

Risikominimierende Durchführung von Schnitten

Michael Aschke

Seminar: Robotik und Medizin
Sommersemester 1998

***Abstract:** Das Thema "Risikominimierende Durchführung von Schnitten" wurde bisher nicht in der Literatur behandelt, deshalb wird hier zuerst eine Definition gegeben. In Kapitel 2 wird auf wichtige angrenzende Forschungsbereiche (Segmentierung, virtuelles Schneiden, präoperative Planung und Simulation) eingegangen. Der Übersichtlichkeit wegen werden einige Anwendungen dieser Forschungsbereiche beispielhaft vorgestellt. Anschließend wird der Versuch eines Lösungsvorschlages zur risikominimierenden Durchführung von Schnitten unternommen, der die Ergebnisse der in Kapitel 2 vorgestellten Bereiche benötigt.*

Inhaltsverzeichnis

1	Begriffsdefinition und Einführung	3
2	Involvierte Forschungsbereiche	3
2.1	Sonderforschungsbereich 414	3
2.2	Segmentierung	3
2.2.1	Wissensbasierte Segmentierung	4
2.2.2	"Live-Wire Boundary Extraction"	4
2.2.3	Volumetrische Stereotaxie	6
2.2.4	Segmentierung von 2-D und 3-D Objekten aus MRI Volumendaten mittels erzwungener elastischer Deformationen von beweglichen Fourierumrissen und Oberflächenmodellen	7
2.3	Virtuelles Schneiden in Volumendaten	7
2.4	Präoperative Planungs- und Simulationssysteme	9
2.4.1	Chirurgisches Planungssystem für Weichgewebe unter Verwendung von Virtueller Realität	9
2.4.2	Planung und Simulation von medizinischen Roboteranwendungen	10
3	Versuch eines Lösungsvorschlags	11
4	Zusammenfassung	12
5	Literaturverzeichnis	13

1 Begriffsdefinition und Einführung

Unter risikominimierender Durchführung von Schnitten versteht man eine operative, optimierte Durchführung von Einschnitten, wobei möglichst wenig kritische Strukturen zerstört werden. Mit kritischen Strukturen sind Elemente, wie z.B. Arterien, wichtige Nervenzellen und -bahnen etc. gemeint, welche im Falle einer Beschädigung Komplikationen während der Operation oder der anschließenden Regenerationszeit verursachen können. Durch die Vermeidung von Komplikationen werden auch Kosten gespart (siehe Kapitel 3).

Da in Konferenzbüchern und im Internet keine Veröffentlichungen gefunden wurden, die das oben definierte Thema direkt treffen, muß davon ausgegangen werden, daß dieses Thema bisher noch nicht in der Literatur behandelt wurde. Deshalb wird in Kapitel 2 zuerst auf Forschungsbereiche eingegangen, welche nah an dieses Thema heranreichen und für den im Kapitel 3 vorgestellten Lösungsvorschlag, der eine mögliche Variante der Durchführung risikominimierender Schnitte darstellt, wichtig sind. Da die gebührende Behandlung jedes Forschungsbereichs den Rahmen dieser Ausarbeitung sprengen würde, werden die Bereiche mit ihren Varianten nur anhand von Beispielen vorgestellt. Kapitel 4 bietet eine Zusammenfassung und den schon angesprochenen Lösungsvorschlag.

2 Involvierte Forschungsbereiche

Das Ziel einer risikominimierenden Durchführung von Schnitten ist die rechnergestützte Auswertung von Volumendaten und Festlegung des besten Schnittweges, so daß möglichst wenig erhaltenswerte Strukturen beim Schnitt zerstört werden. Wichtige Bereiche hierfür sind die Segmentierung von Strukturen aufgrund von Bilddaten und virtuelles Schneiden. Die präoperative Planung wird ebenfalls diesbezüglich betrachtet.

2.1 Sonderforschungsbereich 414

Die Universität Karlsruhe, das Deutsche Krebsforschungszentrum – DKFZ– sowie die Universität Heidelberg beabsichtigen, im Rahmen eines gemeinsamen Sonderforschungsbereichs (SFB414) rechnerintegrierte Methoden zur Unterstützung des Chirurgen zu erforschen und zu entwickeln [1]. Dieser Forschungsbereich unterteilt sich in Herzprojekte, Kopfprojekte und Querschnittsprojekte, welche Herz- und Kopfprojekte verbinden. Das dem Thema "Risikominimierende Durchführung von Schnitten" am nächsten verwandte Teilprojekt [2] befaßt sich mit Navigationsschnittstellen für kardiale (herz-) und kraniofaziale (kopf-) Volumendaten. Ziel dieses Bereiches ist die Bereitstellung von Schnittstellen, die die freie Positionierung des Betrachterstandpunkts in der visualisierten Szene sowie die Interaktion mit Objekten und den dazugehörigen Simulationsmodellen (Manipulation des visualisierten Datenmodells).

2.2 Segmentierung

Unter Segmentierung versteht man die Abgrenzung und Extraktion von Objekten (hier) in Bilddaten. Sie ist für das risikominimierende Schneiden insofern wichtig, daß man bevor man schneidet kritische Bereiche durch Segmentierung extrahiert und versucht, in der Restmenge eine möglichst kurze Schnittstrecke zu ermitteln. Es gibt verschiedene Arten der Segmentierung. Hier sollen einige beispielhaft vorgestellt werden.

2.2.1 Wissensbasierte Segmentierung

Diese Art der Segmentierung wird hauptsächlich bei der Erkennung von Gewebe im Gehirn angewandt und basiert auf Computertomographiebildern (CT) und Kernspinaufnahmen (MRI). Ein Schwellenalgorithmus für Grauwerte bildet den Kern dieser Segmentierung. Sie wird eingesetzt, um anatomische Strukturen zu erkennen und ein anatomisches Modell, bestehend aus Superquadriken, zu bilden. Solch ein Modell kann bei der präoperativen Simulation einer Operation (z.B. das Entfernen eines Hirntumors) eingesetzt werden. Abbildung 1 zeigt links ein Bild mit MRI und rechts das zugehörige Ergebnis des Schwellwertverfahrens [3].

2.2.2 "Live-Wire Boundary Extraction"

Um Bildsegmentierung auf allgemeine und praktische Art durchzuführen, müssen intelligente und interaktive Werkzeuge beschafft werden, um die Benutzereingaben zu minimieren und die Effizienz und Robustheit zu erhöhen, so daß exakte, mathematisch optimale Konturen ermittelt werden können.

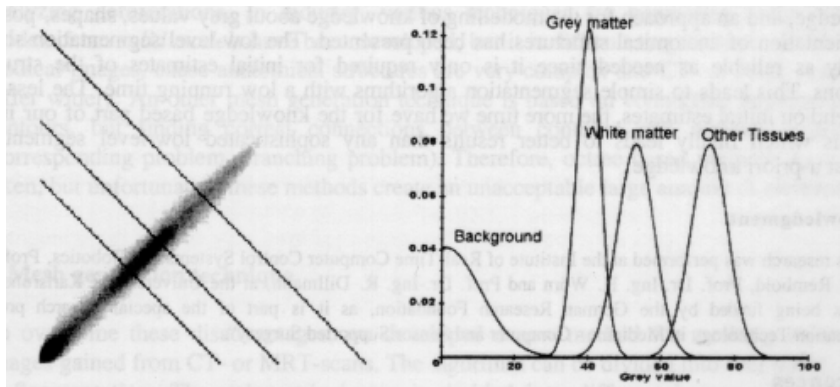


Abbildung 1

Frühere Segmentierungsalgorithmen haben aufwendige Nebenbedingungen vereinigt, aber immer noch lokale Grenzdefinitions-kriterien benutzt, welche die Empfänglichkeit für das Rauschen erhöhen. Andere vereinigten globale Eigenschaften bezüglich Robustheit und der Erstellung mathematisch optimaler Grenzen, aber die meisten dieser Methoden benutzen eindimensionale Realisierungen, welche Richtungsab-tastung und Suchbedingungen verwenden, um zweidimensionale Grenzlinien zu extrahieren. Folglich werden 2-D Abgrenzungstemplates benötigt, welche mit snakes gegeben sind. Snakes sind energieminimierende Splinefunktionen, die durch aus den Bildinformationen gewonnene äußere Kräfte entlang bestimmter Bildmerkmale gelegt werden [10].

Es gibt mehrere Unterschiede zwischen snakes und "live-wires" [4]. U.a.:

- Snakes berechnen iterativ eine letztlich optimale Grenzlinie, indem sie eine initiale, einzelne Grenzapproximation verfeinern, wohingegen das live-wire Werkzeug interaktiv ein optimales Grenzliniensegment aus allen möglichen Pfaden mit minimalen Kosten selektiert.
- Live-wire Grenzlinien sind stückweise optimal (z.B. zwischen Fixpunkten), was zu einer Ausgeglichenheit zwischen globaler Optimierung und lokaler Kontrolle führt, während snakes über die ganze Kontur global optimal sind.

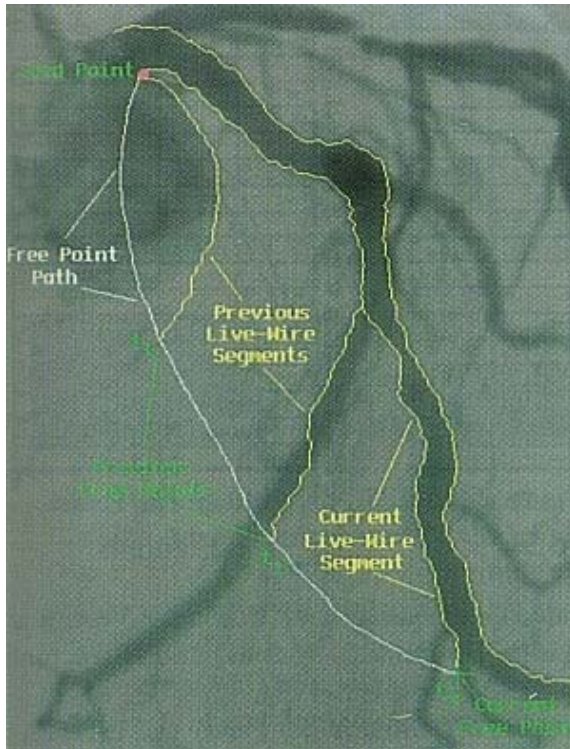


Abbildung 2

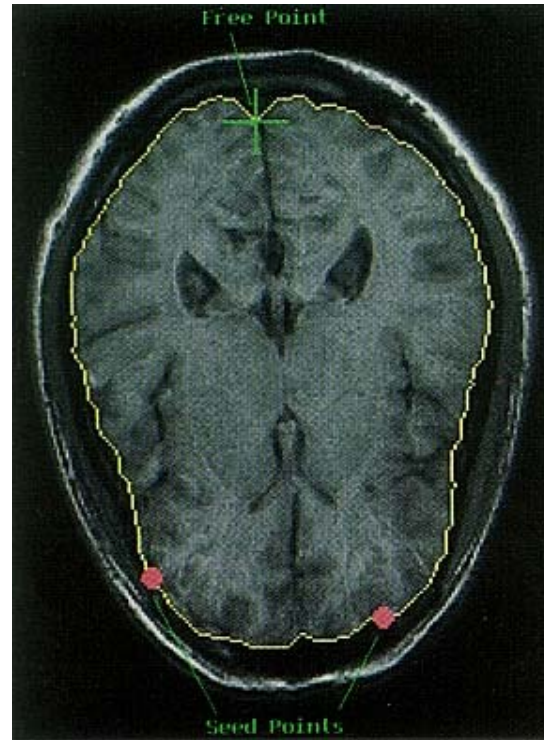


Abbildung 3

Interaktive optimale 2-D Pfadselektion ermöglicht die Grenzermittlung und unterscheidet sie von allen bisherigen Techniken. Folgende Bereiche sind für diese Methode wichtig, auf die aber näher nicht eingegangen werden soll:

- Eine neue Laplacesche Kostenfunktion und Cursorermittlung zur Lokalisation der Grenzlinien
- Überlappende Grenzselektion und "wavefront" Erweiterung
- "On-the-fly" Training für dynamische Anpassung zur aktuellen Kante
- Datenabhängiges Grenz"cooling" zur automatisierten Erzeugung von Fixpunkten
- Anwendung für Farbaufnahmen

Die Grenzermittlung wird als Graphensuchproblem formuliert. Diese Methode zeichnet sich durch ihre Geschwindigkeit, ihre Genauigkeit und ihre Reproduzierbarkeit aus. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel für eine live-wire Grenzermittlung in einer Aufnahme der Korona. Zur Ermittlung einer Grenze benötigt diese Methode ca. 2 Sekunden. In Abbildung 3 wird eine Grenzlinie des Hirns auf der Basis von MRI Daten gezeigt. Die Ermittlung dieser Grenzlinie dauerte 2.3 Sekunden [4].

2.2.3 Volumetrische Stereotaxie

Unter Stereotaxie versteht man das durch ein kleines Bohrloch in der Schädeldecke punktförmig genaues Berühren eines bestimmten Gebietes im Gehirn. Intrakranielle Masseverletzungen (Tumore) sind Volumina im Raum (dreidimensionale Gebilde). Dies wird ersichtlich, wenn man CT und MRI Aufnahmen betrachtet. Jedoch ist die Übersetzung der dreidimensionalen Daten (CT und MRI) von den Bildern in den dreidimensionalen chirurgischen (virtuellen) Operationsraum innerhalb des Kopfes des Patienten schwierig und unpräzise. Rechnergestützte volumetrische Stereotaxie beschafft dem Chirurgen in Echtzeit Informationen über die Lage des chirurgischen Instruments oder Endoskops im definierten, dreidimensionalen Feld des chirurgischen Einsatzes.

Ohne volumetrische Stereotaxie ergeben sich drei Probleme:

1. Ein Chirurg kann die Orientierung verlieren, wenn er versucht, den Tumor ausfindig zu machen. Hirngewebe wird völlig unnötig zerstört. Das kann zu neurologischen Defiziten und verlängerten und kostenintensiveren Rehabilitationsleistungen führen.
2. Ein Chirurg kann nicht entscheiden, wo der Tumor endet und normales Hirngewebe beginnt. Folglich gibt es ein gewisses Risiko, daß der Chirurg normales Hirngewebe zusammen mit dem Tumor entfernt. In wichtigen Hirnbereichen wird dies ebenfalls zu neurologischen Defiziten führen.
3. Ein Chirurg nimmt eine subtotale Entfernung eines Tumors vor. Es bleibt noch erhebliches Tumorgewebe zurück, so daß er bald wieder auftaucht und eine erneute Operation erforderlich macht.

Volumetrische Stereotaxie bietet folgende Vorteile für den Chirurgen:

1. Dem Chirurgen wird es ermöglicht, den Tumor zu finden.
2. Dem Chirurgen wird das Konzept einer dreidimensionalen Hülle des Tumors, welcher zu entfernen ist, gegeben.
3. Volumetrische Stereotaxie ermöglicht eine präoperative chirurgische Simulation und chirurgisches Fortschreiten bei der Schnittplanung unter Berücksichtigung der Anordnung des Tumors, des gesunden Hirnes und der Anatomie der Gefäße, welche bewahrt werden müssen.

Desweiteren gibt es noch Vorteile für den Patienten, welche sich hauptsächlich in kürzeren Aufenthaltszeiten, geringeren Kosten etc. ausdrücken [5].

2.2.4 Segmentierung von 2-D und 3-D Objekten aus MRI Volumendaten mittels erzwungener elastischer Deformationen von beweglichen Fourierumrissen und Oberflächenmodellen

Bei dieser Art der Segmentierung handelt es sich um eine neue modellbasierte Technik, welche wünschenswerte Eigenschaften der physikalischen Modelle (snakes), Gestaltrepräsentationen durch Fourierparametrisierungen und Modellierung der Veränderlichkeit naturgemäßer Gebilde kombiniert. Elastische parametrische Gestaltmodelle werden durch Parametervektoren, welche den Umriß beschreiben und durch eine Reihe von Eigenwerten der Parameter, welche die Gestaltsveränderung charakterisieren dargestellt. Auf nähere Einzelheiten der Berechnung der Segmentierungen soll hier nicht eingegangen werden. Erwähnenswert ist aber, daß bei dieser Methode ein neuer "coarse-to-fine" Algorithmus (Verfeinerungsalgorithmus) eingesetzt wird.

Abbildung 4 zeigt ein Anwendungsbeispiel dieser Segmentierungsmethode. Teil a zeigt die Segmentierung des "caudate nucleus" (wörtlich: schwanzförmiger Kern) durch 3-D Fourier-snakes, welches die anfängliche Positionierung des 3-D Korona Schnittmodells (mit Kugelflächenfunktionen bis zum Grad 3 mit 48 Parametern) darstellt. In Teil b wird das endgültige Ergebnis der Segmentierung gezeigt. Teil c zeigt die graphische Darstellung des elastisch deformierten Modells, welches das Ergebnis der 3-D Segmentierung darstellt. Die endgültige Optimierung basierte auf Kugelflächenfunktionen (spherical harmonics) des Grades 5 (108 Parameter).

Die Optimierung durch Kugelflächenfunktionen kann aber auch dazu genutzt werden, bei Segmentierung erhaltenswerter Objekte eine Art Schutzmantel um diese zu legen [6] (z.B. den Umriß etwas großzügiger zu gestalten).

2.3 Virtuelles Schneiden in Volumendaten

Das Planen von chirurgischen Eingriffen basierte bis jetzt meistens ausschließlich auf der Erfahrung des durchführenden Chirurgen und auf der Interpretation von zweidimensionalen statischen Informationsquellen. Ziel des virtuellen Schneidens ist es, daß der Chirurg in seiner Planung durch 3-D Simulation des Ergebnisses der geplanten Operation, durch das "Austesten" von alternativen Methoden, deren Effekten und Risiken, unterstützt wird.

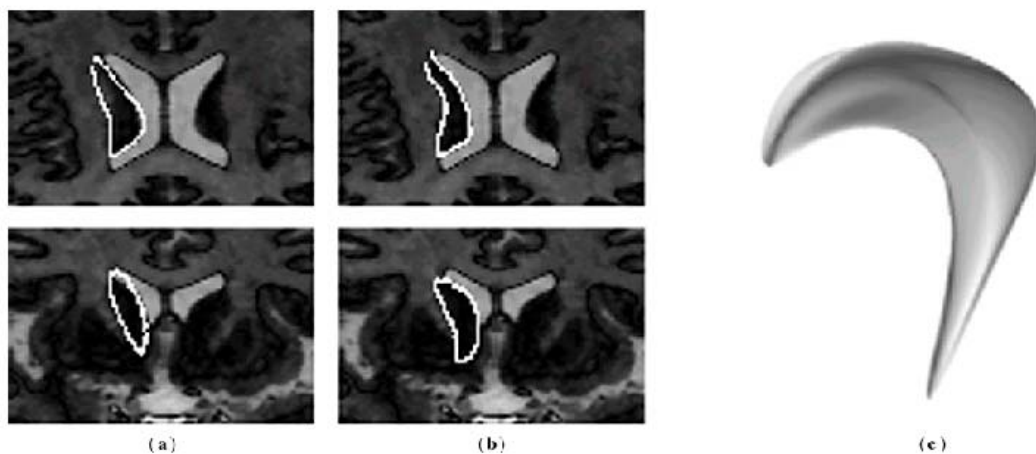


Abbildung 4

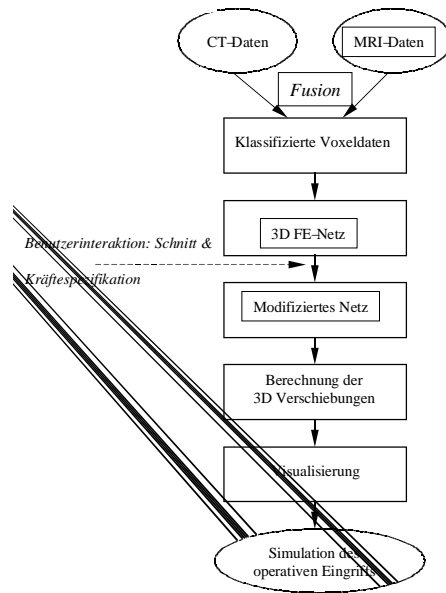


Abbildung 5

In [7] wird eine neue 3D Finite-Elemente-Methode vorgestellt, welche nichtlineare elastische Materialien und nichtlineare geometrische Eigenschaften beinhaltet. In früheren Methoden konnten elliptische Schnitte auf eine 3-Schichten-Shell, welche die Oberfläche des medizinischen Objektes approximiert, von dem Reichweitenscannerdaten verfügbar sind, angewendet werden. Eine andere Methode beschäftigt sich z.B. mit der Modellierung eines virtuellen Skalpell in einer 2D-Realisierung.

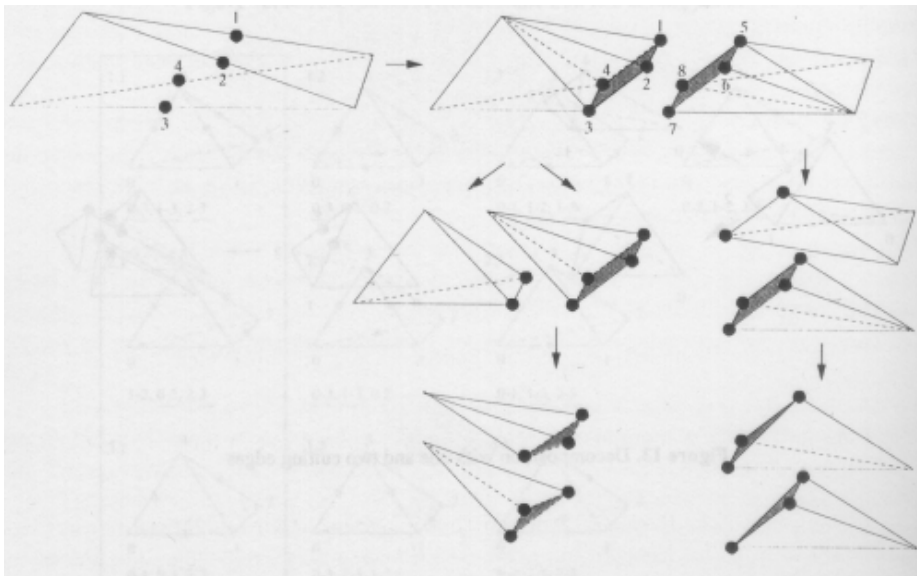


Abbildung 6

Abbildung 5 zeigt die einzelnen Komponenten des Simulationssystems. Zuerst werden CT- und MRI-Daten zu Voxeldaten (Volumendaten, in denen Eigenschaften bzgl. Relaxationsverhalten und Dichte enthalten sind) fusioniert. Mit Hilfe dieser Daten wird ein 3-D Finite-Elemente-Netz erzeugt, aus dem ggf. durch Benutzerinteraktion bzgl. Schnitt und Kräftespezifikation ein modifiziertes FE(Finite-Elemente)-Netz entsteht. Unter Verwendung dieser Modifikationen werden die 3D-Verschiebungen berechnet. Das Ergebnis wird dann visualisiert und dient zur Simulation des operativen Eingriffs [7].

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel einer Dekomposition mit 4 Schnittpunkten.

2.4 Präoperative Planungs- und Simulationssysteme

2.4.1 Chirurgisches Planungssystem für Weichgewebe unter Verwendung von Virtueller Realität

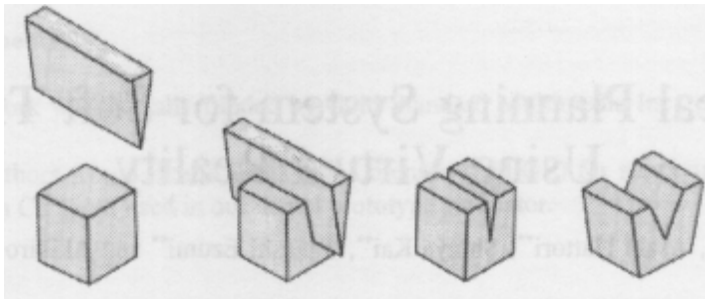


Abbildung 7

Dieses System, welches die Simulation von Einschnitten in Weichgewebe und Gefäße ermöglicht, existiert bereits seit 1994 und wurde in einigen Punkten verbessert [8]. Große Mengen an Daten, welche detaillierte anatomische Informationen des menschlichen Körpers beinhalten, sollen in Echtzeit bearbeitet werden. Das Funktionsprinzip stellt sich wie folgt dar: Aus seriellen MRI-Bildern wird ein 3D-Modell konstruiert, welches visualisiert und ständig aktualisiert wird. Anhand der Visualisierung kann der Chirurg nun virtuell die Operation durchführen. Die Eingabe wird registriert und in 3D-Koordinaten umgewandelt. Der Eingriff wird berechnet und das zugrundeliegende Modell (und somit auch dessen Visualisierung) transformiert. Die Transformation von Weichgewebe beim Einschnitt wird in Abbildung 7 schematisch dargestellt.

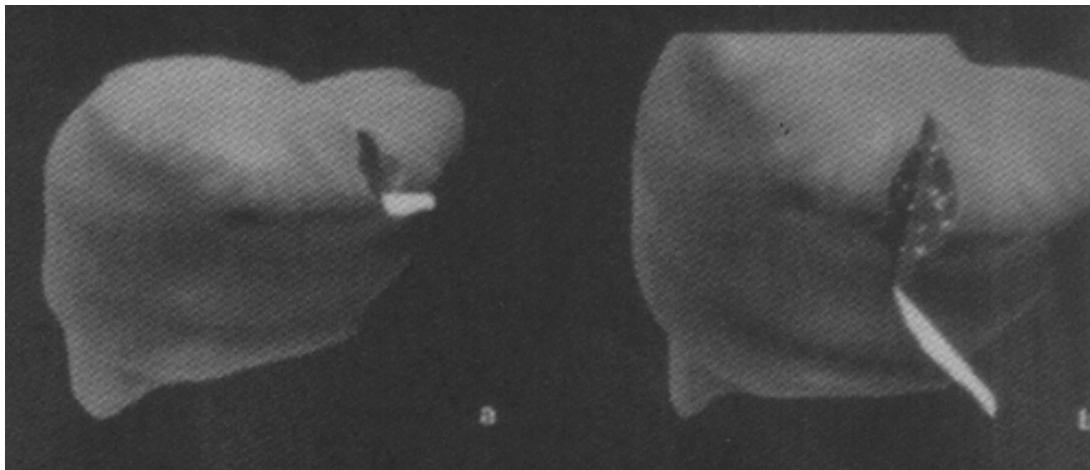


Abbildung 8

Das System besteht aus einer grafischen Workstation und einem Eingabegerät in Form eines Zeigestifts oder eines Datenhandschuhs, jeweils mit Lokalisationssensor, welcher die Handbewegungen des Benutzers registriert. Das Organ des Patienten, einschließlich der internen Struktur, wird als 3D-Bild rekonstruiert. Der Bereich des Einschnitts wird durch die Bewegung des "Skalpells" des Benutzers, dessen Position durch den Sensor registriert wird, definiert. Abbildung 8 zeigt ein Beispiel dieser Methode anhand eines Oberflächeneinschnitts der Leber durch ein Skalpell. Der Schnittbereich wird geweitet und die zerschnittenen Gefäße sind auf den Schnittflächen zu sehen [8].

2.4.2 Planung und Simulation von medizinischen Roboteranwendungen

Hohe Präzision und minimale Behandlungszeiten sind entscheidende Faktoren, um ein gutes Operationsergebnis zu erhalten. Speziell bei der Verbesserung der Bildbearbeitung von tomographischen Daten, 3D-Rekonstruktion und der Fusion von zwei oder mehr Bildmodalitäten sind große Fortschritte gemacht worden. Heutzutage wird die Planung durch den Chirurgen selbst durchgeführt, unter Zuhilfenahme von Visualisierung und rekonstruierten Methoden in dessen Hirn. Oft existiert nur eine unentwickelte Dokumentation eines Plans. Der Gebrauch eines programmierbaren Systems, wie z.B. eines Roboters oder eines Operationsmikroskopes erfordert u.a. die formale Beschreibung des Behandlungsplanes. Dies wird in der Robotik Aktionsplanung genannt. Ein Plan stellt eine Sequenz von attributbehafteten Operationen dar. Die Korrektheit eines Plans kann durch die Ausführung einer Simulation überprüft werden. Die für die roboterunterstützte Chirurgie benötigte Simulation ist in zwei Phasen unterteilt. Einerseits muß es eine präoperative Planung der erwünschten Osteotomie (operative Durchtrennung von Knochen) stattfinden, um dem Chirurgen zu ermöglichen,

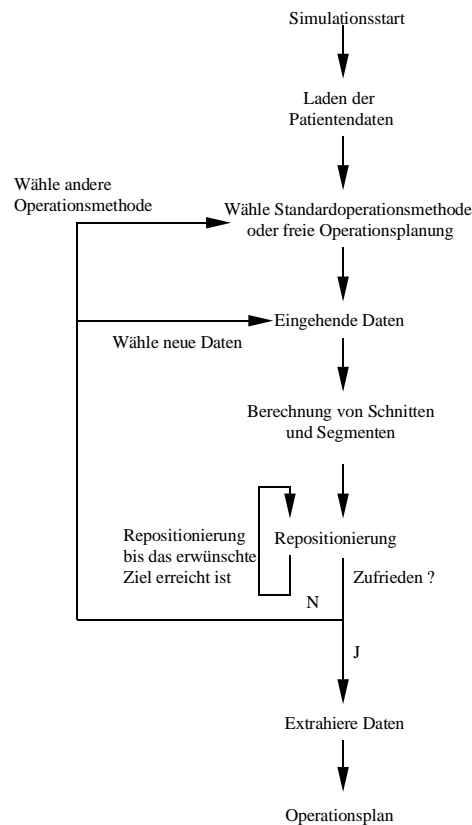


Abbildung 9

den besten Behandlungsplan für seinen Patienten zu wählen, andererseits wird die momentane roboterunterstützte Chirurgie in ROBOCAD simuliert, um präoperativ die Kontrollhandlungen für den Roboter zu ermitteln.

Ein chirurgischer Eingriff wird präoperativ wie in Abbildung 9 gezeigt simuliert. Nach dem Simulatorstart werden die Patientendaten geladen. Danach kann zwischen einer Standardoperationsmethode oder einer freien Operationsplanung gewählt werden. Eingabedaten werden spezifiziert (Spezifikationsdaten) und Schnitte und Segmente berechnet und dargestellt. Ggf. werden die Segmente bzw. Schnitte solange repositioniert, bis das gewünschte Ziel erreicht ist. Wenn auch das nicht reicht, werden neue Daten ausgewählt oder sogar eine andere Operationsmethode gewählt und die Prozedur wiederholt sich. Bei zufriedenstellendem Ergebnis werden die Daten extrahiert und in einen Operationsplan ausgegeben. Bei der Berechnung der Schnitte wird schon ein Algorithmus (osteotomischer Pfadalgorithmus) verwendet, der kritische Strukturen (z.B. Nerven, Blutgefäße) berücksichtigt. [9]

3 Versuch eines Lösungsvorschlags

Aufgrund mangelnder Existenz von Veröffentlichungen, die das gestellte Thema direkt treffen, wird hier anhand der Abbildung 10 der Versuch eines Lösungsvorschlages gemacht, der inhaltlich an die in 2.4.2 vorgestellte Methode, welche sich nur auf Kopfoperationen bezieht angelehnt ist, aber auch auf beliebige Schnittziele (z.B. Weichgewebe) anwendbar sein soll.

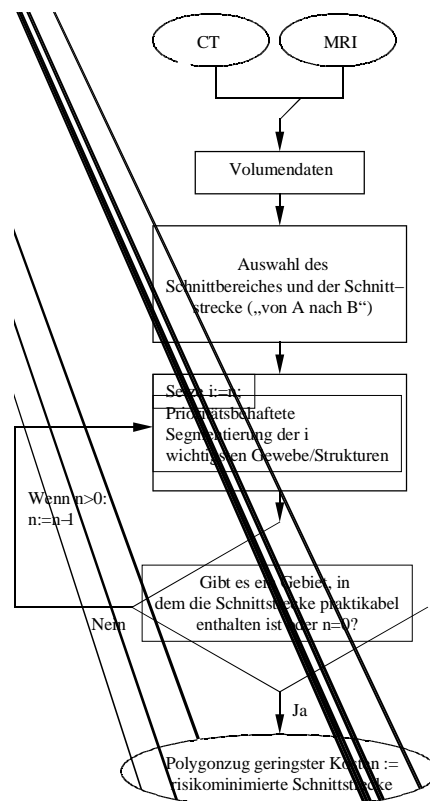


Abbildung 10

Zuerst werden aus CT- und MRI-Daten des Patienten Volumendaten gebildet. Dann wird vom Chirurgen der Schnittbereich ausgewählt, d.h. es wird spezifiziert, von wo nach wo geschnitten werden soll (der Einfachheit halber wird hier das Verfahren in 2-D skizziert). Die Punkte A und B werden fixiert und der zu betrachtende Bereich wird festgelegt. Nun wird eine prioritätsbehaftete Segmentierung der kritischen Strukturen vorgenommen. Dies kann man sich so vorstellen: Die kritischsten Strukturen (z.B. Nervenbahnen, Nervenzellen oder auch Hauptblutversorgungen (Schlagadern etc.)) bekommen die höchste Priorität zugewiesen, danach die zweitwichtigsten Strukturen (z.B. ebenfalls Nervenbahnen, Nervenzellen oder auch Muskel, Organe etc.). Am Schluß der Prioritätskette stehen Strukturen wie z.B. Muskelgewebe, Fettgewebe etc. Wenn die Segmentierung all dieser Objekte erfolgt ist (was einen großen Rechenaufwand erfordert und somit noch eine präoperative Planung und Simulation notwendig macht), kommt der Kern der hier vorgestellten Methode. Nun wird untersucht, ob der Schnittpunkt und der Schnittpunkt gemeinsam in einem akzeptablen Gebiet liegen, d.h. ob es einen Polygonzug gibt, der keine der segmentierten Strukturen schneidet und die beiden Punkte verbindet. Gibt es diesen, so wird er noch bzgl. Kosten (=Länge) untersucht. Um für eine Operation nützliche Ergebnisse zu bekommen, können hier noch Forderungen an die Länge der Verbindungsstrecke gestellt werden, wie z.B., daß sie nicht länger als das 1.5-fache der Direktverbindung der beiden Punkte sein soll. Falls allerdings keine Verbindungsstrecke gefunden wird, die keine der segmentierten Strukturen verletzen würde, wird die Strukturgruppe mit der niedrigsten Priorität nicht länger berücksichtigt und eine erneute Berechnung einer Verbindungsstrecke vorgenommen, die den gewünschten Kriterien entspricht. Diese Prüfung wird solange fortgesetzt, bis entweder eine Verbindungsstrecke gefunden wird, oder keine Segmentierungen mehr vorhanden sind. Falls eine Verbindungsstrecke gefunden wurde, die alle Kriterien erfüllt, wird diese als risikominimierte Schnittstrecke verwendet und angezeigt. Der Problembereich dieses Vorschlages liegt in der Segmentierung, die noch von Hand vorgenommen werden muß (z.B. mit der live-wire Methode). Ob dieser Vorschlag durchführbar ist, wird noch zu untersuchen sein.

4 Zusammenfassung

Für die risikominimierende Durchführung von Schnitten sind mehrere Faktoren wichtig. Das Ziel ist es, möglichst wenig kritische Strukturen (z.B. Nerven, Blutbahnen, Blutgefäße etc.) bei der Durchführung eines Einschnittes zu zerstören, was sich schließlich auch auf kürzere Rehabilitationszeiten, schnellere Regeneration, kürzere Krankenhausaufenthalte und somit auch geringere Kosten für den Patienten auswirkt. Segmentierung kritischer Strukturen ist essentiell wichtig für die Überprüfung, ob mit einer berechneten Schnittstrecke zu schützende Strukturen verletzt bzw. zerstört werden. Dieser Aspekt beinhaltet auch die Notwendigkeit der präoperativen Planung. In Kapitel 2 wurden aus den einzelnen Bereichen Beispiele kurz vorgestellt, die zum Erreichen des oben gesteckten Ziels beitragen können. Da in der Literatur und im Internet keine Veröffentlichung gefunden wurde, die das Thema direkt behandelt, wurde in Kapitel 3 der Versuch eines Lösungsvorschlages zur risikominimierenden Durchführung von Schnitten gemacht.

5 Literaturverzeichnis

- [1] H.U.Lemke, Computer Assisted Radiology and Surgery, 1997, S.849–854
- [2] Teilprojekt Q3: Inhalt, http://sfb414.ira.uka.de/inhalt_q3.html
- [3] J. D. Westwood, Medicine meets Virtual Reality, 1998, S.353–354
- [4] Karl H. Höhne, Visualization in biomedical computing, VBC'96, S.183–192
- [5] NYU Department of Neurosurgery: <http://www.braintumor.net/intro/stereo.disc.html>
- [6] G. Székely, A. Kelemen, Ch. Brechbühler, G. Gerig: siehe: http://www.oup.co.uk/media/jhdb/Volume_01/Issue_01/010019.sgm.abs.html
- [7] A. Mazura, Virtuelles Schneiden in Volumendaten, Diss. Uni Karlsruhe, 1997
- [8] K.S.Morgan et al. (Eds.), Medicine meets Virtual Reality, 1997, S.159–163
- [9] J. D. Westwood, Medicine meets Virtual Reality, 1998, S.209–214
- [10] D. Terypopoulos, M. Kaas, A. Witkin, "Snakes: Active contour models", Intern. Journal of Computer Vision 1988, S.321–331