

Computergestützte Patchplanung für Aortenerweiterungsplastiken

Urte Rietdorf¹, Eugénie Riesenkampff², Ivo Wolf¹, Mathias Seitel¹,
Nicole Engel¹, Titus Kühne², Michael Hübler², Tobias Schwarz¹,
Hans-Peter Meinzer¹

¹Abteilung für Medizinische und Biologische Informatik, DKFZ Heidelberg

²Abteilung Kinderkardiologie und Angeborene Herzfehler, DHZB Berlin

u.rietdorf@dkfz-heidelberg.de

Kurzfassung. Stenosen der Aorta betreffen 5-8% aller Neugeborenen mit Herzfehlern und führen unbehandelt meist zum Tod. Liegt die Indikation für einen chirurgischen Eingriff vor, hängt die Wahl der Operationsmethode maßgeblich von der Anatomie der Aorta sowie dem Erfahrungsschatz des Operationsteams ab. Ein Verfahren hierbei ist die Patcherweiterungsplastik, bei der ein Patch in das Gefäß eingefügt wird, um das Lumen zu erweitern. Bisher erfolgt die Patchplanung intraoperativ auf Grundlage der Erfahrung des Operateurs. Wir haben eine Applikation entwickelt, mit der bereits präoperativ ein individueller Patchvorschlag angefertigt werden kann. Dadurch wird die Operationszeit verkürzt und postoperative Komplikationen wie Re- bzw. Reststenosen und Aneurysmen reduziert. Um die Applikation zu evaluieren wurde die Stenosenquantifizierung unseres Ansatzes mit der eines Kinderkardiologen verglichen und zeigt eine Abweichung im Durchmesser von lediglich $(2,33 \pm 1,43)$ mm.

1 Einleitung

Stenosen der Aorta (Coarctation of Aorta, CoA) betreffen 5-8% aller Neugeborenen mit angeborenen Herzfehlern (AHF). Unbehandelt verursachen sie, je nach Schweregrad, starke Organschäden und führen meist zum Tod innerhalb des ersten Lebensjahres. Ist als Therapie ein chirurgischer Eingriff indiziert, so hängen die Operationstechnik und der Operationserfolg maßgeblich von der Anatomie der Aorta und dem Erfahrungsschatz des Operateurs ab. Eine Operationsmethode stellt hierbei die plastische Erweiterung der Aorta durch einen Patch, die sogenannte Patchaortoplastie, dar. Hierbei wird ein Patch in die Engstelle der Gefäßwand eingefügt, um das Lumen durch Vergrößerung des Gefäßdurchmessers zu erweitern.

Das Patchmaterial, das zum Erweitern des Lumens eingesetzt wird, muss dabei in Form und Größe so gestaltet sein, dass es das Gefäß auf den gewünschten Durchmesser abändert [1]. Bei einer komplizierten, irregulären CoA ist dies oft schwer zu planen. Derzeit wird der dafür notwendige Patch vom Operateur auf

Grundlage seiner Erfahrung in Form und Größe intraoperativ frei angefertigt und eingesetzt, wofür zusätzliche Operationszeit eingeplant werden muss.

Ein weiteres großes Problem der Patchaortoplastie stellen die häufig auftretenden, und ebenfalls von der Erfahrung des Operateurs abhängigen, postoperativen Komplikationen der Re- bzw. Reststenose (20-30 %) und Aneurysmen (24%) dar [2].

Daher wurde eine Applikation entwickelt, mit der, basierend auf MRT-Daten, die Aorta inklusive Stenose quantifiziert, und ein individueller Patchvorschlag erstellt wird. Durch diese präoperative Planungsmöglichkeit wird nicht nur die Operationszeit verkürzt, sondern auch postoperative Komplikationen sollen durch die hohe Präzision minimiert werden.

2 Methoden

Das Softwarewerkzeug, mittels dessen ein möglichst optimaler Patch zur Gefäßweiterung bei Stenosen der Aorta ermittelt werden kann, arbeitet in mehreren Schritten. Zuerst muss die Aorta aus dem Datensatz extrahiert werden, um sie anschließend in zur Quantifizierung geeignete Modelle umwandeln zu können. Die Quantifizierung erfolgt durch Ermittlung der Radien entlang der Aorta, aus deren Differenz zum größten ermittelten Radius der Patchvorschlag erfolgt. Die Applikation, welche die interaktive Korrektur sämtlicher Zwischenschritte ermöglicht, wurde auf Grundlage des Medical Imaging Interaction Toolkits (MITK), einem C++-basierten Framework, erstellt [3].

2.1 Gefäßsegmentierung mittels Graph-Cut

Um die Aorta möglichst schnell und genau aus dem Datensatz zu extrahieren, wurde eine Segmentierung mit dem Graph-Cut-Algorithmus [4] angewendet. Wie in Abb. 1 dargestellt, werden innerhalb einer zuvor definierten Region of Interest (ROI) bestimmte Bereiche dem Gefäß zugeordnet, andere dem Hintergrund. Als Resultat entsteht eine binäre Segmentierung der Aorta. Falls das Segmentierungsergebnis nicht den Anforderungen entspricht, kann es durch die Definition weiterer Objekt- oder Hintergrundbereiche interaktiv verändert werden.

2.2 Quantifizierung der Aorta

Zur Quantifizierung der Aorta werden aus der Segmentierung zwei Modelle erstellt: Ein Polygonnetz (Surface) mittels des Marching-Cube-Algorithmus [5], und ein Gefäßbaum mittels einer Skelettierung [6]. Die Surface liefert die Oberflächenkoordinaten der Aorta, während durch die Skelettierung die Mittellinie des Gefäßes, die Centerline, definiert wird.

Die Durchmesser entlang der Aorta werden errechnet, indem zu jedem Punkt auf der Centerline die gemittelte Entfernung zu n Punkten auf der Oberfläche in

360° um den Centerlinepunkt herum gemessen werden. Dazu wird das Oberflächenmodell diffusionsbasiert parametrisiert [7], indem die Punkte des Polygonnetzes, wie in Abb. 2 dargestellt, in n Längengrade eingeteilt werden. Anschließend lässt sich jeder Punkt auf der Oberfläche einem Längensegment zuordnen.

Der mittlere Radius um einen Centerlinepunkt herum wird ermittelt, indem zu jedem Punkt auf der Centerline jeweils der nächstliegende Punkt innerhalb eines der n Segmente zugeordnet wird.

Wie in Abb. 3 links abgebildet, entsteht dadurch für jeden Punkt auf der Centerline die Zuordnung von n Punkten der Surface, was einem Ring mit kleinstem gemitteltem Gefäßradius um die Aorta entspricht.

Als optimaler Gefäßradius wird hier der größte Radius innerhalb des quantifizierten Gefäßabschnitts definiert. Das Verhältnis zwischen den einzelnen mittleren Radien um die Centerlinepunkte und dem größten ermittelten Radius definiert die Stärke des Stenosegrades an den Centerlinepunkten. Umgewandelt in Umfänge ergibt sich hieraus die Fläche, die als Patch in die Aorta eingesetzt werden muss, um die Stenose auszugleichen. Abb. 3 zeigt in der Mitte die Abbildung der mittleren Radien entlang einer Aorta als Graphen und rechts den daraus resultierenden Patchvorschlag.

2.3 Studiendesign

Um die Quantifizierung der Aorta zu evaluieren wurden bei neun Testpatienten die rechnergestützt ermittelten minimalen Aortendurchmesser mit den ermittelten Werten eines Kinderkardiologen verglichen. Dazu wurden die neun MRT-Daten der Patienten analysiert. Der Radius der applikationsgestützten Quantifizierung wurde in $n = 18$ Sektoren ermittelt. Die Auflösung der Datensätze betrug $1 \times 1 \times 1.2 \text{ mm}^3$.

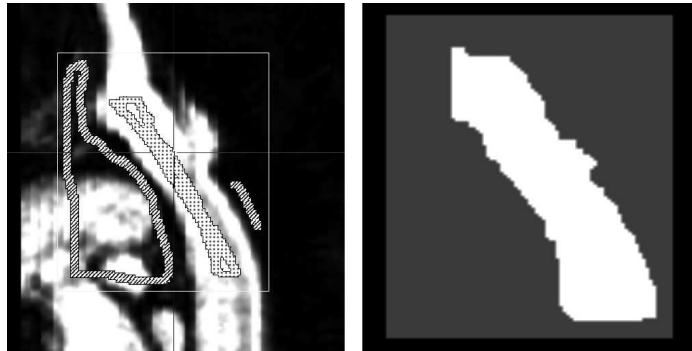


Abb. 1. Aortensegmentierung mittels Graph-Cut. Links: Innerhalb einer zuvor definierten ROI (helles Quadrat) werden Bereiche der Aorta (gepunktet) und des Hintergrunds (schraffiert) markiert. Ergebnis ist eine binäre Segmentierung (rechts).

3 Ergebnisse

Der mittlere Aortendurchmesser der neun Testpatienten, gemessen durch den Kinderkardiologen, betrug $(11,86 \pm 2,4)$ mm ($\mu \pm \sigma$). Unsere Applikation ermittelte $(9,54 \pm 2,2)$ mm. Die durchschnittliche absolute Differenz zwischen der manuellen Messung und unserer Annäherung betrug $(2,33 \pm 1,43)$ mm.

Die Zeit des Anwenders, die für die manuelle Durchmesserermittlung benötigt wurde, lag bei $(3,6 \pm 1,5)$ min (gemessen bei 7 Patienten), sowie $(4,1 \pm 2,2)$ min bei Quantifizierung mittels der Applikation.

In allen neun Fällen konnte ein Patchvorschlag ermittelt werden. Abb. 3 rechts zeigt den Patchvorschlag für einen Patienten als Beispiel. Der Patch gleicht die fehlenden Umfänge entlang der Aorta im Vergleich zum größten Umfang aus.

4 Diskussion und Ausblick

Die genaue Form und Größe eines Patches ist bei einer komplizierten, irregulären CoA vom Chirurgen oft schwer zu planen. Wir stellen eine neue Methode zur präoperativen Aortenquantifizierung vor, mit der die Stenose der Aorta ermittelt und ein Patchvorschlag erstellt werden kann. Mit Hilfe des individuellen Patchvorschlages kann bereits präoperativ ein Patch erstellt werden, der in Form und Größe den stenotischen Abschnitt auf den gewünschten Durchmesser erweitert. Dadurch kann zum einen die Operationszeit reduziert, und somit das Operationsrisiko für den Patienten minimiert werden, zum anderen können optimale Patches die postoperativen Komplikationen der bei dieser chirurgischen Therapieform häufig auftretenden Re- bzw. Reststenosen und Aneurysmen reduzieren. Bei neun Testpatienten betrug die Differenz zwischen den manuell durch einen Kinderkardiologen ermittelten Radien an der engsten Stelle der Aorta und den applikationsermittelten Werten durchschnittlich $(2,33 \pm 1,43)$ mm, was ungefähr der Größe von zwei Pixeln der MRT-Datensätze entspricht.

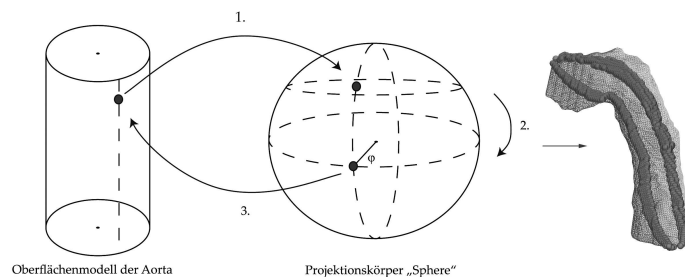
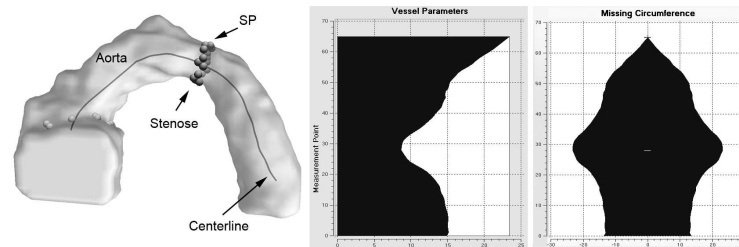


Abb. 2. Surfaceparametrisierung. Die Surface wird in n Längengrade eingeteilt, indem die Punkte des Polygonnetzes auf eine Kugel projiziert (1.) und in Grade eingeteilt werden (2.). Nach der Rückprojektion (3.) lässt sich jeder Punkt auf der Oberfläche genau einem Längengrad zuordnen. Rechts abgebildet: Eine Surface mit den Punkten zweier Längengradbereiche.

Abb. 3. Ermittlung des mittleren Radius für einen Centerlinepunkt (CP) und daraus resultierender Patchvorschlag. Jedem CP werden die Surfacepunkte (SP) zugeordnet, die innerhalb eines Sektors am nächsten liegen. Aus den Entfernungen der n Punkte zum CP errechnet sich der mittlere Radius. An der Stelle des geringsten mittleren Radius ist die Stenose lokalisiert. In der Mitte ist die Abbildung aller ermittelten Radien entlang der Aorta. Aus der Differenz des mittleren Radius zum größten innerhalb der Aorta ermittelten Radius errechnet sich anschließend der Patchvorschlag (rechts).



Derzeit wird der optimale Gefäßradius automatisch als der größte ermittelte Radius definiert, was bei Aneurysmen oder hypoplastischen Aorten problematisch ist. Daher ist eine Erweiterung geplant, in der der Kardiologe auf die Definition des optimalen Gefäßdurchmessers Einfluss nehmen kann. Zudem soll bei der Patchform die Krümmung der Aorta, insbesondere im Aortenbogen, mit berücksichtigt werden. Dies ist als Erweiterung der Applikation zusammen mit Studien zur Evaluierung der Patchform und -größe geplant. Außer für Patchplanungen an Stenosen der Aorta soll die Applikation auch für Stenosen anderer Gefäße, wie beispielsweise an Pulmonalbifurkationen eingesetzt werden.

Literaturverzeichnis

1. Small BH, McGiffin DC, LeGrice IJ, et al. The effect of synthetic patch repair of coarctation on regional deformation of the aortic wall. *J Thoracic Cardiovasc Surg.* 2000;120(6):1053–1063.
2. Schumacher G, Hess J, Bühlmeier K. *Klinische Kinderkardiologie: Diagnostik und Therapie der angeborenen Herzfehler.* Springer Verlag, 4. Auflage; 2007.
3. Wolf I, Vetter M, Wegner I, et al. The medical imaging interaction toolkit (MITK). *Med Image Anal.* 2005;9:594–604.
4. Boykov J, Jolly MP. Interactive graph cuts for optimal boundary and region segmentation of objects in n-d images. *Procs ICCV.* 2001;1:105–112.
5. Lorensen WE, Cline HE. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *Computer Graph.* 1987;21(4):163–169.
6. Zhou Y, Kaufmanand A, Toga AW. Efficient Skeletonization of Volumetric Objects. *IEEE Trans Vis Computer Graph.* 1999;5(3):196–209.
7. Brechbühler C, Gerig G, Kübler O. Parametrization of closed surfaces for 3-D shape description. *Computer Vis Image Underst.* 1995;61:154–170.