

Elastische Registrierung der Leber mit laparoskopischem Ultraschall in drei Schritten

V. Martens¹, A. Besirevic², O. Shahin^{1,3}, M. Kleemann², A. Schlaefer¹

¹ Universität zu Lübeck, Institut für Robotik u. Kognitive Systeme, Lübeck, Germany

² Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Klinik für Chirurgie, Lübeck, Germany

³ Graduate School for Computing in Medicine and Life Sciences, Lübeck, Germany

Kontakt: {martens, shahin, schlaefer}@rob.uni-luebeck.de

Abstract:

Für die Navigation in laparoskopischer Leberchirurgie ist die Registrierung präoperativer Daten das zentrale Problem. Es wird das Konzept und die Umsetzung vorgestellt. Dabei kommt ausschließlich eine elektromagnetisch navigierte laparoskopische Ultraschallsonde zum Einsatz. Die Registrierung besteht aus drei Schritten: Einer Vorregistrierung basierend auf grob geschätzten Punkten an der Leberoberfläche, einer rigiden Oberflächenregistrierung und einer elastischen Registrierung. Letztere verwendet aus US-Bildern extrahierte Gefäße sowie die bereits erfasste Oberfläche. Es wird an Simulationen, am Phantom und einem echten Patientendatensatz gezeigt, dass die elastische Registrierung eine messbare und sichtbare Verbesserung bringt. Die Einbeziehung der Oberflächendaten sorgt dabei für vernünftige Ergebnisse, auch wenn nur wenige brauchbare Daten aus den Ultraschallbildern gewonnen werden können.

Schlüsselworte: Ultraschall, Laparoskopie, elastische Registrierung, TPS-ICP

1 Problem

Die Resektion ist nach wie vor der erfolgversprechendste Heilungsversuch bei primären oder sekundären hepatischen Malignomen. Laparoskopie verspricht dabei, abgesehen vom kosmetischen Vorteil, weniger Trauma und bessere immunologische Parameter für den Patienten nach dem Eingriff. Allerdings geht dieses Verfahren einher mit dem Verlust der Tiefenwahrnehmung und der Taktilität, zumindest bei der in Europa verbreiteten Variante ohne Handport. Computer-assistierte Navigation zur Übertragung von Resektionsplanungen und Ansteuerung von Läsionen zur Ablation ist also in der Laparoskopie besonders hilfreich. Hierfür wurde von uns ein System entwickelt, welches ein Behandlungsinstrument und die bewegliche Spitze der laparoskopischen Ultraschallsonde elektromagnetisch erfasst [1].

In unserem Szenario wird eine CT- oder MRT-Aufnahme zur Diagnose und Operationsplanung erstellt. Erst danach entscheidet sich, welche Eingriffsart (interventionell, offen, laparoskopisch) am sinnvollsten ist, falls überhaupt. Diese präoperativen Daten unterscheiden sich aufgrund etlicher Faktoren wie Lagerung und Gasdruck von der intraoperativen Situation. Neben einer rigiden Registrierung zur Erfassung der Lage der Leber im Koordinatensystem des Navigationssystems ist also auch eine elastische Registrierung erforderlich.

Lange et al. [2] erfasst bei offenem Eingriff mit einer 3D-US-Sonde ein Volumen und identifiziert darin Landmarken aus dem portalvenösen Gefäßbaum. Danach findet eine Landmarken- und Intensitätsbasierte elastische Registrierung statt. Derzeit sind keine laparoskopischen 3D-Sonden auf dem Markt und bei Freihand-3D-US, also einer navigierten 2D-Sonde wie in unserem Fall, ist es nicht leicht, ein geschlossenes Volumen zu erzeugen. Daher wurde der Ansatz auf einzelne Schichtbilder im Raum erweitert [3]. Informationen über die Oberfläche werden jedoch nicht erfasst.

Die Gruppe um Chapman und Galloway aus Nashville präsentiert, ebenfalls für offene Eingriffe, verschiedene Ansätze für eine elastische Registrierung basierend auf Oberflächendaten, u.a. ein Atlas-basiertes Verfahren über mit FEM vorberechneten Deformationen [4]. Hierfür wird optisches Tracking und ein Laser-Range-Scanner verwendet. Arbeiten an einer minimal-invasiven Umsetzung laufen indes bereits [5].

Im Folgenden präsentieren wir ein dreistufiges Registrierungsverfahren, welches ausschließlich die navigierte laparoskopische Ultraschallsonde erfordert. Die Interaktion mit dem System ist auf wenige einfache Aktionen beschränkt (Lebermodell drehen, Knöpfe drücken, Schieberegler einstellen). Da die Leber nicht direkt getrackt wird, findet keine automatische Anpassung der Registrierung bei Bewegungen oder im Laufe der Resektion selbst statt. Allerdings konnte bei mehreren laparoskopischen Eingriffen an der Leber keine nennenswerte Atmungsbewegung festgestellt werden.

2 Methoden

Der ohnehin zur Diagnose aufgenommene CT- oder MRT-Patientendatensatz wird zuerst segmentiert (MeVis, Bremen). Diese Daten werden zu Beginn der Anwendung in das System eingelesen und 3D-Modelle der Tumore, Gefäße, Lebersegmente und Resektionsvorschläge erstellt. Nach einigen Schritten zur Kalibrierung der Instrumente beginnt die Registrierung der Leber zu den präoperativen Falldaten. Diese Registrierung gliedert sich in die folgenden 3 Schritte.

Der erste Schritt dient der groben Einmessung der Leber. Dazu muss das Modell auf dem Bildschirm so ausgerichtet werden, dass die sichtbare Seite auch in Wirklichkeit mit Instrumenten erreichbar ist (Interaktion I). Nach dem Start erscheinen automatisch 4 Landmarken an den Seiten der Leber, die nacheinander vom Chirurgen mit der navigierten Ultraschallsonde angesteuert und über eine Schaltfläche bestätigt werden müssen (Interaktion II). Dieser Vorgang ist zwar relativ grob, aber kann recht schnell durchgeführt werden und ist zudem sehr robust.

Als nächstes wird die Oberfläche erfasst, um sie mit dem ICP-Algorithmus (Iterative Closest Point) rigide auf das präoperative 3D-Modell zu registrieren mit der Grobregistrierung aus dem ersten Schritt als Startwert. Dies geschieht ebenfalls mit der navigierten Ultraschallsonde (Interaktion III), da deren flexible Spitze auch an die Seiten und hinter die Leber gelangt. Allerdings wird dabei die Oberfläche eingedrückt, weswegen die erfasste Punktposition leicht modifiziert wird. Wichtig ist, dass die aufgenommenen Punkte möglichst weit über die Leber verteilt sind, damit der Algorithmus nicht in ein lokales Optimum läuft. Daher werden die Anzahl und räumliche Ausdehnung der Oberflächenpunkte kontrolliert. Zudem wird anhand des Ultraschallbildes überprüft, ob überhaupt Kontakt zum Gewebe besteht. Bei Luft bilden sich charakteristische weiße Artefakte am oberen Bildrand, und es werden keine Oberflächenpunkte aufgenommen. Daher kann der Chirurg während der Aufnahme problemlos die Sonde umsetzen.

Als dritter und letzter Schritt folgt eine elastische Registrierung. Hierfür muss eine Sequenz von Ultraschallbildern aufgenommen werden (Interaktion IV). Dabei kann es sich sowohl um Farbdopplerbilder wie auch Grauwertbilder in allen verfügbaren Eindringtiefen handeln. Auch hier ist eine großräumige Aufnahme von Vorteil. Die elastische Registrierung besteht aus folgenden Schritten:

- **Segmentierung:** Alles Farbige im Farbdopplerbild. Bei Grauwertbildern adaptives Thresholding auf herunterskaliertem und geglättetem Bild, wobei über einen Schieberegler (Interaktion V) der Threshold feinjustiert werden kann. Dank einer Echtzeit-Segmentierungsvorschau kann die Segmentierung direkt auf der Leber so eingestellt werden, dass nur die sichtbaren Gefäße möglichst gut erkannt werden.
- **Gefäßvalidierung:** Alle segmentierten Bereiche werden überprüft, ob es sich um Gefäße handelt und nicht z.B. um Luft oder Schatten. Neben der bereits erwähnten Prüfung auf Luftkontakt werden zu kleine und zu große Segmente entfernt. Außerdem werden alle Bereiche entfernt, die den Bildrand berühren und ihren Schwerpunkt sehr nah am Bildrand haben, da vermutlich ein wesentlicher Teil ihrer Gestalt fehlt. Schließlich werden nur die Segmente als Gefäße akzeptiert, die größtenteils von helleren Regionen umgeben sind.
- **Merkmalsbestimmung:** Für eine schnelle Verarbeitung werden die Gefäße bzw. die Gefäßschnitte auf ihre wesentlichen Eigenschaften reduziert: Mittelpunkt und Radius. Bei ovalen Segmenten kann der Schwerpunkt genommen werden. Bei Gefäßaufzweigungen könnte dieser jedoch sogar außerhalb des Segments liegen. Daher wird eine Abstandskarte der Pixel eines Segments zusammen mit dem Skelett, wie in [6] beschrieben, erstellt. Liegt der Schwerpunkt nahe am Abstandsmaximum des Segments, wird er ausgewählt. Ansonsten werden die lokalen Maxima (als Teile des bereits extrahierten Skeletts) in der Abstandskarte verwendet. Liegen mehrere dicht beisammen, wird wiederum deren Schwerpunkt genommen. Dadurch können auch Gefäßaufzweigungen häufig gut erfasst werden (s. Abbildung. 1). Der zugehörige Gefäßradius ergibt sich direkt aus der Abstandskarte.

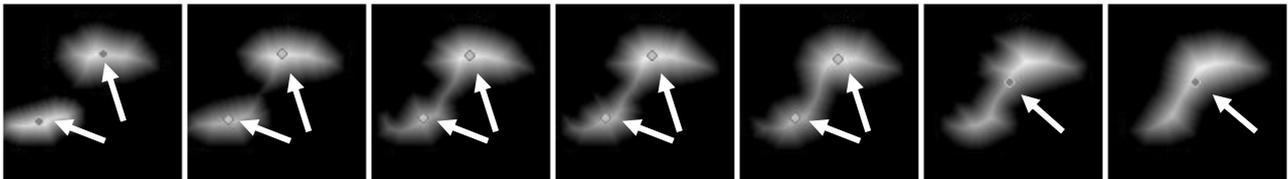


Abb. 1: Beispiel für Bestimmung der Gefäßmittelpunkte. Segmentierte Bereiche zur Anschaulichkeit mit Intensität proportional zum Abstand zum Segmentrand (Abstandskarte). Dunkle Punkte sind Schwerpunkte der Segmente, helle Punkte mit dunklem Rand die (aggregierten) Maxima. Im 2.-5. Bild von links wäre der Schwerpunkt keine gute Wahl.

- **Registrierung:** In einem iterativen Verfahren (TPS-ICP) wird eine elastische Verformung mittels TPS (Thin Plate Splines) durchgeführt. Dafür wird jedem im Ultraschall gefundenen Gefäßmittelpunkt ICP-ähnlich der nächstliegende Punkt im präoperativen Gefäßmodell (hepatische und portalvenöse Gefäße, sofern segmentiert auch Arte-

rien) zugewiesen, wobei auch der Gefäßradius in die Abstandsberechnung mit eingeht. Das gleiche geschieht parallel mit den im zweiten Schritt gefundenen Oberflächenpunkten und dem präoperativen Oberflächenmodell. In einem dem diskreten Abkühlen (discrete annealing) ähnlichen Verfahren wird der Regularisierungsparameter α kontinuierlich verringert (elastischer). Wenn in einer inneren Schleife die Veränderung der Punktpositionen unter eine bestimmte Grenze fällt, wird diese verlassen und in einer äußeren die Temperatur und mit ihr die Elastizität verändert, bis eine minimale Temperatur erreicht ist. Dabei werden die wenigen erfassten Punkte verformt und erst zum Schluss mit einer inversen Transformation die präoperativen Daten auf die intraoperativen abgebildet.

Sowohl beim zweiten wie auch dritten Registrierungsschritt sollte die Beatmung für die Dauer der jeweiligen Aufnahme (Oberfläche bzw. US-Sequenz) angehalten werden, wenn die Bewegung der Leber zu stark ist (mehr als 5mm).

3 Ergebnisse

Es wurden drei Arten von Evaluationen durchgeführt: synthetisch (a), am Phantom (b) und an Patientendaten (c).

a) Der Schritt der elastischen Registrierung ohne Bildverarbeitung wurde an verschiedenen präoperativen Leberdatensätzen evaluiert. Dafür wurden zufällig Gefäß- und Oberflächenpunkte in einem Radius von 90mm um einen zufälligen Punkt nahe des Leberschwerpunkts ausgewählt. Zuvor wurden die Patientendaten zufällig rigide und elastisch (mit TPS) verformt. Tabelle 1 zeigt die mittlere quadratische und maximale Abweichung der registrierten Gefäßmittelpunkte und Oberflächenpunkte von der deformierten Grundwahrheit. Vor TPS-ICP (Gefäßmittel- und Oberflächenpunkte) wurde ICP auf die Gefäßmittelpunkte angewendet, um eine bessere Ausgangslage für TPS-ICP zu erhalten.

Verfahren	Mittl. Quadr. (Gefäße)			Max.			Mittl. Quadr. (Oberflächenpunkte)			Max.		
Initial	10,3	9,5	9,0	18,2	16,2	17,2	11,0	11,5	8,3	20,8	21,2	15,5
ICP (Gefäße)	6,1	6,7	6,7	12,4	13,8	12,7	7,3	9,1	6,8	15,2	18,6	14,6
TPS-ICP	3,8	3,8	4,6	11,1	14,8	14,9	6,7	8,1	5,5	16,6	25,8	15,8

Tabelle 1: Fehler in mm bei drei Testläufen (jeweils linke, mittlere und rechte Spalte) mit synthetischen Daten eines menschlichen Patientendatensatzes

b) An einem Leberphantom (Kagaku, Kyoto, Japan) wurde die ganze Registrierung durchgeführt, und zwar einmal ohne Verformung und mit zwei unterschiedlichen Verformungen. Für jeden der drei Testfälle wurden eine Grob- und Oberflächenregistrierung durchgeführt und 4-6 US-Sequenzen zur elastischen Registrierung aufgenommen. Die Grundwahrheit bildeten an der Oberfläche mit einem Zeiger und innen mit der Ultraschallsonde definierte Landmarken. Die Landmarken wurden zuvor in einem störfreien Umfeld und nach präziser Oberflächenregistrierung im unverformten Zustand definiert. Die tatsächlichen Aufnahmen fanden unter OP-ähnlichen Bedingungen statt (Tabelle 2).

Verfahren	Mittl. Quadr. (Gefäße)			Max.			Mittl. Quadr. (Oberflächenpunkte)			Max.		
Initial	7,4	11,6	10,0	11,2	19,2	20,1	1,9	2,3	2,0	6,6	7,2	10,8
ICP (Gefäße)	7,7	7,3	6,9	11,8	11,9	11,6	2,9	4,7	2,0	5,9	16,9	10,8
TPS-ICP	7,7	6,7	7,0	13,6	12,0	12,4	1,4	1,1	2,7	6,0	5,2	7,5

Tabelle 2: Fehler in mm am Phantom ohne Deformation (jeweils linke Spalte), gestaucht (jeweils mittlere Spalte) und gestreckt (jeweils rechte Spalte)

In der Tabelle findet sich jeweils nur die beste Registrierung pro Deformation. Bei der ersten Deformation (mittlere Spalte) waren zwei Registrierungen besser, eine brachte keine Veränderung, eine wurde schlechter. Bei der zweiten Deformation waren drei besser und zwei schlechter. Ohne Deformation blieben drei ungefähr gleich, drei wurden etwas schlechter (eine Verbesserung war hier allerdings auch kaum zu erwarten). Leider war die Segmentierung der präoperativen Daten nicht sehr gut (z.B. fehlt ein Gefäß), so dass Aufnahmen in diesen Bereichen zu Fehler führen konnten.

c) Schließlich standen navigierte Ultraschallsequenzen samt initialer Registrierung eines echten Patienten zur Verfügung, allerdings ohne Oberflächenpunkte. An diesen Daten wurde die elastische Registrierung erprobt (Tabelle 2). Als Grundwahrheit wurden postoperativ 10 Landmarken in den US-Sequenzen gesetzt.

Verfahren	Mittl. Quadr. Fehler	Max. Fehler
Intraop. Registrierung	38,7	44,7
ICP der Gefäßzentren mit Radius	6,5	13,5
TPS-ICP (nach ICP)	5,0	13,5

Tabelle 2: Ergebnisse der Registrierung am echten Patienten (alle Angaben in mm)

Der Unterschied zwischen dem Fehler nach ICP und nach TPS-ICP mag nicht groß sein, der visuelle Unterschied ist jedoch nicht unerheblich. Abbildung 2 zeigt einige ausgewählte (und in der Sequenz gleichmäßig verteilte) Ultraschallbilder nach ICP und nach darauf folgendem TPS-ICP. Für TPS-ICP zeigen die überblendeten Gefäße eine bessere Übereinstimmung mit den US-Bildern. Aufgrund der starken Gewebekompression wurden die ermittelten Gefäßdurchmesser mit dem Faktor 1.3 multipliziert. Dies ist beim nachfolgend beschriebenen Leberphantom nicht erforderlich. Die US-Segmentierung dauerte 64ms pro Bild (PC mit Intel Core 2 Duo, 2.4 GHz).



Abb. 2: Von links nach rechts vier Bilder aus der US-Sequenz vom echten Patienten. Die Eckpunkte der präoperativen Oberflächenmodelle sind als helle Punkte eingezeichnet. Oben: ICP über Gefäße. Unten: zusätzlich TPS-ICP.

4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die elastische Registrierung eine Verbesserung bringen kann. Stehen US-Daten für den gesamten Gefäßbaum zur Verfügung (Simulation), ist die Verbesserung erheblich und das Verfahren robust. Stehen nur wenige Daten zur Verfügung (wenige Gefäße im Sequenzbereich, schlechte Bildqualität), kann das TPS-ICP Verfahren auch zu schlechteren Lösungen führen. Hier helfen aber weiträumig verteilte Oberflächenpunkte. Der gezeigte Ansatz ist aufgrund der geringen Interaktion und der Verwendung weniger Merkmale bei den Ultraschallsequenzen (Gefäßmittelpunkt und Radius) schnell, es gibt fast keine Wartezeiten. Allerdings ist das Verfahren stark vom Startwert abhängig, und bei starker Deformation wäre eine elastische Vorregistrierung, z.B. über Landmarken, wohl hilfreich.

Das Projekt wird finanziert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (Förderkennzeichen 01IBE03A).

5 Referenzen

- [1] V. Martens, S. Schlichting, A. Besirevic and M. Kleemann, "LapAssistent - a laparoscopic liver surgery assistance system", Proceedings of the EMBEC, 121-125, Antwerpen, Belgien, 2008
- [2] T. Lange, N. Papenberg, S. Heldmann, J. Modersitzki, B. Fischer, H. Lamecker, P. Schlag, „3D ultrasound-CT registration of the liver using combined landmark-intensity information, Int. J. CARS, 4(1): 79-88, 2009
- [3] S. Heldmann und N. Papenberg, „A Variational Approach for Volume-to-Slice Registration”, Proceedings of the SSVI, 624–635, Voss, Norwegen, 2009
- [4] L. W. Clements, P. Dumpuri, W. C. Chapman, R. L. Galloway und M. I. Miga, "Atlas-based method for model updating in image-guided liver surgery", In K. R. Cleary und M. I. Miga, Hg., Medical Imaging 2007: Visualization and Image-Guided Procedures, Bd. 6509, SPIE 2007
- [5] T. P. Rauth, P. Q. Bao, R. L. Galloway, J. Bieszczad, E. M. Friets, D. A. Knaus, D. B. Kynor und A. J. Herline, "Laparoscopic surface scanning and subsurface targeting: implications for image-guided laparoscopic liver surgery", Surgery, 142(2): 207–214, 2007
- [6] S. Chang, "Extracting Skeletons from Distance Maps", IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, 2007