

Robotik in der Chirurgie



Experimentelles Robotersystem am Deutschen Herzzentrum München.

Historie

Der bestimmende Trend in der Chirurgie der 80er Jahre des vergangenen Jahrhunderts war die „Enttraumatisierung“ der Operationen, d.h. Eingriffe durch kleinere Schnitte und höhere Präzision weniger belastend für den Patienten zu gestalten. Häufig stellen jedoch in der Chirurgie die Begriffe „kleinerer Schnitt“ und „höhere Präzision“ bereits ein Gegensatzpaar dar, weil das manuelle Arbeiten mit herkömmlichen Instrumenten und die visuelle Erfassung des Operationssitus um so schwieriger werden, je kleiner der Zugang zum Körperinneren des Patienten ausfällt.

Daher begann in dieser Ära eine rasante Entwicklung neuartiger Instrumente, verbesserter intraoperativer Navigation, um die verringerte Übersicht zu kompensieren bis hin zur Entwicklung von Robotersystemen, die beide Qualitäten vereinen. Die erste medizinische Anwendung am Menschen erfolgte schließlich 1985 (PUMA-System) bei einer robotergestützten Tumorpunktion bei einem 52-jährigen Patienten.

„Mensch-Maschine-Interaktion“ in der Medizin

Die zunehmende Technisierung in der Medizin und besonders in der Chirurgie führte bei einer Reihe von Patienten zu der Befürchtung, dass die Interaktion mit dem Arzt entmenslicht und die Behandlung von Maschinen übernommen würde. Tatsächlich aber sollten gerade Robotersysteme ausschließlich zum Wohle des Patienten und für mehr und bessere Behandlungsmöglichkeiten eingesetzt werden und dabei unter ständiger Kontrolle des Arztes bleiben. Ein zumindest teilweise brauchbares Analogon ist die Entlastung von Piloten durch die Entwicklung der Autopiloten und fly-by-wire-Techniken, die Flugzeuge von ehemals reinen Master-Slave-Systemen mit minimaler sensorischer Ausstattung und Instrumentierung zu fliegenden Robotern gemacht hat, die vom Piloten nicht mehr direkt gesteuert, sondern nur noch überwacht werden. Es lässt sich hier wie dort gut argumentieren, dass niemals an den Ersatz des Operators gedacht war und ist, vielmehr bleibt ihm jederzeit die Möglichkeit, die Systementscheidungen zu korrigieren oder zu ignorieren. Insgesamt soll also die kognitiv-motorische Entlastung des Arztes sogar dazu führen, ihm mehr Zeit für die menschliche Interaktion mit dem Patienten zu geben.

Anforderungen an die Sicherheit medizinischer Roboter

Im Vergleich zu Industrierobotern, die größtenteils autonom agieren können, besteht bei Robotern in der Chirurgie unmittelbarer Kontakt zu Patienten, aber auch zu dem medizinischen Personal, so dass hier zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen zu beachten sind. Wichtig ist es, sowohl den Arbeitsraum des Roboters zu definieren als auch die Kraft, die er auf verschiedene Gewebestrukturen ausüben darf.

Einsatz von Robotersystemen in der Chirurgie

Bereits in den frühen neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden über 35 Robotersysteme für die Chirurgie entwickelt [1]. Dabei zeigte sich vor allem, dass die Realisierung eines universell nutzbaren Roboters schwierig war, weil die Anforderungen stark von der zu operierenden Körperregion und den zu manipulierenden Gewebestrukturen abhängig waren.

Chirurgie der Knochen

Es war schließlich 1992, als das erste kommerziell verfügbare Robotersystem für Eingriffe am Menschen zur Verfügung stand: der *ROBODOC*. Nicht zufällig handelte es um ein System für Hüftoperationen, das ein hochpräzises Fräsen ermöglichen sollte, um dann die optimale Einpassung der Hüftprothese zu gewährleisten. Im Vergleich zur Chirurgie der Weichteile bieten Eingriffe am Knochen (Skelett einschließlich des knöchernen Schädels) für die Anwendung von Robotern eindeutige Vorteile: für die Dauer der Operation kann das betreffende Körperteil komplett ruhiggestellt werden, d.h. es ist keine Verschiebung des Operationsgebiets durch autonome Bewegungen (wie z.B. des Herzens, der Lunge oder des Darms) zu erwarten. Durch präoperativ eingebrachte Marker ist eine räumliche Kalibration des Systems anhand der vor der Operation durchgeführten Untersuchungen und damit ein sehr exaktes Positionieren und Navigieren möglich, und die Bearbeitung des relativ starren Knochengewebes ist in hohem Maße vorhersagbar und damit planbar. Das System *CASPAR* war vergleichbar konzipiert und für Eingriffe an der Hüfte und am Knie geeignet. Beide Systeme konnten autonom arbeiten, wurden aber jederzeit von dem verantwortlichen Arzt kontrolliert.

Nachdem über 12000 Eingriffe mit dem *ROBODOC* durchgeführt worden waren, litten mehrere Patienten über ständige Beschwerden durch Muskel- oder Nervenverletzungen, und es kam zu einer Vielzahl von Prozessen gegen Hersteller und behandelnde Ärzte. Das System wurde daraufhin nicht weiter verwendet, zumal retrospektive Untersuchungen auch keinen Vorteil der roboterunterstützten Eingriffe nachweisen konnten [2].

Weitere Einsatzfelder, bei denen die geforderte Präzision und die Navigationsmöglichkeiten weit höher waren, waren Eingriffe an den Strukturen des Kopfes, wo durch den Roboter Strukturen zugänglich wurden, an denen eine schonende Operation früher nicht oder nur unter erheblicher Gefährdung des Patienten hätte durchgeführt werden können. Dieses Anwendungsgebiet umfasst zum einen die roboterunterstützte konventionell-endoskopische Chirurgie [3], aber auch das relativ neue Feld der Radiochirurgie. Hier konnten durch die zielgenaue Planung und Durchführung der Bestrahlung

mit Systemen wie z.B. dem „Cyberknife“ Tumoren und Metastasen in schwer zugänglichen Regionen wesentlich effektiver und schonender behandelt werden als früher [4].

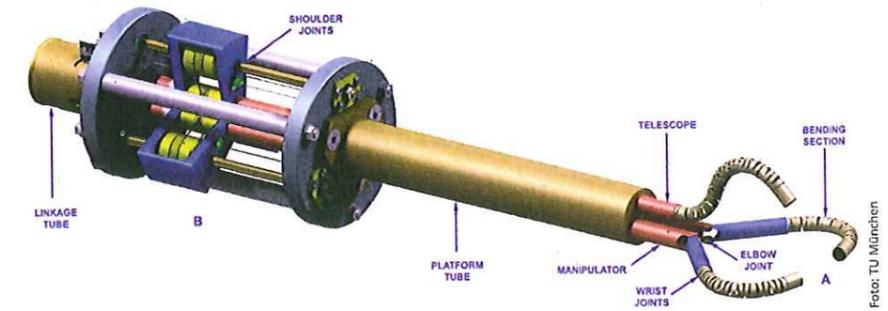
Chirurgie der Weichteile

Die Chirurgie der Weichteile ist das weitaus anspruchsvollere Feld für den Einsatz von Robotersystemen, weil hier die Prädiktion der durch die Manipulation bedingten Umgebungsbewegungen im Gewebe schwer bis unmöglich ist – insbesondere bei Organen mit autonomer eigener Motorik, die nicht ohne Weiteres unterbrochen werden kann, wie dem Herzen, der Lunge oder dem Magen-Darmtrakt.

Interessanterweise wurden die beiden ersten Systeme auf diesem Gebiet in der Herzchirurgie Ende der Neunziger Jahre eingesetzt, der „*Zeus*“ von ComputerMotion und der „*Da Vinci*“ von Intuitive Surgical; später fusionierten die Firmen. Der Bedarf in der Herzchirurgie entstand dadurch, dass man gerne diese großen und belastenden Eingriffe ähnlich wie in der Bauchchirurgie minimal invasiv durchführen wollte, aber feststellen musste, dass die hier notwendige Präzision mit herkömmlichen endoskopischen Instrumenten nicht zu erzielen war. Um die Strukturen des Herzens erreichen und mit der notwendigen Genauigkeit operieren zu können, waren zusätzliche Freiheitsgrade, ein Tremorfilter und 3-D-Endoskope nötig.

Bei beiden genannten Systemen handelte es sich um Telemanipulatoren, d.h. Systeme, die vollständig vom Arzt gesteuert wurden und keine autonomen Handlungssequenzen vornahmen. Nach einer anfänglichen Phase der Euphorie wurde schnell klar, dass die Möglichkeiten beider Robotersysteme in der Herzchirurgie sehr begrenzt waren: es konnte nur ein kleines Spektrum an Eingriffen durchgeführt werden, und das auch nach intensivem Training nur mit erheblichem Zeitaufwand. Die Gründe hierfür waren vielfältig, als zentral wurden aber die zeitraubende Positionierung der Instrumente im Patienten, die fehlende Krafterückkopplung und das Fehlen autonomer Handlungssequenzen bei zeitraubenden Aufgaben, z.B. dem Nähen oder Knoten, angesehen.

Aus dieser Erkenntnis stammte die Motivation, einem experimentellen Robotersystem „das Fühlen beizubringen“, das in einem Gemeinschaftsprojekt des Institute for Robotics and Embedded Systems in Garching und dem Deutschen Herzzentrum München realisiert werden konnte. Diese Möglichkeit der Krafterückkopplung erleichterte einerseits dem Chir-



Single-Port-System der TU München.

urgen die Manipulation, war aber auch notwendige Voraussetzung für die Durchführung autonomer Sequenzen durch den Roboter, die ohne haptische Informationen unabdingbar zur Verletzung des Gewebes oder des chirurgischen Materials geführt hätte; auch dieses Ziel konnte erreicht werden [5].

Eine Weiterentwicklung stellte das auf der *AUTOMATICA 2010* von der DLR Oberpfaffenhofen präsentierte System *MIROSURGE* dar: mehrere Leichtbauroboterarme mit integrierter Krafterückkopplung für die minimal-invasive Chirurgie.

Ausblick

Während das *Da Vinci*-System sich aus der Herzchirurgie immer mehr zurückzog, begann bereits seine Erfolgsgeschichte in der Urologie: mittlerweile wurden Hunderttausende von radikalen Prostatektomien (vollständige Entfernung der Prostata) mit dem Roboter durchgeführt. Kritische Stimmen fragen jedoch nach wie vor, ob die Anwendung eines so kostspieligen und raumfordernden Systems tatsächlich gerechtfertigt ist, zumal sich die postulierten Vorteile offensichtlich nicht in der Patientenzufriedenheit widerspiegeln [6].

Stattdessen konzentriert man sich mittlerweile eher auf kleinere, „intelligente“ und versatile Systeme, wie das an der TU München entwickelte „*Highly Versatile Single Port System*“ [7] und besonders auf die Adaptation des gesamten Workflows von der präoperativen Planung über die Durchführung des Eingriffs bis hin zur Nachsorge.

Nach Ansicht der Autoren hat die Robotik in der Chirurgie definitiv eine hochinteressante Zukunft; wenn der Roboter allerdings nur als zusätzliches Instrument betrachtet wird, kann er schnell zum Fremdkörper werden. Das übergeordnete Ziel ist die schonendere und effektivere Behandlung des Patienten, darin ist der Roboter ein wichtiges Element, ebenso wichtig

ist es aber, auch alle anderen Schritte der Diagnostik und Behandlung auf diese Technologie abzustimmen.

Prof. Dr. Robert Bauernschmitt

Klinik für Herz-, Thorax- und Gefäßchirurgie
(Direktor: Prof. Dr. A. Liebold)

Universität Ulm

Prof. Dr. Alois Knoll

Institute for Robotics and Embedded Systems
TU München

LITERATUR

INFO

- [1] Taylor RH, Stoianovici D. Medical robotics in computer-integrated surgery, *IEEE Trans on Robotics and Automation* 2003, 19(5): 765-81
- [2] Schulz AP, Seide K, Queitsch C, von Haugwitz A, Meiners J, Kienast B, Tarabolsi M, Kammal M, Jürgens C., Results of total hip replacement using the Robodoc surgical assistant system: clinical outcome and evaluation of complications for 97 procedures., *Int J Med Robot.* 2007 Dec;3(4):301-6
- [3] Hofer M, Runge A, Haase R, Neumuth T, Maier T, Lueth T, Dietz A, Strauss G., Ein chirurgischer Mikromanipulator in der Ohrchirurgie, *HNO.* 2012 Feb;60(2):109-16
- [4] Wang YS, Wang YY, Jiang P, Ma JJ, Qu Z, Wang XL, Li JT, Jia XF, Short-term outcomes of CyberKnife therapy for advanced high-risk tumors: A report of 160 cases., *Exp Ther Med.* 2012 Apr;3(4):725-727
- [5] Knoll A, Mayer H, Staub C, Bauernschmitt R., Selective automation and skill transfer in medical robotics: a demonstration on surgical knot-tying., *Int J Med Robot.* 2012 Dec;8(4):384-97
- [6] Pretreatment expectations of patients undergoing robotic assisted laparoscopic or open retroperitoneal radical prostatectomy. Schroeck FR, Krupski TL, Stewart SB, Bañez LL, Gerber L, Albala DM, Moul JW. *J Urol.* 2012 Mar;187(3):894-8.
- [7] The mechatronic support system „HVSPS“ and the way to NOTES. Can S, Fiolka A, Mayer H, Knoll A, Schneider A, Wilhelm D, Meining A, Feussner H. *Minim Invasive Ther Allied Technol.* 2008;17(6):341-5