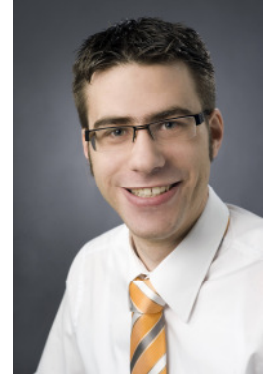


Information zum Referenten:

MSc FHO in Engineering

Dominik Widmer



Studium

Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, 9471 Buchs, Schweiz

- BSc FHO in Systemtechnik, Mechanik und Produktion
- MSc FHO in Engineering, Industrial Technologies

Berufliche Karriere

Federtechnik Kaltbrunn AG

- Werkzeugkonstrukteur

Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs NTB, 9471 Buchs, Schweiz

- Entwicklungsingenieur/Projektleiter in der mechatronischen Produktentwicklung
- Unterrichtsunterstützung

Hals-Nasen-Ohren-Roboter für Fräsarbeiten an der lateralen Schädelbasis

Dominik Widmer, Einar Nielsen, NTB Interstaatliche Hochschule für Technik, Buchs und St. Gallen

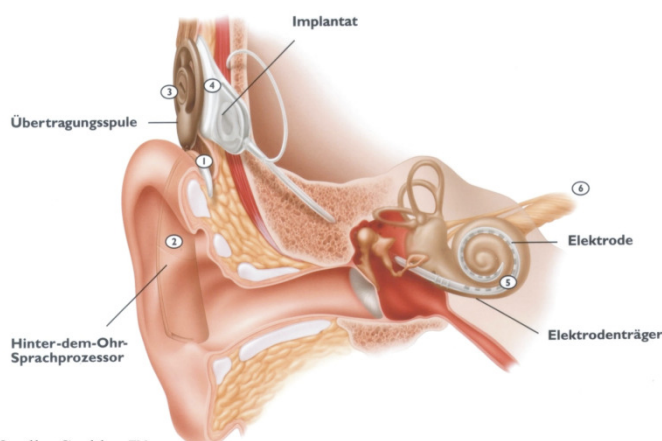
Jonas Salzmann, Christof Stieger, Brett Bell, Lutz Nolte, Marco Caversaccio, Stefan Weber, ARTORG Center for Biomedical Engineering und Inselspital, Universität Bern

1 Einleitung

1.1 Medizinische Indikation

Bei beidseitiger Taubheit oder bei hochgradiger Schwerhörigkeit, wenn externe Hörgeräte kein zufriedenstellendes Sprachverständnis mehr erlauben, können Hörgeräte direkt in die Hörschnecke (Cochlea) implantiert werden (Abbildung 1).

Die Voraussetzung für ein solches Cochlea-Implantat ist ein intakter Hörnerv, welcher von einer direkt in die Cochlea eingeführten Elektrode stimuliert wird. Ein solches Cochlea-Implantat besteht aus zwei separaten Teilen. Eine Art Hörgerät wird äusserlich über dem Ohr getragen und beinhaltet Mikrophon, Sprachprozessor und Sender sowie die Speisung. Der zweite Teil, das eigentliche Implantat wird retroaurikulär (hinter dem Ohr) im Knochen implantiert und besteht aus dem Empfänger sowie der in die Cochlea eingeführten Elektrode.



Quelle: Cochlear™

Abbildung 1: Cochlea-Implantat

1.2 Technische Problemstellung

Um ein Cochlea-Implantat chirurgisch einzusetzen, müssen verschiedene Fräsarbeiten an der lateralen Schädelbasis durchgeführt werden. Das Verrutschen des Empfängers kann verhindert werden, indem dieser in ein aus dem Schädel gefrästes Implantatlager hinter dem Ohr eingesetzt wird. Zudem muss ein direkter Zugang zur Cochlea chirurgisch erstellt werden (Mastoidektomie). Die Cochlea wird dann minimal eröffnet, um die Elektrode einführen zu können. Bei diesem Zugang dürfen die vitalen Strukturen wie der Gesichtsnerv nicht beschädigt werden. Da diese Strukturen sehr individuell verlaufen und von aussen nicht ersichtlich sind, muss sie der Chirurg während der Operation Schritt für Schritt explorativ identifizieren [Helms, J.]. Die für einen solchen Eingriff notwendige Genauigkeit wird in der klinischen Literatur mit 0.3 mm angegeben. Derzeit ist diese Genauigkeit nur über mechanische Schablonen [Balachandran et al. 2010] erreichbar. Versuche, die genannte Genauigkeit in einem roboterassistierten Eingriff zu realisieren, erreichen derzeit Genauigkeiten von 0.6 mm [Majdani et al. 2009]

Bei diesem Eingriff bestehen drei Herausforderungen: Erstens erfordern die kleinen Dimensionen der relevanten anatomischen Strukturen ein Mikroskop. Zweitens muss der Chirurg, um sich anhand anatomischer Landmarken orientieren zu können, den Zugang zur Cochlea wesentlich grösser eröffnen, als für die Einführung der Elektrode nötig wäre und drittens befindet sich die Trajektorie der Zugangsbohrung sehr nahe an kritischen Strukturen wie zum Beispiel zum Nervus Facialis, dem Gesichtsnerv.

1.3 Anforderungen an einen Operations-Roboter

Um ein Assistenzrobotersystem für das Fräsen am Schädel realisieren zu können, gibt es folgende Anforderungen:

- Es wird ein genauer, präziser Roboter benötigt, der optimal an die Anforderungen des Operationssaals angepasst ist.
- Die Grundlage einer Operationplanung sind dreidimensionale Bilddaten (CT oder DVT). Es muss ein softwarebasiertes Planungsinstrument erarbeitet werden, welches unter Verwendung dieser Bilddaten die Planung des genauen Operationsablaufs erlaubt.
- Die Bilddaten, zusammen mit den Planungsinformationen, sollen als Grundlage für die Positionierung und Ausrichtung des Roboters herangezogen werden.
- Die resultierenden Positionierungsfehler zwischen Roboter, Patient und dem virtuellen Patientenmodell aus den Bilddaten muss hinreichend klein sein.
- Es muss ein intuitives (z.B. haptisches User-Interface) zur Verfügung stehen, welches dem Chirurgen erlaubt, den Operationsprozess vollständig und intuitiv zu beherrschen.

Mit einem derartigen System kann ein Cochleaimplantatlager präzise gefräst und die Cochlea mit nur einer Bohrung erreicht werden.

1.4 Anforderungen an die Mechanik und die kinematische Struktur

Der Roboter muss so platziert werden können, dass er die Tätigkeiten des Operationsteams nicht stört. Dazu gehören unter anderem die Arbeiten der Chirurgen aber auch der der des Anästhesie und der OP-Schwestern. Der Chirurg selbst benötigt bei allen übrigen Operationsschritten, wie Präparation des Schädels oder dem Implantieren des Hörgeräts, freie Sicht auf das Operationsfeld haben. Daraus folgt, dass der Roboter bei Nichtgebrauch aus dem Operationsfeld heraus geschwenkt werden muss. Die Montage des Roboters am Operationstisch erfolgt während der OP Vorbereitung durch eine Schwester.

Die Nutzlast des Roboters soll 1 kg betragen und dabei muss eine Fräskraft von 10 N aufgebracht werden können. Die Grösse der Fräskraft wurde in Studien nachgewiesen [Plinkert, P.K]. An der Fräseerspitze wird eine Positionsauflösung von mindestens 0,01 mm erwartet, bei einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,05$ mm. Zudem darf sich der Roboter bei Fräskraft an der Fräseerspitze höchstens um 0,2 mm durchbiegen.

2 Entwicklungsprozess der Robotermechanik

2.1 Entwicklungsprozess

Hauptschwierigkeit bei der Entwicklung von medizintechnischen Produkten ist die Akzeptanz des Ärzteteams zu erreichen. Deshalb ist es von entscheidender Wichtigkeit, dass die Chirurgen bereits in einer frühen Phase des Projekts mit einbezogen werden. Deshalb wurde jedes Konzept und jeder Entwurf von den medizinischen Partnern auf ihre Eignung bezüglich Handling, Platzbedarf, Logistik

und Sicherheit im Operationssaal überprüft. Dies geschah nach jedem Meilensteinen, indem für die Roboterkinematik, die Befestigung des Roboters oder bei Änderungen an der Formgebung jeweils ein Mockup gefertigt wurde, das den medizinischen Partnern, aber auch dem Entwicklungsteam als Anschauungsmodell diente.

2.2 Entwicklung der Roboterkinematik

Im ersten Entwurf war eine Befestigung des Roboters seitlich an den Schienen des Operationstischs vorgesehen. Als geeignetes kinematisches Konzept erwies sich eine serielle Konfiguration mit fünf rotierenden Achsen. Der Roboter hatte im ausgestreckten Zustand eine Spannweite von mehr als einem Meter. Dadurch, wäre es möglich gewesen, ihn um den Patienten herum zur Eingriffsstelle hinter dem Ohr zu führen. Durch die Grösse und Anordnung des Roboters sollte auch ein schnelles Wegschwenken des Arms aus dem Arbeitsbereich des Chirurgen möglich sein.

Das gefertigte Modell des Roboters zeigte aber deutlich, dass ein solch grosser Instrumentenhalter in einem Operationssaal grosse Nachteile hat. Problematisch ist zum Beispiel der Zeitbedarf für das Befestigen am Operationstisch und die Zugänglichkeit für den Anmesisten.

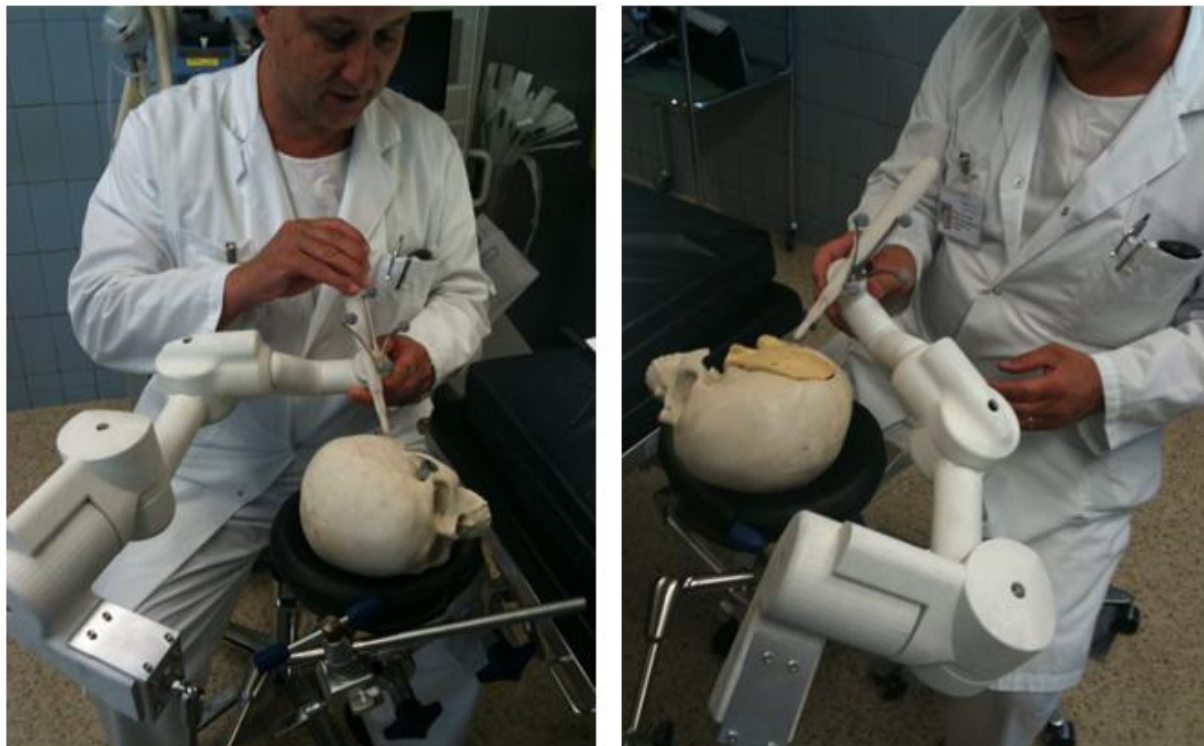


Abbildung 2: Klinische Tests

Für den überarbeiteten zweiten Entwurf wurde die Grösse des Systems soweit reduziert, dass nun die grösste Spannweite des Roboters im gestreckten Zustand 500 mm beträgt. Der Roboter soll über dem Kopf des Patienten platziert werden. So kann sichergestellt werden, dass das Gesicht erreichbar bleibt und der Arbeitsbereich des Chirurgen leicht freigegeben werden kann. Befestigt wird der Roboter mit flexiblen Armen, welche wiederum am Operationstisch befestigt sind.

Dieser Entwurf wurde ebenfalls als Modell hergestellt und diesmal mit einem Chirurgen im Operationssaal getestet (Abbildung 2). Die Grösse erwies sich als praxistauglich. Die Basis des Roboters soll sich allerdings nicht über dem Kopf des Patienten befinden sondern seitlich des Operationstisches, hinter dem Kopf. Durch die kinematische Anordnung der Achsen des Roboters ist es so möglich, diesen um den Kopf des Patienten herum zu führen. Es wurde zudem festgestellt, dass das Gewicht des

Roboters 5,5 kg nicht überschreiten soll, da sonst das Einrichten nicht von einer einzelnen Person erledigt werden kann.

2.3 Antriebseinheiten

Alle Roboterachsen sollen technisch ähnlich aufgebaut sein. Um das System weiter zu vereinfachen, sollen die drei Hauptachsen sowie die zwei Nebenachsen je die gleichen Getriebeeinheiten und Motoren enthalten. Der Hauptanteil des Lastmoments der Hauptachsen ist der statische Anteil resultierend aus der Gewichtskraft des Roboterarms. In den zwei Nebenachsen hingegen ist die Fräskraft die lastbestimmende Größe. Auch die Auslegung der Antriebe und Lagerungen erfolgte in mehreren Iterationsschritten. Die Gelenke des realisierten Roboters sind mit spielfreien Harmonic-Drive Getrieben und Hohlwellen ausgestattet, welche der Durchführung der Kabel dienen. Die Lagerungen wurden mit Vierpunktlager realisiert. Diese Konstruktion führte zu extrem kompakten und leichtem Roboterjunkten. In die letzte Achse ist ein Kraft-Momenten-Sensor integriert, welcher die angreifenden Kräfte und Momente misst und die Regelung der Kontaktkräfte erlaubt. Ausserdem erlaubt dieser Sensor eine haptische Bedienung des Roboters.

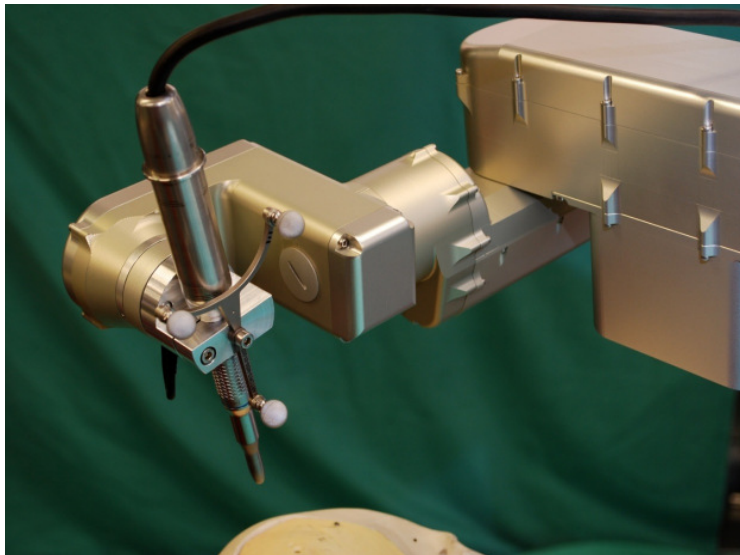


Abbildung 3: Fertiger HNO-Roboter mit einem chirurgischen Bohrer und einer optischen Referenz zur Erfassung der Endeffektorlage in einem optischen Positionsmesssystem



Abbildung 4: Roboterjunkt mit Kabeldurchführung durchs Zentrum des Harmonic-Drives

3 Elektronik

Die erforderliche Leistungselektronik für die Antriebseinheiten ist im Roboter untergebracht. So ist es möglich, den Roboter im Operationssaal mit nur je einem Kabel für Energieversorgung und Signale mit der Steuerung zu verbinden. Die Achsregelsysteme sind auf mehreren Prints einer selbstentwickelten Steuerelektronik zwischen Achse 2 und 3 und bei Achse 1 direkt im Roboter untergebracht und werden über einen CAN-Bus angesteuert. Diese Elektronik steuert die CAN-Kommunikation. Für zusätzliche Regelaufgaben steht noch ein zusätzlicher CAN-Bus zur Verfügung. Beim Abschalten der Energie werden alle Achsen mit Bremsen blockiert und die aktuellen Achspositionen werden in einen nichtflüchtigen Speicher geschrieben. Beim Starten des Systems werden die gespeicherten Positionen zurück in die Regelung geladen. Auf diese Weise wird ein digitaler Mechanismus für einen Absolutencoder realisiert. Zur Sicherheitsüberwachung werden auf den Prints zusätzlich Temperatur und Beschleunigungen erfasst und entsprechend ausgewertet.

Aus Sicherheitsgründen wird im Operationssaal eine redundante Positionsüberwachung durch eine optische Messkamera eingesetzt, so dass bei Fehlern in der Hardware und Software der Robotersteuerung und der Antriebseinheiten das System bei einem etwaigen Fehlerhalten sofort außer Kraft gesetzt werden kann.

4 Einsatz und Schlussfolgerung

Nach Realisierung des Robotersystems, dessen elektrischer und informationstechnischer Inbetriebnahme wurden eine Reihe von Tests zur Bestimmung der verfügbaren Genauigkeiten durchgeführt. Es konnte bereits gezeigt werden, dass der Roboter Trajekturen abfahren kann, deren Positionsabweichungen unterhalb des Messrauschens von optischen Positionsmesssystemen liegen.

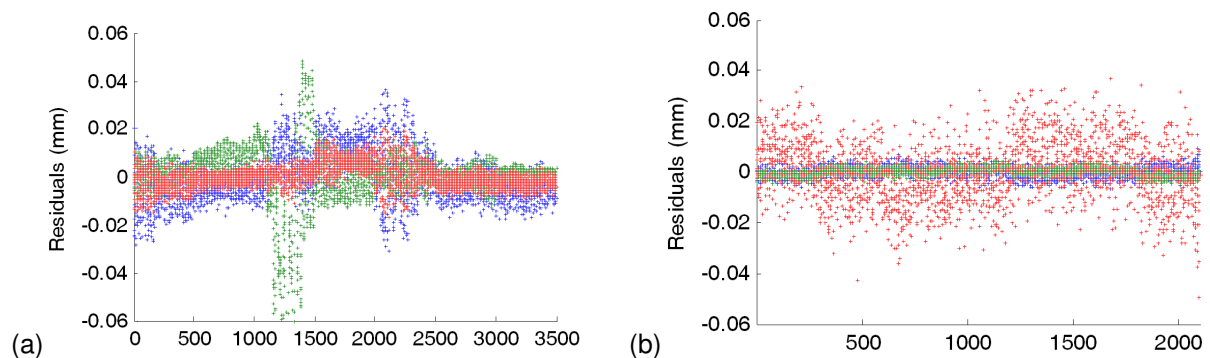


Abbildung 5: Messung der Roboterbewegungen in verschiedenen optischen Koordinatensystemen a) NDI Optotrack und b) Axios Cambar B1. Die Präzision des Roboters liegt unterhalb des Messrauschens der Kamerasysteme.

Nach Abschluss der Realisierungsarbeiten des Systems, erfolgen derzeit eine Reihe von Arbeiten zur Integration des Roboters in eine chirurgische Navigationsanwendung. Ziel des Einsatzes wird es später sein, Bohr- und Fräsvorgänge am Schädel mit einer Prozesspräzision (Summe aller Fehler: Bildgebung, Navigation) von unter 0.3 mm zu erreichen.

5 Referenzen

- Balachandran R., Mitchell, J.E. Blachon G., Noble J.H. Benoit M. Dawant, Fitzpatrick J.M., Labadie R. (2010): Percutaneous cochlear implant drilling via customized frames: An in vitro study, *Otolaryngology–Head and Neck Surgery* (2010) 142, 421-426
- Helms, J.: Chirurgie Manual – Chirurgische Technik für die Cochlea-Implantation; Eigenverlag der Universität Würzburg, Würzburg: 2004
- Majdani O., Rau T.S., Baron S., Eilers H., Baier C., Heimann B., Ortmaier T., Bartling S., Lenarz T., Leinung M. (2009): A robot-guided minimally invasive approach for cochlear implant surgery: preliminary results of a temporal bone study. *Int. J. Computed Assisted Radiol. Surg.* 2009 Sep;4 (5):475-86
- Plinkert, P.K.: Einsatz eines Roboters an der lateralen Schädelbasis – Evaluation einer roboter-gesteuerten Mastoidektomie; *Kopf- und Hals-Chirurgie am anatomischen Präparat / Ausgabe 7*, Juli 2001, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg: 2001