

Simon Densborn

Modellierung, Regelung und Trajektoriengenerierung für ein flexibles Mehrkörpersystem am Beispiel einer Feuerwehrdrehleiter

Band 63

**Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart**



Modellierung, Regelung und Trajektoriengenerierung für ein flexibles Mehrkörpersystem am Beispiel einer Feuerwehrdrehleiter

Modelling, Control, and Trajectory Planning for a Flexible Multibody System:
The Aerial Turntable Ladder

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

von

Simon Ernst Densborn
geboren in Bitburg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kemmetmüller

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Februar 2022

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2022

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 63

Simon Densborn

**Modellierung, Regelung und Trajektoriengenerierung
für ein flexibles Mehrkörpersystem am Beispiel einer
Feuerwehdrehleiter**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Stuttgart, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8612-6

ISSN 1863-9046

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

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meinen Vater

Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart in einem Kooperationsprojekt mit der Magirus GmbH entstanden. Diese Arbeit war nur durch die Unterstützung vieler Personen möglich. Ich möchte Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny als Leiter des Instituts für die Möglichkeit der Promotion, sein Vertrauen und das Forschungsthema danken. Auf Seiten der Magirus GmbH gilt mein Dank insbesondere Herrn Dr. rer. nat. Mathias Etter. Zudem möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kemmettmüller für sein großes Interesse an der Arbeit und die freundliche Übernahme des Mitberichts danken.

Die vorliegende Arbeit wurde erst aufgrund der engen Kooperation mit der Magirus GmbH und der Unterstützung zahlreicher Mitarbeiter möglich. Besonders erwähnt seien Jürgen Zettelmeier und Philip Erhart. Sie standen zu jeder Zeit sehr freundschaftlich mit Rat und Tat zur Seite, sowohl bei der alltäglichen Arbeit als auch beim Meistern von kleineren und größeren Herausforderungen. Des Weiteren möchte ich mich bei Fabrice Garnier, Marco Fahlbusch, Michael Graf, Tobias Häcker und Sami Al-Ezzy bedanken. Alle haben in direkter Weise zum Erfolg des Projektes beigetragen. Nicht vergessen möchte ich alle bisher nicht genannten Kolleginnen und Kollegen in der Entwicklungsabteilung der Magirus GmbH. Die sehr offene und freundliche Atmosphäre und ganz besonders die Frühstücksgespräche, welche häufig in Ideen für neue Produkte mündeten, werden mir in sehr guter Erinnerung bleiben.

Diese außergewöhnliche Arbeitsatmosphäre durfte ich auch im Institut für Systemdynamik erleben. Vor allem möchte ich mich bei jenen Kolleginnen und Kollegen bedanken, welche das Institutsleben auch außerhalb ihres Promotionsprojekts mitprägt und gestaltet haben. Insbesondere hervorheben möchte ich auch all jene, welche ihre Aufgaben in der Lehre zum Wohle der Studierenden wahrgenommen und weit über den Standard hinaus ausgefüllt haben. Unter diesen besonderen Personenkreis fallen Kai-Uwe Amann, Anja Lauer, Jonas Missler und Julian Wanner, mit welchen ich das Glück hatte während meiner Zeit am Institut in der Lehre arbeiten zu dürfen.

Gute wissenschaftliche Arbeit baut auf gegenseitiger Unterstützung und konstruktiver Diskussion auf. Ich möchte mich bei meinem Projektvorgänger Alexander Pertsch für die sorgfältige Übergabe bedanken. Ich freue mich, dass Bernd Müller als Nachfolger das Forschungsprojekt weiter bearbeitet. Entscheidende wissenschaftliche Anstöße habe ich von Kevin Schmidt im Gebiet der verteiltparametrischen Modellierung, von Florentin Rauscher in der Modellierung nach Lagrange Formalismus und von meinem

Bürokollegen Julian Wanner zu den flexiblen Mehrkörpersystemen erhalten. Ich denke mit sehr großer Freude vor allem an die vielen sehr ergiebigen fachlichen Diskussionen mit meinem Bürokollegen zurück.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, welche nach klassischen wissenschaftlichen Prinzipien arbeiten, bedanken und ihnen Mut zusprechen. Es kostet sehr viel Mühe und Geschick komplexe Sachverhalte einfach und verständlich aufzubereiten. Nach meiner Ansicht bedingt unser Fortschritt eine effektive Weitergabe des Wissens und die dadurch resultierende gegenseitige geistige Befruchtung. In tiefster Überzeugung vom Wert der Wissenschaft, wünsche ich, dass sie auf ihren ursprünglichen Pfad zurückfindet.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof.(i.R.) Dr.-Ing. Dr. h.c. Zeitz als Beispiel für exzellente Wissenschaft und Lehre, welche er sogar während seines Ruhestands fortgeführt hat. Als Wissenschaftler aus Berufung war er stets eine Motivation für das gesamte Umfeld.

Die Arbeit am Institut für Systemdynamik ist auch deshalb besonders, da man zu vielen Kolleginnen und Kollegen freundschaftliche Verhältnisse pflegt. Teil davon ist auch Gerlind Preisenhammer, welche dankenswerter Weise zusammen mit Corina Hommel im Hintergrund sehr viele Verwaltungsaufgaben erledigt, alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter unterstützt und auch über die ein oder andere Schwierigkeit hinweghilft.

Nicht zuletzt gilt mein ausdrücklicher Dank meiner gesamten Familie für die nicht selbstverständliche Unterstützung und den großen Rückhalt. Schon als Kind wurden meine damals teils bohrenden Fragen stets bereitwillig und exakt beantwortet. Während der gesamten Ausbildungs- und Promotionszeit wurde ich immer unterstützt. Nicht zu vergessen das akribische Korrekturlesen der vorliegenden Dissertation. Und ganz besonders freue ich mich, dass Jana Kopp als meine Freundin Teil der Familie geworden ist und mich zu jeder Zeit unterstützt.

Neuenstein, im März 2022

Simon Densborn

Kurzfassung

Feuerwehdrehleitern werden naturgemäß meist in sehr zeitkritischen sowie für den Bediener mental belastenden Situationen genutzt. Zudem sind mehr als 99 % der Feuerwehren in Deutschland, Stand 2017, ehrenamtliche Abteilungen [43]. Trotz intensiver feuerwehrtechnischer Ausbildung kann während des Einsatzes nicht auf eine tägliche Erfahrung im Umgang mit dem Hubrettungsgerät zurückgegriffen werden. Daher sind Assistenz- und Unterstützungsfunktionen zum sicheren, einfachen und schnellen Drehleiterbetrieb von großer Bedeutung.

Drehleitern sind in einer hohen Variantenvielfalt in Leiterlängen bis zu 68 m sowie Ausführungen mit und ohne Gelenkarm verfügbar. Assistenz- und Regelfunktionen müssen auf allen Typen funktionsfähig sein. Aus diesem Grund wird ein modellbasierter Entwurf der Regelsysteme durchgeführt, welcher ein valides Streckenmodell voraussetzt. Die vorliegende Arbeit stellt ein Verfahren zur Modellierung der Leiterdynamik als flexibles Mehrkörpersystem (FMKS) nach der Lagrange Gleichung zweiter Art vor. Die Diskretisierung der Flexibilität erfolgt nach dem Ritz-Verfahren. Es wird ein Modellierungsverfahren abgeleitet, mit dem es möglich ist, diesen Modellierungsansatz auch für eine hohe Anzahl an flexiblen Elementen effizient durchzuführen. Die Modellierung nach der Lagrange Gleichung zweiter Art bietet den Vorteil, dass linearisierte Systemmatrizen für jeden gewünschten Arbeitspunkt in geschlossener Form berechenbar sind. Als Ansatzfunktionen der Ritz-Diskretisierung werden die Eigenformen von Euler-Bernoulli Balken sowie Torsionsstäben genutzt. Dazu werden für Euler-Bernoulli Balken mit innerem Momentenlager die Eigenformen und charakteristischen Gleichungen analytisch hergeleitet.

Im Anschluss an die Modellierung werden drei Assistenzsysteme für Feuerwehdrehleitern vorgestellt. Es wird ein Modul zur Trajektoriengenerierung abgeleitet, welches vorher abgespeicherte Trajektorien glättet und anschließend zeitoptimiert abfährt. Ein weiteres Verfahren fährt beliebige Zielpunkte im Arbeitsraum zeitoptimiert an. Zur Umsetzung dieser Trajektorien wird ein Verfahren zur Trajektorienfolgeregulation entwickelt, welches die begrenzte Hydraulikölförderleistung der Aktorik berücksichtigt. Während des Betriebs einer Feuerwehdrehleiter treten zwangsläufig strukturdynamische Schwingungen im Leitersatz auf. Um die Auswirkungen auf die Positioniergenauigkeit zu reduzieren und dadurch die Einsatzgeschwindigkeit zu erhöhen, wird ein bereits bekanntes Verfahren zur aktiven Schwingungsdämpfung auf Drehleitern mit fünf Freiheitsgraden erweitert. Der analytische Entwurf eines Luenberger-Beobachters auf Basis der Struktur des Systemmodells ermöglicht dabei eine allgemein gültige Beobachterparametrierung.

Abstract

By their very nature, turntable ladders for firefighters are mostly used in very time-critical as well as mentally stressful situations for the operator. Additionally, as of 2017, more than 99 % of fire departments in Germany are volunteer departments [43]. Despite intensive technical training and drills, daily experience in handling the aerial rescue device is not a feasible expectation. Consequently, assist systems and support functions that enable safer, easier, and faster aerial ladder operation are of great importance.

Turntable ladders are available in a wide range of variants in ladder lengths up to 68 m as well as versions with articulated arms. Assistance and control functions must be functional on all of these variations. For this reason, a model-based design of the control systems is carried out which requires a valid plant model. This work presents a method for modeling the ladder dynamics as a flexible multibody system applying Lagrange's equation of the second kind. The discretization of flexibility is carried out following to the Ritz approach. A procedure is derived that allows this modeling approach to be carried out efficiently even for many flexible elements. The modeling according to Lagrange's equation of the second kind offers, among other things, the advantage that linearized system matrices are computable for each desired working point in closed form. The eigenmodes of Euler-Bernoulli beams as well as those of torsion bars are used as assumed modes for the Ritz discretization. For this purpose, the eigenmodes and characteristic equations are derived analytically for Euler-Bernoulli beams with an internal moment bearing.

Following the modeling, three assistance systems for turntable fire ladders are presented. A module for trajectory generation is derived, which smooths previously stored trajectories and then traverses them in a time-optimized manner. Arbitrary target points in the working area of the turntable ladder can be approached in a time-optimized manner using a second developed module for trajectory generation. For the realization of these trajectories, a method for trajectory tracking is developed, which takes the limited hydraulic oil delivery capacity of the actuator system into account. During the operation of a turntable ladder, structural dynamic vibrations inevitably occur in the ladder set. To reduce the effects on the positioning accuracy and thereby increase the operational speed, an already known method for active vibration damping is extended to turntable ladders with five degrees of freedom. The analytical design of a Luenberger observer based on the structure of the system model thereby allows a generally valid observer parametrization.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Wissenschaft und Technik	4
1.1.1	Modellierung von Großraummanipulatoren	4
1.1.2	Schwingungsdämpfung von Großraummanipulatoren	6
1.1.3	Trajektorienengineering für Großraummanipulatoren	8
1.2	Zielstellung	11
1.2.1	Modellierung	12
1.2.2	Trajektorienengineering	12
1.2.3	Regelung	13
1.3	Aufbau der Arbeit	13
2	Aufbau einer Feuerwehdrehleiter	17
2.1	Grundlegender Aufbau	17
2.2	Sensoren	23
2.3	Antriebe	25
2.3.1	Load-Sensing System	26
2.3.2	Drehkranz	28
2.3.3	Aufrichtszylinder	28
3	Flexibles Mehrkörpersystem der Leiterdynamik	31
3.1	Euler-Bernoulli Balken mit innerem Momentenlager	32
3.1.1	Problembeschreibung	32
3.1.2	Randbedingungen	34
3.1.3	Modaltransformation	35
3.1.4	Selbstadjungiertes System	36
3.1.5	Lösung der Eigenmoden	38
3.1.6	Analyse	42
3.2	Torsionsstab	47
3.2.1	Problembeschreibung	48
3.2.2	Randbedingungen	49
3.2.3	Modaltransformation	49
3.2.4	Lösung der Eigenmoden	50
3.3	Koordinatensysteme	52
3.3.1	Verwendete Koordinatensysteme	52
3.3.2	Positionsvektoren, Geschwindigkeiten und Transformationen	54

3.3.3	Verwendete Drehmatrizen	55
3.4	Elastische Leitelemente	56
3.4.1	Bombierung	57
3.4.2	Reihenansatz zur Darstellung der Flexibilitäten	59
3.4.3	Darstellung der Ansatzfunktionen	60
3.4.4	Form der Position und Orientierung	61
3.5	Kinematik	61
3.5.1	Drehkranz	63
3.5.2	Unterstes Leitelement	64
3.5.3	Teleskopierbare Leitelemente	65
3.5.4	Gelenkarm	69
3.5.5	TCP / Korb	70
3.6	Wahl der Ansatzfunktionen	71
3.6.1	Unterstes Leitelement	71
3.6.2	Teleskopierbare Elemente	72
3.6.3	Erstes Gelenkarmelement	75
3.7	Lagrange Formalismus	77
3.8	Energien	78
3.8.1	Kinetische Energie	78
3.8.2	Potentielle Energie	82
3.9	Dämpfung	84
3.10	Bestimmung der Integrale	87
3.11	Messgleichungen	90
3.11.1	Dehnmessstreifen	90
3.11.2	Gyroskop	91
3.11.3	Linearisierung der Messgleichungen	91
3.12	Modellreduktion	91
3.12.1	Reduktionsverfahren	92
3.12.2	Dominanzmaß	93
3.13	Modellimplementierung	94
4	Modellvalidierung	101
4.1	Modellparameter des flexiblen Mehrkörpersystems	101
4.2	Vergleich des Zeitverhaltens bei externer Anregung	103
4.2.1	System „Aufrichten/Neigen“	103
4.2.2	System „Drehen“	109
4.3	Vergleich der modalen Systemparameter	114
4.3.1	System „Aufrichten/Neigen“	115
4.3.2	System „Drehen“	118
4.4	Eigenformen des Leitersatzes	123
4.5	Zusammenfassung der Modellvalidierung	132

5	Trajektorienengineering	133
5.1	Randbedingungen und Beschränkungen	133
5.2	Zeitoptimierte Trajektorien	134
5.2.1	Lösungsskizze	134
5.2.2	Numerische Validierung	137
5.3	Geglättete Trajektorien	140
5.3.1	Lösungsskizze	141
5.3.2	Numerische Validierung	146
5.4	Zusammenfassung	148
6	Regelung	153
6.1	Aktive Schwingungsdämpfung	153
6.1.1	Beobachtermodell	153
6.1.2	Beobachterentwurf	160
6.2	Trajektorienfolge­regelung	168
6.2.1	Position­regler	169
6.2.2	Zeitsyn­chronisation	171
6.2.3	Numerische Validierung	172
6.3	Zusammenfassung	174
7	Zusammenfassung	177
A	Anhang	181
A.1	Euler-Bernoulli Balken mit innerem Momentenlager	181
A.1.1	Charakteristische Gleichungen	181
A.1.2	Parameter Vektoren	182
A.2	Drehmatrizen	187
A.3	Integrale im Lagrange Formalismus	188
B	Notation	191
	Symbolverzeichnis	193
	Abkürzungsverzeichnis	201
	Abbildungsverzeichnis	203
	Tabellenverzeichnis	207
	Literatur	209