

Marcus Vetter
Dr. sc. hum.

Konzeption eines bildgestützten Navigationssystems für die offene Leberchirurgie – Aufrechterhaltung des initial hergestellten Registrierungszustands der Leber mittels Navigationshilfen und Verformungsmodellierung

Geboren am 22.5.1973 in Pforzheim
Studiengang der Technischen Informatik Diplom (FH) vom SS 1995 bis SS 1999
Diplom am 19.10.1999 an der Fachhochschule Mannheim

Promotionsfach: Bioinformatik (DKFZ)
Doktorvater: Prof. Dr. sc. hum. H. P. Meinzer

In dieser Arbeit wurde ein neues Konzept entwickelt und evaluiert, das eine bildgestützte Navigation in der offenen onkologischen Leberchirurgie erstmalig ermöglichen soll. Derzeit ist die chirurgische Therapie, da potentiell kurativ, die angestrebte Therapie bei malignen Tumoren der Leber. Die Visualisierung des chirurgischen Instruments in den Bild-daten des Organs unterstützt den Chirurgen bei seiner Orientierung während der Operation. Durch ein bildgestütztes Navigationssystem sollen Komplikationen und Rezidive verringert und die Indikationen zur chirurgischen Therapie erweitert werden.

Derzeit existieren noch keine bildgestützten Navigationssysteme für die Leberchirurgie. Die Gründe hierfür sind die starken Deformationen der Leber wie sie bei der offenen chirurgischen Resektion oder der Teilung der Spenderleber für die Leber-Lebendspende auftreten sowie die resektionsbedingte Topologieveränderung des Organs. Das bislang unge-löste Problem der intraoperativen Organregistrierung, die die räumliche Korrespondenz zwischen den präoperativen Leberbilddaten und der intraoperativen Leber während der chirurgischen Resektion gewährleistet, will die vorliegende Arbeit lösen.

Bisherige Ansätze beruhen auf der Registrierung der Organoberfläche. Die Übertragung der Registrierungsergebnisse auf tiefer liegende Strukturen ist hinsichtlich ihrer Genauigkeit während einer Resektion nicht ausreichend.

Aufgrund der Verformung und Topologieveränderung der Leber während des chirurgischen Eingriffes ist ein schritthaltender Abgleich der Korrespondenzbeziehung erforderlich. Das hier vorgeschlagene Konzept trennt diesen schritthaltenden Registrierungsprozess in zwei, jeweils separat lösbare Teilaufgaben auf:

- in eine initiale bildbasierte Registrierung der Leber, die einmalig intraoperativ vor Beginn der Resektion durchgeführt wird. (Als initiale Registrierung lassen sich bereits existierende Registrierungsverfahren verwenden, die hier nicht näher behandelt werden.)
- in eine Aufrechterhaltung des initial hergestellten Registrierungszustands durch das Einbringen von Navigationshilfen in die Leber und Berechnung eines Deformationsmodells in Echtzeit.

Der neue Ansatz dieser Arbeit beruht auf der räumlichen Erfassung der Leber und ihrer Verformungen durch neu entwickelte Navigationshilfen. Navigationshilfen sind Messinstrumente, die von einem elektromagnetischen Trackingsystem räumlich lokalisiert werden. Diese werden in die Nähe der interessierenden intrahepatischen Strukturen wie Tumor, wichtige Gefäße oder der geplanten Resektionsebene eingebracht. Aus den Messdaten der Navigationshilfen berechnet das neu entwickelte Deformationsmodell die räumliche Position und Verformung der betreffenden Organregion in Echtzeit. Das Deformationsmodell basiert auf einer Sparse-Messdaten-Interpolation mit den Nebenbedin-

gungen der Inkompressibilität von Leberparenchym und der räumlichen Glattheit der Deformation.

Zur Evaluierung des Deformationsmodells wurde ein physikalisches Leber-Phantom aus Silikon gebaut, in das 1000 Marker eingebracht wurden. Mit vier Navigationshilfen ergibt sich eine Genauigkeit der Deformationsberechnung wie folgt:

- Bei einer Scherung des Phantoms von 21° : Mittlerer Fehler von: 2,1 mm ($\sigma = 1,7$ mm)
- Bei einer Torsion des Phantoms von 30° : Mittlerer Fehler von 1,2 mm ($\sigma = 0,5$ mm)
- Bei einer Kompression des Phantoms um 22%: Mittlerer Fehler von 1,3 mm ($\sigma = 0,7$ mm)

Auch resektionsbedingte Topologieveränderungen des Organs werden von dem hier entwickelten Deformationsmodell berücksichtigt und in Echtzeit berechnet.

Die schritthaltende Registrierung der intraoperativen Leber mit präoperativen Bilddaten ermöglicht die Übertragung von Ergebnissen einer computergestützten Operationsplanung auf den Situs. Dies ist die Voraussetzung für ein Navigationssystem, das auf dem Navigated-Control-Prinzip basiert und das chirurgische Instrument abschaltet, falls ein Sicherheitsabstand unterschritten oder die geplante Resektionsfläche verlassen wird, und somit die Grundlage für "smarte" chirurgische Instrumente legt.

Eine adäquate Präsentation der Navigationsergebnisse durch die Visualisierung der Instrumentenposition in räumlicher Beziehung zu den intrahepatischen Strukturen wie Gefäße, Gallengänge, Tumoren bzw. zu den Sicherheitsabständen und den geplanten Resektionsflächen ist hinsichtlich der Genauigkeit von hoher Relevanz. Untersucht wurde daher die Eignung eines autostereoskopischen Displays zur Visualisierung eines 3D-Modells der Patientenleber. Die Visualisierungskomponente der in dieser Arbeit entwickelten Software ARION (Augmented-Reality for Intra-Operative Navigation), die eine multiplane Rekonstruktion und eine stereoskopische 3D-Visualisierung bzw. eine quasi-holographische Visualisierung umfasst, wurde bereits bei zwei Hemihepatektomien intraoperativ eingesetzt. In einer Studie mit 45 Probanden wurde eine mögliche Verbesserung der Navigation durch die stereoskopische oder quasi-holographische Visualisierung untersucht.

Abschließend lässt sich feststellen, dass mit dem neu vorgestellten Konzept der Navigationshilfen und Echtzeit-Deformationsberechnung eine sehr hohe Genauigkeit bei der Beschreibung einer Weichteil-Deformation wie es das Leberparenchym darstellt, erreicht wird. Der Fehler liegt in der Größenordnung der physikalisch-technischen Messgrenze heutiger elektromagnetischer Trackingsysteme. Dieses Konzept scheint sich über die Anwendung in der Leberchirurgie hinaus auch allgemein für die Navigation von Weichteilen zu eignen.