

Ausarbeitung zum Überfachlichen Seminar
“Medizinische Informatik”

Thema:
"Robotik in der Medizin"

Wintersemester 2004/2005

Technische Universität München, Lehrstuhl Prof. Navab, Betreuer: Joerg Traub
und Dr. Stefan Burkhardt, bearbeitet von: Peter Cihak (cihak@in.tum.de)

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| 1. Einführung..... | 3 |
| 2. Mensch und Maschine..... | 4 |
| 3. Roboter..... | 4 |
| 3.1 Komponenten..... | 4 |
| 3.2 Sensoren und Programmierung | 6 |
| 3.3 Präzision und Wiederholgenauigkeit..... | 6 |
| 4. Sicherheit..... | 7 |
| 4.1 Klassifizierung von CAS-Systemen nach benötigter Sicherheit | 7 |
| 4.2 Sicherheitskonzepte für Roboter..... | 7 |
| 5. Intraoperative Navigationssysteme..... | 9 |
| 5.1 Grundlagen..... | 9 |
| 5.2 Klassifizierung der Navigatoren..... | 10 |
| 6. Robotersysteme in Praxis und Entwicklung..... | 12 |
| 6.1 ROBODOC..... | 12 |
| 6.1.1 Grundlagen..... | 12 |
| 6.1.2 Operationsverlauf..... | 14 |
| 6.1.3 Operationsergebnisse..... | 14 |
| 6.1.4 Probleme | 15 |
| 6.2 CASPAR..... | 15 |
| 6.2.1 Grundlagen..... | 15 |
| 6.2.2 Operationsablauf..... | 16 |
| 6.2.3 Vor- und Nachteile..... | 17 |
| 6.2.4 Vergleich mit konventionellen Operationen..... | 18 |
| 6.2.5 Weitere Einsatzmöglichkeiten..... | 19 |
| 6.3 CRIGOS..... | 20 |
| 6.3.1 Einleitung..... | 20 |
| 6.3.2 Operationsablauf | 20 |
| 6.3.3 Roboter | 21 |
| 6.4 Da Vinci System..... | 23 |
| 6.5 Precise needle placement | 24 |
| 7. Zusammenfassung..... | 25 |
| Literaturverzeichnis..... | 27 |

1. Einführung

Das RIA (Robot Institute of America) definiert einen Roboter als „ein programmierbares Mehrzweck-Handhabungsgerät für das Bewegen von Material, Werkstücken, Werkzeugen oder Spezialgeräten. Der frei programmierbare Bewegungsablauf macht ihn für verschiedenste Aufgaben einsetzbar.“ [7]. Eine dieser möglichen Aufgaben ist die Verwendung im medizinischen Umfeld, bei welcher der Roboter chirurgische Instrumente bewegt und an Operationen beteiligt ist.

Der Einsatz von Robotern in der Medizin ist ein sehr junges Forschungsgebiet. Mehrere Robotersysteme wurden oder werden verwendet und unterstützen Ärzte bei Operationen. Roboter können gegenüber einem Chirurgen verschiedene Vorteile haben (z. B. eine höhere Genauigkeit, bessere Sensorik) und ihn bei seiner Arbeit unterstützen oder Teile der Arbeit selbständig ausführen. In jüngster Zeit sind aber auch negative Berichte über Roboter erschienen, die zeigen, dass deren Einsatz Nachteile haben kann und für den Patienten manchmal schadhaft ist.

In dieser Ausarbeitung soll zunächst erklärt werden was ein Roboter ist, wie er aufgebaut ist und wie er funktioniert. Es wird näher auf die Sensorik von Robotern und auf deren Steuerung eingegangen. In diesem Zusammenhang werden auch Fachbegriffe aus der Robotik erklärt.

Da die heute im Einsatz befindlichen Systeme ursprünglich für die Industrie konzipiert wurden, werden Sicherheitsaspekte beim Gebrauch dieser Industrieroboter in der Medizin erörtert. Diese unterscheiden sich erheblich von den in der Industrie geforderten Sicherheitsvorkehrungen. Erhöhte Sicherheit beim Einsatz in der Medizin ist besonders wichtig, da sich Menschen im Arbeitsraum des Roboters befinden. Bei einer Fehlfunktion kann dieser den Patienten oder das Operations-Team gefährden. Es wird auch auf die Frage eingegangen, ob der Einsatz von Robotern in der Medizin überhaupt sinnvoll ist, ob die Vorteile die entstehenden Gefahren rechtfertigen.

Im Kapitel "Mensch und Maschine" wird die veränderte Rolle des Arztes beschrieben, der heute auch Techniker ist und komplizierte Geräte bedienen muss. Im Kapitel "Intraoperative Navigationssysteme" werden Systeme kategorisiert und beschrieben, die dem Arzt prä- und intraoperative Informationen liefern und ihn bei seiner Arbeit unterstützen.

Bei der Beschreibung zweier in der Praxis verwendeter Roboter-Systeme (ROBODOC und CASPAR) wird detailliert auf deren Verwendung und den Operationsablauf eingegangen. Auch die Probleme, die während des Einsatzes entstehen können sowie Folgeschäden beim Patienten werden erörtert.

Weiterhin wird ein neues Konzept für einen medizinischen Roboter vorgestellt (CRIGOS). Dieses System ist nicht von einem Industrieroboter abgeleitet sondern wurde speziell für medizinische Aufgaben konzipiert. Durch seinen geschlossenen kinematischen Aufbau hat er gegenüber Industrie-Robotern viele Vorteile und ist für den medizinischen Bereich besser geeignet. Anschließend werden ein Telemanipulationssystem (6.4 da Vinci) und die roboter-gestützte Tumorbehandlung (6.5 Precise needle placement) beschrieben.

Abschließend werden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und eine Prognose für die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet wird gegeben.

2. Mensch und Maschine

P. Rabischong [5] beschreibt eine Veränderung in der modernen Medizin die dazu führt, dass der Arzt immer mehr technische Geräte bei seiner Arbeit einsetzt. Während kranke Menschen früher nur mit Arzt und Pflegern in Berührung kamen, haben sie heute immer mehr Kontakt zu Maschinen. Menschen werden in Computertomographen "durchleuchtet", von medizinischen Robotern operiert und von Herzschrittmachern am Leben erhalten. Dieser immer größere Kontakt zur Maschine scheint dem Patienten viele Vorteile zu bringen.

Vor allem bei älteren Menschen kann man aber auch Angst vor technischen Geräten beobachten. Deswegen ist auch der persönliche Kontakt zwischen Patient und Arzt sehr wichtig. Ein Arzt darf nicht nur ein Techniker sein, der "seine Geräte" versteht und bedienen kann, sondern muss gleichzeitig ein Seelsorger für den Patienten sein. Letztendlich wird auch in Zukunft ein erkrankter Mensch behandelt von einem Arzt, auch wenn verschiedene Geräte diesen bei seinen Aktionen unterstützen.

Trotz einiger Vorteile, die Maschinen gegenüber dem Menschen haben, wird der Arzt benötigt, damit er die von den Maschinen ausgeführten Aktionen überwachen und bei Fehlern eingreifen kann. Dadurch entsteht auch die Frage, ob bei Problemen nach von Robotern ausgeführten Operationen der Roboter-Hersteller haftbar ist. Letztendlich muss der Arzt die Operation beaufsichtigen und trägt die Verantwortung für deren Verlauf und das Ergebnis.

3. Roboter

3.1 Komponenten

Der grundlegende Aufbau von Robotern, deren Sensorik und Kontrolle, werden in [3] erläutert. Roboter bestehen aus einer Steuereinheit und einem Manipulator (Roboterarm).

Dieser setzt sich zusammen aus einer Basis, den einzelnen Segmenten mit Gelenken, einem Antriebssystem, Sensoren innerhalb des Manipulators und einem Effektor. Mit Hilfe des Effektors interagiert der Roboter mit seiner Umwelt. Dabei kann es sich z. B. um einen Greifarm oder um spezialisierte Werkzeuge handeln, die am Flansch des Manipulators befestigt werden. Der Antrieb des Manipulators kann auf elektrischem, hydraulischem oder pneumatischem Wege erfolgen. Hydraulische Antriebe können jedoch nicht im medizinischen Umfeld verwendet werden, da sie laut und schmutzig sind (als hydraulische Flüssigkeit wird Öl verwendet). Heutzutage werden meistens elektrische Antriebe verwendet.

Die Anzahl der benötigten Segmente bzw. Gelenke hängt davon ab, ob Gegenstände im Raum nur positioniert oder auch orientiert werden sollen. Um einen Gegenstand an eine beliebige Stelle im Raum zu bewegen, reichen drei Gelenke aus (drei Freiheitsgrade). Damit dieser Gegenstand zusätzlich im Raum um alle drei Achsen rotiert werden kann, werden sechs Gelenke (sechs Freiheitsgrade) benötigt. Die in medizinischen Anwendungen verwendeten Roboter haben sechs Freiheitsgrade (Abb. 1).

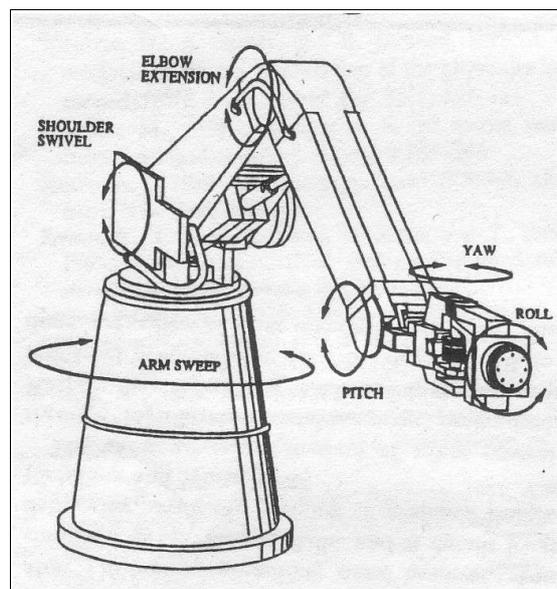


Abb. 1 Roboter mit sechs Freiheitsgraden

Unter dem Arbeitsraum (work envelope) eines Roboters versteht man den Bereich, den der Roboter mit seinem Effektor erreichen kann. Im Gegensatz zum industriellen Robotereinsatz, wo sich normalerweise keine Menschen im Arbeitsraum des Roboters befinden, kann es im medizinischen Einsatz zu Kollisionen zwischen dem Roboterarm und dem Krankenhauspersonal sowie dem Patienten kommen. Aus diesem Grund müssen

Industrieroboter modifiziert werden, damit sie den erhöhten Sicherheitsanforderungen gerecht werden.

3.2 Sensoren und Programmierung

Damit der Roboter mit seiner Umwelt interagieren und auf Veränderungen in dieser reagieren kann, werden verschiedene Sensoren benötigt. Um die aktuelle Position des Manipulators zu bestimmen und ihn steuern zu können, werden interne Sensoren verwendet, die Auskunft über die Position der Gelenke geben. Wichtig sind weitere externe Sensoren, die entweder am Manipulator angebracht werden oder sich über dem Arbeitsraum befinden. Diese können z. B. Kameras sein, deren Daten mit einer Bilderkennungssoftware ausgewertet werden. Ergebnisse dieser Auswertung führen zu neuen Steuersignalen an den Manipulator. Beim Einsatz eines Roboters in der Chirurgie können Kraft- und Drehmomentsensoren am Handgelenk des Manipulators Anwendung finden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass keine zu große Kraft auf den Patienten ausgeübt wird.

Zur Steuerung eines Roboters gibt es verschiedene Möglichkeiten. Bei der "manuellen" Kontrolle wird der Manipulator mit einem "Teach Pendant" (einer Art Fernsteuerung) in die gewünschte Position gebracht. Der Roboter speichert die gelehrt Positionen und spielt sie später ab. In der offline Programmierung werden Bewegungsabläufe des Roboters durch eine spezielle Programmiersprache beschrieben. Mit einem grafischen Simulator können diese Abläufe getestet und anschließend vom Roboter ausgeführt werden. Die fortschrittlichste Art der Roboterprogrammierung ist, eine auszuführende Aufgabe in natürlicher Sprache zu beschreiben. Diese wird dann vom Roboter in Bewegungen umgesetzt (task-level Kontrolle).

3.3 Präzision und Wiederholgenauigkeit

Zwei Begriffe, die in Zusammenhang mit der Genauigkeit von Bewegungen des Manipulators stehen, sind Präzision und Wiederholgenauigkeit. Präzision bedeutet, in welchem Maß die erreichte Position des Effektors von der gewünschten Position abweicht. Wiederholgenauigkeit ist die Abweichung zwischen einer bestimmten Position des Effektors und dem erneuten Anfahren dieser Position. Die Präzision ist im Regelfall deutlich schlechter als die Wiederholgenauigkeit. Durch eine Kalibrierung (Abgleich zwischen dem virtuellen Koordinatensystem des Roboters und den realen Koordinaten) kann eine höhere Präzision erreicht werden, was im medizinischen Umfeld sehr wichtig ist.

4. Sicherheit

Da der Einsatz von computerunterstützten Geräten im medizinischen Bereich ein sehr junges Forschungsfeld ist, sollte man sich auch verstärkt mit Sicherheitsfragen und Sicherheitsanforderungen beschäftigen. Medizinische Roboter arbeiten nicht isoliert von ihrer Umwelt sondern haben Kontakt zu Menschen (Ärzte, Helfer und Patienten). Deswegen müssen solche Roboter erhöhten Sicherheitsanforderungen gerecht werden. Auf der anderen Seite müssen sie bezahlbar bleiben, um sich auf dem Markt zu behaupten. Hohe Sicherheit ist jedoch mit erhöhten Kosten verbunden. Ein Kompromiss zwischen Kosten und Sicherheit muss gefunden werden.

4.1 Klassifizierung von CAS-Systemen nach benötigter Sicherheit

Computerunterstützte Systeme, die einem Arzt bei seiner Arbeit helfen, werden eingesetzt, um ihn mit Informationen zu versorgen und seine Fähigkeiten zu verbessern (z. B. höhere Präzision). Allerdings verliert der Arzt dabei einen Teil der Kontrolle über den Verlauf der medizinischen Aktion.

CAS-Systeme (computer-assisted surgery) können eingeteilt werden nach dem Umfang der Kontrolle, die dem Arzt verbleibt [3, S. 283-284]. Das Feld reicht von Geräten, die den Chirurgen präoperativ mit Daten zum Operationsvorgang versorgen, bis zu aktiven Robotern, die selbständig Gewebe und Knochen entfernen. Beim Einsatz von aktiven Robotern ist es wichtig, dass der Chirurg die Operation mitverfolgen und beim Auftreten eines Fehlers eingreifen kann. Die Sicherheitsvorkehrungen müssen hier besonders hoch sein.

Eine weitere Möglichkeit der Einteilung von Geräten in der CAS ist der Grad des Kontaktes zwischen Effektor und Patient [3, S. 292]. Dieser reicht von einer Konfiguration, in der der Patient sich nicht innerhalb des Arbeitsraums des Roboters befindet (z. B. Füttern von gelähmten Patienten), bis zu einer Konfiguration, in der der Patient sich vollständig innerhalb des Arbeitsraums befindet. Hier müssen zunehmende Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, wie z. B. eine niedrige Arbeitsgeschwindigkeit des Roboters und eine sensorische Kontrolle der auf den Patienten ausgeübten Kräfte.

4.2 Sicherheitskonzepte für Roboter

Da es bei Robotern keine absolute Sicherheit geben kann, wird bei deren Einsatz immer ein Risiko in Kauf genommen. Es stellt sich die Frage, wodurch dieses Risiko gerechtfertigt

werden kann. Es sind Einsatzgebiete für Roboter vorstellbar (z. B. in der Neurochirurgie), in denen die Präzision eines Roboters die Genauigkeit des Chirurgen weit übersteigt. Dadurch nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass der Patient den Eingriff überlebt, zu. In solchen Situationen ist der Robotereinsatz sicherlich zu befürworten [3, S. 288]. Bei den meisten heutigen Anwendungsgebieten für Roboter liegen allerdings keine lebensbedrohlichen Situationen vor. Ein Arzt kann diese Eingriffe ebenfalls vornehmen.

Bis heute fehlen Sicherheitsrichtlinien, in welchen genau definiert wird, wie sicher ein Roboter sein muss. Dies führt zu einer verlangsamten Entwicklung von medizinischen Robotern. Unternehmen scheuen sich davor in diesem Bereich Produkte zu entwickeln, solange Sicherheitsanforderungen und die Haftungssituation nicht klar definiert sind.

Eine Möglichkeit wäre zu fordern, dass der Einsatz eines medizinischen Roboters sicherer sein muss, als wenn die Arbeit von einem Chirurgen durchgeführt würde. Dieser Ansatz scheitert allerdings daran, dass es oftmals schwer ist, Statistiken über die Komplikationsrate von Operationen zu bekommen. Statistiken über die Sicherheit von Robotern fehlen bei neuen Systemen völlig.

Es gibt beim Einsatz von Robotern in der Medizin aber verschiedene Konzepte, um die Sicherheit des Patienten und medizinischen Personals zu erhöhen [3, S. 284 ff.]. Damit der durch einen Fehler verursachte Schaden klein bleibt, ist die Arbeitsgeschwindigkeit bei medizinischen Robotern oft sehr niedrig. Zusätzlich können nach einer Bewegung Wartepausen eingebaut werden, damit der Arzt bei Problemen eingreifen kann. Die komplexen Bewegungen des Manipulators können in eine serielle Abfolge von einfachen Bewegungen umgesetzt werden, damit der von einer Bewegung betroffene Raum möglichst klein bleibt.

Ein Konzept, das unter anderem beim CASPAR-System (siehe Kapitel 6.2) eingesetzt wird, ist ein sogenannter Totmannknopf (dead-man switch). Diesen Knopf muss der Chirurg drücken, solange der Operationsroboter sich bewegen soll. Wird der Knopf losgelassen, schaltet der Roboter sich ab.

Um die Sicherheit bei der Robotersteuerung zu erhöhen, können redundante Systeme verwendet werden. Dabei werden die Sensoren des Roboters und die Steuerungssoftware redundant eingesetzt, um Fehlfunktionen zu erkennen. Dies führt jedoch zu deutlich erhöhten Kosten des Roboters.

Um zu verhindern, dass ein Roboter zu hohe Kraft auf einen Patienten ausübt, können mechanische Sicherungen und Kraft/Drehmoment-Sensoren verwendet werden. Die

Sicherheit des Patienten wird weiterhin erhöht durch die Definition von “no-go areas”. Dies sind Bereiche (z. B. der Kopf des Patienten), in denen der Manipulator sich nur sehr langsam oder gar nicht bewegen darf.

Wenn es bei einem medizinischen Roboter zu einer Fehlfunktion kommt, kann gewöhnlicherweise der Roboter abgebaut und die Operation vom Chirurgen beendet werden. Deswegen ist es wichtig, dass der Roboter sich nach einer Fehlfunktion kontrolliert abschaltet. Darüberhinaus muss durch Bremsen sichergestellt werden, dass der Roboter bei einem Stromausfall nicht auf den Patienten oder das Personal fällt.

5. Intraoperative Navigationssysteme

5.1 Grundlagen

Die moderne Medizin bietet viele Möglichkeiten, 2- und 3-dimensionale Bilder eines Patienten mit hoher Genauigkeit zu erstellen (z. B. mit Röntgen, CT oder MRI). Diese Daten können unter anderem verwendet werden bei der Planung von operativen Eingriffen. Während der Operation sind die Möglichkeiten, solche Aufnahmen zu machen, jedoch sehr eingeschränkt. Die einzige Möglichkeit ist die Verwendung eines Fluoroskops, mit welchem Röntgenstrahlen sichtbar gemacht werden können. Man versucht zur Zeit aber, die Computertomographie und MRI auch intraoperativ zugänglich zu machen, was allerdings mit Nachteilen, wie einem stark eingeschränkten Operationsbereich, verbunden ist. Um auf Informationen über diese nicht direkt einsehbaren Bereiche des Patienten nicht verzichten zu müssen, werden intraoperative Navigationssysteme verwendet [2].

Es wird hier unterschieden zwischen dem therapeutischen und dem virtuellen Objekt. Das therapeutische Objekt ist der Bereich, in welchem eine medizinische Aktion durchgeführt wird (z. B. ein Tumor oder ein Gelenk). Das virtuelle Objekt ist ein Abbild dieses Bereichs (z. B. die Daten aus einem CT die am Computermonitor sichtbar sind). Aufgabe des Navigationssystems ist, chirurgische Aktionen am therapeutischen Objekt ins virtuelle Objekt zu übertragen. Dazu wird ein Navigator verwendet, der ein Koordinatensystem definiert und die Koordinaten des therapeutischen Objekts, des virtuellen Objekts, sowie die Position von chirurgischen Instrumenten im therapeutischen Objekt abgleicht.

Um ein intraoperatives Navigationssystem nutzen zu können, müssen die chirurgischen Instrumente zunächst kalibriert werden (Referenzpunkte werden gesetzt, damit deren Geometrie im Koordinatensystem des Navigators beschrieben wird).

Bei der Registrierung (auch Matching genannt) werden die Koordinaten des therapeutischen Objekts mit denen des virtuellen Objekts in Übereinstimmung gebracht. Dazu können anatomische Merkmale verwendet werden wie Endpunkte von Knochen. Sind nicht ausreichend viele anatomische Punkte verfügbar, können vor dem CT/MRI-Scan Schrauben in den betroffenen Körperbereich implantiert werden, damit deren reelle Koordinaten dann mit deren Koordinaten in den Bilddaten in Übereinstimmung gebracht werden können. Bei der Registrierung geht es letztendlich darum zu bestimmen, welcher Punkt im therapeutischen Objekt welchem Punkt im virtuellen Objekt entspricht.

Bei der Referenzierung wird darauf geachtet, dass die Beziehung zwischen therapeutischem und virtuellem Objekt gleich bleibt. Bei der statischen Referenzierung wird eine feste Verbindung zwischen Patient und dem Navigator hergestellt. In der dynamischen Referenzierung wird ein Navigator verwendet, der berührungslos die Position des therapeutischen Objekts bestimmen kann.

Das erste in der Literatur beschriebene intraoperative Navigationssystem basierte auf statischer Referenzierung. Schon 1906 wurde der stereotaktische Rahmen erwähnt.

5.2 Klassifizierung der Navigatoren

Die verwendeten Navigatoren können in verschiedene Klassen eingeteilt werden. Passive Navigatoren liefern dem Arzt Informationen über die Position seiner Instrumente. Diese kann dann im virtuellen Objekt angezeigt werden. Eine Möglichkeit der Realisierung sind zwei Vielgelenkarme, die mit dem Patienten bzw. dem chirurgischen Instrument verbunden sind (statische Referenzierung). Diese feste Verbindung ist jedoch unpraktisch und wird nicht eingesetzt. Heutzutage werden berührungslose Navigatoren verwendet. Diese können akustisch, magnetisch oder optisch arbeiten.

Bei den akustischen Systemen werden mehrere Lautsprecher im Operationssaal angebracht. Diese senden Schallwellen mit verschiedenen Frequenzen aus. An den chirurgischen Instrumenten sind je 3 Mikrophone angebracht. Diese fangen die Schallwellen auf und aus dem Laufzeitunterschied kann die Lage und Orientierung der Instrumente bestimmt werden. Der Nachteil ist, dass Schallwellen leicht durch Gegenstände abgelenkt oder reflektiert werden können.

Bei magnetischen Systemen erzeugt ein Generator ein homogenes Magnetfeld. Sensoren an den Instrumenten können ihre Lage in diesem Magnetfeld bestimmen. Diese Systeme sind

günstig und es wird kein Sichtkontakt zwischen dem Generator und den Instrumenten benötigt. Metallische Gegenstände beeinflussen allerdings die Homogenität des Magnetfeldes und es kommt zu einer Verschlechterung der Messgenauigkeit.

Aufgrund dieser Nachteile werden heute meistens optische Systeme verwendet. Um die Position und Ausrichtung eines chirurgischen Instruments im Raum zu bestimmen, werden 3 Lichtquellen (aktiv) oder Reflektoren (passiv) auf dem Instrument benötigt. Das von den Instrumenten ausgestrahlte bzw. reflektierte Licht wird von Kameras aufgefangen und dadurch wird die Position der Instrumente bestimmt. Optische Systeme zeichnen sich durch eine hohe Messgeschwindigkeit und Genauigkeit aus. Allerdings ist der Anschaffungspreis höher als bei anderen Systemen. Passive Navigatoren werden unter anderem im HNO-Bereich, der Neurochirurgie und der orthopädischen Chirurgie verwendet.



Abb. 2 Stereotaktischer Rahmen

Bei den semi-aktiven Navigatoren führt der Arzt zwar die chirurgische Aktion aus, sein Handlungsspielraum wird aber durch den Navigator eingeschränkt. Der stereotaktische Rahmen (Abb. 2) ist ein Beispiel für diese Klasse von Navigatoren. Er wird mit mehreren Schrauben fest am Kopf des Patienten angebracht und ermöglicht es dem Arzt, an einer bestimmten Stelle im Gehirn eine Gewebeprobe zu entnehmen. Andere semiaktive Systeme finden z. B. in der Knieorthopädie Anwendung. Eine dritte Kategorie bilden die aktiven Navigatoren. Diese ermöglichen nicht nur die Visualisierung der chirurgischen Instrumente, sondern führen auch die chirurgischen Aktionen durch. ROBODOC und CASPAR gehören zu dieser Klasse. Die Registrierung bei diesen Systemen erfolgt zur Zeit durch Metallpins, die an

der zu operierenden Stelle implantiert werden. Es wird über den Einsatz von aktiven Navigatoren in der Laparoskopie (Bauchspiegelung), Neurochirurgie, Prostataktomie und in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie nachgedacht.

6. Robotersysteme in Praxis und Entwicklung

Bis heute haben es nur zwei Roboter in den regulären Einsatz im Krankenhaus geschafft. Beide Systeme (ROBODOC und CASPAR) werden bei der Implantierung von künstlichen Hüftgelenken (Abb. 3) verwendet.



Abb. 3 Aufnahme eines künstlichen Hüftgelenks

Dabei muss ein Hohlraum in den Femur (Oberschenkelknochen) gebohrt werden, in welchen die Hüftprothese eingesetzt wird. Für diese Aufgaben können Roboter verwendet werden, da sie diesen Hohlraum mit höherer Genauigkeit erzeugen können als ein Chirurg. Dadurch ist der Kontakt zwischen Knochen und Prothese besser und das künstliche Hüftgelenk ist stabiler und kann sofort belastet werden. Nach Operationen mit ROBODOC gab es allerdings so viele Folgeprobleme, dass dieses System heute nicht mehr in Einsatz ist.

6.1 ROBODOC

6.1.1 Grundlagen

Der ROBODOC Roboter [4, 6] (Abb. 4) ist ein modifizierter Industrieroboter. Er führt eine

zementfreie Einsetzung des Implantats in den Femur durch. Früher versuchte man, künstliche Hüftgelenke ohne den Einsatz von Zement im Oberschenkelknochen zu befestigen. Dies führte jedoch zu Problemen und erst nachdem man begann, Zement zu verwenden, wurde die THR (Total Hip Replacement) vermehrt und erfolgreich von Chirurgen durchgeführt. Der Hauptvorteil beim Einsatz von Zement ist, dass Lücken zwischen der Prothese und dem Knochen vom Zement gefüllt werden. Der Hohlraum für die Prothese muss deswegen nicht so exakt gebohrt werden. Zum anderen ist der Sitz der Prothese stabil, sobald der Zement erhärtet ist und das Bein kann sofort belastet werden.

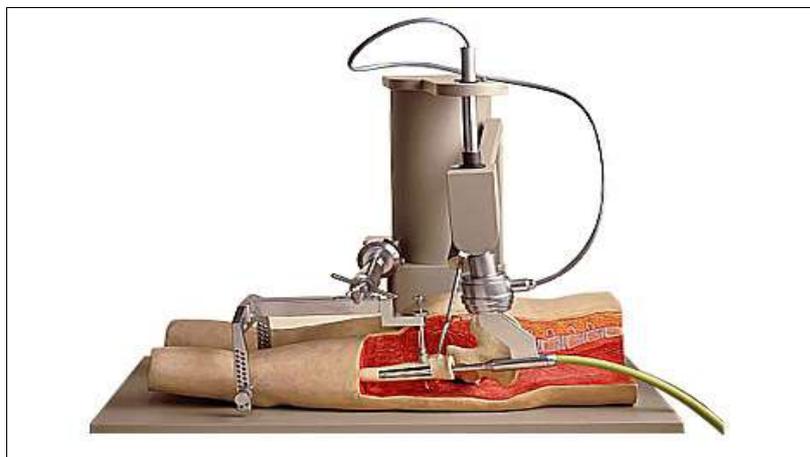


Abb. 4 ROBODOC während einer Operation

Es ergeben sich aber auch Nachteile durch diese Methode. Zum einen hat der Zement eine andere Elastizität als der Knochen bzw. die Metallprothese, was zu Spannungen an dieser Stelle führen kann. Zum anderen muss, falls die Prothese sich lockert und neu angebracht wird, der gesamte Zement aus dem Femur wieder entfernt werden. Dies ist sehr aufwendig. Der Einsatz einer Hüftprothese in den Oberschenkelknochen ohne die Verwendung von Zement wäre also vorteilhaft. Da ein Chirurg allerdings den Hohlraum in den Knochen nicht so exakt fräsen kann, dass die Prothese ohne Zwischenräume direkt am Knochen anliegt, ist dies schwer möglich. Versuche, einen möglichst guten Kontakt zwischen Prothese und Knochen herzustellen, führten oft zu Brüchen des Oberschenkelknochens. Mit Hilfe eines Operationsroboters - ROBODOC - wurde versucht, diese Problematik zu lösen. ROBODOC wurde unter anderem an der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik in Frankfurt am Main seit 1994 eingesetzt. Bis Anfang 1998 wurden über 1000 Operationen durchgeführt. ROBODOC besteht aus einer Planungs-Software (ORTHODOC), einem Operations-Roboter, der einen Hohlraum für die Hüftprothese in den Femur fräsen kann, sowie einer Steuereinheit

für den Roboter.

6.1.2 Operationsverlauf

Für den Einsatz von ROBODOC werden Daten eines CT-Scans des Femurs benötigt. Damit eine Registrierung durchgeführt werden kann, müssen zuvor drei Metallpins am Knochen angebracht werden. Während des CT-Scans werden Bewegungen des Oberschenkels erkannt. Falls sich der Oberschenkel um mehr als einen Millimeter bewegt wird der Scan erneut durchgeführt, da die gewonnenen Daten für ROBODOC unbrauchbar wären. Die CT-Bilddaten werden von der ORTHODOC-Software verwendet, um den Operationsverlauf zu planen. ORTHODOC berechnet aus den CT-Daten ein Bild des Oberschenkelknochens. Anschließend kann der Chirurg aus einer Prothesen-Bibliothek eine Prothese aussuchen und sie am Computer im Knochen platzieren. Hat er die richtige Prothesengröße und Position bestimmt, ist die Planung beendet und die Daten werden auf den Kontroll-Computer von ROBODOC überspielt.

Die eigentliche Operation beginnt mit dem Freilegen des Hüftgelenks durch den Chirurgen, dem Entfernen des Oberschenkelkopfes sowie dem Anbringen der künstlichen Hüftgelenkpfanne. Anschließend wird eine feste Verbindung zwischen dem Bein des Patienten und dem Roboter hergestellt. Die Messspitze des Roboterarms wird an die Metallschrauben gebracht damit der Roboter eine Registrierung durchführen kann. Nach erfolgreichem Abgleich zwischen der Position der Metallpins und den CT-Daten kann das Fräsen des Hohlraums für die Prothese beginnen. Dieser Vorgang dauert zwischen 20 und 40 Minuten. Danach passt die Prothese exakt in den Femur und kann vom Chirurgen eingesetzt werden.

6.1.3 Operationsergebnisse

ROBODOC sollte im August 1994 zum ersten mal zum Einsatz kommen. Die ersten beiden geplanten Operationen konnten aber nicht durchgeführt werden, da der verwendete Computertomograph falsche Daten lieferte. Nachdem ein neuer Computertomograph angeschafft wurde, wurden bis 1998 über 1000 Operationen mit ROBODOC durchgeführt. Ausnahmslos konnte die Prothese nach dem Fräsen der Höhle problemlos eingesetzt werden. Während des Fräsens kam es zu keinen Frakturen des Femurs. Die Zeitdauer der Operationen sank von Anfangs 3 Stunden auf 2,25 Stunden. Konventionelle Operationen dauern durchschnittlich 1,25 Stunden. Nebenwirkungen wie Thrombosen und Embolien traten nicht

durch den Einsatz von ROBODOC, sondern durch das Anbringen der Hüftpfanne auf. Die Komplikationsrate war insgesamt niedriger als bei konventionellen Operationen. Das Hüftgelenk konnte im Gegensatz zu herkömmlichen Operationen sofort belastet werden. Bei diesen beginnt man erst nach 8-10 Wochen mit einer Gewichtsbelastung. Die Position des künstlichen Hüftgelenks nach der Operation war in allen Fällen identisch mit der am Computer geplanten idealen Lage.

Bei einer Langzeitstudie wurden Aufnahmen des Implantats direkt nach der Operation verglichen mit Aufnahmen, die ungefähr 300 Tage später aufgenommen wurden [4]. Es stellte sich heraus, dass die Lage des Implantats sich innerhalb diesen Zeitraums kaum veränderte und immer noch annähernd mit der am Computer geplanten Position übereinstimmte.

6.1.4 Probleme

Beim Einsatz von ROBODOC kam es aber auch häufig zu Problemen [8]. Das System wurde in den USA entwickelt und während einer Testphase wurden in drei Krankenhäusern Operationen durchgeführt. Wegen einer zu hohen Komplikationsrate bei den Patienten bekam ROBODOC in den USA keine Zulassung. In Deutschland hingegen wurde eine Zulassung erteilt und bis 2004 wurden ungefähr 12.000 Operationen mit ROBODOC durchgeführt. Inzwischen haben sich über 400 Patienten mit Schäden nach der Operation in einer Initiative zusammengeschlossen. Laut dem Rothenburger Chefarzt Wolfgang Bullmann ist die Komplikationsrate bei ROBODOC genauso hoch wie die bei konventionellen Operationen (1-3 Prozent). Rechtsanwalt Jochen Grund, der heute 300 durch die Operation geschädigte Patienten vertritt, behauptet, dass ungefähr 20 Prozent der anfänglichen Operationen problematisch verliefen und viele Patienten heute Muskel- und Nervenschäden haben. Ein Gutachten des Medizinischen Dienstes der Krankenkassen sagt, dass die Operation mit ROBODOC keine Vorteile gegenüber Operationen ohne Roboter aufweist und dass es sogar zu einer Zunahme von postoperativen Komplikationen kommt. Seit Mitte April 2004 ist ROBODOC deutschlandweit nicht mehr im Einsatz.

6.2 CASPAR

6.2.1 Grundlagen

Das CASPAR-System [2] (Computer Assisted Surgical Planning And Robotics) ist ein in Europa entwickelter Operationsroboter (Abb. 5).

Er kann in der Knochen- und Gelenkchirurgie verwendet werden und wird seit 1997 in der Abteilung für Unfallchirurgie der Universitätsklinik Erlangen-Nürnberg eingesetzt. Zunächst wurde CASPAR bei Hüftschaffimplantationen eingesetzt. Seit April 1999 wird das System auch beim Kreuzbandersatz verwendet. Weitere Einsatzmöglichkeiten, wie z. B. in der Schulterprothetik, sind vorstellbar.



Abb. 5 CASPAR Operationsroboter

Als Vorteile von CASPAR werden besserer Kontakt zwischen Knochen und Implantat (> 90 Prozent), eine Vermeidung von Achsabweichungen und Torsionsfehlern, sowie eine geringere Komplikationsrate und schnellere Heilung genannt. Nachteile sind höhere Kosten für die Operation, ein höherer Zeitaufwand während der Operation (bei regulärem Implantatlager), sowie ein höherer Schulungs- und Planungsaufwand.

6.2.2 Operationsablauf

Vorab müssen Referenzpins (Schrauben) an dem zu operierenden Gelenk befestigt werden. Sie werden während der Operation vom Roboter zur exakten Lageerkennung benötigt. Bei einer Hüft-TEP (Totalendoprothese) werden zwei Pins benötigt, die entweder einige Tage vor der Operation oder am Operationstag eingesetzt werden können. Für das Anbringen dieser Pins werden ungefähr 20 Minuten benötigt. Anschließend wird ein CT des zu operierenden Bereichs durchgeführt.

Die Operationsplanung wird von einem Computersystem (PROTON) durchgeführt. Zunächst

wird vom Chirurgen ein passendes Implantat aus einer Datenbank ausgesucht und virtuell innerhalb der CT-Bilder eingesetzt. Danach kann PROTON eine Schätzung über den zu erwartenden langfristigen Operationserfolg abgeben. Dabei wird bewertet, wie gut der Kontakt zwischen Knochen und Implantat voraussichtlich sein wird. Im nächsten Schritt berechnet PROTON aus den eingegebenen Daten die Fräsebahn (Hüft-TEP) oder Bohrlochplatzierung (Kreuzbandersatz). Die Planung einer Operation mit PROTON dauert 15-20 Minuten.

Nachdem die errechneten Daten auf den Roboter überspielt wurden, wird das zu operierende Gelenk vom Chirurgen freigelegt. Der CASPAR Roboter wird fest mit dem Oberschenkelknochen des Patienten verbunden. Anschließend wird eine Messspitze, die Teil des CASPAR-Roboters ist, an die Referenzpins gebracht, damit eine Positionsbestimmung durchgeführt werden kann. Im nächsten Schritt wird diese Messspitze durch das jeweils benötigte chirurgische Instrument (z. B. Fräse oder Bohrer) ersetzt und die Operation kann beginnen.

Mit der Fräse wird der Knochen in konzentrischen Kreisen bearbeitet bis die Prothese passt. Dieser Vorgang wird vom Chirurgen optisch kontrolliert und kann von ihm jederzeit abgebrochen werden. Der Chirurg hält einen sogenannten "Totmannknopf" gedrückt. Wird dieser losgelassen, wird die Operation sofort unterbrochen. Durch einen Sensor am Roboterarm wird verhindert, dass die Fräse einen zu starken Druck auf den Knochen ausübt und sich dadurch das Fräseblatt verbiegt bzw. die Temperatur des bearbeiteten Knochens auf über 40 Grad steigt. Der Fräsevorgang dauert je nach Prothesengröße 11-14 Minuten. Anschließend kann die Prothese eingesetzt und die Operationsstelle verschlossen werden.

6.2.3 Vor- und Nachteile

Der Vorteil von CASPAR ist die hohe Genauigkeit, die beim Fräsen des Prothesenbettes erreicht wird. Durch die exakte Umsetzung der am Computer errechneten Fräsebahnen kann die Prothese genau wie am Computer geplant eingesetzt werden. Außerdem werden bei Operationen, die von CASPAR durchgeführt werden, die betroffenen Knochen sowie das betroffene Weichteilgewebe deutlich weniger belastet. Durch die hohe Passgenauigkeit der eingesetzten Prothese (ähnlich gut wie bei einer Verwendung von Zement) wird der Heilungsprozess beschleunigt und ein langfristiger Erfolg der Operation wahrscheinlicher.

Nachteilig an CASPAR gegenüber konventionellen Operationen sind die Referenzpins, mit denen der zu operierende Bereich versehen werden muss. Das Befestigen dieser Pins bedeutet

eine zusätzliche Belastung für den Patienten. Außerdem muss das Personal geschult werden im Umgang mit CASPAR. Dazu gehören die präoperative Planung der Operation, die Bedienung des Roboters während der Operation, sowie das Verständnis der Sicherheitsaspekte. Die eigentliche Operation dauert mit CASPAR ungefähr 10 Minuten länger als eine konventionelle Operation. Bei einem irregulären Implantatlager kann die von CASPAR benötigte Zeit auch kürzer sein als bei herkömmlichen Operationen.

6.2.4 Vergleich mit konventionellen Operationen

Die Gefahr einer Infektion oder Entstehung einer Thrombose ist beim Einsatz von CASPAR genauso hoch wie bei herkömmlichen Operationen. Die postoperativen Beschwerden der Patienten werden durch den Einsatz von CASPAR vermindert. Acht Wochen nach der Operation konnten sich 80% der Patienten ohne eine Gehhilfe bewegen. Verglichen mit konventioneller Behandlung sind die Ergebnisse sehr gut.

In nachfolgender Tabelle werden CASPAR und die herkömmliche Operationstechnik nochmals gegenübergestellt:

Tabelle 1 Vergleich von konventionellen Operationen mit dem CASPAR-System [2]

| | <i>Konventionelle Technik</i> | <i>CASPAR-System</i> |
|--|--|--|
| OP-Planung | 2D - Röntgenbild | 2D - Röntgenbild - CT-Scan |
| Winkelberechnung | CCD - Winkel | CCD - Winkel Antetorsion |
| Beinlängenausgleich | während der OP | am Computer und während der OP |
| Zubereitung des Implantatbettes | grob mechanisch mit Raspel, Meißel und Hammer | sehr präzise mit Turbine und Fräse |
| OP-Komplikationen (Fissuren, Frakturen, Embolien) | möglich | unwahrscheinlich |
| OP-Komplikationen (Infektionen, Paresen, etc.) | gering | gering |
| OP-Zeit (reguläres Implantatlager) | kürzer | länger |
| OP-Zeit (irreguläres Implantatlager) | länger | kürzer |
| Schmerzen postoperativ | Hüfte | Hüfte und Knie (Pin in Femurkondyle) |
| Schmerzen nach Einheilung | Oberschenkelschmerz | geringer Oberschenkelschmerz |
| Einwachsen des Schaftes | längere Reparationsphase durch breite Spalten | schnelle Integration durch optimalen Knochenkontakt |
| Belastbarkeit | Teilbelastung mehrere Wochen | Vollbelastung eher möglich |
| Personal | kein Unterschied | kein Unterschied |

| | <i>Konventionelle Technik</i> | <i>CASPAR-System</i> |
|---------------|-------------------------------|--|
| Zusatzkosten | keine | Anschaffungspreis, Instandhaltungskosten |
| Dokumentation | Röntgenbild, OP-Bericht | Röntgenbild, CT-Scan, Computer-Planung, CASPAR-Protokoll, OP-Bericht |

6.2.5 Weitere Einsatzmöglichkeiten

Ein mögliches Einsatzgebiet für CASPAR ist der Ersatz von gerissenen vorderen Kreuzbändern am Knie. Bei dieser Operation muss je ein Loch in die Tibia (Schienbein) und in den Femur (Oberschenkelknochen) gebohrt werden. In diese Löcher werden Schrauben eingesetzt, an denen das neue Kreuzband befestigt wird (Abb. 6).



Abb. 6 neues Kreuzband mit Halterungen

Für einen langfristigen Erfolg dieser Operation müssen die Löcher an den richtigen Stellen platziert werden. Es scheint aber problematisch zu sein, diese Stelle genau zu bestimmen, da 10-25% der Kreuzbandoperationen aufgrund schlecht gewählter Bohrstellen erneut durchgeführt werden müssen.

Bei Verwendung von CASPAR werden zunächst Referenzpins in das Knie implantiert und ein Computertomogramm des Kniegelenks erstellt. Am Computer können an dieser CT-Aufnahme des verletzten Kniegelenks die richtigen Bohrstellen bestimmt werden. Dabei können unter anderem CT-Aufnahmen des gesunden Knies verwendet werden und von diesen kann auf die idealen Ansatzpunkte des Kreuzbandes beim verletzten Knie geschlossen werden. Nach dieser virtuellen Planung werden die berechneten Daten auf den CASPAR Roboter überspielt. Dieser wird fest mit Femur und Tibia verbunden und ein

Bewegungssensor wird am Knochen angebracht. Registriert dieser Bewegungen des Knochens, fährt der Roboter in seine Sicherheitsposition. Die Tibia wird mit Hilfe des Metallpins registriert und der tibiale Tunnel gebohrt. Danach wird der Femur registriert und der femurale Tunnel gebohrt. Anschließend wird das neue vordere Kreuzband vom Chirurgen an Schrauben in den gebohrten Kanälen befestigt und die Operationsstelle verschlossen.

Weitere Gebiete, in denen der Einsatz von CASPAR vorstellbar ist, sind die unikondyläre Kniearthroplastik und die Schulterendoprothetik.

6.3 CRIGOS

6.3.1 Einleitung

Mit CRIGOS wurde ein völlig neuartiges Konzept eines medizinischen Roboters entwickelt [1]. Bei den zur Zeit verwendeten Robotersystemen müssen Metallpins in die zu operierenden Stellen gebohrt werden, was zu einer zusätzlichen Belastung des Patienten führt. Die Roboter sind modifizierte Industrieroboter. Diese haben wegen des Einsatzes in der Industrie einen großen Arbeitsraum und sehr flexible Bewegungen, was zu Sicherheitsrisiken führen kann. Gerade im medizinischen Einsatz befinden sich auch Menschen in der näheren Umgebung des Roboters. Durch erhöhten Sicherheitsaufwand müssen Kollisionen zwischen Roboter und seiner Umwelt vermieden werden. Zusätzlich sind die eingesetzten Roboter sehr groß und schwer. Dies führt zu einem Erschwerten Auf- und Abbau, schlechteren Zugang für das Operationsteam zum Patienten, sowie zu einem erhöhten Sterilisierungsaufwand.

Der CRIGOS-Roboter (Compact Robot for Image Guided Orthopedic Surgery) kann bei Operationen Knochen modifizieren. Ziel dieser Entwicklung ist es, den konventionellen Operationsablauf möglichst wenig abzuändern und die Sicherheit bei der Benutzung eines Roboters zu erhöhen. Es müssen vor der eigentlichen Operation keine Metallpins an der betroffenen Stelle angebracht werden. Zur Planung des Ablaufs werden während der Operation Röntgenaufnahmen des betroffenen Gebietes gemacht. Teure 3-dimensionale CT-Aufnahmen werden nicht benötigt.

6.3.2 Operationsablauf

Anhand eines ersten Röntgenbildes kann der Arzt die ungefähre Größe der Prothese und den groben Operationsablauf bestimmen. Um Bewegungen des Patienten zu verhindern, wird der zu bearbeitende Knochen fest am Operationstisch fixiert. Der Chirurg verbindet nun den

Roboter mit der zu operierenden Stelle. Im nächsten Schritt werden mindestens 2 Röntgenaufnahmen gemacht. Der Chirurg bestimmt die richtige Prothese und positioniert und orientiert sie innerhalb eines 3-dimensionalen Bildes des Oberschenkelknochens. Das Ergebnis wird auf die beiden 2-dimensionalen Röntgenbilder übertragen. Der Roboter besitzt eine "Kalibrierungsplatte" mit mehreren Kalibrierungspunkten. Diese sind in den Röntgenaufnahmen zu sehen. Sie werden verwendet, um die virtuellen 3D-Koordinaten des Computers mit den realen Koordinaten abzugleichen. Dadurch entfällt der Einsatz von Metallpins, die in den Knochen gebohrt werden müssten, um eine Kalibrierung durchzuführen.

Bei der Durchführung der Operation werden von CRIGOS zwei Modi unterstützt. Im halbautomatischen Modus wird der Chirurg bei der Operation unterstützt, indem CRIGOS die Bewegungsfreiheit des Chirurgen einschränkt und einen Rahmen für den Operationsablauf vorgibt. Im automatischen Modus führt der Roboter die Operation selbständig durch, während der Chirurg den Verlauf überwacht.

6.3.3 Roboter

Um den Roboter zu entwickeln wurden zunächst die Anforderungen aus technischer und medizinischer Sicht aufgestellt:

- 6 Freiheitsgrade
- hohe Positionierungsgenauigkeit ($< 0,3$ mm)
- niedriges Gewicht (< 5 kg)
- Arbeitsraum von mindestens $10 \times 10 \times 10$ cm³
- Nutzlast von mindestens 2 kg
- kompakt

Beim Vergleich von offenen und geschlossenen kinematischen Ketten hat man sich für Letzteres entschieden. Der CRIGOS-Roboter basiert auf einer Stewart-Plattform (Abb. 7). Hier wird eine mobile Platte mit Hilfe von sechs Verbindungen zu einer Basisplatte bewegt. Durch Veränderung der Länge der einzelnen Verbindungen können translatorische und rotatorische Bewegungen durchgeführt werden (sechs Freiheitsgrade). Ein Roboter dieses Bautyps hat ein sehr gutes Eigengewicht/Nutzlast-Verhältnis von 1:1. Deswegen kann ein sehr leichter Roboter mit der geforderten minimalen Nutzlast von 2 kg gebaut werden. Ein Roboter mit einer offenen kinematischen Kette würde ungefähr 100 kg wiegen.

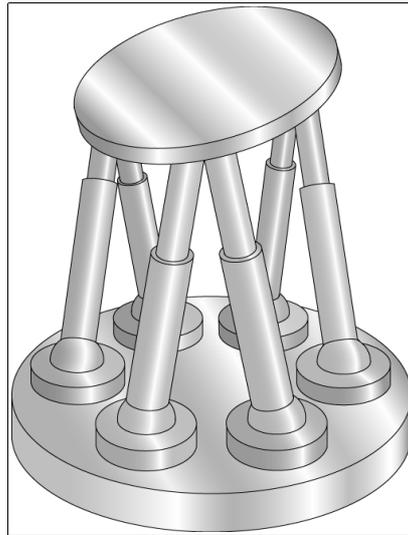


Abb. 7 Stewart Plattform

Ein weiterer Vorteil dieser Bauform ist der kleine Arbeitsraum, der die Sicherheit des Patienten und der Personals erhöht. Die Operationsstellen werden mit Hilfe von verschiedenen Adaptern erreicht, die zwischen dem Roboter-Flansch und dem chirurgischen Instrument montiert werden. Ein erster Prototyp (Abb. 8) wurde gebaut mit einem Eigengewicht von 4 kg und einer maximalen Nutzlast von 3 kg.



Abb. 8 Prototyp von CRIGOS

Der Arbeitsbereich ist $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ groß und die maximale Geschwindigkeit beträgt 10 mm/s. Dadurch kann es zu keinen schnellen, gefährdenden Bewegungen kommen. Ziel

weiterer Arbeit und Forschung sind die Instrument-Adapter, die Implementation und Auswertung der Bild- und Registrierungsverfahren, sowie die Sterilisation des Roboters.

6.4 Da Vinci System

Manche Operationen können heute durch einen minimal invasiven Eingriff durchgeführt werden. Das bedeutet, dass der Zugang zum Operationsort durch mehrere kleine (ca . 1cm) Löcher erfolgt. Dies hat den Vorteil, dass der Patient deutlich weniger belastet wird, als bei herkömmlichen Operationen, bei welchen ein großer Zugang zum Operationsgebiet benötigt wird. Der Patient verliert weniger Blut, es wird eine kleinere Narkosedosis benötigt, das Infektionsrisiko sinkt und der Krankenhausaufenthalt wird verkürzt. Allerdings werden heute die meisten Operationen immer noch nicht minimal invasiv ausgeführt. Der Grund dafür ist, dass die chirurgischen Aktionen (Gewebe schneiden, nähen...) durch die minimal invasive Technik erschwert werden. Die Sicht auf das Operationsgebiet ist nicht besonders gut, der Bewegungsspielraum der Instrumente ist eingeschränkt und die exakte Bewegung der Instrumente ist schwierig. Das da Vinci System wurde entwickelt, um diese Nachteile zu beseitigen. Es ist kein autonomer Roboter, sondern ein Telemanipulationssystem. Bei Operationen, die mit da Vinci durchgeführt werden, sitzt der Arzt an einer Steuerkonsole und bewegt von dort aus die chirurgischen Instrumente beim Patienten. Das da Vinci System besteht aus der Steuerkonsole (Abb. 9), einem Instrumentenwagen mit speziellen chirurgischen Instrumenten und einer Bildverarbeitungssoftware.

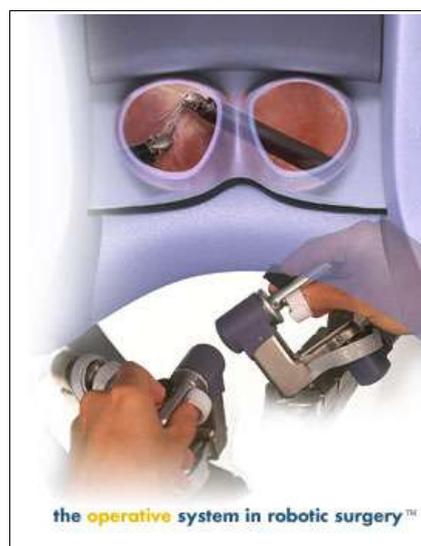


Abb. 9 Da Vinci Steuerkonsole und 3-D Sicht

Die Software ermöglicht dem Arzt eine sehr detaillierte, dreidimensionale Sicht auf das Operationsfeld und eine gute Tiefenschärfe. An der Steuerkonsole kann der Arzt die Instrumente mit Hilfe von Steuerknüppeln bewegen. Dabei werden die Bewegungen des Handgelenks, der Hand und der Finger sehr exakt auf die chirurgischen Instrumente übertragen. Ein leichtes Händezittern kann ausgefiltert werden. Die Kamera kann im Körper bewegt werden und das Bild kann gezoomt werden. Dadurch hat der Chirurg immer eine optimale Sicht auf das Operationsfeld. Durch diese Technik wird es möglich, Operationen minimal invasiv auszuführen die bisher nicht auf diese Weise realisierbar waren. Das Operieren wird für den Arzt deutlich vereinfacht. Das da-Vinci System wurde über 200 mal verkauft und wird heute weltweit eingesetzt.

6.5 Precise needle placement

B. Maurin et al beschreiben in [11] ein roboter-gestütztes System, welches chirurgische Eingriffe ermöglicht, die manuell von einem Arzt nicht durchführbar wären. In der heutigen Medizin ist es oft nötig, Nadeln mit hoher Genauigkeit durch die Haut in den Körper einzuführen. Dabei muss ein Ziel mit der Nadelspitze möglichst exakt getroffen werden. Solche Methoden werden z. B. bei Biopsien oder zur Behandlung von Tumoren verwendet. Bei der Hochfrequenztherapie wird eine Hochfrequenz-Nadel in den Tumor gestochen, die das Tumorgewebe erhitzen und dadurch zerstören kann. Für gute Behandlungserfolge ist es wichtig, dass diese Nadel exakt den Tumor trifft. Heutzutage können Ärzte problemlos Tumore ab einer Größe von 3 cm mit dieser Methode behandeln. Die Computertomographie ermöglicht es aber, Tumore mit einer Größe von unter 1 cm zu identifizieren. Damit auch kleinere Tumore behandelt werden können, der Arzt auf der anderen Seite aber nicht der Röntgenstrahlung des CTs ausgesetzt wird, versucht man, diesen Eingriff roboter-gestützt durchzuführen.

Dazu wurde ein Roboter vorgestellt, der auf dem Prinzip des "Visual Servoing [10]" basiert. Hierbei findet sich der Roboter in seiner Umwelt zurecht anhand visueller Daten von einer Kamera. Diese Daten werden mit einer Bilderkennungssoftware analysiert, und die Ergebnisse in einem geschlossenen Steuerkreis zur exakten Steuerung des Roboters verwendet. Eine bekannte Soll-Position des Roboters wird ständig mit der momentanen Ist-Position verglichen und errechnete Abweichungen werden zur Steuerung verwendet. Dabei kann insbesondere auf Änderungen in der Umwelt (z. B. Atmung oder Herzschlag eines Patienten) reagiert werden. Das Robotersystem von B. Maurin besitzt als Effektor ein Instrument, mit welchem eine

Nadel in den Körper eingeführt werden kann. Durch drei Freiheitsgrade können translatorische Bewegungen durchgeführt, und die Nadel an der Einstichstelle positioniert werden. Durch zwei weitere Freiheitsgrade wird die Nadel mit dem zu treffenden Tumor ausgerichtet. Anschließend kann sie in den Körper eingeführt werden. Zwischen dem Endeffektor und dem Roboterarm befindet sich ein Kraftsensor, der eine force-feedback unterstützte Steuerung des Roboters erlaubt. Dadurch kann der Chirurg während der Steuerung einzelne Gewebeschichten "erfühlen" und unterscheiden. Es wird geplant, eine Zielgenauigkeit von unter 2 mm zu erreichen, was eine deutliche Verbesserung gegenüber manuellen Methoden wäre.

7. Zusammenfassung

Der Einsatz von Robotern in der Medizin hat klare Vorteile aber auch Nachteile. Ein Roboter kann die Fähigkeiten eines Chirurgen erweitern und chirurgische Aktionen mit einer hohen Präzision ausführen. Wie sich bei in der Praxis verwendeten Systemen wie ROBODOC und CASPAR zeigte, ist die Operation selbst schonender und mit eher weniger Komplikationen verbunden als bei konventionellen chirurgischen Eingriffen. Allerdings ergaben sich bei ROBODOC im nachhinein öfters Probleme, was zu vielen Klagen von Geschädigten führte.

Der Einsatz eines Roboters führt zu einem gewissen Kontrollverlust des Chirurgen über den Operationsablauf. Deswegen sind beim Roboter Sicherheitsvorkehrungen einzurichten, damit der Chirurg gegebenenfalls in die Operation eingreifen kann (niedrige Arbeits-Geschwindigkeit, Totmannknopf usw.).

Die Entwicklung in der medizinischen Robotik wird zur Zeit durch eine fehlende Definitionen von Sicherheit behindert. Es ist nicht klar, wann ein "ausreichender" Sicherheitsstandard erreicht ist. Hohe Sicherheit ist auf der anderen Seite auch mit hohen Anschaffungskosten verbunden. Hier gilt es klare Richtlinien zu definieren und einen sinnvollen Kompromiss zwischen Kosten und Sicherheit zu finden. Beim Einsatz eines Roboters während einer Operation kann keine hundertprozentige Sicherheit erreicht werden. Es muss akzeptiert werden, dass die Vorteile der Roboter ein kleines Restrisiko rechtfertigen.

Die Bewertung von Mensch und Maschine ist im medizinischen Bereich sehr unterschiedlich. Wenn ein Chirurg eine Operation durchführt, bei der es zu Problemen kommt, wird das akzeptiert. Operationen gelten als komplizierte und mit Risiken behaftete Vorgänge. Kommt es allerdings zu Problemen bei von Robotern durchgeführten Operationen, ist die Haftungssituation unklar. Die Probleme können durch den Chirurgen bedingt sein oder durch

den Roboter selbst. Die von ROBODOC geschädigten Patienten wollen eine Sammelklage gegen den amerikanischen Hersteller des Roboters einreichen. Aufgrund solcher Gefahren zögern die Roboterhersteller mit der Investition in medizinische Roboter.

Ich habe im Rahmen dieser Arbeit den Eindruck bekommen, dass die Verwendung von Robotern zur Zeit immer noch ein Experiment darstellt. Da die ersten Operationen Anfang der neunziger Jahre stattfanden, ist dieses Gebiet sehr neu und es gibt keine oder wenige Langzeitstudien. Vergleiche von Ergebnissen bei Operationen mit und ohne Robotern sind ebenfalls schwer zu machen, da es an entsprechenden Daten fehlt. Ich sehe bei diesen Operationen ein oft schwer abzuschätzendes Risiko.

Auf der anderen Seite ist das Potential auf diesem Gebiet sehr groß. Systeme mit einer Vielzahl von möglichen Einsatzgebieten werden entwickelt. Insbesondere das CRIGOS-System zeigt, dass völlig neue Konzepte erprobt werden. Dieser kompakte, leichte Roboter mit einem kleinen Arbeitsbereich erhöht die Sicherheit während der Operation beträchtlich.

Ich bin überzeugt, dass der Einsatz von Robotern in Zukunft zunehmen wird und die Operationserfolge dadurch deutlich verbessert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] G. Brandt et al. "*A compact robot for image-guided orthopedic surgery: concept and preliminary results*". CVRMed 1997. S. 767-776
- [2] J. Jerosch, K. Nicol, K. Peikenkamp. "*Rechnergestützte Verfahren in Orthopädie und Unfallchirurgie*". Steinkopff Verlag. 1999.
- [3] R. H. Taylor et al. "*Computer-Integrated Surgery - Technology and Clinical Applications*". MIT Press. 1995. S. 255-295.
- [4] A. Lahmer et al. "*Is there a difference between the planning and the real position of the shaft 300 days after a robot assisted total hip replacement?*". CAR '98. Elsevier Science B. V. 1998. S. 694-698
- [5] P. Rabischong. "*The human factors in medical robotics*". Computer Assisted Radiology and Surgery 1998. Excerpta Medica International Congress Series 1165: S. 649-653.
- [6] M. Boerner, A. Lahmer, A. Baue, U. Stier. "*Experiences with the ROBODOC system in more than 1000 cases*". CAR '98. Elsevier Science BV. S. 689-693
- [7] "*Definition eines Roboters*". URL: <http://www.enas.de/roboter_definition.htm>, aufgerufen am 16.10.2004
- [8] J. Marschner. "*Der Robodoc vor Gericht*". URL: <<http://www.szonline.de/nachrichten/artikel.asp?id=605711>>, Artikel vom 18.05.2004, aufgerufen am 12.10.2004
- [9] Intuitive Surgical. URL: <<http://www.intuitivesurgical.com>>, aufgerufen am 11.11.2004
- [10] T. Lietmann. "*Was ist Visual Servoing?*". URL: <<http://www.iat.uni-bremen.de/Mitarbeiter/Fischer/Forschung/VisualServoing.html>>, Artikel vom 18.05.2004, aufgerufen am 12.11.2004
- [11] B. Maurin et al. "*A new robotic system for ct-guided percutaneous procedures with haptic feedback*". URL: <<http://eavr.u-strasbg.fr/fr/publications/upload/eavr-2004-200.pdf>>, aufgerufen am 12.11.2004