Felix Nickel
Dr. med.

Accuracy Assessment of a Navigation System and Analysis of Soft Tissue Deformation in an Experimental Model for Minimally Invasive Esophagectomy

Promotionsfach: Chirurgie

Doktorvater: Priv.-Doz. Dr. med. Beat Müller

In der vorgelegten Arbeit wurde ein selbst entwickeltes Navigationssystem für die minimal invasive Ösophagektomie im Tierversuch in einem interdisziplinären Projekt getestet. Hierzu wurde ein geeignetes Großtiermodell identifiziert und auf Vergleichbarkeit zum Menschen hinsichtlich der Größe und der Deformationsparameter des Ösophagus untersucht. Die respiratorische Organdeformation wurde im Tiermodell im Detail untersucht. Der Ösophagus wurde endoskopisch markiert und mittels drei- und vierdimensionaler Computertomographien untersucht. Die Korrelation von Atmung, Organdeformation des Ösophagus und Bewegung der Hautoberfläche wurde im Hinblick auf die Weiterentwicklung des Navigationssystems analysiert. Zur Evaluation der Anwendbarkeit der Ergebnisse der Analyse der Organdeformation auf die intraoperative Situation wurden intraoperative Faktoren berücksichtigt. Das bei laparoskopischen Operationen notwendige Pneumoperitoneums beeinflusste hierbei die Position und respiratorische Organdeformation des Ösophagus. Zur Genauigkeitsevaluation des Navigationssystems im Tiermodell wurde eine eigene Messmethode entwickelt. Mit der entwickelten Methode wurde die Genauigkeit des Navigationssystems am Ösophagus in einer realen Operationsumgebung getestet und mit einer statischen im Phantomversuch verglichen. Die Fehlerquellen des Navigationssystems im Bereich der Weichgewebsdeformation im Tiermodell wurden im Detail analysiert. Hierbei wurden insbesondere intraoperative Faktoren untersucht.

Die respiratorische Organdeformation im verwendeten Tiermodell entsprach in den verschiedenen Abschnitten des Ösophagus den vom Menschen bekannten Werten. Die Organdeformation im zervikalen Ösophagus war mit 1.3 mm ± 1.1 mm im nativen Zustand ähnlich dem Menschen gering ausgeprägt. Der Ösophagus bewegte sich mit der Atmung in den unteren thorakalen und abdominellen Abschnitten stärker mit 7 mm ± 3.3 mm und 6.9

mm ± 2.8 mm und zeigte hier eine signifikante Korrelation mit der Atmung und der Oberflächenbewegung von Thorax und Abdomen. Sowohl die Position, als auch die respiratorische Organbewegung des Ösophagus wurden durch das Anlegen des Pneumoperitoneums beeinflusst. Die respiratorische Organdeformation war nach Anlage des Pneumoperitoneums in den unteren thorakalen und abdominellen Abschnitten mit 3.9 mm ± 2.7 mm und 4.2 mm ± 2 mm geringer augeprägt als im nativen Zustand (p=0.05 bzw. p=0.02). Im zervikalen Ösophagus erhöhte sich die respiratorische Deformation auf 2.8 mm ± 1.5 mm (p=0.02) gegenüber dem Zustand ohne Pneumoperitoneum. Im Vergleich konnte die Expirationsstellung ohne Pneumoperitoneum als präoperative respiratorische Stellung identifiziert werden, die am besten den intraoperativen Verhältnissen bzw. Organpositionen nach Anlage des Pneumoperitoneums entsprach. Die Positionsänderung des Ösophagus durch Anlage des Pneumoperitoneums betrug durchschnittlich 8.2 mm ± 1.2 mm und die der Hautmarker 13.9 mm ± 1.2 mm. An den abdominellen Hautmarkern war die Positionsänderung durch Anlage des Pneumoperitoneums mit 32 mm ± 9.1 mm am höchsten. In einer Analyse der vierdimensionalen Computertomographien des Ösophagus konnte die respiratorische Organdeformation im Detail besser untersucht werden als in der dreidimensionalen Computertomographie. Es zeigte sich bei der Untersuchung der Organdeformation des Ösophagus über mehrere Atemzyklen eine Reproduzierbarkeit der Positionen in den verschiedenen Phasen des Atemzyklus und es konnte ein Radius zur gemittelten Position definiert werden, welcher den Ösophagus zu einem gewünschten Zeitanteil enthielt. Im Mittel war hierbei ein Radius von 3.5 mm ± 0.9 mm im nativen Zustand und ein Radius von 2.5 mm ± 1.2 mm nach Anlage des Pneumoperitoneums notwendig um 100% der Positionen des Ösophagus im Atemzyklus über die Zeit abzudecken. Diese Erkentnisse können genutzt werden, um die Verlässlichkeit und die einzukalkulierenden Ungenauigkeiten bei navigierten und bildbasierten Eingriffen am Ösophagus abzuschätzen.

Es wurde eine Testmethode für das Navigationssystem entwickelt, um die Genauigkeit im realistischen Operationsumfeld im experimentellen Tiermodell zu testen und die Fehlerquellen für Ungenauigkeiten des Systems zu analysieren. Das Navigationssystem wurde im experimentellen Tiermodell auf die Gesamtgenauigkeit am Zielorgan Ösophagus getestet und es wurde eine Analyse der für den Navigationsfehler relevanten Fehlerquellen durchgeführt. Die Gesamtgenauigkeit des in diesem Projekt entwickelten Navigationssystems für die minimal invasive Ösophagektomie lag in Phantomversuchen in einer statischen Umgebung bei 1.75 mm ± 0.8 mm Gesamtfehler. Im Tierversuch zeigte sich eine Genauigkeit

von 11.2 mm ± 2.4 mm des Navigationssystems am Ösophagus. Als Ursachen für die höhere Ungenauigkeit des Navigationssystems im Tierversuch am Ösophagus konnten verschiedene Quellen für Weichgewebsdeformation identifiziert werden. Als relevante präoperative Faktoren konnten die Atmung und Lagerung identifiziert werden. Die Lagerung in 25° steiler Anti-Trendelenburg Position während der Operation führte zu einer Vergrößerung des Gesamtfehlers des Navigationssystems an den Hautmarkern auf 14.6 mm ± 2.7 mm in 25° Lagerung verglichen mit 3.2 mm ± 1.3 mm in 0° Rückenlage. Als intraoperativ relevante Faktoren für die Organdeformation des Ösophagus wurden das Anlegen eines Pneumoperitoneums identifiziert mit 8.2 mm ± 1.2 mm, die Veränderung der anatomischen Verhältnisse durch Gewebsdissektion während der Operation mit 8.5 mm ± 1.9 mm, sowie die chirurgische Manipulation der Organe durch Zug- und Druckkräfte während des Eingriffs. Diese verschiedenen Einflüsse führten zu dem ermittelten Gesamtfehler von 11.2 mm ± 2.4 mm des Navigationssystems am Ösophagus.

Mit der erreichten Genauigkeit ist zu erwarten, daß die Orientierung während einer minimal invasiven Ösophagektomie durch ein Navigationssystem bereits erheblich erleichtert werden kann. Die Identifikation von Zielstrukturen wie Lymphknoten, Tumor und Resektionshöhe am Ösophagus könnte durch ein Navigationssystem mit der aktuellen Genauigkeit bereits unterstützt werden. Zur Vermeidung und Schonung von Risikostrukturen wie Gefäßen, Atemwegen und Nerven durch Definition eines einzuhaltenden Sicherheitskorridors mit Sicherheitsabstand der scharfen Instrumentenspitzen von den Risikostrukturen sollte die Genauigkeit des Navigationssystems jedoch höher sein. Im Falle des Ösophagus im engen Medistinalraum wäre sonst bei einer Genauigkeit des Systems von 11.2 mm ± 2.4 mm der Arbeitsraum zu stark eingeschränkt, da die Ziel- und Risikostrukturen in unmittelbarer Nachbarschaft liegen. Um eine höhere Genauigkeit des Navigationssystems zu erreichen, können die aus diesem Forschungsprojekt entstandenen Erkenntnisse umgesetzt werden. In der Zukunft werden Kompensationsmechanismen für die Organdeformation in das Navigationssystem integriert, um die Genauigkeit des Systems in der realen Operationssituation zu erhöhen. Die Korrelation der Ösophagusdeformation mit der Oberflächenbewegung und Atmung kann es in der Zukunft ermöglichen, durch eine Verfolgung der Oberflächenbewegung und Atmung Rückschlüsse auf die Organposition zu ziehen. Hierdurch kann eine Anpassung der präoperativen Computertomographiedaten an den intraoperativen Zustand mit potentiell höherer Genauigkeit erreicht werden. Die chirurgische Manipulation als relevante Fehlerquelle für die Genauigkeit der Navigation kann durch die

Nutzung von Sensoren direkt am Zielorgan, z.B. durch elektromagnetisches Tracking, kompensiert werden. Die Position von Organen und Tumoren kann direkt verfolgt und mit den weiteren Koordinaten des Navigationssystems im Sinne eines dynamischen Navigationssystems in echtzeit aktualisiert werden. Die Genauigkeit des Navigationssystems kann in Zukunft weiter erhöht werden durch die Implementierung von Kompensationskomponenten für die respiratorische und iatrogene Organdeformation.