

Biomechanik des Spinnenbeins

Keywords: Spinnen, Stoffschlüssigkeit, Gelenke, Mikrohydraulik, Nachgiebigkeit, Manipulator

Für die Entwicklung neuer Bewegungsprinzipien für die Lokomotion und Manipulation bei Robotern, besonders für Systeme mit mikrotechnologisch gefertigten Mechanik-Komponenten bieten sich Studien zur Funktionsanatomie von Gliedertieren förmlich an. Zu dieser Tiergruppe werden auch die Krebse, die Insekten und die Spinnentiere gezählt, die unter anderem eines gemeinsam haben: eine feste, segmentierte Hülle (fachsprachlich einen Chitinpanzer oder -weil außen liegend- das Exoskelett). Allgemein bekannt ist, dass diese "Ritter am Wegesrand" eine fast mikroskopische Kleinheit erreichen können, andererseits jedoch beachtliche mechanische Arbeit verrichten können.

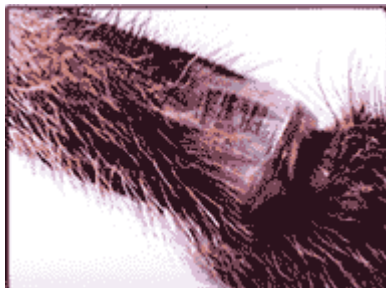


Das Problem

In der Mikro-Robotik steht, wie in der Mikrotechnologie allgemein, die Einschränkung, dass Gelenke und Antriebe und besonders die Strukturen zur Übertragung von Kräften und Umsetzen von Bewegungen (das "Getriebe") aus möglichst wenigen, zueinander beweglichen Teilen gefertigt werden müssen. In der Mikromechanik werden daher stoffschlüssige Gelenke, die "aus einem Stück" gefertigt sind, bevorzugt und möglichst lange Übertragungstrecken vermieden. Deshalb erschließt das genaue Erkennen und Verstehen der Funktionsmechanismen von Gliedertieren ein noch unüberschaubares Reservoir an miniaturisierungsfähigen Lösungen. Sie sind ebenfalls "aus einem Stück" gewachsen und ihre Gelenke befinden sich an Stellen höherer Nachgiebigkeit des Panzers, sind mithin stoffschlüssig. Schon 1988 wurde von KALLWEIT (TU Dresden) ein feinwerktechnischer Greifer nach dem Vorbild der Mundwerkzeuge der Walzenspinne mit hydraulischem Antrieb vorgestellt.

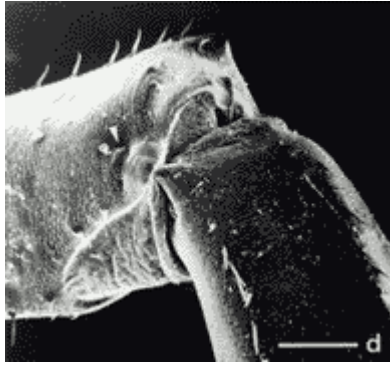
Das Vorbild

Spinnen, Ekeltiere und Lieblinge der Boniker gleichermaßen, können zudem noch mit ihren langen Extremitäten nicht nur sehr effektiv laufen, sondern zuweilen auch große Sprünge machen (Fangsprung!). Jedoch fehlt ein Teil der Antriebe, der Muskelzüge, welche die gelenkig verbundenen Beinsegmente nach einer Beugung wieder zu strecken vermögen. Hier konnte eine druckgetriebene Transmission nachgewiesen, die das Körperfluid ("Blut-Lympe") aus dem Spinnenkörper durch Kanäle in die Beine bis zu den Gelenken als Kraft-Auskopplungspunkte drückt. Der Druckerzeuger, die Pumpe liegt im Vorderkörper, in welchem kräftige Muskelzüge die Brustplatte mit dem Rückenpanzer verbinden und bei Kontraktion etwas aufeinander zu bewegen. Diese Volumenverringering ist also der eigentliche Motor eines Spinnensprunges.



Seine Funktionsweise

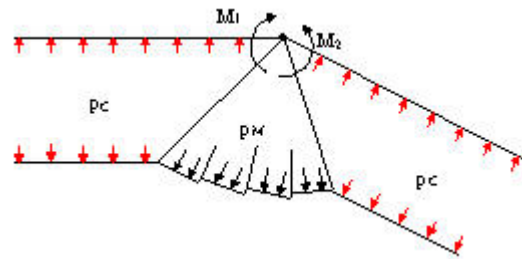
Betrachtet man ein Spinnenbein, so sieht man die in Serie angeordneten Gelenke auf den röhrenförmigen Extremitäten-Exoskelett mit versetzter Achsenlage und unterschiedlichem Bewegungsumfang. Ihnen gemeinsam ist die Art der Kopplung der beteiligten Beinsegmente, sowohl die Ausbildung von Gelenkzapfen, die eine Führung der Bewegung bewirken als auch eine alles verbindende Gelenkhaut. Beide mechanisch wirksamen Strukturen bestehen aus dem selben Material, dem Chitin-Polymer, nur mit unterschiedlichem Verhärtungsgrad.



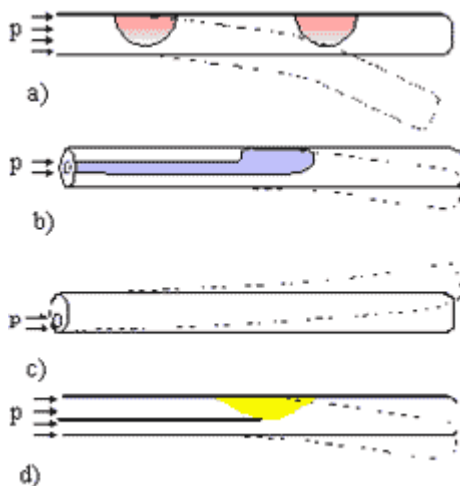
Dieser Typ stoffschlüssiger Gelenke integriert also die Funktionen: Aufrechterhaltung der Kopplung und Führung der Bewegungsmöglichkeiten (Achslage, Freiheitsgrad) mit dem Antrieb als Bewegungsauslöser. Die abdichtende Membran wird bei Auskopplung des Drehmoments am Folgesegments nach Erhöhung des Fluiddrucks (ca. 50 kPa) im Gelenkspalraum in Bewegungsrichtung gestreckt, ohne sich gleichzeitig auszubeulen! Gerüstsubstanzen der Lebewesen zeichnen sich generell durch eine Orts-, Richtungs- und zeitliche Zustandsabhängigkeit der mechanischen Parameter aus, die konstruktive Vielfalt und funktionelle Stabilität dieser evolutiv optimierten Mechanismen ermöglicht.

Untersuchung und bionische Modellmethode

Für die Modellierung eines Spinnenbeins bildet das Mehrkörper-System (MKS) ein geeignetes Modell für die synthetische Methode (Anwendung des Schnittprinzips auf jeden Teilkörper = Segment und Aufstellung des Impuls- und Drallsatzes). Die transmittiven Kräfte werden durch die Hydrodynamischen Formeln des Fließwiderstandes im Modell berücksichtigt. Die Geometrie- und Trägheitsparameter wurden am Objekt "Vogelspinnen-Bein" über Flüssigkeitsinjektion gemessen und die dynamischen Kenngrößen (Dämpfung, Steifigkeit) aus Arbeiten zum Spinnenverhalten abgeleitet. Um die Kinematik des Gesamtkörpers zu bewerten, wurde die Sprungbewegung mit der MKS-Software "alaska" simuliert. Die ermittelten Reaktionskräfte wurden dazu als eingeprengte Kräfte eingegeben. Besonders eindrucksvoll ist die Leistungsfähigkeit des hydraulischen Antriebs beim Sprung der Spinne. Die Modelluntersuchung zeigt, dass die realen Beinsegment-Längenverhältnisse in einem Optimalbereich liegen, welcher möglichst kurze Absprungetzeiten garantiert: für die Streckungs-Geschwindigkeit als Designkriterium für die erfahrungsgemäß trägen mikrohydraulischen Mechanismen ein wichtiger Befund.



Die konstruktive Umsetzung



a)-c) stoffschlüssige Gelenke mit irreversibler Nachgiebigkeit: a) Inhomogenität der Materialeigenschaften, b)-c) asymmetrischer bzw. asymmetrisch gelegter Innenraum, d) Stoffschlüssiges Gelenk mit steuerbarer reversibler Nachgiebigkeit: Lokale Änderung der Materialeigenschaften durch Energiezufuhr

Zusammen mit der TU Budapest werden im Labormaßstab Abformungstechnologien entwickelt, die Hohlformen aus Silikon-Kautschuk im Millimeter-Maßstab ermöglichen. Diese Strukturen sind, in Abhängigkeit von ihrer chemischen Komposition, in der Lage, sich bei Druckbeaufschlagung gerichtet zu verformen. Werden die mechanischen Parameter des Werkstoffes im Formstück durch unterschiedliche Zusammensetzung oder einer Variation der Polymerisationsbedingungen lokal geändert, können, dem monolithischen Fertigungsprinzip der Mikrotechnik folgend, Gelenke mit integriertem Antrieb "aus einem Guß" gefertigt werden - mithin eine Gradientenmechanik darstellend. Bei der Spinne bestimmt das in unterschiedlichem Grade verfestigte Chitin der skelettalen Außenhülle die ortsabhängige Nachgiebigkeit der röhrenförmigen Elemente, die jeweils mit dem Freiheitsgrad 1 zu einer kinematischen Kette verkoppelt sind. Zwei unterschiedliche Arten der röhrenförmigen Elemente zur Bewegungserzeugung als stoffschlüssige Gelenke sind hervorzuheben. Gelenke mit unveränderlicher Nachgiebigkeit sind durch einen unsymmetrischen Aufbau der Struktur gezeichnet. Gelenke mit steuerbarer reversibler Nachgiebigkeit sind dagegen symmetrisch aufgebaut. Durch eine lokale unsymmetrische Einwirkung auf das Material ändern sich reversibel mechanische Eigenschaften (Steifigkeit) des Materials, wobei bei gleichzeitiger Druckänderung eine Bewegung erzeugt wird.

Weiterentwicklung und Ausblick

Bedingt durch den hydraulischen oder pneumatischen Antrieb können stoffschlüssige Gelenke mit steuerbarer reversibler Nachgiebigkeit klein ausgeführt werden, wodurch sie für Anwendungen in der Miniaturtechnik prädestiniert sind. Diese Gelenkzonen können zu monolithischen Strukturen seriell verkoppelt und individuell aktiviert werden, um komplexe räumliche Bewegungen auszuführen, wobei nur ein druckgenerierender Antrieb für die gesamte Struktur notwendig ist.

Hydraulisch getriebene Mikrogreifer aus gelenkigen Polymer-Hohlstrukturen bieten insbesondere in der medizintechnischen Anwendung mehrere Vorteile: sie haben keine die Sterilisierung erschwerenden Spaltflächen und atraumatische (verletzungsvermeidende) Konturen, sind durch ihre Nachgiebigkeit (compliant mechanism) bruchfest und werden mit einer biokompatiblen Energieform angetrieben (die Mikro-Pumpe für die physiologische Kochsalzlösung kann außerhalb des Patienten verbleiben). Gelingt es außerdem, der abschnittweisen Änderung der Nachgiebigkeit zusätzlich eine richtungsabhängige Verformbarkeit (Anisotropie) aufzuprägen, ist der konstruktive Schritt zum peristaltisch arbeitenden Medikamenten-Dosiersystem (siehe Projekt "Mikropumpe für hochviskose Medien") oder einer nach Druckbeaufschlagung selbstbewegenden Sonde offen.

Die Bearbeitung erfolgte durch Herrn Prof. Dr. R. Blickhan (FSU Jena - Biomechanik) und Frau Dr. L. Zentner (TU Ilmenau).