

Computerassistierte Leberchirurgie

Wie Computer die Leber in medizinischen Bilddaten automatisch erkennen

Thomas Lange¹, Hans Lamecker², Hans-Christian Hege², Peter Deuflhard² und Peter M. Schlag¹; Berlin

Computergestützte Planungs- und Navigationssysteme sind vor allem in der Neurochirurgie und Orthopädie mittlerweile fester Bestandteil der klinischen Routine. Dies liegt zum einen daran, dass sich beispielsweise Knochen leichter und sicherer in Computertomographien automatisch erkennen lassen (Bildseg-

mentierung), zum anderen, dass sich knöcherne Strukturen zwischen dem Zeitpunkt der Bilddatenakquisition und der eigentlichen Operation nicht deformieren. Die Leber hingegen lässt sich selbst aus modernen Mehrzeilen-Computertomographien mit Kontrastmittelgabe nicht mit einfachen Mitteln der

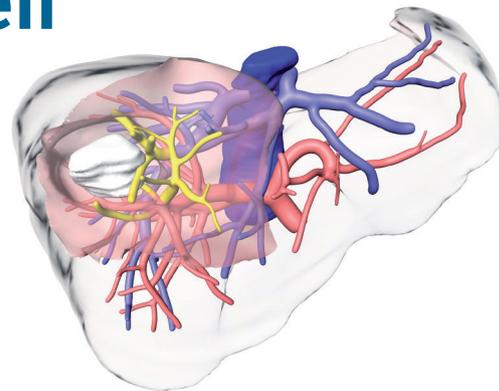


Abb. 1: Modell der Leber mit Gefäßsystemen und Tumor. Der gelb gekennzeichnete Teil der Gefäße wird nach der OP nicht mehr zur Versorgung bzw. Entsorgung der Leber zur Verfügung stehen. Dadurch wäre der markierte Bereich des Lebergewebes nicht mehr versorgt.

Schlüsselwörter

Segmentierung, Statistische Formmodelle, Computerassistierte Chirurgie, Leberchirurgie, chirurgische Planungssysteme, intraoperative Navigationssysteme

Zusammenfassung

Die computerassistierte Chirurgie unterstützt den Operateur bei der optimalen Planung und präzisen Umsetzung eines operativen Eingriffs. Das Ziel in der onkologischen Leberchirurgie ist, einen Tumor vollständig zu entfernen bei bestmöglicher Schonung des gesunden Lebergewebes. Dabei spielt die räumliche Lage des Tumors zu wichtigen Blutgefäßen der Leber eine entscheidende Rolle. Mit Hilfe mathematischer Methoden können virtuell Leberresektionen im Computer geplant und die Konsequenzen für die Funktion der Leber simuliert werden. Die automatische Generierung der für die virtuelle Operationsplanung notwendigen dreidimensionalen Modelle ist seit Jahren eine wichtige Aufgabe der medizinischen Bildverarbeitung. In einem unlängst im Rahmen einer internationalen Konferenz ausgetragenen Wettbewerb waren Verfahren am erfolgreichsten, die statistisches Vorwissen über typische Leberformen integrieren. Diese Verfahren kommen manuellen Konturierungen der Leber schon sehr nahe.

Keywords

segmentation, statistical shape analysis, computer assisted surgery, liver surgery, surgical planning systems, intraoperative navigation systems

Summary

Computer assisted surgery supports the surgeon by optimal planning and precise implementation of a surgical procedure. The aim in oncological liver surgery is to remove a tumor completely while considering best possible preservation of healthy tissue. The spatial relation of the tumor to important blood vessels plays a decisive role. With the aid of mathematical methods virtual liver resections can be planned in the computer and the consequences for the liver's function can be simulated. The automatic generation of three dimensional models for virtual operation planning is an important task in medical image processing. In a recently arranged contest during an international conference those approaches were most successful, that integrated statistical a priori knowledge about typical liver shapes. These methods come already fairly close to manual contouring.

Bildverarbeitung automatisch extrahieren. Außerdem verformt sie sich oft deutlich zwischen dem Zeitpunkt der Bildaufnahme und dem operativen Eingriff. Dadurch ist eine direkte Nutzung präoperativer Bilddaten für intraoperative Navigationssysteme nicht möglich. Für beide Probleme gibt es mittlerweile erfolgreiche mathematische Lösungsansätze, die das Potenzial haben, den Weg in die klinische Routine zu finden.

Virtuelle Leberresektionen – Planung von optimalen Eingriffen

Bei Tumoren in der Leber muss nicht nur das befallene Gewebe identifiziert und mit einem ausreichenden Sicherheitsraum entfernt, sondern auch die räumliche Beziehung der Blutgefäße in der Nähe des Tumors berücksichtigt werden, um Blutungen und spätere Funktionsstörungen der Leber zu vermeiden. Gleichzeitig soll so schonend wie möglich operiert werden, d.h. möglichst

¹ Klinik für Chirurgie und Chirurgische Onkologie, Charité – Universitätsmedizin Berlin
² Zuse-Institut Berlin



Abb. 2: Um eine präzise Umsetzung einer geplanten Leber-OP zu erreichen, wird ein Navigationssystem eingesetzt, das an der Klinik für Chirurgie und Chirurgischer Onkologie (Charité) entwickelt wurde. Das System basiert auf einer 3D-Ultraschall Aufnahme während der OP, deren Position im Raum von einem Kamerasystem am Kopfende des Patienten aufgenommen wird. Anschließend wird ständig die Position eines chirurgischen Instruments gemessen und auf einem Monitor in den Ultraschall-Daten dargestellt.

wenig gesundes Gewebe verletzt werden. Entscheidend hierbei sind die Versorgungsgebiete der Blutgefäße, die von Patient zu Patient stark variieren. Eine virtuelle Planung der Resektion basierend auf Computertomographien der Leber hilft, diese individuellen Gegebenheiten zu berücksichtigen und mittels Simulationen Risiken einer Minderversorgung von Gewebe einzuschätzen (siehe Abbildung 1).

Eine wichtige Grundlage einer solchen Planung ist die eindeutige Identifizierung der Leber aus Computertomograpiedaten (Bildsegmentierung). Die genaue Abgrenzung der Leberoberfläche aber ist sehr schwierig und wird meist „von Hand“ durchgeführt. Dabei versucht ein Medizinisch-Technischer Assistent unter Anleitung eines Radiologen, aus über 100 Aufnahmen im Computer-

tomographen eine genaue Abgrenzung der Leber zu benachbarten Strukturen zu zeichnen. Dies ist zum einen zeitaufwendig, zum anderen können die Ergebnisse variieren. Eine vollautomatische Bildsegmentierung dagegen ist insbesondere wegen des Bildrauschens und des geringen Kontrastes zu benachbarten Organen mit herkömmlichen Methoden nicht möglich. Bevor jedoch auf moderne Verfahren der Bildsegmentierung eingegangen wird, soll erläutert werden, wie die geplanten Resektionen präzise während der OP umgesetzt werden können.

Navigationssysteme – Orientierung für den Chirurgen während der OP

Chirurgische Navigationssysteme zeigen dem Operateur auf einem Bildschirm die Position seines chirurgischen Instruments in Relation zu anatomischen Strukturen in medizinischen Bilddaten. Dadurch kann der Operateur die genaue Lage eines Tumors oder Entfernungen zu kritischen Strukturen sehr präzise einschätzen obwohl diese nicht direkt sichtbar sind.

Aufgrund der Deformierbarkeit der Leber wird eine intraoperative Bildgebung benötigt, um die aktuelle Lage und Form der Leber zu bestimmen. Für den Einsatz in der Leberchirurgie bietet sich der 3D Ultraschall an, bei dem im

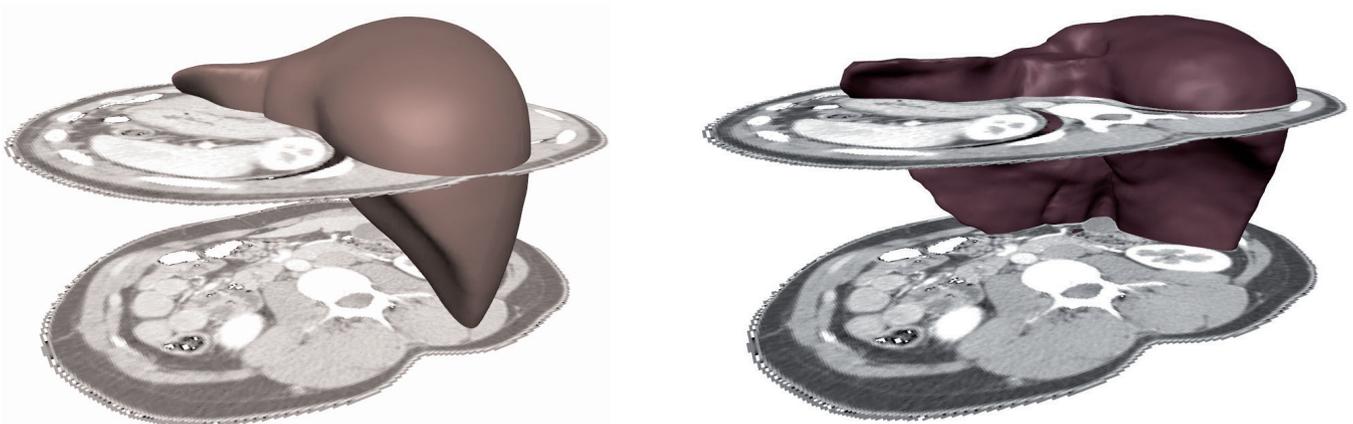


Abb. 3: a) Es werden 2 Schichten eines CT Datensatzes der Leber dargestellt. Initial wird ein deformierbares Modell in den Daten platziert. Das Modell repräsentiert die durchschnittliche Form einer Leber. b) Dieses Modell adaptiert sich autonom an die Bilddaten, wobei es sich nicht beliebig verformen darf, sondern lediglich gemäß für die Leber charakteristischer Deformationen.

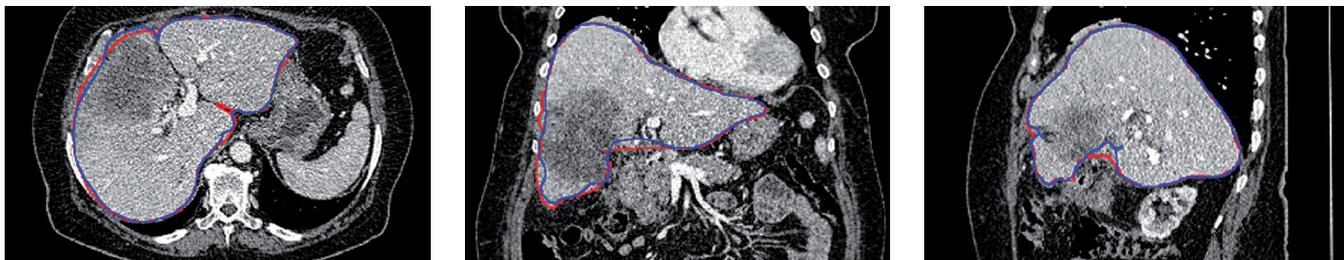


Abb. 4: Segmentierungsergebnis in einer Schicht der Computertomographie in transversaler, koronaler und sagitaler Schichtführung. Die manuelle Referenzsegmentierung ist blau, die automatisch mittels statistischen Formmodells erzeugte Segmentierung ist rot gekennzeichnet. Das Verfahren funktioniert trotz großem intrahepatischen Tumors robust.

Gegenüber zum herkömmlichen Ultraschall in wenigen Sekunden ein ganzes Volumen akquiriert wird. An der Klinik für Chirurgie und Chirurgische Onkologie der Charité wurde ein solches System entwickelt und befindet sich bereits erfolgreich im klinischen Einsatz (siehe Abbildung 2).

Gegenstand aktueller Forschung ist die automatische Übertragung des präoperativen Lebermodells und der Resektionsplanung auf die intraoperativen 3D Ultraschalldaten. Dies ist aufgrund der genannten Deformationen schwierig. Bisher erfolgt dieser Transfer mental durch den Operateur, was aber meist nur in grober Näherung gelingt.

Statistische Formanalyse – Computer lernen die Variabilität von Leberformen

Kommen wir nun zurück zur automatischen Bildsegmentierung der Leber als Grundlage der Erstellung von 3D Modellen. Moderne Segmentierungsmethoden basieren meist auf der Lösung eines mathematischen Optimierungsproblems. Es liegt daher nahe eine Kooperation zwischen Mathematikern und Chirurgen anzustreben. Zwischen der Klinik für Chirurgie und Chirurgische Onkologie der Charité unter der Leitung von Herrn Prof. Peter M. Schlag und dem Zuse-Institut Berlin (ZIB) unter der Leitung von Herrn Prof. Peter Deuffhard besteht eine langjährige erfolgreiche Zusammenarbeit im Bereich der computerassistierten Chirurgie. Das ZIB ist ein Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Mathematik und Informatik und beschäftigt sich, zum Teil auch im Rahmen des DFG-Forschungszentrums Matheon, mit medizinischer Bildsegmentierung.

In enger Zusammenarbeit von ZIB und Charité wurde ein Segmentierungsverfahren entwickelt, dessen Grundidee die Nutzung von statistischem Vorwissen über Leberformen ist. Im Prinzip wird ein Modell typischer Leberformen auf Basis einer großen Datenbank individueller Lebern erstellt. Derzeit werden 112 individuelle Leberformen in ein gemeinsames Formmodell integriert. Für die Bildsegmentierung der Leberdaten wird dieses Modell mit den tomographischen Bilddaten abgeglichen und so angepasst, dass es die gesuchte Leberform möglichst gut repräsentiert (siehe Abbildung 3). Die Anpassung erfolgt schrittweise. Zunächst wird die mittlere Form aller 112 Lebern optimal in die Bilddaten platziert. Danach erfolgt eine Anpassung der Leberform, wobei allerdings nur Deformationen im Rahmen der Variationsbreite des Formmodells zulässig sind. Zum Schluss wird diese Beschränkung etwas gelockert, da auch 112 Lebern nicht komplett die möglichen Leberformen repräsentieren. Allerdings darf sich das Modell nur noch in einem sehr eingeschränkten Bereich um die bereits adaptierte Form bewegen.

Bilddatenbanken und Wettbewerbe zur Validierung

Der Goldstandard für Segmentierungsverfahren sind manuell erzeugte Referenzsegmentierungen, die von einem (besser mehreren) radiologischen Experten erstellt wurden. Wichtig für den Vergleich von Segmentierungsverfahren verschiedener Forschungsgruppen ist ein gemeinsamer Satz von klinisch relevanten Computertomographien. Solche frei zugänglichen Bilddatenbanken mit Referenzsegmentierungen sind leider sehr

rar. Um einen objektiven Überblick über den aktuellen Stand und populäre Methoden der Bildsegmentierung zu bekommen, bietet sich ein Wettbewerb an, der zudem für die Teilnehmer sehr motivierend ist.

Für den Bereich der Lebersegmentierung hatte unlängst die „10th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI)“ in Brisbane, Australien, einen solchen Wettbewerb ausgeschrieben. An dem Wettbewerb haben sich insgesamt 16 Teams aus aller Welt sowohl von Universitäten als auch von großen renommierten Firmen beteiligt. Dabei sollten zehn unbekannte klinische Datensätze in maximal drei Stunden automatisch segmentiert werden. Doch weniger auf die Schnelligkeit kam es dabei an, als vor allem auf die Genauigkeit. Die Abweichungen vom Goldstandard wurden mit Punkten bewertet. Selbst bei einer Auswertung von Hand, ist oft nur eine Treffsicherheit von 75 von 100 möglichen Punkten gegeben. Ein gemeinsames Team aus Mitgliedern der Abteilung Visualisierung und Datenanalyse (Leitung: Hon. Prof. Hans-Christian Hege) des ZIB und der Klinik von Herrn Prof. Schlag konnte mit der eigentlich unsicherer eingeschätzten automatischen Bildsegmentierung eine Punktzahl von 77 Punkten erreichen.

Mit dieser hohen Genauigkeit setzte sich das Team bestehend aus Hans Lamecker (ZIB), Dagmar Kainmüller (ZIB) und Thomas Lange (Charité) beim Wettbewerb in Australien an die Spitze und wurde mit dem ersten Preis ausgezeichnet. Viel wichtiger aber ist die große wissenschaftliche Reputation und die

Hoffnung, dass diese Methode künftig in der Industrie in radiologischen Befundungsstationen sowie chirurgischen Planungs- und Navigationssystemen Eingang findet. An der Klinik von Herrn Prof. P. M. Schlag wird das Segmentierungsverfahren bereits bei der Planung von Leberoperationen eingesetzt und klinisch zusammen mit seinem OP 2000 Team, zu welchem auch der Wettbewerbsgewinner Thomas Lange gehört, evaluiert.

Sämtliche Ergebnisse, sowie Dokumentationen der Segmentierungs- und Auswerteverfahren sind auf der Webseite www.sliver07.org zu finden.

Fazit

Die computerassistierte Chirurgie unterstützt die optimale Planung und präzise Umsetzung von Leberresektionen insbesondere bei komplexen Eingriffen. Die fortschreitende Automatisierung der Modellgenerierung für die intuitive Resektionsplanung sowie die hohe Integrierbarkeit und Genauigkeit von Ultraschallbasierten Navigationssystemen ermöglicht den Einsatz der computerassistenten Leberchirurgie in der klinischen Routine.



Korrespondenzadresse

Prof. Dr. Dr. h.c. Peter M. Schlag
Klinik für Chirurgie und Chirurgische
Onkologie
Charité – Universitätsmedizin Berlin
Lindenberger Weg 80
13125 Berlin
Tel. +49 (0)30 94171400
pmschlag@charite.de