

Computerunterstützte Planung von Bonebridge-Operationen

Autoren

Institute

email

Kurzfassung. Zur Unterstützung der präoperativen Planung zur Platzierung eines Hörimplantats am Schädelknochen eines Patienten mit Hörschädigung wurde ein Prototyp einer Planungssoftware basierend auf präoperativen DVT-Daten entwickelt. Die Umsetzung erfolgte mittels eines VTK-Widgets, das Manipulationen der Implantatlage sowohl in zweidimensionalen Schnittansichten als auch in einer dreidimensionalen Darstellung des Schädelknochens erlaubt. Zusätzlich wurde auch die Biegung des Implantats berücksichtigt. Dabei lag der Fokus auf einfacher Anwendbarkeit und der Umsetzung geeigneter Manipulationstechniken mittels eines 2D-Eingabegerätes.

1 Einleitung

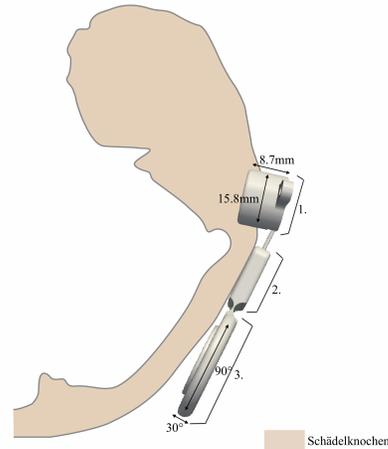
Bei Patienten mit einer diagnostizierten Schädigung der natürlichen Schallweiterleitung zum Innenohr wird ein Knochenleitungssystem, z.B. die Bonebridge (MED-EL, Innsbruck, Österreich), eingesetzt. Eine Bonebridge überbrückt die geschädigte Schallübertragung, von Außen- und Mittelohr zum Innenohr. Ein externer Empfänger auf der Haut nimmt dazu Schallwellen aus der Umgebung auf und überträgt sie elektromagnetisch auf das Implantat, das Vibrationen im Knochen erzeugt und so den Schall zum Innenohr weiterleitet. Abb. 1 zeigt den Aufbau des Hörimplantats und eine skizzenhafte Platzierung. Der kritische Teil des Implantats ist der Transducer für die Vibrationserzeugung, der für eine gute Übertragung in den Knochen des Mastoids implantiert wird. Aus dem klinischen Alltag sind Mediziner mit 2D-Schnittansichten topografischer Bilddaten sehr gut vertraut. Diese Darstellungen liefern den Medizinern den Ist-Zustand der individuellen anatomischen Strukturen eines Patienten. Die Größe und Form der relevanten Strukturen, insbesondere der Risikostrukturen und deren Lage, können zur Planung des operativen Eingriffs herangezogen werden.

Kritische Strukturen für die Bonebridge-Implantation sind der Sinus sigmoideus und die Dura. Gegenwärtig basiert die Planung der Implantatposition relativ zu diesen Strukturen einzig auf der räumlichen Vorstellung des Chirurgen. Das ist insbesondere bei untypischer Anatomie (z. B. durch krankhafte Veränderung des Felsenbeins oder vorhergehende Operationen) eine schwierige Aufgabe. Mit Blick auf die umfangreichen Formen von Computerunterstützung in der HNO [1]

ist es naheliegend, auch diese Aufgabe durch die Verwendung einer geeigneten Planungssoftware zu vereinfachen.

In einer solchen Software muss der Anwender virtuell die Lage des Implan-

Abb. 1. Skizzenhafte Platzierung des Implantats am Schädelknochen. Zur Platzierung des Implantats muss die Beschaffenheit des Schädels des Patienten berücksichtigt werden. Eine Bonebridge besteht aus 1. Transducer (Bone Conduction-Floating Mass Transducer - BC-FMT), 2. Demodulator und 3. Spule: Der BC-FMT hat einen Durchmesser von 15,8 mm und benötigt für die Einbettung eine Tiefe von 8,7 mm. Die Verbindung zwischen dem Transducer und dem Demodulator ist beweglich. Die Bewegung beschränkt sich auf $\pm 90^\circ$ in horizontaler Ebene und -30° in vertikaler Ebene.



tats relativ zum Schädelknochen in allen drei Dimensionen ausrichten können. Dammann et al. [2] beschreiben eine Methode zur Simulation eines chirurgischen Eingriffs zur Bestimmung einer geeigneten Position und der Vorbereitung eines Implantatbetts. Die einzelnen Objekte können mit einer konventionellen 2D- oder 3D-Maus beliebig transformiert werden. Zur präoperativen Planung einer geeigneten Position eines BoneBridge-Implantats verwenden Wimmer et al. [3] eine farbcodierte Darstellung der Knochendicke. Darüberhinaus werden Methoden zum Ausrichten des Implantats nicht weiter beschrieben. Während des operativen Eingriffs hat der Chirurg Zugriff auf die Planungsdaten. Ein Software-Tool zur Platzierung einer BoneBridge haben Ramm et al. [4] umgesetzt. Während der Ausrichtung der BC-FMT am Schädelknochen bekommt der Benutzer ein visuelles Feedback zur Eignung der gewählten Position durch die farbliche Codierung der Knochendichte, der Entfernung der Risikostrukturen und das Hinzufügen von Warnlabels zur Eignung der Platzierung der BC-FMT. Benutzer, so auch Mediziner, favorisieren traditionelle 2D-Eingabegeräte. Zur Manipulation der 3D-Objekte müssen dem medizinischen Anwender geeignete Interaktionstechniken zur Verfügung gestellt werden. Eine gute Basis zur Umsetzung geeigneter Manipulationstechniken bieten 3D-Widgets. Ein Widget zur Rotation, Translation und Skalierung von Objekten mit Hilfe der 2D-Maus haben Conner et al. umgesetzt [5]. Handles werden dabei zur eingeschränkten Interaktion entlang einer Achse oder um eine Achse eingesetzt.

Ziel dieser Arbeit war die Umsetzung eines Prototypen eines Widgets zur Manipulation der räumlichen Lage von Objekten. Das Widget sollte den Medizinern in vertrauten 2D-Ansichten und in einer 3D-Ansicht zur Verfügung gestellt werden.

2 Material und Methoden

Die Programmierung der Anwendung erfolgte in der Programmiersprache C++ unter Verwendung der Open-Source-Librarys Qt (Version 4.8.4, qt-project.org) und VTK (Version 5.10.0, vtk.org). Bilddaten eines digitalen Volumentomographen (DVT) dienen als Ausgangspunkt für den Workflow dieser Computerunterstützung. Diese werden in den standardisierten 2D-Ansichten (sagittal, coronal und axial) und in einer 3D-Ansicht visualisiert. In der 3D-Ansicht wird der Knochen mithilfe eines schwellenwertbasierten Segmentierungsalgorithmus visualisiert. Zur Planung einer geeigneten Position des Implantats wird ein geometrisches Modell des Implantats als CAD-Objekt im STL-Format verwendet. Dieses Modell wird sowohl in den 2D-Ansichten (Umriss in Schichtebene) als auch in einer 3D-Ansicht (Oberflächenmodell) dargestellt. Zur Platzierung des Implantats wird dem Chirurgen ein Widget zur Verfügung gestellt, das an das Implantat gebunden ist. Die Realisierung des Widgets erfolgt in Anlehnung an in VTK umgesetzte Widgets, das heißt das Verhalten und die Geometrie des Objektes werden getrennt voneinander gesteuert. Das Widget dient zur Ausführung von 2D- und 3D-Transformationen zur Platzierung eines Hörimplantats. Es kann sowohl innerhalb der im medizinischen Bereich üblicherweise verwendeten 2D-Schichtansichten (sagittal, coronal und axial) als auch im 3D-Raum benutzt werden und erlaubt das Verschieben (Translate), Rotieren (Rotate) und das Verbiegen des Implantats (Bend):

2.1 Translate

Zum Verschieben des Implantats werden die Koordinatenachsen im Zentrum des BC-FMT eingeblendet. Mit der Darstellung der Koordinatenachsen kann der Chirurg das Implantat mittels einer 2D-Maus frei im Raum bewegen. Die Selektion einer Achse beschränkt sich auf das Verschieben des Implantats entlang dieser Achse. Die Verschiebung des Implantats entspricht der Translation eines Punktes p um den Verschiebevektor v . Der Verschiebevektor wird aus den aktuellen 2D-Mauspositionen (x,y) berechnet.

2.2 Rotate

Zur Darstellung des Dreh-Modus wird zusätzlich zu den Koordinatenachsen die Drehrichtung abgebildet. Diese entsprechen der Drehung des Implantats um einen Rotationswinkel und die zugehörige Rotationsachse, die sich aus der Bewegungsrichtung der Maus ergibt. Rotationen können mathematisch durch orthonormale Rotationsmatrizen oder durch Quaternionen dargestellt werden. Die hier erforderliche häufige Berechnung von Teilrotationen führt in Matrixschreibweise zu einer Häufung von Matrixmultiplikationen, bei denen numerische Fehler auftreten können. Die Orthonormalität der Matrix kann dabei nicht mehr gewährleistet werden, was zu einer verzerrten Darstellung des Implantats führen kann. Daher wurden Quaternionen verwendet, die sich einfach normieren lassen.

2.3 Bend

Das Verbindungsstück zwischen Transducer und Demodulator ist in horizontaler und vertikaler Ebene beweglich und somit auf die Rotation des Transducers beschränkt. Die Manipulationstechnik Bend soll diese Bewegungen umsetzen. Der Knickpunkt wird im Mittelpunkt der Verbindung des Transducers mit dem Demodulator platziert. Die Manipulation der Handles ist auf das Verbiegen des Implantats um $\pm 90^\circ$ in horizontaler Ebene und -30° in vertikaler Ebene beschränkt. Die Manipulation des Implantats erfolgt im lokalen Koordinatensystem.

3 Ergebnisse

Ein Prototyp einer Software zur präoperativen Planung von Bonebridge-Operationen wurde programmiert. Zur Umsetzung geeigneter Manipulationstechniken wurde ein Widget für die präoperative Platzierung des Hörimplantats mittels eines 2D-Eingabegeräts entwickelt.

Radiologische Bilddaten des Patientenschädels werden aus dem DICOM-Dateien und das Implantat als CAD-Objekt aus dem STL-Format geladen. Beide Objekte stehen dem Chirurgen sowohl in den üblicherweise verwendeten 2D-Schichtansichten (sagittal, coronal und axial) als auch einer 3D-Ansicht zur Verfügung. Die 2D-Ansichten können vom Chirurgen zur Beurteilung der Abstände zu kritischen Strukturen wie dem Sinus sigmoideus und der Dura genutzt werden. Zur Platzierung des Implantats stehen dem Chirurgen unterschiedliche Interaktionsmöglichkeiten zur Verfügung: Der Chirurg kann mit der gesamten Szene interagieren, die sich aus dem segmentierten Schädel des Patienten und dem 3D-Modell des Implantats zusammensetzt. Der Betrachter erhält einen globalen Überblick über die Szene, sowie über die Stellung der Objekte zueinander. Die Selektion des Implantats und die damit verbundene Aktivierung des 3D-Widgets, zur Manipulation des Implantats, legt den Fokus für weitere Interaktionen auf das Implantat. Das 3D-Widget stellt dem Chirurgen Handles zur Verfügung, mittels derer er zwischen den einzelnen Techniken wählen kann:

- Translate dient der Bewegung des Implantats im Raum. Die eingeblendeten Koordinatenachsen (siehe Abb. 3 a) dienen dabei als Handles. Durch die Selektion einer einzelnen Achse wird diese farblich hervorgehoben und das Verschieben des Implantats auf diese Achse beschränkt. In den 2D-Ansichten werden schichtspezifische Handles eingeblendet (siehe Abb. 3 d).
- Rotate dient der Veränderung der Orientierung des Implantats. Als Handles werden in der 3D-Ansicht Pfeil-Darstellungen um den Drehpunkt platziert (siehe Abb. 3 b). Diese zeigen die Drehung um die entsprechende Achse an. In den 2D-Ansichten werden Orbits als Handles um den Drehpunkt platziert (siehe Abb. 3 e). Die Selektion eines Handles hebt diesen farblich hervor und beschränkt die Rotation um dessen Achse.
- Bend (Verbiegen des Implantats) beschränkt sich auf die horizontale ($\pm 90^\circ$) und vertikale Ebene (-30°). Die Handles werden als Pfeil-Darstellungen an der Spule des Implantats platziert (siehe Abb. 3 c).

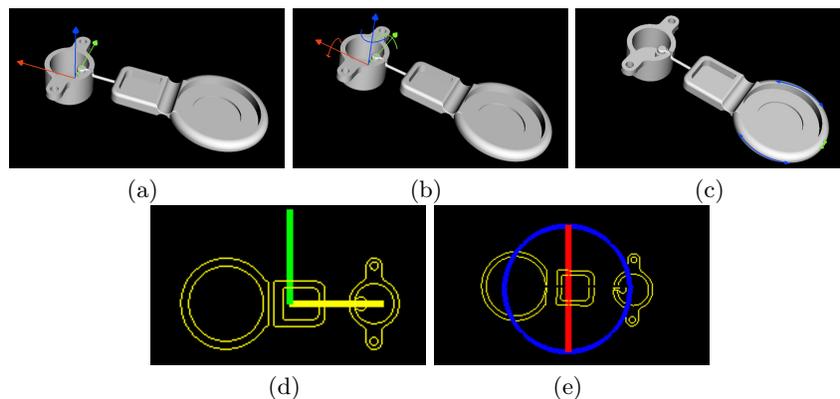


Abb. 2. Darstellung der Handles des 3D-Widgets als (a) Koordinatenachsen zum Verschieben und als gebogene Pfeile zum (b) Rotieren und (c) Verbiegen des Implantats. Die Anpassung der Handles in den 2D-Ansichten (d) zum Verschieben und (e) zum Rotieren.

Translate und Rotate können sowohl innerhalb der 2D-Ansichten als auch in der 3D-Ansicht ausgeführt werden, wobei die Transformationen in den jeweiligen Ansichten in Echtzeit angepasst werden. Die Darstellung des 3D-Widgets wird innerhalb der 2D-Ansichten angepasst. Bend ist nur auf den 3D-Raum beschränkt.

4 Diskussion

Das vorgestellte Programm bietet, wie angeführte Software-Tools, eine einfache und intuitive Möglichkeit zur Planung der Implantatlage bei einer Bonebridge-Implantation. In ihrer operativen Praxis sind es Chirurgen gewohnt, innerhalb komplexer 3D-Strukturen zu interagieren. Somit bilden, neben traditionellen 2D-Schichtansichten, 3D-Visualisierungen, auf Grund ihrer besseren Abbildung der Realität, eine optimale Möglichkeit zur Planung operativer Eingriffe. Demgegenüber lassen sich in den Schichtansichten Abstände zu Risikostrukturen besser erkennen, worin der Vorteil der kombinierten Lösung liegt.

Ein alternatives Software-Tool zur Planung einer Bonebridge-Implantation haben Ramm et al. [4] umgesetzt. Während der Ausrichtung der BC-FMT am Schädelknochen bekommt der Benutzer ein visuelles Feedback zur Eignung der gewählten Position auf Basis der Abstände zu autosegmentierten Risikostrukturen. Das erfordert eine höhere Rechenleistung als der hier vorgestellte Ansatz. Auch findet die Position der Spule keine Berücksichtigung, was insbesondere für das kosmetische Ergebnis der Operation nachteilig ist, da die Spule die Position des externen Teils des Implantats bedingt. Zur präoperativen Planung einer geeigneten Position eines Bonebridge-Implantats verwenden Wimmer et al. [3] eine farbcodierte Darstellung der Knochendicke. Ein Verfahren zur automatisierten

Berechnung derselben wurde von Lexow et al. entwickelt [6]. Das ist eine sinnvolle Ergänzung zu der hier vorgestellten Software, um die initiale Positionierung zu erleichtern. Methoden zum Ausrichten des Implantats wurden bei beiden nicht weiter beschrieben.

Das hier vorgestellte Widget bietet die zeitgleiche Verwaltung der Geometrie des Hörimplantats und der umgesetzten Manipulationstechniken zur Ausrichtung des Implantats. Bei der Umsetzung der Manipulationstechniken wurde insbesondere auch das Verbiegen des Implantats berücksichtigt, um eine realitätsnahe Computerunterstützung zu gewährleisten. Die Nutzung eines Widgets bietet eine multifunktionale Anpassung notwendiger Interaktionstechniken und eine Erweiterung weiterer Handles. Kontextbezogenes Ein- und Ausblenden gewünschter Handles gewährleistet eine vereinfachte Anpassung des Widgets an weitere Objekte zur Platzierung sowohl im 3D-Raum als auch innerhalb der 2D-Ansichten. Zur weiteren Verbesserung des Planungsprozesses wäre ein visuelles Feedback für den Chirurgen hilfreich, im Kontext der Bestimmung einer geeigneten Position für das Implantat. Weitere Untersuchungen sind zur vereinfachten Übertragung der Planungsdaten auf den Patienten geplant.

Literaturverzeichnis

1. Preim B, Botha CP. Visual Computing for Medicine, Second Edition: Theory, Algorithms, and Applications (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics). 2nd ed. Morgan Kaufmann; 2013.
2. Dammann F, Bode A, Schwaderer E, Schaich M, Heuschmid M, Maassen MM. Computer-aided Surgical Planning for Implantation of Hearing Aids Based on CT Data in a VR Environment. 2001;.
3. Wimmer W, Guignard J, Gerber N, Kompis M, Weber S, Caversaccio M. A preoperative planning method for Bonebridge implantations using surface distance maps; 2013. Computer Assisted Radiology and Surgery.
4. Ramm H, Morillo OSV, Todt I, Schirmacher H, Ernst A, Zachow S, et al. Visual Support for Positioning Hearing Implants. In: Freysinger W, editor. Proceedings of the 12th annual meeting of the CURAC society; 2013. p. 116 – 120.
5. Conner BD, Snibbe SS, Herndon KP, Robbins DC, Zeleznik RC, van Dam A. Three-dimensional widgets. In: Proceedings of the 1992 symposium on Interactive 3D graphics. I3D '92. New York, NY, USA: ACM; 1992. p. 183–188. Available from: <http://doi.acm.org/10.1145/147156.147199>.
6. Lexow GJ, Rau TS, Eckardt F, Kobler JP, Ortmaier T, Lenarz T, et al. Automatisierte Bestimmung der Schädelknochendicke in CT- und DVT-Bilddaten. In: 11. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie e.V. (CURAC), Düsseldorf; 2012. .