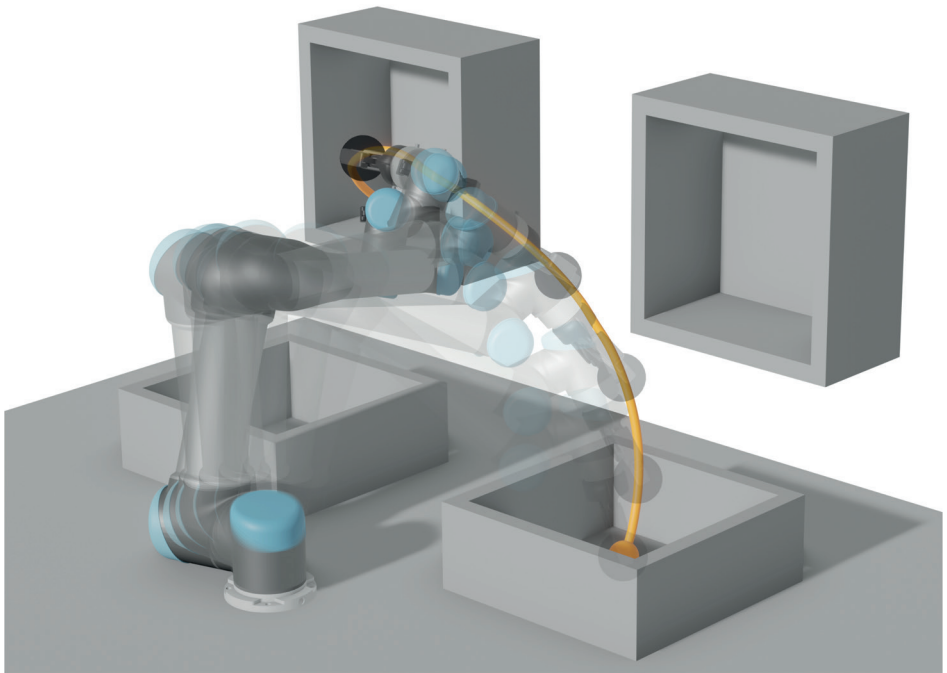


Trajectory Optimization Considering Energy Consumption and Service Life Towards Efficient Robotic Systems

Autor: Florian Stuhlenmiller, M.Sc.
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. S. Rinderknecht



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT





Trajectory Optimization Considering Energy Consumption and Service Life Towards Efficient Robotic Systems

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von
Florian Stuhlenmiller, M.Sc.
aus Augsburg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold
Mitberichterstatterin:	Prof. Dr. rer. nat. Debora Clever

Tag der Einreichung:	20.10.2021
Tag der mündlichen Prüfung:	14.12.2021

Darmstadt 2021
D17



Forschungsberichte Mechatronische Systeme im Maschinenbau

Florian Stuhlenmiller

**Trajectory Optimization Considering Energy
Consumption and Service Life Towards Efficient
Robotic Systems**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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 978-3-8440-8506-8

ISSN 2198-8536

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

Acknowledgements

First and foremost, I thank Professor Stephan Rinderknecht, who gave me the opportunity to work on robotic research projects at the Institute of Mechatronic Systems. For introducing me to the exciting field of research and for his support during my studies, I am very thankful to Philipp Beckerle. I thank all friends and colleagues at the department for the friendly and supporting atmosphere they are creating as well as the inspiring exchanges during discussions and coffee breaks. In particular, I would like to mention Veronika Ungermann, Anna Abrams, Jens Jungblut, Omar Elsarha and Janosch Moos. My special thanks go to Professor Debora Clever for introducing me to robotics and optimal control as well as her constant support and guidance. I want to thank Professor Matthias Weigold for his intensive discussion of my research results. Furthermore, I thank Michael Lutter and the department Intelligent Autonomous System for allowing me to use their robot Darias as well as Steffi Weyand and the department Material Flow Management and Resource Economics for their cooperation in performing the life cycle assessment. Finally, I would like to thank my friends and family for encouraging my studies and for their constant support and advice.

Kurzfassung

Die industrielle Fertigung profitiert von der Automatisierbarkeit bei gleichzeitiger Flexibilität von Robotersystemen. Dementsprechend muss ein Roboter so konzipiert sein, dass verschiedene, vom Anwender programmierte Aufgaben ausgeführt werden können. Dabei haben die programmierten Bewegungsabläufe aufgrund von Einsatzdauern mehrerer Jahre einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz. Es gibt jedoch nahezu unbegrenzte Möglichkeiten, den örtlichen und zeitlichen Verlauf der Bewegungen festzulegen. Um trotz dieser Komplexität optimale Trajektorien zu finden, werden in der Literatur verschiedene Optimierungsmethoden vorgestellt. Diese werden beispielsweise eingesetzt, um den Energiebedarf zu minimieren und somit die Effizienz zu steigern und die Umweltauswirkungen zu verringern. Gleichzeitig gibt es Ansätze, die Lebensdauer zu maximieren. Die Wechselbeziehung zwischen diesen beiden Kriterien wird bisher jedoch nicht berücksichtigt. Ziel dieser Arbeit ist daher die Optimierung von Trajektorien unter Berücksichtigung des Energiebedarfs und der Lebensdauer.

In einem ersten Schritt werden diese beiden Kriterien anhand des dynamischen Modells eines seriellen Manipulators sowie der Aktoreigenschaften modelliert. Dies ermöglicht die Bestimmung der benötigten elektrischen Leistung und der Lebensdauer der Getriebe in Abhängigkeit der Trajektorie. Für eine Bestimmung der Roboterlebensdauer wird die Zuverlässigkeit der Komponenten herangezogen. Dadurch kann die Systemzuverlässigkeit unter Berücksichtigung ausgewählter Komponenten und der Manipulatorstruktur in Abhängigkeit der Trajektorie geschätzt werden.

Im nächsten Schritt werden gradientenbasierte, multikriterielle Trajektorienoptimierungsverfahren implementiert. Dazu wird eine Zielfunktion entwickelt, die Energiebedarf und Systemzuverlässigkeit kombiniert. Es werden Vereinfachungen der Kriterien vorgeschlagen, um kontinuierlich differenzierbare Formulierungen zu erhalten und den Rechenaufwand zu reduzieren. Die Zielfunktion wird zur Optimierung von Parametern der Trajektorien und des Überschleifens sowie in Methoden der Optimalsteuerung verwendet. Die Ergebnisse der Optimierungen zeigen ein hohes Verbesserungspotenzial sowie einen Zielkonflikt zwischen Energiebedarf und Lebensdauer in Abhängigkeit von Optimierungsmethode, Aufgabe, Nutzlast und Bewegungsdauer. Experimentell ermittelte Energiebedarfe und Belastungen der Getriebe zeigen die generelle Anwendbarkeit des vorgeschlagenen Optimierungsansatzes.

Auf der Grundlage der Bewegungssimulation und der Optimierungsergebnisse werden die wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen mittels Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanzierung bewertet. Darüber hinaus werden korrektive Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt und erforderliche Ersatzteile werden anhand der modellierten Zuverlässigkeit abgeschätzt. Ausgewertete Ergebnisse bestätigen das Potenzial der Trajektorienoptimierung unter Berücksichtigung von Energiebedarf und Lebensdauer in Kombination mit Wartungsmethoden, Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanz zur Unterstützung der Entscheidungsfindung der Nutzer.

Abstract

Industrial manufacturing benefits from the automation capability combined with the flexibility of robotic systems. Accordingly, a robot must be designed to perform various tasks programmed by the user. The programmed trajectories have a distinct impact on efficiency due to operating durations of several years. However, there are almost unlimited possibilities to specify the location and timing of the motions. In order to find optimal trajectories despite this complexity, various optimization methods are presented in the literature. These are used, for example, to minimize energy consumption and thus increase efficiency and reduce environmental impact. At the same time, there are approaches to maximize the service life. However, interactions between both optimization criteria are not considered so far. Therefore, the objective of this thesis is the optimization of trajectories considering energy consumption and service life.

In the first step, both criteria are modeled based on the dynamic characteristics of a serial manipulator and the actuator properties. This approach enables the expression of the required electrical power and the service life of the gearboxes depending on the trajectory. For an assessment of the service life of the system, the reliability of the components is modeled. Thus, the system reliability can be estimated considering selected components and the manipulator structure depending on the trajectory.

In the next step, gradient-based, multi-objective trajectory optimization methods are implemented. Therefore, an objective function combining energy consumption and system reliability is developed. Simplifications of the criteria are proposed to obtain continuously differentiable expressions and reduce the computational effort. The objective function is utilized to optimize parameters of the trajectory and polynomial blends as well as in optimal control methods. Optimization results indicate a distinct potential for improvements and a conflict of interest between energy consumption and service life depending on optimization method, task, payload, and trajectory duration. Experimentally determined energy consumption and loads on the gearboxes show the general applicability of the proposed optimization approach.

Based on the motion simulation and optimization results, the associated economic and environmental impact is evaluated by life cycle costing and life cycle assessment. In addition, corrective maintenance is considered, and the required spare parts are estimated based on the reliability of the components. Evaluated results confirm the potential of trajectory optimization considering energy consumption and service life combined with maintenance methods, life cycle costing, and life cycle assessment to support user decision-making.

Contents

Acknowledgements	i
Kurzfassung	ii
Abstract	iii
List of Figures	vi
List of Tables	ix
Symbols	x
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Contribution	3
1.3 Outline	4
2 Background and State of Research	7
2.1 Introduction	7
2.2 Energy Efficiency Methods	8
2.3 Service Life Methods	12
2.4 Efficient Robotic Systems	14
2.5 Conclusion	17
3 Model-based Estimation of Energy Consumption and Service Life	19
3.1 Introduction	19
3.2 Kinematic Models	21
3.3 Geometric Jacobian	22
3.4 Dynamic Models	22
3.5 Actuation System Analysis	26
3.6 Energy Consumption Estimation	27
3.7 Service Life Estimation	29
3.8 Reliability Modeling	34
3.9 Model Assumptions and Discussion	38
3.10 Conclusion	40

4	Combined Optimization of Energy Consumption and Service Life	43
4.1	Introduction	43
4.2	Formulation and Simplification of the Objective Function	45
4.3	General Constraints and Boundary Conditions	48
4.4	Linear Interpolation with Polynomial Blends	53
4.5	Optimal Control	54
4.6	Optimization of Trajectory Parameters	66
4.7	Conclusion	70
5	Evaluation of the Combined Optimization of Energy Consumption and Service Life	73
5.1	Evaluation of the Initial Trajectories	75
5.2	Impact of Workpiece Weight and Cycle Time	78
5.3	Optimization Results for the <i>UR5</i>	80
5.4	Optimization Results for <i>Darias</i>	101
5.5	Summary and Discussion	111
6	Efficiency of a Robotic System	115
6.1	Maintenance Methods and Trajectory-Based Reliability Estimation . . .	116
6.2	Life Cycle Assessment	121
6.3	Life Cycle Costing	124
6.4	Evaluation of the Economic and Ecological Impact and the Efficiency .	125
6.5	Conclusion	134
7	Conclusion	137
7.1	Contributions	137
7.2	Summary and Outlook	140
A	Appendix	143
A.1	Kinematic and Dynamic Parameters of the <i>UR5</i>	143
A.2	Drive Train Parameters	144
A.3	Output Bearing Lifetime	146
A.4	Partial Derivatives of the System Reliability as Objective Function . . .	147
A.5	Points and Waypoints used for the exemplary Tasks	150
A.6	Values for the Constraints used in the Optimizations	151
A.7	The estimated mass for the modules of the <i>UR5</i>	152
B	Bibliography	153