

Eine konfokale Messsonde zur hochpräzisen navigierten Felsenbeinchirurgie

M. Riechmann², E. Papastathopoulos³, K. Körner³, C. C. Ngan², J. Raczkowsky², F. Knapp¹, Th. Klenzner¹, J. Schipper¹, H. Wörn²

¹ Universitäts-HNO-Klinik der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

² Universität Karlsruhe

³ Universität Stuttgart

Ansprechpartner: M. Riechmann riechmann@ira.uka.de

Abstract:

Die robotergestützte Eröffnung der Cochlea erfordert eine sehr präzise Vorgehensweise. Dabei hat sich gezeigt, daß das präoperativ verfügbare Bildmaterial, das als Grundlage zur Planung des Bohrlochs dient, den Anforderungen in Punktogenauigkeit nicht genügt. Bei CT-Aufnahmen muß nach dem derzeitigen Stand der Technik von einer Auflösung zwischen 0,5 und 1,0 mm ausgegangen werden. Die Genauigkeit könnte intraoperativ durch eine hochpräzise Vermessung der Oberfläche gesteigert werden. In dieser Arbeit wird eine Lasermeßsonde nach konfokalem Prinzip vorgestellt, die, auf einem Hexapoden montiert, eine exakte und berührungslose Vermessung der Oberfläche der Cochlea darstellen könnte.

Keywords: Felsenbein, Meßtechnik, konfokale Meßsonde, Hexapod, Laser

1. Motivation

In der hochpräzisen navigierten Felsenbeinchirurgie liegt ein Limitationsfaktor der geforderten Genauigkeit u. a. im begrenzten Auflösungsmuster der verfügbaren Bilddatensätze (CT/MR). Diese Ungenauigkeit wird auch auf die verwendeten Navigationssysteme und Roboter übertragen.[3]

In diesem Projekt wird der Ansatz verfolgt, eine Detailgenauigkeit im Zielgebiet im Submillimeterbereich zu erreichen. Als chirurgisches Beispiel wurde die Cochleostomie im Rahmen der Cochlea-Implantation gewählt. Eine Genauigkeit kleiner 0,5 mm ist erforderlich, um präzise im Mittelohr den Punkt der Innenohreröffnung zu definieren und in der basalen Schneckenwindung die Scala tympani zu eröffnen.

2. Methoden

Für die Bohrung der Cochleostomie wurde ein hexapodbasiertes System implementiert, das nach einer präoperativen Planung die Bohrung mit wesentlich höherer Präzision als bisher möglich durchführen soll. Zur Registrierung der Felsenbeinpräparate wurden Titanschrauben als Landmarken verwendet, ein 64zeiliges Computertomogramm erstellt und das System mittels eines Microscribe-Meßarms (mit einer Meßgenauigkeit von 0,25 mm) registriert. In ersten Experimenten zeigte sich hier, daß die berechnete Registriergenauigkeit unter 0,5 mm lag.[2]

Zur weiteren Optimierung wurde eine optische Meßsonde auf der Grundlage des konfokalen Prinzips entwickelt, welche auf dem Hexapoden montiert wird und somit eine hochpräzise Vermessung der Oberfläche des Mittelohres erlauben soll. Die gewonnenen 3-dimensionalen Daten im Sinne eines „Oberflächenscans“ sollen dann zur Navigation der mechatronischen Einheit genutzt werden.

Das konfokale Meßprinzip arbeitet wie folgt: Eine Punktlichtquelle wird auf das zu messende Objekt abgebildet und das von der Objektoberfläche reflektierte oder rückgestreute Licht wird auf einen punktförmigen Fotodetektor abgebildet. Dieses vom Detektor aufgenommene fotometrische Signal erreicht ein Maximum, wenn das Objekt sowohl in der Bildebene der Punktlichtquelle als auch in der Bildebene des Detektors liegt. Nur im Fokuspunkt ist dies der Fall. Wird nun das Objekt vorwärts oder rückwärts aus dieser Ebene heraus bewegt, werden sowohl das Bild der Lichtquelle als auch das Bild des Objektes unscharf und die aufgenommene Lichtintensität wird reduziert. Um dieses punktweise messende Prinzip

zur Gewinnung der kompletten 3D-Topografie eines Objekts einzusetzen, muß der Sensor mechanisch mit hoher Präzision in allen drei Raumrichtungen bewegt werden. Die dafür notwendige Positionierungsplattform stellt das Hexapodsystem PI M 850 der Firma PI dar. Dieses hochpräzise Gerät erlaubt eine Positionierungsgenauigkeit der Meßsonde von $0,5 \mu\text{m}$.

Das FOCON-Konzept stellt die Basis für das optische Design dar, welches hier auch für die Topografiemessung des Felsenbeins vorgeschlagen wurde. Als Lichtquelle wurde für den konfokalen Sensor eine fasergekoppelte Laserdiode (pigtailed, Thorlabs, w/HL6501MG) eingesetzt, die quasi-monochromatisches Licht mit einer Wellenlänge von 658 nm und mit einer optischen Intensität von 12 mW in eine Single-Mode-Faser emittiert. Aufgrund der sehr begrenzten Größe des durch einen chirurgischen Eingriff zugänglich gemachten Bereiches des Felsenbeins musste ein sehr kompakter Sensor entworfen werden. Anders als der FOCON-Sensor, wo ein voluminöses Mikroskopobjektiv zur Fokussierung eingesetzt wurde, entwickelten wir ein Fokusssystem auf der Basis einer Gradienten-Index-Linse (GRIN), ähnlich dem in [1] eingeführten Konzept. Das aufgebaute System basiert auf einer Gradienten-Index-Stablinse mit einer Brennweite von 4,5 mm und einem Durchmesser von 1,8 mm, die mit einem Glasabstandsstück (BK7) verkittet ist. Auf der anderen Seite des Glasabstandsstücks wurde das Ende einer Single-Mode-Faser zentriert aufgeklebt, die einen Kerndurchmesser von etwa $9 \mu\text{m}$ aufweist. Um Kontaminationen oder eine Beschädigung des operierten Bereiches am Felsenbein zu vermeiden, ist ein angemessener Arbeitsabstand von einigen Millimetern - hier mehr als 4 mm - erforderlich. Dieser korrespondiert mit dem Abstand vom gemessenen Objekt und der Endfläche der Stablinse. Der geringe Durchmesser der GRIN-Linse (1,8 mm) und der Arbeitsabstand begrenzen die numerische Apertur und damit auch die laterale und die Tiefenauflösung des konfokalen Sensors. Parameter wie die Brennweite der Stablinse, die Länge und das Material des Abstandsstücks sind wesentlich für die Auslegung des Designs des Sensors, das unter Anwendung einer kommerziellen Optik-Design-Software (ZEMAX) optimiert wurde. Abb. 1 zeigt den Sensor.

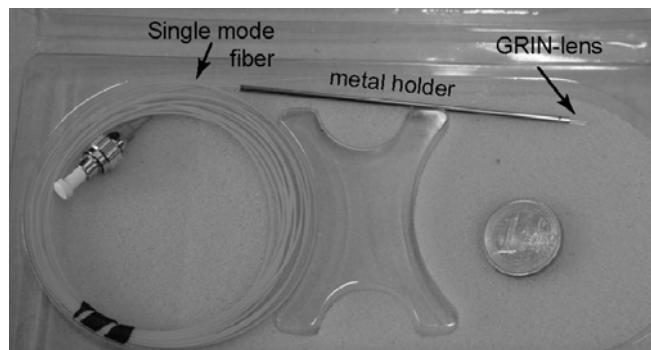


Abb. 1: Die optische Meßsonde

Mit Hilfe dieses Sensors wurden zuerst technisch gefertigte Objekte mit ebenen Oberflächen, also bekannte Strukturen vermessen. Zunächst wurde ein gestufter Aluminiumblock untersucht, um die prinzipielle Tauglichkeit des Sensors zu bestätigen. Es folgte ein gestufter Teflonblock (Abb. 2 links), von dem man sich eine ähnliche Verhaltensweise wie bei echtem Knochengewebe erhoffte. Um das Verhalten des Meßsignals bei nicht orthogonal zur Oberfläche einfallendem Licht zu untersuchen, folgte eine Kunststoffkugel (Abb. 2 rechts). An einem tierischen Knochenpräparat wurde zudem das Reflexionsverhalten von natürlichem Gewebe untersucht.

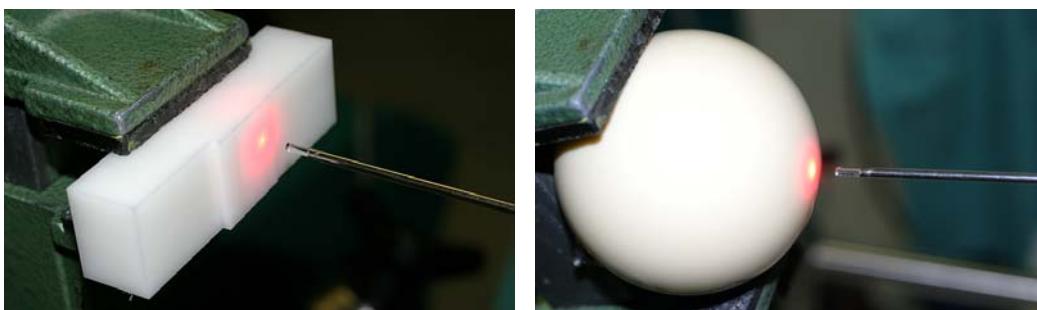


Abb. 2: Optische Vermessung eines Teflonblocks (links) und einer Kugel (rechts)

3. Ergebnisse

Die generelle Tauglichkeit des optischen Sensors konnte am Aluminiumblock nachgewiesen werden. Bei der Vermessung des Teflonblockes konnten die Stufen bis zu einer Höhe von ca. 0,1 mm identifiziert werden (Abb. 3). Allerdings war das Signal etwas verrauscht und mußte numerisch geglättet werden. In den Einzelmessungen (Abb. 4) sind die charakteristischen Peaks entlang der axialen Bewegung des Sensors gut zu erkennen. Abb. 5 zeigt eine sehr gute Wiederholgenauigkeit mehrerer Messungen ohne eine laterale Verschiebung. Bei der Vermessung der Kugel zeigte sich, daß die Messung bei reflektierenden Oberflächen stark vom Einfallswinkel des Lichts auf die zu vermessende Oberfläche abhängig ist (Abb. 6 links). Durch das Überziehen der Kugel mit einer optisch matten, Kunststoffhaut konnte die Meßbarkeit derselben stark verbessert werden Abb. 6 rechts). Das konfokale Prinzip hat sich auch bei der Vermessung eines Knochens gut bewährt, wobei bislang aber nur ein einzelner Punkt der Oberfläche abgetastet wurde (Abb. 7).

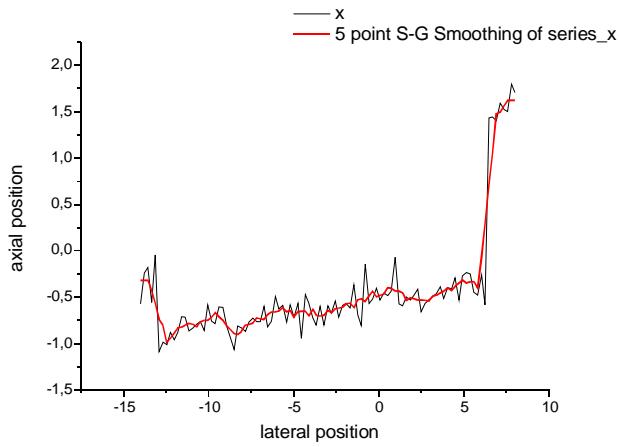


Abb. 3: Meßergebnisse am Teflonblock

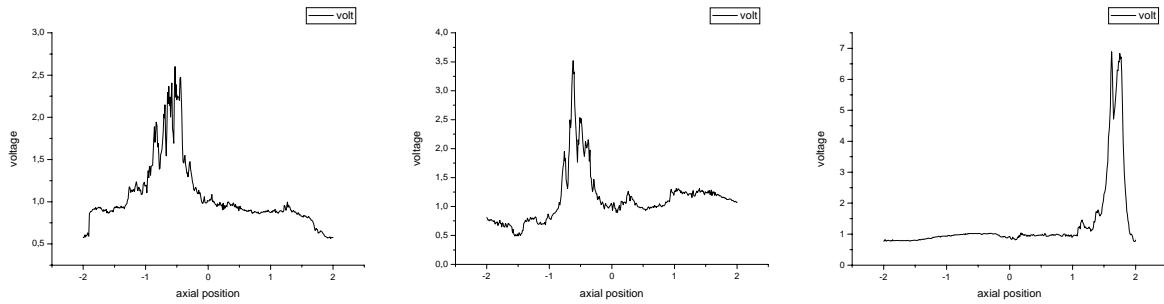


Abb. 4: Drei exemplarische optische Einzelmessungen am Teflonblock

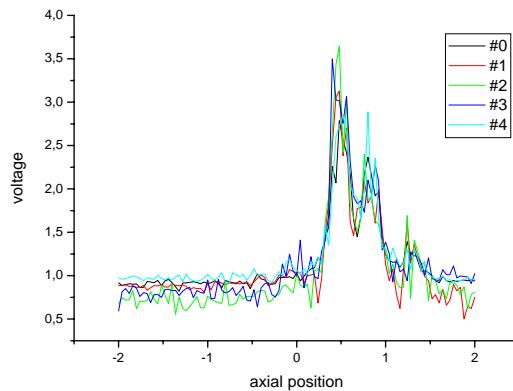


Abb. 5: Wiederholgenauigkeit der Messung am Teflonblock

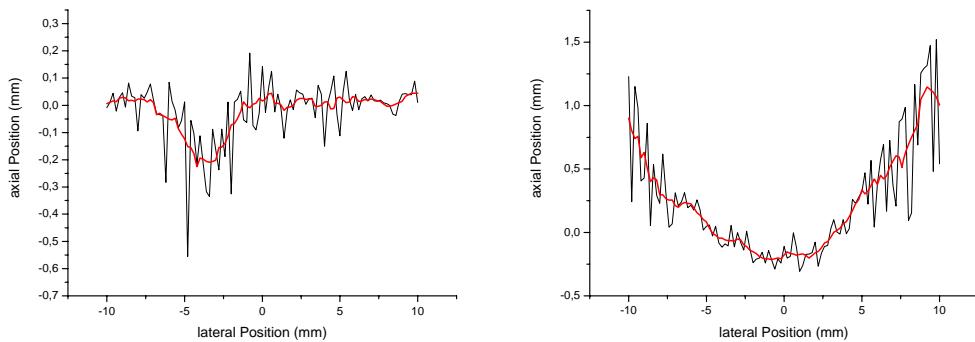


Abb. 6: Abtastung einer Kugel (links: reflektierend, rechts: stumpf)

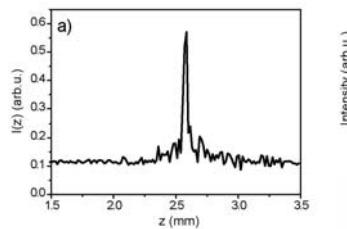


Abb. 7: Vermessung eines Knochens

4. Fazit und Ausblick

Es wurde eine sehr kompakte, fasergekoppelte konfokale Messoptik mit einer GRIN-Linse entwickelt, die eine vergleichsweise große Brennweite (4,5 mm) aufweist. Mit Hilfe der Linse und dem Hexapodsystem konnten Oberflächen mit einer Genauigkeit von ca. 0,1 mm abgetastet werden. Auch die prinzipielle Eignung für Knochengewebe wurde festgestellt.

In den nächsten Schritten soll das Meßsystem eingesetzt werden, um ein humanes Felsenbeinpräparat zu vermessen.

5. Zusammenfassung

Das konfokale Messprinzip stellt einen vielversprechenden Ansatz zur Optimierung der Genauigkeit des verwendeten Navigationssystems dar. Die dargestellten Messungen an Referenzoberflächen zeigten die Vorteile und Grenzen dieser Meßmethode auf. Weitere Untersuchungen an Knochenoberflächen müssen erfolgen, um die intraoperative Anwendbarkeit abschätzen zu können. Außerdem könnte das System bei entsprechender Eignung in einen Versuchsaufbau mit erhöhter Navigationsgenauigkeit für eine hexapod-gestützte Cochleostomie integriert werden.

Literatur

- [1] Knittel J., Schnieder L., Buess G., Messerschmidt B., Possner T. "Endoscope-compatible confocal microscope using a gradient index-lens system" Opt. Comm. 188 267-273 (2001).
- [2] Ngan Chiu-Chun. Atraumatic and function-preserving high precision surgery of the temporal bone. Der Andere Verlag, 2007. Dissertationsschrift.
- [3] Schipper J, Aschenorff A, Arapakis I, Klenzner T, Teszler CB, Ridder GJ, Laszig R. Navigation as a quality management tool in cochlear implant surgery. J Laryngol Otol 2004;118:764-70.
- [4] Wilson T, Sheppard CJR. "Theory and practice of scanning optical microscopy" New York: Academic, 1984.
- [5] Dabbs T., Glass M. "Fiber-optic confocal microscope: FOCON" Appl. Opt. 31 (16) 3030-3035 (1992).
- [6] Knittel J., Schnieder L., Buess G., Messerschmidt B., Possner T. "Endoscope-compatible confocal microscope using a gradient index-lens system" Opt. Comm. 188 267-273 (2001).