

Robotergestütztes Fräsen an der lateralen Schädelbasis: Kraft-basierte lokale Navigation bei der Implantatbetтанlage

Robot-based milling at the lateral skull base: Force-based local navigation for making implant cavities

Prof. Dr. **D. Henrich**, Universität Kaiserslautern; Prof. Dr. **P.K. Plinkert**, Dr.
Ph. A. Federspil, Dr. **B. Plinkert**, Universitätskliniken des Saarlandes

Zusammenfassung

Die Domäne der Operationsroboter liegt heute in Fräsarbeiten an knöchernen Strukturen. Da Roboter über eine extreme Präzision verfügen und nicht ermüden bietet sich ihr Einsatz insbesondere bei langwierigen und zugleich hochpräzisen Fräsvorgängen im Bereich der lateralen Schädelbasis an. Aus diesem Grunde wurde ein Verfahren entwickelt, welches aus einer geometrischen Beschreibung des Implantates eine geeignete Fräsbahn errechnet und eine kraftgeregelte Prozesskontrolle des Fräsvorganges implementiert. Mit einem 6-achsigen Knickarmroboter erfolgten die Untersuchungen primär an Tierpräparaten und zur Optimierung an Felsenbeinpräparaten.

Abstract

The domain of the surgery robots is today in milling at bony structures. Since robots provide extreme precision and do not fatigue, they offer themselves their application in particular with lengthy and at the same time highly precise milling processes within the area of the lateral head base. For this reason a method was developed, which calculates a suitable milling course by a geometrical description of the implant and which implements a force-based control to supervise the milling process. With a 6 degree-of-freedom industrial robot, the investigations took place primarily at animal preparations and at human temporal bone specimen for optimization.

1 Einleitung

Obwohl der erste Einsatz eines Operationsroboters (Puma560) am Menschen 1991 eine transurethrale Prostataresektion war [1], liegt die Domäne der Operationsroboter zehn Jahre später in Fräsarbeiten an knöchernen Strukturen [2, 3]. In jüngster Zeit wurden solche erstmals im Bereich der lateralen Schädelbasis durchgeführt [5, 6]. Ziel dieses Projektes war es, Prozessparameter zu evaluieren um bspw. ein Mastoid oder ein Implantatlager für ein Cochlea Implantat robotergesteuert auszufräsen. Festgelegte Grenzwerte für die Parameter Kraft, Moment, Vibration und Temperatur dienten der Ermittlung von Optimierungsempfehlungen für den Fräsvorgang. Um die o.g. Parameter unterhalb bestimmter Grenzwerte zu halten, aber trotzdem optimal zu fräsen, im Sinne von maximaler

Spanabfuhr bei möglichst geringem Zeitaufwand und hoher Präzision, wurde z.B. in der Kalotte eine Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/s bei 30.000 U/min am geeignetsten ermittelt. Auffallend waren jedoch singuläre Extremwerte, die teilweise deutlich über den vorgegebenen Grenzwerten lagen und nicht eindeutig auf eine physikalische Ursache zurückzuführen waren. Über die klinischen Auswirkungen solcher kurzfristig einwirkender Spitzenwerte konnte in Folge des Versuchsaufbaus keine Aussage getroffen werden. Prinzipiell wurde aber empfohlen, solche unberechenbaren Ereignisse, durch die Entwicklung einer geeigneten Prozesssteuerung zu vermeiden [6].

Ziel dieses Projektes war es nun ein System (Abb. 1) zu entwickeln, welches

- die Kalibrierung des Roboters d.h. die Eingabe der Eingriffsposition am Patienten durch intuitive Art des Arztes ermöglicht,
- aus einer vorgegebenen Implantatgeometrie die Fräsbahn schnell und genau berechnet,
- durch kontinuierliche Kraftmessung die Vorschubgeschwindigkeit steuert und
- die Methodik der lokalen Navigation erlaubt.

Als *lokale Navigation* bezeichnen wir, dass der Roboter vom Operateur zunächst seinen Aktionsradius zugewiesen bekommt, d.h. er ist gegenüber dem fixierten Kopf referenziert und kann nun mit Hilfe von online rückgekoppelten sensorischen Daten navigiert werden. Eine Prozesssteuerung des Fräsvorgangs wird ermöglicht. Für den Einsatz des Roboters bei komplexeren Operationen an der lateralen Schädelbasis ist jedoch zusätzlich zur lokalen Navigation auch die *globale Navigation*, d.h. Registrierung und anschließender Referenzierung der präoperativen Schnittbilder unabdingbar, doch nicht Gegenstand dieses Berichts.

Zusätzlich sollte festgestellt werden, ob durch Widerstandsmessungen am Fräskopf oder durch kontinuierliche Kraft/Momenten-Messung, im Sinne eines taktilen Sensors, eventuell eine Aussage über die Qualität des zu fräsenden Gewebes getroffen werden kann bzw. die Dura-Knochen-Grenze erkennbar ist.



Abb. 1: Fräser nach der Kraftmessdose an einen 6-achsigen Knickarmroboter montiert.

2 Material

Bei den Untersuchungen wurden folgende Materialien verwendet:

- Knickarmroboter vom Typ Stäubli RX130 mit sechs Freiheitsgraden und einer Wiederholungsgenauigkeit von 0,3 mm.

- Steuerungsrechner Adept CS7 VME Controller mit 68040 Mikroprozessor (40 MHz) und 68882 Koprozessor (33MHz), 32MB RAM.
- Fräser der Firma Aesculap® micro speed EC System mit elektrischem Motor Typ GD657 Low Speed (10000–30000 U/min) bzw. GD656 High Speed Motor (10000–75000U/min) mit passenden Handstücken und angefertigter Aluminiumhalterung zur Ankopplung am Roboter (Abb.1).
- Fräskopfsortiment: Rosen- bzw. Diamantfräsköpfe mit einem Durchmesser zwischen 1,3mm und 4,5 mm.
- Kraftmessdose vom Typ JR–3/KMS 90M31 mit Kraft/Momentenmessbereich 63N/5N mit Halterung zur direkten Ankopplung an den Fräser (Abb.1).
- Widerstandsmessgerät Test Lab Digital Multimeter (Messbereich bis 4 M Ω).

Die Vorversuche zur Qualitätsanalyse von unterschiedlichen Fräsbahngeometrien, differenten Fräsbahnabständen und Fräskopfgrößen erfolgten an Füllschaum und Eichenholzplatten. Kraftmessungen und Widerstandsmessungen wurden zunächst am Schweinskopfpräparat und anschließend zur Validierung an menschlichen Felsenbeinpräparaten durchgeführt.

3 Methodik und Ergebnisse

Die Methodiken zur Verwirklichung, der in der Einleitung aufgeführten Ziele, sollen im folgenden zusammen mit den Ergebnissen beschrieben werden, da die Methodiken sich z.T. aus Ergebnissen der vorangegangenen Untersuchung ergeben.

3.1 Kalibrierung des Roboters

Vor Durchführung eines roboterbasierten Eingriffs muss die genaue Position des Eingriffs am Patienten definiert werden. Da zwischen dem Roboter und dem Instrumentenflansch (z.B. Fräser, Kalibrierstift, Endoskop) eine 6D-Kraftsensor liegt, entwickelten wir ein Verfahren, welches mit Hilfe eines Proportionalreglers intuitiv die Eingabe der Eingriffsposition durch den Operateur ermöglicht. Hierzu zieht der Operateur den montierten Fräser an drei charakteristische Punkte, z.B. Eckpunkte des geplanten Implantatbettes. Der Roboter folgt den Bewegungen, basierend auf den gemessenen Kraftwerten und erhält somit durch diese nun im Raum bekannten Punkte genaue Positionsdaten [4, 7]. Mit Hilfe dieser Methode kann eine Referenzierung und Registrierung mit präoperativen Schnittbildern unter Verkürzung der Rüstzeit entfallen.

3.2 Berechnung von Fräsbahnen

Es galt aus der geometrischen Beschreibung eines Implantates eine geeignete Fräsbahn zu berechnen. Hierzu wird das Volumen des Implantates durch eine Reihe von aufspannenden Eckpunkten angegeben. Dieses Volumen wird nun in horizontale Flächen eingeteilt, deren vertikaler Abstand ausreichend klein ist, so dass die gesamte Geometrie ausgefräst werden kann. Ermittelte Eckpunkte ergeben für jede Fläche eine Außenkontur. Durch einen speziellen Algorithmus lässt sich nun eine zugehörige Innenkontur ermitteln [7]. Es wurden vier Möglichkeiten des Fräsens getestet: Horizontalfräsen vs. Vertikalfräsen sowie konturerhaltendes vs. konturüberschreitendes Fräsen.

Beim *Horizontalfräsen* wird überwiegend horizontal vorgegangen und nur beim Wechsel von einer Ebene zur nächsten in die Tiefe gefräst. Im Gegensatz hierzu beschreibt das

Vertikalfräsen das vertikale Vordringen des Fräsers bis auf die unterste Ebene, horizontal verfährt man hier nur von Bohrloch zu Bohrloch. Nach Durchführung zahlreicher Fräsuntersuchungen im Eichenholz haben wir uns aus folgenden Gründen für das Horizontalfräsen entschieden:

- Schnellere Berechnung der Bahnen,
- doppelt so schnelles Abfahren der Bahnen,
- ausreichende Kühlung (beim vertikalen Fräsen ist dies in der Tiefe des Bohrlochs nicht möglich),
- falls die Knochenschicht in dieser Lokalisation zu dünn ist, hat man zuerst eine Mulde ausgehoben und kann durch manuellen Feinschliff den Fräsvorgang beenden.

Der Aspekt des konturerhaltenden- oder konturüberschreitenden Fräsens erklärt sich schon aus der Geometrie des runden Fräskopfes mit seinem definierten Durchmesser. Um ein minimale Ecke oder Rundung mit einem runden Fräskopf konturerhaltend auszufräsen, bedarf es eines kleinen Fräskopfradius, was eine deutliche Verlängerungen des Fräsvorganges bedeuten würde. Zudem stellte sich heraus, dass ein kantiges Implantat nur schwer in eine passgenaue Höhlung einzuführen ist. Deshalb gestalteten wir die Bahnplanung in der Weise, dass eine Konturüberschreitung eintritt, in dem in den Ecken explizit bis auf den Fräskopfradius herangefahren wird, ansonsten wird die Kontur parallel geplant und ausgefräst. Der Abstand der gefrästen Innenkontur zur vorgegebenen Außenkontur sollte dabei so gewählt werden, dass zwischen den einzelnen Bahnen möglichst keine großen Rillen bestehen bleiben, da sich der Fräskopf in der nächsten Ebene darin verfangen kann. Um eine möglichst saubere Fräsoberfläche zu erhalten, ergaben Untersuchungen am Eichenholzpräparat, dass der Bahnabstand im Bereich 0,5 mal dem Fräskopfradius liegen sollte. Bei geringen Bahnabständen steigt die Dauer des Fräsvorganges. Unter Berücksichtigung der o.g. Aspekte errechnet das Computerprogramm eine Vorausschau der geplanten Bahnen mit vier verschiedenen Ansichten [7].

3.3 Regelung der Vorschubgeschwindigkeit

In Vorarbeiten der Autoren [5] wurde zur Vermeidung von Extremwerten beim automatisierten Fräsvorgang eine Prozesssteuerung empfohlen, die auf dem Prinzip der Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit basiert. Nach genauer Betrachtung scheint es, zur weiteren Senkung der Operationsdauer, sinnvoll die Vorschubgeschwindigkeit entsprechend der Situation anzupassen und somit eine Prozessregelung zu entwickeln. Im einfachsten Fall bedeutet dies, wenn der Fräser ohne Knochenkontakt verfährt um bspw. von einer Ebene zur nächsten zu gelangen, also gemessene Kräfte gegen Null laufen, wird die Vorschubgeschwindigkeit erhöht. Trifft er auf Knochen und sind Kräfte messbar, dann wird diese wieder reduziert. Mit Hilfe einer geeigneten Auswahl von Geschwindigkeits- und Kraftparametern wurden von uns zur Prozessregelung zwei verschiedene kraftbasierte Geschwindigkeitsregler implementiert.

Die komplette Ausfräsung von mehreren Implantatlagern am Felsenbeinpräparat erfolgte nach Kalibrierung des Roboters und Berechnung der Fräsbahn passgenau und zügig. Die Force-Protect-Sicherheitsgrenze von 40 N wurde durch die Prozessregelung nicht erreicht und der Roboter stellte sich nicht mehr ständig ab, was bei einer Prozesssteuerung der Fall gewesen wäre [8] (Abb. 2 a, b)

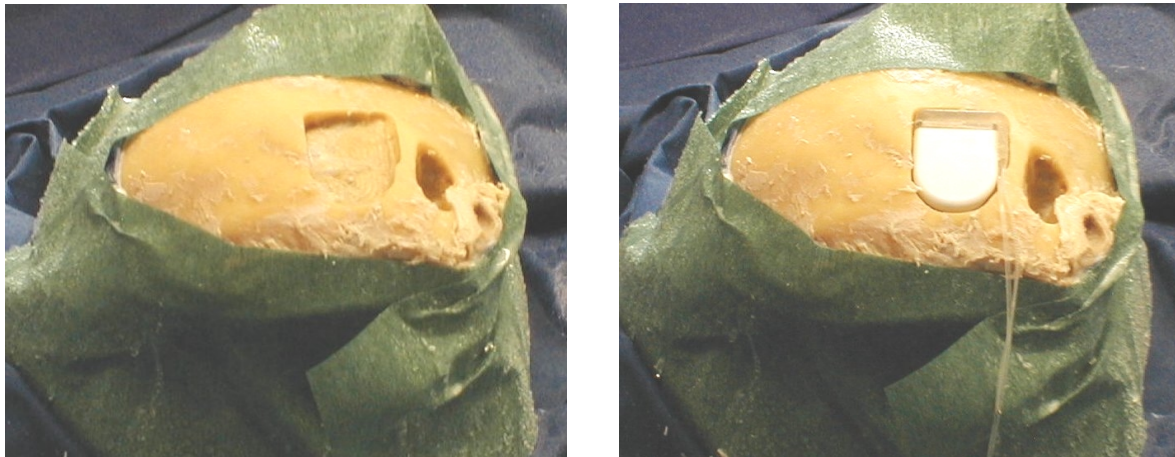


Abb. 2: Gefrästes Implantatlager ohne Implantat (a) und mit Implantat (b)

3.4 Sensorik – Kraftmessung – Lokale Navigation

Da während des gesamten Fräsvorgangs kontinuierlich Kräfte gemessen werden, liegt die Frage auf der Hand, ob deren Analyse eine Aussage über die Lokalisation oder eine Gewebedifferenzierung erlaubt.

Die Absolutwerte verliefen parallel zu den gemessenen Momenten waren aber auf Grund von Vorschub, Umdrehungszahl und physiologischen Gegebenheiten der Patienten durch starke Schwankungen nicht aussagekräftig. Die Standardabweichungen der Kräfte zeigten jedoch ein auffallendes Phänomen. Während des Stillstandes des Roboters in Luft waren erwartungsgemäß bei laufendem Fräser niedrige Kraftwerte messbar. Sie entsprachen im wesentlichen den Vibrationen des Fräasers und stiegen beim Anfahren des Roboters sprunghaft an. Insbesondere die Standardabweichungen dieser Kraftwerte blieben solange hoch, wie der Fräser im Knochen verfuhr. Das Phänomen lässt sich durch die hinzukommenden Vibrationen der Robotermotoren erklären. Die Vibrationen werden an den Knochen weitergegeben und wiederum von der Kraftmessdose registriert. Verlässt der Fräser nun die Kalotte und bewegt sich auf der Dura, so fallen diese Vibrationsanteile fort und lassen den Kraftverlauf sehr glatt erscheinen (Abb.3). Dabei fällt die Standardabweichung merklich um mindestens eine Größenordnung ab [8]. Da die Standardabweichung der Kraftmessungen in Echtzeit berechnet werden kann, lässt sich diese Beobachtung als Sensor für die Detektion der Knochen-Dura-Grenze nutzen. Das Phänomen kommt wahrscheinlich dadurch zustande, dass die elastische Dura die höherfrequenten Vibrationsanteile des Roboters und Fräasers absorbiert.

Auffallend ist auch, dass der Fräser mit Rosenbohrer eine lange Strecke über der Dura bewegt werden kann ohne sie zu verletzen. Drei Ursachen kommen hierfür in Betracht. Erstens arbeitet der Fräser positionsgesteuert, d.h. er bleibt auf seiner Position auch nach Kalottendurchtritt. Beim manuellen kraftgesteuerten Fräsen kann der Operateur im gleichen Moment nur verzögert auf den Widerstandsverlust reagieren. Zweitens wird horizontales großflächiges Fräsen mit den Roboter angewandt, wie es auch der Operateur vorzieht. Ist ein Knochenplateau horizontal abgetragen so verteilt sich der Fräskopfdruck auf diese Fläche im Vergleich zur punktuellen Entfernung. Drittens ist die Fräskopfstruktur zu erwähnen. Die Klingen laufen hier zusammen und es stellt sich fast eine Ebene dar. Bei

senkrecht aufsetzen des Fräskopfs wird deshalb ausreichend Material seitlich des Fräskopfes, aber kaum Knochen an der Spitze abgetragen. Im Fall des FräSENS auf der Dura erweist sich diese Situation als überaus erwünscht.

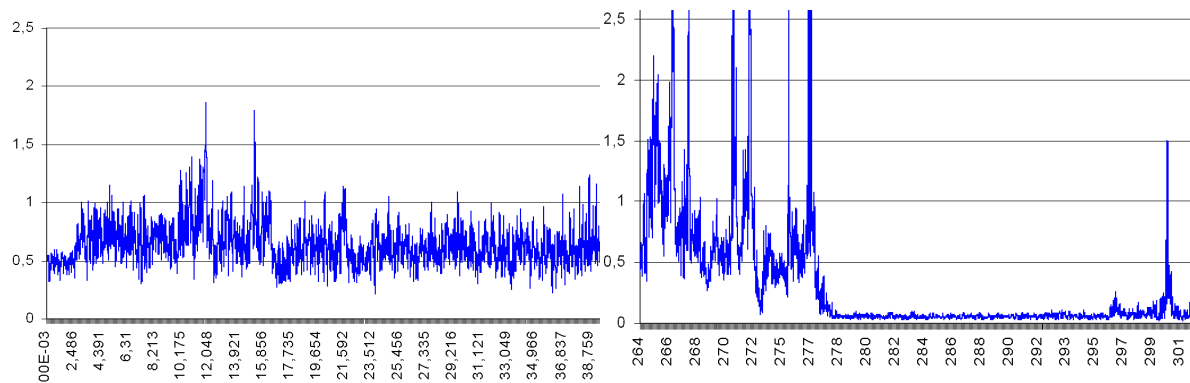


Abb.3: Standardabweichung (über 20 Meßwerte) der Kräfte beim Fräsen in der Kalotte; Links: Beginn der Fräsung; Rechts: Aufsetzen auf der Dura (ab 278 sec). Deutlicher Abfall der Standardabweichung als Hinweis für die Knochen-Dura-Grenze.

4 Diskussion

Die Integration der Teilprojekte: Roboterkalibrierung zur Positionierung, der Fräsbahnberechnung durch Entwicklung eines adäquaten Computerprogramms und der kraftgeregelte Fräsvorgang, ermöglichten eine sichere und komplette Anlage eines Implantatlagers im Bereich der lateralen Schädelbasis. Die Anlage des Implantatlagers dient uns wiederum als Modell für den Einsatz eines Operationsroboters. In Abhängigkeit von den Resultaten könnte die Computer-assistierte Chirurgie (CAS) auch auf andere komplexe Eingriffe an der Schädelbasis ausgedehnt werden.

Literatur

- [1] Davies B, (2000) A review of robotic surgery. Proc. Inst Mech. Eng. H., 214: 129-140
- [2] Federspil Ph A, Stallkamp J, Plinkert PK (2001) Robotik – Ein Evolutionssprung in der operativen Medizin?, Deutsches Ärzteblatt (im Druck)
- [3] Fuchsberger A, (1985) „Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen“ Forschungsbericht iwv (Dissertation), Springer, Berlin
- [4] Keitel J, (1998) Entwicklung einer intuitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Interaktion zwischen Chirurg und Roboter. Diplomarbeit, Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik
- [5] Plinkert PK, Plinkert B, Hiller A, Stallkamp J, (2001) Einsatz eines Roboters an der lateralen Schädelbasis. Evaluation einer robotergesteuerten Mastoidektomie am anatomischen Präparat, HNO 49: 514–522
- [6] Plinkert PK, Plinkert B, (2001) Robotics in skull base surgery, Proc. of the 15th int. congr. CARS, Elsevier science, 139-144
- [7] Waringo M, (2001) Planung von Fräsbahnen, Projektarbeit, AG Eingebettete Systeme und Robotik , Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern
- [8] Stolka Ph, (2001) Voruntersuchungen zum Sensoreinsatz, Projektarbeit, AG Eingebettete Systeme und Robotik , Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern