

Verbundprojekt PORTASOR - Neue Generation von portablen Soft-Roboterarmen mit „sanften“ Greifern auf Basis von elastischen fluidischen Gelenken für alltägliche Assistenz- und Serviceaufgaben

Dr. O. Ivlev^{a)}, Dr. S. Schulz^{b)}, U. Brenk^{c)}, Dr. R. Resinger^{d)}, G. Dietz^{e)}, B. Böhm^{f)}

^{a)} Friedrich- Wilhelm-Bessel-Institut Forschungsgesellschaft m.b.H.
Postfach 106364, 28063 Bremen

^{b)} Institut für Angewandte Informatik/Automatisierungstechnik, Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstrasse 12, Geb. 10.91, 76128 Karlsruhe

^{c)} i-sys Automationstechnik GmbH

Greschbachstrasse 19, 76229 Karlsruhe

^{d)} Dr. Winkler GmbH & Co Herstellungs- und Vertriebs KG
Industriestrasse 8, D-83404 Ainring-Mitterfelden

^{e)} Gottlob Dietz GmbH

Benzstr. 9-11, 74196 Neuenstadt

^{f)} Fluidmotion GmbH,

Lützowstrasse 25, 04157 Leipzig

Kurzfassung

Eine neuen Generation von „sanften“ Roboterarmen und Greifern mit natürlicher Elastizität wird erforscht und entwickelt. In den Robotergelenken werden neuartige, fluidisch angetriebene Aktoren eingesetzt – eine besondere Art von künstlichen Muskeln mit speziellen elastischen, segmentförmig ausdehnbaren Arbeitskammern, die unmittelbar eine Drehbewegung erzeugen. Die auf der genannten technologischen Basis aufgebauten Leichtbauroboterarme und –hände sind durch eine kompakte Bauweise, sowie eine naturimmanente Nachgiebigkeit gekennzeichnet, die bei marktüblichen elektromechanisch angetriebenen Robotern nur durch sehr aufwendige Reglerstrukturen und kostspielige Konstruktionsmaßnahmen realisiert werden kann.

Solche portable Soft-Roboterarme sind für die direkte Interaktion mit Menschen prädestiniert und werden speziell für Assistenz- und Serviceaufgaben in einer Alltagsumgebung konzipiert. Die erfolgreiche Entwicklung setzt die Erforschung neuer Technologien in Bereichen Verfahrenstechnik und Werkstoffeinsatz voraus. Die Arbeit mit den neuen flexiblen und elastischen Verbundwerkstoffen, die Integration flexibler Sensoren und fluidischen Systemkomponenten einschließlich Miniatur-Ventiltechnik und Mikroelektronik sowie die komplexe Aufgabe, ein kompressibles Arbeitsmedium in elastischen Antriebselementen mit erforderlicher Genauigkeit zu regeln, sind Aufgabenstellungen, die den innovativen Gehalt des Projektes bilden.

1. Einleitung und Vorstellung des Themenkomplexes

1.1 Darstellung der allgemeinen Situation

Geschickte, leichte und präzise Manipulatoren sind bereits seit mehreren Jahrzehnten Gegenstand von intensiven Untersuchungen und Entwicklungen. Stellvertretend für beeindruckende Erfolge im mechatronischen Leichtbau steht der DLR-Leichtbauroboter [1]. Bei diesem handelt es sich wohl um das weltweit erfolgreichste Beispiel der Realisierung eines Leichtbauroboterarmes mit elektromechanischen Gelenken. In jedem Gelenk ist ein Drehmomentsensor integriert, so dass durch geschickte und sehr komplexe Regelung sowohl jedes Gelenk als auch der gesamte Arm beim geschlossenen Regelkreis eine gewisse Nachgiebigkeit aufweisen kann. Außerhalb der Regler-Bandbreite, genauso wie bei Störungen in Kraft/Momentrückkopplungen, verliert der Arm seine Nachgiebigkeit.

Deswegen wird weiter nach neuen Konzepten für sichere Manipulatoren gesucht, die auch im unmittelbaren Kontakt mit Menschen zuverlässig arbeiten können [2]. Der nahe liegende Weg zur Erreichung einer garantierten mechanischen Manipulationssicherheit durch Einführung passiver elastischer Elemente (Federn) in der Gelenktransmission [3] führt erwartungsgemäß zur Begrenzung der Tragfähigkeit des Manipulators. Mit den neusten Konzepten wie z.B. distributed macro-mini actuation [4] oder variable stiffnes actuation [5] wird versucht, diese Nachteile zu mindern, indem komplizierte mechanische Transmissionen, teilweise mit Elastizität, zum Einsatz kommen.

1.2 Gründe für die Thematisierung der Problematik

Eine Alternative zu elektromechanischen Gelenken stellen Roboter-Antriebskonzepte dar, die auf den so genannten „pneumatischen Muskeln“ basieren. Derartige fluidisch angetriebene Aktoren mit natürlicher Elastizität sind für Service- und Assistenzbereiche prädestiniert und werden weltweit intensiv erforscht [6 - 11]. Das Arbeitsprinzip pneumatischer Muskeln ist dem biologischen Muster nachempfunden und basiert auf dem Effekt der gleichzeitigen axialen Kontraktion und radialen Extraktion eines geschlossenen Schlauchstückes mit polymorpher Wandstruktur bei Erhöhung des Innendruckes. Eine Vielfalt von unterschiedlichen Typen solcher Zug-Aktoren wurde entwickelt, um den oben erwähnten Effekt zu verstärken; eine Übersicht dieser Arbeiten ist in [12] zu finden.

Seit einiger Zeit hat die Firma FESTO AG & Co. KG aus Esslingen den bekanntesten Typ dieser fluidischen Aktoren, so genannte McKibben-Muskel [13], technologisch perfektioniert und unter dem Produktnamen fluidic muscle MAS auf den Markt gebracht [14]. Der Anwendungsbereich geht weit über die Robotik in die industrielle Prozessautomatisierung hinaus, wo sich die Anwendungen hauptsächlich auf einachsige Linear- und/oder Drehbewegungen beschränken. Als Beispiel einer Realisierung von komplexeren kinematischen Strukturen auf der Basis von fluidic muscle MAS kann die Entwicklung eines 6-DOF Roboterarmes [10] oder einer Laufmaschine mit sechs Beinen [15] dienen.

Auf dem gleichen Muskel-Typ (McKibben-Muskel) basiert eine andere zur Zeit kommerziell verfügbare Variante – die *air muscle* von „The Shadow Robot Company“, London, die als Antriebe bei vielen beeindruckenden aber auch mechanisch sehr anspruchsvollen Entwicklungen, wie The Shadow Dexterous Hand, Biomorphic Arm oder Shadow Biped dienen [16].

Interessante Alternativen zu den herkömmlichen pneumatischen Muskeln vom McKibben-Typ stellen die so genannten pleated pneumatic muscle [17], entwickelt bei Vrije Universiteit Brussels, Belgien, sowie die pneumatic bellows [18], entwickelt bei University of Michigan, USA, dar. Diese Entwicklungen zielen hauptsächlich darauf hin, das für McKibben-Muskeln typische stark nichtlineare und für die Anwendungen nachteilige Kontraktionsverhalten, d.h. den drasti-

schen Zugkraftabfall bei der Aktuatorkontraktion, und somit die Antriebs-Kraftcharakteristiken, zu verbessern.

1.3 Abgrenzung des Problembereiches

Wie bereits angedeutet wurde, erzeugen alle gängigen Arten von künstlichen Muskeln unmittelbar nur lineare Bewegungen. Diese müssen dann mechanisch in benötigte Drehbewegungen umgewandelt werden. Die zitierten Beispiele zeigen bei genauerer Betrachtung, dass komplexere kinematische Strukturen auf dieser Basis ineffizient sind und daher noch weit von den Anforderungen an alltagstauglichen Produkten entfernt sind.

In dem Verbundprojekt PORTASOR wird eine neue Generation von fluidischen Antriebselementen mit immanenter Nachgiebigkeit in extremer Leichtbauweise erforscht und entwickelt, die in den Robotergelenken zum Einsatz kommen. Diese innovativen Leichtbaugelenke enthalten spezielle elastische, segmentförmig ausdehnbare Kraftelemente, eine besondere Art von künstlichen Muskeln.

Im Unterschied zu herkömmlichen linearen pneumatischen Muskeln (McKibben, Festo) erzeugen die membranartigen Aktoren unmittelbar Drehbewegungen und weisen daher eine wesentlich höhere Leistungsdichte auf. Die auf der genannten technologischen Basis aufgebauten Leichtbauroboterarme und -hände werden durch eine naturimmanente Nachgiebigkeit gekennzeichnet, die bei den marktüblichen elektromechanisch angetriebenen Robotern nur durch sehr aufwendige Reglerstrukturen und kostspielige Konstruktionsmaßnahmen realisiert werden kann.

1.4 Ziele und innovativer Gehalt

Dass Gesamtprojektziels – eine neue Generation von portablen und anwendungssicheren Roboterarmen und Greifern in extremer Leichtbauweise – wird erreicht, indem nach den notwendigen theoretischen und experimentellen Voruntersuchungen funktionsfähige Versuchsmuster (Demonstratoren) entwickelt und realisiert werden. Der Aufbau dieser Demonstratoren ist eng mit erfolgreicher Durchführung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf unterschiedlichen Forschungsgebieten verbunden. Die FuE- Arbeiten, die notwendig sind, um die angestrebten Projektziele zu erreichen, lassen folgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele formulieren:

Arbeitsziel 1: Erforschung und Entwicklung neuartiger fluidischer Drehantriebe mit elastischen Kraftelementen. Neben der Kernfragen, die mit der konstruktiven Auslegung und Herstellungstechnologien von elastischen Kraftelementen verbunden sind, müssen hierbei auch Fragen der problembezogenen Auslegung der notwendigen Komponenten des fluidischen Netzwerkes (Miniaturventile, Druckmedienversorgungseinheiten, flexible oder gelenkige Durchführungselemente für den Transport des Fluids usw.) untersucht und ggf. einschlägige Sonderentwicklungen durchgeführt werden;

Arbeitsziel 2: Konzipierung, Spezifikation und Design einer Baureihe von portablen „sanften“ fluidischen Roboterarmen und Greifern (Hände) auf der Basis der oben genannten Drehantriebe für unterschiedliche Anwendungen auf dem Gebiet der Assistenz- und Servicerobotik hinsichtlich Kinematik, Genauigkeit, Handhabung, Portabilität, äußerer Gestaltung und Erfüllung der Sicherheitsanforderungen;

Arbeitsziel 3: Methoden und Verfahren zur robusten adaptiven Regelung und Steuerung sowohl der einzelnen neuartigen Gelenkantriebe mit stark nichtlinearen dynamischen Charakteristiken als auch des gesamten nachgiebigen Roboterarmes unter Berücksichtigung der antriebsspezifischen Gelenkdynamik und Sicherheitsaspekten.

2. Projektstatus

Der geplante Projektzeitraum erstreckt sich über 42 Monate mit Beginn am 01. August 2006 laut Bewilligungsbescheid. Ausgehend von den gesetzten Projektzielen und den daraus resultierenden Problemstellungen sind die notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des Verbundvorhabens in fünf Teilprojekten unterteilt worden, die jeweils von einem Projektpartner bearbeitet werden. In folgenden sind die Teilprojekte und deren Zielsetzung näher beschrieben.

Teilvorhaben DYNREG: Dynamik und Regelung von portablen Soft-Roboterarmen mit neuartigen fluidischen Gelenkantrieben unter Berücksichtigung ihres stark nichtlinearen viskos-elastischen Verhaltens

Bei der Entwicklung einer neuen Generation von portablen Robotern mit nachgiebigen fluidischen Gelenken bilden Untersuchungen der Dynamik, Regelung und Steuerung die Grundlage für ein effizientes und zuverlässiges Funktionieren des Gesamtsystems. Die dynamischen Einflüsse sind einerseits stark von den Bewegungsgeschwindigkeiten abhängig, andererseits hängt die Wechselwirkung von der Gelenkflexibilität ab. Da die anwendungsspezifische Geschwindigkeiten und Beschleunigungen eher als niedrig eingestuft werden können, sind auch die Inertialkräfte für eine Leichtbaukonstruktion relativ niedrig. Für einen Roboterarm mit steifen Gelenken könnten diese Einflüsse vernachlässigt werden; bei nachgiebigen Gelenken mit der gewünschten relativ niedrigen inneren Steifigkeit müssen diese Effekte genauer untersucht werden. Auch die Wirkung der Schwerkraft muss berücksichtigt und kompensiert werden. Bei einem fluidisch angetriebenen nachgiebigen Leichtbauroboterarm mit einer ständig wechselnden Massenverteilung wird diese Aufgabe erheblich anspruchsvoller sein, und ihre Lösung erfordert eine aufwendigere mathematische Modellierung als bei einem Manipulator mit konventionellen Antrieben.

Neben der Projektkoordination übernimmt die FWBI-Forschungsgesellschaft in dem Verbundprojekt folgende Aufgaben:

- Optimierung der kinematischen Struktur der Roboterbaureihe und inverse Kinematik,
- Roboterdynamik und Regelungsalgorithmen,
- Robotercontroller-Architektur und -Programmierung.

Teilvorhaben FLUGEL: Fluidische Gelenkantriebe mit elastischen Membrankammern für Soft-Roboterarme mit „sanften“ Greifer

Bei der Entwicklung der im Projektziel beschriebenen neuen Antriebs Elemente und der auf dieser Basis aufbauenden „sanften“ und leichten Robotersysteme, werden verschiedene Problem Schwerpunkte erwartet, die sich aus dem aktuellen technologischen Stand ergeben. So werden Materialien, wie sie in den Antriebs Elementen zum Einsatz kommen sollen bislang für Anforderungen konzipiert, die weit unter der Belastungsgrenze und unterhalb des Arbeitsbereiches liegen, wie im neuen Antriebs Element erforderlich sein wird. So werden beispielsweise die mit HF verschweißten Folienelemente für Standardanwendungen mit Arbeitsdrücken unterhalb 1bar beaufschlagt. Die neuen fluidischen Antriebs Elemente werden mit Arbeitsdrücken von bis zu 8bar arbeiten.

Noch sind keine geeigneten Berechnungsmodelle verfügbar, die eine entsprechende Materialsimulation zulassen.

Auch existieren im Bereich der Sensorintegration in elastische Membranstrukturen keine ausreichenden wissenschaftlichen Vorarbeiten. In diesem Bereich muss das technologische Know-how erst erarbeitet werden, durch die Fertigung von Funktionsmustern, begleitet von umfangreichen messtechnischen Analysen, ggf. Simulationen.

Neben den o.g. Arbeitsschwerpunkten übernimmt das AIA der Universität Karlsruhe innerhalb des Verbundprojekts daher folgende Aufgaben:

- Entwicklung fluidischer Antriebe mit elastischen Kraftelementen und deren Berechnungsgrundlagen
- Untersuchungen geeigneter Herstellungstechnologien der Antriebs- und Gelenkkomponenten
- Konstruktive Integration der Antriebs- und Sensorelemente in modulare Gelenksysteme
- Entwicklung geeigneter Druckmedienversorgungs- und Steuerungseinheiten.

Teilvorhaben FEINMECH: Fertigungstechnologien für Feinmechanik-Präzisionskleinstteilen in Kombination mit Kunststoffkomponenten

Die Entwicklung einer neuen Generation von portablen Soft-Roboterarmen mit elastischen Gelenken erfordert den Einsatz sowohl neuer Materialien und Fertigungstechnologien als auch eine Modernisierung bzw. Anpassung der bereits zur Verfügung stehenden Verfahren und Werkstoffe. Neue Roboterarme und Roboterhände sind komplexe mechatronische- und mikrosystemtechnische Systeme, die physikalisch gesehen aus Teilen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zusammengesetzt sind.

Für die neue Roboterarmgeneration ist das „Zusammenspiel“ von elastischen (flexiblen) und starren Komponenten, die gleichzeitig den hohen Präzisionsanforderungen entsprechen müssen, signifikant. Dadurch wird der ohnehin im Leichtbau vorhandene Widerspruch zwischen dem Systemgewicht und der Konstruktionstragfähigkeit verstärkt. Ziel des Projektes ist daher diesem Widerspruch mit innovativen Technologien entgegenzuwirken.

In dem Verbundprojekt übernimmt der Projektpartner folgende Forschungs- und Entwicklungsaufgaben:

- Entwicklung neuer Fertigungsprozesse für Kleinstteile in präziser Ausführung für die Roboterarm- sowie Roboterhandmechanik;
- Entwicklung geeigneter Fertigungstechnologien für die miniaturfluidischen Systemkomponente, insbesondere der Ventiltechnik
- Konstruktionsentwicklung und Konstruktionsanpassung hinsichtlich der zu verwendenden Fertigungstechnologien;
- Analyse der Verwendbarkeit und der Bearbeitungstechnologien von modernen Werkstoffen;

Teilvorhaben MEMBRAN: Materialforschung und Herstellungstechnologien für elastische Membrankammern aus dünnen Gewebeverbundstoffen

Das Ziel des Teilprojektes ist es, im Bereich der HF-Verschweißung dünner elastomerer Folien-schichten in Verbindung mit nichtelastomeren Einlagestoffen und Sensoren neue technologische Prozesse zu erforschen bzw. durch Veränderung der technologischen Parameter die bestehenden Produktionsverfahren an die Anforderungen anzupassen, die durch den Einsatz neuartiger fluidischer Gelenkantriebe zustande kommen.

Einen wesentlichen Aspekt dieser Untersuchungen bilden Technologien zur Herstellung und Bearbeitung von Verbundteilen aus Kunststofffolien und elastomeren Spritzgusskomponenten. Einen anderen Aspekt stellen die Untersuchungen im Rahmen der Materialforschung dar, in wie weit Messelemente (Sensoren) direkt in die Materialien eingebracht werden können. In erster Linie wird dabei die Möglichkeit der Integration elastischer Dehnmessstreifen zur Überwachung von Materialverformungen untersucht, um darauf basierend einen Aufschluss über den aktuellen

Fluiddruck, das übertragene Drehmoment, den Gelenkwinkel usw. zu ermöglichen. Andere Sensorarten können z.B. laufend Informationen über die Fluidtemperatur oder andere Parameter liefern.

Die flexiblen Antriebselemente sollen im Rahmen des Projektes aus der Kombination zweier Technologien entstehen – zum einen der Verarbeitung elastomeren Rohmaterials durch Spritzguss und Vulkanisation, zum anderen durch die HF-Verschweißung von dünnen Folienschichten und Verbundmaterialien in Verbindung mit elastomeren Formteilen.

Den Bereich der HF-Technologien wird der Projektpartner Fa. Winkler übernehmen. In dem Verbundprojekt werden das insbesondere folgende Forschungs- und Entwicklungsaufgaben sein:

- Entwicklung geeigneter Herstellungstechnologien bezüglich der Verbindung dünner Folienschichten und Verbundwerkstoffe in Kombination mit elastischen Volumenkörpern
- Forschung im Bereich der Wechselwirkungen von Form und Volumen der Aktorelemente und der damit zu erzielenden Kraftübertragungen
- Materialforschung, insbesondere flexible Verbundmaterialien bzw. gewebeverstärkte Kunststofffolien
- Untersuchung der technologischen Parameter hinsichtlich der Zug- und Belastungsfestigkeit.
- Untersuchung der Volumenkörper hinsichtlich der dauerhaften und gleichförmigen Einsatzbereitschaft und der Stabilität bei wechselnden Umgebungssituationen.

Teilvorhaben ELAST: Material- und Technologieforschung zur Integration von Präzisionsteilen und Messelementen in elastomere Verbund-Materialien

Das Ziel des Teilprojektes ist es, im Bereich Spritzguss und Vulkanisation elastomere Materialien in Verbindung mit nichtelastomeren Einlagestoffen und Sensoren neue technologische Prozesse zu erforschen bzw. durch Veränderung der technologischen Parameter die bestehenden Produktionsverfahren an die Anforderungen anzupassen, die durch den Einsatz neuartiger fluidischer Gelenkantriebe zustande kommen.

Einen wesentlichen Aspekt dieser Untersuchungen bilden Technologien zur Herstellung und Bearbeitung von Präzisions-Verbundteilen aus Kunststoff-, Gummi- und Metallkomponenten – eine Art von Hybridwerkstoffen (hart/weich Materialkombinationen). Einen anderen Aspekt stellen die Untersuchungen im Rahmen der Materialforschung dar, in wie weit Messelemente (Sensoren) direkt in die Materialien eingebracht werden können. In erster Linie wird dabei die Möglichkeit der Integration elastischer Dehnmessstreifen zur Überwachung von Materialverformungen untersucht, um darauf basierend einen Aufschluss über den aktuellen Fluiddruck, das übertragene Drehmoment, den Gelenkwinkel usw. zu ermöglichen. Andere Sensorarten können z.B. laufend Informationen über die Fluidtemperatur oder andere Parameter liefern.

Den Bereich der Spritzguss- und Vulkanisations-Technologien wird der Projektpartner Gottlob Dietz GmbH übernehmen. In dem Teilprojekt werden das insbesondere folgende Forschungs- und Entwicklungsaufgaben sein:

- Entwicklung neuer Herstellungstechniken bei der hart/weich- Materialkombination in flexiblen fluidischen Gelenkantrieben;
- Materialforschung zur Sensorenintegration in den Antriebselementen;
- Untersuchung der technologischen Parameter (Prozessparameter wie Temperatur, Druck, Vulkanisationszeit, Haftigkeit der Elastomere, Leitfähigkeit);
- Untersuchung des Verhaltens von Elastomeren und Hybridwerkstoffen gegen Umwelteinflüsse und Druckmedien.

Der assoziierte Partner Fluidmotion GmbH wird in dem Verbundprojekt ihre Erfahrung in der Systemintegration, Fertigungsnetzwerke und in der Erarbeitung von Vermarktungsstrategien auf die im Projekt zu entwickelnden fluidischen Antriebs Elemente sowie deren Systembestandteile konzentrieren. Im Vordergrund werden jedoch die Entwicklung von koordinierten technischen Lösungen in einem Fertigungsnetzwerk sowie die Machbarkeitsanalyse der Systemkomponenten hinsichtlich späterer Vermarktung von kompletten fluidischen Leichtbau-Robotersystemen stehen.

3. Erfahrungen, Bewertungen

Die geplanten Forschungsarbeiten basieren in wesentlichen auf den Erfahrungen, die die Kooperationspartner im Rahmen eines durch AiF geförderten ZUTECH-Projektes ZN 113 „Hochinnovatives Baukastensystem für gelenkige Leichtbauroboter mit flexiblen Servo-Fluidaktoren“ gesammelt haben. Im Rahmen dieses, bereits abgeschlossenen Projektes sind mechatronische Gelenkmodule mit elastischen faltenbalgähnlichen Kraftkammern erforscht und entwickelt worden. Die Gelenkmodule sind mit integrierter Messelektronik, Stell- und Regelementen ausgerüstet und nach dem Baukastenprinzip in drei Typengrößen - mit charakteristischen Durchmessern 100, 80 und 60 Millimeter - konstruktiv aufeinander abgestimmt entworfen.

Die ansatzweise realisierten Gelenkmodule D100 und D80 entwickeln maximale Drehmomente von 40 Nm bzw. 17 Nm. Der am FWBI entwickelte und getestete Gelenkmodul der Typengröße D100 (Abbildung 1) kann sowohl pneumatisch als auch hydraulisch mittels einer reversiblen, am Forschungszentrum Karlsruhe (Institut für Angewandte Informatik) entwickelten Miniaturpumpe betrieben werden. Der Aktuator bildet zusammen mit den Sensoren, dem Elektronikblock mit Regelalgorithmen sowie dem der Betriebsart entsprechenden Stellglied ein mechatronisches Modul (Abbildung 2). Die Entwicklungs- und Untersuchungsergebnisse der lokalen Regelung für Einzelgelenke sind u.a. in [19-22] beschrieben.

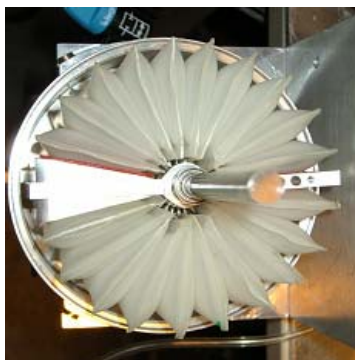


Abbildung 1: REK-Aktuator D100

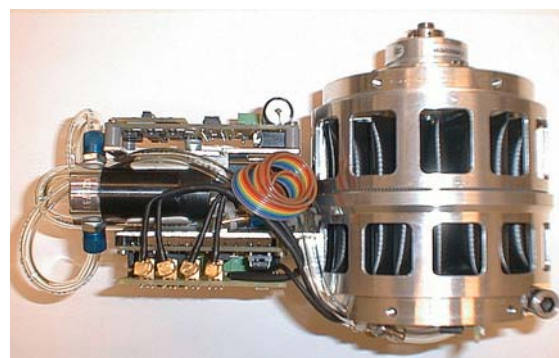


Abbildung 2: Mechatronisches Modul D100

Die mechatronischen Module werden mittels den standardisierten mechanischen Leichtbau-Verbindungselementen zu einem gelenkigen Roboterarm zusammengebaut; dabei wird der Typ des Rotationsgelenks – Kipp- oder Drehgelenk – allein durch die verwendeten Verbindungselemente festgelegt (Abbildung 3). Aus den Gelenken des Baukastens lassen sich vielfältige kinematische Strukturen zusammensetzen. Eine mögliche Roboterkinematik ist in Abbildung 3 als Designerentwurf gezeigt und in Abbildung 4 als realisierte Teilkette eines Oberarmes.



Abbildung 4: Der hydraulisch betätigte Oberarm



Abbildung 3: Module des Baukastens

Ab-

Als ein weiteres Ergebnis des abgeschlossenen Forschungsvorhabens ZN 113 stehen pneumatische Gelenkmodule D80 mit einem Außendurchmesser von ca. 75mm zur Verfügung, die am Forschungszentrum Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der Universität Karlsruhe entwickelt und als eine kleine Serie von 10 Prototypen realisiert worden [23-26]. Aus den Gelenkmodulen wurde ein Demonstrator des pneumatischen Unterarms „PRMA4“ (Pneumatic Rotation Modul Arm system with 4 joints) aufgebaut, bestehend aus vier fluidischen Gelenkmodulen mit je zwei Folien-Balg-Aktoren und einem 5-Finger-Softgreifer „APH8“ (Artificial Pneumatic Hand with 8 actuators) mit acht Balgzylinder-Aktoren (Abbildung 5).



Abbildung 5: Roboterarms „PRMA4“ mit dem 5-Finger-Softgreifer „APH8“

Ein Multigelenk-Roboter-Arm „PBA9“ (pneumatic balg arm system with 9 actuators) in Verbindung mit dem Softgreifer „PG12“ (pneumatic grasper with 12 actuators), der seinerseits über 12 Balgzylinder-Aktoren verfügt, in Abbildung 6 zu sehen. Roboterarme dieser Art können im Serviceroboterbereich und in der Medizintechnik u.a. für eine automatisierte Rehabilitation eingesetzt werden.

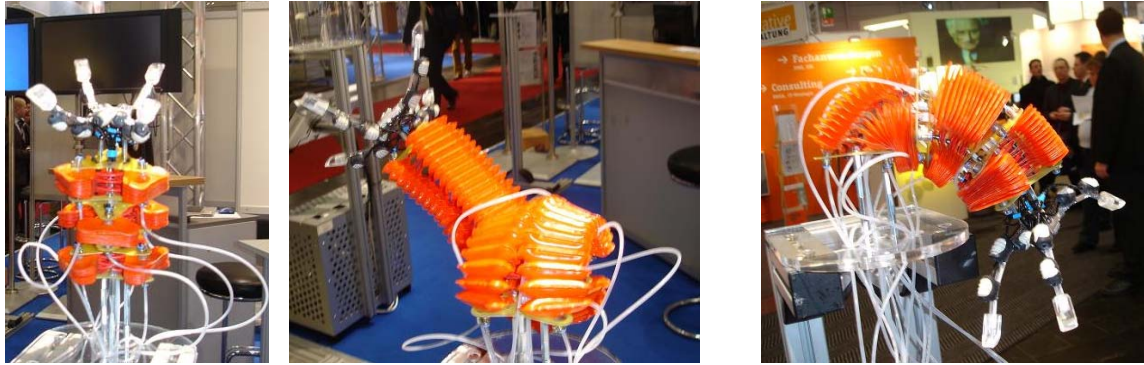


Abbildung 6: Multigelenk-Roboter-Arm „PBA9“ mit insgesamt neun Aktoren

Entsprechend der Aufgabenstellung des AiF-Projektes ZN 113 wurden in entwickelten und realisierten Roboterkontrollern lediglich die durch Konfigurationsänderungen des Armes verursachten Veränderungen der Trägheitsmomente berücksichtigt. Bezüglich der dynamischen Wechselwirkung zwischen den Gelenken wird angenommen, dass sie relativ klein ist und durch die lokalen Gelenkregler abgefangen und kompensiert wird. Diese Annahme, die bei den verhältnismäßig niedrigen Geschwindigkeiten sowie für kleine Lasten durchaus berechtigt ist, beschränkt allerdings die möglichen Robotereinsatzgebiete und kommt daher in dem aktuellen Verbundprojekt nicht zum Tragen.

Die Aufgabenstellung im laufenden Projekt und somit die erarbeiteten wissenschaftlich-technischen Lösungen, unterscheidet sich deutlich von der Aufgabenstellung in dem aktuellen Verbundprojekt, bildet aber eine gute Ausgangsbasis für die vertieften Untersuchungen und für die Erarbeitung der für die erfolgreiche Projektdurchführung benötigten wissenschaftlichen Grundlagen.

4. Ausblick

In der Service- und Assistenzrobotik, die die Bereiche von Industrie und Haushalt über Medizin- und Rehabilitationsrobotik bis zur Spielzeugtechnik umfasst, stehen Sicherheitsanforderungen im Vordergrund. Die immanente, jedoch exakt regulierbare Nachgiebigkeit und daraus folgende grundsätzliche Manipulationssicherheit sind dabei von unerlässlicher Bedeutung. Portable „unschädliche“ Leichtbau-Roboterarme mit „sanften“ Greifern (Händen) stellen eine der Schlüsselkomponente dieser Anwendungen dar. Mit der Entwicklung neuartiger Leichtbau-Roboter mit eingebauter Elastizität können völlig neue Dimensionen des Robotereinsatzes eröffnet werden. Einer Baureihe von solchen Roboterarmen, die sowohl die mechanischen (Roboterarmen und Greifer) als auch die zugehörigen Basis-Kontrollkomponenten (exakte Positions- und Kraft/Momentregelung sowie wichtigste Greifskills) enthalten, werden hervorragende Rahmenbedingungen zur Realisierung verschiedener Ideen und Konzepte aus den aktuellen Robotik-Themenfeldern wie intelligentes Steuern, Planen und Lernen schaffen.

5. Literaturverzeichnis

- [1] Hirzinger, G., Sporer, N., Schedl M., Butterfaß J., Grebenstein M. *Torque-Controlled Lightweight Arms and Articulated Hands: Do We Reaching Technological Limits Now?* The International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 4–5, April–May 2004, pp. 331-340.
- [2] Albu-Schaffer A., A. Bicchi, G. Boccadamo, R. Chatila, A. De Luca, A. De Santis, G. Giralt, G. Hirzinger, V. Lippiello, R. Mattone, R. Schiavi, B. Siciliano, G. Tonietti, and L. Villani. *Physical Human-Robot Interaction in Anthropic Domains: Safety and Dependability*. Proc. 4th IARP/IEEE-EURON Workshop on Technical Challenges for Dependable Robots in Human Environments, 2005.

- [3] Pratt G., Williamson M. *Series Elastics Actuators*. Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. On Intelligent Robots and Systems, 1995, pp. 399-406
- [4] Zinn M., Roth B., Khatib O., Salisbury J. K. *A New Actuation Approach for Human Friendly Robot Design*. The International Journal of Robotics Research, Vol. 23, No. 4-5, April-May 2004, pp. 379-398
- [5] Tonietti G., Schiavi R., Bicchi A. Design and Control of a Variable Stiffness Actuator for Safe and Fast Physical Human/Robot Interaction: Proc. ICRA 2005, pp. 528-533
- [6] Noritsugu, T., Tanaka, T., and Yamanaha, T.. Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, Tsukuba, Japan, 1996.
- [7] Pack, R. T., Christopher, J. L. Jr., Kawamura, K. A rubber-tuator-based structure-climbing inspection robot. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Albuquerque, NM, pp. 1869-1874, 1997.
- [8] Kawamura, K., Peters R.A. II, Wilkes D.M., Alford W.A., Rogers T.E. *ISAC: Foundations in Human-Humanoid Interaction*, IEEE Intelligent Systems, July/August 2000, pp. 38-45
- [9] D.G. Caldwell, N. Tsagarakis, G.A. Medrano-Cerda, J. Schofield, S. Brown, "A pneumatic muscle actuator driven manipulator for nuclear waste retrieval", *Control Engineering Practice*, Vol. 9, pp. 21-36, 2001
- [10] K. Kawashima, T. Sasaki, T. Miyata, N., Nakamura, M. Sekiguchi, T. Kagawa, "Development of Robot Using Pneumatic Artificial Rubber Muscles to Operate Construction Machinery", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 16 No. 1, 2004.
- [11] B. Tondu, S. Ippolito, J. Guiochet, A. Daidie, "A Seven-degrees-of-freedom Robot-arm Driven by Pneumatic Artificial Muscles from Humanoid Robots", *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 24, No. 4-5, April 2005, pp. 257-274.
- [12] Daerden F., Lefeber D. *Pneumatic artificial muscles: actuators for robotics and automation*, *European Journal of Mechanical and Environmental Engineering*, 47(1):10-21, 2002.
- [13] Schulte R.A. The Characteristics of the McKibben Artificial Muscle. The Application of External Power in Prosthetics and Orthotics, publ. 874, Nas-RC, pp.94-115, 1962
- [14] www.festo.com
- [15] Kerscher T., Albiez J., Zöllner J. M., Dillmann R. *AirInsect - A New Innovative Biological Inspired Six-Legged Walking Machine Driven by Fluidic Muscles*, Proceedings of IAS 8, The 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems, Amsterdam, March 10-13, 2004
- [16] www.shadow.org.uk
- [17] Daerden F., Lefeber D. *The Concept and Design of Plated Pneumatic Artificial Muscles*. Int. J. of Fluid Power, vol. 2, no. 3, pp. 41-50, 2001
- [18] Granosik G., Borenstein J. *Integrated Joint Actuator for Serpentine Robots*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 10, no. 5, Oktober 2005, pp.473-481
- [19] Mihajlov M, Ivlev O., Gräser A. Design and Control of Safe Robotic Arm with Compliant Fluidic Joints, 37th Int. Symposium on Robotics and 4th German Conference on Robotics, 2006, May 15-17, Munich
- [20] Ivlev O., Mihajlov M., Wendland E., Gräser A., New Compliant Fluidic Rotary Actuators for Soft Service and Assistance Robotics, 10th International Conference on New Actuators, Actuator 2006, June 14 - 16, Bremen
- [21] Ivlev O., Mihajlov M., Gräser A. Modular Multi-Sensory Fluidic Actuator with Pleated Rotary Elastic Chambers; 4th IFAC Symposium on Mechatronic Systems, September 12 - 14, Heidelberg, Germany; 2006.
- [22] Mihajlov M, Hübner M., Ivlev O., Gräser A. Modeling and Control of Fluidic Robotic Joints with Natural Compliance; IEEE Int. Conf. on Control Applications, Oktober 2 - 4, Munich, Germany; 2006.
- [23] Schulz S., Mehne C., Ebersoldt A., Rößler W., Schulz M. *Fluidisch angetriebene Gelenke für modulares Leichtbaurobotersystem*. Deutsche Forschungsvereinigung für Meß-, Regelungs- und Systemtechnik e.V. (DFMRS), Jahrestagung 2004, Automatisierung, Mechatronik, Regenerative Energiesysteme, ISSN 0944-694X, Bremen, 2004, S. 53-66
- [24] Schulz S., Pylatiuk C., Bretthauer G. *A New Ultralight Anthropomorphic Hand*. Proc. of the ICRA, Seoul, Korea, S. 2437-2441, 2001
- [25] Pylatiuk C., Schulz, S. *Flexible Fluidaktoren*. Biona Report 14, Hrsg.: W. Nachtigall, A. Wissner, Akademie der Wissenschaft, Mainz, S. 132-134, 2000
- [26] S. Schulz, C. Pylatiuk, G. Bretthauer, *A New Class of Flexible Fluidic Actuators and their Applications in Medical Engineering*, *at-Automatisierungstechnik* 47(8), S. 390-395, 1999