

Reproduzierbar rotationsfähiges Halsphantom zur Evaluation minimalinvasiver operativer Techniken mittels eines Ultraschall-gestützten Navigationssystems

Wissenschaftlicher Beitrag für die 11. CURAC Jahrestagung 2012

N. Jansen¹, J. Hirschfeld¹, T. Brennecke², L. Colter¹, J. Raczkowski², H. Wörn², J. Schipper¹

¹ Klinik für Hals-, Nasen-, Ohrenheilkunde, Kopf- und Halschirurgie, Universitätsklinikum Düsseldorf, Germany

² Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik, Karlsruher Institut für Technologie, Germany

Kontakt: nils.jansen@med.uni-duesseldorf.de

Abstract:

Die zukünftige minimal-invasive Hals-Chirurgie erfordert ein an den Operationssitus angepasstes Navigationssystem, um bei endoskopisch bedingt beschränkter Übersicht und der im Weichgewebe auftretenden Weichteilverschiebung eine sichere Orientierung für den Operateur zu gewährleisten. Dabei ist es unabdingbar, dass die Lagebeziehung wichtiger anatomische Landmarken im Verhältnis zum Instrumentarium jederzeit für den Operateur visuell dargestellt werden kann. Hierzu wird im Rahmen des DFG-Projekts SACAS ein ultraschall-gestütztes, auf Basis einer präoperativen Bildgebung individualisiertes, Navigationssystem entwickelt. Ein eigenes, bereits etabliertes flexibles Halsphantom wurde weiterentwickelt, um Reproduzierbarkeit sowie die Einstellung definierter Rotationen zu ermöglichen. Der Einfluss der Weichteilverschiebung auf die Lage anatomischer Strukturen wurde zunächst am Modell untersucht und anschließend im Computermodell berechnet. Grundlage dieser Untersuchungen sind MRT- und CT-Datensätze, die vom Halsmodell in verschiedenen Rotationspositionen angefertigt werden.

Schlüsselworte: reproduzierbares rotationsfähiges Halsphantom, intraoperative Ultraschall-unterstützte Weichteilnavigation, minimalinvasive Weichteilchirurgie Hals, Halsweichteilemodell, Freihand-3D-Ultraschall

1 Problem

Vor allem durch die kosmetisch exponierte Lage des Halses sind Patienten sehr daran interessiert, nur möglichst kleine Narben nach einer Operation im Kopf-Hals-Bereich zurückzubehalten. Die Etablierung minimalinvasiver Zugangswege am Hals kann zur Verbesserung des postoperativen kosmetischen Ergebnisses beitragen. Problematisch bei der dazu notwendigen minimal-invasiven Chirurgie ist die durch die intraoperative Lagerung des Halses bedingte Weichteilverschiebung im Vergleich zur präoperativ durchgeführten Bildgebung zur Operationsplanung. Der Operateur muss bei zukünftigen minimalinvasiven Eingriffen bei der intraoperativen Berücksichtigung der Weichteilverschiebung durch ein computer-assistierte Navigationssystem unterstützt werden. Das Navigationssystem beruht auf präoperativen Datensätzen und nutzt sonographisch erhobene Daten vor Beginn der Operation, um das Modell an die individuelle Weichteilverschiebung anzupassen.

Im Rahmen des DFG-Forschungsprojektes SACAS (Sonographic Aided Computer Assisted Surgery) wurde zur Berechnung der Weichteilverschiebung ein sonographiefähiges Halsphantom entwickelt [1, 2]. Der Anspruch an die Weiterentwicklung des fertiggestellten Halsphantoms war es nun, mit Hilfe einer Halterung verschiedene Rotationspositionen des Halses im Modell reproduzierbar nachbilden zu können. Diese Rotationspositionen entsprechen der intraoperativen Lagerung eines Patienten bei einer Hals-Operation und mussten zunächst durch CT- und MRT-Bildgebung des Halsmodells erfasst werden. Im Anschluss daran wurden die gesammelten Daten ausgewertet. Die erhobenen Daten dienen der Erstellung eines Datensatzes und Computermodells, das die durch die Rotation verursachte Weichteilverschiebung analysiert.

Hierbei liefert das Hals-Modell die Basis, geplante Operationswege am Modell trainieren zu können und das gefundene Computermodell sonographisch gesteuert evaluieren zu können.

2 Methoden

Grundlage der weiteren Forschung bildet das bereits etablierte Halsphantom aus Polyvinylalkohol (PVA), dessen Herstellung und Eigenschaften bereits unter anderem im Rahmen der CURAC 2011 vorgestellt wurden [1-5]. Als neue Gussform stellten wir durch einen Negativabdruck eines menschlichen Halses her, um reproduzierbar gleiche Phantome herstellen zu können. Die Boden- und Deckenplatte der externen Halterung wurde bereits bei der Herstellung in das Modell integriert.

Zusätzlich wurde eine externe Halterung entwickelt, die das flexible Halsphantom für die Durchführung der CT- und MRT-Untersuchungen in definierten Rotationspositionen fixieren konnte. Zu beachten war bei der Planung, dass die konzipierte Halterung auch in die für Hals-MRTs notwendige MRT-Spule passen musste, um artefaktfreie Datensätze zu generieren. Aus den so gewonnenen Daten wurde ein Computerdatensatz errechnet. Sonographisch wurde das Ausmaß der Weichteilverschiebung detektiert und die Bilder digital archiviert (siehe Abbildung 1).

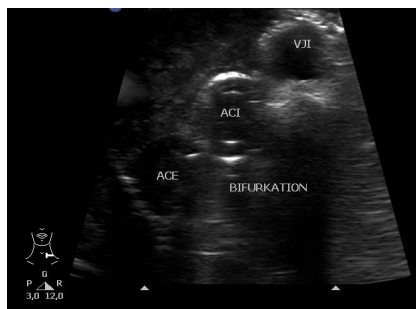


Abbildung 1:
Sonographische Darstellung der linken Carotisbifurkation und der linken Vena jugularis des Halsmodells

Als Landmarken der Detektion dienten hierbei die im Modell enthaltenen anatomischen Landmarken der großen Halsgefäße. Auf die Integration weiterer anatomischer Strukturen wurde zunächst verzichtet, da dies in den Vorversuchen vermehrt zu Artefakten geführt hatte. Um die Datensätze der verschiedenen Modalitäten der Bildgebung miteinander vergleichen und registrieren zu können, war außerdem die Definition von Fixpunkten am Modell notwendig. Hierzu statteten wir das Halsmodell, wie in Abbildung 2 sichtbar, mit CT- und MRT-fähigen Markern an vorher definierten Stellen aus.

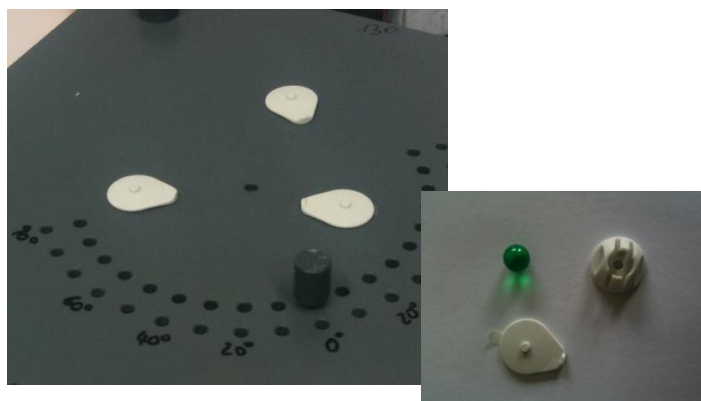


Abbildung 2:
Halterung des Halsphantoms mit angebrachten Markerplatten und Vorrichtung zur Einstellung der Rotationspositionen (links) und Darstellung der einzelnen Komponenten des Markers (rechts)

brainlab, rechts)

Die Marker wurden je nach Modalität (CT oder MRT) gewechselt. Im Anschluss an die Untersuchungen kann der Marker aus der Halterung entfernt werden und der Mittelpunkt der Halteplatte dient gleichzeitig bei Verwendung eines Pointers als Referenzpunkt.

Das neu erstellte Hals-Modell wurde so mit Hilfe der CT- und MRT-Bildgebung in verschiedenen Rotationspositionen (0°, 20° nach links und rechts, 40° nach links und rechts, 50° nach links) untersucht.

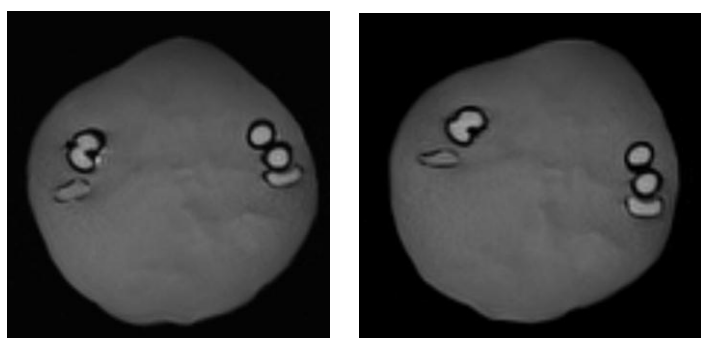


Abbildung 3:
MRT-Bildgebung des Halsmodells (T2-Wichtung) in Neutralposition (links) und bei 40° Rotation nach links (rechts)

Das Ausmaß der durch die Rotation verursachten Weichteilverschiebung wurde im Anschluss an die CT- und MRT-Untersuchungen genutzt, um das Navigationssystem zu evaluieren. Dazu wurden mit Hilfe eines Navigationssystems Volumen des Phantoms, z.B. das der Arteria carotis, registriert. In dem Navigationssystem sind derzeit folgende Komponenten integriert: Die Fraunhofer DiPhAS Ultraschallforschungsplattform [6], das optische Messsystem NDI Polaris, sowie die Bildverarbeitungssoftware PLUS [7], welche die Rekonstruktion der aufgezeichneten Volumen übernimmt.

Als erste Vergleichsstruktur wurde hierbei der Verlauf der Arteria carotis gewählt. Anschließend wurde das Ultraschallvolumen zu den MRT und CT Volumen registriert und die Abweichungen zueinander gemessen, um die Genauigkeit des Systems zu bestimmen. Als Schallgeschwindigkeit wurde auf Grund des verwendeten PVA 1540 m/s angenommen, was der durchschnittlichen Schallgeschwindigkeit für humanes Gewebe entspricht.

3 Ergebnisse

Durch die durch uns erstmalig etablierte Methode der Herstellung homogener multimodaler PVA-Gele für den Kopf-Hals-Bereich war es uns zu jedem Zeitpunkt der Weiterentwicklung des Halsmodells möglich, neue Phantome herzustellen. Dabei wurde jeweils das PVA-Gel mittels Ultraschall auf mögliche Luftpneumien, die die Qualität negativ beeinflussen können, untersucht. Es stellte sich jedoch heraus, dass es bei keinem der erstellten Modelle im Bereich des PVA-Gels relevante Luftpneumien gab.

Die zur Definition von Fixpunkten verwendeten Marker funktionierten im CT einwandfrei. Allerdings kamen die einzig verfügbaren Marker für MRT-Untersuchungen nur in der T1-Wichtung klar abgegrenzt zur Darstellung und nicht wie erhofft in der, für die Untersuchung des Halsmodells besser geeigneten, T2-Wichtung. Als Lösungsansatz führten wir sowohl eine MRT-Untersuchung des Modells in der T1- als auch in der T2-Wichtung durch und registrierten beide Datensätze im Anschluss.

In CT- und MRT-Untersuchungen war es möglich, konstante Rotationspositionen von 0° bis 50° zu erreichen. Die Veränderung der Rotationsposition war einfach möglich und in hoher Anzahl wiederholbar ohne dass erkennbare Änderungen der Materialeigenschaften eintraten. Des Weiteren erwies sich das Phantom während des kompletten Untersuchungsprozesses als haltbar bei Zimmertemperatur.

Bei der Aufzeichnung der Volumina mittels des Navigationssystems stellte die größte Herausforderung die Wahl der Ultraschallparameter (siehe Tabelle 1) dar. Die derzeit verwendeten Materialien besitzen gute bis hervorragende Ultraschalleigenschaften. Sowohl PVA, wie auch die Materialien der eingebrachten Strukturen, welche meist aus einem Silikongemisch bestehen, sind zum Phantombau geeignet.

Allerdings verbanden sich PVA und die Silikonmischungen nur schlecht und es bleibt meist ein Luftspalt zwischen PVA und Silikon. Bei CT- oder MRT-Untersuchungen waren diese Spalten vernachlässigbar; dies gilt aber nicht für die Ultraschallmodalität. Eine fehlende Schallbrücke verschlechterte die Bildqualität und führte zu Artefakten. Die in Tabelle 1 genannten Ultraschallparameter wurden so gewählt, dass die Artefakte minimiert wurden.

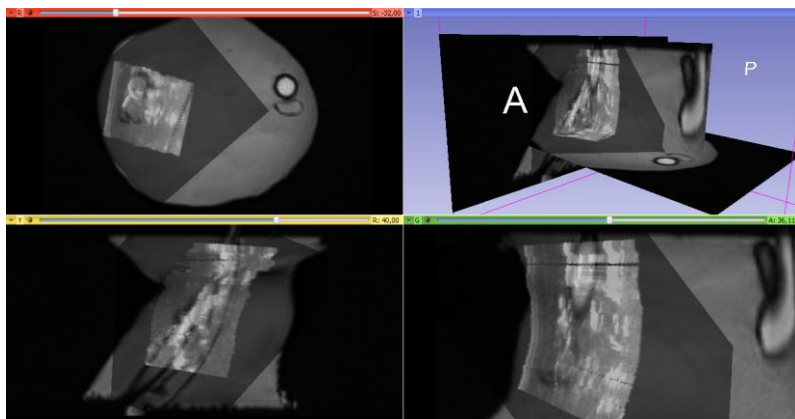


Abbildung 3:
MRT- und Ultraschallvolumina
registriert

Zur Bewertung wurden die Volumina registriert und verglichen. Abbildung 4 zeigt die registrierten Volumina. Zusätzlich wurde der Durchmesser der Phantomstruktur Arteria carotis an verschiedenen Stellen in beiden Modalitäten gemessen. Zwischen den Rotationen ergab sich kein signifikanter Unterschied, weshalb an dieser Stelle ausschließlich Daten aus der 0° Position beschrieben wurden. Die Vergleiche der über das MRT berechneten Volumina mit den Daten

des Navigationssystems ergaben eine absolute Abweichung von 2 mm; die relative Abweichung 0,19. Tendenziell scheinen die Durchmesser der Arteria carotis im Ultraschall unterschätzt zu werden. Tabelle 2 zeigt die Einzelergebnisse.

| | MRT | Ultraschall |
|--|---------|-------------|
| Durchmesser Arteria Carotis (Mittelwert) | 10,8 mm | 8,8 mm |
| Durchmesser Arteria Carotis (Standardabweichung) | 0,38 mm | 0,22 mm |

Tabelle 1: Die gemessenen Abweichungen zwischen den MRT Daten und dem mit dem Navigationssystem aufgezeichneten Volumen

4 Diskussion

Mittels des etablierten Halsmodells und der CT-/MRT-Datensätze konnte zusammen mit einem präoperativen Ultraschall ein Navigationssystem entwickelt werden, das intraoperativ eine Einschätzung der durch die operative Lagerung des Patienten bedingten Weichteilverschiebung ermöglicht. Hierzu erscheint uns eine Orientierung an charakteristischen anatomischen Strukturen des Halses, z.B. der Arteria carotis am plausibelsten.

Die im Vergleich der MRT- und Sonographiedaten erhobene Abweichung von 2 mm ist vor allem auf die Grenzen des Ultraschalls zurückzuführen. Die Luftschlüsse haben zu Artefakten geführt, die eine genauere Registrierung behinderten. Momentan werden die Volumina manuell registriert, während in Zukunft Landmarken wie die Arteria carotis verwendet werden sollen. Außerdem zeigt sich bei der Untersuchung, dass mit zunehmender Rotation des Halsphantomes die Abweichung nicht zunimmt.

Allerdings kann die Genauigkeit noch weiter erhöht werden, in dem die sonographischen Bilder verbessert werden.

Da PVA und Silikon sich nur schlecht verbinden, bietet es sich an, auch die inneren Strukturen des Phantoms aus PVA zu fertigen und anschließend mit dem Phantom zu vergießen. Um die Form von Arterien und Muskeln zu ermöglichen, werden im nächsten Schritt Gussformen konstruiert und im Rapid-Prototyp-Verfahren realisiert. Alternativ bemühen wir uns um ein geeignetes Material, welches Silikon und PVA besser miteinander verbindet. Auf diese Weisen kann vermutlich die Problematik des Luftspalts verringert werden.

Um die für die Untersuchung dieser Aspekte notwendige Anzahl identischer Halsphantome herstellen zu können, wird es wichtig sein, dass die Gussformen wiederverwendet werden können und die Halterung ebenso bereits teilweise in das Modell integriert ist.

Für die Evaluation des Computermodells kann im nächsten Schritt ebenfalls das Halsmodell dienen. Im Weiteren ist es ebenso möglich, Pathologien in das Halsmodell zu integrieren um minimalinvasive Operations- und Navigationstechniken zunächst am Modell zu etablieren und zu trainieren.

Es wird aber auch weiterhin vom Operateur detailliertes anatomisches Wissen um die Lagebeziehung weiterer, im Modell nicht abgebildeter Strukturen, erwartet.

5 Danksagung

Die oben beschriebene Thematik ist Teil des DFG-geförderten Projektes „SACAS (Sonographic Aided Computer Assisted Surgery) im Halsbereich“ (Geschäftszeichen SCHI 210/10-1). Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung.

6 Referenzen

- [1] Brennecke T et al., Ein 3D-Ultraschallnavigationssystem für die computer-assistierte Chirurgie im Kopf-Halsbereich – Visionen und Konzepte, Tagungsband der CURAC 2010
- [2] Hirschfeld J et al., Flexibles Halsphantom zur Evaluation eines Ultraschall-gestützten Navigationssystems, Tagungsband der CURAC 2011
- [3] Hyon SH et al., Polymer Bulletin 1989; 22: 119-122
- [4] Kharine A et al., Phys Med Biol 2003; 48: 357
- [5] Zell K et al., Phys Med Biol 2007; 52: 475-484
- [6] Hewener HJ et al., Proceedings of the World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering, München 2009
- [7] Lasso A et al., 4th Image Guided Therapy Workshop 2011; vol. 4: 103