

**Navigationskonzept eines autonomen mobilen Roboters
für den automatisierten Betrieb der industriellen Verladezone**

**Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur**

genehmigte Dissertation

von

**M. Sc. Moritz Bonse
geboren am 13. August 1982 in Ahlen**

2014

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. L. Schulze

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. R. Lachmayer

Tag der Promotion: 04.07.2014

Materialfluss- und Logistiksysteme

Band 14

Moritz Bonse

**Navigationskonzept eines autonomen
mobilen Roboters für den automatisierten Betrieb
der industriellen Verladezone**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3012-9

ISSN 1438-4922

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 des Herausgebers

Noch immer wird die Be- und Entladung von Güterwagen, Wechselbrücken, Containern und Lastkraftwagen im Regelfall von bedienergesteuerten Flurförderzeugen ausgeführt. Die Automatisierung von Materialflussprozessen endet vor der Verladung, obwohl daraus signifikante Nachteile resultieren. Das sind Unfallgefahren, hohe Beschädigungs-raten von Gütern, Maschinen und Gebäuden sowie hohe Personalkosten.

Darüber hinaus führt das Überfahren der Übergangsknicke von Verladeblechen und Überladebrücken zu Fahrzeugstößen, die zu einer nicht unerheblichen Belastung für die Fahrer der Verladefahrzeuge werden können. Durch eine automatisierte Verladung ließen sich signifikante Ergonomie- und Effizienzpotentiale heben.

Vor diesem Hintergrund wird die Entwicklung eines umfassenden Navigationskonzeptes für den Einsatz autonomer mobiler Fahrzeuge im Bereich der Verladezone beschrieben. Autonom bedeutet dabei zum einen, dass das technische System nicht auf künstliche Landmarken der Umgebung und der Stückgüter angewiesen ist. Zum anderen impliziert Autonomie eine umfassende Automatisierung der Prozesse ohne manuelle Eingriffe.

Kernpunkte sind die Bahnplanung und Bahnregelung, auf deren Grundlage Fahrzeuge kollisions- und blockungsfrei auf einem optimalen Weg in einem unbekanntem Raum die Verladung von Ladeeinheiten vornehmen. Der Nachweis der Machbarkeit und Praxistauglichkeit der Forschungsergebnisse erfolgte sowohl durch experimentelle Untersuchungen mit einem Testfahrzeug im Labor als auch mit einem Industriefahrzeug in Praxistests.

Der Verfasser stellt neue wissenschaftliche Erkenntnisse dar, die bereits jetzt großes Interesse in der Praxis gefunden haben. Als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen der Leibniz Universität Hannover hat der Verfasser erfolgreich Forschungs- und Entwicklungsprojekte bearbeitet. Die vorliegende Dissertation ist das Ergebnis seiner wissenschaftlichen und praxisbezogenen Arbeit.

Hannover, im August 2014

Lothar Schulze

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen (PSLT) der Fakultät für Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover entstanden. Sie baut zu einem großen Teil auf Forschungsergebnissen auf, die im Rahmen des Förderprojektes „AutoVer“ durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie innerhalb der Förderinitiative „Intelligente Logistik“ unterstützt wurden.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Lothar Schulze für die Initiierung und Betreuung des Projektes, für das in mich gesetzte Vertrauen während dieser Arbeit sowie für die weitreichenden Erfahrungen, die ich während meiner Zeit an seinem Fachgebiet sammeln konnte. Herrn Professor Dr.-Ing. Roland Lachmayer bedanke ich mich vielmals für die Übernahme des Zeitreferats. Ebenso gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Dieter Mewes für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Für drei Jahre freundschaftliche Zusammenarbeit, gemeinsamen Erfahrungsaustausch und eine schöne Zeit innerhalb und außerhalb des Fachgebiets danke ich meinen Kollegen Sebastian Behling, Daniel Knopp, Sebastian Mansky, Carsten Schulte und Li Li. Insbesondere danke ich Stefan Buhrs für die fachliche Unterstützung und das sehr gute Zusammenwirken am gemeinsamen Forschungsprojekt. Ebenso sei an dieser Stelle den studentischen Mitarbeitern besonders gedankt, die durch Ideen und Mitdenken zum Erfolg beigetragen haben.

Herrn Dr. Kliewer und Herrn Jostkleigrewer danke ich für die entgegenkommende Unterstützung des Forschungsprojektes „AutoVer“ und die Bereitschaft die Praxistests zu ermöglichen. Weiterhin danke ich Herrn Eilers von der Firma EK Automation für die Unterstützung während der Probephase sowie seinen Mitarbeitern Herrn Clemens Wollmann und Herrn Lars Langer für eine intensive Zusammenarbeit.

Ich danke meinen Eltern für einen steten Rückhalt, Motivation und Inspiration, ohne die ich nicht so weit gekommen wäre. Auch danke ich meinen Mitbewohnern, Freunden und Geschwistern für Rücksicht und wohlwollende Unterstützung während dieser Arbeit.

Hannover, im Juli 2014

Moritz Bonse

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung und Erprobung eines mobilen Roboters zur Automatisierung der industriellen Verladezone. Sie basiert auf einem Forschungsprojekt zur Erarbeitung funktionaler Konzepte und Algorithmen für die automatisierte Verladung beladener Paletten in Güterwagen. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Navigation des mobilen Roboters.

Untersucht werden die Vor- und Nachteile verschiedener Lokalisierungsverfahren in unterschiedlichen Bereichen der Verladezone. Speziell der kombinierte Einsatz mehrerer Verfahren wird näher betrachtet. Unter Berücksichtigung der aktuellen Umgebungsbedingungen und der Güte der jeweiligen Messergebnisse erfolgt eine gewichtete Mittelung der Roboterpose. Als Basis dient eine odometrisch gestützte Partikelwolke.

Ausgehend von der aktuellen Roboterpose erfolgt die dynamische Planung einer Sollbahn. Als Planungsumgebung kommt ein aus der Umgebung ermittelter Konfigurationsraum zum Einsatz. Eine Diskretisierung des Raums ermöglicht den Einsatz von Planungsstrategien aus der Graphentheorie. Verschiedene Varianten des A*-Algorithmus, ein Ansatz der Potentialfeldmethode sowie die Beachtung nichtholonomer Zwangsbedingungen in der Roboterkinematik führen zu einem erfolgreichen Bahnplaner.

Ein kaskadierter Bahnregelungsansatz aus einem Motorregler und einer übergeordneten Positionsregelung kontrolliert die Fahrzeugbewegung. Das zugrunde liegende inverse Fahrzeugmodell ermöglicht die Beeinflussung der radialen und rotatorischen Abweichung von der Sollbahn. Die im Voraus bekannte Trajektorie erlaubt eine Prädiktion des nachfolgenden Bahnverlaufs.

Die praktische Umsetzung mit einem Versuchsfahrzeug in der Verladezone zweier Industriepartner validiert die Ergebnisse.

Schlagworte:

- o Automatisierte Be- und Entladung
- o Fahrerlose Flurförderzeuge
- o Mobile Roboter

Abstract

The presented work concerns the development of a mobile robot for automation of the industrial loading area. It is based on a research project on the creation of functional algorithms and concepts for automated loading and unloading of palletized goods in freight wagons. The work is focused on the navigation of the mobile robot.

The advantages and disadvantages of various localization methods in different regions of the loading area are examined. Especially the combined use of multiple methods is studied in detail. Considering the current surrounding conditions and the quality of the measured poses, the weighted mean is taken as the robot's actual position. The calculation bases on an odometrically tracked set of particles.

A dynamic planner calculates a path starting by the robot's actual pose. The planning takes place in a configuration space based on the robots surroundings. A discretization of the space allows the use of planning strategies of the graph theory. Adaptions of the A* algorithm, an approach based on the potential field method and the consideration of nonholonomic constraints in the robot's kinematics lead to a successful pathplanner.

A cascaded path controlling approach composed of a motor controller and an unfolding position control monitors the vehicle's movement. The underlying inverse vehicle model allows the controlled reduction of the radial and rotational error. The in advance known trajectory allows the prediction of coming up path changes.

A practical application on a testing vehicle in the loading area of two industrial partners validates the work's results.

Keywords:

- o Automated Loading and Unloading
- o Automated Guided Vehicle
- o Mobile Robot

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Abkürzungsverzeichnis	IV
Symbolverzeichnis	V
Bildverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung	4
3 Fahrzeug	6
3.1 Konstruktion	6
3.1.1 Hubwerk	8
3.1.2 Chassis	8
3.1.3 Fahrwerk	8
3.2 Elektronik	9
3.2.1 Fahrzeugsteuerung	10
3.2.2 Interne Kommunikationsperipherie	10
3.2.3 Laserscanner	11
3.2.4 Antriebsmotoren	11
3.2.5 Energieversorgung	12
3.2.6 Sicherheitseinrichtungen	12
3.3 Software	13
3.3.1 Softwareumgebung	13
3.3.2 Modulsystem	13
4 Lokalisierung	17
4.1 Begriffsbestimmung	18
4.2 Odometrie	20
4.2.1 Berechnung	21
4.2.2 Kalibrierung	23
4.3 Landmarkenbasierte Lokalisierung	25

4.3.1	Künstliche und natürliche Landmarken	25
4.3.2	Landmarkenzuordnung	27
4.3.3	Trilateration	28
4.3.4	Triangulation	30
4.3.5	Überbestimmung	31
4.3.6	Anwendung am Versuchsfahrzeug	32
4.4	Landmarkenfreie Lokalisierung	33
4.5	Kombinierte Lokalisierung	34
4.5.1	Datenfusion	35
4.5.2	Rekursive Datenerhaltung	36
4.6	Ergebnisse	37
5	Bahnplanung	40
5.1	Begriffsbestimmung	41
5.2	Konfigurationsraum	43
5.2.1	Definition	44
5.2.2	Konstruktion	45
5.2.3	Algorithmus	46
5.2.4	Bahnverläufe	49
5.2.5	Blockungskontrolle	49
5.2.6	Diskretisierung	50
5.3	Planungsalgorithmus	51
5.3.1	A*-Algorithmus	52
5.3.2	Zwangsbedingungen	55
5.3.3	Erweiterung des Betrachtungsbereichs	56
5.3.4	Adaption der Potentialfeldmethode	58
5.3.5	Interpolation	61
5.3.6	Trajektorie	63
5.4	Komplexität	64
5.5	Ergebnisse	66
5.6	Ausblick	69
6	Bahnregelung	70
6.1	Servoantrieb	70

6.2	Motorregelung	73
6.2.1	Regelkreis	73
6.2.2	Regelalgorithmus	74
6.2.3	Parametereinstellung	75
6.3	Positionsregelung	77
6.3.1	Fahrzeugmodell.....	78
6.3.2	Regelkreis	80
6.3.3	Regelabweichung.....	82
6.3.4	Reglerentwurf.....	84
6.3.5	Prädiktion	89
6.3.6	Wendepunkte und Richtungswechsel	91
6.4	Regelverhalten	92
6.5	Ausblick	93
7	Experimentelle und praktische Erprobung.....	95
7.1	Laborfahrzeug	96
7.1.1	Palettenerkennung	96
7.1.2	Grafische Benutzerschnittstelle.....	97
7.2	Konzept	98
7.3	Ablaufplan	101
7.4	Praxistests.....	104
7.5	Ausblick	108
8	Zusammenfassung.....	110
	Schrifttum	113