

# Intraoperative Gefäßrekonstruktion für die multimodale Registrierung zur bildgestützten Navigation in der Leberchirurgie

Peter Hassenpflug<sup>1</sup>, Max Schöbinger<sup>1</sup>, Marcus Vetter<sup>1</sup>, Roman Ludwig<sup>2</sup>, Ivo Wolf<sup>1</sup>, Matthias Thorn<sup>1</sup>, Lars Grenacher<sup>3</sup>, Götz M. Richter<sup>3</sup>, Waldemar Uhl<sup>2</sup>, Markus W. Buechler<sup>2</sup> und Hans-Peter Meinzer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Abt. Medizinische und Biologische Informatik  
Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), D-69120 Heidelberg

<sup>2</sup>Chirurgische Klinik, <sup>3</sup>Radiologische Klinik  
Ruprecht-Karls Universität Heidelberg, D-69120 Heidelberg  
Email: p.hassenpflug@dkfz.de

**Zusammenfassung.** Dieser Beitrag stellt ein Verfahren vor, das die Voraussetzung für die gefäßbasierte Registrierung patientenindividueller, präoperativer 3D-Lebermodelle mit dem Operationssitus bildet. Aus intraoperativen 3D-Ultraschalldaten wird durch Methoden der Bildverarbeitung und -analyse ein attributierter relationaler Graph des aufgenommenen Gefäßsystems erstellt. Das Verfahren ist auf andere solide Weichteile wie die Nieren übertragbar. Mit der Evaluierung des Verfahrens in Phantom- und in-vivo-Experimenten soll der Nachweis der Machbarkeit der gefäßbasierten Registrierung für die computergestützte Navigation in der Viszeralchirurgie erbracht werden.

## 1 Einleitung

Im Projekt ARION untersuchen wir die Machbarkeit computergestützter Navigation für die Leberchirurgie. Ziel ist der Nachweis der Übertragbarkeit des patientenindividuellen, präoperativen 3D-Modells der Leber (Planungsmodell) auf korrespondierende anatomische Punkte der intraoperativ verformten Leber (Operationssitus). Aus der Analyse des Workflows der offenen Leberchirurgie an drei chirurgischen Zentren folgte die Spezifikation klinisch invarianter Anforderungen an ein Navigationssystem [1]. Die zentrale chirurgische Anforderung ist die Verbesserung der Orientierung in der Tiefe der Leber während der Resektion. Dies setzt informatisch eine Registrierung des Planungsmodells mit dem Operationssitus voraus. Dazu müssen korrespondierende anatomische Punkte (Landmarken) in den prä- und intraoperativen Datensätzen ermittelt werden. Als derartige Landmarken eignen sich die Bifurkationspunkte der intrahepatischen Gefäße [2]. Im Planungsmodell liegen die Bifurkationspunkte als Knoten in den Gefäßgraphen vor, die aus kontrastmittelverstärkten CT-Aufnahmen ermittelt werden. Das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren zeigt die Machbarkeit der Gewinnung korrespondierender Gefäßgraphen aus intraoperativem 3D-Ultraschall.

## 2 Stand der Forschung

Navigationssysteme haben Einzug im Bereich starrer anatomischer Strukturen (Knochen) und durch Knochen umgebener Weichteile (Gehirn) gefunden. Beispiele sind Navigationssysteme für die Orthopädie, Mund-Kiefer-Gesichts- und die Neurochirurgie. Für die Abdominalchirurgie sind Navigationssysteme bislang nicht verfügbar. Gründe hierfür sind die Form- und Gestaltänderung der Weichteile durch den Eingriff und deren Beweglichkeit durch die Atmung. Die Herausforderung für die Realisierung eines Navigationssystems für die Leberchirurgie besteht in der schritthaltenden Registrierung des sich verformenden Lebergewebes mit dem virtuellen Planungsmodell. Für die onkologische Leberchirurgie sind bereits mehrere Systeme entwickelt worden, die präoperativ die Patientenauswahl und Planung der Resektion ermöglichen (HepaVision 2 von MeVis [3], Leberplanungssystem des IRCAD [4], Lena-System des DKFZ [5]). Bei der Übertragung der Planungsergebnisse auf den Operationssitus orientiert sich der Chirurg bislang mit seinem Seh- und Tastsinn in Kombination mit seinem anatomischen Wissen. Zur Abklärung des Befundes und der Groborientierung im Organ wird intraoperativer Ultraschall durch den Chirurgen oder konsiliarisch durch einen Radiologen eingesetzt [6]. Die Tiefennavigation erfordert 3D-Ultraschalldatensätze in Patientenkoordinaten [7]. Alternative Ansätze zur Realisation von Navigationssystemen in der Leberchirurgie werden im Computer-Aided Diagnosis and Display Lab (CADDLab) der University of North Carolina at Chapel Hill (Gefäßmodell zu 3D-Ultraschall-Registrierung [8]), am Center for Technology-Guided Therapy (TGT) der Vanderbilt University (Registrierung optischer Marker auf der Leberoberfläche mit korrespondierenden Punkten im Computertomogramm [9]) und im Dept. of Radiology, Faculty of Medicine der University of Tokyo (Registrierung geometrischer und physikalischer Lebermodelle mit Oberflächenabstastpunkten der Leber [10]) erforscht.

## 3 Methoden

Grundlage der präoperativen Planung [5] ist ein kontrastmittelverstärktes Drei-Phasen-Spiral-CT. Aus den Bilddaten der späten portalvenösen Phase werden der Portalbaum und die Lebervenen mittels eines Hysterese-Schwellwertverfahrens extrahiert und nach einer topologieerhaltenden morphologischen Skelettierung [11] als mathematischer Graph gespeichert. Intraoperativ wird ein Siemens Sonoline Ultraschallgerät (Siemens Medical Systems, Inc., Issaquah, WA, USA) mit einer 7,5 MHz Linearschallsonde verwendet, um beliebig orientierte Schnittbilder des zu operierenden Lebervolumens zu erstellen. Durch Erweiterung der Schallsonde mit dem Sensor eines elektromagnetischen Lokalisationssystems (Minibird 500, Ascension Technology Corp., Burlington, VT, USA) und Einsatz der freihand 3D-Ultraschallsoftware Stradx [12] (Dept. of Engineering, University of Cambridge, UK) liegen die Pixel der Ultraschallbilder in den Weltkoordinaten des Lokalisationssystems vor. Um auf die Lage der Bildpunkte in der Leber zurückschließen zu können, wird die Leber während der Aufnahme und der

**Abb. 1.** Links: B-Bild nach anisotroper Diffusion; Mitte: Segmentierungsergebnis; rechts: rekonstruierter Gefäßbaum



sich anschließenden Registrierung mittels Jet-Ventilation und chirurgischer Maßnahmen ruhiggestellt. Zunächst werden die B-Bild-Ultraschalldaten zweidimensional aufbereitet, indem sie mittels anisotroper Diffusion [13] kantenerhaltend geglättet werden (Abb. 1, links). Gefäßpixel (Abb. 1, Mitte) werden über ein Hysteresis-Schwellwertverfahren ermittelt, das über ein Bereichswachstumsverfahren [14] simuliert wird: Alle Grauwerte werden zusammengefasst, die innerhalb eines für Gefäße sicheren Grauwertbereichs liegen. In einem zweiten Schritt werden dem Segmentierungsergebnis angrenzende Pixel hinzugefügt, wenn sie eine zweite, geringfügig höhere Schwelle unterschreiten. Die Konturen der schichtweise segmentierten Gefäße dienen der topologieerhaltenden Interpolation eines 3D-Oberflächenmodells des Gefäßbaums mittels Algorithmen zur Korrespondenzsuche („disc-guided interpolation“ [15]) und Oberflächeninterpolation („regularised marching tetrahedra“ [16]). Das resultierende Oberflächenmodell des Gefäßbaumes (Abb. 1, rechts) wird in ein äquidistantes reguläres Voxelgitter überführt (3D scan conversion nach Sramek und Kaufman [17]). So kann für die Berechnung der Mittelachsentransformation der gleiche Skelettierungsalgorithmus wie für die präoperativen Gefäßbäume angewandt werden. Die Gefäßvoxel, die Gefäßdurchmesser an und die euklidische Distanz zwischen Bifurkationspunkten werden für die Erstellung eines attributierten relationalen Gefäßgraphen verwendet. Dieser wird als Adjazenzliste abgelegt, um die geringe Anzahl Verbindungen zwischen den Knoten des Graphen für die effiziente Traversierung auszunutzen. Auf diese Weise wird ein intraoperativer Gefäßgraph generiert, der über korrespondierende Gefäßmerkmale im präoperativ erstellten Gefäßgraphen verfügt.

## 4 Ergebnisse

Das von uns vorgeschlagene Verfahren ermöglicht die intraoperative Rekonstruktion von intrahepatischen Gefäßen anhand von 3D-Ultraschalldaten. Die benötigte Zeit und die Qualität der Rekonstruktion hängen stark von der Qualität der Bilddaten ab. Es wurden bereits drei intraoperative 3D-Ultraschalldatensätze akquiriert. Um über die prinzipielle Machbarkeit hinaus Aussagen über die

Robustheit des Verfahrens zu machen, wird gegenwärtig die Datenbasis im Rahmen von Tierversuchen vergrößert.

## 5 Diskussion

Die intrahepatischen Gefäßbäume weisen eine Vielzahl charakteristischer Merkmale wie Längen, Durchmesser und Bifurkationen auf, die eine Registrierung auch in der Tiefe der intraoperativ verformten Leber ermöglichen. Zunächst erscheint es für die Segmentierung der Gefäße als vielversprechend, Doppler-Daten zu akquirieren. Niedrige Bildraten, Doppler-Artefakte, die vor allem auftreten, wenn die Schallsonde mit unterschiedlichem Druck über das Organ geführt wird („flash artifacts“) und die Abhängigkeit der Doppler-Signalstärke von der Richtung des Geschwindigkeitsvektors der Blutflussrichtung lassen freihandakquirierten 3D-Doppler-Ultraschall für eine automatische Gefäßsegmentierung als zu unrobust erscheinen. Die Erfahrung des untersuchenden Radiologen ist ein bedeutender Faktor für gleichmäßig gute Bildqualität, die die wichtigste Voraussetzung für gelungene Rekonstruktionen mit geringem Interaktionsaufwand ist. Verformungsartefakte des Lebergewebes durch die Untersuchung selbst („probe pressure artifacts“) können dann mit Stradx elastisch korrigiert werden. Verbessertes Bildmaterial zeigen Testdatensätze aktueller 3D-Ultraschallsonden, da sowohl Druck- als auch Dopplerartefakte gegenüber der Freihand-3D-Akquisition reduziert sind. Um diese Geräte für die Navigation erproben zu können, sind die Offenlegung der Volumen-Datenformate durch die Hersteller und die Anpassung der Algorithmen zur Kalibrierung mit dem Lokalisations-System erforderlich.

Das Verfahren zur Gewinnung präoperativer 3D-Gefäßmodelle anhand von CT-Daten realer Patienten wurde bereits über 120 mal erfolgreich von uns erprobt. Das hier vorgestellte Verfahren zur Rekonstruktion intraoperativer Gefäßbäume ist eine wichtige Voraussetzung für eine effiziente Registrierung mit den präoperativen Daten. Die Chirurgen sind bereits mit intraoperativem Ultraschall bei onkologischen Leberoperationen vertraut. Die Erweiterung zur 3D-Freihand-Akquisition erfordert nur wenig Mehraufwand für den Anschluss und die Kalibrierung des elektromagnetischen Lokalisationssystems. Der hohe Automatisierungsgrad unseres Verfahrens erlaubt eine intraoperative Gefäßrekonstruktion der Zielregion innerhalb weniger Minuten. Mit den prä- und intraoperativen Gefäßgraphen liegen zwei die Verformung der operativen Zielregion charakterisierende Beschreibungen vor, die eine Registrierung der verformten Zielstruktur auch in der Tiefe der Leber ermöglichen. Dazu untersuchen wir gegenwärtig Algorithmen zum inexakten Graph-Matching.

## 6 Danksagung

Das Projekt ARION wird vom BMBF im Rahmen des Innovationswettbewerbs Medizintechnik unter dem Kennzeichen 01EZ0008 gefördert. Die Autoren danken Drs. Richard Prager, Andrew Gee und Graham Treece, Cambridge Univer-

sity, Dept. of Engineering, für das Stradx-System, die Algorithmen zur Oberflächenrekonstruktion und den Leber-Beispieldatensatz.

## Literaturverzeichnis

1. Hassenpflug P, Vetter M, Cárdenas C, et al: Navigation in liver surgery – results of a requirement analysis. *Procs CARS 1230*:1162, 2001.
2. Glombitza G, Vetter M, Hassenpflug P, et al: Verfahren und Vorrichtung zur Navigation bei medizinischen Eingriffen. Internationale Patentanmeldung PCT/DE010397223.101, München, 2001.
3. Högemann D, Stamm G, Shin H et al: Individuelle Planung leberchirurgischer Eingriffe an einem virtuellen Modell der Leber und ihrer Leitstrukturen. *Radiologe* 40(3):267–273, 2000.
4. Soler L, Delingette H, Malandain G, et al: Fully automatic anatomical, pathological, and functional segmentation from CT scans for hepatic surgery. *Comput Aided Surg* 6(3):131–42, 2001.
5. Glombitza G, Lamadé W, Demiris AM, et al: Virtual planning of liver resections: image processing, visualization and volumetric evaluation. *Int J Med Inf* 53(2–3):225–237, 1999.
6. Takigawa Y, Sugawara Y, Yamamoto J, et al: New lesions detected by intraoperative ultrasound during liver resection for hepatocellular carcinoma. *Ultrasound Med Biol* 27(2):151–156, 2001.
7. Fenster A, Downey DB, and Cardinal HN: Three-dimensional ultrasound imaging. *Phys Med Biol* 46:R67–R99, 2001.
8. Aylward S, Weeks S, and Bullitt E: Analysis of the parameter space of a metric for registering 3d vascular images. *Procs MICCAI, Springer LNCS 2208*:932–939, 2001.
9. Herline AJ, Herring JL, Stefansic JD, et al: Surface Registration for Use in Interactive, Image-Guided Liver Surgery. *Comput Aided Surg* 5:11–17, 2000.
10. Masutani Y and Kimura F: A new modal representation of liver deformation for non-rigid registration in image-guided surgery. *Procs CARS 1230*:19–24, 2001.
11. Selle D and Peitgen HO: Analysis of the morphology and structures of vessel systems using skeletonization. *Procs SPIE Med Imaging*, vol 4322, 2001.
12. Prager RW, Gee AH, and Bermann L: Stradx: real-time acquisition and visualization of freehand three-dimensional ultrasound. *Med Image Anal* 3(2):129–140, 1998.
13. Weickert J: Theoretical foundations of anisotropic diffusion in image processing. *Computing Suppl* 11:221–236, 1996.
14. Adams R and Bischof L: Seeded region growing. *IEEE Trans Patt Anal Mach Intell* 16(6):641–647, 1994.
15. Treece GM, Prager RW, Gee AH and Berman L: Surface interpolation from sparse cross-sections using region correspondence. Technical report CUED/F-INFENG/TR 342, Cambridge University Dept of Engineering, 1999.
16. Treece GM, Prager RW, and Gee AH: Regularised marching tetrahedra: improved iso-surface extraction. Technical report CUED/F-INFENG/TR 333, Cambridge University Dept of Engineering, 1998.
17. Sramek M and Kaufman AE: Alias-free voxelization of geometric objects. *IEEE Trans Vis Comp Graph* 5(3):251–267, 1999.