

Entwurf und Konstruktion eines anthropomorphen Roboters

Rainer Bischoff

Universität der Bundeswehr München
Institut für Meßtechnik
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg
E-Mail: Rainer.Bischoff@unibw-muenchen.de

Kurzfassung

Zur vollautomatischen Verrichtung von Dienstleistungen an verschiedenen Orten einer weitläufigen Einsatzumgebung wird ein Robotersystem benötigt, das sich autonom fortbewegen und am jeweiligen Einsatzort die vom Benutzer gewünschten Handlungen durchführen kann. In diesem Beitrag werden der Entwurf und die Konstruktion eines anthropomorphen Roboters beschrieben, der durch seinen menschenähnlichen Aufbau, seine Sensorik und Aktorik und seine praktische, handlungsbezogene Intelligenz in Zukunft zu Handhabungsaufgaben befähigt werden soll, wie sie für viele Bereiche der Servicerobotik erforderlich sind. Die Gesichtspunkte, die uns bei der Konzeption und Realisierung dieses Roboters geleitet haben, werden im einzelnen vorgestellt.

1 Einleitung

Serviceroboter, die in vielfältigen, nicht näher definierten und vor allem nicht besonders hergerichteten Umgebungen die verschiedensten Dienstleistungen erbringen können, werden in der Zukunft große technische und wirtschaftliche Bedeutung erlangen [Schraft et al. 1994]. Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Entwicklung solcher Roboter ist, daß sie auch in Umgebungen arbeiten müssen, die von Menschen bevölkert sind, und zwar von Menschen, die im Umgang mit Robotern nicht besonders ausgebildet sind und sich nicht notwendigerweise dafür interessieren. Serviceroboter werden daher ein hohes Maß an Robustheit im Umgang mit unerwarteten Situationen, an Anpassungsfähigkeit und an Kommunikationsfähigkeit benötigen, das weit über den gegenwärtigen Stand der Technik hinausgeht.

Zur Erforschung von Möglichkeiten zur Realisierung solcher Roboter bauen wir einen Versuchsroboter auf, der bereits zahlreiche Eigenschaften besitzt, die von zukünftigen Servicerobotern benötigt werden. Im übrigen sollen durch seine Flexibilität, Modularität und Erweiterbarkeit sichergestellt werden, daß vielfältige Ansätze zur Lösung der noch offenen Probleme durch Experimente in der realen Welt entwickelt und bewertet werden können. Im folgenden sollen die Notwendigkeit einer anthropomorphen Konstruktion begründet und daraus abgeleitet unsere Konzepte und die Realisierung des Roboters *HERMES* – **H**umanoid **E**xperimental **R**obot for **M**obile **M**anipulation and **E**xploration **S**ervices – vorgestellt werden (Abbildung 1).

1.1 Vorteile eines menschenähnlichen Roboterentwurfs

Es gibt mehrere Gründe, einen Serviceroboter in Größe und Form dem Menschen nachzubilden. Das wohl beste Argument ist, daß ein solcher Roboter in Umgebungen arbeiten soll, in denen sich auch das tägliche Leben von Menschen abspielt, also beispielsweise in Wohnungen, Büros, Laboren, Gaststätten, Krankenhäuser, Straßen oder Verkehrsmitteln. Diese Einsatzumgebungen sind an die speziellen körperlichen Eigenschaften und Erfordernisse des Menschen angepaßt worden: an seinen Platzbedarf (z.B. Breite von Korridoren und Türen), an seine Arbeitshöhe (z.B. Tische oder Türgriffe), an seine Sehhöhe (z.B. Türschilder) und an die Körperkraft, die er zum Manipulieren von Objekten aufbringen kann (z.B. zum Öffnen einer

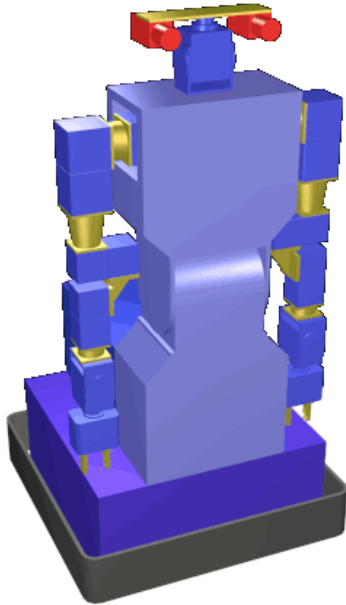


Abbildung 1: Anthropomorpher Roboter *HERMES* mit omnidirektionaler mobiler Basis, zwei Armen, abknickbarem Oberkörper und zwei Kameras auf einer steuerbaren Plattform; Größe 70 cm x 70 cm x 180 cm

Tür). Wenn also ein Roboter in solchen Umgebungen zum Einsatz kommt, sollte er eine dem Menschen ähnliche Gestalt und vergleichbare sensorische und motorische Fähigkeiten besitzen.

Ein weiterer wichtiger Grund ist, daß Serviceroboter mit Menschen auf verschiedenen Ebenen, von Berührungen über Gesten bis hin zur Sprache, interagieren und kommunizieren müssen. Weist der Roboter eine menschenähnliche Form und ein menschenähnliches Verhalten auf, fällt Menschen die Interaktion leichter [Brooks 1996].

Auch kann es für die Repräsentation von Wissen über die Umwelt von Vorteil sein, wenn Roboter eine menschenähnliche Größe und Form besitzen, weil sie dann bei der Exploration der Umgebung eine dem Menschen besonders gut zugängliche Art von Wissen aufbauen können [Johnson 1987].

1.2 Anforderungen an den Roboter *HERMES*

Die Kombination von Mobilität und der Fähigkeit zur Manipulation stellen wesentliche Grundfunktionen für die meisten Serviceroboter dar. *HERMES* soll deshalb in die Lage versetzt werden, unbekannte Umgebungen zu explorieren, um in diesen dann auftragsbezogen zu navigieren und verschiedene Objekte zu manipulieren. Dabei soll er Befehle wie z.B. "Nimm Objekt A in Raum 1 auf, transportiere es in Raum 2 und lege es dort auf dem Tisch ab!" ausführen können, ohne daß die Umgebung

speziell hergerichtet werden muß. Hauptsensormodalität soll das Sehen sein, da es für derartige Anwendungen (wie auch bei Lebewesen) besonders leistungsfähig ist. Auf exakte Weltmodelle soll ebenso verzichtet werden wie auf genaue Kenntnis der optischen, kinematischen und dynamischen Kenngrößen. Damit soll ein Grad der Robustheit erreicht werden, der es ermöglicht, Serviceroboter in häuslichen, öffentlichen und industriellen Bereichen zur selbständigen Verrichtung verschiedenster Dienstleistungen einzusetzen.

2 Stand der Technik

An vielen Forschungseinrichtungen wird an der Entwicklung von Komponenten autonomer mobiler Systeme gearbeitet. Meistens handelt es sich dabei um Forschung auf den Gebieten Autonomie *oder* Mobilität *oder* Manipulation. Die Integration zu funktionierenden Gesamtsystemen, autonomen mobilen Manipulatoren und anthropomorphen Robotern, findet dabei erst seit einiger Zeit größere Beachtung. Im folgenden wird eine kurze Übersicht über bereits entwickelte Systeme gegeben. Anschließend werden die projektrelevanten Vorarbeiten des Instituts für Meßtechnik beschrieben.

2.1 Mobile Manipulatoren

Ein mobiles Manipulatorsystem besteht aus einer beweglichen Plattform und einem oder mehreren darauf angebrachten Manipulatoren. Durch die mit einer mobilen Plattform erzielbare Beweglichkeit ergibt sich eine wesentliche Arbeitsraumvergrößerung gegenüber einem ortsfesten Manipulator. Allerdings steigt damit auch die Anzahl der Freiheitsgrade (im folgen-

den: DOF) des Gesamtsystems, und die Steuerung des Manipulators wird komplexer. Allen vorgeschlagen Lösungen für dieses Problem ist dabei gemein, daß sie mit sorgfältig kalibrierten Sensoren und Aktuatoren, Weltmodellen und inversen Kinematiken arbeiten. Mit diesen Ansätzen konnten beeindruckende Robotersysteme realisiert werden, z.B. an der Universität Karlsruhe der Montageroboter KAMRO [Lueth et al. 1995], an der TU München der Service-roboter ROMAN mit einer großen Anzahl integrierter Schlüsselkomponenten [Daxwanger et al. 1996] und der Rehabilitationsroboter MOVAID [Dario et al. 1995].

Am GRASP Lab der Universität von Pennsylvania [Yamamoto 1994] und an der Stanford Universität [Khatib et al. 1995] beschäftigt man sich mit der Kraftregelung mehrerer kooperierender mobiler Manipulatoren. Am Georgia Institute of Technology [Cameron et al. 1993] wurde ein mobiler Manipulator entwickelt, der durch reaktive Steuerungsmethoden bereits während der Andockphase den Arm in eine für die Manipulation günstige Position bringt.

2.2 Anthropomorphe Roboter

Der Übergang von mobilen Manipulatoren zu anthropomorphen Robotern ist in der Literatur nicht eindeutig definiert. Im folgenden wird ein Roboter als anthropomorph bezeichnet, wenn er durch seine Größe, seine Form, die Konfiguration seiner Freiheitsgrade und die Art und Anordnung seiner Hauptsensoren an den Körperbau eines Menschen erinnert.

An der Ruhruniversität Bochum wird ein anthropomorpher Roboter ("Arnold") aufgebaut, bei dem ein 7 DOF Roboterarm der Firma amtec auf einen TRC-Labmate montiert wurde. Der Kamerakopf (3 DOF) trägt vier Kameras mit paarweise unterschiedlichen Brennweiten für Navigations- und Manipulationsaufgaben [Bergener et al. 1997]. Bei der DASA in Bremen beschäftigt man sich ebenfalls seit einigen Jahren mit anthropomorphen Servicerobotern, jedoch sind uns bis dato keine Veröffentlichungen (außer Fotos, z.B. in [amtec 97]) bekannt geworden.

Auch in den USA und Japan gibt es mehrere Projekte, die sich mit menschenähnlichen Robotern befassen; sie alle näher zu beschreiben, muß aus Platzgründen unterbleiben. Die Mehrzahl der aufgebauten Robotersysteme sind jedoch nach unserem Kenntnisstand immobil, verfügen dafür aber über mehrere Freiheitsgrade in den Rumpfen, Manipulatoren und Sensorköpfen (z.B. [Brooks, Stein 1993], [Konno et al. 1997]).

2.3 Vorarbeiten am Institut für Meßtechnik

Wichtig für die Neuentwicklung des anthropomorphen Roboters *HERMES* waren die vorausgegangenen Forschungsarbeiten an unseren mobilen Robotern *ATHENE I* und *II* sowie am Manipulator "Mitsubishi Movemaster".

Mobilität. *ATHENE II* ist ein Dreiradfahrzeug mit einer monochromen Videokamera auf einer einachsigen Kameraplattform, einem PC als Steuerrechner und einer darin befindlichen Transputer-Framegrabberkarte zur Bildverarbeitung. Mit diesem Roboter konnte die Leistungsfähigkeit des situationsabhängigen, verhaltensbasierten Steuerungs- und Navigationskonzeptes in strukturierter Umgebung gezeigt werden [Wershofen 1996].

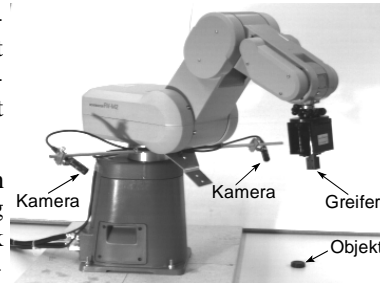
In einem mehrfach zusammenhängenden Netz von Korridoren und frei befahrbaren Flächen kann *ATHENE II* (Abbildung 2) auftragsbezogen navigieren, d.h. namentlich vorgegebene Zielorte anfahren bzw. direkt spezifizierte Sequenzen von Verhaltensmustern abarbeiten. Das dazu notwendige Kartenwissen kann während



Abbildung 2: Mobiler Roboter *ATHENE II*; LBH: 135 cm x 70 cm x 110 cm

einer überwachten Erkundungsfahrt selbständig erworben werden. Eine 3D- oder 4D-Weltbeschreibung ist weder für die Situationserkennung noch für die Ausführung von Verhaltensmustern erforderlich [Bischoff et al. 1996].

Manipulation. Normalerweise wird zur sichtbasierten Steuerung von Manipulatoren eine genaue Kalibrierung der optischen Parameter der Kameras und der Kinematik des Arms benötigt. Diese Kalibrierung ist sehr umständlich und muß fortwährend überwacht und, z.B. nach Wartungsarbeiten, erneut durchgeführt werden. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, haben wir einen neuen Ansatz entwickelt und damit einen kalibrationsfreien Manipulator realisiert [Graefe, Ta 1995]. Er besteht aus einem Knickarmroboter mit 5 DOF, einem Zweifingergreifer und einem Stereosichtsystem (Abbildung 3). Flache und längliche zylindrische Objekte kann er ohne Kenntnis seiner Kinematik und der Parameter der Kameras lokalisieren und greifen; sogar willkürliche Eingriffe und Änderungen am optischen System während des Betriebs werden toleriert.



Grundlage für diese ungewöhnliche Robustheit sind der Verzicht auf ein Weltkoordinatensystem und ein direkter Übergang von Bildsensordaten zu Motor-Steuerbefehlen, unter Umgehung der sonst üblichen Berechnung der inversen perspektivischen und kinematischen Transformationen. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen, die bei vergleichbarer Zielsetzung mit neuronalen Netzen arbeiten, wird bei uns kein Training vor dem Beginn der Manipulation benötigt.

Das Annähern des Greifers an das Objekt erfolgte anfangs in einer Folge von Schritten mit zwischengeschalteten Testbewegungen. Inzwischen konnte durch die Verwendung lernfähiger Steuerungsalgorithmen die für einen Lokalisierungs- und Greifvorgang benötigte Zeit von etwa 50 s auf 10 s reduziert werden [Xie et al. 1997].

3 Ein Neuentwurf – Konzepte, Wünsche und Forderungen

Einige Schwächen und Beschränkungen der am Institut vorhandenen Roboter (unzureichende Manövrierfähigkeit des Fahrzeugs; zu geringe Anzahl an Freiheitsgraden und zu geringe Nutzlast des Arms; schwer erweiterbare, inhomogene Gesamtkonstruktionen) haben uns zu einem vollständigen Neuentwurf veranlaßt. Um dabei ein weites Spektrum an Experimentiermöglichkeiten zu eröffnen, haben wir uns für die Realisierung eines anthropomorphen Gesamtkonzeptes entschieden.

Ein streng modularer Aufbau des Roboters, bei dem alle Module über genormte und einheitliche mechanische und elektrische Schnittstellen verfügen, war uns besonders wichtig. Sind diese Module über leistungsfähige Kommunikationsschnittstellen miteinander verbunden, so lassen sie sich nahezu beliebig konfigurieren und steigenden Anforderungen anpassen. Ein solches Modulkonzept haben wir sowohl bei der Konstruktion des "Roboterkörpers" verfolgt als auch beim Aufbau des Informationsverarbeitungssystems aus mehreren vernetzten Rechnern. Dadurch soll es möglich werden, auf der einen Seite durch Hinzufügen von Standardbausteinen die Anzahl der Freiheitsgrade des Systems zu erhöhen und auf der anderen Seite durch Hinzunahme weiterer Rechenknoten die Rechenleistung entsprechend anzupassen. Durch die Verwendung von in der Industrie bewährten Standardkomponenten entsteht so ein in sich homogenes, flexibles System, das leicht zu warten ist, und insbesondere in allen Freiheitsgraden einheitlich angesteuert werden kann.

3.1 Mobile Plattform

Eine Vielzahl von Servicerobotern soll in Umgebungen arbeiten, in denen sich auch Menschen problemlos fortbewegen können. Vielen dieser Umgebungen ist gemeinsam, daß sie für Radfahrzeuge leicht befahrbar sind. Deshalb haben wir uns entschieden, den Robotern auf Rädern fahren zu lassen.

Unser neuer Roboter soll idealerweise überall dort hingelangen können, wo auch Menschen hingehen können; er soll deshalb möglichst viel nicht breiter sein als ein Mensch. Andererseits wollen wir, daß er unabhängig von externer Energieversorgung und Informationsverarbeitung mehrere Stunden lang autark arbeiten kann. Beide Forderungen lassen sich nur schwer miteinander vereinbaren. Eine vermeintlich ideale Lösung ist ein Roboter mit runder Basisfläche (z.B. von Real World Interfaces RWI) und pyramidenförmiger Anordnung der Aufbauten (vgl. [Bergener et al. 1997]). Dies führt jedoch im Vergleich zu einer quadratischen Grundfläche bei gleicher Breite zu einer deutlichen Verkleinerung der nutzbaren Fläche für Batterien, Rechner und Transportgut und macht Spezialanfertigungen erforderlich. Deshalb sehen wir eine quadratische Grundfläche mit einer Seitenlänge von 60 bis 70 cm als ideal an. Damit ist der Roboter um ca. 10 bis 20 cm breiter als ein normaler Mensch, kann aber trotzdem noch problemlos die meisten Türen und sonstigen Engstellen durchfahren und in den meisten Räumen navigieren.

Wichtigste Forderung an das Fahrwerk ist die Gewährleistung der Omnidirektionalität. Diese Fähigkeit erleichtert sowohl das Manövrieren auf engstem Raum als auch das Einnehmen einer günstigen Position relativ zu Objekten, mit denen gearbeitet werden soll. Ideal wäre ein streng holonomes Fahrzeug, das auf praktisch einfache Weise jedoch nicht zu realisieren ist. Um dem Ideal möglichst nahezukommen, verwenden wir ein Fahrwerk mit mehreren frei beweglichen Rädern, von denen einige aktiv steuerbar sind. Um einen tiefliegenden Schwerpunkt des Gesamtsystems zu erreichen, sollte eine Anordnung der Räder gefunden werden, die eine Unterbringung der Batterien in Bodennähe zuläßt.

3.2 Manipulationssystem

Um Manipulationsaufgaben an Objekten in beliebiger Lage und Orientierung optimal durchführen zu können, muß jeder Arm über mindestens sechs Freiheitsgrade verfügen. Da sich die ideale Anzahl und Konfiguration der Freiheitsgrade sowie die Art der Endeffektoren erst im Laufe der Forschungsarbeiten herausstellen werden, sollten die Manipulatoren aus einzelnen beliebig kombinierbaren Modulen zusammengesetzt sein.

Maßgeblich für die Entscheidung, zwei Arme vorzusehen, ist einerseits das menschliche Vorbild und andererseits die Erwartung, mit zwei Armen anspruchsvollere Aufgaben als mit nur einem einzigen bewältigen zu können, z.B. das Öffnen und Durchfahren von selbstschließenden Türen. Außerdem lassen sich mit zwei Armen vielfältige Aspekte der Kooperation von Mehragentensystem untersuchen, z.B. das Aufheben von Gegenständen, die für einen Arm allein zu schwer sind ([Lueth et al. 1995], [Khatib et al. 1995]).

Neben der Manipulation von Objekten, die sich auf Tischen befinden oder die dem Roboter von einem Menschen gereicht werden, ist auch das Aufheben von Gegenständen vom Boden von Interesse. Prinzipiell hat der Mensch zwei Möglichkeiten, Gegenstände vom Boden aufzuheben: Entweder beugt er den Rumpf oder geht in die Knie. Das In-die-Knie-Gehen läßt sich relativ leicht durch ein Linearmodul nachbilden, aber bei einer solchen Lösung läßt sich der dadurch zusätzlich gewonnene Manipulationsbereich nur schwer vom "Kopf" des Roboters aus, d.h. von oberhalb der Schultern angebrachten Kameras, überwachen. Deshalb haben wir uns für einen abknickbaren Oberkörper entschieden, der gleichzeitig mit den Armen auch den Kamerakopf in eine für Manipulationsaufgaben günstige Position bringen kann (Abbildung 4).

Ein weiterer Vorteil eines abknickbaren Oberkörpers liegt in der Möglichkeit, Objekte von Tischen aufzunehmen, auch wenn diese weit von der Tischkante entfernt in der Tischmitte

liegen. Befindet sich das Hüftgelenk oberhalb der Tischhöhe, bei ca. 60 bis 80 cm, ergibt sich je nach Länge und Konfiguration der Arme ein deutlich erweiterter Manipulationsbereich vor der mobilen Plattform.

Während der Mensch nur eingeschränkte Möglichkeiten besitzt, hinter seinem Rücken zu manipulieren, sollen bei unserem Roboter wegen der andersartigen Hüft-, Schulter- und Ellenbogengelenke und der Beweglichkeit des Kameraträgers diese Einschränkung nicht bestehen. So wird der Roboter sichtbasiert auf der hinteren Nutzfläche des Fahrzeugs manipulieren können, um dort z.B. aufgenommene Gegenstände zwischenzulagern.

3.3 Sensorik

Sensoren dienen der Erfassung der inneren und äußeren Zustände des Robotersystems und der Überwachung der momentanen Wechselwirkung seiner Aktuatoren mit der Umwelt. Wie beim Menschen kann eine Unterteilung der Sensorik des Roboters in Exterozeptoren und Propriozeptoren erfolgen. Exterozeptoren nehmen die Reize wahr, die von außerhalb des Organismus kommen (z.B. mittels Augen, Ohren, etc.), während Propriozeptoren Wahrnehmungen aus dem eigenen Körper vermitteln (z.B. aus Sehnen, Muskeln und Gelenken).

Exterozeptoren. Wesentlich für die Erfassung der externen Gegebenheiten der Umgebung ist ein leistungsfähiges Sensorsystem, dessen Aufmerksamkeit aktiv in gewünschte Richtungen gesteuert werden kann. Die Anbringung eines Sensorkopfes ("Roboterkopfes") an einem auf den Schultern sitzenden "Hals" ist die logische Konsequenz eines dem menschlichen Vorbild entsprechenden Entwurfes. Allerdings erscheint uns die Realisierung zweier Freiheitsgrade, Schwenken und Neigen des Kopfes, zunächst ausreichend. Damit tragen wir der Tatsache Rechnung, daß der Mensch den vorhandenen dritten Freiheitsgrad des Halses nur in Sonderfällen benötigt, um z.B. auf der Seite stehende Schrift leichter lesen zu können.

Das Halsgelenk muß so angebracht und konfiguriert sein, daß der Roboter direkt vor sich auf den Boden sehen und somit durch visuelle Rückkopplung, z.B. beim Andocken an Arbeitsstationen, den Abstand und die Orientierung optimieren kann. Die Kameraplattform sollte um mehr als $\pm 180^\circ$ gedreht werden können, damit der Roboter auch nach hinten sehen kann (z.B. während Rückwärtsfahrten oder Manipulationen auf der Nutzfläche).

Der Tastsinn liefert dem Menschen wichtige Informationen zur Handhabung komplexer Objekte bei fehlender, unvollständiger oder falsch interpretierter Sichtinformation. In einem ersten Schritt möchten wir die mobile Plattform mit einer Art Tastsinn ausstatten, welcher durch in die Stoßfänger integrierte Sensoren die Lokalisierung von Kollisionsstellen erlaubt. Dieser Tastsinn ermöglicht es dem Roboter, aus seinem Fehlverhalten zu lernen. Ein in die Greifer integrierter Tastsinn ist wünschenswert, aber für die erste Ausbaustufe nicht vorgesehen.

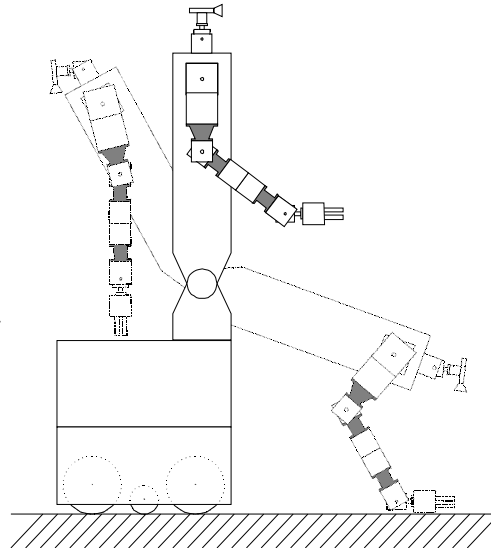


Abbildung 4: Veranschaulichung des durch den abknickbaren Oberkörper zusätzlich gewonnenen Arbeitsraums in Verbindung mit einem 6 DOF Arm mit Zweifingergreifer; die Kameraplattform (2 DOF) hält den Sensorkopf in einer für die Manipulationsaufgabe günstigen Position.

Propriozeptoren. Der Roboter benötigt eine Vielzahl innerer Sensoren, die ihm eine Rückkopplung über seine inneren Zustände geben. Am wichtigsten sind dabei die Winkelgeber, die sich an sämtlichen Drehachsen des Systems befinden müssen, damit eine koordinierte Bewegungssteuerung erfolgen kann. Genauso wichtig erscheint die Erfassung der an den Gelenken auftretenden Momente. Zusätzliche Sensoren sollen weitere Zustandsinformationen liefern, so z.B. über eine etwaige Überlastung der Antriebe und den Ladezustand der Batterie.

3.4 Informationsverarbeitung und Robotersteuerung

Die Verarbeitung von Sensorinformationen und die daraus abgeleitete intelligente Steuerung des Roboters sind komplexe Aufgaben, die mit den zur Zeit gegebenen technischen Möglichkeiten nur durch ein Mehrprozessorsystem zu bewältigen sind. Die einzelnen Prozessoren lassen sich dabei entsprechend ihren Aufgaben auf mehrere Hierarchie-Ebenen verteilen und müssen dabei unterschiedliche Anforderungen an die Rechenleistung, die Kommunikationsschnittstellen und die anzuschließende Peripherie erfüllen.

In der obersten Hierarchie-Ebene soll das Gesamtsystem dem Bediener zugänglich gemacht werden, d.h. der Roboter soll im Kontext der zu erledigenden Aufgabe kommunizieren können. Dafür scheint uns ein standardmäßiger PC die beste Wahl zu sein, da hierfür vielerlei E/A- und Kommunikationsgeräte erhältlich sind. Die darunterliegende Ebene setzt die vom Bediener gegebenen Befehle in sensorgestützte Aktionen des Roboters um. Die Beschreibung dieser Aktionen erfolgt in Form von Bewegungskommandos an die Teilsysteme des Roboters, z.B. an die mobile Plattform, das Manipulations- oder das Sichtsystem. Für die dafür erforderliche übergeordnete Sensordatenverarbeitung und Bewegungssteuerung bietet sich ein System aus vernetzten digitalen Signalprozessoren an, dessen Gesamtrechenleistung durch Hinzunahme weiterer Prozessoren nach Bedarf erhöht werden kann. In der untersten Ebene schließlich reichen einfache Mikrocontroller aus, an die über verschiedene Schnittstellen Sensoren und Aktuatoren angeschlossen werden können. Ideal wäre die Vernetzung dieser Einheiten über ein Bussystem, weil dies die Kommunikation mit der übergeordneten Datenverarbeitung enorm vereinfacht.

3.5 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Bei der Gestaltung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle muß unterschieden werden zwischen der Entwicklerschnittstelle, die für die Erstellung der Roboter-Software benötigt wird, und der Schnittstelle, die einem späteren Bediener zur Verfügung gestellt werden soll. Für den Entwickler müssen in erster Linie vielfältige Anzeige-Optionen zur Überwachung und Analyse des Verhaltens des Roboters vorgesehen werden, während für die Bediener auf das jeweilige Dienstleistungsszenario angepaßte Mensch-Maschine-Schnittstellen entwickelt werden müssen. Eine gute Basis für die Realisierung einer benutzerfreundlichen Bedienerchnittstelle bildet eine verhaltensbasierte Systemarchitektur, da sie eine Kommunikation auf einem dem Menschen angepaßten Abstraktionsniveau ermöglicht [Graefe, Bischoff 1997].

Ein wichtiges Element der Entwicklerschnittstelle und auch des Sicherheitskonzepts während der Entwicklungsphase stellt ein Handbediengerät dar, das es dem Entwickler ermöglicht, aus sicherer Distanz die Steuerung des Roboters zu übernehmen. Mit diesem Handbediengerät müssen sämtliche Freiheitsgrade des Roboters gesteuert werden können, um ihn für Tests in eine günstige Startposition zu bringen oder um ihn im Fehlerfall aus nicht gewünschten oder vom Roboter nicht beherrschbaren Situationen manuell freifahren zu können.

3.6 Sicherheit

Der Roboter ist mit taktilen Sensoren und Notaus-Tastern auszustatten, die im Fehlerfall eine sofortige Trennung sämtlicher Antriebe vom Versorgungsnetz initiieren. Da es aufgrund der großen kinetischen Energie des Roboters bei der an sich zu späten Auslösung dieser Sensoren

schon zu einer Gefährdung von Personen und Beschädigung von Einrichtungsgegenständen kommen kann, muß letztlich ein Sicherheitskonzept entwickelt und realisiert werden, das Gefahren frühzeitig erkennt und zuverlässig vermeidet. Denn im Gegensatz zu Industrierobotern ist bei Servicerobotern eine vollständige Trennung der Arbeitsbereiche von Mensch und Maschine nicht gegeben, sondern es ist ganz im Gegenteil bei bestimmten Dienstleistungsszenarien eine Interaktion zwischen Bediener und Serviceroboter geradezu notwendig.

Personen und Gegenstände, die sich im Manipulationsbereich der Arme aufhalten sind einer besonderen Gefährdung ausgesetzt. Hier läßt sich die Sicherheit durch den Einsatz von an der Oberfläche der Arme angebrachten taktilen Sensoren oder durch eine kontinuierliche Prädiktion und Verifikation der Kraft-Momentenverhältnisse in allen Gelenken erhöhen.

3.7 Energieversorgung

Wichtige Gesichtspunkte bei der Energieversorgung sind eine lange autarke Arbeitszeit und die Entkopplung der informationsverarbeitenden Geräte von Spannungsschwankungen, die durch Lastschwankungen der Motoren verursacht werden können. Für eine effiziente Programmentwicklung ist eine unterbrechungsfreie Umschaltung zwischen Netz- und Batteriebetrieb wünschenswert. Damit nach einem Nothalt ein schnelles Wiederanfahren möglich ist, sind für den Versuchsbetrieb getrennte Sicherheitsschalter für die Motoren einerseits und das Rechnersystem andererseits zweckmäßig.

4 Realisierung von *HERMES*

Der entstehende anthropomorphe Roboter *HERMES* kann als ein Mehrrobotersystem mit insgesamt 18 Freiheitsgraden beschrieben werden. Diese Freiheitsgrade verteilen sich auf ein omnidirektional bewegliches Fahrwerk (3 DOF), ein Manipulationssystem bestehend aus zwei seitlich an einem abknickbaren Oberkörper (1 DOF) befestigten Roboterarmen (je 6 DOF) mit Zweifingergreifern und eine Schwenk-Neigeplattform (2 DOF) zur Aufnahme eines Sensorkopfes (Abbildung 1).

Zentrales Grundelement des Roboters sind kompakte Antriebsmodule, die bei minimalem Platzbedarf in Doppelwürfeln leistungsfähige Motor-Getriebe-Kombinationen, die zugehörige Leistungselektronik, verschiedene Sensoren (Winkelencoder, Stromwandler, Temperaturfühler), einen Mikrocontroller zur Bewegungssteuerung und Zustandüberwachung sowie ein intelligentes Businterface (CAN) integrieren [amtec 1997]. Mit diesen Modulen und verschiedenen mechanischen Verbindungs- und Adapterelementen können vielfältige kinematische Strukturen aufgebaut werden. Die elektrische Verbindung für Energieversorgung und Kommunikation der Module erfolgt über einheitliche Kabel mit Steckverbindern entlang der kinematischen Kette der Roboterstruktur. Die Kommunikation mit allen Modulen wird durch den in der Industrie bewährten CAN-Bus realisiert. Zu den Eigenschaften dieses Bussystems gehören eine mit anderen Bussystemen verglichen hohe Übertragungsgeschwindigkeit (bis zu 1 Mbit/s), eine hohe Störunempfindlichkeit, die Erkennung und Behebung auftretender Übertragungsfehler, Multi-Master-Fähigkeit und eine leicht zu verändernde Bustopologie.

4.1 Das omnidirektionale Fahrwerk

HERMES ist auf einer quadratischen Grundfläche von 60 cm x 60 cm aufgebaut, mit zusätzlichen 5 cm breiten Stoßfängern auf jeder Seite. Im Interesse einer guten Standsicherheit ist das Fahrwerk mit vier Rädern versehen. Diese sind jeweils in den Mitten der vier Seiten des Fahrwerks angeordnet (Abbildung 5). Zwei der vier Räder sind angetrieben und aktiv gelenkt (\varnothing 20 cm), die anderen beiden sind passive Stützräder (\varnothing 10 cm) (vgl. auch Seitenansicht in Abbildung 4). Zwei Fahrmotoren mit je 300 W Leistungsaufnahme reichen aus, um mit einer angemessenen Beschleunigung (ca. 1 m/s^2) mehr als Fußgängergeschwindigkeit zu erreichen

(ca. 2 m/s). Das Fahrwerk erlaubt es dem Roboter, sich auf der Stelle zu drehen und aus dem Stand in eine beliebige Richtung wegzufahren. Auch lassen sich relativ leicht verschiedene Antriebskonfigurationen testen. In der von uns zunächst bevorzugten Konfiguration (aktive Räder vorn und hinten) besteht zunächst die Möglichkeit, wie bei unserem mobilen Roboter *ATHENE II* nur ein Rad anzutreiben und zu lenken und das zweite aktive Rad lediglich mit gleicher Geschwindigkeit geradeaus mitlaufen lassen. Es lassen sich aber genauso gut omnidirektionale oder differentielle Antriebskonzepte realisieren, darunter auch solche, bei denen die Aufbauten um 90° gedreht auf der Plattform angebracht sind, so daß die Antriebsräder sich rechts und links am Fahrzeug befinden.

4.2 Manipulationssystem

Oberhalb des Fahrwerks befindet sich das Manipulationssystem, das aus zwei an einem abknickbaren Oberkörper befestigten Armen mit je 6 Freiheitsgraden und (vorläufig) einem Zweifingergreifer als Endeffektor besteht. Die Arme bestehen aus einer Struktur von doppelwürfel-förmigen Drehmodulen, die durch konisch bzw. zylindrisch geformte Verbindungselemente miteinander verbunden sind (Abbildung 6). Zwei Drehmodule mit der Kantenlänge 90 mm entsprechen zusammen dem Schultergelenk, dem damit ein Freiheitsgrad gegenüber dem menschlichem Pendant fehlt. Dieser fehlende Freiheitsgrad läßt sich teilweise

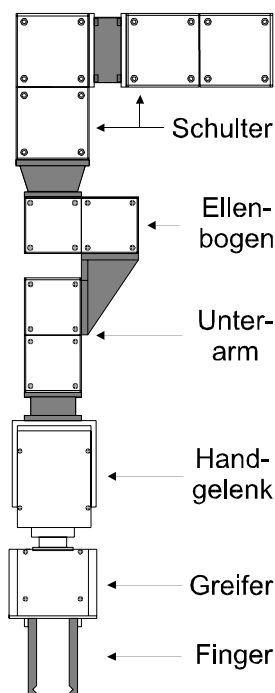


Abbildung 6: Manipulator mit sechs DOF und Zweifingergreifer; Reichweite: 94 cm

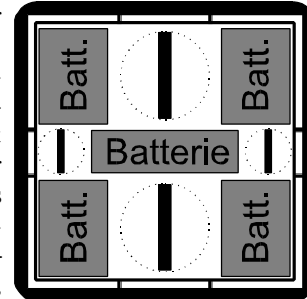


Abbildung 5: Fahrwerk von *HERMES* mit aktiven (groß) und passiven Rädern (klein), Stoßfängern und Batterien

durch den rotatorischen Freiheitsgrad der Bewegungsplattform kompensieren oder aber aufgrund der Modularität der Anordnung bei Bedarf nachrüsten. Zwei weitere Drehmodule der Kantenlänge 70 mm bilden den Ellenbogen und den Unterarm. Ein Handgelenkmodul mit zwei Freiheitsgraden und ein Greifermodul komplettieren den Arm. Die ersten Schultergelenkmodule beider Arme sind vollständig im Oberkörper versenkt und berühren sich dort in der Mitte. Dadurch wird gewährleistet, daß die Arme in hängender Stellung nicht über die Stoßfänger des Fahrwerks hinausragen.

Die gewählte Struktur des Arms hat bei einer Eigenmasse von 14,2 kg eine nominelle Nutzlast von 2,0 kg (am ausgestreckten Arm). Durch Hinzuschalten der in den einzelnen Modulen eingebauten Haltebremsen lassen sich bei alleiniger Verwendung der Freiheitsgrade des Fahrwerks jedoch wesentlich höhere Halte- und Druck- bzw. Zugkräfte auf andere Gegenstände (z.B. Türen) ausüben. Begrenzend für die Kraftübertragung wirkt sich dann nur die Leistungsfähigkeit der mobilen Plattform aus und deren Fähigkeit, die Kraft auf den Boden zu übertragen.

Bei den derzeit gewählten Proportionen von Rumpf, Oberkörper und Armen ergibt sich ein Manipulationsbereich von ca. 120 cm (!) vor der mobilen Plattform; die Erreichbarkeit der hinteren Hälfte der Nutzfläche ist ebenfalls gewährleistet. Das Hüftgelenk auf 80 cm Höhe ermöglicht ein Abknicken oberhalb von Tischkanten. Durch die ca. 120 kg schweren und extrem tief in der mobilen Plattform liegenden Batterien ist garantiert, daß der Roboter selbst bei abgeknicktem Oberkörper und ausgestreckten Armen nicht das Gleichgewicht verliert.

4.3 Sensorik

Das für die Kameraplattform verwendete Schwenk-Neigemodul ist das gleiche wie das im Arm verwendete Handgelenkmodul. Entgegen der Abbildung 1, die den rotatorischen Freiheitsgrad räumlich über dem Neigegelenk anordnet, wird die Kameraplattform mit dem Rotationsgelenk nach unten auf den Schultern montiert. Dadurch werden Kopf und Hals des Menschen besser nachgebildet, und die beiden Kameras können bei aufrechtem Oberkörper (z.B. im Fahrbetrieb) unabhängig vom Neigewinkel um eine stets vertikale Achse geschwenkt werden. Die maximalen Geschwindigkeiten der Neigeachse mit 90°/s und der Schwenkachse mit 180°/s sind für die in näherer Zukunft anstehenden Aufgaben ausreichend.

Zur Zeit werden zwei Monochromkameras für die Gewinnung visueller Informationen verwendet. Es ist jedoch geplant, zwei weitere Vergenzfreiheitsgrade und eine aktive Steuerung von Brennweite und Fokus für beide Kameras zu ermöglichen oder Kameras mit verschiedenen Brennweiten einzusetzen, um den unterschiedlichen Anforderungen an das optische System bei Navigations- und Manipulationsaufgaben gerecht zu werden. Farbkameras könnten wichtige Zusatzinformationen zur Segmentierung von Objekten vom Hintergrund liefern.

Die zum Betrieb des Roboters notwendigen Propriozeptoren sind in den Modulen integriert: Drehwinkelgeber, Stromwandler und Temperaturfühler. Weitere externe bzw. interne Sensorik wird entweder direkt über den CAN-Bus oder über in den Modulen vorhandene digitale und analoge Ein-/Ausgänge angeschlossen (z.B. zur Messung der Batteriespannung oder zur Realisierung des Tastsinns).

4.4 Informationsverarbeitung und Robotersteuerung

Abbildung 7 zeigt das hierarchisch aufgebaute Mehrprozessorsystem und die Zuordnung der einzelnen Prozessoren zu den jeweiligen Teilsystemen des Roboters: Die unterste Ebene wird aus den Antriebsmodulen mit den darin integrierten Controllern, Sensoren und Aktuatoren gebildet. Diese sind für die Bewegungssteuerung und Zustandsüberwachung der *einzelnen Module* zuständig. Die Hauptlast der Informationsverarbeitung wird von einem homogenen Mehrprozessorsystem auf Basis des digitalen Signalprozessors TMS 320C40 ("C40") übernommen, das sich in der darüber liegenden Hierarchie-Ebene befindet. In dieser Ebene erfolgen die Situationserkennung und Verhaltensauswahl sowie Sensordatenverarbeitung (einschließlich Bildverarbeitung) und Bewegungssteuerung auf einem höheren Abstraktionsniveau. Hier werden normalerweise nicht die einzelnen Module, sondern *Gruppen von Modulen*, z.B. die mobile Plattform, als funktionale Einheiten angesprochen.

Je nach benötigter Rechenleistung können den einzelnen Funktionen ein oder mehrere C40-Rechenknoten zugeordnet werden, oder es können mehrere Funktionen in einem Rechenknoten zusammengefaßt werden. Zur Zeit werden zwei C40-basierte Framegrabber und ein C40-Rechenknoten zur Bildverarbeitung eingesetzt. Ein Rechenknoten übernimmt die Gesamtsteuerung (inkl. Wissensverwal-

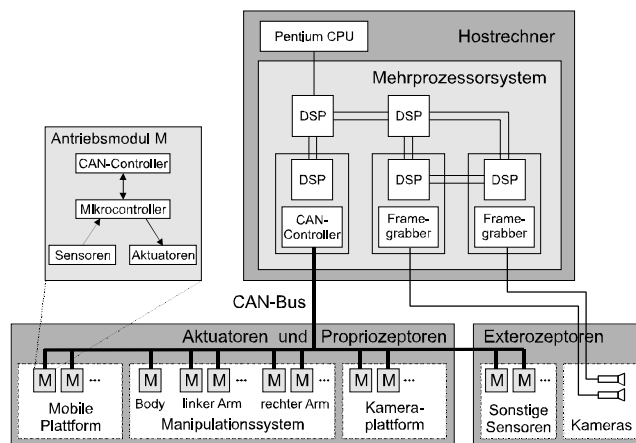


Abbildung 7: Modulare und anpassbare Hardwarearchitektur zur Informationsverarbeitung und Robotersteuerung

tung) und Kommunikation zum PC, und ein C40- basierter CAN Controller wird zur Aktuatoransteuerung und Abfrage der Propriozeptoren verwendet.

An oberster Stelle befindet sich schließlich ein Industrie-PC mit Pentium CPU, der als Host für das Mehrprozessorsystem dient und die Mensch-Maschine-Schnittstelle realisiert.

4.5 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Entwickler- und Bedienerschnittstelle werden unter Windows NT 4.0 realisiert. Aufträge können dem Roboter auch über Funk-Ethernet übermittelt werden. Das Handbediengerät kann als Busmaster sämtliche am CAN-Bus angeschlossenen Module bzw. Teilsysteme abfragen und per Joystick steuern.

4.6 Sicherheit

Um die Folgen etwaiger Kollisionen weitgehend zu vermindern, ist das Fahrwerk mit umlaufenden Stoßfängern versehen. Darin befindliche Sensoren ermöglichen die Auswertung der Kollisionsstelle und stellen eine Art "Tastsinn" für die mobile Plattform dar. In Zukunft soll damit das Fehlverhalten des Roboters analysiert und verschiedene Strategien zur Fehlervermeidung erprobt werden.

Falls der Roboter, insbesondere das Manipulationssystem, außer Kontrolle geraten sollte, können Notaus-Taster betätigt werden, die sich mittig am hinteren Ende der mobilen Plattform und am Handbediengerät befinden. Ein 2D-Laserscanner, der zur robusten Hinderniserkennung eingesetzt werden kann, soll noch integriert werden.

4.7 Energieversorgung

Die Energieversorgung des Roboters erfolgt über fünf in die Freiräume der mobilen Bewegungsplattform integrierte Batterien (Abbildung 5). Die vier in den Ecken befindlichen 12 V Batterien sind in Serie geschaltet, so daß sie sowohl 48 V für die Fahrmotoren als auch über einen Abgriff 24 V für alle übrigen Antriebe und das Rechnersystem liefern können. Eine fünfte in die Plattform integrierte Batterie (24 V) puffert das Rechnersystem und schützt es so zum einen vor kurzfristigen Spannungsabfällen der Hauptbatterie und ermöglicht zum anderen in Notaus-Situationen, in denen sämtliche Antriebe sofort von der Energieversorgung getrennt werden, ein geordnetes Wiederanfahren der Antriebe. Hilfsspannungen für die Kameras und die übrige Sensorik (5 V bzw. 12 V) werden über Spannungswandler bereitgestellt. Es besteht die Möglichkeit, unterbrechungsfrei zwischen Netz- und Batteriebetrieb umzuschalten. Die Kapazität der Batterien beträgt 160 Ah, was je nach Auslastung des Systems für einen mehrstündigen autarken Betrieb ausreichend ist.

5 Zusammenfassung

Aufbauend auf den am Institut für Meßtechnik gesammelten Erfahrungen zur sichtbasierten, auftragsbezogenen Navigation mit dem mobilen Roboter *ATHENE II* und zur Manipulation mit einem Knickarmroboter mit fünf Freiheitsgraden und einem unkalibriertem Stereosichtsystem wurde der anthropomorphe Roboter *HERMES* konzipiert und realisiert. Das durchgängige Konzept der Modularität sowohl bei der Informationsverarbeitung als auch bei der Roboterhardware stellt sicher, daß *HERMES* als Forschungsplattform äußerst flexibel einzusetzen und leicht erweiterbar ist. Die durch den beweglichen Oberkörper erreichte Arbeitsraumerweiterung, die einheitliche Ansteuerung aller Freiheitsgrade über CAN-Bus und das modulare Antriebskonzept mit dezentral verteilten Recheneinheiten stellen gegenüber bisher bekannten mobilen Manipulatoren und anthropomorphen Robotern eine sinnvolle Neuerung dar. Wir denken, mittels dieses Roboters interessante Problemstellungen bearbeiten und wertvolle Lösungen entwickeln zu können, die für eine Vielzahl künftiger Serviceroboter relevant sind.

Literatur

- amtec (1997)**. Produktlinie MoRSE, Beschreibung und technische Spezifikationen, April 1997.
- Bergener, T.; Bruckhoff, C.; Dahm, P.; Janßen, H.; Joublin, F.; Menzner, R. (1997)**. Arnold: An Anthropomorphic Autonomous Robot for Human Environments. 42. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Ilmenau, September 1997.
- Bischoff, R.; Graefe, V.; Wershofen, K. P. (1996)**. Combining Object-Oriented Vision and Behavior-Based Robot Control. Proceedings of the Intern. Conference on Robotics, Vision and Parallel Processing for Industrial Automation. Ipoh, Malaysia, pp 222-227.
- Brooks, R. A.; Stein, L. A. (1993)**. Building Brains for Bodies. A.I. Memo No. 1439, Massachusetts Institute of Technology, Boston, August 1993.
- Brooks, R. A. (1996)**. From Earwigs to Humans. To appear: Journal of Robotics and Autonomous Systems.
- Cameron, J. M.; MacKenzie, D. C.; Ward, K. R.; Arkin, R. C.; Book, W. J. (1993)**. Reactive Control for Mobile Manipulation. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation. Atlanta, GA, May 1993, Vol. 3, pp 784-791.
- Dario, P.; Guglielmelli, E.; Laschi, C.; Guadagnini, C.; Pasquarelli, G.; Morana, G. (1995)**. MOVAID: a new European joint project in the field of Rehabilitation Robotics. http://www.alfa.it/movaid/Public_Domain_Area/Papers/Paper1.html, Arts Lab- Scuola Superiore Sant'Anna, Italy.
- Daxwanger, W.; Ettelt, E.; Fischer, C.; Freyberger, F.; Hanebeck, U.; Schmidt, G. (1996)**. ROMAN: Ein mobiler Serviceroboter als persönlicher Assistent in belebten Innenräumen. In: Schmidt, G.; Freyberger, F. (Hrsg.): 12. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme 1996, Springer Verlag, Berlin, pp 314-333.
- Graefe, V.; Ta, Q. (1995)**. An Approach to Self-Learning Manipulator Control Based on Vision. IMEKO Intern. Symposium on Measurement and Control in Robotics. Smolenice, pp 409-414.
- Graefe, V.; Bischoff, R. (1997)**. A Human Interface for an Intelligent Mobile Robot. 6th IEEE Intern. Workshop on Robot and Human Communication. Sendai, Japan, Sept. 1997 (in Druck).
- Johnson, M. (1987)**. The Body in the Mind: The Bodily Basis of Meaning, Imagination, and Reason. The University of Chicago Press, Chicago, Illinois.
- Khatib, O.; Yokoi, K.; Chang, K.; Ruspini D.; Holmberg, R.; Casal A.; Baader A. (1995)**. Force Strategies for Cooperative Tasks in Multiple Mobile Manipulation Systems. Intern. Symposium of Robotics Research. Munich, October 1995.
- Konno, A.; Nagashima, K.; Furukawa, R.; Nishiwaki, K.; Noda, T.; Inaba, M.; Inoue, H. (1997)**. Development of the Humanoid Robot Saika. Proceedings of IEEE/RSJ Intern. Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS '97 (in Druck).
- Lueeth, T. C.; Nassal, U. M., Rembold, U. (1995)**. Reliability and Integrated Capabilities of Locomotion and Manipulation for Autonomous Robot Assembly. Journal on Robotics and Autonomous Systems, 14 (1995), pp 185-198.
- Schraft, R.D.; Engeln, W.; Hägele, M. S.; Kelterer, M.; Nicolaisen, P.; Schäffer, C.; Volz, H.; Wolf, A. (1994)**. Serviceroboter – ein Beitrag zur Innovation im Dienstleistungswesen. Eine Studie im Auftrag des BMFT durchgeführt von April 1993 bis Juni 1994. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart.
- Wershofen, K. P. (1996)**. Zur Navigation sehender mobiler Roboter in Wegenetzen von Gebäuden – Ein objektorientierter verhaltensbasierter Ansatz. Dissertation, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik der Universität der Bundeswehr München.
- Xie, Q.; Graefe, V.; Vollmann, K. (1997)**. Using a Knowledge Base in Manipulator Control by Calibration-Free Stereo Vision. IEEE Intern. Conference On Intelligent Processing Systems. Beijing, China, Oktober 1997 (in Druck).
- Yamamoto, Y. (1994)**. Control and Coordination of Locomotion and Manipulation of a Wheeled Mobile Manipulator. Dissertation, University of Pennsylvania, August 1994.