

Aktuelle Forschung Medizintechnik

RESEARCH

Janine Olesch

Bildregistrierung für die navigierte Chirurgie

Spezialisierte Ansätze zur Anwendung
in der navigierten Leberchirurgie



Springer Vieweg

Aktuelle Forschung Medizintechnik

Editor-in-Chief:

Th. M. Buzug, Lübeck, Deutschland

Unter den Zukunftstechnologien mit hohem Innovationspotenzial ist die Medizintechnik in Wissenschaft und Wirtschaft hervorragend aufgestellt, erzielt überdurchschnittliche Wachstumsraten und gilt als krisensichere Branche. Wesentliche Trends der Medizintechnik sind die Computerisierung, Miniaturisierung und Molekularisierung. Die Computerisierung stellt beispielsweise die Grundlage für die medizinische Bildgebung, Bildverarbeitung und bildgeführte Chirurgie dar. Die Miniaturisierung spielt bei intelligenten Implantaten, der minimalinvasiven Chirurgie, aber auch bei der Entwicklung von neuen nanostrukturierten Materialien eine wichtige Rolle in der Medizin. Die Molekularisierung ist unter anderem in der regenerativen Medizin, aber auch im Rahmen der sogenannten molekularen Bildgebung ein entscheidender Aspekt. Disziplinen übergreifend sind daher Querschnittstechnologien wie die Nano- und Mikrosystemtechnik, optische Technologien und Softwaresysteme von großem Interesse.

Diese Schriftreihe für herausragende Dissertationen und Habilitationsschriften aus dem Themengebiet Medizintechnik spannt den Bogen vom Klinikingenieurwesen und der Medizinischen Informatik bis hin zur Medizinischen Physik, Biomedizintechnik und Medizinischen Ingenieurwissenschaft.

Editor-in-Chief:

Prof. Dr. Thorsten M. Buzug
Institut für Medizintechnik,
Universität zu Lübeck

Editorial Board:

Prof. Dr. Olaf Dössel
Institut für Biomedizinische Technik,
Karlsruhe Institute for Technology

Prof. Dr. Heinz Handels
Institut für Medizinische Informatik,
Universität zu Lübeck

Prof. Dr.-Ing. Joachim Hornegger
Lehrstuhl für Bildverarbeitung,
Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr. Marc Kachelrieß
German Cancer Research Center,
Heidelberg

Prof. Dr. Edmund Koch,
Klinisches Sensoring und Monitoring,
TU Dresden

Prof. Dr.-Ing. Tim C. Lüth
Micro Technology
and Medical Device Technology,
TU München

Prof. Dr. Dietrich Paulus
Institut für Computervisualistik,
Universität Koblenz-Landau

Prof. Dr. Bernhard Preim
Institut für Simulation und Graphik,
Universität Magdeburg

Prof. Dr.-Ing. Georg Schmitz
Lehrstuhl für Medizintechnik,
Universität Bochum

Janine Olesch

Bildregistrierung für die navigierte Chirurgie

Spezialisierte Ansätze zur
Anwendung in der navigierten
Leberchirurgie

Janine Olesch
Fraunhofer MEVIS Projektgruppe Bildregistrierung
Lübeck, Deutschland

Dissertation Universität zu Lübeck, 2013

ISBN 978-3-658-05654-4

ISBN 978-3-658-05655-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-658-05655-1

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer Fachmedien Wiesbaden 2014

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.springer-vieweg.de

Vorwort des Reihenherausgebers

Das Werk *Bildregistrierung für die navigierte Chirurgie. Spezialisierte Ansätze zur Anwendung in der navigierten Leberchirurgie* von Dr. Janine Olesch ist der 10. Band der Reihe exzellenter Dissertationen des Forschungsbereiches Medizintechnik im Springer Vieweg Verlag. Die Arbeit von Dr. Olesch wurde durch einen hochrangigen wissenschaftlichen Beirat dieser Reihe ausgewählt. Springer Vieweg verfolgt mit dieser Reihe das Ziel, für den Bereich Medizintechnik eine Plattform für junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zur Verfügung zu stellen, auf der ihre Ergebnisse schnell eine breite Öffentlichkeit erreichen. Autorinnen und Autoren von Dissertationen mit exzellentem Ergebnis können sich bei Interesse an einer Veröffentlichung ihrer Arbeit in dieser Reihe direkt an den Herausgeber wenden:

Prof. Dr. Thorsten M. Buzug
Reihenherausgeber Medizintechnik

Institut für Medizintechnik
Universität zu Lübeck
Ratzeburger Allee 160
23562 Lübeck

Web: www.imt.uni-luebeck.de
Email: buzug@imt.uni-luebeck.de

Geleitwort

Die Registrierung medizinischer Bilder bildet eine Schlüsseltechnologie im Bereich der medizinischen Bildverarbeitung, in der anspruchsvolle Methoden und Techniken der Bildverarbeitung, Informatik und Mathematik in Kombination eingesetzt werden. Wesentliches Ziel der Bildregistrierung ist es, zwei Bilddatensätze so zu transformieren, dass korrespondierende Bildstrukturen aufeinander abgebildet werden. Bildregistrierungsverfahren können somit insbesondere in der Medizin eingesetzt werden, um verschiedene Bilder eines oder mehrerer Patienten gemeinsam darzustellen und im direkten Vergleich analysieren zu können.

In dem vorliegenden Buch werden Registrierungsverfahren im Kontext der computerassistierten Chirurgie mit Fokus auf die navigierte Leberchirurgie vorgestellt. Die entwickelten Registrierungsverfahren sollen den Chirurgen bei der Operation von Lebertumoren unterstützen, die zu den weltweit häufigsten Krebserkrankungen gehören. Kernaufgabe ist hierbei aus methodischer Sicht, eine nicht-lineare Registrierung der präoperativen Computertomographie- (CT) und der intraoperativen Ultraschallaufnahmen der Leber eines Patienten anhand der Blutgefäße vorzunehmen.

Das Anwendungsszenario der entwickelten Verfahren sieht wie folgt aus: Vor einer Intervention an der Leber wird eine 3D-Operationsplanung auf der Grundlage eines drei-dimensionalen CT-Bilddatensatzes durchgeführt. Hierzu werden die vor der Operation akquirierten CT-Bilder durch Bildverarbeitungsverfahren so aufbereitet, dass die Lebergefäßbäume, die zu entfernenden Tumore und die geplanten Resektionen dreidimensional dargestellt werden können. Sobald die Operation startet und der Situs geöffnet wird, stimmen die CT-basierten 3D-Planungen jedoch nicht mehr mit der Realität im Operationssaal überein. Mithilfe von intraoperativ gewonnenen Ultraschallbildern kann die veränderte Situation erfasst werden. Um die wichtigen CT-basierten Planungsdaten während der Operation verwenden zu können, wird die entwickelte Anpassung der

präoperativen CT-Bilddaten und des zugehörigen Operationsplans an die die intraoperativ gewonnenen Ultraschallbilddaten eingesetzt. Hierdurch soll ermöglicht werden, in Zukunft auch solche Tumore operieren zu können, welche bislang als inoperabel gelten.

Die medizinische Problemstellung birgt große methodische Herausforderungen: Zum einen ist die vorliegende Problemstellung multi-modal, das heißt, dass Bilddaten unterschiedlicher Bildgebungsgeräte, die sich durch stark unterschiedliche Darstellungen der Leberstrukturen auszeichnen, miteinander registriert werden müssen. Zum anderen müssen die verwendeten Verfahren nicht nur robust, sondern auch schnell sein, damit sie während der Operation in der Praxis Anwendung finden können. Frau Olesch stellt in ihrem Buch Bildregistrierungsverfahren vor, mit deren Hilfe im intra-operativen Kontext eine Anpassung und Nachführung der CT-Planungsdaten an die intraoperative Situation möglich wird. Hier werden interessante Methoden zur Einbeziehung korrespondierender Landmarken in den präoperativ erstellten CT-Bilddaten und den intraoperativ generierten Ultraschallbilddaten in den Registrierungsprozess vorgestellt. Zur Kompensation der starken Grauwertunterschiede in den Ultraschall- und CT-Bildern wird hierbei vorab eine Segmentierung der Gefäße vorgenommen und die Registrierung anhand der segmentierten Gefäßbäume durchgeführt. In diesen Gefäßbäumen bilden insbesondere die Verzweigungen anatomisch ausgezeichnete Punkte in beiden Bilddatensätzen, die als Landmarken bezeichnet werden.

Systematisch beschreibt Frau Olesch verschiedene Registrierungsansätze zur Integration von Zusatzinformation über korrespondierende Landmarkenpaare. Nach der Darstellung rein landmarkenbasierter Verfahren stellt sie die entwickelten hybriden Registrierungsverfahren vor, bei denen intensitätsbasierte Registrierungsverfahren um Landmarkenbedingungen erweitert werden. Als interessante und wichtige Weiterentwicklung der hybriden Ansätze präsentiert Frau Olesch die hybride Registrierung mit ungenauen Landmarkenpositionen. Diese Methode ist für die adressierte intraoperative Anwendung von Bedeutung, da hier in den Ultraschallbildern von den Chirurgen interaktiv gesetzte Landmar-

ken häufig Ungenauigkeiten aufweisen. Hier ermöglicht der vorgestellte Ansatz die explizite Berücksichtigung anisotroper Ungenauigkeiten der Landmarkenpositionen bei der Bildregistrierung. Hierbei wurden über 3D-Ultraschallbilddaten hinaus auch getrackte 2D-Ultraschallsequenzen mit den CT-Bilddaten registriert, die in der navigierten Leberchirurgie häufig eingesetzt werden. Bei der Volume-to-Slice-Registrierung wird eine interessante Methode zur Reduktion der 2D-Ultraschallschichten auf ausgewählte, bedeutsame Schichten vorgestellt, wodurch eine starke Beschleunigung der Registrierungsverfahren möglich wurde, ohne die Registrierungs-genauigkeit zu verringern. Hervorzuheben sind des Weiteren die entwickelten Fokussierungsstrategien, durch die die Registrierung mit hoher Genauigkeit auf einen chirurgisch wichtigen Bereich fokussiert und so eine weitere Beschleunigung erzielt wird. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Registrierungsalgorithmen für die intraoperative Anwendung entwickelt wurden, von Bedeutung. Die in dem Buch vorgestellten Registrierungsverfahren und ihre mathematischen Grundlagen werden ausführlich und anschaulich erläutert. Das vorliegende Buch ist daher nicht nur für Wissenschaftler mit Interesse an aktuellen Methoden der Medizinischen Bildregistrierung in der computerassistierten Chirurgie sehr zu empfehlen, sondern durchaus auch für Leser interessant, die einen ersten fundierten Einblick in die mathematischen Methoden und Verfahren im Gebiet der Medizinischen Bildregistrierung gewinnen wollen. Betreut wurde Frau Olesch in ihrer Promotionszeit von Prof. Dr. rer. nat. Bernd Fischer, der zu unserem großen Bedauern nach kurzer, schwerer Krankheit im Juli 2013 verstarb.

Prof. Dr. Heinz Handels
Institut für Medizinische Informatik
Universität zu Lübeck

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung Navigierte Leberchirurgie	5
2.1	Motivation	5
2.2	Funktionelle Anatomie der Leber	7
2.3	Leberresektionen	9
2.4	Navigierte Chirurgie	11
3	Medizintechnische Grundlagen	19
3.1	Computertomografie	20
3.1.1	Funktionsweise	20
3.1.2	CT der Leber	24
3.2	Sonografie	26
3.2.1	Funktionsweise	26
3.2.2	Schallköpfe	28
3.2.3	Typische Artefakte	29
3.2.4	Dopplersonografie	30
3.2.5	3D-Ultraschall-Techniken	31
3.3	Trackingsysteme	34
3.3.1	Grundlagen	34
3.3.2	Trackingtechnologien	35
4	Grundlagen der numerischen Optimierung	39
4.1	Allgemeine Grundlagen	40
4.2	Unrestringierte Optimierung	41
4.2.1	Optimalitätskriterien	42
4.2.2	Algorithmen zur Bestimmung lokaler Optimierer	43
4.3	Restringierte Optimierung	54
4.3.1	Algorithmen zur Optimierung mit Nebenbedingungen - Quadratische Penaltyfunktion	57

4.3.2	Optimalitätskriterien für restringierte Minima . . .	59
4.3.3	Algorithmen zur Optimierung mit Nebenbedingungen - Augmented Lagrangefunktion	61
5	Grundlagen der Bildregistrierung	73
5.1	Gitter und Interpolation	75
5.1.1	Gitter	76
5.1.2	Interpolation	81
5.2	Distanzmaße	88
5.2.1	Diskretisierung der Distanzmaße	92
5.3	Parametrische Registrierung	97
5.3.1	Affin-lineare Transformationen	97
5.4	Nicht-parametrische Registrierung	107
5.4.1	Regularisierer	110
5.4.2	Messung der Registrierungsgüte	118
5.4.3	Wahl des Regularisierungsparameters α	122
5.4.4	Anzahl der Deformationspunkte	131
5.4.5	Nicht-parametrische Multilevel Registrierung . . .	136
6	Spezialisierte Registrierungsansätze	143
6.1	Landmarken	144
6.1.1	Registrierung mit exakten Landmarken	149
6.1.2	Landmarken mit Unsicherheiten	170
6.1.3	Auswirkungen fehlerhafter Landmarken	182
6.2	Mechanismen zur Beschleunigung und Steigerung der Robustheit	188
6.2.1	Multiskalenansatz	190
6.2.2	Fokussierung	195
6.3	2D-3D-Registrierung	199
6.3.1	Volume-to-Slice Registrierung	201
7	Anwendungen in der navigierten Leberchirurgie	211
7.1	3D CT - 3D Ultraschall Registrierung	212
7.1.1	Datenlage	212

7.1.2	Landmarkenbasierte Registrierung für die navigierte Leberchirurgie	215
7.2	3D CT - 2D Ultraschall Registrierung	233
7.2.1	Datenlage	233
7.2.2	Fokussierte Volume-To-Slice-Registrierung	235
7.2.3	Bewertung der erzielten Ergebnisse	238
8	Fazit	249
	Literaturverzeichnis	253
	Danke	265

Einleitung

Die vorliegende Arbeit beschreibt spezialisierte Registrierungsansätze zur Verwendung in der navigierten Leberchirurgie.

Primäre und sekundäre Lebertumore gehören zu den weltweit häufigsten Krebserkrankungen. Die einzige anerkannte kurative Therapieform ist die chirurgische Resektion. [Gassmann & Lang, 2012, Kleemann, 2009].

Je nach Lage und Größe des Tumors in der Leber wird eine Operationsplanung zur Resektion durchgeführt. Die vor der Operation akquirierten, computertomografischen Bilddaten werden digital aufbereitet, um Lebergefäßbäume und die zu entfernenden Tumore zu visualisieren. Teil dieser Operationsplanung können auch eine Risiko-Abschätzung zum Beispiel in Bezug auf das verbleibende Restvolumen sowie Vorschläge für Schnittebenen des Chirurgen sein.

Problematisch ist jedoch: Sobald die Operation startet und der Situs geöffnet wird, stimmen die aufbereiteten Planungsdaten nicht mehr mit der Realität überein.

Um die Planungsdaten dennoch verwenden zu können, muss eine Anpassung an die intra-operative Situation erfolgen.

In vielen Fällen gelingt diese Anpassung rein durch die Vorstellungskraft des Chirurgen mit Hilfe der Ultraschallbildgebung oder durch haptisches Feedback tastbarer Tumore. Bei schwieriger zu operierenden Tumoren, zum Beispiel nah an wichtigen hepatischen Gefäßen oder auch bei Minimal-Invasiven Eingriffen, gibt es den Wunsch nach einer visuellen Unterstützung. [Kleemann, 2009].

Das Ziel ist es, dadurch auch solche Tumore operabel zu machen, welche mit den bisherigen Techniken inoperabel waren.

Genau hier setzt die vorliegende Dissertation an: Wir werden Verfahren vorstellen, mit deren Hilfe im intra-operativen Kontext eine Nachführung der Planungsdaten an die intra-operative Situation gelingt.

Es wurden bereits eine Reihe von Verfahren beschrieben, welche eine Nachführung von intra-operativem Ultraschall und prä-operativen CT-Planungsdaten unterstützen. Ansätze zur affinen oder rigiden Anpassung der Planungsdaten finden bereits Verwendung. Es hat jedoch unseres Wissens bisher noch kein Verfahren die Klinik erreicht, welches eine korrekte nicht-lineare Anpassung der Planungsdaten an die intra-operative Situation erlaubt.

Diese Arbeit beschreibt eine Reihe von spezialisierten Verfahren, welche Lösungen für die herrschenden Probleme der Genauigkeit, Robustheit und Geschwindigkeit von nicht-linearen Verfahren im intra-operativen Einsatz anbieten.

Der eigene wissenschaftliche Beitrag im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird im Abschnitt der spezialisierten Verfahren beschrieben. Hier werden einige auf die Problemstellung zugeschnittene Techniken vorgestellt, welche die Lösung der intra-operativen Navigation ermöglichen.

Ein wesentlicher eigener Beitrag wird in der Entwicklung von exakten, beziehungsweise inexacten Punkt zu Punkt-Beziehungen geleistet. Durch Letztere wird der Einsatz von landmarkenbasierten Verfahren im intra-operativen Kontext erst ermöglicht. Das bedeutet, dass korrespondierend zu Landmarken, die beispielsweise schon in der Planungsphase im CT-Datensatz markiert wurden, intra-operativ keine exakten Korrespondenzen markiert werden müssen. Dies wäre ohnehin aufgrund der Auflösung von Ultraschallsystemen gar nicht möglich. Stattdessen muss der korrespondierende Punkt nur noch einem Bereich um die eigentliche Landmarke markiert werden.

Auch zur Lösung eines weiteren, häufig im Kontext von navigierter Chirurgie vorliegenden Registrierungsproblems wird ein Verfahren vorgestellt. Das Szenario hier ist das folgende: Serien intra-operativ akquirierter und getrackter 2D-Ultraschallbilder sollen zur Nachführung von 3D-CT-Volumen genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit haben wir

durch Kombination verschiedener Strategien ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht diese Daten mit Hilfe spezialisierter Ansätze ohne eine vorherige Rekonstruktion sehr schnell registrieren zu können.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt: Wir beginnen zunächst mit einem Überblick über die klinische Problemstellung. Daran anschließend betrachten wir die verwendeten Technologien im Bereich der Bildgebung und des Trackings. Nachfolgend führen wir die für die Problemstellung benötigten Grundlagen der numerischen Optimierung sowie die verwendeten Konzepte der Bildregistrierung ein, die wir für die spezialisierten Verfahren benötigen.

Im Anschluss daran beschreiben wir die bereits erwähnten spezialisierten Ansätze und führen in einem letzten Abschnitt retrospektiv Versuche auf klinischen Daten durch.

Problemstellung Navigierte Leberchirurgie

Inhalt

2.1	Motivation	5
2.2	Funktionelle Anatomie der Leber	7
2.3	Leberresektionen	9
2.4	Navigierte Chirurgie	11

2.1 Motivation

Ein Anwendungsgebiet der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren ist der Bereich der navigierten Leberchirurgie. Dazu wollen wir an dieser Stelle einen kurzen Blick auf die medizinische Problemstellung werfen sowie unterschiedliche, chirurgische Eingriffe zur Leberresektion vorstellen. In einem letzten Absatz beleuchten wir die Anforderungen an Navigationssysteme im Bereich der navigierten Leberchirurgie und stellen exemplarisch drei unterschiedliche Systeme vor.

Eine Leberresektion, also das operative Entfernen eines Teils der Leber, kann aufgrund verschiedener Erkrankungen der Leber erforderlich werden. Die Fälle, die im Anwendungsteil dieser Arbeit betrachtet werden, sind Tumor-Erkrankungen der Leber.

Primäre und sekundäre Lebertumore stellen mit jährlich mehr als 5 Millionen neu auftretenden Fällen weltweit eine Erkrankung mit hoher klinischer Relevanz dar. Im Gegensatz zu den sekundären Tumoren (Lebermetastasen anderer Tumoren) sind primäre Lebertumoren in Europa seltener, in den südostasiatischen jedoch Ländern sehr häufig [Bettag et al., 2010].

Da die Leber im Organismus als Filter für Zellen aus dem Blutkreislauf dient, kann jede Art von Krebs zu Leberkrebs führen. In der Leber können diese Zellen wachsen und zu Tumoren werden. Schätzungen zufolge entstehen bei 70% aller Menschen mit unbehandeltem Krebs früher oder später sekundäre Lebertumore oder Metastasen. Metastasen sind Tumore, die durch primäre Krebszellen aus anderen Tumoren entstehen. Bei Vorliegen nonkolorektaler Lebermetastasen, also Metastasen, die nicht aus dem Darmkrebs stammen, ist noch unklar ob die Resektion hier auch die beste Therapieform ist.

Das kolorektale Karzinom, also Darmkrebs, ist die zweithäufigste maligne Todesursache in den westlichen Ländern [Hamady et al., 2004]. Bei Vorhandensein dieser Karzinome ist in 40 – 60% der Fälle mit Fernmetastasen zu rechnen. In 80% der Fälle handelt es sich dabei um Lebermetastasen [Grünberger et al., 2008].

Die chirurgische Resektion von kolorektalen Karzinomen der Leber ist bis heute die einzige anerkannte kurative Therapieform [Bechstein, 2007, Fong et al., 1999]. Circa 30 – 50% der behandelten Patienten bilden allerdings nach Resektion kolorektaler Karzinome erneut Metastasen in der Leber. In diesem Fall müsste dann eine Re-Resektion erfolgen. Als mögliche Ursachen werden fehlerhafte Resektionsgrenzen oder nicht erkannte Metastasen in der Restleber genannt [Grünberger et al., 2008]. Bei Vorliegen nonkolorektaler Lebermetastasen, also Metastasen, die nicht aus dem Darmkrebs stammen, ist noch unklar, ob die Resektion hier auch die beste Therapieform ist. Aufgrund der Inhomogenität der Patienten und der unterschiedlichen Tumoren ist eine allgemeingültige Aussage hier nur schwer möglich [Klempnauer & Lehner, 2008]. Seit

einigen Jahren ist zusätzlich die interventionelle Tumorablation als Therapieoption zur Behandlung von Lebermetastasen hinzugekommen. Auch dieser wird ein kuratives Potential zugesprochen [Golling et al., 2006]. Die bei anderen Krebsarten erfolgsversprechenden Chemo- oder Bestrahlungstherapien sind bei Leberkrebs typischerweise nicht kurativ [Schenk et al., 2011].

Im Rahmen dieser Dissertation wurden sowohl Verfahren für die konventionelle, offene Leberchirurgie als auch für die Laparoskopische, minimal-invasive Leberchirurgie entwickelt. Für beide Resektionstechniken, also die konventionelle und die laparoskopische Resektion hängt der Therapieerfolg wesentlich von

- der Sicherung eines tumorfreien Resektionsrandes (R_0 -Resektion),
- der Maximierung des funktionellen Restvolumens des verbleibenden Leberparenchyms

ab. Weiteres zentrales Ziel, welches zum Therapieerfolg beiträgt, ist die Minimierung des Patiententraumas.

Zur Sicherstellung dieser Kriterien ist eine genaue Kenntnis des funktionellen, anatomischen Aufbaus der Leber erforderlich [Bismuth, 1982, Blumgart & Belghiti, 2000, Vauthey et al., 2000].

2.2 Funktionelle Anatomie der Leber

Die *klassische* beschreibende Anatomie der Leber stützt sich auf die äußerlich sichtbaren Merkmale der Leber. Für die Planung einer Leberresektion ist jedoch die funktionelle Anatomie von Interesse. Basierend auf der funktionellen Gefäß-Anatomie der Leber lässt sich diese nach Couinaud [Couinaud, 1957] in acht Segmente unterteilen. Diese Segmente sind funktionell voneinander unabhängig und jedes dieser Segmente lässt sich behandeln, oder auch entfernen, ohne die anderen Segmente zu beeinträchtigen. Durch die Verzweigungen der Portalgefäße und die

dazwischenliegenden Lebervenen, Arterien und Gallengänge wird die Leber in ihre Segmente unterteilt. Abbildung 2.1 zeigt eine Darstellung der Portalgefäße (grau), Lebervenen (gelb) und Arterien (rot). Jedes Segment besitzt jeweils einen eigenständigen portalvenösen Zufluss [Lang & Schenk, 2011]. Mittlerweile hat sich die Sicht über die von Couinaud vorgeschlagene Einteilung in die Segmente geändert. Man geht nicht mehr von acht, sondern von deutlich mehr Segmenten aus [Fasel, 2008, Fasel et al., 2010].

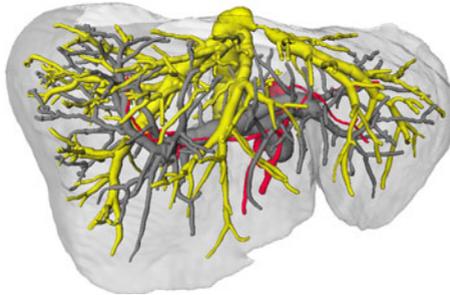


Abbildung 2.1: Visualisierung der Portalgefäße (grau), Lebervenen (gelb) und Arterien (rot) einer durch MeVis Medical Solutions segmentierten Patientenleber.

Das Modell von Couinaud nimmt an, dass die Aufteilung der intrahepatischen, also der Gefäße im Inneren der Leber, einer Regel folgt. Tatsächlich weiß man aber heute aus anatomischen und radiologischen Untersuchungen, dass diese Regelmäßigkeit nur eine idealisierte schematische Einteilung darstellt. Hinsichtlich Größe als auch Anzahl der Segmente existieren zahlreiche Variationen. Die auf der Leberoberfläche vorhandenen Orientierungspunkte, wie zum Beispiel die Portalfissuren, haben für den Resektionseingriff untergeordnete Bedeutung, da die darunterliegenden Gefäßsysteme die Lebersegmente bestimmen. Aus diesem Grund ist zur Durchführung einer Leberresektion eine patientenindividuelle Resektionsplanung basierend auf den vorhandenen Gefäßsystemen erforderlich. Im Rahmen des FUSION-Projektes wurde diese patientenindividuelle

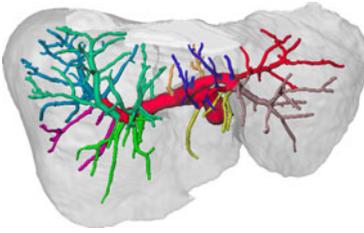
Resektionsplanung von der Firma MeVis Medical Solutions (MMS) erstellt. Abbildung 2.2 zeigt beispielhaft die bestimmten Lebersegmente, in Abhängigkeit der beiden venösen und des arteriellen Gefäßsystems, im Rahmen der Planung. Insgesamt beinhaltet die Planung nicht nur die Einteilung der Leber in ihre Segmente, sondern auch Vorschläge zur Resektion und basierend darauf durchgeführte Risikoanalysen [Schenk et al., 2011]. Für eine nicht vorgeschädigte Leber gilt als Richtwert, dass etwa 25 – 30% des funktionellen Restvolumens erhalten bleiben muss [Lang & Schenk, 2011], beziehungsweise 1% der Körpermasse [Castaing et al., 2007].

2.3 Leberresektionen

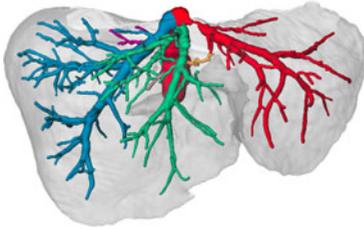
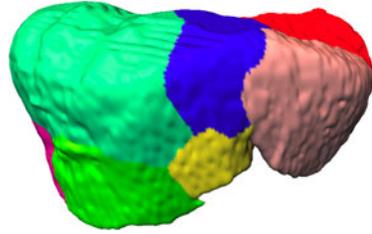
Zur Resektion von Tumoren der Leber werden unterschiedliche Verfahren genutzt. Die drei häufigsten Verfahren werden nachfolgend kurz beschrieben.

Offene Leberchirurgie Bei der klassischen, offenen Leberchirurgie erfolgt die Öffnung der Bauchdecke durch einen großen Schnitt. Auf diese Weise können große Werkzeuge zur Resektion verwendet und auf mögliche Komplikationen, wie zum Beispiel Blutungen schnell und adäquat reagiert werden. Auch kann der Chirurg während der Intervention die Lage der Tumore mit seinen Händen ertasten [Castaing et al., 2007].

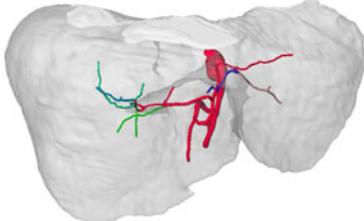
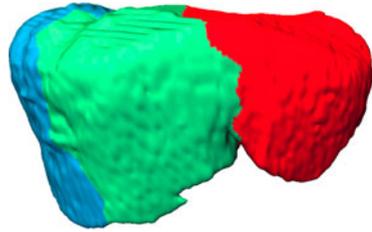
Laparoskopische Leberchirurgie Für die laparoskopische Chirurgie sind nicht alle Tumore der Leber gleichermaßen geeignet. Vor allem kleine Tumore in den linkslateralen Segmenten und den anterioren Segmenten des rechten Leberlappens sind für den minimal-invasiven Zugang prinzipiell geeignet [Kleemann, 2009]. Die Vorteile des minimal invasiven Eingriffs sind die folgenden: Das Patiententrauma ist im Vergleich zum offenen Eingriff reduziert und der Krankenhausaufenthalt verkürzt [Kleemann, 2009]. Zur laparoskopischen Leberchirurgie nutzt man drei bis vier kleine Zugänge.



Portalvenöses Gefäßsystem



Venöses Gefäßsystem



Arteriell Gefäßsystem

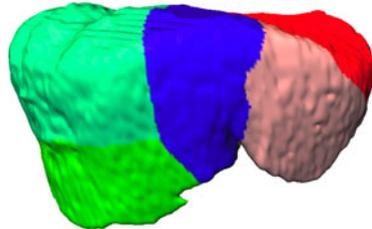


Abbildung 2.2: Beispielhafte Planungsdaten der Firma MeVis Medical Solutions, Bremen. Zu sehen sind die Segmentierungen der einzelnen Gefäßsysteme und die farbliche Codierung der abgeleiteten Segmente.

Neben den Operationsinstrumenten werden diese auch für das Einführen von Licht und Kameras verwendet. Um in der Bauchhöhle arbeiten zu können, wird diese mittels CO_2 -Gas aufgeblasen.

Ablation Bei der Radiofrequenz-Ablation (RFA) wird unter Kontrolle von Ultraschall und/oder Computertomografie eine Nadel in die

Leber des Patienten eingeführt, über deren Spitze elektromagnetische Wellen in das Gewebe abgegeben werden. Dadurch wird das betroffene Gewebe zerstört. Alternative zur RFA ist die Laserinduzierte Thermoablation (LITT). Hier bringen Lichtwellenleiter in Verbindung mit speziellen Applikatoren hohe Energiemengen in eine Zielregion ein [Lehmann & Weihusen, 2011]. Ablationsverfahren gewannen in den letzten ca. 15 Jahren an Bedeutung. Im Gegensatz zur Resektion ist allerdings nach erfolgter Ablation keine histologische Untersuchung möglich und damit auch nicht die Sicherstellung der vollständigen Tumorzerstörung. Bisher gibt es noch keine Studie, die nachweist, dass die beschriebene Ablation als potenziell kuratives Verfahren bei kolorektalen Metastasen geeignet ist, jedoch deuten einzelne Beobachtungsstudien darauf hin [Lehmann & Weihusen, 2011].

In dieser Arbeit werden Verfahren mit Fokus auf die Resektionsverfahren vorgestellt. Prinzipiell sind die Methoden aber auch zur Unterstützung der navigierten RFA geeignet.

2.4 Navigierte Chirurgie

Das Ziel der navigierten Leberchirurgie ist es, dem Chirurgen während der Intervention einen genauen Überblick über den intra-operativen Situs zu ermöglichen. Da die Leber, wie eingangs schon festgestellt, über nur wenig äußere Landmarken mit Aussagekraft über das Gefäßsystem in der Leber verfügt, soll dem Chirurgen während der Operation die Operationsplanung als Hilfestellung dienen. Die alleinige Visualisierung der Planungsdaten, wie sie prä-operativ erzeugt wurden reicht hier allerdings nicht, da sich die Leber nach Öffnung des Situs und vor allem nach ihrer Mobilisation stark deformiert. Idee der auch im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren ist es, die Planungsdaten der Leber an die aktuelle, intra-operative Situation anzupassen, um dem Chirurgen eine Hilfestellung zu geben. Intra-operativ ist es bis heute in der Leberchirurgie Standard, die Gefäßsysteme und die vorhandenen Tumore

in der Leber mittels Ultraschall darzustellen. Bei den nicht-navigierten Eingriffen, vor allem im Abdomen, erfolgt eine Navigation ausschließlich über die Ultraschallbildgebung. Diese ist jedoch gerade dort häufig nicht ausreichend. Im Abdomen liegen weiche, verformbare Strukturen vor, die eine präzise intra-operative Lokalisation eines Tumors nicht immer erlaubt [Preim & Rode, 2011].

Hier setzen die computerassistierten, navigierten Verfahren an.

2.4.0.1 Navigationssysteme

Das Ziel computergestützter Navigationssysteme ist es, dem Chirurgen intra-operative Hilfestellung bei der Durchführung bestimmter Interventionen zu geben. In den von uns betrachteten Systemen wird dies über die zur Verfügungstellung angepasster prä-operativer Planungsdaten realisiert. Diese Planungsdaten sollen mit den in dieser Arbeit entwickelten Verfahren im Bereich der navigierten Leberchirurgie nicht nur visualisiert, sondern auch an den aktuellen Status der Operation angepasst (nachgeführt) werden. Beller et al. formulieren in [Beller et al., 2011] die Anforderungen an ein ideales System wie folgt:

Ein **ideales Navigationssystem** unterstützt die Arbeit des Operateurs durch zusätzliche Informationen, ohne den konventionellen Ablauf der Intervention zu behindern.

Im Bereich der Neurochirurgie und auch der orthopädischen Chirurgie sind Navigationssysteme in der chirurgischen Anwendung längst etabliert [Vetter et al., 2001]. Das erste Navigationssystem zur neurochirurgischen Navigation gab es bereits 1980 [Jaques et al., 1980].

Die Anforderungen zur Navigation in der Leberchirurgie wurden von Vetter et al. in [Vetter et al., 2001] untersucht. In Zusammenarbeit mit Leberchirurgen aus Heidelberg, München und Mainz wurden sie erarbeitet. Ein Ergebnis war, dass die Erwartungen an ein Navigationssystem bei offener oder laparoskopischer Operationstechnik sehr unterschiedlich

sind: Während die Navigationssysteme in der offenen Leberchirurgie vor allem für tief liegende Tumore gewünscht werden - da oberflächennahe Tumore auch ertastet werden können, ist die Anforderung für die laparoskopischen Eingriffe den fehlenden Tastsinn während der Intervention durch das Navigationssystem auszugleichen. Die Hoffnung ist, dass es durch die Navigation ermöglicht wird, mehr Tumore als bisher für den Patienten schonend auch laparoskopisch zu entfernen.

Die Gründe für den Einsatz von Trackingsystemen in der Viszeralchirurgie (Bauchchirurgie) insgesamt sind vielseitig. Kleemann et al. formulierten in [Kleemann et al., 2005] die folgenden Ziele:

- Steigerung der Zielgenauigkeit,
- kleinerer Zugangsweg,
- Übertragung prä-operativer Planungsdaten,
- Semi-Automation von Operationsschritten,
- Kameraführung,
- zielgenaue Kombination endoskopisch-laparoskopischer Eingriffe,
- Simulation und
- Ausbildung.

Wir möchten uns in dieser Arbeit auf den Aspekt der Übertragung der prä-operativen Planungsdaten beschränken. Mittels getrackter Ultraschallsonden werden 2D oder 3D-Ultraschalldaten akquiriert (mehr zu Ultraschall siehe Abschnitt 3.2). Die Anpassung der Planungsdaten erfolgt über einen oder mehrere Bildregistrierungsschritte (mehr dazu im Abschnitt 5).

Durch die Verwendung der Ultraschallbildgebung zur Navigation ist es möglich, dass weitere Metastasen während der OP gefunden werden. In diesem Fall ist es möglich, diese neuen Metastasen in eine erneute Operationsplanung einfließen zu lassen, um dem Chirurgen einen aktualisierten Vorschlag zur Resektion zu unterbreiten. Gleichzeitig kann nochmals

das Volumen der verbleibenden funktionellen Leber bestimmt werden, um das Risiko neu abzuschätzen. In circa 10 – 25% der Interventionen kann davon ausgegangen werden weitere bisher unbekannte Läsionen zu finden [Kleemann, 2009].

In diesem Abschnitt möchten wir die verfügbaren Navigationssysteme lediglich kurz beschreiben, um generelle Möglichkeiten aufzuzeigen. Für diese Arbeit standen Daten von insgesamt drei verschiedenen Systemen zur Verfügung. Die Daten wurden sowohl in offenen als auch in laparoskopischen Interventionen akquiriert.

Zusätzlich zu den getrackten Ultraschallsonden stehen intra-operativ auch getrackte Zeiginstrumente, bzw. getrackte Schneidewerkzeuge zur Verfügung, die dem Chirurgen zusätzlich eine Orientierung im Inneren der Leber in Bezug auf die Planungsdaten ermöglichen. Daten dieser Instrumente fließen nicht in die Algorithmen ein, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind.

Die Darstellung der gewonnenen Informationen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Bei laparoskopischen Eingriffen ist es denkbar die Planungsdaten im Sinne einer Augmented Reality direkt über dem Kamerabild dazustellen [Preim & Bartz, 2007, Schlichting, 2008]. Alternativ können auch hier, die Planungsdaten mit den intra-operativen Daten in einem eigenen Bildschirmfenster überlagert werden.

Eine Übersicht verschiedener chirurgischer Navigationssysteme findet sich in [Beširević et al., 2007] und in [Cleary & Peters, 2010]. Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Navigationssysteme sind die folgenden:

LapAssistent: Für laparoskopische Interventionen im Rahmen des FUSION-Projekts durch das Institut für Robotik, der Universität zu Lübeck sowie die Klinik für Chirurgie am Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Lübeck entwickelt. Eine Übersicht über die Funktionalität bieten [Martens et al., 2010] sowie [Schlichting, 2008]. Das System verwendet elektromagnetisches Tracking zur Positionsbestimmung einer getrackten 2D-Ultraschallsonde. Die Abbildungen (a) und (b) aus Abbildung 2.3 zeigen ein Foto des

gesamten Systems sowie einen Screenshot der Benutzeroberfläche. Diese enthält neben dem Bild der laparoskopischen Kamera ein Fenster zur Visualisierung der Ultraschalldaten und ein Fenster zur gemeinsamen Visualisierung der Planungsdaten mit den Ultraschalldaten. Das System kann ebenfalls verwendet werden für die Durchführung einer Radio-Frequenz-Ablation.

CAS-One: Ein kommerziell erhältliches Navigationssystem der Firma CAScination, welche eine Ausgründung der Universität Bern ist. Das System, welches mit einem optischen Trackingsystem ausgestattet ist, bietet Unterstützung für die offene Leberchirurgie oder auch die Radio-Frequenz-Ablation. Wie auch beim LapAssistent wird hier die intra-operative Bildgebung über 2D Ultraschall realisiert. Detailliert beschrieben wird das System auf der Webseite <http://www.cascination.ch/home.html> oder auch [Peterhans et al., 2011].

Forschungssystem der Charité Berlin: Das System, welches an der Charité in Berlin entwickelt wurde, ist für den Einsatz im Bereich der offenen Leberchirurgie konzipiert und derzeit noch nicht kommerziell erhältlich [Beller et al., 2007]. Es kombiniert das optische Trackingsystem Polaris von NDI mit dem 3D-Ultraschall-System *Voluson 730* von GE Healthcare. Anders als in den zwei zuvor beschriebenen Systemen erfolgt die Navigation hier in den aufbereiteten 3D-Ultraschall-Daten. Die CT-Planungsdaten werden parallel für eine bessere Orientierung dargestellt. Analog zu den anderen Systemen zeigt die Abbildung 2.3 in den Abbildungen (c) und (d) das System und zusätzlich einen Eindruck der Benutzeroberfläche.

Sowohl der LapAssistent als auch das Navigationssystem CAS-One bieten ein Daten-Interface zu den Planungsdaten, welche von MeVis Medical Distant Services aus den Planungs-CT-Aufnahmen erstellt werden.

Die Planungsdaten enthalten die Segmentierung der Leber und ihrer Gefäßsysteme sowie eventueller Tumore, eine Risiko-Analyse für Resektionen unter Berücksichtigung von Sicherheitsabständen, die Erstellung

virtueller Resektionsvorschläge basierend auf der patientenspezifischen Anatomie und umfassende Berichte einschließlich einer interaktiven 3D Visualisierung der Ergebnisse.

Zu den Verfahren der Bildregistrierung und den im Speziellen für diese Problemstellungen entwickelten Registrierungsverfahren werden wir in den Abschnitten 5 und 6 kommen. Grundlagen zu den genannten Bildgebungsmodalitäten und Trackingtechnologien betrachten wir im Abschnitt 3 über die medizintechnischen Grundlagen.



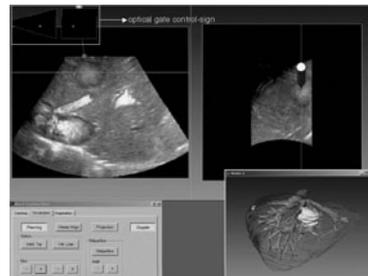
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 2.3: Fotos und Screenshots von zwei der verwendeten Navigationssysteme. In den Abbildungen (a) und (b) ist der LapAssistent sowie ein Screenshot der Navigationsoberfläche zu sehen. ^a Die Abbildungen (c) und (d) zeigen das Navigationssystem, welches in Berlin im Einsatz ist. ^b

^aAbdruck der Bilder mit freundlicher Genehmigung von Armin Besirevic und Volker Martens, Institut für Robotik, Universität zu Lübeck.

^bDer Abdruck der Bilder von Thomas Oberländer erfolgen mit freundlicher Genehmigung von Thomas Lange und Prof. Peter M. Schlag, Charité Comprehensive Cancer Center, Charité - Universitätsmedizin Berlin.