

**Entwurf, Auslegung und Umsetzung eines Systems neuartiger
Gelenkmodule für rekonfigurierbare Leichtbau-Gelenkarmroboter**

Roland-Kosta Tschakarow

Universität Bremen

**Entwurf, Auslegung und Umsetzung eines Systems neuartiger Gelenkmodule für
rekonfigurierbare Leichtbau-Gelenkarmroboter**

Vom Fachbereich für Physik und Elektrotechnik
der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Roland-Kosta Tschakarow
wohnhaft in Untergruppenbach

Referent: Prof. Dr.-Ing. Axel Gräser
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik

Eingereicht am: 20.03.2009
Tag des Promotionskolloquiums: 03.11.2009

Publication Series of the Institute of Automation
University of Bremen

Series 3-Nr.4

Roland-Kosta Tschakarow

**Entwurf, Auslegung und Umsetzung eines Systems
neuartiger Gelenkmodule für rekonfigurierbare
Leichtbau-Gelenkarmroboter**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2009

Publication Series of the INSTITUTE OF AUTOMATION, UNIVERSITY OF BREMEN:

- 1 Colloquium of Automation, Salzhausen
- 2 Automation
- 3 Robotics
- 4 Control Theory
- 5 Brain Computer Interface
- 6 Virtual and Augmented Reality
- 7 Image Processing

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9157-0

ISSN 1861-5457

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die Grundlagen für diese Arbeit entstanden im Zuge vieler Überlegungen, die im Beginn des Forschungsprojekts AMaRob lagen. Das Projektziel des alltagstauglichen Rehabilitationsroboters FRIEND wurde vom Institut für Automatisierung an der Universität Bremen initiiert und als Verbundprojekt vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Als Forschungs- und Kooperationspartner beteiligte sich die Amtec Robotics GmbH in Berlin, die ich als Geschäftsführer leitete. Die anspruchsvollen Aufgaben im Rahmen des Projektes und die weit gesteckten Ziele der Projektmitglieder waren mir Ansporn, meinen Beitrag für das Gelingen des Vorhabens mit der Entwicklung des neuen Leichtbauroboters zu leisten.

Mein tiefer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Axel Gräser, der mich ermutigt, unterstützt und während der Promotion begleitet hat. Ebenso bin ich Herrn Prof. Dr. Bernd Orlik für seine fruchtbaren Hinweise sehr dankbar.

Ich danke der Schunk GmbH & Co. KG, die mit Amtec Robotics im Verlauf des Projekts fusionierte, für die Fortführung der Forschungskooperation mit der Universität Bremen und den Willen, Leichtbauroboter in ein neues Marktumfeld einzuführen. Mein Dank richtet sich ebenso an Kollegen und Mitarbeiter des Unternehmens, die den Bau der Roboter in Konstruktion, Fertigung und Montage begleitet und zur Realisierung beigetragen haben.

Die vertrauensvolle Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung in Stuttgart zur Integration der Leichtbauroboter in das Projekt Care-O-bot 3 hat mich zusätzlich inspiriert. Mein besonderer Dank gilt Christopher Parlitz und Martin Hägele.

Schließlich, doch nicht zuletzt, danke ich meiner Familie, meiner Frau und meinen Eltern für Geduld, Ratschlag und Anregung.

Untergruppenbach im April 2010

Abstract

The use of light weight robotic manipulators increases in applications and processes so far considered non-automatable. Service robotics therefore gains more and more attention. The crucial issue for these applications is cooperation between human being and servicing robot. This thesis proposes a set of building block type light weight rotary joint modules with adequate connecting elements (links) for manufacturing light weight robots suitable for automating service tasks in public, industrial and medical environments. The components developed can be standardized and are by combination capable of building manipulators with tailor made light weight kinematics in an economic way. This way these modular robots allow for reconfiguration (meaning to rebuild kinematics in a different way) in a relatively short time. Thus light weight modular robots capable of handling payloads of up to 10 kg and built by configuration represent a novelty in state-of-the-art of science and technology.

The first part of this thesis comprises feasibility and draft concept of the complete building block architecture generalizing the requirements for service robots in the area of mobile manipulation. The requirements catalog is strongly influenced by the goals of the AMaRob research project, coordinated at the Institute of Automation at the Bremen University. AMaRob targets the development of rehabilitation robots for severely impaired persons by merging a wheel chair and a dextrous antropomorphic light weight articulated robot.

The second part of this thesis addresses the realization of the building block system and the adequate components as well as building the target robotic manipulator for AMaRob. Special attention is paid to selecting heavy-duty material and capable machine components as well as designing the drive train, developing electronics, software and closed loop control. Similarly the aspect of mechatronical integration is emphasized while resolving heat problems caused by a high level of miniaturization.

The thesis applies two functional levels to proof operation and capability of the building block set for applications in service robotics. The first level is represented by the newly developed joint modules with integrated control and power electronics and the necessary mechanical and electrical links. This part assesses the components performance concerning mechanical robustness, closed loop control and fully loaded operation. The second level studies are related to a 7DOF light weight modular robot built to the requirements of the AMaRob project. Based on an open multiple-stage control architecture introduced to control the robot the data interface is optimized for throughput. Following this cartesian trajectory and force control strategies are verified. In addition to open and closed loop cartesian control the reconfiguration capability is shown by building several different kinematics from identical components. Finally the work provides analysis in comparison with state-of-the-art light weight robots to outline the system solution.

Kurzfassung

Leichtbauroboter finden zunehmend Anwendung in der Lösung bislang nicht automatisierbarer Prozesse. Ein wesentliches Augenmerk liegt auf der Servicerobotik, deren Kernpunkt in einer Kooperation zwischen Mensch und dienstleistendem Roboter begründet ist. Die vorliegende Arbeit schlägt einen Baukasten von Leichtbau-Gelenkmodulen und geeigneten Verbindungselementen zur Herstellung von Leichtbaurobotern vor, die für Dienstleistungsaufgaben im öffentlichen, industriellen und medizinischen Umfeld geeignet sind. Mit Hilfe der entwickelten standardisierbaren Komponenten ist es möglich, Manipulatoren mit anwendungsspezifischer Kinematik modular in Leichtbauweise und wirtschaftlich aufzubauen sowie bei Bedarf in vergleichsweise kurzer Zeit zu rekonfigurieren (d.h. die Kinematik umzugestalten). Die auf dem Wege der Konfiguration errichteten modularen Leichtbauroboter besitzen im Vergleich zum Stand der Forschung Neuheitscharakter.

Die Arbeit umfaßt im ersten Teil Entwurf und Konzeption des gesamten Baukastens unter verallgemeinernder Betrachtung der an Serviceroboter im Umfeld der mobilen Manipulation gerichteten Anforderungen. Wesentlichen Einfluß auf die Formulierung der Anforderungen hat die im Mittelpunkt des Forschungsprojekts AMaRob stehende Zielstellung eines Rehabilitationsroboters für hochgradig querschnittsgelähmte Anwender. Der AMaRob-Rehabilitationsroboter basiert auf der Verschmelzung eines Rollstuhls und eines wendigen Leichtbau-Gelenkarmroboters mit antropomorpher Kinematik.

Der zweite Teil dieser Arbeit widmet sich der Realisierung des Baukastensystems und seiner Komponenten sowie dem Aufbau der Zielarchitektur für den AMaRob-Leichtbauarm. Besondere Aufmerksamkeit erhalten die Auswahl der Werkstoffe und Maschinenelemente, die Auslegung des Antriebsstrangs, die Entwicklung der erforderlichen Elektronik, Software und Regelungen sowie die mechatronische Integration unter Berücksichtigung der wegen des hohen Miniaturisierungsgrades problematischen thermischen Verhältnisse.

Funktion und Eignung des Baukastens für die Anwendung in der Servicerobotik werden auf zwei funktionalen Ebenen nachgewiesen. Die erste Ebene wird durch die entwickelten Gelenkmodule mit integrierter Steuer- und Regelelektronik und die für den Zusammenbau erforderlichen Verbindungskomponenten repräsentiert. Eingehende Untersuchungen zur Festigkeit der Konstruktion, zu Robustheit und Tauglichkeit der Regelung dienen dem Funktionsnachweis der Komponentenentwicklungen. Die zweite Ebene der Untersuchungen bezieht sich auf den modularen 7DOF-Leichtbauarm, der als Zielsystem für das Projekt AMaRob definiert ist. Anhand einer mehrstufigen offenen Steuerungsarchitektur wird der Leichtbauarm einer Optimierung der Datenschnittstelle sowie einer Funktions- und Eignungsprüfung mit kartesischer Bahnsteuerung und Kraftregelung unterzogen. Ergänzend wird durch Aufbau mehrerer Kinematiken aus gleichen Komponenten ein Nachweis der projektierten Rekonfigurierbarkeit erbracht. Der Vergleich mit einem den Stand der Forschung repräsentierenden Leichtbauroboter verdeutlicht den Neuheitscharakter und die Abgrenzung zu anderen Entwicklungen.

Inhalt

1	Einführung	8
1.1	Motivation und These	8
1.2	Zielstellung der Forschungsarbeit	10
2	Modulare Roboter – Stand der Forschung	11
2.1	Überblick zu den Entwicklungsrichtungen	11
2.2	Modulare Manipulatoren und Greifsysteme in Leichtbauweise	14
2.2.1	Rekonfigurierbares modulares Handhabungssystem PowerCube	14
2.2.2	Leichtbauarm LWA2 (Amtec Robotics, Deutschland, 2004)	19
2.2.3	Leichtbauarm LeRoS-F (IAT Bremen, Deutschland, 2005)	19
2.2.4	Leichtbauarm MARS (Traclabs, USA, 2003)	19
2.2.5	Leichtbauarm LWR (DLR, Deutschland, 2004)	20
2.2.6	Zusammenfassung	20
3	Konzeption des Gelenkbaukastens	21
3.1	Anforderungen an Leichtbauroboter aus Sicht der Anwender	21
3.1.1	Zielsystem für das Forschungsprojekt AMaRob	21
3.1.2	Beeinflussende Tendenzen	21
3.1.3	Neuartige Anwendungen der Robotik	21
3.2	Eignung der Modularen Robotik	22
3.3	Entwicklungsziele und Zielsystembeschreibung	23
3.4	Methoden für die Umsetzung	25
3.4.1	Mechatronische Integration	25
3.4.2	Konsequente Anwendung von Leichtbauprinzipien	25
3.4.3	Funktionsintegration durch dezentrale Intelligenz	26
4	Realisierung	27
4.1	Vorgehensweise und Leistungsumfang	27
4.1.1	Voruntersuchungen zur Systemauslegung (Phase 1)	27
4.1.2	Entwicklung der Gelenkmodule und Funktionsnachweis (Phase 2)	27
4.1.3	Aufbau des Zielsystems und Funktionsnachweis (Phase 3)	28
4.2	Auslegung des Gesamtsystems und seiner Komponenten	28
4.2.1	Auslegung des Zielsystems und Abstufung der Baugrößen	29
4.2.2	Auslegung der Gelenkantriebe	33
4.3	Entwicklung der Gelenkmodule	36
4.3.1	Festlegung der Werkstoffe und Fertigungstechnik	36
4.3.2	Auslegung der Getriebestufen	36
4.3.3	Auslegung der Gelenklagerung	39
4.3.4	Auswahl des Elektroantriebs	43
4.3.4.1	Eignung aus Applikationssicht	43
4.3.4.2	Vorteile von Permanentmagnet-Synchronmotoren für die Antriebslösung	44
4.3.5	Konstruktion der Gelenkmodule	44
4.3.5.1	Auslegung der Verbindungselemente	45

4.3.5.2	Konstruktive Lösungen zur Integration der Elektronik-Baugruppen	47
4.3.6	Thermische Analyse.....	49
4.3.7	Entwicklung und Aufbau der Gelenkelektronik.....	56
4.3.7.1	Funktionsweise und Miniaturisierung des Antriebsreglers.....	56
4.3.7.2	Stromregelung des PMSM	58
4.3.7.3	Stromrichter und Modulator	62
4.3.7.4	Lage-/Drehzahlregelung und Überwachung.....	65
4.3.7.5	Zusammenfassende Vorgaben für die Elektronik.....	65
4.3.7.6	Lösungskonzept für die Entwicklung der Elektronikbaugruppen.....	65
4.3.7.7	Aufbau der Baugruppe Anschlusseinheit	66
4.3.7.8	Aufbau der Baugruppe Regler.....	68
4.3.7.9	Aufbau der Baugruppe Stromrichter	70
4.3.8	Entwicklung der Gelenksteuerung und –lageregelung.....	74
4.3.8.1	Funktionen der dezentralen Antriebsregelung	74
4.3.8.2	Betriebssystem für die dezentrale Gelenksteuerung.....	76
4.3.8.3	Entwurf der Reglerstruktur und Identifikation der Regelstrecke.....	78
4.3.9	Implementierung der Regelung und Funktionsnachweis	82
4.3.9.1	Schleppabstand und Geschwindigkeitsverstärkung.....	88
4.3.9.2	Verhalten der Gelenkregelung unter Betriebsbedingungen.....	88
4.3.10	Experimentelle Ermittlung der technischen Daten.....	89
4.4	<i>Systemverhalten im Roboterbetrieb und Funktionsnachweis</i>	<i>90</i>
4.4.1	Mehrstufiges Steuerungskonzept für modulare Roboter	90
4.4.2	Optimierung der Datenschnittstelle.....	91
4.4.3	Betrachtungen zur Echtzeitfähigkeit der Steuerung	95
4.4.4	Aufbau des Zielsystems	96
4.4.5	Vergleich mit dem Referenzsystem	98
4.4.6	Nachweis der Rekonfigurierbarkeit.....	101
4.4.7	Kartesische Steuerung und Regelung modularer Roboter.....	101
4.4.7.1	Kartesische Bahnsteuerung.....	101
4.4.7.2	Kartesische Kraftregelung.....	105
5	Zusammenfassung und Ausblick	112
A.	Anhang: Spezifikationen zur Gelenklagerung.....	114
B.	Anhang: Spezifikationen zur Auslegung des Gelenkbaukastens	116
C.	Anhang: Spezifikationen zur mechatronischen Integration	121
D.	Anhang: Spezifikationen zu Software und Steuerung	123
E.	Anhang: Technische Daten der Gelenkmodule	124
F.	Anhang: Variation von Kinematiken durch Rekonfiguration	126
i	Literaturverzeichnis.....	128
ii	Abbildungsverzeichnis.....	134
iii	Tabellenverzeichnis.....	137