Entwicklung eines autonomen mobilen Roboters für die automatisierte Verladung von palettierten Gütern

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

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Stefan Buhrs
geboren am 17. August 1981 in Hannover

2011

1. Referent:	**Prof. Dr.-Ing. L. Schulze**
2. Referent:	**Prof. Dr.-Ing. G. Voß**
Tag der Promotion:	**15.08.2011**

Materialfluss- und Logistiksysteme

Band 10

Stefan Buhrs

Entwicklung eines autonomen mobilen Roboters für die automatisierte Verladung von palettierten Gütern

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.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2011

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 978-3-8440-0507-3
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

Die Automatisierung des innerbetrieblichen Materialflusses für Stückgüter stellt den Stand der Technik dar. Sie endet jedoch häufig an der Schnittstelle von inner- und zwischenbetrieblicher Logistik, d. h. im Regelfall wird die Be- und Entladung von Waggons, Wechselbrücken, Containern und Lastkraftwagen von bedienergesteuerten Flurförderzeugen ausgeführt.

Vor diesem Hintergrund wird die Entwicklung eines autonomen technischen Systems zur Be- und Entladung von Verkehrsmitteln angestrebt. Das impliziert eine umfassende Automatisierung der Verladeprozesse ohne manuelle Eingriffe in unbekannten Verladeräumen. Diese Aufgabenstellung beinhaltet eine herausfordernde Schnittmenge zwischen Logistik, Informationstechnik und Robotik.

Grundlage der Arbeiten bilden die Konstruktion und Realisierung eines mobilen Roboters, mit dem die Forschungsergebnisse validiert werden. In der Entwicklung werden neue Ansätze zur Palettenidentifizierung sowie zur Lokalisierung und Navigation des Roboters verfolgt. Untersuchungen zur Funktionalität, Stabilität und Fehlerfreiheit weisen die Machbarkeit und Praktikabilität des Konzeptes nach. Darüber hinaus unterstreichen die Ergebnisse der Praxistests die grundsätzliche Anwendbarkeit.

Es werden neue Möglichkeiten für die Automatisierung der Stückgutverladung aufgezeigt und ein Erkenntniszuwachs für die Intralogistik geschaffen. Die vorliegenden Ergebnisse sind auch für Applikationen von Fahrerlosen Flurförderzeugen in anderen Einsatzbereichen von Bedeutung.

Der Verfasser hat als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen (PSLT) der Leibniz Universität Hannover Automatisierungsprojekte in praxisorientierten Forschungsvorhaben bearbeitet. Neben den wissenschaftlichen und analytischen Fähigkeiten hat der Verfasser eine pragmatische und zielorientierte Arbeitsweise bewiesen. Die Ergebnisse seiner wissenschaftlichen Arbeit sind in der vorliegenden Dissertation dokumentiert.

Hannover, im September 2011

Lothar Schulze

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Planung und Steuerung von Lager- und Transportsystemen (PSLT) der Leibniz Universität Hannover entstanden. Ein Großteil der Entwicklungsergebnisse wurde durch die Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie für das Forschungsprojekt „AutoVer“ innerhalb der Förderinitiative „Intelligente Logistik“ ermöglicht.

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr. Schulze für die Betreuung dieser Arbeit, die Freiheiten bei der Bearbeitung des Forschungsprojekts „AutoVer“ und das damit in mich gesetzte Vertrauen. Herrn Professor Dr. Voß danke ich für die Übernahme des Zweitreferats und die Bereitschaft auch im Ruhestand die Prüfung und Bewertung diverser studentischer Arbeiten durchzuführen. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich Herrn Professor Dr. Poll.

Für viereinhalb Jahre freundschaftliches Zusammenwirken innerhalb und außerhalb des Instituts bedanke ich mich bei meinen Kollegen Daniel Knopp, Carsten Schulte und Sebastian Mansky sowie insbesondere bei Sebastian Behling für das ausgezeichnete Klima im gemeinsamen Büro und bei Moritz Bonse für seine Beiträge und seine Unterstützung bei der gemeinsamen Bearbeitung des Forschungsprojekts „AutoVer“. Ich danke außerdem Sebastian Schwarzendahl, Britta Griesbach und Sven Lampe für ihre Untersuchungen und Ergebnisse im Rahmen von Projekt- und Diplomarbeiten.

Herrn Dr. Kliewer und Herrn Jostkleigrewe danke ich für die Bereitschaft das Forschungsprojekt „AutoVer“ als Kooperationspartner zu begleiten und das persönliche Interesse daran, die Abschlusstests zu ermöglichen. Hierfür danke ich ebenfalls Herrn Eilers von der Firma E&K Automation GmbH. Bei seinen Mitarbeitern Herrn Clemens Wollmann und Herrn Lars Langer bedanke ich mich für die intensive Zusammenarbeit während der Erprobungsphase.

Mein Dank gilt schließlich meinen Eltern, die meinen Werdegang ermöglicht und gefördert haben sowie allen, die mich auf meinem Weg unterstützt und auf diese Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Hannover, im September 2011

Stefan Buhrs

Abstract

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Entwicklung eines autonomen mobilen Roboters, der in der Lage ist, die Verladung palettierter Güter automatisiert durchzuführen. Gleichzeitig handelt es sich bei dem System aus industrieller Sicht um ein Fahrerloses Flurförderzeug, das im Vorlauf oder Nachgang eines Verladevorgangs in dieser Eigenschaft für innerbetriebliche Transportaufgaben einsetzbar ist. Dies ermöglicht eine direkte Verknüpfung von Ladezonen mit Produktion, Lager und anderen Unternehmensbereichen ohne das Transportmittel zu wechseln.

Um diese Ziele zu erreichen, sind sowohl die Erkennung von Ladeeinheiten als auch die Lokalisierung des Systems autonom, das heißt ausschließlich mit an Bord befindlicher Sensorik, zu bewerkstelligen. Zur autonomen Erkennung von Ladeeinheiten wird ein Verfahren vorgestellt, dass die Position und Orientierung von Paletten mittels eines Laserscanners bestimmt. Die autonome Lokalisierung erfolgt anhand von zwei alternativen Methoden, die darauf spezialisiert sind, entweder eine im Vorfeld bekannte Umgebungsbeschreibung auszuwerten oder diese im laufenden Betrieb selbst zu erstellen.

Die zusätzlich vorgestellten Ansätze zur Navigation ermöglichen es dem System, eigenständig Fahrwege zu erzeugen und diese geregelt abzufahren. Eine Erprobung der vorgestellten Lösungen wird mit einem zu diesem Zweck aufgebauten Versuchsfahrzeug durchgeführt.

Eine mögliche Anwendung der Entwicklungsergebnisse besteht darin, Güterwagen automatisiert zu be- und entladen. Die Machbarkeit dieses Ansatzes wird abschließend anhand von Versuchen im industriellen Umfeld gezeigt.

Schlagwörter
Automatisierte Be- und Entladung, Fahrerloses Flurförderzeug, Mobiler Roboter

Abstract

The presented work describes the development of an autonomous mobile robot which is enabled to automatically accomplish the handling of palettized goods. From an industrial perspective the system represents an automated guided vehicle, which thus can be utilized for in-plant transportation in addition to goods handling. This allows the loading zone to be linked directly to production, warehouse or other company sectors without the necessity to change the mean of transportation.

To achieve these objectives the detection of loading units as well as the localization of the system have to be carried out autonomously. This means by the sole use of sensory equipment located aboard. Loading units are detected autonomously by infering the position and orientation of pallets from laser range finder data. Autonomus localization is solved by two specialized methods which either make use of an initially available description of the environment or generate one during operation.

Additionaly presented approaches to the subject of navigation provide the system with capabilities of self-contained path planning and path control. The testing of all proposed solutions was conducted on an experimental vehicle built for this purpose.

A possible application of the resulting developments is the automated loading and unloading of railroad freight cars. The feasibility of this approach is concludingly shown by experiments in an industrial environment.

Keywords

Automated Loading and Unloading, Automated Guided Vehicle, Mobile Robot

für Magrit, Erich und Thomas

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation 2
1.2 Gliederung 4

2 Automatisierte Verladung von palettierten Gütern **5**
2.1 Begriffsbestimmung 5
2.2 Systemabgrenzung 7
2.3 Stand der Technik 8
2.3.1 Installierte Verladesysteme 8
2.3.2 Freie Verladesysteme 9
2.4 Hemmnisse 10
2.4.1 Unternehmerische Perspektive 11
2.4.2 Technische Perspektive 12
2.5 Autonome Verladesysteme 13
2.6 Zielsetzung 14

3 Ladeeinheitenerkennung **16**
3.1 Begriffsbestimmung 16
3.2 Stand der Technik 17
3.3 Sensorauswahl 17
3.3.1 Anordnung 18
3.3.2 Anforderungen 19
3.3.3 Reichweite 22
3.3.4 Sick LD-OEM1000 23
3.4 Umgebungserfassung 25
3.5 Segmentierung 25
3.5.1 Zerlegung 26
3.5.2 Linienextraktion 28
3.6 Klassifizierung 32
3.6.1 Segmente 32
3.6.2 Relationen 32
3.7 Interpretation 33

3.7.1 Repräsentation 33
3.7.2 Vergleich 36
3.8 Subgraph-Isomorphismus 37
3.8.1 Tiefendurchlauf 37
3.8.2 Simultanes Backtracking 40
3.8.3 Auswertung 43
3.9 Ergebnisse 44
3.10 Ausblick 45

4 Lokalisierung 48
4.1 Begriffsbestimmung 48
4.2 Stand der Technik 50
4.3 Sensorauswahl 51
4.4 Scan-Matching 53
4.4.1 Linienkarte 54
4.4.2 Zielfunktion 55
4.4.3 Varianzschätzung 58
4.4.4 Algorithmus 60
4.5 Odometrie 63
4.5.1 Rekursionsvorschrift 63
4.5.2 Kinematik 66
4.5.3 Varianzschätzung 68
4.5.4 Algorithmus 70
4.6 Sensordatenfusion 72
4.7 Simultaneous-Localization-And-Mapping 75
4.7.1 Rasterkarte 75
4.7.2 Wahrscheinlichkeit 75
4.7.3 Markov-Lokalisierung 76
4.7.4 Sampling-Importance-Resampling 79
4.7.5 Occupancy-Grid-Mapping 82
4.7.6 Algorithmus 85
4.8 Ergebnisse 90
4.9 Ausblick 92

5 Navigation **93**
5.1 Bahnplanung 93
5.2 Bahnregelung 96
5.2.1 Prädiktion 96
5.2.2 Regelabweichung 97
5.2.3 Regler 98
5.3 Ergebnisse 99
5.4 Ausblick 99

6 Versuchsfahrzeug **101**
6.1 Fahrzeug 101
6.1.1 Anforderungen 102
6.1.2 Antriebseinheit 104
6.1.3 Weitere Komponenten 105
6.2 Bordrechner 105
6.2.1 Architektur 105
6.2.2 Betriebssystem 106
6.3 Module 107
6.3.1 Ringpufferung 109
6.3.2 Modulsystem 110
6.3.3 Grafische Benutzerschnittstelle 112
6.4 Ergebnisse 112
6.5 Ausblick 112

7 Anwendung **113**
7.1 Forschungsprojekt AutoVer 114
7.2 Systembeschreibung 115
7.3 Ergebnisse 117
7.3.1 Paul Hartmann AG 118
7.3.2 NOSTA-Transport GmbH 120
7.4 Ausblick 122

8 Zusammenfassung **124**