

Die neue Robotik – hin zur Menschzentrierung Maschinen

Stefan Schaal¹

¹Informatik und Neurowissenschaften, University of Southern California, 3710 S. McClintock Avenue – RTH 401, Los Angeles, Kalifornien 90089-2905 und ATR Computational Neuroscience Laboratories, 2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02

Eingegangen am 26. Dezember 2006; angenommen am 21. Mai 2007; online veröffentlicht am 16. Juli 2007)

Die Forschung in der Robotik hat sich von ihrem primären Fokus auf die Industrie entfernt Anwendungen. Die New Robotics ist eine Vision, die in den vergangenen Jahren entwickelt wurde durch unsere eigene Universität und viele andere nationale und internationale Forschungen Institutionen und thematisiert, wie immer mehr menschenähnliche Roboter leben können unter uns und übernehmen Aufgaben dort, wo unsere heutige Gesellschaft Defizite hat. Ältere Pflege, Physiotherapie, Kindererziehung, Suche und Rettung und Allgemeines Beispiele hierfür sind die Unterstützung in Alltagssituationen die neue Robotik in naher Zukunft. Unter Berücksichtigung dieser Ziele ist die Forschung für die Neue Robotik muss einen breiten interdisziplinären Ansatz verfolgen, der von reicht traditionelle mathematische Probleme der Robotik bis hin zu neuartigen Problemen der Psychologie, Neurowissenschaften und Ethik. In diesem Artikel werden einige wichtige Forschungsergebnisse vorgestellt Probleme, die gelöst werden müssen, um die neue Robotik Wirklichkeit werden zu lassen. [DOI: 10.2976/1.2748612]

KORRESPONDENZ

Stefan Schaal: sschaal@usc.edu

Im Jahr 1921 erschien Karel Capeks Theaterstück „*Rossums Universal Robots*“, das weithin als Beginn der Ära der Robotik gilt [z. B. Sciacicco und Siciliano (1996)] – lieferte zwei interessante Visionen. Erstens waren Roboter menschenähnlich, und zweitens interagierten sie auf natürliche, also menschenähnliche Weise mit Menschen. Mehr als ein halbes Jahrhundert nach Capeks Konzept eines Roboters, Erkenntnissen blieb weit hinter seinen Vorstellungen zurück: Roboter waren minimalistische mechanische Geräte, weit von der Erreichung einer allgemeinen Menschenähnlichkeit ab Leistung, und das gab es im Wesentlichen Keine Interaktion zwischen Menschen und Robotern, außer dass ein Programmierer Code hochlädt. Natürlich hat das alles gemacht Sinn, da Roboter lediglich dazu verwendet wurden hochrepetitive und hochpräzise Positionierungsaufgaben in der Industrie. Und es ist Diese Domäne haben bislang Roboter einen Unterschied gemacht und dazu beigetragen nützliche Wege zum Fortschritt der Technologie und der industriellen Produktivität. Der Beginn des 21. Jahrhunderts, erlebte jedoch eine bemerkenswerte

Veränderung des Forschungsschwerpunkts der Roboterik. Wie es in den 1980er und 1990er Jahren durch künstliche Intelligenz initiiert wurde Es bestand schon immer großes Interesse daran, allgemeinere und intelligenter Roboter Maschinen zu entwickeln. So wie es war wenig Anwendung für solche Roboter in Industrie – das heißt, industrielle Spezialroboter sind in ihrer Produktivität bei der Aufgabe, für die sie konzipiert wurden – der Arbeit an intelligenten Robotern, kaum zu übertreffen war zunächst weitgehend auf universitäre Forschung und einige einzigartige Forschungsarbeiten beschränkt Programme wie Weltraumforschung, Unterwasserforschung usw. Mit der Weiterentwicklung der Informationstechnologie und Das mechanische Design stammt jedoch von Capek Vision von menschenähnlichem, autonomem und Interaktive Roboter sind nach und nach in die Reichweite von Forschungsprototypen gerückt. Ende der 1990er Jahre ein neues Feld der Robotik wurde hervorstechend, humanoid Robotik, vor allem durch Pionierarbeit Arbeit an der Waseda University, Sarcos Inc., und die Honda Corporation [z. B. für eine Übersicht siehe Menzel und D'Alusio

(2000)]. An diesen Orten die ersten humanoiden Ganzkörperroboter wurden erstellt und der Forschungsgemeinschaft vorgestellt und bekannte Presse. Die Wabian-Reihe von Menschen der Waseda-Universität konzentrierte sich in erster Linie auf die Fähigkeiten des zweibeinigen Gehens, ebenso wie der Asmio-Roboter von Hon da, der aufgrund seiner Assoziation mit einem sehr großen Unternehmen und sein sehr edles Erscheinungsbild erhalten hat große Aufmerksamkeit auf der ganzen Welt. Der Sarcos-Humanoide Der Roboter „DB“ konzentrierte sich auf autonome Manipulationsfähigkeiten, gepaart mit daraus abgeleiteten Lernfähigkeiten Ideen aus der Computational Neuroscience (Atkeson *et al.*, 2000). Mittlerweile gibt es vor allem zahlreiche humanoide Roboter insbesondere in Asien und Japan, aber auch in Europa und den USA UNS. Seit dem Jahr 2000 gibt es sogar eine Fachkonferenz zum Thema humanoide Robotik, die IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robotics.

Neben der langjährigen wissenschaftlichen Herausforderung, zu verstehen, wie das menschliche Gehirn funktioniert und wie es entsteht Haben humanoide Roboter als künstliches System mit ähnlichen Fähigkeiten wie Menschen einen wirklichen Nutzen? Aus die Sichtweise der traditionellen Fertigung in der Industrie, die Die Antwort wäre wahrscheinlich negativ, ebenso wie das Kosten-Nutzen-Verhältnis von humanoiden Robotern ist – bisher und in mittlerer Zukunft – ziemlich unattraktiv. Aber die traditionelle Industrie ist höchstwahrscheinlich nicht der Fall, worauf sich die neue Robotik auswirken wird. Vielmehr werden humanoide und ähnliche Roboter Teil unseres normalen Lebens sein, d. h. Sie werden Funktionen in unserer Gesellschaft übernehmen, wo es welche gibt einfach zu wenige Menschen, um den gesellschaftlichen Bedürfnissen gerecht zu werden. Dies wurde von vielen Ländern anerkannt und vorgebracht in der Welt, oft ausgelöst durch die Trends eines zunehmenden Anteils älterer Menschen in der Gesellschaft und den damit verbundenen Gefahr eines künftigen Mangels an angemessener Pflege. Es gibt jedoch noch viele andere Bereiche, in denen Roboter hilfreich sein können. Arbeiten in gefährlichen Umgebungen sowie Such- und Rettungseinsätze nach Katastrophen gehören zu den am häufigsten genannten Themen. Roboter können auch als Physiotherapeuten fungieren Helfen Sie den Patienten, richtig zu trainieren und verlorene motorische Fähigkeiten wiederherzustellen Funktionen – zum Beispiel bietet der Mangel an Physiotherapeuten Schlaganfallpatienten in den USA nur etwa 40 Minuten Training pro Tag, während im Jahr etwa 6 ha pro Tag benötigt würden unmittelbar nach dem Schlaganfall, um die motorischen Funktionen wiederherzustellen (Taub und Wolf, 1997; van der Lee *et al.*, 1999; Wolf und Blanton, 1999) – wäre es nicht schön, wenn man einen Roboter „aushecken“ könnte? Physiotherapeut aus der örtlichen Apotheke? Natürlich könnten Roboter Menschen in der Rekonvaleszenz und mit Behinderungen dabei helfen, Gegenstände zu erreichen, zu tragen und zu manipulieren – das hier Dieses Thema wird oft unter dem Namen persönliche Robotik diskutiert oder unterstützende Robotik. Diese Roboter können auch Mentoring- und kognitive Funktionen übernehmen, beispielsweise Menschen daran erinnern, etwas zu nehmen Ihre Medikamente rechtzeitig einzunehmen oder andere geplante Medikamente nicht zu vergessen Aktivitäten. Auch für Roboter gibt es interessante Möglichkeiten in der Bildung und im täglichen Leben von Kindern. Zum Beispiel, Autistische Kinder scheinen sehr positiv auf Bildung zu reagieren Spiele mit Robotern (z. B. Robins *et al.*, 2005). Und Roboter könnten auch Spielkameraden und pädagogische Helfer werden

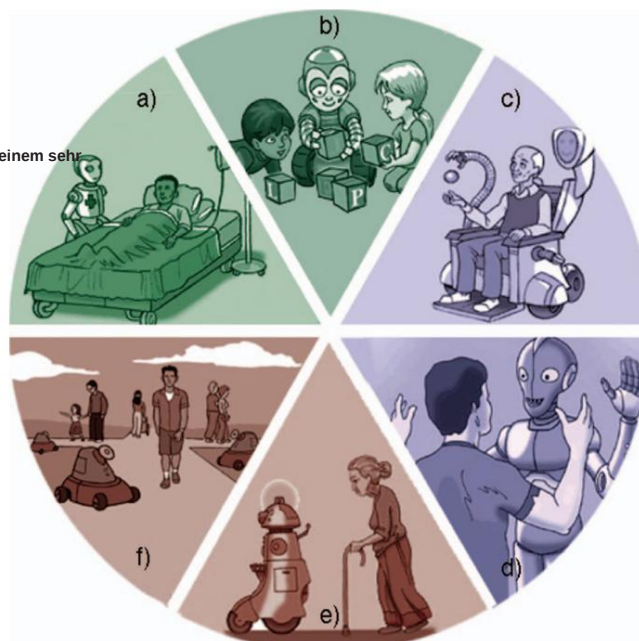


Abbildung 1. Eine künstlerische Skizze der zukünftigen Beteiligung von Robotern die Gesellschaft: „a... Assistenzroboter, „b... Spielgefährtenroboter bei Kindern.“ Bildung, „c... Roboter zur Betreuung und Unterstützung bei Manipulationsaufgaben, „d... Roboter, die Bewegungsübungen lehren, „e... persönliche Roboter für ältere Menschen, „f... Roboter zur Überwachung und zum Schutz von Kindern und Erwachsenen.

Schulszenarien, die dazu führen, dass Kinder Interesse an einer höheren Bildung in Naturwissenschaften und Technik entwickeln und auch behalten. Viele Weitere Szenarien könnten hier aufgezählt werden – Abb. 1 bietet eine künstlerische Skizze einiger dieser Ideen.

Es ist wichtig zu betonen, dass die neue Robotik den Menschen in den Mittelpunkt stellen wird¹, dh Roboter werden mit hu arbeiten Menschen in normalen menschlichen Umgebungen. Und es ist in dieser Rolle von Assistenzroboter, dass viele neue und interdisziplinäre Komponenten Teil der Robotikforschung werden. Wenn beispielsweise ein Roboter von Kindern und Erwachsenen akzeptiert werden soll, dann ist er muss sich an bestimmte soziale Verhaltensweisen und Standards halten wir als Menschen finden es akzeptabel. Daher müssen die Psychologie und Ethik der Mensch-Roboter-Interaktion erforscht werden. Wenn ein Roboter als Physiotherapeut fungieren soll, muss der Roboter dies tun Wissen über die neuralen und muskulo-skelettalen Defizite eines Patienten einbeziehen und Übungen individuell anpassen entsprechende Verbesserungsvorschläge. Im Wesentlichen, z Ein Roboter muss einige Kenntnisse darüber haben, wie das menschliche Gehirn funktioniert steuert Bewegungen und wie neuronale Defizite, z. B. aufgrund von Schlaganfall kann die Bewegungsfähigkeit eines Patienten beeinträchtigen. Oder nehmen ein Roboter in einer menschlichen Umgebung mit dem arbeiten soll Möglicherweise handelt es sich um dieselben Gegenstände und Werkzeuge, die Menschen im täglichen Leben verwenden nützlich, um zu verstehen, wie Menschen motorische Fähigkeiten entwickeln Fähigkeiten und wie das menschliche Fähigkeitsrepertoire strukturiert ist. Daher,

¹Es gibt auch einige spezielle Workshops für menschenzentrierte Robotik kürzlich gestartet, z. B. der International Workshop on Human-Centered Robotics.

Robotiker, die traditionell tief in angewandter Mathematik, Mechanik, Kontrolltheorie und Optimierungstheorie verwurzelt sind, werden plötzlich mit einer Fülle neuer Themen konfrontiert von Psychologie, Biologie und Neurowissenschaften bis hin zur Ethik. Der Neue Robotik erfordert eine neue Art von Wissenschaftlern, die dazu in der Lage sind, Sie durchqueren ein sehr breites Spektrum unterschiedlicher Disziplinen.

Abbildung 2 ist ein Versuch, Forschungsthemen hierbei zu strukturieren neue, menschenzentrierte Robotik in drei Hauptkategorien: (i) Aktion, (ii) Interaktion und (iii) Engagement. Aktionsforschung befasst sich in erster Linie mit Fragen der motorischen Kontrolle in beiden Fällen Menschen und Roboter. Der Schwerpunkt der Interaktionsforschung liegt auf der Mensch-Roboter- bzw. Roboter-Roboter-Interaktion, also der Grundlagenforschung, wie zwei Systeme zusammenarbeiten können, um ein Ziel zu erreichen. Ziel – im Extremfall bedeutet dies, dass ein System, z. B. das Der Mensch weist das andere System, den Roboter, an, was zu tun ist. Bei Im anderen Extrem könnten die beiden Systeme zusammenarbeiten ein Ziel erreichen, z. B. gemeinsam einen schweren Gegenstand tragen. Schließlich untersucht die Engagementforschung die kognitiven und psychologische Komponenten der menschenzentrierten Robotik. Natürlich ist die in Abb. 2 vorgeschlagene Struktur nicht klar, d. h. Es gibt viele Überschneidungen zwischen der Aktions-, Interaktions- und Engagementforschung. Auch die Liste der Forschungsthemen in Abb. 2 ist nicht vollständig. Aber um eins zu geben

Perspektive auf die Zukunft der Robotikforschung und um Sehen Sie sich einige relevante neuere Literatur an. Abb. 2 bietet eine nützliche Richtlinie für die kommenden Abschnitte dieses Dokuments. Es sollte Es ist zu beachten, dass in der Literatur mehrere andere Perspektiven auf die Zukunft der Robotik zu finden sind (z. B. [Khatib et al., 2004](#); [Brock et al., 2005](#)).

AKTIONSFORSCHUNG

Die Aktionsforschung basiert auf der Theorie der motorischen Kontrolle. das weitgehend in klassischen Ingenieursbereichen angelegt war wie Kybernetik ([Wiener, 1948](#)), optimale Kontrolle ([Bellman, 1957](#)) und Kontrolltheorie ([Slotine und Li, 1991](#); [Narendra und Annaswamy, 2005](#)). Diese Bereiche befassten sich mit vielen entscheidenden Themen Probleme mit Bewegungssystemen, einschließlich negativer Rückmeldungen

Steuerung, Vorwärtssteuerung, nichtlineare Steuerung, Bewegung Planung mit Optimierungskriterien, Stabilität, Kontrolle mit zeitverzögertes System, adaptive Steuerung, stochastische Steuerung, Zustandsschätzung, Kontrolle von Über- und Unterbetätigung Systeme usw. Abbildung 3 zeigt ein klassisches Steuerungsdiagramm für die Motorsteuerung, die die verschiedenen Stufen eines Steuerkreises hervorhebt, denen jeweils eine große Zahl zugeordnet ist von Forschungsthemen. Viele dieser Themen haben reichlich Eingang gefunden Sie haben in der Robotikforschung so viel Aufmerksamkeit erregt, dass sie es geworden sind Lehrbuchwissen (z. B. [Russell und Norvig, 1995](#); [Scia vicco und Siciliano, 2000](#)). Mehrere Probleme verdienen es jedoch besondere Aufmerksamkeit. Es ist zu beachten, dass eine große Menge Die Forschung zur biologischen Motorkontrolle konzentriert sich auf Themen ähnlich denen in Abb. 3 ([Sabes, 2000](#); [Schaal und Schweighofer, 2005](#); [Shadmehr und Wise, 2005](#)).

Motorprimitive und Motorbibliotheken

Während Probleme wie Koordinatentransformationen und Motor

Die Befehlserzeugung in der Robotik (Abb. 3) ist mittlerweile recht gut verstanden (z. B. [Sciavicco und Siciliano, 2000](#)).

Verlassen Sie sich darauf, dass jemand dem Roboter einen geeigneten Plan liefert davon, was zu tun ist. In vielen Robotikprojekten wird dieser Teil übernommen von einem menschlichen Designer, der den Plan manuell erstellt ein bestimmtes Verhalten. Während dieser Ansatz in statischen Umgebungen sehr erfolgreich ist, ist dies bei der Neuen Robotik von Natur aus der Fall über Roboter, die in normalen menschlichen, also dynamischen Umgebungen agieren. Es stellt sich also die Frage, wie flexible und flexible Gestaltungsmöglichkeiten geschaffen werden können reaktive motorische Steuerung und Planung. Am häufigsten wird eine Lösung dadurch angestrebt, dass ein Werkzeugkasten elementarer Bewegungen geschaffen wird, die in Folge oder Überlagerung ein ausreichend großes Spektrum komplexer motorischer Fähigkeiten ergeben. Wir nennen solche Elementarbewegungen sind motorische Grundelemente, in der Literatur werden sie aber auch als Schemata, Basisverhalten, Optionen, Makros usw. bezeichnet (für eine Übersicht siehe [Mataric, 1998](#); [Schaal, 1999](#); [Schaal et al., 2003](#)).

Man kann mindestens zwei große Forschungstrends unterscheiden zu Bewegungsprimitiven. Erstens können Bewegungsprimitive sein

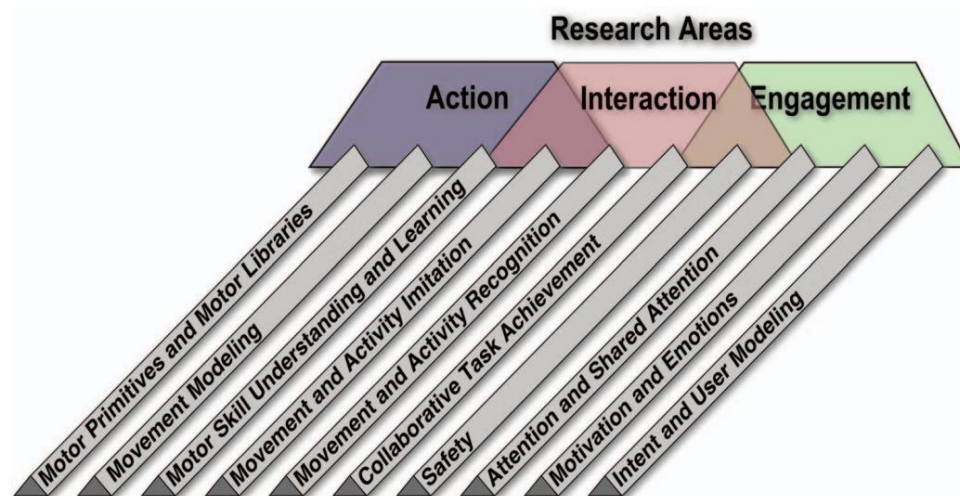


Abbildung 2. Forschungsthemen in Menschzentrierte Robotik.

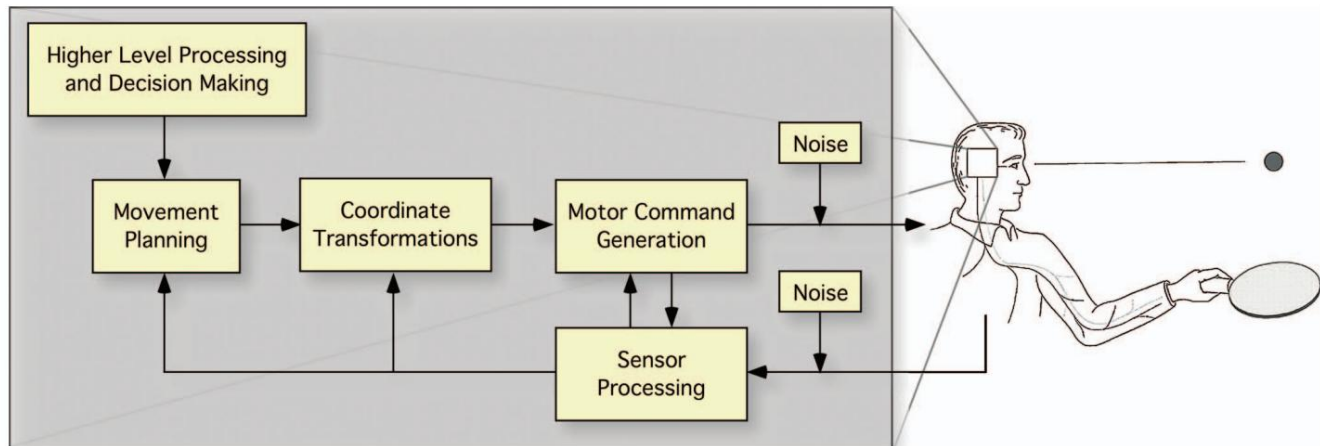


Abbildung 3. Skizze eines generischen Kontrolldiagramms, das typischerweise in der Robotikforschung verwendet wird.

als dynamische Systeme modelliert, wie Punktattraktoren und Grenzwerte Zyklen (z. B. [Bullock und Grossberg, 1988](#); [Burridge et al., 1999](#); [Schaal et al., 2004](#); [Righetti und Ijspeert, 2006](#)). Der dynamische Systemansatz ermöglicht es, verschiedene wichtige Probleme der menschenähnlichen Bewegung auf natürliche Weise anzugehen, z. Stabilitätsprobleme, Wahrnehmungs-Aktionskopplung, Hindernisvermeidung mit potenziellen Feldern usw. Häufig dynamische Systeme motorische Grundelemente lassen sich leicht als Verhaltenseinheiten interpretieren, B. das Erreichen eines Ziels, die Fortbewegung eines Zweibeiners usw. Ein Nachteil ist häufig die Modellierung mit nichtlinearen Differentialgleichungen recht komplex und nicht immer analytisch nachvollziehbar.

Der zweite Hauptansatz für Bewegungsprimitive ist von mittels statistischer Techniken (z. B. [Atkeson et al., 2000](#); [Haruno et al., 2001](#); [Doya et al., 2002](#); [Jenkins, 2003](#); [Ina mura et al., 2004](#)).

Als Vorteil bieten sich statistische Methoden an gut verstandene Werkzeuge und Mechanismen zur Extraktion von Bewegungs Module aus empirischen Daten, so dass Bewegungsprimitive kann auf Verhaltensaufzeichnungen von Menschen beruhen. Als ein Nachteil, es scheint, dass statistisch extrahierte Bewegung Primitive sind häufig nicht verhaltensbedeutsam, wie z dass nicht klar ist, wie gut sich solche Bewegungsprimitive auf neue Verhaltensweisen übertragen lassen. Darüber hinaus sind Phänomene wie Wahrnehmungs-Aktionskopplung, Hindernisvermeidung usw. natürlich nicht in statistischen Modellen von Bewegungsprimitiven enthalten.

Bisher fehlt es an umfassenden Umsetzungen jeglicher bewegungsprimitiver Ansätze, und es ist schwierig, objektiv einen Ansatz gegenüber dem anderen zu bevorzugen.

BEWEGUNGSMODELLIERUNG

Um in Umgebungen zu agieren, die für Menschen gebaut wurden, ist es für Roboter oft von Vorteil, ähnliches einzusetzen Bewegungsstrategien wie Menschen. Außerdem, wenn sich Roboter bewegen Wie Menschen akzeptieren Menschen sie leichter als Partner aufgrund unserer inhärenten Abstimmung auf natürlich aussehende Bewegungen ([Johansson, 1973](#); [Viviani und Schneider, 1991](#); [Viviani et al., 1997](#)). Daher muss man sich die Frage stellen, welche Prinzipien (oder Modelle) Menschen bei der Bewegungsgenerierung verwenden und

Welche Strategien liegen den motorischen Fähigkeiten des Menschen zugrunde?

Diese Fragen sind schwierig, da sie von der beantwortet wurden Bereich der Verhaltenspsychologie für motorische Kontrolle und neuromotorische Kontrolle seit mehreren Jahrzehnten (siehe z. B. [Schmidt, 1988](#); [Arbib, 1995a](#); [Arbib, 1995b](#); [Shadmehr und Wise, 2005](#)) und Konkrete Schlussfolgerungen fehlen noch.

Es lassen sich jedoch mehrere Merkmale hervorheben der menschlichen Bewegung, insbesondere wenn diese Merkmale vorliegen fehlen in Robotersystemen weitgehend. Einer davon ist, dass die Erzeugung menschlicher Bewegungen sehr konform ist, während die meisten (sogar moderne) Roboter verwenden eine eher steife Steuerung (mit hoher Verstärkung). Der Grund, warum Roboter eine Steuerung mit hoher Verstärkung bevorzugen, liegt darin, dass sie den Bedarf an genauen Modellen des Roboters und seiner Umgebung verringern. Hohe Verstärkungsregelung bedeutet einfach, dass Position und Geschwindigkeitsfehler zwischen einer gewünschten und einer erreichten Flugbahn werden mit einer großen Zahl multipliziert, und diese Ergebnisse sind dann zu den Motorbefehlen hinzugefügt. Somit sind geringe Abweichungen möglich Die gewünschte Bewegung führt zu starken motorischen Korrekturbefehlen, das heißt, der Roboter fühlt sich sehr steif an. Das Problem mit steif Kontrolle besteht darin, dass jede unvorhergesehene Störung bekämpft wird Sehr hoher Aufwand, möglicherweise so hoch, dass entweder der Roboter selbst Die Umwelt kann beschädigt werden. Mensch und Tier, auf der anderen Seite sanft der Unruhe nachgeben und so Vermeiden Sie es, die Umwelt (z. B. einen anderen Menschen) oder sich selbst zu verletzen. Angesichts dessen in einem dynamischen Umfeld Kollisionen mit der Umgebung sind unvermeidbar, konform Kontrolle scheint für die Neue Robotik von entscheidender Bedeutung zu sein.

Eine Alternative zur Steuerung mit hoher Verstärkung mit Feedforward-Modellen ([An et al., 1988](#); [Miall und Wolpert, 1996](#); [Kawato, 1999](#)), also Modellen der Dynamik des Roboter, die die Vorhersage des optimalen Motorbefehls unterstützen jede Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Roboters der Freiheit. Theoretisch die Designvorgaben eines Roboters ermöglichen die recht genaue Erstellung dieser Modelle. In der Praxis stimmen die theoretischen Modelle und die tatsächliche Dynamik des Zehnerroboters jedoch nicht überein, da komplexe Aktuatordynamiken, Drähte usw. Schläuche, Schutzhüllen etc. am Roboter. Daher geringer Gewinn

Die modellbasierte Steuerung komplexer menschenähnlicher Roboter ist tatsächlich ziemlich schwierig und immer noch Gegenstand laufender Forschung (Vijaya Kumar und Schaal, 2000; Vijayakumar et al., 2005). Der Noch komplexer wird das Thema, wenn man die Interaktionsdynamik zwischen einem Roboter und seiner Umgebung berücksichtigt Berücksichtigung – jedes Laufsystem hat beispielsweise diese Wechselwirkungsdynamik aufgrund von Bodenreaktionskräften. Durch Interaktionen mit der Umgebung entstehen Einschränkungen, und die Mathematik der modellbasierten Steuerung wird deutlich komplexer komplex (Peters et al., 2005a; Nakanishi et al. eingereicht). Als Eine Folge davon ist die nachgiebige Kontrolle bei menschenähnlichen Robotern kaum erreicht, weder theoretisch noch experimentell (mit einigen Ausnahmen siehe Albu-Schäffer et al., 2007), und möglicherweise kann aus der menschlichen Bewegung viel gelernt werden Studien (Gomi und Kawato, 1996; Franklin et al., 2003; Osu et al., 2004) und die Eigenschaften des menschlichen Bewegungsapparates (Brown et al., 1999; Brown und Loeb, 1999; Loeb, 2001).

Ein weiteres faszinierendes Merkmal der menschlichen Motorsteuerung ist dass wir meistens mehrere Aufgaben parallel erledigen, z. B. auf zwei Füßen balancieren und nach einem Gegenstand greifen. Die Robotik-Theorie hat Methoden zur hierarchischen Aufgabenpriorisierung entwickelt (Nakamura, 1991; Khatib et al., 2004; Sentis und Khatib, 2004; Arimoto et al., 2005; Peters et al., 2005b) , dass, Theoretisch sind sie recht ansprechend und leistungsfähig. In neueren Arbeiten Sentis und Khatib (Khatib et al., 2002; Khatib et al., 2004; Sentis und Khatib, 2004) zeigten, dass dies eher natürlich ist Mit geeigneten Task-Space-Controllern und Hierarchien könnten Suchverhalten generiert werden. Allerdings sind die meisten Methoden basieren auf genauen Modellen des Roboters und werden recht komplex, wenn der Roboter Kontakt mit der Umgebung hat, insbesondere wenn sich die Kontaktbedingungen ändern (wie in Fortbewegung oder Objektmanipulation). Zur hierarchischen Aufgabensteuerung auf komplexen Gebieten liegen eher wenige experimentelle Robotersysteme und Verhaltensstudien mit Menschen haben kaum auf solch komplizierte Probleme eingegangen.

VERSTEHEN UND LERNEN DER MOTORISCHEN FÄHIGKEITEN

Es muss noch viel mehr darüber verstanden werden, wie motorische Fähigkeiten dargestellt werden können. In der Regel gibt es die Wahl, ob es sich um eine spezielle Aufgabe handelt Koordinaten, allgemeine externe Koordinaten (z. B. kartesische Koordinaten) oder interne (Gelenkwinkel-)Koordinaten sind am häufigsten geeignet (Saltzman, 1979; Schaal et al., 1992). Spezielle Kontrollstrategien können die motorischen Fähigkeiten erleichtern oder erschweren (z. B. Beek, 1989; Schaal et al., 1992). Es gibt einige Ideen, wie das geht generische Darstellungen motorischer Fähigkeiten generieren (Wada und Kawato, 1995; Miyamoto et al., 1996; Miyamoto und Kawato, 1998; Ijspeert et al., 2003), aber bisher fehlt ein allgemeiner Ansatz zum Kompetenzerwerb.

Eine weitere wichtige Komponente zum Verständnis der Motorik Fähigkeiten liegen in der Darstellung des Aufgabenziels, also einer Art Metrik, die die Aufgabenerfüllung misst. Für einige Aufgaben, z Wenn man nach einem Objekt greift, ist dies einfach als Maß dafür Erfolg ist einfach der Abstand der Hand vom Objekt.

Für andere Aufgaben, zum Beispiel die zweibeinige Fortbewegung, ist die Aufgabe Das Ziel ist viel abstrakter und nicht leicht quantifizierbar. Für Fortbewegung des Zweibeiners, das primäre Aufgabenziel besteht darin, nicht umzufallen, aber ein sekundäres Aufgabenziel ist die Energieeinsparung, ein tertiäres Ziel der Aufgabe ist es, den Verschleiß des motorischen Systems zu reduzieren Ein weiteres Aufgabenziel könnte darin bestehen, das Gleichgewicht zu halten und gleichzeitig nach einer Kaffeetasse zu greifen. Das Ziel, sich auszubalancieren ist nicht leicht quantifizierbar: Wir könnten die gewünschte Position des Schwerpunkts wählen, aber auch eine gewünschte Position des Nullmomentpunkt (Kajita und Tani, 1996). Andere Forscher könnten behaupten, dass solche Messungen für die Fortbewegung eines Zweibeiners ungeeignet seien, und greifen darauf zurück, die Fortbewegung des Zweibeiners als Stabilitätsmaß für die damit verbundene Bewegung zu beschreiben Grenzyklus (McGeer, 1990; Collins et al., 2005). Im Wesentlichen, Die Festlegung aufgabenspezifischer Optimierungskriterien ist nicht einfach.

Wenn wir davon ausgehen, dass wir eine Aufgabendarstellung und eine Metrik haben Um den Aufgabenerfolg zu messen, ist immer noch nicht klar, wie man wählen soll geeignete motorische Befehle, um die Aufgabe zu erfüllen. Visionen eines menschlichen Designers sind eine Möglichkeit, aber wie bereits erwähnt, erfordert die neue Robotik Roboter, die dazu in der Lage sind reagieren auf dynamische Umgebungen, und es ist unwahrscheinlich, dass der Mensch Designer können alle möglichen Ereignisse vorhersehen, die ein Roboter erleben wird ausgesetzt. Daher wären lernende Roboter sehr wünschenswert, a Bereich, der Lernkontrolle genannt wird. Es ist hilfreich, einem zu folgen eines der allgemeinsten Rahmenwerke der Lernkontrolle, wie sie ursprünglich in der Mitte des 20. Jahrhunderts auf diesem Gebiet entwickelt wurden der Optimierungstheorie, der optimalen Steuerung und insbesondere der dynamischen Programmierung (Bellman, 1957; Dyer und McRey Nolds, 1970). Hier wurde das Ziel der Lernkontrolle als die Notwendigkeit formalisiert, eine aufgabenabhängige Kontrollpolitik zu erwerben. das den kontinuierlich bewerteten Zustandsvektor x eines Steuerelements abbildet System und seiner Umgebung, möglicherweise zeitabhängig Weg, zu einem kontinuierlich bewerteten Kontrollvektor u :

Untersuchungen vor
 $u = x_{i,t}$ 1

Der Parametervektor enthält die problemspezifischen Parameter in der Richtlinie, • die vom Lernen angepasst werden müssen System. Denn die Regelstrecke lässt sich im Allgemeinen als nichtlineare Funktion ausdrücken

$x_t = f(x_{t-1}, u_t)$ 2

gemäß der Standardtheorie dynamischer Systeme (Stro Gatz, 1994) die kombinierte System- und Reglerdynamik ergeben

$\dot{x} = f(x, u, t)$ 3

Daher bedeutet das Erlernen der Kontrolle, eine (normalerweise nichtlineare) Funktion • die für ein gegebenes gewünschtes Verhalten angemessen ist und Bewegungssystem.

Ein allgemeiner Ansatz für Strategien zur Lernkontrolle ist das verstärkende Lernen (Sutton und Barto, 1998; Schaal, 2002; Barto und Mahadevan, 2003). Leider Verstärkung Lernen ist eine eher langsame Technik, die bei der Anwendung enorme rechentechnische und theoretische Probleme mit sich bringt

es auf echte Roboter ([Peters et al., 2003a](#); [Peters et al., 2003b](#); [Peters et al., 2005c](#)). Alternativ kann man sich auch bewerben Lernen nur für einige Teile des Kontrollproblems, z. B. wie in Erlernen der internen Modelle, die im Feedforward benötigt werden Kontrolle. Solche Aufgaben können durch überwachtes Lernen gelöst werden Techniken, was rechnerisch und praktisch viel ist besser handhabbar ([Atkeson et al., 1986](#); [Schaal und Atkeson, 1994](#); [Atkeson et al., 1997a](#); [Atkeson et al., 1997b](#); [Schaal et al., 2002](#); [Peters und Schaal, 2006](#)). Leider lernen Die Anwendung auf menschenähnliche Roboter wurde nur bis zu einem gewissen Grad verfolgt eher geringer Umfang und viel Forschung zu beidem Die theoretische und praktische Seite des maschinellen Lernens und der Robotik muss noch bearbeitet werden (für einen Überblick siehe [Schaal, 2002](#); [Schaal, im Druck](#)).

Interaktionsforschung

Die Interaktionsforschung fügt der Robotik eine interessante Komponente hinzu, nämlich die Frage, wie zwei Bewegungssysteme koordiniert werden können, um bei der Erreichung desselben Aufgabensziels zusammenzuarbeiten. Natürlich ist diese Zusammenarbeit auf eine mechanische Zusammenarbeit beschränkt, lässt aber jede zu Art der Interaktion, z. B. Sprache, Gesten usw. Interaktion Die Forschung hat kürzlich ein eigenes Forschungsgebiet und damit verbundene Konferenzen gegründet: die Mensch-Roboter-Interaktion (HRI). Um die Komplexität von HRI zu veranschaulichen, könnten wir es vorläufig definieren ähnlich dem Begriff „Mensch-Computer-Interaktion“:

Bei HRI sind sowohl Menschen als auch Roboter beteiligt gegenseitig beeinflussende Reaktionserfahrung. In technischer Hinsicht Begrifflich gesehen haben wir (mindestens) zwei gekoppelte Kontrollrichtungen, einer arbeitet aus einem Menschen, einer aus einem Roboter

Das Problem hierbei ist, dass HRI mindestens zwei nichtlineare Verbindungen koppelt dynamische Systeme. Einem von ihnen, dem Roboter, könnte es ganz gut gehen verstanden. Der andere, der Mensch, ist weniger gut verstanden, und sogar auf die Gefahr hin, verletzt zu werden, wenn die HRI schief geht. Im Allgemeinen ist die gekoppelte nichtlineare Dynamik gut bekannt Systeme können sich vorhersehbar oder unvorhersehbar verhalten auf komplexe Weise ([Strogatz, 1994](#)). Forschung muss also sein ziemlich vorsichtig bei der Entwicklung von Methoden für HRI, immer unter Einhaltung Denken Sie daran, dass einfache Algorithmen gut verstanden werden Die Isolation kann bei der Kopplung über mehrere Systeme zu Schäden führen. Das heißt, Ethik- und Sicherheitsbedenken sind äußerst wichtig in HRI sowie ein solides Verständnis der Dynamik von menschliches Handeln und Wahrnehmen und welche Reize oder Verhaltensweisen könnte für den Menschen gefährliche Situationen auslösen, z. B. Anfälle durch Wahrnehmungsreize, emotionale Reaktionen usw unangemessene körperliche Reaktionen.

BEWEGUNGS- UND AKTIVITÄTSIMITATION

Kulturelles Lernen und Nachahmungslernen gehören zu den faszinierendsten Elementen des Menschen und werden oft als Grundstein dafür angesehen, wie Menschen ein so hohes Maß an Intelligenz entwickeln können (vgl. Übersichtsartikel in Piaget, 1951; Tomasello et al., 1993; Meltzoff und Moore, 1994; Byrne und Russon, 1998; Rizzolatti und Arbib, 1998; Dautenhahn und Nehaniv, 2002). Seit mehr als 20 Jahren versuchen Robotiker, Nachahmung hinzuzufügen

tionslernen oder Lernen durch Demonstration, wie es genannt wurde zunächst zum Repertoire des Roboterlernens. Bewegungsimitation ist jedem aus der täglichen Erfahrung bekannt: einem Lehrer demonstriert eine Bewegung, und sofort ist der Schüler dabei in der Lage, es annähernd zu wiederholen. Aus der Sicht von Lernen, die Demonstration eines Lehrers als Ausgangspunkt Das eigene Lernen kann das Lernen deutlich beschleunigen Prozess, da Nachahmung die Menge meist drastisch reduziert des Versuchs und Irrtums, der erforderlich ist, um die Bewegung zu vollbringen Ziel, indem wir ein gutes Beispiel für eine erfolgreiche Bewegung liefern ([Schaal, 1999](#)). Aus Sicht der Robotik ist es daher wichtig, die detaillierten Prinzipien, Algorithmen usw. zu verstehen Metriken, die der Nachahmung dienen, angefangen bei der visuellen Wahrnehmung des Lehrers bis hin zur Erteilung motorischer Befehle Bewegungen Sie die Gliedmaßen des Schülers.

Abbildung 4 skizziert die Hauptbestandteile eines Konzepts Nachahmungslernensystem [für eine Übersicht über viele verwandte Arbeiten siehe [Schaal \(1999\)](#)]. Visuelle sensorische Informationen müssen in Informationen über Objekte und deren räumliche Lage in einem internen oder externen Koordinatensystem zerlegt werden; Die dargestellte Organisation ist größtenteils vom dorsalen (was) inspiriert. und ventraler (wo) Strom, wie in der Neurowissenschaft entdeckt Forschung ([van Essen und Maunsell, 1983](#)). Infolgedessen einige Form der Haltungsinformation der Bewegung des Lehrers und/oder dreidimensionale Objektinformationen über das manipulierte Objekt (sofern es sich um ein Objekt handelt) werden sollen verfügbar. Anschließend dreht sich eine der großen Fragen Es geht darum, wie solche Informationen in Taten umgesetzt werden können.

Zu diesem Zweck spielt Abb. 4 auf den Begriff der Bewegung an Primitiven, was oben bereits besprochen wurde. Allgemein, Wir denken an Bewegungsprimitive, um den kompletten Zeitablauf zu kodieren Verhaltensweisen wie „nach einer Tasse greifen“, „gehen“, „einen Tennisaufschlag“ usw. Abbildung 4 geht davon aus, dass die wahrgenommene Handlung des Lehrers wird in einer Assimilation auf eine Menge bestehender Grundelemente abgebildet Phase, auch vorgeschlagen in [Demiris und Hayes \(2002\)](#) und ([Wolpert et al., eingereicht](#)). Dieser Mapping-Prozess benötigt auch um das Korrespondenzproblem bezüglich einer Diskrepanz zwischen der Lehrerschaft und der Schülerschaft zu lösen ([Dautenhahn und Nehaniv, 2002](#)). Anschließend werden die am besten geeigneten Grundelemente angepasst, indem gelernt wird, sie zu verbessern Leistung in einer Akkommodationsphase. Abbildung 4 zeigt einen solchen Prozess durch Hervorheben der besser passenden Grundelemente mit zunehmender Linienbreite. Wenn kein vorhandenes Grundelement vorhanden ist, ist dies ein Gut Mit dem beobachteten Verhalten muss ein neues Grundelement übereinstimmen generiert. Nach einer anfänglichen Nachahmungsphase erfolgt die Selbstverbesserung, z. B. mit Hilfe einer Verstärkungsmethode Leistungsbewertungskriterium ([Sutton und Barto, 1998](#)), kann sowohl Bewegungsprimitive als auch eine angenommene Stufe verfeinern der Motorbefehlsgenerierung (siehe unten) bis zum gewünschten Wert Niveau der motorischen Leistungsfähigkeit erreicht wird (z. B. [Peters et al., 2003a](#); [Bentivegna et al., 2004a](#)).

Nachahmungslernen erfordert ein hohes Maß an motorischer und wahrnehmungsbezogener Kompetenz, was bisher in robotischen Systemen nicht realisiert wurde. Dennoch ist der Bereich der Nachahmung in

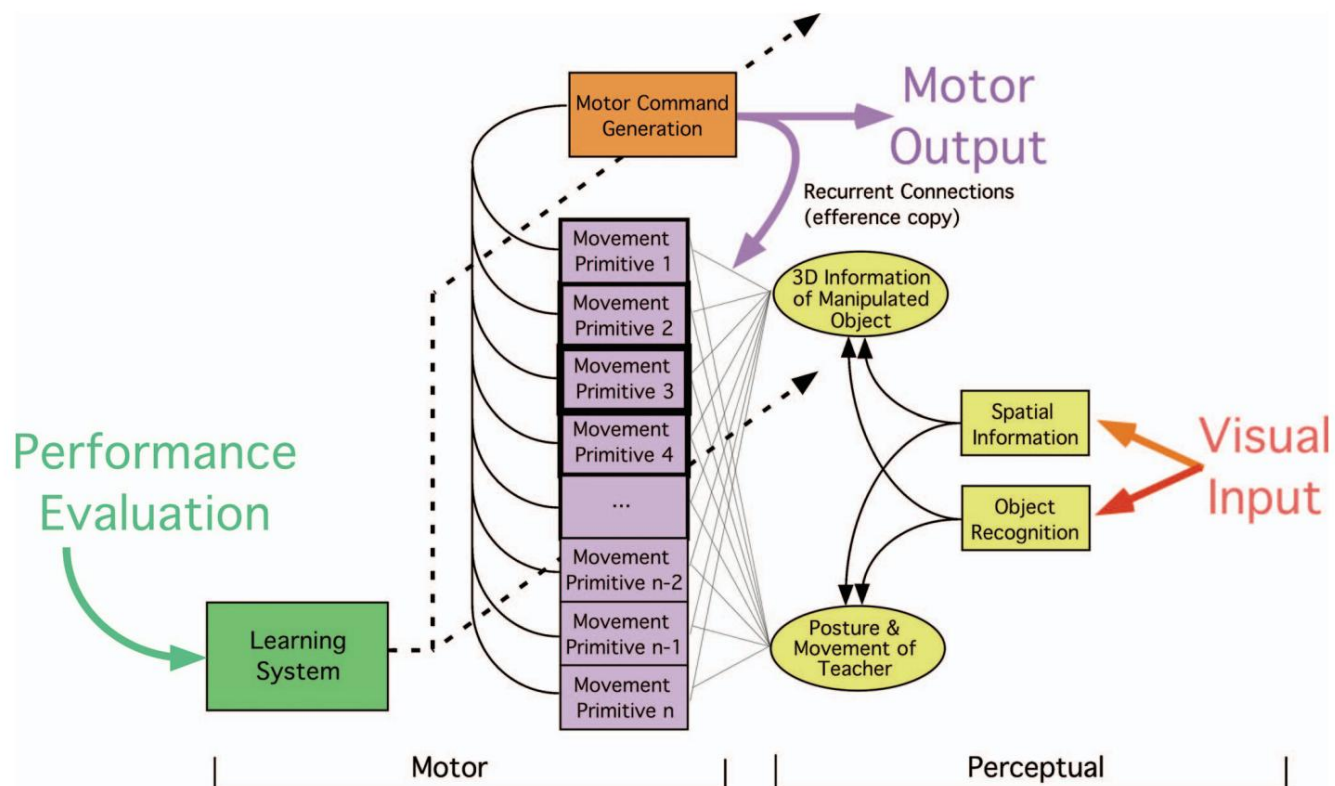


Abbildung 4. Konzeptskizze eines Nachahmungslernsystems. Die rechte Seite der Figur enthält hauptsächlich Wahrnehmungselemente und gibt an, wie visuelle Informationen in Raum- und Objektinformationen umgewandelt werden. Die linke Seite konzentriert sich auf motorische Elemente und veranschaulicht, wie eine Reihe von Bewegungsprimitiven konkurriert um ein demonstriertes Verhalten. Motorbefehle werden aus der Eingabe des am besten geeigneten Motors generiert. Beim Lernen können sowohl Bewegungsprimitive als auch der Motorbefehlsgenerator angepasst werden.

Im Bereich Robotik wurde in den letzten zehn Jahren intensiv geforscht, und es gibt hervorragende Rezensionen und Papersammlungen (z. B. [Schaal, 1999](#); [Mataric, 2000](#); [Dautenhahn und Nehaniv, 2002](#); [Schaal et al.; Arbib, 2006](#)).

BEWEGUNGS- UND AKTIVITÄTSERKENNUNG

Das Verständnis menschlicher Bewegungen und Aktivitäten wird ein wichtiger Bestandteil der neuen Robotik sein, wie es auch bei Robotern der Fall sein wird, die in den Kontext dessen, was um sie herum geschieht, abzuleiten und autonom darauf zu reagieren. Auf diese Weise können wir Menschen in ihrer Umgebung erkennen und erkennen, wer sie sind und was sie tun wird entscheidend sein. Während die meisten verwandten Forschungen ihren Ursprung in der Computer Vision (z. B. für Übersichten siehe [Gavrila, 1997](#); [Aggarwal und Cai, 1999](#)) und geht über den Rahmen dieses Artikels hinaus, aus Sicht der Bewegungserzeugung ein Potenzial. Der Nachteil dieser Ansätze besteht darin, dass Darstellungen verwendet werden, die zur Erkennung sind für die Steuerung meist ungeeignet. Bewegung, da sie nichts mit der Vorstellung von Gelenken zu tun haben, Muskeln, Gelenkdrehmomente oder Aufgabenziele. Angesichts der Tatsache, dass Roboter in der neuen Robotik nicht nur zur Überwachung eingesetzt, sondern vielmehr müssen wir auf das, was sie wahrgenommen haben, reagieren, z. B. wie bei Bewegungsimitationen oder Physiotherapie, wir müssen handlungsorientierte Wahrnehmung statt isolierter Wahrnehmung.

Ausgelöst durch die Entdeckung von „Spiegelneuronen“ in der Neurologie

biologische Forschung, d.h. einige Neuronen, die sich an der Schnittstelle von Wahrnehmung und Handeln bei Menschen und Affen befinden ([Rizzolatti und Arbib, 1998](#); [Schaal, 1999](#); [Frith und Wolpert, 2004](#); [Arbib, 2006](#)), und das scheint tatsächlich daran beteiligt zu sein. Um die handlungsorientierte Wahrnehmung zu verbessern, wurden mehrere Forschungsprojekte in der Robotik und verwandten Bereichen in Angriff genommen, um entsprechende Theorien und Algorithmen zu entwickeln. Das heißt, der modulare Kontrollansatz von [Wolpert und Kawato \(1998\)](#), der dynamische Systemansatz von [Ijspeert et al. \(Ijspeert et al., 2003\)](#) und der statistische Ansatz von [Inamura et al. \(Inamura et al., 2004\)](#) und [Jenkins \(Jenkins, 2003\)](#) sind alles Methoden, die eine handlungsorientierte Wahrnehmung durchführen und auf die Robotik angewendet werden können. Das muss jedoch betont werden.

Die Wahrnehmung in diesen Ansätzen ist normalerweise vereinfacht, d. h. die Autoren verwenden keine rohen Videoeingaben zur Bewegungserkennung, sondern stattdessen ihre Probanden mit Markierungen oder anderem aus, was bedeutet, die Komplexität der visuellen Verarbeitung zu reduzieren. Daher, Es muss noch viel mehr getan werden, um eine handlungsorientierte Wahrnehmung in wirklich natürlichen Umgebungen zu erreichen.

Gemeinsame Aufgabenerfüllung

In bestimmten Situationen wird es nützlich sein, wenn mehrere Roboter, bzw. Roboter und Mensch arbeiten zusammen, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Es gibt zwei Arten der Zusammenarbeit: Zusammenarbeit

durch physischen Kontakt (z. B. durch das gemeinsame Tragen eines Objekts) und Zusammenarbeit ausschließlich durch Informationsaustausch (z. B. durch die Kartierung einer Umgebung durch mehrere Roboter). Der Letzterer Bereich hat in den letzten Jahren aufgrund des RoboCup-Wettbewerbs, d. h. mobiler Roboter, die in Teams Fußball spielen, große Aufmerksamkeit erhalten (siehe z. B. [Bredendfeld et al., 2006](#)) und es gibt auch eine Fachkonferenz zum Thema Multiroboter Systeme (siehe z. B. [Parker et al., 2005](#)). Viele der in diesem Forschungsbereich entwickelten Techniken werden Auswirkungen auf die Zukunft haben die Neue Robotik, erweitert dieses Papier jedoch auf diesen Bereich würde unseren Fokus auf interdisziplinäre Menschenorientierung reduzieren zu viel recherchieren.

Physische Zusammenarbeit von Robotern (oder Robotern und Menschen) wird in der Robotik weitgehend unter dem Namen Kraftkontrolle behandelt, da die Summe der Kräfte, die auf ein gemeinsam manipuliertes Objekt wirken, für das Verhalten des Objekts von zentraler Bedeutung ist. Ein theoretisch sehr ansprechender Rahmen für eine solche Manipulation war Entwickelt von Khatib ([Khatib, 1987](#)), ursprünglich mit dem Ziel Erklären, wie Kraft die wichtigste Variable sein könnte Kodierung motorischer Aufgaben (im Gegensatz zu Position, Geschwindigkeit oder Beschleunigung). In [Featherstone und Khatib \(1997\)](#) wurde es verwirklicht dass Khatibs Rahmenwerk zur kraftbasierten Kontrolle auf Aufgabenebene dient (auch bekannt als „Operational Space Control“) eignete sich sehr gut für die gemeinsame Aufgabenerfüllung, da die spezielle Formulierung von Khatib vermeidet komplexe mathematische Interaktionen zwischen die zusammenarbeitenden motorischen Systeme, d. h. jedes System kann individuell seinen Kraftbeitrag leisten, ohne die Kraft zu übernehmen Gesamtzustand aller beteiligten motorischen Systeme berücksichtigt. Khatibs Formulierung der Aufgabenkontrolle bleibt somit eine Einer der attraktivsten theoretischen Ansätze zur Entwicklung motorischer Fähigkeiten von Robotern, da er die Fähigkeit der nachgiebigen Steuerung, der hierarchischen Steuerung und sogar der Koordination mehrerer Roboter kombiniert. Wie bereits erwähnt, besteht darin der einzige Nachteil Diese Eigenschaften erfordern recht genaue Modelle des Roboters System. Es wird interessant sein, in zukünftigen Arbeiten zu sehen, ob Es kann gezeigt werden, dass die menschliche Motorsteuerung entsprechend funktioniert ähnliche Prinzipien, wie sie in Khatibs Arbeit nahegelegt werden, und einige Arbeiten in dieser Richtung sind im Gange ([Scholz und Schöner, 1999](#); [Todorov und Jordan, 2002](#); [Todorov, 2005](#)).

SICHERHEIT

In diesem Dokument wird zwar nicht auf technische Fragen der Sicherheit eingegangen Dennoch ist es wichtig, auf die neue Robotik hinzuweisen dass Sicherheit ein großes Anliegen und Hindernis bei der Entwicklung der neuen Robotik sein wird. Es ist unvermeidlich, dass dort wird es zu Unfällen zwischen Menschen und Robotern in einer menschenzentrierten Robotikumgebung kommen. Der Roboter löst möglicherweise nicht aus solche Probleme, aber wer wird in der Lage sein, Menschen davon abzuhalten? versehentliches Anstoßen der Roboter, Kinder dazu zu bringen, auf sie zu klettern, usw.? Die wirksamsten Möglichkeiten, das Verletzungsrisiko zu reduzieren erfolgt durch leichtes und nachgiebiges Roboterdesign (z. B. [Zinn et al., 2004](#)) und indem wir Erholungsverhalten annehmen, das dem ähnelt, was wir Menschen tun (z. B. [Fujiwara et al., 2002](#)).

ENGAGEMENTFORSCHUNG

Wenn man einem Industrieroboter dabei zusieht, wie er ein Auto zusammenbaut, kann man das Lassen Sie sich für einen Moment von der Technologie faszinieren, aber nach ein paar Minuten Wiederholungen, dieses Interesse schwindet. Die Engagementforschung versucht es Verstehen Sie, was nötig ist, um das Interesse der Menschen an der Interaktion mit einem Roboter aufrechtzuerhalten. Dies wird in der Neuen Robotik von entscheidender Bedeutung sein, wenn Roboter zu Erziehern, Physiotherapeuten, persönlichen Assistenten oder sogar Haustieren werden sollen. Engagementforschung ist zumindest ein originelles Robotik-Thema und noch viel mehr verwurzelt in der Psychologie und den Kognitionswissenschaften. In diesem Papier, Wir werden uns daher nur auf einige wenige Themen der Engagementforschung konzentrieren, die den stärksten Bezug zur technischen Forschung haben der Robotik.

AUFMERKSAMKEIT UND GETEILTE AUFMERKSAMKEIT

In mindestens zwei Fällen sind Augenbewegungen für das menschliche Verhalten von entscheidender Bedeutung Wege. Erstens nutzen wir sie, um den Fokus unserer Aufmerksamkeit auf sie zu lenken ein Objekt von Interesse, so dass es mit dem untersucht werden kann hochauflösende foveale Region der Netzhaut, und zweitens wir Nutzen Sie unsere Augen, um andere über interessante Objekte zu informieren, d. h. Wir teilen Aufmerksamkeit und wecken Engagement. Darüber hinaus ist die Das menschliche Augenmotoriksystem weist mehrere Verhaltensweisen auf niedrigerer Ebene auf die der Stabilisierung des visuellen Inputs dienen (der vestibuläre Augenreflex, der optokinetische Reflex, die sanfte Verfolgung usw.). Vergenz, siehe z. B. [Shibata et al., 2001](#)). Schließlich scheinen Augenbewegungen eine wichtige Komponente bei der Schaffung komplexer motorischer Abläufe zu sein ([Flanagan und Johansson, 2003](#); [Flanagan et al., 2006](#)), sodass eine sequentielle Aktionsgenerierung erfolgt Möglicherweise ist es erforderlich, die Prinzipien der visuellen Aufmerksamkeit zu verstehen und Planung im visuellen Raum.

Aus robotischer Sicht gab es einen fairen Aufschwung der Arbeit zur Schaffung von motorischen Sehverhaltensweisen auf niedriger Ebene Köpfe (z. B. [Demiris et al., 1997](#); [Breazeal et al., 2001](#); [Shibata et al., 2001](#); [Panerai et al., 2003](#); [Aryananda und Weber, 2004](#)). Bisher ist jedoch eine vollständige Umsetzung aller Das okulomotorische Verhalten des menschlichen Augenmotoriksystems ist fehlen. Solange Roboterköpfe auf statischen Plattformen montiert waren, bestand oft kein großer Bedarf an einem kompletten Augenmotorsystem, wenn sich der Kopf jedoch auf einer beweglichen Plattform befinden sollte Für einen humanoiden Roboter sind alle Stabilisierungsreflexe und höhere motorische Verhaltensweisen erforderlich. Es ist nicht so Diese Verhaltensweisen an sich sind ein technisches Problem, sondern das Die Herausforderung liegt in der Kombination und Arbitrierung aller Verhaltensweisen und einigen erforderlichen Lernfähigkeiten für die Abstimmung Verhaltensparameter ([Shibata et al., 2001](#)).

Die visuelle Aufmerksamkeit mit Roboter-Vision-Köpfen wurde ebenfalls ausführlich untersucht (z. B. [Braun, 1994](#); [Driscoll et al., 1998](#); [Breazeal et al., 2001](#); [Shibata et al., 2001](#); [Vijayakumar et al., 2001](#)), aber erst vor kurzem wurde ein ziemlich umfassendes veröffentlicht Das visuelle Aufmerksamkeitssystem für technische Anwendungen wurde aus Erkenntnissen der Neurobiologie abgeleitet ([Koch und Ullman, 1985](#); [Itti und Koch, 2000a](#); [Itti und Koch, 2000b](#); [Itti und Koch, 2001](#); [Itti et al., 2003](#)). Diese Arbeit ist derzeit in Bearbeitung

Möglichkeit zu untersuchen, wie Absichten (d. h. aufgabenrelevante Vorurteile von oben nach unten) die Aufmerksamkeit und Entscheidungsfindung beeinflussen können (Navalpa kkam und Itti, 2005; Carmi und Itti, 2006).

Schließlich die gemeinsame Aufmerksamkeit, die für das Engagement von entscheidender Bedeutung ist, wurde in einigen Robotikprojekten erforscht zu werden (Kozima und Ito, 1998; Scassellati, 1998; Scassellati, 2002).

Zu den Fähigkeiten, die zur Überwachung der Aufmerksamkeit erforderlich sind, gehört auch der Blick Tracking, Haltungsinterpretation, Gesichtsausdruckerkennerkennung usw. (z. B. Breazeal und Scassellati, 2002). Es wird eine Zeit dauern Es bedarf erheblicher Forschung und technologischer Entwicklungen, bis solche Systeme gut verstanden, in ihren Fähigkeiten mit der menschlichen Leistung vergleichbar und in der Praxis einsetzbar sind reale Umgebungen.

ABSICHT UND BENUTZERMODELLIERUNG

Eine eher unerforschte und schwierige Frage der Mensch-Roboter-Interaktion ist die, wie man die Absichten und Präferenzen der Bewegung eines Körpers ermitteln kann. Wenn wir diese Probleme verstanden haben, ist das angemessen Protokolle könnten in Interaktion und Engagement entwickelt werden Recherchen, die den einzelnen Nutzer ansprechen und seine individuellen Neigungen berücksichtigen. Eher wenig Forschung

Es sind Projekte zu finden, die sich mit diesen Fragen befassen. Eine Premiere Der Schritt könnte darin bestehen, die menschliche Bewegung und Aktivität zu verstehen Begriffe von Kostenfunktionen, dh um bestimmte Kosten zuzuordnen Funktion mit einem bestimmten Verhalten. Verstärkungslernen generiert Kontrollrichtlinien basierend auf solchen Kostenfunktionen und Das Ableiten der Kostenfunktion aus einer bestimmten Richtlinie (dh einem bestimmten Verhalten) könnte als inverses Verstärkungslernen (Ng und Russell, 2000). Alternativ können aus beobachtetem Verhalten Verhaltensstatistiken erhoben werden, die anschließend bestimmte Nutzer- und Bewegungspräferenzen charakterisieren (Bentivegna et al., 2004b; Billard et al., 2004). Es ist viel Forschungsarbeit nötig Es muss getan werden, um praktikable Ansätze für das Thema und die Absicht zu finden und Benutzermodellierung, die im Wesentlichen versucht, sich dem zu nähern Thema einer „Theorie des Geistes“ auf algorithmischem Wege (Gallese und Goldman, 1998; Scassellati, 2002; Wolpert et al., 2003).

MOTIVATION UND EMOTIONEN

Eng mit der Absichts- und Benutzermodellierung verbunden ist die Frage wie man Motivation und Emotionen von Menschen versteht

auf automatische Weise und natürlich, wie man Roboterverhalten erzeugt in der Neuen Robotik, die sich auf jene Eigenschaften menschlicher

Persönlichkeiten beziehen. Bisher gibt es empirische und explorative Arbeit in der Robotik-Community zu diesem Thema (z. B. Breazeal und Scassellati, 2002; Kanda et al., 2004; Coredeschi et al., 2006), in der Regel durch die Konfrontation menschlicher Subjekte mit einigen Form eines menschenähnlich aussehenden Roboters und indem ihre Reaktion anhand einiger psychologischer Maßstäbe untersucht wird. Ein interessanter neuer Ansatz besteht darin, die neurowissenschaftlichen Grundlagen zu untersuchen

Motivation und Emotionen, untersucht im Kontext von Training und Engagement. Forschung zu Ausbildung und Engagement geht von der Hypothese aus, dass motorisches Lernen selbst interne Belohnungen generieren kann. Konkret wird vorgeschlagen, dass

Das Nervensystem berechnet die Geschwindigkeit, mit der motorische Fähigkeiten erlernt werden.

Dies dient als interne Belohnung und ergänzt die externen

Belohnungsbedingungen. Nach einem vorläufigen Modell (Daw und Touretzky, 2002; Schweighofer und Doya, 2003; Schweighofer et al., 2004)

hängt die Lernmotivation davon ab

Gleichgewicht zwischen Erfolgen, Misserfolgen und externen Belohnungen. In

Dabei ist insbesondere die Schwierigkeit der beobachteten, zu erlernenden

Bewegung entscheidend. Wenn zu einfach oder zu schwer, die Lerngeschwindigkeit

wird bald Null sein. Somit nur moderat und abnehmend

Lernfehler führen zu einem hohen Zugewinn an positivem Feedback

Schleife, die die Lernmotivation maximiert. Diese Intuitionen können in

Trainingsplänen formalisiert werden und dazu führen

Methoden, die die Schüler optimal motivieren und ihnen ein schnelles Lernen

ermöglichen. Eine ähnliche Forschungsmethodik könnte auf Folgendes anwendbar sein andere Situationen, in denen menschliche Motivation und Emotionen

spielen wichtige Rollen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Diese Perspektive verdeutlichte eine interdisziplinäre Forschung

Programm, das den Weg zu einer neuen Robotik ebnen könnte.

Die Vision ist, dass es irgendwann in naher Zukunft Roboter geben werden

Seien Sie allgegenwärtig unter uns und helfen Sie uns, Aufgaben in einem zu erfüllen

eine immer komplexer werdende Gesellschaft, eine Gesellschaft, die immer komplexer wird

Sie sind mit einer alternden Bevölkerung, Bildungsproblemen, Katastrophen,

Krankheiten usw. konfrontiert. Um unter uns funktionieren zu können, müssen

die Roboter der Neuen Robotik über viel mehr verfügen

Menschenähnliche Fähigkeiten in ihrem motorischen Verhalten, und das werden sie auch

Auch ein angemessenes Sozialverhalten ist erforderlich. Daher,

Die Robotikforschung muss einen neuartigen interdisziplinären Ansatz verfolgen

Das Programm reicht von traditionellen technischen Themen der Steuerung

bis hin zu Neurowissenschaften, Psychologie, Kognitionswissenschaften und

Ethik. Dieser Artikel konzentrierte sich darauf, etwas Unverständliches einzubringen

Weise – eine gewisse Struktur für die potenziellen Forschungsthemen in der

Neue Robotik. Einige dieser Themen, z. B. die genannten

unter Aktionsforschung verfügen bereits über eine fundiertere wissenschaftliche Grundlage

Stiftung und sind auf dem Weg zu Pilotstudien an echten Robotern. Andere

Themen, insbesondere die unter Engagement Research aufgezählten, stecken

eher in den Kinderschuhen und das ist der Fall

Aufgabe der Recherche ist es, herauszufinden, welche Fragen die richtigen sind

fragen Sie nach und welche Ansätze erfolgversprechend sein könnten. In einigen

In diesem Sinne ist die Neue Robotik nichts anderes als der alte Traum der

künstlichen Intelligenz, ein ähnliches künstliches System zu erschaffen

Fähigkeiten als die des Menschen. Es ist nur so, dass die Mittel und

Die Herangehensweisen an dieses Thema haben sich deutlich verändert

von den klassischen Ideen des symbolischen Denkens und im

im Zuge verbesserter Computertechnologie und Einblicke in die

menschliches Gehirn, sondern verfolgen Methoden des statistischen Lernens,

Computational Neuroscience und Computational Psychology.

Wichtig ist auch, dass die Ambitionen der New Robotics

reduziert werden: Sie können sich wirklich auf gesellschaftliche Bedürfnisse konzentrieren und etwas bewirken

Fortschritte in klar definierten Problembereichen, z. B. Roboterphysik

Therapie oder Robotererziehung von Kindern mit besonderen Bedürfnissen

(z. B. autistische Kinder), anstatt zu versuchen, das omnipotente Robotersystem

für alle Probleme zu schaffen. In vielen Ländern,

Forschungsagenturen haben begonnen, die Setzlinge des zu finanzieren

Neue Robotik, und es wird spannend sein, die Entwicklung dieses neuen Bereichs im nächsten Jahrzehnt mitzuerleben.

DANKSAGUNGEN

Diese Forschung wurde teilweise durch die National Science Foundation Grant Nos. ECS-0325383, IIS-0312802, IIS 0082995, ECS-0326095, ANI-0224419, NASA Grant No.

AC#98-516, ein AFOSR-Stipendium für intelligente Steuerung, das von der japanischen Wissenschafts- und Technologieagentur finanzierte ERATO Kawato Dynamic Brain Project und die ATR Computational Neuroscience Laboratories.

REFERENZEN

- Aggarwal, JK und Cai, Q (1999). „Analyse menschlicher Bewegungen: Ein Rückblick.“ *Berechnen. Vis. Bildverstand.* 73, 428–440.
- Albu-Schäffer, A, Ott, C und Hirzinger, G (2007). „Ein einheitliches passivitätsbasiertes Steuerungsframework für die Positionen-, Drehmoment- und Impedanzsteuerung von Robotern mit flexiblen Gelenken.“ *Int. J. Roboter. Res.* 26, 23–39.
- An, CH, Atkeson, CG und Hollerbach, JM (1988). Modellbasierte Steuerung eines Roboter manipulators, MIT Press, Cambridge, MA.
- Arbib, M (1995a). Das Handbuch der Gehirntheorie und neuronalen Netze, MIT Press, Cambridge, MA.
- Arbib, MA (1995b). „Schematheorie.“ In *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, Arbib, MA (Hrsg.), S. 830–834, MIT Press, Cambridge, MA.
- Arbib, MA (2006). *Aktion zur Sprache über das Spiegelneuronensystem*, Cambridge University Press, Cambridge, MA.
- Arimoto, S., Sekimoto, M., Hashiguchi, H. und Ozawa, R. (2005). „Natürliche Lösung der Fehlstellung der inversen Kinematik für redundante Roboter: Eine Herausforderung für Bernsteins Freiheitsgradproblem.“ *Adv. Rauben.* 19, 401–434.
- Aryananda, L. und Weber, J. (2004). „MERTZ: eine Suche nach einem robusten und skalierbaren humanoiden Kopfrobooter mit aktiver Sicht.“ In, Bd. 2, S. 513–532.
- Atkeson, CA, Aboaf, EW, McIntyre, J und Reinkensmeyer, DJ (1986). „Modellbasiertes Roboterlernen.“ *Viertes Internationales Symposium zur Robotikforschung*, 2318–2330.
- Atkeson, CG, Hale, J, Kawato, M, Kotosaka, S, Pollick, F, Riley, M, Schaal, S, Shibata, S, Tevatia, G und Ude, A (2000). „Einsatz humanoider Roboter zur Untersuchung menschlichen Verhaltens.“ *IEEE Intell. Syst.* 15, 46–56.
- Atkeson, CG, Moore, AW und Schaal, S (1997a). „Lokal gewichtet Lernen.“ *Artif. Intel. Offb.* 11, 11–73.
- Atkeson, CG, Moore, AW und Schaal, S (1997b). „Lokal gewichtetes Lernen zur Kontrolle.“ *Artif. Intel. Rev.* 11, 75–113.
- Barto, AG und Mahadevan, S (2003). „Neueste Fortschritte beim hierarchischen Verstärkungslernen.“ *Diskrete Ereignisdyn. Syst.* 13, 341–379.
- Beek, PJ (1989). *Jonglierdynamik*, Free University Press, Amsterdam.
- Bellman, R (1957). *Dynamische Programmierung*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Bentivegna, DC, Atkeson, CA und Cheng, G (2004a). „Lernaufgaben aus Beobachtung und Übung.“ *Rauben. Auton. Syst.* 47, 163–169.
- Bentivegna, DC, Cheng, G und Atkeson, CG (2004b). „Lernen aus Beobachtung und aus der Praxis unter Verwendung von Verhaltensprimitiven.“ 11. Internationales Symposium für Robotikforschung (ISRR2003), Springer, Cien, Italien.
- Billard, A, Epars, Y, Calinon, S, Cheng, G und Schaal, S (2004). „Optimale Nachahmungsstrategien entdecken.“ *Rauben. Auton. Syst.* 47, 68–77.
- Braun, J (1994). „Visuelle Suche zwischen Elementen unterschiedlicher Bedeutung: Die Entfernung der visuellen Aufmerksamkeit imitiert eine Läsion im extrastriatischen Bereich V4.“ *J. Neurosci.* 14, 554–567.
- Breazeal, C, Edsinger, A, Fitzpatrick, P und Scassellati, B (2001). „Aktive Vision für gesellige Roboter.“ *IEEE Trans. Syst. Mann Cybern.* 31, 443–453.
- Breazeal, C und Scassellati, B (2002). „Roboter, die Menschen imitieren.“ *Trends Cogn. Wissenschaft.* 6, 481–487.
- Bredendfeld, A, Jacoff, A, Noda, I und Takahashi, Y (2006). *Robocup 2005: Robot Soccer World Cup IX*, Springer, New York.
- Brock, O, Fagg, AH, Grupen, R, Platt, R, Rosenstein, M und Sweeney, J (2005). „Ein Rahmen für Lernen und Kontrolle in intelligenten humanoiden Robotern.“ *Int. J. Humanoid Robotics* 2, 301–336.
- Brown, IE, Cheng, EJ und Loeb, GE (1999). „Gemessene und modellierte Eigenschaften der Skelettmuskulatur von Säugetieren. II. Die Auswirkungen der Reizfrequenz auf Kraft-Längen- und Kraft-Geschwindigkeits-Beziehungen.“ *J. Muskelres. Zellmotilität.* 20, 627–643.
- Brown, IE und Loeb, GE (1999). „Gemessene und modellierte Eigenschaften der Skelettmuskulatur von Säugetieren. I. Die Auswirkungen der Potenzierung nach der Aktivierung auf den Zeitverlauf und die Geschwindigkeitsabhängigkeiten der Kraftproduktion.“ *J. Muscle Res. Zellmotilität.* 20, 443–456.
- Bullock, D und Grossberg, S (1988). „Neuronale Dynamik geplanter Armbewegungen: Emergente Invarianten und Geschwindigkeitsgenauigkeitseigenschaften während der Flugbahnbildung.“ *Psychol. Rev.* 95, 49–90.
- Burridge, RR, Rizzi, AA und Koditschek, DE (1999). „Sequentielle Zusammensetzung dynamisch geschickter Roboterhaltensweisen.“ *Int. J. Roboter. Res.* 18, 534–555.
- Byrne, RW und Russon, AE (1998). „Lernen durch Nachahmung: A hierarchischer Ansatz.“ *Verhalten. Gehirnwissenschaft.* 21, 667–684; Diskussion 684–721.
- Carmi, R. und Itti, L. (2006). „Visuelle Ursachen versus Korrelate der Aufmerksamkeitsauswahl in dynamischen Szenen.“ *Vision Res.* 46, 4333–4345.
- Collins, S., Ruina, A., Tedrake, R. und Wisse, M. (2005). „Effiziente zweibeinige Roboter auf Basis passiv-dynamischer Gehhilfen.“ *Wissenschaft* 307, 1082–1085.
- Coradeschi, S, Ishiguro, H, Asada, M, Shapiro, SC, Thielscher, M, Breazeal, C, Mataric, MJ und Ishida, H (2006). „Vom Menschen inspirierte Roboter.“ *IEEE Intell. Syst.* 21, 74–85.
- Dautenhahn, K, und Nehaniv, CL, (Hrsg.) (2002). *Nachahmung bei Tieren und Artefakte*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Daw, ND und Touretzky, DS (2002). „Langfristige Belohnungsvorhersage in T. D. Modelle des Dopaminsystems.“ *Neuronale Berechnung.* 14, 2567–2583.
- Demiris, J. und Hayes, G. (2002). „Nachahmung als zweistufiger Prozess mit Vorhersage- und Lernkomponenten, ein biologisch plausibles Rechenmodell.“ In *Imitation in Animals and Artificats*, Dautenhahn, K, und Nehaniv, CL, (Hrsg.), S. 327–361, MIT Press, Cambridge, MA.
- Demiris, J, Rougeaux, S, Hayes, GM, Berthouze, L und Kuniyoshi, Y (1997). „Verzögerte Nachahmung menschlicher Kopfbewegungen durch einen aktiven Stereo-Vision-Kopf.“ *Internationaler IEEE-Workshop zur Roboter-Mensch-Kommunikation*, Sendai, Japan.
- Doya, K., Samejima, K., Katagiri, K. und Kawato, M. (2002). „Mehrfachmodellbasiertes Verstärkungslernen.“ *Neuronale Berechnung.* 14, 1347–1369.
- Driscoll, J, Peters, R und Cave, K (1998). „Ein visuelles Aufmerksamkeitsnetzwerk für einen humanoiden Roboter.“ *Proz. Internationale IEEE/RSJ-Konferenz über intelligente Roboter und Systeme (IROS-98)*.
- Dyer, P und McReynolds, SR (1970). *Die Berechnung und Theorie der optimalen Kontrolle*, akademisch.
- Featherstone, R und Khatib, O (1997). „Lastunabhängigkeit der dynamisch konsistenten Umkehrung der Jacobi-Matrix.“ *Int. J. Roboter. Res.* 16, 168–170.
- Flanagan, JR, Bowman, MC und Johansson, RS (2006). „Kontrolle Strategien bei Objektmanipulationsaufgaben.“ *Curr. Meinung. Neurobiol.* 16, 650–659.
- Flanagan, JR und Johansson, RS (2003). „Aktionspläne werden in die Tat umgesetzt Überwachung.“ *Natur (London)* 424, 769–771.
- Franklin, DW, Osu, R, Burdet, E, Kawato, M und Milner, TE (2003). „Anpassung an stabile und instabile Dynamik durch kombinierte Impedanzkontrolle und inverses Dynamikmodell.“ *J. Neurophysiol.* 90, 3270–3282.
- Frith, CD und Wolpert, DM (2004). *Die Neurowissenschaften des Sozialen Interaktion: Die Handlungen anderer entschlüsseln, nachahmen und beeinflussen*, The Royal Society, Oxford University Press, Oxford.
- Fujiwara, K., Kanehiro, F., Kajita, S., Kaneko, K., Yokoi, K. und Hirukawa, H. (2002). UKEMI: Fallbewegungssteuerung zur Minimierung von Schäden an zweibeinigen humanoiden Robotern. In, Bd. 3, S. 2521–2526.
- Gallese, V und Goldman, A (1998). „Spiegelneuronen und die Simulationstheorie des Gedankenlesens.“ *Trends Cogn. Wissenschaft.* 2, 493–501.
- Gavrila, DM (1997). „Die visuelle Analyse menschlicher Bewegungen: Eine Umfrage.“ *Berechnen. Vis. Bildverstand.* 73, 82–98.
- Gomi, H. und Kawato, M. (1996). „Gleichgewichtspunktkontrollhypothese

- untersucht durch gemessene Armsteifheit bei Mehrgelenksbewegungen." *Wissenschaft* 272, 117–220.
- Haruno, M, Wolpert, DM und Kawato, M (2001). „Mosaikmodell für sensomotorisches Lernen und Kontrolle." *Neuronale Berechnung*, 13, 2201–2220.
- Ijspeert, A, Nakanishi, J und Schaal, S (2003). „Lernen von Attraktorlandschaften zum Erlernen motorischer Grundelemente." In *Advances in Neural Information Processing Systems* 15, Becker, S, Thrun, S, und Obermayer, K, (Hrsg.), S. 1547–1554, MIT Press, Cambridge MA.
- Inamura, T., Iwaki, T., Tanie, H. und Nakamura, Y. (2004). „Verkörperte Symbolentstehung basierend auf der Mimesis-Theorie." *Int. J. Roboter. Res.* 23, 363–377.
- Itti, L., Dhavale, N. und Pighin, F. (2003). „Realistische Avatar-Augen- und Kopfanimation unter Verwendung eines neurobiologischen Modells der visuellen Aufmerksamkeit." Vorträge des 48. jährlichen internationalen SPIE-Symposiums für optische Wissenschaft und Technologie, 64–78.
- Itti, L und Koch, C (2000a). „Ein Vergleich von Merkmalskombinationsstrategien für hervorstechende visuelle Aufmerksamkeitssysteme." *Proceedings of the SPIE Human Vision and Electronic Imaging IV (HVEI99)*, 3644, 473–482.
- Itti, L und Koch, C (2000b). „Ein hervorstechender Suchmechanismus für offene und verdeckte Verschiebungen der visuellen Aufmerksamkeit." *Vision Res.* 40, 1489–1506.
- Itti, L. und Koch, C. (2001). „Computergestützte Modellierung der visuellen Aufmerksamkeit." *Nat. Rev. Neurosci.* 2, 194–203.
- Jenkins, OC (2003). „Datengesteuerte Ableitung von Fähigkeiten für autonome humanoide Agenten." Institut für Informatik, University of Southern California, Los Angeles.
- Johansson, G (1973). „Visuelle Wahrnehmung biologischer Bewegung und ein Modell für ihre Analyse." *Wahrnehmung. Psychophyse.* 14, 201–211.
- Kajita, S. und Tani, K. (1996). „Experimentelle Untersuchung des zweibeinigen dynamischen Gehens." *IEEE-Steuerungssystem. Mag.* 16, 13–19.
- Kanda, T., Ishiguro, H., Imai, M. und Ono, T. (2004). „Entwicklung und Evaluierung interaktiver humanoider Roboter." *Proz. IEEE* 92, 1839–1850.
- Kawato, M (1999). „Interne Modelle für Motorsteuerung und Flugbahnplanung." *Curr. Meinung. Neurobiol.* 9, 718–727.
- Khatib, O (1987). „Ein vereinter Ansatz zur Bewegungs- und Kraftsteuerung von Roboter manipulatoren: Die operative Raumformulierung." *Int. J. Roboter. Res.* 31, 43–53.
- Khatib, O, Brock, O, Chang, K, Conti, F, Ruspini, D und Sentis, L (2002). „Robotik und interaktive Simulation." *Komm. ACM* X, 46–51.
- Khatib, O., Sentis, L., Park, J. und Warrent, J. (2004). „Dynamisches Ganzkörperverhalten und Steuerung menschenähnlicher Roboter." *Int. J. Humanoider Roboter.* 1, 1–15.
- Koch, C. und Ullman, S. (1985). „Verschiebungen der selektiven visuellen Aufmerksamkeit: Hin zu den zugrunde liegenden neuronalen Schaltkreisen." *Summen. Neurobiol.* 4, 219–227.
- Kozima, H. und Ito, A. (1998). Ein aufmerksambasierter Ansatz zur Symbolerfassung. In, S. 852–856.
- Loeb, GE (2001). „Vom Rückenmark lernen." *J. Physiol.* 533, 111–117.
- Mataric, M (1998). „Verhaltensbasierte Robotik als Werkzeug zur Synthese künstlichen Verhaltens und zur Analyse natürlichen Verhaltens." *Trends Cogn. Wissenschaft.* 2, 82–86.
- Mataric, M (2000). „Humanoide dazu bringen, sich zu bewegen und nachzuahmen." *IEEE Intell. Syst.* 15, 18–24.
- McGeer, T (1990). „Passives dynamisches Gehen." *Int. J. Roboter. Res.* 9, 633–643.
- Meltzoff, AN und Moore, MK (1994). „Nachahmung, Erinnerung und Darstellung von Personen." *Säuglingsverhalten. Entwickler* 17, 83–99.
- Menzel, P. und D'Alusio, F. (2000). Robosapiens: Evolution eines Neuen Arten, MIT Press, Cambridge, MA.
- Miall, RC und Wolpert, DM (1996). „Vorwärtsmodelle für physiologische Motorsteuerung." *Neuronale Netze* 9, 1265–1285.
- Miyamoto, H. und Kawato, M. (1998). „Ein Tennis-Aufschlag- und Aufschwung-Lernroboter basierend auf der bidirektionalen Theorie." *Neuronale Netze* 11, 1331–1344.
- Miyamoto, H., Schaal, S., Gandolfo, F., Koike, Y., Osu, R., Nakano, E., Wada, Y. und Kawato, M. (1996). „Ein Kendama-Lernroboter, der auf der bidirektionalen Theorie basiert." *Neuronale Netze* 9, 1281–1302.
- Nakamura, Y (1991). Fortgeschrittene Robotik: Redundanz und Optimierung, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Nakanishi, J, Mistry, M und Schaal, S (eingereicht). „Inverse Dynamikkontrolle mit schwebender Basis und Einschränkungen." Internationale Konferenz für Robotik und Automatisierung (ICRA2007).
- Narendra, KS und Annaswamy, AM (2005). Stabile adaptive Systeme, Dover, Mineola, NY.
- Navalpakkam, V und Itti, L (2005). „Modellierung des Einflusses der Aufgabe auf Aufmerksamkeit." *Vision Res.* 45, 205–231.
- Ng, AY und Russell, S (2000). „Algorithmen für inverses Verstärkungslernen." Tagungsband der Siebzehnten internationalen Konferenz über maschinelles Lernen (ICML 2000), Stanford, CA.
- Osu, R, Kamimura, N, Iwasaki, H, Nakano, E, Harris, CM, Wada, Y und Kawato, M (2004). „Optimale Impedanzkontrolle zur Aufgabenerfüllung bei signalabhängigem Rauschen." *J. Neurophysiol.* 92, 1199.
- Panerai, F, Metta, G und Sandini, G (2003). „Lernen visueller Stabilisierungsreflexe bei Robotern mit beweglichen Augen." *Neurocomputing* 48, 16.
- Parker, LE, Schneider, FE und Schultz, AC (2005). „Multirobotersysteme: Von Schwärmen zu intelligenten Automaten." Bd. III, Proceedings from the 2005 International Workshop on Multi-Robot Systems, Springer, Dordrecht.
- Peters, J, Mistry, M, Udawadia, FE, Cory, R, Nakanishi, J und Schaal, S (2005a). „Ein vereinheitlichender Rahmen für die Steuerung von Robotersystemen." Internationale IEEE-Konferenz über intelligente Roboter und Systeme (IROS 2005), Edmonton, Alberta, Kanada, 2.–6. August 1824–1831.
- Peters, J, Mistry, M, Udawadia, FE und Schaal, S (2005b). „Eine neue Methodik für das Design von Robotersteuerungen." Fünfte internationale ASME-Konferenz über Mehrkörpersysteme, nichtlineare Dynamik und Steuerung (MSNDC 2005), Long Beach, CA, 24.–28. September.
- Peters, J. und Schaal, S. (2006). „Lernen der operativen Raumkontrolle." In *Robotics: Science and Systems (RSS 2006)*, Burgard, W, Sukhatme, GS, und Schaal, S, (Hrsg.), MIT Press, Cambridge, MA.
- Peters, J, Vijayakumar, S und Schaal, S (2003a). „Verstärkendes Lernen für humanoide Robotik." *Humanoids 2003, Dritte internationale IEEE-RAS-Konferenz über humanoide Roboter*, Karlsruhe, Deutschland, 29.–30. September.
- Peters, J, Vijayakumar, S und Schaal, S (2003b). „Skalierung von Reinforcement-Learning-Paradigmen für motorisches Lernen." Vorträge des 10. Joint Symposium on Neural Computation (JSNC 2003), Irvine, CA, Mai.
- Peters, J, Vijayakumar, S und Schaal, S (2005c). „Natürlicher Schauspieler-Kritiker." Gama, J, Camacho, R, Brazdil, P, Jorge, A und Torgo, L (Hrsg.), Proceedings of the 16th European Conference on Machine Learning (ECML 2005), Band 3720, Springer, Porto, Portugal, 3. Oktober –7, S. 280–291.
- Piaget, J (1951). Spiel, Träume und Nachahmung in der Kindheit, Norton, New York.
- Righetti, L und Ijspeert, A. (2006). „Entwurfsmethoden für zentrale Mustergeneratoren: Eine Anwendung auf kriechende Humanoide." *Proceedings of Robotics: Science and Systems*, MIT Press, Philadelphia.
- Rizzolatti, G und Arbib, MA (1998). „Sprache in unserer Reichweite." *Trends Neurosci.* 21, 188–194.
- Robins, B, Dautenhahn, K, Boekhorst, R und Billard, A (2005). „Roboterassistenten in der Therapie und Bildung von Kindern mit Autismus: Kann ein kleiner humanoider Roboter dabei helfen, soziale Interaktionsfähigkeiten zu fördern?" *Universeller Zugang in der Informationsgesellschaft* 4.
- Russell, SJ und Norvig, P (1995). Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Sabes, PN (2000). „Die Planung und Steuerung von Greifbewegungen." *Curr. Meinung. Neurobiol.* 10, 740–746.
- Saltzman, EL (1979). „Ebenen der sensomotorischen Repräsentation." *J. Mathe. Psychol.* 20, 91–163.
- Scassellati, B (1998). „Nachahmung und Mechanismen gemeinsamer Aufmerksamkeit: A. Entwicklungsstruktur zum Aufbau sozialer Fähigkeiten bei einem humanoiden Roboter." In *Computation for Metaphors, Analogy and Agents*, Nehaniv, C. L., S. 176–195, Springer, New York.
- Scassellati, B (2002). „Theorie des Geistes für einen humanoiden Roboter." *Auton. Rauben.* 12.
- Schaal, S (1999). „Ist Nachahmungslernen der Weg zu humanoiden Robotern?" *Trends Cogn. Wissenschaft.* 3, 233–242.

- Schaal, S (2002) „Lernende Robotersteuerung.“ In *The Handbook of Brain Theory and Neural Networks*, 2. Auflage, Arbib, M. A, MIT Press, Cambridge, MA, S. 983–987.
- Schaal, S, *Dynamische Systeme: Gehirn, Körper und Nachahmung*. In *Action to Language via the Mirror Neuron System* (im Druck).
- Schaal, S. und Atkeson, CG (1994). „Roboterlernen durch nichtparametrische Regression.“ Tagungsband der Internationalen Konferenz über intelligente Roboter und Systeme (IROS'94). München, Deutschland, S. 478–485.
- Schaal, S., Atkeson, CG und Botros, S. (1992). „Was soll gelernt werden?“ Vorträge des siebten Yale-Workshops zu adaptiven und lernenden Systemen, New Haven, CT, 20.–22. Mai, S. 199–204.
- Schaal, S., Atkeson, CG und Vijayakumar, S. (2002). „Skalierbare Techniken aus nichtparametrischer Statistik für Echtzeit-Roboterlernen.“ *Appl. Intel.* 17, 49–60.
- Schaal, S., Ijspeert, A. und Billard, A. (2003). „Computergestützte Ansätze zum motorischen Lernen durch Nachahmung.“ *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B* 358, 537–547.
- Schaal, S., Peters, J., Nakanishi, J. und Ijspeert, A. (2004). „Bewegungsprimitive lernen.“ Internationales Symposium zur Robotikforschung (ISRR2003), Springer, Cienza, Italien.
- Schaal, S. und Schweighofer, N. (2005). „Computergestützte Motorsteuerung bei Menschen und Robotern.“ *Curr. Meinung. Neurobiol.* 15, 675–682.
- Schmidt, RA (1988). „Motorische Kontrolle und Lernen.“ *Human Kinetics*, Champaign, IL.
- Scholz, JP und Schoner, G (1999). „Das Konzept der unkontrollierten Mannigfaltigkeit: Identifizieren von Steuervariablen für eine funktionale Aufgabe.“ *Exp. Gehirn Res.* 126, 289–306.
- Schweighofer, N. und Doya, K. (2003). „Meta-Lernen zur Verstärkung Lernen.“ *Neuronale Netze* 16, 5–9.
- Schweighofer, N., Doya, K. und Kuroda, S. (2004). „Aminerge Neuromodulation des Kleinhirns: Auf dem Weg zu einem funktionellen Verständnis.“ *Gehirn Res. Rev.* (im Druck).
- Sciavicco, L. und Siciliano, B. (1996). *Modellierung und Steuerung von Roboterarmen*, MacGraw-Hill, New York.
- Sciavicco, L. und Siciliano, B. (2000). *Modellierung und Steuerung von Roboterarmen*, Springer, London.
- Sentis, L. und Khatib, O. (2004). „Aufgabenorientierte Steuerung humanoider Roboter durch Priorisierung.“ Internationale IEEE-RAS/RSJ-Konferenz über humanoide Roboter, Santa Monica, Kalifornien, 10.–12. November.
- Shadmehr, R und Wise, SP (2005). „Die computergestützte Neurobiologie des Greifens und Zeigens: Eine Grundlage für motorisches Lernen.“ MIT Press, Cambridge, Mass.
- Shibata, T., Vijayakumar, S., Conradt, J. und Schaal, S. (2001). „Biomimetische okulomotorische Kontrolle.“ *Adaptives Verhalten* 9, 189–207.
- Slotine, JJ. E und Li, W (1991). *Angewandte nichtlineare Steuerung*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Strogatz, SH (1994). „Nichtlineare Dynamik und Chaos: Mit Anwendungen in der Physik, Biologie, Chemie und Technik.“ Addison-Wesley, Reading, MA.
- Sutton, RS und Barto, AG (1998). *Verstärkungslernen. Eine Einleitung*. MIT Press, Cambridge.
- Taub, E und Wolf, SL (1997). „Zwangsinduzierte Techniken zur Erleichterung der Nutzung der oberen Extremitäten bei Schlaganfallpatienten.“ *Themen der Schlaganfallrehabilitation* 3, 38–61.
- Todorov, E (2005). „Stochastische optimale Steuerungs- und Schätzmethoden angepasst an die Rauscheigenschaften des sensomotorischen Systems.“ *Neuronale Berechnung.* 17, 1084–1108.
- Todorov, E und Jordan, MI (2002). „Optimale Feedback-Kontrolle als Theorie der motorischen Koordination.“ *Nat. Neurosci.* 5, 1226–1235.
- Tomasello, M., Savage-Rumbaugh, S. und Kruger, AC (1993). „Nachahmendes Erlernen von Handlungen an Objekten durch Kinder, Schimpansen und kultivierte Schimpansen.“ *Chim. Oggi* 64, 1688–1705.
- van der Lee, JH, Wagenaar, RC, Lankhorst, GJ, Vogelaar, TW, Deville, WL und Bouter, LM (1999). „Zwangsgebrauch der oberen Extremität bei Patienten mit chronischem Schlaganfall: Ergebnisse einer einfach verblindeten, randomisierten klinischen Studie.“ *Strich* 30, 2369–2375.
- van Essen, DC, und Maunsell, JM. R (1983). „Hierarchische Organisation und Funktionsströme im visuellen Kortex.“ *Trends Neurosci.* 6, 370–375.
- Vijayakumar, S., Conradt, J., Shibata, T. und Schaal, S. (2001). „Offene visuelle Aufmerksamkeit für einen humanoiden Roboter.“ Internationale IEEE-Konferenz über intelligente Roboter und Systeme (IROS 2001).
- Vijayakumar, S., D'Souza, A. und Schaal, S. (2005). „Inkrementelles Online-Lernen in hohen Dimensionen.“ *Neuronale Berechnung.* 17, 1–33.
- Vijayakumar, S. und Schaal, S. (2000). „Echtzeitlernen bei Humanoiden: Eine Herausforderung für die Skalierbarkeit von Online-Algorithmen.“ *Humanoids 2000*, erste internationale IEEE-RAS-Konferenz über humanoide Roboter. CD-Proceedings, Cambridge, MA.
- Viviani, P., Baud-Bovy, G. und Redolfi, M. (1997). „Kinästhetische Reize wahrnehmen und verfolgen: Weitere Beweise für motorische Wahrnehmungsinteraktionen.“ *J. Exp. Psychol. Summen. Wahrnehmung. Ausführen.* 23, 1232–1252.
- Viviani, P. und Schneider, R. (1991). „Eine Entwicklungsstudie über die Beziehung zwischen Geometrie und Kinematik bei Zeichenbewegungen.“ *J. Exp. Psychol. Summen. Wahrnehmung. Ausführen.* 17, 198–218.
- Wada, Y und Kawato, M (1995). „Eine auf dem Minimierungsprinzip basierende Theorie für die kursive Handschrift.“ *Biol. Cybern.* 73, 3–13.
- Wiener, N (1948). *Kybernetik*, Wiley, New York.
- Wolf, SL und Blanton, S (1999). „Eine Anwendung der durch Zwänge der oberen Extremitäten induzierten Bewegungstherapie bei einem Patienten mit subakutem Schlaganfall.“ *Physik. Dort.* 79, 847–953.
- Wolpert, DM, Doya, K und Kawato, M (2003). „Ein vereinheitlichendes Rechengestütztes für motorische Kontrolle und soziale Interaktion.“ *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B* 358, 593–602.
- Wolpert, DM, Doya, K und Kawato, M (eingereicht) „Eine vereinende Rechenrahmen für motorische Kontrolle und soziale Interaktion.“ *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. B.*
- Wolpert, DM und Kawato, M (1998). „Mehrere gepaarte Vorwärts- und Rückwärtsmodelle zur Motorsteuerung.“ *Neuronale Netze* 11, 1317–1329.
- Zinn, M, Khatib, O, Roth, B und Salisbury, JK (2004). „Auf Nummer sicher gehen [menschenfreundliche Roboter].“ *Roboter. Autom. Mag.* 11, 12–21.