

Martin Wagner

Dr. med.

## **Entwicklung und Evaluation von Methoden zur Kompensation der Organbewegung und –deformation in der navigierten Viszeralchirurgie am Beispiel der laparoskopischen Rektum- und Leberchirurgie**

Fach/Einrichtung: Chirurgie

Doktorvater: Prof. Dr. med. Beat Peter Müller

### Einleitung

Navigation oder bildgestützte Chirurgie ermöglicht es, radiologische Bildgebung im Operationssaal zu nutzen, indem die verarbeiteten Bilddaten dreidimensional visualisiert und die Instrumente in Relation zu Risiko- oder Zielstrukturen dargestellt werden. In Fachgebieten wie Neurochirurgie und Orthopädie werden Navigationssysteme klinisch eingesetzt und ihr Nutzen ist durch Studien belegt.

In der Viszeralchirurgie konnte sich Navigation bisher nicht etablieren. Die Bilddaten, auf denen die Navigation beruht, verlieren durch Bewegung und Deformation des Weichgewebes ihre Validität. Diese Organbewegung und -deformation sind bedingt durch Herzschlag, Atmung und iatrogene Manipulation.

Die Ziele dieser Arbeit waren daher die Entwicklung und Evaluation neuer Methoden zur Kompensation der Organbewegung und -deformation in der navigierten laparoskopischen Viszeralchirurgie. Ein menschenähnliches Operationsphantom wurde als methodische Grundlage für die weiteren Versuche erarbeitet. Es wurde das Organtracking zur Deformationskompensation am Rektumphantom untersucht. Außerdem wurde ein statisches Navigationssystem für die laparoskopische Ösophagektomie im Tierversuch für die laparoskopische Kolorektalchirurgie verwendet. Für eine laparoskopische Leberresektion im Hybrid-OP wurden intraoperative Cone-beam Computed Tomography (CBCT) und Augmented Reality (AR) im Phantomversuch und einer klinischen Machbarkeitsstudie evaluiert.

### Material und Methoden

Als menschenähnliches Operationsphantom wurde mit dem Open Heidelberg Laparoscopy Phantom (OpenHELP) eine Evaluationsplattform für die computerassistierte Chirurgie entwickelt. Dieses Phantom basiert auf einer Computertomographie (CT). Die Organe wurden segmentiert, per Rapid Prototyping fabriziert und aus Silikon abgegossen. OpenHELP ist modular aufgebaut und besteht aus einem dreiteiligen lasergesinterten Kunststoff-Torso und den Organen des Abdomens aus Silikon. Zur geometrischen Evaluation der Produktionsmethode wurden ein Gipsausdruck des Rektums und zehn Abgüsse des Rektums CT-oberflächenbasiert miteinander verglichen. Als Referenz diente das Ursprungs-CT für die absolute Reproduktionsgenauigkeit bzw. Silikonrektum 1 für die relative Reproduktionsgenauigkeit der Silikonorgane untereinander. Für den haptischen Realismus wurden die Gewebeeigenschaften dieser elf Organe von sechs Chirurgen auf einer visuellen Analogskala von 1 (Gipsrektum) bis 10 (humanes Rektum intraoperativ) verblindet bewertet. Das Organtracking am Rektum wurde mit dem Beckenmodul des OpenHELP evaluiert. Im Lumen des Rektum wurde ein elektromagnetischer Sensorkatheter des Aurora®-Systems als Organsensor befestigt. Die Positionsveränderung von fünfzehn Zielpunkten am Rektum wurde nach dessen Mobilisation aus dem pelvinen Bindegewebe in verschiedenen Zugweiten mit einem optisch getrackten Pointer (Polaris®) gemessen. Bei n=14 Versuchsdurchläufen wurden insgesamt 2100 Messungen aufgenommen. Retrospektiv wurden verschiedene

mathematische Modelle angewandt, um aus der Bewegungsinformation des Organsensors die Deformation des Rektum zu berechnen. Modell 1 hatte keine Bewegungskorrektur, Modell 2 hatte eine Bewegungskorrektur um den Vektor des Organsensors und die Modelle 3-7 waren ineinander genestete lineare Regressionsmodelle steigender Komplexität zur Modellierung der Weichgewebedeformation.

Die statische Navigation im Tierversuch wurde mit n=7 Hausschweinen getestet. In einer kontrastmittelverstärkten CT-Aufnahme wurden präoperativ die Ureteren, große arterielle Bauchgefäße und das Skelett segmentiert. Während der anschließenden laparoskopischen Operation mit dem Navigationssystem Heidelberg Minimally Invasive Navigation Device (HD-MIND) diente das Polaris®-System zur Lokalisierung der Instrumente. Vorab definierte Risikostrukturen wurden aufgesucht und entlang ihres Verlaufs wurden mit dem laparoskopischen Instrument Messungen aufgenommen, deren Position anschließend mit der Organposition im Navigationssystem verglichen wurde.

Die Leberresektion im Hybrid-OP wurde mit der kommerziellen Syngo iPilot®-Software durchgeführt. Im Phantomversuch wurde die Systemgenauigkeit aus verschiedenen Fluoroskopiewinkeln sowie die Zielführungsgenauigkeit des Chirurgen bei einem idealen beziehungsweise einem ungünstigen Winkel zur Leberoberfläche untersucht. In der klinischen Machbarkeitsstudie wurde ein 50-jähriger Patient mit einer Läsion suspekt für ein Hepatozelluläres Karzinom (HCC) in Segment 7 unter Zielführung mit Syngo iPilot® im Hybrid-OP laparoskopisch atypisch segmentreseziert.

## Ergebnisse

Die Evaluation des menschähnlichen Operationsphantoms OpenHELP ergab für die geometrische Genauigkeit der Silikonorgane bei einem Vergleich der Oberflächen einen durchschnittlichen Root Mean Square Error von 2,26mm verglichen mit dem digitalen Ursprungsrektum und 1,62mm verglichen mit Silikonrektum 1. Der haptische Realismus ergab auf der visuellen Analogskala für drei Organe im Median niedrige Werte (2,3 / 2,25/ 1,3), für ein Organ einen mittleren Wert (3,9) und für den Rest hohe Werte über 6. Rektum 10 erreichte mit 7,7 den höchsten Wert und wurde daher für das Organtrackingexperiment genutzt.

Das Organtracking am Rektum erreichte einen Target Registration Error (TRE) von  $32,8 \pm 20,8$ mm ohne die Korrektur durch den Organsensor (Modell 1). Eine Translation um den Bewegungsvektor des Organsensors (Modell 2) führte zu einem TRE von  $6,8 \pm 4,8$  mm. Eine Verbesserung der Genauigkeit mithilfe mathematischer Modellierung (Modelle 3 bis 7) konnte nur bei einer Einzelbetrachtung aller Zielpunkte (Modell 7) erreicht werden und führte zu einem TRE von  $2,9 \pm 1,4$  mm.

Das statische Navigationssystem für die Rektumchirurgie erreichte im Tierversuch einen Gesamt-TRE von  $6,8 \pm 4,4$ mm und organspezifische Werte zwischen  $5,3 \pm 3,2$ mm (Ureter rechts) und  $13,6 \pm 5,3$ mm (Arteria mesenterica inferior). Dabei waren 98,8% der Werte unter 20mm und 77,7% der Werte unter 10mm.

Die Leberresektion im Hybrid-OP hatte im Phantomversuch eine Systemgenauigkeit von durchschnittlich  $0,93 \pm 0,54$ mm und maximal 2,49mm. Der Zielführungsfehler des Chirurgen betrug im idealen Winkel zur Leberoberfläche  $0,45 \pm 0,6$ mm gegenüber  $1,25 \pm 1,01$ mm für einen ungünstigen Winkel. Die klinische Machbarkeitsstudie konnte in 135 Minuten mit einem Blutverlust von 300ml durchgeführt werden. Die pathologische Aufarbeitung des Resektats bestätigte ein HCC, pT1, pNx, G2, und eine R0-Resektion.

## Diskussion

Verschiedene Methoden zur Kompensation von Organbewegung und -deformation wurden entwickelt und konnten erfolgreich evaluiert werden. Zusammenfassend konnte gezeigt

werden, dass sich Organtracking und intraoperative Bildgebung hierfür eignen, zukünftig möglicherweise in Kombination mit Weichgewebemodellierung.

Ein menschenähnliches Operationsphantom als Evaluationsplattform für die computerassistierte Chirurgie wurde realisiert. Das OpenHELP diente dabei nicht nur für die Phantomversuche dieser Arbeit, sondern auch für verschiedene weitere Forschungsprojekte. Der Vorteil im Unterschied zu vergleichbaren Phantomen aus der Literatur waren die modulare Struktur und der Bezug zu einem menschlichen CT. Perspektivisch soll es um weitere physiologische Funktionen wie Blutfluss und Atmung oder die Möglichkeit zur elektrischen Koagulation erweitert werden.

Das Organtracking am Rektumphantom lieferte selbst mit einer einfachen Korrektur der Organbewegung gute Ergebnisse. Die Evaluationsmethode ist etabliert und kann in den Tierversuch übertragen werden. Die Kombination mit einem mathematischen Weichgewebemodell kann die Bewegungskompensation weiter verbessern.

Statische Navigation in der laparoskopischen Rektumresektion ermöglicht auch ohne Kompensation von Organbewegungen die korrekte Visualisierung von Risikostrukturen im Retroperitoneum. Die Weiterentwicklung des Mensch-Maschine-Interface durch AR im Laparoskopiebild oder Virtual Fixtures für Telemanipulatoren stellen weitere Forschungsrichtungen dar.

Leberchirurgie im Hybrid-OP ist machbar. Die kommerziell erhältliche Software Syngo iPilot® lieferte im Phantomversuch gute Ergebnisse und konnte klinisch eingesetzt werden. Der Hybrid-OP ermöglicht der Viszeralchirurgie intraoperative Bildgebung in einer neuen Modalität, da bisherige Navigationssysteme vor allem mit Ultraschall arbeiteten. Durch Bild-zu-Bild-Registrierung in das CT könnten multimodale präoperative Bilddaten intraoperativ zukünftig noch besser genutzt werden und die Operationsplanung in kritischen Operationsphasen unterstützen. Insbesondere in der Laparoskopie könnte eine verbesserte Übersicht das Indikationsspektrum erweitern. Über navigierte laparoskopische Ablationsverfahren könnte die Zusammenarbeit mit Interventionalisten intensiviert und das therapeutische Spektrum erweitert werden.