Visualisierungs- und Interaktionstechniken zur Entscheidungsunterstützung in der präoperativen Planung

Bernhard Preim[1], Wolf Spindler[1], Karl J. Oldhafer[2], Heinz-Otto Peitgen[1]

[1]MeVis – Centrum für Medizinische Diagnosesysteme und Visualisierung,
Universitätsallee 29, 28359 Bremen, Email: {preim, spindler, peitgen}@mevis.de
[2]Universitätsklinikum Essen, Klinik für Allgemein- und Transplantationschirurgie
Hufelandstr. 55, 45122 Essen, Email: karl.oldhafer@uni-essen.de

Zusammenfassung. Wir präsentieren den SURGERYPLANNER, mit dem auf der Basis patientenindividueller Daten die Operabilität von Patienten abgeschätzt werden kann. Der SURGERYPLANNER integriert Visualisierungsverfahren und Techniken zur Manipulation von Volumendaten, mit denen die Operationsplanung unterstützt wird. Dieses System basiert auf den bei MEVIS entwickelten Verfahren zur Organ- und Tumorsegmentierung sowie zur Gefäßsegmentierung und -analyse. Es ermöglicht die Exploration der zuvor analysierten Daten und die visuelle Simulation beliebiger Resektionen.

Schlüsselwörter: Operationsplanung, Volumenvisualisierung, 3D-Interaktion

1 Einleitung

Die Planung onkologischer Operationen erfordert die detaillierte Kenntnis patientenindividueller anatomischer Strukturen. Im klinischen Alltag wird anhand von CT- oder MR-Bildern entschieden, ob und wie Tumoren operiert werden können. Für diese Entscheidung sind die Anzahl, die Lage, die Ausdehnung und das Volumen von Tumoren und Metastasen wesentlich. Die Territorien, die von Blutgefäßen versorgt werden, sind in den Bildern nicht enthalten. Die Kenntnis dieser Territorien ist aber Voraussetzung, um diese vollständig zu resezieren, damit kein unversorgtes Gewebe zurückbleibt. Bei der OP-Vorbereitung muss der Chirurg ein mentales 3D-Modell der räumlichen Strukturen rekonstruieren, was insbesondere in Bezug auf die Gefäßsysteme äußerst schwierig ist. Bei der Entscheidung für eine Operationsstrategie ist die relative Lage von Tumoren zu Gefäßen besonders wichtig, um Resektionsgebiete abzugrenzen und einen geeigneten Zugang zum Operationsgebiet zu wählen.

Bei MEVIS ist die Identifikation und Analyse anatomischer Strukturen in CT-Daten der Lunge und der Leber intensiv bearbeitet worden und wird klinisch eingesetzt [1]. Die Verfahren zur Segmentierung von Leber und Tumoren, zur Gefäßsegmentierung und -analyse, sowie zur Abschätzung von Versorgungsgebieten sind in [2] beschrieben. In einem Visualisierungsmodul kann eine 3D-Darstellung von Blutgefäßen, Segmenten und Tumoren – eingebettet in die Originaldaten – erkundet werden. Darauf aufbauend wurde der hier beschriebene SURGERY PLANNER entwickelt, der die OP-Planung – über die Visualisierung hinaus – unterstützt. Langfristiges Ziel ist es dabei, auf einer besseren Grundlage zu entscheiden, ob ein Patient operabel ist und dazu beizutragen, die Qualität von Operationen zu steigern.

2 Entwurf von Visualisierungs- und Interaktionstechniken

Der Entwurf von Techniken zur Unterstützung der Operationsplanung stützt sich auf eine Befragung klinisch tätiger Chirurgen (11 Chirurgen, darunter 10 Fachärzte, die auf die Tumorchirurgie spezialisiert sind) hinsichtlich ihrer Vorgehensweise bei der OP-Planung. Dabei wurde auch nach Verbesserungsmöglichkeiten durch eine Computerunterstützung gefragt. Es wird als besonders wichtig angesehen, Operationspläne „ausprobieren zu können", die Lage von Tumoren in Relation zu Gefäßen zu sehen und wichtige Maße, z.B. Abstände, in einer Visualisierung zu erkennen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, beliebige Resektate definieren zu können. Dies erfordert ein Visualisierungsverfahren, mit dem beliebige Volumen „maskiert" werden können und eine intuitive Interaktionsmöglichkeit, um Teile aus einem Volumen „zu radieren".

2.1 Visualisierung für die Operationsplanung

Für jedes Visualisierungsobjekt (z.B. Gefäßabschnitt, Segment) können verschiedene Renderingstile (Oberflächendarstellung, Konturlinien und Volumenvisualisierung), Farben und andere Materialeigenschaften, wie Transparenz, spezifiziert werden. Für eine effektive Interaktion können diese Einstellungen nicht nur einzelnen Objekten sondern auch Kategorien von Objekten (z.B. Läsionen und Gefäße) zugewiesen werden. Das Ein- und Ausblenden von Objekten kann ebenfalls auf der Ebene von Objekten und Kategorien erfolgen. Um jedes Visualisierungsobjekt kann ein Randobjekt definiert werden (motiviert durch tumorfreie Ränder). Dadurch wird es erleichtert zu beurteilen, welche Gefäße und Versorgungsgebiete von der Resektion eines Tumors betroffen sind. Ein solches Randobjekt „erbt" die Visualisierungsparameter des enthaltenen Objektes, ist aber semi-transparent, um den Durchblick zu ermöglichen.

Für die Visualisierung von Resektionen werden (analytisch beschreibbare) Resektionswerkzeuge benutzt. Diese werden als (diskrete) Voxel in einem Maskenvolumen repräsentiert. Das Zeichnen eines Voxels wird für alle Voxel der Maske unterdrückt. Unregelmäßige Resektionsvolumen können definiert werden, indem bei der Bewegung eines Resektionswerkzeugs alle Teile maskiert werden, die berührt werden. Die effiziente Visualisierung unregelmäßiger Masken ist in [3] erstmals beschrieben.

2.2 Manipulatoren zur Spezifikation beliebiger Resektate

Für das Ausprobieren von Resektionen werden verschiedene Resektionswerkzeuge zur Verfügung gestellt. Dazu zählen Zylinder, Schnittebene, Keil und Quader. Diese Resektionswerkzeuge können in entsprechenden Dialogen oder graphisch durch Manipulatoren von OPEN INVENTOR skaliert, platziert und rotiert werden.

Für die Operationsplanung ist es nützlich, dass diese Resektionskörper selektiv angewendet werden können. Dabei werden bestimmte Strukturen, z.B. Gefäße, von der Resektion ausgespart. Dadurch kann leichter beurteilt werden, welche Gefäße von einer Resektion betroffen sind (Abb. 1). Derartige Visualisierungen sind unter

dem Begriff *selective cutting* im Bereich der computergestützten Anatomieausbildung eingeführt worden [4]. Während Resektionswerkzeuge, wie Keile und Schnittebenen, realistische Resektate definieren können, sind z.B. Zylinder sehr artifiziell. Ihre Benutzung ist aber sinnvoll, wenn sie eine Spur hinterlassen und so ein beliebiges Volumen definieren. Es hat sich gezeigt, dass ein Zylinder (Abb. 2) für die virtuelle Resektion gut geeignet ist.

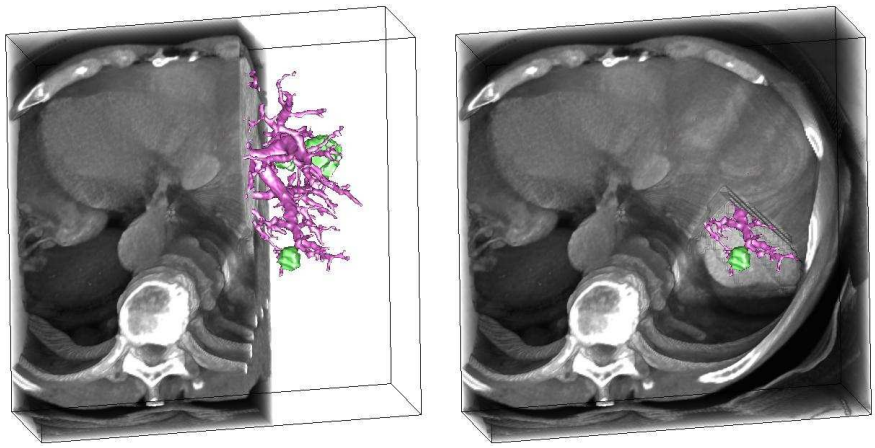

Abb. 1: Selektive Resektionswerkzeuge, die nicht auf Gefäße und Tumoren angewendet werden, verdeutlichen, welche Gefäße bei der geplanten Resektion verletzt werden und welcher Abstand der Resektionsgrenze zu den Tumoren erreicht wird. Links: Resektion durch eine Schnittebene, rechts keilförmige Resektion.

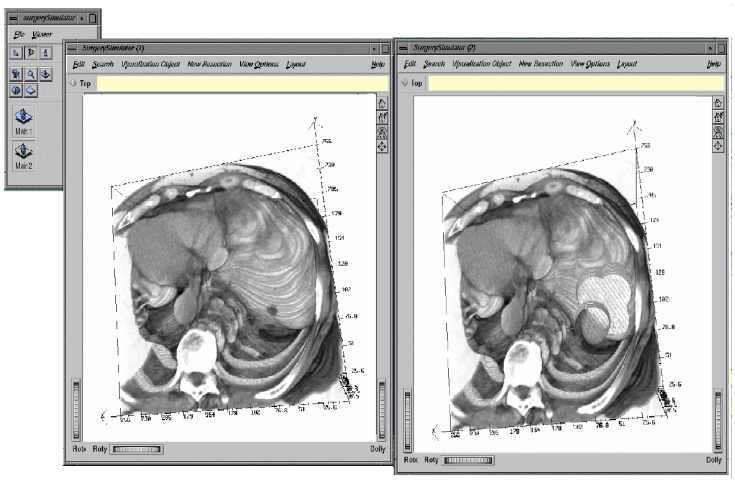

Abb. 2: Synchronisation zweier Ansichten. Links die Originaldaten, rechts die simulierte Entnahme eines Tumors mit einem zylinderförmigen Resektionskörper. Am linken Rand befindet sich das Hauptfenster mit einer Übersicht über die geöffneten Viewer.

Für die praktische Nutzung von Resektionswerkzeugen ist deren Visualisierung und die Handhabung durch die Manipulatoren wesentlich. Dabei ist zu fordern, dass Resektionswerkzeuge und Manipulatoren gut erkennbar sind, aber das „Operationsgebiet“ nicht zu stark verdecken. Die Darstellung als semi-transparente Oberfläche (Abb. 2) oder als Kombination aus semi-transparenter Oberfläche und kontrastreichen Umrisslinien sind dabei günstig. Bei den Manipulatoren ist wichtig, dass die Handles, mit denen sie bedient werden, groß genug sind und nicht verwechselt werden. Die in OPEN INVENTOR vorhandenen Manipulatoren, wie der Transformer-Manipulator, sind dafür nur ein erster Ansatz. Sie heben sich farblich zu wenig von typischen Daten ab und die Handles sind zu klein.

Bei der Nutzung von Resektionswerkzeugen ist ein häufiges Umschalten zwischen der Bewegung mit einem Werkzeug und der Rotation des Modells (zum Betrachten dessen, was entfernt wurde) typisch. Diese Folge von Interaktionen wird durch eine beidhändige Interaktion optimal unterstützt. Dabei wird eine Hand (die rechte bei Rechtshändern) für das virtuelle Resezieren mit einem 3D-Eingabegerät, z.B. SpaceMouse, und die andere für die Manipulation der virtuellen Kamera benutzt. Diese beidhändige 3D-Interaktion ist inspiriert von einem System zur neurochirurgischen Operationsplanung [5]. Typisch für die virtuelle Resektion ist, dass in verschiedenen Detaillierungsgraden gearbeitet wird: zunächst wird mit einem großen Resektionswerkzeug eine grobe Begrenzung des Resektionsgebietes durchgeführt, die dann mit einem verkleinerten Werkzeug verfeinert wird. Bei den Standard-Manipulatoren, wie dem Transformer-Manipulator, kann ein Objekt gleichzeitig verschoben, skaliert und gedreht werden. Da die Handles nahe beieinander liegen, kommt es oft zu einer versehentlichen Aktivierung. Daher ist es günstig, die Freiheitsgrade so einzuschränken, dass nur eine dieser Möglichkeiten aktiv ist. Der Benutzer wird dadurch nur geringfügig verlangsamt, da Translationen viel häufiger sind als z.B. Rotationen.

Ein Problem bei der virtuellen Resektion besteht darin, dass häufig „etwas zuviel“ entnommen wird. In dieser Situation kann der Benutzer das entsprechende Resektionswerkzeug invertieren, so dass es bei der Bewegung durch das Volumen Daten aus der Maske entfernt. Außerdem ist ein mehrstufiger Undo-Mechanismus implementiert, mit dem Resektionsschritte rückgängig gemacht werden können.

3 Synchronisation mehrerer Ansichten

Bei der Arbeit mit dem SURGERYPLANNER werden verschiedene Ansichten generiert, z. B. Ansichten

- aus unterschiedlichen Blickrichtungen,
- auf verschiedene Teilmengen der Visualisierungsobjekte und
- mit verschiedenen Resektionswerkzeugen.

Eine sinnvolle Unterstützung besteht darin, dass mehrere Sichten auf die Daten gegenüber gestellt werden können. Für die Beurteilung einer Operationsstrategie ist es z.B. hilfreich, in einem Viewer einen Tumor in Relation zu den Gefäßen darzustellen und in einem anderen Viewer den Tumor innerhalb der Lebersegmente,

wobei keine Gefäße dargestellt werden. Daher ermöglicht der SURGERYPLANNER, beliebig viele Viewer zu öffnen, in denen verschiedene Teilmengen der identifizierten Objekte dargestellt werden können. Die Anwendung von Resektionswerkzeugen kann ebenfalls auf einen Viewer beschränkt werden, so dass gleichzeitig das Organ vor und nach der simulierten Resektion sichtbar ist. Für das Umschalten zwischen mehreren sich überlappenden Viewern ist eine Übersichtsdarstellung realisiert, die für jeden geöffneten Viewer ein Icon enthält, dessen Aktivierung den zugehörigen Viewer in den Vordergrund bringt.

Das Gegenüberstellen mehrerer Ansichten kann unterstützt werden, indem die Inhalte in den Viewern synchronisiert werden. Zu diesem Zweck kann der Benutzer eingeben, welche Viewer in Bezug auf welche Eigenschaften synchronisiert werden. Zu diesen Eigenschaften gehören die Sichtrichtung, die Anwendung von Resektionswerkzeugen und Filteroperationen (Ein- und Ausblenden einer Teilmenge der Visualisierungsobjekte). Zusätzlich kann in allen Dialogen angegeben werden, ob die Einstellung auf den aktuellen oder auf alle Viewer angewendet werden soll.

4 Diskussion

Der SURGERYPLANNER ermöglicht das Ausprobieren beliebiger Resektionen. Die Definition tumorfreier Ränder und die Berücksichtigung von Versorgungsgebieten innerhalb der Visualisierung gehen über eine visuelle Simulation einer Operation hinaus und sind auf das Vorgehen bei der Operationsplanung zugeschnitten. Die Nutzung von Resektionswerkzeugen ist in verschiedenen Größen und damit Detaillierungsgraden möglich. Dennoch ist die Spezifikation eines Resektionsgebietes allein über die direkt-manipulative Nutzung von Resektionswerkzeugen zu aufwendig für eine routinemäßige Nutzung. Eine Unterstützung durch geeignete Automatismen (z.B. Vorschläge für Resektionen, Nachbearbeiten von Resektionsgebieten) ist daher die wichtigste Aufgabe bei der Weiterentwicklung des Systems.

Literatur

1. Oldhafer KJ, Högemann D, Stamm G, Raab R, Peitgen HO, Galanski M (1999) „Dreidimensionale Visualisierung der Leber zur Planung erweiterter Leberresektionen", *Der Chirurg*, Band 70, Springer-Verlag, S. 233-238
2. Selle D, Schindewolf T, Evertsz CJG, Peitgen HO (1999) „Quantitative analysis of CT liver images", *Excerpta Medical International Congress*, Band 1182, Elsevier, S. 435-444
3. Udupa JK, Odhner D (1991) „Fast Visualization, Manipulation and Analysis of Binary Volumetric Objects", *IEEE Comput. Graphics Appl.*, Band 11 (6), S. 53-62
4. Tiede, U, Bomans, M, Höhne KH, Pommert A, Riemer, M, Schiemann, T, Schubert R, Lierse W (1993) „A computerized three-dimensional atlas of the human skull and brain", *Am. J. Neuroradiology*, Band 14 (3), S. 551-559
5. Hinckley K, Pausch R, Goble JC, Kassell NF (1994) „Passive Real-World Interface Props for Neurosurgical Visualization", *Proc. of SIGCHI*, ACM SIGCHI, S. 452-458