

Entwicklung eines mobilen Roboters für die automatisierte Instandhaltung von Materialflusssystemen

Von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Matthias Bücker

aus Münster

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne

Tag der mündlichen Prüfung 21.12.2010

**Schriftenreihe Industrielle Robotik
und Produktionsautomatisierung**
hrsg. von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter

Band 1

Matthias Bucker

**Entwicklung eines mobilen Roboters für die auto-
matisierte Instandhaltung von Materialflusssystemen**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2011

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.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0225-6

ISSN 2192-5941

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung der Technischen Universität Dortmund.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter, dem Leiter des Lehrstuhls für Industrielle Robotik und Produktionsautomatisierung, danke ich für die wohlwollende Betreuung und Unterstützung, die maßgeblich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Künne danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit im SFB 696 und die Begutachtung dieser Arbeit.

Herrn Dr.-Ing. Alfred Hypki danke ich für die eingehende Durchsicht meiner Arbeit und seine hilfreichen kritischen Anregungen.

Mein besonderer Dank gilt dem Team des Forschungsprojektes, in dessen Rahmen diese Arbeit entstand. Tobias Brutscheck danke ich für die fachlichen Diskussionen sowie die hervorragende Zusammenarbeit im Projekt und über die gesamte Zeit am Lehrstuhl. Bei Ingo Holzweissig bedanke ich mich für seine ausgezeichnete Arbeit bei der praktischen Umsetzung der Forschungsergebnisse und seine Ideen hierbei. Den wissenschaftlichen Hilfskräften danke ich für ihr Engagement und ihre detaillierte Arbeit.

Weiterhin gilt mein Dank allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für das sehr gute Arbeitsklima und die vielfältige Unterstützung, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Freundin Nicole Heinert für ihre motivierende Unterstützung und die Freiräume, die sie mir zur Erstellung dieser Arbeit gegeben hat. Meinen Eltern danke ich dafür, dass sie die Grundsteine für diese Arbeit gelegt und mir immer Rückhalt gegeben haben.

Mainz, Mai 2011

Matthias Bucker

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Vorgehensweise	4
2	Stand der Technik und Forschung	7
2.1	Materialflusssysteme	7
2.1.1	Einteilung der Fördertechnik	8
2.1.2	Rollen- und Bandförderer	10
2.1.3	Aufbau von Förderanlagen	12
2.1.4	Aktuelle Entwicklungen	13
2.2	Instandhaltung	14
2.2.1	Instandhaltung von Materialflusssystemen	15
2.2.2	Unterstützung manueller Instandhaltung	16
2.2.3	Zustandsüberwachung	17
2.3	Mobile Roboter - ein Überblick	18
2.3.1	Industrielle mobile Roboter	19
2.3.2	Mobile Instandhaltungsroboter	20
2.3.3	Systeme mit 3D-Fahrbahnerkennung	21
2.3.4	Kommerzielle mobile Robotersysteme	23
2.4	Steuerungen mobiler Roboter	25
2.4.1	Steuerungsarchitekturen	25
2.4.2	Umweltrepräsentation	30
2.4.3	Lokalisierung	32
2.4.4	Pfadplanung	41
2.5	Sensorik	48
2.5.1	Laserscanner	48
2.5.2	Time-of-Flight Kameras	50
2.5.3	Odometrie- und Inertialsensoren	51

3	Anforderungen an eine mobile Roboterplattform	55
3.1	Situationsanalyse	55
3.1.1	Instandhaltung von Materialflusssystemen	55
3.1.2	Automatisierte Instandhaltung	56
3.1.3	Mobile Robotik	57
3.2	Anforderungen und spezifische Randbedingungen	59
3.2.1	Anlagenmodellierung	59
3.2.2	Lokalisierung	60
3.2.3	Fahrbahnerkennung	61
3.2.4	Lokale Bahnplanung	62
3.2.5	Zusammenfassung	63
3.3	Konkretisierung der Aufgabenstellung	64
3.3.1	Gesamtkonzept	64
3.3.2	Verfahrensentwicklung	65
3.3.3	Umsetzung	66
4	Konzept der mobilen Roboterplattform	67
4.1	Einleitung	67
4.2	Einsatzkonzept	68
4.2.1	Durchführung von Instandhaltungen	68
4.2.2	Vorbereitung des Robotereinsatzes	68
4.2.3	Integration des Instandhaltungsroboters in den Anlagenbetrieb	70
4.3	Gesamtkonzept der Roboterhardware	71
4.3.1	Erforderliche Komponenten	71
4.3.2	Modularität	73
4.3.3	Skalierbarkeit	73
4.4	Gesamtkonzept des Steuerungssystems	74
4.4.1	Steuerungsstruktur	74
4.4.2	Steuerungskomponenten	75
4.5	Zusammenfassung	77
5	Globale Navigation	79
5.1	Einleitung	79
5.2	Modellierung der Anlagenstruktur	80
5.2.1	Methoden der Modellierung	80
5.2.2	Auswahl der Modellierungsstrategie	81
5.2.3	Modulbasierte Strukturmodellierung	83
5.3	Lokalisierung	89

5.3.1	Vergleich bekannter Lokalisierungsansätze	90
5.3.2	Komplexitätsreduktion	92
5.3.3	Sensorbasierte Lokalisierung	94
5.3.4	Versuche und Auswertung	105
5.4	Globale Wegplanung	108
5.4.1	Wegberechnung im Anlagenmodell	109
5.4.2	Konfiguration der lokalen Pfadplanung	109
5.5	Zusammenfassung	112
6	Lokale Bewegungsplanung	115
6.1	Einleitung	115
6.2	Lokale Kartierung	115
6.2.1	Verfahrensauswahl	116
6.2.2	Datenerfassung	118
6.2.3	Klassifizierung	120
6.3	Lokale Bahnplanung	122
6.3.1	Bestimmung des lokalen Zielpunktes	122
6.3.2	Sicherheitsüberprüfung der Roboterposition	125
6.3.3	Berechnung der Bewegungsbahn	125
6.4	Zusammenfassung	127
7	Prototypische Umsetzung und Evaluierung	129
7.1	Mechanischer Aufbau des Instandhaltungsroboters	129
7.1.1	Roboterplattform	131
7.1.2	Handhabungssystem	131
7.1.3	Sensorik	132
7.2	Steuerungsaufbau des Instandhaltungsroboters	135
7.2.1	Robotersteuerung	135
7.2.2	Graphische Bedienoberfläche	138
7.3	Globale Navigation	138
7.3.1	Einrichtung des Roboters	139
7.3.2	Lokalisierung	140
7.3.3	Wegberechnung und Erzeugung der Fahrhinweise	145
7.4	Lokale Bewegungsplanung	145
7.4.1	Lokale Kartierung	147
7.4.2	Lokale Bahnplanung	149
7.5	Evaluierungsergebnisse	151

8 Zusammenfassung und Ausblick	155
8.1 Zusammenfassung	155
8.2 Ausblick	157
Literaturverzeichnis	159
Abbildungsverzeichnis	176
A Layout der Versuchsanlage	181
B Versuchsreihen	183