Intraoperative Navigation in der Leberchirurgie mittels Navigationshilfen und Verformungsmodellierung

Marcus Vetter, Peter Hassenpflug, Ivo Wolf, Matthias Thorn, Carlos Cárdenas, Lars Grenacher[1], Götz Martin Richter[1], Wolfram Lamadé[2], Markus W. Büchler[2], Hans-Peter Meinzer

Abt. Med. und Biol. Informatik, Deutsches Krebsforschungszentrum
Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg
[1]Radiologische und [2]Chirurgische Klinik der Universität Heidelberg
Im Neuenheimer Feld 110, 69120 Heidelberg
Email: M.Vetter@DKFZ.de

Zusammenfassung. In diesem Beitrag stellen wir eine neue Methode zur bildgestützten Navigation in der onkologischen Leberchirurgie vor. Sie erlaubt die Aufrechterhaltung der Registrierung auch tiefgelegener Organstrukturen während der Resektion. Dazu werden durch ein magnetisches Tracking-System erfassbare Navigationshilfen in der Leber verankert. Mit den aus den Navigationshilfen gewonnenen Positions- und Orientierungsdaten wird ein lineares Deformationsmodell parametrisiert. Dieser Ansatz ermöglicht erstmals die schritthaltende Verfolgung von Zielstrukturen auch in der Tiefe der intraoperativ verformten Leber.

1 Einleitung

Jährlich erkranken allein in Deutschland etwa 5200 Patienten neu an primärem Leberkrebs [1,2]. Die weitaus häufigeren sekundären Lebertumore entstehen meist durch Absiedlungen von Tumorzellen des kolorektalen Karzinoms. Die Leberchirurgie ist derzeit die einzige potenziell kurative Therapie bei Leberkrebs. Chemo- und Strahlentherapie haben nur adjuvante und palliative Bedeutung. Die Fünfjahresüberlebensrate ohne Therapie liegt unter 2 %. Eine Tumorentfernung (Resektion) erhöht die Fünfjahresüberlebensrate auf 20 % bis 40 % [3]. Es können derzeit jedoch nur ca. 30 % der Patienten der chirurgischen Therapie zugeführt werden.

In den letzten Jahren gab es verschiedene Arbeiten, um die onkologische Leberchirurgie durch eine patientenindividuelle Operationsplanung zu unterstützen [4–6]. Bei der intraoperativen Orientierung und der Übertragung der Ergebnisse der Operationsplanung auf den Situs erhält der Chirurg bislang keine Unterstützung. Besonders bei komplizierter Lokalisation von Läsionen nahe vitaler Strukturen wie zentraler Gefäße ist eine intraoperative Unterstützung zur Orientierung wünschenswert [7]. Die Verringerung von Komplikationen und Rezidiven ist Ziel einer genaueren intraoperativen Orientierung und Resektion.

Eine Navigationsunterstützung durch ein System zur bildgestützten Chirurgie ist für Leberoperationen derzeit nicht verfügbar. Die Verformung des Gewebes während des Eingriffs und der damit verbundene hohe Rechenaufwand für die elastische Registrierung der prä- und intraoperativen Bilddaten sind die Gründe hierfür. Bisher

existieren keine Verfahren, die eine schritthaltende Registrierung bei deformierenden Weichteilen ermöglichen.

Zwei weitere Gruppen arbeiten an Systemen zur bildgestützten Navigation in der Leberchirurgie [8,9]. Die dort verfolgten Ansätze basieren ausschließlich auf der Registrierung und Deformationserfassung der Leber anhand von Messpunkten auf der Organoberfläche. Die Registrierung von tiefgelegenen Strukturen gelingt mit dieser Vorgehensweise nicht und stellt ein bisher ungelöstes Problem dar.

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, das die Aufrechterhaltung des registrierten Zustands während der Resektion zum Zweck der Navigation auch an tiefgelegenen Strukturen ermöglicht.

2 Methode

Das von uns verfolgte Gesamtszenario ist in [10] dargestellt. Die Ultraschall-basierte intraoperative Bilddatenakquisition und Registrierung mit den präoperativen CT-Daten ist die Voraussetzung für die hier vorgestellte Methode. Aus dem am eröffneten Situs akquirierten Doppler-Ultraschall-Datensatz werden die Gefäße extrahiert und mit denen aus den präoperativ aufgenommenen CT-Daten extrahierten registriert [11]. Während der Bilddatenakquisition und Registrierung wird die Leber durch anästhesistische und chirurgische Maßnahmen in ihrer Lage fixiert.

Im registrierten Zustand werden in die Nähe der interessierenden Zielstrukturen Navigationshilfen [12] in die Leber eingebracht und in dieser verankert. Über diese Navigationshilfen kann nach Aufhebung der Leberfixierung die Position und die Deformation der Zielstruktur während der Resektion erfasst werden.

Die Navigationshilfen sind nadelförmig aus Titan ausgeführt und weisen an ihrer Spitze einen Weichteilanker auf. Im Innern einer Navigationshilfe befindet sich eine Mikroempfangsspule für ein elektromagnetisches Tracking-System (AURORA, Northern Digital Inc., Waterloo, Ontario, Kanada), das die Position und Orientierung der Navigationshilfe in fünf Freiheitsgraden erfasst. Eine Navigationshilfe definiert entlang ihrer Achse ein lokal sehr genaues Zylinderkoordinatensystem, das mit zunehmendem Radius an Genauigkeit verliert.

Die Lage der Empfangsspule in Beziehung zur Spitze der Navigationshilfe ist einmalig durch eine Eichung zu ermitteln. Durch Rotation der Navigationshilfe um ihre Spitze lässt sich die relative Lage ihrer Spule präzise bestimmen. Hierzu wird eine Kugel (Mittelpunkt $\vec{x} = (x, y, z)$, Radius r) mittels einem nichtlinearen kleinste Quadrate Fit nach Gl. 1 an die gewonnenen Messpunkte angepasst.

$$(\vec{x}, r) = \arg\min_{\vec{x},r} \left\| F(\vec{x}, r) \right\|_2^2 = \arg\min_{\vec{x},r} \sum_i ((x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 - r^2)^2 \quad (1)$$

Das kontrollierte Einbringen der Navigationshilfen in die registrierte Zielstruktur gewährleistet, dass keine vitale Strukturen des Organs verletzt werden. Außerdem ist ihre exakte Positionierung gemäß der präoperativen Planung möglich.

Das Einbringen von zwei oder mehr Navigationshilfen in die Nähe einer interessierenden Zielstruktur ermöglicht neben der Lokalisation des Gewebes in

unmittelbarer Nähe der Navigationshilfen einen Rückschluss auf die Deformation des Gewebes zwischen den Navigationshilfen. Hierzu wird die Lage der Navigationshilfen zueinander als Parametrisierung für ein Verformungsmodell des umgebenden Gewebes verwendet. Aus den Verschiebungsvektoren zwischen Referenz- und aktueller Position der Navigationshilfen wird eine Schar von Verschiebungsvektoren bestimmt. Durch lineare Interpolation der Verschiebungsvektoren der einzelnen Navigationshilfen lässt sich ein Verschiebungsvektorfeld $\vec{v}(\vec{r})$ der aktuellen Deformation angeben. Die Plausibilität der aktuellen Deformation lässt sich aus der Divergenz $div(\vec{v}(\vec{r}))$ und Rotation $rot(\vec{v}(\vec{r}))$ des Verschiebungsvektorfeldes und dem Abstand zur nächstgelegenen Navigationshilfe abschätzen.

Zur Evaluierung dieses Verfahrens wurde ein Organmodell aus speziellem Silikon mit parenchym-ähnlichen Deformationseigenschaften erstellt, das nach einem menschlichen Leberplastinat von Prof. von Hagens gefertigt wurde. Weiterhin wurden erste Versuche an Schweinelebern ex vivo durchgeführt.

3 Ergebnisse

Der Einsatz von Navigationshilfen ermöglicht die schritthaltende Verfolgung von Zielstrukturen während einer onkologischen Resektion. Hierbei ist besonders hervorzuheben, dass tiefliegende Zielstrukturen in ihrer Lage verfolgt werden können. Bisherige Ansätze zur Verformungsmodellierung der Leber basieren auf der Verfolgung von natürlichen oder künstlichen Markern auf der Oberfläche des Organs. Oberflächennahe Läsionen können jedoch von Chirurgen durch Palpation lokalisiert werden. Ein Navigationssystem wird für derartige Befunde von vielen Chirurgen als unnötig angesehen. Auch ist die Gefahr von Verletzung vitaler Strukturen an der Leberoberfläche weitaus geringer. Der medizinische Nutzen der Navigation ergibt sich vor allem durch die Möglichkeit der Verfolgung tiefliegender vitaler Strukturen wie beispielsweise dem Lebervenenhauptstamm. Dies kann durch die hier vorgestellte Methode gewährleistet werden. Erste Untersuchungen an Schweineleberen ex vivo zeigen, dass eine lokal sehr genaue Verfolgung von Strukturen in der Tiefe des Organs während der Resektion möglich ist.

4 Diskussion und Resümee

Die Genauigkeit des gesamten Verfahrens ist abhängig von den Messbedingungen des elektromagnetischen Tracking-Systems, der Genauigkeit der intra- und präoperativen Bildakquisition, der Registrierung, der praktischen Umsetzung der Organfixation und der Genauigkeit des Deformationsmodells. Ein weiterer wichtiger Parameter für die Gesamtgenauigkeit ist die geeignete Präsentation der Navigationsergebnisse während der Resektion. Diese Einflüsse müssen in weiteren Arbeiten im Einzelnen untersucht und bewertet werden.

Die ersten Untersuchungen zeigen, dass über Navigationshilfen auch bei tiefgelegenen Zielstrukturen eine Aufrechterhaltung der Registrierung während der Resektion möglich ist.

5 Danksagung

Das Projekt ARION (Augmented Reality for Intraoperative Navivation) wird vom BMBF im Rahmen des Innovationswettbewerbs Medizintechnik unter dem Kennzeichen 01EZ0008 gefördert. Für die Leihgabe von Tracking-Systemen und die Möglichkeit zur Teilnahme am AURORA-Beta-Testprogramm danken wir der Firma Northern Digital Inc. und insbesondere deren Mitarbeitern Dr. Christian Lappe, Turgut Acay und Manfred Schmid für die freundliche Unterstützung.

6 Literatur

1. Ferlay J, Parkin DM, Pisani P: GLOBOCAN 1 – Cancer Incidence and Mortality, WHO, Lyon: IARCPress, 1998.
2. Statistisches Bundesamt Wiesbaden (ed): Statistisches Jahrbuch 1999 für die Bundesrepublik Deutschland, Stuttgart: Metzler-Poeschel, September 1999.
3. Lehnert T, Otto G, Herfarth C; Therapeutic Modalities and Prognostic Factors for Primary and Secondary Liver Tumors. World J Surg 19:252–263, 1995.
4. Soler L, Delingette H, Malandain G, Montagnat J, Ayache N, Koehl C, Dourthe O, Malassagne B, Smith M, Mutter D, Marescaux J: Fully automatic anatomical, pathological, and functional segmentation from CT scans for hepatic surgery. Comput Aided Surg 6(3):131–42, 2001.
5. Högemann D, Stamm G, Shin H, Oldhafer KJ, Schlitt HJ, Selle D, Peitgen HO: Individual planning of liver surgery interventions with a virtual model of the liver and its associated structures. Radiologe 40(3):267–73, 2000.
6. Glombitza G, Lamade W, Demiris AM, Gopfert MR, Mayer A, Bahner ML, Meinzer HP, Richter G, Lehnert T, Herfarth C: Virtual planning of liver resections: image processing, visualization and volumetric evaluation. Int J Med Inf 53(2–3):225–37, 1999.
7. Vetter M, Hassenpflug P, Cárdenas C, Thorn M, Glombitza G, Meinzer HP: Navigation in der Leberchirurgie – Ergebnisse einer Anforderungsanalyse. Procs. BVM 01:49–53, 2001.
8. Masutani Y, Yamauchi Y, Suzuki M, Ohta Y, Dohi T, Tsuzuki M, Hashimoto D: Development of interactive vessel modelling system for hepatic vasculature from MR images. Med Biol Eng Comput 33(1):97–101, 1995.
9. Herline AJ, Stefansic JD, Debelak JP, Hartmann SL, Pinson CW, Galloway RL, Chapman WC: Image-guided surgery: preliminary feasibility studies of frameless stereotactic liver surgery. Arch Surg 134(6):644–9, 1999.
10. Vetter M, Hassenpflug P, Thorn M, Cárdenas C, Glombitza G, Lamadé W, Richter GM, Meinzer HP: Navigation in der Leberchirurgie – Anforderungen und Lösungsansatz. In: Wörn H, Mühling J, Vahl C, Meinzer HP (eds): Rechner- und sensorgestützte Chirurgie, Procs. LNI P-4:92–102, GI, Bonn, 2001.
11. Glombitza G, Vetter M, Hassenpflug P, Cárdenas C, Wolf I, Braun V, Gieß C, Evers H, Lamadé W, Meinzer HP: Verfahren und Vorrichtung zur Navigation bei medizinischen Eingriffen. Internationale Patentanmeldung PCT/DE010397223.101, München, 2001.
12. Vetter M, Hassenpflug P, Glombitza G, Wolf I, Meinzer HP: Verfahren, Vorrichtung und Navigationshilfe zur Navigation bei medizinischen Eingriffen. Internationale Patentanmeldung PCT/DE01/03971, München, 2001.