

Auffaltung von Gefäßbäumen mit Hilfe von deformierbaren Oberflächen

Anja Schnaars^{1,2}, Christian Tietjen², Grzegorz Soza², Bernhard Preim¹

¹Institut für Simulation und Graphik, Universität Magdeburg

²Siemens Healthcare Computed Tomography

`peter.faltin@lfb.rwth-aachen.de`

Kurzfassung. Follow-up assessment of pleural thickenings requires the comparison of information from different points in time. The investigated image regions must be precisely registered to acquire this information. Since the thickenings' growth is the target value, this growth should not be compensated by the registration process. We therefore present a non-rigid registration method, which preserves the shape of the thickenings. The deformation of the volume image is carried out using B-splines. With focus on the image regions located around the lung surface, an efficient way of calculating corresponding points combined with the reuse of information from different scale levels leads to the non-rigid registration, which can be performed within a short computation time.

1 Einleitung

Insbesondere in der Leber erlauben Kenntnisse über deren Gefäßbaumtopologien eine detaillierte Analyse, Planung sowie Durchführung von chirurgischen Eingriffen. Um die Versorgung von verbleibendem Gewebe nach einer Teilresektion der Leber weiterhin zu gewährleisten, sollte ebenfalls der Verlauf wichtiger Gefäße bekannt sein. Folglich ist eine Darstellung essentiell, die sowohl die Ausdehnung der Gefäße im Bereich der Resektion als auch übersichtlich die Verbindungs- sowie Verzweigungsstruktur wiedergibt. Die Verfolgung eines Pfades entlang des Lebergefäßsystems ist hingegen insbesondere im Bereich der Tumorbehandlung von großem Interesse. Bei einer Embolisation eines partiellen Gefäßbaumes muss das Embolisat über einen Katheter zielgerichtet verabreicht werden, um nur die Zielregion zu erreichen. Um eine möglichst einfache Navigation der Sonde zu ermöglichen, sollte der entsprechende Pfad in der Darstellung nicht durch andere Strukturen verdeckt werden.

Dabei stellt eine geeignete Visualisierung der Gefäßbäume eine essentielle Grundlage für eine qualitative Beurteilung dar. Sowohl existierende zweidimensionale als auch dreidimensionale Darstellungsverfahren geben jedoch nur einen bestimmten Ausschnitt des gesamten Informationsgehalt der Daten zurück. Entweder entstehen Einbußen in der Übersichtlichkeit oder es können nur Teilausschnitte des Gefäßbaumes dem Betrachter präsentiert werden [1, 2]. Die Auffaltung eines Gefäßbaumes ermöglicht die Repräsentation seiner Topologie ohne

Überlagerungen von Strukturen in einer einzigen Darstellung und ist vielseitig einsetzbar. Zusätzlich kann diese Darstellung ideal zur Validierung und Editierung eines segmentierten Gefäßbaumes verwendet werden.

Voraussetzung für das in diesem Beitrag beschriebenen Verfahren ist, dass die Gefäße als segmentierte Baumstrukturen vorliegen, aus denen die Topologie als Centerline-Datenstruktur ermittelt werden kann.

2 Material und Methoden

Im Wesentlichen existieren zwei Verfahren, die versuchen einen Gefäßbaum aufgefaltet darzustellen [2, 3]. Bei der Multi-Path CPR werden Schnitte entlang der einzelnen Gefäß-Centerline erstellt, die in eine Ebene projiziert werden [2]. Anschließend erfolgt die Anordnung benachbarter Gefäßdarstellungen mit Hilfe von rekursiv umschreibenden Unterbäumen. In dem Ansatz von Kiraly et al. wird entlang jeder Gefäß-Centerline auf Grundlage der Gefäßoberfläche eine Intensity Projection erzeugt, die danach in einem Baumdiagramm angeordnet wird [3]. Beide Verfahren erzeugen eine sehr schematische Darstellung des Gefäßbaumes. Des Weiteren ist Multi-Path CPR eher für weniger komplexe Gefäßbäume geeignet. Anwendungsbeispiele hierfür wären Herzkranzgefäße oder periphere Gefäße. Ein weiteres relevantes Verfahren erzeugt mit Hilfe von Coons-Flächen einen Schnitt durch ein Gefäß [4]. Diese Fläche wird anschließend in einem Punkt bzw. in einer Curve-Of-Interest geebnet. Jedoch ist dieses Verfahren nur für ein Gefäß und nicht für einen Gefäßbaum konzipiert.

Die in diesem Beitrag verwendeten Ausgangsdaten beinhalten sowohl den originalen Volumendatensatz als auch einen segmentierten Gefäßbaum, der manuell bzw. automatisch gewonnen werden kann. Dieser Gefäßbaum liegt in einer Graphenstruktur vor, in der sowohl Informationen zum Gefäßverlauf als auch deren approximierten Gefäßkonturen der einzelnen Gefäßbaumäste vorliegen. Der Verlauf wird mittels der Gefäß-Centerlines, welche im Grunde eine in gleichmäßigen Abständen abgetastete, geordnete Punktfolge darstellen, beschrieben. Durch eine Kreisradiusvariable wird jedem Centerline-Punkt die Informationen zur lokalen Gefäßkontur zugeordnet.

3 Ergebnisse

Für die Auffaltung des Gefäßbaumes erzeugt das Verfahren eine Schnittfläche basierend auf der Topologie des Gefäßbaumes. Diese Schnittfläche wird anschließend so aufgefaltet, dass sie sich in einer planaren Ebene befindet. Eine Besonderheit des Verfahrens ist, dass es nicht nur auf ein Gefäß anwendbar ist, sondern auf Gefäßbäume mit beliebiger Verzweigungsanzahl. Somit ermöglicht das Verfahren einen Überblick über die komplette Topologie eines Gefäßbaumes. Aufgrund der Verwendung einer Schnittfläche werden nur geschnittene Strukturen dargestellt, so dass folglich keine Überlagerungen der Gefäßbaumstrukturen auftreten können.

Würde die resultierende Schnittfläche ohne weitere Verarbeitung aufgefaltet werden, so könnten insbesondere im Bereich der Centerline (je nach Differenz der Neigungswinkel zweier aufeinander treffenden Flächen) starke Verzerrungen auftreten. Im Wesentlichen zeichnen sich Verzerrungen bei der Auffaltung einer Fläche an starken Flächenkrümmungen ab. Um die Verzerrungen innerhalb des geschnittenen Gefäßes so gering wie möglich zu halten, sollte idealerweise die Krümmung an der Gefäß-Centerline gleich Null sein. Zu diesem Zweck erfolgt die Generierung eines Gefäßbandes auf Basis der bereits erzeugten Schnittfläche, welches als Skelett für die finalen Schnittfläche dient (Abb. 2(a)). Zwischen dem Gefäßband-Skelett werden abschließend Coons-Flächen aufgespannt.

In den nun folgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte zur Auffaltung eines Gefäßbaumes erläutert.

3.1 Spannen und Erzeugen einer Schnittfläche

Damit die gesamte Topologie von der Schnittfläche erfasst werden kann, wird diese aus mehreren Einzelflächen zusammengesetzt. Dafür werden Coons-Flächen verwendet, die sich auf Grundlage von vordefinierten Randkurven erzeugen lassen. Unter Einbindung der Centerline-Information in die Randkurve kann somit die Form der Fläche an den Verlauf des Gefäßes angepasst werden.

Mittels Pre-Order Traversierung werden auf dem Gefäßbaum Buchten erzeugt, in denen sich einzelnen die Coons-Flächen anordnen lassen (Abb. 1(a)). Die Fläche einer Bucht wird wiederum aus mehreren Einzelflächen zusammengesetzt. Dafür wird ein Schwerpunkt aus allen der Bucht umgebenden Centerline-Punkten berechnet, um den die einzelnen Flächen sternförmig angeordnet werden. Jede Fläche ist somit durch eine Centerline als Randkurve sowie den Schwerpunkt definiert (Abb. 1(b)). Je spitzer der Neigungswinkel der aufeinander treffenden Flächen an der Centerline ist, desto stärker ist bei der nachfolgenden Auffaltung die Verzerrung in dieser Umgebung. Dementsprechend wird auf Grund-

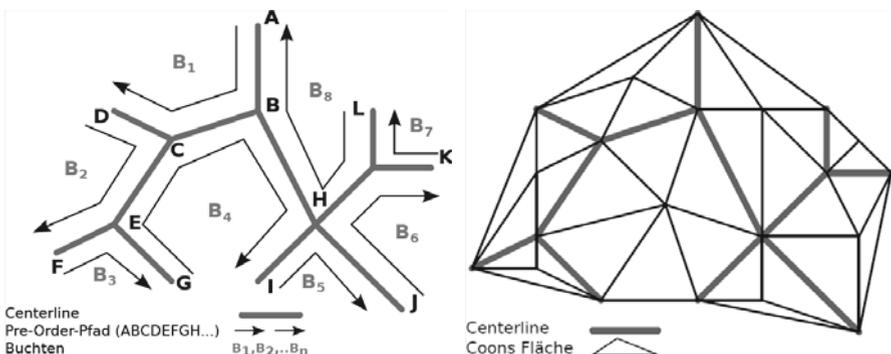


Abb. 1. Baumstruktur mit Eckpunkten A – L und angeschlossenen Buchten B₁ – B₈ (links) und sternförmige Anordnung von Coons-Flächen (rechts)

lage der bereits erzeugten Schnittfläche ein Gefäßband generiert, welches das Gefäß mit einer Geraden im Querschnitt schneidet.

3.2 Erzeugung eines Gefäßband-Skeletts

An jedem Punkt der Centerline wird eine Ebene erzeugt, die senkrecht zur lokalen Centerline-Richtung (lokaler Tangentenvektor) steht. Durch das Schneiden der Ebenen mit der bereits erzeugten Schnittfläche lassen sich die aktuellen Austrittspunkte aus dem Konturbereich im Querschnitt entlang der jeweiligen Centerline ermitteln. Anschließend werden diese Austrittspunkte jeweils mit gleichen Winkeln in den entsprechenden Ebenen um den Centerline-Punkt gedreht, so dass sie mit dem Centerline-Punkt einen 180° Winkel einschließen (Abb. 2(a)).

Damit ein kontinuierlicher Übergang im Verzweigungsbereich entsteht, sollen die neu berechneten Punkte im Endbereich der jeweils aufeinander treffenden Centerlines mittels eines Tiefpassfilters interpoliert werden. Basierend auf dem Gefäßband-Skelett lässt sich die für die Auffaltung notwendige Schnittfläche erzeugen.

Anschließend müssen die Centerlines des Gefäßbaumes verbunden werden. Statt der Gefäß-Centerline wird jedoch das Gefäßband-Skelett verwendet. Die Flächen entlang der Centerline werden mit Coons-Flächen, bestehend aus vier Randkurven, erzeugt. Dabei entspricht das Gefäßband-Skelett den jeweils gegenüberliegenden Randkurven. Im Verzweigungsbereich werden die Flächen ähnlich der in den Buchten erzeugt. Die Eckpunkte des Gefäßband-Skeletts dienen dabei zur Generierung der Randkurven. Anschließend wird das generierte Flächenmodell mit einem Laplacian-Filter geglättet und die Anzahl der Dreiecke für eine effiziente Auffaltung reduziert.

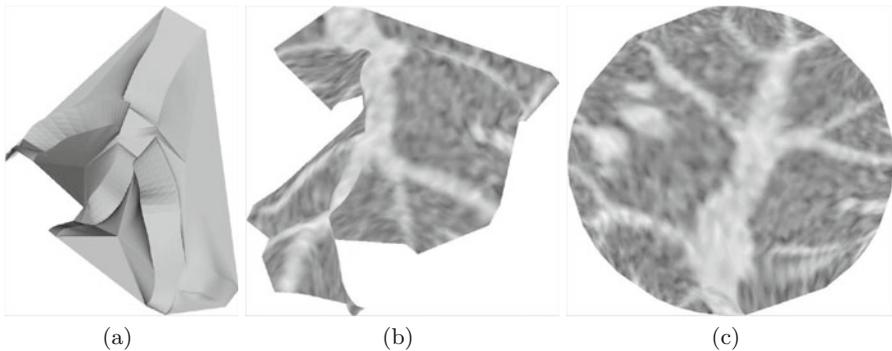


Abb. 2. Auffaltungsfläche eines Gefäßbaumes mit Berücksichtigung eines Gefäßbandes zur minimalen Verzerrung der Gefäße (a). Darstellung des Gefäßbaumes mit Anwendung der original HU-Werte (b). Planare Einbettung des Gefäßbaumes in eine ebene Fläche (c)

3.3 Planare Einbettung der Fläche

Die planare Einbettung der Fläche erfolgt mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens aus dem Bereich der Mesh Parametrisierung. Aus Effizienzgründen wurde dabei ein Verfahren gewählt, welches den Rand der gesamten Fläche in eine bereits konvexe Region überträgt (zum Beispiel in eine Kreisregion). Bei der verwendeten Randbedingung wird dabei das Größenverhältnis einer einzelnen Kante zu allen Kanten in der Abbildung gewahrt (Abb. 2(c)). Für die Gewichte wurde der Mittelwert von [5] angewandt, aber es wäre das Einsetzen anderer Gewichte ebenfalls denkbar. Das daraus resultierende lineare Gleichungssystem wurde mittels Gaußsches Eliminationsverfahren und LU-Zerlegung gelöst.

4 Diskussion

Für die Betrachtung der Gefäßbäume erstellt das Verfahren auf Grundlage der jeweiligen Centerline eine durchgehende Fläche, die alle Gefäße schneidet. Anschließend wird diese Fläche geebnet. Eine Besonderheit des Verfahrens ist, dass Gefäße eines Gefäßbaumes ohne Überschneidungen in einer Darstellung repräsentiert werden. Des Weiteren wird die angrenzende Umgebung des Gefäßbaumes mit dargestellt, wodurch benachbarte geschnittene Gefäßbäume ebenfalls in der Darstellung zu sehen sind.

Durch die Verwendung des Gefäßbandes wird sichergestellt, dass die Querschnitte der Gefäße korrekt wiedergegeben werden. Zur Darstellung pathologischer Gefäße sollte dieses Verfahren jedoch nicht verwendet werden, da hier nicht beliebig um die Centerline-Achse rotiert werden. Dafür müsste der Gefäßbaum an den Verzweigungen aufgebrochen werden. Sehr gut geeignet ist die Darstellung jedoch, wenn eine schnelle Orientierung in der Topologie des Gefäßbaumes erforderlich ist.

Literaturverzeichnis

1. Hahn HK, Preim B, Selle D, et al. Visualization and interaction techniques for the exploration of vascular structures. *IEEE Visualization*. 2001; p. 395–402.
2. Kanitsar A, Wegenkittl R, Fleischmann D, et al. Advanced curved planar reformation: flattening of vascular structures. *IEEE Visualization*. 2003; p. 43–50.
3. Kiraly AP, Naidich DP, Novak CL. 2D display of a 3D tree for pulmonary embolism detection. *Proc CARS*. 2005;1281:1132–36.
4. Saroul L, Figueiredo O, Hersch RD. Distance preserving flattening of surface sections. *IEEE TVCG*. 2006;12:26–35.
5. Floater MS. Parametrization and smooth approximation of surface triangulations. *Comput Aided Geom Des*. 1997;14(3):231–50.