

Visual Computing zur Analyse von zerebralen arteriovenösen Malformationen in 3D- und 4D-MR Bilddaten

Dennis Säring¹, Jens Fiehler², Nils Forkert¹, Milena Piening², Heinz Handels¹

¹Institut für Medizinische Informatik

²Klinik und Poliklinik für Neuroradiologische Diagnostik und Intervention

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, 20246 Hamburg

Email: d.saering@uke.uni-hamburg.de

Zusammenfassung. Im Beitrag werden Verfahren zur Visualisierung und Analyse von zerebralen arteriovenösen Malformationen (AVM) präsentiert. Als Eingabe dienen hochaufgelöste 3D- sowie zeitlich-räumliche 4D-MRT-Daten. Ein Ziel dieser Arbeit ist die Kombination von räumlichen und zeitlichen Informationen. Bei der vorgestellten Methode wird zunächst in den 3D-MRT-Daten das Gefäßsystem segmentiert und daraus ein Oberflächenmodell erzeugt. In einem weiteren Schritt werden in den 4D-MRT-Daten für jedes Voxel der Signalverlauf über die Zeit analysiert und die berechneten Einströmzeitpunkte in einem 3D-Parameterbild gespeichert. Ein affines Registrierungsverfahren ermöglicht die farb-codierte Darstellung der zeitlichen Parameter in den räumlich hochaufgelösten Schichten und den Oberflächenmodellen. Diese kombinierte Visualisierung der komplizierten Struktur und der Hämodynamik unterstützt den Mediziner bei der räumlichen Beurteilung von AVM.

1 Einleitung

Die zerebrale arteriovenöse Malformation (AVM) ist eine Fehlbildung des Gefäßsystems im Gehirn. Durch eine AVM wird das sauerstoffreiche Blut von den arteriellen Gefäßen zum großen Teil direkt ohne Kapillarbett in die venösen Gefäße geleitet und es kann zu einer Sauerstoffunterversorgung des Gehirns kommen. Diese Kurzschlussverbindung erhöht durch den anormal hohen Blutdruck in den Venen das Risiko einer schweren intrazerebralen Blutung. Für die Behandlung von AVM stehen u.a. endovaskuläre Embolisation, neurochirurgische Operation und stereotaktische Radiochirurgie sowie deren Kombination zur Verfügung [1]. Hierbei sind Lokalisation und Quantifizierung der AVM, Detektion von zuführenden (Feeder) und abfließenden Gefäßen (draining veins) sowie Beurteilung des zeitlichen Einströmverlaufes des Blutes von besonderem Interesse. In der Klinik werden dazu neben der zeitlich hochaufgelösten digitalen 2D-Subtraktionsangiographie (DSA) auch neue 3D- und 4D-MRT-Aufnahmetechniken verwendet. Hierbei stellt die DSA als invasive Prozedur mit einer Komplikationsrate von bis zu 0,5% für Therapieverlaufskontrollen ein erhöhtes Risiko dar.

Das Softwaresystem AnToNIa¹ wurde zur kombinierten Visualisierung und Analyse von räumlichen und räumlich-zeitlichen MRT-Datensätzen entwickelt. Mit seiner Hilfe sollen nicht-invasive 3D- und 4D-MRT-Bildsequenzen kombiniert, qualitativ und quantitativ unter Verwendung neuer Visualisierungstechniken für AVM und Feeder analysiert und visuell mit der DSA verglichen werden. Der Grundgedanke ist hierbei, die zeitaufgelöste Information im dreidimensionalen Raum darzustellen und so eine Betrachtung aus beliebigen Betrachtungswinkeln und Schnittebenen zu ermöglichen. Die Informationen über die individuelle Struktur der AVM sollen die Therapieplanung und Verlaufskontrolle unterstützen.

2 Stand der Forschung und wesentlicher Fortschritt

Für die Diagnostik der AVM werden unterschiedliche bildgebende Verfahren eingesetzt. MRT-Daten ermöglichen u.a. die Differenzierung von kleinen AVM und die Erkennung von großen zuführenden und abführenden Gefäßen [2]. Die DSA erlaubt insbesondere eine präzise hämodynamische Diagnose und ist derzeit unerlässlich für die Prognoseeinschätzung und Therapieplanung. MRT-Datensätze mit annähernd ähnlicher zeitlicher Auflösung (0,5ms) sind erst durch die Entwicklung von 3T Hochfeldgeräten mit parallelen Bildgebungstechniken möglich geworden. Mit der Unterstützung durch AnToNIa soll untersucht werden, inwieweit die 4D-MRT-Datensätze eine Alternative zur DSA darstellen.

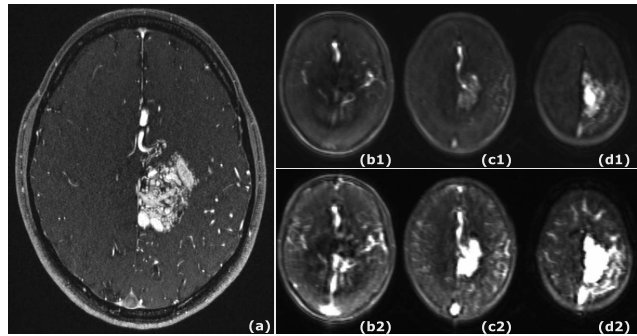
Die Anzahl der Veröffentlichungen, welche sich mit der Segmentierung, computergestützten Analyse und Visualisierung von Gefäßsystemen des Gehirns beschäftigen, ist hoch. Jedoch ist ein Segmentierungs- oder Analysetool speziell für die Problematik einer komplizierten arteriovenösen Malformation den Autoren nicht bekannt. In Bullitt [3] wird die AVM mit Volume-Rendering Technik in Kombination mit den Oberflächenmodellen der Gefäße dargestellt und so eine Visualisierung der komplizierten Struktur ermöglicht. Eine zusätzliche Kombination mit 4D-MRT-Bilddaten wird dort nicht beschrieben.

AnToNIa unterstützt durch semi-automatische Segmentierung und integrierte 3D-Visualisierungstechniken die Beurteilung der komplizierten räumlichen Strukturen der AVM. Durch die Registrierung von 3D- und 4D-MRT-Bilddaten wird das Einblenden zeitlicher Information über die Hämodynamik ermöglicht.

3 Methoden

Mit Hilfe von neuen parallelen Bildgebungstechniken, wie beispielsweise GRAPPA (generalized autocalibrating partially parallel acquisition), können zeitaufgelöste kontrastmittelgestützte 4D-TREAT-Sequenzen (time-resolved echo-shared MR-angiography) erzeugt werden, welche die Grundlage für die zeitliche

¹ Abkürzung für Analysis Tool for Neuro Imaging Data

Abb. 1. TOF MRT (a) und 3 TREAT Schichten (b-d) mit zeitlichem Abstand 6 ms

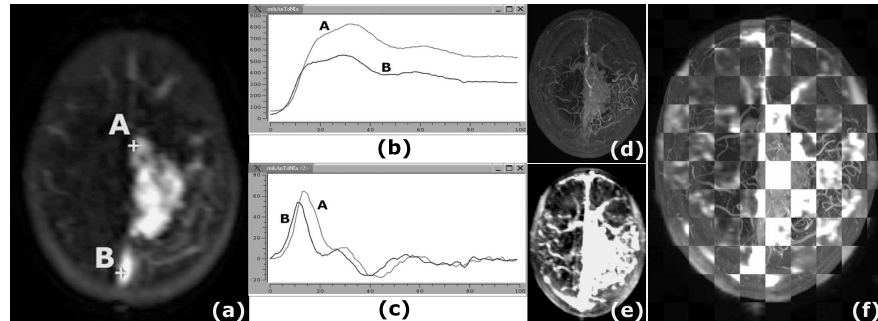
Analyse der Hämodynamik bilden. Die visuelle Bildqualität ist bei den 4D-TREAT-Bilddaten mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 0,5 s und einer Voxelgröße von $1,875 \times 1,875 \times 5,0\text{mm}^3$ eher gering (Abb. 1 b-d). Daher werden zusätzlich nach Kontrastmittelgabe räumlich hochauflösende 3D TOF-MRA (time-of-flight) aufgenommen (Abb. 1a), welche durch einen verbesserten Blut-zu-Hintergrund-Kontrast und einer geringen Voxelgröße von $0,469 \times 0,469 \times 0,5\text{mm}^3$ eine detaillierte Segmentierung des Gefäßsystems und eine Quantifizierung von Größe und Lage [4] der AVM ermöglichen. AnToNIa wurde unter Verwendung der Toolkits ITK & VTK entwickelt. Klassen wurden problemorientiert angepasst und eigene Klassen in C++ implementiert.

3.1 Kombination von TREAT und TOF

Um die zeitliche Information der Dynamik des Blutes aus den TREAT-Bilddaten und die räumliche Auflösung der TOF-Bilddaten zu kombinieren, wird zunächst für jedes Voxel der Intensitätsverlauf über die Zeit analysiert (Abb. 2a-c). Darüber hinaus werden aus den zeitlichen Signalverläufen Parameter zur Charakterisierung der Hämodynamik extrahiert. Hierbei wird der Zeitpunkt, zu dem die Ableitung der Signalkurve maximal ist, als Einströmzeitpunkt definiert. Basierend auf dieser Definition werden voxelweise die Einströmzeitpunkte des Blutes berechnet, wodurch das zeitlich-räumliche Datenvolumen auf einen 3D-Datensatz reduziert wird.

In AnToNIa wird eine 3D-Maximum Intensity Projection (MIP) über alle Zeitpunkte aus den 4D-TREAT-Daten berechnet. Die 3D-MIP ermöglicht eine verbesserte Darstellung von charakteristischen Gefäßverläufen (Abb. 2e), die daraus entstandenen zusätzlichen Bildinformationen sind hilfreich für den Registrierungsprozess. Für das hier verwendete affine 3D-3D Registrierungsverfahren wird zunächst mittels Resampling die Auflösung der 3D-MIP an die der TOF-MRT-Bildsequenz angepasst und anschließend der hochskalierte MIP- mit dem TOF-MRT-Datensatz registriert. Die daraus berechnete Transformation ermöglicht eine direkte Übertragung der Einströmzeitpunkte auf die räumlich hochauflösenden TOF-MRT-Daten. In Abb. 2 ist das Ergebnis der Registrierung

Abb. 2. Zeitlichen Intensitätsverlauf (b) und diskret approximierte Ableitungen für zwei Voxel aus den 4D TREAT (a). Ergebnis der 3D-3D Registrierung im Schachbrett-View (f) der MIP von beiden Datensätzen (d+e)



im Schachbrett-View der MIP aus TOF (Abb. 2d) und TREAT-MIP dargestellt.

3.2 Analyse des Gefäßsystems

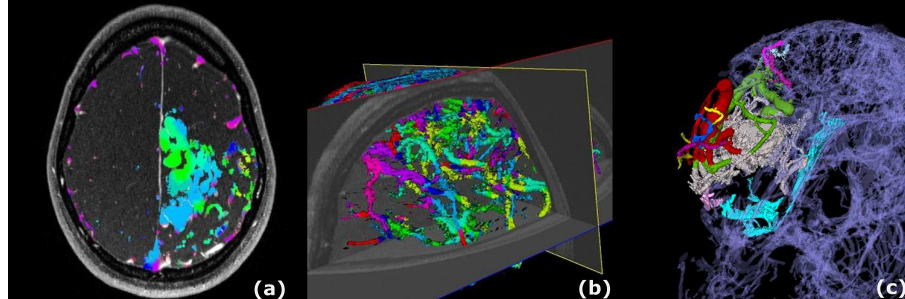
In dem 3D-TOF-Datensatz wird das individuelle Gefäßsystem mittels Region-Growing und manueller Korrektur in orthogonalen Sichten segmentiert. Aus der Segmentierung wird anschließend unter Verwendung des Marching-Cube-Algorithmus [5] ein 3D-Oberflächenmodell des Gefäßbaumes generiert. In AnToNIa kann durch den Arzt im dreidimensionalen Raum mittels interaktiver Positionierung der orthogonalen Begrenzungsebenen ein Quader definiert werden, der als erste Approximation des Kerns der AVM verwendet wird.

Der Verlauf von Gefäßen in einer definierten Region außerhalb und innerhalb des Kernbereiches der AVM wird analysiert und farblich dargestellt. Die Klassifizierung in zufließende Arterien (Feeder) und abfließende Venen (draining veins) wird durch den Mediziner unter Verwendung einblendbaren Parameterinformationen über die Einströmzeitpunkte interaktiv vorgenommen (Abb. 3c).

4 Ergebnisse

Bei der Entwicklung der Analyse und Visualisierungstechniken von AnToNIa standen 12 Datensätze von Patienten mit AVM zur Verfügung. Zur Evaluation erster Ergebnisse wurde in den TOF-MRT-Bilddaten aller Patienten das Gefäßsystem segmentiert und ein Oberflächenmodell erzeugt. Anschließend wurden in 4D-TREAT-Datensätzen Einströmzeitpunkte berechnet und nach 3D-3D Registrierung farbcodiert in den 2D-TOF-Schichtbildern und auf dem 3D-Oberflächenmodell dargestellt (Abb. 3a+b). Die Darstellungen wurden von Experten als hilfreich für die Diagnose und Therapieplanung eingestuft. Die interaktive Navigation im 3D-Raum, Rotation und Zooming, sowie das optionale Ein- und Ausblenden der Zeitinformation von Gefäßstrukturen wurde als Vorteil gegenüber der DSA gesehen.

Abb. 3. Farbcodierte Darstellung der Einströmzeitpunkte auf TOF-MRT (a) und im 3D-Oberflächenmodell (b) sowie die farbliche Darstellung von zu- und abfließenden Gefäßen (c)



5 Diskussion

Es wurden neue Verfahren zur Visualisierung und Analyse von AVM präsentiert. Hierbei wurden aus zeitlich-räumlichen 4D-TREAT-Datensätzen Parameter für die Hämodynamik extrahiert und nach affiner Registrierung mit räumlich hochaufgelösten 3D-TOF-Bilddaten kombiniert visualisiert. Dabei können die extrahierten Parameter optional als starre Farbüberlagerung in den TOF-Schichten und im 3D-Gefäßmodell dargestellt werden. Für die nähere Zukunft ist geplant, das Analysis Tool for Neuro Imaging Data im Bereich der Segmentierung des Gefäßbaumes zu erweitern, um den Zeitaufwand des Segmentierungsprozesses zu reduzieren. Zusätzlich könnten Struktur- und Verlaufsanalysen des Gefäßbaumes, wie sie z.B. bei der Leberoperationsplanung eingesetzt werden, in Kombination mit der Hämodynamik eine automatische Detektion von zu- und abfließenden Gefäßen ermöglichen. Im Bereich der Visualisierung müssen weitere Techniken zur Real-Time-Visualisierung des Blutflusses entwickelt werden, um die starre Darstellung durch eine dynamische zu ersetzen.

Literaturverzeichnis

1. Grzyska U. Treatment of cerebral arteriovenous malformations. *Hamburg Concept Clinical Neuroradiology* 2004;14(1):41–47.
2. S Fasulakis, S Andronikou. Comparison of MR angiography and conventional angiography in the investigation of intracranial arteriovenous malformations and aneurysms in children. *Pediatr Radiol* 2003;33:378–384.
3. Bullitt E, et al. Computer-assisted visualization of arteriovenous malformations on the home personal computer. *Neurosurgery* 2001;48(3).
4. Spetzler RF, Martin NA. A proposed grading system for arteriovenous malformations. *J Neurosurg* 1986;65:467–483.
5. Lorensen WE, Cline HE. Marching cubes. *Computer Graphics* 1987;21(4):163–169.