



Christian Tietjen

Modifikation und Erweiterung von Techniken zur interaktiven und automatischen Vermessung in medizinischen 3D Visualisierungen

Studienarbeit

Betreuer Dr. Bernhard Preim Dipl. Inf. Felix Ritter

Oktober 2001 – Februar 2002

1	EI	NLEITUNG	5
2	тн	IEORETISCHE GRUNDLAGEN	7
2.1	l	Medizinische Bildgebung	7
2.2	Ţ	Visualisierung von Bilddaten	9
2	.2.1	Darstellung in 2D	9
2	.2.2	Darstellung in 3D	9
2.3		Vermessung radiologischer Daten in 2D	10
2.4]	Bisherige Möglichkeiten der Vermessung in 3D	10
2	.4.1	Forschungsprototypen	11
2.5	Ţ	Vorarbeiten bei MeVis	12
2.6	(Oberflächengestaltung	13
2	.6.1	Die goldenen Regeln der Oberflächengestaltung	13
2	.6.2	Direkte Manipulation	13
2.7		3D-Interaktion	14
2.8	r	Fiefenhinweise (depth cues)	15
3	EN	ITWURF	17
3.1		Analyse der bestehenden Vermessungswerkzeuge	17
3	.1.1	Distanzmesswerkzeug	18
3	.1.2	Lineal	18
3	.1.3	Winkelmesswerkzeug	18
3.2	I	Modifikation der bestehenden Werkzeuge	19
3	.2.1	Distanzmesswerkzeug	19
3	.2.2	Lineal	19
3	.2.3	Winkelmesswerkzeug	21
3	.2.4	Automatische Farbgebung	21
3	.2.5	Beschriftung	22
3	.2.6	Hervorhebungstechniken	23
3.3]	Ergänzung der direkten Manipulation von Vermessungswerkzeugen	24
3	.3.1	Aktivierung der Interaktionsmodi	24
3.4]	Entwurf eines Werkzeuges zur Volumenabschätzung	25

3.5	Automatische Vermessung				
3.	5.1 Bestimmung der Objektausdehnung				
3.	5.2 Bestimmung des Winkels zwischen zwei Objekten				
3.6	Integration der Werkzeuge in eine Applikation				
3.	6.1 Gestaltung der Applikation				
4		33			
-					
4.1	Software fur die Implementierung der Vermessungswerkzeuge				
4. 1	1.1 OPENINVENTOR				
4.	1.2 ILAD				
4.2	Allgemeine Funktionalität der Werkzeuge				
4.	2.1 Detaillierungsgrad der Darstellung				
4.	2.2 Interaktionsmöglichkeiten				
4.3	Distanzmesswerkzeug				
4.4	Lineal	41			
4.5	Winkelmesswerkzeug				
4.6	Werkzeug zur Volumenabschätzung				
4.7	Automatische Vermessung	45			
4.	7.1 Bestimmung der Objektausdehnung				
4.	7.2 Bestimmung des Winkels zwischen zwei Objekten				
4.8	Integration der Werkzeuge in eine Applikation				
4.	8.1 Dateimanager				
4.	8.2 Werkzeug-Editor				
4.	8.3 Kameraoptionen				
4.	8.4 Clipplane-Optionen				
5	EVALUIERUNG DER VOLUMENABSCHÄTZUNG	51			
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	53			
6.1	Nicht behobene Probleme				
6.2	Fortführungs- und Verbesserungsvorschläge	54			
7	QUELLENNACHWEIS55				
8	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS57				

1 Einleitung

In vielen Bereichen der medizinischen Diagnostik und Therapieplanung spielt die genaue Vermessung der pathologischen Befunde eine wichtige Rolle. Die Größe eines bösartigen Tumors ist ein Kriterium für die Stadieneinteilung einer Krebserkrankung und beeinflusst maßgeblich die Therapieplanung. Auch der Abstand eines Tumors zu umliegenden Strukturen ist für die Operationsplanung von Bedeutung. Wenn ein Tumor zu nah an einem größeren Blutgefäß liegt, muss man eventuell einen viel größeren Gefäßbereich entfernen, wodurch die Blutversorgung des umliegenden Gewebes gefährdet sein kann und dieses eventuell abstirbt. Andere Beispiele sind Durchmesser von Blutgefäßen bei krankhaften Veränderungen, wie etwa Stenosen oder Aneurysmen (Gefäßverengungen bzw. -erweiterungen). In der orthopädischen Chirurgie bzw. in der Mund-, Kiefer-, Gesichtschirurgie ist die Messung von Winkeln wichtig, um Fehlstellungen von Knochen oder Zähnen beurteilen zu können.

Bislang werden solche Vermessungen auf den einzelnen Schichtbildern eines 3D-Datensatzes (Computer- oder Magnet-Resonanz-Tomographie) – also in 2D – durchgeführt. Da die zu vermessenden Objekte in verschiedenen Schichten lokalisiert sind, ist eine solche Messung ungenau. Eine fehlerhafte Abschätzung der Größen- und Lageverhältnisse kann jedoch weitreichende Folgen für die weitere Behandlung des Patienten haben. Ob ein Tumor operabel ist und mit welcher Art von Eingriff er behandelt werden muss, hängt stark von diesen Kriterien ab.

Daher werden in dieser Arbeit Interaktionstechniken beschrieben, mit denen man direkt an dem 3D-Datensatz Vermessungen durchführen kann. Dadurch bekommt der behandelnde Arzt ein direktes visuelles Feedback und kann so Zusammenhänge erkennen, die in der Schichtenansicht eventuell falsch interpretiert wurden. Solche Fehlinterpretationen passieren zum Beispiel leicht bei der Identifikation von Verzweigungen komplexer Gefäßbäume. Die Entwicklung von 3D-Messwerkzeugen bringt jedoch einige Probleme mit sich. Das Werkzeug muss intuitiv zu bedienen sein und sich leicht im 3D-Volumen transformieren lassen. Außerdem müssen die Werkzeuge präzise die gewünschten Strukturen ausmessen. Das ist deswegen ein Problem, weil die Mittel zur Interaktion – Maus und Bildschirm – für Interaktionen in 2D entworfen worden sind. Des Weiteren muss die Lage des Werkzeuges im Raum deutlich erkennbar sein und die Bemaßung gut lesbar darstellt werden. Dabei darf jedoch nicht mehr als nötig von den zu vermessenden Strukturen von dem Werkzeug verdeckt werden.

Diese Arbeit wurde bei MeVis angefertigt und ist Teil eines von der DFG geförderten Projektes zur präoperativen Planung. In diesem Projekt wurden bereits erste Werkzeuge zur interaktiven und automatischen Vermessung entwickelt (SONNET [2000]), diese Arbeit beschäftigt sich jedoch hauptsächlich mit den Problemen der besseren Handhabung. Es wird unter anderem eine Korrelation zwischen 2D- und 3D-Ansicht vorgestellt, durch die eine möglichst bequeme Eingabe erreicht werden soll. Neben der Weiterentwicklung existierender Vermessungswerkzeuge wird ein neues Werkzeug zur Abschätzung von Volumina beschrieben.

2 Theoretische Grundlagen

In dieser Arbeit sollen Werkzeuge beschrieben werden, mit denen Messungen direkt auf den medizinischen Rohdaten durchgeführt werden können. Aus diesem Grund werden kurz die Verfahren der medizinischen Bildgebung erläutert. Die Daten können zwei- oder dreidimensional dargestellt werden, wobei auf die Vor- und Nachteile dieser Visualisierungen eingegangen wird. Anschließend werden die bisherigen Möglichkeiten der Vermessung medizinischer Daten beschrieben und die Umsetzung dieser Konzepte analysiert. Da vor allem die Handhabung der Werkzeuge verbessert werden soll, wird zum Abschluss noch auf die Aspekte eingegangen, auf die bei dem Entwurf einer Manipulationsmöglichkeit geachtet werden muss.

2.1 Medizinische Bildgebung

Zur Akquisition dreidimensionaler Bilddaten von anatomischen Strukturen werden vorwiegend zwei Aufnahmeverfahren, Computer- und MR-Tomographien, verwendet. Beide Verfahren liefern unterschiedliche Resultate und werden somit auch bei unterschiedlichen Problemstellungen angewandt (HANDELS [2000]).

Die Computer-Tomographie (CT) misst die Stärke von Röntgenstrahlen, nachdem sie den Körper durchdrungen haben. Während der Messung fährt der Tomograph spiralförmig um das Zielobjekt und berechnet aus den Intensitätswerten einzelne Bilder. Aus diesen Schichtbildern entsteht der Datensatz. Um die Strahlungsbelastung möglichst gering zu halten, wird die Dosis so eingestellt, dass die Bildqualität für die Diagnose ausreichend ist. Auf den Daten sind Strukturen mit unterschiedlichem Absorptionsniveau sehr gut zu erkennen. Während sich Knochen und Gase gut differenzieren lassen, sind Weichteile und Organe - die zum größten Teil aus Wasser bestehen - kaum voneinander zu unterscheiden (Abb. 2-1). Um auch Gefäßbäume darstellen zu können, wird den Patienten Kontrastmittel injiziert. Um einen standardisierten Vergleich zwischen verschiedenen CT-Bildern zu ermöglichen, wurde die Hounsfield-Skala eingeführt. Der gemessene Abschwächungskoeffizient der eingestrahlten Röntgenstrahlung wird in Relation zum Abschwächungskoeffizienten von Wasser gesetzt, welches als Referenzflüssigkeit dient. Dadurch ergeben sich standardisierte Werte, die sich grob in die Klassen Wasser = 0 HE (Hounsfield-Einheiten), Gas, Gewebe und Knochen einteilen lassen. Durch die Standardisierung ist es möglich, Automatismen zur Segmentierung auf den Bilddaten arbeiten zu lassen.

Mit der Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) lassen sich alle Strukturen visualisieren, die ein magnetisches Moment besitzen. Am Anfang des Messvorgangs wird in dem Tomographen ein hohes Magnetfeld aufgebaut, um die Atomkerne an den Feldlinien auszurichten. Anschließend kann die Dichte der Atomkerne und die Zeit, die verstreicht bis die Kerne wieder in ihre alte Ausrichtung zurückkehren, gemessen werden. Da u.a. Wasserstoff ein solches Moment besitzt, lassen sich insbesondere Weichteile und Organe, die einen sehr hohen Wasseranteil haben, differenziert darstellen. Knochen und Knorpeln sind dagegen kaum wahrzunehmen (Abb. 2-2). Eine Normierung der Grauwerte ist aufgrund der vielen Variablen, die bei der Aufnahme berücksichtigt werden müssen, noch nicht möglich.



Die beiden Aufnahmeverfahren im Vergleich: Links MRT, rechts CT; beide nach Kontrastmittelvergabe. Zu sehen ist ein maligner Hirntumor vom Typ Astrozyom 4°

Ouelle: Universitätsklinikum C. G. Carus Dresden, Abteilung für Neuroradiologie

Abb. 2-1



Beide Geräte können in einer sehr breiten Bandweite Intensitätswerte auflösen (bei der CT 4096 Einheiten). Da das menschliche Auge jedoch nur 64 – 128 Grauwerte auf einmal wahrnehmen und Monitore nur 256 Graustufen darstellen können, lässt sich bei der anschließenden Betrachtung eine sogenannte Fensterung einstellen, wobei nur eine gewisse Breite von Intensitätswerten auf Grauwerte abgebildet wird. Das Fensterzentrum und die Fensterbreite lassen sich frei einstellen. Eine schmale Fensterbreite erzeugt eine hohen Kontrast. Werte, die über bzw. unter dieser Fensterbreite liegen, werden Weiß bzw. Schwarz gezeichnet. Dadurch lassen sich sehr differenziert Strukturen wahrnehmen, die sonst dem menschlichen Auge verborgen geblieben wären (Abb. 2-3).



Abb. 2-3: Derselbe Datensatz mit verschiedenen Fensterungen, links ist die Lunge gut zu erkennen, rechts wird ein Tumor in der Mitte der Leber sichtbar. Quelle: Radiologie Uni Mainz

Als Ergebnis liefern die Geräte plane Schichtbilder mit konstantem Abstand und konstanter Größe zurück. Während der Pixelabstand je nach Anforderung auf den Schichten 0,5 – 1 mm beträgt, liegen die Schichten selbst ca. 2 – 4 mm auseinander. Die Daten werden meistens im DICOM-Format gespeichert. Dieses Format ermöglicht es, zu den komprimierten Bilddaten noch zusätzliche Informationen über die Aufnahmemodalitäten und den untersuchten Patienten zu speichern.

2.2 Visualisierung von Bilddaten

2.2.1 Darstellung in 2D

Die Untersuchung von Datensätzen in der 2D-Ansicht hat im Gegensatz zur räumlichen Darstellung den Vorteil, dass jedes Pixel einer Schicht unabhängig von der Fensterung zu sehen ist. Durch die verschiedenen Schichten kann bequem mit der Maus oder der Tastatur hindurchgefahren werden. Die wichtigsten Bild- und Patientendaten werden als Annotationen zusammen mit dem Bild auf dem Bildschirm eingeblendet. Zu den Daten zählen die persönlichen Daten des Patienten, die Cursorposition mit dem aktuellen Intensitätswert (beim CT die Hounsfield-Einheit), sowie die eingestellte Fensterung (Abb. 2-3).

Auf den einzelnen Schichten lassen sich Marker setzen, die dazu dienen können, auffällige Stellen zu markieren, Stützpunkte für Segmentierungen zu liefern oder aber Endpunkte von Werkzeugen zu definieren.

Der Nachteil dieser Darstellungsart ist, dass es einiger Übung bedarf, um die Schichtbilder mental wieder zu einem dreidimensionalen Bild zusammenzusetzen.

2.2.2 Darstellung in 3D

In der 3D-Visualisierung lassen sich die räumlichen Zusammenhänge wesentlich leichter beurteilen. Dargestellt werden können die originalen Volumendaten oder aber auch Oberflächenrepräsentationen durch 3D-Objekte. Mit Hilfe einer frei beweglichen Kamera lassen sich die Strukturen beliebig vergrößern und von allen Seiten ansehen.

Um nicht nur die Außenkanten eines Volumendatensatzes begutachten zu können, wird an die Fensterung eine dazu korrespondierende Transparenz gekoppelt. Strukturen, die durch die Fensterung schwarz gezeichnet werden würden, werden nicht angezeigt, weiße Strukturen werden opak dargestellt und in dem Bereich der Fensterung werden die Strukturen entsprechend transparent gezeichnet. Durch zusätzliche Beleuchtungseffekte kann außerdem der räumliche Eindruck noch verstärkt werden.



Abb. 2-4: Derselbe Datensatz mit verschiedenen Fensterungen.

In dem linken Bild sind nur die linke Niere sowie die Knochen gut zu erkennen.

Im rechten Bild sind auch die anderen inneren Organe zu sehen.

Zur Befundung von pathologischen Strukturen, die sich nur durch minimale Grauwertschwankungen erkennen lassen, ist die 3D-Visualisierung jedoch nicht geeignet (Abb. 2-5). Um Objekte in dieser Darstellung freistellen zu können, müssen sich ihre Intensitätswerte hinreichend von den umliegenden Intensitätswerten unterscheiden. Außerdem wird durch die Transparenz und das Shading die Darstellung so stark verfälscht, dass eine derartige Befundung unmöglich wird.



Abb. 2-5: In dieser 3D-Visualisierung wird derselbe Datensatz wie in Abb. 2-3 dargestellt. Der Quader umschließt den Tumor, welcher in dieser Darstellung kaum zu erkennen ist.

2.3 Vermessung radiologischer Daten in 2D

Möglichkeiten zur Vermessung von radiologischen Daten auf planen Bilddaten sind auf allen modernen medizinischen Workstations verfügbar. Angeboten werden Werkzeuge zum Ausmessen von Winkeln und Abständen. Ein am Bildrand eingeblendeter Maßstab ermöglicht eine Abschätzung der Größenverhältnisse. Durch Polygone können Flächen definiert werden, die anschließend mit Hilfe einer Histogrammanalyse ausgewertet werden können. Die Histogrammanalyse ermöglicht es, Veränderungen der Gewebestruktur, wie etwa bei der Osteoporose, herauszufiltern und den Grad der Erkrankung festzustellen. Solche Veränderungen äußern sich im CT- oder MRT-Bild durch leichte Grauwertschwankungen und sind für das menschliche Auge kaum zu erkennen

2.4 Bisherige Möglichkeiten der Vermessung in 3D

Im Gegensatz zur 2D-Vermessung wird die Vermessung in 3D von kaum einer medizinischen Workstation unterstützt. Im folgenden werden zwei Workstations beschrieben, die hier eine Ausnahme bilden. Zum einen die VIRTUOSO von Siemens Medical Solutions (Abb. 2-6), bei der ich Gelegenheit hatte, sie mir persönlich im Krankenhaus St. Jürgen Straße in Bremen anzusehen, und zum anderen die EASYVISION von Philips (Abb. 2-7), bei der mir vom MeVis Referenzmaterial zur Verfügung gestellt worden ist.

Bei der VIRTUOSO ist es möglich, Vermessungen direkt in der Volumendarstellung durchzuführen. Angeboten werden Polygonzüge, die Definition von Pfaden (z.B. für die virtuelle Endoskopie), Abstandsmessungen und eine Kombination aus Winkel- und Distanzmesswerkzeug. Beim Letzten wird für jeden Schenkel zusätzlich die Distanz angegeben. Durch die Definition weiterer Punkte können weitere Linien hinzugefügt werden, sodass ein Polygon entsteht, bei dem sämtliche Winkel und Linienlängen ausgemessen werden. Alle Hilfsmittel werden jedoch nur als einfache Linien dargestellt, wodurch der Benutzer keinerlei Information über die räumliche Lage des Werkzeuges erhält. Eine Linie, die 10 cm in den Raum hinein verläuft, sieht auf dem Monitor unter Umständen genauso aus wie eine Linie, die 2 cm lang ist und in der Bildschirmebene verläuft. Unklar ist dem Benutzer auch, welcher Punkt selektiert wurde, wenn sich halbtransparente Strukturen vor dem gewünschten Punkt befinden. Dadurch wird ein präzises Ausmessen unmöglich.



Abb. 2-6: Bei der Siemens Virtuoso können mit Hilfe von 2D- Abb. 2-7: Mit der Philips EasyVision kann ein Elementen Distanzen und Winkel in 3D gemessen werden.

polygonal begrenzter Pfad angegeben und vermessen werden.

Bei der EASYVISION können Abstände und Pfade auf zuvor segmentierten Daten angegeben werden. Die gesetzten Punkte werden hier durch Picking direkt auf die Oberfläche des segmentierten Objektes gesetzt, wodurch ein präzises Ausmessen bewerkstelligt wird. Wenn die 3D-Visualisierung rotiert und dadurch ein gesetzter Punkt verdeckt wird, wird eine unauffälligere Darstellungsart für diesen Punkt gewählt, womit der Benutzer ein besseres räumliches Verständnis bekommt. Leider müssen die Daten zuvor segmentiert worden sein, was einen erhöhten Zeit- und Rechenaufwand benötigt.

2.4.1 Forschungsprototypen

HASTREITER [1999] hat unter Verwendung der Grafikbibliothek OPENINVENTOR Werkzeuge zur Distanz- und Volumenabschätzung entwickelt, die sich direkt in einer 3D-Visualisierung darstellen lassen. Die Werkzeuge können mit Hilfe von Manipulatoren gesteuert werden, wobei das korrespondierende Maß zusammen mit dem Messfehler angezeigt wird (Abb. 2-8). Die Volumenabschätzung wird dadurch realisiert, dass der Benutzer einen Quader platzieren kann, dessen Seiten einen Ellipsoid beschreiben.





Abb. 2-8: Direkt-manipulative Abstandsmessung mit Angabe der Unsicherheit. Quelle: Hastreiter [1999]

Abb. 2-9: Ein Handlebox-Manipulator wird durch die Angabe von Maßen ergänzt. Quelle: Hastreiter [1999]

Ein anderer Ansatz zur Darstellung von Bemaßungen wird von ZUIDERVELD [1995] beschrieben. Ähnlich wie die Temperaturdarstellung auf Wetterkarten kann die Farbkodierung genutzt werden, um z.B. die Dicke von Schädelknochen zu visualisieren (Abb. 2-10). Eine solche Auswertung ist sehr gut geeignet, um einen Überblick über den qualitativen Verlauf einer Größe zu bekommen. Der Abstand oder Winkel zwischen zwei Objekten lässt sich jedoch nicht farblich kodieren. Zudem ist eine explizite Bemaßung exakter, wogegen die Kodierung besser für Vergleiche geeignet ist.



Abb. 2-10: Links: Farbkodierung der Knochendicke. Rechts: die Farbkodierung ist überlagert mit dem Shading der Oberfläche, so dass die räumliche Struktur klarer wird. Quelle: Zuiderveld [1995]

2.5 Vorarbeiten bei MeVis

Bisher wurden bei MeVis verschiedene Werkzeuge entwickelt, die sich in einer OPENINVENTOR-Szene frei im Raum bewegen lassen (SONNET [2000], PREIM [2000]). Diese Werkzeuge sind im Wesentlichen während des Praxissemesters von HENRY SONNET im Sommersemester 2000 entstanden.

Entwickelt wurden ein Winkel- und ein Abstandsmesswerkzeug, ein Lineal und ein Gitter zur Flächenapproximation. Alle Werkzeuge wurden mit verschiedenen Manipulatoren¹ ausgestattet, die es erlauben, die Werkzeuge zu transformieren. Bei allen Änderungen wird sofort das aktuelle Maß angegeben. Die Maßzahl wird immer so dargestellt, dass die Zugehörigkeit zum Werkzeug klar erkennbar ist. Optional lässt sich am Maß die Einheit anzeigen.

Das Winkelmesswerkzeug hat jeweils einen Manipulator an den beiden Endpunkten der Schenkel, mit denen sich der Winkel verändern lässt und einen Manipulator am Verbindungspunkt, mit dem sich das gesamte Werkzeug verschieben lässt. Beim Aktivieren eines Manipulators werden zusätzliche transparente Flächen eingeblendet, zwei Rechtecke orthogonal zu den Schenkeln und ein Dreieck zwischen den Eckpunkten, die die genaue Lage verdeutlichen. Die Abstandslinie erhält zwei Manipulatoren zum jeweiligen Verschieben der Endpunkte. Das Lineal verhält sich genauso wie die Abstandslinie, nur dass beim Berühren der Verbindungslinie ein zusätzlicher Manipulator erscheint, mit dem sich das gesamte Lineal verschieben lässt. Außerdem wurde noch ein Gitter zur approximativen Flächenbestimmung entworfen. Das Gitter wird in dieser Arbeit jedoch nicht weiter behandelt und durch einen

¹ Manipulatoren sind 3D-Widgets und wurden von CONNOR *et al.* [1992] eingeführt (siehe Abschnitt 2.7).

Ellipsoiden zur Volumenapproximation ersetzt, ähnlich wie er von Peter Hastreiter beschrieben worden ist.

Die Vorteile dieser Vermessungswerkzeuge gegenüber den bisherigen Möglichkeiten der Vermessung in 3D sind zum einen, dass die Werkzeuge mit Hilfe von 3D-Komponenten dargestellt werden und dadurch einen besseren Eindruck ihrer räumlichen Lage vermitteln als die Mittel der VIRTUOSO. Zum anderen sind die Werkzeuge nicht auf die vorherige Segmentierung der Volumendaten angewiesen wie die EASYVISION.

Allerdings sind die Werkzeuge noch immer schwer zu handhaben. Da nicht bekannt ist, was der Benutzer in den Volumendaten vermessen möchte, werden die Vermessungswerkzeuge in den Koordinatenursprung gelegt, und müssen von dort aus in die gewünschte Lage transformiert werden. Dazu ist ein mehrfaches Ändern des Zoomfaktors und des Blickwinkels notwendig, da das Werkzeug eventuell sehr weit vom Zielpunkt entfernt ist und alle Objekte stark verkleinert werden müssen damit sie alle am Bildschirm zu sehen sind. Dabei kann es passieren, dass das Werkzeug auf wenige Pixel verkleinert wird und somit nicht mehr oder nur noch mit Mühe selektierbar ist. Das Gleiche gilt für die Manipulatoren zum Transformieren des Werkzeuges. Trotz der räumlichen Darstellung des Werkzeuges kann der Betrachter noch immer nicht feststellen, wie weit es von der zu vermessenden Struktur entfernt ist, da ihm durch die räumliche Abbildung auf den Bildschirm wichtige Informationen fehlen. Um das auszugleichen muss die Szene sehr oft gedreht werden, was wieder zeitaufwendig ist.

2.6 Oberflächengestaltung

2.6.1 Die goldenen Regeln der Oberflächengestaltung

In SHNEIDERMAN [1997] werden acht Regeln beschrieben, die bei dem Design einer grafischen Benutzungsschnittstelle berücksichtigt werden müssen. Auf drei dieser Regeln, die in diesem Zusammenhang besonders wichtig sind, soll hier näher eingegangen werden.

Die am schwierigsten einzuhaltende Regel ist "Strive for consistency (Streben nach Konsistenz)". D.h., dass ähnliche Abläufe im Programm möglichst nach dem gleichen Schema abgearbeitet werden müssen. Die Benutzerschnittstellen müssen eine möglichst hohe Ähnlichkeit aufweisen, um dem Benutzer einen gewissen Wiedererkennungswert zu liefern.

"Reduce short-term memory load (Belastung des Kurzzeitgedächtnisses reduzieren)": Das menschliche Kurzzeitgedächtnis kann nur begrenzt neue Informationen aufnehmen. Wenn innerhalb eines kurzen Zeitraumes weitere Informationen hinzukommen, gehen ältere Informationen wieder verloren. Aus diesem Grund sollten alle wichtigen Informationen gleichzeitig auf dem Bildschirm angezeigt werden. Das ist gerade im medizinischen Alltag wichtig, welcher von vielen Unterbrechungen geprägt ist, und wo zusätzlich zu den Programminformationen noch viele Informationen von außerhalb verarbeitet werden müssen.

"Offer informative feedback (Informative Rückmeldungen anbieten)" bedeutet, dass der Benutzer bei allen Änderungen und Aktionen, die er vornimmt, ausreichend über die Auswirkungen informiert wird. Bei Aktionen, die einen großen Rechenaufwand auslösen, sodass das Ergebnis nicht sofort dargestellt werden kann, muss darauf hingewiesen werden.

2.6.2 Direkte Manipulation

Bei der direkten Manipulation handelt es sich um einen Interaktionsstil, bei dem Aufgaben durch direkte Zeigehandlungen auf grafischen Symbolen von Objekten ausgeführt werden (SHNEIDERMAN, PREIM [1999]). Eines der bekanntesten Beispiele ist das Drag&DropVerfahren. In einem Dateimanager können somit z.B. Dateien von einem Ordner in einen anderen verschoben werden.

Die Vorteile dieses Interaktionsstils sind vor allem die leichte Erlernbarkeit wegen der grafischen Darstellung und das sofortige Feedback der ausgeführten Aktion. Ein Nachteil ist hingegen, dass mit dieser Art der Interaktion Objekte nicht präzise verschoben werden können, sofern es sich hierbei nicht um symbolische Verschiebungen von z.B. Dateien handelt, sondern um räumliche Ausrichtungen an anderen Objekten. In diesem Fall muss die direkt-manipulative Interaktion mit anderen Interaktionsstilen kombiniert werden.

Die direkte Manipulation ist sehr gut für die interaktive Vermessung geeignet, da die Werkzeuge so direkt eingefügt, "angefasst" und verschoben werden können. Um die Präzision der Vermessung zu erhöhen, können zusätzliche Interaktionsmöglichkeiten, wie inkrementelles Verschieben mit der Tastatur oder Automatismen, angeboten werden. Sinnvolle Automatismen sind die Bestimmung des minimalen Abstandes zwischen Objekten und die maximale Ausdehnung eines Objektes.

Bei dieser Art der Interaktion ist der Benutzer darauf angewiesen, eine Rückmeldung darüber zu bekommen, ob ein Objekt bewegt und welche Aktionen darauf ausführt werden können. Als Rückmeldung, ob ein Objekt manipuliert werden kann, muss das Objekt beim Überfahren mit der Maus sein Erscheinungsbild leicht ändern, z.B. durch Umrahmung oder Einfärbung. Nach der Selektion müssen zusätzliche Informationen erscheinen, die darauf hinweisen, wie das Objekt zu bewegen ist. Im Falle der Vermessung wäre dies ein Manipulator, der in die Richtungen deutet, in die das Werkzeug verschoben werden kann. Damit nicht erst nach der Manipulation das Resultat zu sehen ist, muss das Werkzeug mit verschoben werden, oder zumindest mit Linien angedeutet werden, wie das Ergebnis aussehen würde. Das Aufziehen eines Bereichs oder einer Linie mit der Maus, wobei das umschließende Rechteck bzw. die Linie dargestellt werden, wird auch Rubberbanding genannt.

Um die Selektion von grafischen Darstellungen zu erleichtern, die aufgrund ihrer Größe oder Strukturierung (z.B. Text) schwer zu selektieren sind, werden diese von einem maussensitiven Bereich umgeben. Ein solcher Bereich zum einfacheren Selektieren von länglichen und dünnen Objekten wird in FOLEY *et al.* [1990] beschrieben (Abb. 2-11). Er lehnt sich an die Beschreibung eines Gravitationsfeldes von Stabmagneten an. Durch diese Art des sensitiven Bereichs wird die Selektion von Linienenden stark vereinfacht.



Abb. 2-11: Eine Linie umgeben von einem Gravitationsfeld, welches größer ist als die Linie selbst, um die Selektion der Linie zu vereinfachen. Quelle: FOLEY *et al.* [1990]

2.7 3D-Interaktion

Um Objekte in einer 3D-Szenerie manipulieren zu können, werden besondere 3D-Interaktionselemente benötigt. Alternativ wäre es z.B. auch möglich, die Objekte indirekt mit Schaltflächen zu bewegen oder nur 2D-Interaktionen auf der eingestellten Sichtebene zuzulassen. 3D-Widgets sind jedoch aufgrund ihrer Einbindung in die 3D-Visualisierung wesentlich intuitiver und haben mehr Freiheitsgrade. Der Begriff 3D-Widget ist von CONNOR *et al.* [1992] eingeführt worden und ist demnach eine Kombination einer 3D-Geometrie mit dem dazugehörigen Verhalten zur Steuerung oder Anzeige von Informationen. In dieser Arbeit wird anstelle von "3D-Widget" der Begriff "Manipulator" benutzt.

Da es beim Einsatz von 3D-Widgets noch keine hinreichende Standardisierung gegeben hat und die 3D-Widgets bislang nur wenig verbreitet sind, ist ein gewisses Maß an Lernaufwand erforderlich, um mit den ihnen arbeiten zu können.

Im Normalfall müssen die 3D-Widgets mit herkömmlichen Zeige- und Anzeigegeräten wie Maus und Bildschirm bedient werden, welche jedoch nur für eine Interaktion in 2D konzipiert wurden. Die zweidimensionale Bewegung der Maus also auf einen dreidimensionalen Raum abgebildet werden muss, wird mindestens ein weiterer Fixpunkt benötigt, damit die Abbildung eindeutig bleibt. Aus diesem Grund wird die Mausbewegung z.B. auf Kugel- oder Zylinderoberflächen projiziert, wobei der Mittelpunkt im Zentrum des zu manipulierenden Objektes verankert ist. Eine andere Möglichkeit ist, die Bewegung auf eine Ebene oder auf eine Dimension zu beschränken, wobei die fixen Parameter wiederum durch andere 3D-Widgets verändert werden können. Durch die Kombination von mehreren Draggern zu einem übergreifenden Widget wird es notwendig, dieses Widget mit sogenannten Handles (Griffen) zu versehen, mit denen sich die untergeordneten Teilfunktionalitäten auswählen lassen.

2.8 Tiefenhinweise (depth cues)

Ein Problem in der Visualisierung von 3D-Modellen auf 2D-Ausgabegeräten ist die Vermittlung räumlicher Verhältnisse. Um die räumlichen Zusammenhänge (z.B. Abstände oder Größenverhältnisse) richtig interpretieren zu können, müssen zusätzliche Tiefenhinweise in die Darstellung eingebunden werden. Eine Grundvoraussetzung ist, das Objekte, die weiter hinten angeordnet sind, von davor liegenden Objekten verdeckt werden.

Die Nachbildung natürlicher Phänomene wie perspektivische Verkleinerung und Bewegungsparallaxe sind geeignete Mittel, um die relativen Abstände zwischen den Objekten in der Szenerie darzustellen. Der Nachteil dieser Methoden ist, das Fehlinterpretationen auftreten können, wenn die Größenverhältnisse der Strukturen untereinander nicht bekannt sind, und dass das Bild bewegt werden muss, um die Parallaxe hervorzurufen.

Weitere Möglichkeiten, Informationen über die Tiefenlage der Objekte und eine zusätzliche Orientierungshilfe zu vermitteln, sind eine Ansicht mit Schattenprojektion (Abb. 2-12) oder die Unterstützung einer stereoskopischen Darstellung.

In dieser Arbeit soll jedoch mehr auf ein unterstützendes Design des Werkzeuges selbst eingegangen werden.



Abb. 2-12: Durch die Schattenprojektion wird die Tiefenlage der Lebertumore sichtbar

3 Entwurf

Für eine bequeme und effiziente Benutzung müssen die Werkzeuge verschiedene Kriterien erfüllen. Die Lage im Raum sowie zu den umliegenden Strukturen muss gut zu erkennen sein. Die Lage der Werkzeuge selbst – also ob sie parallel zur Sichtebene liegen oder in den Raum hinein verlaufen – kann gut durch die Präsentation mit 3D-Objekten anstelle von einfachen Linien realisiert werden.

Alle Parameter der Werkzeuge müssen mit sinnvollen Initialwerten gestartet werden, damit sie ohne weitere Parametrisierung sofort eingesetzt werden können. Alle voreingestellten Präsentationsvariablen sollten aber auch von dem Anwender individuell nach seinen Wünschen verändert werden können.

Da die exakte Platzierung von Messpunkten aufwändig und fehlerträchtig ist, sind Automatismen wünschenswert, die bestimmte Aufgaben erleichtern, wie z.B. das Picking. Weitere Automatismen sind die Bestimmung der maximalen Ausdehnung von Objekten und die Bestimmung des minimalen Abstandes zwischen zwei Objekten.

Die extrahierten Informationen müssen reproduzierbar sein, d.h. sie müssen dauerhaft abgespeichert werden können. Das ist nötig, damit zu späteren Zeitpunkten Kontrollen vorgenommen oder die Daten für spätere Vergleiche herangezogen werden können.

3.1 Analyse der bestehenden Vermessungswerkzeuge

Beim MeVis wurden bereits verschiedene Werkzeuge entwickelt, die hier detaillierter beschrieben werden sollen. Die Werkzeuge wurden so entworfen, dass alle für das Erscheinungsbild wichtigen Parameter angepasst werden können. Zu den parametrisierten Eigenschaften gehören die Farbe, die Maßeinheit, die Linienstärke und die Eckpunktpositionen.

Die Farbe wird mit Weiß initialisiert. Die Schriftgröße des Maßes passt sich automatisch an die Entfernung zum Betrachter an und hat drei verschiedene Detaillierungsgrade. Die Eckpunktpositionen werden um den Koordinatenursprung gelegt. Jeder Eckpunkt wird mit einem Manipulator versehen, mit dem sich dieser transformieren lässt. Der Manipulator kann aktiviert werden, indem der entsprechende Eckpunkt mit der Maus angewählt wird. Um das gesamte Werkzeug vom Koordinatenursprung möglichst schnell in die gewünschte Position bringen zu können, wird es mit Manipulatoren ausgestattet, die sich auf das gesamte Werkzeug auswirken.

Zum Verschieben der Werkzeuge wurde ein Manipulator entwickelt, mit dem die Werkzeuge frei im Raum verschoben werden können (Abb. 3-1). Der Manipulator wurde aus zwei, in OPENINVENTOR bereits bestehenden, Manipulatoren kombiniert. Der eine Manipulator lässt sich auf einer Ebene (xy) verschieben und der andere nur in einer Dimension (z). Aktiv ist jeweils nur der Teil des Manipulators, der mit der Maus angewählt wird.



Abb. 3-1: Zwei Manipulatoren werden zu einem sogenannten 3D-Dragger kombiniert

3.1.1 Distanzmesswerkzeug

Das Distanzmesswerkzeug wurde dafür entworfen, möglichst genau Abstände zwischen zwei verschiedenen Punkten bestimmen zu können. Es wird durch zwei Kegel beschrieben, die mit einer Linie verbunden werden. Die Stärke der Linie kann durch einen Parameter angepasst werden.



Abb. 3-2: Zwei Distanzlinien, die mit Hilfe der dafür vorgesehenen Manipulatoren verschoben werden können. Bei der oberen Linie wird die Maßzahl außerhalb angezeigt, da der Platz für eine Platzierung innerhalb der Linie nicht ausreichend ist.

Die Maßzahl des Distanzmesswerkzeuges wird in der Mitte der Linie eingeblendet. Um Überlappungen zwischen Maßzahl und Werkzeug zu vermeiden, wird die Linie an dieser Stelle unterbrochen. Bei einer Verkürzung der Linie unter ein bestimmtes Maß wird die Linie geschlossen dargestellt und die Maßzahl jeweils an jenes Werkzeugende gelegt, welches gerade nicht aktiviert ist (Abb. 3-2).

3.1.2 Lineal

Im Gegensatz zur Distanzlinie ist das Lineal nicht primär dafür gedacht, explizite Abstände zu bestimmen, sondern um die Größenverhältnisse und Abstände verschiedener Strukturen untereinander besser einschätzen zu können. Der Aufbau des Lineals ist ähnlich dem der Distanzlinie, nur das zusätzliche Skalenstriche als Kreuze dargestellt werden (Abb. 3-3).

Die Maßeinheit wird optional an der Seite dargestellt. Die Nullstelle der Bemaßung kann entweder an den Rand oder in die Mitte des Werkzeuges gelegt werden, andere Positionen stehen hingegen nicht zur Verfügung. Die Distanz zwischen den Skalenstrichen kann individuell eingestellt werden. Wenn die Länge des Lineals geändert wird, bleibt die Distanz weiterhin konstant und es werden weitere Skalenstriche hinzugefügt bzw. gelöscht. Bei der Anzeige der Skaleneinheiten kommt es zu Überlappungen, wenn das Lineal in den Raum hinein verläuft oder eine zu geringe Distanz eingestellt bzw. das Lineal zu stark verkleinert wird.



Abb. 3-3: Bei dem Lineal werden zusätzliche Skalenwerte angezeigt. Bei ungünstiger Raumlage kommt es hier zu Überlappungen.

3.1.3 Winkelmesswerkzeug

Das Winkelmesswerkzeug besteht aus zwei Linien, die in einem Punkt zusammenlaufen. Die Linienstärke ist auch hier einstellbar. An den Endpunkten werden zwei Kegel dargestellt (Abb. 3-4). Der Winkel lässt sich verändern, indem einer dieser beiden Kegel selektiert wird.



Abb. 3-4: Bei der Winkelmessung werden während der Interaktion zusätzliche Hilfsflächen eingeblendet, die die Lage des Werkzeuges im Raum besser hervorheben. Um die Lage des Werkzeuges besser einschätzen zu können, werden drei zusätzliche transparente Flächen eingeblendet, die die Orientierung erleichtern. Diese sind nur solange sichtbar, wie einer der Manipulatoren aktiv ist. Die Flächen bestehen aus einem Dreieck, das durch die drei Stützpunkte des Werkzeuges definiert wird, und zwei Rechtecken, die senkrecht zur aufgespannten Ebene stehen. Bei der Vermessung von Winkeln, die in der Nähe von 180° liegen, ist die Dreiecksfläche jedoch nicht mehr besonders hilfreich, da sie kaum noch Fläche aufspannt.

Die Maßzahl wird immer auf einem Schenkel eingeblendet. Wenn die Linie zu sehr verkürzt wird, wird sie zum Verbindungspunkt auf der gegenüberliegenden Seite des gemessenen Winkels verschoben. Die Einheit kann ebenfalls mit dargestellt werden.

3.2 Modifikation der bestehenden Werkzeuge

Das von HENRY SONNET entworfene Erscheinungsbild der Werkzeuge in 3D wird zum größten Teil übernommen und die Geometrie nur an wenigen Stellen überarbeitet. Alle Komponenten, die vorher als Linien dargestellt wurden, werden durch Zylinder ersetzt. Dadurch wird der räumliche Eindruck noch verstärkt.

Für die Korrelation zwischen 2D- und 3D-Ansicht brauchen alle Werkzeuge eine Repräsentation für die beiden Darstellungsarten. Die Repräsentation in 2D ist für alle Werkzeuge gleich. Für die Endpunkte der Werkzeuge werden Markierungen auf den jeweiligen Schichten eingezeichnet. Nur bei der Volumenabschätzung werden zusätzliche Informationen abgebildet.

3.2.1 Distanzmesswerkzeug

Bei der Vermessung sollte es möglich sein, die Länge eines Gefäßastes genauso gut ausmessen zu können wie die Länge des Oberschenkelhalsknochens. Ein einheitlicher Durchmesser des Vermessungswerkzeuges würde dazu führen, dass es bei sehr kurzen Abständen mehr breit als lang und bei sehr langen Abständen nur noch als dünne Linie zu erkennen wäre. Deswegen wird die Dicke des Werkzeuges wird an die aktuelle Länge angepasst (Abb. 3-5). Dadurch können beliebig große Abstände ausgemessen werden, ohne dass eine weitere Interaktion notwendig ist. Es wäre auch denkbar, die Dicke vorab anhand der Ausmaße des zu vermessenden Datensatzes zu initialisieren. Da aber auch kleine Strukturen in einem großen Datensatz vermessen werden sollen, wird davon abgesehen. Auch auf die Möglichkeit, den Durchmesser an die Größe der aktuellen Darstellung auf dem Bildschirm zu koppeln, wird verzichtet, da dies im Widerspruch zur erwarteten perspektivischen Verkleinerung stehen würde. Damit der Durchmesser keine überdimensionierten Größen annimmt oder bei sehr kurzen Messungen kaum noch zu sehen ist, wird die Größenanpassung nach beiden Seiten beschränkt. Die Verbindungslinie wurde durch einen Zylinder ersetzt. Alle weiteren Visualisierungsparameter wurden übernommen.



Abb. 3-5: Die blaue Distanzlinie ist genauso weit von der Kamera entfernt, wie die Gelbe. Die Größe kommt durch die kürzere Distanz zustande.

3.2.2 Lineal

Im Gegensatz zur Distanzlinie ist das Lineal nicht primär dafür gedacht, explizite Abstände zu bestimmen, sondern um die Größenverhältnisse und Abstände verschiedener Strukturen unter-

einander besser einschätzen zu können. Daher ist ein präzises Positionieren nicht notwendig, sodass die Kegel an den Enden durch Kugeln ersetzt werden. Dadurch ist eine bessere Selektionsmöglichkeit der Linealenden gewährleistet. Die Skalenkreuze werden aufgrund der besseren Sichtbarkeit und perspektivischen Darstellung durch Scheiben ersetzt.

Die beiden Manipulatoren an den Werkzeugenden haben ihre Funktion beibehalten und dienen weiterhin zur Verschiebung der jeweiligen Enden. Da das Werkzeug durch die Erweiterung der Interaktionsmöglichkeiten (Abschnitt 3.3) wesentlich effizienter versetzt werden kann, sind die Manipulatoren zum Verschieben und Drehen des gesamten Werkzeuges nicht mehr notwendig. Die Manipulatoren wurden daher entfernt.

Statt dessen wird ein Manipulator eingefügt, der durch die Selektierung der Verbindungslinie erscheint. Dieser Manipulator dient dazu, den Nullpunkt beliebig auf dem Lineal verschieben zu können. Der Parameter zur Auswahl der Nullpunktposition (Mitte oder Rand) wurde daher auch entfernt.



Abb. 3-6: Lineal mit Skalenüberlappung



Abb. 3-8: Lineal ohne Skalenüberlappung



Abb. 3-7: Skalenscheiben, für die keine Maßzahl angezeigt wird, haben einer geringeren Umfang

Das Problem der Überlappung der Skalenwerte bei ungünstiger Raumlage oder perspektivischer Verkleinerung (Abb. 3-6) wird durch verschiedene Detaillierungsgrade des Lineals behoben. Je nachdem, wie groß das Lineal auf dem Bildschirm dargestellt wird, werden unterschiedlich viele Skalenwerte dargestellt (Abb. 3-8). Es werden ausschließlich Skalen angezeigt, die sich durch den vom Benutzer eingestellten Skalenabstand restlos teilen lassen. Für Skalenwerte, die sich aufgrund dieser Vorgabe aus Platzmangel nicht anzeigen lassen, werden kleinere Scheiben ohne Angabe des Wertes gezeichnet (Abb. 3-7).

3.2.3 Winkelmesswerkzeug

Die Geometrie des Winkelmesswerkzeuges wird zum größten Teil übernommen. Die Linien werden wie bereits erwähnt durch Zylinder ersetzt. Die dreieckige Hilfsebene, die den Winkel zwischen den Schenkeln aufgespannt hat, wird gegen einen Teilkreis ausgetauscht, da dieser auch bei Winkeln um 180° gut zu erkennen ist (Abb. 3-9).

Der Manipulator am Verbindungspunkt, mit dem sich vorher das gesamte Werkzeug verschieben ließ, lässt sich jetzt nur noch der Verbindungspunkt selbst verschieben. Alle weiteren Visualisierungsparameter wurden übernommen.



Abb. 3-9: Zwischen den Schenkeln wird ein Kreissegment zur besseren Orientierung eingeblendet

3.2.4 Automatische Farbgebung

Für die gleichzeitige Darstellung mehrerer Werkzeuge ist es notwendig, dass die Werkzeuge gut voneinander zu unterscheiden sind. Dies wird erreicht, indem den Werkzeugen verschiedene Farben automatisch zugewiesen werden. Bei der Initialisierung wird jedem neuen Werkzeug eine Farbe aus einer festgelegten Auswahl zugewiesen, die jedoch vom Anwender weiterhin verändert werden kann. Wenn alle Farben vergeben wurden, wird bei der Farbauswahl wieder von vorne angefangen.

SCHUMANN [2000] beschreibt acht Farben, die sich durch einen guten Kontrast untereinander auszeichnen. Da sich die Farben von einem hellen Hintergrund genauso gut abheben müssen wie von einem dunkeln oder verrauschten, musste diese Farbauswahl reduziert werden. Die Farben Blau und Braun sowie Gelb und Rosa wurden aussortiert, da sie zu dunkel bzw. zu hell sind und vor entsprechenden Hintergründen kaum zu erkennen sind (Abb. 3-10 - Abb. 3-12). Nach weiteren Modifikationen bleiben die Farben hellblau, grün, rot und orange übrig.



Abb. 3-10: Eingefärbte Werkzeuge vor zwei entgegengesetzten Grauverläufen



Abb. 3-11: Gleichmäßiger Hintergrund

Abb. 3-12: Stark kontrastierter Hintergrund

3.2.5 Beschriftung

Es muss ein klarer Zusammenhang zwischen dem Werkzeug und dem zugehörigen Maß erkennbar sein. D.h. es muss möglichst in der Nähe des Werkzeuges angezeigt werden. Dabei darf es weder wesentliche Teile des Werkzeuges selbst noch die zu vermessenden anatomischen Strukturen verdecken. Zusätzlich kann ein Bezug zwischen Werkzeug und Maß hergestellt werden, indem das Maß in der Farbe des Werkzeuges dargestellt wird. Bei einer Einfärbung der Beschriftung kommt es jedoch trotz der bereits eingeschränkten Farbauswahl zu Problemen bei der Lesbarkeit.

Auf den meisten Hintergründen lässt sich eine weiße Schrift mit einer schwarzen Umrahmung sehr gut lesen. Bei einer solchen Darstellung würde jedoch der Bezug zum Werkzeug verloren gehen. Da eine eingefärbte Schrift mit schwarzer oder weißer Umrandung bei der Lesbarkeit keine Vorteile bringt (Abb. 3-13), wird hinter die Schrift eine unifarbene Ebene gelegt (Abb. 3-14). Nach mehreren Tests wurde die Variante gewählt, die Schrift weiß darzustellen, den Rahmen schwarz und die Ebene dem Werkzeug entsprechend einzufärben (Abb. 3-15 / Abb. 3-16). Um nicht zu viel von den zu vermessenden Strukturen zu verdecken, wird die Ebene transparent gezeichnet.





Abb. 3-14

Abb. 3-15

Abb. 3-16

Eine Besonderheit der Beschriftung ist, dass diese immer im Vordergrund gezeichnet wird. Dadurch wird sichergestellt, dass die Bemaßung immer gut abzulesen ist, auch wenn Teile des Werkzeuges verdeckt werden.



Abb. 3-17: Optional lassen sich zur Maßzahl noch die Einheit und eine Beschriftung einblenden Zusätzlich lässt sich jedem Werkzeug ein Name zuweisen, der zusammen mit der Einheit in der 3D-Visualisierung angezeigt werden kann (Abb. 3-17). Eine Auswahl von Standard-Einheiten wird ebenfalls angeboten. Bei den Längenmaßen handelt es sich um mm, cm und m, bei den Volumenmaßen um mm³, ml und l und beim Winkelmaß um Grad.

Die Präzision der Bemaßung muss der Problemstellung angemessen sein. Auch bei hochauflösenden Datensätzen sind genauere Angaben als 0,1 mm für die Therapieplanung irrelevant. Ein weiterer Grund, nicht unnötig präzise zu bemaßen, ist der Platzbedarf der Nachkommastelle. Um Fehlinterpretationen vorzubeugen, könnte der in der Messung vorhandene Fehler optional mit angegeben werden. Da dieser Fehler nicht nur von nachvollziehbaren Größen wie der Voxelgröße des Datensatzes abhängt, sondern z.B. auch Segmentierungsfehler mit einfließen können, wird die Ungenauigkeit nicht mit angegeben.

3.2.6 Hervorhebungstechniken

Um zu verdeutlichen, an welchen Stellen die Werkzeuge Interaktionsschnittstellen bieten, werden diese beim Überfahren mit der Maus farblich hervorgehoben. Da die Werkzeuge auf diverse Arten manipuliert werden können, muss der eingestellte Interaktionsmodus noch verdeutlicht werden. Auf den Umstand, dass Pick- und Drag-Modus nicht gleichzeitig freigegeben werden können, soll im Abschnitt 3.3.1 eingegangen werden.

Der erste Entwurf, die Werkzeugkomponenten je noch Modus einzufärben, musste verworfen werden (Abb. 3-18 / Abb. 3-19). Da die Werkzeuge selbst bereits eine Farbe zugewiesen bekommen haben, kommt es durch eine zusätzliche Einfärbung (dem Modus entsprechend) zu unübersichtlichen Mischfarben (Abb. 3-20 / Abb. 3-21). Das Einblenden von zusätzlichen Objekten am Werkzeug wurde ebenfalls verworfen, da die Darstellung der Werkzeuge so schlicht wie möglich gehalten werden muss, um nicht allzu viel von den zu vermessenden Strukturen zu verdecken.



Abb. 3-20: Rote Einfärbung ergibt Mischfarbe

Abb. 3-21: Blaue Einfärbung ergibt Mischfarbe

Wenn ein Werkzeugteil mit der Maus ausgewählt wird, so wird dieser Teil dauerhaft heller dargestellt (Abb. 3-22). Um deutlich zu machen, in welchem Modus sich das Werkzeug befindet, werden die Manipulatoren nur dann eingeblendet, wenn sich das Werkzeug im Drag-Modus befindet. Welcher der inkompatiblen Interaktionsmodi aktiviert ist, wird zusätzlich außerhalb der Visualisierung in einem Menü angezeigt.



Abb. 3-22: Der rechte Teil der Distanzlinie wird heller dargestellt, da er momentan aktiv ist.

3.3 Ergänzung der direkten Manipulation von Vermessungswerkzeugen

Der größte Kritikpunkt an den bereits entwickelten und eingesetzten Vermessungswerkzeugen ist ihre schlechte Handhabung. Um vernünftig eingesetzt werden zu können, müssen die Werkzeuge jedoch schnell und leicht zu bedienen sein. Dazu zählt, dass sie sofort an den gewünschten Punkt zu transformieren sind. Dafür werden verschiedene Möglichkeiten zur Interaktion benötigt, wobei umständliche Kombinationen von Maus und Tastatur oder das Drücken mehrerer Maustasten gleichzeitig vermieden werden sollten. Daher sollten alle Aktionen mit der linken Maustaste ausgeführt werden können.

Der naheliegendste Ansatz ist, das Werkzeug mit einem Manipulator in der 3D-Visualisierung zu bewegen. HENRY SONNET hat bereits einen Manipulator beschrieben, mit dem das Werkzeug auf allen drei Koordinatenachsen verschoben und so jeder beliebiger Punkt im Raum erreicht werden kann. Der Manipulator zum Verschieben der Werkzeuge sollte bei allen Entfernungen zur Kamera gut selektierbar sein. Wenn sich der Manipulator nicht in seiner Größe anpasst, schrumpft er bei großen Entfernungen auf wenige Pixel zusammen oder ist überhaupt nicht mehr sichtbar.

Ein weiterer einfacher Ansatz ist die numerische Koordinateneingabe der Endpunktkoordinaten. Diese Methode ist jedoch nur sinnvoll, wenn dem Anwender die Koordinaten bereits bekannt sind.

Zum präzisen inkrementellen Verschieben des Werkzeuges ohne Einblendung eines Manipulators, der eventuell wichtige Strukturen verdecken könnte, ist die Eingabe über die Tastatur geeignet. Zum Verschieben in der *xy*-Ebene werden die Cursor-Tasten benutzt und zum Verschieben in der *z*-Achse die *Bild-Auf / Bild-Ab* Tasten. Die Größe des Inkrements kann frei gewählt werden.

Ein sehr intuitiver Ansatz ist das Positionieren des Werkzeuges per Picking. Hierbei kann direkt eine Oberfläche angewählt werden, indem der Strahl von der gewählten Position entlang der Kamerarichtung verfolgt und die erste getroffene Fläche selektiert wird. Diese Methode erfordert jedoch bereits segmentierten Daten, da es bei unbearbeiteten Daten aufgrund der halbtransparenten Strukturen zu unerwarteten Ergebnissen kommen kann.

Um auch auf Rohdaten effektiv arbeiten zu können, bietet sich eine Kombination aus 2D- und 3D-Interaktion an. Die Endpunkte des Werkzeuges können auf den Schichten des Datensatzes gesetzt werden, wobei die Vorgänge synchron in einem 3D-Viewer angezeigt werden. Umgekehrt kann das Werkzeug in 3D mit Hilfe der vorher beschriebenen Methoden verschoben werden, wobei auch hier der 2D-Viewer aktualisiert wird. Dadurch können auch Strukturen vermessen werden, für die sich in der 3D-Visualisierung keine geeignete Fensterung finden lässt, da sich ihre Intensitätswerte nicht genügend von denen der umliegenden Strukturen unterscheiden.

Alle Ausgaben müssen synchronisiert sein, damit die Angaben konsistent zueinander sind.

3.3.1 Aktivierung der Interaktionsmodi

Prinzipiell ist immer nur ein Werkzeug zur Zeit aktiv. Damit wird verhindert, dass versehentlich mehrere Werkzeuge auf einmal verschoben werden können und nicht benötigte Manipulatoren die Sicht versperren. Um alle Werkzeuge zu deaktivieren, muss entweder die mittlere Maustaste betätigt oder mit der rechten Maustaste ins Leere geklickt werden.

Auf die Möglichkeit, dass alle Interaktionsmodi gleichzeitig benutzt werden können, musste zumindest für die Interaktion in der 3D-Ansicht verzichtet werden, da es zwischen der Picking- und der Dragging-Methode zu Konflikten kommen kann.

Wenn der Anwender das Werkzeug mit dem Manipulator verschieben möchte, und dabei aus Versehen nur leicht neben den Manipulator dahinter liegende Strukturen anwählt, würde das Werkzeug an diese Stelle springen. Andererseits wirkt ein Manipulator wiederum störend, wenn das Werkzeug mittels Picking verschoben werden soll. Aus diese Gründen wird jeweils nur der Pick- oder der Drag-Modus freigeschaltet. Zum Umschalten muss entweder die Leertaste betätigt, das Werkzeugende wiederholt ausgewählt oder in einem Menü der entsprechende Eintrag ausgesucht werden.

Beim Picking-Verfahren wird außerdem geprüft, ob es sich bei dem anvisierten Punkt um ein anderes Werkzeug handelt. Ist dies der Fall, wird die Pick-Aktion nicht ausgeführt sondern das andere Werkzeug aktiviert.

Alle anderen Interaktionsmodi können parallel verwendet werden. In den 2D- und 3D-Visualisierungen kann es bei den Interaktionen nicht zu Konflikten kommen, da sich diese in verschiedenen Fenstern mit eigenen Eingabefokussen befinden. Gleiches gilt für die direkte Koordinateneingabe. Das inkrementelle Verschieben per Tastatur kann ebenfalls immer eingesetzt werden, weil hierzu keine Mauseingabe erforderlich ist und keine Fehlinterpretationen auftreten können.

3.4 Entwurf eines Werkzeuges zur Volumenabschätzung

Eine korrekte Segmentierung kann langwierig und aufwändig sein. Zum Segmentieren eines Tumors müssen mehrere Stützpunkte auf verschiedenen Schichten gesetzt werden oder es muss auf jeder einzelnen Schicht die Tumorkontur eingezeichnet werden. In manchen Fällen ist jedoch eine grobe Approximation an das Tumorvolumen ausreichend.

Das von HASTREITER [1999] entwickelte Werkzeug zur Volumenapproximation (Abb. 3-23) wird in dieser Arbeit aufgegriffen und erweitert. Hiernach wird das Volumen durch einen Ellipsoiden angenähert, der über das zu vermessende Objekt gelegt wird. Der Ellipsoid wird wiederum durch einen ihn umschließenden Quader manipuliert. Der Quader kann mit Hilfe eines Manipulators in alle Richtungen verschoben, skaliert und gedreht werden. Der Ellipsoid wird durch ein Drahtgittermodell repräsentiert, da auf diese Art und Weise kaum Strukturen verdeckt werden. Dieses Modell wurde dahingehend erweitert, dass jetzt nicht nur Ellipsoiden, sondern verschiedene Hüllkörper über das Volumen gelegt werden können.



Abb. 3-23: Das Werkzeug zur Volumenapproxima- Abb. 3-24: Wenn das Werkzeug inaktiv tion nach HASTREITER. Die Maßzahl wird während ist, wird die Maßzahl im Zentrum des der Interaktion am Rand positioniert.

Hüllkörpers positioniert.

Nach HASTREITER wird nur das Volumen des Ellipsoiden berechnet und ausgegeben. Das wurde als zu ungenau angesehen, da ein Tumor auch schmale Auswüchse aufweisen kann oder ein Gefäßsystem umschließen kann, ohne dies zu infiltrieren.

Das Volumen des Hüllkörpers wird nicht mehr durch seine die Volumenformel berechnet, sondern es werden die vom Hüllkörper eingeschlossenen Voxel gezählt und mit der Größe eines Voxels multipliziert. Die Größe eines Voxels kann aus der Header-Definition des Datensatzes bestimmt werden. Dadurch wird es möglich, die zu zählenden Voxel zusätzlich durch weitere Bedingungen einzugrenzen.

In diesem Fall wird die Eingrenzung mit Hilfe eines Threshold-Operators vorgenommen. Mit ihm lässt sich eine Schwelle angeben, die nur Intensitätswerte innerhalb eines definierten Bereichs passieren lässt. Da bei minimalen Änderungen des Threshold-Operators das berechnete Volumen stark variieren kann, wird parallel zum ersten Threshold-Operators ein zweiter eingesetzt, sodass sich eine obere und eine untere Grenze für das Volumen berechnen lassen. Damit ist eine Abschätzung des gemessenen Fehlers möglich.

Es kann durchaus sein, dass sich ein Tumor durch hellere und dunklere Intensitätswerte vom gesunden Gewebe abhebt. Für diesen Fall lässt sich das gesunde Gewebe segmentieren und anschließend der selektierte Bereich in dem Hüllkörper invertieren, sodass nun das Volumen des kranken Gewebes berechnet wird.

Das mit dem Threshold-Operator segmentierte Volumen lässt sich ebenfalls in der 3D-Visualisierung anzeigen, wobei diese Art der Darstellung nicht zur korrekten Vermessung geeignet ist. In der 3D-Ansicht lässt sich nicht beurteilen, ob und welche Punkte im inneren Teil des Volumens selektiert sind (Abb. 3-26). Für diese Beurteilung lassen sich in der 2D-Ansicht die Pixel einfärben (Abb. 3-25). Die Pixel werden mit der Farbe des Werkzeuges eingefärbt, wobei die Pixel, die überhaupt von dem Ellipsoiden abgedeckt werden, nur leicht transparent eingefärbt werden, die Pixel der äußeren Volumenbegrenzung etwas opaker und die der inneren Volumenbegrenzung opak.



Abb. 3-25 Selektion der Voxel in 2D



Abb. 3-26 3D-Repräsentation

Approximation eines Tumors mit Hilfe eines quaderförmigen Hüllkörpers. Oberer und unterer Schwellwert sind in diesem Beispiel identisch.

Wie bei den anderen Werkzeugen lassen sich die Visualisierungsparameter vom Anwender anpassen. Das Maß wird im inaktiven Zustand des Werkzeuges im Zentrum des Ellipsoiden angezeigt (Abb. 3-24). Da die Maßzahl immer im Vordergrund gezeichnet wird, ist das Maß stets genau auf dem Ellipsoiden platziert. Im aktiven Zustand wird das Maß an einem Eckpunkt des umschließenden Quaders angezeigt (Abb. 3-23).

3.5 Automatische Vermessung

Mit Hilfe der bereits beschriebenen Werkzeuge lassen sich auf bereits segmentierten Daten automatische Vermessungen vornehmen. Durch Berechnung der Hauptachsentransformation lassen sich die drei längsten, senkrecht zueinander stehenden Achsen eines Objektes bestimmen. Aus diesen Daten lassen sich diverse Informationen extrahieren. Eine solche Information ist die orientierte Bounding Box (Abb. 3-27), mit deren Hilfe sich gut Objekte vor anderen hervorheben oder markieren lassen.



Abb. 3-27: Die Abbildung zeigt drei Tumore innerhalb der Leber. Die Einfärbungen der Leber bezeichnen verschiedene Versorgungsgebiete durch das Gefäßsystem.

3.5.1 Bestimmung der Objektausdehnung

Durch Kombination von drei Distanzmesswerkzeug lassen sich die drei Hauptachsen darstellen (Abb. 3-28). Die Maßzahlen werden immer am Rand dargestellt, da sie sonst alle am Achsenschnittpunkt eingeblendet werden würden, und damit nicht mehr lesbar wären.



Abb. 3-28: Die maximale Ausdehung der Tumore wird durch die drei Hauptachsen angezeigt.

3.5.2 Bestimmung des Winkels zwischen zwei Objekten

Um den Winkel zwischen zwei Objekten bestimmen zu können, wird bei beiden die längste Hauptachse bestimmt. Anschließend lässt sich der Winkel zwischen diesen beiden Achsen berechnen und mit Hilfe des Winkelmesswerkzeugs darstellen..



Abb. 3-29: Der Winkel zwischen Fragmenten des Ober- und Unterschenkelknochens wird durch ein Winkelmesswerkzeug angezeigt.

3.6 Integration der Werkzeuge in eine Applikation

Um den vollen Funktionsumfang der Werkzeuge nutzen zu können, werden diese in eine eigene Applikation eingebunden. Die Applikation dient im Rahmen dieser Arbeit außerdem als Evaluationsumgebung, um testen zu können, inwieweit die Interaktionsstile miteinander kombiniert und sinnvoll angewendet werden können.

Zu diesem Zweck soll es möglich sein, Volumendatensätze als auch OPENINVENTOR-Dateien, die bereits segmentierte Strukturen enthalten können, laden und gleichzeitig anzeigen zu können. Für den Fall, dass z.B. eine Leber von mehreren Tumoren befallen worden ist, und jeder Tumor bereits segmentiert und in einer separaten Datei gespeichert worden ist, können beliebig viele OPENINVENTOR-Dateien auf einmal angezeigt werden.

Es können beliebig viele Vermessungswerkzeuge eingefügt werden. Die Werkzeuge werden in eine Liste eingefügt, aus der zum Einstellen der Visualisierungsparameter jeweils eines ausgewählt werden kann. Ebenso kann ein Werkzeug auch wieder gelöscht werden. In der 3D-Ansicht werden standardmäßig alle Werkzeuge eingeblendet. Die Werkzeuge können jedoch auch explizit ausgeblendet werden. In der 2D-Ansicht wird immer nur das Werkzeug eingeblendet, das in der Liste ausgewählt wurde, um die Ansicht nicht zu überladen.

Damit die Werkzeuge vom Anwender und von der Applikation eindeutig zu identifizieren sind, wird jedem Werkzeug beim Einfügen automatisch ein Name zugewiesen. Dieser setzt sich zusammen aus der Art des Werkzeuges und einer fortlaufenden Nummer (Ruler0, DistanceLine0, DistanceLine1, ...). Der Name lässt sich jedoch nachträglich manuell ändern, wobei das Programm auch hier auf Eindeutigkeit achtet und gegebenenfalls eine fortlaufende Nummer anhängt.

Eine günstige Kameraposition zu finden, in der das Werkzeug sowie die zu vermessende Struktur gut zu sehen ist, kann sehr langwierig sein. Aus diesem Grund kann für jedes Werkzeug eine Kameraposition gespeichert werden. Alternativ kann auch für jedes Werkzeug die Kameraposition automatisch gespeichert werden, wenn ein anderes Werkzeug aus der Liste ausgewählt wird. Diese Position wird dann automatisch wiederhergestellt, wenn das Werkzeug wieder aufgerufen wird.

Trotz optimaler Kameraposition und der Möglichkeit, sich den Datensatz in 2D und in 3D anzusehen, kann die Lage des Werkzeuges eventuell schwer zu erkennen sein (Abb. 3-30). Daher werden in der Applikation zwei zusätzliche Methoden zur Verfügung gestellt, um die Lage sichtbar zu machen. Diese beiden Methoden können auch miteinander kombiniert werden.



Abb. 3-30: Das Winkelmesswerkzeug bei der Vermessung eines Winkels an den Handinnenknochen. Die Lage des Werkzeuges ist kaum zu erkennen, da es von den Knochen verdeckt. Wenn die Fensterung so eingestellt werden würde, das der Knochen ausgeblendet wäre, wäre außer dem Werkzeug nichts mehr zu sehen.



Abb. 3-31: Die Position der drei Eckpunkte in der 2D-Ansicht. Die Lage wird auch hier nicht deutlicher.

Um irrelevante Strukturen auszublenden, können verschiedene Clipplanes eingefügt werden. Alle Strukturen auf der einen Ebenenseite werden gelöscht, sodass die Strukturen auf der anderen Seite freigelegt werden (Abb. 3-32). Um die erzielten Ergebnisse auch zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar zu haben, müssen all diese Informationen auch gespeichert werden können.

Unter Verwendung der Eckpunktkoordinaten eines Werkzeuges kann eine MPR (Multiplanar Reconstruction) erzeugt werden. D.h. eine 2D-Ansicht der Daten, die nicht axial, sagittal oder coronal das Volumen schneidet, sondern beliebig im Raum orientiert ist. Da zur Definition einer Ebene drei Punkte notwendig sind, ist die MPR nur beim Winkelmesswerkzeug eindeutig definiert (Abb. 3-33). Bei der Volumenabschätzung werden der Mittelpunkt sowie die beiden größten Ausdehnungen zur Bestimmung der MPR benutzt, und bei der Distanzlinie und dem Lineal wird ein dritter Punkt erzeugt, der auf der gleichen *x*-Achse wie einer der beiden Eckpunkte liegt. In der 3D-Ansicht kann eine Clipplane erzeugt werden, die die gleiche Lage wie die MPR hat.



Abb. 3-32: Die MPR kombiniert mit einer Clipplane in der 3D-Visualisierung.

Abb. 3-33: Die MPR wird durch die drei Eckpunkte des Winkelmesswerkzeugs definiert.

Für die 2D- und die 3D-Ansicht müssen verschiedene Fensterungen einstellbar sein. Um einen Tumor im Lebergewebe sichtbar zu machen, ist es in der 2D-Ansicht vollkommen ausreichend, genügend Kontrast zwischen beiden Gewebearten herzustellen. In der 3D-Ansicht muss hierzu das gesamte Lebergewebe ausgeblendet werden.

In der 2D-Ansicht werden noch zusätzliche Informationen, wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, dargestellt. Wenn die 2D-Ansicht größer skaliert wird, da die Bildschirmauflösung eine höhere Auflösung zulässt, als die Genauigkeit der dazustellenden Daten, können die einzelnen Pixel ebenfalls vergrößert dargestellt werden (Abb. 3-34), oder aber es wird zwischen den einzelnen Pixeln bilinear interpoliert (Abb. 3-35).



Abb. 3-34: Runden auf den nächsten Nachbarn

Abb. 3-35: Linearer Filter

Während die Interpolation eine genauere Auflösung vorgibt, als eigentlich gegeben, wirkt die Vergrößerung der Pixel sehr unnatürlich. In diesem Fall wurde sich für die Interpolation ent-

schieden, da die Strukturen in der Realität nicht in diskreten Würfeln vorliegen, sondern die Interpolation der Wirklichkeit näher kommt.

3.6.1 Gestaltung der Applikation

Mit Hilfe der Applikation sollen die Werkzeuge möglichst einfach und intuitiv zu bedienen sein. Der durchschnittliche Windows-Anwender ist es gewohnt, beim Navigieren durch grafische Oberflächen allein mit der rechten Maustaste auszukommen. Die linke Maustaste wird nur zum Aufrufen des Kontextmenus benötigt und die Mittlere wird meist gar nicht unterstützt.

Unter diesem Zusammenhang sollten ungewöhnliche Kombinationen zwischen Maus und Tastatur bei der Interaktion vermieden werden. Zu diesem Zweck ist es wünschenswert, möglichst alle Informationen und Interaktionselemente gleichzeitig am Bildschirm anzeigen zu können. In Abb. 3-36 bis Abb. 3-38 werden verschiedene Ansätze zur Flächenaufteilung des Bildschirmes vorgeschlagen.



Auch wenn davon ausgegangen wird, dass die Applikation vorwiegend im Vollbildmodus benutzt wird, ergeben sich Platzprobleme. In den ersten beiden Entwürfen steht für keines der Interaktionselemente ausreichend Platz zur Verfügung. In dem dritten Ansatz wurden die wesentlichen Interaktionselemente auf drei an der Zahl reduziert.

Das mit "3D (2D)" bezeichnete Teilfenster dient zur Darstellung der 3D-Ansicht. Da aber das Teilfenster "2D (3D)" auch hier viel zu klein für die Darstellung der 2D-Ansicht ist, lassen sich die beiden Fenster austauschen, sodass dann im großen Teilfenster die 2D-Ansicht zu sehen ist und umgekehrt. In dem "Optionen" -Fenster werden alle nötigen Parameter angezeigt. Die Parameter werden in funktionale Einheiten aufgespaltet und auf verschiedenen Karteikarten verteilt. Dadurch ergeben sich vier Karteikarten:

- Laden und speichern von Datensätzen
- Verwalten der Werkzeuge
- Einstellen der Kameraparameter und
- Verwalten der Clipplanes

4 Implementierung

4.1 Software für die Implementierung der Vermessungswerkzeuge

Alle Werkzeuge wurden in OPENINVENTOR implementiert und als Module in die Entwicklungsumgebung ILAB von MeVis integriert. Anschließend wurde die Funktionalität unter ILAB noch erweitert.

4.1.1 **OPENINVENTOR**

Bei OPENINVENTOR handelt es sich um objektorientierte Grafikbibliothek, die auf den Grafikroutinen von OpenGL aufsetzt. Ziel von OPENINVENTOR ist es Szenen darzustellen, deren Eigenschaften in Echtzeit vom Benutzer manipuliert werden können, wie z.B. der Blickwinkel, die Materialeigenschaften oder die 3D-Objekte selbst.

In dem Lieferumfang von OPENINVENTOR befinden sich eine Vielzahl von Grafikprimitiven (Kegel, Konus, Würfel, etc), wobei auch Freiformflächen direkt unterstützt werden, und eine Vielzahl von Manipulatoren zum Transformieren von Objekten.

Sämtliche Objekte werden in einem Szenengraphen (Abb. 4-1) zusammengefügt, wobei mit "Objekten" in diesem Zusammenhang nicht nur die Grafikprimitive gemeint sind, sondern auch Materialeigenschaften, Transformationen, Kameras etc. Beim Darstellen des Szenengraphen werden sämtliche Knoten von oben nach unten und von links nach rechts traversiert. Die Eigenschaften eines Knotens, wie z.B. eine Translation oder eine Materialeigenschaft, wirken sich auf alle nachfolgenden Knoten aus, sofern sie nicht von einem weiteren Knoten wieder rückgängig gemacht oder überschrieben werden.

Ganze Teilbäume können unter SOGROUP- oder SOSEPARATOR-Knoten² zusammengefasst werden. Dadurch wird es möglich, diese Teilbäume an verschiedenen Stellen des Szenengraphen einzuhängen. Die Besonderheit des SOSEPARATORS besteht darin, dass Transformationen und Materialänderungen, die in dem Teilbaum unterhalb des SOSEPARATORS vorgenommen werden, gekapselt werden und sich nicht auf Knoten auswirken, die nach diesem Knoten traversiert werden.

Abwandlungen vom Gruppenknoten sind der SOSWITCH- und der SOLEVELOFDETAIL-Knoten. Beim SOSWITCH-Knoten wird nur ein oder gar kein Kind traversiert. Welches Kind traversiert wird, kann im Programmablauf variiert werden. Beim SOLEVELOFDETAIL-Knoten wird ebenfalls nur ein Kind traversiert, je nachdem, wie groß der darrunterliegende Teilbaum in dem Ausgabefenster dargestellt wird.

Ein weiteres Konzept, welches von OPENINVENTOR unterstützt wird, sind die Benutzung sogenannter Felder. Für sämtliche gängigen Datentypen wie Integer oder Float wurden eigene Klassen eingeführt, die die ständige Überwachung der Variablen ermöglichen. Felder können mit anderen Feldern verbunden werden, welche bei Änderung benachrichtigt werden und eine Update-Routine anstoßen, die eine Aktualisierung veranlasst. Außerdem lassen sich mit Hilfe von SOENGINES komplexe Operationen definieren. Wird ein Eingangsfeld einer SOENGINE verändert, so werden die Berechnungen neu ausgeführt und die Ausgangsfelder ebenfalls aktualisiert. Eine besondere SOENGINE ist der sogenannte SOCALCULATOR, der einen eigenen Parser besitzt, in dem sich gegenseitig beeinflussende mathematische Funktionen und Bedingungen definieren lassen. Der SOCALCULATOR besitzt acht Ein- und Ausgänge, sodass

² In Open Inventor wird allen Klassen, die in den Szenengraphen eingehängt werden können, ein "So" (Scene object) vor den Klassennamen gestellt.

bis zu acht Felder gesteuert werden können. Die Verwendung von Feldern in Verbindung mit Engines bietet weiterhin den Vorteil, dass die Verarbeitung der Feldaktualisierung parallel zum eigentlichen Programm abläuft. Endlosschleifen, die entstehen können, wenn sich Felder gegenseitig beeinflussen, werden automatisch abgefangen. Außerdem wird der Quelltext durch den SOCALCULATOR-Parser sehr übersichtlich, da die Feldüberwachung nicht mehr auf mehrere SOCALLBACKS verteilt ist.



Abb. 4-1: Dieser Szenengraph zeigt den Aufbau der Stammklasse SOMEASURETOOL, welche von allen Vermessungswerkzeugen verwendet wird. Die Materialänderungen, die im Teilbaum des Würfel-SEPARATORs vorgenommen werden, wirken sich nur auf den Würfel aus. Die Änderung der Schriftgröße betrifft den gesamten nachfolgenden Graphen, da sie nicht von einem SEPARATOR gekapselt werden. Die abgeleiteten Werkzeuge hängen ihre Manipulatoren an den Manipulator-SWITCH, die 3D-Objekte an den Eckpunkte-SEPARATOR und die Beschriftung an den ANNOTATION-Knoten.

OPENINVENTOR bietet eine SOVIEWER-Klasse an, in der die Szenengraphen angezeigt werden können. Soweit nicht vom Programmierer bereitgestellt, fügt diese Klasse selbstständig eine Beleuchtung und eine Kamera hinzu, damit der Graph betrachtet werden kann. Die Kamera wird automatisch so positioniert, dass die gesamte Szene zu sehen ist. Dieser VIEWER verfügt über zwei Interaktionsmodi, den *Handle-* und den *View-*Modus. Zwischen beiden Modi kann mit der *Escape-*Taste umgeschaltet werden. Im *View-*Modus kann die Szene durch Kombinationen der linken und mittleren Maustaste verschoben, skaliert und rotiert werden. Im *Handle-*Modus werden die Maus- und Tastatur-Events an den Szenengraphen weiter-

geleitet, sofern der VIEWER den Event nicht selbst verarbeiten kann (wie etwa das Drücken der *Escape*-Taste).

Wenn der Event nicht vom Viewer behandelt werden kann, so traversiert der Event den Graphen, bis ein Knoten diesen abfängt oder alle Knoten passiert wurden. In den Graphen lassen sich SOCALLBACKS einfügen, die auf solche Events reagieren und dann selbstdefinierte Methoden aufrufen. Auf diese Art und Weise werden die benötigten Maus- und Tastaturevents abgefangen.

Wenn eine Maustaste in einer OPENINVENTOR-Szene gedrückt wird, wird das selektierte Objekt ermittelt und der Pfad zwischen der Wurzel des Szenengraphen und dem Objekt bestimmt. Dieser Pfad wird beim Aufruf eines entsprechenden SOCALLBACKS übergeben.

4.1.2 ILAB

ILAB ist gemeinsame Entwicklungsplattform für alle Entwicklungen bei MeVis und Möglichkeit für das Prototyping von medizinischen Applikationen. ILAB ist eine grafische Entwicklungsoberfläche, in der die OPENINVENTOR-Knoten mit den Bildverarbeitungsmodulen von MeVis kombiniert werden. Die Klassen von OPENINVENTOR und die Bildverarbeitungsmodule können hier als Module in eine grafische Oberfläche eingefügt und zu einem Netzwerk verknüpft werden (Abb. 4-2). Die beiden von OPENINVENTOR eingeführten Konzepte – der Szenengraph und die Felder – werden von ILAB direkt unterstützt. Alle Felder einer OPENINVENTOR Klasse können in dem zugehörigen Panel angezeigt und mit Feldern anderer Klassen per Drag & Drop verknüpft werden. Zusätzlich wurde OPENINVENTOR noch um einige Klassen erweitert, durch die es möglich wird, auch 2D-Objekte darzustellen und Volumendatensätze in den Szenengraphen zu integrieren.

Mitunter ist es sinnvoll, Netzwerke mit einer bestimmten Funktionalität getrennt abzuspeichern und als Makro in ein anderes Netzwerk zu integrieren. Z.B. ein Makro, das als Eingabeparameter einen DICOM-Datensatz erhält, diesen zusammen mit den Patienteninformationen in 2D-Schichten darstellt und es zusätzlich ermöglicht, mit der Maus die Transferfunktion zu manipulieren und durch die einzelnen Schichten hindurchzublättern.

Die Ein- und Ausgabeparameter des Makros, sowie die Felder der einzelnen Netzwerkkomponenten, die nach außen geführt werden sollen, können in der ILAB-Skriptsprache definiert werden. In die Skriptsprache sind außerdem die Sprachen Objective-C und JavaScript eingebettet, wodurch auch Funktionsaufrufe und komplexe Operationen möglich sind.

Um die komplizierten Netzwerke von dem Endanwender fernzuhalten und ihm eine fertige Applikation anzubieten, lässt sich das Layout des Makro-Panels mit der Skriptsprache frei gestalten und zu einem komplexen Fenstersystem ausbauen.



Abb. 4-2: dieses komplexe ILAB-Netzwerk steht hinter der Applikation, in die die Vermessungswerkzeuge integriert wurden. Die gewölbten Module stellen OPENINVENTOR-Klassen dar, oder Makros in denen andere Netzwerke zusammengefasst wurden. Die flachen Module sind Bildverarbeitungsklassen. Es stehen drei verschiedene Kommunikationsmöglichkeiten zwischen den Modulen zur Verfügung. Mit den runden Anschlüssen werden OPENINVENTOR-Szenengraphen aufgebaut, mit den Dreieckigen werden Volumendatensätze zur Verarbeitung weiterereicht und die dunkelgrauen Linien an den Seitenausgängen stehen für Feldverbindungen.

4.2 Allgemeine Funktionalität der Werkzeuge

Die Klasse SOMEASURETOOL ist die Basisklasse aller Messwerkzeuge. In dieser Klasse werden in den Szenengraphen der Werkzeuge einige Knoten eingehängt, die das einheitliche Verhalten aller Werkzeuge sicherstellen.

Während der Interaktion mit dem Werkzeug soll jeweils nur ein Manipulator zum Manipulieren zu sehen sein. Zu diesem Zweck wird ein SOSWITCH-Knoten in den Graphen eingehängt, an den bei der konkreten Initialisierung der Werkzeuge die Manipulatoren angehängt werden.

Des Weiteren wird ein SOLEVELOFDETAIL-Knoten für den Detaillierungsgrad bereitgestellt und es werden SOSEPARATORS eingefügt, an denen die Maßzahl und die Werkzeuggeometrie selbst angehängt werden.

Zusätzlich werden zwei statische Variablen angelegt. Zum einen ein Zähler, der bei jeder neuen Instanzierung inkrementiert wird und anhand dessen einer der vordefinierten Farbwerte dem Werkzeug zugewiesen wird. Wenn der Zeiger den Wert fünf erreicht, wird er wieder auf eins zurückgesetzt, sodass vier Zustände möglich sind. Zum anderen ein Zeiger auf das momentan aktive Werkzeug. Dieser wird für die korrekte Abarbeitung der Events benötigt, da immer nur ein Werkzeug reagieren soll.

Bisher wurden fast alle Felder, insbesondere die, die für die Interaktion verwendet wurden, mit Hilfe von SOCALLBACK-Knoten überwacht. Dadurch wird der Quelltext schwer zu warten und unübersichtlich, da in der Regel jeder SOCALLBACK-Knoten eine eigene Methode aufruft. Da die Funktionalität noch um einige Interaktionsmöglichkeiten erweitert werden soll, die wiederum neue interne Felder benötigt, werden die Felder so weit wie möglich mit Hilfe von SOENGINES überwacht.

Die Manipulatoren für die 2D-Interaktion wurden nicht unter OPENINVENTOR realisiert, sondern erst unter ILAB hinzugefügt.

4.2.1 Detaillierungsgrad der Darstellung

Da die Werkzeuge aus 3D-Objekten zusammengesetzt werden, passen sie sich automatisch an die dargestellte Szene an und werden je nach Position der Kamera entsprechend groß gezeichnet. Bei 2D-Objekten, wie bei der Schrift, ist dies nicht der Fall. Zwar kann den Objekten eine Position im 3D-Raum zugewiesen werden, doch hat dies keinerlei Auswirkungen auf die Darstellungsgröße, sondern nur, ob die Schrift von davor liegenden Objekten verdeckt wird oder nicht. Zu diesem Zweck hat Henry Sonnet unter den SOLEVELOFDETAIL-Knoten mehrere Gruppenknoten mit je einem Würfel und einem SOFONT-Knoten gehängt. Die Größe des Würfels im Fenster bestimmt, welcher Gruppenknoten ausgewählt wird, und mit dem SOFONT-Knoten lassen sich für alle nachfolgenden SOTEXT-Knoten Schriftart, größe, etc. festlegen. Auf diese Art und Weise werden dem Werkzeug drei verschiedene Schriftgrößen zugewiesen.

Der normale SOTEXT-Knoten wird durch einen selbst definierten SOEXTTEXT-Knoten ersetzt. Dies ist notwendig, um den Text mit einer Umrandung und einer dahintergelegten transparenten Ebene versehen zu können. Dieser SOEXTTEXT -Knoten wurde direkt unter OpenGL implementiert, sodass hier auf die von OpenGL unterstützte Schriftart Helvetica zurückgegriffen werden musste. Diese Schriftart wird nur in drei festen Größen (10, 12 und 18) angeboten, was jedoch aufgrund der wesentlich besseren Lesbarkeit in Kauf genommen wird, auch wenn eine bessere Verteilung der Schriftgrößen wünschenswert wäre.

Der Text wird hinter einen SOANNOTATE-Knoten gehangen. Dieser bewirkt, dass alle an ihm hängenden Objekte erst dann gezeichnet werden, wenn der Rest der Szene bereits gezeichnet worden ist. Dadurch befindet sich der Text grundsätzlich immer im Vordergrund und wird nie von anderen Objekten verdeckt.

Bei größerer Entfernung kann es sein, dass das Werkzeug nicht mehr angezeigt wird, obwohl es eine Spannbreite von mehreren Zentimetern besitzt. Das kommt daher, weil das Werkzeug zu dünn ist, um gezeichnet zu werden. Um dem Abhilfe zu schaffen, wird in dem oben erwähnten SOLEVELOFDETAIL-Knoten ab einer gewissen Entfernung der Zeichenmodus (SODRAWSTYLE) geändert. Mit Hilfe des Zeichenmodus kann zwischen den Modi Punkt, Linie, normal und unsichtbar umgeschaltet werden. Wenn das Werkzeug im Linienmodus gezeichnet wird, werden alle Kanten der einzelnen Objekte, aus denen das Werkzeug besteht, durch eine ein Pixel breite Linie dargestellt. Dadurch bleibt das Werkzeug auf jeden Fall sichtbar, kann aber weiterhin von anderen Objekten verdeckt werden. Da sich der Zeichenmodus auch auf die Beschriftung auswirkt, und diese nur noch als ein einfaches Rechteck dargestellt werden würde, wird diese noch mit einem eigenen SODRAWSTYLE-Knoten versehen, der die Beschriftung permanent im Normal-Modus zeichnet.

4.2.2 Interaktionsmöglichkeiten

OPENINVENTOR stellt verschiedene Manipulatoren zur Verfügung, die die 2D-Bewegung der Maus auf ein Bewegungsmodell in 3D abbilden. Es gibt z.B. einen SOROTATESPHERICAL-DRAGGER, der das Zentrum des zu bewegenden Objektes als Fixpunkt nimmt und die Bewegung der Maus auf die umschließende Kugel projiziert. Es gibt auch einen SOTRANSLATE2DRAGGER, mit dem man ein Objekt auf einer 2D-Ebene verschieben kann. Alle von OPENINVENTOR bereitgestellten Manipulatoren brauchen jedoch mindestens einen Fixpunkt, um die Mausbewegungen eindeutig in 3D abbilden zu können. Da die Werkzeuge aber vollkommen frei im Raum bewegt werden sollen, muss auf einen solchen Fixpunkt jedoch verzichtet werden. Einen solchen Manipulator hat Henry Sonnet entwickelt. Er besteht aus dem SOTRANSLATE2DRAGGER und einem dazu senkrecht stehenden SOTRANSLATE1-DRAGGER, welcher sich nur auf einer Linie bewegen lässt. Die beiden Dragger wurden zu einem Manipulator kombiniert und lassen sich abwechselnd bewegen. Dadurch bleibt die Bewegung auch weiterhin eindeutig, wird jedoch auch sehr umständlich, wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben worden ist. Ein besserer Manipulator ist aufgrund der benötigten Eindeutigkeit auch nicht vorstellbar.

Ein großes Problem der bisherigen Interaktion mit dem Manipulator ist es, dass der Manipulator bei größerer Entfernung auf wenige Pixel reduziert wird und somit nicht mehr vernünftig bedienbar ist. Aus diesem Grund wurde versucht, einen Manipulator zu entwickeln, der seine Größe verdoppelt, sobald seine Darstellungsgröße am Bildschirm unter eine bestimmte Grenze fällt. Das hatte jedoch zur Folge, dass sich mit der Verdopplung der Skalierung auch der Positionsvektor und die Bewegungsgeschwindigkeit verdoppeln – im Gegensatz zum Objekt, das bewegt werden soll. Da Dragger auch nicht auf normalem Wege erstellt werden können, sondern nur über sogenannte Toolkits, über die es keine entsprechende Dokumentation gibt, wurde dieser Ansatz wieder verworfen.

Wenn ein Maus-Event gesendet und von einem Messwerkzeug abgefangen wird, ist dem Werkzeug nicht bekannt, ob sich noch andere Messwerkzeuge in dem Szenengraphen befinden. Bekannt ist nur, dass nur ein Werkzeug zur Zeit aktiv ist. Zunächst prüft die Instanz, ob die linke oder die mittlere Maustaste gedrückt worden ist. Wenn die mittlere Taste gedrückt wurde, ist es irrelevant, ob diese Instanz gerade aktiv ist. Mit Hilfe des Zeigers auf das aktive Werkzeug wird dieses deaktiviert, der Zeiger auf *NULL* gesetzt und der Event als behandelt markiert.

Wenn die linke Maustaste betätigt wurde, wird zunächst geprüft, ob der von OPENINVENTOR übergebene Pfad leer ist. Ist dies der Fall, wird genauso verfahren wie beim Betätigen der mittleren Maustaste. Wurde ein Objekt selektiert, so wird ermittelt, ob es sich um einen Eckpunkt einer anderen Instanz handelt. Wenn ja, wird der Event hier nicht weiter behandelt, sodass der Event den Szenengraphen weiter traversiert und früher oder später auf dieses Werkzeug trifft. Wenn es sich um einen Eckpunkt dieser Instanz handelt, wird im weiteren Verlauf getestet, ob das Werkzeug schon vorher aktiv war. Wenn nicht, wird mit Hilfe des statischen Zeigers, der das bisher aktive Werkzeug angibt, dieses deaktiviert und der getroffene Eckpunkt aktiviert. War das Werkzeug bereits aktiv – und auch der getroffene Eckpunkt – so wird der Interaktionsmodus zwischen Pick- und Drag-Modus umgeschaltet, ansonsten wird nur der vorher selektierte Eckpunkt deaktiviert und der neue aktiviert. Wenn ein Objekt selektiert wurde, aber kein Werkzeugeckpunkt, so wird geprüft, ob sich ein Werkzeug im Pick-Modus befindet. Wenn das der Fall ist, so wird der aktivierte Eckpunkt dieses Werkzeuges an den selektierten Punkt gesetzt.

Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, dass keine zwei Manipulatoren auf einmal aktiv sind, also nicht mehr Objekte als nötig den Blick auf die anatomischen Strukturen versperren, und im Pick-Modus kein Werkzeug auf ein anderes gesetzt wird, wenn ein anderes selektiert werden soll. Zur besseren Veranschaulichung wird der Vorgang in Abb. 4-3 noch einmal in einem Flussdiagramm dargestellt.



Abb. 4-3: Verarbeitung eines Events, der durch das Drücken der linken Maustaste ausgelöst wurde.

Beim Abfangen eines Tastatur-Events wird nur unterschieden, ob die Leertaste oder eine Richtungstaste gedrückt worden ist. Wurde die Leertaste gedrückt, so wird mit Hilfe des Zeigers auf das aktuelle Werkzeug zwischen Pick- und Drag-Modus umgeschaltet und der Event als behandelt markiert. Beim Drücken einer Richtungstaste wird ebenfalls das aktuelle Werkzeug mit Hilfe des Zeigers direkt aufgerufen. Optional kann hier noch mit angegeben werden, ob eine Zusatztaste (*Umschalt, Strg* oder *Alt*) gedrückt wurde. Die Zusatztaste wird jedoch nur von dem Werkzeug zur Volumenapproximation verwendet.

Zur 2D-Interaktion stehen unter ILAB zwei Module zur Verfügung, mit denen die Eckpunkte gesetzt werden können. Zum einen das Modul SOVIEW2DCURRENTPOS und zum anderen das Modul MARKER. SOVIEW2DCURRENTPOS erzeugt ein Fadenkreuz, bestehend aus zwei sich kreuzenden Linien, die über das gesamte Bild verlaufen, und einem kleinen Quadrat an der kreuzenden Stelle. Durch die beiden Linien ist die markierte Stelle beim Durchsuchen der Schichten leicht wiederzufinden, wirkt aber auch leicht störend. Außerdem lässt sich ein solches Fadenkreuz nicht verschieben, sondern muss bei jeder Positionsänderung neu gesetzt werden. Dadurch lässt sich nicht feststellen, welcher der Eckpunkte verschoben werden soll

und die Eckpunkte daher immer nacheinander in einer bestimmten Reihenfolge gesetzt werden müssen.

MARKER erzeugt ein kleines Quadrat, das auf der Schicht, auf der es gesetzt worden ist, opak gezeichnet wird, und in den anliegenden Schichten transparent ausläuft. Diese Darstellung wirkt nicht so störend, ist aber auch schwerer wiederzufinden. Die Markierung lässt sich mit der Maus verschieben, kann aber auf keine andere Art und Weise manipuliert werden. Das ist jedoch notwendig, um die Konsistenz der Darstellung zu erhalten, wenn das Werkzeug durch eine der anderen Interaktionsmöglichkeiten verändert wurde.

Aufgrund des letzten Kritikpunktes wurde sich für das Fadenkreuz entschieden. Das gilt nicht für das Werkzeug zur Volumenabschätzung, da hier dritter Ansatz zur 2D-Interaktion gewählt wurde.

4.3 Distanzmesswerkzeug

Während sich das äußere Erscheinungsbild des Distanzmesswerkzeugs kaum geändert hat, wurde die innere Struktur der Klasse zum größten Teil neu aufgebaut. Da das Werkzeug aus zwei symmetrischen Teilen besteht, waren auch im Quelltext weite Teile symmetrisch. Der doppelte Quelltext ließ sich mit Hilfe der SOENGINES und durch Einführung einer Unterklasse größtenteils eliminieren.



Abb. 4-4: Dieses Netzwerk steht hinter dem DISTANCELINE-Makro. Die SODISTANCELINE-Klasse wird hier mit einer 2D-Interaktion versehen.

Im Prinzip besteht das Distanzmesswerkzeug aus zwei identischen Pfeilen, die in entgegengesetzte Richtungen zeigen, und einer Maßzahl. Der Pfeil wird in eine separate Klasse SOARROW ausgelagert. Jeder Pfeil besitzt einen Positionsvektor, der die Position der Pfeilspitze bestimmt, und einen Richtungsvektor, der bestimmt aus welcher Richtung der Pfeil zeigt. Die Länge des Pfeils wird durch eine weitere Variable bestimmt. Da die Maßzahl ab einer gewissen Länge des Werkzeuges in der Mitte eingeblendet werden soll, kann diese Distanz ebenfalls angegeben werden. Die Länge des Pfeils wird dann gegebenenfalls um diese Distanz reduziert. Alle diese Parameter werden als Felder implementiert, sodass sie von SOCALLBACKS oder SOENGINES gesteuert werden können. Der Pfeil besteht aus einem Kegel als Pfeilspitze und einem Zylinder als Pfeilschaft. Minimum und Maximum der Skalierung liegen zwischen vier und 20 Längeneinheiten, wobei die Länge des Pfeils nicht von dieser Skalierung beeinflusst wird. Mit einer zusätzlichen Erweiterung lässt sich dieser Pfeil auch für das Winkelmesswerkzeug verwenden, worauf im entsprechenden Abschnitt eingegangen werden soll.

Für das Distanzmesswerkzeug werden zwei Pfeile erzeugt, die die beiden Eckpunkte als Positions- und Richtungsvektor erhalten. Die benötigte Länge wird mit Hilfe eines SOCALCULATORS berechnet. Mit Hilfe dieser Engine wird auch die Maßzahl berechnet, welche noch durch den Faktor der eingestellten Einheit dividiert werden muss.

Das so beschriebene Werkzeug wird als Modul in ein ILAB-Makro integriert (SODISTANCELINE, Abb. 4-4). Hier wird die Funktionalität noch um die 2D-Interaktion erweitert. Mit Hilfe der beiden SOVIEW2DCURRENTPOS-Module werden zwei Fadenkreuze angezeigt, die die Enden des Werkzeuges anzeigen. Mit dem SOMOUSEGRABBER werden die Fadenkreuze im Makro-Skript immer abwechselnd für die Maus-Events sensitiviert. Dadurch wird bei einem Mausklick immer je ein Fadenkreuz verschoben. Mit Hilfe des FANIN-VECTORS werden Endlosschleifen unterbunden, die entstehen wenn sich OPENINVENTOR- und ILAB-Felder gegenseitig beeinflussen. Die Farbe der Fadenkreuze wird über eine Feldverbindung an die Farbe des Werkzeuges gekoppelt. Als Ausgabe liefert das Makro einen OPEN-INVENTOR-Ausgang, der die 2D-Geometrie enthält, sowie einen OPENINVENTOR-Ausgang für die 3D-Geometrie.

4.4 Lineal

Um Überlappungen bei den Maßzahlen zu vermeiden, wird ein weiterer SOLEVELOFDETAIL-Knoten eingesetzt. Dieser Knoten berechnet die Fläche des umschließenden Rechteckes, um dann entsprechend einen Unterbaum auszuwählen. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass sich aufgrund der Bildschirmauflösung nicht mehr als 32 Maßzahlen darstellen lassen, wenn das Werkzeug diagonal bereichsfüllend angezeigt wird, was einer maximalen Fläche entspricht. Es werden also 32 große Scheiben mit Maßzahl sowie 32 kleine Scheiben ohne Maßzahl erzeugt. Der SOLEVELOFDETAIL-Knoten hat sechs Teilbäume, für $2^0 = 1$ bis $2^5 = 32$ Scheiben, in denen entsprechende Zeiger auf diese Scheiben gesetzt werden. Wenn der Nutzer den Abstand zwischen den Scheiben so groß wählt, das weniger Scheiben angezeigt werden sollen als möglich, werden entsprechend weniger in die Teilbäume eingehangen.

Die Position des Nullpunktes wird als Abstand zu einem der Eckpunkte gespeichert. Wird die Länge des Lineals vergrößert, so bleibt der Abstand zu diesem Eckpunkt unverändert. Wenn die Gesamtlänge des Lineals kürzer ist als dieser Abstand, so wird dieser auf die Gesamtlänge verkürzt.

Das Makro in ILAB entspricht dem der Distanzlinie, nur dass das Modul SODISTANCELINE gegen das Modul SORULER ausgetauscht wird.

4.5 Winkelmesswerkzeug

Bei dem Winkelmesswerkzeug wurden die gleichen Vereinfachungen vorgenommen wie bei dem Distanzmesswerkzeug. Zur Darstellung der beiden Schenkel werden hier jedoch vier Pfeile benötigt. Am Verbindungspunkt der Schenkel wird eine Kugel positioniert, die das selektieren zur Interaktion vereinfacht. Damit aus dieser Kugel keine Pfeilspitzenfragmente herausragen, wird die Pfeilklasse dahingehend erweitert, dass die Spitzen durch Zylinder ersetzt werden können.

Während der Interaktion werden Hilfsebenen eingeblendet, die die Erkennung der Lage im Raum vereinfachen, bestehend aus zwei Rechtecken und einem Teilkreis. Vor diese Hilfsebenen wird ein zusätzlicher SODRAWSTYLE-Knoten gehangen, der verhindert, das die Ebenen bei größerer Entfernung im Linienmodus dargestellt werden. Zur Ausrichtung der Hilfsebenen wird das Kreuzprodukt der beiden Schenkel benötigt, welches von dem SOCALCULATOR berechnet wird, der auch die Pfeile steuert. Die Rechtecke werden so senkrecht zur, von dem Werkzeug aufgespannten, Ebene orientiert. Die Achse des Teilkreises wird in Richtung des Kreuzproduktvektors rotiert. Der Kreis selbst muss dann noch zwischen die beiden Schenkel gedreht werden. Der Radius entspricht immer der kürzeren Schenkelhalbierenden. Diese Transformationen werden ebenfalls mit Hilfe von SOENGINES realisiert.

Das Makro in ILAB entspricht dem der Distanzlinie, nur dass das Modul SODISTANCELINE gegen das Modul SOANGLELINES ausgetauscht wird, und ein weiteres SOVIEW2DCURRENT-POS-Modul zum Bewegen des dritten Eckpunktes eingefügt wird.

4.6 Werkzeug zur Volumenabschätzung

Das Werkzeug besteht im Wesentlichen aus einem SOTRANSFORMERDRAGGER, mit dem die Transformationen Translation, Drehung und Skalierung durchgeführt werden können, sowie einem darin liegenden Hüllkörper. Als Hüllkörper werden die Grafikprimitive Kugel, Zylinder und Quader implementiert. Da dieser Hüllkörper die zu vermessende Struktur verdecken würde, wenn er im normalen Zeichenmodus dargestellt werden würde, wird ein SoDRAWSTYLE-Knoten davor gehangen, der den Hüllkörper im Linienmodus zeichnen lässt.

In der Methode zum inkrementellen Verschieben per Tastatur werden zusätzlich noch die Sondertasten *Shift* und *Strg* überwacht. Wenn eine dieser Tasten gehalten wird, wird der Hüllkörper nicht verschoben, sondern rotiert bzw. skaliert. Alle weiteren Eigenschaften des Werkzeuges werden unter ILAB realisiert (Abb. 4-5).

Das Modul SOVIEW2DCURRENTRECT wird in diesem Netzwerk genutzt, um ein Quader aufzuspannen, das die Ausmaße des Hüllkörpers bestimmt. Die Interaktion wird von SOMOUSEGRABBER in der Weise überwacht, dass beim Drücken der linken Maustaste der erste Eckpunkte zum Definieren des Quaders und beim Loslassen der Zweite gesetzt wird. In der vorherigen Variante wurde der Mittelpunkt des Hüllkörpers mittels Fadenkreuz gesetzt. Rotation und Skalierung mussten in einem weiteren Schritt per Tastatur angegeben werden. Diese umständliche Vorgehensweise wurde durch das bereits beschriebene Verfahren ersetzt, wobei hier in Kauf genommen werden muss, dass es Fehler in der 2D-Darstellung gibt, wenn der Hüllkörper rotiert wird, da der mit SOVIEW2DCURRENTRECT aufgespannte Quader nicht rotiert werden kann. Mit Hilfe des SOCALCULATOR werden aus den beiden Eckpunktkoordinaten wieder Skalierungsfaktor und Position des Hüllkörpers berechnet.

In der 2D-Darstellung werden außer dem Quader noch die selektierten Voxel durch drei SOVIEW2DOVERLAY markiert (Abb. 4-6). Ein Overlay wird transparent über die Volumendaten gelegt und markiert die Voxel, die von dem Hüllkörper abgedeckt werden. Die anderen Beiden markieren das innere bzw. äußere selektierte Intervall.



Abb. 4-5: Das Makro-Netzwerk der Volumenabschätzung. Die Klasse SOVOLESTIMATION wird hier um die Fähigkeit zur 2D-Interaktion und zur Auswertung des eingeschlossenen Volumens erweitert.



Abb. 4-6: Die 2D-Ansicht des Werkzeuges. Der transparente bezeichnet den Bereich, der von dem Hüllkörper abgedeckt wird. Der hellblaue Bereich markiert das Äußere und der dunkelblaue Bereich das innere Intervall.

Mit dem DICOMTAGVIEWER wird überprüft, ob es sich bei dem Datensatz um eine CT-Aufnahme handelt. Ist dies der Fall, so werden die Schwellwertregler, mit denen die Intervalle eingestellt werden können, in Hounsfield-Einheiten angezeigt. In dem Makro selbst werden die Intervalle von dem Modul INTERVALTHRESH eingegrenzt.

Um den selektierten Bereich innerhalb des Hüllkörpers invertieren zu können, wird die Auswahl mit Arithmetic1 umgedreht. Einzelne Voxel, die in einem Bereich liegen, der fast vollständig von selektierten Voxeln umgeben ist, können mit Hilfe des CLOSEGAPFILTERs mit in die Auswahl genommen werden. Wie viel Prozent der umliegenden Voxel bereits selektiert sein müssen, lässt sich frei einstellen (Abb. 4-7).



Abb. 4-7: Auswirkungen des CLOSEGAPFILTERS: Im linken Bild wurde kein Filter angewendet, im mittleren bzw. rechten Bild ein Filter mit der Größe 7x7x3 bzw. 11x11x3. Das Volumen des inneren Intervalls änderte sich von 3,5 auf 3,6 bzw. 3,8 ml und das des Äußeren von 7,6 auf 7,7 bzw. 8,0 ml.

Das Modul CALCVOLUME zählt schließlich die selektierten Voxel und multipliziert die Anzahl mit der Größe eines Voxels. Das Ergebnis kann in mm³, ml und l ausgegeben werden.

Da die Volumendaten zur endgültigen Bestimmung des Ergebnisses all diese Module passieren müssen und die Datensätze mitunter sehr groß sein können, können diese Berechnungen leider nicht in Echtzeit durchgeführt werden. Der Berechnungsprozess muss daher vom Anwender manuell angestoßen werden. Aus dem gleichen Grund wird in der 3D-Ansicht nur der Hüllkörper und nicht das selektierte Volumen selbst angezeigt.

4.7 Automatische Vermessung

Die automatische Vermessung ist nur auf bereits segmentierte Objekte anwendbar, da zur Berechnung die Objekthülle benötigt wird. Die beiden folgenden Berechnungen arbeiten auf Basis der Hauptachsentransformation, welche anhand der bekannten Punkte auf der Objekthülle die größte Ausdehnung des Objektes bestimmt. Das Ergebnis sind drei orthogonale Achsen, die sich im Schwerpunkt des Objektes schneiden.

Beide Vermessungen geben einen Szenengraphen aus, der die zu vermessenden Strukturen enthält und zusätzlich Vermessungswerkzeuge, die die Ergebnisse anzeigen. Da die Hauptachsen meistens innerhalb des Objektes verlaufen, lassen sich die Objekte beliebig transparent darstellen.

4.7.1 Bestimmung der Objektausdehnung

Diese Berechnung erhält als Eingabe einen Szenengraphen, der beliebig viele Objekte enthalten kann. Der Anwender kann bestimmen, ob die Objektausdehnung für jedes einzelne Objekt berechnet werden soll, oder ob der gesamte Szenengraph als ein Objekt aufgefasst werden soll.

Die Hauptachsen werden mit Hilfe von Distanzwerkzeugen dargestellt. Der Anwender hat die Möglichkeit zu entscheiden, ob alle drei Hauptachsen oder nur die längste Hauptachse angezeigt werden sollen. Zusätzlich kann die objektorientierte Bounding Box angezeigt werden, da hierfür dieselben Berechnungen notwendig sind. Das Feld, das angibt ab wann die Distanzlinie geschlossen dargestellt werden soll, wird so hoch gesetzt, dass es in der Praxis nie erreicht wird und die Linie immer geschlossen dargestellt wird. Damit aufgrund der automatischen Farbgebung nicht jede Distanzwerkzeug eine andere Farbe bekommt, wird eine Werkzeug erzeugt, an dessen Farbe alle anderen Werkzeugfarben verknüpft werden.

In einem Szenengraphen besteht keine Möglichkeit, direkt auf das Eckpunktkoordinatenfeld eines Objektes zuzugreifen. Weiterhin müssen auch nicht alle Objekte in einem Szenengraphen, z.B. Gruppen- oder Material-Knoten, ein Koordinatenfeld besitzen. Aus diesem Grund wird ein SOCALLBACK-Knoten erzeugt, der selbstdefinierte Methoden aufruft. Wenn beim Traversieren eines Graphen ein SOSHAPE-Objekt passiert wird, also ein Objekt das definitiv Eckpunktkoordinaten besitzt, können am Beginn und am Ende des Passiervorgangs Methoden aufgerufen werden und während des Passiervorgangs sämtliche Dreieckskoordinaten, aus denen das Objekt besteht, in einer Liste gespeichert werden. Soll für jedes Objekt separat die maximale Ausdehnung bestimmt werden, so werden am Beginn eines Passiervorgangs eines Objektes alle bisher gesammelten Koordinaten verworfen und am Ende auf den neu gesammelten Koordinaten die Hauptachsentransformation ausgeführt. Beim Bestimmen der Hauptachsentransformation auf den gesamten Graphen werden diese beiden Methoden nicht aufgerufen und erst am Ende des traversierens die Berechnung ausgeführt.

Aufgrund der Vorgehensweise von OPENINVENTOR ist jede Koordinate am Ende eines Sammelvorgangs sechsmal in der Liste vorhanden. Um Rechenzeit bei der Hauptachsentransformation zu sparen, wird die Liste lexikographisch sortiert und anschließend nur jeder sechste Punkt für die Transformation verwendet.

4.7.2 Bestimmung des Winkels zwischen zwei Objekten

Bei dieser Berechnung lässt sich der Winkel zwischen zwei Objekten bestimmen, wobei diese beiden Objekte als je ein Szenengraph gegeben sein müssen. Von beiden Graphen wird die maximale Objektausdehnung bestimmt (siehe 4.7.1). Dabei wird die Hauptachsenbestimmung so konfiguriert, dass nur die längste Ausdehnung des gesamten Graphen berechnet wird. Die resultierenden Achsen der beiden Objekte werden für die Winkelmessung verwendet. Da der interne Aufbau des Szenengraphen bei der Objektausdehnungs-Klasse bekannt ist, können die vier Koordinaten der Achsen direkt extrahiert werden, und die Distanzlinien, die die Achsen anzeigen, aus dem Graphen entfernt werden, da sie für die Visualisierung nicht relevant sind.

Da die beiden Achsen meistens windschief zueinander verlaufen, müssen sie dazu erst so verschoben werden, das sie sich in einem gemeinsamen Punkt treffen. Hierzu werden die beiden Achsenendpunkte bestimmt, die am Nächsten beieinander liegen. Anschließend werden die beiden Achsen jeweils um die Hälfte zueinander verschoben. Dadurch ergeben sich drei Punkte, mit denen sich das Winkelmesswerkzeug zur Anzeige des Winkels positioniert werden kann.

4.8 Integration der Werkzeuge in eine Applikation

Mit Hilfe des auf Seite 36 abgebildeten Netzwerkes (Abb. 4-2) wurde eine Applikation erstellt, mit der sich Volumendatensätze und OPENINVENTOR-Objekte mit den beschriebenen Werkzeugen vermessen lassen. Auf das Netzwerk selbst soll hier jedoch nicht näher eingegangen werden, da dies kaum zum Verständnis der Funktionsweise der Applikation beitragen würde. Während des Programmablaufs werden ständig Module und Feldverbindungen hinzugefügt oder gelöscht, wodurch der Aufbau des Netzwerkes noch sehr viel komplexer wird, als es auf der Abbildung zu erkennen ist.

Die Anwendung ist grafisch in vier Bereiche aufgeteilt (Abb. 4-8). Der meiste Platz wird von zwei Fenstern eingenommen, in denen sich der zu vermessende Datensatz auf verschiedene Weisen ansehen lässt. Das große Fenster dient zur detaillierten Betrachtung der Daten, während das kleine Fenster eine Übersicht in einer anderen Sichtweise bereitstellt.

Während in dem einen Fenster immer die 3D-Darstellung des Datensatzes zu sehen ist, kann in dem anderen Fenster zwischen einer axialen 2D- und einer MPR-Ansicht gewählt werden. Die 3D-Ansicht wird mit Hilfe eines OPENINVENTOR-Viewers realisiert und hat entsprechende Interaktionsmöglichkeiten. In der 2D-Ansicht muss nicht zwischen *View* und *Handle*-Modus umgeschaltet werden. In der axialen Sichtweise kann mit Hilfe der mittleren Maustaste durch die Schichten gefahren werden und mit der Rechten können die Werkzeuge manipuliert werden. Der Unterschied bei der Interaktion zwischen Axial und MPR-Ansicht besteht darin, dass nicht durch Schichten gefahren, sondern die MPR um den Fenstermittelpunkt gekippt werden kann.

Bei beiden Fenstern lässt sich Transferfunktion zum Einstellen der Fensterung unabhängig voneinander einstellen. Während die rechte Maustaste gedrückt wird, kann durch vertikale Bewegung die Fensterbreite und durch horizontale Bewegung die Fensterposition der Transferfunktion variiert werden.

Direkt oberhalb des kleinen Fensters befindet sich eine Knopfleiste mit verschiedenen Schaltflächen. Mit der Schaltfläche "Change Viewers" lassen sich die Inhalte der beiden Fenster austauschen. Somit wird es z.B. möglich, sich nach einer exakten Platzierung der Werkzeuge in der 2D-Ansicht die Ergebnisse im 3D-Fenster genauer anzuschauen. Mittels "View All" wird die Kamera in der 3D-Ansicht so weit zurückgefahren, dass alle Objekte im Bildbereich liegen. "Ortho <-> MPR" dient dazu, die 2D-Ansicht zwischen der axialen Darstellung und der MPR umzuschalten.

Um die 2D-Visualisierung nicht mit Informationen zu überladen, werden nur die Interaktionselemente von dem Werkzeug angezeigt, das gerade in dem Werkzeug-Editor aktiv ist.

Unterhalb des großen Fensters befindet sich eine Statuszeile, in der angezeigt wird, wie das aktuelle Werkzeug zu bewegen ist. Im rechten, oberen Drittel befinden sich Karteikarten, die die Funktionalität der Anwendung in vier Bereiche einteilt: Laden von Dateien, Editieren der Werkzeuge sowie Kamera- und Clipplane-Einstellungen.



Abb. 4-8: Ein Screenshot der fertigen Applikation. Zur Zeit ist ein Werkzeug zur Volumenabschätzung aktiv und die Karteikarte zum Editieren der Werkzeuge liegt vorne.

4.8.1 Dateimanager

Der Dateimanager (Abb. 4-9) dient zum einen zum Laden eines 3D-TIFF- oder DICOM-Volumendatensatzes und zum anderen zum Laden von einem oder mehreren OPENINVENTOR-Graphen. Beim Anwählen einer der beiden "Browse"-Schaltfläche erscheint der normale Windows-Dateidialog. Soll ein Volumendatensatz geladen werden, so wird der evtl. vorher geladene Datensatz sofort ersetzt. Als zusätzliche Information über die Bildaufnahmemodalitäten wird die Voxelgröße mit angegeben.

Wenn ein OPENINVENTOR-Graph geladen werden soll, wird dieser nicht sofort in die Szene eingefügt, sondern muss erst mit "Add Graph" explizit hinzugefügt werden. Sofern "Show Preview" aktiviert ist, hat der Nutzer so die Möglichkeit, sich den Graphen vorher anzusehen. Das Vorschaufenster wird dann unter der "Add Graph"-Schaltfläche eingeblendet. Alle Dateinamen der geladenen Graphen werden in der nebenstehenden Liste aufgeführt. Wird Listeneintrag ausgewählt, so wird in dem Vorschaufenster (wenn aktiv) die Datei angezeigt. Dadurch wird sichergestellt, dass nicht versehentlich ein falscher Graph mit "Remove Graph" gelöscht wird. Das Vorschaufenster kann deswegen optional eingeblendet werden, da zum Berechnen einer Vorschau eines großen Graphen einige Zeit benötigt wird.

Das Speichern der erzielten Ergebnisse ist im Falle dieser Anwendung unter ILAB leider nicht möglich. Zwar kann ILAB OPENINVENTOR-Dateien oder DICOM-Datensätze speichern, jedoch keine einzelnen Feldvariablen. Diese werden jedoch benötigt, um z.B. Kamerapositionen oder das Vorhandensein dynamisch erzeugter Feldverbindungen abzulegen.

Images Tools Camera Clipplanes	Images Tools Car	nera Clipplanes	
Load Image-File	Anglelines	Anglelines Remove Tool	
Loading an Image-File will replacing the further one!	Distanceline	AngleLines0	
name \$(HOME)/images/Leber04_Art_ROI.dcm Browse	Ruler	Ruler0 VolumeEstimation0	
localname c:/users/tietjen/images/Leber04_Art_ROI.dcm	VolumeEstimation	DistanceLine0	
Voxel Size	Selected Tool		
VX 0.8555 VY 0.8555 VZ 5.0000	Position × -144	f.(y <mark>-176.)</mark> z <mark>-329.(</mark>	
r Load Inventor-Graph ————	Rotation x 0.00	00 y 0.000 z 1.000 d 0.000	
name Browse	Scale Factor × 15.0	94 y 17.42 z 17.50	
Add Graph Remove Graph			
	Inner Volume In ml 5.913	1640625 Calculate Volume	
	Outer Volume In ml 13.19	11 185546875 Invert Interval 📃	
	Interval Center 577	.5099	
Show Preview 🔲 🔤	Interval Inner Width 794	.3317	
	Interval Outer Width 961	.5594	
	Display Tool 🔲 Save	Cain Load Cam Advanced >>	

tiviert.



4.8.2 Werkzeug-Editor

Mit Hilfe des Werkzeug-Editors können Werkzeuge in die Visualisierung eingefügt, modifiziert und bei Bedarf wieder gelöscht werden (Abb. 4-10). Eingefügt werden können die Werkzeuge mit einer der vier Schaltflächen oben links. Beim Einfügen wird dem Werkzeug ein eindeutiger Name zugewiesen, der nachträglich noch geändert werden kann, und dieser in die Liste mit aufgenommen. Gleichzeitig wird das Werkzeug automatisch in der Liste ausgewählt und seine Parameter im unteren Teil eingeblendet.

Da aus Platzgründen nicht alle Parameter gleichzeitig angezeigt werden können, werden sie in zwei Kategorien aufgeteilt. Zum einen die häufig benötigten Optionen und zum anderen die Optionen, die selten angepasst werden müssen und nicht zur Orientierung dienen.

Zu den häufig benötigten Optionen zählen die aktuelle Transformation bzw. Position der Werkzeuge, das Resultat der momentanen Messung und ob das Werkzeug in der Visualisierung eingeblendet werden soll oder nicht. Außerdem wird Farbe des Werkzeuges angezeigt, jedoch nicht, weil diese häufig geändert werden muss, sondern um das korrespondierende Werkzeug in der 3D-Darstellung leichter wiederzufinden. Bei dem Werkzeug zur Volumenapproximation werden außerdem Schieberegler zum Einstellen des Schwellwertes und Schaltflächen zum Invertieren bzw. Berechnen des selektierten Volumens bereitgestellt.

Zu den selten modifizierten Eigenschaften zählen der Name des Werkzeuges und ob dieser in der 3D-Visualisierung angezeigt werden soll. Gleiches gilt für die Anzeige und Auswahl der Maßeinheit. Bei dem Distanz- und dem Winkelmesswerkzeug kann eingestellt werden, wie groß die Lücke zum Einblenden der Maßzahl bei geschlossener Linie sein soll. Beim Lineal kann die Auflösung der Skala variiert werden. Bei der Volumenapproximation kann die Empfindlichkeit des CLOSEGAPFILTERs gesteuert werden.

Die Schaltflächen zum manuellen Laden und Speichern der Kameraposition werden immer angezeigt. Auf diese Schaltflächen soll im nächsten Abschnitt näher eingegangen werden.

4.8.3 Kameraoptionen

Für jedes Werkzeug lässt sich eine Kameraposition speichern. Auf der Karteikarte (Abb. 4-11) lässt sich einstellen, ob diese Funktion aktiviert werden soll. Dies kann entweder automatisch geschehen, also bei jedem Wechsel zwischen den Werkzeugen im Werkzeug-Editor, oder aber manuell. Soll die Position manuell geladen oder gespeichert werden, so müssen diese Optionen zusätzlich angegeben werden. Die entsprechenden Schaltflächen im Werkzeug-Editor werden dann freigegeben.



Abb. 4-11: Die Kameraoptionen. Zur Zeit werden Abb. 4-12: Die Clipplanes. Momentan ist keine der keine Kamerapositionen gespeichert. Clipplanes aktiviert.

4.8.4 Clipplane-Optionen

Die Visualisierung lässt sich mit sieben verschiedenen Clipplanes beschneiden. Zum einen sechs Clipplanes, die standardmäßig die gesamte Visualisierung umschließen, und eine Clipplane, die mit der MPR synchronisiert ist. Diese Ebenen lassen sich bei Bedarf einzeln aktivieren und zusätzlich durch einen weißen Rahmen in der 3D-Darstellung andeuten.

Wenn die Ebenen aktiviert sind, lassen sie sich frei in der 3D-Visualisierung bewegen. Mit "Reset Clipping Planes" lassen sie sich wieder in die ursprüngliche Position zurücksetzen.

5 Evaluierung der Volumenabschätzung

Um zu prüfen, ob es sinnvoll ist, den Ansatz zur Volumenabschätzung weiterzuentwickeln, wurden mit Hilfe des Werkzeuges verschiedene Lebertumore in CT-Daten analysiert. Dieser Einsatz des Werkzeuges ist durchaus zweckmäßig, da anhand des Tumorvolumens Aussagen über das Stadium und die Behandlungsmethoden getroffen werden können. Auf der anderen Seite ist dieser Einsatz auch problematisch, da die Intensitätswerte innerhalb des Tumors stark variieren können. Unabhängig von dieser Analyse wurden die selben Tumore von einem Radiologen manuell segmentiert. Die Ergebnisse beider Untersuchungen werden in Tabelle 5-1 verglichen.

Der Vergleich wurde bei insgesamt vier Tumoren durchgeführt. Bei 3 von 4 Tumoren entspricht das Ergebnis den Erwartungen, d.h. das exakte Resultat liegt innerhalb der beiden gemessenen Grenzwerte des Werkzeuges. Bei einem Tumor liegt das Volumen der Segmentierung über dem oberen Grenzwert. Das ist darauf zurückzuführen, dass trotz der Anwendung des CLOSEGAP-Filters diverse Lücken nicht geschlossen wurden. Ohne den Einsatz dieses Filters umfasst das Volumen durchschnittlich 12% weniger, wodurch auch bei Fall 2 das gemessene Volumen unter dem exakten Ergebnis liegen würde (nur 42 bis 76 ml).

Fall	Intervall (Zentrum, innere Breite, äußere Breite) in HU	Volumenab- schätzung in ml	Exaktes Resultat in ml
1	40; 50; 75	42; 92	69
2	40; 55; 75	46; 87	82
3	40; 40; 60	130; 231	235
4	40; 60; 80	117; 178	151

Tabelle 5-1: Vergleich der Volumenapproximation mit einer expliziten Segmentierung.

Das mit dem Werkzeug erzielte Ergebnis hängt stark von der Position des Intervallzentrums ab. Das Volumen variiert sich bis zu 30%, wenn das Zentrum um 10 HU verschoben wird. Bei kleinen und länglichen Objekten mit einer hohen Anzahl von Randvoxeln, bei denen eine Zugehörigkeit zum Objekt nicht sichergestellt ist, kann der Fehler bis zu 30% betragen. Dieser Ansatz sollte daher bei solchen Objekten nicht angewandt werden.

Aufgrund der geringen Anzahl von Fallbeispielen lässt sich mit dieser Untersuchung keine statistisch relevante Aussage über die Zuverlässigkeit des Werkzeuges machen. Jedoch lässt sich aus dieser Untersuchung schlussfolgern, dass eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes sinnvoll ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden verschiedene Werkzeuge zu interaktiven und automatischen Vermessung von medizinischen Datensätzen vorgestellt, mit denen Abstände, Winkel und Volumina bestimmt werden können. Diese Vermessungen können auf segmentierten Daten ebenso wie auf Rohdaten ohne vorige Analyse durchgeführt werden.

Zum Ausmessen der Strukturen wurden verschiedene Interaktionsmöglichkeiten implementiert, mit denen die Werkzeuge schnell und intuitiv in die gewünschte Position gebracht werden können. Da sich alle Interaktionsmöglichkeiten parallel verwenden lassen, kann der Anwender jeweils die Möglichkeit wählen, die der Problemstellung angemessen ist und mit der er am schnellsten zu einem korrekten Ergebnis kommt.

Zur effizienten Ausmessung von Rohdaten wurde eine korrelierende Interaktion in 2D und 3D eingeführt. Dadurch ist der Anwender in der Lage, das Werkzeug punktgenau auf den Schichtdaten zu platzieren, und sich das korrespondierende Ergebnis in 3D anzuschauen.

Zur effizienten Ausmessung von segmentierten Daten wurde eine Picking-Methode implementiert, mit der sich die Werkzeuge direkt an die gewünschte Stelle setzen lassen, sowie Methoden zur automatischen Bestimmung der maximalen Ausdehnung und dem Winkel zwischen zwei Objekten.

Alle Visualisierungsparameter der Werkzeuge werden automatisch so initialisiert, dass die Werkzeuge sofort einsetzbar sind, können jedoch auch manuell modifiziert werden. Sie werden so gewählt, dass sich das Werkzeug von fast allen Hintergründen gut zu erkennen und die Beschriftung stets gut lesbar ist. Wenn mehrere Werkzeuge zur Vermessung notwendig sind, wird dafür Sorge getragen, dass sie sich leicht voneinander unterscheiden lassen. Während des Messvorgangs adaptieren sich die Werkzeuge an die Problemstellung, indem der Detaillierungsgrad und die Größe angepasst werden.

Damit wurden das angepeilte Ziele dieser Arbeit, nämlich die Bedienbarkeit der Werkzeuge zu optimieren, zur Zufriedenheit gelöst.

6.1 Nicht behobene Probleme

Die 2D-Interaktion bei der Volumenapproximation wird durch einen Quader realisiert, der die Eckpunkte des Transformators in 3D bestimmt und sich beliebig verschieben und skalieren lässt. Eine Rotation wird von dem Modul, dass diesen Quader zu Verfügung stellt, leider nicht unterstützt. Dadurch ist die 2D-Interaktionsmöglichkeit in einem wesentlichen Punkt eingeschränkt. Zwar ließe sich das Modul so erweitern, dass eine Rotation auf der 2D-Ebene durchzuführen ist, doch eine eindeutige freie Rotation in 3D lässt sich so nicht definieren. Daher muss dazu ein anderes Verfahren entwickelt werden, dass eine freie Rotation an dieser Ansicht zulässt.

Der Funktionsumfang von ILAB müsste dahingehend erweitert werden, dass es möglich wird, den Inhalt einzelner Felder zu speichern. Dadurch könnten die erzielten Ergebnisse und Einstellungen der Vermessungsanwendung auch gespeichert werden und wären auch für spätere Untersuchungen noch verfügbar. Aufgrund dieser fehlenden Funktionalität ist dies zur Zeit noch nicht möglich.

6.2 Fortführungs- und Verbesserungsvorschläge

Neben der Behebung der bereits beschriebenen Probleme sind noch weitere Verbesserungen denkbar, mit denen sich eine noch komfortablere Bedienung gestalten ließe.

Bei segmentierten Daten könnte eine Snapping-Methode implementiert werden, die einen Eckpunkt eines Werkzeuges auf eine markante Stelle (Ausstülpungen, Wendepunkte, etc.) in der Nähe des vom Benutzer selektierten Punktes verschiebt. Dadurch würden die Messungen von verschiedenen Personen vergleichbar und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ließe sich auf diese Weise erhöhen.

Es wurden zwei Module beschrieben, mit denen die 2D-Interaktion zu realisieren ist (SOVIEW2DCURRENTPOS und MARKER). Beide Module weisen Nachteile auf, die eine intuitive Bedienung beeinträchtigen. Durch eine Kombination der Vorteile, die die Module für diese Anwendung bieten, in ein neues Modul, könnte sich die Bedienung noch vereinfachen.

Bei der Volumenapproximation wäre es wünschenswert, dass der Hüllkörper in Echtzeit verschoben und zeitgleich das selektierte Volumen berechnet werden kann. Zur Zeit kommt es hier zu Laufzeitproblemen, da durch die Kombination diverser Bildbearbeitungsmodule (Abb. 4-5) ein sehr großer Rechenaufwand entsteht. Zur Berechnung muss bei jeder Änderung das gesamte Volumen durch jedes Modul geschleust werden. Für jedes Modul muss ein eigenes Speicherabbild des Volumens angelegt werden, damit auf diesem die Berechnungen durchgeführt werden können. Durch eine geschickte Zusammenfassung in ein einziges Modul könnte der Speicher- und Rechenaufwand stark reduziert werden, da nur ein Speicherabbild geschaffen werden müsste und die Berechnungen sich auf den wesentlichen – also den selektierten Bereich – reduzieren ließen.

In diesem Modul könnte zusätzlich ein Algorithmus implementiert werden, der nicht selektierte Lücken, die von dem selektierten Volumen umschlossen sind, automatisch schließt. Dies wird momentan nur annähernd von dem CLOSEGAP-Modul übernommen. Durch diesen Algorithmus könnte die Präzision des Ergebnisses erhöht werden.

Unter ILAB ist es nicht möglich, in einem Szenengraphen die Kamera nachträglich auszutauschen, obwohl dies unter OPENINVENTOR möglich wäre und ILAB auf OPEN-INVENTOR aufbaut. Dadurch kann während der Vermessung nicht zwischen einer orthographischen und perspektivischen Kamera gewechselt werden. Beide Kamerasysteme bieten jedoch verschiedene Vor- und Nachteile. Während die perspektivische Kamera eine bessere räumliche Darstellung liefert, dafür jedoch mehr Rechenaufwand benötigt, verfälscht die orthographische Kamera aufgrund der nicht vorhandenen perspektivischen Verkürzung nicht die Darstellung der gemessenen Längen und Winkel.

In der Anwendung kann für jedes Werkzeug eine separate Kameraposition gespeichert werden. Wenn zwischen den Werkzeugen gewechselt wird, ändert sich die Kameraposition sprunghaft, was den Verlust der Orientierung zur Folge haben kann. Dem könnte vorgebeugt werden, indem die Kamera zur neuen Position hinfährt.

Der nachvollziehbare Fehler in der Messung, wie etwa die Diagonale eines Voxels, könnte in der Visualisierung mittels Genauigkeitsangaben mit angegeben werden. Der Nutzer muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass es sich hierbei nicht um den absoluten Fehler handelt, da dieser auch von nicht nachvollziehbaren Größen wie einer fehlerhaften Segmentierung abhängig ist.

7 Quellennachweis

Connor, D. B., S. C. Snibbe, K. P. Herndon, D. C. Robbins, R. C. Zeleznik, A. van Dam (1992) "Three-Dimensional Widgets", *Proc. of Symposium on Interactive 3D Graphics*, März, S. 183 - 188

Foley, J., A. van Dam, S. K. Feiner, J. F. Hughes (1990) *Computer Graphics: Principles and Practice*, Addison Wesley

Handels, H. (2000) Medizinische Bildverarbeitung, Teubner Verlag, 1. Auflage

Hastreiter, P. (1999) *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

Preim, B. (1999) Entwicklung interaktiver Systeme, Springer Verlag

Preim, B., H. Sonnet, W. Spindler, K. J. Oldhafer, H.-O. Peitgen (2001) "Interaktive und automatische Vermessung von 3d-Visualisierungen für die Planung chirurgischer Eingriffe" *Bildverarbeitung für die Medizin*, Reihe Informatik aktuell, Springer-Verlag, S. 19-23

Preim B., Tietjen C., Spindler, W., Peitgen H.-O. (27. Oktober - 2. November 2002) "Integration of Measurement Tools in Medical Visualizations", *IEEE Visualization*, Boston

Shneiderman, B. (1997) Designing The User Interface, Addison Wesley, 3. Edition

Shneiderman B. "Direct Manipulation – A Step Beyond Programming", *IEEE Computer*, Vol. 16 (8), S. 42-61

Schumann, H., W. Müller (2000) Visualisierung – Grundlagen und allgemeine Methoden, Springer Verlag

Sonnet, H. (2000) "Interaktive und automatische Vermessung segmentierter 3D-Objekte", Studienarbeit, Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik

Wernecke, J. (1994) The Inventor Mentor, Addison Wesley

Zuiderveld, K. J. (1995) "Visualisation of Multimodality Medical Volume Data using objektoriented methods", PhD-thesis, Utrecht University

8 Abkürzungsverzeichnis

- CT Computer Tomographie
- DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft
- DICOM Digital Imaging and Communications in Medicine
- HE (HU) Hounsfield Einheit (Hounsfield Unit)
- ILAB MeVis Image Laboratory
- MeVis Centrum für Medizinische Diagnosesysteme und Visualisierung
- MPR Multiplanar Reconstruction
- MRT Magnet Resonanz Tomographie
- TIFF Tagged Image File Format