



Hans-Arthur Marsiske

# Mach's wie ein Mensch

## Humanoide Roboter auf dem Weg zur komplexen Einheit

Roboter, die nicht nur aussehen wie Menschen, sondern auch so agieren, sind der heilige Gral der Robotik. Die Forschung nähert sich diesem Ziel aus zwei Richtungen: Sie konzentriert sich entweder auf die Beine und das Laufen – oder auf den Oberkörper und dessen Fähigkeit zur Aktion und Interaktion mit Menschen. Humanoide Plattformen, die beides perfekt können, sind nur noch eine Frage der Zeit.

Zwei Beine, zwei Arme, ein Kopf und ein Rumpf – wenn in Science-Fiction-Erzählungen intelligente Maschinen eine Rolle spielten, hatten sie fast immer eine solche Gestalt. Das gilt für

die Akteure in Karel Capeks Bühnenstück „Rossum's Universal Robots“ von 1921, dem wir überhaupt erst die Bezeichnung „Roboter“ verdanken, ebenso wie für Fritz Langs Stummfilmklassiker

„Metropolis“, die berühmten Geschichten von Isaac Asimow oder Commander Data an Bord der „USS Enterprise“. Roboter mussten menschenähnlich sein.

Auch die Verfasser des Kapitels „Humanoid Robots“ im „Springer Handbook of Robotics“ [1] reihen das Vorhaben, maschinelle Ebenbilder von uns zu schaffen, in die uralte Tradition der Beschäftigung des Menschen mit sich selbst ein. Der Bau menschenähnlicher Roboter sei so etwas wie die „Grand Challenge“ der Robotik, motiviert nicht nur vom

Bedürfnis nach Selbsterkenntnis, sondern auch von der Idee, dass solche Roboter am besten an die menschliche Lebensumgebung angepasst wären.

Steht die Bewältigung dieser „großen Herausforderung“ jetzt unmittelbar bevor? Die moderne Entwicklung jedenfalls begann im Jahr 1973 mit dem an der japanischen Waseda University gebauten WABOT-1. Sein Körperbau war mit zwei Beinen und zwei Armen dem Menschen nachempfunden und er vereinte erstmals Fähigkeiten der Wahr-

nehmung, Fortbewegung und Manipulation in sich. Ein weiterer Meilenstein wurde erreicht, als die Firma Honda nach zehnjähriger geheimer Entwicklungsarbeit im Jahr 1996 mit dem P-2 den ersten humanoiden Roboter mit menschlichen Maßen vorstellte. Er konnte auf zwei Beinen laufen und verfügte über eigene Energieversorgung und Rechenkapazität.

Inzwischen gibt es eine nicht mehr überschaubare Vielzahl humanoider Roboter in unterschiedlichen Größen – vom 31 Zentimeter messenden Robo-nova bis zum über zwei Meter aufragenden Hajime Robot 33. Bausätze und immer billigere Komponenten haben es auch kleineren Universitäten ermöglicht, in diesem Bereich zu forschen. Neu entwickelte aufwendige Plattformen sorgen gleichwohl immer wieder für Schlagzeilen und sind ein beliebtes Fotomotiv bei der Eröffnung von Industrie- und Technologiemesen. In der Regel wird dann stolz aufgelistet, was diese Roboter schon alles können.

Bei genauerem Hinsehen stellt sich das Projekt „Humanoide Roboter“ aber eher als ein gigantisches Puzzle dar, von dem viele, vielleicht sogar die meisten Teile noch fehlen: Zwischen Kopf und Füßen gibt es für Forscher viel zu tun.

## Das Ende der Plattfüße

Von fundamentaler Bedeutung sind nach wie vor die Beine. Denn den aufrechten Gang beherrschen Roboter bisher nur unter besonderen Bedingungen. Wenn ein Roboter wie der P-2-

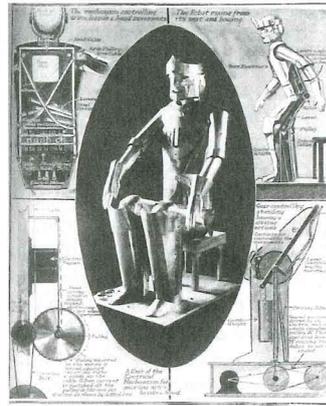
Nachfolger Asimo über eine Bühne läuft und dabei vielleicht sogar eine Treppe hochsteigt, braucht er dafür möglichst flachen Untergrund, und die Höhe der Treppenstufen muss zuvor genau ermittelt werden. Auch wirkt die Gangart nicht sonderlich natürlich: Die Knie sind stets gebeugt, die Füße rollt Hondas Sprössling nicht ab, sondern setzt sie flach auf den Boden.

Humanoide Roboter laufen heute noch fast ausschließlich auf Plattfüßen, denn dadurch lässt sich die Druckverteilung in der Fußsohle besser messen. Die genaue Bestimmung des Center of Pressure (CoP) wiederum ist wichtig, um dessen Abweichung vom angestrebten Zero Moment Point (ZMP) zu bestimmen, dem Punkt, an dem alle Drehmomente im Körper des Roboters einander aufheben. Idealerweise sollen CoP und ZMP übereinstimmen. Je stärker sie voneinander abweichen, desto instabiler ist der Roboter.

Das vor 40 Jahren von dem Serben Miomir Vukobratovic vorgestellte ZMP-Konzept ist derzeit immer noch das gängigste Verfahren, um zweibeinige Roboter zu stabilisieren. Es erfordert aber die genaue Kenntnis der Massenverteilung im Roboter und aller Gelenkstellungen. Diese extrem kontrollierte Art der Fortbewegung ist sich in jedem Moment aller „Muskeln“ und Glieder bewusst. Doch weder ein Mensch noch ein Tier läuft so.

Ein Weg, das Laufverhalten humanoider Roboter dem menschlichen Vorbild näherzubringen, geht über die differenziertere Gestaltung der Füße. Simulationen zeigten bereits im Jahr 2006, dass der von Kawada Industries gemeinsam mit dem japanischen Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) entwickelte Roboter HRP anderthalbmal schneller laufen könnte, wenn seine Füße mit einem passiven Gelenk ausgestattet wären, das die Funktion der Zehen übernimmt. Ramzi Sellaouiti und sein Forschungsteam stützten ihre Studie auf biomechanische Untersuchun-

**Wäre Hondas Asimo ein Mensch, hätte er wegen seiner unnatürlichen Gangart wohl mit erheblichen Kniebeschwerden zu kämpfen.**



gen, die zeigten, dass der Druckpunkt während der Single-Support-Phase (nur ein Fuß berührt den Boden) von der Ferse zu den Zehen wandert.

Bewegungsstudien inspirierten auch Katsu Yamane und Laura Trutoiu von der Carnegie Mellon University in Pittsburgh. Auf der „9. International Conference on Humanoid Robots“ in Paris stellten sie im vergangenen Dezember ihre Untersuchungen zum Effekt abgerundeter Füße vor. Aus einer Datenbank mit Bewegungsaufzeichnungen wählten sie drei Gangarten mit verschiedenen Geschwindigkeiten, Schrittlängen und Schrittfrequenzen und testeten anhand numerischer Modelle, wie gut sich diese Gangarten mit unterschiedlich gestalteten Füßen von Robotern realisieren lassen. Mit vorne und hinten abgerundeten Füßen war das durchweg einfacher, insbesondere bei schnelleren Gangarten. Zugleich reduzierte diese Fußform den Kraftaufwand im Fußgelenk.

## Raus aus dem Laufstall

Mit zweiteiligen Füßen, die vorne und hinten mit jeweils zwei Kraftsensoren ausgestattet sind, arbeiten auch David J. Braun und sein Forschungsteam von der Vanderbilt University in Nashville. Ihr Roboter, mit dem sie dynamischere Gangarten erproben, hat zudem rückfahrbare Aktuatoren, die die Kräfte, die beim Auftreffen der Füße auf dem Boden wirken, besser abfangen und nutzen können. Bei den üblicherweise zur Steuerung der Gelenke verwendeten Rotationsmotoren und Getrieben ist das nur schwer realisierbar.

Ohne elastische Gliedmaßen dürfte es jedoch kaum möglich sein, humanoiden Robotern den Übergang vom Gehen zum Lau-

**In Karel Capeks Drama „Rossumovi Univerz-Ini Roboti“ (RUR) gehen humanoide Roboter ihrem Schöpfer zunächst zur Hand – und vernichten später die Menschheit.**

fen und Rennen zu ermöglichen. José-Luis Peralta und seine Mitarbeiter an der Helsinki University of Technology experimentieren daher mit Linearmotoren, wie sie etwa dem Antrieb einer Magnetschwebbahn zugrunde liegen. Ihr Roboter, der derzeit noch in der Entwicklungsphase ist, soll zudem zusätzlich mit Federn und Dämpfern ausgestattet werden, die die Energie auch mechanisch speichern können.

Am Laulabor in Jena ist in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Darmstadt vor wenigen Wochen der Unterkörper des Roboters BioBiPed entstanden, bei dem die Motoren nicht in den Gelenken stecken, sondern über Seilzüge die Gliedmaßen bewegen. Ziel dieses Projekts sei es, den Roboter rennen



**Der Riese unter den humanoiden Robotern: Mit einer Länge von 2,10 Metern topppt Hajime 33 die Durchschnittsgröße der Spieler der US-Profibasketball-Liga NBA um 9 Zentimeter.**



Bild: Honda Research

Bild: Hajime Research Institute

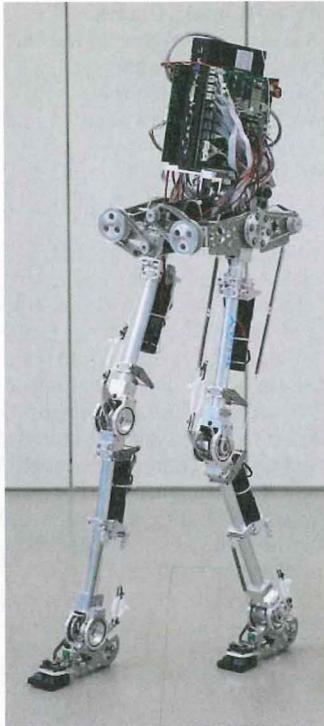


Bild: A. Karguth/TETRA GmbH

**Roboter ohne Oberleib: Der BioBiPed der TU Darmstadt soll zunächst das Rennen und dann erst das Gehen lernen.**

zu lassen und von dort aus den Übergang zum Gehen zu realisieren, verdeutlicht Katayon Radkhah von der TU Darmstadt. Die Informatikerin möchte dabei unter anderem klären, ob die verschiedenen Fortbewegungsarten über ein einheitliches Kontrollverfahren gesteuert werden können oder ob ein Wechsel zwischen verschiedenen Controllern erforderlich ist.

Es bleibt abzuwarten, ob sich BioBiPed schneller und eleganter bewegen wird als Petman, eine von der Firma Boston Dynamics im Auftrag der US Army entwickelte Laufmaschine. Sie arbeitet mit hydraulischen Aktuatoren, rollt die Füße ab und geht sehr natürlich und stabil. In einem Video erreicht der Prototyp Geschwindigkeiten bis 7 km/h und kann seitliche Stöße ausgleichen. Der Roboter soll dazu dienen, Schutzkleidung gegen chemische Kampfstoffe zu testen, und wird dafür eine menschliche Gestalt bekommen. Im Jahr 2011 soll er einsatzbereit sein.

**Tanz den Robo**

Bei der Entwicklung des Laufverhaltens von Robotern wie auch anderer Bewegungsabläufe kom-

men häufig Motion-Capture-Verfahren zum Einsatz, mit denen sich menschliche Bewegungsabläufe „abgucken“ lassen. Personen, deren Körper an den Gelenken hell reflektierende Marker tragen, werden dazu gleichzeitig aus mehreren Blickwinkeln gefilmt. Die so gewonnenen Daten geben im Wesentlichen zeitliche Veränderungen der einzelnen Gelenkwinkel wieder. Diese können jedoch nicht ohne Weiteres auf einen anderen Körper mit unterschiedlicher Massenverteilung und Kinematik übertragen werden.

Das betrifft nicht nur den Vergleich zwischen Mensch und Roboter, sondern auch den von Robotern untereinander. Robert Eilenberg und sein Forschungsteam an der Drexel University, Philadelphia, etwa wollen humanoiden Robotern das Tanzen beibringen und sie autonom auf Musik reagieren lassen. Die Forscher glauben, auf diese Weise Kreativität und Intelligenz messbar machen zu können. Ein Problem dabei ist jedoch, dass sie mit dem vom KAIST-Labor in Südkorea erworbenen Roboter Jaemi Hubo sehr vorsichtig umgehen müssen, um Schäden an dem teuren Gerät zu vermeiden. Daher erschien es ihnen zweckmäßig, zunächst mit einem kleinen Roboter zu arbeiten, dem Robonova-1, und die hierbei gewonnenen Erkenntnisse dann auf den größeren Roboter zu übertragen.

Natürlich haben beide Roboter völlig unterschiedliche Kinematiken und unterscheiden sich auch hinsichtlich anderer Parameter wie Gliedergröße, Kraft der Aktuatoren oder Materialfestigkeit. Das muss sich auf die Algorithmen in einer höheren kognitiven Ebene aber nicht unbedingt auswirken. Schließlich geht es um die generellen Cha-

rakteristiken von Bewegung. Tanz sei „eine komplexe, aber formalisierte Sprache, für die es klare Regeln und sogar eine Notation“ gebe, erklären die Forscher. Neben Motion Capture nutzen sie dabei auch die von Rudolf von Laban entwickelte Labanotation, mit der alle Bewegungen des menschlichen Körpers aufgezeichnet werden können. Für den Robonova waren Änderungen in der Systemsoftware erforderlich, weil die Verarbeitung von Gestikkommandos mit 2 bis 5 Hertz ansonsten zu langsam gewesen wäre. Der grundsätzliche Ansatz, den kleinen Roboter als Testplattform zu verwenden, hat sich aber bislang bewährt.

**Knackpunkte**

Auf wieder andere Weise nutzen Kunihiro Ogata und Yasuo Kuniyoshi von der University of Tokyo das Motion-Capture-Verfahren. Sie wollten genau wissen, wie es menschlichen Pflegekräften gelingt, behinderten Menschen aus dem Bett in den Rollstuhl zu helfen, und zeichneten die Bewegungen von mehreren Pflegern auf. Die beiden Wissenschaftler gingen davon aus, dass es dabei weniger auf Kraft als auf die geschickte Körperbewegung ankommt. Ihre Absicht war es, die „Knackpunkte“ des Bewegungsablaufs zu identifizieren, die über Erfolg oder Scheitern entscheiden.

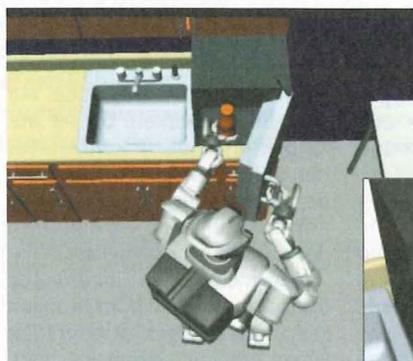
Bei der Modellierung des Bewegungsablaufs stützten sich die Forscher auf das von Sung-Hee Lee und Ambarish Goswami vorgeschlagene Konzept des „Reaction Mass Pendulum“: Die Masse eines Roboters wird dabei als Ellipsoid dargestellt, dessen Schwerpunkt durch eine gerade Linie mit dem Zentrum des Drucks am Boden verbunden

wird. Ogata und Kuniyoshi erweiterten das Prinzip zu einem integrierten Zwei-Körper-Pendelmodell, in dem sowohl die Massenschwerpunkte von Träger und Getragenen als auch der gemeinsame Schwerpunkt von beiden markiert sind. Damit konnten sie drei unterschiedliche Strategien identifizieren, wie die Trägheitskräfte von Pfleger und Patient im Ablauf der Bewegungsfolge genutzt werden können. Ihr Modell wollen die Forscher nun auf weitere Bewegungsabläufe anwenden, etwa das Hucklepack-Tragen eines Menschen oder das Aufrichten des Patienten aus einer liegenden in eine sitzende Position.

Bis aus solchen Modellrechnungen Roboter hervorgehen, denen man tatsächlich pflegebedürftige Menschen anvertrauen kann, werden aber wohl noch mindestens zehn Jahre vergehen. Bislang jedenfalls erfolgt die Entwicklung von Unter- und Oberkörper humanoider Roboter noch weitgehend getrennt voneinander. Das zeigt sich besonders anschaulich bei den Roboterturnieren im Rahmen der RoboCup-Meisterschaften. Das Laufen von humanoiden Robotern wird auf den Fußballfeldern erprobt, wo die Arme lediglich zur Sicherung des Gleichgewichts und zum Aufstehen nach Stürzen eingesetzt werden. Am Wettbewerb RoboCup@home dagegen, bei dem anspruchsvolle Manipulationsleistungen der Arme und eine möglichst intuitive Interaktion mit Menschen gefragt sind, beteiligen sich fast ausschließlich Roboter ohne Beine. Denn der gezielte Einsatz der Arme ist auch so schon anspruchsvoll genug.

**Kühlschranktüren**

Ein Roboter etwa, der den Auftrag bekäme, schon mal den Sektor für die Siegesfeier beim RoboCup kalt zu stellen, müsste nicht nur das Kommando verstehen und den Kühlschrank finden. Auch der vermeintlich einfache Akt, die Kühlschranktür zu öffnen, kann ein unüberwindliches Hindernis darstellen. Mit konventionellen Roboterarmen, wie sie in großen Werkshallen Automobile montieren, geht es jedenfalls nicht. Die Kraftpakete sind darauf ausgelegt, mit großer Ausdauer und Präzision ständig die gleiche Bewegung zu wiederholen. Dafür wird die Bewegung jedes



**Klappt zumindest schon in der Simulation: Ein HRP-2 öffnet den Kühlschrank und stellt eine Flasche Sekt kalt.**

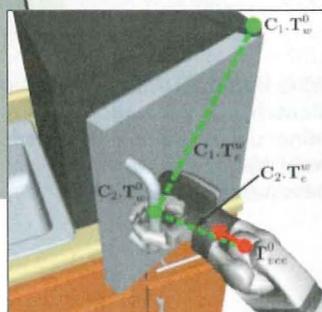


Bild: CMU

## „Beim Menschen reichen aber zwei Beine aus ...“

**Jacky Baltes, University of Manitoba, über seine Erfahrungen als Wettbewerbsleiter der Humanoids League beim RoboCup**

*c't: Herr Baltes, seit 2002 gibt es beim RoboCup Wettbewerbe für humanoide Roboter. Sie waren als Teilnehmer von Anfang an dabei und organisieren die Liga seit 2003. Was hat sich in dieser Zeit getan?*

**Jacky Baltes:** Unglaublich viel. Beim RoboCup gab es am Anfang nur drei Teams: mein eigenes, eins aus Japan, eins aus Singapur. Jetzt haben wir 24. Beim Wettbewerb der Fira, den ich ebenfalls organisiere, ist es ähnlich. Ein Grund dafür sind die gesunkenen Kosten für Servomotoren. Dadurch wurde es auch für Universitäten mit geringeren finanziellen Mitteln möglich, humanoide Roboter zu bauen.

*c't: Was hat Sie dazu gebracht, sich mit humanoiden Robotern zu beschäftigen?*

**Baltes:** Es ist ein ziemlich schwieriges Gebiet und bietet ungeheuer viele Möglichkeiten zum Lernen. Außerdem sind humanoide Roboter schon seit Generationen das Idealbild eines Roboters. Wir stellen uns Roboter zumeist nicht als fliegende oder rollende Kisten vor, sondern als Spiegelbild des Menschen. Es gibt auch ganz praktische Gründe: Wenn wir Roboter bauen wollen, die Menschen helfen können, dann müssen die sich in unserer Lebensumgebung bewegen können, die durch unsere Körperform geprägt ist. Dieser Körper ist zu dem ungeheuer flexibel.

*c't: Zugleich ist die Entwicklung humanoider Roboter aber ungeheuer aufwendig. Wird es am Ende nicht ökonomischer sein, viele verschiedene Roboter für Spezialaufgaben zu haben statt die eine Universalmaschine, die alles kann?*

**Baltes:** Natürlich müssen die Komponenten noch billiger und besser werden. Aber wenn das so weit ist, werden die Leute sicherlich lieber einen vielseitigen

Roboter einsetzen als 20 spezialisierte. Früher gab es ja auch eine Vielzahl von elektronischen Rechnern für jeweils spezielle Aufgabenstellungen. Heute haben wir programmierbare Computer, die beliebige Algorithmen verarbeiten können.

*c't: Welchen Vorteil hat es, auf zwei Beinen zu laufen? Beim Menschen hat sich diese Gangart evolutionär entwickelt. Aber beim Bau von Robotern könnten wir doch frei wählen und etwa Vierbeiner mit sechs Armen konstruieren.*

**Baltes:** Es mag durchaus sein, dass sich Serviceroboter in diese Richtung entwickeln. Beim Menschen reichen aber zwei Beine aus, um sich stabil, effizient und sehr vielseitig zu bewegen. Wenn wir einmal verstanden haben, wie das funktioniert, und entsprechende Roboter bauen können, dann sind vierbeinige Roboter vielleicht schlichtweg zu teuer. Im Moment sind wir davon aber noch weit entfernt. Auch die großen Vorzeigeprojekte wie Asimo oder Hubo versagen, sobald sie über einen einfachen Kiesweg laufen sollen.

*c't: Bei der letzten „Humanoids“-Konferenz beschäftigten sich die meisten Beiträge mit dem Thema Manipulation, während beim RoboCup weiterhin das Laufen im Vordergrund steht. Hat sich der RoboCup von der wissenschaftlichen Diskussion abgekoppelt?*

**Baltes:** Manipulation ist einfacher zu verstehen als Laufen. Und die Konferenzbeiträge, die sich mit Laufen beschäftigen, stützen sich sehr oft auf Simulationen. Da mag dann alles wunderbar funktionieren, aber ob wir jemals die Sensoren haben werden, die erforderlich sind, um die dafür erforderlichen Daten zu messen, weiß keiner.

*c't: Hat das Übergewicht der Manipulation vielleicht auch damit zu tun, dass die Industrierobotik mobiler werden möchte?*

**Baltes:** Das spielt insbesondere in Deutschland eine Rolle, wo die industrielle Automatisierung und der Maschinenbau traditionell sehr stark sind. In Asien sind es dagegen meistens Elektroingenieure, die sich für humanoide Roboter interessieren, in den USA Informatiker.



Ein vertrautes Bild beim RoboCup: Jacky Baltes pfeift ein Spiel der Humanoid League, hier in der Teen Size bei der Weltmeisterschaft 2010. Im Vordergrund ein Roboter des japanischen Teams CIT Brains.

*c't: Die bisher realisierten humanoiden Roboter sind durchweg Forschungsplattformen. Welche Lebenserwartung haben sie? Wie lange lässt sich sinnvoll damit forschen?*

**Baltes:** Mit den Robotern, die wir in unserem Labor selbst bauen, arbeiten wir drei bis fünf Jahre. Danach sind sie dann auch nicht völlig nutzlos, sondern können noch für spezielle Fragestellungen, etwa für Lokalisierung und Navigation oder auch bei öffentlichen Präsentationen eingesetzt werden. Bei den großen Plattformen wie Asimo, HRP oder Hubo dürften die Zyklen, in denen neue Versionen entwickelt werden, in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

*c't: Der menschliche Körper ist symmetrisch aufgebaut, funktional sind wir aber nicht symmetrisch. Zumeist gibt es eine bevorzugte Körperhälfte. Ist das auch bei Robotern sinnvoll?*

**Baltes:** Es wird nicht unbedingt angestrebt, aber es ergibt sich. Einige unserer Fußballroboter können mit einem Bein besser kicken als mit dem anderen. Wir wissen nicht immer genau warum, stellen uns dann aber mit der Programmierung darauf ein. Interessant wäre es, den Roboter das selbst lernen zu lassen, sodass er sein Lauf- und Kickverhalten auf die Möglichkeiten seiner Hardware abstimmt.

*c't: Wo sehen Sie derzeit die größten Herausforderungen in der humanoiden Robotik?*

**Baltes:** Wir brauchen bessere Sensoren, um stabiles Laufen auch auf unebenem Untergrund zu realisieren. Derzeit haben die Roboter Beschleunigungssensoren und Gyroskope im Torso und Kraftsensoren in den Füßen. Auf unebenem Gelände haben diese Sensoren aber nicht immer Kontakt mit dem Boden. Das muss sich noch deutlich verfeinern.

*c't: Wann rechnen Sie damit, einen humanoiden Roboter als Hilfe im Haushalt einsetzen zu können?*

**Baltes:** In zwanzig Jahren.

Gelenks genau kontrolliert, Wiederholgenauigkeit ist ein entscheidendes Kriterium.

Beim Öffnen einer Tür ist jedoch Nachgiebigkeit gefragt. Es ist nicht damit getan, dass der Arm einfach nur an der Tür zieht. Denn jetzt übernimmt die Tür beziehungsweise der Griff das Kommando und zwingt den Roboterarm auf eine Kreisbahn. Die ließe sich zwar im Voraus programmieren, sodass die Gelenke des Roboterarms entsprechend angesteuert werden könnten. Doch dann müsste der Roboter von jeder Tür, jeder Schublade und jedem Gegenstand, mit dem er hantieren soll, vorab ein Modell haben. Für den Einsatz in einem Haushalt, in dem sich ständig

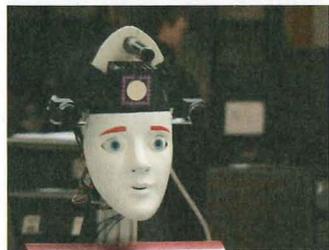


Bild: H.-A. Marsiske

**„Gestatten, mein Name ist Dynamaid, ich komme aus Bonn. Leider habe ich Sie nicht richtig verstanden. Würden Sie Ihre Anweisung deshalb bitte noch einmal wiederholen?“**

etwas ändern kann, ist das nicht praktikabel. Da sind flexible Roboter gefragt, die sich wie Menschen problemlos auch auf neue Objekte mit unbekanntem Bewegungseigenschaften einstellen können. In der Simulation ist das Kaltstellen des Sekts immerhin schon gelungen. Ein von Dmitry Berenson an der Carnegie Mellon University geleitetes amerikanisch-japanisches Forschungsteam demonstrierte damit die Brauchbarkeit ihres Konzepts der „Task Space Region Chains“.

Während bei einem industriellen Roboterarm die angestrebte Position der Armspitze üblicherweise als Punkt definiert wird, gibt es bei vielen praktischen Aufgaben wie dem Bewegen einer Kiste oder eben dem Öffnen einer Tür durch einen humanoiden Roboter eine Vielzahl von möglichen Endpositionen. Zugleich müssen bei der Planung der Bewegungen aber auch Einschränkungen berücksichtigt werden: Die Hände müssen stets an den Seiten der gegriffenen Kiste blei-

ben oder sie müssen der Bahn der Tür folgen und zugleich um den Griff herum rotieren. Diese Einschränkungen und Variationsmöglichkeiten werden in den „Task Space Regions“ erfasst.

Komplexe Bewegungen entstehen aus der Verknüpfung solcher „Task Space Regions“. Damit der Roboter die Flasche in den Kühlschrank stellen konnte, mussten die Forscher vier Einzelregionen definieren: eine für das linke Bein und dessen mögliche Standorte, eine für den rechten Arm, der die Tür öffnet, und zwei für den linken Arm. Letztere beschreiben während des Türöffnens die sichere, aufrechte Haltung der Flasche und definieren danach mögliche Positionen der Flasche im Kühlschrank.

Während von dem KühlschrankszENARIO vorerst nur eine Simulation veröffentlicht wurde, haben die Forscher einen realen HRP-2 zwei Kartons heben und stapeln lassen. Der Videofilm ist im Internet abrufbar [2]. Trotz dreifachem Zeitraffer wirken die Bewegungen zwar immer noch langsam, gleichwohl ist die sichere Planung der komplexen Bewegungsabläufe, bei denen der gesamte Körper zum Einsatz kommt, beeindruckend. Sowohl bei der Simulation als auch beim realen Roboter ist hingegen nicht ganz klar, wie genau die Eigenschaften der manipulierten Objekte vorab bekannt waren.

### Gleichgewicht und Dynamik

Ausdrücklich um die Manipulation von unbekanntem Objekten wie Türen oder Schublade geht es dagegen bei einer Studie von Advait Jain und Charles C. Kemp am Georgia Institute of Technology. Die beiden Forscher stützen sich auf die aus der Biomechanik stammende „Equilibrium Point“-Hypothese. Der Equilibrium Point beschreibt die Position eines Gliedes, auf das keine anderen Kräfte als die Schwerkraft wirken. Die Bewegungen von Gliedmaßen lassen sich dann als Anpassung des Equilibrium Point im Verlauf der Bewegung beschreiben. Ob dieses Prinzip tatsächlich der motorischen Kontrolle beim Menschen zugrunde liegt, ist umstritten. Für Jain und Kemp ist es gleichwohl ein viel versprechender Ansatz, Roboterarme bei Manipulationsaufgaben zu steuern.

Mit einem zweiarmigen Roboter testeten sie zwei verschiedene Kontrollverfahren an mehreren Schubladen und Türen, die sich mal nach links und mal nach rechts öffnen ließen. Ein Verfahren berechnete einen linearen Pfad für den Equilibrium Point, das andere einen radialen. Letzterer erwies sich als überlegen: Bei geringerem Kraftaufwand konnte mit ihm eine weitere Öffnung der Objekte erreicht werden als mit dem linearen Controller.

Die beiden Wissenschaftler testeten die Verfahren mit einem für diesen Zweck zusammengebauten Roboter. Mehr und mehr Forschungsgruppen nutzen für ihre Studien aber auch fertig produzierte Roboter. So warten Wissenschaftler an der Universität Freiburg derzeit auf die Auslieferung eines PR2-Roboters der kalifornischen Firma Willow Garage, die insgesamt elf Exemplare des zweiarmigen Haushalts Helfers für die Forschung kostenlos zur Verfügung stellt. Unter insgesamt 78 Bewerbungen überzeugte die Freiburger Informatiker die Jury des Unternehmens mit der Idee, dem rollenden Roboter das Aufräumen nach einer Party beizubringen. Dafür muss der PR2 selbstständig erkennen, was in die Spülmaschine, den Kühlschrank oder den Mülleimer gehört. Er muss mit verschiedenen Schubladen und Türen hantieren, sicher navigieren und mit Veränderungen in seiner Arbeitsumgebung zurechtkommen. Im Verlauf der nächsten zwei Jahre soll der Roboter diesem Ziel deutlich näherkommen.

Die einzige weitere Forschungsgruppe in Deutschland, die einen PR2 gewonnen hat, ist die Intelligent Autonomous Systems Group an der Technischen Universität München. Das von Michael Beetz geleitete Team will die kognitiven Fähigkeiten



Bild: Willow Garage

**Mit ihm arbeiten künftig gleich mehrere Robotikteams: der zweiarmige PR2-Roboter von Willow Garage.**

des Roboters verbessern. Unter dem Titel CRAM (Cognitive Robot Abstract Machine) soll eine Software-Toolbox entstehen, die es dem Roboter erlaubt, zu lernen, seine Umwelt zu verstehen und auf die jeweiligen Aufgaben bezogene Entscheidungen zu treffen. Er sollte dann zum Beispiel wissen, dass es sinnvoller ist, eine Flasche weiter unten zu greifen, wenn es darum geht, den Inhalt in ein Glas einzuschenken. Dagegen sollte er sie eher am Hals greifen, wenn er sie auf dem Boden abstellt.

Nicht nur die Studenten und Wissenschaftler an der TU München werden vom PR2 profitieren. Noch bis zum 1. August können sich Forscher aus aller Welt für die „CoTeSys-ROS Fall School on Cognition-enabled Mobile Manipulation“ bewerben, die vom 1. bis 6. November mit Vorträgen und praktischen Übungen mit dem Thema vertraut machen soll. Die Teilnehmer des Herbstkurses können dabei nicht nur mit dem PR2 arbeiten, sondern auch mit anderen Robotern, etwa Tum-Rosie, einer mit zwei Leichtbauarmen, Laserscannern und Stereokameras ausgestatteten omnidirektionalen Plattform, oder iCub, dem von einem europäischen Konsortium gemeinsam entwickelten humanoiden Roboter, den die TU München ebenfalls im Rahmen eines „Open Call“ gewonnen hat.

Der iCub wurde nach dem Vorbild eines dreijährigen Kindes gestaltet. Software wie Hard-

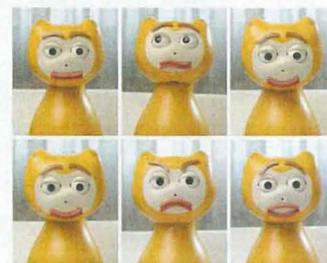


Bild: Uni Bielefeld

**iCat von der Uni Bielefeld kann verschiedene menschliche Gesichtsausdrücke imitieren.**

ware sind Open Source, Universitäten und andere Forschungseinrichtungen können sich den Roboter daher auch selbst bauen. Im Zentrum dieses Projekts steht die Erforschung der Kognition. iCub soll wie ein Kind nach und nach entdecken, wozu er fähig ist. Für die Arbeit mit ihm gibt es eigene Kurse, etwa die jährliche „iCub Summer School“, die in diesen Tagen in Sestri Levante in Italien zusammenkommt, oder Workshops im Rahmen großer wissenschaftlicher Konferenzen wie IROS.

Auch andere Hersteller sind bestrebt, ihre Roboter den Forschern nahezubringen. So profitiert die französische Firma Aldebaran Robotics sehr von den Erfahrungen der RoboCup-Teams, die den Zweibeiner Nao bei ihren Fußballturnieren einsetzen. Dafür stellt Aldebaran den Teams den Roboter zu einem Sonderpreis zur Verfügung und sorgt bei den Wettkämpfen für rasche Reparaturen von Hardware Schäden. Bisher hat sich die Zusammenarbeit bewährt: In den zwei Jahren seit seiner Einführung in den Wettbewerb ist der Roboter deutlich robuster geworden, zugleich haben die Beiträge der RoboCup-Teams sein Verhaltensspektrum erheblich erweitert.

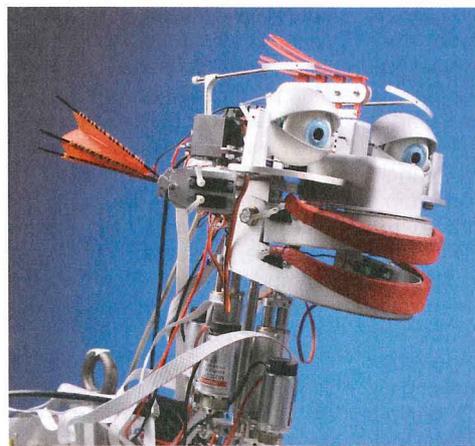
## Macht der Mimik

Bei der diesjährigen RoboCup-WM in Singapur traute sich das Team „Radical Dudes“ mit einem Nao sogar in die RoboCup@home-Arena, wo es darum geht, vielfältige Aufgaben in einer Wohnumgebung zu bewältigen. Beim Sprachverstehen und der Interaktion mit Menschen konnte der putzige Roboter durchaus punkten, hatte bei Manipulationsaufgaben aber schon wegen seiner Körpergröße keine Chance.

In dieser Disziplin brillierte der Roboter Dynamaid von der Universität Bonn, der mit einem seiner beiden zweifingrigen Greifer eine Getränkedose aus dem Regal eines echten Spielzeugladens holte. Dafür war das Zusammenspiel verschiedener Sensoren erforderlich. „Mit dem Laserscanner sucht der Roboter zunächst im vertikalen Abtastmodus nach der Kante des Regals“, erklärt Sven Behnke, Professor für Informatik und Leiter des RoboCup-Teams Nimbro. „Im ho-

izontalen Modus sucht er dann über der Kante nach dem Objekt. Der Greifer wird schließlich mit Hilfe der Stereokamera zum Objekt gesteuert, die sich nur noch auf den durch den Laserscanner eingegrenzten Bereich konzentrieren muss.“ Um die unsicheren Lichtverhältnisse zu kompensieren, verfügt Dynamaid zudem über einen starken Scheinwerfer, der die Szene beleuchtet. Den Griff selbst überwachen Infrarotsensoren, die sich im Handgelenk und in den Fingerspitzen befinden.

Beeindruckend sind auch die kommunikativen Fähigkeiten des Roboters: Nachdem er eine Spracheingabe mehrfach falsch verstanden hatte, entschuldigte er sich und bat höflich um eine weitere Wiederholung. Künftig soll Dynamaid aber nicht nur zur sprachlichen Kommunikation in der Lage sein, sondern sich auch über Mimik ausdrücken können. Dabei können die Bonner Forscher an die Arbeiten



Die Mimik des Münchner Roboterkopfs Eddie ist trotz vieler Freiheitsgrade noch weit von der Subtilität menschlicher Mimik entfernt.

Bild: Kurt Fuchs/CotEsSys

vieler anderer Wissenschaftler anknüpfen. So haben Marko Tscherepanow und seine Forschungsgruppe an der Universität Bielefeld den Roboter iCat Gesichtsausdrücke von Menschen direkt imitieren lassen – ohne den Umweg über eine emotionale Deutung der Mimik. Die stützt sich zumeist auf das von Ekman und Friesen in den 1970er-Jahren entwickelte „Facial Action Coding System“, das die wahrnehmbaren Muskelbewegungen im menschlichen Gesicht in 46 „Basic Action Units“ unterteilt. Die direkte Imitation hat den Forschern zufolge den Vorteil, auch willkürliche Gesichtsausdrücke wiedergeben zu können. Zudem ist der Rechenaufwand geringer.

In der menschlichen Kommunikation kommt die direkte Spiegelung der Mimik häufig vor, im Durchschnitt fünfmal pro Minute. Das Lächeln des Gesprächspartners regt zum eigenen Lächeln an, ebenso werden seine Sorgenfalten gespiegelt. Die Botschaft dieser Nachahmung ist: Ich weiß, wie du dich fühlst. Es ist ein Ausdruck der Anteilnahme, der auch bei der Interaktion mit einem Roboter, dem eigene Gefühle eher abgesprochen werden, als angenehm empfunden wird. Die Spiegelung erleichtert den Umgang, selbst bei einer gegenüber den menschlichen Ausdrucksmöglichkeiten deutlich eingeschränkten Mimik.

Kotaro Funakoshi und sein Team vom Honda Research Institute verzichteten bei ihrem Roboter dennoch komplett auf jegliche Mimik. Stattdessen signalisierte ein blinkendes Lämpchen dem menschlichen Gesprächspartner, dass der Roboter, der die Reservierung eines Hotelzim-

und Cog, die am Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelt wurden. Ein ähnlicher Kopf mit dem Namen Eddie steht auch an der Technischen Universität München. Anhand eines Gesichtsmodells mit 113 Markierungspunkten kann er die Emotionen menschlicher Nutzer erkennen und in seinem eigenen Gesicht spiegeln. Im Unterschied zum Bielefelder Roboter erfolgt diese Spiegelung aber nicht direkt, sondern über die vorgeschaltete Deutung des Gesichtsausdrucks. Mit 23 Freiheitsgraden im Gesicht und fünf im Nacken verfügt Eddie auch über mehr Ausdrucksmöglichkeiten als iCat.

Dennoch wirken die aufwendig gestalteten Roboterköpfe sehr künstlich. Zur grundlegenden Erforschung der nonverbalen Kommunikation mögen sie hervorragende Plattformen sein – für den alltäglichen Gebrauch scheint eine reduzierte Mimik dagegen häufig angemessener zu sein. Das beginnt damit, dass der Roboter den Blick auf seinen Gesprächspartner ausrichtet. Es hat sich auch als wichtig erwiesen, eine wie auch immer reduzierte Mimik des Roboters in Bewegung zu halten. Der Roboter Homer von der Universität Koblenz etwa zeigt auf einem Monitor ein comicitartiges Gesicht, das gelegentlich mit den Augen zwinkert und hin- und herschwankt, ähnlich wie ein Mensch, dessen Gesichtszüge auch nie völlig starr sind.

Eine auf solche Weise animierte Mimik hat allerdings den Nachteil, dass die kommunizierenden Augen nicht mit den sehenden Augen identisch sind. Kinder entdeckten diesen Schwachpunkt in Experimenten mit einem ähnlichen Roboter sehr schnell. Auf lange Sicht dürften daher auch bei humanoiden Robotern die Kameras vorzugsweise in den Augen lokalisiert werden. Ob das menschliche Gegenüber darin dann so etwas wie die Seele der Maschine erblicken kann, ist eine Frage, die wohl auch in Zukunft noch viele Philosophen und Science-Fiction-Autoren beschäftigen wird. (pmz)

## Literatur

- [1] Springer Handbook of Robotics, ISBN 978-3-540-23957-4
- [2] Video der Carnegie Mellon University, [www.cs.cmu.edu/%7Edbereno/tsrplanning.mp4](http://www.cs.cmu.edu/%7Edbereno/tsrplanning.mp4) 