

Henrik Ebel

**Distributed Control and
Organization of Communicating
Mobile Robots: Design, Simulation,
and Experimentation**

**SHAKER
VERLAG**



Band 69 (2021)

Distributed Control and Organization of Communicating Mobile Robots: Design, Simulation, and Experimentation

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und
Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Henrik Ebel
aus Kempten (Allgäu)

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Qirong Tang
Prof. Dr. sc. Sebastian Trimpe

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juli 2021

Institut für Technische und Numerische Mechanik
der Universität Stuttgart

2021

Schriften aus dem Institut für Technische und Numerische
Mechanik der Universität Stuttgart

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard

Band 69/2021

Henrik Ebel

**Distributed Control and Organization of
Communicating Mobile Robots: Design, Simulation,
and Experimentation**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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 978-3-8440-8172-5

ISSN 1861-1651

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Preface

This dissertation was written over the course of my work as a member of the research staff at the Institute of Engineering and Computational Mechanics (ITM) at the University of Stuttgart. Indeed, anywhere else, this dissertation could not have become what it is. Omnipresent collegiality, helpfulness, the always-open office doors, and signature coffee breaks have made my time at the institute so worth living and enriching and have formed the foundation for a marvelous working atmosphere. Since the institute's characteristic atmosphere seems to have persisted throughout many generations of doctoral researchers, it is also a testament to the qualities of the institute's leadership, which directs and cultivates the institute, its atmosphere, and its staff members to make it such a unique place to be for a doctoral researcher. Of course, this atmosphere builds upon the characters of all the wonderful colleagues and friends that have worked at the ITM during the years I have been there so far.

I would like to express my deepest gratitude to Prof. Peter Eberhard for believing in my abilities early on, already giving me great advice when I was an undergraduate and graduate student, providing me with the opportunity to work at the ITM, and guiding me proficiently through my dissertation work and scientific life. I am very grateful for the freedom I was granted in research and for all the advice I got whenever needed. It fills me with joy that I am given the opportunity to continue my work at the ITM. Moreover, without the help and advice of Dr.-Ing. Pascal Ziegler, Peter Schöler, and my colleague Wei Luo, the creation of all the hardware for the experimental research involved in the dissertation would have been nigh impossible. Furthermore, I thank Prof. Jörg Fehr for being a great motivator and pointing me in a lot of right directions. I thank Prof. Michael Hanss for all the discussions about the peculiarities of many languages and for pulling the strings behind quite some of the institute's social activities.

With Prof. Qirong Tang and Prof. Sebastian Trimpe, I am happy to have had such interested and professional co-examiners and I thank them for all the effort and scrutiny invested. In addition, I extend my gratitude to Prof. Qirong Tang for having been my host during a two-month research visit to his laboratory in Shanghai in 2018. Many of the qualities of this dissertation are rooted in insights from my time in Shanghai. Moreover, I would like to thank Prof. Aki Mikkola and Dr. Marko Matikainen for being great supervisors and hosts during a four-month research visit to Lappeenranta University of Technology as a master's student in the winter of 2015/16. Not only will my stay in Finland be a lifelong-memorable experience due to the kindness and openness of the research staff there but it also demonstrated to me how much joy scientific work can bring and, thus, it helped to set me onto the path leading to this thesis and beyond.

I thank my colleagues and friends at the ITM for being awesome advice-givers and great company. Furthermore, I had the pleasure to supervise well over 20 students and countless student assistants, who helped tremendously in teaching and research, and I would like to thank each and every one of them for all the insights that we gained together. Special thanks go to my friends from the Simulation Technology study program, who already made my undergraduate and graduate studies so much more enjoyable and continue to be great company. It was almost ten years ago that we ventured together into a journey that, ultimately, lead most of us into the world of scientific research. And, as often in life, some of the strongest ties are forged on common journeys. Last but not least, I would like to express my deepest gratitude to my parents and brothers for their unconditional support throughout my studies and, simply, for being great parents and siblings throughout all my life.

Stuttgart, July 2021

Henrik Ebel

Contents

Zusammenfassung	VII
Abstract	IX
1 Introduction	1
2 Fundamentals from Modeling	7
2.1 Mechanical Modeling – Multibody Systems	8
2.2 Information Modeling	11
2.2.1 Graphs	11
2.2.2 Paths, Trajectories, and Motion Planning	16
2.2.3 Convex Polytopes and Convexity	18
2.2.4 Workspace Modeling	21
3 Fundamentals from Distributed Control and Organization	25
3.1 Optimization	26
3.2 Model Predictive Control	30
3.2.1 The Concept of Model Predictive Control	30
3.2.2 Distributed MPC	38
3.3 Graph-Algebraic Control	43
4 Designing a Scheme for Cooperative Robotic Behavior	47
4.1 Defining Features of Distributed Cooperative Behavior	47
4.2 Approach and System Architecture	49
4.3 A Custom Mobile Robot for Cooperative Tasks	53
4.3.1 Hardware Design	54

4.3.2	Mechanical Model	56
4.3.3	Simulative Analysis	61
5	Distributed Control and Organization for Cooperative Robotic Behavior	67
5.1	Formation Control	69
5.1.1	DMPC-Based Formation Controller	71
5.1.2	Graph-Algebraic Formation Controller	77
5.1.3	Practical Considerations	81
5.1.4	Comparative Analysis	83
5.2	Organization for Cooperative Transportation	94
5.2.1	Formation Synthesis	95
5.2.2	Negotiation	107
5.3	Mapping and Path Planning	109
5.3.1	Individual Navigation	109
5.3.2	Global Navigation	111
6	Results from Cooperative Transportation	117
6.1	Simulative Investigation	117
6.2	Experimental Investigation	127
6.3	Transportation Through Obstacle-Ridden Environments	134
7	Conclusion and Outlook	139
	Appendix	143
A.1	Expressions in the DMPC Formation Controller	143
	Abbreviations, Symbols, and Notation	145
	Bibliography	149

Zusammenfassung

Die kommunikationsbasierte Kooperation mehrerer robotischer Systeme hat das Potenzial, den Horizont dessen, was mit robotischer Automation erreichbar ist, nachhaltig zu erweitern. Daher rücken dynamisch anpassbare robotische Netzwerke zunehmend in den Fokus der Forschung, die in den letzten Jahrzehnten zuvorderst die Verbesserung einzelner Roboter vorangetrieben hat. Hierbei verbindet sich mit der in diesem Sinne verteilten Robotik die Hoffnung, die erreichbare Flexibilität, Robustheit und Leistungsfähigkeit gegenüber zentralisierten Ansätzen entscheidend positiv zu beeinflussen. Trotz dieser charakteristischen, erwarteten Vorteile sind robotische Netzwerke jedoch noch vorwiegend Gegenstand von Forschung und Forschungsvisionen und noch nicht in die Breite der Anwendung gelangt. Dies mag auch damit im Zusammenhang stehen, dass die erwarteten Vorteile zum Teil durch eine gesteigerte Systemkomplexität aufgewogen werden, schließlich ist die Entwicklung eines zuverlässigen und dynamisch anpassbaren verteilten Systems durchaus herausfordernd. Dabei ist bereits die herkömmliche Robotik durch ihren interdisziplinären Charakter ein anspruchsvolles Betätigungsfeld mit mannigfaltigen Problemstellungen. Infolgedessen ist die verteilte Robotik in einem Stadium, in dem sich Fortschritte durch zielgerichtete Forschung anhand klar definierter Modellprobleme erzielen lassen. Aus diesem Grund stellt sich diese Dissertation den Herausforderungen der verteilten Robotik anhand einer kooperativen Transportaufgabe. Dabei sollen omnidirektionale mobile Roboter polygonale Objekte komplett selbstständig und nur durch Schubkräfte transportieren. Diese Aufgabe ist hervorragend als Modellproblem geeignet, da sie alle für das Forschungsfeld charakteristischen Herausforderungen mit sich bringt und gleichzeitig durch ihren anschaulichen Charakter eine intuitive Beurteilung der Funktionstüchtigkeit ersonnener Regel- und Organisationsverfahren ermöglicht. Die Dissertationsschrift behandelt alle Aspekte der Aufgabe auf umfassende Art und Weise. So werden neben den Organisations- und Regelverfahren auch die zugrundeliegende verteilte Programmarchitektur sowie sogar die eingesetzten, extra für die Forschung in der verteilten Robotik entwickelten mobilen Roboter entworfen und untersucht. Die im Rahmen von Simulationen und Experimenten erzielten Ergebnisse zeugen hierbei von einer beinahe beispiellosen Einsatzflexibilität des ersonnenen Transportansatzes. Insbesondere werden alle maßgeblichen, versprochenen Vorteile der verteilten Robotik praktisch umgesetzt, wobei der dynamischen Anpassung des robotischen Netzwerks eine besondere Bedeutung zukommt. Die vielseitige Anwendbarkeit des vorgestellten Ansatzes geht hierbei vor allem auf den Einsatz optimierungsbasierter Ansätze für die wichtigsten Unterprobleme zurück. Die Transportaufgabe wird aufgeteilt in eine Formationsregelungsaufgabe sowie eine Organisationsaufgabe. Letztere besteht darin, für den Objekttransport geeignete Formationen zu bestimmen. Dies ermöglicht die Nutzung verteilter modellprädiktiver Regelung für die Formationsregelung und die Lösung der Organisationsaufgabe mithilfe von verteilter Optimierung. Darüber hinaus werden in der Dissertation auch die selbstständige Aushandlung einer Aufgabenverteilung

zwischen den Robotern sowie die lokale und globale Navigation behandelt. Die erzielten Erkenntnisse erstrecken sich über die unmittelbaren Erfordernisse des Modellproblems hinaus. Ein Teilaspekt, der sich auch in anderen Forschungsvorhaben in der verteilten Robotik als nützlich erweisen könnte, ist die entwickelte verteilte Programmarchitektur, die insbesondere den Übergang von Simulationen zu Experimenten stark vereinfacht. Ebenso sind die entwickelten mobilen Roboter auch für andere Aufgaben und die Behandlung anderer Forschungsfragen geeignet. Überdies ist die Formationsregelung von allgemeinerer Nützlichkeit. Daher wird der vorgeschlagene modellprädiktive Ansatz gesondert behandelt und analysiert. Hierbei bestätigt der Ansatz seine aufgrund theoretischer Überlegungen erwarteten Vorteile auch in Experimenten und im Vergleich zu einem gebräuchlicheren Ansatz, obwohl letzterer so modifiziert wurde, dass auch dieser Beschränkungen der Stellgröße berücksichtigen kann. Nicht zuletzt ist eine vorgeschlagene, verteilte Fassung eines Partikelschwarmoptimierers auf Basis der erweiterten Lagrange-Funktion potenziell weit über die Robotik hinaus von Nutzen. In der Transportaufgabe leistet der Algorithmus gute Dienste bei der Bestimmung von zum Transport geeigneten Formationen.

Abstract

Leveraging the communication-based cooperation of multiple robotic systems has the potential to significantly further the state of the art of what is achievable with robotic automation. Therefore, beyond solely improving the capabilities of individual robotic agents, reconfigurable robotic networks have come to the attention of research and industry. However, despite the potential to increase flexibility, robustness, and performance, robotic networks are not yet in widespread application, with many research challenges remaining. After all, developing a reliable, reconfigurable distributed system is very difficult, adding to the manifold, interdisciplinary challenges posed by robotics in general. Hence, to better understand and subsequently overcome these challenges, distributed robotics is still in a state where it can benefit significantly from research that tackles well-defined benchmark problems. Consequently, this thesis faces the challenges of distributed robotics at the example of a cooperative transportation task. In the task, omnidirectional mobile robots cooperate to maneuver polygonal objects purely by pushing forces and in a completely self-reliant manner. The task is found to be a formidable benchmark problem since it raises all major challenges of the field while still being easily graspable, intuitively making evident the qualities of the control and organization schemes employed. The thesis discusses all aspects of the task in an encompassing manner, not only including the design of the employed control and organization methods, but also the software architecture and even the custom robotic hardware employed. Results from simulations and real-world hardware experiments show that the proposed scheme is of unprecedented versatility, putting into practice all major promises of distributed robotics, including plug-and-play control for online reconfigurations of the robotic network. This is achieved by relying, at heart, on optimization-based schemes. The task is decomposed into a formation control task and the organizational task of inferring formations useful for manipulation, allowing the usage of distributed model predictive control for formation control and of distributed optimization for organization. Further challenges dealt with include self-reliant task allocation as well as local and global navigation. However, the contributions of the thesis extend beyond the immediate needs of the benchmark problem. A component that may prove helpful in other research endeavors in the field includes the devised distributed software architecture, which greatly facilitates the transition from simulations to experiments. Similarly, the custom mobile robot and different proposed setups of the formation controller are also suited to other tasks and projects. Due to formation control's universal appeal, the proposed approach based on distributed predictive control is analyzed separately from the transportation task. In experiments, the predictive control-based approach confirms its theory-rooted advantages in comparison to a more traditional approach, despite the latter being modified to also respect input constraints. Finally, a proposed distributed version of an augmented Lagrangian particle swarm optimization algorithm, which is used to devise formations in the thesis, may even prove useful far beyond robotics.