

On Structural Optimization of Flexible Multibody Systems

Von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und
Fahrzeugtechnik und dem Stuttgart Research Centre for Simulation
Technology der Universität Stuttgart zur Erlangung der
Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von

Alexander Held

aus Chemnitz

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

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Robert Seifried

Prof. Dr. Olivier Brüls

Tag der Einreichung: 7. April 2014

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Juni 2014

Institut für Technische und Numerische Mechanik
Universität Stuttgart

2014

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

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

Band 33/2014

Alexander Held

**On Structural Optimization of
Flexible Multibody Systems**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

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 978-3-8440-3102-7

ISSN 1861-1651

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

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Technische und Numerische Mechanik an der Universität Stuttgart und wurde von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik sowie vom Stuttgart Research Centre for Simulation Technology als Dissertation angenommen.

Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Robert Seifried bedanken. Er hat mir, damals noch als Juniorprofessor, nicht nur die Möglichkeit gegeben, am Institut zu promovieren, sondern mir während der Zeit auch stets mit seiner Erfahrung und wertvollen Ratschlägen zur Seite gestanden. Selbst nachdem er einem Ruf an die Universität Siegen gefolgt war, begleitete er weiterhin die Arbeit und übernahm neben Prof. Dr. Olivier Brüls den Mitbericht.

In gleicher Weise danke ich Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Peter Eberhard für die Übernahme des Hauptberichtes und die Unterstützung während der gesamten Zeit. Die von ihm gepflegte und geförderte Atmosphäre und die Arbeitsbedingungen am Institut waren beispielhaft.

Es war mir eine Ehre, Teil dieses Instituts zu sein und die Zeit mit hochgeistigen Charakterköpfen wie Thomas Gorius, Markus Burkhardt, Achim Fischer, Christian Fischer, Michael Fischer, Timo Gaugele, Fabricio Lopes e Silva, Christine Nowakowski und Nico-Philipp Walz wird mir noch lange im Gedächtnis bleiben.

Zumeist war auch die Arbeit mit den Studenten eine Bereicherung. Als Hilfswissenschaftler oder im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten haben sie wertvolle Ergebnisse erbracht, wobei Sven Knüfer, Philipp Miermeister und Ali Moghadasi besonders zu erwähnen sind.

Nicht vergessen werden soll der Sommer 2011, den ich als Gast am Dynamic Simulation Laboratory an der University of Illinois at Chicago verbracht habe. Es waren nicht nur fachlich drei äußerst lehrreiche Monate. Durch die Gastfreundschaft von Prof. Ahmed A. Shabana und seinen Mitarbeitern konnte ich auch abseits des akademischen Lebens viel Neues sehen und erleben.

Tatsächlich haben all diese Umstände, Erlebnisse und Menschen dazu beigetragen, dass ich mich wie nie zuvor über einen solch langen Zeitraum einer Aufgabe mit meiner ganzen Freude und Motivation verschrieben habe. Danke für diese Zeit.

Stuttgart im September 2014

Alexander Held

To my family

Contents

Abstract	IX
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aims and Structure of this Work	2
2 Flexible Multibody Systems	7
2.1 The Floating Frame of Reference Approach	7
2.1.1 Kinematics	8
2.1.2 Kinetics	10
2.1.3 Standard Input Data	14
2.1.4 Global Shape Functions	14
2.2 The Absolute Nodal Coordinate Formulation	16
2.2.1 Kinematics	16
2.2.2 Kinetics	17
2.2.3 2D Shear-Deformable Beam Element	19
2.2.4 Element connectivity	20
2.3 Flexible Multibody Systems in Generalized Coordinates	22
2.4 Flexible Slider-Crank Mechanism	25
3 Optimization Procedure	29
3.1 Optimization using Virtual Prototypes	29
3.2 Parameterization	31
3.2.1 Shape Optimization	31
3.2.2 Topology Optimization	32

3.3	Objective Function	33
3.4	Optimization Algorithms	35
3.5	The Method of Moving Asymptotes	36
3.6	Sensitivity Analysis	41
3.6.1	Finite-Difference Method	42
3.6.2	Adjoint Variable Method	42
4	Shape Optimization using the ANCF	45
4.1	Flexible Slider-Crank Mechanism	45
4.1.1	Modeling and Parameterization	46
4.1.2	Efficient Evaluation of Parameterized Equations of Motion	48
4.2	Sensitivity Analyses	51
4.2.1	Sensitivity Analysis of Functional Objective Functions	51
4.2.2	Sensitivity Analysis of Equivalent Static Loads	54
4.3	Case Studies	58
4.3.1	Quasi-Static Analysis of a Cantilever Beam	58
4.3.2	Shape Optimization of a Flexible Slider-Crank Mechanism	59
5	Topology Optimization using the FFoR Formulation	65
5.1	Choice of Global Shape Functions	67
5.1.1	Adapted SIMP Approaches	67
5.1.2	Model Reduction of SIMP Parameterized Models	68
5.2	Sensitivity Analyses	76
5.2.1	Sensitivity Analysis of Equivalent Static Loads	76
5.2.2	Sensitivity Analysis of Functional Objective Functions	79
5.2.3	Augmented Standard Input Data	86
5.2.4	Nelson’s Method for Generalized Eigenvalue Problems	89
5.2.5	Sensitivity Filtering	91
5.3	Case Studies	92
5.3.1	Sensitivity Analyses	92
5.3.2	Influence of the Model Reduction Technique	99

5.3.3	Choice of the SIMP Approach	103
5.3.4	Dead-Load Optimization of a Flexible Piston Rod	105
6	Summary and Conclusion	109
	Symbols	113
	Literature	117