

Duc Tho Le

**Entwicklung eines modularisierten
mobilen Manipulatorsystems für die
flexible automatisierte Montage**

Entwicklung eines modularisierten mobilen Manipulatorsystems für die flexible automatisierte Montage

**Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektro- und Energiesysteme
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg zur Erlangung
des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation**

vorgelegt von

M. Sc. Duc Tho Le

**geboren am 02.02.1984
in Hanoi, Vietnam**

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Georg Möhlenkamp
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Lappus
Tag der mündlichen Prüfung:	28.09.2017

Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik
BTU Cottbus-Senftenberg
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger

Duc Tho Le

**Entwicklung eines modularisierten
mobilen Manipulatorsystems für die
flexible automatisierte Montage**

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5602-0

ISSN 1864-5789

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

Förderhinweis

Gedruckt und veröffentlicht mit Unterstützung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD).

Vorwort des Herausgebers

Die Automatisierungstechnik bildet eine Schlüsseltechnologie für die Steigerung der Produktinnovation und die Verbesserung von Wertschöpfungsprozessen. Als Konsequenz einer globalen Wirtschaftsstruktur müssen alle Unternehmensbereiche wie Entwicklung, Produktion und Güterverkehr in einen übergreifenden Kontext gestellt und behandelt werden. Dabei steht die informationstechnische Verknüpfung verbundener Unternehmen und Unternehmensbereiche bei stetig veränderlichen Aufgabenstellungen und Randbedingungen eine besondere Herausforderung dar. Die Automatisierung des betrieblichen und betriebsübergreifenden Informationsflusses sowie die Einbindung des Menschen in allen Phasen des Entwicklungs- und Leistungsprozesses bildet daher die vordringliche Aufgabenstellung für Forschung und Entwicklung. Durch den zielgerichteten, systematischen Einsatz und die ständig aktualisierte Beurteilung und Bewertung automatisierungstechnischer Lösungen wird die schnelle Umsetzung und Einführung hochwertiger und zukunftsweisender Innovationen gesichert.

Ziel der Forschungsarbeiten am Lehrstuhl Automatisierungstechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) ist die kontinuierliche Verbesserung der automatisierungstechnischen Methoden und Verfahren im Hinblick auf fortgeschrittene Produktionsstrukturen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung integrierter Fertigungs- und Montagesysteme unter Einsatz neuartiger Steuerungstechnik. Dazu werden leistungsfähige Entwurfswerkzeuge der *Digitalen Fabrik* erprobt und weiterentwickelt. Durch die Bereitstellung modernster Laborausstattung und die Zusammenarbeit mit industriellen und institutionellen Technologieführern wird der Stand der Technik in Wissenschaft und Forschung aktualisiert abgebildet. Nationale und internationale Forschungsarbeiten zu ganzheitlichen Automatisierungskonzepten, den *Industrial Life Cycle Automation*, runden das Aufgaben- und Leistungsspektrum des Lehrstuhls ab.

Die in dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen aus den Forschungsarbeiten des Lehrstuhls Automatisierungstechnik der BTU Cottbus-Senftenberg. In diesen Bänden werden neue Resultate und Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung veröffentlicht. Die Berichte aus dem Lehrstuhl Automatisierungstechnik sollen Forschung, Entwicklung und Anwendung zu automatisierungstechnischen Fragestellungen enger verknüpfen und daraus Potential für zukünftige Innovationen erzeugen.

Ulrich Berger

Kurzfassung

Im Automobilmarkt werden die Innovationszyklen immer kürzer und die Zukunftsprognosen immer schwieriger. Die maximale Flexibilität der Produktionsunternehmen und deren Fertigungssysteme ist immer eine große Herausforderung. Besonders in der Fließfertigung der Automobilindustrie ist die Flexibilität jedoch gering. Jede Änderung in der Fließfertigung kostet viel Zeit und Geld. Deshalb ist die Entwicklung flexibler Fertigungssysteme innerhalb der Fließlinienfertigung notwendig, um die Produktvielfalt zu steigern. Es gibt zwei Möglichkeiten, um diese zu entwickeln. Die Erste ist die Verbesserung der bestehenden Fließfertigung, um die Senkung der Herstellungskosten, die Erhöhung der Flexibilität sowie die Reduzierung der Taktzeit zu ermöglichen. Die zweite Möglichkeit ist das Ersetzen der Fließfertigung durch Modularisierung, um die Herstellungskosten und die Lieferzeiten zu senken, sowie eine neue Generation von wandlungsfähigen Produktionssystemen zu entwickeln. Um die beiden genannten Varianten zu ermöglichen, wurden in dieser Arbeit Lösungsansätze mit mobilen Manipulatoren entwickelt.

Bei den beiden oben genannten Möglichkeiten, der Fließfertigung oder Modularisierung sind die Montagesysteme mit mehreren Stationen sowie Rohbauzellen organisiert. An den Stationen und Rohbauzellen werden die Fertigungsschritte mit festmontierten Robotern ausgeführt. Die Produkte müssen zwischen ihnen transportiert werden. Während des Transportweges wird keine Bearbeitung durchgeführt. Basierend auf dieser Organisationsform wurden in dieser Arbeit neue industrielle Szenarien entwickelt. Das erste Szenario des Lösungsansatzes zum Einsatz eines mobilen Manipulators ist die „Synchronisation“. Während die Produkte zwischen den Stationen/ Rohbauzellen transportiert werden, kann der mobile Manipulator synchron zur Fertigungslinie fahren und gleichzeitig Aufgaben auszuführen. Ein weiteres Szenario des Lösungsansatzes zum Einsatz eines mobilen Manipulators ist die „Unterstützung“. Ein mobiler Manipulator kann an Stationen oder in Rohbauzellen zur Unterstützung hinzukommen.

Die Entwicklung des mobilen Manipulators bietet die folgenden Herausforderungen:

- Kalibrierung des internen mobilen Manipulators und der externen Umgebung
- Synchronisation des Manipulators mit sich bewegendem Produkt
- Erhöhung der Präzision für spezifische Aufgaben
- Roboterprogrammierung für verschiedene Aufgaben
- Umgebung- und Objekterkennung
- Roboterbahnplanung zur Vermeidung der Kollision zwischen Roboter und Hindernissen
- Entwicklung von Optimierungsverfahren für unterschiedliche Montageaufgaben

Das entwickelte Konzept wurde an einem Demonstrator zur Lösung einer industriellen Fertigungsaufgabe umgesetzt, um die Anwendbarkeit unter realen Rahmenbedingungen bewerten zu können. Das entwickelte Konzept wurde in einer Reihe von Experimenten implementiert. Anhand des Demonstratoraufbaus konnte gezeigt werden, dass das entwickelte Konzept für die avisierten Aufgaben grundsätzlich geeignet ist.

Abstract

In the automotive market, the innovation cycles are becoming shorter and the future forecasts are becoming increasingly more difficult to predict. The maximum flexibility of the production companies and their production systems has always been a big challenge. This can be seen in the manufacturing line of the automobile industry, in which the flexibility is very low. Any change in the manufacturing line can as a result cost time and money. Therefore, a development of flexible manufacturing systems within the manufacturing line is necessary to increase product diversity. There are two ways to tackle this task. The first is to improve the existing flow production to reduce the production costs, increase flexibility as well as the reduction of the cycle time. The second option is to replace the manufacturing line by modularization to reduce production costs and delivery times, as well as to develop a new generation of transformable production systems. To enable these two variants, possible solution approaches with mobile manipulators have been developed and are presented in this work.

Currently, the manufacturing line and the modularization are organized in several stations. The production steps are carried out at the stations and car body cells with the help of fixed robots. Therefore, the products must be transported between the stations and the car body cells. During transportation, no processing is carried out. Based on this organizational form, new industrial scenarios were developed in this work. The first solution is using a mobile manipulator in "synchronization" to the products which are transported between the stations and cells where the mobile manipulator can synchronize with the moving product and at the same time carry out tasks. A further solution approach for the use of a mobile manipulator is "support". A mobile manipulator can move to the stations/ cells to support the fixed robots performing the tasks.

The development of the mobile manipulator offers the following challenges:

- Calibration of the internal mobile manipulator and the external environment
- Synchronization of the manipulator with the moving product
- Task specific precision requirements
- Task dependent robot programming
- Environment and object detection
- Robotic path planning to avoid the collision between robots and obstacles
- Development of optimization procedures for different assembly tasks

The developed concept was implemented on a demonstrator for the solution of an industrial production task to evaluate the applicability under real conditions and was tested by performing a series of experiments. Based on the demonstrator design it was shown that the developed concept is suitable for the indicated tasks.

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit als Doktorand am Lehrstuhl Automatisierungstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus - Senftenberg (BTU - CS), gefördert durch den Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD).

Zunächst möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger, dem Lehrstuhlinhaber, für seine hervorragende Unterstützung und Betreuung dieser Arbeit bedanken. Durch seine konstruktiven Hinweise und jederzeitige Diskussionsbereitschaft hat er entscheidend zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen. Weiterhin möchte ich Ihm für seine nette Unterstützung während meines Aufenthalts in Deutschland sehr danken.

Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Lappus, für die Empfehlung für DAAD sowie Übernahme des Zweitgutachtens. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Georg Möhlenkamp, dem Leiter des Lehrstuhls Leistungselektronik und Antriebssysteme der BTU - CS, bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses. Bei Herrn Dr.-Ing. Bernhard Klug bedanke ich mich für die Protokollführung meiner Doktorverteidigung.

Eine andere wichtige Voraussetzung für die erfolgreiche Arbeit war die enge Zusammenarbeit mit meinen Kollegen und Freunden am Lehrstuhl. Ausdrücklich danke ich Udo Steffen, Kai Henning, Dr.-Ing. Christian Lehmann, Philipp Städter, Jürgen Selka, Mayur Andulkar, Wenchao Zou, Panagiotis Kilimis, Alexandros Ampatzopoulos und Marlon Lehmann für die nette Unterstützung sowie Diskussion. Für die angenehme Zeit möchte ich mich bei allen Lehrstuhlmitarbeitern bedanken.

Meiner Familie danke ich für ihr Verständnis und die Unterstützung in jeder Situation auf meinem bisherigen Lebensweg. Besonders meinen Eltern, Frau Thi Dao Dinh und Herr Xuan Tham Le danke ich für Eure Liebe.

Abschließend möchte ich mich bei meiner lieben Ehefrau Minh Hang Pham, meinen Kindern Pham Duc Minh Le und Pham Duc Duy Le für die ununterbrochene Unterstützung in allen Lebenslagen und für die Kraft bedanken, die sie mir gegeben haben.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	XI
Verzeichnis der Abbildungen.....	XV
Verzeichnis der Tabellen	XVII
Verzeichnis der Diagramme.....	XIX
Verzeichnis der Algorithmen	XXI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung.....	1
1.2 Lösungsansatz und Zielstellung.....	4
1.3 Vorgehensweise	6
2 Anforderungen an den mobilen Roboter	8
2.1 Wesentliche Definitionen und Begriffe	8
2.2 Analyse der technologischen Einsatzmöglichkeit des mobilen Roboters.....	11
2.3 Ableitung der Anforderungen an das neue flexible mobile Robotersystem	13
3 Stand der Technik und Forschung.....	17
3.1 Analyse des aktuellen Industriesystems.....	17
3.1.1 Roboter.....	17
3.1.2 Fördermittel und mobile Plattform	22
3.1.3 Bildverarbeitungs-/ Sensorkonzept.....	26
3.2 Kalibrierungstechnologien für mobile Robotersysteme	31
3.2.1 Allgemeine Methode der Zellenkalibrierung.....	31
3.2.2 Existierende Umgebungserkennungssysteme mittels Vision und Sensoren.....	35
3.3 Synchronisierungstechnologien für mobile Robotersysteme.....	37
3.3.1 Allgemeine Methode der Synchronisation.....	37
3.3.2 Existierende mobile Robotersysteme für die Synchronisation	39
3.4 Objekterkennung.....	40
3.4.1 Allgemeine Methoden der Objekterkennung.....	40
3.4.2 Existierende Objekterkennungssysteme mittels Vision und Sensoren	45
3.5 Bahnplanung und Greifplanung.....	48
3.5.1 Allgemeine Methode der Bahnplanung	48
3.5.2 Allgemeine Methode der Greifplanung	54

3.5.3	Existierende Robotersysteme	56
3.6	Sicherheitskonzept	57
3.6.1	Allgemeine Voraussetzungen	57
3.6.2	Mensch – Roboter – Interaktion/ Kollaboration	57
3.6.3	Existierende Systeme	58
3.7	Analyse existierender Forschungs- und Entwicklungsprojekte	59
3.8	Zusammenfassung	62
4	Entwicklung des flexiblen Robotersystems mit Bildverarbeitungssystem	65
4.1	Übersicht über das gesamte entwickelte System	65
4.1.1	Übersicht über die entwickelte Methode und Zielstellung	65
4.1.2	Ablauf der gesamten entwickelten Methode	66
4.1.3	Systemarchitektur	69
4.2	Kinematik, Dynamik und Quaternion des Robotersystems	70
4.2.1	Kinematik	71
4.2.2	Dynamik von Industrierobotern	72
4.2.3	Quaternionen für Roboterachsen	73
4.3	Kalibrierungsroutine für das entwickelte Robotersystem	74
4.3.1	Kalibrierung der externen 3D - Kamera	75
4.3.2	Kalibrierung der externen 2D - Kamera	78
4.4	Entwicklung eines Regelsystems für das Synchronisationskonzept	81
4.4.1	Analyse der Konzepte des Roboters in der Montagelinie	81
4.4.2	Methode der Synchronisation	83
4.4.3	Regelsystem	85
4.5	Entwicklung einer Routine für die Kalibrierung der Umgebung	86
4.5.1	Entwicklung einer Methode zur Simulation der Arbeitsumgebung	86
4.5.2	Optimierung der Orientierung der Arbeitsebene	91
4.6	Entwicklung eines Bildverarbeitungssystems für Roboterregelung	92
4.6.1	Überblick über die entwickelte Methode des Bildverarbeitungssystems	92
4.6.2	Objekterkennung mittels 3D - Kamera	93
4.6.3	Optimierung der Objektpose mittels 2D - Kamera	94
4.6.4	Kollisionsfreie Trajektorie mit MoveIt!	98
4.7	Entwicklung einer Methode zur Durchführung der Montageaufgabe	101
4.7.1	Überblick über die entwickelte Methode	101
4.7.2	Greifplanung	104

4.7.3	Suchmethode zur Passung (Roboter Skills)	106
4.7.4	Schraubvorgang	110
4.8	Sicherheitsmechanismen	111
4.9	Zusammenfassung	112
5	Umsetzung des Konzepts	114
5.1	Komponenten der Anlage	114
5.2	Hardwareentwicklungen	117
5.3	Software Framework Robot Operating System (ROS)	118
5.4	Kommunikationsarchitektur der technischen Realisierung	119
6	Experimente und Bewertung	124
6.1	Synchronisationskonzept	124
6.2	Bildverarbeitungssystem in der teilweise strukturierten Umgebung	126
6.3	Optimierung der Objektpose mittels 2D - Kamera	127
6.4	Durchführung der Schraubaufgabe	129
6.5	Zusammenfassung	138
7	Diskussion der Arbeit	140
7.1	Synchronisationskonzept	140
7.2	Bildverarbeitungssystem	140
7.3	Optimierung der Objektpose mittels 2D - Kamera	141
7.4	Durchführung der Montageaufgabe	142
7.5	Gesamtsystem	143
8	Zusammenfassung und Ausblick	144
8.1	Zusammenfassung	144
8.2	Ausblick	146
9	Liste der Veröffentlichungen	147
10	Literaturverzeichnis	148
Anhang A:	Darstellung der Hauptbenutzeroberfläche	163
Anhang B:	Zusätzliche Abbildungen	164
Anhang C:	Sicherheitsbezogene Standards und Richtlinie	165
