.at

Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

Automatisierungstechnik

Mayur Andulkar

Development of Multimodal Collaborative Robot System using Hybrid Programming Methods

SHAKER
VERLAG

Development of Multimodal Collaborative Robot System using Hybrid Programming Methods

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

Master of Technology

Mayur Andulkar

geboren am 19.10.1990
in Akola, Maharashtra, Indien

Vorsitzender:	**Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach**
Gutachter:	**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger**
Gutachter:	**Prof. Dr.-Ing. Rolf Kraemer**
Tag der mündlichen Prüfung:	**04.07.2018**

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

Mayur Andulkar

Development of Multimodal Collaborative Robot System using Hybrid Programming Methods

Shaker Verlag
Aachen 2018

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Cottbus-Senftenberg, BTU, Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018
All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6124-6
ISSN 1864-5789

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die Automatisierungstechnik bildet eine Schlüsseltechnologie für die Steigerung der Produktinnovation und dieVerbesserung von Wertschöpfungsprozessen. Als Konsequenz einer globalen Wirtschaftsstruktur müssen alle Unternehmensbereiche wie Entwicklung, Produktion und Güterverkehr in einen übergreifenden Kontext gestellt und behandelt werden. Dabei stellt 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, dem *Industrial Life Cycle Automation* runden das Aufgaben- und Leistungsspektrum des Lehrstuhls ab.

Die in dieser Buchreihe erschienenen 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

Acknowledgement

Förderhinweis: Gedruckt bzw.veröffentilicht mit Unterstützung des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD).

Acknowledgement: Printed with the support of the German Academic Exchange Service (DAAD).

Abstract

The development of collaborative robots (cobots) has enabled automation of several processes such as assembly, logistics, packaging etc. which were historically impossible to automate. Compared to the conventional industrial robots, cobots provide the flexibility to execute a task together with humans along with the possibility of performing different types of tasks by moving them from one workstation to another. Although these advantages of cobots have opened up a wide range of possibilities, there are several issues such as environment model generation, task specific programming, requirement of qualified personnel etc. that need to be resolved before they can become a common part of the manufacturing process.

To assess the requirements for performing a given task using a cobot system, the aspects: ease of use, adaptability, efficiency, robustness and safety are looked into. A study of state of the art methods compares the identified requirements and indicates that three hybrid programming approaches ”instructive programming”, ”programming by demonstration” and ”end-to-end learning” are suitable for enabling the use of movable cobots in industrial environments.

Based on these approaches, three methods are developed in this thesis, each of which involves integrating vision systems into cobots. The methods were implemented in three different scenarios and compared on the basis of the identified requirements for their use in manufacturing environments.

The first method ”Instructive programming for autonomous task performance” was implemented into a demonstrator capable of performing assembly tasks of fixing and screwing. The method involved object detection based on template matching with an occupancy grid map of the environment in order to achieve collision free task execution. A task of part handling was considered for the implementation of the second method ”Programming by demonstration through hand-eye coordination” in which the cobot was programmed using a combination of a 2D camera and human demonstrations. In contrast to the first method, the object detection was performed using Region Based Convolutional Neural Networks for 2D images and the operators experience was used for task sequencing. Finally the third method ”Task performance through deep reinforcement learning” was implemented in a simulation environment for performing simple assembly tasks: peg in hole and ring in peg. A mapping from state to actions for controlling the cobot was learned using policy optimization in an end-to-end manner.

It was concluded that the second method fulfilled most of the requirements of movable cobots as the method combined the human capabilities of adapting to new scenarios with the cobot capabilities of performing tasks with high accuracy and repeatability.

Kurzfassung

Die Entwicklung kollaborierender Roboter (Cobots) ermöglicht die Automatisierung verschiedener Prozesse, wie zum Beispiel Montage, Logistik oder Verpackung, die bisher unmöglich zu automatisieren waren. Cobots bieten gegenüber konventionellen Robotern sowohl die Vorteile, mit Menschen zusammen zu arbeiten, als auch verschiedene Arten von Aufgaben durchzuführen, indem sie zwischen Arbeitsplätzen bewegt werden können. Obwohl diese Vorteile der Cobots eine große Fülle an Möglichkeiten eröffnen, bleiben z. B. noch einige Probleme wie die Generierung eines Umgebungsmodells, aufgabenspezifisches Programmieren und die Anforderungen an qualifiziertes Personal bestehen. Diese Probleme müssen gelöst werden, bevor Cobots Teil des alltäglichen Produktionsprozesses werden.

Um die Anforderungen zu ermitteln, welche entstehen, wenn eine Aufgabe mit einem Cobot System ausgeführt werden soll, wurden die Aspekte Bedienerfreundlichkeit, Wandlungsfähigkeit, Effizienz, Stabilität und Sicherheit näher betrachtet. Eine Studie zum Stand der Technik vergleicht anhand der identifizierten Anforderungen unterschiedliche Programmierverfahren. Es wurden drei hybride Programmierverfahren ermittelt, "Instruktionsprogrammierung", "Programmieren durch Vormachen" und "End-to-End Learning", die geeignet sind um bewegliche Cobots im industriellen Umfeld zu nutzen.

Basierend auf diesen Verfahren wurden in der vorliegenden Arbeit drei Methoden entwickelt, die jeweils die Integration von Vision-Systemen in Cobots beinhalten. Die Methoden wurden in drei verschiedenen Szenarien implementiert und auf der Basis der zuvor identifizierten Anforderungen für ihre Anwendung im Produktionsumfeld verglichen.

Die erste Methode "Instruktionsprogrammierung für autonome Tätigkeitsausführung" wurde in einem Demonstrator umgesetzt, der in der Lage ist die Montagetätigkeiten Fixieren und Schrauben durchzuführen. Die Methode beinhaltet Objekterkennung basierend auf Template Matching mit einer Umgebungskarte, die mit Occupancy Grid Mapping erstellt wurde, um einen kollisionsfreien Ablauf zu ermöglichen. Eine Teilehandlingsaufgabe wurde für die Implementierung der zweiten Methode betrachtet, "Programmieren durch Vormachen mit Hand-Auge-Koordination", in welcher der Cobot mit Hilfe einer Kombination aus 2D-Kamera und Vormachen durch den Menschen programmiert wurde. Im Gegensatz zur ersten Methode besteht hier die Objekterkennung aus einem künstlichen neuronalen Netz (Region Based Convolutional Neural Network) für 2D-Bilder und die Erfahrung des Bedieners dient der Aufgabensequenzierung. Die dritte Methode "Aufgabenausführung durch Deep Reinforcement Learning" wurde in einer Simulationsumgebung umgesetzt, um einfache Montagetätigkeiten durchzuführen: Stempel in Bohrung und Ring in Stempel. Um den Roboter zu kontrollieren, wurde eine Zuordnung von seinen Zuständen auf Aktionen mit Hilfe von End-to-End Policy Optimierung gelernt.

Es stellte sich heraus, dass die zweite Methode am besten den Anforderungen von beweglichen Cobots entspricht. Sie kombiniert die menschliche Fähigkeit, auf neue Szenarien zu reagieren, mit der Fähigkeit des Cobots, Aufgaben mit hoher Präzision und hoher Wiederholbarkeit durchzuführen.

Acknowledgements

First and foremost I would like to thank my supervisor Prof. Dr.-Ing. Ulrich Berger who gave me the opportunity to realize my thesis at the Chair of Automation Technology, Brandenburg University of Technology (BTU) Cottbus-Senftenberg under the grant of the German Academic Exchange Service (DAAD). I am really grateful for his helpful suggestions and continual support which were crucial in the success of this work. I would also like to thank Prof. Dr.-Ing. Rolf Kraemer for his valuable inputs and comments in improving the literal contents of the thesis. My thanks also goes to Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Bambach for undertaking the chairmanship of the PhD defense committee.

My special thanks to all the people at the Chair of Automation Technology, BTU Cottbus-Senftenberg who have contributed to the success of my PhD. Particularly the assistance of Dipl.-Ing. J. Philipp Städter, Dipl.-Ing. Udo Steffens and Dr.-Ing. Christian Lehmann in developing the hardware and software required for the demonstrators is deeply appreciated. I am grateful to have worked with Dr.-Ing. Duc Tho Le, M.Sc. Wenchao Zou, Dipl.-Wirt.-Ing. Panagiotis Kilimis, M.B.A Alexandros Ampatopoulos and Ms. Karin Habelski. They have not only been exceptionally supportive and encouraging but were also my family in Cottbus.

During my time at BTU, I had the opportunity to work as an intern at Daimler AG from June to August 2017 due to the support of Prof. Berger. During my internship, I am glad to have befriended and worked with M.Sc. Jan Hodapp. His assistance in developing the Hand-eye coordination demonstrator and 2D image object detector is deeply acknowledged. I am also grateful to my supervisor Dr.-Ing. Matthias Reichenbach and his team for their continual guidance and assistance.

I am particularly indebted to my family who have been a constant source of support and motivation, particularly in the difficult stages of this work. I am really grateful to have my brother by my side who has been instrumental in guiding me all the while and always encouraged me to strive for more. I am thankful to all my friends especially Vinay Bandari, Kanuj Mishra and Mirko Augustinovic who have supported me all the time and helped me manage difficult situations. I am thankful to my mentors Prof. Dr. Shital Chiddarwar and Prof. Shyam Ramnani for inculcating a keen sense of interest in the field of robotics and their relentless support in undertaking new endeavors.

Finally I am grateful to the DAAD for granting me the scholarship to the conduct this work and their continual support right from my arrival in Germany and even after the end of scholarship.

Mayur Andulkar

Cottbus, July 2018

Contents

Page No.

Contents VII

List of Figures XI

List of Tables XIII

List of Abbreviations XV

List of Units and Symbols XVII

1 Motivation and problem statement 1
- 1.1 Trends in manufacturing and collaborative robots . . . 1
- 1.2 Mobile cobots in industrial processes . . . 3
- 1.3 Objectives and contributions of the work . . . 4
- 1.4 Thesis structure . . . 5

2 Problem definition and requirement analysis 7
- 2.1 Essential definitions and terms . . . 7
- 2.2 Issues with performing a task using a movable cobot . . . 10
  - 2.2.1 Hardware and peripherals . . . 10
  - 2.2.2 Robot control . . . 12
  - 2.2.3 Task related factors . . . 13
  - 2.2.4 Human robot interaction . . . 13
- 2.3 Requirement analysis for movable cobot in industrial applications . . . 14
  - 2.3.1 Ease of use . . . 14
  - 2.3.2 Flexibility and reconfigurability . . . 16
  - 2.3.3 Adaptability . . . 17
  - 2.3.4 Reliability and process safety . . . 18
  - 2.3.5 Efficiency and robustness . . . 18
  - 2.3.6 Safety . . . 19
- 2.4 Summary of requirements . . . 20

3 State of the art 23
- 3.1 Introduction to robot programming . . . 23
  - 3.1.1 Classification procedures for robot programming . . . 23
  - 3.1.2 Collaborative robot programming . . . 24
  - 3.1.3 Instructive programming . . . 26
  - 3.1.4 Programming by demonstration . . . 27
  - 3.1.5 End-to-end learning . . . 27
- 3.2 Analysis and evaluation of the technologies involved in cobot programming . 28
  - 3.2.1 Vision system . . . 28
  - 3.2.2 Object recognition and pose estimation . . . 34
  - 3.2.3 Robot motion planning . . . 38

3.3 Machine learning in robotics . . . 41
3.3.1 Deep learning . . . 42
3.3.2 Reinforcement learning . . . 46
3.3.3 Deep reinforcement learning for robot control . . . 50
3.4 Possible application scenarios . . . 50
3.4.1 General application areas for movable robots . . . 51
3.4.2 Human robot collaboration scenarios . . . 52
3.4.3 Non-industrial applications . . . 52
3.5 Analysis and evaluation of the existing solutions for possible scenarios . . . 53
3.5.1 Relevant projects . . . 53
3.5.2 Patents . . . 53
3.6 Safety standards for movable cobots in industrial environments . . . 54
3.6.1 Standards for conventional industrial robots . . . 54
3.6.2 Standards for HRC scenario . . . 54
3.6.3 Standards for movable cobots . . . 56
3.7 Summary of application scenarios and requirements . . . 56

4 Conceptualization 61
4.1 Assumptions . . . 61
4.2 Concepts for movable cobot programming . . . 62
4.2.1 Concept I: Autonomous task execution . . . 64
4.2.2 Concept II: Human assisted task execution . . . 65
4.2.3 Concept III: Learning control through interaction with environment . 66
4.3 Common interaction concept . . . 66

5 Development of system components 69
5.1 Camera calibration . . . 69
5.1.1 Intrinsic calibration . . . 69
5.1.2 Extrinsic calibration . . . 70
5.1.3 Hand-eye calibration . . . 73
5.2 Object recognition and pose estimation . . . 75
5.2.1 Synthetic data for object recognition . . . 76
5.2.2 Region based convolutional neural networks for 2D images . . . 77
5.2.3 Template based recognition for 3D images . . . 81
5.3 Collision free motion planning . . . 83
5.3.1 Probabilistic motion planning . . . 84
5.3.2 Generation of collision free motions . . . 85
5.4 Robot control through reinforcement learning . . . 86
5.4.1 Framework for policy search . . . 88
5.4.2 Training a policy . . . 89
5.5 User interaction . . . 90
5.5.1 User interaction during system calibration . . . 91
5.5.2 User interaction in task selection mode . . . 92
5.5.3 User interaction in program execution mode . . . 94
5.6 Summary of developed system components . . . 95

6 Derivation of methods based on system components 97

6.1 Method I: Instructive programming for autonomous task performance 97
6.2 Method II: Programming by demonstration through hand-eye coordination . 99
6.3 Method III: Task performance through deep reinforcement learning 101

7 Implementation and validation of developed methods 103
7.1 Scenario for validation of Method I 103
7.1.1 Development of demonstrator 104
7.1.2 Implementation of system components 106
7.1.3 Results and discussion 107
7.2 Scenario for validation of Method II 108
7.2.1 Development of demonstrator 110
7.2.2 Implementation of system components 111
7.2.3 Results and discussion 115
7.3 Scenario for simulation of Method III 116
7.3.1 Development of simulation environment 117
7.3.2 Implementation of system components 118
7.3.3 Results and discussion 120
7.4 Comparison of different methods 121
7.5 Conclusion 126

8 Summary and outlook 129

Bibliography 133

A Appendix 155
A.1 Publications of the author 155
A.2 Safety-related standards and guidelines 157
A.3 KUKA LWR iiwa 159
A.4 Camera calibration 161
A.4.1 Pinhole camera model 162
A.4.2 Unified Projection model 163