

Robotik: Programmierung intelligenter Roboter

Springer

Berlin

Heidelberg

New York

Barcelona

Budapest

Hongkong

London

Mailand

Paris

Santa Clara

Singapur

Tokio

Hans-Jürgen Siegert Siegfried Bocionek

Robotik: Programmierung intelligenter Roboter

Mit 95 Abbildungen



Springer

Prof. Dr.-Ing. Hans-Jürgen Siegert
Technische Universität München
Institut für Informatik
Arcisstraße 21
D-80333 München

Dr. Siegfried Bocionek
Siemens AG, MED GT 7
Henkestraße 127
D-91052 Erlangen

ISBN-13: 978-3-540-60665-9 e-ISBN-13: 978-3-642-80067-2
DOI: 10.1007/ 978-3-642-80067-2

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Siegert, Hans-Jürgen:

Robotik: Programmierung intelligenter Roboter/Hans-Jürgen Siegert; Siegfried Bocionek. –

Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hongkong; London; Mailand; Paris;

Santa Clara; Singapur; Tokio: Springer, 1996

NE: Bocionek, Siegfried:

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: Künkel + Lopka Werbeagentur, Ilvesheim

Satz: Reproduktionsfertige Vorlage von den Autoren

SPIN 10518704 45/3142 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Vorwort

Das vorliegende Buch basiert auf dem Stoff der jeweils dreistündigen Vorlesungen „Robotik 1“ und „Robotik 2“, die vom Erstautor unter stetiger Fortentwicklung des Inhalts und der Darstellung seit 1989 regelmäßig an der Fakultät für Informatik der Technischen Universität München angeboten wurden. Viele Ergebnisse stammen auch aus Forschungsprojekten, die am Lehrstuhl für Echtzeitsysteme und Robotik in der Fakultät für Informatik der TU München im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 331 „Informationsverarbeitung in autonomen, mobilen Handhabungssystemen“ erzielt wurden. Dieser Sonderforschungsbereich wird von Professoren aus der Fakultät für Maschinenwesen, der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik sowie der Fakultät für Informatik getragen.

Der Schwerpunkt des Buches liegt nicht auf dem technischen Teil der Robotik, wie beispielsweise dem Bau von Robotern (Mechanik) oder der Regelung der Gelenke (Elektronik). Stattdessen befaßt sich das Buch mit dem Programmieren von Robotern: Es wird die roboterorientierte Programmierung mit Roboterprogrammiersprachen behandelt, grundlegende Fragestellungen der Informationsverarbeitung bei intelligenten Robotern werden aufgegriffen und die Ebene der aufgabenorientierten Programmierung besprochen. Die Anwendungsbeispiele entstammen vorwiegend dem Bereich der flexiblen Fertigung in einer „Fabrik der Zukunft“.

Zum angesprochenen Leserkreis gehören Informatiker, Ingenieure der Fachrichtungen Maschinenbau und Elektrotechnik, Praktiker in der Fertigungsindustrie, Informatikstudenten im Haupt- und Nebenfach, Studenten sonstiger technischer Studiengänge sowie alle Personen, die Interesse an Robotern und deren Programmierung für intelligente Anwendungen zeigen. Das Buch ist in sich geschlossen und für die eigenständige Beschäftigung mit dem Stoff geeignet. Zahlreiche detaillierte Schemazeichnungen und ausführliche Programmierbeispiele, die veranschaulichen und präzisieren, erleichtern das Nachvollziehen des dargebotenen Stoffs.

Im Buch werden in den ersten drei Kapiteln zunächst alle für die Programmierung notwendigen Grundlagen eingeführt. In Kapitel 1 finden sich grundlegende Definitionen und ein kurzer Überblick über die Historie. Die beiden Schwerpunkte des Kapitels 2 sind die Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus von Industrierobotern und die Aufgabenverteilung in einer

sehr komplexen, vernetzten und verteilten Roboterprogrammierungsumgebung. In Kapitel 3 werden die mathematischen Grundlagen der Roboterkinematik, insbesondere Transformationen zwischen Koordinatensystemen auf der Basis homogener Koordinaten, behandelt.

Das Thema des Kapitels 4 ist die Roboterkinematik. Hier werden die Ergebnisse des Kapitels 3 auf konkrete Roboter angewandt. Die Kenntnis der Roboterkinematik ist Voraussetzung für das Verständnis der roboterorientierten Programmierung und der Roboterprogrammiersprachen. Es wird gezeigt, wie durch Vorwärtsrechnung aus den Gelenkwinkeln eines Roboters die Stellung (Position und Orientierung) der Hand berechnet wird. Durch Verfahren der Rückwärtsrechnung werden umgekehrt aus der vorgegebenen Stellung der Hand die hierfür notwendigen Gelenkwinkel berechnet. Als konkretes Beispiel für die Verfahren wird durchgängig der sechsachsige Industrieroboter PUMA 560 gewählt.

In Kapitel 5 werden die verschiedenen Methoden der Programmierung von Robotern geschildert und bewertet.

Kapitel 6 und 7 sind der detaillierten Behandlung der roboterorientierten Programmierung und der Roboterprogrammiersprachen gewidmet. Hierbei werden die Konzepte und die Sprachkonstrukte textueller Programmiersprachen besprochen. Sie werden in einer leicht verständlichen, herstellerunabhängigen Syntax notiert, die meist an C angelehnt ist. Als ausführliche Programmierbeispiele wurden das Beschicken einer Heizzelle und die Benchmark-Aufgabe „Montage des Cranfield-Pendels“ gewählt.

Der zweite Teil des Buchs mit den Kapiteln 8 bis 12 behandelt die aufgabenorientierte Programmierung intelligenter Roboter. Es werden Konzepte der Modellierung und Programmierung basierend auf der Objektorientierung und mehrstufigen, verteilten, reaktiven Aufgabentransformatoren in einer Multiagentenumgebung verwendet.

Kapitel 8 behandelt aktuelle Konzepte zur objektorientierten Umweltmodellierung, insbesondere Entity-Relationship-Ansätze, Frame-Modelle nach Minsky, hierarchische Klassenkonzepte, objektorientierte Wissensbasen und faktenorientierte Wissensdarstellungen in regelbasierten Systemen. Auf dieser Basis läßt sich dann die Funktionsweise vorwärtsverkettender Regelsysteme bei der Implementierung intelligenter Robotikanwendungen darstellen.

Die Konzepte für die aufgabenorientierte Programmierung finden sich in Kapitel 9. Mit Modellierungssprache und Regelsystem als Grundlagen wird die aufgabenorientierte Programmierung von Robotern auf hohem Abstraktionsniveau ermöglicht. Die Aufgaben werden durch mehrstufige, reaktive Aufgabentransformatoren mit Hilfe von Umwelt- und Anwendungswissen dynamisch zur Ausführungszeit in ablauffähige roboterorientierte Befehlssequenzen transformiert. Diese wiederum werden an die beteiligten Roboter und Maschinen weitergegeben und dort ausgeführt.

Kapitel 10 enthält zwei Anwendungsbeispiele. Bei der „Montage des Cranfield-Pendels“ liegt der Schwerpunkt auf der Systemarchitektur von

mehrstufigen, verteilten, reaktiven Aufgabentransformatoren und der Kooperation von Agenten über Auftragsbeziehungen. Das zweite Beispiel zeigt Realisierungsdetails und Abstraktionsschritte der verschiedenen Ebenen eines mehrstufigen Aufgabentransformators für eine einfache Anwendung aus der Klötzchenwelt.

In Kapitel 11 werden, motiviert durch die Planungsfunktionalität eines Aufgabentransformators, verschiedene Varianten des Planens skizziert. Suchstrategien werden am Beispiel des A^* -Algorithmus diskutiert. Mit einfach zu verstehenden Beispielen aus der Klötzchenwelt werden grundsätzliche Eigenschaften exemplarisch vermittelt.

In dem abschließenden Kapitel 12 werden als Beispiel für eine Planungsaufgabe wichtige Schritte und Elemente der „Montageplanung“ behandelt. Als sehr einfaches Beispiel dient hierbei die Montage einer Taschenlampe.

Wir möchten uns an dieser Stelle bei allen bedanken, die am Zustandekommen dieses Buches beteiligt waren, sei es durch Anregungen oder Beiträge zum Inhalt, durch kritische Diskussionen und Verbesserungsvorschläge, durch Mitdenken in den Vorlesungen oder durch Korrekturlesen. Unser Dank gilt ganz besonders den Herren Dr. Klaus Fischer, Dr. Ernst Hagg, Dipl.-Inf. Andreas Koller, Dipl.-Inf. Michael Sassin, Dr. Gerhard Schrott und Dr. Peter Stöhr. Beim Springer-Verlag, speziell bei Herrn Dr. Wössner, bedanken wir uns für die sehr gute Unterstützung, die kritische Durchsicht des Manuskripts, die Verbesserungsvorschläge und die zügige Abwicklung. Nicht vergessen werden soll der herzliche Dank an unsere Ehefrauen Ursula und Andrea für Unterstützung, Verständnis und Toleranz.

Wir wünschen, daß dieses Buch sein Ziel erreicht, das Verständnis der Programmierung intelligenter Roboter zu fördern und die Umsetzung von Ideen aus der Universität in die Praxis zu unterstützen.

München und Erlangen, im Januar 1996

Hans-Jürgen Siegart
Siegfried Bocionek

Inhalt

Vorwort	V
1. Grundlagen	1
1.1 Der Begriff Roboter	1
1.2 Systematik und Einsatzgebiete	6
1.3 Roboter und Automatisierung	9
1.4 Forschungsgebiete	11
2. Teilsysteme eines Roboters	13
2.1 Gelenke	13
2.2 Arbeitsraum und Grundkonfigurationen	15
2.3 Roboterhandgelenke	19
2.4 Freiheitsgrade und Gelenke	20
2.5 Der Roboter PUMA 560	21
2.6 Antrieb	24
2.7 Kinematikmodul	25
2.8 Gelenkregelung	26
2.9 Effektoren	28
2.10 Sensoren	28
2.11 Programmiersystem	29
3. Grundlagen Kinematik	35
3.1 Drehung der Koordinatensysteme	35
3.2 Verschiebung der Koordinatensysteme	37
3.3 Homogene 4x4-Matrizen	39
3.4 Elementare Drehungen	41
3.5 Drehung um eine beliebige Achse	43
3.6 Darstellung der Orientierung	46
4. Roboterkinematik	55
4.1 Denavit-Hartenberg-Regeln	55
4.2 Koordinatensysteme des PUMA 560	59
4.3 Vorwärtsrechnung für den PUMA 560	63
4.4 Effektorkoordinatensystem beim PUMA 560	64

4.5	Orientierung beim PUMA 560	66
4.6	Rückwärtsrechnung	69
4.7	Explizite Rückwärtsrechnung	72
4.8	Spezielle Rückwärtsrechnung für den PUMA 560	76
4.9	Problemfälle bei der Rückwärtsrechnung	84
5.	Programmierung von Robotern	87
5.1	Arten der Programmierung	87
5.2	Programmierung durch Beispiele	88
5.3	Programmierung durch Training	92
5.4	Neuronale Netze	94
5.5	Roboterorientierte Programmierung	96
5.6	Aufgabenorientierte Programmierung	96
5.7	Robotersimulationssystem	97
5.8	Kartesische Echtzeit-Schnittstelle	101
6.	Konzepte roboterorientierter Programmierung	105
6.1	Entstehung der Roboterprogrammiersprachen	105
6.2	Sprachelemente von Roboterprogrammiersprachen	107
6.3	Beispiel für Roboterwelt	108
6.4	Das Framekonzept	110
6.5	Datentypen, Datenobjekte	117
6.6	Ausdrücke	119
6.7	Konstruktoren und Selektoren für Kinematikobjekte	119
6.8	Bewegungsanweisungen	123
6.9	Ein einfaches Anwendungsbeispiel	132
6.10	Kommunikation	135
6.11	Unterbrechungen	138
6.12	Anweisungen für Effektoren und Sensoren	140
6.13	Strukturierung von Programmen	142
7.	Beispiele roboterorientierter Programmierung	145
7.1	Anwendungsbeispiel: Werkstück in Heizzelle	145
7.2	Konzepte zur Montage des Cranfield-Pendels	150
7.3	Programm zur Montage des Cranfield-Pendels	159
8.	Konzepte zur Umweltmodellierung	165
8.1	Objektorientierte Modellierung	165
8.2	Entity-Relationship-Modelle	172
8.3	Semantische Netze	177
8.4	Frame-Modelle	178
8.5	Faktenorientierte Modelle	184
8.6	Regelsysteme	186

9. Konzepte aufgabenorientierter Programmierung	197
9.1 Komponenten	197
9.2 Skripte zur Modellierung von Abläufen	200
9.3 Verhaltensmuster zur Modellierung von Abläufen	202
9.4 Regelsysteme zur Aufgabentransformation	205
9.5 Kommunikation zwischen verteilten Agenten	207
9.6 Grundstruktur eines Aufgabentransformators	209
10. Beispiele aufgabenorientierter Programmierung	215
10.1 Architektur eines mvr-Aufgabentransformators	215
10.2 Regeln des Moduls RM1	217
10.3 Ein dreistufiger, nichtreaktiver Aufgabentransformator	226
10.3.1 Symbolische Ebene	228
10.3.2 Geometrische Ebene	232
10.3.3 Roboterorientierte Ebene	234
11. Planen	237
11.1 Elemente des Planens	237
11.2 Planen als Suche	240
11.3 Taxonomie des Planens	246
11.4 Anwendungsbeispiele aus der Klötzchenwelt	253
12. Montageplanung	263
12.1 Grundlagen	263
12.2 Montagewissen	265
12.3 Montagegraph	266
12.4 Montageplanung und UND/ODER-Graph	270
12.5 Anwendungsaspekte	276
Literatur	281
Abbildungsverzeichnis	291
Register	295