

Interaktive und automatische Vermessung von 3d-Visualisierungen für die Planung chirurgischer Eingriffe

Bernhard Preim¹, Henry Sonnet², Wolf Spindler¹, Karl J. Oldhafer³ und Heinz-Otto Peitgen¹

¹MeVis – Centrum für Medizinische Diagnosesystem und Visualisierung, Universitätsallee 29, 28359 Bremen, Email: {preim, spindler, peitgen}@mevis.de

²Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Simulation und Graphik, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, Email: sonnet@mail.cs.uni-magdeburg.de

³Universitätsklinikum Essen, Klinik für Allgemein- und Transplantationschirurgie Hufelandstr. 55, 45122 Essen, Email: karl.oldhafer@uni-essen.de

Zusammenfassung. Wir präsentieren Methoden zur Vermessung in 3d-Visualisierungen von medizinischen Volumendaten, die der Planung von Operationen, speziell der Resektion von Weichteiltumoren, dienen. Im Vordergrund steht die Vermessung von Distanzen, z.B. zwischen Risikostrukturen und krankhaften Veränderungen. Darüber hinaus werden wichtige Vermessungsaufgaben identifiziert, die einer weitestgehenden Automatisierung bedürfen. Darauf aufbauend wird beschrieben, wie minimale Abstände und die Objektausdehnung automatisch bestimmt werden. Die vorgestellten Interaktionstechniken setzen voraus, dass die relevanten Strukturen zuvor segmentiert wurden.

1 Einleitung

In der medizinischen Diagnose und Therapieplanung sind quantitative Aussagen über pathologische Strukturen und die Relation zwischen pathologischen und anatomischen Strukturen wesentlich. Beispiele dafür sind die Ausdehnung von Tumoren, die Abstände zwischen zu therapierenden pathologischen Strukturen und Risikostrukturen, die geschont werden sollen.

Mit Methoden der Bildverarbeitung werden Strukturen segmentiert und analysiert. Im Ergebnis können 3d-Modelle patientenindividueller Strukturen interaktiv erkundet werden. Derartige 3d-Visualisierungen sind z.B. für Chirurgen hilfreich, um Operationen zu planen. In diesem Beitrag wird beschrieben, wie 3d-Visualisierungen segmentierter Daten und Bemaßungen integriert werden. Die Integration der Bemaßungen in 3d-Visualisierungen ist dadurch motiviert, dass für viele Fragestellungen, wie die nach dem minimalen Abstand zwischen zwei 3d-Objekten, Messungen in axialen 2d-Schichten – so wie sie in radiologischen Workstations möglich sind – sehr ungenau sind. Die Auswahl der hier beschriebenen Messwerkzeuge ist durch Anwendungen bei der Operationsplanung geprägt: dabei sind die Ausdehnung von Objekten, Abstände und Winkel (bei orthopädischen Operationen) essenziell. Da die manuelle Vermessung einen gewissen Interaktionsaufwand erfordert und zu Fehlern führen kann, wird auch erläutert, wie häufig benötigte Maße automatisch bestimmt werden.

2 Anforderungen an Werkzeuge zur Vermessung in 3d-Visualisierungen

Wie eine Bemaßung wahrgenommen wird, hängt von einer Reihe von Präsentationsvariablen ab. Dazu zählen der Font (Fontgröße, -farbe), Linien (Linienstile, -breite), die z.B. Abstände repräsentieren, und Pfeilspitzen. Die Wahl von Präsentationsvariablen wird durch folgende Anforderungen bestimmt:

Eindeutige Zuordnung von Bemaßungen zu Objekten. Bemaßungen beziehen sich auf Objekte oder Regionen. Die Zuordnung von Bemaßungen zu Objekten und Regionen muss klar erkennbar sein. Dies hat z.B. Konsequenzen für die Farbwahl.

Eindeutige Zuordnung von Maßzahlen zu Maßlinien. Ein Maß besteht häufig aus Linien und einer Maßzahl. Diese können in unmittelbarer Nachbarschaft dargestellt sein, aber auch relativ weit voneinander positioniert werden. Dabei muss eine eindeutige Zuordnung gewährleistet werden. Die Maßzahlen dürfen nicht rotiert werden – sie müssen sichtbar (vor den bemaßten Objekten) und erkennbar bleiben.

Individualisierbarkeit. Auch wenn Standardwerte für die Präsentationsvariablen einer Bemaßung sorgfältig gewählt werden, ist es – aufgrund der großen Variabilität zu vermessender Strukturen – wichtig, dass Bemaßungen individuell einstellbar sind.

3 Methoden

Grundlage für die Bemaßung sind segmentierte Objekte, die bei der Analyse medizinischer Volumendaten entstanden sind. Es wird vorausgesetzt, dass die segmentierten Objekte in eine Oberflächenrepräsentation umgewandelt sind.

3.1 Interaktive Abstandsmessung

Eine Messlinie dient zur Abstandsmessung und besteht – analog zu entsprechenden Werkzeugen in 2d – aus einer Linie mit zwei Pfeilspitzen. Die Pfeilspitzen werden durch Kegel dargestellt und die Linie durch einen dünnen Zylinder. Durch die räumliche Ausdehnung dieses Messwerkzeugs wird die perspektivische Verzerrung erkennbar. Bei der Platzierung der Maßzahl wird ein Kompromiss gewählt, bei dem der Platzbedarf der Linie relativ gering ist und die Maßzahl sich auch bei kurzen Linien nicht mit den Pfeilspitzen überschneidet (Abb. 1).

3.2 Bestimmung und Visualisierung der Objektausdehnung

Eine wichtige Quantifizierung betrifft die Bestimmung der Objektausdehnung (bei der OP-Planung vor allem von Tumoren). Dazu wird eine Hauptachsentransformation des Objektes genutzt, bei der ein lokales rechtwinkliges Koordinatensystem entsteht, dessen Achsen sich im Objektschwerpunkt schneiden. Die längste dieser drei Achsen repräsentiert die größte Objektausdehnung [5]. Die Objektausdehnung wird durch drei orthogonale Abstandsmesslinien (einschließlich der Maßzahl) visualisiert. Das derart vermessene Objekt wird semitransparent dargestellt, um die – durch das Objekt ver-

laufenden – Linien sichtbar zu machen. Abb. 2 veranschaulicht das Prinzip; eine Anwendung bei der Vermessung eines Tumors ist in Abb. 3 dargestellt.

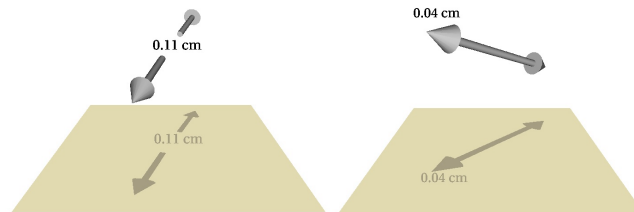


Abb. 1: Abstandslinien und ihre Schattenprojektionen. Die Platzierung des Maßes hängt vom verfügbaren Platz ab. Die maximale Genauigkeit des Maßes ergibt sich aus der Voxelgröße des zugrunde liegenden Datensatzes.

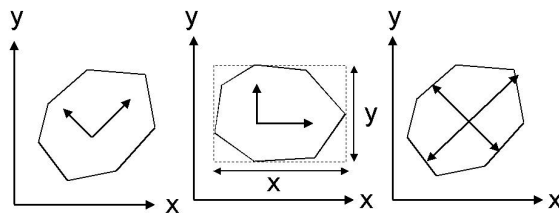


Abb. 2: Prinzip der Bestimmung der Objektausdehnung in 2d. Die normierten Eigenvektoren der Kovarianzmatrix (links) definieren eine Rotation. Nach der Rotation der Eigenvektoren in achsenparallele Koordinaten (Mitte) wird die Ausdehnung bestimmt und angezeigt (rechts).

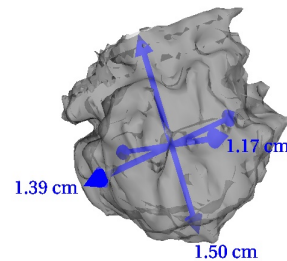


Abb. 3: Visualisierung der Ausdehnung eines Tumors mit drei automatisch bestimmten Distanzlinien.

3.3 Bestimmung und Visualisierung minimaler Abstände

Unter den vielen Möglichkeiten, Abstände zu vermessen, sind minimale Abstände zwischen Objekten von besonderem Interesse. Der minimale Abstand zwischen zwei als Oberflächen repräsentierten Objekten kann in guter Näherung durch die Betrachtung aller Eckpunkte ermittelt werden. Die naive Methode, Distanzen zwischen allen Eckpunkten zu berechnen, ist bei der typischen Größe der Eckpunktmengen medizinisch relevanter Objekte aber zu aufwändig. Daher wurde ein Algorithmus entwickelt, der auf der Beobachtung aufbaut, dass der minimale Abstand zwischen zwei Objekten kleiner ist als der Abstand zwischen den Schwerpunkten dieser Objekte. Daher werden zunächst die Schwerpunkte der Objekte A und B bestimmt (als M_A und M_B bezeichnet) und für alle Eckpunkte aus A bestimmt, ob sie von M_B aus hinter M_A liegen. Falls das der Fall ist, kommen diese Punkte nicht in Frage für die Bestimmung des minimalen Abstandes. Analog werden Eckpunkte von Objekt B daraufhin analysiert, ob ihre Entfernung zu M_A größer ist als die Entfernung von M_B zu M_A . Die resultierenden Mengen von Eckpunkten werden solange rekursiv unterteilt, bis die Zahl ihrer Eckpunkte unter einem Schwellwert liegt. Dann werden die Abstände aller

Eckpunkte berechnet und davon das Minimum gebildet. Als Beispiel ist in Abb. 4 der minimale Abstand zwischen einer Risikostruktur und einem Tumor dargestellt. Dadurch wird beurteilbar, mit welchem Rand ein Tumor höchstens reseziert werden kann, ohne die Risikostruktur zu beschädigen. Bei der Berechnung des minimalen Abstandes zwischen Tumor und einem Gefäßsystem ist es vorteilhaft, wenn das Gefäßsystem entsprechend seiner Verzweigung in mehrere Objekte unterteilt ist.

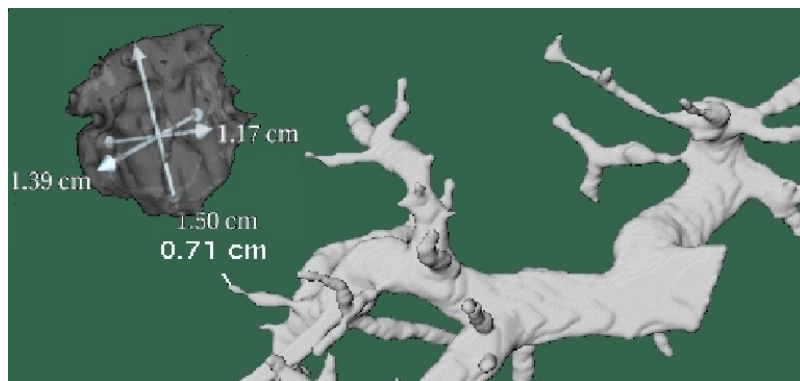


Abb. 4: Der minimale Abstand (0.71 cm) zwischen dem portalvenösen Gefäßsystem der Leber und einem Tumor wurde automatisch bestimmt und durch eine Abstandslinie visualisiert.

4 Verwandte Arbeiten

Während in CAD-Werkzeugen Methoden zur 3d-Vermessung verbreitet sind, wird in der medizinischen Visualisierung bisher fast ausschließlich in 2d-Schichten vermessen. Möglichkeiten zur Vermessung in 3d sind in [2] beschrieben. Dabei werden Manipulatoren von OPENINVENTOR so erweitert, dass das zur Ausdehnung des Manipulators korrespondierende Maß eingeblendet wird. Bei der Vermessung von Abständen wird neben der Länge auch die maximal erreichbare Genauigkeit angegeben, die sich aus der Auflösung der originalen Daten ergibt. Darüber hinaus gibt es spezielle Anwendungen in der computergestützten orthopädischen Chirurgie. Häufig wird dort der Einsatz eines Implantates anhand einer 3d-Visualisierung geplant [1]. Die Genauigkeitsanforderungen sind dabei sehr hoch, so dass quantitative Angaben unerlässlich sind. Ein Beispiel dafür ist die Planung von Hüftendoprothesen [6].

5 Ergebnisse

Die Werkzeuge zur Vermessung sind aus Graphikprimitiven aus der Graphikbibliothek OPENINVENTOR zusammengesetzt und werden durch speziell kombinierte Dragger aus OPENINVENTOR manipuliert. Die Werkzeuge werden automatisch benannt und können selektiv ein- und ausgeblendet werden.

Die Werkzeuge sind in eine Applikation integriert. Diese enthält zwei OPENINVENTOR-Viewer, in denen synchronisierte Ansichten der zu vermessenden 3d-Szene (segmentierte Objekte zur OP-Planung) integriert sind. Die Integration quantitativer

Maße – insbesondere Abstände und Ausdehnungen – verbessert die OP-Planung und macht Risiken besser beurteilbar. Die Werkzeuge wurden anhand klinischer CT-Datensätze getestet, die zur präoperativen Planung von Leberoperationen erstellt wurden. Die Segmentierung erfolgte mit der bei MEVIS entwickelten Software HEPAVISION [4].

6 Diskussion

Bei der interaktiven Vermessung besteht die Herausforderung darin, für den Benutzer erkennbar zu machen, wo sich ein Messpunkt befindet in Relation zu der zu vermessenden Struktur. Die Nutzung von zwei Ansichten (oder eine Schattenprojektion auf eine Grundfläche) erleichtern die Vermessung erheblich.

Diskussionswürdig ist die Genauigkeit der Maße. Diese hängt entscheidend von der zuvor erfolgten Segmentierung ab, die bei einer schwierigen Objektbegrenzung mit hoher Unsicherheit behaftet sein kann. Insofern kann die Vermessung eine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen. Die vorgestellten Werkzeuge sind informell getestet und dementsprechend verfeinert worden. Die Integration der Vermessungswerkzeuge in den SURGERYPLANNER, eine umfassende Applikation zur Operationsplanung [3], ist geplant. Diese Integration ist Voraussetzung für einen systematischen Test der Nützlichkeit bestimmter Maße für die OP-Planung.

Danksagung. Wir bedanken uns bei unseren Kollegen A. Schenk und Dr. D. Selle für ihre wichtigen Vorarbeiten im Bereich der Segmentierung. Bei der DFG bedanken wir uns für die Förderung des Projektes unter der Nummer Pe 199/9-1.

7 Literatur

1. Handels H, Ehrhardt J, Peters P, Plötz W und Pöpl J: „Computergestützte Planung von Hüftoperationen in virtuellen Körpern“, *Bildverarbeitung für die Medizin* (Heidelberg, 4.-5. März), Springer Verlag, Reihe Informatik aktuell, S. 177-181, 1999
2. Hastreiter P: *Registrierung und Visualisierung medizinischer Bilddaten unterschiedlicher Modalitäten*, Dissertation, Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Arbeitsberichte des Institutes für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung (Informatik), Band 32 (8), September 1999
3. Preim B, Selle D, Spindler W., Peitgen HO und Oldhafer KJ: „Interaction Techniques and Vessel Analysis for Preoperative Planning in Liver Surgery“, Proc. of Medical Imaging and Computer-Assisted Intervention, MICCAI 2000 (Pittsburgh, USA, 11.-14. Oktober 2000), Springer-Verlag, LNCS, Band 1935, S. 608-617, 2000
4. Schenk A, Breitenborn J, Selle D et al.: „IlabMed-Workstation – Eine Entwicklungsumgebung für radiologische Anwendungen“, *Bildverarbeitung für die Medizin* (Heidelberg, 4.-5. März), Springer Verlag, Reihe Informatik aktuell, S. 238-242, 1999
5. Sonka M, Hlavac V und Boyle R: *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, Brooks-Cole, 2. Auflage, 1999
6. Wolfsiffer K und Kalender W: „Computerbasierte dreidimensionale Planung von Knieendoprothesen – eine Machbarkeitsstudie“, *Bildverarbeitung für die Medizin* (München, 12.-14. März), Springer Verlag, Reihe Informatik aktuell, S. 254-258, 2000