

Kontinuumsroboter auf Basis vorgebogener Nitinolröhrchen: Evaluierung eines Prototypen für die Transnasale Schädelbasischirurgie

Jessica Burgner¹, Hunter B. Gilbert¹, Philip J. Swaney¹, Paul T. Russell III² und Robert J. Webster III^{1,2}

¹Vanderbilt University, Department for Mechanical Engineering, Nashville, TN, USA

²Vanderbilt University Medical Center, Department for Otolaryngology, Nashville, TN, USA

Kontakt: jessica.burgner@vanderbilt.edu

Abstract:

Die konventionelle Instrumentierung bei der transnasalen Schädelbasischirurgie kann nicht immer einen linearen Zugang zum Situs gewährleisten der gleichzeitig ausreichend Manipulationsraum bietet. Kontinuumsroboter auf Basis vorgebogener Nitinolröhrchen erlauben dank ihrer flexiblen, wendigen Natur erweiterte Manipulationsräume. In diesem Beitrag wird ein teleoperiertes Kontinuumsrobotersystem, das um Methoden der bildgestützten Navigation erweitert wurde, in einem humanen Schädel bezüglich der Erreichbarkeit signifikanter anatomischer Strukturen und des effektiven Arbeitsraumes evaluiert. Die vielversprechenden Ergebnisse zur Verwendung von Kontinuumsrobotern für eine zukünftige klinische Anwendung motivieren weitere experimentelle und theoretische Untersuchungen in diesem jungen Forschungsbereich.

Schlüsselworte: Kontinuumsroboter, kontinuierlicher Roboter, Medizinrobotik, roboter-assistierte Chirurgie

1 Problem

Die transnasale Schädelbasischirurgie offeriert gegenüber herkömmlichen Zugangswegen eine geringere Traumatisierung, sowie Verringerung der Operations- und Hospitalisierungsdauer [1]. Der Eingriff erfolgt hier endoskopisch durch die Nase. Zugang zur Schädelbasis wird dabei transsphenoidal erreicht. So kann beispielsweise der Zugang zur Hypophyse und die Resektion sellärer Tumore (z.B. Hypophysenadenom) erfolgen [2], [3]. Die heute gängige Instrumentierung umfasst ein rigides Endoskop zur Visualisierung und rigide Instrumente mit geradem Schaft zur Resektion. Bei ungünstigen anatomischen Bedingungen ist aber nicht immer ein Zugang zur Hypophyse oder suprasellären Regionen gewährleistet, weil gerade Instrumente nicht ausreichend Manipulationsmöglichkeiten am Situs bieten. Wie in Abb. 1 gezeigt wird, können erweiterte Manipulationsräume erzielt werden, wenn beherrschbare, gebogene, nicht-lineare Instrumente verfügbar wären.

Das Konzept der kontinuierlichen Chirurgieroboter wurde 2006 von Webster et al. [4] und Dupont et al. [5] vorgestellt. Im Vergleich zu hyperredundanten Robotern sind hier keine diskreten Gelenke im eigentlichen Sinne vorhanden. Vielmehr handelt es sich um einen kontinuierlichen Manipulator. Dieser besteht aus mehreren ineinanderliegenden, vorgebogenen, flexiblen Röhrchen. Durch Translation und Rotation dieser Röhrchen zueinander, erfolgt die Aktuierung (siehe Abb. 2a). Beispielsweise kann ein Greifer an der dem Situs zugewandten Ende des inneliegenden Röhrchen als End-Effektor realisiert und so flexibel bewegt und gesteuert werden. Die Kinematik dieser Form von kontinuierlichen Robotern wird durch Kontinuumsmechanik beschrieben [6] und beherrscht mehrere beliebig vorgebogenen Röhrchen. Typischerweise werden die Röhrchen aus Nitinol gefertigt. Die Durchmesser der kleinsten verfügbaren Nitinolröhrchen ist derzeit 0,2 mm. Somit lassen sich Kontinuumsroboter dieses Typs realisieren, welche von den Ausmaßen mit medizinischen Nadeln vergleichbar sind, aber zugleich den Vorteil der oben genannten erweiterten Manipulationsräume bieten. Zusätzlich besteht ein wesentlicher Vorteil im freien Lumen des innersten Röhrchen, welches den Austausch von Instrumenten wie Zängchen, flexiblen Endoskopen und Lasern, oder auch Spülung und Absaugung ermöglicht.

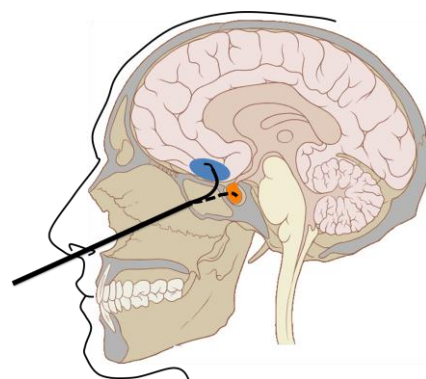


Abb. 1: Gebogene Instrumente wie Kontinuumsroboter ermöglichen erweiterte Manipulationsräume bei der transnasalen Schädelbasischirurgie, z.B. Erreichbarkeit der Hypophyse (orange) und suprasellären Region (blau).

Die roboter-assistierte, transnasale Schädelbasischirurgie ist bisher nur in wenige Forschungsarbeiten thematisiert worden. Es wurden Robotersysteme in der Literatur beschrieben, welche die Bohrung zum sicheren Eröffnen des Situs oder die roboter-assistierte Manipulation eines Endoskops zur Zielsetzung haben [7–12]. Des Weiteren wurde ein Kontinuumsroboter mit 4 mm Durchmesser vorgestellt um die visuelle Exploration des Sinus mit einer Kamera zu ermöglichen [13]. Der nasale Zugang zur Schädelbasis ist räumlich sehr eingeschränkt und erschwert die Applikation herkömmlicher Robotersysteme. Unser teleoperiertes System, das aus Kontinuumsrobotern mit vorgebogenen Nitinolröhrchen besteht, komplementiert die bisherigen Forschungsarbeiten bezüglich wendiger Manipulationsmöglichkeiten am Situs. In diesem Beitrag stellen wir im Speziellen das Anwendungsszenarios der transnasalen Schädelbasischirurgie sowie erste Evaluierungen vor.

2 Methoden

2.1 Teleoperiertes Robotersystem

Die wesentlichen Komponenten des 2011 vorgestellten Teleoperationssystems [14] werden im Folgenden zusammengefasst. Das Robotersystem besteht aus zwei Kontinuumsrobotermanipulatorarmen, welche jeweils aus drei Nitinolröhrchen zusammengesetzt sind (vgl. deren Parameter in Tab. 1). Die Röhrchen mit Innendurchmesser ID und Außendurchmesser OD haben ein geradliniges Segment mit der Länge L_S , gefolgt von einem vorgebogenen Segment mit der Länge L_C mit konstanter Krümmung κ . Die Aktuierung jedes Armes erfolgt durch drei auf einer Schiene gelagerten Schlitten, die jeweils ein Röhrchen an ihren Enden mit einer Spannzange greifen. Jeder Schlitten verfügt über zwei Motoren (RE 339152, Maxon Inc., Schweiz), welche - übersetzt durch Schneckengetriebe - die Translation und Rotation des Röhrchen ermöglichen. Zur Low-Level PID Steuerung wird ein Motion Control Board (DMC 4080, Galil Motion Control, USA) eingesetzt. Die Kommunikation mit dem High-Level Steuerrechner erfolgt per Ethernet. Die High-Level Steuerung wurde in C++ implementiert und realisiert die Teleoperation. Dazu wird unter Verwendung der berechneten, inversen Jacobi-Matrix des Manipulators die gewünschten Kartesischen Positions- und Winkelgeschwindigkeiten, die durch den Benutzer über ein Eingabegerät (Phantom Omni, Geomagic, USA) vorgegeben werden, in Gelenkgeschwindigkeiten transformiert. Dabei wurde die von Wampler et al. [15] vorgestellte Methode der gedämpften kleinsten Quadrate adaptiert. Die grafische Benutzeroberfläche umfasst die Darstellung des kinematischen Modells und Möglichkeiten zur benutzerspezifischen Parametrierung der Teleoperation (z.B. Bewegungsskalierung).

	Außen	Mitte	Innen
L_S [mm]	82,4	241,1	417,6
L_C [mm]	68,6	69,9	38,4
κ [mm^{-1}]	0,0032	0,0059	0,0128
OD [mm]	2,32	1,68	1,16
ID [mm]	1,87	1,35	0,76

Tab. 1: Röhrchenparameter.

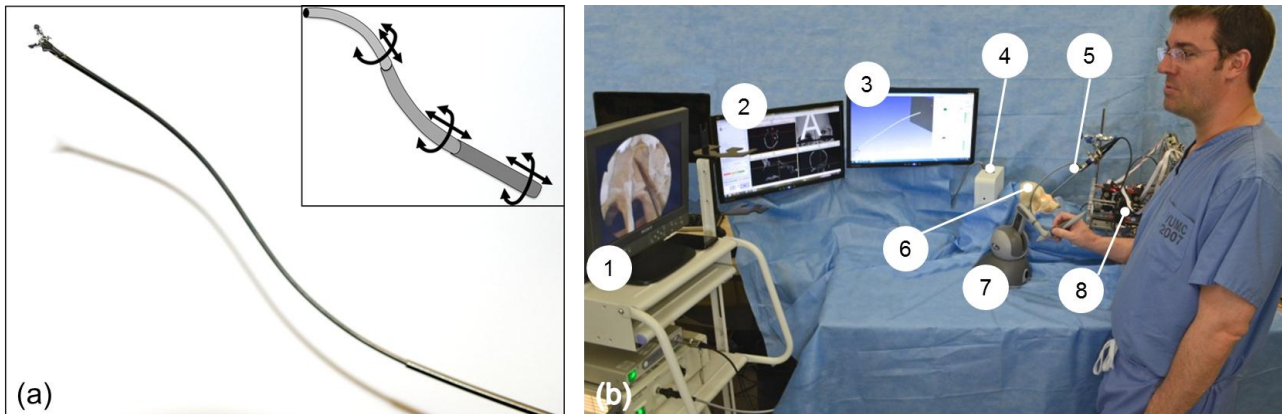


Abb. 2: (a) Greif-Manipulator aus drei vorgebogenen Nitinolröhrchen und schematische Darstellung des Aktuationsprinzips. (b) Der Kontinuumsroboter (8) im Laborsetup bei der teleoperierten Exploration der Keilbeinhöhle im humanen Schädel (6). Der Chirurg steuert den Manipulatorarm über das Eingabegerät (7). Der Blick des Endoskops (5) wird präsentiert (1) und durch die bildgestützte Navigation (2) sowie die High-Level Kontrollsoftware (3) komplementiert. Die Lage des End-Effektors wird kontinuierlich elektromagnetisch getrackt (4).

2.2 Bildgestützte Navigation

Das teleoperierte Robotersystem wurde um ein Modul zur bildgestützten Navigation erweitert. Um die Position und Lage der Manipulatorarme des Roboters zu erfassen, wird ein elektromagnetischen Trackingsystem (NDI Aurora, Northern Digital Inc., Kanada) verwendet. Dazu wird jeweils eine Magnetspule (0,8 mm Durchmesser) in das innere Röhrchen integriert. Zur bildgestützten Navigation wird 3D Slicer [16] verwendet und die Trackinginformationen mittels o-

penIGTLink übertragen. Die Registrierung der präoperativen medizinischen Bilddaten erfolgt oberflächenbasiert mittels eines Oberflächenmodells und intraoperativer Vermessung der korrespondierenden Oberfläche mit einem getrackten Pointer. Die Position des End-Effektors eines Manipulatorarmes wird durch ein Fadenkreuz in der triplanaren Ansicht der medizinischen Bilddaten angezeigt.

2.3 Experimentelle Evaluierung

Für die Evaluierung des Robotersystems wurden Erreichbarkeitsversuche mit einem humanen Schädel (Skulls Unlimited International, Inc., USA) durchgeführt. Die Keilbeinhöhle des Schädels wurde chirurgisch eröffnet. Im Anschluss wurde ein CT Datensatz aufgenommen (isotrope Voxel 0,4 mm). Zur Registrierung wurde der Schädel mit einem Schwellwertverfahren segmentiert und ein 3D Oberflächenmodell erzeugt. Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurde der Schädel in einem Schaumstoffkissen weitestgehend fixiert und auf dem Tisch vor dem Robotersystem in der klinisch angedachten, relativen Lage zueinander platziert. Zur Visualisierung der Keilbeinhöhle wurde ein rigides Endoskop (30° Optik, 2,7 mm Durchmesser, Olympus, USA) mit einem Haltearm fixiert. Für die bildgestützte Navigation wurde die oben beschriebene oberflächenbasierte Registrierung des Schädels durchgeführt. Der experimentelle Aufbau ist in Abb. 2b dargestellt. Für die Versuche wurde jeweils nur einer der beiden Manipulatorarme des Robotersystems verwendet.

2.3.1 Erreichbarkeit anatomischer Strukturen

In diesem Versuch wurde die Erreichbarkeit von fünf vorab vom Chirurgen festgelegten anatomischen Strukturen in der Keilbeinhöhle (Rostrum, linker und rechter Keilbeinhöhlengrund, superiorer und Mittelpunkt des Septums) getestet. Der Chirurg steuerte dazu den Manipulatorarm über das Eingabegerät zu den anatomischen Strukturen. Beim Erreichen der Struktur wurde das Endoskopbild als Standbild gespeichert.

2.3.2 Effektiver Arbeitsraum

Für diesen Versuch wurde der Chirurg aufgefordert den Manipulatorarm in der Nasenhöhle zu allen erreichbaren Positionen zu bewegen um den effektiven Arbeitsraum des Robotersystems zu quantifizieren. Die Position des Manipulatorarmes wurde dabei fortlaufend mittels des Trackingsystems aufgezeichnet.

3 Ergebnisse

Die in Abschnitt 2.3 beschriebene experimentelle Evaluierung der Erreichbarkeit von relevanten anatomischen Strukturen in der Keilbeinhöhle war erfolgreich. Alle fünf vorab festgelegten Strukturen konnten vom Chirurgen mit dem Robotersystem erreicht werden. Abb. 3a zeigt die überlagerte Darstellung der jeweilig aufgezeichneten Endoskopbilder. Abb. 3b zeigt das Erreichen des Mittelpunktes des Keilbeinhöhlenseptums. In Abb. 3c sind die aufgezeichneten Positionen des Manipulatorarmes während des Versuches zur effektiven Arbeitsraumbestimmung als Punktwolke dargestellt. Dazu wurden die aufgezeichneten Endeffektor-Positionen unter Verwendung der Registrierinformation in das Koordinatensystem des CT Datensatzes transformiert und mit dem 3D Oberflächenmodell des Schädels visualisiert. Der effektive Arbeitsraum deckt die für den Zugang zur Schädelbasis zu erreichenden und zu passierenden anatomischen Strukturen ab.

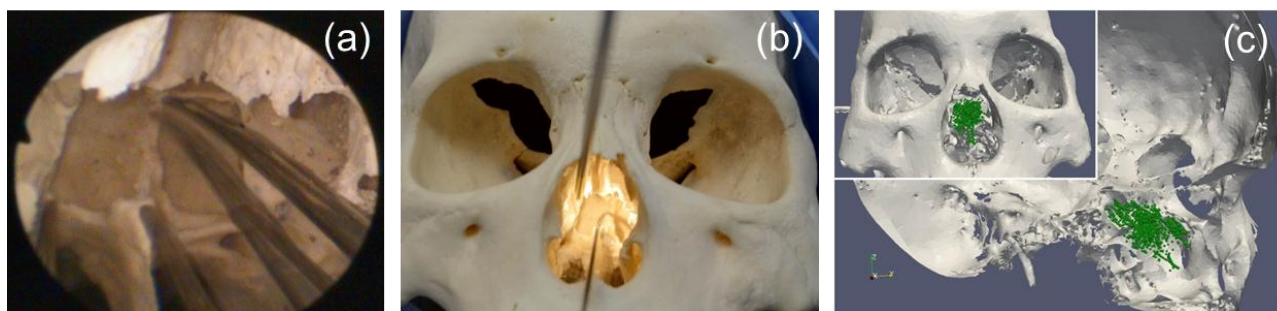


Abb. 3: (a) Überlagerte Darstellung der fünf mit dem Roboter erreichten anatomischen Strukturen in der Keilbeinhöhle. (b) Der Manipulatorarm berührt den Mittelpunkt des Septums der Keilbeinhöhle. Das rigide Endoskop (oben im Bild) visualisiert den Situs (vgl. a). (c) Visualisierung des effektiven Arbeitsraums in der Nasenhöhle (lateral und frontal).

4 Diskussion

In diesem Beitrag wurde ein Prototyp sowie die Evaluierung eines neuartigen Kontinuumsrobotersystems für die transnasale Schädelbasischirurgie in einem humanen Schädel unter Laborbedingungen vorgestellt. Vorangegangene Experimente zeigen die prinzipielle Anwendbarkeit des Robotersystems auch bei vorhandenem Weichgewebe [14].

Eine Parametrierung der Röhren auf Basis von Bilddaten des Patienten ist Gegenstand unserer derzeitigen Forschung um beispielsweise Erreichbarkeit und Arbeitsraum zu optimieren. Eine individuelle und anwendungsspezifische Ausle-

gung des Roboters soll damit möglich werden. Weitere zukünftige Erweiterungen des Robotersystems beinhalten beispielsweise die Integration eines Handgelenks am End-Effektor, um die Wendigkeit zu erhöhen. Ebenso sind die Integration von Kraftsensorik und Rückkopplung gemessener Kräfte an den Chirurgen, als auch die Entwicklung eines dedizierten Eingabegerätes denkbar. Darüber hinaus ist die Entwicklung geeigneter Trajektorienerzeugungs- und Kollisionsvermeidungsalgorithmen für diesen Typ von Kontinuumsroboter notwendig, um die Benutzerinteraktion performanter und intuitiver zu gestalten.

Die bisher erzielten Forschungsergebnisse mit unserem Kontinuumsrobotersystem sehen wir als vielversprechend für chirurgische Applikationen an, weil wir ein hohes Potenzial für die Erweiterung chirurgischer Methoden in schwer zugänglichen und räumlich beengten Anatomien sehen. Neben der endonasalen Schädelbasischirurgie ist die Verwendung der nicht-linearen, wendiger Manipulatorarme - bei direkter Kontrolle durch den Chirurgen - auch für alternative Zugangsmethoden und sogar in vielen weiteren therapeutischen Szenarien verschiedenster Körperregionen denkbar, die während der Konferenz diskutiert werden sollen.

Danksagung

Die Autoren danken D. Caleb Rucker für die Realisierung von Systemkomponenten, sowie Kyle D. Weaver für wertvolle Diskussionen. Die Arbeit wurde in Teilen unter der Bewilligungsnummer IIS-1054331 von der National Science Foundation und der Bewilligungsnummer R21 EB011628 von den National Institutes of Health gefördert. Die Inhalte des Beitrages obliegen der Verantwortung der Autoren und repräsentieren nicht unbedingt die offiziellen Sichtweisen der National Science Foundation und National Institutes of Health

5 Referenzen

- [1] P. Cappabianca, "Cranial, craniofacial and skull base surgery." Springer, 2009.
- [2] W. Reith, "Tumoren der Sellaregion," *Der Radiologe*, vol. 49, no. 7, pp. 624–31, 2009.
- [3] M. Wagenmann and J. Schipper, "The transnasal approach to the skull base. From sinus surgery to skull base surgery.," *GMS Current Topics in Otorhinolaryngology, Head and Neck Surgery*, vol. 10, p. Doc08, 2011.
- [4] R. Webster, A. Okamura, and N. Cowan, "Toward Active Cannulas: Miniature Snake-Like Surgical Robots," in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 2857–2863.
- [5] P. Sears and P. Dupont, "A Steerable Needle Technology Using Curved Concentric Tubes," in *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2006, pp. 2850–2856.
- [6] D. C. Rucker, B. A. Jones, and R. J. Webster III, "A Geometrically Exact Model for Externally Loaded Concentric-Tube Continuum Robots," *IEEE Transactions on Robotics*, 2010.
- [7] J. Wurm, T. Dannenmann, C. Bohr, H. Iro, and K. Bumm, "Increased safety in robotic paranasal sinus and skull base surgery with redundant navigation and automated registration," *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 01, no. 03, p. 42, 2005.
- [8] T. Xia, C. Baird, G. Jallo, K. Hayes, N. Nakajima, N. Hata, and P. Kazanzides, "An integrated system for planning, navigation and robotic assistance for skull base surgery.," *International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, vol. 4, no. 4, pp. 321–30, 2008.
- [9] C. Nimsky, J. Rachinger, H. Iro, and R. Fahlbusch, "Adaptation of a hexapod-based robotic system for extended endoscope-assisted transsphenoidal skull base surgery.," *Minimally Invasive Neurosurgery*, vol. 47, no. 1, pp. 41–6, 2004.
- [10] K. W. G. Eichhorn and F. Bootz, "Clinical Requirements and Possible Applications of Robot Assisted Endoscopy in Skull Base and Sinus Surgery," *Acta Neurochirurgica*, vol. 109, pp. 237–240, 2011.
- [11] M. Fischer, C. Gröbner, A. Dietz, M. Krinninger, T. C. Lüth, and G. Strauss, "A technique with manipulator-assisted endoscope guidance for functional endoscopic sinus surgery: proof of concept.," *Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, vol. 145, no. 5, pp. 833–9, 2011.
- [12] M. Fischer, C. Gröbner, A. Dietz, T. C. Lueth, and G. Strauß, "Klinischer Einsatz eines Endoskop-Manipulator-Systems in der endo- und transnasalen Chirurgie," *Laryngo- Rhino- Otologie*, vol. 91, no. 8, pp. 487–93, 2012.
- [13] H.-S. Yoon, S. M. Oh, J. H. Jeong, S. H. Lee, K. Tae, K.-C. Koh, and B.-J. Yi, "Active bending endoscope robot system for navigation through sinus area," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 967–972.
- [14] J. Burgner, P. J. Swaney, D. C. Rucker, H. B. Gilbert, S. T. Nill, P. T. Russell, K. D. Weaver, and R. J. Webster, "A bimanual teleoperated system for endonasal skull base surgery," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2011, pp. 2517–2523.
- [15] C. Wampler, "Manipulator Inverse Kinematic Solutions Based on Vector Formulations and Damped Least-Squares Methods," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 16, no. 1, pp. 93–101, 1986.
- [16] "3d Slicer," 2012. [Online]. Available: <http://www.slicer.org>.