

Roboter für Menschen – Zielvorstellungen und Ansätze für autonome „smarte“ Serviceroboter

Alois Knoll

Technische Universität München, Fakultät für Informatik

<http://www.knoll.informatik.tu-muenchen.de/~knoll/>

Einführung

Noch vor zwanzig Jahren wurde der Begriff des Roboters entweder mit realen „freiprogrammierbaren Handhabungsautomaten“ bar jeglicher Intelligenz oder aber mit fiktiven humanoiden Wesen verbunden, gegenüber deren Intelligenz die menschliche nur wie ein Durchgangsstadium der Evolution wirkte. Der Abstand zwischen beiden Welten schien unüberbrückbar. Inzwischen stellt sich die Situation jedoch differenzierter dar:

- Die *Technik kleiner Rechner* ist um Größenordnungen leistungsfähiger geworden: neben der Verhundertfachung der Rechengeschwindigkeit in den letzten 15 Jahren hat sich die Speicherkapazität mehr als vertausendfacht, und der Preis ist auf Zehntelbruchteile gefallen. Vor allem aber hat sich der Energieverbrauch dramatisch vermindert und die Abmessungen sind so geschrumpft, daß die Rechner im Gesamtsystem Roboter mitgeführt werden können und keine wesentlichen konstruktiven Rücksichten mehr erfordern. Diese Entwicklung wird weitergehen – zunächst durch Fortsetzung der Geschwindigkeitserhöhung, danach durch Parallelschalten von Verarbeitungseinheiten.¹
- Ähnliche Fortschritte wie die Rechentechnik hat die *Methodik zur Programmierung* gemacht: u.a. mit dem Durchbruch des Paradigmas der objektorientierten Programmierung auch im Bereich eingebetteter Systeme und Echtzeitanwendungen und in dessen Folge der systematischen Wiederverwendung getesteter Programmmodule, stehen auch für fast alle denkbaren Einsatzfälle in der Robotik die grundlegenden Algorithmen zur Verfügung. Damit sind Steuer-

¹ Nur der Vollständigkeit halber sei bemerkt, daß natürlich der Zeitpunkt absehbar ist, an dem die Summenleistung die „Rechenkapazität“ des Menschenhirns überstiegen haben wird. Daraus aber ableiten zu wollen, daß damit die Intelligenzleistung des Menschen zwangsläufig erreicht werde, ist ebenso unsinnig wie die Behauptung, bestimmte Tiere seien intelligenter als Menschen, weil sie ein größeres Hirnvolumen besitzen. Davon abgesehen wird natürliche und künstliche Intelligenz sowieso nie vergleichbar sein, Roboter werden immer *anders* bleiben.

rungsprogramme einer Komplexität praktisch handhabbar geworden, wie es früher nicht möglich war. Ferner gibt es inzwischen verschiedene Programmierumgebungen, die speziell auf die Anforderungen der Robotik zugeschnitten sind.

- Schließlich ist auch die *Mechanik* bzw. die Verbindung von Mechanik und Elektronik (Mechatronik) der Roboter robuster, präziser und wesentlich zuverlässiger geworden. Ganz neue Klassen von Apparaten sind entstanden: mobile Roboter (Fahrzeuge für innen und außen, Flug- und Unterwasserroboter, Spezialelemente für Aufgaben wie Fassadenputzen), Mikroroboter; darüber hinaus Teilsysteme wie anthropomorphe Arme und Mehrfingerhände – Meisterwerke der Präzisionsmechanik (siehe z.B. (IEEE 2003) als Übersicht).

Auf der Grundlage der vorstehenden gewaltigen Ingenieursleistungen sind in den Forschungsdisziplinen der Signalverarbeitung, Mustererkennung, Künstlichen Intelligenz sowie in jüngster Zeit auch der Neurobiologie und Hirnforschung eine Vielfalt von Methoden, Verfahren und Systeme entstanden, die die Übertragung perceptiver, kognitiver und aktorischer Leistungen, wie wir sie bei einfachen Lebewesen beobachten können, auf mechanische Systeme zum Ziel haben.

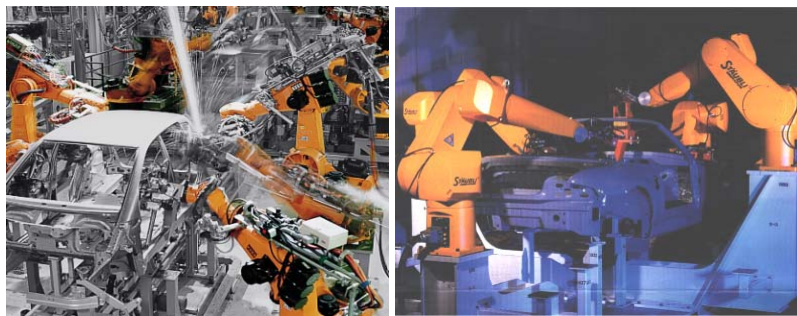


Abbildung 1. (a) Kuka-Roboter für Schweißaufgaben im Automobilbau. (b) Stäubli-Roboter zur Karosserievermessung.

Insgesamt ist zwischenzeitlich ein Stand erreicht worden, der die Beschäftigung mit Robotik und die Einführung von Robotern in die Fabriken nicht mehr zwangsläufig zu einer Odyssee durch diverse Disziplinen wie Maschinenbau, Elektrotechnik, Regelungstechnik und Softwaretechnik mit unzähligen unfreiwilligen Zwischenstopps macht; es kann vielmehr von einer (Mindest-)Verfügbarkeit und Stabilität der Komponenten ausgegangen werden, und die Systeme können ingenieurgemäß synthetisierend aufgebaut werden. Dies gilt insbesondere natürlich für den Einsatz von Robotern in der Industrie (für Routineaufgaben wie Schweißen, Lackieren, Kleben, zunehmend aber etwa auch für Verpackung und für Präzisionsmessungen). Dabei stehen die stationären Roboter im Vordergrund (Abbildung 1 zeigt zwei typische Anwendungen), ein Trend zu mobilen Transportsystemen, die nicht nur eine fest vorgegebene Route abfahren, sondern ein Mindestmaß an

Adaptationsvermögen an sich ändernde Umweltbedingungen aufweisen, zeichnet sich ab.

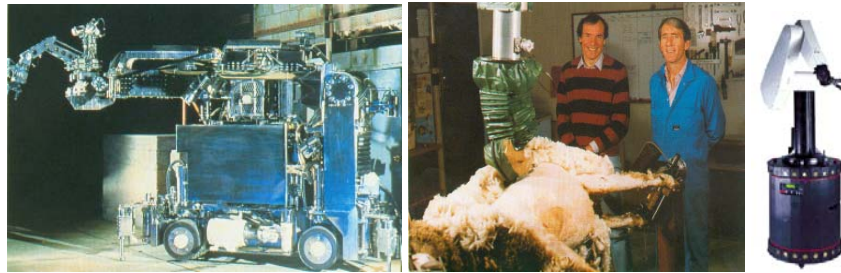


Abbildung 2. Einige Beispiele für Serviceroboter. Einsatz im Kernkraftwerk, Schafscherroboter, fahrbarer Standard-Roboter.



Abbildung 3. Beispiele für Spezialbauformen zur besseren Adaptation an die Umwelt. Einsatz im Freien mit dem Ziel der Minenräumung bzw. der Kanalinspektion (beide Fraunhofer-AiS).

Programmiert werden die Robotersysteme heute mit Hilfe sehr komplexer CAD-Werkzeuge, die ihrerseits vernetzt werden können mit Fabrik- und Produktionsplanungssystemen. Allerdings kann nach wie vor keine Rede davon sein, daß das Mitte der achtziger Jahre propagierte Ziel der vollständigen off-line-Programmierung erreicht ist, das darin bestand, in Robotersimulationssystemen Aggregate zu konstruieren, aus diesen Konstruktionsplänen automatisch Roboter-Steuerungsprogramme zu erzeugen und diese dann von den Robotern vor Ort ausführen zu lassen. Dazu wäre es notwendig, die der Simulation zugrundeliegende Geometrie des Roboteraufbaus in der Montagezelle exakt zu kennen und weitere Modellierungsfehler (z.B. bezüglich der Roboterdynamik) ausschließen zu können. Da dies nur in den seltensten Fällen gewährleistet werden kann, wird üblicherweise eine manuelle Korrektur notwendig, die direkt am Standort des Roboters mit einem Handprogrammiergerät vorgenommen wird.

Dies ist zeitaufwendig und fehleranfällig, zumal auf dieser Ebene nur sehr einfache Umgebungen zur Verfügung stehen (in manchen Fällen Programmierspra-

chen auf der Ebene speicherprogrammierbarer Steuerungen). Selbstredend ist es auch nicht möglich, die vorgenommenen Korrekturen wieder in das Ausgangsmodell des Robotersimulationssystems zu projizieren.

Es bleibt ferner festzuhalten, daß in den Fertigungsstätten anspruchsvolle Sensorik, speziell zur Bildverarbeitung, bislang kaum verwendet wird – eigentlich nur dort, wo es ganz und gar unvermeidlich ist. Dies hat verschiedenste Gründe, sicher spielt die frühe Euphorie und die dann folgende Ernüchterung unmittelbar nach Verfügbarkeit digitaler Bildverarbeitungssysteme eine gewisse Rolle. Dennoch ist hier ein gewisser Wandel festzustellen, bestimmte Fertigungsaufgaben lassen sich in der geforderten Qualität nur noch bewältigen, wenn über sensorische Rückkopplungen für eine präzise Führung der Roboter gesorgt wird.

Kognitionsorientierte Serviceroboter

Ganz ohne Zweifel besteht also ein erheblicher Bedarf an solchen Robotersystemen, die über eine leistungsfähige Sensorik verfügen und sich an neue Aufgabenstellungen anpassen lassen. In der Tat gibt es eine Reihe von Versuchen, Serviceroboter zu bauen, die anspruchsvolle Dienstleistungen übernehmen können: Material- und Werkzeugtransport in Fabriken, Bringdienste im Krankenhaus, Reinigungsaufgaben im Heim, Inspektionen unter Wasser (Abbildung 2 zeigt einige Beispiele). Dennoch haben sich die Erwartungen an diese neue Klasse von Robotern nicht erfüllt; ihre Akzeptanz ist weit hinter den ursprünglich hochgesteckten Erwartungen zurückgeblieben. Dies hat im wesentlichen zwei Gründe:

- die Anpassung solcher Roboter an nur leicht von den ursprünglichen Aufgaben abweichende *tasks* ist sehr schwierig und muß vielfach vom Hersteller vorgenommen werden. Das gilt auch bei Veränderungen im Umweltausschnitt, in dem der Roboter agiert;
- die Kommunikation und die Kooperation mit dem Menschen über einer vorgegebenen Aufgabe ist ein weithin ungelöstes Problem.

Beides führt dazu, daß Menschen diese Roboter als ausgesprochen „dumm“ wahrnehmen und – schlimmer noch – ihre Dienstleistung vielfach auch nicht als Hilfe empfunden wird. Dies wird sich erst ändern, wenn das grundlegende Defizit, nämlich der zu geringe Grad an *Autonomie* und *Adaptivität*, den diese Roboter heute aufweisen, beseitigt werden kann.

Es rückt also die Frage in den Mittelpunkt des Interesses, wie die Möglichkeiten zur Implementierung einfacher bis komplexer sensorischer und kognitiver Leistungen so auf die vorhandenen Roboter-Plattformen aufgesetzt werden können, daß ein technisches System entsteht, welches bis zu einem gewissen Grad autonom handeln kann. Dabei ist Autonomie durchaus so zu verstehen, daß das System in Abhängigkeit von sich ständig wandelnden Umweltsituationen nicht nur – losgelöst von menschlichen Kommandos – zielgerichtet arbeitet, sondern daß ein externer Beobachter Verhaltensweisen des Systems erkennen kann, die nicht explizit bei der Konstruktion des Systems vorgegeben wurden.

Flexibilität des Roboters (Artefakts) bezüglich sich strukturell ändernder Aufgabenstellungen setzt zum einen *kognitive Leistungen* voraus: Objekt- und Umwelterkennung, Planung von Bewegung und Handlungsausführung sowie deren Kontrolle, Lernen von Objekteigenschaften und langen Handlungssequenzen (mit sensomotorischen Parametern), Generalisierung auf neuartige Situationen, Bewertung von Situationskontext, Generalisierung und Übertragung von kontext- oder raumbundenem gelerntem Wissen auf neue Situationen, selbständige Bildung von autonomem Eigenverhalten aus Erfahrung und Hintergrundwissen (Analogie zur Übertragung von gelernten Handlungen ins Kleinhirn des Menschen), Kurz- und Langzeitgedächtnis – eine enorme Herausforderung an die Informatik im Verein mit den Kognitionswissenschaften.

Zum anderen ist entscheidende Voraussetzung die Anpassung von Körper und Aktorik an die Umwelt – ihre aktorische Ausrüstung sollte es den Artefakten ermöglichen, in halbstrukturierten Umgebungen arbeiten zu können, in denen sich Menschen natürlich bewegen: Wohnungen, öffentliche Einrichtungen, Fabriken, Kraftwerke. Darüber hinaus ist die körperliche Anpassungsfähigkeit Voraussetzung dafür, Aufgaben übernehmen zu können, die Menschen nicht oder nur mit erheblichem technischen Aufwand bearbeiten können; etwa in lebensfeindlicher Natur (erste Beispiele siehe Abbildung 3), basierend auf der eigenständigen Entwicklung von adäquaten Überlebensstrategien. Für die Anpassung ergeben sich zwei Möglichkeiten: entweder die Nutzung von Prinzipien der Selbstorganisation und Wachstumsprozessen (im Sinne einer selbständigen, vom Designer nur „genetisch vorgeprägten“ Anpassungsstrategie, die sich an den von der Umwelt diktierten Randbedingungen anlehnt und den Anpassungserfolg geeignet bewertet) oder die Adaptation der Mechanik über zusätzliche Vorrichtungen bzw. Werkzeuge. Die erste Möglichkeit entspricht der biologischen Evolution über tausende Jahre hinweg, die zweite erfordert die Weitergabe von Erfahrungswissen über den Gebrauch von Vorrichtungen von einer „Generation“ an die nächste. Schließlich ist es denkbar, daß Artefakte mit redundanter Aktorik ausgerüstet werden, deren Gebrauch sich durch Übung verbessert (durch zusätzliche Verfügbarkeit von Ressourcen; das entspricht der Vergrößerung von Hirnarealen, die zur Steuerung häufig genutzter Gliedmaßen eingesetzt werden).

Der Aufbau adäquater sozialer und interaktiver Kommunikation zwischen Artefakt und Mensch erfordert (i) die bidirektionale Nutzung aller dem Menschen zur Verfügung stehenden Modalitäten (optisch-visuell, sprachlich-auditiv, gestisch-mimisch) und (ii) die Fähigkeit des Artefakts zur *Vorhersage* von Bewegungs-, Handlungs- und Kommunikationsabläufen; einschließlich eines Verständnisses von menschlichen Emotionsäußerungen sowie der Darstellung innerer „emotionaler Zustände“ des Artefakts. Der erste Punkt bedingt neben der Erkennung und Produktion von Äußerungen in allen Modalitäten auch die Erkennung und Befolgung menschlicher *Dialogmuster* – ein ausgesprochen schwieriges Problem. Der zweite Punkt ist die Voraussetzung für *einsichtiges Verhalten*: Bei Vorlage einer Aufgabe werden die verschiedenen Lösungswege mental durchgespielt und der beste in Handlung umgesetzt. Nur wenige Lebewesen (Menschen und Menschenaffen) sind dazu in der Lage, dennoch wird sie vom Artefakt unabdingbar abge-

fordert, wenn es vom Menschen als Handlungspartner ernstgenommen werden will.

Strebt man die Schaffung von künstlichen Wesen an, die grundlegend neue Fähigkeiten zur Anpassung an Umweltgegebenheiten im weitesten Sinne aufweisen und ebenso eine neue Qualität von kognitiven Leistungen zu Umweltwahrnehmung und Lernen, zur Kooperation und Interaktion mit dem Menschen und mit ihresgleichen, so ergeben sich zwei miteinander verwobene Problemkreise: Entwicklung des Erkenntnisapparats und Entwicklung der Körperlichkeit. Mit der Problematik der Steuerung des Erkenntnisapparats und seiner eigenständigen Weiterentwicklung sind u.a. folgende grundlegende Fragen verbunden:

- Welches Wissen wird dem Artefakt initial „eingepflanzt“, welches Wissen/welche Verhaltensmuster und welche Strukturen lernt es hingegen aufgrund sensorischen Inputs, vor allem aber – *wie* (was hängt vom Kontext ab, was ist an Vorwissen notwendig, welche Instinkte gibt es)?
- Was weiß das Wesen über sich (Form, Zustand, Verhalten, Wünsche, Intentionen, Annahmen, Fähigkeiten) und seine Umgebung, was muß demgegenüber der Designer wissen?
- Welche Strategien hat es zum Erkunden der Umwelt (der eigenen Interaktion mit ihr) und wie kann Wissen durch aktives Handeln konstruiert werden (Nahrungssuche, Neugierde, Suche nach sozialem und kommunikativem Kontakt)?
- Welche Information ist aus internem Wissen ableitbar, für welche wird (zusätzlicher) sensorischer Input benötigt und wie wird dieser dann vor Erfahrungshintergrund und Handlungsergebnissen bewertet, was wird in das Gedächtnis übernommen?
- Wie können Repräsentationen aufgebaut sein, die zur erweiterbaren Darstellung des internen Wissens um die Außenwelt und um die eigene Kompetenz geeignet sind und dabei Faktoren wie Raum, Zeit und inneren Zustand einbeziehen?
- Wie werden Konzepte und Begriffe der menschlichen Vorstellungswelt gelernt, wie entstehen Bedeutungen und wie sind diese in den Sensor- und Handlungsmustern gegründet? Können aus dem menschlichen Umgang mit den Begriffen eigenständig Schlüsse für deren Verwendung bzw. das eigene Verhalten gezogen werden?
- Wie kann dem Menschen ein Zugang zu den Erfahrungen des Artefakts geschaffen werden, die in derselben Welt wie die menschlichen gemacht werden – und dennoch sicher anders sind? Welche Erfahrungen sammeln beide im Umgang miteinander?
- Besteht am Ende die Möglichkeit, daß Operationen über diesen (oder höheren) Repräsentationen ein eigenes (Ich-)Bewußtsein oder die Fähigkeit zur Introspektion schaffen?

Mit dem Problemkreis der Entwicklung der Körperlichkeit, der Anpassung der aktorischen Fähigkeiten an die Umwelt und der Veränderung der Umwelt durch das Artefakt sind weitere komplexe Fragen verbunden:

- Inwieweit ist die physische Gestalt verantwortlich für den Ablauf der Erkenntnisprozesse bzw. zu deren Entwicklung?

-
- Kann aus der Evolution der natürlichen Vorbilder für Sensoren und deren hervorragende Anpassung an (Aufgaben-)Nischen gelernt werden (welche Faktoren sind anpaßbar, was kann verändert werden – und was nicht)?
 - Wie entstehen Repräsentationen und wie interagieren sie mit der Robotergestalt?
 - Wie können diese Repräsentationen genutzt werden, um die eigene Verhaltensplanung durch Probehandeln unter Berücksichtigung des dynamischen Eigenverhaltens, durch antizipatorischen Einbezug von Sensormustern (Verhalten anderer Systeme), durch Nutzung von Erfahrungen aus anderen Kontexten zu unterstützen?
 - Wie können Geräte und Werkzeuge, die Menschen benutzen, von den Artefakten zielgerichtet eingesetzt werden (durch abstrahierende Beobachtung des menschlichen Umgangs mit ihnen)?
 - Wieweit können Aktoren durch einfache mechanische Modifikationen an neue Aufgaben angepaßt werden? Wie werden diese modifizierten Aktoren gesteuert, wie ist der sensomotorische Regelkreis anzupassen, wie plastisch muß/kann diese Anpassung sein?
 - Besteht durch neue (biologische) Substrate am Ende die Möglichkeit, daß sich „Organe“ und „Effektoren“ durch Wachstum (in Einklang mit den kognitiven Fähigkeiten) während der Lebenszeit des Wesens entwickeln?

Allgemeiner ausgedrückt stellt sich also die Frage, wie ein *Bauplan* eines autonomen Systems aussehen kann, das seine kognitiven Fähigkeiten so weit wie möglich selbst entwickelt, durch Interaktion mit seiner Umwelt (dem Menschen) sowie durch Modifikation/Konstruktion seiner Effektoren eine (nur ihm verständliche) Wissensbasis aufbaut, damit zu *maschineller Erkenntnis* (im Gegensatz zum reinen Lernen) und zur Entwicklung neuer, nicht vor-programmierter *Aktionsmuster* fähig ist und diese auch dem Menschen in einer ihm verständlichen Form mitteilen kann.

Es muß also darum gehen, systematische Untersuchungen vorzunehmen, um die Wirkungsprinzipien biologischer Systeme auf der Signalverarbeitungs- und Konzeptebene im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit auf die kognitiven und aktorischen Leistungen von Artefakten zu untersuchen. Dies betrifft insbesondere

- die *Ko-Evolution* von Sensorik, kognitiven Leistungen und aktorischen Fähigkeiten während der Lebenszeit des künstlichen Wesens und/oder über eine *Vererbungs-komponente*;
- die Steuerung bzw. Nutzung von *Wachstumsdynamiken* des sensorischen Apparats und der äußeren Gestalt (Morphologie). Statt voller Kodierung (Spezifikation) des Entwicklungs- bzw. Wachstumsprozesses sollte nur eine gewisse *Disposition* vorgegeben und damit Prinzipien der Selbstorganisation ausgenutzt werden (in einem die Funktion optimierenden Sinne);
- die Herstellung einer *kognitiven Basis* zum Lernen von Strukturen in verschiedenen Kontexten: Kategorienbildung, Konzeptlernen, Objektbenennung, (z.B. durch Imitation) und Transformation der Erkenntnisse in eine für den Menschen nachvollziehbare Form;

- die Entwicklung geeigneter Substrate/Materialien und Realisierungstechniken (Hardware: analog, FPGA, hybrid, biologisch);
- die *strukturelle Kopplung* der Artefakte an die Umwelt sowie die Kopplung an den Menschen bzw. an andere Maschinen durch soziale und kommunikative Interaktion über geeignete dynamische Ontologien.

Welche könnten nun lohnenswerte Ziele für den Transfer der in diesem anspruchsvollen Rahmen zu entwickelnden Methoden in praktische Realisierungen sein? Es ergeben sich aus heutiger Sicht mindestens drei Anwendungssegmente:

- **Verbesserung klassischer Anwendungen.** In Frage kommen hier etwa die Bereiche Industrierobotik (Verbesserung des Programmierinterfaces durch Integration von Bild und Sprache; Lernen komplexer Handlungsabläufe, etwa in der Montage), fahrerlose Transportsysteme (Vereinfachung der Aufgabenspezifikation), Prothetik (Anpassung an variable Umweltbedingungen), etc. Hier ist der Nutzen offensichtlich, es wird beim Transfer in die Realwelt-Anwendungen hauptsächlich um die überzeugende Umsetzung von Labor-Prototypen in Komponenten gehen, die für den Alltagsgebrauch produzierbar sind.
- **Anspruchsvolle neue Aufgaben der adaptiven Servicerobotik.** Hier kann man an die praktische Demonstration des Potentials der Techniken durch Anwendung auf neue Gebiete denken, ohne direkten Blick auf sofortige Vermarktung. Ein Beispiel könnte ein in einem großen Flughafen navigationsfähiger künstlicher Kofferträger sein, der über ein multimodales Interface den Zielwunsch des Passagiers entgegennimmt („Zum Pan-Am-Flug nach San Francisco“) und ihm dorthin folgt – unter ständiger Adaptation seines Verhaltens (siehe dazu beispielsweise die Arbeiten im Morpha-Konsortium (Morpha 2003)).
- **Humanoide Roboter für Service und „Edutainment“.** Weltweit läßt sich in den letzten Jahren verstärkt der Trend feststellen, daß die Bereiche Ausbildung, Weiterbildung, anwendungsnahe Forschung und Technologieentwicklung im Sinne der Kommunikation von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen über „anfaßbare“ Exponate oder Produkte immer enger verwoben werden. Insofern ist es nicht verwunderlich, daß auch sehr komplexe Mechanismen wie der Roboterhund „Aibo“ (20 Antriebsfreiheitsgrade und etliche Sensoren; <http://www.us.aibo.com/>) zu hohen Preisen in hohen Stückzahlen verkauft werden. Entsprechend läßt sich der enorme Erfolg der diversen Roboterwettbewerbe (RoboCup; <http://www.robocup.org/> und „Lego Mindstorms“ <http://www.hands-on-technology.de/>, <http://mindstorms.lego.com/>) erklären. Humanoide Roboter für den Spielzeuggbereich sind in Japan bereits am Markt (mit Preisen zwischen US\$ 50 bis zu US\$ 40.000, letzteres nicht nur für Forschungsanwendungen!), Weltfirmen wie Fujitsu, Sony, Sega etc. gehen diesen Markt aggressiv an.

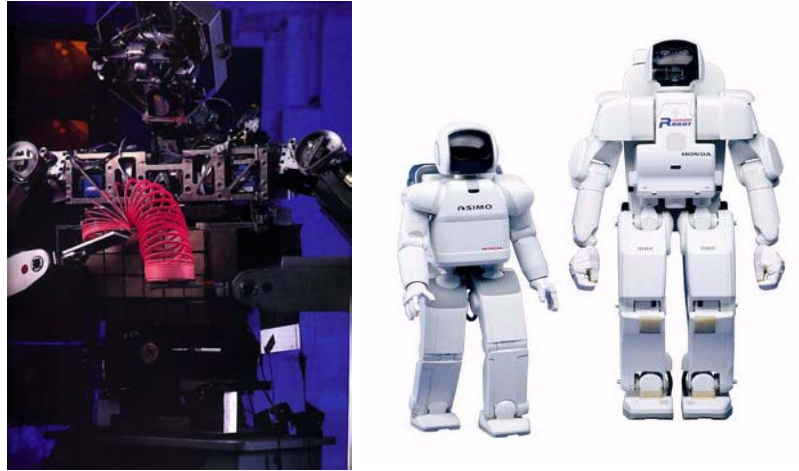


Abbildung 4. (a) Der Torso (Rumpfhumanoide) Cog, entwickelt seit 1993 am AI Lab des MIT (entnommen aus (Menzel 2000)). (b) Humanoide Roboter vom Typ Asimo (links) und P3 (rechts) von Honda.

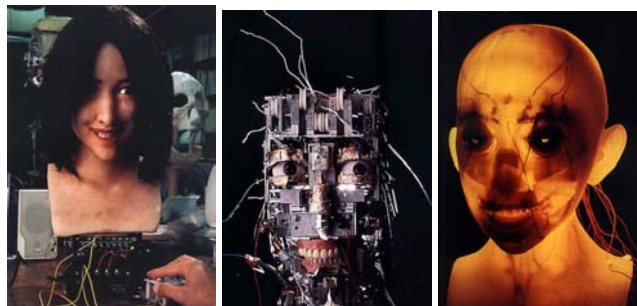


Abbildung 5. „Gesichtsroboter“ (entnommen aus (Menzel 2000)) – hier noch getrennt vom Torso.

Die im letzten Punkt genannten humanoiden Roboter können im Prinzip für den Bereich Edutainment drei neuartige Aufgaben übernehmen, sofern sie mindestens partiell die oben genannten Anforderungen erfüllen: zum einen können sie Teil eines größeren Szenarios sein, das dem Menschen vermittelt werden soll (als physikalisch animierte Exponate in Science Centers und Themenparks), sie können Interaktionspartner für Menschen sein (als Spielzeug und z.B. in der Filmindustrie oder im Theater), und sie können schließlich ihre eigenen Entwicklungsprinzipien erklären und demonstrieren – sich selbst also sowohl Subjekt und Objekt sein, und dabei einen Grad von Interaktivität realisieren, den Software im Rechner (virtuelle Wesen zur Veranschaulichung von Lehrinhalten) kaum jemals erreichen können.

Betrachten wir den Humanoiden als den idealen Serviceroboter², dann besteht die Zielvorstellung darin, daß er im Unterschied zu radbasierten mobilen Service-robotern, die eine bestimmte Aufgabenklasse ohne menschliche Überwachung ausführen können, dank seiner sensorischen und aktorischen Möglichkeiten in genau denselben *halbstrukturierten Umgebungen* arbeiten kann, in denen sich Menschen bewegen: Wohnungen, öffentliche Einrichtungen, Fabriken, Kraftwerke, möglicherweise auch Autos, etc. und *dabei dieselben Geräte und Werkzeuge* benutzen kann wie Menschen. Vor allem aber sollten sie in der Lage sein, mit ihren menschlichen Instruktoren *in menschengerechter Form* zu kommunizieren. Das bedeutet die Entgegennahme von Instruktionen in multimodaler Form (Sprache, Lautäußerungen, Gesten, Mimik), die Produktion von Kommentaren bzw. Rückfragen, und es bedeutet die *Lernfähigkeit* des Humanoiden längs aller dieser Dimensionen. Mit anderen Worten: es soll möglich sein, mit diesen Maschinen einen ganz natürlichen *Dialog* zu führen, und dabei nach initialer „kleinteiliger“ Instruktion einzelner Aufgabenschritte bei späterer Durchführung der gleichen oder einer ähnlichen Aufgabe nicht mehr wiederholen zu müssen, sondern auf die Lern- und Generalisierungsfähigkeit des Humanoiden vertrauen zu können.

Drei Beispiele für Lösungsansätze

Im folgenden wollen wir anhand von drei Beispielen aus unserer Forschungsarbeit verschiedene Aspekte der oben genannten Bereiche Aufgabenanpassung, Interaktion und Transfer von Fertigkeiten auf den Menschen illustrieren.

Multimodale Steuerung

Die heute zur Verfügung stehende Rechenleistung ermöglicht einen qualitativen Sprung in der Programmierbarkeit: die Interpretation von natürlichsprachlichen Anweisungen in Kombination mit optisch beobachteten Gesten (möglicherweise später auch Mimik) eines Instruktors im Kontext der vorliegenden Umweltsituation sowie die ebenso natürlichsprachlich geäußerte Rückmeldung des Robotersystems über erkannte Problemlagen. Mit anderen Worten: die Abwicklung eines *Handlungsdialogs* über einer – zunächst eingeschränkten Welt – rückt in den Bereich des möglichen; die Roboterinstruktion kann ganz ohne klassische Programmierarbeit vorgenommen werden. Ein reibungsloses und intuitiv vom menschlichen Instrukteur gesteuertes Ineinandergreifen von Anweisungsfolgen, Montagesequenzen und Umweltwahrnehmung erfordert dabei auf der Seite des Robotersystems ein ausgesprochen komplexes Zusammenspiel sensorischer, kognitiver und manipulativer Fähigkeiten.

² Eine andere Sicht ist die des Humanoiden als Kollektion und/oder Testplattform verschiedener mechatronischer Aggregate, von denen einzelne auch als Prothesen für Menschen dienen können.

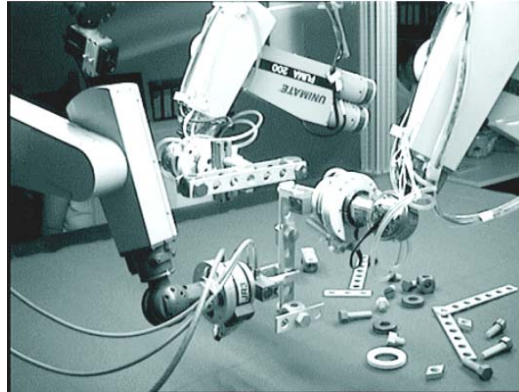


Abbildung 6. Laborsystem zur „mehrhändigen“ Montage von Baufix-Aggregaten (siehe (Hildebrandt 1999)).

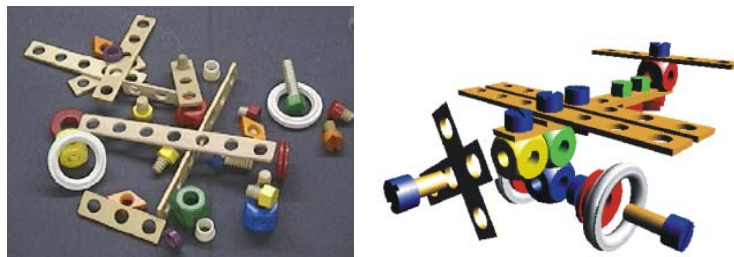


Abbildung 7. (a) Ausgangssituation von Bauelementen vor Beginn der Montage. (b) Angestrebtes Endergebnis der Montage.

Ein System, das eine solche Kopplung implementiert, wurde über viele Jahre hinweg an der Universität Bielefeld entwickelt, teilweise im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs 360 (Hildebrandt 1999, Zhang 2002). Es arbeitet im Labormaßstab robust und integriert wesentliche Fertigkeiten, die zukünftige stationäre Robotersysteme aller Voraussicht nach aufweisen werden (Abbildung 6). Ausgegangen wird dabei von einem Spielzeug-Szenario: die Aufgabe besteht darin, aus einer mehr oder weniger geordneten Menge von „Baufix“-Elementen, die beliebig auf einem Tisch liegen, zunächst einzelne Aggregate und danach aus diesen fertige Modellobjekte (Flugzeug, Motorroller, etc.) zu bauen. Aus einem Angebot von Bauelementen nach Abbildung 7(a) soll beispielsweise ein Modell entstehen, wie es Abbildung 7(b) zeigt. Dies ist zwar nicht komplett, aber bezüglich der wesentlichen Strukturen der Aggregate, mit diesem System inzwischen prinzipiell möglich.

Der gesamte Konstruktionsprozeß wird dabei *ausschließlich* durch einen multimodalen Dialog gesteuert, und die Lage der Teile wird rein optisch erfaßt. Besonderer Wert wird dabei auf Unabhängigkeit der Konzepte und soweit wie mög-

lich auch der Implementierung von der konkreten Ausformung der Domäne gelegt: es werden keine speziellen Werkstückaufnahmen oder Greifer eingesetzt, alle Montageoperationen werden stattdessen von zwei kooperierenden Armen mit umfangreicher Kraft- und Sichtsensorik ausgeführt. Der Ablauf ist dabei wie folgt: Dem menschlichen Instrukteur steht ein Konstruktionsplan zur Verfügung, den der Konstrukteur (das Robotersystem) nicht einsehen kann. Der Instrukteur erteilt dem Konstrukteur anhand dieses Konstruktionsplans Anweisungen. Die von den Perzeptions- und Kognitionsschichten gelieferten Ergebnisse werden dann in Aktionen umgesetzt, in denen sich die Intentionen des menschlichen Instrukteurs spiegeln. Die Systemkomponenten, denen dabei wesentliche Bedeutung zukommt, seien kurz genannt:

- **Dialogkomponente zur Instruktion.** Mensch und Robotersystem (Konstrukteur) nehmen denselben Umweltausschnitt wahr und beziehen auf ihn ihre Handlungen und sprachlichen Äußerungen. Deshalb ist die integrative und kohärente Repräsentation von Objekten, Ereignissen und Sachverhalten sowie den darauf aufbauenden Verstehensprozessen wichtig. Basis der Dialogführung ist die sprachliche Äußerung; weitere Modalitäten (speziell Gestik) werden hinzugezogen, falls dies hilfreich ist (bei Zweifeln, Mehrdeutigkeiten, etc.). Die Sprachverstehenskomponente basiert auf einer Variante der Kategorialgrammatik, der Combinatory Categorical Grammar (Steedman 1987, Steedman 1996). Um kognitiven Verarbeitungsprinzipien der Sprachrezeption, wie z.B. der inkrementellen Verarbeitung und der flexiblen Konstituentenstellung im Deutschen zu entsprechen, wurde die Grammatik modifiziert und an das Deutsche angepaßt (Hildebrandt 1997). Dadurch können selbst komplexe und (lokal) ambige Anweisungen (z.B. „steck die lange Schraube in das zweite Loch von links der siebenlöchrigen Leiste“) effizient interpretiert werden.
- **Robuste Sensorbasis und verteilte Steuerung.** Um der Forderung nach robuster Perzeption bei allen vorkommenden Objektkonstellationen und in möglichst allen Umweltsituationen nachkommen zu können, verfügt das System über eine Vielfalt von z.T. redundanten stationären, beweglichen und mitbewegten Sensoren. Damit können eine ganze Reihe von inhärenten Ungenauigkeiten berücksichtigt werden: ungenaue Spezifikation des einzelnen Montageschritts; geringe Reproduzierbarkeit der Ausgangssituation; Begrenzungen in der genauen sensorischen Erfäßbarkeit des augenblicklichen Zustands; begrenzte Präzision des Roboters. Sensoren und Aktoren werden als Agenten in einem Multi-Agenten-System modelliert; die Auswahl der in einer jeweiligen Situation erforderlichen sensorischen, aktorischen oder kombinierten Aktion erfolgt über das *Vertragsnetzprotokoll* durch Verhandlungen zwischen den Agenten. Damit wird ein hohes Maß an Fehlertoleranz erreicht; Sensoren und Aktoren können zur Laufzeit des Gesamtsystems hinzugefügt und außer Betrieb genommen werden.

Äußerungen	Alternativen	Kognitive Operation
Mensch: Bist Du bereit? Initialisierung		
Kommunikator: Ja, es kann los-	a) Nein, heute nicht	

gehen. Bestätigung Initialisierung	b) Einen Moment noch	
M: Heute wollen wir ein [Baufix-] Flugzeug [zusammen] zusammenbauen [, wir fangen mit dem Leitwerk an]! Problemspezifikation		Aktivierung Domänenwissen
K: Alles klar! Spezifikationsbestätigung	Darüber weiß ich nichts! Schon wieder!	Aktivierung Lernmodus
K: Ich prüfe mal, was wir da liegen haben. Handlungsvorbehalt	Ich brauche dazu aber noch eine Schraube [...] mehr.	Objekterkennung Szene Aktualisieren Umweltmodell Ausgabe Problemformulierung
K: Wie würdest Du das rote [eckige] Objekt [am Rand] nennen? Verhandlung Objektbenennung		Lernen der Namenskonvention/Taufakt
M: Das ist ein Würfel. <zeigt darauf>		Fokus auf Hand, Gestenerkennung
K: Gut, nennen wir {es, ihn} so!		
M: Nimm eine Schraube! Handlungsanweisung	Du brauchst [erstmal] eine Schraube!	Auffinden des referenzierten Objekts
K: Ich nehme mir mal eine. Handlungskommentierung	a) ...+mit der linken Hand b) Ich sehe keine	Sensomotorische Steuerung
M: Jetzt nimm die Leiste mit drei Löchern! Handlungsanweisung		Ableitung, daß zweiter Arm benötigt wird
K: Ich sehe mehrere [solcher] Leisten. Kommunikatorseitige Widerspruchsbenennung	... + Ich würde [am liebsten] die schräge nehmen.	Erkennung Mehrdeutigkeiten
M: Nimm diese hier! <zeigt darauf> Menschseitige Widerspruchsauflösung	a) Nimm die, auf die ich zeige! b) Nimm die rechts von {mir, dir}!	
K: Ich habe sie. Handlungsbestätigung	Und nun die Schraube durch?	
...

Tabelle 1. Beginn eines Beispieldialogs zur Montage eines Aggregats.

- **Flexible Montageoperationen.** Während die berührungsfrei ablaufenden Transportphasen der einzelnen Montageschritte einfach realisiert werden können (es sind lediglich Kollisionen zu vermeiden), verlangen die Kontakt- und Fügephasen ein komplexes Zusammenspiel von Kraft-, Tast- und visueller Sensorik mit der Steuerung bzw. Regelung der Bewegungsfreiheitsgrade des Roboters. Eine wichtige Voraussetzung zur Nachbildung menschlicher Manipulationsfähigkeiten ist die Konstruktion eines Rahmens, innerhalb dessen ein Grundrepertoire an elementaren Bewegungsfähigkeiten flexibel kombinierbar ist. Die elementaren Montageprimitiva müssen dabei ihrerseits durch eine direkte Sensorkopplung so robust implementiert werden, daß eine sichere Regelung der einzelnen Parameter auch bei sehr langen Folgen (also bei der Konstruktion komplexer Aggregate) gewährleistet bleibt.

Aus den sprachlichen Anweisungen leitet die Sprachverstehenskomponente semantische Strukturen ab, aus denen wiederum elementare Handlungsanweisungen für die Aktoren generiert werden. Die Interpretation einer Anweisung basiert zusätzlich zum linguistischen Wissen auch auf konzeptuellem Wissen über Objekte und Handlungen.

Tabelle 1 zeigt einen *Beispieldialog* (aus Platzgründen geben wir hier nur den Beginn wieder), der sich mit dem System abwickeln läßt. Ziel ist die Konstruktion des Höhenleitwerks des Modellflugzeugs. Man erkennt, daß bereits diese relativ einfache Montageabfolge eine Vielzahl von sensorisch-kognitiven Fähigkeiten erfordert, die sich bei Zulassen der angedeuteten Alternativen noch vervielfacht. Während der Handlungsinterpretation und -ausführung kommt es zu einem komplexen Interaktionsgeflecht zwischen den Modulen, wobei die zugrundegelegten Verarbeitungsprinzipien die Basis für ein robustes System bilden, das unerwartete, unvollständige und auch widersprüchliche Information verarbeiten kann, ohne handlungsunfähig zu werden.

Mobile Manipulatoren

Der Einsatzbereich von mehrgelenkigen Robotern läßt sich ganz entscheidend erweitern, wenn sie nicht mehr ortsfest sind, sondern sich zumindest in Innenräumen auf glatten Böden frei bewegen können. Wünschenswert ist dabei eine platzsparende Bauweise, um auch in Nischen navigieren zu können, geringe Leistungsaufnahme, um auch mit geringerer Batteriekapazität über lange Zeiträume fahren zu können und vor allem freie Programmierbarkeit ohne fest zu verlegende Navigationsschienen, um flexible Anpassung an sich ändernde räumliche Gegebenheiten zu erreichen (einschließlich der Neuberechnung eines vorgeplanten Weges um ein sich möglicherweise bewegendes Hindernis herum).

Um die potentielle Leistungsfähigkeit eines solchen mobilen Manipulators in halbstrukturierten Umgebungen (Fabrikräume, Werkstätten, Wartungshallen, etc.) zu zeigen, wurde von uns in mehrjähriger Entwicklungsarbeit ein komplettes Szenario auf der Basis eines mobilen, vollständig sensorgeführten Manipulationssystems entwickelt (Lütkemeyer 2000).

Ausgangspunkt war ein biotechnologisches Labor (siehe Abbildung 8). Solche Labore sind manchmal so organisiert, daß ausschließlich Fließprozesse auftreten; dann ist das Automatisierungspotential gering. Sehr häufig weisen die Anlagen jedoch eine Mischung aus verschiedenen Prozeßtypen auf, dann müssen Chargen von Hand entnommen, transportiert, analysiert und archiviert werden. Dies ist ein zeitraubender Prozeß, der bezüglich zeitlicher Planung und Präzision der Handhabung hohe Anforderungen stellt und bislang rund um die Uhr von Menschen ausgeführt werden muß: eine ideale Aufgabe für einen Roboter.

Die eigentliche Aufgabenstellung besteht in der vollständigen Automatisierung der sogenannten *Probennahme*. Dabei wird mit einem anzudockenden Probenröhrchen eine kleine Probe aus dem Bioreaktor gezogen, bezüglich verschiedener

Parameter in verschiedenen, räumlich voneinander entfernten Geräten analysiert und dann archiviert.

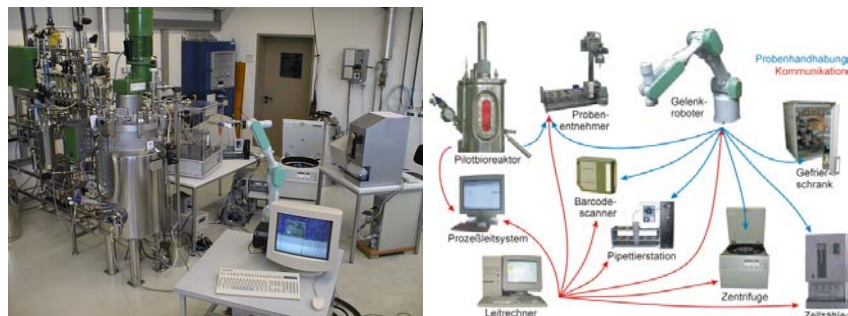


Abbildung 8. (a) Siebenachsiger Roboter in einer biotechnologischen Anlage. (b) Probenlogistik und Kommunikationsfluß bei der automatisierten Probenahme (Vernetzung des Robotersystems).

Dieser Prozeß wurde mit einem Serviceroboter automatisiert, welcher genügend Genauigkeit und Präzision aufweist, um mit einem Zweifingergreifer alle Tätigkeiten auszuführen, die erforderlich sind, um den gesamten Probenahmezyklus durchzuführen. Dabei sind keine Änderungen an den eingesetzten Geräten erforderlich, d.h. sie müssen *nicht (oder nur minimal) für den Roboterbetrieb umgerüstet* werden. Dies bedeutet natürlich im Umkehrschluß auch, daß (i) der Handbetrieb weiter ohne jede Einschränkung möglich ist und daß (ii) Geräte *bedient und abgefragt* werden müssen, die überhaupt keinen Rechneranschluß haben. Weitere Kernforderungen waren:

- **Einfache Benutzung.** Der Roboter soll, wenn einmal eingerichtet, von einer Kraft überwacht werden können, die keine Erfahrung in der Robotertechnik hat. Zu einem späteren Zeitpunkt soll erreicht werden, daß auch der Einrichtungsprozeß so einfach abläuft, daß kein Experte mehr erforderlich ist.
- **24h / 7 Tage.** Das Gesamtsystem (Roboter und Auswertungsgeräte) muß rund um die Uhr laufen, sich also auch selbst erneut mit Energie versorgen können.
- **Robustheit und Fehlertoleranz.** Umwelteinflüsse, wie unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen, verschobene Geräte etc. sowie Hardware(teil)ausfälle dürfen zwar zu planmäßiger automatischer Stillsetzung des Roboters führen, aber in keinem Fall zu Fehlfunktionen.
- **Arbeit in sterilen, gefährlichen, unzugänglichen Anlagen.** Der Roboter muß sterilisierbar sein, er soll in Bereichen einsetzbar sein, die Menschen nicht betreten dürfen, und er soll möglichst klein bauen.
- **Validierbarkeit.** Das Robotersystem soll so aufgebaut, dokumentiert und betrieben werden, daß eine Validierung nach GMP (Good Manufacturing Practice) der amerikanischen Gesundheitsbehörde möglich wird (FDA 2003).



Abbildung 9. Mobiler Manipulator. (a) Rückansicht mit hinterem Laserscanner. (b) Frontansicht mit Greifer und Kamera.

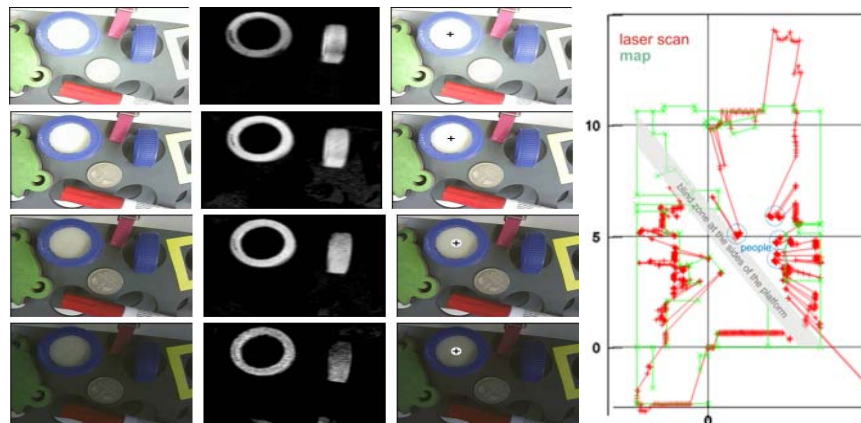


Abbildung 10. Zwei Klassen der Sensorsignalverarbeitung (a) Bildauswertung der Handkamera zur kleinräumigen Steuerung des Griffvorgangs bei ganz unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen. (b) Ergebnis der beiden Messungen der beiden Laserscanner zur Steuerung der großräumigen Navigation.

Diese Anforderungen können inzwischen für den gesamten Zyklus unter allen Randbedingungen für die Probenahme erfüllt werden. Abbildung 9 zeigt eine Komplettansicht des Manipulators mit zwei Laserscannern der Firma Sick (Sick 2003) zur Navigation und Kollisionsvermeidung; Roboter und elektrischer Zweifingergreifer mit Kraftsensor und Miniatur-Farbkamera; mobiler Plattform mit allen Recheneinheiten und Batterien sowie Funkübertragung. In Abbildung 10

erkennt man, mit welchen Schwierigkeiten der Roboter bei der Abwicklung des Gesamtprozesses zurecht kommen muß: nicht nur muß ein bestimmtes Objekt in ganz unterschiedlichen Lagen erkannt werden, es muß vielmehr auch fehlerfrei immer das richtige Objekt gegriffen werden.

Gegenwärtig befassen wir uns damit, das System bei einem Pharmahersteller in den täglichen Betrieb zu überführen.

Eine Anwendung in der Herzchirurgie

Die Programmierung von Robotern durch menschliches „Vormachen“ und „Abschauen“, also das *Erlernen von Manipulationssequenzen*, ist seit langem Ziel der Robotikforschung. Roboter zum Sprühlackieren oder für bestimmte Schweißoperationen, die strukturell einfache Bewegungen machen müssen, bei denen aber Parameter wie Form oder Geschwindigkeitsprofil einzuhalten sind, konnten bereits Ende der siebziger Jahre durch einfache Führung gelehrt werden (Todd 1986). Im Prinzip gilt dies auch für die Anwendungen der Telemanipulatoren (Sheridan 1992). Für die Durchführung von komplexen Folgen von Operationen hingegen gibt es bis heute kein praktisch einsetzbares System, welches rein oder zum überwiegenden Teil durch Verfolgung der Bewegungen eines menschlichen Instruktors Handhabungsoperationen lernt (oder auch nur parametrisierte instanziiert).



Abbildung 11. (a) Operationsroboter *daVinci* von *IntuitiveSurgical* (*Intuitive* 2003) b) Bediengeräte für die beiden Roboterarme (c) Knotenvorgang

Um nachzuweisen, daß die Einführung und Auswertung multimodaler Hinweise sowohl beim Lernen (Übertragen) von Fertigkeiten vom Menschen als auch bei der Anwendung dieser Fertigkeiten einen qualitativen Fortschritt gegenüber den bisherigen hauptsächlich monomodalen Ansätzen bieten, haben wir ein Demonstrations-Szenario aus der Herzchirurgie gewählt.

Dort werden äußerst hohe Anforderungen an die Präzision gestellt, wenn Bypass-Operationen endoskopisch ausgeführt werden sollen. Diese Operationstechnik wurde erst möglich, als Roboter zur Verfügung standen, die neben einer 3D-Optik über ein Tremorfilter verfügten (siehe Abbildung 11). Wesentliche Mängel dieser Technik, die ihr Einsatzfeld stark limitieren, sind die nicht ausreichenden Navigationsmöglichkeiten (innerhalb des Brustraums) und die fehlende Rück-

kopplung der Kräfte, die der Chirurg auf das Gewebe ausübt, an seine den Roboter direkt steuernden Hände.



Abbildung 12. (a) Feder-Masse-Modell zur Organmodellierung als Hilfsmittel zur Vorausschau. (b) Bildschirmabzug des Werkzeugs zur Segmentierung von Angiographiebildern.

Wir entwickeln für diese Operationsklasse Methoden zum *automatisierten Knotenbinden*. Dies ist neben dem Schneiden die am häufigsten benötigte Fertigkeit. Es existieren verschiedene Techniken zum Knoten, deshalb soll ausgehend von einem Satz durch *Skill-Transfer* gelernter sensomotorischer Primitiva zur Fertigstellung verschiedener Knotenklassen das Robotersystem den Operateur beim Durchführen der einzelnen Arbeitsschritte einer Bypass-Operation verfolgen bzw. beobachten. Es erkennt automatisch, wenn der Operateur einen Knoten bestimmten Typs beginnt (je früher diese Erkennung stattfindet, desto besser). Das System bietet dann an, diesen Knoten und alle auf diesem aufbauenden automatisch zu komplettieren. Der Operateur kann daraufhin entscheiden, ob er den vom System vorgeschlagenen Weg akzeptieren, modifizieren oder verwerfen will. Wird das Angebot nicht verworfen, führt das Robotersystem die Operationen optimal im Sinne der Kriterien (i) maximale Geschwindigkeit (ii) minimales Trauma und (iii) bestmögliche Funktion der vorgenommenen Rekonstruktion aus. Wir erwarten hier neben der Verbesserung der Qualität der Gesamtoperation und einer deutlichen Entlastung des Operateurs eine dramatische Reduktion der benötigten Zeit und eine völlige Vermeidung von Fehlern, wie dem ständigen Fadentreißen durch Überlastung bei manueller Steuerung des Roboters. Dazu wurden bereits folgende Komponenten fertiggestellt:

- *Modellierung von Faden und Gewebe zu Planung und Prädiktion.* Für die Berechnung der einzelnen Schritte beim Knoten in einem konkreten Umfeld ist ein ausreichend exaktes Modell des Verhaltens von Faden, Gewebe und ihrer Wirkung aufeinander notwendig. Da ein Ansatz basierend auf FE-Methoden zu rechenintensiv ist, wurde auf der Grundlage eines hochdimensionalen Feder-Masse-Modells, mit Hilfe von NURBS-Flächen und Texturinformation realer Bilder ein Modell der Herzwand konstruiert; mit einem ebenfalls entwickelten Rendering-Modul können sehr realistische Verformung der Herzwand bei Krafteinwirkung dargestellt werden (Abbildung 12 (a)); dies soll bei der Prädiktion des zu erwartenden Resultats nach dem Bindevorgang

verwendet werden. Es wurde darüber hinaus ein ähnlich strukturiertes Modell des Fadens entwickelt, das bereits beim Wickeln eines Fadens um einen Zylinder praktisch verwendet wurde (mit zwei kooperierenden kraftgesteuerten Kuka-KR6/2 unter realistischen makroskopischen Größenmaßstäben). Noch zu erarbeiten sind hier die Interaktion zwischen Faden- und Gewebemodell sowie die Kalibration des Modells anhand von geometrischen Daten (z.B. als Kombination aus optischem Bild und CT-Sicht) sowie aus Kraftdaten bei der Manipulation des konkreten Herzens (oder auch eines anderen Organs).

- *Navigation zum Auffinden der Zielgefäße.* Es wurde untersucht, ob unter Zuhilfenahme von angiographischem Bildmaterial (längere Videosequenzen) bei vorhandener optischer Sicht zuverlässig auf die Lage der Arterien zu schließen ist. Dazu wurde ein Software-Prototyp gebaut, der über eine komfortable Benutzeroberfläche verfügt und die präzise Segmentierung der Röntgenaufnahmen erlaubt. Es können Standard-Videoformate eingelesen und das berechnete Ergebnis in verschiedenen Darstellungen präsentiert werden. Das *matching* zwischen den beiden Modalitäten wird anhand von in beiden Bildern (Bildfolgen) sichtbaren Bifurkationen der Arterien vorgenommen. Es ist zu erwarten, daß damit die Navigation dieses Teils der Operation wesentlich erleichtert werden kann.

Gegenwärtig wird von uns der eigentliche Fertigkeitentransfer bearbeitet, wir rechnen hier bald mit praktischen Ergebnissen, die allerdings auf eine routinemäßig einsetzbare *Kraftmessung und haptische Rückkopplung* angewiesen sind, die wir ebenfalls entwickeln.

Ausblick auf zukünftige Forschungsrichtungen

Es ist festzuhalten, daß die vor rund einem Jahrzehnt formulierten Hoffnungen auf einen sich schnell entwickelnden Markt in der Service-Robotik sich nicht erfüllt haben – die bisher implementierten Systeme sind in vielerlei Hinsicht nicht praxistauglich, man könnte auch sagen: sie sind nicht *intelligent* genug, um in einem von Menschen geprägten Szenario aus dynamischen Umgebungen, Anforderungen und Aufgaben überleben zu können.

Wie ebenfalls angedeutet, ist es inzwischen weitgehend akzeptiert, daß echte Adaptation und Intelligenz sich nur dann ausprägen können, wenn die Artefakte nicht nur über einen anpassungsfähigen Körper, sondern auch über situierte Reaktionsfähigkeiten und ein hohes Maß an Handlungsautonomie verfügen, die sich ihrerseits auf leistungsfähige Sensorik samt (Vor-)Verarbeitung abstützt. Idealerweise sind sie darüber hinaus mit der Fähigkeit ausgestattet, ihre Handlungsmöglichkeiten über ihre „Lebensspanne“ zu entwickeln; dies bedingt eine hochflexible Aktorik oder sogar einen entsprechend *mitwachsenden* Körper.

Akzeptiert man diese Prämissen, so wird schnell klar, daß substantieller Fortschritt nur bei einer engen Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen möglich sein wird, welche bislang nicht unbedingt mit der Robotik in einen operativen

Zusammenhang gebracht worden sind: Kognitionswissenschaften und Gehirnforschung, theoretische Biologie, Materialwissenschaften, Philosophie und weitere. Eine kognitionsorientierte Neuroinformatik in Verbindung mit der Möglichkeit, daß sich in Abhängigkeit von der Aufgabe vieldimensionale Körperstrukturen über geeignete Materialien selbsttätig ausbilden können, stellt damit den Schlüssel für neue, wesentlich leistungsfähigere Robotertechnologien dar. Dabei müssen auch klassische Lernparadigmen überprüft werden – die reine datengetriebene Anpassung von Modellparametern an einfache Modelle wird für die hier anstehenden Aufgaben des lebenslangen Lernens nicht ausreichen; geschweige denn für die zielgerichtete selbststabilisierende synchrone Ko-Evolution von Körperstrukturen und „Geist“ eines solchen Artefakts.

Aus der gegenwärtigen Perspektive scheint es plausibel, daß sich drei verschiedene Typen von Artefakten herausbilden werden:

- *Klasse 1*: Artefakte, die ihre sensorisch-kognitiven Fähigkeiten und ihr damit auf verschiedenen Ebenen gekoppeltes Handlungsrepertoire autonom entwickeln, basierend auf multimodaler/multisensorieller Rückkopplung. Typische Vertreter dieser Spezies sind mehrbeinige Laufmaschinen, humanoide Roboter (siehe z.B. (Knoll 2002)) oder aber auch die im vorigen Abschnitt dargestellten Montage-, Analysen- und Chirurgieroboter.
- *Klasse 2*: Artefakte, die (strukturell neue) sensomotorische Fertigkeiten in permanenter enger Kopplung mit der Umgebung entwickeln und dabei auf einen in gewissen Maßen an die Aufgabenstellung anpaßbaren Körper haben (siehe z.B. (Kamimura 2001)).
- *Klasse 3*: Artefakte, die ihr Steuerungssystem (ihr – möglicherweise verteiltes – Gehirn) ausgehend von einem physikalischen Kern (oder auch nur einer minimalen generischen Beschreibung im Sinne eines Genoms) zusammen mit einem auf die typischen im Laufe ihres Lebens angetroffenen Aufgaben zu optimierenden Körper evolvieren (leibliche künstliche Embryologie).

Es ist klar, daß insbesondere Klasse 3 sich noch kaum am Horizont abzeichnet (siehe dazu das sich gerade etablierende europäische Netzwerk zur Disziplin „Neuro-IT“ (Neuro-IT 2003)), während die beiden ersten Klassen schon in ersten Ansätzen sichtbar werden. Insofern wäre die Definition der Entwicklung eines Artefakts der Klasse 3 eine wirklich langfristige Herausforderung zur transdisziplinären Zusammenarbeit. Spezifische Themenbereiche könnten in Stichworten dabei beispielhaft die folgenden sein:

- **Wachstum**. Mechanische Strukturen, die in zwei und drei Dimensionen zielgerichtet wachsen können. Zunächst grobe Strukturen aufbauend auf elektromotorisch angetriebenen Modulen, später bis auf die molekulare Ebene verfeinert. Zwischenstufen könnten auf neuartigen Aktoren aufsetzen (künstliche Muskeln aus neuartigen Materialien).
- **Kopplung**. Mikrosensoren zur präzisen Erfassung von Feinstrukturen; feldgekoppelte, elektrische und mechanische Interfaces zwischen Nerven und Muskeln von Lebewesen und den Artefakten bei geeigneter Interpretation der Sig-

nalmuster; Materialien für die Konstruktion nanoelektrischer-bioelektronischer Komponenten.

- **Lernen und Entwicklung.** Identifikation der Primitiva, die es Lebewesen erlauben, aus einfachen Strukturen komplexe Verhaltensweisen aufzubauen; One-shot-learning; Kategorisierung und Klassifikation bei lebenslangem Lernen und Strategien für die Transformation von gelerntem Wissen in Reflexe sowie Plastizität und Vergessen; Imitationslernen und fallbasiertes Lernen bzw. Generalisierungsstrategien. Nutzung kreuzmodaler Assoziationen zum Aufbau von komplexen Repräsentationen und zur generellen Beschleunigung von Lernvorgängen.
- **Neuromodellierung.** Ausbau von bioanalogen Neuro-Modellen zur einer Theorie des Designs von Artefakten. Dabei Unterscheidung unterschiedlicher Modellierungsniveaus: Hirnregionen mit unterschiedlichen Zelltypen, kleinere Netzwerke innerhalb dieser Regionen, einzelne Neuronen, Kanäle und Synapsen. Daraus sollten auch Erkenntnisse über die Erfordernisse beim Wachstum gewonnen werden können (wie schafft es das zentrale Nervensystem von Lebewesen, während es sich selbst entwickelt, kontinuierlich einen Körper zu steuern, dessen Volumen im Laufe seines Lebens um Größenordnungen zunimmt?).

Literatur

- FDA (2003). <http://www.fda.gov/cder/guidance/4011dft.pdf>
- B. Hildebrandt and G. Rickheit (1997). Verarbeitung von Präpositionalphrasen in der Combinatory Categorical Grammar. Technischer Bericht 97/6, SFB360, Universität Bielefeld.
- B. Hildebrandt, A. Knoll, C. Scheering, und J. Zhang (1999). Ein Situierter Künstlicher Kommunikator für Konstruktionsaufgaben. *Kognitionswissenschaft*, 8(3).
- IEEE (2003). <http://www.service-robots.org/IEEE-start.php>
- Intuitive (2003). <http://www.intuitivesurgical.com/>
- Kamimura, S. Murata, E. Yoshida, H. Kurokawa, K. Tomita and S. Kokaji (2001). Self-Reconfigurable Modular Robot – Experiments on Reconfiguration and Locomotion. *Proceedings of 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2001)*.
- A. Knoll (2002). *Cui Bono Robo Sapiens?*. *Autonomous Robots* 12 (1). Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- D. Lütkemeyer, I. Pogendorf, T. Scherer, J. Zhang, A. Knoll, J. Lehmann (2000). First Steps in Robot Automation of Sampling and Sample Management during Cultivation of Mammalian Cells in Pilot Scale. *Biotechnology Progress* 16(5). Columbus (Ohio): ACS Publications.
- P. Menzel and F. D'Aluisio (2000). *Robo sapiens. Evolution of a new species*. Cambridge, The MIT Press.
- Morpha (2003). http://www.morpha.de/php_d/index.php3
- Neuro-IT (2003). <http://www.neuro-it.net/>

- T. Sheridan (1992). *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*. MIT-Press, Boston, 1992.
- Sick (2003) <http://www.sick.de/de/products/categories/safety/espe/laserscanner/de.html>
- M. Steedman (1987). Combinatory grammars and human language processing. In J. L. Garfield, editor, *Modularity in knowledge representation and natural-language understanding*, pages 187–205. MIT-Press, 1987.
- M. Steedman (1996). *Surface structure and interpretation*. MIT-Press, 1996.
- D. Todd (1986). *Fundamentals of Robot Technology: An Introduction to Industrial Robots, Teleoperators and Robot Vehicles*. Wiley, 1986.
- J. Zhang and A. Knoll (2002). Control Architecture and Experiment of a Situated Robot System for Interactive Assembly. Proc. IEEE Conference on Robotics and Automation, ICRA-02, Washington, D.C., IEEE Press.