

Versuchsträger zur Entwicklung lernfähiger sehender Roboter

Rainer Bischoff und Volker Graefe

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

Kurzfassung

In diesem Beitrag berichten wir über drei von uns aufgebaute Roboter, mit denen wir Grundlagen der Selbstorganisation und des adaptiven Verhaltens in technischen Systemen durch Experimente in der realen Welt erforschen. In der Reihenfolge ihrer Inbetriebnahme sind es ein autonomes Fahrzeug, ein stationärer Manipulator und ein anthropomorpher Roboter mit omnidirektionalem Fahrwerk und zwei Armen. Sie alle verwenden das maschinelle Sehen als Hauptsensormodalität und beruhen auf einem verhaltensbasierten Grundansatz. Mit ihrer Hilfe haben wir u.a. die Problembereiche der Navigation in bekannten und unbekanntem Umgebungen, das maschinelle Lernen und die Steuerung ohne Kenntnis quantitativer Modelle untersucht. Die Gesichtspunkte, die uns bei der Konzeption und Realisierung dieser Roboter geleitet haben, und mit ihnen gewonnene Erkenntnisse werden vorgestellt.

1 Einleitung

Künftige Service-Roboter sollen in der stets unvorhersehbaren und veränderlichen realen Welt bestehen und selbständig vielfältige Aufgaben erfüllen. Sie sollen kooperativ mit dem Menschen zusammenarbeiten, seine Fähigkeiten ergänzen und ihn, vor allem bei gefährlichen, ermüdenden und unangenehmen Aufgaben, entlasten. Die enorme wirtschaftliche und soziale Bedeutung, die solche Roboter voraussichtlich in einer nicht zu fernen Zukunft einmal haben werden, wurde z.B. von [Schraft et al. 1994] untersucht und ausführlich dargelegt.

Trotz weltweiter Anstrengungen haben heutige Roboter allerdings noch längst nicht den Grad an Robustheit im Umgang mit unerwarteten Situationen, Anpassungsfähigkeit, Kommunikationsfähigkeit und technischer Reife erlangt, wie er für einen Einsatz in gänzlich unkooperativen oder mit Menschen bevölkerten Umgebungen erforderlich ist. Umfangreiche Forschungsarbeiten werden notwendig sein, bevor Roboter mit den zu fordernden Eigenschaften und, vor allem, der notwendigen praktischen, handlungsbezogenen Intelligenz realisiert werden können. Entscheidend dabei ist, daß alle Forschungsergebnisse zum Nachweis ihrer Gültigkeit jeweils unverzüglich in praxisnahen Experimenten in der realen Umwelt überprüft und demonstriert werden. Diese Arbeitsweise ist wegen des notwendigen Baus und Unterhalts umfangreicher und komplexer Versuchsanlagen sehr aufwendig, hat aber gegenüber reinen Simulationen den gravierenden Vorteil, zu weitaus solideren und in der Praxis belastbareren Ergebnissen zu führen. Im folgenden legen wir die Konzepte dar, die uns beim Aufbau von experimentellen Robotern für derartige Versuche geleitet haben. Wir stellen drei solche Roboter vor und berichten über durchgeführte Experimente und einige dabei gewonnene Erkenntnisse.

An einem mobilen Roboter haben wir das Konzept der situationsorientierten verhaltensbasierten Systemarchitektur entwickelt und damit Navigationsexperimente durchgeführt und Aspekte des maschinellen Lernens untersucht (Kapitel 2). Ein Knickarmroboter mit fünf Freiheitsgraden, gesteuert durch ein Stereosichtsystem, wurde für Greifexperimente verwendet, wobei die Besonderheit darin besteht, daß weder die mechanischen noch die optischen Kenngrößen des Systems bekannt sind und daß das System sich wegen des Verzichts auf solche Kenntnisse als äußerst robust gegenüber Änderungen dieser Kenngrößen erweist (Kapitel 3). Basierend auf den am mobilen Roboter und am Manipulator gesammelten Erfahrungen wurde schließlich ein mobiler Manipulator mit menschenähnlicher Größe und Form aufgebaut, mit dem in Zukunft vielfältige Ansätze zur Lösung der noch offenen Probleme entwickelt und bewertet werden sollen (Kapitel 4).

2 Autonome Mobilität in Gebäuden

2.1 Situationsabhängig verhaltensbasierte Navigation

Der Grundgedanke der schon seit langem bekannten verhaltensbasierten Navigation (und ganz allgemein von verhaltensbasierter Bewegungssteuerung) ist, daß ein Ziel bzw. ein konkreter Bewegungsablauf dadurch erreicht wird, daß eine geeignete Sequenz von Grundverhaltensmustern, wie z.B. „einen Fahrweg entlangfahren“, „Abbiegen“ oder „auf eine Landmarke zufahren“, ausgeführt wird.

Die Auswahl des jeweils nächsten Verhaltensmusters ist das zentrale Problem bei jeder Realisierung des verhaltensbasierten Ansatzes. Bei dem von uns entwickelten Ansatz erfolgt sie aufgrund einer ständig mitlaufenden Analyse der aktuellen Situation des Roboters. Der Begriff „Situation“ umfaßt hier

- die wahrnehmbaren Objekte in der Umgebung des Roboters und deren vermutete oder erkennbare Zustände;
- den Zustand des Roboters (Bewegungszustand, gerade ausgeführtes Verhaltensmuster etc.);
- die Gegebenheiten der Umgebung, welche dem Roboter bekannt sind (z.B. Lageplan), auch wenn diese momentan mit seinen Sensoren nicht erfassbar sind;
- die Ziele des Roboters, und zwar sowohl permanente Ziele (z.B. Überleben, Unfallfreiheit), als auch transiente, die sich aus der aktuellen Mission und den Forderungen des Benutzers ergeben (z.B. Fahrtziel, zu befahrende Wege);
- das Repertoire an verfügbaren Verhaltensmustern sowie die gegebenen Möglichkeiten, Verhaltensmuster zu koordinieren und zu verketteten und so bestimmte Änderungen der Situation herbeizuführen.

2.2 Systemarchitektur

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die realisierte Systemarchitektur. Eine ausführliche Beschreibung der Systemarchitektur und ihrer Komponenten findet sich in [Wershofen 96].

Zentrale Instanz ist das Situationsmodul. Die Situationserkennung spielt bei unserem Ansatz eine zentrale Rolle, weil fast alle Entscheidungen im System auf der Grundlage der vom Roboter erkannten Situation getroffen werden. Die Situationserkennung geschieht durch eine Verknüpfung von Sensordaten mit gespeichertem Wissen über die Umwelt und über die Mission.

Eine wesentliche Grundlage der situationsabhängig verhaltensbasierten Navigation bilden außerdem elementare sensorische und motorische Fähigkeiten, aus denen, wenn sie in koordinierter Form ausgeführt werden, Verhaltensmuster resultieren. Bei der hier im Vordergrund stehenden Navigation in Wegenetzen zählen zu den sensorischen Fähigkeiten die Erkennung von Wänden, Abbiegemöglichkeiten, Zielobjekten und Landmarken. Aus dem Bereich der motorischen Fähigkeiten ist z.B. das Geradeausfahren oder das Kurvenfahren zu nennen.

Die Verhaltensmuster sind wiederum die Basis für komplexes Verhalten, welches durch eine situationsabhängige Verkettung der (elementaren) Verhaltensmuster entsteht. Auch das Abarbeiten vorgegebener Fahraufträge wird durch die situationsabhängige Verkettung von Verhaltensmustern realisiert. Dazu wird der erteilte Auftrag in eine Datenstruktur (Missionsbeschreibung) umgesetzt, auf die ein Management-Prozess zugreift, welcher das Gesamtverhalten – einschließlich der Kommunikation mit dem Benutzer – koordiniert.

Drei weitere Module sind somit, neben dem Situationsmodul, wichtige Bestandteile des Systems: eine sehr leistungsfähige Sensorik zur Erfassung der Gegebenheiten der Umwelt als Grundlage der fortlaufenden Situationserkennung, eine Aktorik zur Realisierung der vom Situationsmodul jeweils ausgewählten Verhaltensmuster und eine an die Erfordernisse der Systemarchitektur angepaßte Wissensrepräsentation.

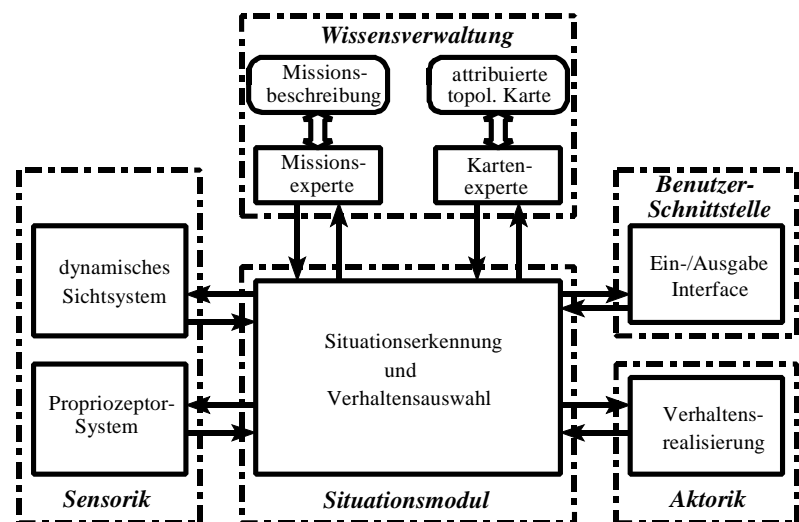


Abbildung 1: Überblick über die Systemarchitektur der situationsabhängig verhaltensbasierten Navigation.

2.3 Sensorik und Aktorik

Wichtige Voraussetzung für eine Situationserkennung ist reichhaltige sensorische Information über die in der Umgebung des Roboters befindlichen Objekte. Das Sehen ist bei *ATHENE II* die Hauptsensormodalität, da es, wie die Natur beweist, am besten geeignet ist, Objekte zu erkennen und die Informationen zu liefern, die für die Erkennung von nicht-trivialen Situationen notwendig sind. Es konnte gezeigt werden, daß trotz der großen zu verarbeitenden Datenmengen mittels eines Sichtsystems, dessen Architektur auf dem Konzept des in [Graefe 1989] beschriebenen objektorientierten Sehens basiert, die benötigten Informationen in Echtzeit geliefert werden können.

Neben dem Sichtsystem ist noch ein Propriozeptorsystem vorhanden, das im wesentlichen aus zwei mit den nicht angetriebenen Rädern verbundenen Weggebern besteht. Es dient vor allem dazu, ungefähre Information über Fahrgeschwindigkeiten und zurückgelegte Wege zu gewinnen. Genaue Information ist wegen der unvermeidlichen Meßfehler mit einer solchen Anordnung nicht zu erhalten. Sie ist aber auch nicht erforderlich, denn die Navigation beruht – wie auch beim Menschen – primär auf der visuell gewonnenen Information.

Die Aktorik verfügt über ein Repertoire an sozusagen eingebauten motorischen Fähigkeiten, die jeweils als eigene Regler für die Motoren des Roboters realisiert sind. Durch koordinierte Aktivierung solcher motorischer Fähigkeiten in Verbindung mit sensorischen Fähigkeiten ergeben sich die elementaren Verhaltensmuster.

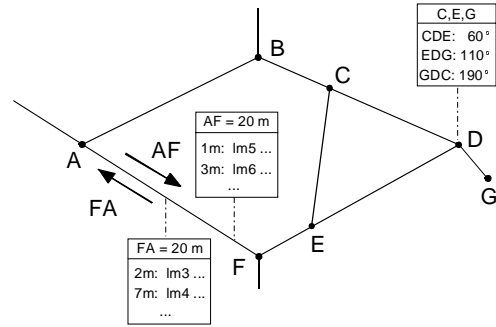


Abbildung 2: Ausschnitt einer attribuierten topologischen Karte. Attribut-Listen (hier in gekürzter Form angedeutet) sind jedem Knoten und jedem gerichteten Pfad zugeordnet

2.4 Wissensrepräsentation

Das für die Situationserkennung und die Steuerung des Roboters erforderliche Wissen ist sowohl in Form von prozeduralem Wissen in den einzelnen Algorithmen als auch in Form von deklarativem Wissen in Datenbasen gespeichert.

Attribuierte topologische Karte. Zur Repräsentation der statischen Gegebenheiten der Umwelt wird eine attribuierte topologische Karte verwendet. Sie enthält neben der Topologie des Fahrwegenetzes wahlweise auch ungefähre Angaben über geometrische Sachverhalte sowie Beschreibungen von sichtbaren Landmarken und Hinweise auf bestimmte Verhaltensweisen, die auf den jeweiligen Ort bezogen sind, wie z.B. „hier langsam fahren“ oder „hier rechts halten“.

Abbildung 2 zeigt als Beispiel für die grundsätzliche Struktur einer attribuierten topologischen Karte einen kleinen Ausschnitt aus einer solchen Karte für ein Wegenetz. Kreuzungen und Abzweigungen (z.B. A, B und C) sowie aufgabenrelevante Orte wie etwa Beladestationen (z.B. G) werden als Punkte modelliert, Verbindungswege zwischen den Orten als Paare von entgegengesetzt gerichteten Pfaden. Sowohl Punkte als auch Pfade tragen als Attribute Listen, die wichtige Hinweise beinhalten; soweit Längen oder Winkel überhaupt angegeben sind, genügt es, wenn diese in grober Näherung richtig sind.

Missionsbeschreibung. Abhängig von den Fähigkeiten des Roboters und den Wünschen des Benutzers ist der Detaillierungsgrad einer Missionsbeschreibung in weiten Grenzen wählbar; sie kann sehr kompakt oder sehr ausführlich sein. Im günstigsten Fall ist es schon ausreichend, wenn die Missionsbeschreibung den Namen des zu erreichenden Zielortes und optional eine Liste mit den Namen von Zwischenpunkten, an denen vorbeigefahren werden soll, beinhaltet. Das Bild zeigt als Beispiel eine Missions-

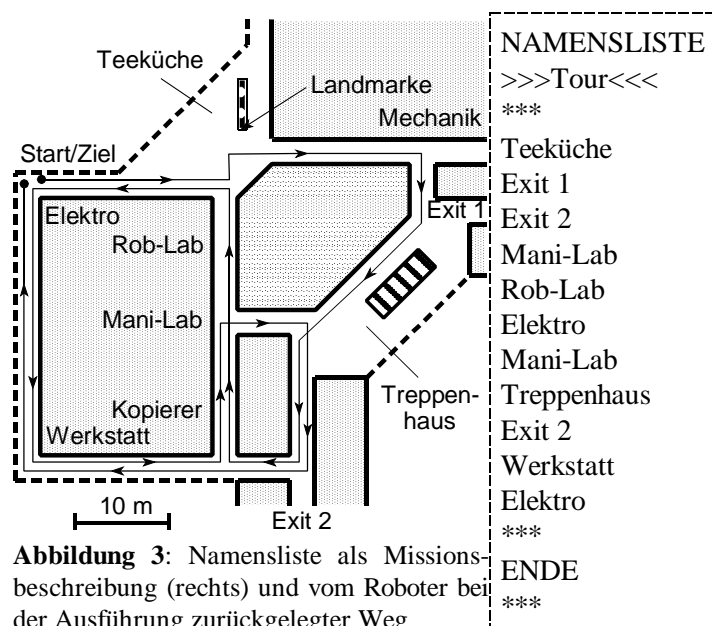


Abbildung 3: Namensliste als Missionsbeschreibung (rechts) und vom Roboter bei der Ausführung zurückgelegter Weg

beschreibung in Form einer Namensliste, in die zu Demonstrationzwecken besonders viele Zwischenpunkte aufgenommen wurden. Im Gegensatz dazu besteht eine detaillierte Missionsbeschreibung aus einer Sequenz von Aktionen, die ausgeführt werden müssen, um die gewünschte Mission auszuführen.

2.5 Benutzerschnittstelle

Die bei der situationsabhängig verhaltensbasierten Navigation möglichen Missionsbeschreibungen können mit Hinweisen verglichen werden, die einem Menschen gegeben werden, wenn ihm erklärt wird, wie er zu einem bestimmten Ort gelangen kann. Dies ist ein großer Vorteil, denn es bedeutet, daß der Bediener mit dem Roboter auf eine für ihn naheliegende Weise kommunizieren kann.

Ursächlich dafür ist, daß der Systemarchitektur Konzepte wie „Situation“ und „Verhalten“ zugrundeliegen und daß das Situationsmodul als zentrale Schaltstelle im System an der Steuerung der Kommunikation mit dem Benutzer beteiligt ist. Dadurch kann der Roboter ein Kommunikationsverhalten zeigen, das in gewissen Grenzen dem eines intelligenten Lebewesens ähnelt. Insbesondere kann die Kommunikation situationsabhängig und unter Bezugnahme auf Sachverhalte und Objekte der Umgebung erfolgen, wie sie für den Benutzer erkennbar sind, und ohne Bezugnahme auf Roboter-interne Gegebenheiten wie etwa Speicheradressen, Variablennamen oder Prozeßbezeichnungen [Graefe, Bischoff 1997].

Aufgrund der Tatsache, daß die Handlungen des Roboters auf Verhaltensmustern basieren, können die Anweisungen des Bedieners an den Roboter auch dann in sehr kompakter Form erfolgen, wenn Einzelaktionen kommandiert werden. Beispiele hierfür sind: „Fahre der Wand entlang“ oder „Biege an der nächsten Kreuzung ab“. Die Umweltrepräsentation in Form einer attribuierten topologischen Karte ermöglicht es darüber hinaus, in Fahraufträgen gewohnte Ortsbezeichnungen in Form von Ortsnamen zu verwenden. So ist dem Roboter nicht mitzuteilen, daß er zu irgendeiner Koordinate (x, y) zu fahren hat, sondern der Fahrauftrag lautet z.B.: „Fahre zum Manipulatorlabor“.

2.6 Realisierung und Ergebnisse

Der vorgestellte Ansatz wurde mit dem mobilen Roboter *ATHENE II* (Abbildung 4) validiert. Dieser Roboter ist ein Dreiradfahrzeug mit einer monochromen Video-Kamera auf einer einachsigen Kameraplattform, einem PC als Steuerrechner und einer darin befindlichen Transputer-Framegrabberkarte zur Bildverarbeitung. Für *ATHENE II* wurden die Verhaltensmuster „Wand folgen“, „Abbiegen“, „Zielfahrt“ und „Anhalten“ implementiert. Dazu wurden Erkennungsprozesse für Wände, Abbiegemöglichkeiten, Zielobjekte und Landmarken entwickelt. Die Situationserkennung und Verhaltensauswahl ist in Form eines endlichen Automaten realisiert [Bischoff et al. 1996].

In einem mehrfach zusammenhängenden Netz von Korridoren und frei befahrbaren Flächen kann *ATHENE II* auftragsbezogen navigieren, d.h. namentlich vorgegebene Zielorte anfahren bzw. direkt spezifizierte Sequenzen von Verhaltensmustern abarbeiten. Aufgrund der Abmessungen des Roboters und der Korridore stellen Abbiegemöglichkeiten in der Regel Engstellen dar, die jedoch mit angemessen reduzierter Geschwindigkeit ohne Probleme durchfahren werden.

In den Experimenten wurde gezeigt, daß selbst wenn Engstellen zu passieren sind, Fahrtziele auch dann problemlos erreicht werden, wenn die Startposition und die metrischen Angaben in der Karte um mehrere Meter falsch sind. Diese ungewöhnliche Robustheit ermöglicht im Vergleich zu bisher bekannten Ansätzen eine hohe Aufwandsreduzierung bei der Erstellung der Karte und der Missionsbeschreibung.

2.7 Wissenserwerb durch Lernen

Alle höheren Tiere haben die Fähigkeit, aus Erfahrungen zu lernen und sich an ständig sich ändernde Umweltbedingungen anzupassen. Lernen und Adaptionsfähigkeit sind offenbar wesentliche Voraussetzungen für die Existenz komplexer autonomer Systeme in der Natur. Wir sind deshalb überzeugt, daß auch intelligente Roboter diese Fähigkeiten benötigen, um in der realen Welt zu bestehen.

Die situationsabhängig verhaltensbasierte Navigation bildet eine sehr gute Basis zur Realisierung eines lernfähigen Roboters. Der Nachweis hierfür wurde zunächst für das überwachte Erlernen von Kartenwis-

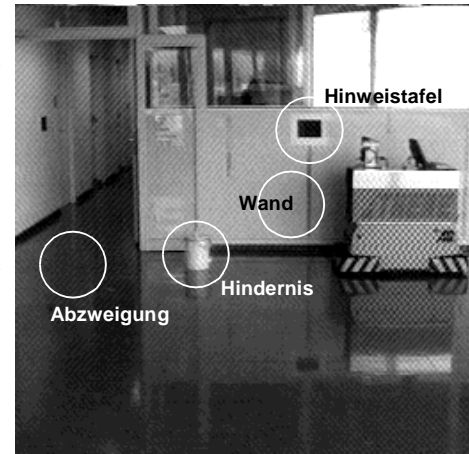


Abbildung 4: *ATHENE II* in der Versuchsumgebung, mit Beispielen für „Objekte“, die bei der Navigation in Wegenetzen relevant sind (mit weißem Kreis markiert).

sen erbracht. In Experimenten wurde demonstriert, daß ein sehender mobiler Roboter die zur selbständigen Navigation benötigte Karte im Rahmen von geführten Erkundungsfahrten erlernen kann.

Darüber hinaus wurde in ersten Experimenten gezeigt, daß auch eine selbständige, von keinem Bediener unterstützte Erkundungsfahrt möglich ist. Um hierbei ähnliche Leistungen wie bei der geführten Erkundungsfahrt zu erreichen, sind allerdings die sensorischen Fähigkeiten des Roboters noch zu erweitern.

3 Ein kalibrationsfreier Manipulator

3.1 Grundkonzept

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, wiederholt und z.B. nach Wartungsarbeiten erneut durchgeführt werden. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, haben wir einen neuen Ansatz entwickelt, das „objekt- und verhaltensbasierte Stereosehen“, und damit einen kalibrationsfreien Manipulator, bestehend aus einem Knickarmroboter und einem Stereosichtsystem, realisiert [Graefe, Ta 1995]. Er kann Objekte 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 große 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.

Dem Verfahren liegt ein einfacher Ansatz zugrunde: Der Roboter beobachtet seinen Endeffektor mit seinen Kameras, etwa so, wie ein spielender Säugling seine Hände mit den Augen beobachtet. Er gibt nun mehr oder weniger willkürlich gewählte Steuerwörter an die Motoren aus und „erlernt“ so Zusammenhänge zwischen Steuerwörtern und daraus resultierenden Änderungen in den Kamerabildern. Nach Ausführung entsprechender Testbewegungen ist es möglich, den Endeffektor gezielt an jede überhaupt erreichbare Stelle in den Bildern zu steuern. Wenn außerdem ein zu manipulierendes Objekt in den Bildern sichtbar ist, kann der Endeffektor auf diese Weise in den Bildern – und damit auch in der realen Welt – an das Objekt herangeführt werden.

3.2 Experimentelle Erprobung

Das Verfahren wurde an einem Knickarmroboter mit 5 Freiheitsgraden und einem Zweifingergreifer als Endeffektor entwickelt; Gegenstand des Experiments war das Entdecken und Greifen eines bestimmten Objekts. In unserer speziellen Anordnung sind die beiden Kameras oberhalb des Hüftgelenks J_0 des Manipulators befestigt, so daß sie sich bei einer Hüftdrehung mitbewegen und der Greifer an der gleichen Position im Bild bleibt. Über die Gelenke J_1 , J_2 und J_3 läßt sich der Greifer in seiner (vertikalen) Arbeitsebene bewegen. Gelenk J_3 wurde dabei überwiegend so gesteuert, daß der Greifer eine vertikale Orientierung aufwies. Die Ausrichtung der Greiferbacken parallel zu einem Objekt wird durch Rotation des Handgelenks J_4 erreicht.

Flache und längliche zylindrische Objekte wurden gefunden und gegriffen, obwohl nichts über die optischen und kinematischen Parameter des Roboters bekannt war. Sogar das willkürliche Verdrehen einer Kamera wurde problemlos toleriert. Das Annähern des Greifers an das Objekt erfolgte in einer Folge von Schritten mit zwischengeschalteten Testbewegungen; das Greifen brauchte deshalb viel Zeit (etwa 50 s). In einer ersten Implementierung wurden die während eines Experiments erlernten Zusammenhänge

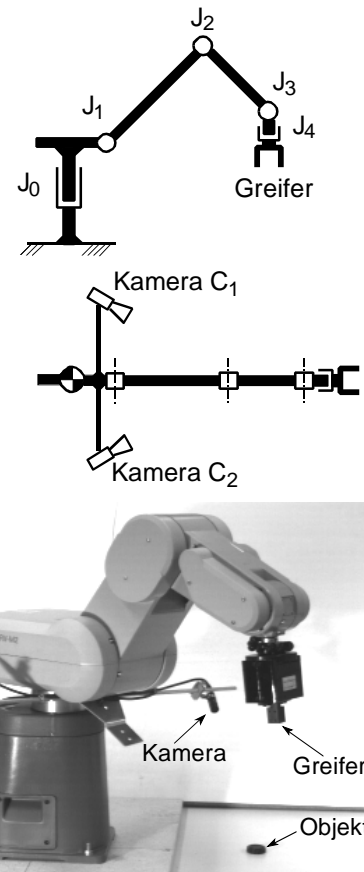


Abbildung 5: Anordnung der Gelenke und Kameras am verwendeten Knickarmroboter mit 5 DOF, Zweifingergreifer und Stereosichtsystem

zwischen Steuerwörtern und Bildbewegungen am Ende jedes Experiments sofort wieder vergessen. Das führte einerseits zu einer totalen Unempfindlichkeit gegenüber Parameteränderungen zwischen Experimenten, verhinderte aber auch, daß der Roboter Erfahrungen sammeln und dadurch seine Geschicklichkeit steigern konnte.

3.3 Das Langzeitgedächtnis

Damit der Roboter erworbene Erfahrungen ansammeln und so seine Fähigkeiten im Laufe der Zeit verbessern kann, müssen die einmal erlernten Werte der Kenngrößen in einer Wissensbasis dauerhaft gespeichert werden (Gedächtnisfunktion). Im Gegensatz zu üblichen Datenbanken muß die hier angesprochene Wissensbasis zum einen das Lernen unterstützen und zum anderen echtzeitfähig sein.

Da sich die optischen und die mechanischen Kenngrößen des Roboters, aber auch die Umgebungsbedingungen, zeitlich verändern können (z.B. infolge von Alterung oder Wartungsarbeiten), soll auch eine adaptive Komponente vorhanden sein, welche die selbständige Anpassung der Steuerung an eben diese Änderungen ermöglicht. Dies erfordert eine Form des Vergessens und Umlernens.

Wir untersuchen parallel zwei Ansätze zur Realisierung der Wissensbasis: modifizierte Kohonennetze und selbstorganisierende Tabellen. In beiden Fällen wird ein Punkt in der realen Welt durch die Koordinaten seiner Abbilder in den Bildern beider Kameras charakterisiert; er wird also in einen vierdimensionalen Bildraum abgebildet. Für ausgewählte Punkte in diesem vierdimensionalen Raum (sog. Stützstellen) werden in der Wissensbasis bestimmte Daten gespeichert, u.a. die Steuerwörter und deren Ableitungen, die dann gelten, wenn der Greifer sich an dem betreffenden Punkt befindet.

Es hat sich gezeigt, daß sich auf diese Weise tatsächlich ein dauerhaftes Lernen und eine zunehmende Geschicklichkeit des Roboters erreichen lassen: Von Versuch zu Versuch werden die Bewegungen flüssiger, und das Greifen erfolgt schneller; nach einigen wiederholten Versuchen benötigt der gesamte Greifvorgang nur noch wenige Sekunden [Xie et al. 1997]. Offene Fragen sind die optimale Form der Wissensrepräsentation, die Beschleunigung des Lernens in komplizierteren Situationen, die Realisierung des Umlernens und das Greifen beliebig geformter Objekte in beliebiger Lage.

Die genannten Grundgedanken lassen sich sowohl für die Manipulation, z. B. das Greifen, von Objekten als auch für die Navigation von mobilen Robotern anwenden. Wir haben uns vorerst auf das Greifen von Objekten konzentriert; Navigationsanwendungen sollen nach der Fertigstellung und Inbetriebnahme des neuen Roboters (vgl. folgender Abschnitt) untersucht werden.

4 HERMES – Ein anthropomorpher Roboter für die mobile Manipulation

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. 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. Wenn ein Roboter in solchen Umgebungen zum Einsatz kommt, sollte er eine dem Menschen ähnliche Gestalt und vergleichbare sensorische und motorische Fähigkeiten besitzen. Eine ausführliche Beschreibung und Begründung dieses Konzeptes sowie eine Darstellung des Stands der Technik ist [Bischoff 1997] zu entnehmen.

Der bei uns im Entstehen befindliche Roboter *HERMES* – **H**umanoid **E**xperimental **R**obot for **M**obile **M**anipulation and **E**xploration **S**ervices – kombiniert Mobilität mit der Fähigkeit zur Manipulation und realisiert damit wesentliche Grundfunktionen für die meisten Serviceroboter. *HERMES* soll 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 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.

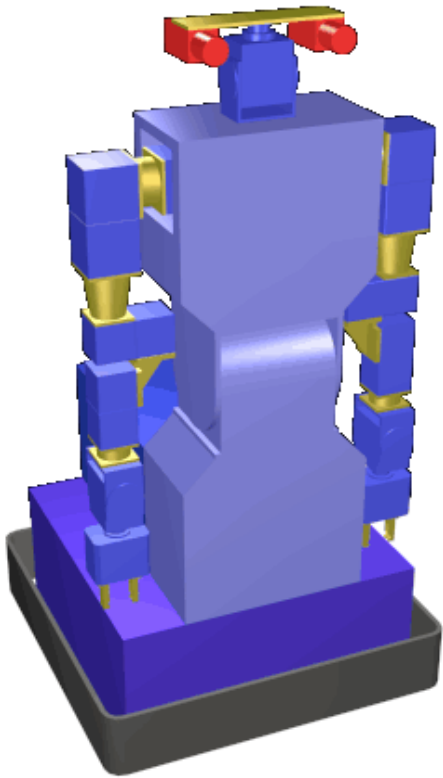


Abbildung 6: Anthropomorpher Roboter *HERMES* mit omnidirektionaler mobiler Basis, zwei Armen, abknickbarem Oberkörper und zwei Kameras auf einer steuerbaren Plattform; Größe 70 cm x 70 cm x 180 cm.

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 Störuneempfindlichkeit, 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. Zwei der vier Räder sind angetrieben und aktiv gelenkt (\varnothing 20 cm), die anderen beiden sind passive Stützräder (\varnothing 10 cm) (Abbildung 7). 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 zu 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.

Ein streng modularer Aufbau, 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.

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.

Zentrales Grundelement des Roboters sind kompakte Antriebsmodule, die bei minimalem Platzbedarf in Doppelwürfeln leistungsfähige Motor-Getriebe-Kombinationen, die zugehörige Leistungselektronik, verschiedene Sensoren (Winkelencoder,

4.2 Manipulationssystem

Oberhalb des Fahrwerks befindet sich das Manipulationssystem, das aus zwei an einem abknickbaren Oberkörper befestigten Armen mit je sechs 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 8). 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 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.

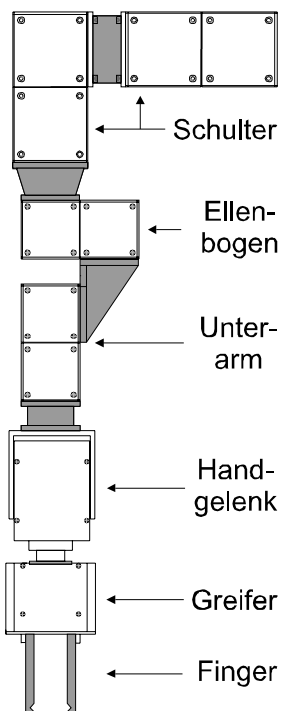


Abbildung 8: Manipulator mit sechs DOF und Zweifingergreifer; Reichweite: 94 cm

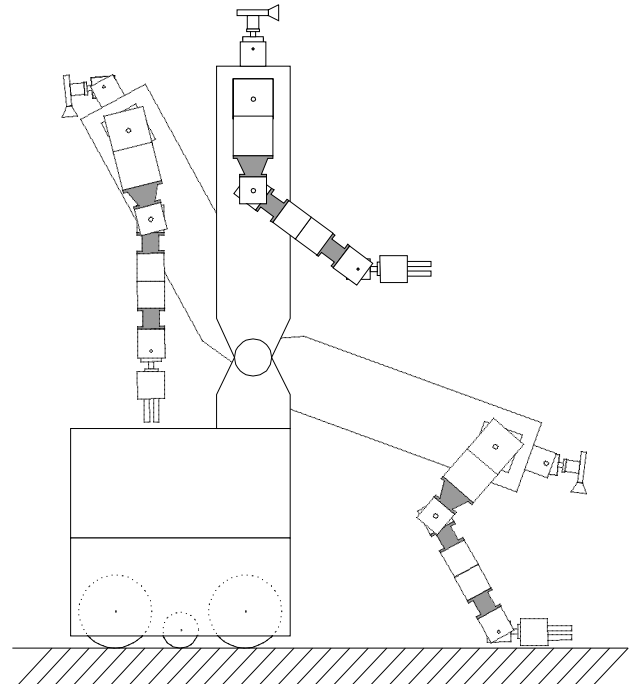


Abbildung 7: Veranschaulichung des durch den abknickbaren Oberkörper zusätzlich gewonnenen Arbeitsraums in Verbindung mit einem 6 DOF Arm mit Zweifingergreifer; die Kameraplatzform (2 DOF) hält den Sensorkopf in einer für die Manipulationsaufgabe günstigen Position.

4.3 Sensorik

Das für die Kameraplatzform verwendete Schwenk-Neigemodul ist das gleiche wie das im Arm verwendete Handgelenkmodul. Die maximalen Geschwindigkeiten der Neigeachse mit $90^\circ/s$ und der Schwenkachse mit $180^\circ/s$ 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 9 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 darüberliegenden 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. Wissensverwaltung) 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 Bediener-schnittstelle 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-Laser-scanner, der zur robusten Hinderniserkennung eingesetzt werden kann, soll noch integriert werden.

Die Energieversorgung des Roboters erfolgt über fünf in die Freiräume der mobilen Bewegungsplattform integrierte Batterien. 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

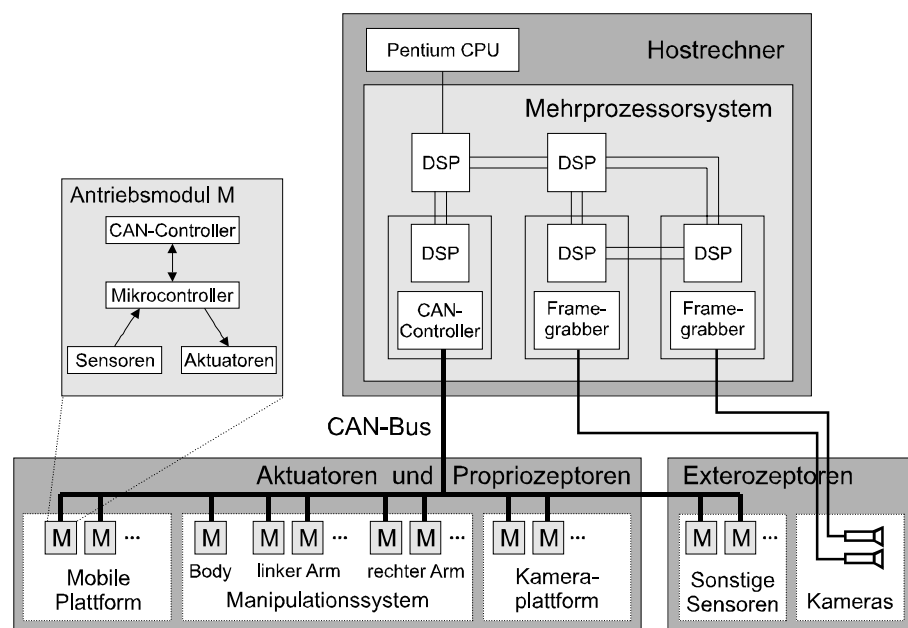


Abbildung 9: Modulare und anpaßbare Hardwarearchitektur zur Informationsverarbeitung und Robotersteuerung

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 einfaches Wiederanfahren der Antriebe. Hilfspennungen 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

Die Entwicklung robuster lern- und adaptionsfähiger Roboter setzt umfangreiche Versuche in der realen Welt voraus. Drei zu diesem Zweck aufgebaute Versuchsträger wurden vorgestellt:

- ▶ ein sichtgesteuerter mobiler Roboter, mit dem das Konzept der situationsorientierten verhaltensbasierten Navigation entwickelt wurde und der lernend Wissen über seine Umgebung erwirbt;
- ▶ ein vollständig unkalibrierter Manipulator, der, gesteuert durch ein ebenfalls völlig unkalibriertes Stereosichtsystem, weitgehend beliebig geformte Objekte handhabt und sich an zufällige Änderungen seiner Kenngrößen selbsttätig anpaßt;
- ▶ ein anthropomorpher Roboter, der die Fähigkeiten der beiden erstgenannten Roboter in einem System vereinen und an wechselnden und variablen Einsatzorten Manipulations- und Transportaufgaben bewältigen soll.

Als wichtige Grundkonzepte für die Realisierung der Lern- und Adaptionsfähigkeit und der daraus resultierenden Robustheit künftiger Roboter sehen wir die folgenden an:

- ▶ Einsatz des Sehens, das sich in der Tierwelt so hervorragend bewährt hat, als Hauptsensormodalität;
- ▶ Verhaltensauswahl auf der Grundlage eines Verständnisses der aktuellen Situation, in der sich der Roboter befindet, wobei zur Situation nicht nur das gehört, was sich unmittelbar in den Sensordaten widerspiegelt, sondern auch Wissen über die Ziele und die Fähigkeiten des Roboters sowie über die Umgebung;
- ▶ möglichst direkter Übergang von Bildsensordaten auf Motor-Steuerkommandos und möglichst weitgehender Verzicht auf Weltkoordinaten sowie auf stark parameterabhängige Berechnungen wie z.B. inverse Perspektiv- und Kinematiktransformationen.

Wir denken, mit dem neuen anthropomorphen Roboter *HERMES* mit seinem flexiblen, modularen und erweiterbaren Aufbau ein wertvolles Hilfsmittel für weitere Schritte auf dem Weg zu dem Fernziel des intelligenten und universell einsetzbaren Service-Roboters geschaffen zu haben.

Literatur

amtec (1997). Produktlinie MoRSE, Beschreibung und technische Spezifikationen, April 1997.

Bischoff, R. (1997). Entwurf und Konstruktion eines anthropomorphen Roboters. 13. Fachgespräch Autonome Mobile Systeme 1997, Springer Verlag, Berlin (im Druck).

Bischoff, R.; Graefe, V.; Wershofen, K. P. (1996). Combining Object-Oriented Vision and Behavior-Based Robot Control. Proc. of the Int. Conf. on Robotics, Vision and Parallel Processing for Industrial Automation. Ipoh, Malaysia, pp 222-227.

Graefe, V. (1989). Dynamic Vision Systems for Autonomous Mobile Robots. Proc. IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems, IROS '89. Tsukuba, pp 12-23.

Graefe, V.; Ta, Q. (1995). An Approach to Self-Learning Manipulator Control Based on Vision. IMEKO Intern. Symp. 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 (im Druck).

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), 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. Conf. On Intelligent Processing Systems. Beijing, Oktober 1997 (im Druck).