

Programmierbare biologische Roboter

Die Nutzung gentechnischer Verfahren zur Erzeugung von gezielt veränderten Produktionsstämmen (Bakterien usw.) z. B. zur Herstellung von Arzneimitteln ist heute Stand der Technik. Jüngste Erfolgsmeldungen zur Realisierung sogenannter Xenobots haben nun auch dem lang-gehegten wissenschaftlichen Traum von der Entwicklung „lebender“ Roboter, also von künstlich erzeugten Organismen mit mechanischer Aktorik-Funktionalität, neue Nahrung gegeben. Die dafür benötigte Technik an der Schnittstelle zwischen Robotik und Synthetischer Biologie steht heute aber noch ganz am Anfang und ist weit von einer großtechnischen Nutzbarkeit entfernt.

Der hier zugrundeliegende gänzlich neue Ansatz besteht darin, virtuelle Organismen auf Grundlage künstlicher Intelligenz zu generieren und diese spezifisch auf ihren jeweiligen Verwendungszweck maßzuschneidern. Der Entwicklungsprozess setzt sich dabei aus einer Sequenz verschiedener Generatoren und Filter zusammen. Als Input dienen lediglich eine (digitale) Beschreibung des verwendeten Ausgangsmaterials sowie das gewünschte Verhalten des biologischen Systems in seiner zukünftigen Einsatzumgebung. Der erste Generator ist ein evolutionärer Algorithmus, welcher verschiedene Kombinationsmöglichkeiten für die biologischen Bausteine (Voxel) entdeckt, um das gewünschte Verhalten zu erreichen. Zunächst wird eine Population von Zufallsdesigns erstellt. Dann wird jeder Entwurf in einer physikbasierten virtuellen Umgebung simuliert und automatisch mit einer Leistungsbewertung versehen. Weniger leistungsfähige Entwürfe werden gelöscht und durch zufällig veränderte Kopien leistungsfähigerer Varianten überschrieben. Durch Wiederholung dieses Prozesses entstehen Populationen leistungsfähiger und unterschiedlicher Designs. Um Abweichungen zwischen der simulierten und physischen Umgebung zu minimieren, werden die leistungsfähigen Entwürfe durch einen Robustheitsfilter geleitet, der nur Entwürfe durchlässt, die das gewünschte Verhalten angesichts von äußeren Störungen beibehalten. Die über-

lebenden Entwürfe werden anschließend durch einen sogenannten „Build“-Filter geleitet, welcher Designs entfernt, die für das aktuelle Herstellungsverfahren nicht geeignet sind oder bei zukünftigen Einsätzen wahrscheinlich nicht für komplexere Aufgaben skaliert werden können. Jene Entwürfe, die sämtliche Filter erfolgreich durchlaufen, werden schließlich mittels Methoden des Bioengineering aus lebendem Gewebe gebaut. Das Endprodukt dieses Verfahrens ist eine lebende 3D-Annäherung an das entwickelte Design. Abschließend werden die Organismen in ihrer physischen Umgebung ausgesetzt und das reale Verhalten mit dem simulierten abgeglichen. Mögliche Abweichungen lassen sich dadurch weiter iterativ korrigieren.

Das Resultat des Prozesses stellt eine gänzliche neue Schöpfung dar und entspringt keinem natürlichen Vorbild. Lediglich das verwendete Material zur Realisierung entstammt einer natürlichen Quelle. Die entstehenden lebenden Systeme repräsentieren neuartige Aggregate von Zellen, die neuartige Funktionen bieten. Oberhalb der zellulären Ebene haben sie wenig Ähnlichkeit mit bestehenden Organismen.

Xenobots können als erste Vertreter dieser neuartigen Entwicklung angesehen werden. Dabei handelt es sich um biologische Mikroroboter, welche darauf ausgelegt sind, sich schwimmend in einer flüssigen Umgebung fortzubewegen und kleine Lasten zu transportieren. Ihr grundlegender Aufbau und ihr Name beruht auf den (Stamm-)Zellen des afrikanischen Krallenfroschs (*xenopus laevis*). Gleichzeitig soll die Bezeichnung zum Ausdruck bringen, dass die zusammengefügten Organismen auch Funktionen erfüllen können, welche vom ursprünglichen genetischen Bauplan der Zellen abweichen (lat.: xeno = fremd). Sie bestehen ausschließlich aus lebenden, tierischen Haut- und (Herz-) Muskelzellen. Im Gegensatz zu konventionellen mechanischen oder biohybriden Systemen verfügen sie über einzigartige Eigenschaften wie z. B. die Fähigkeit zur Selbstheilung oder kollektiven Zusammenarbeit. Ebenfalls konnte inzwischen gezeigt werden,

dass eine hinreichend große Grundpopulation zur autonomen Selbstreplikation in der Lage ist, wodurch perspektivisch eine effiziente Skalierung und Produktion in großen Mengen vorstellbar wäre.

Die langfristigen Zukunftserwartungen im Hinblick auf den gesellschaftlichen Nutzen programmierbarer biologischer Roboter sind noch nicht absehbar. Im Falle der Xenobots gehen die Anwendungsmöglichkeiten, in Abhängigkeit des eingesetzten Materials, in unterschiedliche Richtungen. Potentielle Anwendungsfelder liegen in der Medizin, Nanotechnologie oder im Bereich der Gehirn-Maschine-Schnittstelle. Auf Grundlage tierischer Zellen versprechen sie vielseitige Anwendungsmöglichkeiten in der Industrie. Unter anderem könnten sie radioaktive bzw. toxische Kontaminationen in verseuchten Gegenden detektieren oder bei der Reinigung der Meere von Mikroplastik unterstützen. Sofern der Grundaufbau auf menschlichen Zellen beruht, kämen auch Anwendungen im medizinischen Bereich in Frage, da eine höhere Immunverträglichkeit gegeben wäre. So ließen sich Mikroroboter aus körpereigenen Zellen als Transportvehikel nutzen, um gezielt Medikamente abgeben zu können oder um körperinterne Instandhaltungsaufgaben (z. B. Reinigung verkalkter Arterien usw.) beim Menschen durchzuführen. Auf makroskopischer Ebene existieren bisher keine realen Beispiele. Grundsätzlich hängt das Anwendungspotenzial von den Eigenschaften und Fähigkeiten des verwendeten Ausgangsmaterials ab. Mit zunehmender Größenordnung der biologischen Gesamtsysteme wären auch Kombinationen von verschiedenen Zellen unterschiedlicher Arten denkbar, sodass sich der Umfang an Einsatzmöglichkeiten beliebig erweitern ließe.

Perspektivisch scheint damit die bisher klar gezogene Grenze zwischen künstlicher und natürlicher Schöpfung zunehmend aufzuweichen, sodass sicher auch ethische, die Akzeptanz der Technik betreffende Fragestellungen Einfluss auf die weitere Entwicklung haben werden.

Andreas Brening