

Mechatronische Konzepte zur Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion

G. Bretthauer¹, J. Wittenburg², H. Wörn³, A. Albers⁴, K. Berns⁵
J. Martin¹, R. Keppler², D. Osswald³, W. Burger⁴, K. Regenstein⁵

¹ Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Angewandte Informatik,
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

² Universität Karlsruhe (TH), Institut für Technische Mechanik,
Kaiserstr.12, 76128 Karlsruhe

³ Universität Karlsruhe (TH), Institut für Prozessrechenstechnik, Automation und Robotik,
Engler-Bunte-Ring 8, 76131 Karlsruhe

⁴ Universität Karlsruhe (TH), Institut für Maschinenkonstruktionslehre und KFZ-Bau,
Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe

⁵ Forschungszentrum Informatik an der Universität Karlsruhe,
Abteilung Interaktive Diagnose- und Servicesysteme,
Haid-und-Neu-Straße 10-14, 76131 Karlsruhe

Abstract

Die Entwicklung eines humanoiden Roboters erfordert bei der Mechatronik neue Denkansätze, insbesondere um der Forderung nach direkter Interaktion des Roboters mit dem Menschen gerecht zu werden. In einer Übersicht werden die Konzepte der Mechanik, Sensorik, Elektronik und Regelung eines humanoiden Roboters als zentrale Demonstrationsplattform des Sonderforschungsbereichs 588 'Lernende und kooperierende multimodale Roboter' dargestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Komponenten Arm, Kopf und Hand.

1 Einleitung

Aus Sicht des Konstrukteurs bedeutet 'humanoider Roboter' dreierlei: Menschenähnliche Abmessungen, menschenähnliche Massen und menschenähnliche Beweglichkeit. Die Forderung nach humanoiden Abmessungen und Bewegungsmöglichkeiten ergibt sich aus dem für Menschen geschaffenen Umfeld, in dem der Roboter agieren soll. So hätte ein üblicher Industrieroboter zum Beispiel Probleme, eine Spülmaschine auszuräumen oder einen Gegenstand aus einem hoch hängenden Küchenregal zu greifen.

Weitere Schwerpunkte der Vorüberlegungen bilden die Akzeptanz eines Roboters durch seinen Bediener oder Nutzer, der kein Ingenieur oder Fachmann

sein wird, sowie eine mögliche Gefährdung des Menschen durch den Roboter. Da beide in enger partnerschaftlicher Kooperation miteinander tätig sein sollen, darf der Roboter für den Menschen niemals eine Gefahr darstellen. Hierfür sind neben entsprechenden umfangreichen Überwachungsmechanismen in der Software auch geringe bewegte Massen sowie elastische Strukturen gefordert, die auch bei einer unbeabsichtigten Kollision nicht zu Verletzungen führen. Bereits hier zeigt sich, dass sich eine für Industrieroboter übliche massive und steife Konstruktion verbietet. Die zu fordernde Genauigkeit der Bewegungen muss daher nicht aus der Steifigkeit der Strukturen sondern durch Sensorik und Regelung erreicht werden.

Des Weiteren wird ein Mensch einen Roboter am ehesten als Partner und Mitarbeiter akzeptieren, wenn sein Äußeres nicht furchterregend ist und wenn dessen Bewegungen für ihn berechenbar sind. Ein Roboter, der den Kopf um 360° drehen oder die Arme in für Menschen unübliche Positionen bringen oder mit unerwartet hoher Geschwindigkeit bewegen kann, würde mit Sicherheit Skepsis erregen, auch wenn diese Eigenschaften für sich gesehen vielleicht durchaus wünschenswert wären.

Der Mensch ist im Stande, sehr hohe Winkelgeschwindigkeiten zu realisieren. Als Beispiele seien Augenbewegungen von maximal rechts bis maximal links in 0,1s genannt, dies entspricht 1200°/s, aber auch

die maximale Winkelgeschwindigkeit der Kopfdrehung eines Menschen liegt in ähnlicher Größenordnung. Die Realisierung solcher Geschwindigkeiten stellt den Konstrukteur vor hohe Anforderungen. Kopfdrehungen mit diesen Geschwindigkeiten führt der Mensch jedoch nur im Falle einer Gefahr aus (wenn sich beispielsweise von hinten ein unbekanntes Objekt nähert), so dass hier die Anforderungen an den Roboter deutlich zurückgenommen werden können. Die Forderungen an die Augenbewegungen (hier Kamerabewegungen) bleiben jedoch hiervon unberührt.

Auch die Hand des Roboters ist mit fünf Fingern an das menschliche Vorbild angelehnt. Ihr Daumen ist opponierbar, so kann eine große Auswahl unterschiedlicher Greifmuster realisiert werden. Ihr Antrieb mit flexiblen Fluidaktoren weicht dabei von den typischen starren Antriebselementen vieler anderer künstlicher Hände ab.

2 Der Arm

Grundlage für die Armkonstruktion bilden menschliche Abmessungen sowie Analysen für Menschen typischer Bewegungen. Abbildung 1 zeigt die daraus abgeleitete kinematische Kette für einen humanoiden Arm. Basis sind die durchschnittlichen Körperabmessungen einer 165cm großen Frau.

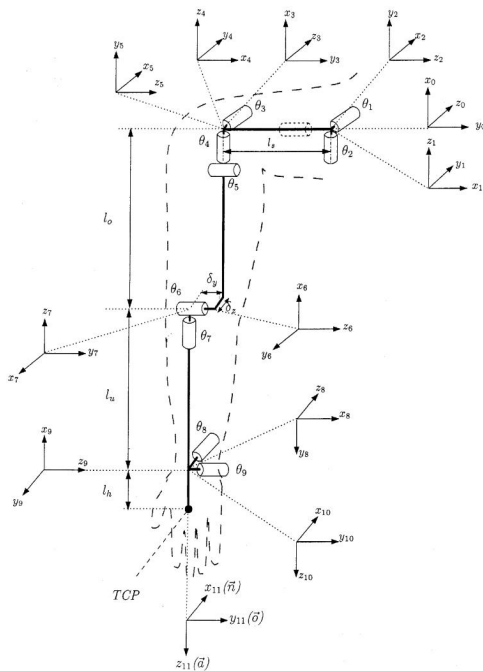


Abbildung 1: Kinematische Kette für einen humanoiden Arm aus [1].

In der ersten Entwicklungsstufe wird ein Arm mit

sieben Freiheitsgraden realisiert. Eine spätere Erweiterung um zwei zusätzliche Freiheitsgrade im Schulterbereich ist vorgesehen. Der Arm soll ein Gewicht von mindestens 3 kg halten und mindestens 1 kg mit voller Dynamik bewegen können. Die Maximallast von 3 kg muss nicht mit voller Geschwindigkeit bewegt werden können. Eine Begrenzung der Dynamik ist hier aus den bereits diskutierten Sicherheitsgründen sogar sinnvoll und erwünscht. Eine weitere Anforderung ist die Bereitstellung eines durchgängigen Hohlraums möglichst großer Abmessungen, um Versorgungsleitungen z.B. für die Hand durch den Arm führen zu können.

Bereits bei den ersten Vorüberlegungen wurde klar, dass der Arm, um alle Forderungen zu erfüllen, aktorfrei sein muss [2]. Das Mitbewegen von Elektromotoren und Getrieben z.B. für den Antrieb des Handgelenks, erhöht die bewegten Massen, die im System gespeicherte kinetische Energie, die erforderlichen Antriebsleistungen und damit auch das Gewicht aller nachfolgenden Gelenke. Diese Überlegungen führten zum Konzept eines Arms, bei dem sich alle Antriebe und Getriebe im Torso befinden. Zur Übertragung der Betätigungskräfte werden spezielle, hoch biegsame Seilzüge und Hydrauliklösungen untersucht. Lediglich die drei Drehachsen des Schultergelenks werden direkt angetrieben.

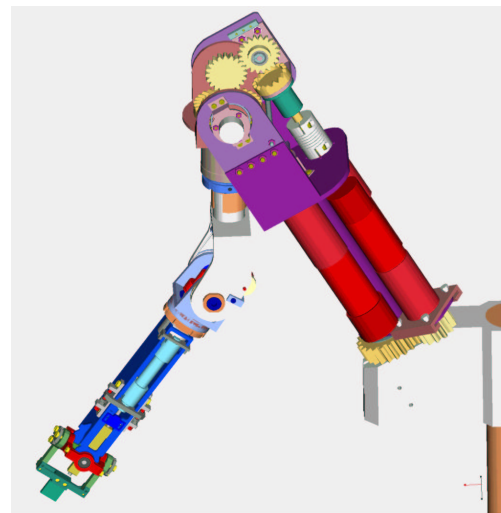


Abbildung 2: 3D-Ansicht des ersten Arm-Prototyps.

Umfangreiche Simulationen hierzu wurden durchgeführt, die Konstruktionsarbeiten und Tests an den zahlreichen Varianten sind jedoch noch nicht abgeschlossen. Abbildung 2 zeigt den Roboterarm, wie er zur Zeit aufgebaut wird. Tabelle 1 zeigt die mit dieser Lösung erreichbaren Verdrehwinkel und Winkelgeschwindigkeiten sowie die Massen der Einzelteile. Die

Summe der Massen aller bewegten Teile des Arms ohne Hand beträgt nur ca. 2,4 kg.

Schulter	
Den Arm nach hinten und nach vorne Drehen	$-40^\circ \dots +160^\circ$
Den Arm nach unten und nach oben Heben	$-90^\circ \dots +80^\circ$
Drehung Oberarm	170°
Ellenbogen	
Beugen	$-10^\circ \dots +150^\circ$
Unterarm	
Drehung des Unterarms	$\pm 80^\circ$
Handgelenk	
Nach links und rechts Beugen	$\pm 60^\circ$
Nach oben und unten Beugen	$\pm 30^\circ$
Bewegungsgeschwindigkeit aller Armgelenke	$> 90^\circ/s$
Schulter	800 g
Oberarm	700 g
Unterarm	900 g

Tabelle 1: Verdrehwinkel und Winkelgeschwindigkeit der sieben Freiheitsgrade, Masse der bewegten Armsegmente.

Bei der Auslegung der Antriebsmotoren wurde grundsätzlich zwischen Dauerlast und Spitzenlast unterschieden. So müssen die Motoren die Drehmomente für hohe Beschleunigungen nur kurzzeitig erbringen, während das dauernde Halten einer Last unter Umständen über Minuten möglich sein muss. Die ausgewählten DC-Motoren können schadlos und wiederholt kurzzeitig das vier- bis sechsfache ihres Dauermoments erbringen. So wurde immer der kleinstmögliche Antrieb ausgewählt, was zur Gewichtsersparnis des Gesamtsystems beiträgt.

2.1 Sensorik

Die Winkel-, Kraft- und Drehmomentmessung muss einerseits zum Teil hohe Anforderungen an Genauigkeit erfüllen, andererseits darf sie, wie zum Beispiel im Handgelenk, nur ein Minimum an Bauraum benötigen. Alle Sensorsignale werden direkt am Sensor digitalisiert und per CAN-Bus an die Steuerrechner im Torso übertragen. So können der Verdrahtungsaufwand und die mit langen Übertragungswegen immer verbundenen EMV-Probleme minimiert werden. Wo dies möglich ist, sollen zur Winkelmessung absolut messende Sensoren zum Einsatz kommen, um nach dem Einschalten des Systems eine Referenzfahrt des Gelenks zu vermeiden.

2.1.1 Winkelmessung

Die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit des Greifers sind deutlich geringer als z.B. bei einem Montageroboter. Gefordert ist eine inhärente Genauigkeit besser als 5 mm an den Fingerspitzen. Die Feinpositionierung wird später, wie beim Menschen auch, durch

Nachregelung basierend auf Bildverarbeitung erfolgen. Da die zu fordernde Genauigkeit der Winkelmessung abnimmt, je näher das jeweilige Gelenk sich an der Hand befindet, werden drei unterschiedliche Sensorprinzipien zum Einsatz kommen. Aus Platzgründen können nur in der Schulter absolut messende optische Winkelencoder mit einer Auflösung von 5000 Schritten pro Umdrehung eingesetzt werden.

Für die Ellenbogengelenke sind spezielle, relativ kleine Messpotentiometer mit einer Auflösung und Wiederholgenauigkeit besser als $0,1^\circ$ vorgesehen. Im Handgelenk werden neuartige magneto-resistive Winkelsensoren vom Typ LK40 der Firma Sensitec zum Einsatz kommen, die nur eine Fläche von 10mm x 7,25mm und inklusive des Betätigungsmagneten eine Höhe von ca. 3mm in Anspruch nehmen. Abbildung 3 zeigt einen solchen Sensor zusammen mit dem Stabmagneten, der das benötigte Magnetfeld erzeugt.

Der Sensor liefert zwei zum Sinus und Cosinus des Magnetfeldwinkels proportionale Spannungssignale, aus denen per Division und Bildung des Arkustangens der Gelenkwinkel berechnet werden kann [3]. Durch die erforderliche Division kürzen sich Fehler in den Ausgangsspannungen infolge von Temperatur oder Veränderungen der Stärke des Magnetfelds heraus. Der Hersteller verspricht eine Genauigkeit besser als 1° und eine Reproduzierbarkeit besser als $0,1^\circ$. Nichtlinearitäten und andere systematische Fehler können durch Kalibrieren der Sensoren weitgehend ausgeglichen werden, so dass eine Gesamtgenauigkeit von besser als $0,5^\circ$ realisierbar scheint, was hier ausreicht.

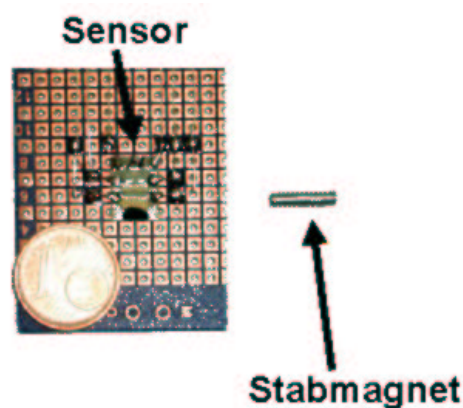


Abbildung 3: Testaufbau des magneto-resistiven Winkelsensors für das Handgelenk.

2.1.2 Kraft- und Drehmomentenmessung

Zur Messung der drei Kraft- und Drehmomentkomponenten am Handgelenk wird eine Kraft-Momentenmessnabe des Typs Mini45 des Herstellers ATI Intelligent Automation zum Einsatz kommen. Dieser Sensor hat lediglich einen Durchmesser von 45mm und eine Dicke von 16mm bei einem Gewicht von 92g. Die Messbereiche sind für Kräfte 580N in jeder Richtung und 20Nm für Drehmomente in jeder Richtung. Die für diesen Einsatzfall sehr wichtige Überlastbarkeit des Sensors beträgt bei Kräften 900% und bei Drehmomenten mindestens 500%.

In den Ellenbogengelenken werden die Drehmomente voraussichtlich durch Kraftsensoren des Typs XF7C-100-M5 des Herstellers disynet in den Seilzügen gemessen. Der Messbereich beträgt hier 500N, die Abmessungen 10mm x 10mm (siehe Abbildung 4). Falls eine hydraulische Kraftübertragung zum Einsatz kommt, sollen die Hydraulikdrücke zur Drehmomentmessung herangezogen werden. Im Schultergelenk werden die Drehmomente durch Miniatur-Drehmomentsensoren gemessen, deren Auswahl ist noch nicht abgeschlossen.



Abbildung 4: Kraftsensor zur Momentenmessung im Ellenbogen.

3 Der Roboterhals

Aufgabe der Halsmechanik ist das Bewegen des Kopfes um vier Freiheitsgrade. Neben Drehen, Kippen und Neigen des Kopfes wurde zur Verbesserung des Sichtfelds als vierter Freiheitsgrad das Nicken um ein Gelenk an der Basis des Kopfs eingeplant. In Tabelle 2 sind die Anforderungen an Verdrehwinkel und Winkelgeschwindigkeiten aufgeführt. Abbildung 5 zeigt die Konstruktion, wie sie derzeit realisiert wird. Wie bereits beim Arm wurde streng darauf geachtet, dass die Antriebe wo immer möglich nicht mitbewegt werden. Das Neigen nach vorne und hinten und das seitliche Kippen des Halses wird über zwei Linearbewegungen

und die Halsdrehung und das Nicken wird mit einer Rotationsbewegung realisiert.

	Verdrehwinkel	Winkelgeschwindigkeit
Drehen des Halses	$\pm 90^\circ$	$90^\circ/s$
Nach vorne und hinten Neigen	$\pm 30^\circ$	$60^\circ/s$
Seitliches Kippen	$\pm 30^\circ$	$60^\circ/s$
Nicken des Kopfes	$\pm 30^\circ$	$60^\circ/s$
Bewegungsgenauigkeit um jede Achse	$< 1^\circ$	
Masse aller zusätzlich im Kopf untergebrachten Bauteile	1,0kg	
Masse aller bewegten Hals- und Pan-Tilt-Bauteile	1,5kg	

Tabelle 2: Maximale Verdrehwinkel und Winkelgeschwindigkeiten der vier Freiheitsgrade, Masse der bewegten Hals- und Kopfbauteile.

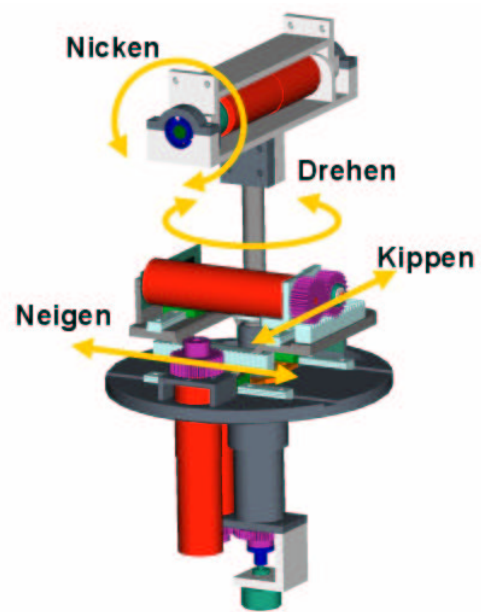


Abbildung 5: Roboterhals

3.1 Sensorik

Im Roboterhals müssen nur Drehwinkel gemessen werden. Eine Messung der Drehmomente ist lediglich zu Überwachungszwecken (Kollisionserkennung) notwendig, so dass die geforderten Genauigkeiten gering sind. Es dürfen daher die leicht zu messenden Motorströme zur Bestimmung der Drehmomente herangezogen werden. Zur Winkelmessung im Halsgelenk kommen sowohl potentiometrische Sensoren nach dem Kontaktfolien-Prinzip (Sensofoil) der Firma metallux [4] für das Beugen und das Neigen, sowie absolut messende Winkelencoder für die Drehung und das Nicken zum Einsatz.

4 Bewegung der Kameras mit Pan-Tilt-Einheiten

Als Bilderfassungssystem des humanoiden Roboters sind zwei unabhängig bewegliche Kameras vorgesehen, die nicht nur mit bis zu $1200^\circ/\text{s}$ extrem schnell, sondern auch mit sehr hoher Präzision positioniert werden sollen. Winkelfehler in der Kameraposition gehen direkt in die Genauigkeit z.B. einer Abstandsmessung durch Triangulation ein. Die Positionierung der Kameras muss deshalb mit einer Genauigkeit von deutlich besser als $0,1^\circ$ erfolgen. Jede Kamera hat zwei Freiheitsgrade zur Drehung um die horizontale und vertikale Achse. Die hohen Winkelbeschleunigungen sind nur dann zu erreichen, wenn keiner der Antriebsmotoren mitbewegt wird. Abbildung 6 zeigt die derzeit favorisierte und im Aufbau befindliche Konstruktion, die rechnerisch die geforderten Winkelbeschleunigungen realisieren kann. Als Antriebe kommen hier hochdynamische bürstenlose Gleichstrommotoren zum Einsatz. Zur Winkelmessung werden optische Inkrementalgeber mit einer Auflösung von mindestens 2000 Inkrementen pro Umdrehung eingesetzt werden, die bei Vierfachauswertung die erforderliche Auflösung und Genauigkeit erbringen. Die hierdurch notwendige Referenzfahrt nach dem Einschalten wird bei der Kamerabewegung als vertretbar angesehen.

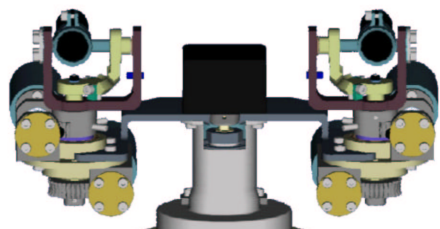


Abbildung 6: Kamera Pan-Tilt-Einheiten

5 Hardware-Architektur

Die Interaktion des Roboters mit dem Menschen setzt grundlegende sensomotorische Fähigkeiten seitens des Roboters voraus. Ziel ist es diese Voraussetzungen zu schaffen bzw. vorhandene Fähigkeiten zu verbessern. Unterteilen lässt sich diese Aufgabenstellung in den Entwurf einer Rechnerarchitektur, die die Sensorik mit einschließt und eine Basissteuerung der Roboterkomponenten Plattform, Arme und Kopf. Im Bereich Rechnerarchitektur geht es hauptsächlich darum, die auf ARMAR I (siehe Abbildung 7) vorhandene Rechnerarchitektur [5] hinsichtlich der Leistungsfähigkeit zu optimieren und weitere Sensoren zur Regelung vorzusehen.



Abbildung 7: Armair I

Es ist nötig die Regelzyklen der untersten Ebene auf ein Minimum zu reduzieren, damit die resultierenden Bewegungen flüssig und somit menschenähnlich erscheinen. Um diese kurzen Regelzyklen erreichen zu können soll auf unterster Ebene ein leistungsfähiger digitaler Signalprozessor (DSP) eingesetzt werden, der die Regelung von bis zu zwei Motoren übernimmt. Die Kommunikation zu den DSP soll vom PC über eine Mittelschicht erfolgen, die mehrere DSP zu funktionellen Gruppen zusammenfasst. Die geplante Hardware-Architektur ist in Abbildung 8 dargestellt.

Eine weitere Grundvoraussetzung für eine sinnvolle Interaktion mit dem Menschen stellt die Mobilität des Roboters dar. Diese wird zur Zeit durch eine mobile Plattform sichergestellt. Die Navigation der Plattform erfolgt durch Odometrie aus den Impulsgebern der Antriebsmotoren. Zusätzlich kann die aktuelle Position mit Hilfe von zwei Laserscannern anhand einer Karte korrigiert werden.

6 Die flexible Leichtbauhand

Die Besonderheit der Leichtbauhand ist ihr Antrieb mittels flexibler Fluidaktoren [6, 7]. Flexible Fluidaktoren sind elastische Kammern, die bei Beaufschlagung mit Druck durch Expansion ein Gelenk beugen. Sie erlauben die Konstruktion einer elastischen Hand, die eine gefahrlose Interaktion mit dem Menschen unterstützt.

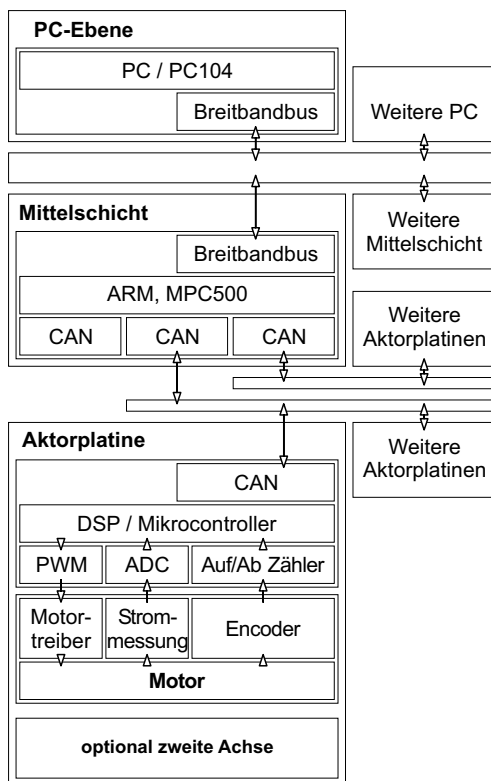


Abbildung 8: Hardware-Architektur für Armar II

6.1 Mechanik

Die Mechanik der anthropomorphen Fünf-Finger-Hand besteht aus einem Aluminiumskelett mit Stahlachsen. Zum Beugen besitzen alle Finger je zwei unabhängige Freiheitsgrade, der Daumen ist mit einem dritten Gelenk zur Realisierung der Oppositionsstellung ausgestattet. Die Aktoren werden durch eine kompakte Hydraulikeinheit mit 11 2/2-Wege-Ventilen und einer Pumpe angetrieben. In einer ersten Stufe soll ihre Einsatzfähigkeit an einem sensorlosen Prototypen getestet werden.

Zukünftige Prototypen der Hand werden mit Gelenkwinkelsensoren zur Positionsbestimmung, Kraftsensoren zur Erkennung von Objektkontakten und Drucksensoren zur Überwachung des Fluiddrucks ausgestattet.

6.2 Dynamiksimulation

Die Simulation im Rahmen der Handentwicklung vereinigt eine Vielzahl unterschiedlichster Aufgabenstellungen. Im Rahmen der Modellierung der Fluidaktoren ist nicht nur der funktionale Zusammenhang des Antriebsmoments in Abhängigkeit vom beaufschlagten Druck von Interesse, sondern auch die Frage nach einer optimalen Aktorgeometrie. Letzteres wird

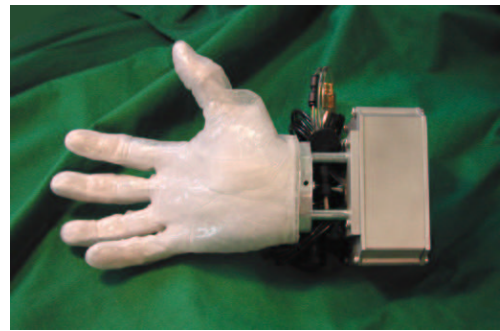


Abbildung 9: Konzept einer hydraulisch angetriebenen Fünf-Finger-Hand.

anhand spezieller FEM-Modelle untersucht.

Für Studien an der Hand als mechanisches System bieten sich Mehrkörpersimulationspakete, wie Alasca (siehe Abbildung 10) oder Adams an. Die Pakete stellen eine Vielzahl an Werkzeugen zu gängigen Problemstellungen (Bewegungsanalysen, Parameteridentifikation, etc.) bereit, welche auch auf speziellere Bedürfnisse anpassbar sind.

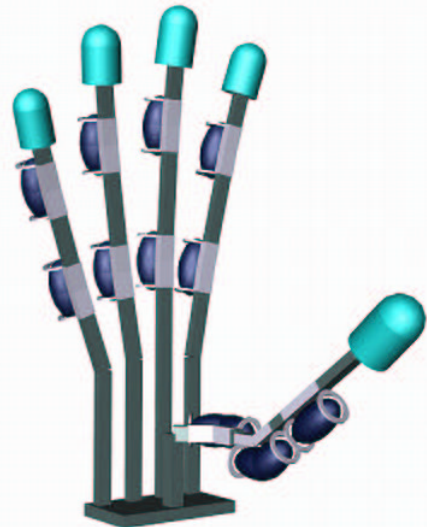


Abbildung 10: Mit Alasca erstelltes Handmodell.

Um Anforderungen, wie beispielsweise der Integration des Modells in die im Rahmen des SFB 588 entwickelte Virtual-Reality-Umgebung gerecht zu werden, ist auch eine softwareunabhängige Diskussion der Bewegungsgleichungen in analytischer Form erforderlich. Des Weiteren zählen Gelenkanschlagsmodelle,

sowie Modelle für Ein- und Mehrpunktkontakte bei Greifvorgängen ebenso zum Aufgabenkreis Modellbildung und Simulation, wie die Einbindung mechatronischer Komponenten, zu denen beispielsweise Gelenksensoren und Hydraulikregelung zählen.

6.3 Steuerung und Regelung

Die Steuerung der Hand wird in einem hierarchischen System erfolgen [8, 9] (siehe Abbildung 11). Die oberste Ebene zielt auf die Auswahl eines für die gestellte Aufgabe geeigneten Greifmusters aus einem vorgegebenen Repertoire. Dieses beinhaltet verschiedene Kraft- und Präzisionsgriffe sowie Gesten. Es ist an das Klassifikationsschema von Cutkosky und Wright [10] angelehnt. Während der Ausführung eines Greifvorgangs ist die oberste Ebene für die Hand-Arm-Koordination und die zeitliche Abstimmung der Greifphasen wie Pregrasp, Anrückbewegung, Zugreifen, Halten, Loslassen und Abrückbewegung verantwortlich.

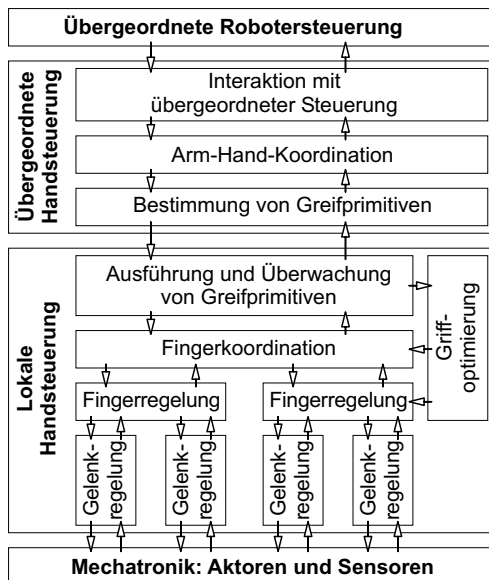


Abbildung 11: Hierarchische Handsteuerung

Die lokale Handsteuerung wird die vorgegebenen Greifprimitive in Führungsgrößen für die untergeordneten Positions- und Kraftregler umsetzen. Bei der Entwicklung und dem Test dieser Basisregler [11] wurde insbesondere das nichtlineare Momentenkennfeld und das druckabhängige viskoelastische Verhalten des Aktors berücksichtigt.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurden die grundlegenden mechatronischen Konzepte für die Arme, Kopf und Hände

eines humanoiden Roboters dargestellt. Derzeit werden Prototypen der einzelnen Baugruppen aufgebaut. Die weiteren Schritte werden den Test der Komponenten sowie die Entwicklung und Anpassung geeigneter Steuer- und Regelungsalgorithmen beinhalten.

Die Autoren danken an dieser Stelle der DFG für die finanzielle Unterstützung der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Rahmen des SFB 588 'Lernende und kooperierende multimodale Roboter'.

Literatur

- [1] ASFOUR, T.: *ARMAR*. Interne Veröffentlichung des Forschungszentrums Informatik FZI, 2002.
- [2] BEHRENDT, M.: *Entwicklung und Konstruktion der Armmechanik und Sensorik eines Humanoiden Roboters*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [3] SENSITEC: *Neuartige magnetoresistive Winkelsensoren für den Einsatz in Drehgebern*. Produktinformation.
- [4] METALLUX: *Sensofoil Weg- und Winkelsensoren*. Produktinformation, 2000.
- [5] ASFOUR, T., K. BERNIS und R. DILLMANN: *The Humanoid Robot ARMAR: Design and Control*. In: *Proceedings of the 2000 International Conference on Humanoid Robots, MIT, Boston, USA, September 2000*.
- [6] SCHULZ, S., C. PYLATIUK und G. BRETTHAUER: *A New Ultralight Anthropomorphic Hand*. In: *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Seoul, Korea, Seiten 2437-2441*. IEEE Computer Society Press, 2001.
- [7] SCHULZ, S., C. PYLATIUK, J. MARTIN und G. BRETTHAUER: *Die Anthropomorphe FZK-Hand*. In: DILLMANN, R., R. D. SCHRAFT und H. WÖRN (Herausgeber): *Robotik 2002 Leistungsstand - Anwendungen - Visionen - Trends (VDI-Berichte 1679)*, Seiten 531-536. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, 2002.
- [8] OSSWALD, D. und H. WÖRN: *Mechanical System and Control System of a Dexterous Robot Hand*. In: *Proceedings of the 2001 International Conference on Humanoid Robots, Waseda University, Tokyo, Japan, November 2001*.

- [9] BURGHART, C., S. YIGIT, O. KERPA, D. OSSWALD und H. WÖRN: *Concept for Human Robot Co-operation Integrating Artificial Haptic Perception*. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (IAS-7), Marina del Rey, USA, März 2002*.
- [10] CUTKOSKY, M. R. und P. K. WRIGHT: *Modeling manufacturing grips and correlations with the design of robotic hands*. In: *Proceedings of the 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, USA*, Seiten 1533–1539. IEEE Computer Society Press, 1986.
- [11] BECK, S., A. LEHMANN, J. MARTIN und R. MIKUT: *Modellbildung und Fuzzy-Gelenkpositionsregelung für eine 5-Finger-Roboterhand mit flexiblen Fluidaktoren*. In: MIKUT, R. und M. REISCHL (Herausgeber): *Proceedings, 12. Workshop Fuzzy Systeme des GMA-FA 5.22., Dortmund*, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6767, Seiten 177–191. Forschungszentrum Karlsruhe, November 2002.