

Konfigurierbares, flexibles Instrumentensystem für die minimaltraumatische intrakranielle Chirurgie

J. Mintenbeck¹, C. Ledermann¹, P. Hoppen², J. Raczkowsky¹, V. Schulze², H. Wörn¹

¹Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik, Karlsruhe, Germany

²Karlsruher Institut für Technologie, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruhe, Germany

Kontakt: mintenbeck@ira.uka.de

Abstract:

Standardmäßig werden Tumore an der Latero- und Frontobasis des Schädels mit starren Instrumenten entfernt, welche über relativ große Schädelöffnungen eingeführt werden. Trotz sorgfältiger präoperativer Planung kann es dabei vorkommen, dass relevante Nervenstrukturen beschädigt werden. Ferner ist die Eröffnung der Schädelbasis immer mit Risiken verbunden. In diesem Paper wird ein mechatronisches System vorgestellt, welches eine flexible Struktur aufweist und durch den Nasentrakt eingeführt wird. Durch die Flexibilität des Systems können Risikostrukturen einfacher umgangen werden, wobei ein integrierter Formsensordie Form und Geometrie stetig überwacht. Ebenso wird ein Fräskopf integriert, mit dem Knochen schädigungsfrei bearbeitet werden können und somit Zugänge zum Tumor durch Knochen hindurch ermöglicht werden. Basierend auf ersten Prototypen werden die einzelnen Bausteine des Systems – der mechanische Aufbau, die Sensorik und der Fräskopf – vorgestellt sowie jeweils erste Ergebnisse präsentiert.

Schlüsselworte: Minimalinvasive Chirurgie, roboterassistiert, Neurochirurgie, flexible Instrumente, Formsensoren, Knochenfräsen

1 Problemstellung

Die Schädelbasis enthält sehr relevante und vital notwendige Strukturen. An der lateralen Schädelbasis und im Bereich der mittleren Schädelgrube befinden sich beispielsweise eingebettet in den Knochen des humanen Felsenbeins die innere Halsschlagader, der Gesichtsnerv, das Innenohr mit Gleichgewichts- und Hörorgan sowie Anteile des Geschmacksnervs. Bilden sich in diesem Bereich Tumore, so sind sehr präzise Interventionen für ein minimales Trauma beim Patienten gefordert. Bei solchen mikro-chirurgischen Eingriffen ist ein flexibler definierter Knochenabtrag im Millimeterbereich mit Schonung und Erhalt der darin liegenden Nerven- und Gefäßbahnen zwingend erforderlich.

Heutige, manuelle Eingriffe erfordern für den Zugang bereits relativ große Schädelöffnungen. In einigen Fällen ist es bereits möglich, starre Instrumente über die laterale Schädelbasis über mehrere gerade Bohrkanaäle einzuführen. Dabei können allerdings, trotz sorgfältiger präoperativer Planung der Zugänge, innere Strukturen teilweise beschädigt werden. Für eine roboterassistierte Durchführung derartiger Eingriffe bedarf es neuartiger mechatronischer Systeme, die einen nichtlinearen Zugang ermöglichen. Hierbei existieren einige Forschungsprojekte, wie das MINIR-Projekt der Universität von Maryland [1,2]. Ergänzend dazu existiert ein Neurochirurgieroboter von Tanaka et al. [3]. Zur robotergestützten Erzeugung von Zugängen im Schädel mittels Fräsen gibt es ebenfalls Forschungsarbeiten, bspw. von Plinkert et al. [4].

Aufgrund der aktuell noch sehr geringen Anzahl an Systemen für die Neurochirurgie, speziell für die Thematik der intrakraniellen Chirurgie, forscht das Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik (IPR) an einem konfigurierbaren Instrumentensystem, welches die Fähigkeiten der Hand des Chirurgen in Bezug auf Beweglichkeit und Präzision nachbilden soll. Am Institut für Produktionstechnik (WBK) wird an Fräswerktechniken für die Knochenzersetzung samt passenden Testumgebungen geforscht.

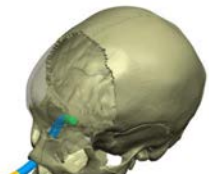


Abbildung 1: Eingriff mit Instrumentensystem

2 Material und Methoden

Das zu entwickelnde Instrumentensystem ist aus insgesamt drei Komponenten aufgebaut und soll durch die Nase eingeführt werden (siehe Abb. 1). Hierfür ist das Instrument aus einem starren rein translatorischen Anfang mit flexibler Fort-

führung geplant. Am Ende der flexiblen Struktur ist es möglich, ein Werkzeug zu adaptieren, also z.B. eine Kamera, einen Greifer oder auch einen Fräskopf. Des Weiteren ist im Inneren der gesamten Struktur eine Formsensoren integriert, die es ermöglicht, die aktuelle Instrumentenlage und Geometrie zu erfassen. Ergänzt wird das System um ein teilautarkes Werkzeug, welches am distalen Ende der flexiblen Struktur fixiert ist. Hierbei liegt der Fokus auf einem Fräskopf, welcher die Erzeugung von kleinen Kavitäten in knöchernen Strukturen ermöglicht.

2.1 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau des flexiblen Manipulators besteht aus einer bereits am IPR vorhandenen Grundstruktur, die einen Durchmesser von 10 mm aufweist. Diese besteht aus zwei unabhängig aktuierten Segmenten, welche jeweils zwei Freiheitsgrade aufweisen. Die einzelnen Segmente wiederum bestehen aus abwechselnd starren und elastischen aneinandergereihten Elementen, die eine maximale Segmentlänge von bis zu 90 mm erlauben. Mit Hilfe von Seilzügen werden die einzelnen Segmente aktuiert, indem die elastischen Elemente deformiert werden. Der dabei kleinste erreichbare Krümmungsradius beträgt 45 mm.

Im Inneren des Manipulators ist ein 3 mm breiter Arbeitskanal, welcher sowohl für die Sensorik als auch für die Instrumente verwendet wird. Zusätzlich sollen die elektrischen und informationstechnischen Signale über diesen Kanal an das Werkzeug weitergeleitet werden. Umhüllt ist diese flexible Struktur von einem elastischen Schlauch, der die innere Mechanik vor dem Eindringen von Flüssigkeiten schützt. Das Antriebssystem für die Seilzüge übernehmen Miniatur-Hydraulikzylinder, die die einzelnen Seile mit einer definierten Kraft spannen und positionieren. Die dafür erforderlichen Hydraulikventile und -pumpen werden außerhalb des Manipulators vorgehalten. Dies ermöglicht im Notfall auch die sofortige Drucklosschaltung des Systems. Sobald der Manipulator die gewünschte Position erreicht hat, wird ein ebenfalls hydraulisch aktuiertes Zusatzsystem aktiviert, das die Fixierung der Struktur übernimmt. Dieser Schritt ist erforderlich, um für Fräs- und Bohrprozesse eine entsprechende Steifigkeit des Systems zu erreichen. Abschließend ist es möglich, das Werkzeug über eine elektromechanische Kupplung an der flexiblen Struktur zu kontaktieren. Diese Verbindung ermöglicht in der präoperativen Phase einen sehr schnellen und gleichzeitig sicheren Wechsel der Werkzeuge. Am Anfang der flexiblen Struktur bildet ein starres Element einerseits die mechanische Verbindung zum übergeordneten Stativ, andererseits die Befestigung der flexiblen Struktur.

Das gesamte System ist schematisch mit den drei Hauptkomponenten in Abb. 2 dargestellt.

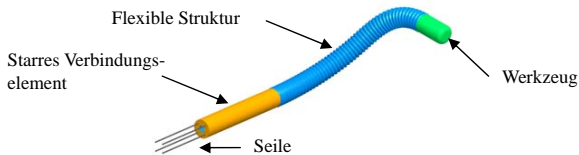


Abbildung 2: Aufbau des Instrumentensystems mit einer starren Trägerstruktur, einer flexiblen, durch Seile aktuierten Struktur und dem angeflanschten Werkzeugkopf – innenliegende Sensorik und Hydraulikkomponenten sind nicht dargestellt.

2.2 Sensorik

In das Instrument integriert werden soll ein Formsensoren, welcher die aktuelle Geometrie des Instrumentes misst. Hierzu werden Fiber Bragg Gratings verwendet, mit denen durch Biegung entstandene Dehnungen gemessen werden. Fiber Bragg Gratings sind elektromagnetisch verträglich, da sie auf optischer Basis arbeiten, sowie biokompatibel und damit prinzipiell für chirurgische Werkzeuge zulässig. Mit den Gratings werden an signifikanten Stellen entlang des Instruments Dehnungen gemessen, aus denen auf die entsprechende Krümmung geschlossen wird. Anhand dieser Krümmungswerte ist es dann mit Methoden aus der Differentialgeometrie möglich, die Gesamtform des Instrumentes zu berechnen [5] (siehe Abb. 3). Angepasst und optimiert auf das spezifische Instrument ist mit Hilfe des Formsensors theoretisch eine Berechnung der Position der Spitze des Instrumentes mit einer Genauigkeit von einem Prozent möglich, bezogen auf die Gesamtlänge des Instruments. Somit kann die Position der Werkzeugschneide bei einer Gesamtlänge von 180 mm und 18 Gelenken auf 1,8 mm genau bestimmt werden. Werden zusätzlich die Informationen genutzt, welche durch die aktive Steuerung des Instruments gegeben sind, wie z.B. die Kraft auf den Seilzügen, kann dieser Wert weiter verbessert werden.

Der Formsensor wird in den Arbeitskanal des Instruments geschoben, wodurch die Konfiguration und Geometrie des Instruments beim Einführen in den Kopf dauerhaft überwacht werden kann, sodass keine vitalen Strukturen beschädigt werden. Sobald die Zielstruktur erreicht ist, wird das Instrument wie oben beschrieben fixiert und der Formsensor herausgenommen, sodass entsprechende Werkzeuge eingeführt werden können.

2.3 Werkzeuge

Der effizienteste Weg zur Schaffung von Zugängen im Knochen ist die Verwendung von Bohr- oder Fräs Werkzeugen. Zur Entwicklung und Integration eines Fräskopfs ist es elementar zu wissen, wie groß die auftretenden Kräfte und Momente sind. Hierzu wurden entsprechende Versuche auf einem Bearbeitungszentrum am Institut für Produktionstechnik (WBK) durchgeführt. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der Versuche mit einem 4 mm großen Werkzeug gezeigt werden. Gemessen wurden sowohl die Kräfte in allen drei Raumrichtungen als auch das dafür benötigte Drehmoment. In Vorversuchen wurde mit Hilfe einer Thermokamera ermittelt, dass eine Knochenbearbeitung ohne Kühlung in den allermeisten Fällen zu einer Schädigung aufgrund zu hoher Temperaturen führt und somit eine Kühlung zwingend erforderlich ist.

Für die Versuche wurde ein Stück Pferdekniespeiche verwendet, da dies aufgrund seiner Härte den „worst case“ darstellt und dem menschlichen Felsenbein (dem härtesten Knochen im menschlichen Schädel) in seinen Eigenschaften sehr nahe kommt. Das benötigte Drehmoment zur Erzeugung von Bohrungen liegt unterhalb von 100 mNm mit vereinzelt Spitzenwerten bis 300 mNm. Die Ursache dieser Maximalwerte ist nicht abschließend geklärt, es wird jedoch vermutet, dass diese aufgrund der Inhomogenität des Materials auftreten. Das benötigte Drehmoment lässt sich mechanisch – mittels flexibler Wellen – sowie hydraulisch übertragen. Elektromotoren weisen ein deutlich zu geringes Drehmoment bei dem verfügbaren Bauraum auf und bauen mit vorgeschaltetem Getriebe deutlich zu groß.

Einen sehr großen Einfluss auf die benötigte Steifigkeit und Haltekräfte des Instruments haben die Kräfte in Vorschubrichtung sowie senkrecht dazu. Besonders die relativ geringe Steifigkeit des langen und dünnen Instruments limitiert die möglichen Fräsparameter. Die auftretenden Kräfte variieren zwischen 15 N (bei einer Helix-förmigen Bewegung) und 30 N (bei einer rein linearen Bewegung). Der Vorteil der geringeren Vorschubkraft bei Helix-förmigem Vorschub resultiert jedoch in deutlich höheren Kräften senkrecht zur Vorschubrichtung von bis zu 60 N. Die Versuche wurden jedoch auf einem Bearbeitungszentrum mit verhältnismäßig hoher Steifigkeit und Antriebsleistung durchgeführt. Bei der Verwendung eines Prüfstands mit Steifigkeit und Antriebsleistung analog der des Instruments werden deutlich geringere Kräfte erwartet. Allerdings sinkt dadurch gleichzeitig die Präzision bei der Bearbeitung, da sich das Instrument beim Fräsen elastisch verformt. Ebenso ist über eine weitere Optimierung der Prozessparameter und des verwendeten Werkzeugs eine weitere Senkung der Kräfte sehr wahrscheinlich. Die erwarteten Prozesszeiten werden als unkritisch gesehen, da sie voraussichtlich immer noch im Bereich weniger Minuten liegen.

3 Ergebnisse

Das zuvor beschriebene Instrumentensystem existiert im aktuellen Status mit seinen einzelnen Komponenten, die unabhängig voneinander entwickelt werden. Hierbei ist der eingesetzte Manipulator, bestehend aus zwei Segmenten und einer Gesamtlänge von 180 mm, in der Lage, ohne Fixierung der Struktur an der Instrumentenspitze Kräfte von 2 N zu erzeugen. Ferner ermöglicht der aktuelle Aufbau mit vier aktiven Freiheitsgraden einen Krümmungsradius von 45 mm.

Ein prototypischer Formsensor konnte im großen Maßstab erfolgreich hergestellt werden [6]. Dieser ist in der Lage, einfache Kurven und S-Formen robust zu erkennen (vgl. Abb. 3). An einer Miniaturisierung des Sensors auf einen Durchmesser von 3 mm oder weniger, sodass er in den Arbeitskanal des Instrumentensystems passt, wird aktiv gearbeitet - an diesem wird dann auch eine Genauigkeitsvalidierung erfolgen.

Die Randbedingungen bzgl. Kraft, Drehmoment und Temperatur des Knochenfräsprozesses wurden in einem ersten Schritt geklärt und flossen zusammen mit dem zur Verfügung stehenden Bauraum als Randbedingung in die Entwicklung von Konzepten ein. Dem mechanischen und hyd-

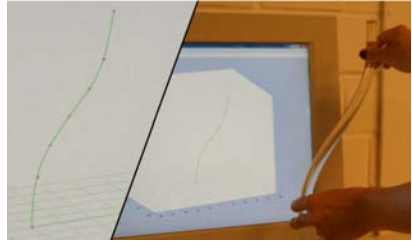


Abbildung 3: Erkennung von S-Formen durch den Formsensor.

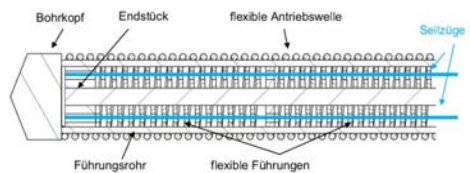


Abbildung 4: Antriebskonzept mit flexibler Hohlwelle

raulischen Antrieb ist gemein, dass die Leistung außerhalb des Instruments bereitgestellt und dann durch das Instrument zum Fräskopf geleitet wird. Geeignet sind massive flexible Wellen mit einem Durchmesser von 3 mm bzw. innen hohle flexible Wellen mit einem Durchmesser von 7 mm sowie entsprechende Hydraulikleitungen. Wichtig hierbei ist eine biegeschlaife Weiterleitung der Antriebsleistung zum Fräskopf. Dies ist sowohl mit flexiblen Wellen wie auch einer entsprechend ausgeführten Hydraulikleitung gegeben. Abb. 4 zeigt ein Konzept mit flexibler Welle. Hierbei umgibt die flexible Welle das Instrument. An der Entwicklung eines Konzepts, bei dem die flexible Welle im 3 mm Arbeitsschaft des Instruments geführt wird, wird derzeit gearbeitet.

4 Zusammenfassung und Diskussion

In dieser Arbeit wurde ein Instrumentensystem vorgestellt, das auf einzelnen mechatronischen Bausteinen basiert und die Operation an Tumoren an der seitlichen Schädelbasis vereinfachen soll. Dabei werden erstmalig die Komponenten eines flexiblen Manipulators mit einer Formsensorik und einem Fräskopf verknüpft. Diese einzelnen technologischen Komponenten wurden im Einzelnen kurz beschrieben, befinden sich aktuell aber noch im Laboraufbau und müssen zunächst grundsätzlich getestet, integriert und anschließend evaluiert werden. Speziell die Erzeugung einer flexiblen und gleichzeitig für Fräsaufgaben versteifbaren Struktur stellt hierbei die größten Herausforderungen dar.

Sobald die Einzelkomponenten für den beschriebenen Anwendungsfall jeweils optimiert wurden, sollen sie in ein Gesamtsystem integriert werden. Das so entwickelte Instrument wird einen Durchmesser von etwa 10 mm haben und damit zu groß sein, um es durch einen menschlichen Nasentrakt einzuführen. Es wird daher zunächst an einem überdimensionierten Phantomkopf getestet und evaluiert werden, um bereits mögliche Problematiken festzustellen und das System entsprechend zu verbessern. Wenn erfolgreiche Testläufe durchgeführt wurden, wird die Miniaturisierung des Gesamtsystems mit allen Einzelkomponenten im Fokus stehen.

Visionäres Ziel ist die Erforschung eines flexiblen minimaltraumatischen Instrumentensystems für die intrakranielle Chirurgie, welches auf dem Gebiet der Neurochirurgie völlig neue Möglichkeiten der Behandlung ermöglicht. Bereits durch die Flexibilisierung und den Zugang über den Nasentrakt ist ein Zugewinn an Manipulierbarkeit bei gleichzeitiger Reduktion des Traumas möglich.

5 Danksagungen

Diese Arbeit wird gefördert und unterstützt durch das Ministerium für Wirtschaft, Forschung und Kunst Baden Württemberg im Rahmen des Förderprogrammes „Innovative Projekte“, sowie durch die DFG-geförderte Forschergruppe „Single-Port-Technologie für gastroenterologische und viszeralkirurgische endoskopische Interventionen“ (WO 720/36-1).

6 Referenzen

- [1] Mingyen Ho, Jaydev P. Desai, *Towards the Development of a SMA-Actuated MRI-Compatible Tendon-Driven Neurosurgical Robot*, 683-688, IEEE International Conference on Robotics and Automation 2012
- [2] Mingyen Ho, Alan B. McMillan, J. Marc Simard, Rao Gullapalli, *Toward a Meso-Scale SMA-Actuated MRI-Compatible Neurosurgical Robot*, 213-222, IEEE Transaction on Robotics, Vol. 28, 2012
- [3] K. Hongo, T. Goto, T. Miyahara, Y. Kakizawa, J. Koyama, and Y. Tanaka, *Telecontrolled micromanipulator system (NeuroBot) for minimally invasive neurosurgery*, 63-66, Acta Neurochirurgica, Vol. 98, 2006
- [4] P.K. Plinkert, B. Plinkert, A. Hiller, J. Stallkamp, *Einsatz eines Roboters an der lateralen Schädelbasis*, 514-522, HNO, Vol. 49, 2001
- [5] J. P. Moore and M. D. Rogge, *Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions*, Opt. Express, vol. 20, no. 3, pp. 2967-2973, Jan 2012. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-20-3-2967>
- [6] H. Pauer, C. Ledermann, O. Weede and H. Woern, *Towards Building a Miniaturized Shape Sensor*, under review