

Dynamische Systeme zur Verhaltensgenerierung eines anthropomorphen Roboters

Axel Steinhage und Werner von Seelen

Institut für Neuroinformatik, Ruhr Universität Bochum, 44780 Bochum, Germany

Axel.Steinhage@neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de

WWW home page:

<http://www.neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de/ini/PEOPLE/axel/top.html>

1 Einleitung

Autonome Systeme organisieren ihr Verhalten auf der Basis der über ihre Sensoren aufgenommene Information. Um ein in der realen Umwelt effizientes Verhalten zu erzeugen, müssen sich diese Systeme im geschlossenen Regelkreis befinden. Dabei treten zwei Aspekte der Wechselwirkung zwischen Umwelt und sich verhaltendem System in den Vordergrund: zum einen verändert das System durch sein Verhalten die Umwelt und muß daraufhin seine eigenen Aktionen diesen veränderten Bedingungen anpassen. Zum anderen kann das System durch sein Verhalten bestimmen, welche Informationen es über seine Sensoren von der Umwelt bekommt. Bei der Erzeugung von Verhalten steht man also vor dem Problem, ein sich dynamisch veränderndes gekoppeltes System bestehend aus der Umwelt und dem sich darin verhaltenden Agenten in Echtzeit zu organisieren. Als besonders komplex erweist sich dieses Problem dann, wenn die Umwelt einen hohen Grad an Dynamik besitzt. Diese Situation ist beispielsweise im Bereich Servicerobotik gegeben, wo autonome Maschinen mit Menschen interagieren sollen. Genau diesem Bereich widmet sich die Forschung der Robotikgruppe am Institut für Neuroinformatik.

Aus der bisherigen Forschungstätigkeit haben sich zwei grundlegende Prinzipien als besonders geeignet zur Lösung der Probleme im Bereich Mensch-Maschine Interaktion herausgestellt (vergl. [3]). Das erste Prinzip, welches wir als *Anthropomorphie* bezeichnen, betrifft die äußere Form und die Sensorausstattung der Systeme, die mit dem Menschen interagieren sollen: eine effiziente Interaktion ist dann gegeben, wenn der menschliche Partner mit der Maschine über die gewohnten Kommunikationskanäle Sprache, Sehen und Tasten kommunizieren kann. Weiterhin erscheint die Interaktion natürlicher, wenn die äußere Form der Maschine menschenähnlich ist. Beispielsweise kann der Mensch aus der Richtung in die die Kameras eines Roboters schauen, ein potentielles Bewegungsziel der Maschine antizipieren und sich dementsprechend verhalten. Das wird erleichtert, wenn sich die Kameras gut sichtbar in Augenhöhe am Roboter befinden.

Das zweite grundlegende Prinzip betrifft die mathematische Methodik mit welcher Verhalten generiert und organisiert wird: der Tatsache Rechnung tragend, dass sowohl die Umwelt als auch jedes sich verhaltende System dynamische

Systeme sind, die miteinander über Sensoren und Effektoren gekoppelt sind, verwenden wir die Theorie dynamischer Systeme zur Verhaltensgenerierung. Hierbei werden Verhaltensvariablen des Systems auf Zustandsgrößen multidimensionaler nichtlinearer dynamischer Systeme abgebildet, die eine Vielzahl verschiedener stabiler Zustände annehmen können. Als Ergebnis unserer Forschung haben wir eine Reihe von Designprinzipien erarbeitet, die es uns gestatten die mathematische Form der dynamischen Systeme so zu gestalten dass ihre stabilen Zustände den zu generierenden Verhalten entsprechen. Im Folgenden möchten wir diese Prinzipien zuerst schematisch und dann anhand zweier Roboterimplementationen vorstellen.

2 Der dynamische Ansatz zur Verhaltensgenerierung

Die grundlegende Idee unseres Ansatzes ist es, Verhalten durch eine skalare oder vektorwertige Größe \mathbf{x} , die so genannte *Verhaltensvariable* zu beschreiben [9]. Auf diese Weise soll der auf das jeweilige Verhalten bezogene physikalische Zustand des Roboters auf die Zustandsvariable eines mathematisch formulierten dynamischen Systems abgebildet werden. Soll beispielsweise für einen mobilen Roboter Navigationsverhalten in der Ebene erzeugt werden, so bieten sich hierzu die Zustandsvariablen *Bewegungsrichtung* ϕ und *Vorwärtsgeschwindigkeit* v an. Die Auswahl der jeweiligen Verhaltensvariablen beeinflusst auf sensible Weise die spätere Formulierung des verhaltensgenerierenden dynamischen Systems und muß daher mit großer Sorgfalt geschehen. Für das Navigationsverhalten hat sich beispielsweise gezeigt, dass die ebenfalls plausibel erscheinende Möglichkeit statt Vorwärtsgeschwindigkeit und Richtung die kartesischen Positionskoordinaten x und y zu verwenden, zu Stabilitätsproblemen bei der späteren Kopplung mit weiteren Verhalten wie *Hindernisvermeidung* und *Zielanfahrt* führt (siehe hierzu [10], S. 15ff).

Der nächste Schritt beim Aufbau eines verhaltensgenerierenden Systems auf der Basis des dynamischen Ansatzes ist nun, die Differentialgleichung eines dynamischen Systems in der gewählten Verhaltensvariable zu formulieren:

$$\tau \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \mathbf{s}(\mathbf{x}, t)) \quad (1)$$

Dabei bezeichnet $\dot{\mathbf{x}}(t) = \frac{d\mathbf{x}}{dt}$ die zeitliche Variation der Verhaltensvariable, die Konstante τ ist die so genannte *Zeitskala* der Dynamik, $\mathbf{s}(\mathbf{x}, t)$ bezeichnet einen Satz von Parametern bzw. den so genannten *Input* und \mathbf{F} ist eine lineare oder nichtlineare Funktion. Das konkrete Verhalten wird dann erzeugt indem die Lösung der Differentialgleichung als Zeitserie ausgewertet und an die Effektoren des Systems weitergeleitet wird. Die genaue Form von \mathbf{F} hängt vom konkreten Anwendungsfall ab. Jedoch bietet unser Ansatz eine Reihe von generellen Richtlinien an, die die Erstellung der Dynamik erleichtern.

2.1 Erstellung der Dynamik

Wesentlich für die Erzeugung sinnvollen Verhaltens ist die Formulierung des *Verhaltensziels*. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten. So kann man beispiels-

weise für das Navigationsverhalten die Position eines anzufahrenden Ziels in kartesischen Koordinaten vorgeben. Dieser Ansatz wird z.B. vom so genannten *Potenzialfeldansatz* [2] verfolgt, der das sich verhaltende System gleichsam als Kugel in einer Energielandschaft darstellt in der das Verhaltensziel das globale Minimum bildet. Das Problem dabei ist allerdings, dass ein stabiler Systemzustand nur bei Erreichung des Ziels angenommen wird. Auf dem Wege dorthin ist das System aber so zu sagen "ungeschützt" stochastischen Störungen wie z.B. Sensorrauschen ausgesetzt. Dies führt beim Navigationsverhalten auf der Basis von stark verrauschten Sensorsignalen zu unvorhersagbaren Trajektorien oder, im allgemeinen Fall, zu instabilem Verhalten.

Der dynamische Ansatz geht daher einen anderen Weg indem er fordert, dass die Verhaltensziele so zu formulieren sind, dass sich das System zu allen Zeiten in einem stabilen Zustand befindet. Dieser stabile Zustand wird gleichsam mit dem Verhaltensziel identifiziert. Für das Navigationsverhalten wird demzufolge nicht die Position des Ziels sondern die *Richtung* ϕ_T , in der es vom System aus gesehen liegt, zum Verhaltensziel. Da diese Richtung während der gesamten Zielfahrt eingehalten werden muss, kann sie als stabiler Fixpunkt oder *Attraktor* für die verhaltensgenerierende Dynamik benutzt werden. Die einfachste Dynamik, die diese Bedingung erfüllt, ist die Folgende:

$$\tau \dot{\phi}(t) = \phi_T(t) - \phi(t) \quad (2)$$

Die rechte Seite dieser Gleichung und damit die zeitliche Variation von $\phi(t)$ verschwindet für $\phi_T = \phi$. Da außerdem $\frac{\partial \dot{\phi}}{\partial \phi} |_{\phi=\phi_T} = -\frac{1}{\tau} < 0$ gilt, werden Auslenkungen aus der stabilen Lage, wie sie z.B. durch stochastische Störungen verursacht werden, auf der Zeitskala τ abgebaut. Mit anderen Worten: das Verhalten ist zu jeder Zeit stabil. In diesem Zusammenhang wird nun auch deutlich, warum die richtige Wahl der Verhaltensvariablen so wichtig ist: bei Benutzung kartesischer Koordinaten wäre eine Formulierung des Verhaltensziels im Stile von (2) nicht möglich. Die Richtung auf das Ziel $\phi_T(t)$ tritt in (2) als Parameter auf. In der Implementation wird dieser Parameter aus der Ausgabe eines geeigneten Sensors wie z.B. eines Kamerasystems gewonnen.

2.2 Erweiterungen des Ansatzes

Obwohl Gleichung (2) die einfachste Form einer Attraktorgleichung darstellt, kann mit ihr bei konstanter Vorwärtsgeschwindigkeit $v = \text{const}$ ein robustes und glattes Zielfahrverhalten realisiert werden, wie zahlreiche Roboter-Implementationen zeigen (siehe z.B. [4]). Seine besondere Stärke zeigt der Ansatz allerdings erst bei der Integration mehrerer Verhalten und letztendlich bei deren *Organisation* in komplexen Verhaltensketten. Hierfür haben wir eine ganze Reihe weiterer Konzepte entwickelt, die wir gleichsam wie einen "Werkzeugkasten" (*dynamic toolbox*) für das Design verhaltensgenerierender Systeme benutzen.

Die einfachste Erweiterung besteht darin, auch zu vermeidende Verhalten zu berücksichtigen indem diese als *negative* Verhaltensziele betrachtet werden. Naheliegender kann man das ganz einfach dadurch tun, dass man diese Zustände

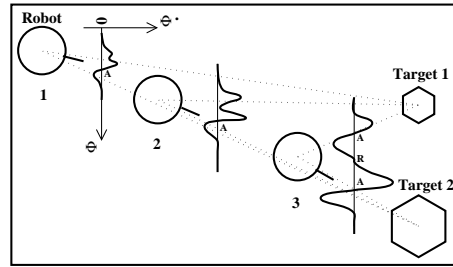
als instabile Fixpunkte oder *Repelloren* formuliert. Statt Zielanfahrt wird Gleichung (2) *Hindernisvermeidung* generieren, wenn die rechte Seite mit -1 multipliziert wird und ϕ_T die Richtung auf das Hindernis beschreibt.

Eine Möglichkeit, mehrere Verhalten zu integrieren, besteht darin, die jeweiligen Verhaltensziele als weitere stabile oder instabile Zustände in der Funktion \mathbf{F} aufzusummieren. Hierbei können konstante Wichtungskoeffizienten λ_i die relative Bedeutung der Verhaltensziele zueinander regeln. Durch Multiplikation mit einer so genannten zeitabhängigen *Aktivierungsvariablen* $n_i(t)$ lassen sich Verhalten auch vollständig ein- ($n_i = 1$) oder abschalten ($n_i = 0$). Um einfache Mittelung und gleichzeitig das Auftreten unerwünschter Fixpunkte zu verhindern, kann man jeden dieser Fixpunktterme mit einem Einflussbereich oder *Range* σ_i ausstatten:

$$\tau \dot{\mathbf{x}}(t) = \sum_i \lambda_i n_i(t) (\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}) e^{-\frac{(\mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}(t))^2}{2\sigma_i^2}} \quad (3)$$

Ein auf diese Weise mit einem gauss'schen Einflussbereich ausgestatteter Fixpunktterm hat nur dann einen Einfluss auf das Systemverhalten, wenn der momentane Wert der Verhaltensvariablen $\mathbf{x}(t)$ innerhalb dieses Bereiches liegt. So kann man z.B. verhindern, dass ein Hindernis hinter dem Roboter dessen Trajektorie beeinflusst.

Haben zwei Attraktorterm überlappende Einflussbereiche, so wird zwischen ihnen gemittelt. Zwei nahe beieinander liegende Ziele werden z.B. aus einiger Entfernung wie ein einziges Ziel behandelt. Rücken zwei Attraktorterm aber so weit auseinander, dass deren Gaussglocken nicht mehr überlappen, so wirken sie als alternative Verhaltensziele. Das geschieht z.B.



bei der Zielanfahrt, wenn sich das System zwei Zielen nähert und diese deshalb im Richtungsraum auseinanderlaufen. Das System wird sich dann autonom für eines der beiden Ziele "entscheiden" (siehe Bild). Mathematisch gesehen durchläuft das dynamische System dabei einen Phasenübergang oder *Bifurkation*: ein einziger Attraktor spaltet sich in zwei Attraktoren mit dazwischen liegendem Repeller auf. Hier wird also das Verhaltenskonzept der "Entscheidungsfällung" in eine mathematisch wohl definierte Formulierung überführt.

Eine weitere Möglichkeit der Integration mehrerer Verhalten besteht darin, verschiedene Dynamiken miteinander zu koppeln. Dabei bildet die Verhaltensvariable einer Dynamik den zeitabhängigen Parameter einer anderen. Um hierbei Instabilitäten zu vermeiden muss bei dieser Art der Kopplung unbedingt das so genannte Prinzip der *Zeitskalentrennung* eingehalten werden (siehe hierzu auch [14]): die Zeitskala einer Dynamik bestimmt, wie schnell die Verhaltensvariable einer Variation in den Parametern folgen kann. Wird diese Variation durch eine andere Dynamik hervorgerufen, so muss diese Dynamik auf einer wesent-

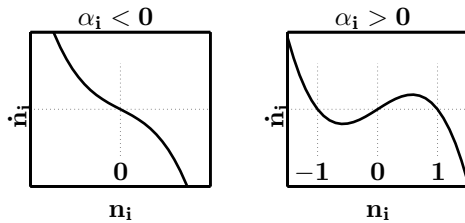
lich langsameren Zeitskala ablaufen da ansonsten die Kopplung verloren geht. Das mathematische Konzept der Zeitskalentrennung bedeutet für das Verhalten eine *Hierarchisierung*: das Verhalten, welches auf der langsameren Skala abläuft *dominiert* oder *versklavt* dasjenige mit der schnelleren Zeitskala (vergl. das *slaving principle* aus [5]). Durch eine so genannte *Zeitskaleninversion* [14] kann das Zeitskalenverhältnis auch umgekehrt werden wodurch sich flexible Hierarchien im Verhalten realisieren lassen. In [15] ist ein System beschrieben, welches durch Kopplung mehrerer nichtlinearer Dynamiken eine grosse Anzahl von Navigationsverhalten wie *Hindernisvermeidung*, *Zielanfahrt*, *Suche*, *Exploration*, *Rekalibration* und *Selbstlokalisierung* realisiert.

2.3 Verhaltensorganisation

Bei der Integration vieler Verhalten kommt neben der eigentlichen Verhaltensgenerierung auch der Organisation der Einzelverhalten eine große Bedeutung zu. In manchen Fällen ergibt sich eine sinnvolle Organisation verschiedener Verhalten von selbst indem sich die Verhaltensziele wie bei *Hindernisvermeidung* und *Zielanfahrt* in ein und derselben Dynamik integrieren lassen. Im Allgemeinen können komplexe Verhaltensleistungen aber nur dadurch erbracht werden, dass verschiedene Elementarverhalten von getrennten Dynamiken generiert werden und dann in logisch sinnvoller Weise aktiviert und deaktiviert werden. Dieser Fall ist beispielsweise bei der Erzeugung von *Verhaltenssequenzen* gegeben. Für diesen Problemkreis haben wir ein weiteres Konzept entwickelt, welches sich nahtlos in den dynamischen Ansatz einfügt: eine so genannte *Aktivierungsdynamik*, deren Zustandsvariable der Vektor der Aktivierungsvariablen n_i aus (3) ist, hat als stabile Zustände logisch sinnvolle Muster aktiver und nicht aktiver Elementarverhalten i :

$$\dot{n}_i = \alpha_i n_i - |\alpha_i| n_i^3, \quad \alpha_i = f(\mathbf{s}, \mathbf{n}, \mathbf{L}, \mathbf{A}) \quad (4)$$

Für $\alpha_i < 0$ (siehe Bild, links) hat diese Dynamik eine stabile Lösung bei $n_i = 0$ was einem deaktivierten Verhalten i entspricht (siehe Gleichung (3)).



Wächst der Parameter α_i in Richtung positiver Werte $\alpha_i > 0$, tritt eine Bifurkation auf, die den Attraktor $n_i = 0$ destabilisiert und zwei neue stabile Fixpunkte bei $n_i = \pm 1 \Rightarrow n_i^2 = 1$ erzeugt, die einem aktiven Verhalten i entsprechen (siehe Bild, rechts). Die Werte α_i bestimmen sich als Funktion des Sensoreingangs \mathbf{s} , des Aktivitäts-

vektors \mathbf{n} , der so genannten *Logikmatrix* $\mathbf{L} = \{L_{i,j} \in \{0, 1, 2, 3\}\}$ und der *Aktivierungsmatrix* $\mathbf{A} = \{A_{i,j} \in \{-1, 0, 1\}\}$. In der Logikmatrix werden feste Beziehungen zwischen den Einzelverhalten kodiert, wie z.B. die Forderung, dass zwei Verhalten i, j nicht gleichzeitig aktiv sein *dürfen* ($L_{i,j} = 3$), gleichzeitig aktiv sein *müssen* ($L_{i,j} = 1$) oder das wenigstens *eines* von vielen Verhalten $j, k, l \dots$

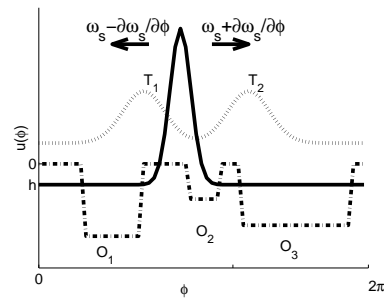
simultan mit Verhalten i aktiv sein muss ($L_{i,j} = L_{i,k} = L_{i,l} = \dots = 2$). Logische Unabhängigkeit wird durch $L_{i,j} = 0$ kodiert.

In der Aktivierungsmatrix werden Einschalt- bzw. Ausschaltbedingungen festgelegt: $A_{i,j} = 1$ bedeutet, die Aktivierung von Verhalten j führt zur Aktivierung von Verhalten i und $A_{i,j} = -1$ zu dessen Deaktivierung. Über den Sensorinput \mathbf{s} können instantane Ereignisse oder kontinuierliche Veränderungen in der Umgebung die Aktivierung eines Elementarverhaltens triggern. In einer Implementation zum akustischen Führen unseres mobilen Roboters ARNOLD dienen beispielsweise über einen Worterkenner identifizierte Sprachkommandos als Sensorikontext s_i für die jeweiligen Verhalten i [8]. Ein Elementarverhalten wird nur dann aktiviert, wenn sowohl sein Sensorikontext als auch alle notwendigen logischen Bedingungen erfüllt sind, die in \mathbf{A} und \mathbf{L} formuliert sind. Das gesamte Verhaltensorganisationssystem wird nur durch die Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{L} und durch den Sensorikontext \mathbf{s} festgelegt. Eine Erweiterung des Systems um neue Verhalten verlangt daher auch nur die Ergänzung von Spalten und Zeilen in diesen Matrizen ohne dass das schon existierende System verändert werden müsste. Somit kann das System inkrementell skaliert werden.

Die konkrete Form der Funktion f in (4) beruht auf einer neuen Methode nach der diskrete logische Zustände als Attraktoren kontinuierlicher dynamischer Systeme dargestellt werden und ist in [10] beschrieben. Durch geschickt gewählte logische Abhängigkeiten zwischen den Elementarverhalten lassen sich auch *Verhaltenssequenzen* erzeugen [12], die sogar erlernbar sind [13].

2.4 Neuronale Felder

Ein weiteres wichtiges Element unseres dynamischen Ansatzes ist das der so genannten *Neuronalen Felder* [1]. Bei diesem von Informationsverarbeitungsprinzipien des Nervensystems inspirierten Konzept [6] handelt es sich um ein dynamisches System für eine so genannte *Aktivierungsverteilung* $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$ über der Verhaltensvariable \mathbf{x} . Wir benutzen beispielsweise ein einsimensionales AMARI-Feld mit asymmetrischem homogenen Kern zur Regelung der Fahrtrichtung unseres anthropomorphen Roboters ARNOLD:



$$\tau \dot{u}(\phi, t) = -u(\phi, t) + s(\phi, t) - h + \int_{-\infty}^{\infty} \omega(\tilde{\phi}) f(u(\phi', t)) d\phi' \quad (5)$$

$$\omega(\tilde{\phi}) = \omega_s(\tilde{\phi}) - n_l^2 \frac{\partial \omega_s(\tilde{\phi})}{\partial \tilde{\phi}} + n_r^2 \frac{\partial \omega_s(\tilde{\phi})}{\partial \tilde{\phi}}$$

$$\text{mit } f(u) = \frac{1}{e^{-cu} + 1}, \quad \tilde{\phi} = \phi - \phi'$$

$$\text{und } \omega_s(\tilde{\phi}) = k e^{-\frac{\tilde{\phi}^2}{2\sigma^2}} - H_0$$

Darin ist $f(u)$ eine sigmoide Nichtlinearität und ω_s eine symmetrische Gaussfunktion (c, k, σ und H_0 sind positive Konstanten). Die Funktion des Neuronalen Fel-

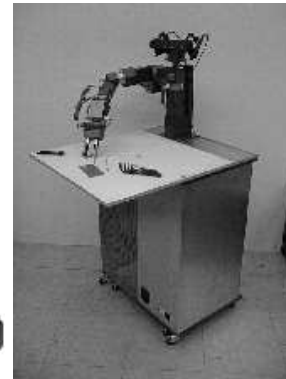
des kann am besten anhand der Abbildung verstanden werden: der Input $s(\phi, t)$ ist die Summe aus einer positiven Komponente, die die Richtung auf Navigationsziele T_i kodiert und einer negativen Komponente für die Richtungen in denen Hindernisse O_i liegen. Verschwinden die Aktivitätsvariablen n_r und n_l , die für die Aktivität der über Sprachkommandos gesteuerten Elementarverhalten "Rechtsfahrt" bzw. "Linksfahrt" stehen, so ist der so genannte Wechselwirkungskern ω symmetrisch. Als stabile Lösung von (5) bildet sich dann ein monomodaler Aktivitätspeak heraus (durchgezogene Linie), der die Bewegungsrichtung des Roboters als Kompromiss zwischen Hindernisvermeidung und Zielfahrt spezifiziert. Wird hingegen ein Sprachkommando "rechts" oder "links" gegeben, so wird der symmetrische Wechselwirkungskern durch die Addition seiner Ableitung $\pm \frac{\partial \omega_s}{\partial \phi}$ in der entsprechenden Richtung asymmetrisch. In diesem Fall bildet sich als stabile Lösung der AMARI-Gleichung (5) bei abwesendem Input s ein in diese Richtung laufender Aktivitätspeak heraus. Bei vorhandenem Input $s(\phi, t)$ wandert der Peak nur so weit, wie es die Ziel- bzw. Hinderniskonfiguration erlaubt. So wird auf elegante Weise sinnvolles teilautonomes Verhalten mit einem einzigen dynamischen System realisiert.

3 Anwendungen

3.1 ARNOLD und CORA

Die beschriebenen Konzepte kamen bei der Generierung aller Verhalten für unseren anthropomorphen mobilen Roboter ARNOLD (Bild, links) zum Einsatz und werden auch für unseren neuen interaktiven Montageassistenten CORA (=Cooperative Robot Assistant, Bild rechts) ausschliesslich benutzt.

ARNOLD wurde als Prototyp eines universellen Serviceroboters für Innenräume entwickelt. Seine mobile Plattform ist ein modifizierter TRC Labmate (80x80 cm), der einen pyramidalen Körper von 145 cm Höhe trägt. In etwa 1 m Höhe ist ein anthropomorpher 7-Freiheitsgrade-Arm (AMTEC) angebracht. Wie mit einem menschlichen Arm kann ARNOLD Gegenstände greifen, während er den zusätzlichen siebten Freiheitsgrad zur Hindernisvermeidung benutzt. Über dem Arm ist ein Stereokamerasystem mit einem Paar hoch-



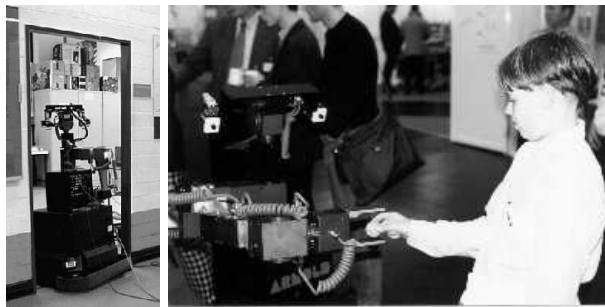
auflösender Fovea-Farbkameras und einem Paar Weitwinkel-Grauwertkameras montiert. Ihre Funktion bildet die fovealen und peripheren Eigenschaften des menschlichen Sehsystems nach. Der Kamerakopf enthält außerdem ein Stereomikrofon. ARNOLD's verhaltensgenerierendes System wird auf drei Pentium

PC's betrieben die über Fast Ethernet verbunden sind und unter dem Echtzeit-Betriebssystem QNX laufen.

CORA wird derzeit als stationäres System für die Mensch-Maschine-Interaktion innerhalb eines Montageszenarios entworfen. Der Roboter besitzt ebenfalls einen 7-Freiheitsgrade Manipulator ist darüber hinaus aber auch noch mit einem achten Freiheitsgrad im Rumpf ausgestattet. Der Forschungsschwerpunkt liegt in der Perzeption, der Repräsentation und der Analyse von Montageszenen, die aus den zu montierenden Objekten, dem Roboter selbst und einem dem Roboter gegenüber sitzenden menschlichen Interaktionspartner bestehen. Um die relevanten Szenenaspekte aufnehmen zu können ist CORA ebenfalls mit einem Stereokamerasystem, Mikrofonen und außerdem mit einer so genannten *künstlichen Haut* ausgestattet.

3.2 Implementierte Verhalten

Auf ARNOLD wurden eine ganze Reihe komplexer Verhalten implementiert (siehe hierzu [3]). Dazu gehören Hindernisvermeidung, Zielfahrt, Verhaltenssequenzen zum Suchen, Tracken und Durchfahren von Türen (siehe Bild, links), kommandogeführte Navigation, Finden und Greifen von Objekten und deren Übergabe an Personen (siehe Bild, rechts).



Alle diese Verhalten basieren auf dem dynamischen Ansatz. Dabei hat sich gezeigt, dass gerade die Benutzung von dynamischen Systemen zu besonders natürlich und glatt erscheinendem Verhalten führt. So haben wir beispielsweise das Objektübergabeverhalten so realisiert, dass die dynamische Regelung der

Blickrichtung auf einer schnellen, die Greifbewegung auf einer mittleren und die Fahrzeugbewegung auf einer langsamen Zeitskala abläuft. Auf diese Weise folgt ARNOLD dem von einem Menschen zu übernehmenden Objekt schnell mit dem Blick und greift erst dann. Entfernt sich der Mensch während dieses Vorgangs weiter als der Manipulator reichen kann, so folgt ARNOLD mit einer Plattformbewegung nach. Dieses Verhalten wird von Außenstehenden in der Regel als sehr menschenähnlich empfunden.

Mit Hilfe des vorgestellten Verhaltensorganisationsschemas haben wir eine kommandogeführte Navigation und Greifsteuerung implementiert, die den momentanen Verhaltenszustand des Roboters zur Reduzierung der vom Menschen zu übermittelnden Information berücksichtigt [7]. So interpretiert ARNOLD beispielsweise das Wort "links" als die Aufforderung in diese Richtung zu fahren,

wenn er gerade in Bewegung ist und als Aufforderung das linke Objekt zu greifen, wenn er sich gerade in einer Manipulationsaufgabe befindet. Dieses ebenfalls menschenähnliche Verhalten ist möglich, weil das Verhaltensorganisationschema den momentanen Systemzustand in dem Aktivitätsmuster der Elementarverhalten repräsentiert hat.

Für die Verhaltenssteuerung von CORA wird dieser Ansatz noch erweitert werden, indem nicht nur der Verhaltenszustand des Roboters sondern auch der des menschlichen Interaktionspartners (beispielsweise dessen momentane Blickrichtung) im System repräsentiert wird. Dazu soll ein neues kognitives Verfahren zum Einsatz kommen, welches alle zu repräsentierenden Informationen als Aktivitätsverteilungen von miteinander gekoppelten Neuronalen Feldern darstellt [11].

4 Zusammenfassung

Der dynamische Ansatz zur Verhaltensgenerierung und -organisation stellt mathematisch vereinheitlichte und universell einsetzbare Konzepte zur Verfügung die sich insbesondere für die Erzeugung komplexen Verhaltens auf anthropomorphen Robotern eignen, wie unsere zahlreichen Implementationen zeigen. Mit seinem starken Bezug zu Informationsverarbeitungsprinzipien neuronaler Systeme nimmt dieser Ansatz eine Sonderstellung im Bereich der Robotik ein. Aus diesem Grunde und wegen des hier nicht zur Verfügung stehenden Raumes den ein eingehender Vergleich mit anderen bestehenden Systemen zur Verhaltensgenerierung erfordern würde, haben wir auf eine Einordnung in den derzeitigen Stand der Forschung zu Gunsten einer detaillierteren Beschreibung unseres Ansatzes verzichtet. Wir möchten in diesem Zusammenhang aber auf [3] verweisen, worin eine solche Einordnung vorgenommen wurde.

Literatur

1. S Amari. Dynamics of pattern formation in lateral-inhibition type neural fields. *Biological Cybernetics*, 27:77–87, 1977.
2. R C Arkin. Motor schema-based mobile robot navigation. *The International Journal of Robotics Research*, pages 92–112, 1989.
3. T Bergener, C Bruckhoff, P Dahm, H Janßen, F Joublin, R Menzner, A Steinhage, and W von Seelen. Complex behavior by means of dynamical systems for an anthropomorphic robot. *Neural Networks 12*, pages 1087–1099, 1999.
4. E Bicho and G Schöner. Target position estimation, target acquisition and obstacle avoidance. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'97*, 1997.
5. H Haken. *Laser theory*, volume XXV/2c of *Encyclopedia of Physics*. Springer Verlag, Berlin, 1970. reprinted as *Laser Theory*, 1984.
6. D Jancke, W Erlhagen, H R Dinse, A C Akhavan, M Giese, A Steinhage, and G Schöner. Parametric population representation of retinal location: Neuronal interaction dynamics in cat primary visual cortex. *The Journal of Neuroscience*, 19(20):9016–9028, 1999.

7. R. Menzner and A. Steinhage. Nonlinear attractor dynamics for guiding an anthropomorphic robot by means of speech control. In H Araujo and J M M Dias, editors, *Proceedings of the International Symposium on Intelligent Robotic Systems, SIRS*, pages 177–180. University of Coimbra, Portugal, 1999.
8. R. Menzner, A Steinhage, and W Erlhagen. Generating interactive robot behavior: A mathematical approach. In *From Animals to Animats 5: Proceedings of the Sixth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, (to appear), 2000.
9. G Schöner, M Dose, and C Engels. Dynamics of behavior: Theory and applications for autonomous robot architectures. *Robotics and Autonomous Systems*, 16:213–245, 1995.
10. A Steinhage. *Dynamical Systems for the Generation of Navigation Behavior (Ph.D. thesis)*. Number ISBN 3-8265-3508-1 in Berichte aus der Physik. SHAKER-Verlag, Aachen, Germany, 1998.
11. A Steinhage. The dynamic approach to anthropomorphic robotics. In *Proceedings of the Fourth Portuguese Conference on Automatic Control, Controlo 2000*, page to appear, 2000.
12. A Steinhage and T Bergener. Dynamical systems for the behavioral organization of an anthropomorphic mobile robot. In R Pfeifer, B Blumberg, JA Meyer, and SW Wilson, editors, *From Animals to Animats 5: Proceedings of the Fifth International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*, pages 147–152. The MIT Press/Bradford Books, 1998.
13. A Steinhage and T Bergener. Learning by doing: A dynamic architecture for generating adaptive behavioral sequences. In *Proceedings of the Second International ICSC Symposium on Neural Computation, NC'2000*, pages 813–820, 2000.
14. A Steinhage and G Schöner. The dynamic approach to autonomous robot navigation. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE'97*, pages SS7–SS12. IEEE-publications, 1997.
15. A Steinhage and G Schöner. Dynamical systems for the behavioral organization of autonomous robot navigation. In McKee G T Schenker P S, editor, *Sensor Fusion and Decentralized Control in Robotic Systems: Proceedings of SPIE*, volume 3523, pages 160–180. SPIE-publishing, 1998.