Ein realistisches dreidimensionales Modell der Inneren Organe auf der Basis des Visible Human

Andreas Pommert, Karl Heinz Höhne, Bernhard Pflesser, Ernst Richter*, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Udo Schumacher** und Ulf Tiede

Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin (IMDM)
*Abteilung für Kinderradiologie
**Institut für Anatomie
Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, 20251 Hamburg
eMail: pommert@uke.uni-hamburg.de

Zusammenfassung. Computergestützten dreidimensionalen Modellen des menschlichen Körpers fehlt es bisher meist an Realismus und Detaillierung. In diesem Beitrag wird ein Modell der inneren Organe entwickelt, das auf über 770 Cryotomschnitten und den dazu kongruenten CT-Schnittbildern aus dem Visible Human-Projekt der National Library of Medicine basiert und eine bisher unerreichte photorealistische Darstellung und Detailtreue bietet. Die dafür entwickelten Methoden zur Segmentation, graphischen Modellierung, Wissensrepräsentation und Visualisierung werden skizziert. Für eine breitere Anwendung steht das Modell auch in Form des PC-basierten Programms "VOXEL-MAN 3D-Navigator" zur Verfügung.

1 Einleitung

Multimediale Darstellungen des menschlichen Körpers folgen bisher meist dem klassischen Paradigma einer Sammlung von vorgefertigten Bildern und Texten. In den vergangenen Jahren hat es sich allerdings gezeigt, das bildliches Wissen, insbesondere über die Struktur des menschlichen Körpers, sehr viel effektiver in Form dreidimensionaler Modelle repräsentiert und genutzt werden kann [1]. Diese Modelle werden in der Regel aus räumlichen Schnittbildfolgen, z.B. aus der Computertomographie (CT) oder der Kernspintomographie (MR), erzeugt. Wenn ein solches Modell um beschreibendes Wissen angereichert wird, können sie in Form eines "selbsterklärenden Körpers" am Bildschirm präpariert werden.

Eine wesentliche Einschränkung dieser Modelle bestand bisher in der relativ geringen räumlichen Auflösung der zugrunde liegenden radiologischen Bilder. Mit dem *Visible Human* der National Library of Medicine steht heute allerdings ein Datensatz zur Verfügung, der eine sehr viel bessere Auflösung bietet und die Organe dazu noch in ihren (post-mortalen) natürlichen Farben darstellt [2]. Ein wesentliches Problem für die Erzeugung eines dreidimensionalen Modells besteht allerdings darin, die einzelnen Objekte in diesem Datensatz zu identifizieren und darzustellen. Die Entwicklung und Anwendung geeigneter Methoden für ein Modell der inneren Organe ist Gegenstand dieses Beitrags.

2 Methoden und Material

Der photographische Datensatz des Visible Human besteht aus 1871 Schnittbildern mit einem Abstand von 1 mm und einer räumlichen Auflösung von 1/3 mm (Abb. 1). Für das Modell der inneren Organe wurde die Auflösung aus Gründen der Speicher- und Rechenkapazität auf 1 mm reduziert. Aus 1049 Schnitten wurde ein Bildvolumen aus $573 \times 330 \times 1049$ Voxeln von 1 mm^3 Größe erzeugt, wobei jedes Voxel durch einen Farbwert (RGB) charakterisiert ist. Zum Visible Human gehören auch noch zwei CT-Datensätze mit einem Schichtabstand von 1 mm, die von der frischen bzw. der gefrorenen Leiche aufgenommen wurden. Beide wurden passend zum photographischen Datenvolumen transformiert.

2.1 Segmentation

Für die Segmentation wurde eine Methode entwickelt, die die verschiedenen Gewebeklassen mit Hilfe von Ellipsoiden im RGB-Farbraum beschreibt (Abb. 2). Diese Ellipsoide wurden mit Hilfe geeigneter Werkzeuge interaktiv bestimmt [3]. Da sich die Farbbereiche und damit die Ellipsoide benachbarter Objekte häufig überschneiden oder sogar identisch sind (z.B. bei aneinander grenzenden Muskeln), wurde oft eine zusätzliche interaktive Segmentation, basierend auf Methoden der Mathematischen Morphologie oder durch das Editieren einzelner Volumenelemente, erforderlich. Die Segmentationsergebnisse werden als Objektmarken an die einzelnen Voxel angefügt.

2.2 Graphische Modellierung

Viele kleine, aber wichtige Strukturen wie Nerven und Arterien waren auf den Schichten häufig kaum sichtbar oder post-mortal kollabiert. In diesen Fällen konnte eine Segmentation nicht durchgeführt werden. Mit Hilfe eines speziell entwickelten Editors wurden deshalb kleine kleine kugelförmige Marker dort, wo ein Objekt auf einer Schicht sichtbar war, plaziert. Dies Marker wurden anschließend durch parabolische Kurven verbunden, so daß sich geschlossene Gefäß- bzw. Nervenverläufe ergeben.

2.3 Wissensmodellierung

Die nicht-piktoriellen Eigenschaften der Objekte wie anatomische Bezeichnungen in verschiedenen Sprachen und Beziehungen zwischen den Objekten wurden in einem semantischen Netzwerk modelliert [4]. Dabei wurden verschiedene Teilnetze für verschiedene anatomische Sichtweisen wie z.B. systematische oder topographische Anatomie erstellt. Innerhalb der Sichten sind die einzelnen Objekte mit Beziehungen wie *TeilVon* oder *AbzweigendVon* verbunden. Die Verknüpfung mit dem räumlichen Modell erfolgt mit den bereits erwähnten Objektmarken.

2.4 Visualisierung

Für die Visualisierung der *segmentierten* Objekte wurde ein Algorithmus zur Darstellung von Oberflächen aus attributierten Volumendaten entwickelt. Im Gegensatz zum sogenannten *Volume Rendering* lassen sich damit sehr scharfe Darstellungen erzielen. Die Oberflächen werden jeweils mit den an der Position vorliegenden Farbwerten texturiert. Ein weiterer Qualitätsgewinn ergibt sich daraus, daß die Bilder mit einer sehr viel höheren räumlichen Auflösung als der der Originaldaten gerechnet werden. Während sich eine Subvoxel-Auflösung relativ einfach durch eine Erhöhung der Abtastrate erzielen läßt, stellt die dabei notwendige Bestimmung der genauen Position der Oberfläche ein wesentliches Problem dar, das erst kürzlich gelöst werden konnte [5]. Für die Visualisierung der *modellierten* Objekte kommen Standardmethoden der Computergraphik zum Einsatz.

Das Visualisierungsprogramm, eine erweiterte Version des Systems VOXEL-MAN [1], wurde auf handelsüblichen Linux-Workstations implementiert. Wegen der großen Datenmengen und der verwendeten aufwendigen Darstellungsverfahren nimmt die Berechnung eines Bildes häufig mehrere Minuten in Anspruch.

3 Ergebnisse

Mit den beschriebenen Methoden wurde ein Modell der inneren Organe des Menschen, bestehend aus mehr als 650 dreidimensionalen Objekten, erstellt. Das semantische Netzwerk des Modells enthält über 2000 Relationen. Abb. 3 vermittelt eine Vorstellung von der erreichten Bildqualität und Detaillierung.

Das Modell ermöglicht eine einfache Interaktion mittels Maus-Klick. Da das Modell volumenbasiert ist, lassen sich auf Schnittebenen, die in beliebiger Anzahl und Richtung gesetzt werden können, die jeweils dort vorliegenden Strukturen darstellen. Die virtuelle Präparation bietet darüber hinaus die Möglichkeit, freigelegte Strukturen hinsichtlich ihres Namens oder ihrer Beziehungen zu anderen Objekten zu untersuchen. Dies kann z.B. durch Popup-Menüs oder die automatische Erzeugung von Beschriftungen erfolgen (Abb. 4). Diese Informationen sind verfügbar, weil jedes Voxel und damit jeder sichtbare Punkt in einem beliebigen, vom Anwender erzeugten 3D-Bild, über eine Objektmarke einen Verweis auf die Wissensbasis enthält. Umgekehrt ist es auch möglich, Objekte über ihre Namen anzusprechen.

Eine besondere Eigenschaft des Modells besteht darin, daß die radiologische Manifestation der Organe im Kontext der 3D-Anatomie untersucht werden kann. Dies gilt sowohl für die Darstellung von CT-Schnittbildern aus auch für Röntgenbilder aus beliebigen Blickwinkeln (Abb.4). Zur Simulation der Röntgenbilder wurden die Absorptionskoeffizienten aus den CT-Bildern herangezogen.

4 Schlußfolgerungen

In diesem Beitrag wurde eine Methode für die Erzeugung computergestützter Modelle der menschlichen Anatomie vorgestellt, die eine bisher unerreichte photorealistische Darstellung und Detaillierung ermöglicht. Außer in der anatomischen und radiologischen Ausbildung eignen sich solche Modelle z.B. als Referenz, für die Vorbereitung von Eingriffen oder zur Information von Patienten. Für eine breitere Anwendung wurde das Programm "VOXEL-MAN 3D-Navigator" entwickelt, das auf üblichen PCs lauffähig ist und somit z.B. von Studenten genutzt werden kann [6].

In der Zukunft sind zahlreiche Erweiterungen des Modells denkbar, z.B. im Hinblick auf die Modellierung der morphologischen Variabilität, die Simulation des Blutflusses und anderer Funktionen, oder die Modellierung von Weichteildeformationen für die realistische Simulation von Eingriffen. Dieser Ansatz stellt damit einen ersten Schritt dar auf dem Weg zu Modellen, die nicht nur realistisch aussehen, sondern sich auch realistisch verhalten können.

Danksagung

Für ihre Beiträge zur Segmentation und Modellierung danken wir Jochen Dormeier, Jan Freudenberg, Sebastian Gehrmann und Stefan Noster. Die Wissensmodellierung wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Nummer Ho 899/4-1 gefördert.

Literatur

1. K. H. Höhne, B. Pflesser, A. Pommert, M. Riemer, T. Schiemann, R. Schubert, and U. Tiede, "A new representation of knowledge concerning human anatomy and function," *Nature Med.*, vol. 1, no. 6, pp. 506–511, 1995.
2. V. M. Spitzer, M. J. Ackerman, A. L. Scherzinger, and D. G. Whitlock, "The Visible Human male: A technical report," *J. Am. Med. Inform. Assoc.*, vol. 3, no. 2, pp. 118–130, 1996.
3. T. Schiemann, U. Tiede, and K. H. Höhne, "Segmentation of the Visible Human for high quality volume based visualization," *Med. Image Anal.*, vol. 1, no. 4, pp. 263–271, 1997.
4. A. Pommert, R. Schubert, M. Riemer, T. Schiemann, U. Tiede, and K. H. Höhne, "Symbolic modeling of human anatomy for visualization and simulation," in *Visualization in Biomedical Computing 1994, Proc. SPIE 2359* (R. A. Robb, ed.), (Rochester, MN), pp. 412–423, 1994.
5. U. Tiede, T. Schiemann, and K. H. Höhne, "High quality rendering of attributed volume data," in *Proc. IEEE Visualization '98* (D. Ebert et al., eds.), (Los Alamitos, CA), pp. 255–262, IEEE Computer Society Press, 1998.
6. K. H. Höhne, B. Pflesser, A. Pommert, K. Priesmeyer, M. Riemer, T. Schiemann, R. Schubert, U. Tiede, H. Frederking, S. Gehrmann, S. Noster, and U. Schumacher, *VOXEL-MAN 3D Navigator: Inner Organs. Regional, Systemic and Radiological Anatomy.* Heidelberg: Springer-Verlag Electronic Media, 2000. (3 CD-ROMs, ISBN 3-540-14759-4).

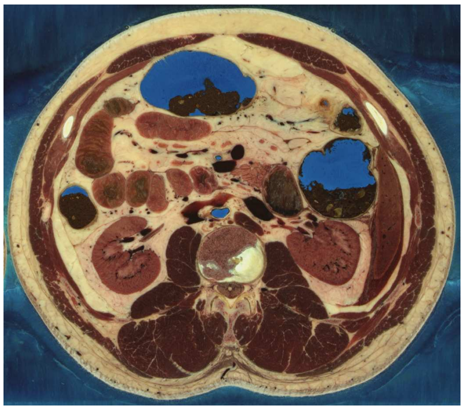

Abb. 1. Photographisches Schnittbild des Visible Human im Bereich des Bauches.

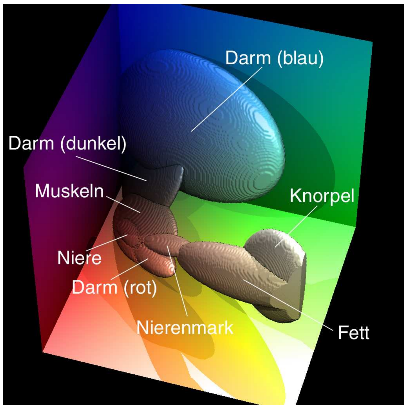

Abb. 2. Ellipsoide im RGB-Farbraum zur Klassifikation einiger der in Abb. 1 erkennbaren Strukturen.

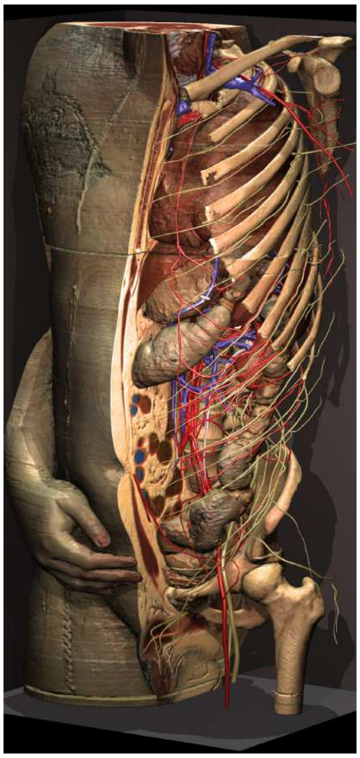

Abb. 3. Das dreidimensionale Modell bietet eine bisher unerreichte Detaillierung und zahlreiche Interaktionsmöglichkeiten wie die Definition von Schnittebenen oder die Abfrage von Objektnamen.

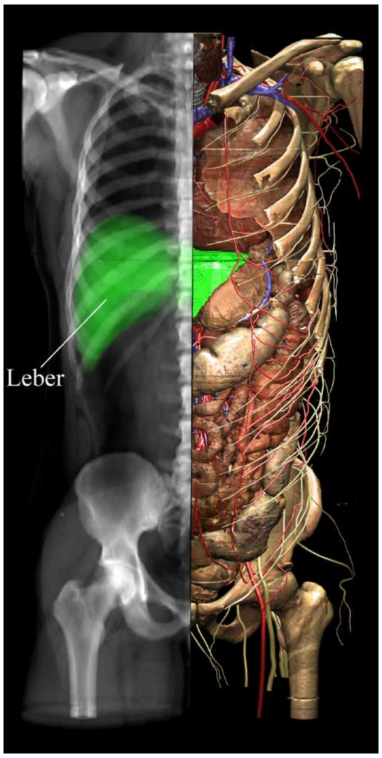

Abb. 4. Neben räumlichen Ansichten sind auch andere Darstellungsarten wie simulierte Röntgenbilder möglich. Diese können genau wie das dreidimensionale Modell auf ihre Bestandteile hin untersucht werden.