Zuse Institute Berlin

Takustr. 7
14195 Berlin
Germany

ROBERT JOACHIMSKY, FELIX AMBELLAN, STEFAN ZACHOW

Computerassistierte Auswahl und Platzierung von interpositionalen Spacern zur Behandlung früher Gonarthrose

ZIB Report 17-72 (November 2017)

Zuse Institute Berlin
Takustr. 7
14195 Berlin
Germany

Telephone: +49 30-84185-0
Telefax: +49 30-84185-125

E-mail: bibliothek@zib.de
URL: http://www.zib.de

ZIB-Report (Print) ISSN 1438-0064
ZIB-Report (Internet) ISSN 2192-7782

Computerassistierte Auswahl und Platzierung von interpositionalen Spacern zur Behandlung früher Gonarthrose

Robert Joachimsky, Felix Ambellan, Stefan Zachow

Zusammenfassung

Degenerative Gelenkerkrankungen, wie die Osteoarthrose, sind ein häufiges Krankheitsbild unter älteren Erwachsenen. Hierbei verringert sich u.a. der Gelenkspalt aufgrund degenerierten Knorpels oder geschädigter Menisci. Ein in den Gelenkspalt eingebrachter interpositionaler Spacer soll die mit der Osteoarthrose einhergehende verringerte Gelenkkontaktfläche erhöhen und so der teilweise oder vollständige Gelenkersatz hinausgezögert oder vermieden werden.

In dieser Arbeit präsentieren wir eine Planungssoftware für die Auswahl und Positionierung eines interpositionalen Spacers am Patientenmodell.

Auf einer MRT-basierten Bildsegmentierung aufbauend erfolgt eine geometrische Rekonstruktion der 3D-Anatomie des Kniegelenks. Anhand dieser wird der Gelenkspalt bestimmt, sowie ein Spacer ausgewählt und algorithmisch vorpositioniert. Die Positionierung des Spacers ist durch den Benutzer jederzeit interaktiv anpassbar.

Für jede Positionierung eines Spacers wird ein Fitness-Wert zur Knieanatomie des jeweiligen Patienten berechnet und den Nutzern Rückmeldung hinsichtlich Passgenauigkeit gegeben. Die Software unterstützt somit als Entscheidungshilfe die behandelnden Ärzte bei der patientenspezifischen Spacerauswahl.

Schlagworte

Osteoarthrose, Kniegelenk, Medizinische Planung, Visualisierung

I. Problemstellung

Unter den muskuloskeletalen Erkrankungen stellt die Osteoarthrose ein besonders verbreitetes Leiden unter älteren Erwachsenen dar. Insbesondere das Kniegelenk ist häufig betroffen. Im Jahr 2010 litten über 3.6% der Weltbevölkerung an einer Osteoarthrose des Kniegelenks [1]. Damit stellt dieses Krankheitsbild insbesondere einen bedeutenden Kostenfaktor innerhalb des Gesundheitssystems dar.

Die Erkrankung wirkt sich spürbar auf den Alltag der Patienten aus. Die entstehenden Beschwerden nehmen mit zunehmendem Alter zu. Die unbehandelte Osteoarthrose verursacht chronische Schmerzen, bewirkt funktionelle Einschränkungen und zeigt zudem Auswirkungen auf (psycho-)soziale Faktoren der Erkrankten. Die Lebensqualität der Patienten sinkt bei fehlender bzw. unzureichender Behandlung.

Die in der Literatur beschriebenen Therapieformen umfassen Chondrozyten-Transplantationen, Hyaluron-Injektionen, Gelenkspiegelungen, Kortikoid-Injektionen und weitere Maßnahmen. Derzeit werden mit keiner dieser Therapien Langzeiterfolge erzielt. Eine an den Patienten angepasste und damit individualisierte Therapieform könnte zu einem besseren Langzeiterfolg mit geringeren Komplikationen führen. Dennoch steht in letzter

Konsequenz meist der teilweise oder komplette Gelenkersatz. Durch Nutzung minimal invasiver Methoden wird versucht eine Verzögerung oder Vermeidung einer unikondylären oder totalen Arthroplastie zu erreichen.

Ein in den Gelenkspalt eingebrachter interpositionaler Spacer soll die mit der Osteoarthrose einhergehende verringerte Gelenkkontaktfläche erhöhen. Dazu sind zwei Kriterien von besonderer Bedeutung. Zum einen entscheidet die Positionierung des Spacers im Gelenkspalt über die Größe der Kontaktfläche zwischen Tibia-Plateau und Spaceroberfläche und damit über die Druckverteilung im Gelenk. Zum anderen ist sicherzustellen, dass das Spacerdesign und die Platzierung eine Dislokation des operativ positionierten Spacers verhindern.

Die vorgestellte Planungssoftware unterstützt die behandelnden Ärzte bei der Therapie von Osteoarthrose mittels interpositionaler Spacer und führt sie dafür interaktiv durch die notwendigen Arbeitsschritte und Entscheidungen im Planungsverlauf der Therapie.

II. Material und Methoden

Die Planungssoftware baut auf drei wesentlichen Elementen auf. Diese Kernkomponenten umfassen die automatische Bildsegmentierung und Rekonstruktion der 3D-Knieanatomie, die patientenspezifische Spacerauswahl, sowie die Visualisierung, die eine interaktive Positionierung des Spacers ermöglicht.

Neben der Visualisierung waren bei der Entwicklung der Planungssoftware die Bedienbarkeit und Nähe zur klinischen Praxis besonders bedeutsam. Die in der Planung der operativen Einbringung eines interpositionalen Spacers notwendigen Arbeitsschritte wurden softwaretechnisch modelliert und implementiert.

Die Arbeitsschritte in der Verwendung der Planungssoftware umfassen:

1) Einlesen der MRT-Bilddaten nach Auswahl durch den Benutzer
2) Vollautomatische Segmentierung der Bilddaten und Rekonstruktion der 3D-Knieanatomie
3) Visualisierung der MRT-Bilddaten und der rekonstruierten 3D-Anatomie mit freier Wahl der Ansicht und Bildschicht
4) Gelenkspaltbestimmung aufgegliedert in ein mediales und laterales Kompartiment
5) Auswahl eines Spacertyps

Optimierung der Positionierung in einem zyklischen und interaktiven Vorgang:

1) Initialisierung und Vorpositionierung des Spacers
2) Bestimmung eines Fitness-Werts bezüglich Lage und Passform
3) Interaktive Positionierung des Spacers durch den Benutzer
4) Rückmeldung über Fitness-Wert und erlaubte Positionen mit Hilfe einer Kollisionserkennung
5) (evtl. Bestimmung einer maximal möglichen Dicke)

In den folgenden Abschnitten werden – beginnend mit der Segmentierung – die Kernaspekte der Software näher erläutert.

A. Segmentierung

Ausgehend von tomographischen Bilddaten (MRT) erfolgt eine automatische Bildsegmentierung und anschließende Rekonstruktion der dreidimensionalen Kniegeometrie. Die Segmentierung basiert auf dem in [2] vorgestellten Ansatz, welcher Statistical Shape Models (SSM) verwendet. Zu Beginn des Segmentierungsvorgangs werden die SSMs von Femur und Tibia mit

Hilfe einer Generalisierten Hough Transformation [3] vorpositioniert. Das Fitting der SSMs an die Bilddaten erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden die Moden der SSMs an die Bilddaten angepasst. Die in [2] präsentierte Kostenfunktion, die entlang des Intensitätsprofils der Oberflächennormalen ausgewertet wird, soll dabei minimiert werden. Es folgt ein Freiformschritt, der die einzelnen Vertices der 3D-Geometrie bewegt und die Kostenfunktion außerhalb der Randbedingungen des SSMs weiter minimiert. Für eine detaillierte Darstellung sei auf die Originalarbeit verwiesen. Das dem SSM zugrundeliegende Formwissen erlaubt eine Rekonstruktion der 3D Knieanatomie trotz unvollständiger Informationen, die unter anderem durch Bildartefakte entstehen können. Dabei hat sich die verwendete Methode bei den heterogenen und stark pathologischen Fällen der SKI10-Challenge-Daten [4] als sehr robust erwiesen. Es wird angenommen, dass eine zuverlässige Rekonstruktion der 3D-Anatomie eine verlässliche Grundlage für den Planungsprozess darstellt. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Schritte durchläuft die Planungssoftware nach dem Einladen der MRT-Bilddaten vollautomatisch. Als Resultat liegen die rekonstruierten 3D-Oberflächengeometrien von Femur und Tibia vor. Da in der klinischen Anwendung eine intraoperative Begradigung des Gelenkknorpels vor Einbringung des Spacers erfolgt, wird dieser innerhalb der Planungssoftware nicht betrachtet.

B. Spacerauswahl

Der interpositionale Spacer übernimmt im degenerierten Kniegelenk die Aufgaben des Knorpels und der Menisci. Neben einer patientenspezifischen Spacerform und Positionierung sind geeignete Materialeigenschaften dafür von großer Bedeutung. Im BMBF-geförderten Projekt TOKMIS erfolgt eine geometrische Analyse der Formvariabilität gesunder und erkrankter Kniegelenke. Die Menge der in der Planungssoftware verfügbaren Spacertypen resultiert aus dieser Analyse. Sie wurde konzipiert, um die Population der an einer Gonarthrose erkrankten Patienten möglichst gut zu repräsentieren. Die folgende Abbildung zeigt schemenhaft einen interpositionalen Spacer.

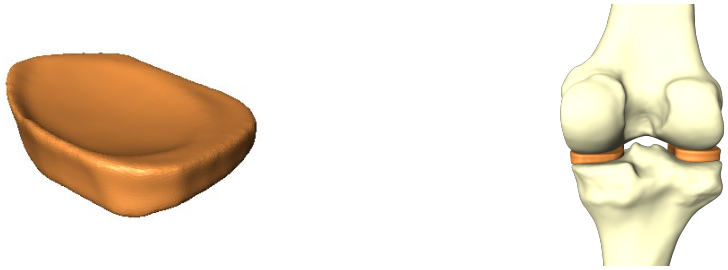

Abbildung 1. Exemplarischer medialer Spacer und Visualisierung zweier interpositionaler Spacer innerhalb des Gelenkspalts.

Die Planungssoftware erlaubt die Auswahl und Positionierung der vorgegebenen Spacer. Die Menge der Spacer ist dabei nicht festgelegt und kann im Nachhinein erweitert und ergänzt werden. Um den für den Patienten geeigneten Spacer zu identifizieren, wird anhand einer gegebenen Metrik ein Fitnesswert für den jeweiligen Spacertypen zur individuellen Knieanatomie des Patienten bestimmt. Dieser beschreibt die optimale Positionierung und Passform des Spacers. Der gewählte Spacer wird über die Alignierung der Schwerpunkte des Spacers und des ermittelten Gelenkspalts initial positioniert.

Die automatische Positionierung des Spacers erfolgt wahlweise anhand des Iterative Closest Point-Algorithmus [5] oder der Auswertung einer aufgabenspezifischen Kostenfunktion.

Die Segmentierung der Bilddaten erzeugt triangulierte Oberflächengitter aus denen 3D-Punktwolken gewonnen werden. Auch die Spacergeometrien liegen als triangulierte Oberflächengitter vor und werden zu 3D-Punktwolken verarbeitet. Der ICP-Algorithmus wird auf die 3D-Punktwolke der Spaceroberseite und -unterseite und die 3D-Punktwolke der Femurkondyle und des Tibiaplateaus angewendet. Der Algorithmus verfolgt dabei das Ziel den mittleren Abstand zwischen beiden Punktwolken zu minimieren.

Zur Auswertung der aufgabenspezifischen Kostenfunktion werden die Femur- und Tibiaoberflächengitter zu 3D-Masken verarbeitet. Die Kostenfunktion beschreibt die Femurkondyle und das Tibiaplateau als bevorzugte Region für die Spacerpositionierung anhand des Bildgradienten. Die Länge des Profils, für die die Auswertung der Kostenfunktion erfolgt, wird schrittweise verringert. Somit wird der Suchraum iterativ verfeinert und der Spacer an eine optimierte Position geführt.

Die Parameter für die Berechnung des Fitnesswerts umfassen eine zu maximierende Auflagefläche des Spacers auf dem Tibiaplateau, die Positionierung des Spacers auf diesem in Relation zu anatomischen Landmarken (z.B. Abstand zur Eminentia intercondylaris), eine Klassifikation der Osteoarthrose nach Kellgren-Lawrence [6] und das Ausfüllen des Gelenkspalts.

Die experimentelle Auswertung der optimalen Gewichtung der Parameter für die Berechnung des Fitness-Werts erfolgt, sobald die finalisierte Menge an Spacertypen zur Verfügung steht.

C. User Interface

Das User Interface der Planungssoftware stellt die Arbeitsschritte des Planungsprozesses in chronologischer Abfolge dar. Im Folgenden werden die Elemente des User Interfaces entlang der einzelnen Arbeitsschritte beschrieben.

Nach dem erstmaligen Start des Programms gibt der Nutzer den Pfad zu den Bilddateien und den in einem Präprozessschritt rekonstruierten 3D-Knieanatomien an. Die anschließend geladenen Daten (Kniegeometrie und MRT) werden in einer gemeinsamen Ansicht nebeneinander mit den relevanten DICOM-Bildinformationen dargestellt. Dabei beeinflussen sich die beiden Einzeldarstellungen gegenseitig. Eine Auswahl einer anderen Ansicht oder Schicht im MRT-Bild bewirkt eine dementsprechend angepasste Darstellung der 3D-Geometrie. Die gewählte Schicht des MRT-Bildes wird auf der Geometrie visualisiert. Diese gekoppelte Darstellung kann zudem auch deaktiviert werden.

Nach dem Einladen der Daten wird die Gelenkspaltbestimmung durch die Benutzer gestartet. Der in ein mediales und laterales Kompartiment aufgeteilte Gelenkspalt wird bei Bedarf visualisiert. Er stellt die Grundlage für die anschließende Positionierung der Spacer dar.

Die verschiedenen Spacertypen sind den Benutzern über eine Auswahlliste zugänglich und frei auswählbar. Der ausgewählte Spacer wird algorithmisch vorpositioniert und kann im Folgenden interaktiv durch die Benutzer in seiner Position angepasst werden.

Die Visualisierung des Spacers innerhalb des Gelenkspalts stellt den Schwerpunkt der Planungssoftware dar. Sie ermöglicht es den Benutzern interaktiv und visuell geführt eine Feinjustierung der Spacerposition vorzunehmen. Die Kollisionserkennung liefert den Benutzern dabei anhand einer Farbcodierung eine Rückmeldung über die anatomische Plausibilität der aktuellen Position, sowie über die Lagebeziehung des Spacers zu den Gelenkflächen. Bei Bedarf erfolgt eine automatische Positionskorrektur.

Die Kollisionserkennung wird zudem verwendet, um die manuelle Spacerpositionierung in ihren Freiheitsgraden so einzuschränken, dass ausschließlich gültige Positionen erreicht werden. Dies fördert die Bedienbarkeit der vorgestellten Planungssoftware.

III. Ergebnisse

Die vorgestellte Planungssoftware basiert auf der am Zuse-Institut Berlin entwickelten Software zur wissenschaftlichen Visualisierung und Datenanalyse AmiraZIBEdition [7] und wurde innerhalb dieser als Erweiterung implementiert. AmiraZIBEdition stellt – unter anderem – eine Reihe von Werkzeugen und Algorithmen für die Bildsegmentierung und die Geometrierekonstruktion zur Verfügung.

Die folgende Abbildung demonstriert die zusammenhängenden Darstellungen von MRT-Schnittbild (rechts) und der dazu rekonstruierten 3D-Anatomie des Kniegelenks (Mitte). Die linke Seite der Abbildung stellt die Kontrollelemente zur Auslösung der nächsten Teilarbeitsschritte bereit.

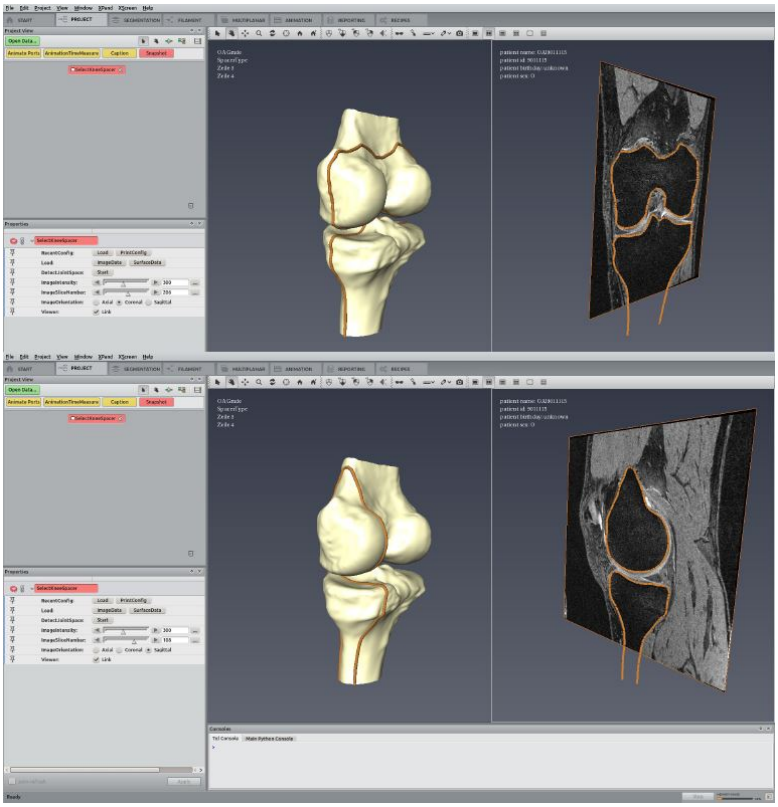

Abbildung 2. Planungssoftware nach Einladen der Bilddaten und Rekonstruktion der 3D-Knieanatomie.

Die nachstehende Abbildung zeigt einen algorithmisch vorpositionierten medialen und einen lateralen Spacer innerhalb des zum Patientenmodell bestimmten Gelenkspalts (blau). Eine ggf. gewünschte manuelle Feinpositionierung ist dabei sowohl auf 3D-Knieanatomie (links) als auch in jedem beliebigen MRT-Schnittbild (rechts) möglich.

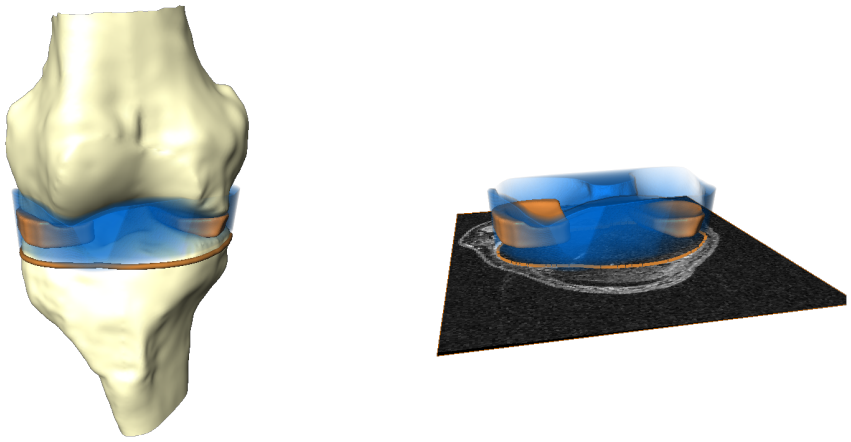

Abbildung 3. Algorithmisch vorpositionierte Spacer innerhalb der Visualisierung des Gelenkspalts.

Im weiteren Verlauf folgt die beschriebene Feinpositionierung, die durch die Planungssoftware mit optischem und farbcodiertem Feedback und Einschränkung auf relevante Freiheitsgrade unterstützt wird.

IV. Diskussion

Bisher berücksichtigt die Kollisionserkennung nur harte Randbedingungen in dem Sinne, dass eine Überschneidung der Spacergeometrie mit den Femurkondylen bzw. den Tibiaplateaus vollständig vermieden wird. Den Materialeigenschaften der Spacer und Knochen würde es ggf. gerechter werden, wenn diese Randbedingungen aufgeweicht werden. Dies würde die Modellierung elastischer Eigenschaften des Materials erlauben.

Zudem wird – in Anlehnung an die OP-Praxis – eine Relaxation der Bänder in späteren Programmversionen berücksichtigt. Dafür ist es notwendig die genutzte Bildsegmentierungspipeline zu erweitern und um eine Bestimmung der Bandansatzstellen zu ergänzen [8].

In einem weiteren Arbeitsschritt sollen die Ergebnisse, die der Softwareprototyp liefert, in einer Kadaverstudie evaluiert werden. Im Anschluss daran ist eine klinische Reihe angedacht.

Die vorgestellte Planungssoftware würde – mit überschaubaren Anpassungen – die Ableitung und Definition eigener Spacertypen erlauben. Momentan scheint dies aber aufgrund des aufwendigen Zulassungsverfahrens für interpositionale Spacer praktisch nicht möglich.

In weiterführenden Arbeiten sollen zudem weitere Fragestellungen adressiert werden. Aufbauend auf [9] ist eine Erweiterung der verwendbaren medizinischen Bilddaten geplant. In der weiteren Entwicklung soll damit auch die Verarbeitung von Röntgen- und fluoroskopischen Bilddaten ermöglicht werden. Dies würde es ermöglichen Fragestellungen zu bearbeiten, die den Zusammenhang zwischen dem entlasteten Kniegelenk (MRT) und dem Kniegelenk unter Last (Röntgen) beinhalten.

Zudem ist die Weiterentwicklung von der statischen hin zu einer dynamischen Simulation der Spacerposition geplant. Eine Artikulation in die Betrachtungen mitaufzunehmen, würde die Einbeziehung von Kräften, denen ein operativ eingebrachter Spacer innerhalb des Kniegelenks des Patienten ausgesetzt ist, erlauben. Auch hiervon könnte der Planungsprozess in der Therapie der Gonarthrose mittels interpositionaler Spacer und damit der Patient zukünftig profitieren.

V. Zusammenfassung

Wir präsentieren in dieser Arbeit eine Planungssoftware, die – auf geometrischen Patientenmodellen basierend – eine interaktive Auswahl und Positionierung von interpositionalen Spacern zur Behandlung der frühen Gonarthrose ermöglicht. Mit Hilfe der in vorhergehenden Arbeiten entwickelten Bildsegmentierung wird die 3D-Knieanatomie der Patienten anhand von MRT-Bilddaten rekonstruiert und der Gelenkspalt bestimmt.

Der in ein mediales und laterales Kompartiment unterteilte Gelenkspalt stellt den Suchraum für die folgende Auswahl und algorithmische Vorpositionierung der interpositionalen Spacer dar. Die Positionierung der Spacer hat eine optimale Druckverteilung auf den Gelenkflächen zum Ziel. Daher wird versucht die Auflageflächen der Spacer auf den Tibiaplateaus und den Femurkondylen zu maximieren.

Die Positionierung des ausgewählten Spacers kann durch die Benutzer nachjustiert werden und so iterativ zu einer auf den Patienten abgestimmten und optimierten Einpassung der Spacer im Gelenkspalt geführt werden.

Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden im Rahmen des Projekts TOKMIS durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung(BMBF) unter dem Kennzeichen 01EC1406E (TOKMIS) gefördert.

Literatur

[1] M. Cross, E. Smith, D. Hoy, S. Nolte, I. Ackerman, M. Fransen, L. Bridgett, S. Williams, F. Guillemin, C. L. Hill *et al.*, "The global burden of hip and knee osteoarthritis: estimates from the global burden of disease 2010 study," *Annals of the rheumatic diseases*, pp. annrheumdis–2013, 2014.

[2] H. Seim, D. Kainmueller, H. Lamecker, M. Bindernagel, J. Malinowski, and S. Zachow, "Model-based auto-segmentation of knee bones and cartilage in mri data," *Medical Image Analysis for the Clinic: A Grand Challenge, Beijing*, 2010.

[3] D. H. Ballard, "Generalizing the hough transform to detect arbitrary shapes," *Pattern recognition*, vol. 13, no. 2, pp. 111–122, 1981.

[4] Ski10-Challenge. [Online]. Available: http://www.ski10.org/

[5] P. J. Besl, N. D. McKay *et al.*, "A method for registration of 3-d shapes," *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 14, no. 2, pp. 239–256, 1992.

[6] J. Kellgren and J. Lawrence, "Radiological assessment of osteo-arthrosis," *Annals of the rheumatic diseases*, vol. 16, no. 4, p. 494, 1957.

[7] AmiraZIBEdition. [Online]. Available: https://amira.zib.de

[8] H. Seim, H. Lamecker, M. Heller, and S. Zachow, "Segmentation of bony structures with ligament attachment sites." in *Bildverarbeitung für die Medizin*. Springer, 2008, pp. 207–211.

[9] M. Ehlke, H. Ramm, H. Lamecker, H.-C. Hege, and S. Zachow, "Fast generation of virtual x-ray images for reconstruction of 3d anatomy," *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 19, no. 12, pp. 2673–2682, 2013.