

Ein 3D-Ultraschallnavigationssystem für die computer-assistierte Chirurgie im Kopf-Halsbereich – Visionen und Konzepte

T. Brennecke¹, J. Burgner¹, L.A. Kahrs², C. Günther³, T. Beyl¹, J. Raczkowsky¹, S. Tretbar³, T. Klenzner², J. Schipper², H. Wörn¹

¹ Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik, Karlsruhe, Germany

² Universitätsklinikum Düsseldorf, Hals-, Nasen- und Ohrenklinik, Düsseldorf, Germany

³ Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik, St. Ingbert, Germany

Kontakt: thorsten.brennecke@kit.edu

Abstract:

Zielsicher zwischen den Strukturen der Halsanatomie hindurch zu operieren wäre die Übertragung des Konzepts der minimal-traumatischen Chirurgie auf die betreffende Region. Methoden der medizinischen Navigation ermöglichen zielgerichtetere Operationsverfahren, wobei momentan die Weichgewebeverschieblichkeit unberücksichtigt bleibt. Durch die Entwicklung eines navigierten Ultraschallsystems, welches Modellwissen für Deformationen verwendet, soll die präoperative Datenlage bei diesen Operationen verbessert werden. Ziel ist ein Ultraschallsystem, das intraoperativ Strukturen mit Hilfe von Modellwissen automatisch erkennt und dreidimensional visualisiert. Diese Arbeit beschreibt einen Systementwurf, der diesen Anforderungen gerecht wird und aus einer Ultraschallforschungsplattform, einer OpenSource Software für die navigierte Chirurgie, einem Lokalisationssystem sowie einem Modell für die Berechnung der Weichgewebeverschieblichkeit besteht.

Schlüsselworte: Freihand-3D-Ultraschall, computer-assistierte Halschirurgie, Navigation

1 Problem

Ein Hauptproblem für die Onlineplanbarkeit chirurgischer Eingriffe stellt die mit der Operation einhergehende Morphologieänderung des Situs dar. Eingriffe im Hals erfolgen dabei zumeist explorativ und relativ großflächig bezüglich der Schnittführung bzw. eines möglichen Traumas. Zielsicher zwischen den Strukturen der Halsanatomie hindurch zu operieren ohne diese vorher freizulegen, zählt bisher nicht zur etablierten klinischen Vorgehensweise. Methoden der medizinischen Navigation ermöglichen prinzipiell zielgerichtetere Operationsverfahren, wobei standardmäßig allerdings die Weichgewebeverschieblichkeit unberücksichtigt bleibt. Diese Herausforderung kann deshalb nur durch den Einsatz einer permanenten Messmodalität behoben werden. Durch Auswertung sonographischer Daten können die Ergebnisse beispielsweise in der Kopf-Halschirurgie durch die Aktualisierung der präoperativen Datenlage verbessert werden [1,2,3].

Sonographische Daten gelten als kaum exakt quantifizierbar und nur aufwendig segmentierbar. Die Interpretation der Ultraschallbilder ist von der Erfahrung und dem Talent des Arztes abhängig, der die zweidimensionalen (2D) Schnittbilder im Kopf zu Schichtbildern aus anderen Modalitäten bzw. der untersuchten anatomischen Strukturen in Bezug setzen muss. Diese gedankliche räumliche Zuordnung und Interpretation wird zusätzlich erschwert, wenn die geschaltete Region durch Bewegung in ihrer Morphologie verändert wird.

Kommerzielle Ultraschallsysteme sind zwar zum Teil mit Erweiterungen für dreidimensionalen Ultraschall (3D-US) erhältlich, jedoch beschränken sich diese Systeme auf die Visualisierung der (zum Teil bereits navigiert gewonnenen) Bilddaten. Neueste Systeme bieten zudem die Überlagerung von intraoperativ gewonnenen US-Daten mit den präoperativ erhobenen radiologischen Schnittbildern aus Computertomographie bzw. Magnetresonanztomographie. Neben dem äußerst limitierten Zugriff auf die US Rohdaten, bieten solche Systeme noch nicht die Möglichkeiten größere Morphologieänderungen, wie sie beispielsweise durch die Lagerung oder während des Operationsverlaufs entstehen, auszugleichen.

In der Forschung wird sich seit vielen Jahren der Erhebung von Freihand-3D-Ultraschalldaten beschäftigt, wobei zahlreiche medizinische Anwendungsbereiche im Fokus stehen [4]. Beim Freihand-3D-Ultraschall werden konventionelle 2D-Schallwandler mit Hilfe eines Trackingsystems in ihrer Lage während der Bildakquisition erfasst und so die räumliche Zuordnung der 2D-Bilddaten ermöglicht. Die Kalibrierung des Systems ist dabei essentiell [5,6]. Die räumlich angeordneten 2D-Ultraschallbilder können danach durch geeignete Bildverarbeitungs- und Visualisierungstechniken für

den Arzt in einem 3D-Volumen dargestellt werden. Auch hierfür bietet der Stand der Forschung zahlreiche Methoden [7].

Allerdings erfüllen die bisher vorhandenen Ansätze die oben genannten Anforderungen (Morphologieänderung, Weichgewebeverschieblichkeit) nur unvollständig und erfordern die Adaption vorhandener und die Entwicklung neuer Methoden. Im Folgenden wird unser Konzept und Systementwurf für die sonographisch-unterstützte computer-assistierte Chirurgie im Halsbereich vorgestellt.

2 Methoden

2.1 Hardware

Für das Projekt wird die Ultraschallforschungsplattform DiPhAS des Fraunhofer Instituts für Biomedizinische Technik (IBMT) eingesetzt. Das DiPhAS (Digitales Phased Array System) bietet im Gegensatz zu kommerziellen Systemen die Möglichkeit sendeseitig das Beamforming (Schallstahlformung) direkt zu beeinflussen und empfangsseitig können sowohl Single-Channel-Data (RAW-Daten jedes einzelnen Kanales/Elementes), Hochfrequenzdaten (HF-Daten nach Aufsummierung der Signale einer Untergruppe), als auch B-Mode-Daten zur Weiterbearbeitung zur Verfügung gestellt werden. Damit ist es möglich applikationsspezifische Sendeparameter und Filter zu entwickeln, und diese für den Anwender in das Frontend zu integrieren und online zu nutzen [8].

Als Schallwandler wird ein linearer 7,5 MHz Vermon-Kopf (L7) mit 128 Elementen eingesetzt, der für Halsuntersuchungen geeignet ist. Der Schallwandler wird mit einem NDI Polaris Trackingsystem lokalisiert. Für die Bildverarbeitung, Berechnung der Volumina und Darstellung des Halsmodells werden Standard-PCs genutzt.

2.2 Software

Das DiPhAS System verfügt über eine umfangreiche Programmierschnittstelle (DiPhAS-SDK). Im DiPhAS-SDK für .NET Entwicklungsumgebungen werden verschiedene Bibliotheken zur freien Ansteuerung der Ultraschallhardware und Schnittstellen zur Handhabung der Ultraschalldatensätze zur Verfügung gestellt. Die offene Definition der Schnittstellen zu den Geräten und ungefilterten hochfrequenten Ultraschalldaten ermöglicht die einfache Implementierung individueller HF-Daten- und Bildverarbeitungsstrategien in Form von eigenen applikationsspezifischen Filtern, die direkt im Betrieb der Hardware genutzt werden können. Die so erzielten Ergebnisse können online angezeigt und mit den Originaldaten verglichen werden, und eventuelle sinnvolle Optimierung der Scanstrategie können direkt auf die Hardwareeinstellungen zurückgeführt werden und über Closed-Loop-Filter Parameter das Beamforming entsprechend online anpassen. Desweiteren verfügt das DiPhAS über Schnittstellen zur Ansteuerung verschiedener Tracking-Hardware. Die .NET Klassenbibliotheken lassen sich auch in Softwaretools wie z.B. LabView und Matlab integrieren.

Als übergreifende Softwareplattform findet das Opensource Framework 3D Slicer Verwendung, das eine umfangreiche Unterstützung für computer-assistierte Chirurgie bietet. Zu dessen Komponenten zählen unter anderem ITK, IGSTK und OpenIGTLink. OpenIGTLink ist ein einfach und robust gehaltenes Netzwerkprotokoll, das speziell für die Anforderungen der computer-assistierte Chirurgie entwickelt wurde. 3D Slicer wurde ausgewählt, da es sich um eine etablierte und in der Forschung weit verbreitete Softwareplattform handelt, für die sich eine große internationale Gemeinschaft engagiert.

Aus den Komponenten wurde zunächst ein Freihand-3D-Ultraschall-System zusammengesetzt. Der direkte Zugriff auf HF-Daten durch das DiPhAS-SDK kann bei der Volumenrekonstruktion qualitative Vorteile bringen.

2.3 Bestimmung der Anforderungen

Die wichtigste Anforderung des 3D-Ultraschallnavigationssystems ist die Einfachheit. Das meint die Einfachheit in der Bedienung wie auch die Klarheit in der Darstellung. Endoskopische Chirurgie am Hals sollte zukünftig möglichst der minimal-traumatischen Strategie folgen und zielgerichtet sein. Um beispielsweise auf dem Weg zum Tumor keine vitalen Strukturen zu verletzen oder gar zu zerstören, ist es wichtig auf Grundlage der aktuellsten Daten zu navigieren. Die Daten aus der präoperativen Bildgebung entsprechen auf Grund der Weichgewebeverschiebung nicht mehr der aktuellen realen Lage. Durch den intraoperativen Ultraschall werden aktuelle Daten gesammelt, die das System zur automatischen Aktualisierung der präoperativ erhobenen Informationen verwendet.

Zusätzlich zur Erfassung der aktuellsten Sonographiedaten besteht eine Möglichkeit die präoperativen Bilddaten über Modellwissen an die aktuelle Kopf-Halssituation anzupassen. Um diese Morphologieänderung durch Kopfbewegungen simulieren zu können, müssen realitätsnahe Eigenschaften (bspw. Rotation, Streckung) abgebildet werden. Diese Zu-

sammenhänge werden derzeit in Probandenversuchen analysiert und aus diesen Erkenntnissen ein Modell der Gewebeverschieblichkeit entwickelt [9]. Änderungen der Morphologie durch chirurgische Ablation werden zunächst nicht berücksichtigt.

3 Ergebnisse

Einen entsprechenden Systementwurf zeigt Abbildung 1. Die zentrale Komponente ist 3D Slicer, an den via OpenIGTLink das DiPhAS-System sowie das Trackingsystem angeschlossen ist. Die Daten des Ultraschalls werden von 3D Slicer mit den Positionsdaten assoziiert. Die Daten der präoperativen Bildgebung fließt mit dem Halsmodell der Weichgewebeverschiebung ebenfalls ein. Aus diesen Informationen werden die relevanten Strukturen segmentiert und farbig markiert.

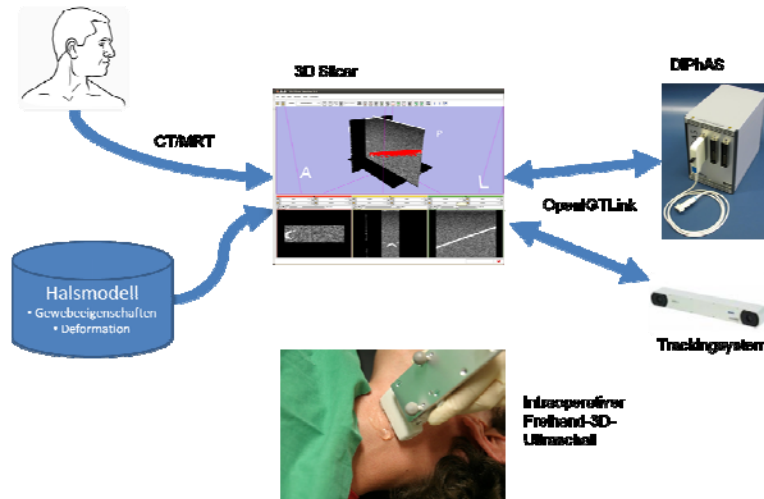


Abb. 1: Systementwurf des 3D-Ultraschallnavigationssystems für die computer-assistierte Chirurgie im Kopf-Halsbereich.

Für den Einsatz wird folgender Ablauf vorgesehen: Als Datengrundlage wird präoperativ ein patientenindividueller Volumendatensatz aus radiologischer Bildgebung (CT/MRT) erzeugt. Aus diesem wird das Halsmodell generiert, indem die Bilder segmentiert, relevante Strukturen markiert. Dabei wird Modellwissen bzgl. der Weichgewebeverschiebung genutzt, um die Strukturen zu identifizieren. Während der Operation schallt der Arzt die Region mit dem Freihand-3D-US-System, wobei parallel die Bilder/HF-Daten für die weitere Verarbeitung gespeichert werden und ein 3D-Volumen erzeugt wird. Aus den Daten werden wiederum die relevanten Strukturen segmentiert und markiert. Diese Informationen werden mit dem präoperativen Daten registriert und abgeglichen; so kann die Verschiebung und Deformation der Weichteile detektiert und ausgeglichen werden (Abb. 2). Weiterhin können die qualitativ besseren präoperativen Bild-daten aktualisiert intraoperativ genutzt werden.

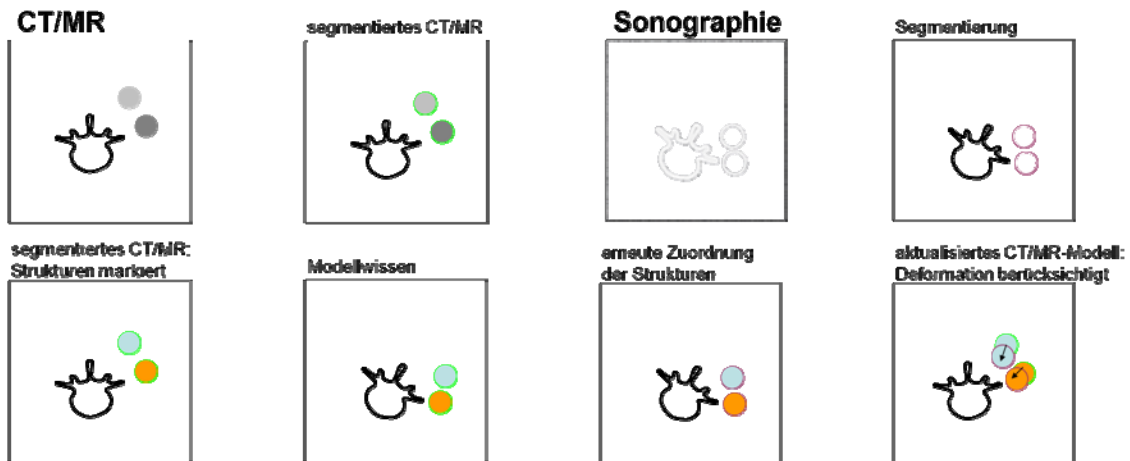


Abb. 2: Konzept der Verarbeitungsschritte des vorgestellten Systems

Wenn Strukturen erkannt werden, werden diese in der 2D und 3D Visualisierung farbig markiert und ggf. benannt. Zusätzlich kann im 3D-Bild die Strukturen mit der relativen Lage des Ultraschallwandlers und des US-Bildes visualisiert werden. Dadurch können relevante Strukturen, die aus der präoperativen Bildgebung bekannt sind, wie etwa Arteria carotis communis oder V.jugulares, auch für das nicht geschulte Auge leicht erkannt werden. Im weiteren Verlauf kann dieses aktualisierte Modell für intraoperative Navigation verwendet werden.

4 Diskussion

Der vorgestellte Ansatz geht über den Stand der Forschung hinaus, da hier die modellbasierte Segmentierung mit einem Halsmodell erfolgt, welches die Weichgewebeverschiebung und -deformation berücksichtigt. Dadurch wird die Morphologieänderung des Situs im Halsbereich beherrschbarer. Die präoperativ gewonnenen qualitativ hochwertigeren Bilddaten können intraoperativ aktualisiert für die Navigation zur Verfügung gestellt werden. Durch die visuelle Hervorhebung der relevanten Strukturen, wird die Sonographie intuitiver, was den Arzt – insbesondere den ungeübten Arzt – unterstützen kann. Die nötige zeitnahe Segmentierung ist hierbei einer der größten Herausforderungen.

Die nächsten Schritte sind die Modellierung des Halsbereichs aus akquirierten Daten für den Einsatz in der modellbasierten Segmentierung bzw. Deformationsberechnung. Die Evaluierung kann sowohl an einem noch zu entwickelndem elastischen Halsphantom als auch mit Probanden unter Laborbedingungen erfolgen. Iterativ werden dabei die Algorithmen und Modelle angepasst, um die Genauigkeit des Gesamtsystems zu optimieren. Die Verwendung von navigierten US-Systemen wird somit quantifizierbarer.

Die Vision ist ein Ultraschallsystem, das intraoperativ Strukturen mit Hilfe von Modellwissen erkennt und visualisiert. Dabei werden in der Visualisierung die bekannten Strukturen dreidimensional dargestellt und auf Grundlage der aktuellen Ultraschalldaten so modifiziert, dass die dem aktuellen Strukturverlauf entsprechen. Ein generisches Halsmodell kann ermöglichen, dass das System ohne die Verwendung von präoperativen Daten einsetzbar ist.

5 Danksagung

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft fördert dieses Vorhaben im Normalverfahren unter dem Titel „SACAS (Sonography Aided Computer Assisted Surgery)“ unter dem Geschäftszeichen WO 720/33-1.

6 Referenzen

- [1] P.U. Lohnstein, J. Schipper, A. Berlis, W. Maier, Sonographisch unterstützte computerassistierte Chirurgie (SACAS) in der Orbitalchirurgie, HNO, 55:777-784, 2006
- [2] H.J. Welkoborsky, Ultrasound usage in the head and neck surgeon's office, Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery, 17:116–121, 2009
- [3] M. Helbig, K. Kryzstoforski, T. Kroll, J. Kucharski, M. Popek, S. Helbig, W. Gstoettner, A. May, J. Kozak, Navigation-supported and sonographically-controlled fine-needle puncture in soft tissues of the neck, Ultrasound Med Biol. 35(3):436-42, 2009
- [4] R.W. Prager, U.Z. Ijaz, A.H. Gee, G.M. Treece, Three-dimensional ultrasound imaging, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine, 224(2): 193-223, 2010.
- [5] J. Burgner, L.A. Kahrs, J. Raczowsky, H. Wörn: Evaluierung einer ultraschallbasierten Registrierung am Multimodal-Abdomen-Phantom, Proceedings der Gemeinsamen Jahrestagung der Deutschen, Österreichischen und Schweizerischen Gesellschaft für Biomedizinische Technik, V210:1-2, 2006.
- [6] L. Mercier, T. Langø, F. Lindseth, D.L. Collins, A review of calibration techniques for freehand 3-D ultrasound systems, Ultrasound in Med. & Biol., 31(4):449-471, 2005
- [7] O.V. Solberg, F. Lindseth, H. Torp, R.E. Blake T.A.N. Hernes, Freehand 3d ultrasound reconstruction algorithms – A review, Ultrasound in Med. & Biol., 33(7):991-1009, 2007
- [8] H.J. Hewener, H.-J. Welsch, C. Günther, H. Fonfara, S.H. Tretbar and R.M. Lemor, A highly customizable ultrasound research platform for clinical use with a software architecture for 2d-/3d-reconstruction and processing including closed-loop control, Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, München, 2009
- [9] L. Colter, L.A. Kahrs, J. Hirschfeld, J. Schipper, Funktionelles Modell der Rotations-abhängigen Strukturverschieblichkeiten im humanen Hals auf Basis von Magnetresonanztomographiebilddaten, eingereicht für curac2010@MEDICA