitung

Für die Verwaltung und Bereitstellung patienten- und aufgabenbezogener Daten ist ein Sicherheitsmodell zu entwerfen und zu realisieren, das Mechanismen für den datenschutzgerechten Umgang mit diesen Daten bereitstellt und deren zwingende Integration in die täglichen Organisationsabläufe umfasst. Dabei ist zu beachten, dass Zugangsberechtigungen nicht nur personenspezifisch sondern auch rollen- und fallbezogen zu vergeben sind, und zudem alle Vorgänge vollständig und nachvollziehbar (insb. authentifiziert) dokumentiert werden müssen. Die sich im medizinischen Ablauf verändernden Zuständigkeiten erfordern die Modellierung geeigneter Zugriffsmechanismen (z.B. shared control), die auf einer dynamischen Rechtevergabe aufbauend die Übertragung von Verantwortung (z.B. bzgl. Vertraulichkeit von Daten) abbildet und umfassenden Schutz (safety) der Daten und Kontrolle der Abläufe im Falle von Missbrauch bietet.

Anhand einer systematischen Analyse der spezifischen Sicherheitsanforderungen und Bedrohungen, die sich innerhalb des Klinik- und des Forschungsbetriebs beim Umgang mit patientenbezogenen Informationen ergeben, konnten die wesentlichen Merkmale, die ein umfassend sicheres medizinisches Informationssystem aufweisen muss, erfasst und dokumentiert werden. Insbesondere wurde die Notwendigkeit von rollen- bzw. funktionspezifischen Zugriffsrechten, die bedingte bzw. zweckorientierte Rückverfolgbarkeit von Informationsquellen sowie die Gewährleistung der Sicherheit von Sekundärinformationen herausgearbeitet, in Einzelanforderungen aufgeschlüsselt

und praktische Lösungsansätze dafür entwickelt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten flossen direkt in die nachfolgenden Entwicklungen ein und finden sich in den sicherheitsrelevanten, datenschutzrechtlichen aber auch bedienungstechnischen Merkmalen der Systeme wieder. Es wurden neue Grundmechanismen zum Aufbau eines sicheren klinischen Informationssystems in einem Prototyp realisiert. Das System zeichnet sich insbesondere durch eine gesicherte Datenhaltung in Verbindung mit einer flexiblen und dynamischen Abbildung der stark wechselnden heterogenen Organisationsstrukturen im Klinikbetrieb aus. Hierzu gehört ein umfassender Schutz vor unbefugten Zugriffen auf Datenmaterial durch indirekt gesicherte Speicherung, der bis hin zu Bereichen wie Administration von Datenbanken oder Fernwartungszugriffe durch Fremdfirmen wirksam ist.

Die Flexibilität der entwickelten Protokolle stellt die Grundvoraussetzung für zukünftige Protokolle zur langfristigen Speicherung von Daten dar. Weiterhin spiegelt die rollenbasierte Benutzermodellierung die komplexen Organisationsstrukturen und Zuständigkeiten in der Klinik wider, die sich mit bisherigen Systemen nur bedingt durch personen- oder gruppenbasierte Benutzermodellierung abbilden lassen. Insbesondere werden die Funktionen und Verantwortlichkeiten des Personals berücksichtigt. Zur Spezifikation von Zugriffsregeln wurde eine formale Beschreibung entwickelt. Sie kann mit Hilfe eines Werkzeuges graphisch dargestellt und bearbeitet werden. Die Gewährung von Zugriffsrechten erfolgt durch dynamische Auswertung dieser Zugriffsregeln. Sie erfolgt situationsabhängig zum Zeitpunkt der Anfragestellung. Über zusätzliche Methoden können Änderungen an Datensätzen protokolliert, nachvollzogen und nachgewiesen werden. Für eine Unterstützung zukünftiger Protokolle mit indirekten Signaturen können die bereitgestellten Mechanismen zu Pseudonymisierung eingesetzt werden.