

- Band 171: H. Lutterbach (Hrsg.), Non-Standard Datenbanken für Anwendungen der Graphischen Datenverarbeitung. GI-Fachgespräch, Dortmund, März 1988. Proceedings. VII, 183 Seiten. 1988.
- Band 172: G. Rahmstorf (Hrsg.), Wissensrepräsentation in Expertensystemen. Workshop, Herrenberg, März 1987. Proceedings. VII, 189 Seiten. 1988.
- Band 173: M. H. Schulz, Testmustererzeugung und Fehlersimulation in digitalen Schaltungen mit hoher Komplexität. IX, 165 Seiten. 1988.
- Band 174: A. Endrös, Rechtsprechung und Computer in den neunziger Jahren. XIX, 129 Seiten. 1988.
- Band 175: J. Hülsemann, Funktioneller Test der Auflösung von Zugriffskonflikten in Mehrrechnersystemen. X, 179 Seiten. 1988.
- Band 176: H. Trost (Hrsg.), 4. Österreichische Artificial-Intelligence-Tagung. Wien, August 1988. Proceedings. VIII, 207 Seiten. 1988.
- Band 177: L. Voelkel, J. Pliquet, Signaturanalyse. 223 Seiten. 1989.
- Band 178: H. Göttler, Graphgrammatiken in der Softwaretechnik. VIII, 244 Seiten. 1988.
- Band 179: W. Ameling (Hrsg.), Simulationstechnik. 5. Symposium. Aachen, September 1988. Proceedings. XIV, 538 Seiten. 1988.
- Band 180: H. Bunke, O. Kübler, P. Stucki (Hrsg.), Mustererkennung 1988. 10. DAGM-Symposium, Zürich, September 1988. Proceedings. XV, 361 Seiten. 1988.
- Band 181: W. Hoepfner (Hrsg.), Künstliche Intelligenz. GWA-88, 12. Jahrestagung. Eringerfeld, September 1988. Proceedings. XII, 333 Seiten. 1988.
- Band 182: W. Barth (Hrsg.), Visualisierungstechniken und Algorithmen. Fachgespräch, Wien, September 1988. Proceedings. VIII, 247 Seiten. 1988.
- Band 183: A. Clauer, W. Purgathofer (Hrsg.), AUSTROGRAPHICS '88. Fachtagung, Wien, September 1988. Proceedings. VIII, 267 Seiten. 1988.
- Band 184: B. Gollan, W. Paul, A. Schmitt (Hrsg.), Innovative Informations-Infrastrukturen. I.I.I. – Forum, Saarbrücken, Oktober 1988. Proceedings. VIII, 291 Seiten. 1988.
- Band 185: B. Mitschang, Ein Molekül-Atom-Datenmodell für Non-Standard-Anwendungen. XI, 230 Seiten. 1988.
- Band 186: E. Rahm, Synchronisation in Mehrrechner-Datenbanksystemen. IX, 272 Seiten. 1988.
- Band 187: R. Valk (Hrsg.), GI – 18. Jahrestagung I. Vernetzte und komplexe Informatik-Systeme. Hamburg, Oktober 1988. Proceedings. XVI, 776 Seiten.
- Band 188: R. Valk (Hrsg.), GI – 18. Jahrestagung II. Vernetzte und komplexe Informatik-Systeme. Hamburg, Oktober 1988. Proceedings. XVI, 704 Seiten.
- Band 189: B. Wolfinger (Hrsg.), Vernetzte und komplexe Informatik-Systeme. Industrieprogramm zur 18. Jahrestagung der GI, Hamburg, Oktober 1988. Proceedings. X, 229 Seiten. 1988.
- Band 190: D. Maurer, Relevanzanalyse. VIII, 239 Seiten. 1988.
- Band 191: P. Levi, Planen für autonome Montageroboter. XIII, 259 Seiten. 1988.
- Band 192: K. Kansy, P. Wißkirchen (Hrsg.), Graphik im Bürobereich. Proceedings, 1988. VIII, 187 Seiten. 1988.
- Band 193: W. Gotthard, Datenbanksysteme für Software-Produktionsumgebungen. X, 193 Seiten. 1988.
- Band 194: C. Lewerentz, Interaktives Entwerfen großer Programmsysteme. VII, 179 Seiten. 1988.
- Band 195: I. S. Batori, U. Hahn, M. Pinkal, W. Wahlster (Hrsg.), Computerlinguistik und ihre theoretischen Grundlagen. Proceedings. IX, 218 Seiten. 1988.
- Band 197: M. Leszak, H. Eggert, Petri-Netz-Methoden und -Werkzeuge. XII, 254 Seiten. 1989.
- Band 198: U. Reimer, FRM: Ein Frame-Repräsentationsmodell und seine formale Semantik. VIII, 161 Seiten. 1988.
- Band 199: C. Beckstein, Zur Logik der Logik-Programmierung. IX, 246 Seiten. 1988.
- Band 200: A. Reinefeld, Spielbaum-Suchverfahren. IX, 191 Seiten. 1989.
- Band 201: A. M. Kotz, Triggermechanismen in Datenbanksystemen. VIII, 187 Seiten. 1989.
- Band 202: Th. Christaller (Hrsg.), Künstliche Intelligenz. 5. Frühjahrsschule, KIFS-87, Günne, März/April 1987. Proceedings. VII, 403 Seiten. 1989.
- Band 203: K. v. Luck (Hrsg.), Künstliche Intelligenz. 7. Frühjahrsschule, KIFS-89, Günne, März 1989. Proceedings. VII, 302 Seiten. 1989.
- Band 204: T. Härder (Hrsg.), Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft. GI/SI-Fachtagung, Zürich, März 1989. Proceedings. XII, 427 Seiten. 1989.
- Band 205: P. J. Kühn (Hrsg.), Kommunikation in verteilten Systemen. ITG/GI-Fachtagung, Stuttgart, Februar 1989. Proceedings. XII, 907 Seiten. 1989.
- Band 206: P. Horster, H. Isselhorst, Approximative Public-Key-Kryptosysteme. VII, 174 Seiten. 1989.
- Band 207: J. Knop (Hrsg.), Organisation der Datenverarbeitung an der Schwelle der 90er Jahre. 8. GI-Fachgespräch, Düsseldorf, März 1989. Proceedings. IX, 276 Seiten. 1989.
- Band 208: J. Retti, K. Leidlmair (Hrsg.), 5. Österreichische Artificial-Intelligence-Tagung, Igls/Tirol, März 1989. Proceedings. XI, 452 Seiten. 1989.
- Band 209: U. W. Lipeck, Dynamische Integrität von Datenbanken. VIII, 140 Seiten. 1989.
- Band 210: K. Drost, Termersetzungssysteme. IX, 152 Seiten. 1989.
- Band 211: H. W. Meuer (Hrsg.), SUPERCOMPUTER '89. Mannheim, Juni 1989. Proceedings, 1989. VIII, 171 Seiten. 1989.
- Band 212: W.-M. Lippe (Hrsg.), Software-Entwicklung. Fachtagung, Marburg, Juni 1989. Proceedings. IX, 290 Seiten. 1989.
- Band 213: I. Walter, Datenbankgestützte Repräsentation und Extraktion von Episodenbeschreibungen aus Bildfolgen. VIII, 243 Seiten. 1989.
- Band 214: W. Görke, H. Sörensen (Hrsg.), Fehlertolerierende Rechensysteme / Fault-Tolerant Computing Systems. 4. Internationale GI/ITG/GMA-Fachtagung, Baden-Baden, September 1989. Proceedings. XI, 390 Seiten. 1989.
- Band 215: M. Bidjan-irani, Qualität und Testbarkeit hochintegrierter Schaltungen. IX, 169 Seiten. 1989.
- Band 216: D. Metzger (Hrsg.), GWA-89. 13th German Workshop on Artificial Intelligence. Eringerfeld, September 1989. Proceedings. XII, 485 Seiten. 1989.
- Band 217: M. Zieher, Kopplung von Rechnernetzen. XII, 218 Seiten. 1989.
- Band 218: G. Stiege, J. S. Lie (Hrsg.), Messung, Modellierung und Bewertung von Rechensystemen und Netzen. 5. GI/ITG-Fachtagung, Braunschweig, September 1989. Proceedings. IX, 342 Seiten. 1989.
- Band 219: H. Burkhardt, K. H. Höhne, B. Neumann (Hrsg.), Mustererkennung 1989. 11. DAGM-Symposium, Hamburg, Oktober 1989. Proceedings. XIX, 575 Seiten. 1989.
- Band 220: F. Stetter, W. Brauer (Hrsg.), Informatik und Schule 1989: Zukunftsperspektiven der Informatik für Schule und Ausbildung. GI-Fachtagung, München, November 1989. Proceedings. XI, 359 Seiten. 1989.

Herausgeber: W. Brauer

im Auftrag der Gesellschaft für Informatik (GI)

Jörg Raczkowski

Multisensor- datenverarbeitung in der Robotik



Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York London
Paris Tokyo Hong Kong Barcelona

Autor

Jörg Raczkowsky
Institut für Prozeßrechentechnik und Robotik
Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe
Postfach 6980, W-7500 Karlsruhe 1

CR Subject Classification (1987): I.2.9-10, I.4.8, I.5.4, G.3

ISBN-13: 978-3-540-53745-8
DOI: 10.1007/978-3-642-76476-9

e-ISBN-13: 978-3-642-76476-9

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, bei auch 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 1991

2145/3140-543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Geleitwort

Die Robotik nimmt in der Automatisierung technischer Prozesse eine besondere Stellung ein. Insbesondere durch das Ersetzen bisher manuell ausgeführter Arbeitsvorgänge tritt immer wieder der Vergleich mit menschlichen Arbeitskräften und deren Fähigkeiten auf. Durch programmierbare Bahnkurven sind selbst komplizierte Bewegungsabläufe mit hoher Präzision und Wiederholgenauigkeit ausführbar. Dies gilt aber im wesentlichen nur für eine gut definierte Arbeitsumgebung. Liegen hingegen dynamische Veränderungen im Arbeitsumfeld des Roboters vor, dann müssen diese mit Sensoren erfaßt und bei der Ausführung der Handhabung berücksichtigt werden. Die angewendete Sensortechnologie ist heutzutage nur bei sehr einfachen Situationen in der Lage, diese Problematik zu lösen.

Die vorliegende Arbeit liefert ein Gesamtkonzept, das die Einbindung verschiedener Sensoren zur Überwachung von Roboteraktionen erlaubt. Dies ist insbesondere deswegen von Bedeutung, da nicht alle notwendigen Informationen von einem einzelnen Sensor geliefert werden können. Die verwendeten Methoden erlauben den Umgang mit Unsicherheiten, die bei Verwendung der Daten realer Messungen immer auftreten. Die Modellierung der Roboterumwelt basiert auf modifizierten CAD-Beschreibungen, die um zusätzliche sensorspezifische Attribute erweitert sind. Das Konzept umfaßt alle Stufen der Verarbeitung der Sensordaten zur vollständigen Beschreibung von Szenen von den physikalischen Sensoren bis hin zur wissensbasierten Interpretation.

Anhand verschiedener Fallbeispiele wird die Vorgehensweise anschaulich dargestellt. Dieser so geschaffene Rahmen erlaubt die Untersuchung weiterer Konfigurationen und die Einbettung neuer Methoden für spezielle Problemstellungen. Die Arbeit ist ein wertvoller Beitrag zur systematischen Strukturierung des Sensordatenverarbeitungsprozesses und eine richtungsweisende Basis für künftige Forschungen auf diesem Gebiet.

Karlsruhe, im September 1990

Prof. Dr.-Ing. U. Rembold

Vorwort

Fortgeschrittene Robotersysteme, häufig als Roboter der dritten Generation bezeichnet, unterscheiden sich von den vorherigen Generationen durch ein höheres Maß an Autonomie. Voraussetzung hierfür ist ein leistungsfähiger Sensorapparat, der es dem System ermöglicht, den Zustand der "Welt", in der es agiert, aufzunehmen. Jeder Sensor besitzt dabei seine sehr spezifische Sichtweise. Beispielsweise sind die Daten eines Sichtsystems anderer Natur als diejenigen eines taktilen Sensors, obwohl sie vielleicht denselben Sachverhalt beschreiben. Ein wesentliches Ziel des vorliegenden Buches ist es, die Informationen von verschiedenen Sensoren so zu verbinden, daß eine umfassende Beschreibung des Zustandes der Roboterarbeitszelle entsteht, die mit derjenigen des internen Weltmodells korrespondiert.

Ansätze zur Fusion der Daten verschiedener Sensoren zu einer umfassenden Beschreibung des aktuellen Zustandes des Arbeitsbereiches von Robotern werden in der Robotik seit den frühesten Anfängen verfolgt. Aufgrund technologischer Hemmnisse sind diese Arbeiten aber entweder nicht über das theoretische Stadium hinausgekommen, oder es sind nur sehr spezielle Fälle realisiert worden. Seit 1980 sind aber realisierte Systeme publiziert worden, die als Prototypen für industrielle Entwicklungen stehen. Um zur Industriereife zu gelangen, müssen sie allerdings erheblich robuster gestaltet werden.

In dieser Arbeit wird ein Konzept zur Integration von Sensoren in Robotersysteme vorgestellt. Im Vordergrund stehen die Gesichtspunkte Fusion realer Meßdaten und wissensbasierte Interpretation der gewonnenen Zwischenergebnisse.

Das erste Kapitel gibt eine ausführliche Einführung in das Gebiet und die Aufgabenstellung. Die Darstellung der bisherigen Ansätze für Sensoranwendungen in der Robotik wird kurz historisch beleuchtet und bildet den Rahmen für die Behandlung einiger publizierter Multisensorsysteme.

Im zweiten Kapitel werden verschiedene Methoden und Techniken mit Relevanz für die in dieser Arbeit konzipierte Sensordatenverarbeitung beschrieben. Wichtige Themen sind dabei die Mustererkennung als grundlegende Theorie zur Behandlung der Sensordaten, die anwendungsorientierte Umweltmodellierung, Ansätze der Künstlichen Intelligenz (KI) unter dem Blickwinkel der technischen Informatik und die Interpretation von unsicheren Sensordaten.

Kapitel 3 befaßt sich mit dem Anwendungsgebiet "Montage mit Industrierobotern". Ein im Rahmen der Arbeit entwickeltes Klassifikationsschema bezieht sich einerseits auf die von den Sensoren gelieferten Informationen und andererseits auf den bestehenden Informationsbedarf des Handhabungsprozesses. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung darüber, wie die Informationen verschiedener Sensoren in der Robotik miteinander verbunden werden können, wobei für die Montage zwei Vorgehensweisen identifiziert werden.

In Kapitel 4 wird das entwickelte Konzept beschrieben. Die sensordatenverarbeitenden Komponenten sind in drei Stufen gegliedert, die sich nach der Komplexität der Grunddaten und der Verwendung von Wissen im Verarbeitungsprozeß unterscheiden. Auf der untersten Ebene ist die Datenreduktion und Merkmalsextraktion angesiedelt. In der nächsten Stufe findet der Vergleich der gewonnenen Merkmale mit Referenzdaten aus

dem Weltmodell statt. Hier ist es möglich, auf dem lokalen Niveau eines einzelnen Sensors Abweichungen zwischen der realen Situation und dem Modell festzustellen und sie im Rahmen des Handhabungsprozesses als Fehler zu interpretieren. Ist eine Fehlerbeschreibung mit den Daten des einzelnen Sensors nicht möglich, dann wird diese Aufgabe auf die Diagnose übertragen.

Im fünften Kapitel wird der Ablauf einer Überwachung beschrieben. Die Planung des Vorgangs geht von einer ungestörten Situation in der Arbeitszelle aus und legt zur Erfüllung des Handhabungsziels eine Reihe von Handhabungsoperationen fest, die zu überwachen sind. Für einige Fehlerszenarien, die unterschiedliche Komplexitäten aufweisen, wird die Reaktion der Überwachungskomponente behandelt.

In der Zusammenfassung und dem Ausblick werden der Ausgangspunkt, die Wege zum schließlich erstellten Konzept und das Ergebnis kritisch beleuchtet.

Das vorliegende Buch gibt meine von der Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe genehmigte Dissertation wieder. Sie entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Prozeßrechentechnik und Robotik der Universität unter Leitung von Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Rembold.

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mir bei der Durchführung der Arbeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Rembold für seine über das Fachliche hinausgehende Unterstützung. Sein persönliches Engagement, gepaart mit seiner fundierten wissenschaftlichen Erfahrung, stützten mich durch konstruktive Kritik auch während schwieriger Phasen.

Herrn Prof. Dr.rer.nat. P. Deussen danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferates und den damit verbundenen inhaltlichen Diskussionen. Seine wertvollen Hinweise beeinflussten die Arbeit sehr positiv.

Im Institut fand ich bei meinen Kollegen umfassende Unterstützung. Insbesondere möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Dillmann und Herrn Prof. Dr.rer.nat. C. Kordecki für ihre Ratschläge danken. Frau Margit Pfitzer trug sehr zur Lesbarkeit des Manuskripts bei.

Besonders hervorheben möchte ich meine Studenten Gerhard Grunwald, Christoph Hartfuss, Joachim Kaltenbach, Dietmar Kappey, Karl-Heinz Mittenbühler, Rolf Müller, Peter Scheuerlein, Ekkehard Schmötzer, Kerstin Seucken, Stefan Weiss, Konrad Weller und Winfried Wirth, die in zahlreichen Diskussionen Anregungen an mich herangetragen, manche Sackgasse aufgespürt und durch ihre Diplom- und Studienarbeiten einzelne Teilbereiche der Arbeit vorangetrieben haben.

Karlsruhe, im November 1990

Jörg Raczkowski

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Aufgabenstellung.....	1
1.1	Sensoren und Meßtechnik, Definitionen.....	3
1.2	Sensoren in der Robotik.....	6
1.2.1	Ankopplung von Sensoren an Roboter.....	7
1.2.2	Multisensorsysteme.....	9
1.2.3	Wertung bisheriger Systeme.....	17
1.3	Eigener Ansatz.....	18
1.4	Zusammenfassung.....	21
2	Methoden und Techniken für die Sensordatenverarbeitung.....	22
2.1	Mustererkennung.....	22
2.2	Modellierungsmethoden für die Umwelt.....	25
2.2.1	Oberflächendarstellung.....	26
2.2.2	Generalisierte Zylinder.....	27
2.2.3	Volumenorientierte Darstellung.....	28
2.3	Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI).....	29
2.3.1	Wissensrepräsentation.....	30
2.3.2	Wissensnutzung.....	32
2.3.3	Suchproblematik.....	33
2.3.4	Zur Architektur von Expertensystemen.....	34
2.3.4.1	Die Blackboard-Architektur.....	35
2.3.4.2	Blackboardsysteme.....	36
2.3.4.3	Das Blackboard-Entwicklungssystem GBB.....	39
2.4	Modellierung von Unsicherheiten.....	41
2.4.1	Modell der bedingten Wahrscheinlichkeit.....	41
2.4.2	Certainty factor-Modell.....	43
2.4.3	Dempster-Shafer-Theorie.....	45
2.4.4	Fuzzy set-Theorie.....	47
2.5	Zusammenfassung.....	50
3	Sensorunterstützte Montage mit Industrierobotern.....	52
3.1	Fehler bei der Montage.....	54
3.2	Die Montageaufgabe.....	55
3.2.1	Sichten der Szene.....	58
3.2.2	Einfügen.....	59
3.3	Sensorklassifikationen.....	60
3.4	Fusion von Sensordaten in Roboteranwendungen.....	65
3.5	Zusammenfassung.....	69

4	Das Konzept der Überwachung.....	70
4.1	Einbindung der Überwachung in ein Robotersystem.....	71
4.2	Die Überwachungskomponente.....	73
4.3	Kontrolle und Kommunikation.....	79
4.3.1	Die Struktur der Kontrolle.....	79
4.3.2	Kommunikation in der Kontrolle.....	85
4.3.2.1	Die Fehlererkennung.....	85
4.3.2.2	Die Diagnose.....	86
4.4	Das Weltmodell.....	87
4.4.1	Das spezifische Sichtenmodell für die Sensoren.....	89
4.4.2	Randbedingungen für den Zugriff.....	91
4.4.3	Darstellung der Daten.....	92
4.4.4	Zugriff auf die Daten.....	94
4.5	Die Stufen der Sensordatenverarbeitung.....	96
4.5.1	Vorverarbeitung der Sensordaten.....	96
4.5.2	Die Ebene der Vergleichseinheiten.....	102
4.5.3	Die Diagnoseebene.....	108
4.5.3.1	Die Kontrolle des Blackboardsystems.....	111
4.5.3.2	Die Datentafel und die Wissensquellen.....	113
4.6	Zusammenfassung.....	117
5	Der Ablauf einer Überwachung.....	119
5.1	Planungsvorgaben und reale Situation.....	119
5.2	Die Überwachung der Handhabungssequenz.....	123
5.2.1	Der Überwachungsauftrag.....	124
5.2.2	Vorverarbeitung der Daten des Sichtsystems.....	127
5.2.2	Die Daten aus dem Weltmodell.....	130
5.3	Die Fehlererkennung.....	134
5.4	Diagnose der Fehlersituation.....	138
5.4.1	Die Hypothesenbildung aus den Merkmalsdaten.....	139
5.4.2	Verifikation der Hypothesen mit einem Graphenansatz.....	142
5.4.3	Ansätze für die 3D-Lagebestimmung.....	145
5.5	Zusammenfassung.....	148
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	150
7	Literatur.....	153
8	Anhang.....	161