

Modellbasierte interindividuelle Registrierung an der lateralen Schädelbasis

M. Riechmann¹, P. U. Lohnstein², J. Raczkowski¹, T. Klenzner², J. Schipper²,
H. Wörn¹

¹Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik,
Universität Karlsruhe (TH)

²Hals-Nasen-Ohren-Klinik, Universitätsklinikum Düsseldorf
`matthias.riechmann@kit.edu`

Kurzfassung. Bei chirurgischen Eingriffen an der lateralen Schädelbasis wird in der zur Zeit gängigen Praxis das Knochengewebe unter optischer Kontrolle großflächig ablativ entfernt, um den Operationssitus freizulegen und konventionell operieren zu können. Prinzipiell soll dabei die Schonung vital und funktional bedeutender Strukturen berücksichtigt werden. Zur weiteren Minimierung der Traumatisierung und zur Erhaltung der strukturellen anatomischen Integrität soll eine alternative endoskopische Operationstechnik entwickelt werden, bei der der Situs durch dünne im Knochen liegende Bohrkanäle erreicht wird. Im Rahmen der Evaluierung der generellen Eignung der geometrischen Ausprägungen der humanen lateralen Schädelbasis wurden Methoden entwickelt, die anhand virtueller Modelle die Zugänglichkeit der anatomischen Zielstrukturen bestimmen können. Ein dabei auftretendes Problem ist die interindividuelle Vergleichbarkeit der Ergebnisse, da aufgrund der anatomischen Variationen eine zuverlässige interindividuelle Registrierung nicht trivial ist. Diese Arbeit beschreibt ein modellbasiertes Verfahren zur automatischen Registrierung mehrerer Felsenbeine zu einander über die prägnante Geometrie der Cochlea.

1 Einleitung

Chirurgische Eingriffe an der lateralen Schädelbasis bringen beim heutigen Stand der Operationstechnik Traumatisierungen des Patienten mit sich. Die Einführung endoskopischer Operationstechniken bei solchen Eingriffen (Minimal Traumatische Chirurgie) verspricht die Erhaltung der strukturellen anatomischen Integrität durch eine gezielte Verringerung des Knochenabtrags: Der Zugang zum Situs muss nicht mehr durch umfangreiches Abtragen von Knochengewebe mit Hilfe einer Fräse geschaffen werden. Statt dessen wird dieser durch wenige Millimeter durchmessende lineare Bohrkanäle, die im Vorfeld roboterassistiert unter Schonung der physiologisch-funktionell kritischen Strukturen[1, 2] angelegt werden, hergestellt. Dabei können keine natürlichen Kavitäten genutzt und auch kein Gewebe verdrängt werden. Angestrebte Einsatzgebiete für diese Technik sind die Dekompression des Saccus endolymphaticus und die transmastoidale Tumorexstirpation am inneren Gehörgang.

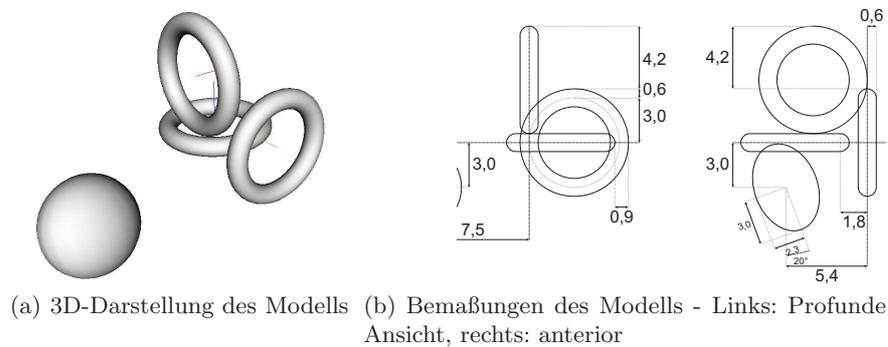
Im Rahmen von Voruntersuchungen, wurde eine Reihe von Simulationen zur Untersuchung der Machbarkeit der Eingriffe an mehreren virtuellen Felsenbeinmodellen durchgeführt[3]. Dies ist erforderlich, da die Anatomie der lateralen Schädelbasis erheblichen interindividuellen Variationen unterliegt[4] und einfache schematische Vorgehensweise somit ausgeschlossen sind. Ein immer wiederkehrendes Problem ist die interindividuelle Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Simulationen, da die besagten Variationen auch Auswirkungen auf die Platzierung der verwendeten Landmarken haben und zu Fehlern führen. Als Alternative wird in dieser Arbeit eine ICP-Registrierung zwischen der Geometrie der Bogengänge mit Cochlea und eines Modells vorgeschlagen. Aufgrund der prägnanten Form der untersuchten anatomischen Struktur kann zudem ein einheitliches Koordinatensystem über aus den Bogengängen hervorgehende Ebenen definiert werden.

2 Material und Methoden

Das Ausgangsmaterial der Untersuchung besteht aus 16 zufällig ausgewählten, anonymisierten und normalbefundeten rechtseitigen Felsenbein-Dünnschicht-CTs, die im Rahmen regulärer medizinischer Untersuchungen aufgenommen wurden. Die axiale Auflösung beträgt zwischen 0,2 und 0,6 mm, der Schichtabstand, zwischen 0,4 und 2 mm. In den Datensätzen wurden mit Hilfe des DICOM-Viewers OsiriX und eines Grafiktablets die Cochlea mit den Bogengängen und eine Reihe weiterer anatomischer Strukturen manuell segmentiert. Zu Registrierungszwecken wurden 6 Landmarken identifiziert. Drei davon liegen zentral in der Nähe der Cochlea, die anderen weiter in der Peripherie: Hammerkopf, Ductus endolymphaticus, Facialiskanal am Ganglion geniculi, Anfang innerer Gehörgang, Anfang äußerer Gehörgang, Mastoidspitze.

Aus den so attribuierten Volumendatensätzen wurden anschließend mit Hilfe einer auf Algorithmen aus dem Insight Toolkit (ITK) und dem Visualization Toolkit (VTK) basierenden Bildverarbeitungsfilterkette (Weichzeichner, Marching Cubes[5], Dezimierung[6], größengetreuer Polygonweichzeichner[7]) dreidimensionale Polygondatensätze berechnet. Ein wichtiger Aspekt dieser Verarbeitungskette ist neben einer möglichst guten Übereinstimmung mit den segmentierten Volumina die Reduzierung der Komplexität der Oberflächenmodelle, da diese einen großen Einfluss auf die Laufzeit von Berechnungen auf den Modellen hat. Die Anatomierepräsentationen können in einer Planungssoftware dargestellt und in einer triplanaren Ansicht auf ihre Übereinstimmung mit den originalen medizinischen Bilddatensätzen verglichen werden.

Das Referenzmodell zur Registrierung der Bogengänge und der Cochlea besteht aus der orthogonalen Anordnung dreier Tori und einer Kugel, die jeweils die drei Bogengänge und die Cochlea repräsentieren. Die Anordnung ist prototypisch, das heißt, sie wurde manuell anhand eines segmentierten Datensatzes erstellt. Es zeigte sich, daß dies ohne große Fehler auf andere Cochleamodelle übertragbar war. Auf Abb. 1 sind die geometrische Konfiguration des Modells und die verwendeten Bemaßungen zu sehen.

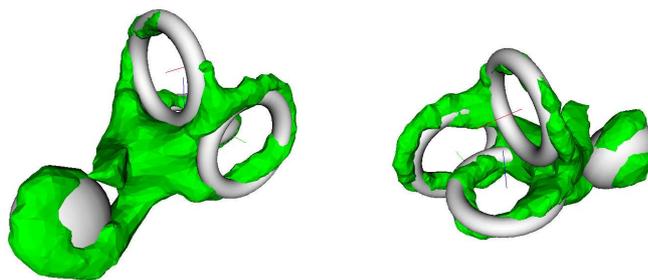
Abb. 1. Das prototypische Modell der Cochlea. Bemaßungen in mm

Das Modell wird mit Hilfe der Landmarken einer Vorregistrierung nach der Methode von Horn[8] unterzogen und anschließend durch eine Iterative Closest Point Registrierung[9] in die Geometrie der Bogengänge und der Cochlea eingepasst. Die verwendeten Registrierungsimplementierungen entstammen dem VTK.

3 Ergebnisse

Nach Tests an den zwölf zur Verfügung stehenden virtuellen Felsenbeinen zeigte sich eine hohe Robustheit des gewählten Ansatzes: Das Referenzmodell lässt sich ohne manuelle Anpassungen bei allen Datensätzen in die Geometrie einpassen und nach optischer Kontrolle können alle vier geometrischen Primitive als am korrekten Ort befindlich befunden werden. Abb. 2 zeigt eine exemplarische Cochlearepräsentation mit darauf registriertem Referenzmodell.

Da die Dimensionen und Ausrichtungen der Teilkomponenten des Modells bekannt sind, können die Tori zur Definition eines Koordinatensystems herangezogen werden: Die X-Achse steht orthogonal auf dem superioren Bogengang, die

**Abb. 2.** Zwei verschiedene Ansichten des registrierten Referenzmodells (weiß) und der Cochleageometrie (grün).

Y-Achse auf dem posterioren Bogengang und die Z-Achse auf dem horizontalen. Analog liegen die YZ-Ebene in der vom superioren Bogengang aufgespannten Grundebene, die XZ-Ebene im posterioren Bogengang und die XY-Ebene am horizontalen Bogengang. Abb. 3 zeigt die Ausrichtung des Koordinatensystems relativ zur Cochlea und den in Abschnitt 1 beschriebenen anatomischen Strukturen. Zur Verbesserung der Übersicht sind die Pfeile entlang der X-Achse verschoben, der Ursprung liegt auf der Höhe des superioren Bogengangs.

4 Diskussion

In dieser Arbeit ist es mit Hilfe eines modellbasierten Ansatzes gelungen die Cochlea und die Bogengänge als Registrierkörper zur Definition eines einheitlichen Koordinatensystems an der lateralen Schädelbasis heranzuziehen. Durch die Verwendung parametrischer geometrischer Primitive ist es theoretisch sogar möglich über wenige Parameter Koordinaten auf der Oberfläche der Cochlea und den Bogengängen eindeutig zu definieren. Zusätzlich können die Öffnungen der Bogengänge ohne eine aufwändige Formanalyse der Oberflächenmodelle lokalisiert werden. Aufgrund der Achsensymmetrie des Kopfes ist das Koordinatensystem nicht ohne weiteres auf die linke Schädelseite übertragbar. Das Modell muß zuvor gespiegelt werden, was auch die Umkehrung einer der definierten Achsen nach sich zieht.

Für die Minimal Traumatische Chirurgie sind mindestens zwei Einsatzgebiete für das entwickelte Verfahren denkbar: Zum einen ermöglicht ein einheitliches Koordinatensystem in der lateralen Schädelbasis die Vergleichbarkeit der Analysen von Zugangswegen verschiedener Patienten. Zum anderen können Standard-Zugangswegen definiert werden, die bei patientenindividuellen Operationsplanungen zur automatischen Berechnung sinnvoller Trajektorienvorschläge herangezogen werden können.

Derzeit ist eine manuelle Vorsegmentierung der Cochlea notwendig. Wünschenswert sind an dieser Stelle Verfahren zur semi- oder vollautomatischen Segmentierung. Interessante Ansätze hierzu, die langfristig auf eine automatische Segmentierung des Felsenbeins abzielen, finden sich in [10, 11].

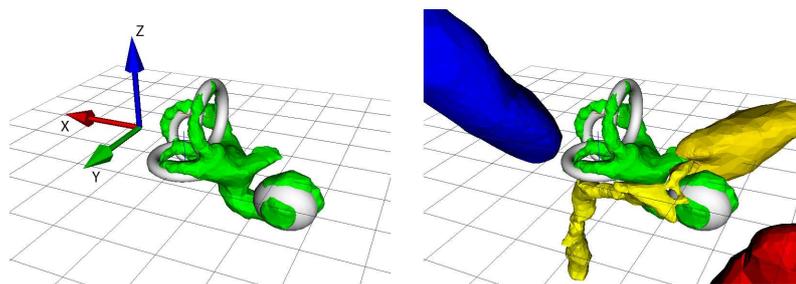


Abb. 3. Die Cochlea in dem vom Referenzmodell definierten Koordinatensystem

Literaturverzeichnis

1. Knapp FB, Ngan CC, Schipper J, et al. Hexapod-gestützte Bohrerführung für eine navigierte Cochleostomie. In: 77. Jahresversammlung der Deutschen Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie; 2006.
2. Chan LL, Manolidis S, Taber KH, et al. Surgical anatomy of the temporal bone: An atlas. *Neuroradiology*. 2001;43:797–808.
3. Riechmann M, Lohnstein PU, Raczkowski J, et al. Identifying access paths for endoscopic interventions at the lateral skull base; 2008.
4. Riechmann M, Lohnstein PU, Raczkowski J, et al. Ein probabilistisches dreidimensionales computermodell des felsenbeins. In: Tagungsband der 6. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie; 2007. p. 223–226.
5. Lorensen WE, Cline HE. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. *SIGGRAPH Comput Graph*. 1987;21(4):163–169.
6. Schroeder WJ, Zarge JA, Lorensen WE. Decimation of triangle meshes. *Procs SIGGRAPH*. 1992; p. 65–70.
7. Taubin G, Zhang T, Golub GH. Optimal surface smoothing as filter design. *Procs ECCV*. 1996;1:283–292.
8. Horn BKP. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *JOSA A*. 1987;4(4):629–642.
9. Zhang Z. Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces. *Int J Computer Vis*. 1994;13(2):119–152.
10. Noble JH, Warren FM, Labadie RF, et al. Automatic segmentation of the facial nerve and chorda tympani using image registration and statistical priors. *Proc SPIE*. 2008.
11. Xianfen D, Siping C, Changhong L, et al. 3D Semi-automatic Segmentation of the cochlea and inner ear. *Proc IEEE EMB Ann Conf*. 2005.