

Virtuelle Operationsplanung auf Basis von computertomographischen (CT-) Daten am Beispiel der Schädelknochenresektion bei einzeitiger Implantatversorgung

Hayo Andreas Knoop

Universität Dortmund, Informatik, Lehrstuhl I
Universitätskliniken Bochum, Knappschaftskrankenhaus Langendreer
Universität Bochum, Maschinenbau, Lehrstuhl für Produktionssysteme

Gefördert durch die DFG im
Rahmen des Projekts Eu 49/1-1

Zusammenfassung: Zur Operationsplanung auf Basis von CT-Daten muss der medizinische Bilddatensatz dargestellt und auf diesem positioniert werden. Üblicherweise findet dies auf dreidimensionalen Oberflächenmodellen statt, die aus den Bilddaten erzeugt werden. Hierzu sind verschiedene Interpretationen der Daten erforderlich. Der im Rahmen der Arbeit erstellte Anwendungsprototyp SOP² benutzt zur Darstellung und Positionierung 2D-Texturen und stellt so die zugrundeliegenden Informationen interpretationsfrei für den planenden Mediziner zur Verfügung.

Schlüsselwörter: Operationsplanung, Registrierung, Texturen, CAD/CAM, Robotik

I. Einführung:

Zur Behandlung von infiltrierendem Tumor im Bereich des Schädels ist eine Resektion des betroffenen Bereiches erforderlich. Dies geschieht mit Hilfe einer individuell konstruierten Metallschablone aus dem TICC-Verfahren¹ [1], die auf dem Schädel fixiert wird. Abschliessend findet die einzeitige Implantatversorgung mit einem der Schablone entsprechenden Titanimplantat statt (Abb.1).

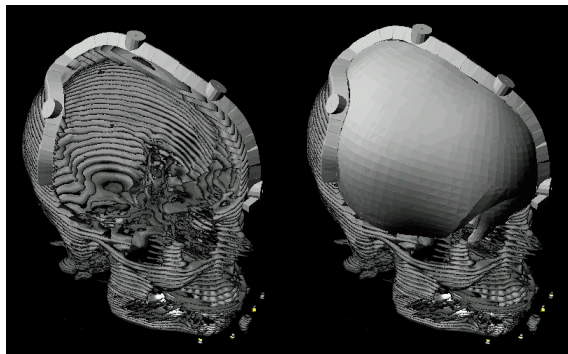


Abb. 1: Resektion und Versorgung

In ersten Anwendungen von Navigation zur Positionskontrolle der Schablone und Robotik zur Nutzung der Resektionsgrenzen für Fräsprogramme wurden geometrische Informationen aus dem Konstruktionsprozess für die Operationsplanung abgeleitet. Bei den in tomographischen Anwendungen üblicherweise benutzten Voxelmodellen ist jedoch die gleichzeitige Darstellung von CT-Bilddaten mit CAD-Geometrien nicht vorgesehen.

II. Anforderungen

Der Anwendungsprototyp stellt die medizinischen Bilddaten in 2D- und 3D-Ansichten zur Verfügung und erlaubt die Navigation und Positionierung im Datensatz. Die Positionen können für verschiedene Planungsaufgaben und zur Erzeugung von einfachen Geometrieobjekten manipuliert und gespeichert werden. Eine modale Benutzerführung gewährleistet die Planungskontrolle.

Zielgruppe

Ärzte, Radiologen, Techniker, Planer

Erweiterbarkeit

Da der Prototyp lediglich rudimentäre Anforderungen erfüllt, ist eine einfache Erweiterbarkeit sicherzustellen. Zusätzliche Module sollen sich nahtlos in die Benutzerführung und die Anwendungsstruktur einpassen.

Darstellung, Navigation

Darstellung von medizinischen Bilddaten im DICOM³-Format [3] gemeinsam mit CAD-Geometrien. Dreidimensionale Navigation innerhalb der Bilddaten und Geometrien und Darstellung der Zusatzinformationen des Datensatzes.

Selektion, Messung

Eingabemöglichkeit für Raumpunkte zur Definition von ROIs⁴, Schnittpunkten und Registriermarkern, Messungen von Winkeln und Strecken, gleichzeitige Abfrage und Darstellung von HU⁵-Werten aus den Bilddaten.

¹ Tomography Image Processing CAD CAM

² Surgical Operation Planning

³ Digital Imaging and Communications in Medicine

⁴ Regions Of Interest

⁵ Hounsfield Unit

Registrierung

Zur Darstellung von Geometrien ist eine physikalische Registrierung zur Verwendung der unterschiedlichen karthesischen Koordinatensysteme durchzuführen. Dabei werden die Bildinformationen von Aufbisschablonen mit integrierten Registrierschrauben oder implantierten knochengetragenen Markern benutzt. Die Registrierinformationen sind für die spätere Wiederverwendung z.B. für eine intraoperative Navigation abzuspeichern.

III. Methoden:

Nach vorangegangener Analyse der Anforderungen wird ein Konzept (s.a.[2]) für die Implementation des Prototypen erstellt.

MVC⁶-Architekturmodell

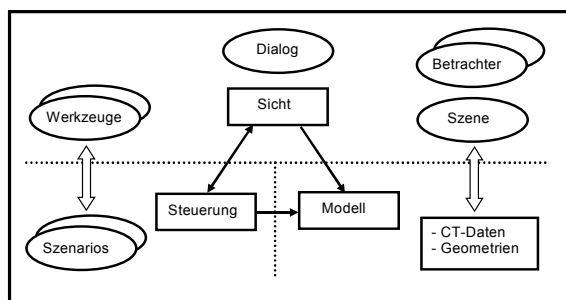


Abb. 2: Modell –Sicht - Steuerung

Die Komponenten des Prototypen lassen sich wie in Abb. 2 in das MVC-Modell eingliedern.

Szenarios, Werkzeuge

Die geforderte Benutzerführung findet innerhalb von Szenarios, deren graphische Präsentation durch eine Leiste mit Werkzeugen statt. In den Werkzeugen sind die durchzuführenden Sequenzen für den Anwender als Werkzeugschritte dargestellt (Abb. 9).

Betrachter, Szene

In einer zentralen Szene sind alle Graphikobjekte angeordnet. Auf diese Szene kann mit mehreren, frei konfigurierbaren Betrachter(-fenstern) zugegriffen werden.

Modelldaten

Von den Szenarios und der Szene wird einseitig auf die um zusätzliche Formate erweiterbare Datenbasis zugegriffen. Die Daten sind so von Steuerung und Präsentation getrennt.

Dokumentation

Allen Graphikobjekten kann in SOP eine eindeutige Bezeichnung zugeordnet werden. Zusätzlich können Texte bearbeitet werden. Aus dem Programm können Bildschirm ausdrücke der aktuellen Ansicht erstellt werden.

Darstellung, Selektion

Für die Darstellung und Positionierung auf medizinischen Bilddaten durch Konturfundungsalgorithmen werden im Raum Dreiecksfacettenetze der Objektoberfläche erzeugt. Hierzu sind für die Bilddaten Schwellwerte zur Erstellung eines Rastermodells auszuwählen, um dessen Rasterpunkte $P_i, i=0, \dots, n \{x_i, y_i, z_i\} \rightarrow \{0,1\}$ einem Objekt zuzuordnen. Die Schwellwerte segmentieren die Bilddaten z.B. für die Darstellung von Knochen. Hierzu sind die Werte benachbarter Schichten des Datensatzes zu interpolieren. Die Abb. 3 zeigt schematisch diesen Zusammenhang.

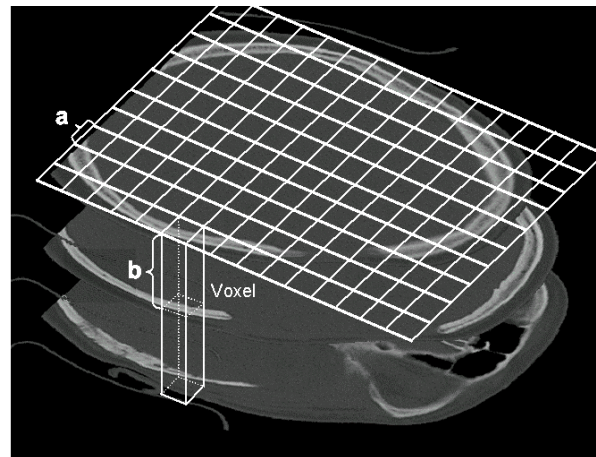


Abb 3.: Voxeldimension und Interpolation

Bei aktueller Tomographentechnik ist jedoch der Abstand der Bildpunkte einer Schicht (a, etwa 0.25 mm) wesentlich kleiner als der Schichtabstand (b, etwa 1-2 mm). Die beschriebene Interpolation interpretiert also die Daten und ordnet einem stark quaderförmigen Voxel einen einzigen Bilddatenwert zu. Umgekehrt wäre eine Vergrößerung auf ein würfelförmiges Voxel möglich, im Vergleich zu konventionellen zweidimensionalen Röntgenaufnahmen mit etwa 4000 x 4000 Bildpunkten scheinen solche Reduktionen aber problematisch. Nach der Zuordnung wird zur Berechnung der Objektoberfläche ein Entrasterungsverfahren angewandt. Beim hierfür typischen Marching-Cubes-Verfahren ist die Ausgabe die Aussenfläche des betrachteten Objektes als Netz von Dreiecken. Die Anzahl der Dreiecke hängt von der Objektstruktur und der Anzahl der Punkte ab, die zum Objekt gehören. Die bei einem medizinischen Bilddatenvolumen entstehenden Dreiecksanzahl kann selbst von modernen Standard-Rechensystemen nicht immer bedienungsfreundlich verwaltet werden. Hinzu kommt, dass bei einer Änderung des Schwellwertes und anschließender erneuter Zuordnung, z.B. um statt Knochenstrukturen den Aufbau des Weichgewebes darzustellen, wiederum eine Berechnung und zusätzliche Dreieckserzeugung nötig wäre. Stattdessen werden 2D-Texturen benutzt. Durch

⁶ Model – View - Controller

Schranken kann der Benutzer eine Bewertung angeben, für die dann die Bilddaten dargestellt werden. Die Texturen werden gemäss den geometrischen Informationen des Bild-datensatzes (Pixel-, Schichtabstand, Position) erzeugt und für die gemeinsame Darstellung werden von SOP die Alpha-Blending-Methoden der OpenGL⁷ [4] benutzt, um wie in der dargestellten Sicht intuitiv selektieren zu können. Zur Selektion wird ein eingeschränktes Sichtvolumen (Sichtstrahl) benutzt; die Graphikobjekte werden getestet, ob sie sich innerhalb dieses Volumens befinden.

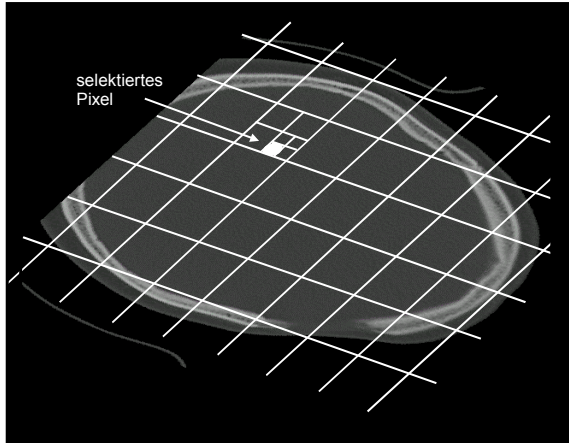


Abb. 4: Selektion

Fällt dieser Test positiv aus, wird bis zu einer durch die Bildauflösung der Daten gegebenen Genauigkeit das selektierte Pixel der Bildschicht bestimmt. Hierzu sind demnach $n = \log_2(\max(\text{Spalten}, \text{Zeilen}))$ Iterationsläufe notwendig (Abb. 4).

Freie Bibliotheken

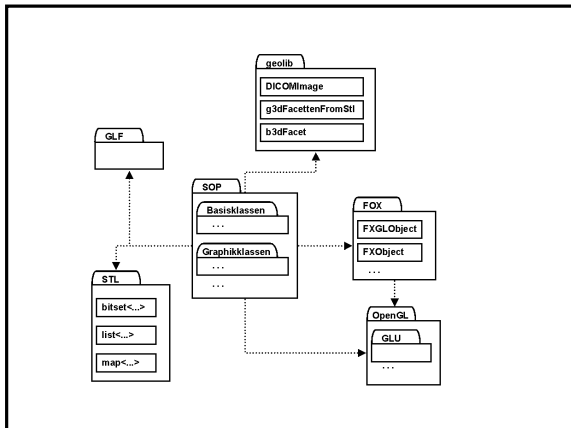


Abb. 5: FOX⁸, OpenGL, STL⁹, GLF¹⁰

Die Implementation des Prototypen findet unter Linux in C++ statt. Zur Implementation des Anwendungsprototypen sollen bereits vorhandene, freie und plattformunabhängige

⁷ Open Graphics Library

⁸ Free Objects for X

⁹ Standard Template Library

¹⁰ Graphics Library Fonts

Bibliotheken (Abb. 5) zum Einsatz kommen, um die notwendige spätere Portierung auf andere Betriebssysteme wie MS-WindowsTM vorzubereiten [5,6,7].

Data, EditData

Um dem Benutzer Änderungen an den Graphikobjekten zugänglich zu machen und diese kontrollieren zu können, werden zunächst nur die Editierdaten eines Objektes verändert. Wenn der Benutzer die Änderung bestätigt, wird der eigentliche Datenblock des Objektes mit diesen Daten synchronisiert (Abb. 6).

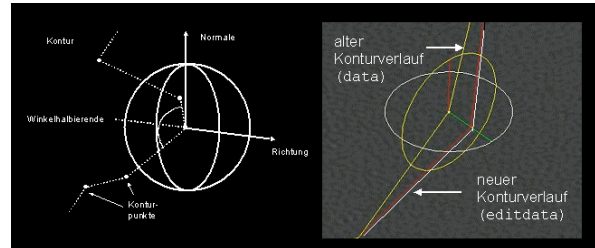


Abb. 6: . Adaptor für Konturwerkzeug

Transformationen, Registrierung

Für die Transformation der Objekte kommen 4x4-Matrizen zum Einsatz. Die Verknüpfung dieser Matrizen zeigt schematisch Abb. 7. Für die Registrierung von CAD-Geometrien und Bilddaten kommt die dargestellte Gruppenmatrix zum Einsatz. Die Registrierung wird zunächst als rigide Punktepaarregistrierung implementiert.

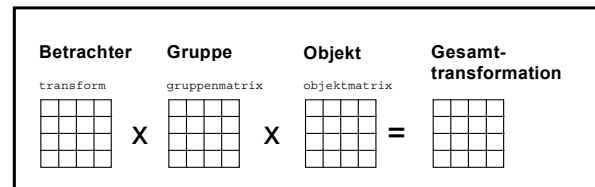


Abb. 7: Matrizen

Import

Für den Import aus dem CAD ist eine Schnittstelle für Dreiecksfacettenmodelle im STL (Stereolithographie)-Format implementiert. Die Texturen der Bilddaten werden direkt aus dem DICOM-Format gelesen. Die Tag-Informationen werden ebenfalls (Abb. 8) dargestellt.

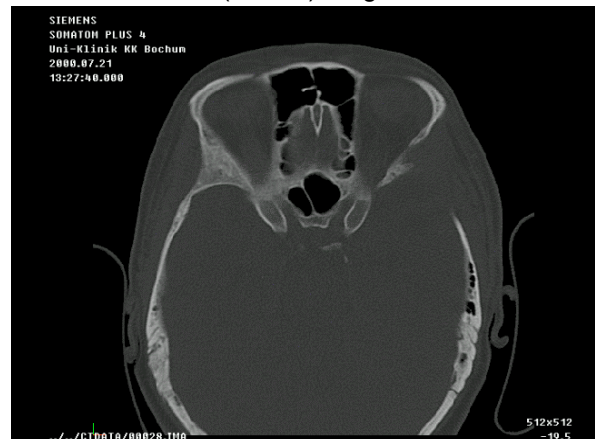


Abb. 8: Texteinblendung mit Tag-Informationen

Export

Zum Speichern und Laden ist eine Eindeutigkeit der erzeugten Geometrieobjekte und der Bezüge zu Bilddaten sicherzustellen. Für die Geometrien werden Zeitstempel verwendet, Bilddaten werden grundsätzlich nicht verändert, der Bezug zu den Planungsdaten wird über Checksummen der einzelnen Bilddateien in einer Projektdatei sichergestellt.

IV. Ergebnisse:

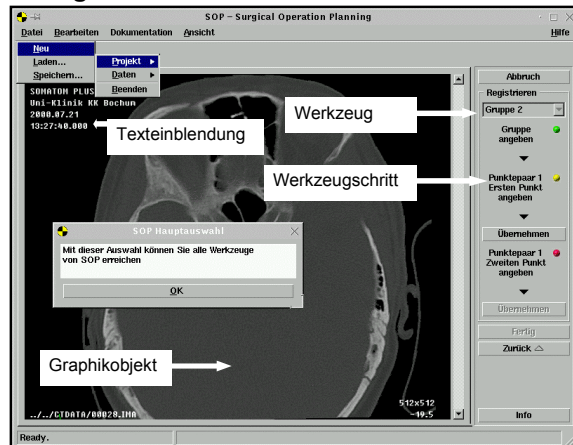


Abb. 9: Hauptfenster mit Komponenten

Durch die Verwendung von Texturen ist bereits auf Standardhardware eine ausreichende Performanz zur Navigation und Selektion in Bilddatensätzen vorhanden. Für die Präsentation des Prototypen mit voller Bildauflösung von 512 x 512 x 125 Punkten kamen ein Intel™ Pentium III, 800 MHz Prozessor, 896 MB RAM, GeForce 2MX 64 MB-Grafikkarte, SuSE Linux 7.1, Kernel 2.2.18, XFree 4.1.0 und nVidia Treiber 1.0.23.13 zum Einsatz.

Beispiele

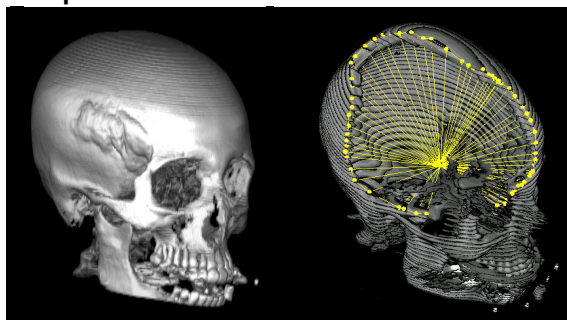


Abb. 10: Versorgungsplanung Tumor

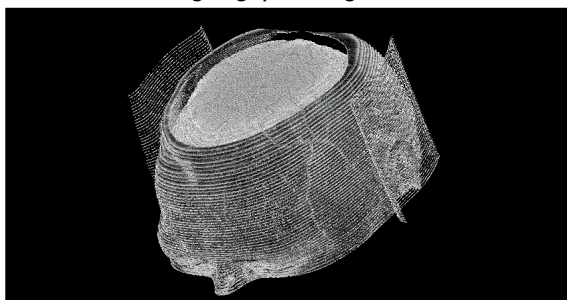


Abb. 11: Berücksichtigung von Weichgewebe

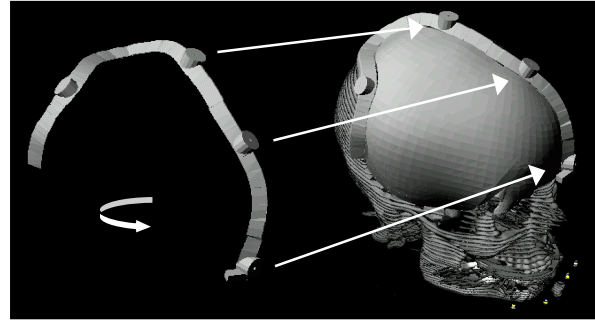


Abb. 12: Registrierung

V. Diskussion, Ausblick:

Es ist gelungen, die Möglichkeiten zur Navigation und Positionierung in medizinischen Bilddatensätzen und Geometrien innerhalb eines Anwendungsprototypen zu realisieren. Positionen können für die Konstruktion und Registrierung abgespeichert und wiederverwendet werden. Zur virtuellen Planung der beschriebenen oder weiterer Versorgungsaufgaben, soll der Prototyp zunächst auf die MS-Windows™-Plattform portiert werden. Eine Erweiterung um komplexere Graphikobjekte wie Bézierkurven ist bereits vorgedacht und kann in die Anwendungsstruktur integriert werden; hierzu muss jedoch ein Weg gefunden werden, deren Darstellung und Manipulation den genannten Zielgruppen zugänglich zu machen. Für die dreidimensionale Navigation und Planung ist die Integration von externen Zeigergeräten wie dem MicroScribe 3DX wünschenswert.

VI. Literatur, Links:

- [1] Wehmöller, M.: Rechnergestützte Analyse von computertomographischen Bilddaten, Konstruktion und Fertigung von individuellen Implantaten, Shaker Verlag Aachen, 1997
- [2] Wehmöller, M., Knoop, H.: SOP- Surgical Operation Planning, Beiträge zur 35. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Biomedizinische Technik, Schiele und Schön, Berlin, 2001
- [3] DICOM, Part 3: Information Object Definitions, National Electrical Manufacturers Association, Virginia, USA, 2000
- [4] Woo, M., Neider J., Davis T., Shreiner, D.: OpenGL Programming Guide, 3rd Edition, Addison-Wesley, 1997
- [5] FTP-Server für den Download der FOX-Bibliothek, Online im Internet unter: <ftp://ftp.cfdrc.com/pub/FOX>
- [6] FTP-Server für den Download der STL, Online im Internet unter: <ftp://ftp.sgi.com>
- [7] FTP-Server für den Download der GLF-Bibliothek, Online im Internet unter: <ftp://ftp.romka.demonews.com>

Neben meinen Betreuern Prof. Moraga und Prof. Eufinger danke ich vor allem Herrn Dr. Wehmöller für seine Anregungen und Kritik.