

Erweiterung des Chirurgierobotersystems „RobaCKa“

Helge Peters, Lüder A. Kahrs, Hayo A. Knoop, Heinz Wörn

Institut für Prozessrechentchnik, Automation und Robotik, Universität Karlsruhe (TH)

peters@ira.uka.de

EINLEITUNG

Das Robotersystem "RobaCKa" [Engel03] für die roboterassistierte kraniofaziale Chirurgie wurde im April 2003 erstmals am Patienten eingesetzt [Korb04]. So konnte gezeigt werden, dass ein Roboter zum Öffnen des menschlichen Schädels einsetzbar ist. Der Vorteil bei dieser Methode liegt darin, dass der operative Eingriff zuvor am PC geplant werden kann, und anschließend durch den Roboter mit einer Genauigkeit von unter 1 mm ausgeführt wird.

Dennoch ist das System bei Operationen dieser Art zur Zeit der manuellen Ausführung durch einen erfahrenen Chirurgen unterlegen. Dies liegt zum einen an dem hohen technischen Aufwand, den das Robotersystem mit sich bringt, zum anderen aber auch in Einschränkungen durch die verwendete Mechanik und Sensorik. Außerdem erfordert das System die Implantation von Landmarken für die Patientenregistrierung.

DAS ROBACKA-SYSTEM

Der Endeffektor des RobaCKa-Systems (Abb. 1) besteht aus einem pneumatischen Überlastschutz, einem Kraft-Momenten-Sensor, Infrarot-LEDs für ein Navigations-

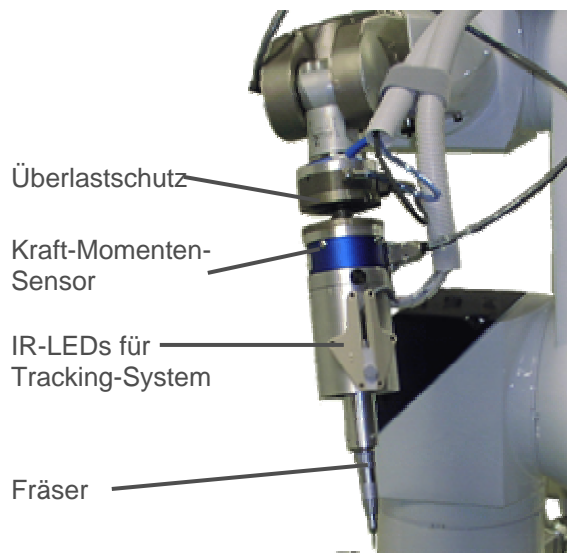


Abbildung 1: RobaCKas alter Endeffektor

onssystem und einem chirurgischen Fräser. Der Überlastschutz ist zwar ein wesentlicher Beitrag zur Systemsicherheit, jedoch bewirkt er eine recht große Nachgiebigkeit des Werkzeugs. Eine Verkipfung im Überlastschutz von $0,2^\circ$ bewirkt bei einer Werkzeuglänge von 400 mm eine Abweichung an der Fräterspitze von über 1 mm. Die Werk-

zeuglänge schränkt außerdem den Arbeitsraum des Systems ein.

Die Verbindungskabel zwischen den Geräten am Endeffektor und dem Steuer-PC verursachen einen ständigen Zug oder Druck auf den Kraft-Momenten-Sensor und verfälschen so die Messergebnisse, die mit hohem Aufwand wieder korrigiert werden müssen.

Um dem Robotersystem die Lage des Patienten bekannt machen zu können, müssen dem Patienten vier kleine Titanschrauben in den Schädel implantiert werden. Bei der darauf folgenden Operationsplanung am Computer werden sie in den CT-Aufnahmen markiert und die zu fräsende Trajektorie relativ dazu festgelegt. Intraoperativ wird die Roboterspitze durch den Chirurgen exakt zu den vier Schraubenköpfen bewegt und der Patient dadurch registriert. Auch hier verschlechtert die Durchbiegung des Endeffektors das Ergebnis.

MATERIALIEN UND METHODEN

Ein neuer Endeffektor (Abb. 2) wurde entwickelt, um bei mindestens gleicher Systemsicherheit eine höhere Präzision und einen größeren Arbeitsraum des Systems zu erreichen.

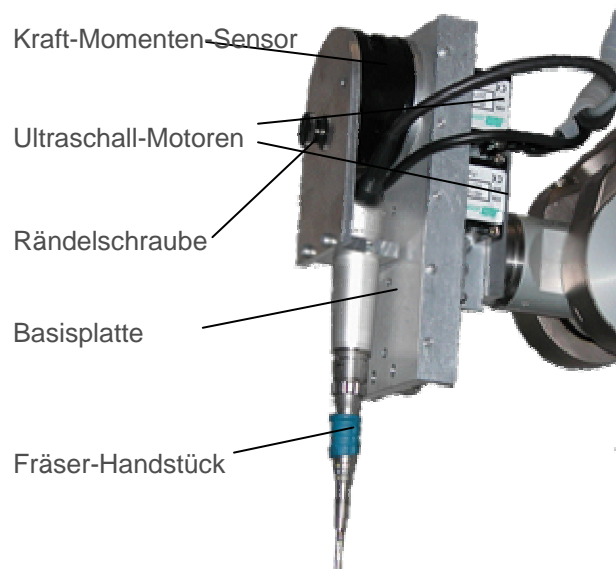


Abbildung 2: Neuer Endeffektor

Eine Basisplatte, die auf einer aktiven Linearachse verfahrbar ist, trägt einen Kraft-Momenten-Sensor. Ein Fräser-Handstück ist an letzteren über eine einzige Schraube montiert. Das Werkzeug kann durch vier Ultraschallmotoren vor und zurück verfahren werden. Dabei erlaubt deren

Präzision sorgfältiges Arbeiten in der Nähe des Gehirns, während ihre erreichbare hohe Geschwindigkeit ein schnelles Entfernen der Fräse vom Patienten ermöglicht.

Der Fräser ist so an dem Endeffektor angebracht, dass durch sein Kabel eingeleitete Störkräfte einen möglichst kleinen Hebel zum Kraft-Momenten-Sensor haben.

Der Überlastschutz als Hauptfehlerquelle für die genaue Werkzeugpositionierung entfällt. Stattdessen wird aufgrund einer Analyse der Kraft- und Momentendaten bei Bedarf das Werkzeug über die Linearachse vom Patienten weg gezogen. Hierzu besitzt der Endeffektor einen eigenen Steuerrechner, der alle eingehenden Sensordaten verarbeitet und die Frästiefe regelt.

Zur Sterilisation kann das Fräser-Handstück mit einer Schraube vom restlichen Endeffektor getrennt werden. Dieser kann dann mit dem Roboter zusammen steril abgedeckt, und der Fräser wieder angeschraubt werden. Der Fräser selbst ist konventionell sterilisierbar. Da der Fräser formschlüssig am restlichen Endeffektor befestigt und nur über eine Schraube gesichert ist, kann er schnell von Patient und Roboter entfernt werden, sollte dies über die Steuerung nicht mehr möglich sein.

Ein wesentliches Merkmal des am gleichen Institut wie RobaCKa entwickelten projektorbasierten Visualisierungssystems [Hoppe03, Hoppe04] ist es, die Lage eines Patienten markerlos mittels zweier Kameras bestimmen zu können. Das System wird klinisch dazu eingesetzt, bestimmte Strukturen (beispielsweise Schnitttrajektorien) auf der Oberfläche eines Patienten zu visualisieren. Dabei wird diese Projektion bei Bewegungen des Patienten mitgeführt.

Um die Lage des Patienten zu bestimmen, wird mittels eines Videoprojektors strukturiertes Licht auf dessen Schädel projiziert. Die von zwei Kameras aufgenommene Projektion wird ausgewertet und daraus ein Oberflächenmodell des Schädels berechnet. Dieses wird mit dem aus den CT-Aufnahmen des Patienten generierten Modell verglichen und so die korrekte Zuordnung zwischen Patient und Operationsplan ermittelt.

In einem weiteren Schritt muss dem System auch das Koordinatensystem des Roboters bekannt gemacht werden. Dazu fährt der Roboter in seinem Koordinatensystem an die acht Eckpunkte eines virtuellen Würfels (Abb. 3). An jedem dieser Eckpunkte wird ein Referenzkörper mit retroreflektierenden Kugeln um die Frässpitze des Roboters bewegt. Die Kugeln können durch die Kameras des projektorbasierten Visualisierungssystems gut detektiert werden. Die Auswertung ihrer Bahnen ergibt die aktuelle Position der Roboterspitze. Nachdem alle acht Positionen der Würfелеckpunkte bestimmt sind, lassen sich die Transformationen zwischen Visualisierungs-, Patienten- und Roboterkoordinatensystem bestimmen.

DISKUSSION

Die bisherige Ungenauigkeit des RobaCKa-Systems (inklusive Bildgebung und -Verarbeitung) lässt Fräsen in Gehirnnähe nur mit etwa 2 mm Sicherheitsabstand zu. Der neue Endeffektor arbeitet in unmittelbarer Nachbarschaft zum Gehirn ermöglichen. Er wird die Genauigkeit des alten Endeffektors übertreffen und überdies durch die Auswertung von Kraft- und Momentenmessungen das

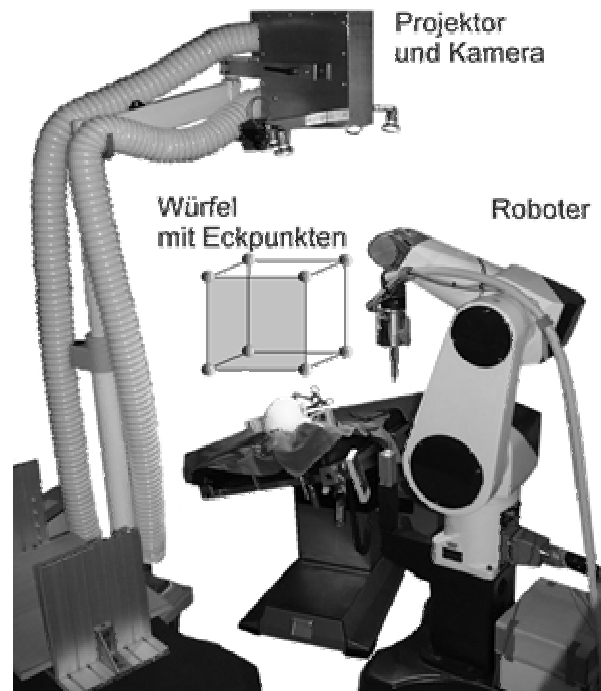


Abbildung 3: Projektor, Kameras, Roboter und virtueller Würfel

völlige Durchfräsen des Schädelknochens erlauben. Die Implantation von Titanmischschrauben in den Patientenschädel für dessen Registrierung wird nicht mehr notwendig sein, wenn die Genauigkeit des oben beschriebenen Verfahrens, die zur Zeit bei etwa 1,2 mm liegt, verbessert wurde.

DANKSAGUNGEN

An der Entwicklung dieses Endeffektors waren Gymnasiasten der Klassen 10-13 im Rahmen des Förderprogramms „Neue Ingenieurteams“ der Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung beteiligt.

Vielen Dank auch an PD Dr. Rüdiger Marmulla, stellvertretend für unsere klinischen Partner in der Universitätsklinik Heidelberg.

LITERATUR

- [Engel03] Dirk Engel: Sensorgestützte Robotersteuerung für den Einsatz in der Chirurgie; *Diss. Univ. Karlsruhe (TH)*, GCA-Verlag, ISBN 3-89863-134-6, 2003
- [Hoppe03] H. Hoppe et al.: Projector Based Visualization for Intraoperative Navigation: First Clinical Results, *Proc. 17th International Congress and Exhibition on Computer Assisted Radiology and Surgery (CARS) 2003*
- [Hoppe04] H. Hoppe: Projektorbasierte Erweiterte Realität in der rechnergestützten Chirurgie, Dissertation, Universität Karlsruhe, GCA-Verlag, 2004
- [Korb04] Werner Korb et al.: Chirurgieroboter für Kraniotomien – Risikoanalyse und erster Patientenversuch., *Automationstechnik Band 52*, Nr. 6, 2004