

Effiziente Verarbeitung von Gefäßgraphen auf Basis von Open-Source Frameworks

Max Schöbinger, Ivo Wolf, Matthias Thorn, Peter Hassenpflug,
Marcus Vetter und Hans-Peter Meinzer

Abteilung für Medizinische und Biologische Informatik,
Deutsches Krebsforschungszentrum, 69120 Heidelberg
Email: m.schoebinger@dkfz-heidelberg.de

Zusammenfassung. Der vorliegende Beitrag stellt die Erweiterung eines Frameworks zur medizinischen Bildverarbeitung um Methoden zur effizienten Laufzeitrepräsentation und Verarbeitung von Gefäßgraphen vor. Neben einem Konzept zur Klassifikation solcher symbolischer Beschreibungen wird die technische Realisierung mittels der Bibliotheken ITK, VTK und BGL präsentiert. Darüber hinaus wird ein standardisiertes Dateiformat auf Basis von XML vorgeschlagen. Die komplette Bildverarbeitungskette von der Segmentierung über die Analyse der Gefäße bis hin zur Visualisierung kann in einer Pipeline abgebildet werden.

1 Einleitung

Für viele Probleme der computergestützten Operationsplanung ist ein detailliertes Wissen über die patientenindividuelle Gefäßanatomie essentiell. In den letzten Jahren wurden deshalb eine Vielzahl von Segmentierungsverfahren für gefäßartige Strukturen vorgeschlagen. Darauf aufbauend haben sich Verfahren etabliert, die eine topologische und morphologische Analyse von Gefäßbäumen erlauben, indem sie diese in eine symbolische Beschreibung überführen. Diese approximiert die reale Gefäßanatomie, indem eine hierarchische bzw. graphenähnliche Datenstruktur aufgebaut wird, in welcher die Lage der Verzweigungen, die einzelnen Gefäßabschnitte und deren Durchmesser repräsentiert sind. Je nach Bildmodalität, Bildqualität und untersuchter anatomischer Struktur kommen jedoch jeweils unterschiedliche Verfahren zur Segmentierung, Analyse und Visualisierung zum Einsatz. Oft muss ein Kompromiss zwischen medizinischen Anforderungen und algorithmischen Randbedingungen gefunden werden. Hieraus ergeben sich oft spezialisierte Software-Lösungen, die nur schwer auf verwandte Anwendungsgebiete übertragbar sind.

Die beschriebenen Probleme lassen sich zum Teil umgehen, indem auf Software-Ebene Datenstrukturen und Schnittstellen standardisiert werden. Darüber hinaus bedarf es aber auch einer Systematik, die vorgibt, auf welcher Abstraktionsebene überhaupt mit symbolischen Beschreibungen gearbeitet werden kann. Ziel dieser Arbeit ist es daher, einen standardisierten „Baukasten“ für Software zur Verarbeitung von Gefäßbäumen für unterschiedlichste Anwendungen bereitzustellen.

2 Stand der Technik

Es existieren mittlerweile eine Vielzahl von kommerziellen und frei verfügbaren Bibliotheken oder Frameworks zur Unterstützung der medizinischen Bildverarbeitung. In den letzten zwei Jahren hat sich allerdings das *Insight Segmentation and Registration Toolkit* (ITK) [1] der National Library of Medicine zu einem de-facto Standard für die Bildverarbeitung entwickelt. Umfangreiche Visualisierungsfunktionalitäten stellt das ebenfalls frei verfügbare *Visualization Toolkit* (VTK) [2] bereit. Zur Kombination der beiden Systeme und Ergänzung um Module zur Datenhaltung und Interaktion mit medizinischen Bilddaten wurde am Deutschen Krebsforschungszentrum das *Medical Imaging Interaction Toolkit* (MITK) [3] entwickelt. Diese Bibliotheken sind allerdings momentan auf die Verarbeitung von Volumendaten und Oberflächenmeshes beschränkt. Bibliotheken oder Frameworks zur effizienten und gleichzeitig flexiblen Laufzeitrepräsentation und einfachen Verarbeitung von Gefäßgraphen sind in der aktuellen Literatur nicht beschrieben.

3 Material und Methoden

Die hier vorgestellte Arbeit entstand aus der Notwendigkeit, unterschiedliche Basistechnologien zur Erzeugung und Verarbeitung von symbolischen Beschreibungen in eine übergeordnete, einheitliche Softwarestruktur zu betten. Diese „Infrastruktur“ wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.1 Konzept

Für die Entwicklung von automatischen Algorithmen, aber auch interaktiven Systemen zur Analyse von Gefäßstrukturen sind oft unterschiedliche Sichten auf das zu Grunde liegende „Netz“ aus Gefäßverzweigungen und -ästen notwendig. Diese unterscheiden sich im Grad an Vorwissen bzw. Annahmen, die zu ihrer Berechnung eingehen. So eignen sich zur interaktiven Analyse von Kommunikationspfaden oder Flussverhältnissen in komplexen Gefäßsystemen ungerichtete bzw. gerichtete Graphen, welche auch „Kurzschlüsse“, die zum Beispiel durch Kollateralgefäße entstehen können, abbilden. Zur Trennung der portalvenösen und hepatischen Gefäße der Leber haben sich jedoch Baumstrukturen (im informatischen Sinne) als vorteilhaft erwiesen [4].

Die hier vorgestellte Bibliothek bietet vier Abstraktionsebenen, auf denen die symbolischen Beschreibungen angesprochen werden können. Diese sind entsprechend der klassischen Graphentheorie geordnet: die allgemeinste Form sind *ungerichtete Graphen*. Sie beschreiben lediglich die Topologie und Morphologie der segmentierten Gefäße. Bringt man Annahmen über die Richtung des Blutflusses in das Modell mit ein, so können diese als *gerichtete Graphen* interpretiert werden. Können in einem gegebenen medizinischen Kontext (beispielsweise arteriovenöse) Anastomosen ignoriert bzw. ausgeschlossen werden, so können Zyklen im Gefäßsystem aufgelöst und *gerichtete azyklische Graphen* erzeugt werden. Diese

lassen sich wiederum in einen oder mehrere *hierarchische Bäume* zerlegen. Mit jedem Abstraktionsgrad steigt also das eingebrachte Modellwissen, gleichzeitig nimmt aber die Generalität und algorithmische Flexibilität ab (siehe Abb. 2(a)). Diese Eigenschaft ist jedoch nicht als Nachteil zu werten. Vielmehr dient diese Systematik zur Strukturierung der verwendeten Gefäßmodelle und der darauf arbeitenden Algorithmen.

3.2 Laufzeitrepräsentation

Für die meisten Algorithmen zur Erzeugung von symbolischen Gefäßbeschreibungen können gemeinsame Eigenschaften definiert werden: Sie detektieren Gefäßverzweigungen und generieren eine geordnete Liste von Punkten, die, verbunden durch Linien oder Splines, den realen Verlauf der Gefäßäste approximieren. Ein Teil der Verfahren liefert zusätzlich zu dem Gefäßverlauf auch Informationen über die Gefäßradien, was beispielsweise eine Oberflächenrekonstruktion ermöglicht. Zur Repräsentation der Topologie der Gefäße wird die frei verfügbare *Boost-Graph-Library* (BGL)[5] verwendet. Als Kompromiss zwischen schneller Traversierung, Modifikation und Speicherplatzverbrauch wurden zur Laufzeitrepräsentation Adjazenzlisten gewählt. Optional können jedoch auch dünn besetzte Matrizen verwendet werden. Die Verzweigungen werden als Knoten und die Äste als Kanten im Graphen abgebildet. Morphologische Eigenschaften wie z.B. Position und Durchmesser werden diesen assoziiert. Um auch applikationsspezifischen Anforderungen gerecht zu werden, können zusätzlich beliebige Datentypen bzw. -werte zur Laufzeit den Knoten und Kanten zugeordnet werden. Hierbei wurde das generische Konzept der *Valued Conversions* [6] angewandt. Um den Datenaustausch mit existierenden und zukünftigen Systemen zu erleichtern und die persistente Speicherung in einer standardisierten, lesbaren Form zu ermöglichen, wurde XML [7] als Dateiformat gewählt und eine entsprechende Document Type Definition (DTD) formuliert.

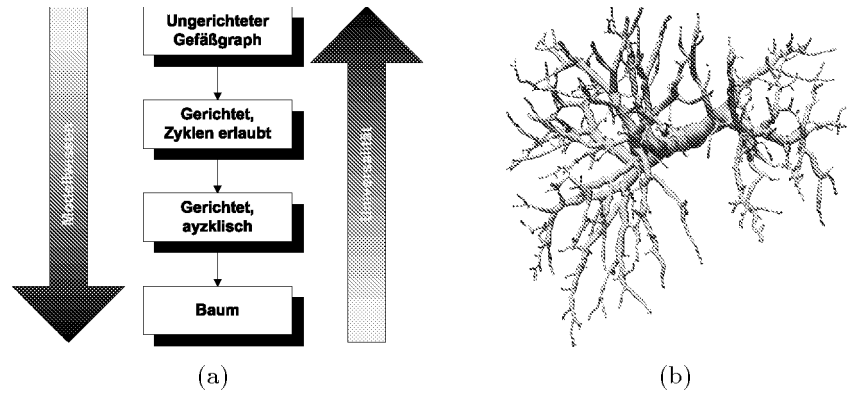
3.3 Pipelinestruktur

Das am Deutschen Krebsforschungszentrum entwickelte MITK verbindet die Pipelinestrukturen von ITK und VTK. Somit kann eine komplette Bildverarbeitungskette ausgehend von den Volumendaten über Segmentierungsalgorithmen bis zur Visualisierung in einer Pipeline abgebildet werden. Diese auf ITK basierende Pipelinestruktur wurde auch für die Verarbeitung von Gefäßgraphen gewählt. Folgende Konzepte stehen somit zur Verfügung:

Datenobjekte. Datenobjekte repräsentieren die eigentlichen Gefäßgraphen. Sie sind Ein- und Ausgabe für Prozessobjekte, die Daten verarbeiten.

Quellen. Gefäßgraph-Quellen erzeugen Gefäßgraphen. Sie lesen beispielsweise gespeicherte Dateien ein, oder erzeugen symbolische Beschreibungen aus vorhandenen Bilddaten. Hierzu stehen im Moment drei unterschiedliche Verfahren zur Auswahl [8,9,10], es können jedoch beliebige hinzugefügt werden.

Abb. 1. (a) Abstraktionsebenen, auf denen mit Gefäßgraphen gearbeitet werden kann. (b) Durch Extrusion generierte Oberflächenrekonstruktion eines Gefäßgraphen.



Prozessobjekte. Prozessobjekte verarbeiten einen oder mehrere Gefäßgraphen um daraus einen oder mehrere neue zu erzeugen. Dies können u.a. Filter zur Bereinigung der Gefäßmodelle von Artefakten oder zur Bildung von Subgraphen sein oder aber auch Adapter, mit deren Hilfe man beispielsweise hierarchische Bäume wie ungerichtete Gefäßgraphen ansprechen kann.

Senken bzw. Mapper. Diese terminieren zunächst die Gefäßgraphenpipeline, haben also kein Graph-Datenobjekt zur Ausgabe. In diese Klasse fallen z.B. Objekte, die einen Gefäßbaum in eine Datei speichern oder aus diesen ein Bildvolumen erzeugen (beispielsweise bei der Berechnung von Versorgungsgebieten). Hier ist auch die Schnittstelle zur Visualisierung mittels VTK anzusiedeln. So können die Gefäßgraphen beispielsweise durch die Verkettung von Kugeln und Kegelstümpfen, oder aber auch durch Extrusion eines Kreises entlang des Gefäßverlaufes [11] (siehe Abb. 2(b)) in Oberflächenmodelle, mit denen interagiert werden kann, umgewandelt werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Mit der Erweiterung des ITK bzw. MITK um ein Framework zur Verarbeitung von Gefäßgraphen auf Basis der BGL wird der Grundstein für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen gelegt. Durch die konsequente Integration existierender Bibliotheken und Standards können umfangreiche Synergieeffekte genutzt werden. Der Anwender bzw. Anwendungsentwickler hat automatisch von einfachen Bereichswachstumsverfahren bis hin zu komplexen Level Set Methoden alle von ITK bereitgestellten Segmentierungsverfahren auch zur Gefäßsegmentierung zur Verfügung. Bereits bestehende Algorithmen zur Erzeugung von Graphen aus Volumendaten wie CT oder MR Angiographien wurden integriert. Die

Analyse der Gefäßstrukturen wird durch die umfangreiche Algorithmensammlung der BGL wesentlich erleichtert. Neben Traversierungsmethoden wie Tiefen- oder Breitensuche stehen u.a. unterschiedliche Lösungen für das Kürzester-Weg-Problem, die Berechnung des maximalen Flusses in Netzwerken oder exakte Graph-Isomorphismen bereit.

Zu einem großen Teil auf Open-Source-Bibliotheken aufzubauen birgt jedoch nicht nur Vorteile in sich. Gerade „junge“ Bibliotheken wie das ITK oder die BGL befinden sich in einem steten Wandel, was dazu führt, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich an zentraler Stelle Schnittstellen oder Design-Änderungen ergeben. Es ist allerdings zu erwarten, dass der Benefit, der durch ihre Verwendung aufgebaut wird, größer ist, als der nachträgliche Entwicklungsaufwand, der durch solche extern motivierten Änderungen entsteht.

Literaturverzeichnis

1. Ibanez L, Schroeder W, Ng L, Cates J: The ITK Software Guide. Kitware, Inc., 2003. URL: <http://www.itk.org>.
2. Schroeder W, Martin K, Lorensen B: The Visualization Toolkit: An Object-Oriented Approach to 3D Graphics, 3rd Edition. Kitware, Inc., 2003. URL: <http://www.vtk.org>.
3. Wolf I, Vetter M, Wegner I, Nolden M, Böttger T, Hastenteufel M, Kunert T, Meinzer HP: The Medical Imaging Interaction Toolkit (MITK) – a toolkit facilitating the creation of interactive software by extending VTK and ITK. In: Procs. SPIE Medical Imaging 2004: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display. In press, 2004
4. Thorn M, Vetter M, Cárdenas S. CE, Hassenpflug P, Fischer L, Grenacher L, Richter GM, Lamadé W, Meinzer HP: Interaktives Trennen von Gefäßbäumen am Beispiel der Leber. In: Procs BVM 2001:147–151, 2001.
5. Siek JG, Lee LQ, Lumsdaine A: The Boost graph library: user guide and reference manual. Addison-Wesley, 2001. URL: <http://www.boost.org/libs/graph>.
6. Henney K: Valued Conversions. C++ Report 12(7), July/August 2000.
7. Extensible Markup Language (XML). URL: <http://www.w3.org/XML>.
8. Schöbinger M, Thorn M, Vetter M, Cárdenas S. CE, Hassenpflug P, Wolf I, Meinzer HP: Robuste Analyse von Gefäßstrukturen auf Basis einer 3D-Skelettierung. In: Procs BVM 2003:76–80, 2003.
9. Hassenpflug P, Schöbinger M, Vetter M, Ludwig R, Wolf I, Thorn M, Grenacher L, Richter GM, Uhl U, Büchler MW, Meinzer HP: Generation of attributed relational vessel graphs from three-dimensional freehand ultrasound for intraoperative registration in image-guided liver surgery. In: Robert, L. at al. (eds.): Procs SPIE Medical Imaging 2003: Visualization, Image-Guided Procedures, and Display, Vol. 5029:222–230, 2003.
10. Zahlten C, Jürgens H, Evertsz CJG, Leppek R, Peitgen HO, Klose KJ: Portal Vein Reconstruction Based on Topology. Eur J Radiol 19(2):96–100, 1995.
11. Hahn H, Preim B, Selle D, Peitgen HO: Visualization and Interaction Techniques for the Exploration of Vascular Structures. In: Procs. of the 12th IEEE Visualization Conference:395–402, 2001.