

Workshop

Graduiertenkolleg 1126:
Intelligente Chirurgie

Workshop Graduiertenkolleg 1126: Intelligente Chirurgie der 10. CURAC Jahrestagung 2011

Rahmen und Zweck der Veranstaltung

Möglichkeiten der Operationsplanung, der interaktiven Bildgebung, der Telemannipulation, der Robotik und der Navigation führen zu tiefgreifenden Veränderungen des chirurgischen Arbeitsplatzes und werden längerfristig auch das Leistungsprofil von Chirurgen verändern. Die breite Nutzung innovativer Operationsstrategien erfordert einen neu konzipierten chirurgischen Arbeitsplatz, in dem die essentielle Verzahnung von Chirurgie und Medizintechnik adäquat berücksichtigt wird und der Verantwortung für die technologischen und chirurgischen Aspekte der Therapie professionell Rechnung getragen wird. Die entsprechenden Neuentwicklungen im Bereich Planung, Navigation, Telemannipulation und der Mensch-Maschine-Schnittstelle sind Gegenstand des Graduiertenkolleg 1126: "Entwicklung neuer computerbasierter Methoden für den Arbeitsplatz der Zukunft in der Weichteilchirurgie" (GRK 1126). Im Rahmen des Workshops werden aktuelle Projekte des Graduiertenkollegs vorgestellt. Weiterhin bietet sich die Gelegenheit zur Diskussion mit technischen und klinischen Experten.

Veranstalter

Das GRK 1126 ist eine Kooperation der Universitätsklinik Heidelberg, des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und des Deutschen Krebsforschungszentrums (DKFZ) Heidelberg. Aufbauend auf bestehenden Kooperationen befasst sich das GRK 1126 mit unterschiedlichen medizintechnischen Fragestellungen der Weichteilchirurgie. Seit 2005 wird es überwiegend aus Mitteln der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) finanziert und ist inzwischen in der zweiten Förderphase. In enger Kooperation zwischen Ingenieuren und Medizinem werden im GRK 1126 neue Methoden für den chirurgischen Arbeitsplatz der Zukunft erforscht. Sprecher des Graduiertenkollegs ist Professor Dr. med. Markus W. Büchler, Geschäftsführender Direktor der Chirurgischen Universitätsklinik Heidelberg.

Vorträge

Das Arbeitsprogramm des GRK ist interdisziplinär angelegt und umfasst insgesamt neun medizintechnische Problemstellungen, die im Rahmen von achtzehn Promotionen erforscht werden. Jedes Forschungsthema wird sowohl in einer medizinischen als auch in einer technischen Promotion bearbeitet, wobei diese sich gegenseitig unterstützen und ergänzen. Das Workshop-Programm besteht aus fünf Vorträgen, die einzelne Arbeiten aus den Bereichen Navigation, Simulation und Mensch-Maschine-Interface präsentieren.

Programm

1. B. Graser, M. Großgasteiger, C. Rosendal, H. Rauch, H.-P. Meinzer, T. Heimann: Perioperative Unterstützung und Auswertungshilfe bei Mitralklappenrekonstruktion durch Quantifizierung von Morphologie und Dynamik der Mitralklappe basierend auf 4D Ultraschall Daten
2. S. Schalck, T. Müller, R. Unterhinninghofen, H. von Tengg-Kobligk, H.U. Kauczor, R. Dillmann: Simulation von Aortenerkrankungen für die Therapieplanung basierend auf 4D MRT- und Phasenkontrastbildgebung
3. A.-L. Wekerle, D. Katić, H.-G. Kenngott, S. Speidel, B.-P. Müller-Stich: Konstruktion einer Wissensbasis für die minimal invasive Pankreaschirurgie
4. L. Eckert, H. Kenngott, B. Müller: Entwicklung und Evaluation eines Trainingsmodells für die Periduralkatheteranlage mit elektronischen Lern- und Trainingsprogramm
5. A. Groch, S. Hempel, S. Speidel, S. Haase, H. Kenngott, A. Seitel, S. Röhl, M. Wagner, T. Kilgus, K. Yung, S. Bodenstedt, B. Müller-Stich, H.-P. Meinzer, J. Hornegger, L. Maier-Hein: Oberflächenrekonstruktion für minimal-invasive Navigationssysteme

Die Veranstalter laden Sie herzlich ein, den Workshop zu besuchen und mit klinischen und technischen Experten der einzelnen Projekte zu diskutieren. Wir freuen uns auf Ihr Interesse und wünschen uns interessante Vorträge und Diskussionen.

Perioperative Unterstützung und Auswertungshilfe bei Mitralklappenrekonstruktion durch Quantifizierung von Morphologie und Dynamik der Mitralklappe basierend auf 4D Ultraschall Daten

B. Graser¹, M. Großgasteiger², C. Rosenda², H. Rauch², H.-P. Meinzer¹, T. Heimann¹

¹ *Abteilung Medizinische und Biologische Informatik, Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), Deutschland*

² *Klinik für Anästhesiologie, Universität Heidelberg, Deutschland*

Kontakt: b.graser@dkfz-heidelberg.de

1 Problem

Die Mitralklappeninsuffizienz (MI) ist ein weit verbreiteter Herzfehler der ca. 1,7 % der erwachsenen Bevölkerung betrifft. Dabei kommt es aufgrund von Undichtigkeit der Mitralklappe zu einem Blutrückfluss vom linken Ventrikel in das linke Atrium, was lebensgefährliche Folgen haben kann. Obwohl die Chancen einer erfolgreichen Erstbehandlung durch eine Mitralklappenrekonstruktion (MR) gut sind, kommt es nach einigen Jahren meist zu einem Wiederauftreten der MI. Gründe hierfür sind fortschreitende Degenerierung oder eine fehlerhafte Behandlung. Während der Operation ist der Chirurg auf seine Erfahrung angewiesen und hat kaum quantitative Daten zur Verfügung auf die er sich stützen könnte. Durch das Erstellen eines patientenspezifischen Modells der Mitralklappe auf Basis von Ultraschall Daten, können jedoch wichtige Daten zur Morphologie und Dynamik der Mitralklappe gewonnen werden. Zum einen kann dem Chirurg bei der Behandlungsentscheidung geholfen werden und zum anderen kann eine MR abschließend evaluiert werden.

2 Methoden

Bei einer Herzklappenoperation wird vor dem ersten Schnitt und nach dem Eingriff ein 4D transösophageales Echokardiogramm (4D TEE) mit Fokus auf der Mitralklappe erstellt. Aus beiden Aufnahmen werden zeitaufgelöste Computermodelle berechnet. Dies geschieht in mehreren Schritten. (1) Zunächst findet eine grobe Segmentierung von Gewebe und Blut durch graphenbasierte Algorithmen statt. (2) Als nächstes werden linkes Ventrikel (LV) und linkes Atrium (LA) detektiert, welche sich durch große Regionen aus Blut in der vorgegangenen Segmentierung auszeichnen. (3) Anschließend wird die Herzphase (Systole oder Diastole) für jeden aufgenommenen Zeitschritt festgestellt indem überprüft wird, ob LV und LA verbunden sind. (4) In systolischen Zeitschritten wird das Gewebe, das LV von LV trennt als Mitralklappe (MK) und Mitralannulus (MA) gekennzeichnet. (5) Mit dieser Detektion als Startpunkt, werden nun MA und MK mittels nicht rigider Registrierung auch in diastolischen Zeitschritten erkannt. (6) Zuletzt wird das Modell nach biomechanischen Regeln interpoliert, so dass es auch zwischen zwei Zeitschritten eine realistische Verformung annimmt. Die Schritte eins bis vier wurden bereits implementiert und teilweise evaluiert (siehe Kapitel 3). Die Schritte fünf und sechs stellen die nächsten Arbeitspakete dar.

3 Ergebnisse

Es wurden bereits Experimente durchgeführt, bei denen die Erkennungsrate der Herzphase für die einzelnen Zeitschritte evaluiert wurde. Ein Vergleich mit der Einschätzung eines Experten ergab eine Erkennungsrate von 96%. Des Weiteren wurde die Detektion des MA in systolischen Zeitschritten evaluiert, indem der erkannte MA Durchmesser mit den manuellen Messungen eines Experten verglichen wurde. Die mittlere Abweichung betrug dabei 3.34 mm.

4 Diskussion

Die bisherigen Ergebnisse bestätigen die Machbarkeit des vorgestellten Konzepts. Letztendlich soll das Modell die Form und die Bewegung der Mitralklappe automatisch mit konkreten Werten quantifizieren, was nach unserem Wissen mit noch keinem bestehenden Verfahren erreicht werden konnte. Der Chirurg kann die Behandlungsmethode mittels der erkannten Werte patientenspezifischer gestalten. Zudem werden neuartige Studien zu den Auswirkungen verschiedener Behandlungsmethoden ermöglicht. Zusammen sollte dies zu einer allgemein verbesserten Behandlung von Mitralklappeninsuffizienzpatienten beitragen.

Simulation von Aortenerkrankungen für die Therapieplanung basierend auf 4D MRT- und Phasenkontrastbildgebung

Sebastian Schalck¹, Tobias Müller^{2,3}, Roland Unterhinninghofen¹, Hendrik von Tengg-Kobligk^{2,3}
Hans-Ulrich Kauczor³, Rüdiger Dillmann¹

¹ Institut für Anthropomatik, Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

² DKFZ - Deutsches Krebsforschungszentrum, Abteilung Radiologie, Heidelberg, Deutschland

³ Klinik für diagnostische und interventionelle Radiologie, Universitätsklinik Heidelberg, Deutschland

Kontakt: sebastian.schalck@kit.edu

1 Problem

Bei der thorakalen endovaskulären aortalen Rekonstruktion (TEVAR) von Aortenaneurysmen treten vor allem mittel- und langfristig Komplikationen auf. Verantwortlich hierfür sind neben vollständigem Device-Versagen, insbesondere Endoleakagen an den Kontaktstellen von Endograft und der Aortenwand, sowie die Device-Migration. Die beiden letzteren Komplikationen resultieren hauptsächlich aus einem unzureichenden Kontakt des Endograft-Systems mit der Gefäßwand. Durch eine patientenindividuelle simulationsgestützte Endograft-Auswahl sowie -Positionierung soll eine Verbesserung der Therapieplanung erreicht werden und zudem die Komplikationsrate gesenkt werden. Dazu ist zunächst ein patientenspezifisches Aortenmodell zu erstellen, das die Gefäßbewegung und die (Blut-)Flussmuster während des Herzzyklus wiedergeben kann.

2 Methoden

Als bildgebende Modalität kommt die MRT zur Anwendung, da sie gegenüber der CT auch Flussinformationen für die Simulation zur Verfügung stellen kann. Diesen Vorteil erkaufte man sich mit einer größeren Auflösung und einer niedrigen SNR der Rohdaten. Im derzeitigen Workflow werden die Schichtbilder für die Modellbildung manuell segmentiert. Zur Erzeugung des geometrischen Modells dienen MRT-Morphologieaufnahmen des thorakalen Blutlumens. Eine Darstellung der Gefäßwandmorphologie ist aufgrund der geringen räumlichen Auflösung nicht möglich und muss künstlich generiert werden. Flusssensitive 4D MRT-Phasenkontrastaufnahmen (3D+t) liefern örtlich- und zeitlich aufgelöste Geschwindigkeitsfeldmessungen. Diese gehen in Form von Randbedingungen in die Simulation ein und garantieren eine patientenindividuelle Betrachtung des Blutflusses während der Simulation.

Für die Berechnung der Fluid-Struktur-Interaktion zwischen Blut und Gefäßwand wird die kommerzielle Simulationsplattform Ansys Workbench eingesetzt.

3 Ergebnisse

Gegenwärtig befindet sich das System im Aufbau. Erste qualitative Resultate deuten darauf hin, dass neben den aus den Phasenkontrastaufnahmen gewonnenen Randbedingungen auch Verschiebungsrandbedingungen aus morphologischen Aufnahmen an der Einlassöffnung und an den Auslassöffnungen nötig sind um patientenspezifische Flussmuster im Aortenbogen wiederzugeben.

4 Diskussion

Die 4D-Phasenkontrastaufnahmen werden mit einer einheitlichen Geschwindigkeitskodierung (VENC) aufgezeichnet. Eventuell notwendige Korrekturen der Phasenkontrastdaten in Regionen mit niedrigeren Geschwindigkeiten sind Teil laufender Untersuchungen.

Kalkhaltige Plaques lassen sich mittels flusssensitiven MRT Sequenzen derzeit nicht darstellen. Für aortale Plaques ist daher in Zukunft eine Möglichkeit zur Integration aus anderen bildgebenden Verfahren bzw. Sequenzen zu schaffen.

Konstruktion einer Wissensbasis für die minimal invasive Pankreaschirurgie

A.-L. Wekerle¹, D. Katić², H.-G. Kenngott¹, S. Speidel², B.-P. Müller-Stich¹

¹ Abteilung für Allgemein- und Viszeralchirurgie, Universitätsklinikum Heidelberg, Germany

² Institut für Anthropomatik, Karlsruher Institut für Technologie, Germany

Kontakt: Anna-Laura.Wekerle@med.uni-heidelberg.de

1 Problem

Laparoskopische Eingriffe des Pankreas sind für den Operateur sehr herausfordernd, weswegen sie auch selten in deutschen Kliniken durchgeführt werden. Zum einen bestehen gängige laparoskopische Schwierigkeiten wie der eingeschränkte Blick in das Operationsfeld und der limitierte Bewegungsradius. Zum Anderen erschweren anatomischen Verhältnisse, wie der Gefäßreichtum im Retroperitoneum den operativen Eingriff. Aus den genannten Problemen resultieren unter anderem lange Operationszeiten, welche die laparoskopische Pankreaschirurgie zu einem kostenintensiven Verfahren machen. Dies legt die Idee nahe, ein Assistenzsystem zu konstruieren, welches die Pankreaschirurgie zu einem operateurfreundlichen Eingriff macht. Im Folgenden wird die Konstruktion einer Wissensbasis als Teil eines solchen Assistenzsystems beschrieben.

2 Methoden

Zunächst wird eine Ontologie mithilfe des Softwareprogramms Protégé erstellt. Hierbei werden alle Begriffe in einer Hierarchie aufgelistet, die für die laparoskopische Pankreaschirurgie relevant ist. Dazu gehört das gesamte Spektrum der Oberbauchanatomie, aber auch alle chirurgisch relevanten Pankreasp pathologien, sowie diverse operative Instrumente und deren Anwendung. Die topographische Anatomie, Zugehörigkeiten, Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen Instrument und Organ bzw. Instrument und Instrument bzw. Organ und Organ werden ebenfalls in Protégé durch eine Beschreibungslogik erfasst. Als weiteren Bestandteil der Wissensbasis werden Regeln, gemäß dem „if-then“-Paradigma, formuliert. Dafür werden prägnante und relevante Operationsschritte verwendet, die eindeutig den Operationsabschnitt charakterisieren. Wir haben bisher sechs Abschnitte definiert: Operationsbeginn, Mobilisation, Dissektion, Transsektion, Bergung, Operationsende.

3 Ergebnisse

Um unsere Wissensbasis zu evaluieren haben wir Videomaterial von laparoskopischen Pankreasoperationen aufgenommen und mit SWAN-Suite annotiert. Mit der Annotation und drei unterschiedlichen Auswertern für logische Ausdrücke (RacerPro, HermiT und Pellet) wurden die Regeln auf Erkennungszeit und Erkennungsleistung getestet. Dabei erkannte RacerPro die Operationsschritte in 37ms, HermiT in 21ms und Pellet in 14 ms. Insgesamt ergab sich eine Erkennungsrate von durchschnittlich 91%.

4 Diskussion

Der Erstversuch zeigte trotz einer geringen Versuchszahl (n=2) vielversprechende Ergebnisse, welche noch mit weiteren Versuchen bestätigt werden müssen. Des Weiteren ist ein Ausbau der Regeln geplant, um die Erkennungsrate zu erhöhen. Die nächsten Schritte bezüglich des Assistenzsystems bestehen darin, weitere maschinelle Lernverfahren zu nutzen. Dabei sollen die bereits erwähnten Annotationen als Trainings- und Testeinheiten dienen. Die Verwendung von maschinellen Lernverfahren soll eine flexiblere Handlungsweise des Assistenzsystems und adäquates Handeln, auch bei geringem Informationsangebot, ermöglichen.

Entwicklung und Evaluation eines Trainingsmodells für die Periduralkatheteranlage mit elektronischem Lern- und Trainingsprogramm

L. Eckert¹, H. Kenngott¹, B. Müller¹

¹ Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Transplantationschirurgie, Universität Heidelberg, Deutschland

Kontakt: lauryeckert@googlemail.com

1 Problem

Die Periduralkatheteranlage gehört zu den Routinetherapien im Operationsalltag. Sie erfordert vom Anästhesisten viel Vorsicht und Erfahrung, da eine Fehllage zu erheblichen Nachwirkungen für den Patienten führen kann. Allerdings gibt es für Ärzte in der Ausbildung kaum Möglichkeiten ihre theoretischen Kenntnisse der Periduralkatheteranlage vor dem Einsatz am Patienten in die Praxis umzusetzen. Wobei besonders die thorakale Anlage eine große Herausforderung darstellt. Daher war es Ziel dieser Arbeit, ein Teilmodell der thorakalen Wirbelsäule zu erstellen, an dem die Anlage eines Periduralkatheters (PDK) trainiert werden konnte. Zusätzlich sollte das Modell mit einer Schnittstelle versehen werden, die es ermögliche, Signale vom Modell abzugreifen, um in einem eigens implementierten Programm, Lernkurven für jeden Trainierenden erstellen zu können.

2 Methoden

Durch die Segmentierung von CT-Datensätzen der Brustwirbelsäule konnte ein Oberflächenmodell von 3 Wirbeln am Computer erstellt werden. Dieses wurde mit einem weiteren Aufbau versehen, der den späteren Periduralraum simuliert. Um ein realistisches Gefühl der Knochenstruktur zu ermöglichen, wurde dieses Modell in Gips gedruckt. Die entsprechenden Gewebestrukturen wurden mit diversen Silikonen dargestellt. Auf dem zusätzlichen Aufbau, der an die Wirbelkörper anmodelliert wurde, wurde eine Platte angebracht, die Dura Mater simuliert.

Da elektrische Signale von dem Modell abgegriffen werden sollten, wurden von der Firma Future Carbon Kohlenstoff-Nanopartikel eingearbeitet. Diese ermöglichten eine elektrische Leitfähigkeit.

Das Lern- und Trainingsprogramm wurde in Scala geschrieben und wurde mit einer Datenbank verbunden um die entsprechenden Daten der einzelnen Trainierenden aufzunehmen und Lernkurven erstellen zu können.

3 Ergebnisse

Durch die Verwendung der unterschiedlichen Silikone für Haut und Muskelschichten und die Darstellung der Wirbelkörper durch Gips, ermöglicht das Modell eine sehr realitätsnahe Trainingsmöglichkeit für die PDK-Anlage. Bei Berühren der zusätzlich aufgebrachten Platte mit der Tuohy-Nadel (speziell geformte Nadel für die PDK-Anlage), weiß der Trainierende, dass er die Dura punktiert, und somit den Periduralraum durchdrungen, hätte. Die Folge für eine solche Fehllage können schwerwiegend für den Patienten sein.

Zur Zeit des Abfassens dieses Abstracts, war es noch nicht möglich das Programm mit dem Modul zu verbinden. In dem implementierten Programm wurden ein Lern- und ein Trainingsbereich eingerichtet. Der Lernbereich besteht aus verschiedenen Fachtexten und einem Video. Der personalisierte Trainingsbereich ermöglicht die Lernerfolge nachzuvollziehen, wobei zur Zeit des Erstellens dieses Abstracts noch Probleme bestanden, die Datenbank mit dem Programm zu verbinden.

4 Diskussion

In diesem Beitrag wurde ein Konzept für das Training einer thorakalen PDK-Anlage vorgestellt. Ersten Ergebnissen zufolge eignet sich Modell aufgrund der realitätsnahen Simulation der anatomischen Strukturen sehr gut zum Erlernen dieser Technik. In zukünftigen Arbeiten soll der gesamte beschriebene Workflow umgesetzt werden.

Oberflächenrekonstruktion für minimal-invasive Navigationssysteme

A. Groch¹, S. Hempel^{2,4}, S. Speidel³, Sven Haase⁴, H. Kenngott⁵, A. Seitel¹, S. Röhl³, Martin Wagner⁵, T. Kilgus¹,
K. Yung¹, S. Bodenstedt⁵, B. Müller-Stich⁵, H.-P. Meinzer¹, J. Hornegger⁴, L. Maier-Hein¹

¹ Abteilung Medizinische und Biologische Informatik, Deutsches Krebsforschungszentrum, Heidelberg, Deutschland

² Forschungsgruppe für Minimal-invasive Interdisziplinäre Therapeutische Intervention am Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München, Deutschland

³ Institut für Anthropomatik, Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

⁴ Lehrstuhl für Mustererkennung, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Deutschland

⁵ Klinik für Allgemein-, Viszeral- und Transplantationschirurgie, Universitätsklinikum Heidelberg, Deutschland

Kontakt: a.groch@dkfz.de

1 Problem

Minimal-invasive Techniken ersetzen mehr und mehr traditionelle offene Eingriffe in der Krebsdiagnose und Krebstherapie. Diese sogenannte Schlüsselloch-Technologie bringt erhebliche Vorteile für den Patienten mit sich, doch sie birgt auch Risiken, hauptsächlich durch ein eingeschränktes Blickfeld des Chirurgen und fehlende Tiefenwahrnehmung durch die endoskopischen 2D-Bilddaten. Erleichterung bringen hier bildgestützte Assistenzsysteme, die beispielsweise ein aus hochaufgelösten Volumendaten präoperativ akquiriertes Modell in das Endoskopvideo des Chirurgen einblenden. Um eine zuverlässige Registrierung dieses präoperativ erstellen Patientenmodells auf die aktuell vorliegende Patientenanatomie zu ermöglichen, ist die Akquise intraoperativer Lageinformation der Zielregion erforderlich. Dies wird im Kontext von laparoskopischen Eingriffen häufig mit der intraoperativen Rekonstruktion der im Endoskopbild sichtbaren Oberfläche umgesetzt. Ziel dieses Projekts ist es, bestehende Rekonstruktionsverfahren zu evaluieren und ein auf der neuen Time-of-Flight (ToF) Technologie basierendes Verfahren gekoppelt mit herkömmlichen Methoden zu entwickeln.

2 Methoden

Die meisten Verfahren zur Oberflächenrekonstruktion im Kontext von laparoskopischer Bildakquisition basieren auf Stereo- oder *Multiple View*-Techniken, bei denen mittels Korrespondenzanalyse auf zwei oder mehreren Bildern die zugehörigen 3D-Punkte berechnet werden. Diese Verfahren bringen gute Ergebnisse bei stark texturierten Organoberflächen. Ist die Textur des zu rekonstruierenden Organs hingegen sehr homogen, ist die Korrespondenzanalyse und damit die Oberflächenrekonstruktion schwierig. Eine Alternative hierzu bietet die noch junge ToF-Kameratechnik, bei der die von Distanz bzw. Flugdauer abhängige Phasenverschiebung eines modulierten Lichtsignals nahe dem Infrarotspektrum gemessen wird. Erst kürzlich wurde das erste Endoskop, das auf der neuen ToF-Technik basiert, vorgestellt.

Um für die Evaluation der verschiedenen Rekonstruktionsmethoden einen zuverlässigen Oberflächenvergleich zu ermöglichen, wurden mehrere Organe mit farbigen Markern bestückt. Als Goldstandard dienten extrahierte Oberflächen jedes Organs aus CT-Aufnahmen. Durch eine punktbasierte Oberflächenregistrierung anhand der sowohl im CT als auch im Endoskopbild segmentierten Marker wurden alle rekonstruierten Oberflächen auf die Ground-Truth-Oberfläche transformiert. Dadurch konnten die einzelnen Oberflächen anhand der Distanz zur Ground-Truth-Oberfläche wie auch anhand der Krümmungseigenschaften mittels Oberflächendeskriptoren verglichen werden.

3 Ergebnisse

Die Studie zeigt, dass die verschiedenen Verfahren unter unterschiedlichen Problemen leiden. Während die Stereo- und Multiple View Methoden fehleranfällig bei schlecht texturierten Oberflächen und sehr rechenintensiv sind, kann die ToF-Endoskopie zwar mit Video-Aktualisierungsrate ein dichtes Tiefenbild erzeugen, bringt aber durch ihre noch lange nicht vollständig erforschte Technik etliche Fehler in die Messung mit ein.

4 Diskussion

In dieser in-vitro Evaluation wurde erstmals die Oberflächenrekonstruktion mittels der neu entwickelten ToF-Endoskopie-Technik mit State-of-the-Art-Rekonstruktionsmethoden verglichen. Weitere Arbeiten beschäftigen sich darauf aufbauend mit der Fusion der ToF-Endoskopie und herkömmlichen Rekonstruktionsmethoden.