

Entwicklung eines Navigationssystems für die laparoskopische Prostatektomie

Matthias Baumhauer¹, Götz Richter², Carsten Gutt³,
Jens Rassweiler⁴, Hans-Peter Meinzer¹ und Marcus Vetter¹

¹Abteilung für Medizinische und Biologische Informatik,
Deutsches Krebsforschungszentrum (DKFZ), 69120 Heidelberg

²Universitätsklinikum Heidelberg, Abteilung Radiodiagnostik

³Chirurgische Klinik der Universität Heidelberg

⁴Urologische Klinik Heilbronn, SLK Kliniken,

Akademisches Lehrkrankenhaus der Universität Heidelberg

Email: m.baumhauer@dkfz.de

Zusammenfassung. Wir stellen hier ein neues computergestütztes Navigationsverfahren zur Unterstützung der laparoskopischen Prostatektomie bei Prostatakarzinomen vor. Durch den intraoperativen Einsatz von transrektalem Ultraschall in Verbindung mit Navigationshilfen soll es ermöglicht werden, dem Chirurgen verdeckte oder schwer erkennbare Risikostrukturen direkt in das Endoskopiebild einzublenden. Ziel dieses Verfahrens ist es, die Wahrscheinlichkeit von Läsionen benachbarter Organe zu minimieren sowie Rezidivfälle nach Resektionen zu vermeiden. Darüberhinaus soll die Modellierung der gesamten Organatopologie auf einem weiteren Bildschirm eine Verbesserung der Orientierung im Beckenraum und somit eine Verkürzung der Operationsdauer und Abflachung der Lernkurve dieses komplexen Eingriffs ermöglichen.

1 Einleitung und Motivation

Durch eine in den letzten Jahren immer weiter ansteigende Inzidenz von Prostatakarzinomen ist die Tumorerkrankung der Vorsteherdrüse heute die häufigste Krebsursache bei Männern in Deutschland. Solange das Karzinom bei der Diagnose auf das Organ beschränkt bleibt, hat sich die radikale Prostatektomie, eine Totalresektion von Prostata und Samenblasen, als eine der sichersten Therapiemethoden etabliert. Insgesamt belegt eine relativ niedrige Rate an intraoperativen Komplikationen (5 - 13%) den hohen Qualitätsstandard der Prostatektomie. Dennoch zeigen längerfristige onkologische Ergebnisse verschiedener Behandlungszentren eine Rezidivrate der Krebserkrankung von 7 - 17% bei Patienten zwischen drei und fünf Jahren nach der Operation. Eine hohe Wahrscheinlichkeit, an permanenter Impotenz zu leiden, sowie ein mäßiges Risiko (15 - 31%) der Inkontinenz gelten als weitere, die Lebensqualität der Patienten einschränkende Nebeneffekte des Eingriffs. Im Rahmen dieses Projektes wird ein computergestütztes Navigations- und Informationssystem zur Unterstützung der minimalinvasiven Prostatektomie entwickelt. Ziel ist die Visualisierung nicht

sichtbarer und verdeckter Strukturen (z.B. potentiell tumorinfiltriertes Gewebe, Harnröhre, Rektum, etc.) direkt im Videobild des Endoskops (siehe Abb. 2) mit Hilfe von Augmented Reality. Das System soll somit einen Beitrag dazu leisten, dass nach der Operation keine Tumorzellen im Körper zurückbleiben und zugleich möglichst viel gesundes Gewebe geschont wird.

2 Methoden

2.1 Anforderungsanalyse

In einer Analyse der Projektanforderungen wurden die medizinischen und technischen Voraussetzungen für ein Navigationssystem in der Prostatachirurgie in enger Abstimmung mit den Chirurgen erarbeitet. Vor der Operation kann mit Hilfe unterschiedlicher Bildgebungsverfahren (CT, MRT) ein Modell der Prostata erstellt werden, Anwendung findet diese Vorgehensweise bereits heute vor allem im Bereich der Brachytherapie von Prostatakarzinomen. Voraussetzung für eine unterstützende Navigation während der Prostataresektion ist jedoch zudem die genaue Kenntnis von Lage und Ausmaße des Karzinoms. Hierfür können statistisch etwa 40 - 50 % aller Karzinome mittels Ultraschall oder Magnetresonanztomographie lokalisiert werden. Zusätzlich wurden in den letzten Jahren verschiedene neuartige Ansätze der Bilddatenverarbeitung und -akquirierung entwickelt. Sie verfolgen das Ziel, die Sensitivität der Diagnostik bei Prostatakrebs zu erhöhen und beinhalten aber auch Methoden, die verwertbare Informationen für eine intraoperative Navigation liefern können:

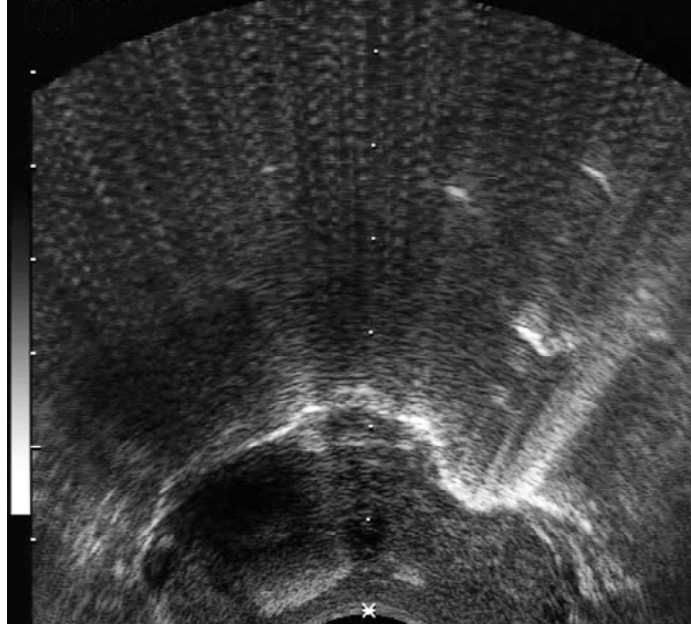
1. Durch Elastographie können Prostatakarzinome anhand ihrer eingeschränkten Elastizität visualisiert werden [1].
2. Computergestützter transrektaler Ultraschall (C-TRUS) ist ein Verfahren zur Bestimmung der Lage von Karzinomen mittels Computeranalyse von B-Mode Ultraschalldaten [2].
3. Neu entwickelte Kontrastmittel in Verbindung mit Harmonic Imaging erhöhen die Sensitivität der ultraschallgestützten Prostatauntersuchung [3].

Neben der präoperativen Erfassung der Organtopologie des kleinen Beckens stellt die eigentliche Navigation in diesem Körperbereich durch das Fehlen geeigneter anatomischer Fixpunkte eine große Herausforderung dar. Die starke Deformierbarkeit der Viszeralorgane erschwert zusätzlich die Modellierung der Gegebenheiten. Durch den Einsatz einer transrektalen Ultraschallsonde während der laparoskopischen Prostatektomie ist es bei diesem Navigationsansatz nicht nötig, anatomische Fixpunkte ausserhalb der Prostata mit in das System einzubeziehen. Die Verwendung eines Deformationsmodells unter Zuhilfenahme der FEM ist vorgesehen, für eine erfolgreiche Navigation bei der Totalresektion der Prostata jedoch nicht von grundlegender Bedeutung.

2.2 Transrektaler Ultraschall zur intraoperativen Bildgebung

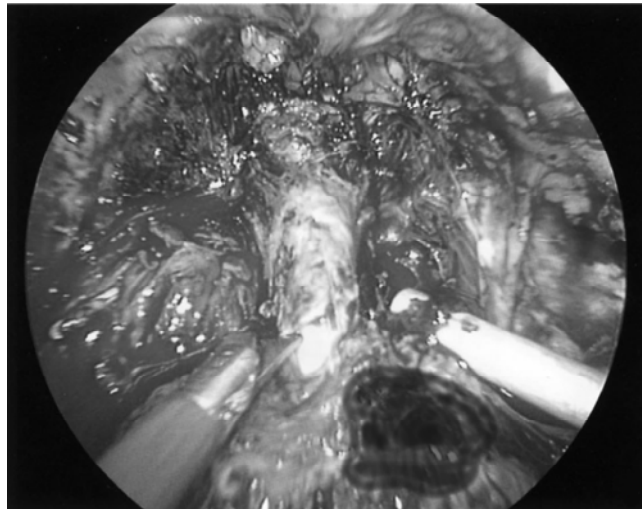
Die Prostata ist anatomisch direkt mit dem Rektum verwachsen und bietet hierdurch eine unkomplizierte Möglichkeit zur Bilddatenakquirierung für den

Abb. 1. Die B-Mode Ultraschallaufnahme zeigt einen transversalen 2D Schnitt der Prostatakapsel während der laparoskopischen Prostatektomie. Der Chirurg präpariert im Bereich des linken Prostatalappens mit Hilfe einer Elektrokoagulation, mittig ist die Harnröhre zu sehen.



prä- und intraoperativen Einsatz mittels transrektalem Ultraschall (TRUS, siehe Abb. 1). Auch im Bezug auf eine Erkennung der Organ Grenzen hat sich dieses Verfahren bereits bewährt [4, 5]. In [6] wurden die medizinischen Vorteile einer mit Hilfe von transrektalem Ultraschall gestützten Prostatektomie erläutert. Hierzu zählen u. a. eine verbesserte Organidentifikation und gesicherte Präparationsmöglichkeiten im Bereich des Rektums. Wegen des hohen Zeitaufwands für eine manuelle Auswertung jeder einzelnen 2D Aufnahme der Prostata konnte sich dieses Vorgehen bislang jedoch nicht durchsetzen. Von unserem Navigationssystem wird dieser Ansatz aufgegriffen und die resultierenden Erkenntnisse werden für den Operateur auf einfache Weise zeitnah zugänglich gemacht. Zusätzlich zum transrektalen Ultraschall werden Navigationshilfen benötigt, die sowohl in den Aufnahmen des Ultraschallgeräts, als auch im Videobild des Monoendoskops sichtbar sind. Vergleichbare Navigationshilfen, die als optischer und zugleich auch als Ultraschallmarker eingesetzt werden, sind uns aus der Literatur nicht bekannt. In ersten Modellversuchen hat sich eine Navigationshilfe bewährt, die in Form und Aussehen einer Stecknadel ähnelt. Die Marker werden kurz vor Navigationsbeginn intraoperativ frei platziert so in die Prostata eingebracht, dass der Kopf der Navigationshilfe direkt auf der Organoberfläche anliegt. Die Gefahr einer Tumorzellstreuung kann hierbei völlig umgangen werden, indem die Navigationshilfen erst nach der vollständigen Organresektion entnommen

Abb. 2. Das Navigationsbeispiel zeigt eine mögliche Darstellung eines Prostatakarioms im Bereich des Prostataapex zum Zeitpunkt des Einschnitts der Harnröhre. Die transparente, farbige Einblendung in das Monoendoskopiebild soll den Chirurgen während der Intervention nicht behindern und einen räumlichen Eindruck vermitteln.



werden. Während des Eingriffs werden Prostata und Navigationshilfen durch weitere TRUS-Scans sukzessive mit dem vor der Operation erstellten 3D Modell registriert.

2.3 Visualisierung und Camera Pose Estimation

Eine Visualisierung im Videobild des Operators erfordert die Einbeziehung der Endoskopiekamera in die Navigation. Auf ein gesondertes Tracking hierfür wird in unserem System verzichtet. Stattdessen können anhand der im Videobild sichtbaren Marker und ihrer aus den TRUS Daten bekannten, relativen Position zueinander, Kameraposition und Orientierung analytisch errechnet werden. Für eine zuverlässige Lösung dieses sogenannten Camera Pose Estimation Problems werden im allgemeinen drei bis vier, in besonders kritischen Konfigurationen fünf Punkte bzw. Navigationshilfen sowie eine kalibrierte Kamera einschließlich eines einzelnen Kamerabildes der Punkte benötigt. In den letzten Jahren wurden hierzu mehrere mathematische Ansätze [7, 8] entworfen, die ein i.d.R. überbestimmtes lineares Gleichungssystem entweder mit komplett linearen Methoden, oder mit Hilfe von partiellen Differentialgleichungen lösen und dabei eine eindeutige mathematische Lösung des Problems liefern. Unterschiede in Bezug auf Störanfälligkeit, Umgang mit kritischen Punktconstellationen, Zeitverhalten und Nutzbarkeit im medizinischen Umfeld werden derzeit von uns untersucht. Hierfür ist auch eine Implementation mehrerer Pose Estimation Algorithmen in das Open Source Framework MITK [9] geplant.

Das System befindet sich momentan in der Entwicklung. Erste Versuche an einem Prostata-Phantom werden derzeit durchgeführt und dienen der Beurteilung unterschiedlicher Navigationshilfen. Anhand eines CT Datensatzes des Prostata-Phantoms sowie eines kalibrierten monoskopischen Endoskops wird zudem die Praxistauglichkeit der Camera Pose Estimation Algorithmen evaluiert. Zusätzlich wurden an drei Patienten transrektale Ultraschallaufnahmen während der laparoskopischen Prostatektomie durchgeführt. Die Aufnahmen belegen eine Auswertbarkeit der Daten über alle relevanten Operationsschritte bis hin zur Präparation der Prostata am Rektum selbst. Sowohl die Analyse der intraoperativ akquirierten, transrektalen Ultraschalldaten, als auch die Versuche mit dem Prostataphantom zeigen sich Erfolg versprechend. Anhand einer prototypischen Implementierung des gesamten Konzepts liegt das weiterführende Augenmerk auf einer Evaluation des Systems und speziell auf der erreichbaren Genauigkeit im Navigationseinsatz.

Literaturverzeichnis

1. Alam SK, et al. Prostate Elastography - Preliminary in vivo Results. In: Proc. of SPIE 2005. vol. 5750; 2005. p. 339-345.
2. Loch T. Computergestützter transrektaler Ultraschall (C-TRUS) in der Diagnostik des Prostatakarzinoms. Der Urologe 2004 2005;43:1377-1384.
3. Halpern E, et al. Detection of prostate carcinoma with contrast-enhanced sonography using intermittent harmonic imaging. Cancer, Published Online 20 October 2005;.
4. Wu Y, et al. Automatic Prostate Boundary Recognition in Sonographic Images Using Feature Model and Genetic Algorithm. J Ultrasound Med 2000;19:771-782.
5. Shao F, et al. Prostate Boundary Detection From Ultrasonographic Images. J Ultrasound Med 2003;22:605-623.
6. Ukimura O, et al. Real-Time Transrectal Ultrasonography during Laparoscopic Radical Prostatectomy. J Uro 2004;172:112-118.
7. Quan L, Lan Z. Linear N-Point Camera Pose Determination. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence 1999;21:774-780.
8. Reid G, et al. Hybrid method for solving new pose estimation equation system. MM Research Preprints 2004;23:215-225.
9. Wolf I, et al. The Medical Interaction Toolkit. J Med Image Anal 2005;9:594-604.