

unimagazin



Ursprung, Schöpfung, Evolution.
Vom Big Bang zum Bewusstsein

Die Mär von den intelligenten Monstern

Werden Computer bald intelligenter sein als Menschen? Werden wir in naher Zukunft von mächtigeren Robotern versklavt? Will man den Prognosen gewisser selbst ernannter Propheten glauben, so ist dies in zwanzig bis fünfzig Jahren der Fall. Wieso solche Prognosen wissenschaftlich unhaltbar sind, zeigt die Forschung am Artificial Intelligence Lab.

VON ROLF PFEIFER

Fehlprognosen sind allgegenwärtig: Wetterprognosen sind chronisch falsch, Prognosen über die Entwicklung der Wirtschaft und Börsenindizes ebenso. Die künstliche Intelligenz schlägt aber in Sachen Fehlprognosen sämtliche Disziplinen. So hat der kürzlich verstorbene Politikwissenschaftler und Ökonomie-Nobelpreisträger Herbert Simon – einer der Gründungsväter der künstlichen Intelligenz – im Jahre 1965 verkündet, «Machines will be capable, within twenty years, of doing any work that a man can do.»

Stanley Kubrick, in seinem grandiosen Film «2001: A Space Odyssey», basierend auf einem Roman von Arthur C. Clarke, prognostizierte 1968, dass Computer im Jahre 2001 nicht nur natürliche, gesprochene Sprache verstehen werden, sondern auch noch Emotionen und entsprechendes Einfühlungsvermögen haben werden. Nun schreiben wir das Jahr 2001, und wir sind bereits 16 Jahre über Simons Prognosehorizont hinaus. Ganz offen-

sichtlich haben sich beide Vorhersagen nicht erfüllt. Es liessen sich dafür viele weitere Beispiele anfügen.

Wie kommt es dann, dass die Vorhersagen von selbst ernannten Propheten wie etwa Hans Moravec, Ray Kurzweil, Hugo de Garis, Kevin Warwick und Bill Joy von einem breiten Publikum – von Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technologie-Experten genauso wie von Journalisten und Politikern – trotzdem ernst genommen und weiterverbreitet werden?

Intelligenz ist nicht gleich Rechenleistung

Das Argument, das von den meisten «Propheten» vorgebracht wird basiert auf dem mooreschen Gesetz, welches besagt, dass sich die Rechenleistung der Computerchips etwa alle ein bis zwei Jahre verdoppelt. Weil dem so ist – so das Argument – können wir annehmen, dass normale PCs in naher Zukunft mehr Speicherkapazität und Rechenleistung als das menschliche Gehirn erbringen werden. Nimmt die Rechen- und Speicherkapazität weiter mit dieser Geschwindigkeit zu, und die vergangenen dreissig Jahre lassen dies tatsächlich vermuten, so werden in Kürze die Computer die Leistung unseres Gehirns bei weitem übertreffen. Beim mooreschen Gesetz handelt es sich nun um eine der ganz wenigen Vorhersagen, die sich bislang tatsächlich erfüllt haben.

Die klassische Sichtweise der künstlichen Intelligenz geht davon aus, dass sich Intelligenz als Computerprogramm verstehen lässt; es wird vom Körper, von der spezifischen Realisierung des jeweiligen Programms abstrahiert. Spätestens als man versucht hat, Kameras an die Computerprogramme anzuschliessen – und

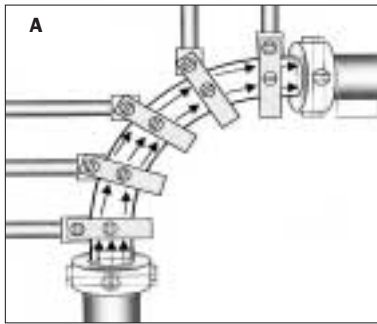
vierzig Jahre Computervision scheinen dies zu bestätigen – hat man realisiert, dass sich das Wahrnehmungsproblem nicht durch reine Erhöhung der Rechenleistung lösen lässt.

Der bekannte Robotiker und Direktor des Artificial Intelligence Laboratory am MIT, Rodney Brooks, leitete dann Mitte der Achtzigerjahre einen Paradigmenwechsel ein, indem er überzeugend argumentierte, dass Intelligenz einen Körper, ein «Embodiment» braucht; die Interaktion eines kompletten Organismus mit seiner Umwelt rückte ins Zentrum des Interesses. Man hatte erkannt, dass zwischen formalen Computerwelten und realen Welten unterschieden werden muss.

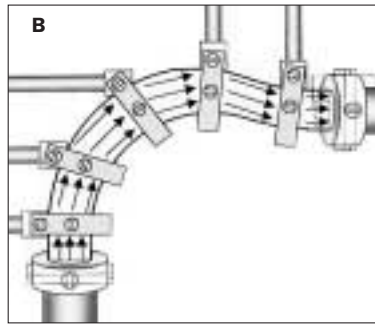
Versteht man einmal die fundamentalen Unterschiede, so wird auch sofort klar, in welchen Bereichen sich die Prognosen, die sich durch Extrapolation aus dem mooreschen Gesetz ergeben, erfüllt haben. Schach, beispielsweise, ist ein formales Spiel, bei dem es genau definierte Situationen, Operationen (die Züge), und Regeln gibt. Es war deshalb vorzusehen, dass die Schachprogramme einmal Menschen besiegen werden, sogar den Weltmeister – «Deep Blue» ist dafür der beste Beweis.

Im Gegensatz dazu ist die natürliche Sprache kein formales Spiel, sondern hat mit Interaktion und Kommunikation in einer komplexen, dynamischen, realen Welt zu tun, in der es vor allem um Bedeutungen geht. Computer kennen keine Bedeutungen, sondern verarbeiten lediglich Daten. Wenn ich mir die Abfahrtszeiten der Züge nach Bern vom Internet herunterlade, so werden sämtliche Bedeutungen von mir als Benutzer den einzelnen Zeichen zugewiesen; der Computer hat nur

Dr. Rolf Pfeifer ist ordentlicher Professor für Informatik und Leiter des Artificial Intelligence Lab am Institut für Informatik der Universität Zürich.



Die optimale Form des Verbindungsstücks von zwei Rohrleitungen wurde mit Hilfe simulierter Evolution gefunden. Optimal heisst, dass der Reibungswiderstand minimal sein soll. Während man intuitiv denken würde, dass ein Viertelskreis (A) die beste Lösung darstellt, zeigte die simulierte Evolution, dass ein eigenartiger «Buckel» (B) die Turbulenzen besser minimiert. (Nach Ingo Rechberg: *Evolutionstrategie*, Frommann-Holzboog [1994])



Komponenten abhängig und kann nur verstanden werden, wenn man «Embodiment», also physikalische und nicht nur Informationsprozesse, mit einbezieht.

Schon aus diesen kurzen Überlegungen wird klar, dass sich Intelligenz und Rechenleistung nicht gleichsetzen lassen. Niemand glaubt ernsthaft, wir hätten jetzt «wirklich intelligente» Computer, nur weil «Deep Blue» Garri Kasparow im Schach geschlagen hat. Für tatsächliche künstliche Intelligenz braucht es reale physikalische Systeme, Roboter etwa, die mit der Umwelt interagieren. Eine einfache Erhöhung der Rechenkapazität auch im «Gehirn» eines Roboters macht diesen nicht wesentlich intelligenter. Man müsste zumindest die Komplexität der Sensorik und der Motorik in einem ähnlichen Ausmass steigern. Aber die Fortschritte in diesen Bereichen sind viel langsamer und folgen nicht dem mooreschen Gesetz. Hugo de Garis, der sich selbst «Brainbuilder» nennt, möchte ein Gehirn «... so gross wie der Mond» bauen – von Intelligenz hat er offensichtlich nicht sonderlich viel verstanden.

Simulierte Evolution

Nun gibt es aber vielleicht eine andere Möglichkeit, wie man die aus dem mooreschen Gesetz resultierende Rechenleistung nutzbar machen kann – nämlich durch simulierte Evolution. Die Evolution hat aus toter, nicht intelligenter, anorganischer Materie Leben,

Intelligenz, und – wie beim Menschen – so etwas wie Bewusstsein geschaffen. Die Evolution kann also als hervorragender Ingenieur, als Designer betrachtet werden, wie das der Evolutionsbiologe Richard Dawkins in seinem Buch «The blind watchmaker» eindrücklich geschildert hat. Der Gedanke ist nun nahe liegend, zu versuchen, die Prozesse der Evolution auf dem Rechner nachzuvollziehen. Ist diese Nachbildung genügend naturgetreu, so müsste eigentlich mit der Zeit, genau wie in der Natur, am Computer simulierte Intelligenz entstehen.

Die Idee, simulierte Evolution auf Designprobleme anzuwenden, stammt von Ingo Rechberg von der Technischen Universität Berlin, der bereits in den 1960er-Jahren schwierige Probleme so gelöst hatte. Er konnte zeigen, dass der Reibungswiderstand in einem Rohr am kleinsten ist, wenn das Verbindungsstück nicht ein Viertelskreis ist, sondern einen eigenartigen «Buckel» hat, eine Lösung, auf die man – als Mensch – nicht so ohne weiteres gekommen wäre (siehe Abbildung oben). Will man nun entsprechend der modernen Konzeption von Intelligenz ganze Organismen mit ihrem «Embodiment» auf der Basis simulierter Evolution erzeugen, so muss man nicht nur ein Computerprogramm, also gewissermassen das «Gehirn» erzeugen, sondern auch die Morphologie, das heisst die Position und die physikalischen Charakteristiken der Sensorik, die Motorik und die Materialien.

Test und Selektion

Josh Bongard vom Artificial Intelligence Laboratory am Institut für Informatik der Universität Zürich hat nun, ausgehend von Erkenntnissen aus der Entwicklungsbiologie, ein Computersystem entwickelt, das die Wachstumsprozesse eines Organismus simuliert und diese in einen Evolutionszyklus eingebettet. Dies

Datensätze manipuliert; er würde garantiert jeden Zug verpassen, da er keine Ahnung hat, was ein Zug ist, geschweige denn eine Abfahrtszeit. Um Bedeutungen erwerben zu können, braucht es die Interaktion mit der physikalischen und sozialen Umwelt. Dementsprechend war auch die Prognose von Stanley Kubrick über den sprechenden, einfühlsamen Computer HAL vollständig verfehlt.

Morphologie und Information

Ganz anders als Computer können Roboter direkt die Umwelt verändern und über ihre Sensorik Information über die Umgebung aufnehmen. Diese Information ist nun bedingt durch die Morphologie, das heisst durch die Form und die Materialien des Körpers, die Art und Form der Sensoren und ihre Positionierung (beispielsweise viele Tastsensoren an den Fingerspitzen, Augen nach vorne gerichtet und im obersten Teil des Organismus liegend). Was also das Nervensystem verarbeiten muss, ist von all diesen

Die Maer von den intelligent Monstern **The Fairytale of the Intelligent Monsters**

Introduction:

Will computers soon be more intelligent than humans? Will we be enslaved in the near future by voracious robots? If one wants to believe in the prognoses of the experts, then this will be the case in twenty to fifty years. Research at the Artificial Intelligence Lab demonstrates why such prognoses are scientifically untenable.

Simulated Evolution

Now there is another possibility, however, that Moore's law—that computer power and performance increases arithmetically with time—may make possible: namely, simulated evolution. Evolution has turned dead, non-intelligent inorganic material into life, intelligence and—in the case of humans—such a thing as consciousness. Evolution can thus be considered as an outstanding engineer, as described by the evolutionary biologist Richard Dawkins in his book "The Blind Watchmaker". This concept is now close to being realized: the processes of evolution are being reproduced in computer simulations. If this reproduction is sufficiently close to nature, then simulated intelligence may actually develop over time inside the computer, exactly as it did in nature.

The idea to apply simulated evolution to design problems came from Ingo Rechenberg, of the Technical University of Berlin, who has already solved difficult problems using such techniques in the 1960s. He was able to show that the fluid friction of water passing through a pipe is minimized if the connecting piece of pipe contains an s-type curve, a solution which is far from obvious (see figure above). In order to generate whole organisms that are embodied (organisms that have a body through which they affect, and are affected by their surroundings) using the modern conception of simulated evolution, then one must produce not only a computer program that controls the agent—to a certain extent the "brain" of the creature—but also the morphology, i.e. the position and the physical characteristics of the sensors, the motors and the body shape of the creature.

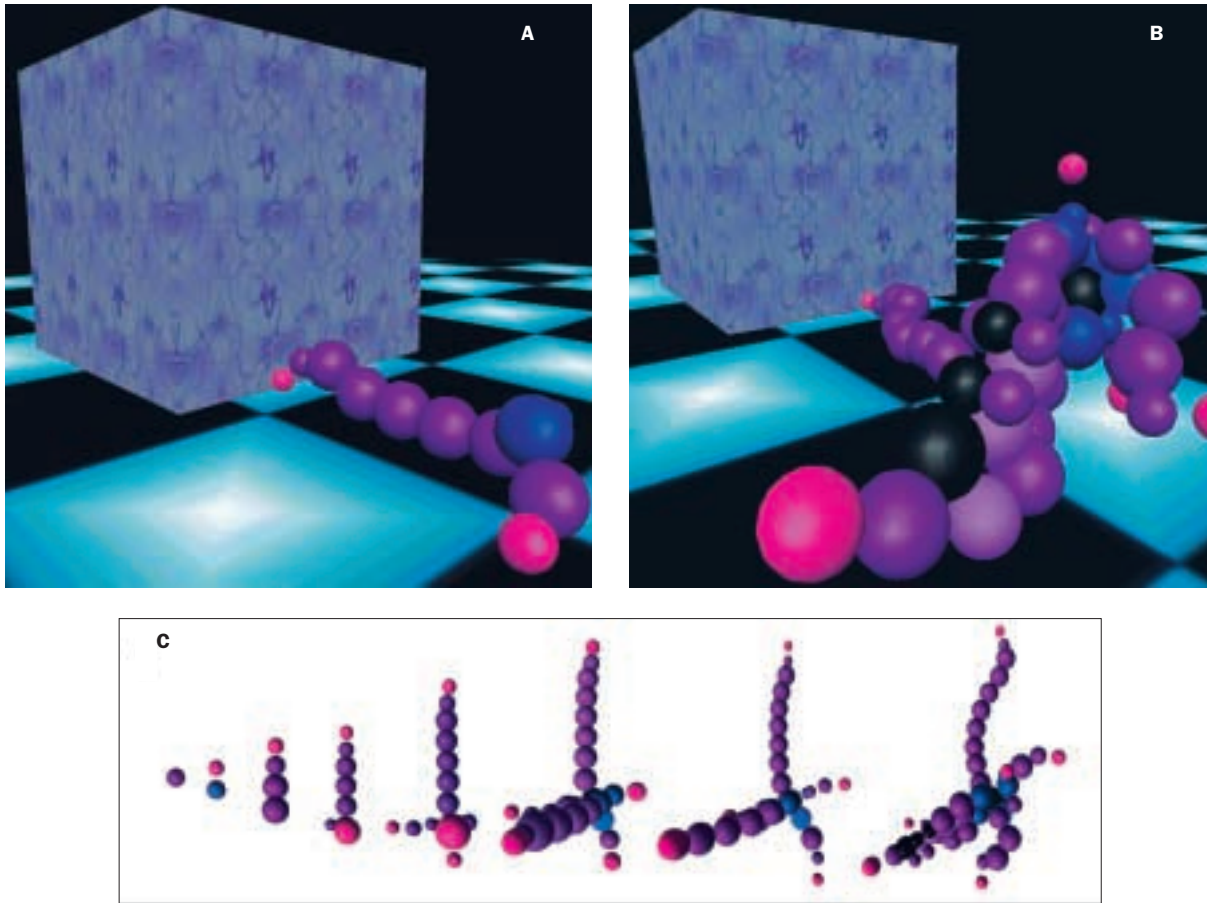
Testing and Selection

Josh Bongard of the Artificial Intelligence Laboratory at the Institute for Computer Science at the University of Zurich has now developed, based on ideas from development biology, a computer system that simulates the growth processes of an organism and embeds these processes into an evolutionary cycle. The system can be described as follows. The system begins with a "cell", which contains places of attachment for joints, muscles, sensors and neurons, as well as a copy of the creature's genome. We set "cell" in quotes in order to suggest that this unit is more than a biological cell. A genetic regulatory network is stored in each "cell", which controls the growth processes of the developing organisms. Fully-grown organisms are then tested in a physically realistically simulated environment, and organisms are selected to participate in reproduction based on their fitness: i.e., how well they perform in the simulator.

In this way the user specifies only what the organism is to do but it is left up to simulated evolution to figure out how. In the example task of moving a heavy block (see figure above), evolution discovered that organisms must be of a certain size; otherwise

they do not have sufficient friction resistance to move the heavy object. "Organs" built from "cells" all of the same type form, which contain no sensors and no neurons, and thus only provide structural support, similar to bones in biological organisms. The ends of the extremities are also specialized and only contain touch and light-sensitive sensors, but no muscles. The locomotion of these organisms is extremely simple and is based on local muscular reflexes; no central control is necessary, which was also discovered by evolution.

Simulated evolution brought this much out of the system, which had not been specified by the programmer. This disproves the commonly-held notion that computers can only do what we program them to do. From a set of basic mechanisms a simulated creature developed, which one could then interpret as a blueprint for a robot. If one now had another device, a 3D printer, which takes a blueprint and, without a human midwife, creates a physical representation of the robot, then it would be possible to test the robotic phenotypes in reality and one would have made the first step towards reproducing robots. Of course, The 3D printer still needs to be manufactured by humans.



Simulierte Evolution eines «Block-Pushers»

Mit Hilfe simulierter Evolution wurden Organismen erzeugt, die in der Lage sind, einen grossen Klotz zu schieben. Die Körper bestehen aus sphärischen «Zellen», die über Gelenke miteinander verknüpft sind und die Sensoren, Muskeln, Neuronen sowie ein digitales Genom enthält. Das Wachstum der Organismen wird über ein Genregulator-Netzwerk gesteuert. Zwei evolvierte Organismen sind in den Abbildungen A und B gezeigt, und zwar ist B ein Abkömmling von A. B ist wesentlich grösser als A, was ihm gestattet, grössere Objekte zu schieben. Das Wachstum des Organismus B, aus-

gehend von einer einzelnen «Zelle» (links), ist in Abbildung C illustriert. Jeder Organismus wurde in einer physikalisch realistischen Simulation auf seine «Fitness» – wie weit er einen Block schieben kann – getestet und je nachdem für die weitere Evolution selektiert. Hellrote Kugeln enthalten nur Muskeln und keine Sensoren; violette sowohl Sensoren als auch Muskeln; blaue enthalten Sensoren, aber keine Muskeln; schwarze enthalten nichts von alledem, sie dienen nur strukturellen und Gewichtszwecken. All dies ist Resultat des Evolutionsprozesses und wurde nicht vom Programmierer vorgegeben.

kann man sich so vorstellen. Man beginnt mit einer Art «Zelle», die neben der genetischen Information auch Ansatzstellen für Gelenke, Muskeln, Sensoren und Neuronen enthält. Wir setzen «Zelle» in Anführungszeichen, um anzudeuten, dass diese Einheit mehr als eine biologische Zelle umfasst. In jeder «Zelle» befindet sich ein Genregulator-Netzwerk welches die Wachstumsprozesse steuert. Die ausgewachsenen Organismen werden dann in einer physi-

kalisch realistisch simulierten Umwelt getestet und je nach Fitness für die Reproduktion selektiert.

Man spezifiziert also nur noch, was der Organismus tun soll, das Wie ist der – simulierten – Evolution vollständig überlassen. Im Beispiel des Schiebens eines Klotzes etwa (siehe Abbildung oben) hat die Evolution selbst gemerkt, dass Organismen eine gewisse Grösse haben müssen, da sie sonst nicht genügend Reibungswiderstand haben, um

ein schweres Objekt zu schieben. Es bilden sich so etwas wie «Organe», «Zellen» vom selben Typ, die beispielsweise keine Sensoren und keine Neuronen enthalten, also nur Gewicht darstellen. Die Enden der Extremitäten sind auch spezialisiert und beinhalten nur Sensoren für Druck und Licht, aber keine Muskeln. Die Fortbewegung ist extrem einfach und basiert auf lokalen Reflexen; eine zentrale Steuerung ist offenbar nicht notwendig, was die Evolution ebenfalls entdeckt hat.

Die simulierte Evolution hat also viel Erstaunliches hervorgebracht, was nicht vom Programmierer vorgesehen worden war. Damit ist die Aussage, Computer könnten nur das tun, was man ihnen einprogrammiert hätte, endgültig widerlegt. Aus einer Menge von Grundmechanismen ist eine simulierte Kreatur entstanden, die man nun als Bauplan für einen Roboter nehmen kann. Es handelt sich also um einen vollständig automatisierten Entwurf, den der Mensch lediglich nachbauen muss. Hätte man nun noch ein Gerät, eine Art 3D-Drucker, mit dem dieser Bauplan ohne menschliches Zutun physikalisch realisiert werden könnte, so wäre es möglich, die Phänotypen in der Realität zu testen, und man hätte so den ersten Schritt zu selbst reproduzierenden Robotern gemacht. Der 3D-Drucker wäre dann allerdings immer noch von Menschenhand hergestellt.

Panik unangemessen

Spinnt man diese Idee weiter, so könnte man annehmen, dass auf diese Weise, mit Hilfe von simulierter Evolution, einmal Maschinen – Roboter – entstehen könnten, die viel intelligenter sind als die Menschen selbst und die dann «... die Menschen so behandeln, wie wir heute Kühe und Affen», wie Kevin Warwick von der University of Reading in einem Interview der Sonntagszeitung kürzlich zu Protokoll gab, wenn nur genügend Rechenleistung vorhanden ist. Droht also die Versklavung der Menschheit durch böartige, superintelligente Monster? Obwohl man als Wissenschaftler Entwicklungen eigentlich nie prinzipiell ausschliessen kann, scheint Panik, wie sie von Kurzweil, de Garis und Bill Joy, verbreitet wird, absolut unangemessen, da sie wiederum ausschliess-

lich auf naiver Extrapolation bezüglich Rechenleistung basiert.

Realistisch sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

1. Die notwendige Rechenleistung ist absolut gigantisch, wenn man sich nur schon überlegt, was es brauchen würde, um die neuronale Stimulation eines Fingers, der sich im Sand hin und her bewegt, und die entsprechenden physikalischen Prozesse zu simulieren;

2. Beim Programm von Josh Bongard und bei allen Modellen der Evolution handelt es sich um Abstraktionen der realen Evolution. Inwieweit man mit solchen Abstraktionen Ergebnisse der realen Evolution erzielen kann, ist eine offene Frage;

3. Wie gut die Simulation auch immer sein mag, wir wissen nicht, inwieweit das Testen des Phänotyps in der realen Welt und ein entsprechendes Feedback notwendig sind. Braucht es die materielle Selbstreproduktion, oder kann dies in der Simulation nachgebildet werden?

Dies sind alles komplexe Forschungsfragen, die nicht lediglich auf Rechenleistung zurückgeführt werden können. Es handelt sich bei der simulierten Evolution um ein hervorragendes Forschungsinstrument, aber naive, lineare Extrapolation ist auch hier nicht gefragt. Generell scheint es einen «Extrapolationsreflex» zu geben: Funktioniert etwas einigermaßen, denkt man gleich, dass damit das Ziel erreicht werden kann. Als Anfang der 1970er-Jahre Terry Winograd vom MIT sein SHRDLU-Programm vorstellte, mit dem man in natürlicher Sprache über eine Klötzchenwelt sprechen konnte, war man allgemein der Ansicht, dass Computer innert weniger Jahre die Fähigkeit

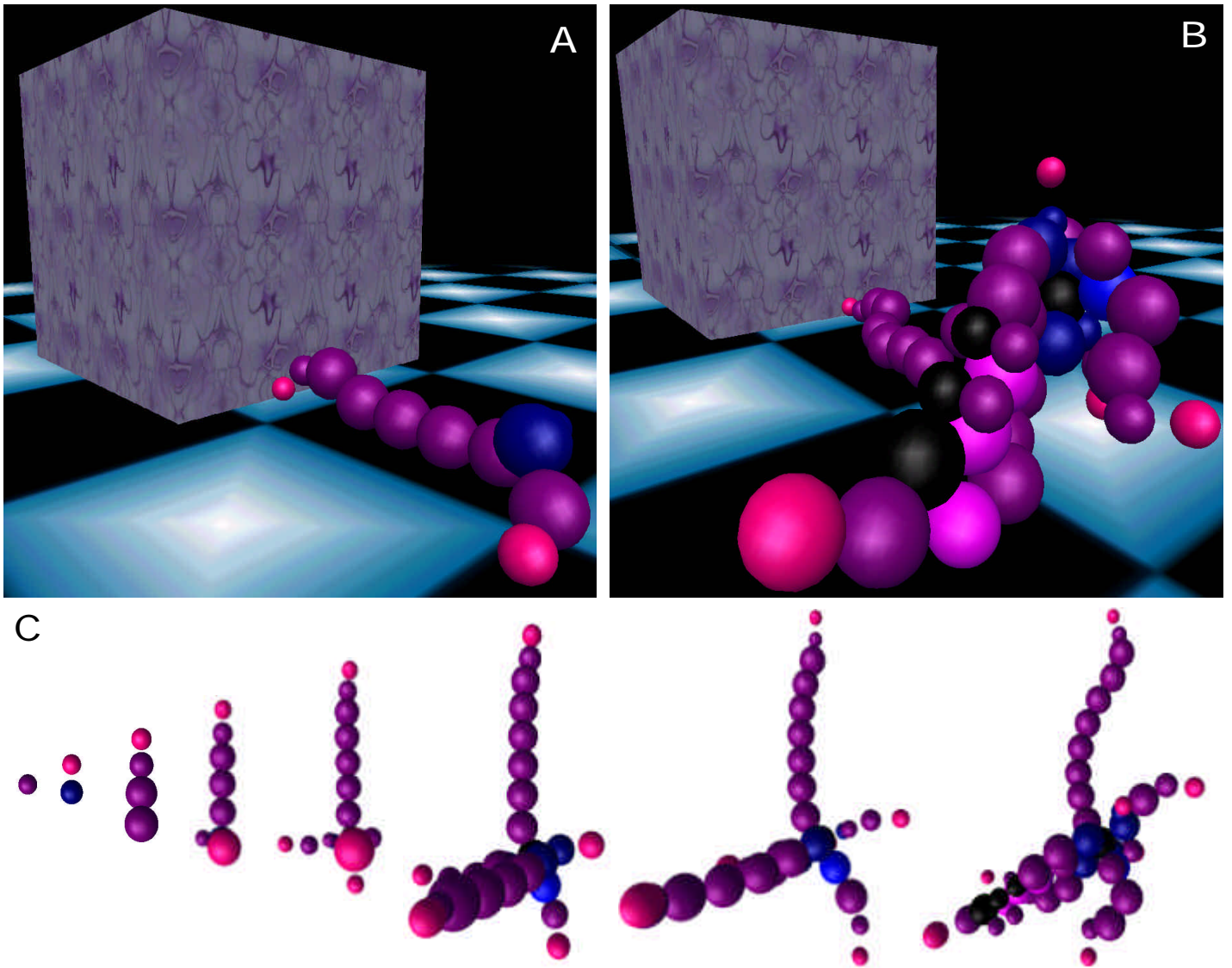
zu natürlicher Sprache besitzen würden – eine weitere Fehlprognose.

Kritisches Nachdenken

Fassen wir also kurz die wichtigsten Punkte zusammen. Erstens braucht Intelligenz einen Körper, kann also nicht einfach mit Rechenleistung gleichgesetzt werden und ist mithin nicht direkt mit dem mooreschen Gesetz gekoppelt. Die Tatsache, dass man gewisse Aspekte eines Körpers, der mit der Umwelt interagiert, simulieren kann, bedeutet noch lange nicht, dass selbst reproduzierende Roboter bereits vor der Tür stehen. Und zweitens darf man die Errungenschaften und Erkenntnisse der Forschung über die künstliche Intelligenz weder unter- noch überschätzen: Im Bereich des automatisierten Entwurfs darf man tatsächlich einiges erwarten, ebenso was das theoretische Verständnis von Intelligenz anbelangt.

Obwohl die meisten Prognosen überrissen sein dürften, ist es doch sinnvoll und notwendig, über potentielle Entwicklungen und deren Auswirkungen nachzudenken. Dabei sollte man sich aber immer vor Augen halten, dass man nicht aufgrund eines einzigen Kriteriums wie Rechenleistung Vorhersagen machen kann. Man sollte – und das ist der letzte Punkt, auf den ich hinweisen möchte – sich zu Herzen nehmen, was der berühmte Physiker Nils Bohr einmal gesagt hatte: «It's hard to predict, especially the future.»

Dieser Artikel verdankt ganz wesentliche Impulse der Diskussion mit den Mitgliedern des Artificial Intelligence Laboratory und den Studierenden des Artificial-Life-Kurses in diesem Sommersemester an der Universität Zürich. Ihnen möchte ich ganz herzlich danken. (R. P.)



Growth and evolution of block-pushing agents In a three-dimensional, physically-realistic virtual environment, agents were evolved to push a large block as far as possible in a short time period. The bodies of the agents are collections of spherical structural units, attached to one another by one degree-of-freedom rotational joints. Each of these units contains sensors, motors and local neural structure: the agent moves by transforming the signals arriving from the sensors into motor commands; the motors then apply force to the joints, causing motion. Two evolved agents are shown in plates **A** and **B**. Starting with a random population of digital genomes, each genome was evaluated by embedding it within a single spherical structural unit. The genome then emits and orchestrates the diffusion of a series of chemicals, which in turn affect how the initial unit grows and splits into new units. During growth the chemicals also generate and delete sensors and motors, as well as neural structure. Plate **C** shows eight still frames taken during the growth of the agent shown in plate **B**. The left-most frame was taken at the start of the growth phase; the right-most frame was taken at the end of the growth phase. Each agent is grown for 300 time steps, and the agent is then allowed 500 time steps to push the block as far as it can. The light, red-tinted units indicate the presence of motors, but no sensors; the purple units contain both sensors and motors; the blue units contain sensors, but no motors; the black units contain neither motors nor sensors, and serve a purely structural function. The agent in plate **A** evolved early during the simulation. The agent in plate **B** appeared later in the same evolutionary run, and is a descendant of the agent in plate **A**. The later agent is much larger, allowing it to exert a greater force against the block. Also, the lower-most unit in plate **A** has been elaborated into a complex appendage in the agent in plate **B**, which is used for locomotion.