

Multisensorische Überwachung robotergestützter Fräsvorgänge an der lateralen Schädelbasis*

P. A. Federspil¹, U. W. Geisthoff¹, D. Henrich² und P. K. Plinkert¹

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

² Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme), Universität Bayreuth, Deutschland

Einleitung

Das Ziel des RONAF-Projekts „*Robotergestützte Navigation zum Fräsen an der lateralen Schädelbasis*“ ist die Entwicklung und Untersuchung eines Systems zur Navigation an der lateralen Schädelbasis, welches einen Roboter bei operativen Eingriffen interaktiv überwachen und steuern kann. Dabei kommen modulare, mehrstufige Navigations- und Regelungsverfahren zum Einsatz. Mit der globalen Navigation soll der Roboter auf der Grundlage eines dreidimensionalen Bilddatensatzes durch CT und MRT, aber auch – als Besonderheit des RONAF-Systems – mittels eines robotergestützten 3D-Ultraschallscans des Schädelknochens gesteuert werden. Zur lokalen Navigation – als weitere Besonderheit – erfolgt eine intraoperative Rückkopplung der Sensorik (Kraft/Moment, Temperatur, Ultraschall, elektrophysiologische Ableitung), so dass die Schonung wichtiger Strukturen gewährleistet ist (Abb. 1).

Kräfte und Momente

Der Kraft-Momentensensor wird in erster Linie dazu benutzt, um den Roboteranschub gemäß den tatsächlich auftretenden Kräften zu regeln [2, 7]. Über Regionen, die dem Fräser nur einen geringen Widerstand entgegen stellen, kann der Roboter zügig verfahren. Bereiche dagegen,

in denen ein größerer Knochenabtrag notwendig ist, verlangen dem Fräser eine höhere Fräsarbeit ab, so dass hier entsprechend den dabei höheren Kräften der Roboter langsamer verfährt, um Überlastungen sowohl des Gewebes als auch des Materials zu vermeiden. In ersten Versuchen konnten wir außerdem zeigen, dass mit diesem Sensor eine Detektion der Dura mater möglich sein kann. Wenn der Fräskopf die Dura mater erreicht, sinkt diese Standardabweichung der Kräfte auf 0 [2].

Temperatur

Reibung erzeugt Wärme. Das ist der Menschheit schon lange bekannt: Das Prinzip machten sich bereits unsere Vorfahren in der Steinzeit beim Feuer machen ohne technische Hilfsmittel zu Nutze. Genau das Gleiche passiert natürlich, wenn wir mit einem Fräser am Knochen arbeiten. Unter der zum Teil extremen thermischen Belastung leidet der umgebende Knochen. Eine Grundvoraussetzung ist also, dass ständig gespült – und damit gekühlt – wird, um die Einwirkzeit minimal zu halten [5].

Um also unter möglichst realistischen Bedingungen beim Fräsen zu messen, d.h.

* Gefördert durch die DFG im Rahmen des SPP 1124 „Medizinische Navigation und Robotik“ (PL 136/5-1)

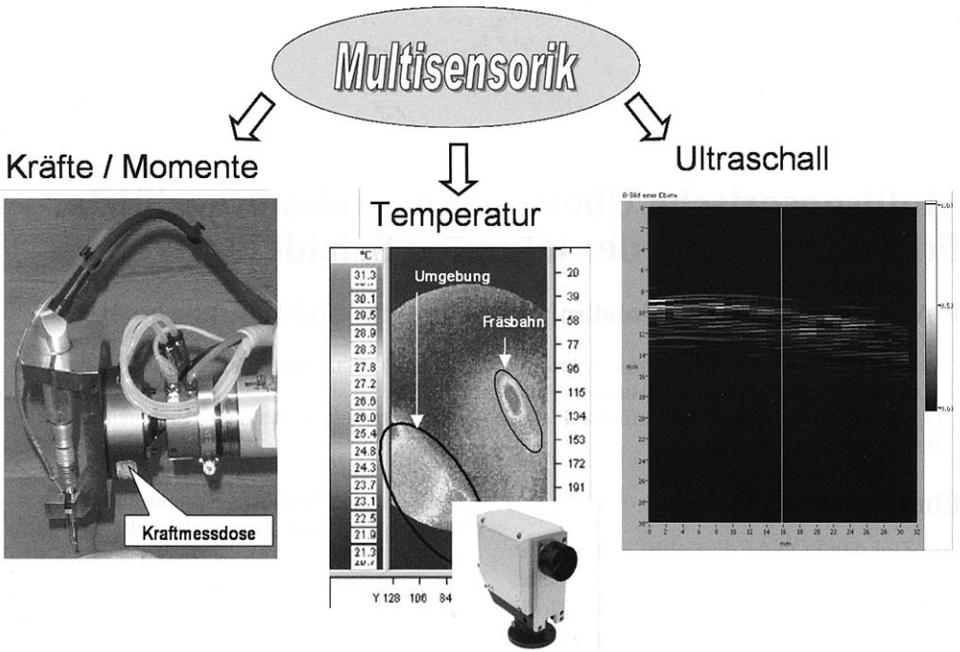


Abb. 1. Multisensorik im RONA-Projekt (Robotergestützte Navigation zum Fräsen an der lateralen Schädelbasis)

während mit Wasser gespült wird, haben wir den Versuch folgendermaßen aufgebaut (Abb. 2): Der Roboter fräst wie gewöhnlich auf der Außenseite des humanen Schädelpräparates und eine Thermokamera beobachtet die Innenseite. Das ist selbstverständlich ein Ansatz, der nicht in vivo



Abb. 2. Robotergestütztes Fräsen am Schädelpräparat. Der Fräsvorgang wird mit einer Thermokamera von der Schädelinnenseite beobachtet (siehe Text)

übertragbar ist, aber er erlaubt eine ununterbrochene optimale Spülung während des Fräsvorgangs. Wenn wir mit der Thermokamera von außen messen würden, würden wir größtenteils lediglich die Oberflächentemperatur des Spülwassers messen, weil Wasser nicht durchlässig für Infrarotstrahlen ist. Uns interessiert insbesondere, ob die kraftbasierte Regelung des Robotervorschubes einen Einfluss auf die Hitzeentwicklung beim Fräsen hat.

Dazu wurden 2 Frässtrategien verglichen:

1. nicht geregelter konstanter Vorschub 5 mm/s und
2. kraftbasiert proportional geregelter Vorschub mit Sollwert 10 Newton

Der Roboter verfährt mit der ihm zugewiesenen Geschwindigkeit solange die gemessenen Kräfte unter dem Sollwert liegen. Bei Überschreitung des Sollwertes wird die Vorschubgeschwindigkeit entsprechend heruntergeregelt bis die Kraftwerte wieder unter den Sollwert sinken. Dann kann die Geschwindigkeit wieder

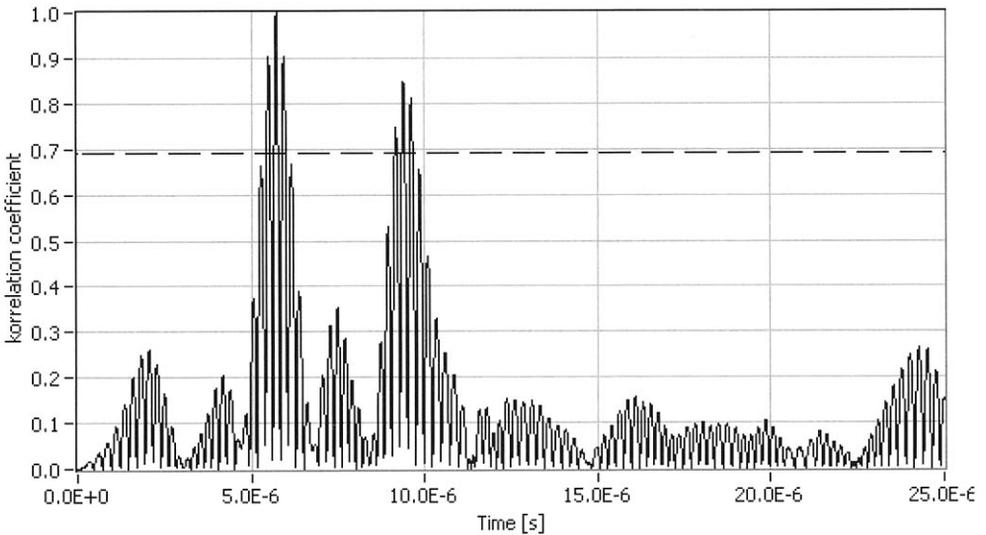


Abb. 3. Originalregistrierung eines kodierten Ultraschallsignals mit matched filter (Korrelationsfunktion). Der erste Gipfel über der gestrichelten Linie ist das Eintrittsecho. Der zweite Gipfel ist das Austrittsecho

ansteigen. Über Bereiche, die dem Fräser wenig Widerstand entgegen setzten, kann der Roboter also schnell verfahren, während er in Bereichen, in denen eine größere Fräsarbeit geleistet werden muss, entsprechend langsamer verfährt.

Bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit erkennt man, dass der Temperaturgrenzwert [3, 6] trotz kontinuierlicher Spülung mehrfach überschritten wurde. Spitzenwerte lagen sogar über 100 °C. Mit der Kraftregelung kommt es zwar gelegentlich auch zu Grenzwertüberschreitungen, diese sind aber nur kurz und die Temperaturspitzen auch deutlich niedriger.

Die Kraftregelung sorgt nicht nur für einen geschmeidigen Fräsvorgang, sie ist damit auch ein deutliches Plus an Prozesssicherheit beim robotergestützten Fräsen, um umgebendes Knochengewebe vital zu erhalten.

Ultraschall

Mit Standardultraschallsystemen ist es praktisch unmöglich ein Austrittsecho am

Schädelknochen zu bestimmen. Schuld daran ist die hohe Dämpfung im Schädelknochen durch Streuung und Interferenz. Wir haben dazu die frequenzabhängige Dämpfung bestimmt. Wenn eine Eindringtiefe von 8 mm erreicht werden soll, darf die Ultraschallfrequenz maximal bei 2,25 MHz liegen. Selbst damit beträgt die Dämpfung 100 dB. Das schafft derzeit kein Standardultraschallsystem. Zur Lösung dieses Problems benutzen wir keinen herkömmlichen Ultraschall-Puls, sondern ein kodiertes Signal, wie beispielsweise einen Chipp. Dieses kodierte Signal kann man jetzt mit einem geeigneten Filter, wie beispielsweise einer Korrelationsfunktion, aus dem Empfangssignal wieder „herausfischen“. Mit dem Filter können wir dann das Austrittsecho (Abb. 3) eindeutig detektieren [4].

Damit können wir dann einen 3D-Scan des Schädels erstellen. In Zukunft soll der Roboter das Op-Gebiet selber mit dem Ultraschall abtasten, wobei er eine globale Karte erstellt und sich gleichzeitig am Op-Gebiet registriert.

Diskussion

Als Anwendungsbeispiele für den Einsatz des RONAF-Systems im Bereich der lateralen Schädelbasis werden das Fräsen eines Implantatlagere (z.B. für Cochlea- und Hirnstamm-Implantate) und die Mastoidektomie als ersten Schritt für die Weiterentwicklung in Richtung komplexer Zugangswege zur lateralen Schädelbasis betrachtet. Diese Eingriffe erfordern vom Operateur extreme Präzision (z.T. im Submillimeterbereich) und hohen Kraftaufwand, um größere Knochenmengen mit dem Fräser abzutragen. Die Realisierung des geplanten Systems wäre deshalb ein großer Fortschritt in der Prozessqualität des operativen Eingriffs [1]. Zudem ist eine steigende Nachfrage nach implantierbaren Hörsystemen, aber auch nach minimal-invasiven Operationsverfahren für Schädelbasis-Tumoren zu erwarten.

Literatur

1. Federspil PA, Stallkamp J, Plinkert PK (2001) Robotik – Ein Evolutionssprung in der operativen Medizin? Dtsch Ärztebl 98: A-2879-2884 [Heft 44]
2. Federspil PA, Geisthoff UW, Henrich D, Plinkert PK (2003) Development of the first force-controlled robot for otoneurosurgery. Laryngoscope 113: 465-471
3. Federspil PA, Plinkert B, Plinkert PK (2003) Experimental robotic milling in skull base surgery. Comput Aided Surg 8: 42-48
4. Federspil, PA, Tretbar SH, Geisthoff U, Plinkert B, Plinkert PK (2003) Ultrasound based navigation of robotic drilling at the lateral skull base. In: Lemke HE, Inamura K, Diu K, Vannier MW, Farman AG, Reiber JHC (eds) CARS 2003 – Computer Assisted Radiology and Surgery. Elsevier Science BV, Amsterdam, pp 1358
5. Fuchsberger A (1986) Untersuchung der spannenden Bearbeitung von Knochen. Technische Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb Forschungsberichte, Bd 2)
6. 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: 514-523
7. Plinkert PK, Federspil PA, Plinkert B, Henrich D (2002) Kraft-basierte lokale Navigation zur robotergestützten Implantatbettanlage im Bereich der lateralen Schädelbasis. Eine experimentelle Studie. HNO 50: 233-239

Korrespondenz: Dr. med. P. A. Federspil, Zentrum für Schädelbasischirurgie, Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde, Universitätsklinik des Saarlandes, Kirrberger Straße, 66421 Homburg, Deutschland, e-mail: Ph.Federspil@uniklinik-saarland.de