

Vom Fachbereich für Mathematik und Informatik
der Technischen Universität Braunschweig
genehmigte Dissertation zur
Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

Bernd Finkemeyer

**Robotersteuerungsarchitektur
auf der Basis von Aktionsprimitiven**

von	Dipl.-Ing. Bernd Finkemeyer
aus	(Geburtsort) Melle
1. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl
2. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Alois Knoll
ingereicht am:	27. 02. 2004
mündliche Prüfung am:	26. 05. 2004

Fortschritte in der Robotik

Band 8

Technische Universität Braunschweig
Institut für Robotik und Prozeßinformatik
Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl (Hrsg.)

Bernd Finkemeyer

**Robotersteuerungsarchitektur auf
der Basis von Aktionsprimitiven**

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2893-4

ISSN 1431-7222

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

...aus Gedanken werden Ideen. Und sie wuchsen zu dieser Arbeit.

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Robotik und Prozessinformatik der Technischen Universität Braunschweig entstanden. Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl für seine anregenden Bemerkungen und unterstützenden Gespräche und Prof. Dr.-Ing. Alois Knoll für die Übernahme des Koreferats. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörn-Uwe Varchmin für vielfältige Hilfestellung während meines Studiums.

Wichtig waren für mich die Diskussionen im Rahmen des SFB 562. Insbesondere die Zusammenarbeit mit Karsten Diethers, Nnamdi Kohn und Ulrike Thomas haben mir interessante Anregungen gebracht. Mein Dank geht an alle meine Kolleginnen, Kollegen und Studenten. Ihre Unterstützung hat vieles in einem angenehmen Arbeitsklima ermöglicht. Besonders Torsten Krögers freundschaftliche Unterstützung bei der Durchführung der Experimente als Student und Kollege hat mir sehr geholfen.

Allen Korrekturlesern sei für ihre Arbeit gedankt. Sie hat erheblich zur Fertigstellung beigetragen.

Vieles wäre nicht gelungen ohne die individuelle Unterstützung und motivierenden Worte, die ich von meinen Eltern sowie Schwiegereltern und anderen Familienangehörigen erfahren habe. Meiner lieben Frau danke ich für ihr Verständnis und ihre Ermutigungen.

Braunschweig, im Februar 2004

Bernd Finkemeyer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anwendungsfelder	1
1.1.1	Industrierobotik	1
1.1.2	Medizinrobotik	2
1.1.3	Servicerobotik	3
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	3
2	Robotersteuerungen und Sensorintegration	5
2.1	Problemeinführung	5
2.1.1	Monitorkonzept	6
2.2	Regelungskonzepte	11
2.2.1	Einschleifige Regelung	11
2.2.2	Modellbasierte Regelung	12
2.2.3	Zustandsregelung	12
2.2.4	Weitere Regelungskonzepte	13
2.3	Roboter-Positionsregelung	13
2.3.1	Robotermodellierung	13
2.3.2	Positionsregelungskonzepte	14
2.4	Roboter-Kraftregelung	15
2.4.1	Kontaktmodellierung	15
2.4.2	Passive Impedance Control	16
2.4.3	Active Impedance Control	17
2.4.4	Admittance Control	18
2.4.5	Explicit Force Control	18
2.4.6	Hybrid Control	19
2.4.7	Parallel Control	21
2.4.8	Zusammenfassung Kraftregelung	22
2.5	Roboterregelung mit sonstigen Sensoren	22
2.5.1	Modellierung	23
2.5.2	Regelung mit Visionsystemen	23
2.6	Ansätze offener Steuerungsarchitekturen	24
2.7	Offene Probleme und Motivation zur eigenen Arbeit	25
3	MiRPA: Middleware zur Realisierung offener Steuerungen	27
3.1	Middlewaredienste	28
3.2	Bekannte Middleware-Lösungen	29
3.2.1	OSACA	29
3.2.2	CORBA	30
3.2.3	DCOM	32
3.2.4	Sonstige Middleware-Plattformen	33
3.3	Leistungsmerkmale	34

3.4	MiRPA-Funktionsweise	35
3.4.1	Nachrichtenobjekt	36
3.4.2	Kommunikationsprotokoll	36
3.4.3	MiRPA-Dienste	43
3.4.4	Kommunikationsmedien	49
3.5	Verifikation der Echtzeit	50
3.5.1	Messaufbau	50
3.5.2	Latenzzeitmessung	50
3.5.3	Datendurchsatzmessung	51
3.5.4	Diskussion der Messergebnisse	52
3.6	Anwendungsbeispiele	54
3.6.1	Einfache Steuerung	54
3.6.2	MATLAB/SIMULINK Anbindung	56
3.7	Zusammenfassung	57
4	Aktionsprimitive	59
4.1	Aktionsprimitivkonzept	59
4.2	Spezifikation der Aktionsprimitivbestandteile	62
4.2.1	Koordinatensysteme	62
4.2.2	Hybrid Move \mathcal{HM}	64
4.2.3	Werkzeugkommando τ	71
4.2.4	Abbruchbedingung λ	72
4.3	Rückgabewerte	73
4.4	Aktionsprimitivübergänge	75
4.4.1	Ansatz 1: Übernahme der aktuellen Position	76
4.4.2	Ansatz 2: Einhaltung der Aktionsprimitivollwerte	76
4.4.3	Ansatz 3: Übernahme von Teilen der Abbruchbedingung	77
4.4.4	Ansatz 4: Übernahme der Istwerte des aktuell aktiven Regelkreises	79
4.4.5	Ansatz 5: Explizite Angabe eines Übergangssollwerts	79
4.4.6	Diskussion der Ansätze	80
4.5	Regeln zur Anwendung von Aktionsprimitiven	81
4.5.1	Platzierung des Task-Frames	82
4.5.2	Mitwanderndes Bezugssystem	83
4.6	Zusammenfassung	87
5	Technische Realisierung	89
5.1	Regelungstechnische Aspekte	89
5.1.1	Regelungsstruktur	89
5.1.2	Adaptive Selektionsmatrix	93
5.1.3	Diskussion des Ansatzes der adaptiven Selektionsmatrix	98
5.2	Softwaretechnische Aspekte	102
5.3	Das Softwarekonzept	102
5.3.1	Das Aktionsprimitiv-Interface	106
5.3.2	Die Aktionsprimitiv-Execution	109
5.3.3	Die Devices	111
5.3.4	Die Joint-Control	114
5.3.5	Der Robot-Task	115

5.3.6	Zusammenfassung	116
6	Aktionsprimitiv-Devices	117
6.1	Online Trajektorienplaner	117
6.2	Kraftregelung	118
6.2.1	Voruntersuchungen	119
6.2.2	Trägheitskompensation	123
6.2.3	Reglerauslegung	126
6.2.4	Experimentelle Ergebnisse	128
6.3	Abstandsregelung	129
6.3.1	Reglerauslegung	130
6.3.2	Experimentelle Ergebnisse	130
6.4	Anmerkungen zur Stabilität	131
7	Ergebnisse	133
7.1	Objektablage	133
7.1.1	Aktionsprimitivnetz	133
7.1.2	Experimentelle Ergebnisse	136
7.2	Objekt platzieren	138
7.2.1	Aktionsprimitivnetz	139
7.2.2	Experimentelle Ergebnisse	140
7.3	Bajonettverschluss	140
7.3.1	Aktionsprimitivnetz	141
7.3.2	Experimentelle Ergebnisse	141
7.4	Akkumontage	144
7.4.1	Aktionsprimitivnetz	145
7.4.2	Experimentelle Ergebnisse	146
8	Zusammenfassung und Ausblick	149
A	Symbolverzeichnis	152
B	Aktionsprimitiv in XML	155
B.1	Aktionsprimitive DTD	155
B.2	XML Beispiel	156
C	Echtzeitverarbeitung der Abbruchbedingung	158
D	Hardware	161
D.1	Rechnerhardware	161
D.2	Roboterhardware	161
D.3	Anpassbaugruppe	161
D.4	Sensorenhardware	164
E	Studien- und Diplomarbeiten	165
F	Eigene Veröffentlichungen	166
	Literaturverzeichnis	167