

Robotik

Eine neue Dimension in der HNO-Heilkunde?

Zusammenfassung

Roboter haben bereits in viele Bereiche des Lebens Einzug gehalten. Mit dem Bild des anthropomorphen Roboters aus „Krieg der Sterne“ haben die Medizinroboter jedoch nichts gemeinsam. Es wird zwischen Manipulatoren, die nach dem Master-Slave-Prinzip arbeiten, und den eigentlichen Robotern unterschieden, bei denen es sich um „automatisch gesteuerte frei programmierbare Mehrzweckmanipulatoren“ handelt, die „in drei oder mehr Achsen programmierbar sind“. Ihren Erfolg verdanken die Roboter der Genauigkeit, fehlenden Ermüdung und Schnelligkeit, mit der sie arbeiten. Mögliche Anwendungsgebiete der Manipulatoren liegen im Bereich der endonasalen Chirurgie, das potentielle Einsatzgebiet der Roboter im Bereich der lateralen Schädelbasis einschließlich der Mastoidektomie und der Anlage von Implantatlagern für implantierbare Hörsysteme und Cochleaimplantate.

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurden von unserer Arbeitsgruppe als vorbereitende Maßnahme für die roboterassistierte Schädelbasischirurgie eine Reihe von Experimenten im Anatomischen Institut durchgeführt. Der folgende Artikel befasst sich mit der aktuellen Situation des Robotereinsatzes in der Medizin und gibt einen Überblick über deren Anwendung in der HNO-Heilkunde.

Schlüsselwörter

Roboter · Manipulator · Computer-aided surgery · Navigation · Schädelbasischirurgie

Roboter stehen in dem Ruf, Arbeitsplätze zu vernichten oder seelenlos zu arbeiten. Dass ihr Einsatzfeld dennoch weiter zunimmt, verdanken sie ihren Eigenschaften wie Genauigkeit, fehlende Ermüdung und Schnelligkeit. Diese Charakteristika haben zu einer wachsenden Akzeptanz von Robotern für unterschiedliche Aufgaben in der Medizin geführt. Die Situation in den Operationssälen lässt sich mit dem Ersatz der Pferdekutsche durch das Automobil vergleichen. In ähnlicher Weise wurde das Automobil als zu teuer, wenig nutzbringend – Pferdekutschen und Dampfmaschinen waren ja bereits verfügbar – und gefährlich bezeichnet wie auch als revolutionäre Neuerung durch Visionäre bewundert. Die moderne Medizinrobotik ist über den Status einer nackten Vision längst hinausgewachsen, wie zahlreiche Installationen von Robotern besonders in deutschen Kliniken zeigen. Trotzdem sind die Kritiker noch nicht verstummt, die sowohl aus medizinischer als auch aus technischer Sicht die Mängellisten dieser Systeme immer wieder anprangern. Allerdings erwächst diese Skepsis heute nicht mehr aus der prinzipiellen Negierung des Nutzens von Medizinrobotern, sondern aus der Tatsache, dass die technischen Ziele der Entwickler und Betreiber in einigen Bereichen noch nicht erreicht werden konnten.

In der Geschichte der Medizin gibt es viele Parallelen für den Entwicklungsverlauf von der Vision bis zum medizinischen Standard: Beispielsweise wurde

die Idee der minimal-invasiven Chirurgie bereits in der Antike geboren [28], die Umsetzung erfolgte aber erst zu Beginn des letzten Jahrzehnts, nachdem geeignete technische Hilfsmittel zur Verfügung standen. Die Medizinrobotik präsentiert sich in einigen Bereichen heute zwar noch prototypisch, ihre Etablierung zum therapeutischen Standard liegt aber allein in den strategischen Maßnahmen zur Weiterentwicklung bestehender Technologien.

Im Jahr 1997 wurde am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart mit der Entwicklung eines Präzisionsroboters für die Neuroendoskopie begonnen. 1999 wurde als Spin-off des Fraunhofer-IPA die Firma Universal Robot Systems (URS) gegründet, die sich zum Ziel gesetzt hat, den Prototypen des Hexapodroboters innerhalb des nächsten Jahres zur Marktreife zu bringen (Abb. 7a, b).

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten wurde von unserer Arbeitsgruppe [HNO-Universitätsklinik Tübingen bzw. Homburg/Saar (UKH)] und des Fraunhofer-IPA als vorbereitende Maßnahme für die roboterassistierte Schädelbasischirurgie eine Reihe von Experimenten im Anatomischen Institut durchgeführt. Diese Untersuchungen bilden die Basis

P.A. Federspil

Klinik und Poliklinik für Hals-Nasen-Ohrenheilkunde, Universitätskliniken des Saarlandes, Kirrberger Straße, 66421 Homburg/Saar, E-Mail: hnopfed@med-rz.uni-sb.de, URL: <http://www.hno-homburg.de>

Robotics. A new dimension in otorhinolaryngology?

Abstract

Robots have entered into many aspects of human life, including operative medicine. However, current medical robots have nothing in common with anthropomorphic robots as known in science fiction novels.

We distinguish manipulators, working on a master-slave principle, from robots. Robots can be defined as "automatically controlled multitask manipulators, which are freely programmable in three or more axes." The success of robots is based on their precision, lack of fatigue, and speed of action. Potential fields of application for manipulators lie in endonasal surgery and for robots in lateral skull base surgery, including mastoidectomy and drilling a cavity for implantable hearing systems and cochlear implants. We performed a number of experiments at the department of anatomy with respect to robotic lateral skull base surgery. This paper reviews the current use of manipulators and robots in operative medicine and their potential applications in otorhinolaryngology.

Keywords

Robot · Manipulator · Computer-aided surgery · Navigation · Skull base surgery

Übersicht

für die derzeit durchgeführten Forschungsarbeiten zur gemeinsamen Umsetzung einer Reihe von Konzepten für die Anwendung der Robotertechnologie auf dem Fachgebiet der HNO-Heilkunde [21, 23, 27]. Der folgende Artikel befasst sich mit der aktuellen Situation des Robotereinsatzes in der Medizin und gibt einen Überblick über deren Anwendung in der HNO-Heilkunde.

Das Wort „Roboter“ leitet sich vom tschechischen Wort „robota“ mit der Bedeutung Fronarbeit ab. Der Begriff wurde 1921 von Karel Capek für einen rastlos arbeitenden „künstlichen Menschen“ geschaffen. In Capeks Drama „R.U.R.“ (Rossums Universal Robots) sind die darin vorkommenden Roboter mechanische Gestalten, die in großer Stückzahl produziert, den Menschen von stumpfsinniger Fabrikarbeit entlasten sollten [29]. Seitdem werden unter Robotern im allgemeinen Sprachgebrauch anthropomorphe Maschinen verstanden, die in zahllosen Büchern, Erzählungen und Spielfilmen, angefangen vom Roboter „Futura“ in Fritz Langs Film *Metropolis* (Abb. 1) bis zu den sympathischen Manifestationen von „C3PO“ und „R2D2“ aus der *Star Wars*-Saga, die Phantasie der Menschen anregen. Neben ihrem Aussehen besitzen diese Roboter weitere menschliche Attribute wie Intelligenz und Verhaltensformen: In Capeks Stück entziehen sich die Roboter, nachdem sie höhere geistige und physische Fähigkeiten erlangen, der Kontrolle durch den Menschen, wenden sich gegen ihre Erbauer und vernichten sie. Obwohl sich die Forschung weiterhin mit

der Entwicklung mechatronischer Wesen mit möglichst menschenähnlichen Eigenschaften auseinander setzt, liest sich die industrielle Definition von einem Roboter wesentlich nüchterner (ISO 8373:1996):

„Ein Roboter ist ein automatisch gesteuerter frei programmierbarer Mehrzweckmanipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und (...) entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann.“

Eine wesentliche Bedeutung besonders in Hinblick auf medizinische Anwendungen kommt den Manipulatoren zu. Das Europäische Komitee für Normierung (CEN) definiert folgendermaßen (ISO 8373:1996):

„(Ein Manipulator ist eine)... Maschine, deren Mechanismus aus einer Folge von Komponenten besteht, durch Gelenke oder gegeneinander verschieblich verbunden, mit dem Zweck, Gegenstände (Werkstücke oder Werkzeuge) zu greifen und/oder zu bewegen, normalerweise mit mehreren Freiheitsgraden.“

Es handelt sich bei den Manipulatoren per definitionem nicht um Roboter. In der modernen Medizintechnik übernimmt der Roboter oder Manipulator die Aufgabe eines Assistenzsystems oder eines Hilfsmittels für die Durchführung des Eingriffs. Tatsächlich sind weltweit bereits über 500 Robotersysteme, zumeist Manipulatoren, im Einsatz. Tabelle 1 fasst die operativen Robotersysteme zusammen. Der „eiserne Chirurg“ gilt bisher jedoch technisch als nicht realisierbar – und ist auch nicht wünschenswert.

Master-Slave-Manipulatoren

Allgemein wird häufig nicht zwischen Robotern und Manipulatoren gemäß der Definition unterschieden. In der Medizin sind Manipulatoren überall dort anzutreffen, wo die menschliche Wahrnehmung und Flexibilität nicht durch künstliche Sensoren und ein Computerprogramm ersetzt werden kann. In der Regel arbeiten Manipulatoren nach dem „Master-Slave-Prinzip“ oder als einfaches Trägersystem [20]. Beim Master-Slave-Prinzip werden die Bewegungen des Operateurs an Eingabegeräten an der Bedienkonsole möglichst verzögert



Abb. 1 ► „Futura“ aus Fritz Langs Film „Metropolis“ (Ufa; mit frdl. Genehmigung der Friedrich-Wilhelm-Murnau-Stiftung)

rungsfrei auf ein auswechselbares Instrument (Endeffektoren) übertragen. Sie stehen zu jedem Zeitpunkt unter der Kontrolle des Operateurs. Ein Tremorfilter verhindert die Übertragung unerwünschter Begleitbewegungen. Das natürliche Zittern der menschlichen Hand wird dabei elektronisch „gelöscht“. Durch die computergestützte Übertragung können die Bewegungen in einem beliebigen Verhältnis auf die endoskopischen Instrumente übersetzt werden („Skalierung“), sodass mikrochirurgische Eingriffe mit noch höherer Präzision ausgeführt werden können.

Eines der ersten Systeme dieser Art war das ARTEMIS-System (Advanced Robot and Telem Manipulation System for Minimally Invasive Surgery; Abb. 2), das am Forschungszentrum Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der Sektion Minimal Invasive Chirurgie der Universitätsklinik Tübingen entwickelt wurde [5]. Das System besteht aus 2 Eingabegegeräten, 2 Manipulatoren, einem Endoskopführungssystem, einer Spracheingabe und einer Trackingfunktion [10]. Die Trackingfunktion kann so eingerichtet werden, dass das Endoskop automatisch dem Effektor des rechten Manipulators folgt. Die Entwicklung von ARTEMIS wurde 1999 eingestellt. Gegenwärtig werden 2 Manipulatorsysteme auf dem Markt angeboten, die bereits in der klinischen Routine zum Einsatz kommen: Es handelt sich dabei um das System „ZEUS™“ (Abb. 3) der Firma Computer-Motion (Goleta, USA) und das System „da Vinci™“ (Abb. 4a) der Firma Intuitive Surgical (Mountain View, CA, USA). Ihr Einsatzgebiet liegt in der laparoskopischen Chirurgie (Viszeralchirurgie, Gynäkologie, Urologie; [6]) und der minimal-invasiven Herz-Thorax-Chirurgie [15, 16, 36]. Typische Einsatzgebiete stellen die komplett endoskopische Bypassoperation mit der A. thoracica interna zum R. interventricularis anterior der linken Koronararterie und die Mitralklappenrekonstruktion dar [15, 16]. Beim da-Vinci-System werden über eine Minithorakotomie ein 3D-Videoendoskop sowie 2 endoskopische Instrumente (EndoWrist™, Abb. 4b) eingeführt, die dem menschlichen Handgelenk nachempfunden sind und die Durchführung komplexer Aufgaben wie beispielsweise die einer chirurgischen Naht erlauben. Ein besonderer Clou ist, dass auch Operationen am schlagenden

Tabelle 1
Übersicht über die wichtigsten operativen Robotiksysteme in ihrem derzeitigen Entwicklungsstand, Einsatzbereich und ihrer Genauigkeit*

System (Hersteller/ Forschungseinrichtung)	Entwicklungs- stadium	Einsatzbereich	Genauigkeit
ROBODOC® (ISS)	Produkt	Hüftgelenk- / Knieendoprothetik	<0,1 mm relativ ^a
AESOP (Computer Motion)	Produkt	Endoskopführung in der Laparoskopie	<1 mm relativ ^a
EndoAssist (Armstrong Healthcare)	Produkt	Kameraführung in der Laparoskopie	<1 mm relativ ^a
NeuroMate (IMMI, ISS)	Produkt	Instrumentenführung in der Neurochirurgie	20 µm relativ
CASPAR® (ortoMAQUET)	Produkt	Hüftgelenk-/ Knieendoprothetik	200 µm absolut
OTTO (SurgiScope, joyumarie)	Produkt	Anaplastologie, Applikations- system für die Brachytherapie	k.A.
ZEUS™ (Computer Motion)	Produkt	Endoskop- und Instrumenten- führung in der Herzchirurgie und Laparoskopie	<1 mm relativ ^a
da Vinci™ (Intuitive Surgical)	Produkt	Endoskop- und Instrumenten- führung in der Herzchirurgie	<1 mm relativ ^a
Evolution 1 (Universal Robot Systems)	Produkt- entwicklung	Hüftendoprothetik, andere Anwendungen in Vorbereitung	<0,01 mm relativ ^a
FIPS (Storz)	Produkt- entwicklung	Endoskopführung in der Laparoskopie	<1 mm relativ ^a
Mikrochirurgie (Fraunhofer-IPA, URS)	Produkt- entwicklung	Endoskop- und Instrumentenführung in der Mikrochirurgie	2 µm relativ, 20 µm absolut
OrthoSista (Armstrong Healthcare)	Forschung	Kniegelenkendoprothetik	<10 µm relativ ^a
Mikrochirurgie (University of Tokio)	Forschung	Instrumenten- und Kamera- führung in der Mikrochirurgie	<0,1 mm relativ ^a
MINERVA (EPFL)	Forschung	Stereotaktische Neurochirurgie	<10 µm relativ ^a
LARS (Johns Hopkins, IBM)	Forschung	Endoskop- und Instrumenten- führung in der Laparoskopie	<0,1 mm relativ ^a
ARTEMIS (Forschungszentrum Karlsruhe)	Forschung	Endoskop- und Instrumenten- führung in der Laparoskopie	<1 mm relativ ^a
RAMS (JPL)	Forschung	Mikrochirurgie, z. B. Instrumenten- führung in der Ophthalmologie	10 µm relativ

* Die Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.
 a Keine Angaben veröffentlicht. Schätzung aufgrund eigener Beobachtung.

Herzen möglich sind, indem Endoskop und Instrumente bei Herzbewegungen EKG-getriggert synchron mitgeführt werden. Auf dem Bildschirm entsteht so der Eindruck, dass sich weder Herz noch Instrumente bewegen.

Durch die Fernübertragung ist es prinzipiell gleichgültig, ob der Operateur unmittelbar im Operationssaal vor Ort oder aber weit davon entfernt ist. Unter dem Namen „Lindbergh-Operation“ – benannt nach dem amerikani-



Abb.2 ◀ **ARTEMIS (Advanced Robot and Telem Manipulation System for Minimally Invasive Surgery): Manipulatorsystem des Forschungszentrums Karlsruhe und der Sektion Minimal Invasive Chirurgie der Universitätskliniken Tübingen**

schen Piloten Charles Augustus Lindbergh, der 1927 im Alleinflug als Erster den Atlantik von New York nach Paris überquerte – ist eine laparoskopische Operation in Frankreich durch einen Operateur in den USA geplant. Eine solche Anwendung wird auch Telechirurgie genannt [24, 25, 26]. Besonders die Möglichkeiten der Telemedizin waren Motor der Entwicklung von Telemanipulatoren durch das US-amerikanische Militär. Ein Nachteil der endoskopischen Robotik besteht jedoch darin, dass bisher noch ohne Tastsinn und ohne natürliches Feedback operiert werden muss. Eine Rückkopplung der auf die Endeffektoren einwirkenden Kräfte ist jedoch technisch möglich [22, 23], aber für den täglichen Gebrauch noch in weiter Ferne. Solche Teleoperationen könnten in Zukunft durch einen künstlichen Tastsinn noch wirklichkeitsgetreuer durchgeführt werden.

Eine einfache Form des Master-Slave-Prinzips stellen Trägersysteme dar, die beispielsweise für die mechanische Führung von Endoskopen eingesetzt werden. Der meistverkaufte Manipulator überhaupt ist das AESOP-System (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning) von der bereits erwähnten Firma ComputerMotion (Goleta, USA). Der Roboterarm hat 7 Freiheitsgrade. Arm und Optik sind über einen Magnetkonnektor verbunden, der aus Sicherheitsgründen im Falle einer mechanischen Behinderung ausklinkt. Gesteuert wird AESOP über ein Spracheingabesystem. AESOP kann Bewegungen inkrementell (z. B. „up“, „down“) oder kontinuierlich (z. B. „move up“, „move down“) durchführen, wobei letztere mit dem Befehl „stop“ beendet werden müssen. Drei Optikpositionen können gespeichert (z. B. „save one“) und der Roboter mit

entsprechendem Befehl (z. B. „return one“) aus jeder beliebigen Position in die gespeicherte Position zurückgefahren werden. Ein weiteres Beispiel für ein Trägersystem ist FIPS, das fernsteuerbare Instrumenten- und Endoskop-Positionier-System des Forschungszentrums Karlsruhe und der Firma Karl Storz (Tuttlingen, Deutschland). Die präzise Steuerung von FIPS erfolgt über einen speziellen Joystick, der an ein Arbeitsinstrument angeclippt werden kann. Das System besitzt außerdem eine integrierte Liftingeinheit zum Anheben der Bauchdecke.

Heute besteht auch die Möglichkeit, das Operationsmikroskop mit Hilfe eines integrierten Manipulators über ein Navigationssystem zu steuern, d. h. das Mikroskop wird vom integrierten Manipulator, wie beispielsweise dem MKM-System der Firma Carl Zeiss, an die gewünschte Position geführt.

Robotersysteme

Bei der Entwicklung von Robotersystemen fand eine Entwicklung von proprietären Systemen bis zur Adaption von Industrierobotern statt [4]. Alle bekannten Systeme übernehmen im Verlauf der Operation nur einen begrenzten Teil der Aufgaben. Für diesen Vorgang sind diese Systeme frei programmierbar.

Obwohl der erste Einsatz eines Operationsroboters („Puma 560“) am Menschen 1991 eine transurethrale Prostataresektion war [7], liegt die Domäne der Operationsroboter heute in Fräsarbeiten an knöchernen Strukturen. Bei Weichteileingriffen kommt es stets zu unvorhersehbaren Veränderungen („tissue shift“). Nur im Skelettsystem wirken sich Fräsarbeiten des Roboters in berechenbarer Weise aus.

An einem präoperativ erhobenen CT-Bilddatensatz kann die Operationsplanung vorgenommen werden. Ein solches *Planungssystem*, beispielsweise Orthodoc® (Abb. 5b), liest die CT-Daten ein und stellt sie als 3D-Bilder auf dem Grafikmonitor dar. Neben einer konventionellen Darstellungsweise können die Knochendichten unter Ausblendung der Weichteilstrukturen farbig angezeigt werden. Auf dem Bildschirm kann jetzt beispielsweise eine Hüftendoprothese aus einer Implantatdatenbank („Computer-aided Design“, CAD) ausgewählt und positioniert werden.

Vor Beginn der Operation ist die Herstellung und Erhaltung eines räumlichen Bezugs zwischen Roboter, Patienten und virtuellen Planungsdaten erforderlich („Referenzierung“). Diese geschieht zum Beispiel durch das Vermessen von Markern mit einem robotergetragenen Instrument oder einem Positionsmesssystem. Diese Marker können kleine Knochenschrauben oder kleine Scheiben sein, die auf die Haut aufgeklebt werden. Seit kurzem können auch anatomische Landmarken genutzt werden, sodass die Notwendigkeit des Einsatzes von Knochenschrauben entfällt („pinless“-Verfahren) [2]. Hierbei werden intraoperativ 20–30 Punkte auf der Knochenoberfläche berührt und daraus ein Oberflächenmodell berechnet, das mit dem präoperativen Modell in räumliche Übereinstimmung gebracht wird.

Die Führung der Instrumente nach einem bei der Planung generierten

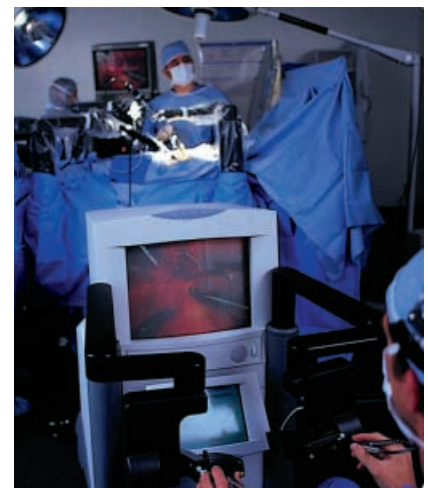


Abb.3 ▲ **ZEUS™: Im Vordergrund sitzt der Operateur an der Eingabekonsolle, im Hintergrund sind die Effektorarmlen zu sehen. (1999 Computer Motion. Foto: Bobbi Bennett)**

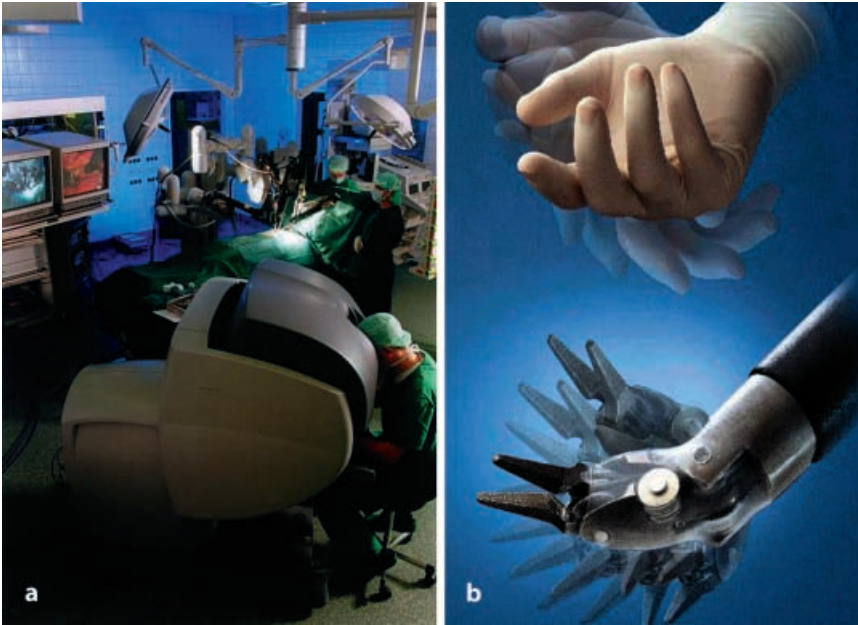


Abb. 4 ▲ a Einsatz des Manipulatorsystem da Vinci™ im Herzzentrum Leipzig. b Das dem menschlichen Handgelenk nachempfunde endoskopische Instrumente Endowrist™ erlaubt die Durchführung komplexer Aufgaben wie beispielsweise einer chirurgischen Naht. (Mit frdl. Genehmigung von Intuitive Surgical)

Computerprogramm oder nach einer virtuellen Anzeige des getrackten Instruments und der Planungsdaten relativ zum 3D-Bilddatensatz stellt den eigentlichen *Navigationsvorgang* dar. Verschiedene Navigationssysteme werden bereits in den operativen Fächern mit und ohne Roboter eingesetzt [35]. Innerhalb der HNO-Heilkunde liegt ihr Hauptanwendungsgebiet bisher in der Nasennebenhöhlenchirurgie, sie werden jedoch auch zunehmend an der lateralen Schädelbasis eingesetzt [9, 11, 12]. Ein Nachteil besteht jedoch heute noch darin, dass intraoperativ nicht zu erkennen ist, welcher Anteil der knöchernen Strukturen bereits entfernt wurde. Sobald intraoperativ ein Fehler auftritt, wie beispielsweise eine ungeplante Lageänderung des Patienten, wird die Navigation in der Regel abgebrochen, weil das Datenmaterial seine Integrität verliert und mit bisherigen Mitteln nur mit hohem Aufwand (intraoperatives MR/CT) aktualisiert werden kann. Neue Lösungen für dieses Problem, wie endoskopische 3D-Laserscanner (IPA) [30] und taktile Sensoren, die anhand der Resonanzfrequenz verschiedene Gewebe akkurat differenzieren können [22, 23], oder die intraoperative Bildgebung mittels 3D-Ultraschall, befinden sich in der Entwicklung.

ROBODOC®

Basierend auf dem Einsatz eines IBM-Roboters zum Hüftersatz bei Hunden [31] wurde am 07.11.1992 erstmals ein Knocheneingriff am Menschen mit einem Roboter durchgeführt. Es handelte

sich dabei um einen Roboter des japanischen Herstellers Sanko-Seiki, der von der Firma Integrated Surgical Systems (Davis, Kalifornien) unter dem Namen ROBODOC® (Abb. 5a, b) auf den Markt gebracht wurde [2]. Nach Herstellerangaben sind weltweit derzeit 40 ROBODOC®-Systeme im Einsatz und davon etwa 30 allein in Deutschland. Während das System in Deutschland bereits zugelassen ist, liegt die Genehmigung durch die US-amerikanische Zulassungsbehörde FDA für die USA noch nicht vor.

Bei der herkömmlichen Handausfräsung des Femurknochens sind Distanzen zwischen Knochen und Implantat von 1 mm regelhaft zu beobachten. Mit ROBODOC® kann dagegen ein optimaler Prothesen-Knochen-Kontakt von mehr als 90% erreicht werden, sodass daraus eine hohe mechanische Primär- und Sekundärstabilität durch Anwachsen des Knochens an die Prothese resultiert. Im Gegensatz zu 6–24% intraoperativen Frakturen bei der herkömmlichen manuellen Operationstechnik sind nach Herstellerangaben in über 6000 Fällen mit dem ROBODOC®-System noch keine intraoperativen Frakturen aufgetreten. Langzeitergebnisse stehen jedoch noch aus. Nach Beendigung des Fräsens wird der Roboter vom Operationstisch entfernt und die Prothese implantiert [18].

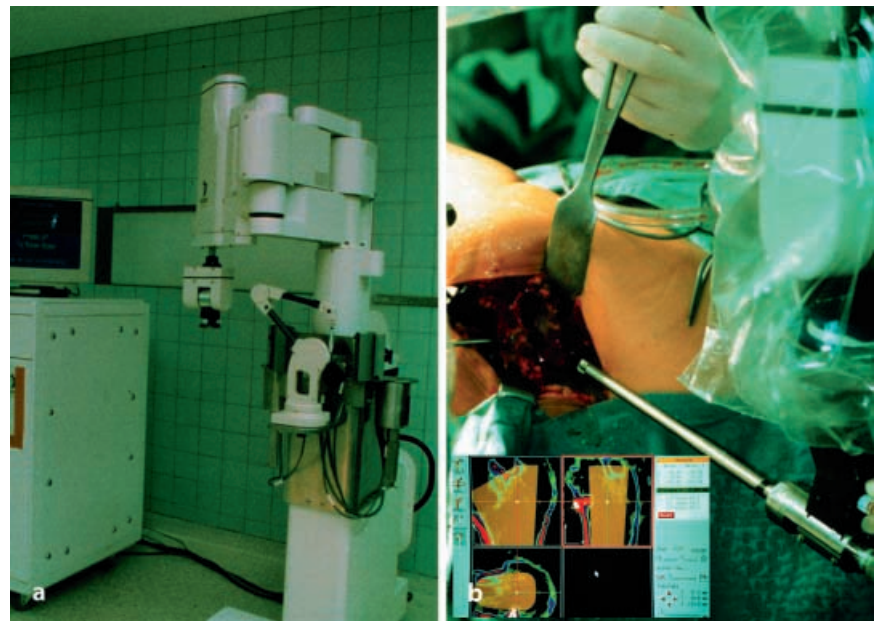


Abb. 5 ▲ a Operationsroboter ROBODOC® beim automatisierten Ausfräsen der Kavität für eine Hüftendoprothese. b Der Bildschirm des Planungssystems Orthodoc® ist im Insert gezeigt. (Mit frdl. Genehmigung von Integrated Surgical Systems)



Abb. 6 ▲ a Operationsroboter CASPAR®; b Demonstration der hochpräzisen Fräsung an einem rohen Ei; c Operationssitus bei einem Eingriff am Knie mit dem Bildschirm des Planungssystems als Insert. (Mit frdl. Genehmigung von ortoMaquet)

In Kürze sollen weitere klinische Anwendungen wie das Planen und Fräsen des Acetabulums, Umstellungsosteotomien und Knieendoprothesen möglich sein.

Computer Assisted Surgical Planning and Robotics (CASPAR®)

Das System CASPAR® (Abb. 6a–c) der Firma ortoMAQUET (Rastatt, Deutschland) basiert auf einem Stäubli-Industrieroboter. 40.000 Roboter dieser Art arbeiten auf der ganzen Welt – z. B. in der Chipfertigung. Der Roboter besitzt 6 Gelenke, die ihm die Freiheitsgrade des menschlichen Armes verleihen. Auch dieses System verfügt über eine eigene 3D-Planungsstation. Die Präzision der Planung liegt ebenfalls im Zehntel-

millimeterbereich. CASPAR® benutzt Markerschrauben, die vor dem Planungs-CT in Lokalanästhesie gesetzt werden. Die Genauigkeit für den Ersatz des vorderen Kreuzbandes liegen im Bereich von 0,5–0,8 mm [19]. Bereits umgesetzte klinische Anwendungen sind das Ausfräsen des Schaftlagers bei Hüftprothesenimplantation und der Ersatz des vorderen Kreuzbandes [19]. In der Planung befindliche Applikationen sind Knieendoprothesen, das Setzen von Pedikelschrauben, Schulterprothesenimplantation, Umstellungsosteotomien und Revisionen.

Hexapodroboter „Evolution 1“

„Evolution 1“ (Abb. 7b) ist ein in der Produktentwicklung befindlicher Hexapod-

roboter [34] der Firma URS (Universal Robot Systems, Parchim, Deutschland), einem Spin-off des Fraunhofer-IPA (Stuttgart). Die Parallelkinematik des Hexapod mit 6 Freiheitsgraden hat sich in der Industrie bei Anwendungen, bei denen es auf Steifigkeit, Traglast und Präzision ankommt, bewährt. Der Hexapod, auch Stewart-Plattform genannt, wurde ursprünglich für die Astronomie entwickelt. Der Hexapodroboter ist lediglich 50 cm hoch; er ist also wesentlich kleiner als andere Industrieroboter. Bei einer Traglast bis zu 25 kg wird dennoch eine Präzision unter 100 µm erreicht. Die Wiederholungsgenauigkeit liegt unter 10 µm. „Evolution 1“ wird auf einer mobilen, von Röntgengeräten abgeleiteten Knickarmkinematik vorpositioniert. Der eigentliche Arbeitsraum des Hexapod selbst beträgt 100 × 100 × 25 mm und 15° Rotation. Der Roboter ist außerdem um eine 7. angetriebene Achse erweitert (Hexapod Z®). An eine universelle Instrumentenschnittstelle können Knochenfräsen, Endoskope und Führungshülsen angeschlossen werden.

Die Zertifizierung nach dem Medizinproduktegesetz steht kurz bevor. Ein Prototyp (Abb. 7a) wurde bereits zur Neuroendoskopie mit Joysticksteuerung eingesetzt [33]. Als Besonderheit des Systems wurden Versuche über eine Rückkopplung der Endoskopbewegung auf ein Operationscockpit durchgeführt, das ebenfalls auf einem Hexapod installiert war [32]. Aktuell wird „Evolution 1“ zur Anwendung im Hüft- und Knieersatz entwickelt. Mit dem System wurden von unserer Arbeitsgruppe bereits Versuche zur roboterassistierten Mastoidektomie und Cochleaimplantation (Abb. 7c) durchgeführt, auf die weiter unten näher eingegangen wird.

OTTO

Im Surgical Robotics Lab der Charité wird ein geführtes Robotersystem OTTO auf der Basis des SurgiScope (DeeMed/ Elektra/joyumarie) erarbeitet, das bereits bei der Implantation von Kathetern zur Brachytherapie und der Implantation von Titanschrauben für die chirurgische Epithetik erprobt wurde [13, 14]. Dabei wird die eigentliche Bohrarbeit vom Chirurgen ausgeführt, der Roboter „merkt“ sich jedoch Position und Achse der Instrumente. Es handelt sich hierbei um ein Unterstüt-

zungssystem, das Operationsinstrumente trägt, leitet und bewegt, ohne eigenständig invasive Maßnahmen durchzuführen. Der Roboter kann z. B. den Bewegungsspielraum, der dem Chirurgen zur Verfügung steht, in gewünschter Weise einschränken.

NeuroMate

NeuroMate ist ein Robotersystem, das von der Firma Integrated Surgical Systems für die Neurochirurgie vertrieben wird. Das System besteht aus einem Roboterarm und einer PC-basierten Navigationseinheit und ermöglicht stereotaktische Eingriffe ohne den konventionellen Stereotaxierahmen. Durch die rahmenfreie Technik, bei der ein Instrumentenhalter mit der Biopsienadel in die vorgesehene Position relativ zum Schädel gebracht wird und der Vorschub der Sonde anschließend manuell erfolgt, sollen 90 min Operationszeit eingespart werden können. Das Produkt lässt sich problemlos an ein chirurgisches Planungssystem, wie beispielsweise VoXim, anschließen. Seit Juni 1999 liegt die Zulassung durch die FDA für die USA vor. Nach Herstellerangaben befinden sich 15 Systeme im Einsatz.

Medizinischer Nutzen von Manipulatoren und Robotern

Roboter bieten für die operative Medizin eine Reihe von Vorteilen: Sie zeichnen sich durch eine konstante Arbeitsleistung aus, ihr Verhalten ist unabhängig von mentalen Einflüssen reproduzierbar und protokollierbar, sie führen Bewegungen mit sehr hoher räumlicher und zeitlicher Präzision aus und können aus der Ferne bedient werden.

Daraus ergibt sich ein großes medizinisches Nutzungspotential für die operative Medizin.

Verbesserung der Qualität

Aufgrund der sehr hohen Präzision lässt sich beispielsweise die Femurkavität für Hüftprothesen von einem Roboter mit einer Passgenauigkeit von über 90% ausfräsen. Diese Eigenschaft kann auch für andere Implantate wie Cochleaimplantate oder implantierbare Hörgeräte ausgenutzt werden. Da der Roboter eine gleich bleibende Leistung erbringt, können Fehler während der Operation –

aber nicht während des Planungsvorgangs – vermieden werden.

Assistenzfunktionen

Eine konzentrationszehrende und ermüdende Tätigkeit, wie das Halten und Nachführen eines Endoskops, die oft in belastender Körperhaltung ausgeführt werden muss, kann von robotischen Systemen übernommen werden. Darüber hinaus wird eine unbeabsichtigte Rotation des Endoskops vermieden, die zu einem Abkippen des wahrgenommenen

Horizonts führen würde, sodass Orientierungsschwierigkeiten und Fehlpositionierungen resultieren können [17].

Manipulatorsysteme wären analog zur laparoskopischen Chirurgie theoretisch für endonasale Eingriffe im Nasennebenhöhlensystem denkbar. Zur Vermeidung einer Perforation der Schädelbasis durch Endoskop- oder Instrumentenführungssysteme ist aus Sicherheitsgründen eine multisensorische Rückkopplung (vibrotaktiler Sensor, Temperatur, Navigation etc.) erforderlich. Dennoch ist die endonasale Nasennebenhöh-

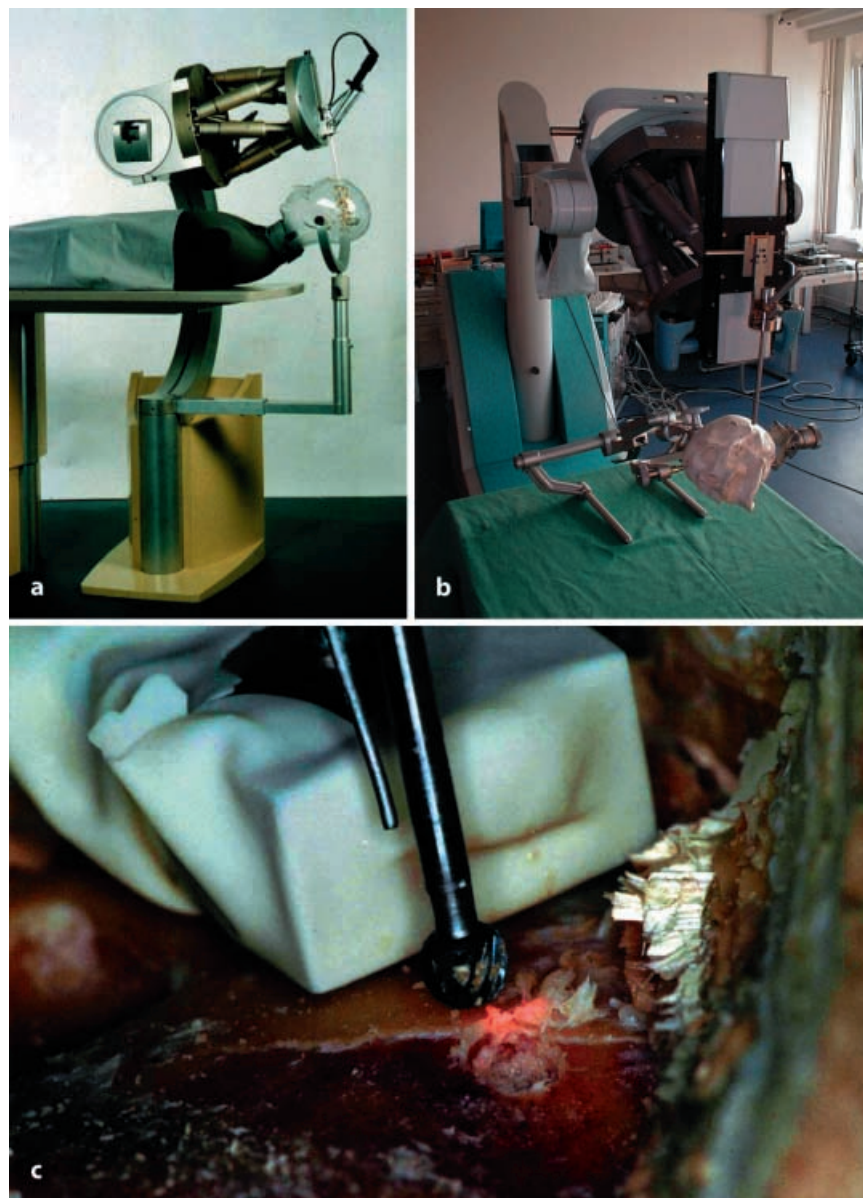


Abb. 7 ▲ a Der Prototyp des Hexapodroboters bei der Neuroendoskopie (mit frdl. Genehmigung des Fraunhofer-IPA, Stuttgart); b Experimente zum Einsatz des Prototyps „Evolution 1“ der Firma URS an der Schädelbasis (mit frdl. Genehmigung von URS); c Fräsversuche mit dem Hexapodroboter am menschlichen Felsenbein

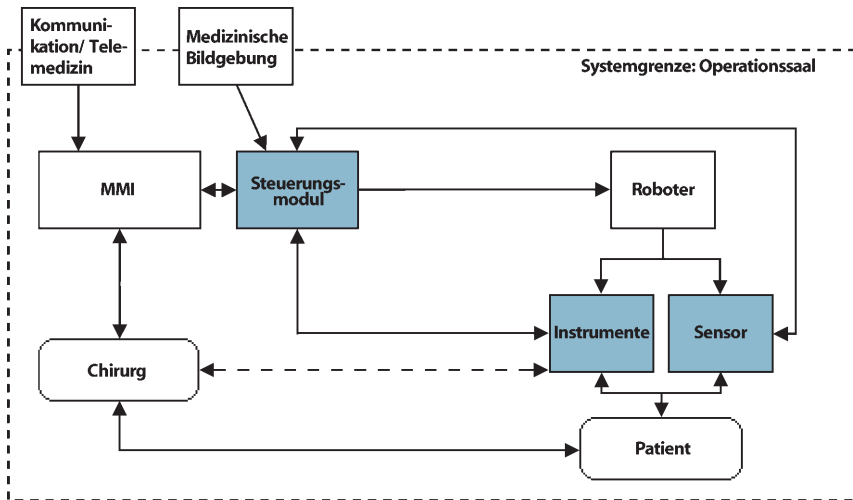


Abb. 8 ▲ Peripheriesysteme eines Roboters. MMI=Man Machine Interface (Schnittstelle)

lenoperation bei entsprechender Weiterentwicklung von steuerbaren Instrumenten [5, 21] und einer Sensorik, die online ein 3D-Scan der Nasenhöhle liefert, eine Vision zukünftiger robotergestützter minimal-invasiver Eingriffe.

An der Universität Bristol befindet sich ein Mikrobhrsystem für die Stapedotomie im Experimentierstadium [1, 3]. Das System misst ständig Drehmoment und Bohrvorschub, sodass aus diesen Daten der Durchbruch der Fußplatte detektiert werden kann. Gleichzeitig ist der Bohrvorschub begrenzt, um die Innenohrstrukturen nicht zu verletzen.

Durchführung von Operationen, die manuell nicht möglich sind

Bestimmte operative Eingriffe in Mikrostrukturen, wie zum Beispiel die Anlage eines Mikrosystems zur Applikation von Medikamenten oder Wachstumsfaktoren in das Innenohr, wären mit Roboterunterstützung denkbar. Analog könnten gezielt Stoffe oder einzelne Neurone an bestimmten Stellen in das Gehirn implantiert oder bestimmte Eingriffe an der Retina durchgeführt werden. Eine andere bestechende Möglichkeit wäre eine Raumforderung der Schädelbasis nicht über den üblichen, großen Zugangsweg, sondern minimal-invasiv endoskopisch über einen sehr kleinen, möglicherweise sogar gewundenen Bohrkanaal zu entfernen, der vom Roboter mit entsprechendem Navigationssystem nach vorheriger virtueller Operationsplanung und -simulation angelegt wird. Miniaturisierte autonome Robotersysteme

könnten Eingriffe im Gastrointestinaltrakt durchführen [8].

Reduktion der Operationszeit

Ein Anwendungsziel von Robotern in der operativen Medizin ist die Verkürzung von Operationszeiten und damit der Belastung des Patienten durch die schnellere Ausführung eines Operationsschrittes, wie beispielsweise dem Ausfräsen einer knöchernen Kavität. Leider benötigt das Setup des Systems heute noch eine gewisse Mehrzeit, sodass die gesamte Operationszeit bei einem Ersteingriff im gegenwärtigen Stadium verlängert wird. Der Zeitbedarf für den Systemaufbau kann jedoch im Sinne einer Lernkurve minimiert werden. Bei Revisionseingriffen ist die Operationszeit dagegen mit dem Roboter verkürzt [2]. Außerdem sind die technischen Möglichkeiten für eine schnellere Referenzierung der Robotersysteme, beispielsweise durch automatische oszillierende Laserabtastung, noch nicht ausgeschöpft.

Gesundheitsökonomische Aspekte

Prinzipiell ist durch den Robotereinsatz eine Einsparung von Ressourcen im Gesundheitssystem möglich. Beispielsweise ist durch die höhere Präzision der Femurkavität für eine Hüftendoprothese mit entsprechend besserem Sitz eine längere Lebensdauer der Prothese zu erwarten. Dementsprechend sollten sozioökonomisch einerseits geringere Ge-

samtkosten durch frühere Mobilisation, kürzere Hospitalisation und schnellere Wiedereingliederung in den Arbeitsprozess und andererseits weniger Folgekosten durch Prothesenlockerung und Nachoperation entstehen. Obwohl bereits bekannt ist, dass weniger intraoperative Femurfrakturen auftreten [2], stehen Langzeitergebnisse noch aus. Ebenso wäre über eine Senkung der Morbidität durch robotergestützte minimal-invasive Zugangswege in der Schädelbasischirurgie eine kürzere Hospitalisation und somit Einsparungen im Gesundheitssystem zu erreichen. Eine Reduktion der Operationszeiten könnte auch die Betriebskosten des Operationssaales senken.

Aufgrund der vielen unbekanntenen und teilweise nur schwer erfassbaren Parameter sind sozioökonomische Abschätzungen schwierig zu erstellen. Dem volkswirtschaftlichen Nutzen stehen die Anschaffungs- und Unterhaltungskosten des Roboters sowie der Personalaufwand zur Inbetriebnahme gegenüber. Ein weiterer Aspekt ist die Dokumentierbarkeit des Robotereinsatzes, die der vom Gesetzgeber geforderten Qualitätssicherung Rechnung trägt.

Technische Herausforderungen

Es ist unter dem technischen Gesichtspunkt kein Zufall, dass Roboteranwendungen in der HNO-Heilkunde bisher erst am Anfang stehen. Mit den Experimenten am Anatomischen Institut der Universitätsklinik Tübingen (Abb. 7c) konnte gezeigt werden, dass für eine große Zahl der für den Roboter bei diesem Eingriff anfallenden Aufgaben noch keine technischen Lösungen zur Verfügung stehen. Der Variantenreichtum des menschlichen Organismus erfordert eine integrierte Prozesssteuerung, die vom heutigen Standpunkt aus wesentlich komplexer ausgelegt werden muss als die von vergleichbaren industriellen Fertigungsanlagen. Abbildung 8 gibt einen Überblick über den Roboter und seine Peripherie. Bisher existieren keine adäquaten Lösungen für diese Aufgabenstellung, die jedoch die Voraussetzung für die Durchführung beispielsweise einer robotergestützten Cochlea-implantation oder auch von Schädelbasisoperationen sind. Von neuen Ansätzen aus dem Bereich der multimodalen Sensorik werden hier entscheidende Impulse erwartet.

Fazit für die Praxis

Der Einsatz von Robotern und Manipulatoren ist nicht nur über das Stadium der Vision hinausgewachsen, sondern der medizinische Erfolg dieser Technologie erscheint in greifbare Nähe gerückt. Allerdings ist der nächste Schritt mit weiterem Entwicklungsaufwand verbunden.

Literatur

1. Baker DA, Brett PN, Griffiths MV, Hughes G (2000) Safety assessment of a mechatronic tool for stapes surgery. In: Isermann R (ed) 1st IFAC-Conference on mechatronic systems. II. Darmstadt, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), pp 541–545.
2. Bargar WL, Bauer A, Börner M (1998) Primary and revision total hip replacement using the robodec system. *Clin Orthop* 354: 82–91
3. Brett PN, Fraser CA, Hennigan M, Griffiths MV, Kamel Y (1995) Automatic surgical tools for penetrating surgical tissues. *J IEEE EMBS* 14: 264–270
4. Buckingham RA, Buckingham RO (1995) Robots in operating theatres. *BMJ* 311: 1479–1482
5. Buess GF, Schurr MO, Fischer SC (2000) Robotics and allied technologies in endoscopic surgery. *Arch Surg* 135: 229–35
6. Cadeddu JA, Stoianovici D, Kavoussi LR (1997) Robotics in urologic surgery. *Urology* 49: 501–507
7. Davies B (2000) A review of robotics in surgery. *Proc Inst Mech Eng [H]* 214: 129–140
8. Goh PMY, Kok K (1997) Microrobotics in surgical practice. *Br J Surg* 84: 2–4
9. Gunkel AR, Freysinger W, Thumfart WF (2000) Experience with various 3-dimensional navigation systems in head and neck surgery. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg* 126: 390–395
10. Holler E (1999) Geräteentwicklung für roboter-assistierte Operationen. In: Schlag PM, Graszew G (Hrsg) *Tele- und computergestützte Chirurgie*. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio, S 138–153
11. Klimek L, Mösger R (1998) Computer-assistierte Chirurgie (CAS) in der HNO-Heilkunde. *Laryngorhinootologie* 77: 275–282
12. Lenarz T, Heermann R (1999) Image-guided and computer-aided surgery in otology and neurotology: is there already need for it? *Am J Otol* 20: 143–144
13. Lueth TC, Hein A, Albrecht J et al. (1998) A surgical robot system for maxillofacial surgery. *IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (IECON)*, Aachen, Germany, pp 2470–2475
14. Lueth T, Bier J (1999) Robot assisted interventions in surgery. In: Spetzger U, Stiehl HS, Gilsbach JM (eds) *Navigated brain surgery. Interdisciplinary views of neuronavigation from neurosurgeons and computer scientists*. Wiss.-Verl. Mainz, Aachen, S 219–229
15. Mohr FW, Onnasch JF, Falk V et al. (1999) The evolution of minimally invasive valve surgery – 2 year experience. *Eur J Cardiothorac Surg* 15: 233–238
16. Mohr FW, Falk V, Diegeler A, Autschback R (1999) Computer-enhanced coronary artery bypass surgery. *J Thorac Cardiovasc Surg* 117: 1212–1214
17. Olinger A, Hildebrandt U (2000) *Endoskopische Wirbelsäulen Chirurgie: thorakal, transperitoneal, retroperitoneal*. Springer, Berlin Heidelberg New York Tokio
18. Paul HA, Bargar DVM, Mittelstadt B et al. (1992) Development of a surgical robot for cementless total hip arthroplasty. *Clin Orthop Rel Res* 175/285: 57–66
19. Petermann J, Kober R, Heinze R, Frölich JJ, Heckt PF, Gotzen L (2000) Computer-assisted planning and robot-assisted surgery in anterior cruciate ligament reconstruction. *Op Tech Orthop* 10: 50–55
20. Plinkert PK, Schurr MO, Kunert W, Flemming E, Buess G (1996) Minimal-invasive HNO-Chirurgie (MI-HNO). *HNO* 44: 288–301
21. Plinkert PK, Löwenheim H (1997) Trends and perspectives in minimally invasive surgery in otorhinolaryngology, head and neck surgery. *Laryngoscope* 107: 1483–1489
22. Plinkert PK, Baumann I, Flemming E (1997) Ein taktiler Sensor zur Gewebedifferenzierung in der minimal-invasiven HNO-Chirurgie. *Laryngorhinootologie* 76: 543–549
23. Plinkert PK, Baumann I, Flemming E, Löwenheim H, Buess GF (1998) The use of a vibrotactile sensor as an artificial sense of touch for tissues of the head and neck. *Minim Invasive Ther All Technol* 7: 111–115
24. Plinkert PK, Plinkert B, Fuchs M, Zenner HP (2000) Telemedizin in der HNO-Heilkunde am Beispiel einer Videokonferenzübertragung Tübingen–Leipzig. *HNO* 48: 728–734
25. Plinkert PK, Plinkert B, Zenner HP (2000) Audio-visuelle Telekommunikation durch Multimedia-Technologien in der HNO-Heilkunde: ISDN – Internet – ATM. *HNO* 48: 809–815
26. Plinkert PK, Plinkert B, Zenner HP (2000) Telemedizin in der HNO-Heilkunde. *HNO* 48: 639–644
27. Plinkert B, Plinkert PK (2001) Robotics in skull base surgery. *CARS-Meeting 2001. International Congress series 24* (in press)
28. Reuter MA (1998) *Geschichte der Endoskopie. Handbuch und Atlas, Bd 1: Geschichte der Endoskopie in der Antike, im Mittelalter und im 19. Jahrhundert*. Schriftenreihe des Max-Nitze-Museum für Medizinische Endoskopie Max Nitze e.V. Stuttgart und der Internationalen Nitze-Leiter-Gesellschaft Wien, Stuttgart
29. Schraft RD, Müller E (1998) Roboter gestern, heute, morgen. In: Trageser H (Hrsg) *Spektrum der Wissenschaft. Dossier: Roboter erobern den Alltag*. Spektrum, Heidelberg, S 6–11
30. Stallkamp J, Hiller A (2000) Bedeutung von Peripheriesystemen für den medizinischen Robotereinsatz. In: *Neue Technologien für die Medizin. 2. Symposium*, Aachen, 2000. Shaker Verlag, Aachen, S 179–192
31. Taylor RH (1989) Robotic hip replacement surgery in dogs. *Proceedings of IEEE EMBS International Conference*, pp 887–889
32. Urban V, Wapler M, Neugebauer J, Hiller A, Stallkamp J, Weisener T (1998) Robot-assisted surgery system with kinesthetic feedback. *Comp Aid Surg* 3: 205–209
33. Urban V, Wapler M, Weisener T, Schönmayr R (1999) A tactile feedback hexapod operating robot for endoscopic procedures. *Neurosci Res* 21: 28–30
34. Wapler M, Binnenbose T, Braucker M, Durr M, Hiller A, Stallkamp J, Urban V (1998) Entwicklung eines modularen Robotersystems für die Mikrochirurgie. *Biomed Tech Berl* 43 (Suppl): 188–189
35. Wirtz CR, Kunze S (1998) Neuronavigation. *Computerassistierte Neurochirurgie. Dtsch Ärztebl* 95: A2384–A2390
36. Zykla-Menhorn V (2000) Wenn ein Roboterarm das Skalpell führt. *Dtsch Ärztebl* 97: B1580–B1583