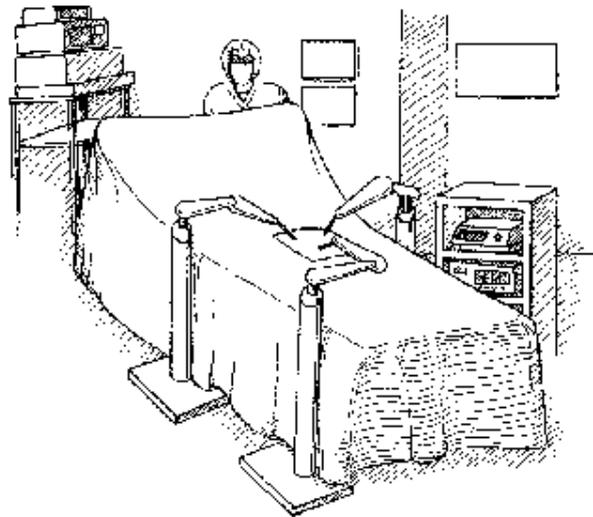


Arbeitsblätter zur Vorlesung Nr. 318.011

Roboter in der Medizin

Sommersemester 2004



Vortragende: o.Univ.Prof. Dr. Peter KOPACEK
Dr. Gernot KRONREIF

Einsatz von Robotersystemen im Gesundheitsbereich - Stand der Technik und zukünftige Trends

Prof. Peter Kopacek

Institut für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

TU Wien

Kopacek@ihrt1.ihrt.tuwien.ac.at

Dr. Gernot Kronreif

Abteilung Medizin- und Rehabtechnik

Austrian Research Centers Seibersdorf

Gernot.kronreif@arcs.ac.at

Kurzfassung:

Vor etwa 15 Jahren waren die Schlagzeilen in der Produktionstechnik vom Thema „Industrieroboter“ geprägt. Inzwischen ist der Roboter längst als ein Werkzeug (unter vielen) im Produktionsbereich etabliert.

Die zunehmende Verfügbarkeit preiswerter sowie präziser Sensorelemente bildet die Basis immer „intelligenterer“ Robotersysteme - mit dem Streben nach neuen Anwendungsgebieten als logische Konsequenz. Einer dieser „fortschrittlichen“ Bereiche ist die Verwendung von Robotersystemen im Dienstleistungs- und Servicebereich - im Unterhaltungsbereich, im Haushalt sowie für Anwendungen im Gesundheitsbereich.

Dieser Fachbeitrag soll einen Überblick über den status-quo dieser „Medical Robots“ verschaffen sowie mögliche zukünftige Bereiche beschreiben. Anhand eines kurzen Rückblicks auf den in Zusammenarbeit mit der internationalen Arbeitsgruppe „International Advanced Robotics Programme - IARP“ organisierten Workshop „Medical Robots“ wird weiters ein Querschnitt über den aktuellen Stand der Forschung in diesem Fachbereich angeboten.

1. Einleitung

Als „Werkzeug“ in der produzierenden Industrie längst etabliert, drängte der Roboter - unterstützt durch die Verfügbarkeit immer exakterer und preiswerter Sensorsysteme - seit einigen Jahren in völlig neue Anwendungsbereiche. Diese unkonventionellen Aufgabenbereiche sind überwiegend im Dienstleistungsbereich angesiedelt - der *Service-roboter* war geboren. Orientiert man sich an der Definition der „Dienstleistung“ kann der Service-roboter wie folgt beschrieben werden:

„Ein **Service-roboter** ist eine freiprogrammierbare Bewegungseinrichtung, die teil- oder vollautomatisch Dienstleistungen verrichtet. Dienstleistungen sind dabei Tätigkeiten, die nicht der direkten industriellen Erzeugung von Sachgütern, sondern der Verrichtung von Leistungen an Menschen und Einrichtungen dienen“.

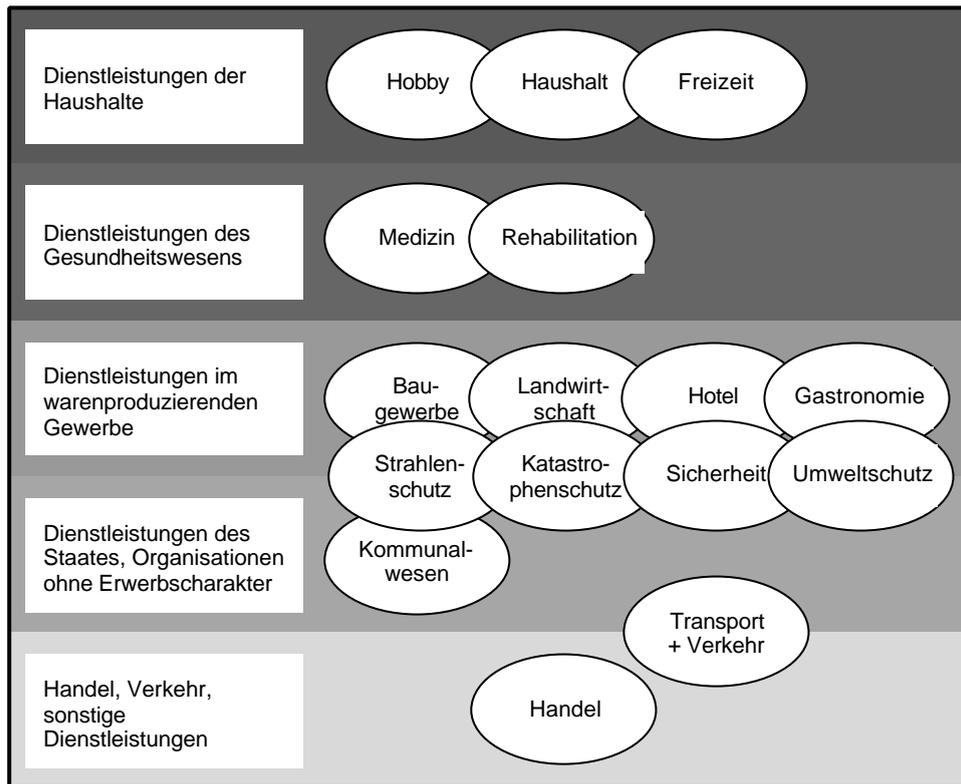


Bild 1: Einteilungsschema der Dienstleistungen

1.1 Roboter in der Medizin

Die Anwendung von Robotertechnik in der Medizin oder in der Chirurgie stellt sich im ersten Anlauf als äußerst problematisch dar - schon alleine, weil das Werkzeug „Roboter“ nicht für diese „Rahmenbedingungen“ konzipiert war. Für die Anwendung im medizinischen Bereich **muß** der Roboter im steten Kontakt mit Personen (Bediener und/oder Patient) stehen - für Produktionsanlagen wäre dies (unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten) wohl eher ein „worst-case“ Szenario.

Der anwachsende Kostendruck im Gesundheitswesen erzwingt jedoch auch in diesem Bereich die zunehmende Automatisierung und ein wirtschaftliches Arbeiten - der medizinische Bereich wird so zu einem zentralen Schwerpunkt für die Serviceroboter-Technik.

Als Vor- und Nachteile von Servicerobotern - gerade auch für „Medical Robots“ - lassen sich anführen:

- ☞ Reduzierung der Dienstleistungskosten
- ☞ Dienstleistung kann industriell orientierte Rationalisierungsmaßnahmen nutzen
- ☞ Größere Zuverlässigkeit bei der Erbringung der Dienstleistung
- ☞ Entlastung des Dienstleisters von Routineaufgaben
- ☞ Wahrung der Diskretion
- ☞ Steigerung der Verfügbarkeit der Dienstleistung

☞ Kunde (Patient) verliert das Gefühl der persönlichen Betreuung

- ☞ Dienstleistung reduziert sich auf sachliche Zweckerfüllung; Befriedigung sozialer und psychologischer Bedürfnisse entfällt
- ☞ Wegfall der Individualität und Einmaligkeit der Dienstleistung
- ☞ Notwendige Lernprozesse und Akzeptanz im Umgang mit Automaten

2. Gründe für den Einsatz von „Medical Robots“

Der Einsatz von Robotertechnik in der Medizin ist durchaus auch unter dem Gesichtspunkt „Kosten“ zu sehen. Serviceroboter in diesem Bereich beinhalten ein beachtliches Rationalisierungspotential. Dadurch werden mehr qualifizierte Fachkräfte für die Patientenbetreuung freigesetzt. Roboter in der Medizin können in die folgenden Kategorien gegliedert werden:

2.1 Einsatzbereiche für Roboter in der Medizin

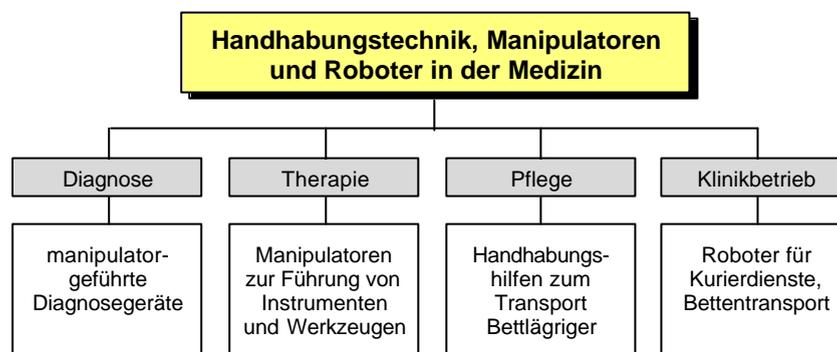


Bild 2: Roboter in der Medizin

Die moderne bildgebende Diagnostik, besonders die **Computertomographie** (CT) und die **Magnetic Resonance Imaging** (MRI) liefert genaue Information über betrachtete Gewebe, Knochen u.ä. Diese Verfahren sowie Ultraschall können durch die beliebige Positionierung und Orientierung von Einrichtungen durch einen Roboter wesentlich flexibilisiert werden. Ein Beispiel dafür ist ein robotergeführter Ultraschallkopf, welcher biomagnetische Quellen z.B. im Herz ortet und durch Ultraschallbilder Körper- bzw. Gewebeteilen zuordnet.

Ein breites Anwendungsgebiet eröffnet sich Robotern auf dem Gebiet der Therapie zur Führung von Instrumenten und Werkzeugen. Sie werden überwiegend zur Unterstützung des Chirurgen bei der Positionierung des Operationsbesteckes oder sogar für überwachte, teilweise selbständige Eingriffe (Schneiden, Einführen von Sonden) eingesetzt. Ein eigenständiger Eingriff eines Roboters an einem Menschen ist mit dem heutigen Stand der Technik noch nicht realisierbar.

Im Bereich der Pflege und des Klinikbetriebes werden bis zu 40% der Arbeitszeit einer qualifizierten Pflegekraft für Botengänge aufgewendet. Daher stellt der Warentransport zwischen Apotheke, Küche, Wäscherei, Labor usw. einen signifikanten Kostenfaktor im Krankenhaus dar. Einer Automatisierung dieser Transportvorgänge durch den Einsatz intelligenter, mobiler Roboterplattformen werden hier wirksame Ansatzpunkte geboten.

2.2 Einsatzbereiche für Roboter in der Rehabilitation

Roboter in der Rehabilitation erlauben behinderten Menschen sich in die Arbeitswelt zu integrieren, alten oder behinderten Menschen mehr Selbständigkeit zu geben sowie das Pflegepersonal bei kraft- und zeitaufwendigen Arbeiten zu unterstützen.



Bild 3: Roboter in der Rehabilitation

Bisherige Rollstuhlssysteme verlangen relativ hohe Fähigkeiten zur Steuerung von den Bedienern. Durch eine geeignete Sensorunterstützung und angepaßte Schnittstellen sollen daher mobile, autonome Rollstühle entwickelt werden. Ein Beispiel hierfür ist ein selbstnavigierender Rollstuhl, der Personen - nach Angabe der Zimmernummer - ohne weiteres Eingreifen des Bedieners in das gewünschte Zimmer bringt. Handhabungshilfen und rollstuhlbasierter Manipulatoren können als eine sinnvolle Erweiterung einer fahrbaren Plattform, wie sie ein Rollstuhl darstellt, angesehen werden.

Um das Pflegepersonal von der körperlich anstrengenden Arbeit der Umbettung und des Transportes von Patienten zu entlasten, können Roboter sinnbringend eingesetzt werden. Jedoch stoßen diese Anwendungen noch an die Grenzen der Sensorik und üblicherweise nur auf geringe Akzeptanz bei den Patienten.

2.3 Einsatzbereiche für Roboter in der Chirurgie

Beispiele für den Robotereinsatz bei chirurgischen Eingriffen sind robotergesteuerte Laserskalpelle und robotergesteuerte Endoskope. Ein wesentlicher Vorteil des Einsatzes von Robotertechnologie in der Chirurgie ist durch die wesentlich höhere (und konstante) Genauigkeit gegeben. Auch die Verkürzung von Operationsdauer und der Regenerationsphase (und damit eine Verkürzung des Krankenhausaufenthalts), die Verminderung der postoperativen Schmerzen sowie die Verbesserung des Heilungsprozesses durch die Verwendung kleinerer Werkzeuge - der Roboter ist in der Lage wesentlich kleinere Operationsbestecke aufgrund seiner höheren Genauigkeit exakt zu führen - stellen erhebliche Vorteile dieser Technik dar.

In der Neurochirurgie, zum Beispiel, kann schon der kleinste Fehler irreversible Schäden verursachen. Durch die millimetergenaue Durchführung einer roboterunterstützten Operation kann das Risiko beträchtlich reduziert werden. Durchgeführte Behandlungen sind z.B.:

- Absaugen von Hämatomen
- Entfernen kleinerer Tumore
- Implantationen von Strahlenquellen zur Zerstörung größerer Tumore
- Biopsie
- Elektrotherapie bestimmter Gehirnbereiche
- Thermische Behandlung im Bereich des Thalamus bei starkem Zittern zufolge der Parkinson'schen Krankheit

Eine der bekanntesten Anwendungen von Robotertechnologie in der Chirurgie ist die Operation von Hirntumoren. Nach genauer Analyse der durch die CT gelieferten Lage eines Hirntumors wird am Computer der geeignetste Operationsweg geplant und damit der Roboter programmiert. Bei der Operation selbst wird der Chirurg durch den Roboter mit Hilfe eines Laserstrahles zum Tumor geführt. Zusätzlich steht dem Chirurgen ein 3D Computerbild des Gehirns und des aktuellen Status der Operation zur Verfügung. Die Vorteile der Roboter-unterstützung konnten bereits in zahlreichen Operationen unter Beweis gestellt werden.

Durch den Übergang von der offenen Chirurgie zur **minimal invasiven Chirurgie** gingen für den Chirurgen jedoch auch wichtige Qualitäten verloren. So ist z.B. das Nähen bei der offenen Chirurgie wesentlich einfacher durchzuführen als bei der endoskopischen Chirurgie mit ihren reduzierten Freiheitsgraden. Dieses und weitere Defizite der minimal invasiven Chirurgie, wie z.B. das Fehlen der räumlichen Sicht und des Tastsinns müssen unter Nutzung neuer Technologien überwunden werden. Damit sich der Chirurg ausschließlich auf die Führung der Instrumentenspitze konzentrieren kann, werden endoskopische Geräte verstärkt mit einem computergestützten, „intuitiven“ Antriebskonzept auszurüsten sein - die Grundfreiheitsgrade des Instruments werden mit der Funktionalität eines Robotersystems ausgestattet. Als weitere Verbesserung der Operationsbedingungen wird auch die Endoskopiekamera mit einem aktiven Mechanismus ausgestattet (z.B. System ARTEMIS, Kernforschungszentrum Karlsruhe). Damit kann die Steuerung der Optik über Sprachsteuerung oder gekoppelt an das Operationsinstrument („Instrumenten Tracking“) erfolgen. Durch realistische Computeranatomiemodelle und einem graphischen „Laparoskopie-Trainer“ kann ein verbessertes Training für das minimal invasive Operieren durchgeführt werden.

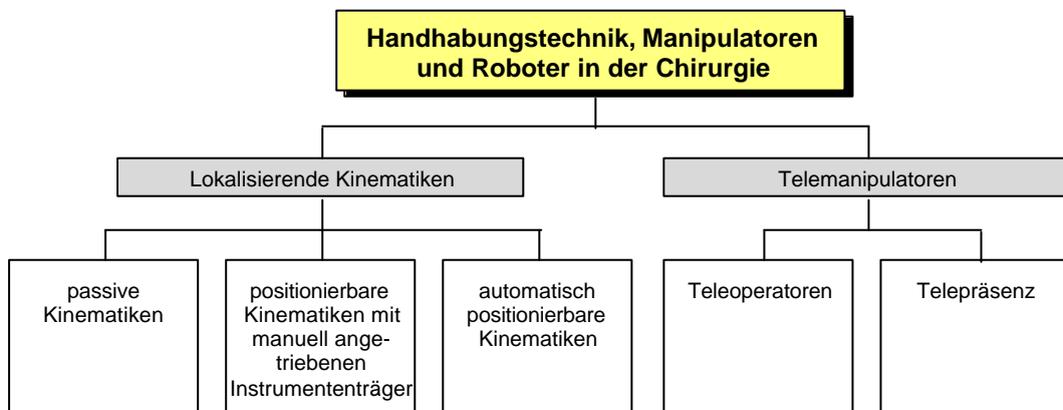


Bild 4: Roboter in der Chirurgie

Passive Kinematiken zur Lokalisierung:

Hier werden einfache Körperteile wie Kopf, Kniegelenk etc. fest positioniert. Eine einfache, blockierbare Kinematik wird anhand der durch bildgebene Diagnose errechneten Punkt- und Positionsvorhaben kalibriert. Während der Operation hält der blockierte Manipulator die Operationswerkzeuge oder Hilfsvorrichtungen in einer konstanten Relativstellung zum fixierten Körperteil.

Positionierbare Kinematiken:

Sie dienen als Instrumententräger, welche außerhalb des Patienten fernbedient oder automatisch positioniert werden. Die Werkzeuge oder Instrumente werden aber von der fixierten Kinematik manuell oder durch manuell gesteuerte Antriebe in das Eingriffsgebiet verfahren.

Automatisch positionierbare Kinematiken:

Kennzeichnend für diese ist die unmittelbare Verbindung von Diagnose und Therapie, Positionsfindung und Korrelation, Operationsfindung und Training. So können verschiedene, roboterangepasste Werkzeuge für chirurgische Eingriffe geführt werden, wie z.B. Messer für Gewebeschnitte, Bohrer für Schädelbohrungen oder Nadeln zur Gewebeentnahme.

2.4 Mikroroboter

Ein nächster Entwicklungsschritt nach dem Einsatz herkömmlicher Roboterstrukturen in der Chirurgie ist die Entwicklung von Mikro- und/oder Nanorobotern für den Einsatz im Inneren des Patienten. Instrumente, die für solche Roboter in Entwicklung sind, umfassen Scheren, Schneiden, Markierer, Ventile, Pumpen, künstliche Schließmuskel, Filter, mobile Gerinnungsblocker, lokale Narkotika und bewegliche Diagnose- und Therapieendoskope.

Hardware:

Ein Roboter besteht im Normalfall aus seinem „Gehirn“ (Mikrochip), einer CCD-Chip Kamera, Sensoren für die Orientierung und Bewegung, einem Antriebsmotor, einem Chassis und verschiedenen Leitungen und Schläuchen. Das Hauptproblem bei der Entwicklung von Mikrorobotern ist die Verkleinerung - insbesondere von Antriebsmotor und Versorgungsteil.

Fortbewegung:

In diesem Bereich der Forschung sind der Phantasie der Entwickler scheinbar keine Grenzen gesetzt. Neben den „konventionellen“ Antriebsarten wie Raupen- oder Kettenantrieb oder Räder, stehen zur Zeit folgende Antriebskonzepte zur Diskussion:

- Piezoelectric-inch-worm (abschnittsweises Fixieren, Komprimieren und Expandieren)
- „Pneumatischer Ballon“
- Luftkissenantrieb
- steuerbarer Schwimmer in einem Magnetfeld

3. Anwendungsbeispiele für Serviceroboter im Krankenhaus

Auch bei der nachfolgenden Beschreibung einzelner Anwendungen von Servicerobotern im Krankenhaus soll in die beiden Bereiche Medizin und Rehabilitation unterschieden werden. Die nachfolgende Tabelle zeigt einen Überblick über einige international bekannte Roboteranwendungen im medizinischen Bereich.

Einsatzbereich	Name	Entwickelt in
Diagnose	Robotergeführter Ultraschallkopf	Deutschland
Chirurgie	Passive Kinematik mit steuerbarer Achsblockierung (PADYC)	Frankreich
	Echtzeit-Simulationssystem für laparoskopische Eingriffe mit visuellem und taktilem Feedback	Frankreich
	3D-Preoperative Planung für die plastische Chirurgie	Italien
	Robotersystem für bildgestützte, minimal-invasive orthopädische Eingriffe (Einsetzen eines künstlichen Kniegelenkes)	Deutschland
	Robotersystem für neurochirurgische Eingriffe (MINERVA)	Schweiz
	Unterstützendes System für orthopädische Eingriffe (ROBODOC)	USA
	Telemanipulator für mikroinvasive Eingriffe (LAPAROBOT)	England
	Manipulatorensystem für Neurochirurgie	Frankreich
	Bildgestützter Lokalisator für neurochirurgische Eingriffe NEUROSISTA	England
	7-achsiger Manipulator für laparoskopische Anwendungen	USA
Roboter zur Unterstützung bei der Entfernung von Prostatakrebs	England	

Tabelle 1: Einige Beispiele für Roboter in der Medizin (Chirurgie)

Serviceroboter im Rehabilitationsbereich:

Der Einsatz von Servicerobotern im Rehabilitationsbereich ermöglicht es, das Pflegepersonal von Transport- und Handhabungsaufgaben sinnvoll zu entlasten. Dadurch können die kommunikativ pflegerischen Aspekte der Betreuung in den Vordergrund gestellt werden, da die Anzahl des Pflegepersonals keineswegs proportional mit dem Anteil älterer und pflegebedürftiger Menschen zunimmt. In der nachfolgenden Tabelle sind einige Serviceroboter für Anwendungen in der Rehabilitation angeführt.

Einsatzbereich	Name	Entwickelt in
Handhabungshilfen	Manipulatoren für rollstuhlgebundene Querschnittgelähmte (IVENTAID)	England
	Roboterarm für Behinderte (HANDY 1)	GB
	Robotersystem (mobile Plattform + Greifarm) für Behinderte URMAD / MOVAID	Italien
	„Intelligenter“ Rollstuhl SIRIUS	Spanien
	Roboter Greifarm für Rollstühle (MANUS)	Niederlande
	Mechanischer Arm (6 DOF) für tetraplegische Patienten (SPARTACUS)	Frankreich
	System zum Transport von Essen, Getränken, Büchern, etc. (VOICE COMMAND I)	USA
	Ortsfestes Manipulatorensystem zur Unterstützung Querschnittgelähmter an Büroarbeitsplätzen	USA
Unterstützung des Pflegepersonals	Transport eines Behinderten von Bett in Rollstuhl (MELCOM)	
	Tragarm zur Patientenunterstützung	Japan
Sonstiges	„elektronischer“ Blindenhund (MELDOG)	Japan
	Sensorgürtel für Blinde zur Erkennung von Hindernissen (NAVBELT)	USA
	Waschkabine	Japan

Tabelle 2: Beispiele für Roboter in der Rehabilitation

4. IARP Workshop „Medical Robots“

Im Jahr 1992 wurde im Zuge des Wirtschafts-Gipfel von Versailles ein internationales Projekt mit dem Titel „International Advanced Robotics Programme - IARP“ gestartet. In der Gründungsurkunde einigten sich die Mitgliedsstaaten auf das gemeinsame Ziel „zur Förderung der Entwicklung fortgeschrittener Robotersysteme, welche den Menschen von Arbeit in rauher, gesundheitsschädigender Umgebung entbinden sowie zu Gesundheit und Wachstum der Weltwirtschaft beitragen“.

Als eine der zukunftsreichsten Entwicklungsbereiche in Forschung und Entwicklung sowie mit ihrem gewaltigen Potential zur Kostensenkung im Gesundheitswesen stellt die Anwendung von Robotertechnik in der Medizin einen der zentralen Beschäftigungsbereiche im Rahmen des IARP dar. Im Rahmen eines jährlichen Workshops über „Medical Robots“ soll Experten, Forschern und Vertretern aus Technik, Gesundheitswesen und Industrie ein Forum geboten werden, um den

aktuellen Stand der Technik, realisierte Anwendungen und zukünftige Trends zu diskutieren.

Für den durch das Institut für Handhabungsgeräte und Robotertechnik der TU Wien organisierten Workshop „Medical Robots 1996“ - 1. und 2. Oktober 1996, Wien - wurden zirka 40 Beiträge eingereicht - 27 Beiträge (aus 11 verschiedenen Ländern) wurden letztlich dem internationalen Fachpublikum präsentiert. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die angebotenen Teilbereiche - sie repräsentiert aber auch die einzelnen Forschungsbereiche für „Medical Robots“.

Teilbereich	Anzahl präsentierter Fachbeiträge
Roboter in der Rehabilitation	6
Pre-operative Planung / Simulation in der Chirurgie	2
Image Guided Therapy / Robotics	4
Neue Robotersysteme / Anwendungen	7
Mikro-Roboter in der Medizin / Chirurgie	4
Verschiedenes	4
Summe	27

Tabelle 3: Zusammenstellung der Fachbeiträge IARP WS „Medical Robots 1996“

Die am Workshop präsentierten Fachbeiträge waren sehr anwendungs-orientiert und auf sehr hohem wissenschaftlichem Niveau. Die ausgiebigen Diskussionen zwischen Experten aus den verschiedensten wissenschaftlichen Disziplinen erlauben den Schluß, daß **Sicherheit und Kosten** die wichtigsten Einflußfaktoren für einen Einsatz der entwickelten und vielfach bereits als Prototyp vorliegenden Systeme darstellen. Weitere Aspekte aus den verschiedenen Präsentationen und Diskussionen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- ☞ Verwendung spezieller und auf die Anwendung „maßgeschneiderter“ Robotersysteme statt Roboter „von der Stange“;
- ☞ Der Roboter ist ein **Werkzeug** für den Chirurgen - kein **Ersatz** desselben;
- ☞ Visualisierung ohne Berücksichtigung des Tastsinnes ist „blind“;
- ☞ Simulation spielt eine zentrale Rolle bei der Verwendung medizinischer Robotersysteme;
- ☞ Ein neuer Entwicklungsschwerpunkt sollte die Entwicklung verbesserter, anwender-orientierter Mensch-Maschine-Schnittstellen sein;

5. Zusammenfassung

Der Einsatz von Robotertechnik für die Anwendung im Gesundheitswesen stellt einen hoffnungsvollen und zukunftsreichen Entwicklungsbereich dar. Für einen verbreiteten Einsatz dieser neuen Technologie muß eine verstärkte Entwicklung in den folgenden Teilbereichen erfolgen:

- ⇒ Steuerungstechnik:
dezentrale Steuerungsarchitekturen, Integration, Neuroinformatik

⇒ Sensorik:

Integration von Erkennen und Eingreifen, Standardisierung von Sensorschnittstellen, Bildverarbeitung

⇒ Antriebstechnik:

höhere Leistungsdichte, Integration von Sensorik und Aktorik, Miniaturisierung

⇒ Mensch-Maschine-Schnittstelle:

Verbesserung der Sprachverarbeitung, Erlernen und Interpretation von Gestik, verständnis-multi-modale Eingabe, Plausibilitätskontrolle

⇒ Sicherheitstechnik:

Entwicklung raumüberwachender Sicherheitssensoren, Gestaltungsregeln für den Entwurf sicherheitsgerechter Systemlayouts

Der Einsatz von Robotersystemen im medizinischen und im Rehabilitationsbereich wird jedoch auch im wesentlichen davon abhängig sein, wie weit Diffusionshemmnisse, wie:

- hohe Systemanschaffungskosten,
 - lange Entscheidungswege der öffentlichen Kranken- und Pflegeeinrichtungen,
 - weitestgehende Abhängigkeit der Hersteller von staatlichen Förderprogrammen
- in ihrer Wirkung minimiert werden.

Das zentrale Problem, das sich gegen den Einsatz von Robotertechnik in der Medizin stellt, sind die hohen Entwicklungskosten. Um eine rasche Umsetzung der Produktideen zu erreichen, sind gezielte und aufeinander abgestimmte Maßnahmen zur Förderung der Forschung und Entwicklung unerlässlich. Die Erfahrungen aus der Einführung von Industrierobotern zeigt auch, daß bei einer ausschließlichen Betrachtung der technischen Lösung die Gefahr einer emotionalen Reaktion in der Gesellschaft besteht und damit unter Umständen der Weg für innovative Technik erschwert wird. Wichtige Entwicklungsparameter sind somit Dienstleistungsmarketing, Organisation der Dienstleistungserbringung, öffentliche Akzeptanz, Umgebungsgestaltung, Ergonomie sowie eine geeignete Mensch-Maschine-Interaktion.

Zusammenfassend ist der Schluß naheliegend, daß Computer und Roboter die Medizin schneller und präziser machen - ob sie im gleichem Maße menschlicher wird, bleibt jedoch dahingestellt.

6. Literatur

Kassler, M.: „Robotics for health care: A review of literature“, Robotica, Vol. 11 (1993), Seiten 495-516.

Kopacek, P.: Preprints of the International IARP Workshop on „Medical Robots“, 1. und 2. Oktober 1996, Wien.

IEEE: Engineering in Medicine and Biology, Vol. 14, Nummer 3, Mai/Juni 1995.

Schraft R., Volz H.: Serviceroboter: Innovative Technik in Dienstleistung und Versorgung, Springer Verlag, 1996, Berlin.

Roboter in der Medizin

Dr. Gernot Kronreif

GF Mechatronische Automatisierungssysteme
Austrian Research Centers Seibersdorf

Prof. Peter Kopacek

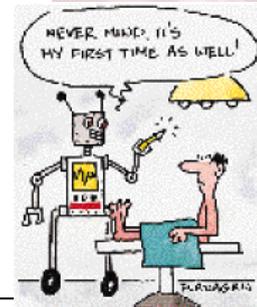
Inst. für Handlungssysteme und Robotertechnik
TU Wien

Vorlesung „Roboter in der Medizin“

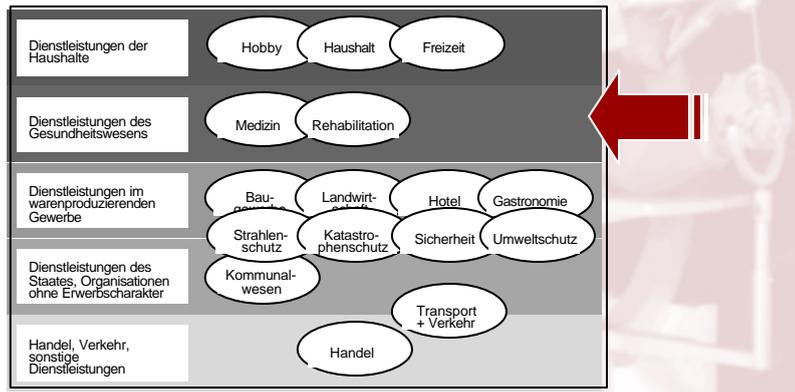
ARCS / IHRT

Themenbereiche

- Einleitung - Robotertechnik
 - ◆ Definitionen, Begriffe
 - ◆ Aufbau eines Industrieroboter-Systems
- Roboter in der Medizin - Überblick
- Anwendungsbeispiele in der Medizin
- Zusammenfassung und Ausblick



Roboter im Dienstleistungsbereich - „Serviceroboter“



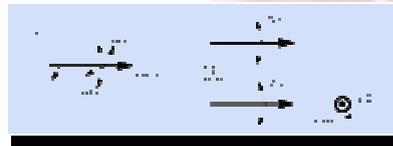
Serviceroboter

- Ende 1999: zirka 6000 Serviceroboter weltweit
- zirka 12% in Medizinbereich
- Pflegeroboter (Altersrehabilitation) noch nicht Weg zum Markt gefunden



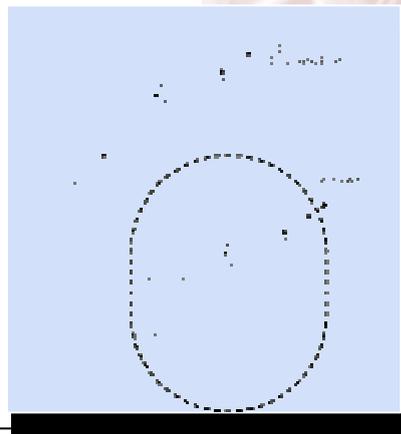
Grundbegriffe, Definitionen

- **Roboterglieder, Robotergelenke**
Roboterglieder bilden die eigentliche mechanische Struktur eines Roboters; Gelenke sind die beweglichen Verbindungselemente zwischen den Gliedern
- **Freiheitsgrade (DOF)**
Jedes Gelenk liefert Freiheitsgrade; Robotik: Dreh- oder Linearfreiheitsgrade mit je 1 DOF; für beliebige Position + Orientierung im Raum \Rightarrow 6 DOF
- **Orientierungsachsen**
Beschreibung der Orientierung des End-Effektors: Roll, Pitch, Yaw



Grundbegriffe, Definitionen

- **Tool Centre Point (TCP)**
TCP liegt entweder am Roboter oder am End-Effektor; Beschreibung in kartesischen, zylindrischen, etc. Koordinatensystemen.
- **Arbeitsbereich**
Kinematische Struktur + Arbeitsbereiche der Gelenke ergeben fixen Arbeitsbereich; Arbeitsbereich entspricht Menge der Punkte welche a) mit beliebiger oder b) mit zumindest einer Orientierung angefahren werden kann.



Grundbegriffe, Definitionen

- **Verfahrgeschwindigkeit**
bezeichnet Bahngeschwindigkeit des TCP oder Geschwindigkeit der einzelnen Gelenke. Ist im allgemeinen nicht exakt geregelt und nicht konstant über den Arbeitsbereich.
- **Nennlast**
Last, die der Roboter ohne Einschränkung der für die Achsen angegebenen Geschwindigkeiten, Arbeitsbereiche und Genauigkeit handhaben kann; Nennlast = Nutzlast + Werkzeuglast
- **Wiederholgenauigkeit**
Mechanische, rechnerische Faktoren (Spiel!) \Rightarrow Abweichung bei wiederholt angefahrenen Punkten. Genauigkeit = Bereich von 99.5% der angefahrenen Punkte.

Komponenten eines Robotersystems

- **Mechanischer Arm**
Roboterglieder, Gelenke, Basis; genügend strukturelle Stabilität zur Aufnahme der Nennlast
- **Antriebssystem**
Motor, Kolbenantriebe, Getriebe, Bremseinrichtungen
- **Steuerungssystem**
Interface zum Operator; Ansteuerung der Roboterachsen
- **End-Effektor, End-of-Arm Tooling (EOAT)**
Spezielles Werkzeug; angepaßt an Anwendung; Greifer, Schrauber, etc.
- **Programmiereinrichtung**
Teach-Panel (PHG), Bewegung der Achsen, Speicherung der Punkte, Programmerstellung, Not-Aus, etc.

Kinematik-Konfigurationen

Roboter	Achsen		Beispiel
	Prinzip	Kinematische Struktur	
Cartesian Robot			
Cylindrical Robot			
Spherical Robot			

ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

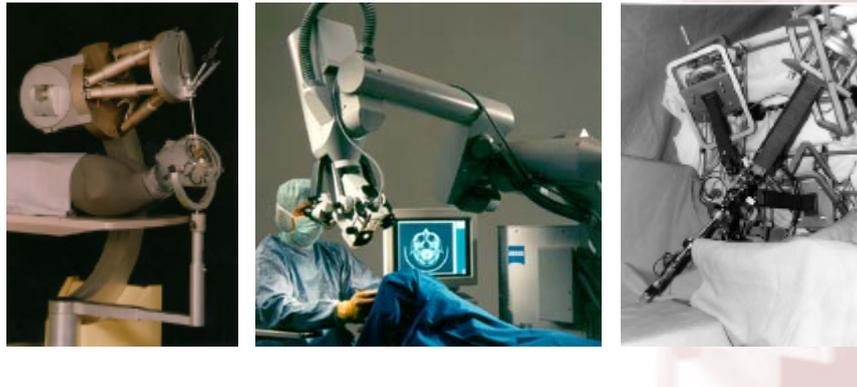
Kinematik-Konfigurationen

Roboter	Achsen		Beispiel
	Prinzip	Kinematische Struktur	
SCARA Robot			
Articulated Robot			
Parallel Robot			

ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

Spezielle Kinematik-Konfigurationen für Roboter in der Medizin



ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

Serielle vs. Parallele Roboterkinematik

Eigenschaften		
Nutzlast / Gewicht	1:10 bis 1:20	1:1 bis 1:2
Kin. Struktur	anthropomorph	kompakt
Steifigkeit	gering	hoch
Intraoperatives Handling	schwierig	einfach
Arbeitsbereich	groß	klein
Genauigkeit	gering	hoch
Positionsfehler	akkumuliert	gemittelt
Technische Komplexität	groß	gering
Verhalten in Singularität	große Bewegungen große Beschleunigungen	große Kräfte

ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

Spezielle Anforderungen

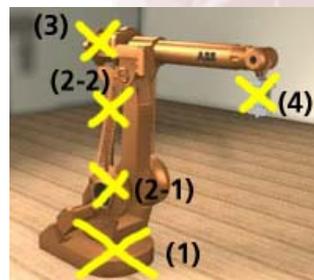
MR Kompatibilität:

- Keine (nennenswerte) Verwendung ferro-magnetischer Werkstoffe
 - ➔ Störung des magnetischen Feldes bzw. magnetische Anziehung
- Im Bildbereich: keine para-magnetischen Werkstoffe
- Kein "electric noise" im MR Raum
 - ➔ Eingeschränkte Verwendung von Computern, Kabelverbindungen, Mobiltelefone, elektrische Antriebe
- Verwendung von Kunststoffen, CF Werkstoffen, Keramik, Glas, Spezial-Legierungen (BeCu)

Spezielle Anforderungen

Industrieroboter ⇔ MR Kompatibilität?

- Rahmenkonstruktion aus Metall (1)
- Achslager (2-1) und kinematische Hilfskonstruktionen (2-2) aus Metall
- Servomotore, Schrittmotore als Antriebselemente (3) - sind aus ferro-magnetischen Materialien und basieren auf magnetischem Feld
- Sensoren produzieren/sind empfindlich gegen "electric noise" (4)



Roboter in der Medizin - Anwendungen

■ Labor-Roboter

Durchführung von Labortests (z.B. Bluttests); VT: wiederholende Tätigkeit bei hoher Geschwindigkeit (ohne zu ermüden!), hoher Zuverlässigkeit; Zeit-, kosten- und personalsparend!

■ Krankenhaus-Roboter

Transporttätigkeiten im Krankenhaus (Medizin, Essen, Wäsche, ...) - Entlastung des Pflegepersonals; "Pflege-Hilfsroboter" (patient handling robots) - Unterstützung des Pflegepersonals bei Umbetten der Patienten, etc.



Roboter in der Medizin - Anwendungen

■ Rehab-Roboter

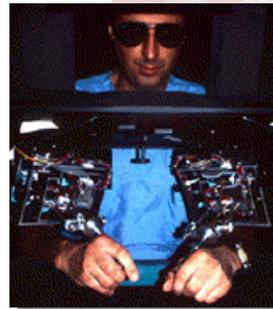
Unterstützung von vorübergehend/dauerhaft behinderten Menschen. Steuerung des Roboters über verschiedenste Eingabehilfen - Mensch-Maschine-Interface! Stationäre Roboter (einfache Handling-Aufgaben) bzw. Mobile Roboter (Roboterarm montiert an Rollstuhl).

■ OP-Roboter

Durchführung eines chirurgischen Eingriffs - (ausschließlich) geführt durch Robotersteuerung; Chirurg: Planung der Operation und Überwachung; VT: Präzision, Zuverlässigkeit, Geschwindigkeit; NT(?): Mehraufwand bei Planung

Roboter in der Tele-Chirurgie

- “Roboter” i.A. direkt (und in “real-time”) vom Chirurgen angesteuert (Telemanipulator)
- Distanz OP - Chirurg beliebig
- Feedback (visuell, haptisches Feedback, ...)
- Chirurg muß auf Feedback vertrauen!



Intra-Operative Registrierung ...

- Bilden einer ständigen Beziehung zwischen Plan-Daten und der Anatomie des Patienten
- **Marker (“Fiducials”):**
werden prä-operativ (vor der Aufzeichnung!) implantiert; ständiger Vergleich der aktuellen und der ursprünglichen (prä-operativen) Position; NT: chirurgischer Eingriff zur Anbringung der Marker (teilweise weit entfernt vom eigentlichen Operationsbereich)
- **“Surface-Based Registration”:**
Verwendung von Vergleichsflächen (pre- und intra-operativer Daten). VT: kein zusätzlicher Eingriff notwendig!
NT: erfordert große Genauigkeit des 3D-Modells und der intra-operativ aufgenommenen Daten!

Sicherheit von Medizin-Robotern

Vergleich zu IR-Systemen ...

- Menschen (Patient, Bedienpersonal) im Arbeitsbereich
Vergleiche mit entsprechenden Normen für den Einsatz von IR! Medizin-Roboter müssen nah am Menschen arbeiten - in ungeordneter und sich ständig ändernder Umgebung! ➔ **EINSATZ WEITERER SENSORSYSTEME**
- Konsequenzen aus Fehlverhalten
- Nicht-generische Anwendungen
IR Roboter führen i.A. gleichartige Befehle zyklisch aus. Medizin-Roboter: jeweils anzupassen an Patienten. ➔ **TESTS, SIMULATION**

Sicherheit von Medizin-Robotern

Mögliche Fehlerquellen ...

- fehlerhaftes Design
- Fehlfunktion von HW und/oder SW Komponenten
- Fehlinterpretation
- fehlerhafte / unvollständige Spezifikation

- ➔ **Absolute Sicherheit ist nicht möglich!**
- ➔ **“Fail Save” Verhalten von Medizin-Robotern**

Sicherheit von Medizin-Robotern

Sicherheits-Strategien ...

- Redundanz
Verdoppelung oder Verdreifachung wesentlicher Module (HW und SW);
Verwendung sich ergänzender Sensorsysteme → “Sensor Fusion”
- Einschränkung der Funktionsvielfalt
Fehler-Wahrscheinlichkeit steigt mit zunehmender Komplexität; Mögliche
Abhilfen: Beschränkung Freiheitsgrade, Beschränkung Arbeitsbereich,
Verringerung der Arbeitsgeschwindigkeit, etc.

➔ Spezielle Anforderungen für Rehab-Roboter!

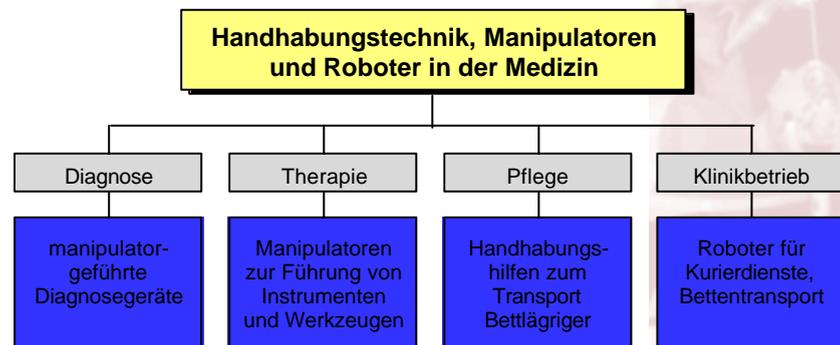
Roboter in der Medizin

- Medizinroboter: einfache Laborroboter bis hoch-komplexe
Roboter in der Chirurgie
- Analogie zu Automatisierungstechnik: Geschwindigkeit,
(Wiederhol-)Genauigkeit, Zuverlässigkeit, Effizienz
- Verstärkter Einsatz für Medizinroboter ist zu erwarten
(gerade im Bereich OP-Roboter)

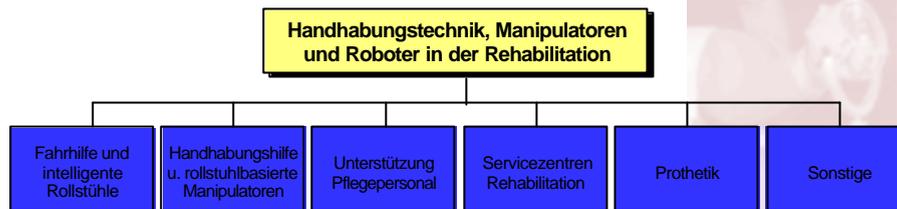
Roboter in der Medizin

- Robotereinsatz MUSS(!) gegenüber “herkömmlichen” Methoden Vorteile bringen ...
 - ◆ nicht “nur” bessere Performance; auch Kosten- und/oder Zeitersparnis, einfache Bedienung, etc.
 - ◆ BEISPIEL: Ausfräsen Oberschenkelknochen für Einsatz einer Hüftprothese
Kontakt Prothese - Knochen: Roboter 83% - Mensch 30%
durch geänderte OP-Technik: Mensch → 83%

Roboter in der Medizin



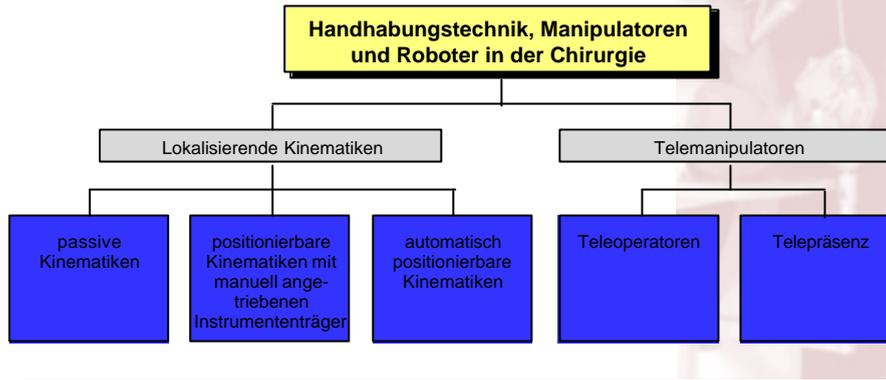
Roboter in der Rehabilitation



Mögliche Anwendungen von Servicerobotern in der Rehabilitation

Anplikation	Kurzbeschreibung	Nutzwert	Potential	Markteinführung
Faltbarer mobiler Rollstuhl	Ein Rollstuhl wird automatisch zum KFZ-Kofferraum bewegt und dort gefaltet verstaut	↑	↗	1996
Handhabungshilfe für Behinderte	Mehrachsiges Kinematik mit Greifer als Handhabungshilfe für Behinderte	↗	↗	2000
Handhabungshilfe im Heimbereich	Mobile, auf einem Fahrzeuge angeordnete mehrachsige Kinematik mit Greifer	↗	→	2005
Körperteilführung	Rehabilitationsunterstützung durch Führung der betroffenen Körperteile	→	↓	1998
Aktive Endprothetik	Mvielektrische Signale werden über Stellmotoren in entsprechende Bewegungen an der Prothese umgesetzt	↑	→	2010

Roboter in der Chirurgie



ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

Mögliche Anwendungen von Servicerobotern in der Medizin

Applikation	Kurzbeschreibung	Nutzwert	Potential	Markteinführung
Fernmanipulierte Endoskope	Fernmanipulierte Betätigung von Werkzeugen, Instrumenten im Bereich schwer zugänglicher Körperpartien bei minimalem Operationstrauma	↑	↗	2005
Aktive Kinematik	Führung von Instrumenten, Werkzeugen, Diagnoseeinrichtungen bei chirurgischen Eingriffen	↑	↑	2000
Medikamente und Essenstransport	Transport von Medikamenten und Speisen zwischen verschiedenen Klinikstationen durch autonome mobile Fahrzeuge	↗	↑	1994
Orthopädie-roboter	Handhabungssystem zur Unterstützung des Operateurs bei chirurgischen Eingriffen	↗	↗	1994
Chirurgiesimulator	Simulation des chirurgischen Eingriffes im Vorfeld der Operation	↑	↘	2000
Reinigung / Desinfektion	Durchführen von Reinigungs- und Desinfektionstätigkeiten durch ein teilautonomes mobiles System	↗	↑	1997
Bettentransport	Durchführen von Bettentransporten durch ein autonomes mobiles Fahrzeug	→	↑	1997
Zahnbearbeitung	Unterstützung des Arztes bei der Präparierung von Zähnen für den Einsatz von Füllungen, Teilkronen u.ä.	↗	↗	2005
Diagnose / Hauttherapie	Abstands- / kraftgeregelter Bewegung über Körperpartien (Dermatologie, Ultraschalldiagnose)	↗	↗	1998

ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

"Medical Robots" - Entwicklungspotentiale

- » **Steuerungstechnik:**
dezentrale Steuerungsarchitekturen, Integration, Neuroinformatik
- » **Sensorik:**
Integration von Erkennen und Eingreifen, Standardisierung von Sensorschnittstellen, Bildverarbeitung
- » **Antriebstechnik:**
höhere Leistungsdichte, Integration von Sensorik und Aktorik, Miniaturisierung
- » **Mensch-Maschine-Schnittstelle:**
Verbesserung der Sprachverarbeitung, Erlernen und Interpretation von Gestik, verständnis-multimodale Eingabe, Plausibilitätskontrolle
- » **Sicherheitstechnik:**
Entwicklung raumüberwachender Sicherheitssensoren, Gestaltungsregeln für den Entwurf sicherheitsgerechter Systemlayouts

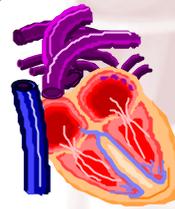
"Medical Robots" - Diffusionshemmnisse

- ❖ hohe Systemanschaffungskosten,
- ❖ lange Entscheidungswege der öffentlichen Kranken- und Pflegeeinrichtungen,
- ❖ weitestgehende Abhängigkeit der Hersteller von staatlichen Förderprogrammen

Nicht nur technische Machbarkeit als Zielsetzung für Entwicklung!

SR in Medizin - Nutzen / begünstigende Faktoren

- Hohe Bereitschaft und Aufgeschlossenheit bei Ärzten und Pflegepersonal bezüglich Einführung und Nutzung modernster Gerätetechnik
- Medizinroboter kann an bestehende technische Einrichtungen anknüpfen (z.B. Erweiterung Diagnoseeinrichtungen)
- Hohes Forschungspotential bei Medizintechnik Anbietern
- Modul- Baukastensysteme anstatt teurer Speziallösungen



SR in Rehabilitation - Nutzen / begünstigende Faktoren

- Qualifiziertes Pflegepersonal ist schwer erhältlich. sinnvolle Entlastung von Routineaufgaben ⇒ pflegerische Aufgabe wieder in Vordergrund
- Weiterentwicklung der Gesamt- und Teilsysteme von SR (Nachfrage!) im Bereich Prothetik und Behindertenhilfen
- Anerkennung als Adaptionshilfe durch Kassen ⇒ Reduktion der Kosten



Roboter in der Medizin

- ▣ Verwendung spezieller und auf die Anwendung „maßgeschneiderter“ Robotersysteme statt Roboter „von der Stange“;
- ▣ Der Roboter ist ein Werkzeug für den Chirurgen - kein Ersatz desselben;
- ▣ Visualisierung ohne Berücksichtigung des Tastsinn ist „blind“;
- ▣ Simulation spielt eine zentrale Rolle bei der Verwendung medizinischer Robotersysteme;
- ▣ Ein neuer Entwicklungsschwerpunkt sollte die Entwicklung verbesserter, anwender-orientierter Mensch-Maschine-Schnittstellen sein;

Labor-Robotersysteme

- Vertikalknickarmroboter:
 - ◆ Beckman Coulter ORCA
 - ◆ CRS F3
 - ◆ Mitsubishi RV-E2 (von Rixan oder Zymark)
- Zylinderkoordinatenroboter:
 - ◆ Zymark Zymate XP
 - ◆ Zymark Twister
 - ◆ Hudson Controls Plane Crane
 - ◆ CRS CataLyst



HELPMATE: Helpmate Inc.

- Roboter für Transportaufgaben im Spitalsbereich (Essen, Medikamente, etc.)
- Sicherheitseinrichtungen
- Navigation
- Spezialeinrichtungen (Liftsteuerung)



MIT-Manus

- Robotersystem für physikalische Therapie nach Schlaganfall
- Bewegungstherapie für Arm (Beine, Handgelenk, Hand)
- Anweisungen für Patienten über Video-Schirm
- Verschiedene Einstellungen des Führungsverhaltens
- Roboter als „Meßgerät“ für Kraft/Moment
(aufgezeichnete Daten über Internet
→ Telemedizin, Expertise)
- Roboter als Tool in der Ausbildung von Therapeuten
(Replay-Function; „Master-Slave“-Setup für Ausbildung)
- Gute Akzeptanz durch Patienten, guter Therapieerfolg



ALL TERRAIN WHEELCHAIRS: University of Pennsylvania

- “To explore strange new places, seek out new frontiers ...
To boldly go where no wheelchair has gone before...”

- Unterstützung bei alltäglichen Hindernissen (Randsteinkante, Stufen, etc.)
- konventioneller Rollstuhl mit 2x 2DOF Manipulatorarmen
- Sicherheitseinrichtungen
- effizienter Energiehaushalt
- robuster, modularer Aufbau



RAID (Robot for Assisting the Integration of the Disabled) Oxim Ltd. - Oxford, UK

- Arbeitsstation zur Hilfestellung bei alltäglichen Aufgaben (Lesen, Trinken, Telephonieren, ...)
- Roboter (montiert auf Verfahrereinheit) + Zusatz-regale + verschiedene Spezialgreifer
- Gesteuert durch PC (Windows OS) + diverse Eingabehilfen
- Infrarotschnittstelle - Verbindung zu externer Steuerung (z.B. Joysticksteuerung Rollstuhl)
- Optionale Peripheriegeräte (Printer, Scanner, ...)

MANUS: Exact Dynamics, NL

6 DOF Roboterarm + Linearachse
Steuerung durch Kopf-, Kinn-, Hand- und
Zehenbewegung
Rutschkupplung in Antriebssträngen

Aktuelle Entwicklungen:

- Gewichtsreduktion (27kg → 20kg)
- Erhöhung der Nutzlast
- Leichter Wechsel der Montageart
- Erhöhte Sicherheit
- CE Prüfzeichen



Handy 1: Rehab Robotics, UK

- Robotersystem zur Unterstützung bei alltäglichen Aufgaben: Essen, Trinken, Schminken, Zahnpflege, etc.
- Ansprechendes Design, leicht zu bedienen („Handy Single Switch“)



“Robotic Room”: RCAST, University of Tokyo

- Der gesamte Raum ist ein “Roboter”
- Umgebende Sensoren und Aktuatoren unterstützen den Menschen auf unaufdringliche Art
- Der Raum interagiert mit den Menschen



PAM-AID (Personal Adaptive Mobility AID for Frail and Elderly Blind People) EU Telematics Applications Program

- Mobilitätshilfe für blinde Personen
- Navigation (Ausweichen von Hindernissen, Warnungen) und physische Unterstützung
- Wiederherstellen der persönlichen Autonomie

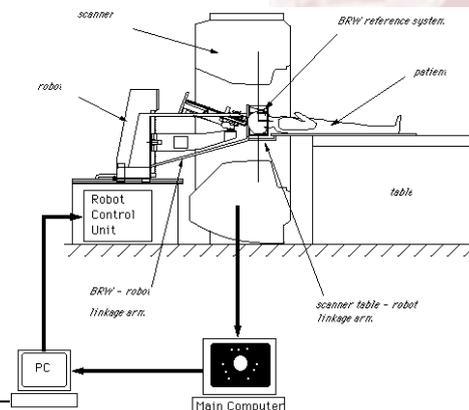


R100: NEC Incubation Center

- „Robot Companion who will become like a family member“
- **Sehen**
Stereo-Video System; Kollisionsvermeidung in real-time + Personenerkennung
- **Hören**
3 on-board Mikrophone / Lokalisation der Schallquelle + Spracherkennung
- **Sprechen**
Sprachsynthesemodul / Lesen von e-mails; Abspielen von Musikstücken
- **Fühlen**
„Streicheleinheiten“; Temperatur, Helligkeit, Tageszeit, Ladezustand Batterien

MINERVA: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) - IMT

- Chirurg: Definition des Eintritts- und des Zielpunkts
- Roboter: Berechnung der Koordinatentransformation; Einschneiden der Kopfhaut, Perforieren des Schädels, Durchdringen der Hirnhaut; Führen einer Sonde bis zum Zielpunkt (Entnahme einer Gewebeprobe, Aspiration, etc.)



Evolution 1: Universal Robot Systems

- Hexapod-Plattform + Z-Achse = 7DOF („Hexapod Z™“)
- Echtzeit-OS VxWorks
- Redundantes Meßsystem
- Kollisionsüberwachung
- Träger-/Vorpositionierungssystem
→ aktive mobile Plattform
(gesteuert über Drucksensoren an Handgriffen)



MKM (Mehr-Koordinaten-Manipulator): Fa. Carl ZEISS

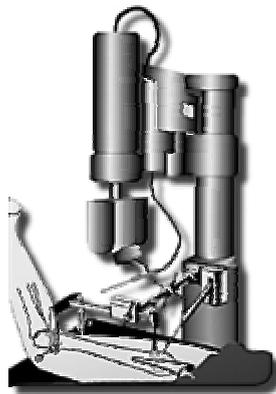


CASPAR (Computer Assisted Surgery Planning and Robotics): Chirurgische Klinik der Univ. Erlangen

- Computergestützte Endoprothetik des Hüftgelenkes
- Bestreben: zementfreie, möglichst großflächige, kraftflüssige und trajektorengerechte Verankerung der Implantate
- kleine Zugänge → indirekter Zugang zum Operationsgebiet → keine Möglichkeit einer Präzisionsfräsung im Oberschenkelchaft über eine Länge von 15 - 20 cm
- Robotertechnik zur verbesserten intraoperativen Nutzung der prä-operativ ermittelten Daten



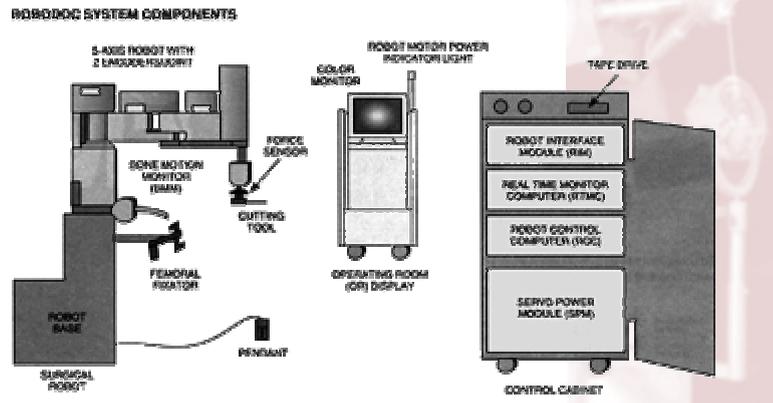
ROBODOC: Integrated Surgical Systems Inc.



- Zementfreie Verankerung der Hüftprothese durch natürliches „Verwachsen“ zwischen Knochen und poröser Implantatoberfläche → Abstand Knochen/Implantat < 0,25 mm!
- „Herkömmliche Methode“: Verwendung von Meisel und Ahlen → Schaft nicht exakt, Oberfläche unzufriedenstellend, Frakturen, etc.
- Robotertechnik zur präzisen Fertigung der Kavitation für das Implantat



ROBODOC: Integrated Surgical Systems Inc.



ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

AESOP (Automated Endoscopic System for Optimal Positioning) Computer Motion Inc.

- Sprachgesteuerter Roboter zur Führung der Optik bei laparoskopischen Eingriffen
- Rascher, einfacher Aufbau im OP (zirka 5 Minuten)
- Verbindung zwischen Roboter und Optik durch Magnetkonnektor
- 23 Sprachbefehle
- Weitere Steuerungsarten: Hand- und Fußsteuerung
- Speichern und Anfahren von Punkten



ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

ZEUS: Computer Motion Inc.

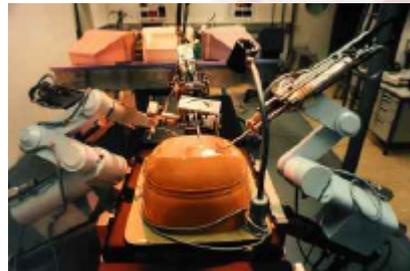
- Robotersystem für komplexe MIS
- 3 Robotersysteme, Controller, OP-Konsole
- Kamera-Roboter: Steuerung über Sprachbefehle, OP-Roboter - Steuerung über Master-Slave Vorrichtung
- Skalierung der Bewegung am Master-Manipulator → exakte Bewegungen auf kleinstem Raum (z.B. By-Pass Operationen)



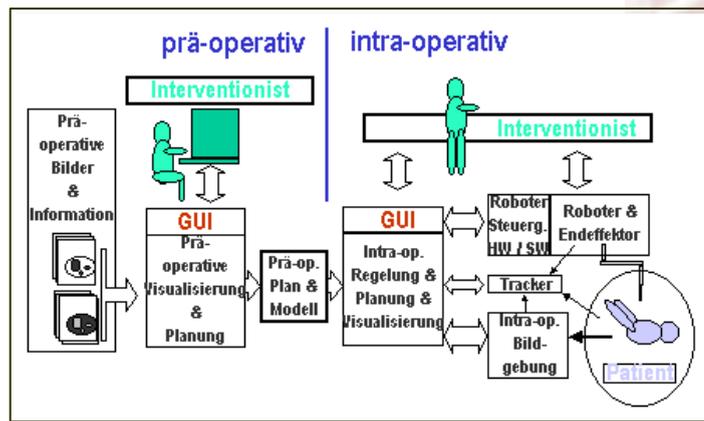
ARTEMIS: Institut für Angewandte Informatik, Forschungszentrum Karlsruhe

ARTEMIS Arbeitssysteme:

- TISKA:
 - ◆ zwangsgeführte Kinematik zur mechanischen Garantie des Bauchdurchstichpunktes als invarianten Punkt
- ROBOX:
 - ◆ mechanischer Grundaufbau aus zwei Kreisbogensegmenten → Einstichpunkt in der Bauchdecke = invarianten Punkt
 - ◆ kontrollierte Bewegung des Endoskops in vier DOF
 - ◆ Eingabe: Sprache, Rollkugel / Maus, Fußpedal, Instrumenten-Tracking



Aufbau eines CIS-Systems



ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

PAKY (Percutaneous Access to the KidneY) - Johns Hopkins University

- Herkömmliches Verfahren: Chirurg muß Hohlnadel exakt positionieren und einführen - "geleitet" durch Gefühl und Röntgenbild
- mit PAKY:
 - ◆ genauere Platzierung
 - ◆ Eingriff schneller und sicherer
 - ◆ ständige Überwachung des Vorgangs



ARC Seibersdorf research

Inst. für Handhabungsgeräte und Robotertechnik

RAMS: Robot Assisted Micro Surgery (Jet Propulsion Laboratory)

- Robotersystem für Operationen auf kleinstem Raum (Augen, Nase, Ohren, Gehirn)
- 6 DOF Master-Slave Telemanipulator mit programmierbarer Steuerung
- Standard-Ansteuerung von RAMS: Telemanipulation, inkl. Kraft- und Struktur-Feedback
- Zuschaltbare Automatiksteuerung für Robotertrajektorien
- Verbesserung des "Größenmaßstabes" für Mikro-Chirurgie (kein Zittern, exakte Positionierung, etc.)
- Positioniergenauigkeit am Slave-Arm = 25 μm

Milli- und Mikroroboter in der Medizin

- Mikroroboter
 - ◆ Einsatzbereiche: Diagnose, Chirurgie, Behandlung (z.B. Gefäßchirurgie, Diagnose der Gefäßwände)
 - ◆ Abmessung: \varnothing 0,1-2 (10) mm, Länge 0,2-10 (20) mm
 - ◆ Versorgung durch Kathederkanäle (Ziel: "drahtlose" Versorgung)
- Manipulatoren für die Endoskopie
 - ◆ aktive "Endeffektoren" für MIS

