

DIE EVOLUTION DER ROBOTER

Von Nesseltierchen und Plattwürmern können Forscher viel lernen: Am Artificial-Intelligence-Lab der Universität Zürich werden modulare Roboter gebaut, die auf zellbiologischen Prinzipien basieren. Von Felix Würsten

Es ist eine merkwürdige Simulation, die auf dem Computerbildschirm zu sehen ist. Aus einer kleinen blauen Zelle wachsen immer neue Zellen; nach und nach entwickelt sich der anfänglich unstrukturierte Haufen zu einem Gebilde, das die Form eines Baseballschlägers hat. Mit einem simplen Tastendruck schneidet Martin Eggenberger Hotz den Kopf des Schlägers ab. Sogleich wachsen aus dem Rumpf wieder neue Zellen zu einem Schlägerkopf heran. Die Animation eines ständig nachwachsenden Gebildes ist mehr als eine blosse Spielerei. Was Eggenberger hier vorführt, basiert auf einem Konzept, das die Entwicklung von intelligenten Robotern grundlegend verändern soll. Der Wissenschaftler am Labor für künstliche Intelligenz der Universität Zürich hat sich zusammen mit Kollegen des dänischen Maersk Instituts und der Universität Edinburgh sowie Forschern der Firma LEGO in den letzten drei Jahren intensiv mit artifiziellen Gebilden auseinander gesetzt, die auf zellbiologischen Mechanismen basieren.

Dass Eggenberger just die Simulation dieses künstlichen Organismus vorführt, ist durchaus passend. Schliesslich entstand sie im Rahmen des EU-Projekts «Hydra». Der Name erinnert nicht nur an das gleichnamige Ungeheuer in der griechischen Mythologie, dem beim Verlust eines Kopfs sofort drei neue Köpfe nachwachsen, sondern auch an die einfachen Nesseltierchen, welche sich vollständig zu regenerieren vermögen, wenn man sie auseinander schneidet. Auch Plattwürmern, so ergänzt Eggenberger, wächst binnen einer Woche ein neuer Kopf nach, wenn man sie mit dem Messer durchtrennt.

LERNFÄHIGE ROBOTER BAUEN

«Unser Ziel ist es, «modulare Roboter» zu bauen», erklärt Eggenberger, der ursprünglich Medizin studiert hat. «Dabei kopieren wir die Prinzipien

der Zellbiologie. Wir beobachten in der Natur, was es konkret braucht, damit aus einem Haufen Zellen ein funktionsfähiger Organismus entsteht.» Mit ihrem Vorhaben verfolgen die Forscher ein ambitioniertes Ziel. Sie wollen nicht nur Roboter bauen, die flexibel und lernfähig sind, sondern eben auch wie richtige Lebewesen aus einzelnen Zellen aufgebaut sind. Damit hoffen sie, die bisherigen Grenzen der Robotik zu überwinden. Das grundsätzliche Problem bei diesem Ansatz: In den biologischen Zellen spielen sich zahlreiche Prozesse ab, und die Interaktion zwischen den Zellen ist sehr komplex. Welche Prozesse sind nun wirklich entscheidend? Und welches Abstraktionsniveau ist angemessen, wenn man das auf einen künstlichen Roboter übertragen will? Diese Fragen galt es in einem ersten Schritt zu beantworten.

SIMULIERTE ZELLEILUNG

Ein wichtiger Prozess, sagt Eggenberger, ist die Zellteilung. «In der Natur werden Zellen nicht genau symmetrisch geteilt. Beispielsweise sind bestimmte Substanzen in den beiden Tochterzellen unterschiedlich verteilt. Wir haben also eine Symmetriebrechung, und diese ermöglicht erst die Zelldifferenzierung. Das ist vor allem am Anfang wichtig, wenn der Organismus zu wachsen beginnt.»

Auch die Morphogenese, also die Anordnung von Zellen zu bestimmten Formen, ist ein Prozess, der unbedingt nachgebildet werden muss. «Zellen üben mit Hilfe von modularen Verbindungen Kräfte aufeinander aus. Auf diese Weise können Organismen bestimmte Formen bilden oder ihre Position verändern.» Eggenberger hat bei seinen Untersuchungen unter anderem eine Linse imitiert. Das Signal von aussen löst in den virtuellen Zellen Prozesse aus, die die molekularen Kräfte zwischen den



Resultat der künstlichen Evolution: die schwimmen



den «Hydrons» des AI Labs der Universität Zürich.

Zellen verändern. Je nach Situation passt die künstlich Linse ihre Form entsprechend an. «Entscheidend ist, dass wir solche Verformungen mit unserem Ansatz viel einfacher und zuverlässiger nachbilden können als andere Forschergruppen», meint Eggenberger. «Wir müssen die Zellen nicht einzeln steuern, sondern können mit relativ einfachen Vorgaben eine grosse Zahl von Zellen gleichzeitig beeinflussen.» So kann man dem System beispielsweise einen räumlich variablen Gradienten vorgeben, der die Zellen zu unterschiedlichen Reaktionen anregt. Daraus resultiert dann das entsprechende Verhalten des «Organismus»: er wächst, verändert seine Form oder bewegt sich durch den Raum.

VIRTUELLES GENOM

Bei ihrer Arbeit orientieren sich die Forscher konsequent am fundamentalen Funktionsprinzip biologischer Zellen. «In der Natur läuft alles auf der molekularen Ebene ab. Nur wenn zwei passende Moleküle aufeinander treffen, werden auch die entsprechenden Reaktionsketten aktiviert.» Genau nach diesem Prinzip funktionieren auch die Modelle der Forscher. Die virtuellen Zellen reagieren nur, wenn die «Liganden» zu den entsprechenden «Rezeptoren» passen. Stimmen diese überein, werden «Gene» aktiviert, welche dann die entsprechenden Reaktionen auslösen. Bewährt sich ein bestimmter «Gensatz», dann ist der virtuelle Organismus «überlebensfähig» und kann sich weiterentwickeln. «Zuerst entwickelt sich also etwas Grobes, das mit der Zeit verfeinert wird.»

Dank diesem mehrstufigen, iterativen Vorgehen sind die modularen Roboter in der Lage, sich weiterzuentwickeln und neue Fähigkeiten zu lernen. Ausgangspunkt bildet jeweils ein Set von Parametern, das für jede Zelle definiert wird. Eggenberger nennt dieses Set – in Analogie zum natürlichen Vorbild – das Genom. Zusätzlich werden Entwicklungsprozesse definiert, die das Verhalten und die Reaktionen der Zellen festlegen. Diejenigen Sets von Parametern, mit denen die vorgegebenen Ziele am besten erreicht werden können, werden in einem dritten Schritt ausgewählt und verfeinert. «Letztlich handelt es sich um künstliche Evolution», so das Fazit von Eggenberger.

FLUGLÄRM OHNE GRENZEN

Für die einen ist der Flughafen ein Albtraum, für die anderen ein Wirtschaftsmotor. Für die Juristen ist er ein gefundenes Fressen. So viele Gesetze und Verträge greifen selten an einem einzigen Ort ineinander. Von Markus Binder

Ausserhalb der Stadt Zürich wurde nach dem Zweiten Weltkrieg ein Flughafen gebaut. In den folgenden 50 Jahren wucherte um den Flughafen die Glattalstadt. Seit zwei Jahren fliegen Flugzeuge über beide Städte hinweg und beschallen diese ordentlich mit Lärm, weil Deutschland den Anflug über den Schwarzwald nicht mehr unbeschränkt akzeptiert. Norden, Westen, Süden, Osten – alle kämpfen gegen alle. Eine verzwickte Situation, und je nach Himmelsrichtung sind die Deutschen, Bundesrat Moritz Leuenberger, die Regierungsrätinnen Rita Fuhrer und Dorothee Fierz, die Flughafenbetreiberin Unique oder die Villenbesitzer im Süden die Bösewichte. «Ein Challenge», sagt Tobias Jaag, Professor für Staats-, Verwaltungs- und Europarecht an der Universität Zürich und lächelt dabei.

Nicht dass ihm so viel Streit recht wäre. Aber die Frage reizt ihn, was denn bei so viel Kom-

plexität noch Recht ist. Deshalb hat er im Herbst 2004 als Präsident der «Stiftung juristische Weiterbildung Zürich» eine Tagung zu Rechtsfragen rund um den Flughafen organisiert; vor kurzem ist der Tagungsband erschienen. Getragen wird die Stiftung von der Rechtswissenschaftlichen Fakultät der Universität Zürich, den Zürcher Gerichten, dem Zürcher Anwaltsverband sowie dem Zürcherischen Juristenverein. Teilgenommen haben externe Experten, zumeist Rechtsanwälte, die die verschiedenen Parteien vertreten. «Ich wollte die individuellen praktischen Erfahrungen mit einer Weiterbildungsveranstaltung einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich machen und zu einem kleinen Forschungsprojekt zusammenfügen», sagt Jaag.

Auf internationaler Ebene stellt sich die Frage, wie man rechtlich mit Flugzeugen umgeht, die im Sinkflug eine Landesgrenze über-

Das internationale Forscherteam hat nicht nur im Computer virtuelle Objekte nachgebildet, sondern seinen Ansatz auch bereits bei physischen Robotern eingesetzt. Grosse Aufmerksamkeit erregte die Gruppe letztes Jahr mit ihrem Roboter «Atron». Dieser besteht aus einer Ansammlung von identischen, kugelförmigen Objekten, die miteinander verhängt sind. Atron kann seine Form je nach Situation völlig verändern. Auf einer ebenen Fläche formt er sich beispielsweise zu einem Wägelchen, während er in einer engen Röhre die Form einer Schlange annimmt. Das schwimmende Pendant zu den Atron-Zellen sind die sogenannten «Hydrons», an deren Entwicklung der Physiker Lukas Lichtensteiger beteiligt war.

SENSIBLE MASCHINEN

Eine weitere Umsetzung ihrer Prinzipien in die reale Welt gelang den Forschern bei zwei weiteren Robotern. Ein erstes Gerät lernte, mit seinen «Augen» einem farbigen Lichtpunkt im Raum zu folgen. Ein zweiter Roboter hatte die Aufgabe, ein Objekt mit dem Arm ins Zentrum des Blickfeldes zu rücken. Dabei zeigten die Roboter erstaunliche Lernfähigkeiten. Bereits nach kurzer Zeit waren sie in der Lage, die vorgegebenen Aufgaben zuverlässig zu bewältigen.

Eggenberger möchte in Zukunft noch einen Schritt weitergehen und zum Beispiel den Arm des Roboters mit Sensoren ausrüsten. Diese melden der Steuerung, wenn der Roboter irgendwo anstösst. Die Maschine kann ihre Bewegungen dann entsprechend anpassen. Eggenbergers Ideal wäre dabei ein Roboter, der sich mit der Zeit von selbst so entwickelt, dass die Sensoren optimal angeordnet sind – genau wie dies bei den grossen Vorbildern in der Natur auch der Fall ist.

VERANTWORTLICH Dr. Peter Eggenberger Hotz, Artificial Intelligence Laboratory der Universität Zürich, eggen@ifi.unizh.ch.

ZUSAMMENARBEIT Mærsk Institute, University of Southern Denmark, Division of Informatics, University of Edinburgh, LEGO Platform Development

FINANZIERUNG EU-Projekt



Konflikt ohne Ende: Die Auseinandersetzungen um den Flughafen Kloten führen zu unzähligen Rechts