



Von der Eulenhalswirbelsäule zum neuartigen Gelenkroboterarm

Bionische Forschung zur Übertragung von natürlichen Gelenken in die Technik

Von Robin Löffler

Von der Natur zur Technik

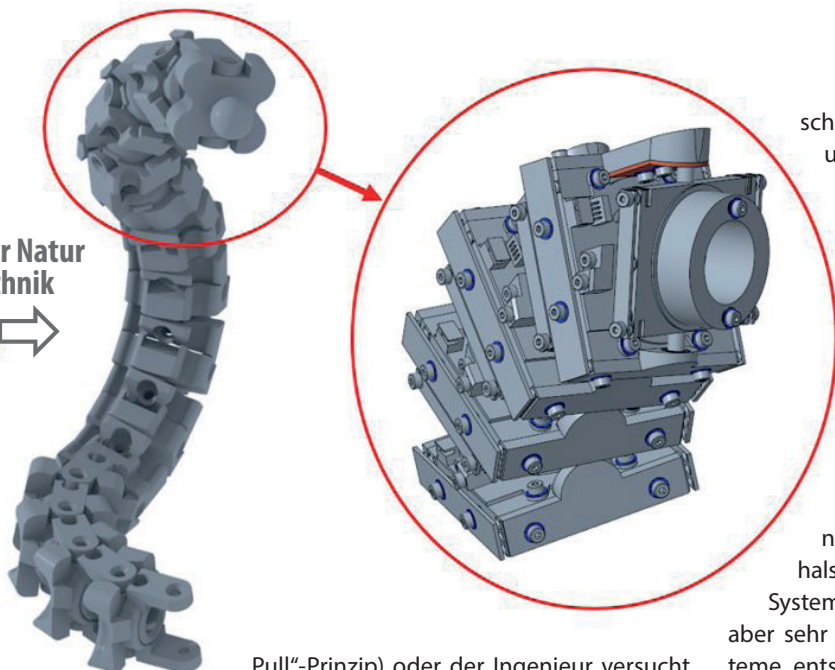


Abb. 1: Darstellung der Mikro-CT-Scan (Rohdaten von MARKUS KRINGS; oben). Rechts: Übertragung auf die erste technische Halswirbelsäule und oberer Bereich der technischen Halswirbelsäule mit Ansätzen für Lagerung und Aktorik.

Bionik, Eule, Eulenhals, Robotik, Gelenkroboter, Roboterarm, Ressourcenschonung, Energieeffizienz. - Bionics, owl, owlneck, robotics, joint robot, robotic arm, resource saving, energy efficiency.

Über Millionen von Jahren entstanden in der Natur aufgrund von Mutations-, Selektions- und Isolationsmechanismen sowohl in der Botanik als auch in der Zoologie hervorragende „Konstruktionen“. Lebewesen, deren anatomische und morphologische Körpermerkmale, angeborenen Verhaltensweisen usw. sich in der jeweiligen Umwelt bzw. in dem vorhandenen Lebensraum bewährten, starben meist nicht aus, so dass diese Eigenschaften vererbt und über die nächsten Generationen weiter optimiert werden konnten. Im Gegensatz dazu starben (und sterben) Tier- und Pflanzenarten mit „ungeeigneten“ Merkmalen meist aus.

Ingenieure sind ständig auf der Suche nach neuen Ideen für technische Produkte, haben aber nicht die Zeit eines langwierigen natürlichen Selektionsprozesses. Aus diesem Grund bedienen sich Konstrukteure an verschiedenen Ideenfindungsmethoden. Eine Möglichkeit ist die Nachahmung von „Konstruktionsprinzipien“ aus der Natur, sprich der bionische Konstruktionsprozess. Entweder liegt ein technisches Problem vor und der Techniker sucht dabei eine Lösung aus der Biologie („Technology

Pull“-Prinzip) oder der Ingenieur versucht die Mechanismen in der Biologie zu verstehen und sucht dafür technische Anwendungen („Biology Push“-Prinzip, vgl. Verein Deutscher Ingenieure 2013).

Am Institut OHM-Chemie, Material- und Produktentwicklung der Technischen Hochschule Nürnberg konzentriert man sich seit 2013 auf die Anwendung des Biology Push-Prinzips. Im Rahmen zweier Forschungsprojekte konnte so erfolgreich der Beinmechanismus der Spinne verstanden und nachbildet werden. Dieses biologische Prinzip wurde in der technischen Version durch den „OHM-Krabbler“ (LANDKAMMER et al. 2016) und den „BioFlexRobot“ Gelenkroboterarm (HORNFECK & LANDKAMMER 2015) umgesetzt. Auf der Suche nach weiteren interessanten „Konstruktionen“ aus der Natur sind wir auf die Kopfbeweglichkeit der Eulen gestoßen.

Eulen sind eine fast weltweit verbreitete Vogelordnung, die sich vor allem durch eine äußerst ausgeprägte Kopfbeweglichkeit auszeichnet. Diese beinhaltet eine Kopffrotation von etwa 270° in beide Richtungen um die vertikale Achse und eine Rotation von mehr als 180° um die horizontale Achse (SCHERZINGER & MEBS 2020; KOENIG 1973; KRINGS et al. 2014; 2017). Diese außerordentliche Bewegungsfähigkeit der Halswirbelsäule kompensiert die fast völlige Unmöglichkeit, die starr im Schädel liegenden Augäpfel zu bewegen. Zahlreiche Eulenarten praktizieren eine sogenannte Ansitzjagd, wobei die Eule von ihrem Aus-

schauplatz dem Beutetier auflauert und im richtigen Moment auf dieses herabstürzt. Speziell für dieses Auflauern muss die Eule aufgrund des oftmals bei völliger Dunkelheit durchgeführten Blindflugs und der dadurch bedingten Horchpeilung ihre Beute permanent „im Gehör“ behalten (SCHERZINGER & MEBS 2020).

Durch die Übertragung dieser natürlichen Kinematik der Eulenhalswirbelsäule auf ein technisches System sollen beispielsweise einfache, aber sehr flexible Greif- oder Kontrollsysteme entstehen, welche als Alternativen zu konventionellen Gelenkrobotern angesehen werden können. Als Grundlage für unsere bionische Entwicklung dienen die Forschungsergebnisse von KRINGS et al. am Lehrstuhl für Biologie II der RWTH Aachen. Demnach hängt die enorme Flexibilität der Eulenhalswirbelsäule mit der Ausrichtung der Halswirbel, der Ausformung dieser Wirbel und den innenliegenden Versorgungskanälen für Arterien und Rückenmark zusammen. Durch die beschriebene Dreiteilung der Halswirbelsäule können die 14 einzelnen Wirbel in verschiedene Kategorien eingruppiert werden (KRINGS 2019; KRINGS et al. 2014; 2017). Diese sehr ähnlichen Wirbel können wir technisch jeweils vereinheitlichen und somit in drei weniger komplexe, aber zusammenhängende Systeme überführen, wodurch der Konstruktionsaufwand sowie die Antriebsintegration stark vereinfacht wird. Für die Konstruktion dieser technischen Halswirbel arbeiten wir mit einer Aneinanderreihung von 28 Drehgelenken (Abb. 1), da die in der Natur vorliegenden Kugel- und Sattelgelenke technisch nur schwer sinnvoll nutzbar sind. Trotzdem behalten wir im Zuge dieses Konstruktionsprozesses die bei den Eulen vorgegebenen Einzelwinkel zwischen den einzelnen Halswirbeln bei. Dadurch stellen wir die maximale Bewegungsfähigkeit des Eulenhalses bestmöglich nach. Aufgrund des sehr filigranen Aufbaus der Halswirbelsäule, unserem Wunsch nach Leichtbau sowie einer möglichst guten



Abb. 2: Aufgebauter erster Prototyp des an der Eulenhalswirbelsäule orientierten Gelenkroboterarms.

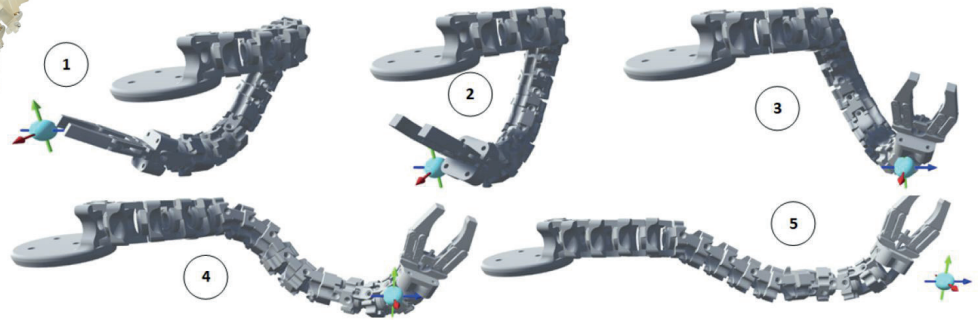


Abb. 3: Beispielhafter Bewegungsablauf der in Unity3D mit BioK-Asset erstellten inversen Kinematik der Eulenhalswirbelsäule. Der Mittelpunkt des Greifers versucht immer so gut wie möglich dem türkisen Punkt zu folgen. Dieser Punkt wird vom Benutzer mit der Computermaus gesteuert.

Energieeffizienz und Ressourcenschonung setzen wir als Antriebstechnologie (sogenannte Aktoren) Drähte aus Formgedächtnislegierungen (FGL) ein. Diese Aktoren bestehen durch eine extrem hohe Leistungsdichte (Kohl 2002) und durch eine muskelartige Kontraktion. Das bedeutet, dass wir bei einem geringen Eigengewicht der Muskeldrähte eine hohe Kraftausbeute erhalten. Die Kontraktion dieser FGL-Drähte entsteht durch eine temperaturabhängige Gefügewandlung im Material. Wird ein passender Draht beispielsweise auf 70°C erhitzt, befindet er sich in der Hochtemperaturphase und kann sich somit um ca. 3-5% verkürzen. Je nach Drahtdurchmesser können dabei verschieden große Kräfte erzeugt werden. Diverse Hersteller geben eine empfohlene Belastung von ca. 1 kg für einen Draht mit einem Durchmesser von 0,25 mm an.¹

Aus unseren Praxisversuchen ergibt sich eine deutlich höhere Kraftausbeute, welche aber mit einer verkürzten Lebensdauer einhergeht. Durch die – prozentual gesehen – vergleichsweise geringe Verkürzung von FGL-Draht-Aktoren müssen für die vorgesehenen Drehbewegungen zwischen den einzelnen Halswirbeln große Drahtlängen benutzt werden. Für die Integration dieser teilweise über 1 m langen Drähte werden Bowdenzüge, ähnlich wie beim Fahrrad, eingesetzt. Diese verlegen wir durch den innenliegenden Kanal, um die Drähte am Standfuß des Gelenkroboterarms nach außen unter den Arbeitstisch zu führen. Für die Rückstellung der Einzelbewegungen und die Vorspannung der Drähte bedienen wir uns verschiedener Federvarianten.

Nachdem der mechanische Aufbau und die Antriebe soweit vorhanden sind, stellt sich nur noch die Frage, wie die einzelnen Drähte angesteuert werden können, damit am Ende auch eine ähnlich flexible und natürliche Bewegung wie beim biologischen Vorbild entsteht. Das Bestromen der einzelnen Drähte mit einer dafür passenden Leistung stellt in dieser Situation nicht das Problem dar. Es muss viel mehr geklärt

werden, welches der 28 Drehgelenke welche Bewegung ausführen muss, damit der „Schnabel“, also der Greifer, des Gelenkroboterarms auch am vorgesehenen Ziel ankommt. Dafür bietet sich eine sogenannte inverse Kinematik an. Dabei legen wir die Position des Greifers am Computer im dreidimensionalen Raum fest. Durch einen Algorithmus werden die sinnvollsten Einzelwinkel zwischen den Wirbeln berechnet. In diesem Fall verwenden wir das Programm BioK (Starke et al. 2019) in Unity3D (Unity Technologies). Das Ergebnis dieses Vorgehens illustriert Abbildung 3. Die Winkel zwischen den vereinfachten Halswirbeln stellen sich so ein, dass der Greifer so gut wie möglich den türkisen Punkt erreichen kann. Dieser wird mit der Maus gesteuert. Mit dieser Simulation können wir dann auch alle vom Greifer erreichbaren Punkte im Raum bestimmen. Dadurch ist es möglich die biologischen Beobachtungen zur flexiblen Halswirbelsäule der Eule teilweise zu belegen. Außerdem bietet sich für uns Ingenieure die Möglichkeit die Einzelwinkel zu verkleinern, um zwischen den Wirbeln bei einer gleichbleibenden Gesamtflexibilität die FGL-Draht-Aktoren noch effektiver einsetzen zu können.

Letztendlich bleibt es spannend, welcher Einsatzfall mit einem derartig flexiblen Gelenkroboterarm bedient werden kann. Von Inspektionsarbeiten mit einer kompakten Kamera bis hin zu leichten Greifaufgaben (z. B. auch für körperlich eingeschränkte Personen) ist alles denkbar. Eine exakte Angabe ist zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung noch nicht möglich. Das liegt daran, dass die Anwendungsmöglichkeiten beim Biology Push-Prinzip erst während der Entwicklung eines technischen Nachbaus des biologischen Vorbilds entstehen.

Literatur

- HORNFECK, R. & LANDKAMMER, S. (2015): Gelenkflexibler Roboter „FlexRobot“. - Technische Hochschule Nürnberg, Nürnberg.
 KOENIG, L. (1973): Das Aktionssystem der Zwergohreule *Otus scops scops* (Linné 1758). - Paul Parey Berlin u. Hamburg.
 KOHL, M. (2002): Entwicklung von Mikroaktoren

- aus Formgedächtnislegierungen. - Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Maschinenbau.
 KRINGS, M. (2019): Wissenschaftliche Erkenntnisse über die Halsbeweglichkeit bei Eulen. Ein Überblick der Untersuchungen an der Amerika-Schleiereule (*Tyto furcata pratincola*). - Kauzbrief 27 (31): 5-8.
 KRINGS, M.; NYAKATURA, J.A.; BOUMANS, M.L.L.M.; FISCHER, M.S. & WAGNER, H. (2017): Barn owls maximize head rotations by a combination of yawing and rolling in functionally diverse regions of the neck. - Journal of Anatomy 231 (1): 12-22.
 KRINGS, M.; NYAKATURA, J.A.; FISCHER, M.S. & WAGNER, H. (2014): The cervical spine of the American barn owl (*Tyto furcata pratincola*): I. Anatomy of the vertebrae and regionalization in their S-shaped arrangement. - PLoS one 9 (3), e91653.
 LANDKAMMER, S.; WINTER, F.; SCHNEIDER, D. & HORNFECK, R. (2016): Biomimetic Spider Leg Joints: A Review from Biomechanical Research to Compliant Robotic Actuators. - Robotics (3): 15; DOI: 10.3390/robotics5030015.
 SCHERZINGER, W. & MEBS, T. (2020): Die Eulen Europas. Biologie, Kennzeichen, Bestände. - Franckh-Kosmos Stuttgart.
 STARKE, S.; HENDRICH, N. & ZHANG, J. (2019): Mimetic Evolution for Generic Full-Body Inverse Kinematics in Robotics and Animation. - IEEE Transactions on Evolutionary Computation 23 (3): 406-420.
 Verein Deutscher Ingenieure (2013): VDI 6222 Bionik. Bionischer Roboter. - Beuth Berlin.
 WILLIG, H.P. (o. J.): Eulen-Biologie. - <https://www.biologie-seite.de/Biologie/Eulen> [15.12.2019].

Anmerkung

Interessenten finden das Video „Projekt ‚Ein Eulenhalsgelenk für effizientere Maschinen‘“ zur vorgestellten Thematik unter: <https://www.youtube.com/watch?v=3CI38fQV76g>.

Danksagung

Das Forschungsprojekt wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz im Rahmen des Bay-Bionik Netzwerks finanziert. Es handelt sich um Projekt Nummer 8: Ein Eulenhalsgelenk für effizientere Maschinen. Mein Dank gilt auch Prof. Dr. HERMANN WAGNER und Dr. MARKUS KRINGS vom Institut für Biologie II (Zoologie) der RWTH Aachen sowie Prof. Dr. WOLFGANG SCHERZINGER für die freundliche Zusammenarbeit bezüglich der biologischen Daten.

Robin Löffler
 robin.loeffler@th-nuernberg.de

¹ <https://www.robotshop.com/de/de/flexinol-draht-0010-lt.html>; <https://www.dynalloy.com/flexinol.php> [jeweils 31.03.2021].

