

P. K. Plinkert¹ · P. A. Federspil¹ · B. Plinkert¹ · D. Henrich²

¹ Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde der Universitätskliniken des Saarlandes, Homburg/Saar ·

² AG Eingebettete Systeme und Robotik (RESY), Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern

Kraftbasierte lokale Navigation zur robotergestützten Implantatbettanlage in der lateralen Schädelbasis

Eine experimentelle Studie

Zusammenfassung

Hintergrund. Die Domäne der Operationsroboter liegt heute in Fräsarbeiten an knöchernen Strukturen, ihr Einsatz bietet sich z. B. bei den langwierigen und zugleich hochpräzisen Fräsvorgängen im Bereich der lateralen Schädelbasis an. In jüngsten Arbeiten wurden Prozessparameter zur Anlage eines Implantatlagere bspw. für ein Kochleaimplantat oder für eine roboterunterstützte Mastoidektomie ermittelt. Hieraus ergaben sich Optimierungsparemeter für solche Fräsvorgänge.

Patienten und Methodik. Aus diesem Grunde wurde ein Verfahren entwickelt, welches aus einer geometrischen Beschreibung des Implantates eine geeignete Fräsbahn errechnet sowie eine kraftgeregelte Prozesskontrolle des Fräsvorganges implementiert. Mit einem 6-achsigen Knickarmroboter erfolgten die experimentellen Untersuchungen an Holz-, Tier- und Felsenbeinpräparaten.

Ergebnisse. Durch intraoperative Onlinrückkopplung der Kraftsensorik war eine lokale Navigation möglich. Bei Kräften über den Grenzwert wurde die Vorschubgeschwindigkeit automatisch reguliert, auch konnte das Erreichen der Dura an Hand der Werte detektiert werden. Das Implantatlager ließ sich durch das Computerprogramm exakt ausfräsen.

Schlussfolgerung. Die zufriedenstellende Anlage eines Implantatbettes in der Kalotte gelingt mit einem Roboter durch einen kraftgeregelten Fräsvorgang im Sinne einer lokalen Navigation.

Schlüsselwörter

Robotik · Navigation · Prozesssteuerung · Computer assistierte Chirurgie (CAS) · Kochleaimplantat

O bwohl der erste Einsatz eines Operationsroboters („Puma 560“) am Menschen 1991 eine transurethrale Prostataresektion war [1] liegt die Domäne der Operationsroboter 10 Jahre später in Fräsarbeiten an knöchernen Strukturen. 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 Kochleaimplantat 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 zu entwickeln, welches

- die Kalibrierung des Roboters d. h. die Eingabe der Eingriffsposition am Patienten durch intuitive Art der 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.

Unter *lokaler Navigation* versteht man, 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 Fräsvorganges 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 anschließende Referenzierung der präoperativen Schnittbilder unabdingbar, doch nicht Gegenstand dieses Projektes.

- Zusätzlich sollte festgestellt werden, ob durch Widerstandsmessungen am Fräskopf oder durch kontinuierliche Kraft/Momentenmessung, im Sinne eines taktilen Sensors, eventuell eine

Prof. Dr. P. K. Plinkert
Universitäts-HNO-Klinik, Kirrbergerstraße,
66421 Homburg/Saar
E-Mail: hnpopl@med-rz.uni-sb.de

P. K. Plinkert · P. A. Federspil · B. Plinkert
D. Henrich

Implementation of force controlled navigation to perform a robot assisted reaming of an cochlea implant bed in the lateral skull base – an experimental study

Abstract

Excellent precision, miss of retiring, reproducibility are main characteristics of robots in the operating theatre. Because of these facts their use for surgery in the lateral skull base is of great interest. In recent experiments we determined process parameters for robot assisted reaming of a cochlea implant bed and for a mastoidectomy. These results suggested that optimizing parameters for thrilling with the robot is needed.

Therefore we implemented a suitable reaming curve from the geometrical data of the implant and a force controlled process control for robot assisted reaming at the lateral skull base. Experiments were performed with an industrial robot on animal and human skull base specimen.

Because of online force detection and feedback of sensory data the reaming with the robot was controlled. With increasing force values above a defined limit feed rates were automatically regulated. Furthermore we were able to detect contact of the thrill to dura mater by analyzing the force values. With the new computer program the desired implant bed was exactly prepared.

Our examinations showed a successful reaming of an implant bed in the lateral skull base with a robot. Because of a force controlled reaming process locale navigation is possible and enables careful thrilling with a robot.

Keywords

Robots · Navigation · Process control · Cochlear implant · Computer assisted surgery (cas)

Originalien



Abb. 1 ◀ Fräser in Aluminiumhalterung vor der Kraftmessdose an den 6-achsigen Knickarmroboter montiert

Aussage über die Qualität des zu fräsenden Gewebes getroffen werden kann bzw. die Dura-Knochen-Grenze erkennbar ist und somit eine haptische Steuerung denkbar sein könnte.

Material

Die Untersuchungen wurden gemeinsam mit dem Institut für Informatik, AG Eingebettete Systeme und Robotik (RESY) der Universität Kaiserslautern durchgeführt.

Hardware, Software und Material

- ▶ Knickarmroboter vom Typ Stäubli RX-130 mit 6 Freiheitsgraden und einer Wiederholungsgenauigkeit von 0,3 mm.
- ▶ Kraftmessdose vom Typ JR-3/KMS 90M31 mit Kraft/Momentenmessbereich 63 N/5 N mit Halterung zur direkten Ankopplung an den Fräser (Abb. 1).
- ▶ Fräser der Firma Aesculap® micro speed EC System mit elektrischem Motor Typ GD657 Low Speed (10.000–30.000 U/min) bzw. GD656 High Speed Motor (10.000–75.000 U/min) mit passenden Handstücken und angefertigter Aluminiumhalterung zur Ankopplung am Roboter (Abb. 1).
- ▶ Fräskopfsortiment: Rosen- bzw. Diamantfräsköpfe mit einem Durchmesser zwischen 1,3 und 4,5 mm.
- ▶ Widerstandsmessgerät Test Lab Digital Multimeter (Messbereich bis 4 M Ω).

- ▶ Steuerungsrechner Adept CS7 VME Controller mit 68040 Mikroprozessor (40 MHz) und 68.882 Koprozessor (33 MHz), 32 MB RAM.

Präparate

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.

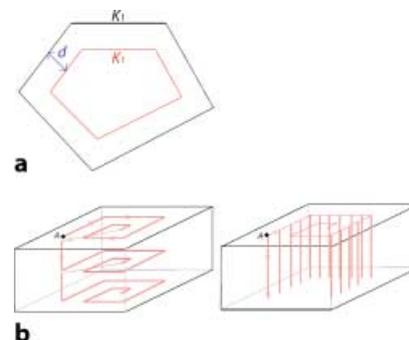


Abb. 2a ▲ An Hand von Eckpunkten wird eine Kontur (K_1) festgelegt. Zu dieser wird eine Innenkontur (K_2) mit einem definierten Fräsbahnabstand (d) gesucht. b Vergleich (1.) Horizontal- und (2.) Vertikalfräsen. Fett dargestellte Linien stellen die Pfadsegmente dar, auf denen gefräst wird. Der Pfad wird jeweils ab Punkt A abgefahren. Hier sind der Übersicht halber nicht alle vertikalen Pfade eingezeichnet

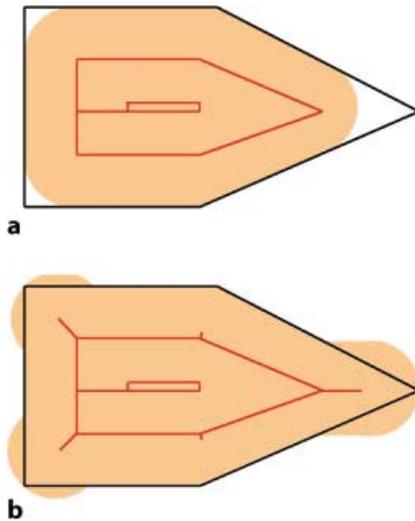


Abb. 3a,b ▲ **Aufsicht: Vergleich (a) konturerhaltendes und (b) konturüberschreitendes Fräsen. Die gefärbten Stellen werden vom Fräser entfernt. Die schwarze Kontur ist die Außenkontur, die Linien im Inneren stellen die Fräspfade dar**

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.

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. für Fräser, Kalibrierstift, Endoskop) ein 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 3 charakteristische Punkte, z. B. Eckpunkte der gewünschten Lage 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.

Berechnung von Fräsbahnen

Es galt aus der geometrischen Beschreibung eines Implantates eine geeignete Fräsbahn zu berechnen. Drei Kriterien sollten berücksichtigt werden:

- ▶ Gültigkeit der Bahnen, d. h. wird wirklich das gewünschte Objekt ausgefräst?
- ▶ Qualität der Bahnen, d. h. möglichst wenig Richtungswechsel während des Fräsens und jede Region sollte nur einmal angefahren werden.
- ▶ Effizienz, d. h. möglichst geringe Rechenzeit.

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, sodass 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]; Abb. 2 a).

Es wurden 4 Möglichkeiten des Fräsens getestet.

- ▶ Horizontalfräsen vs. Vertikalfräsen (Abb. 2 b, c) sowie
- ▶ konturerhaltendes vs. konturüberschreitendes Fräsen (Abb. 3 a, b).

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 Fräasers bis auf die unterste Ebene, horizontal verfährt man hier nur von Bohrloch zu Bohrloch. Nach Durchführung zahlreicher Fräsun-

tersuchungen im Eichenholz haben wir uns aus folgenden Gründen für das Horizontalfräsen entschieden:

- ▶ schnellere Berechnung der Bahnen,
- ▶ doppelt so schnelles Abfahren der Bahnen (Tabelle 1),
- ▶ 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 indem in den Ecken explizit bis auf den Fräskopfradius herangefahren wird, ansonsten wird die Kontur parallel geplant und ausgefräst (Abb. 3 a, b). 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 (r) liegen

Tabelle 1
Zeitbedarf beim Horizontalfräsen im Vergleich zum Vertikalfräsen in Abhängigkeit vom Bahnabstand

Bahnabstand	Zeitbedarf	
	Horizontalfräsen	Vertikalfräsen
$0,5 \times r_1$	250 s	992 s
$0,7 \times r_1$	224 s	558 s
$1,0 \times r_1$	181 s	487 s



Abb.4 ▲ Zu betrachten sind die 6 Lager rechts oben. Diese sind jeweils mit einem Rosenbohrer mit Durchmesser 4,5 mm ausgefräst worden (Radius $r_1=2,25$ mm, man hat festgelegt: $r_2=2$ mm). Die obere Reihe in Horizontalfräsung und die untere Reihe in Vertikalfräsung. Von links nach rechts haben wir den Bahnabstand r_3 und das vertikale Offset r_4 variiert. Linke Spalte: Bahnabstand $r_3=1,125$ mm ($=0,5 r_1$), vertikales Offset $r_4=1,06$ mm; mittlere Spalte: Bahnabstand $r_3=1,575$ mm ($=0,7 r_1$), vertikales Offset $r_4=1,26$ mm; rechte Spalte: Bahnabstand $r_3=2,25$ mm ($=1,0 r_1$), vertikales Offset $r_4=1,50$ mm. Es zeigt sich eine deutliche Zunahme der Rillenhöhe bei steigendem Bahnabstand

sollte (Abb. 4). Bei geringeren Bahnabständen steigt die Dauer des Fräsvorganges (Tabelle 1).

Unter Berücksichtigung der o.g. Aspekte errechnet das Computerprogramm eine Vorausschau der geplanten Bahnen mit 4 verschiedenen Ansichten ([7]; Abb. 8).

Steuerung 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 ent-

sprechend 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 wurde von uns zur Prozessregelung eine kraftbasierte Geschwindigkeitsregelung implementiert.

Die Kraftmessdose registriert 400 Messwerte/s und berechnet einen gleitenden Mittelwert. Dieser Wert muss zur Kraftregelung während des Eingriff innerhalb eines bestimmten Kraftfensters liegen, d. h. sinken die Kraftwerte

unter den Schwellenwert 10 Newton (N) dann wird die Vorschubgeschwindigkeit des Fräasers mit einem definierten Faktor gesteigert. Steigt der gleitende Mittelwert um 10 N über den aus Voruntersuchungen bekannten Grenzwert [5], so sinkt die Vorschubgeschwindigkeit. Regelgröße ist der gleitende Mittelwert einer definierten Anzahl an Kraftmessungen (7 samples), d. h. singuläre Spitzenwerte führen nicht zum Abbruch. Zudem erfolgt die Regelung so, dass aus Sicherheitsgründen die Absenkung der Vorschubgeschwindigkeit beim Überschreiten des gleitenden Mittelwertes schneller erfolgt als der Anstieg bei niedrigen Kraftwerten [8].

Ein Problem stellen jedoch Oszillationen der Kraftwerte dar. Durch die Regelung schwanken die Kräfte zwischen beiden Grenzen hin und her und stellen sich nicht auf ein Mittelniveau ein. Durch Verwendung eines Proportionalreglers, der nach Messung des Kraft-Istwertes den Vorschub proportional dem Kraft-Sollwert unmittelbar in Echtzeit regelt, ist es möglich die Oszillationen zu glätten, und man erreicht ein harmonischeres und insgesamt zügigeres Fräs-

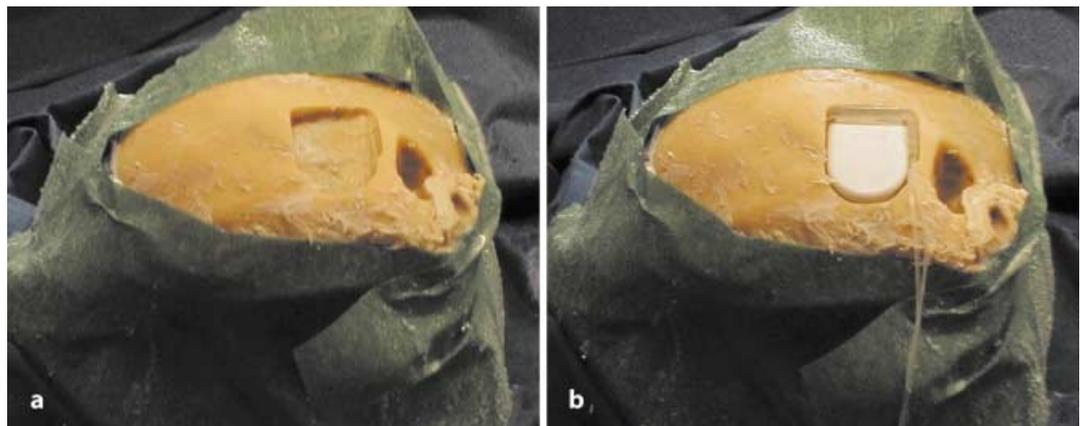


Abb.5a,b ► Implantat-lager. a Ohne Implantat, b mit Implantat (Kochleaimplantat der Fa. Med-EI)

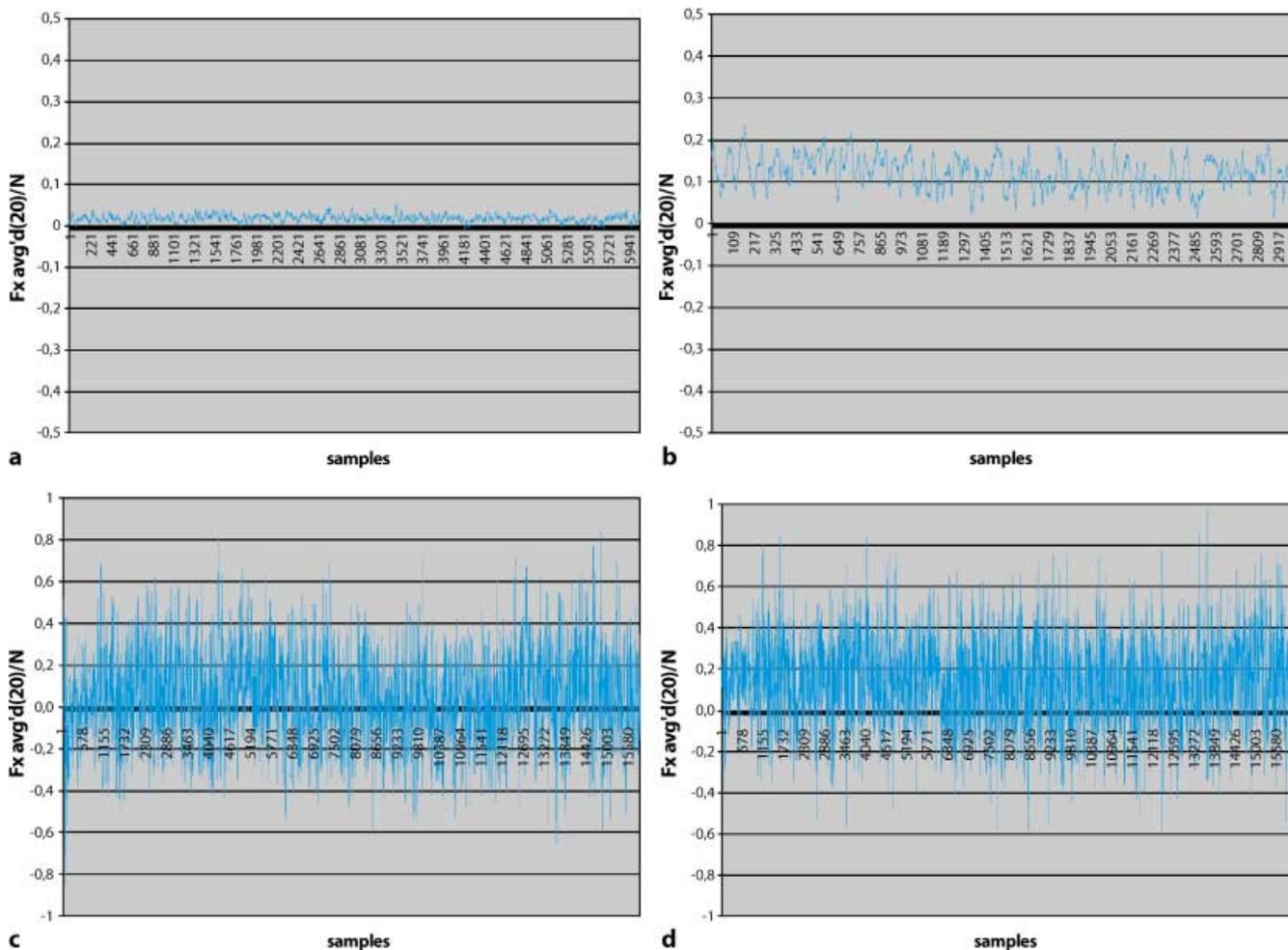


Abb. 6a–d ▲ Standardabweichungen der Kraftkomponente. Fräser und Roboter verursachen eindeutige Vibrationen. Diese müssen bei der Analyse der Kraftwerte berücksichtigt werden. a Standardabweichung der x-Kraftkomponente bei Stillstand des Roboters und 0 U/min. b Standardabweichung der x-Kraftkomponente bei Stillstand des Roboters und 30.000 U/min. c Standardabweichung der x-Kraftkomponente bei Verfahren des Roboters und 0 U/min. d Standardabweichung der x-Kraftkomponente bei Verfahren des Roboters und 30.000 U/min

verhalten. Diese Regelung bewies im Verlauf der Untersuchungen eine extreme Zuverlässigkeit.

Die komplette Ausfräsung von mehreren Implantatlagern am Felsenbeinpräparat erfolgte nach Kalibrierung des Roboters und Berechnung der Fräsbahn passgenau und zügig. Die Sicherheitsgrenze wurde durch die Prozessregelung nicht erreicht und der Roboter stellte sich nicht mehr ab, was bei einer Prozesssteuerung der Fall gewesen wäre ([8]; Abb. 5).

Sensorik – Kraftmessung – Widerstandsmessung – Lokale Navigation

Da während des gesamten Fräsvorgangs kontinuierlich Kräfte gemessen werden, liegt die Frage auf der Hand, ob deren Ana-

lyse eine Aussage über die Lokalisation oder eine Gewebedifferenzierung erlaubt.

Des Weiteren sollte überprüft werden, ob eine Widerstandsmessung während des Fräsvorgangs hilfreich sein könnte. Hierbei sollte die Möglichkeit untersucht werden, mit dem Fräskopf gegen eine Referenzelektrode am Kopf die Leitfähigkeitsdifferenzen der verschiedenen Gewebe zu ermitteln. Leider erwies sich die Messung des Widerstandes schon unter Laborbedingungen als absolut ungeeignet. Die ermittelten Widerstandswerte schwankten über dem rotierenden Fräser extrem und trotz verschiedener mathematischer Transformationen war es nicht möglich eine Aussage zu treffen [8].

Hingegen war die Analyse der *Kraftmessungen* sehr vielversprechend. Die Absolutwerte verliefen parallel zu den ge-

messenen Momenten, waren aber auf Grund von Vorschub, Umdrehungszahl und physiologischen Gegebenheiten 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 (Abb. 6). Das Phänomen lässt sich durch die hinzukommenden Vibrationen der Roboter motoren 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. 7). 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. Als erstes 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. Zum zweiten 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 senkrechtem 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.

Diskussion

Die Integration der Teilprojekte; 1. die Roboterkalibrierung zur Positionierung, 2. die Fräsbahnberechnung durch Entwicklung eines adäquaten Computerprogramms und 3. der kraftgeregelter Fräsvorgang, ermöglichten eine sichere und komplette Anlage eines Implantatlagers im Bereich der lateralen Schädelbasis (Abb. 5). Die Anlage des Implantatlagers dient uns wiederum als Modell für den

Einsatz eines Operationsroboters. In Abhängigkeit von den Resultaten könnte die computerassistierte Chirurgie (CAS) auch auf andere komplexe Eingriffe an der Schädelbasis ausgedehnt werden.

Die initiale Kalibrierung des Roboters vor Beginn des Fräsvorgangs erlaubt nicht nur eine Lagebestimmung des Implantatbettes, sondern ermöglichte durch die Proportionalregelung und Fräsbahnberechnung, dass bei einem eventuellen Abbruch der Fräser erneut an die zuletzt gefräste Position zurückkehren konnte um den Fräsvorgang zu beenden. Eine auf den Monitor projizierte, den Fräsvorgang begleitende Darstellung des aktuellen und noch gewünschten Bahnverlaufs erleichterte dem Operateur den Vorgang zu verfolgen. Er kann jederzeit den Fräsvorgang durch einen Notausschalter stoppen (Abb. 8).

Die Berechnung der Fräsbahnen erfolgte zuverlässig, ist jedoch noch zu verbessern. Der Bahnplaner ist so gestal-

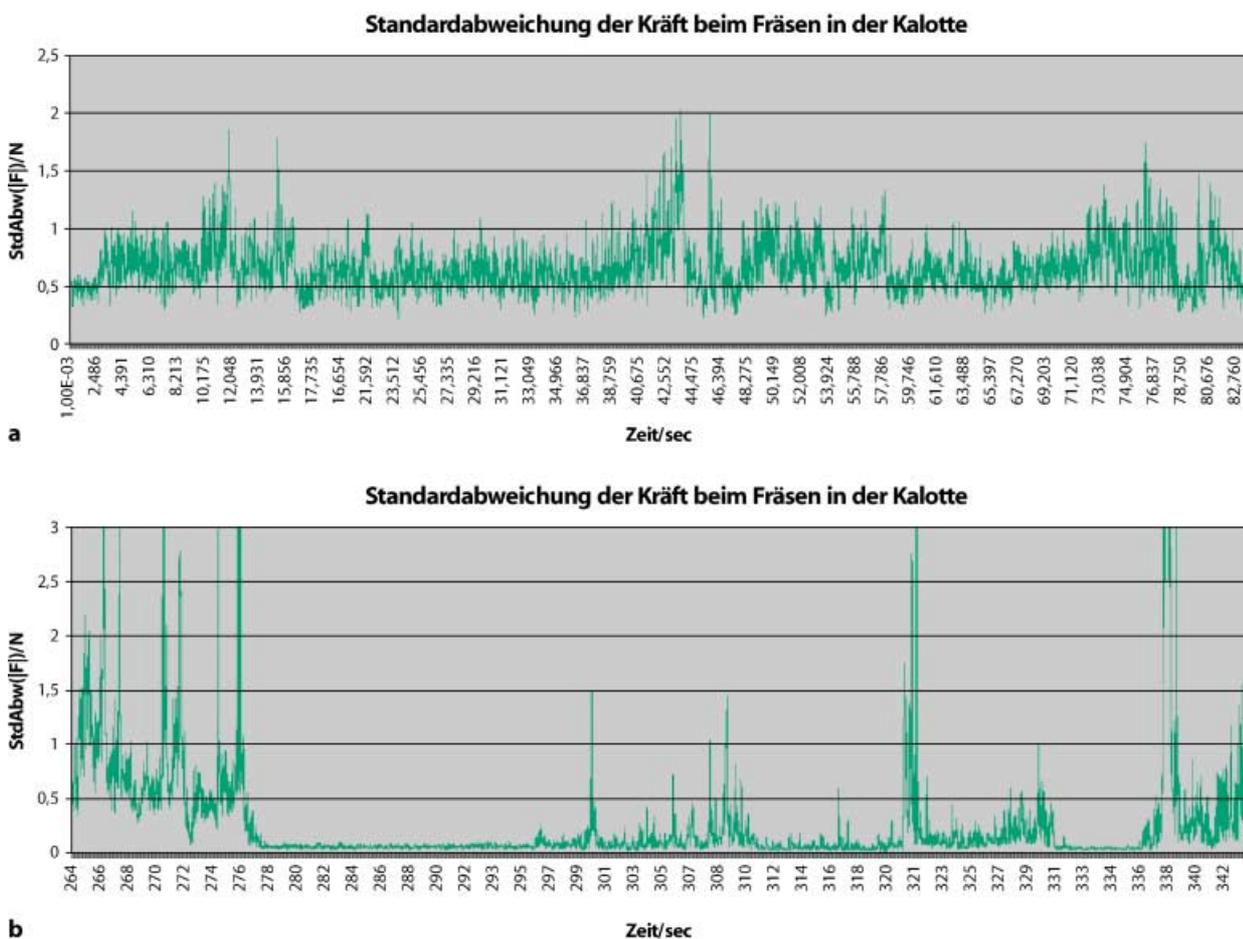


Abb. 7a,b ▲ Gleitender Mittelwert (über $s=20$ Messwerte) der Standardabweichung der Kräfte beim Fräsen in der Kalotte. a Beginn der Fräsung (0–84 s), b Aufsetzen auf der Dura (bei 277–343 s). Deutlicher Abfall der Standardabweichung als Hinweis für die Knochen-Dura-Grenze

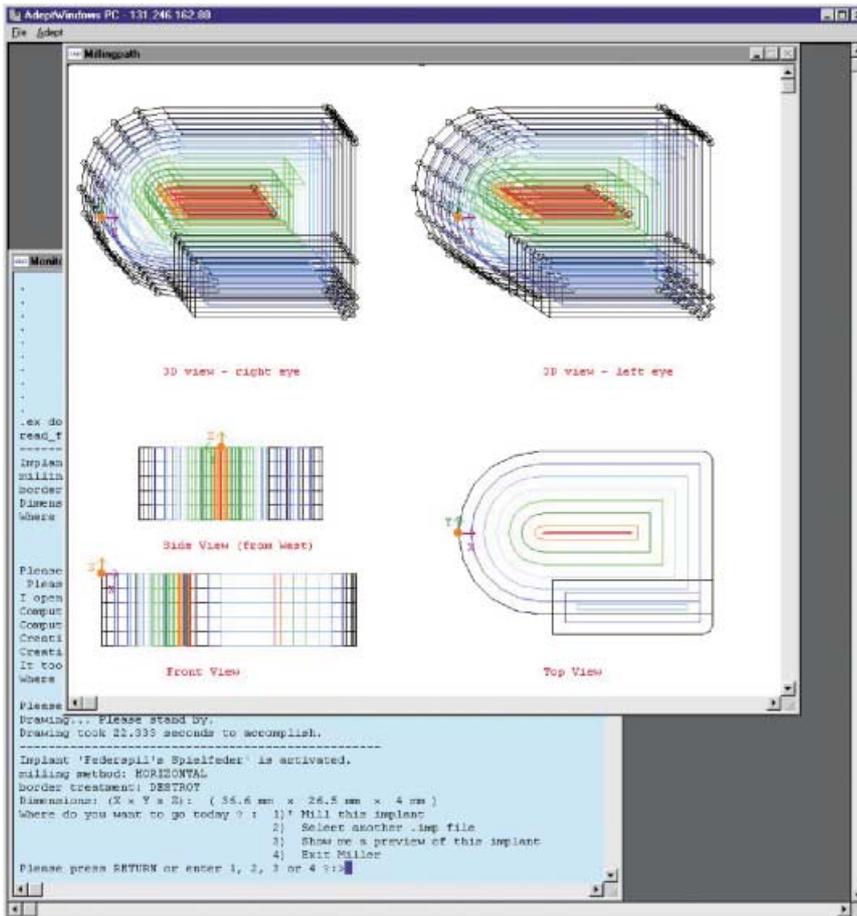


Abb. 8 ◀ **Bildschirmaufnahme:** während des Fräsvorgangs wird in der 3D-Sicht der abgefahrene Pfad in Echtzeit eingezeichnet

Fazit für die Praxis

Die Anwendung von Operationsrobotern wird zur Zeit kontrovers diskutiert [2]. Dies liegt insbesondere daran, dass die Anbindung der Roboter an die Peripheriesysteme, wie Navigationsgeräte bislang nur unzureichend erfolgte. Insbesondere in der Schädelbasischirurgie reicht dieses zur Erkennung gefährdeter Strukturen, allein auf Grund der Geweberverschiebungen, intraoperativ nicht aus. Für weniger aufwendige Operationen, wie die Anlage eines Implantatlagere für ein Kochleaimplantat, ist zudem der Aufwand unangemessen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigten nun, dass durch Integration sensorischer Daten in den robotergesteuerten Fräsprozess, in diesem Fall kontinuierliche Kraftmessungen, eine Optimierung desselben erfolgen konnte. Über die Kraftregelung war zudem die Positionierung des Eingriffs auf einfache Weise möglich. Die Analyse der Kraftwerte erlaubte das Erkennen der Knochen-Dura-Grenze, was online bislang nur mit aufwendigen bildgebenden Verfahren gelang.

Literatur

1. Davies B (2000) A review of robotic surgery. Proc Inst Mech Eng H 214: 129–140
2. Federspil PA, Stallkamp J, Plinkert PK (2002) Robotik – Ein Evolutionssprung in der operativen Medizin? Dtsch Ärztebl (im Druck)
3. Fuchsberger A (1985) Untersuchung der spannenden 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 Prozessrechenstechnik, 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. Elsevier, pp 139–144
7. Waringo M (2001) Planung von Fräsbahnen. Projektarbeit, AG Eingebettete Systeme und Robotik, Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern
8. Stolka P (2001) Voruntersuchungen zum Sensoreinsatz. Projektarbeit, AG Eingebettete Systeme und Robotik, Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern

tet, dass die leicht konvexe Form der Implantate durch Segmentierung so aufgeteilt wird, dass die Ebenen zueinander parallel abgefahren werden können. Diese Segmente werden nun nacheinander einzeln bis zur tiefsten Ebene hin abgefahren. Dabei wird zuerst die Bahn konturparallel gefräst, die der Aufsicht auf das Implantat entspricht, d. h. die Eckpunkte der obersten Ebene sind maßgeblich. Die Erfahrung zeigte, dass je nach Lage des Implantates das Durniveau erreicht wurde, noch bevor ein Segment bis zur tiefsten Ebene hin ausgefräst war. Die tiefste Ebene gibt jedoch das Maß der Passform wieder. Sind die Eckpunkte der untersten Ebene noch nicht ausgefräst, so passt das Implantat nicht. Da das Ausfräsen der anderen Segmente erst im Anschluss geplant war, konnte der Vorgang nun nur noch manuell beendet werden. In weiteren Projekten ist nun geplant, das Programm so abzuändern, dass es möglich ist, die optimale Lage des Implantates im Voraus zu bestimmen, sodass das Implantat in jedem Fall passgenau einsetzbar ist,

auch wenn es eventuell dann die Kalottenoberfläche leicht überragt.

Die Kraftregelung ermöglichte ein weitaus harmonischeres Fräsbild, als dasjenige, das die Autoren aus eigenen Voruntersuchungen her kannten. Dies bedeutet für den Patienten einen schonenderen Fräsvorgang mit Auswirkungen auf die Temperaturentwicklungen im Fräsgebiet [3]. So waren die Fräsränder deutlich weniger hitzenekrotisch verändert. Auch ist eine Materialschonung für Fräskopf und Fräser offensichtlich.

Die Vorstellung, während des Fräsvorgangs durch Widerstandsmessungen über dem Fräskopf einen Sensor zu erhalten, stellte sich leider als nichtig heraus. Neben Untersuchungen zur kraftsensorischen Steuerung des Fräsvorgangs konnte durch die Analyse der Standardabweichung der Kraftverläufe jedoch ein Sensor für die Detektion der Knochen-Dura-Grenze festgestellt werden. Eine Integration in den Steuerungsprozess bleibt, wie die Überprüfung weiterer geeigneter Verfahren zur sensorischen Überwachung des Fräsvorganges, Gegenstand zukünftiger Forschungsprojekte.