

CT-basierte Analyse von Koronararterien zur Unterstützung eines TECAB-Grafting

Stefan Wesarg und Evelyn A. Firle

Fraunhofer IGD, Cognitive Computing & Medical Imaging, Darmstadt
Email: stefan.wesarg@igd.fraunhofer.de

Zusammenfassung. Verkalkungen der Herzkranzgefäße können zu Erkrankungen des kardio-vaskulären Systems bis hin zu einem Herzinfarkt führen. Eine gängige Behandlungsmethode ist die Bypass-Operation, welche mit Hilfe moderner Telemanipulator-Systeme minimal-invasiv durchgeführt werden kann. Dies ist allerdings mit Einschränkungen für den Chirurgen bezüglich der Sicht auf die Koronararterien und des Zugangs zu selbigen verbunden. Diese Arbeit beschreibt neuartige Methoden für die Unterstützung eines TECAB-Grafting, einer speziellen Form einer minimal-invasiven Bypass-Operation. Basierend auf einer Segmentierung des Herzkranzgefäßes werden harte Arterienverkalkungen automatisch detektiert und die Umgebung des Gefäßes analysiert. Zudem werden speziell entwickelte Methoden für die Visualisierung der Analyseergebnisse vorgestellt.

1 Einführung

Eine partielle Verkalkung oder gar ein Verschluß der Koronararterien kann zu einer Blut-Unterversorgung vor allem der Apex-nahen Bereiche des Herzmuskels führen, die einen Herzwand-Infarkt auslösen kann. Eine gängige Behandlungsmethode ist eine Bypassoperation, bei deren konventioneller Ausführung der Brustkorb komplett geöffnet wird. Hier hat der Chirurg neben der freien Sicht auf das Herz die Möglichkeit der Detektion von harten Arterienverkalkungen (Hard Plaques) durch Befühlen des Gefäßes.

Bei schonenderen Verfahren wird die Operation (OP) über sehr kleine Zugänge durchgeführt. Eine spezielle Form einer solchen minimal-invasiven Bypassoperation ist das Telemanipulator-unterstützte TECAB-Grafting [1]. Hierbei werden über mehrere Öffnungen Instrumente in den Patienten eingeführt, und der Operateur bedient das System von einer Konsole aus (Abb. 1). Das bringt dem Patienten den Vorteil eines kleineren Traumas verbunden mit einer schnelleren Genesung und geringerem Infektionsrisiko. Andererseits erfordert das TECAB-Grafting eine Gewöhnung des Chirurgen an die eingeschränkte Sicht und für ein optimales Ergebnis eine Planung des Eingriffs. Letzteres ist bisher nur teilweise für die Port-Plazierung realisiert [2], obwohl eine Analyse der Koronararterien vor einer minimal-invasiven OP dem Chirurgen zusätzliche, wertvolle Informationen bieten und damit die Einschränkungen während des Eingriffs wirkungsvoll kompensieren kann.

Abb. 1. Ein Telemanipulator-System für die minimal-invasive Chirurgie (*da Vinci*, Intuitive Surgical): Der Chirurg steuert von einer Konsole aus (links) die Arme des Systems, an denen die Instrumente und ein Endoskop angebracht sind (rechts).



Derzeit werden die vor der OP aufgenommenen CT-Aufnahmen nur zu einer groben Orientierung verwendet. Eine auf diesen Daten basierende Analyse der Koronararterien wird nicht durchgeführt. Der “Gold-Standard” für die Untersuchung dieser Gefäßstrukturen ist derzeit (noch) die Angiographie. Sie findet aber für die Vorbereitung eines TECAB-Grafting meist keine Verwendung, da sie als stark invasive Bildaufnahmemethode nur in bedingtem Maße für die Untersuchung der für eine Bypaß-OP vorgesehenen Patienten geeignet ist und zudem kaum Informationen über das den Gefäßbaum umgebende Gewebe bietet. Zur CT-basierten Analyse von Koronararterien gibt es bisher erst recht wenige Arbeiten [3, 4]. Diese beschränken sich zudem meist auf eine Stenosen-Detektion, die auf 2D-Bilddaten durchgeführt wird [5]. Echte 3D-Verfahren zur Analyse von CT-Daten sind nach Kenntnis der Autoren noch nicht publiziert worden.

Minimal-invasive Bypaß-OPs sind im Vergleich zur konventionellen Methode zeitaufwendig. Ein großer Teil der OP-Dauer wird für das Freilegen des von Fett- und Muskelgewebe umgebenen Herzkranzgefäßes verwendet, da dies in nur ungenauer Kenntnis der Anatomie sehr langsam und vorsichtig geschehen muß. Hier kann eine Kenntnis der Einbettung des Koronargefäßes in das umliegende Gewebe zu einer deutlichen Beschleunigung des Eingriffs beitragen.

Die im folgenden präsentierten Methoden bieten die Möglichkeit einer umfassenden CT-basierten Analyse von Koronararterien. Damit werden essentielle, das Herzkranzgefäß betreffende Daten für eine bessere Planung eines TECAB-Grafting angeboten. Die während der Analyse generierten Daten ersetzen zum Teil die auf Grund des minimal-invasiven Charakters des Eingriffs fehlenden Informationen. Dazu ist keine zusätzliche Bildakquisition erforderlich, denn es werden die ohnehin schon aufgenommenen CT-Daten verwendet.

2 Methoden

Unsere Analyseverfahren für Koronararterien basieren auf deren Segmentierung, wobei sowohl die Mittellinie als auch der Gefäßrand extrahiert werden. Dies

ermöglicht die Berechnung des Durchmessers entlang des Gefäßes. Dabei kommt ein von uns entwickelter Segmentierungsalgorithmus zum Einsatz [6], welcher für die Analyse in Bezug auf seine Robustheit optimiert wurde.

Für die Detektion von Hard Plaques verwenden wir ein zweistufiges Verfahren. Es wird dabei angenommen, daß diese Verkalkungen durch ihr Vorhandensein das Gefäß teilweise verstopfen und einen höheren Absorptionskoeffizienten als das mit Kontrastmittel gefüllte Blutgefäß aufweisen. Daher werden in einem ersten Schritt die Punkte auf der extrahierten Mittellinie ausgewählt, die im Bereich eines verringerten Gefäßdurchmessers liegen. Die innerhalb des Gefäßes liegende Umgebung dieser Kandidatenpunkte wird anschließend auf das Vorhandensein deutlich größerer Grauwerte (ca. 20 bis 30% heller) inspiziert, was als Entscheidungskriterium für die Kalk-Detektion dient. Weiterhin wird die Umgebung außerhalb der Koronararterie analysiert. Dabei werden die Grauwerte in dieser Umgebung ausgelesen und in Hounsfield-Einheiten (HU) umgerechnet. Damit läßt sich das das Gefäß umgebende Gewebe grob in Luft (HU: ≈ -1000), Fett (HU: -220 bis -20) und Muskelgewebe (HU: 20 bis 50) einteilen (nach [7]).

Der berechnete Gefäßdurchmesser wird durch eine im Durchmesser variierende Röhre um die Gefäßmittellinie, deren Oberfläche zusätzlich farbkodiert ist, direkt in der 3D-Ansicht dargestellt. Ebenso werden die detektierten Hard Plaques durch kleine Pfeile direkt in der 3D-Ansicht angezeigt und entsprechend in den korrespondierenden 2D-Schichten hervorgehoben.

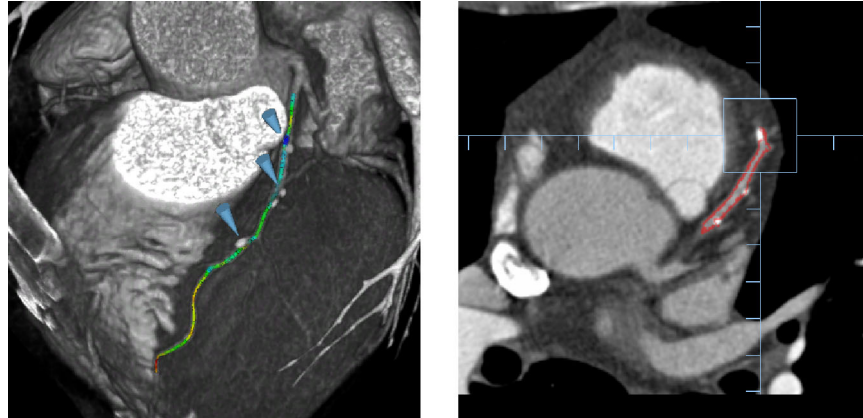
Für den Zugriff auf die das umliegende Gewebe betreffenden Informationen wurde eine spezielle Anzeigeform entwickelt, bei der für jeden Punkt der Mittellinie die Hounsfield-Werte der Umgebung mittels Farbkodierung in einem Polar-Plot dargestellt werden. Über ein Slider-Control läßt sich entlang des Gefäßes navigieren. Zusätzlich wird in einem x-y-Plot der mittlere Grauwert der Umgebung für jeden Punkt der Mittellinie ausgegeben.

Unsere Analyseverfahren wurden mit kontrastverstärkten CT-Datensätzen des Thorax, die mit einem Multi-Slice-CT-Scanner (SIEMENS, Somatom Sensation 16) EKG-getriggert aufgenommen wurden, getestet.

3 Ergebnisse

In den fünf verwendeten Datensätzen wurden jeweils die linke Koronararterie (LAD), die linke Circumflex (LCX) und die rechte Koronararterie (RCA) segmentiert. Basierend darauf wurde die Zuverlässigkeit der Detektion von Hard Plaques getestet. Unser Verfahren fand in 8 der segmentierten Gefäße insgesamt 22 Verkalkungen, die 21 der bei einer vorangehenden manuellen Inspektion gefundenen entsprachen. Eine der Verkalkungen war sehr ausgedehnt und wurde von unserem Verfahren doppelt detektiert. Die sieben verbleibenden Gefäße enthielten keine sichtbaren Verkalkungen. Hier kam unsere automatische Methode zu einem identischen Ergebnis, erbrachte also einen "False-Positive"-Wert von 0. Die farbkodierte Darstellung des Gefäßdurchmessers mittels einer im Durchmesser variierenden Röhre direkt in der 3D-Ansicht macht es sehr einfach, verengte Bereiche der Koronararterien und ihre räumliche Position zu erkennen (Abb. 2).

Abb. 2. Eine im Durchmesser variierende Röhre um die Gefäßmittellinie zeigt den Durchmesser Verlauf farbkodiert in der 3D-Ansicht an – Regenbogenübergang von rot (= minimaler Durchmesser) zu blau (= maximaler Durchmesser). Detektierte Hard Plaques sind durch kleine Pfeile hervorgehoben (links). Auswahl einer der Positionen hebt diese in der entsprechenden 2D-Ansicht hervor (rechts).



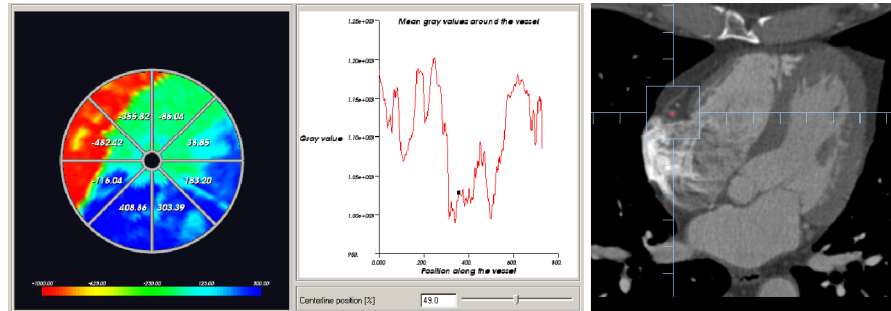
Für dieselben insgesamt 15 segmentierten Koronararterien wurde die Analyse des das Gefäß umgebenden Gewebes durchgeführt. Hier konnte die Evaluation nur qualitativ auf Basis der Bilddaten erfolgen, da alle Datensätze von bereits behandelten Patienten stammten. Der Vergleich der im Polar-Plot farbkodiert angezeigten Gewebezusammensetzung mit der Darstellung der Bilddaten in den 2D-Ansichten und der 3D-Ansicht zeigte volle Übereinstimmung (Abb. 3).

4 Diskussion

Die von uns entwickelten Verfahren bieten eine umfassende 3D-Analyse von Koronararterien basierend auf kontrastverstärkten CT-Aufnahmen. Die dabei berechneten Parameter ermöglichen eine verbesserte Planung eines minimal-invasiven TECAB-Grafting.

Die Zuverlässigkeit und Robustheit der Hard-Plaque-Detektion wurde anhand von 5 Datensätzen gezeigt. Unser Verfahren bietet das Analyseergebnis neben der Visualisierung in der 3D-Ansicht zusätzlich in einer für den Radiologen gewohnten Form in den 2D-Schichten an, ist aber deutlich schneller als die herkömmliche manuelle Inspektion der Koronararterien. Der “False-Positive”-Wert von 0 bei den Tests ist dabei eine wichtige Voraussetzung für die klinische Anwendbarkeit unseres Verfahrens. Eine derzeit durchgeführte klinische Studie an einer unserer Partnerkliniken wird unser Verfahren an einer größeren Zahl von Patienten testen und hat außerdem zum Ziel, diese Ergebnisse mit dem bisherigen “Gold-Standard”, der konventionellen Angiographie, zu vergleichen.

Abb. 3. Visualisierung der Gefäßumgebung: Ein Polar-Plot zeigt die farbkodierten HU (rot: Luft, grünliches Türkis: Fett, bläuliches Türkis: Muskelgewebe, tiefes Blau: kontrastmittelgefüllte Kavitäten) für einen gewählten Punkt des Gefäßes; ein x-y-Plot die mittleren Grauwerte der Umgebung (links). Zum Vergleich ist die korrespondierende axiale Schicht mit der hervorgehobenen Position dargestellt (rechts).



In der Vorbereitung befindliche klinische Tests der Gewebeanalyse werden zeigen, inwieweit sich das TECAB-Grafting durch eine vorherige Kenntnis über die Einbettung der Herzkranzgefäße in umliegendes Fett- und Muskelgewebe beschleunigen läßt und wie zuverlässig die Gewebeklassifizierung ist.

Wir danken unseren Partnern des Klinikums der Universität Frankfurt (Diagnostische und Interventionelle Radiologie) für die Bereitstellung der CT-Daten.

Literaturverzeichnis

1. Dogan S, Wimmer-Greinecker G, Andreßen E, et al. Totally Endoscopic Coronary Artery Bypass (TECAB) Grafting and Closure of an Atrial Septal Defect using the DaVinci System. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2000;48.
2. Cannon JW, Stoll JA, Selha SD, et al. Port Placement Planning in Robot-Assisted Coronary Artery Bypass. *IEEE Trans on Robotics and Automation* 2003;19(5).
3. Traversi E, Bertoli G, Barazzoni G, et al. Non-Invasive coronary angiography with multislice computed tomography. Technology, methods, preliminary experience and prospects. *Ital Heart J* 2004;5:89–98.
4. Gerber TC, Kuzo RS, Karstaedt N, et al. Current Results and New Developments of Coronary Angiography With Use of Contrast-Enhanced Computed Tomography of the Heart. *Mayo Clin Proc* 2002;77:55–71.
5. Dewey M, Schnapauff D, Laule M, et al. Multislice CT Coronary Angiography: Evaluation of an Automatic Vessel Detection Tool. *Fortschr Röntgenstr* 2004;176:478–483.
6. Wesarg S, Firl EA. Segmentation of Vessels: The Corkscrew Algorithm. In: Jr RLGalloway, editor. *Medical Imaging Symposium 2004*. vol. 5370 of Proc. of SPIE; 2004. p. 1609–1620.
7. Morneburg H, editor. *Bildgebende Systeme für die medizinische Diagnostik*. 3rd ed. Publicis-MCD; 1995.