Navigation in der Leberchirurgie
Ergebnisse einer Anforderungsanalyse

Marcus Vetter, Peter Hassenpflug, Carlos Cárdenas, Matthias Thorn,
Gerald Glombitza, Hans-Peter Meinzer

Abteilung Medizinische und Biologische Informatik
Deutsches Krebsforschungszentrum
Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg
Email: {M.Vetter,P.Hassenpflug}@DFKZ.de

Zusammenfassung. Vorgestellt werden die klinischen und technischen Anforderungen für ein computergestütztes Navigationssystem in der Leberchirurgie. Diese wurden an mehreren chirurgischen Zentren erhoben. Offene und laparoskopische Operationstechniken stellen jeweils spezifische Anforderungen an ein solches System. Zur notwendigen Echtzeit-Bildakquisition kommen intraoperativer Ultraschall (IOUS) und offene Magnetresonanztomographie (OMRT) in Frage. Die Eignung von optischen und magnetischen Trackingsystemen zur Positionsbestimmung und von medizinischen Schneidegeräten zur Anbindung an ein Navigationssystem werden diskutiert. Die Ergebnisse der Anforderungsanalyse zeigen, dass ein Navigationssystem für die Leberchirurgie medizinisch sinnvoll ist und die Genauigkeit der technischen Realisierung untersucht werden muss.

1 Einleitung

Die computergestützte Navigation ist für starre anatomische Regionen, also für Knochen und knochennahe Gewebe, schon weit fortgeschritten [1] und im klinischen Routine-Einsatz [2]. Mit Hilfe von Navigationssystemen kann intraoperativ der Eingriff durch eine vorausgegangene Operationsplanung unterstützt werden, wodurch die Indikationsstellung erweitert wird und der Eingriff exakter durchgeführt werden kann. Auf diese Weise können die durch die präoperative Planung gewonnenen Informationen umgesetzt werden.

Im Bereich der Weichteiloperationen ist die Umsetzung der Operationsplanung [3,4] durch ein Navigationssystem momentan nicht möglich, da hier die Bewegung der weichen Organe zu einer starken Abweichung vom präoperativ aufgenommenen Datensatz führt und die präoperativen Planungsdaten nicht mehr mit dem aktuellen Situs übereinstimmen.

Seit vier Jahren wird am Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ) in Zusammenarbeit mit der Heidelberger Universitätsklinik ein System zur computergestützten Operationsplanung für die Leberchirurgie entwickelt [3]. Es wurden bereits intraoperativ Computerprojektionen der präoperativ berechneten Visualisierungen eingesetzt [5]. Die Übertragung auf die tatsächliche, momentane

Lage und Verformung der Leber bleibt bislang jedoch der Vorstellungskraft des Chirurgen überlassen.

Ein durch das BMBF gefördertes Projekt am DKFZ [6] untersucht die Grundlagen für ein computergestütztes Navigationssystem, mit dem eine intraoperative Umsetzung der Operationsplanungsdaten auch für Weichteiloperationen ermöglicht wird. Der vorliegende Beitrag stellt die Ergebnisse der Anforderungsanalyse dieses Projektes vor.

2 Methoden

Um die Projektrisiken im noch unerforschten Gebiet der computergestützten Navigation in der Viszeralchirurgie zu minimieren, wurde ein geeignetes Vorgehensmodell zusammengestellt [9], das zu Beginn iterative und später explorative Projektphasen vorsieht. Die Analyse der medizinischen und technischen Anforderungen war Gegenstand der ersten Projektphase. Mittels nach der Delphi-Methode durchgeführter Befragungen von Leberchirurgen in Heidelberg, München und Mainz sowie der Beobachtung und Video-Dokumentation mehrerer Leber-Operationen wurden multizentrisch die Gemeinsamkeiten und Besonderheiten des Operationsablaufs identifiziert und so invariante Systemanforderungen ermittelt. Die Eignung verschiedener Bildgebungs- und Trackingsysteme [5] für ein Navigationssystem in der Weichteilchirurgie wurden untersucht. Es wurden verschiedene Schneidewerkzeuge [8] verglichen, um ihre Eignung für eine Anbindung an das System zu prüfen.

3 Ergebnisse

Ein wesentliches Ergebnis der Analyse ist, dass die chirurgischen Erwartungen an ein Navigationssystem bei offener und laparoskopischer Operationstechnik höchst unterschiedlich sind. Daraus ergeben sich neben gemeinsamen Anforderungen solche, die von der gewählten Operationstechnik abhängen.

3.1 Klinische Anforderungen bei offener und laparoskopischer Leberchirurgie

Bei beiden Techniken steht die Zuordnung von Strukturen aus der Operationsplanung zu denen des intraoperativen Situs im Vordergrund. Die Analyse hat ergeben, dass das bisherige Operationsplanungssystem [3] für den intraoperativen Gebrauch erweitert werden muss, um intraoperative Befunde in die Planung einbeziehen zu können. Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass nach Mobilisierung der Leber ein Zeitfenster von bis zu einer Stunde zur Verfügung steht, um die intraoperativ gewonnenen mit den präoperativen Daten zu registrieren und beispielsweise für die anschließende Navigation Marker zu setzen. Für die Registrierung kann die Ruhigstellung der Leber ausgenutzt werden, die durch geeignete anästhesistische (Jet-Ventilation) und chirurgische Maßnahmen (z. B. durch Fixation mit Nadeln, eine Halterung oder Auslegung des Bauchraumes mit Tüchern) erreicht werden kann. Nach erfolgter Registrierung und dem Anbringen von Markern soll es das Navigationssystem

ermöglichen, sowohl intraoperative Strukturen in den Planungsdaten zu lokalisieren als auch die aktuelle Position der wesentlichen chirurgischen Instrumente in den prä- und intraoperativen Daten darzustellen.

Bei offenen Eingriffen ist ein Navigationssystem für oberflächennahe, tastbare Tumore aus Sicht der befragten Chirurgen unnötig. Für die Tiefennavigation allerdings, bei der die Resektionsflächen häufig nahe an lebenswichtigen zu erhaltenden Gefäßstrukturen verlaufen, wäre ein Navigationssystem zur Orientierung wünschenswert. Bislang führt die zeitliche Trennung sich abwechselnder Arbeitsschritte zur Orientierung und Durchführung des Eingriffes zu Ungenauigkeit. Die Güte der Orientierung ist derzeit nicht quantifizierbar und somit weder medizinischen Geräten noch anderen am Eingriff beteiligten Personen zugänglich. Somit hängt die Qualität im Sinne der Genauigkeit stark vom subjektiven Erfahrungshorizont der am Eingriff beteiligten Personen ab. Lediglich die Komplikationsrate und das Auftreten von Rezidiven liefern einen postoperativen Indikator für die Operationsqualität.

Die Indikation für laparoskopische Eingriffe ist noch eng begrenzt auf oberflächennahe, vor allem ventral und rechts lateral, gelegene Tumore. Problematisch für die Orientierung ist vor allem der fehlende, für den Chirurgen wichtige Tastsinn. Ein Navigationssystem könnte den fehlenden Tastsinn ersetzen und dadurch die Indikationsstellung für laparoskopische Eingriffe erweitern. Das hätte den Vorteil, dass mehr Lebertumore als bisher minimal-invasiv und damit schonender für den Patienten reseziert werden könnten. Dadurch ließen sich auch schneller und öfter Rezidive operieren.

3.2 Intraoperative Bildakquisition und Trackingsysteme

Die Navigation erfordert die Akquisition intraoperativer Daten in Echtzeit, damit die aktuelle Lage der Leber dem Resektionsmodell zugeordnet werden kann. Zur Echtzeit-Bildakquisition kommen intraoperativer Ultraschall (IOUS) und offene MRT in Frage [7]. CT scheidet aufgrund der hohen Strahlenbelastung für Patient und Operateur aus. Die offene MRT liefert derzeit die besten Daten. Allerdings ist sie nur an wenigen Zentren vorhanden, kostenintensiv und wird von vielen Chirurgen aufgrund des beengten Operationsfeldes nur wenig akzeptiert. Intraoperativer Ultraschall liefert gegenüber der MRT nur zweidimensionale Bilder. Für den Ultraschall als Bildgebungsmodalität spricht aber, dass er an jeder Klinik verfügbar ist und durch seinen Einsatz nur geringe Kosten entstehen. Auch werden beim IOUS gegenüber der offenen MRT keine speziellen Operationssäle benötigt.

Die Navigation kann durch ein Trackingsystem unterstützt werden. Hierfür kommen sowohl optische als auch magnetische Systeme in Frage. Der Vorteil optischer Systeme liegt darin, dass sie im Operationsfeld nur passive Komponenten benötigen. Ihr Nachteil besteht darin, dass mindestens drei Marker erfasst werden müssen, um die sechs Freiheitsgrade eines Raumpunktes bestimmen zu können. Dabei kommt erschwerend hinzu, dass bei den häufig notwendigen Lageveränderungen der Leber während der Resektion nicht immer alle Marker erfasst werden können. Magnetische Trackingssysteme benötigen zwar aktive Komponenten im Operationsfeld, erlauben aber die Erfassung aller sechs Freiheitsgrade in nur einem

Raumpunkt, auch wenn dieser verdeckt ist. Verfälschungen können aber durch ferro-magnetische Stoffe und starke Ströme im Operationsfeld auftreten.

3.3 Geeignete Schneideinstrumente für die intraoperative Navigation

Als Durchtrennungsverfahren des Leberparenchyms kommen derzeit die "finger-fracture" Technik, Ultraschall-Dissektoren, mono- und bipolare Elektrokoagulatoren und neuerdings auch Jet-Cutter zum Einsatz. Aus medizinischer Sicht besteht ein Diskurs über Vor- und Nachteile der verschiedenen Techniken zur Parenchym-Durchtrennung [8]. Deshalb konzentriert sich die Analyse auf die technischen Aspekte einer möglichen Anbindung der Schneidewerkzeuge an ein Navigationssystem. Die "finger-fracture" Technik, bei der das Parenchym vom Operateur mit den Fingern durchtrennt wird, schließt eine Anbindung an ein Navigationssystem aufgrund der mangelnden Genauigkeit aus. Alle anderen Schneidewerkzeuge lassen sich mit optischem Tracking kombinieren. Für eine Anbindung an ein magnetisches Trackingsystem ist der Jet-Cutter am besten geeignet, weil er ohne Elektrizität auskommt und das Handstück aus nicht ferro-magnetischen Materialien gefertigt werden kann. Dem Jet-Cutter kommt auch klinisch eine zunehmende Bedeutung zu, weil er eine komplikationsarme, gefäßerhaltende Durchtrennung des Parenchyms ermöglicht. Ultraschall-Dissektoren und elektrische Koagulatoren sind für ein magnetisches Tracking nur bedingt geeignet, weil die auftretenden Ströme und metallischen Handstücke zu Verfälschungen des magnetischen Gradientenfeldes und damit zu Ungenauigkeit in der Navigation führen.

4 Diskussion, Resümee und Ausblick

Derzeit stellt die Chirurgie bei Leberkrebs die einzig potenziell kurative Therapieform dar. Für die ca. 30 % der operablen Krebserkrankungen der Leber (ICD 155) kann durch Resektion des krebstragenden Gewebes die Fünfjahresüberlebenszeit derzeit von unbehandelt 5 % auf ca. 50 % angehoben werden. Die Erwartungen an ein computergestütztes Navigationssystem sind zum einen, dass durch die genauere Orientierung künftig auch schwierigere Fälle operiert werden können und zum anderen, dass durch die Möglichkeit zur verbesserten Radikalität die Fünfjahresüberlebenszeit weiter angehoben wird.

Sowohl für die Tiefennavigation in der offenen wie auch zur Ersetzung des fehlenden Tastsinns in der laparoskopischen Leberchirurgie besteht ein großer klinischer Bedarf für ein computergestütztes Navigationssystem. Hiervon erhoffen sich die Chirurgen eine Orientierungshilfe, die es ihnen erlaubt, die Operationsplanung genauer und sicherer als bisher umsetzen zu können. Dafür ist es erforderlich, dass sich die Forschung an den tatsächlichen Problemen der Klinik orientiert.

Die aufwendige Systemanalyse erscheint daher den gestellten Projektzielen angemessen, weil so zu Beginn viele Risiken minimiert und Fehlentwicklungen vorgebeugt werden konnten. So stellten sich Teile der anfänglichen Lösungsideen frühzeitig als im klinischen Umfeld nicht realisierbar heraus. Unsere folgenden

Arbeiten müssen zeigen, ob mit den Methoden der Modellbildung, Simulation, Bildverarbeitung und Mustererkennung die zum Abgleich von prä- und intraoperativen Daten benötigten Informationen in Echtzeit extrahiert und verglichen werden können. Darüber hinaus muss an Phantomen die Genauigkeit der Navigation untersucht werden. Sollte sich die Navigation als ausreichend genau erweisen, wären damit auch die Grundlagen für Augmented Reality und Robotik in der Leberchirurgie gelegt.

5 Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wird in der Abteilung Medizinische und Biologische Informatik, Prof. Dr. H.-P. Meinzer, Deutsches Krebsforschungszentrum Heidelberg durchgeführt und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung durch den Innovationswettbewerb Medizintechnik (Förderkennzeichen 01EZ0008) finanziert. Für die Beteiligung an der klinischen Anforderungsanalyse danken wir den Herren PD Dr. med. H. G. Rau, Klinikum Großhadern der Ludwig-Maximilians-Universität München, Prof. Dr. med. Dr. h.c. Ch. Herfarth, Dr. med. W. Lamadé, Chirurgische Klinik der Universität Heidelberg und Prof. Dr. med. G. Otto, Klinik für Transplantationschirurgie, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

6 Literatur

1. Galloway RL, Maciunas RJ, Edwards CA: Interactive, image-guided neurosurgery. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 39:1226-1231, 1992.
2. Wirtz CR, Knauth M, Hassfeld S, Tronnier V, Albert FK, Bonsanto MM, Kunze S: Neuronavigation - first experiences with three different commercially available systems. Zentralbl.-Neurochir. 59(1):14-22, 1998.
3. Glombitza G, Cárdenas CE, Thorn M, Heid V, Vetter M, Hassenpflug P, Lamadé W, Meinzer HP: Ein radiologisches Softwaremodul für die computergestützte Operationsplanung in der onkologischen Leberchirurgie. In: Horsch A, Lehmann T (Hrsg.): Informatik Aktuell – Bildverarbeitung für die Medizin 2000 – Algorithmen, Systeme, Anwendungen. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, 244-248, 2000.
4. Oldhafer KJ, Högemann D, Stamm G, Raab R, Peitgen HO, Galanski M: Dreidimensionale (3-D) Visualisierung der Leber zur Planung erweiterter Leberresektionen. Der Chirurg, 70:233-238, 1999.
5. Lamadé W, Glombitza G, Fischer L, Chiu P, Cárdenas CE, Thorn M, Meinzer HP, Grenacher L, Bauer H, Lehnert T, Herfarth C: The Impact of 3-Dimensional Reconstructions on Operation Planning in Liver Surgery. Archives of Surgery, 135:1256-1261, Nov. 2000.
6. URL des BMBF-Projekts „Ultraschallbasierte Navigation in der onkoligischen Leberchirurgie“: http://www.dkfz-heidelberg.de/mbi/igs
7. Klotz HP, Flury R, Erhart P, Steiner P, Debatin JF, Uhlschmid G, Largiadèr F: Magnetic Resonance-guided Laparoscopic Interstitial Therapy of the Liver. The American Journal of Surgery, 174:448-451, Oct. 1997.
8. Köckerling F, Waclawiczek HW (Hrsg.): Leberchirurgie. Johann Ambrosius Barth Verlag: Heidelberg, Leipzig, 1999.
9. Samentiger J: Software Engineering with Reusable Components. Springer: Berlin 1997.