

**2. Workshop  
Automatisierungstechnische  
Verfahren für die Medizin vom  
25. bis 26. Feb. 1999 in  
Darmstadt**



**„Impedanzvariabler Manipulator für die  
computerunterstützte Chirurgie - Konzept und Grundlagen“**

S. Erbse, F. Neudel, K. Radermacher, G. Rau  
Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik an der RWTH-Aachen, Aachen, Deutschland  
E-Mail:erbse@hia.rwth-aachen.de

ISBN: 318318317x  
Pages: 50-51

# Impedanzvariabler Manipulator für die computerunterstützte Chirurgie - Konzept und Grundlagen

St. Erbse, F. Neudel, K. Radermacher, G. Rau

Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik an der RWTH-Aachen, Pauwelsstr. 20, 52074 Aachen  
email: erbse@hia.rwth-aachen.de

## Einleitung

Die fortschreitende Leistungsfähigkeit medizinischer Bildverarbeitungs- und Operationsplanungssysteme ermöglicht dem Chirurgen eine sehr exakte Planung und Simulation operativer Eingriffe. Die praktische Umsetzung dieser Planung wird dagegen bisher nur unzulänglich unterstützt, so daß das Ergebnis der einzelnen intraoperativen Manipulationen bei konventioneller Vorgehensweise maßgeblich von dem Geschick und der Erfahrung des Chirurgen abhängt. Um diesem Mangel zu begegnen werden an einigen Kliniken zur genaueren intraoperativen Reproduktion der Eingriffsplanung Roboter eingesetzt, die Teilaufgaben der Operation autonom durchführen. Bekanntestes Beispiel ist die Vorbereitung des Implantatsitzes am Femur beim Einsatz einer Hüftprothese mit einem modifizierten Scara-Roboter [1].

Eine Alternative zu autonomen robotischen Systemen stellen passive Manipulatoren mit veränderlicher mechanischer Impedanz dar [2,3]. Diese Systeme erlauben dem Chirurgen eine der präoperativen Planung entsprechende Bearbeitung von Knochen oder Gewebe, während Bewegungen außerhalb des geplanten Bearbeitungsraumes nicht zugelassen werden. Das Werkzeug des Chirurgen wird wie von einer virtuellen rechnergesteuerten Schablone geführt. Innerhalb des Arbeitsbereiches ermöglicht der Manipulator eine freie Bewegung sowie das passive Halten des Endeffektors. Da der Arzt selbst die Manipulationen ausführt, ist eine systemimmanente Sicherheit gewährleistet.

Neben den typischen Einsatzgebieten von Robotern, wie der Erzeugung geplanter Geometrien (z.B. spanende Bearbeitung knöcherner Strukturen, Entfernen von Gewebe,...) oder dem Positionieren medizinischer Instrumente, ergeben sich für einen passiven Manipulator weitere Einsatzmöglichkeiten. Beispielsweise kann in der Laparoskopie mit Hilfe des Manipulators intraoperativ ein Arbeitsraum definiert werden, der zur Vermeidung von Organschädigungen nicht verlassen werden darf.

## Systemkonzept

Am Helmholtz-Institut Aachen wird derzeit das Konzept eines Manipulators mit variabler mechanischer Impedanz verfolgt, der nicht aktiv angetrieben wird, sondern die Bewegungen des Operateurs innerhalb eines zuvor definierten Arbeitsraumes zuläßt. Erzeugt wird die Impedanz durch Aufbringen

von Klemmmomenten in den Gelenken des in serieller Struktur aufgebauten Manipulators.

Die Variation der mechanischen Impedanz des Manipulators erfolgt in Abhängigkeit von der Position, Kraft und Geschwindigkeit des Endeffektors. Der Chirurg erhält so taktile Informationen über den geplanten Bewegungsraum und wird entsprechend der Planung durch den Arbeitsraum geführt, ohne dabei auf eine zusätzliche visuelle Kontrolle, beispielsweise auf einem Bildschirm, angewiesen zu sein. Der Endeffektor kann innerhalb der vordefinierten Zone frei bewegt werden, während ein Verlassen des Bereiches nicht möglich ist. Hierbei wird bei Annäherung an die Randzone die mechanische Impedanz, also der Widerstand gegen die Bewegung, kontinuierlich erhöht. Im Extremfall, bei dem Versuch den Arbeitsbereiches zu verlassen, wird der Manipulator gesperrt und erst wieder geöffnet, wenn ein integrierter Kraft-Momenten-Sensor eine in den zulässigen Arbeitsbereich gerichtete Kraft registriert. Die für die Regelung erforderlichen Parameter Position und Geschwindigkeit werden durch Winkencoder an den Gelenken erfaßt.

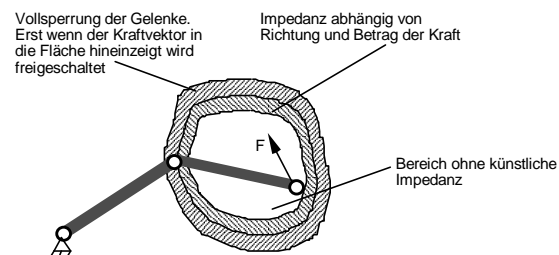


Bild 1: Einsatz des Manipulators zur Beschränkung des Bewegungsraumes

Für verschiedene medizinische Anwendungen sind insgesamt drei unterschiedliche Betriebsarten des Manipulators möglich. Neben der Einschränkung des Bewegungsraums oder einer Fläche, kann der Manipulator die Bewegungen des Operateurs auf einer Trajektorie führen oder eine zielgerichtete Bewegung zu einem Punkt hin überwachen.

Die Bremswirkung in den Gelenken wird durch piezoelektrische Aktoren erzeugt. Erfahrungen beim Bau von piezoelektrisch arretierbaren Gelenkmechanismen bestehen bereits aus der Entwicklung eines

chirurgischen Haltearmsystems, welches sich derzeit in der klinischen Erprobung befindet [4].

Piezoaktoren bieten gegenüber anderen aktorischen Möglichkeiten (Hydraulik, Elektromagnetismus,...) den Vorteil, daß sie relativ hohe Eigenkreisfrequenzen haben (je nach Typ: 20-200kHz). Dies ist in sofern wichtig, da Samplingraten des Systems im Bereich von 0,5-2 kHz zu erwarten sind um für den Benutzer einen möglichst unverfälschten haptischen Eindruck bei der Ausführung der Bearbeitungsaufgabe zu gewährleisten. Eine genauere Angabe zur erforderlichen Samplingrate kann zur Zeit noch nicht gemacht werden, da die dazu erforderlichen Versuche noch durchgeführt werden müssen.

### Regelungskonzept

Ausgehend von den Istgrößen, Abstand des Effektors zum Rand, dessen Annäherungsgeschwindigkeit und der resultierenden Krafteinwirkung auf den Manipulator, müssen geeignete Sollgrößen zur Ermittlung des gesuchten Bremsmomentes in den einzelnen Gelenken gefunden werden.

Um eine akzeptable Berechnungszeit des Reglers zu erreichen, wird nicht der gesamte Navigationsraum untersucht, sondern nur signifikante Koordinaten auf der Oberfläche, die den zulässigen Arbeitsraum begrenzen, betrachtet.

Zur Regelung der Aktorspannung als Funktion des erforderlichen Bremsmomentes wird für die Untersuchung des Abstandes der dem Effektor nächste Randpunkt auf der Raumbofläche untersucht.

Der differentielle Anteil der Regelung wird derzeit auf den Randpunkt der Abstandsregelung bezogen. Aus der Ermittlung der theoretisch verbleibenden Zeit bis zum Erreichen des Randes müssen die Momente in den Gelenken so beeinflußt werden, daß ein abruptes Bremsen oder eine Bewegung außerhalb des Arbeitsraumes vermieden werden. Entfernt sich der Effektor des Manipulators vom Rand, wird das Bremsmoment verringert, verbleibt dagegen nur eine kurze Zeitspanne bis der Effektor die begrenzende Oberfläche erreicht, muß das bremsende Moment erhöht werden.

Diese beiden Regeleingangsgrößen (Abstand vom Rand, Annäherungsgeschwindigkeit) liefern noch keine verwendbare Regelung, wie man leicht aus der Betrachtung des realistischen Falles -Manipulator ist in Ruhe und befindet sich nah am Rand des Arbeitsraumes- rekonstruieren kann. Hier ist es günstiger, die Untersuchung der auf den Manipulator wirkenden Kraftrichtung in Bezug zum Abstand als Eingangsgröße für den Regler heranzuziehen. Eine hybride Geschwindigkeits-Kraftregelung zur Berechnung der Aktorspannung schafft hier Abhilfe. Weiterhin muß aufgrund der mechanischen Eigenschaften des Systems eine Unterscheidung zwischen „schieben oder ziehen“ über die Randoberfläche getroffen werden. Das dynamische Verhalten des Armes in diesen zwei Situationen variiert sehr stark und muß im Regler berücksichtigt werden.

Aufgrund der in die Berechnung eingehenden Zustandsgrößen ist dies, bezugnehmend auf Begriffe aus der Robotik, eine adaptive PD-Regelung des Effektorabstandes zum Rand des zulässigen Arbeitsraumes gekoppelt mit einem Kraftregler.

### Stand und Ausblick

Auf der Basis eines planaren Labormusters mit zwei rotatorischen Freiheitsgraden (Bild 2) wurden Versuche zur Regelungssystematik durchgeführt und erste Erfahrungen gesammelt. Die Versuche hatten zum Ziel, die Machbarkeit eines Systems des vorliegenden Konzepts zu überprüfen und konnten mit positivem Ergebnis abgeschlossen werden.



Bild 2: Planares Labormuster

Ein Labormuster mit drei Freiheitsgraden befindet sich zur Zeit im Aufbau. Die entsprechende Regelung ist bereits implementiert. Vorrangiges Ziel sich anschließender Versuchsreihen soll die Ermittlung der für eine möglichst irritationsfreie Bedienung erforderliche Samplingrate des Systems sein, wobei die derzeit maximal erreichbare Samplingrate der PC-basierten Regelung bei etwa 1kHz liegt.

### Literatur

- [1] Taylor, R. et al.; Augmentation of human precision in computer integrated surgery; *Innov. Tech. Biol. Med.*, Vol 13, no 4, 1992
- [2] Troccaz, J.; PADyC: A passive Arm with Dynamik Constraints; TIMB-TIMC/IMAG, Faculté de Médecine - Domain de la Merci, 38700 La Troche - France
- [3] Davies, B.L.; The Use of Force Control in Robot Assisted Knee Surgery; *Proc. of the First International Symposium on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, MRCAS '94, Pittsburgh, Pennsylvania, Sept. 22-24, 1994*
- [4] Erbse, St. et al.; Development of an automatic surgical holding system based on ergonomic analyses; *Proc. of CVRMed II and MRCAS III, Grenoble, France, March 12-22, 1997, Lecture Notes in Computer Science, Springer Verlag*