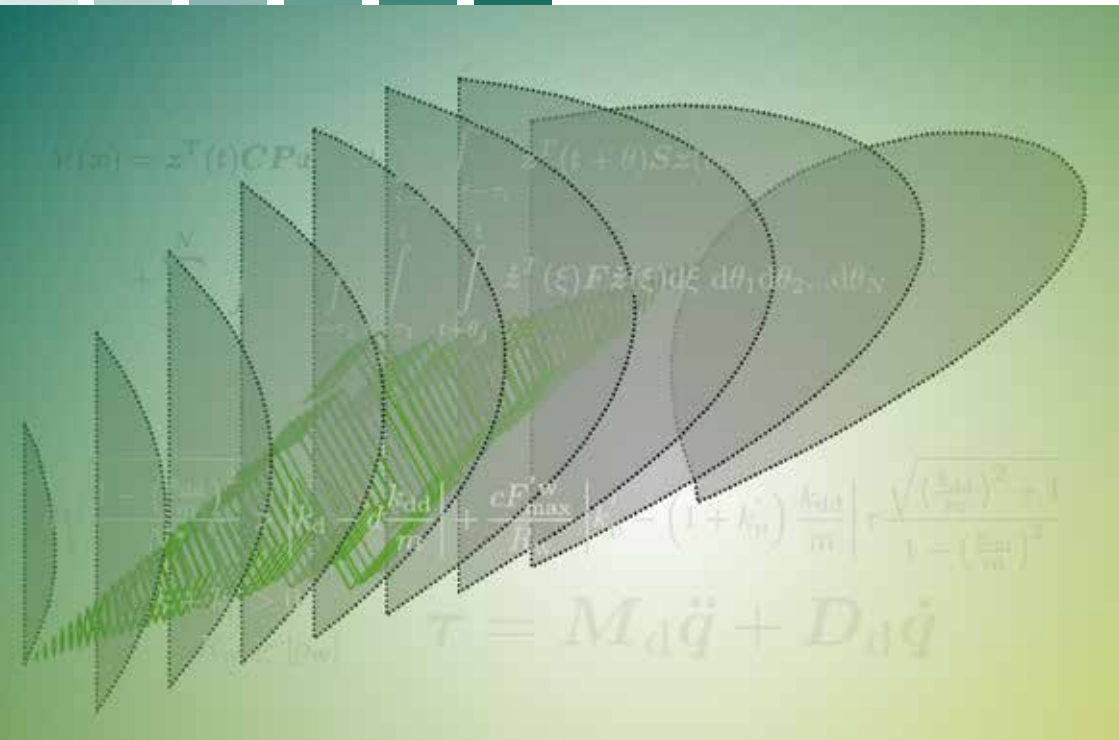


Assistierende virtuelle Kraftfelder bei handgeführten Robotern

Band 1

Florian Müller





TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Assistierende virtuelle Kraftfelder bei handgeführten Robotern

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt von

Florian Müller, M.Sc.

geboren am 23.07.1987 in Wolfen.

Tag der Einreichung: 04.06.2018

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrike Thomas
Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl
Prof. Dr.-Ing. Jens Jäkel

Tag der Verteidigung: 09.11.2018

Fortschritte der Robotik/Progress in Robotics

Band 1

Florian Müller

**Assistierende virtuelle Kraftfelder
bei handgeführten Robotern**

D 93 (Diss. TU Chemnitz)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6424-7

ISSN 2627-2482

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Vorwort

Der Hauptanteil dieser Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik der Elektrotechnik und Informationstechnik Fakultät der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Jäkel für die intensive Betreuung meiner Arbeit und den vielen interessanten fachlichen Diskussionen. Am wichtigsten ist, dass er mich dafür begeistern konnte den Weg in die Wissenschaft zu gehen. Ich danke auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Jozef Suchý, welcher mich in den ersten Schritten des Promotionsprozesses begleitet hat. Ein besonderer Dank gilt ebenfalls der Leiterin des Lehrstuhls für Robotik und Mensch-Technik-Interaktion der Technischen Universität Chemnitz Frau Prof. Dr.-Ing. Ulrike Thomas für die Betreuung in den letzten beiden Jahren meiner Promotion, die fachlichen Anregungen zu meiner Arbeit und den Einsatz für ihre Promovenden. Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Alexander Verl für seine Arbeit als Gutachter und Herrn Dr.-Ing. Thomas Hulin für seine Tätigkeit als Beisitzer. Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Protzel gilt Dank für die Übernahme des Vorsitz der Prüfungskommission.

Besonderen Dank gilt all meinen Kollegen die mich im Laufe meiner Promotion begleitet haben. Dazu zählen die Kollegen der Nachwuchsforschergruppe METEORIT und die Kollegen des Instituts für Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. Frau Dr. rer. nat. Nele Fischer danke ich im speziellen für die Beratung in den Bereichen Fragebogenerstellung sowie statistische Auswertung. Herrn Rick Voßwinkel, M.Sc. gilt Dank für die vielen Diskussionen zum Thema Stabilitätsbetrachtung. Auch dem Kollegium des Lehrstuhls für Robotik und Mensch Technik Interaktion danke ich sehr für die Unterstützung. Besonders hervorzuheben sind hierbei die fachlichen Gespräche mit Herrn Yitao Ding, M.Sc.

Ich danke Herrn Trebbin und seinen Mitarbeiter der Trebbin GmbH & Co. KG für die Kooperation in unseren gemeinsamen Forschungsprojekten und die Möglichkeit Experimente in seinem Betrieb durchführen zu dürfen.

Ich danke allen Korrekturlesern für die Zeit die sie investiert haben, um mir fachliche und orthografische Tipps zu geben. Darunter möchte ich vor allem meinem ehemaligen Deutschlehrer Jens-Uwe Böhme danken.

Meiner Familie gilt besonderer Dank für die Wegbereitung und jegliche Form der Unterstützung. Vor allem danke ich Maria Paul, der wichtigsten Person in in meinem Leben, für das Verständnis was sie über die Jahre für den zeitaufwändigen Prozess meiner Arbeit aufgebracht hat und mich dabei unterstützt hat.

Chemnitz, 09.12.2018

Florian Müller

*Für Maria
und das Kind
was du unter deinem
Herzen trägst*

Kurzfassung

Handgeführte Schwerlastroboter werden in der Industrie eingesetzt, um Arbeitern beim Heben von schweren Lasten zu unterstützen. Diese Technologie ordnet sich in das Gesamtkonzept der Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) ein, bei welchem sich Mensch und Roboter einen gemeinsamen Arbeitsraum teilen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Bedienung solcher Roboter für den Nutzer zu vereinfachen und intuitiver zu gestalten.

Zu diesem Zweck wurden die assistierenden Kraftfelder entwickelt, deren Algorithmus aus einer Lern- und einer Anwendungsphase besteht. In der Lernphase werden die Bewegungsdaten von erfahrenen Arbeitern innerhalb einer speziellen Arbeitsaufgabe aufgezeichnet. Aus diesen Daten wird in der Anwendungsphase ein virtuelles Kraftfeld generiert, welches den Nutzer auf die Pfade der erfahrenen Arbeiter leitet. Es wurden drei verschiedene assistierende Kraftfelder entwickelt: das tunnelförmige virtuelle Kraftfeld (TKF), das assistierende virtuelle Kraftfeld (AKF) und das AKF für anthropomorphe Roboterarme. Das TKF beeinflusst den Endeffektor des Roboters und eignet sich für alle Robotertypen. Das AKF ist eine Erweiterung des TKF und beeinflusst sowohl die Position als auch die Orientierung des Endeffektors. Dieses Kraftfeld wird eingesetzt, um die Nutzer der oben angesprochenen industriellen Schwerlastroboter zu unterstützen. Um dieses Kraftfeld für die in der MRI weit verbreiteten Leichtbauroboter zugänglich zu machen, wurde es für den Einsatz mit anthropomorphen Roboterarmen angepasst. Zusätzlich wurde die kraftfeldabhängige variable Impedanzregelung (KF-VIR) vorgestellt.

Aufgrund der nichtlinearen Rückkopplung des Kraftfeldes und die durch die Reaktionszeit bedingte zeitverzögerte Rückkopplung des Menschen ist eine Stabilitätsbetrachtung des Gesamtsystems, bestehend aus Roboter, Mensch und Kraftfeld, notwendig. Für das Menschmodell wurden verschiedenen Ansätze mit aktiven und passiven Parametern sowie einer Reaktionszeit/Totzeit vorgestellt. Diese wurden mit in das Gesamtsystem integriert. Die resultierenden Gesamtsysteme wurden mit unterschiedlichen Methoden auf Stabilität geprüft. Zwei dieser Methoden wurden

in der vorliegenden Arbeit basierend auf dem Ljapunow-Krasovskii-Funktional entwickelt und dienen zur analytischen Untersuchung von polynomialen Totzeitsystemen. Um zusätzlich Anwendungsfälle mit mehreren Nutzern betrachten zu können, wurden Modelle und Methoden entsprechend angepasst und ebenfalls untersucht. Aus all diesen Untersuchungen resultierten unter anderem konservative analytische Stabilitätsgrenzen im Parameterraum.

Mit Hilfe von Simulationsstudien und anschließenden experimentellen Validierungen wurden verschiedene Parametrierungseinstellungen des AKF und des KF-VIR untersucht. Daraus leiteten sich Parametrierungsrichtlinien für spätere Anwender ab. Um zu untersuchen, ob sich die Bedienung eines im Gelenkraum geregelten handgeführten Roboter durch den Einsatz des AKF verbessert, wurden eine Nutzerstudie unter Laborbedingungen mit 42 Probanden und eine praxisorientierte Nutzerstudie mit 24 Probanden durchgeführt. Bei den Versuchen mit AKF reduzierte sich die Fehleranzahl der Probanden im Schnitt um die Hälfte. Des Weiteren zeigten die Ergebnisse bezüglich Versuchsdauer, Arbeitsbelastung und Nutzerkomfort ebenfalls signifikante Verbesserungen mit großen Effekten.

Schlagnote: Mensch-Roboter-Interaktion, virtuelle Kraftfelder, Menschmodell, nichtlineare Totzeitsysteme, Impedanzregelung, Nutzerstudie

Abstract

Hand-guided robots with heavy payloads are used in the manufacturing industry to assist workers by lifting heavy work pieces. This technology is part of the general concept of human-robot interaction (MRI). The basic idea of MRI defines a common work space for humans and robots. The aim of this thesis is to improve hand-guiding for such types of robots in making hand-guiding more intuitive for its users.

For this purpose assisting force fields were introduced. The corresponding algorithm is established on two phases: a learning phase and an execution phase. During the learning phase the movement data of experienced users, while guiding a robot performing a special task, will be recorded. Based on this data an artificial force field will be generated during the execution phase. This force field guides the user to the reference paths of the experienced users. Three types of assisting force field were presented: the tunnel-shaped artificial force field (TKF), the assisting artificial force field (AKF) and the AKF for anthropomorphic robot arms. The TKF influences the end-effector of the robot and could be used for all robot types. The AKF is a continuation of the TKF and influences the position and orientation of the end-effector. This force field is suitable for assisting users of industrial robots with heavy payload. In order to use this force field for the in the MRI widespread light-weight robots, the AKF was adapted to the usage of anthropomorphic robotic arms. Furthermore, the force-field-dependent variable impedance control (KF-VIR) was introduced.

Because of the nonlinear feedback of the force fields and the delayed feedback of the humans due to their response time a stability analysis of the overall system made out of robot, human and force field is necessary. For the human model different approaches with passive and active parameters as well as response time/time-delay were presented. These models were integrated in the different overall systems. These systems were analyzed by several stability methods. Two of these methods are based on the Lyapunov-Krasovskii-functional and are results this thesis. These

are general methods for the stability analysis of polynomial time-delay systems. In order to consider additionally the use case of multiple users the corresponding models and methods were adapted and also analyzed on stability. Resulting from the conducted stability analysis several conservative stability boundaries within the parameter space were identified.

Using simulation studies and subsequent experimental validation, different parameter settings of the AKF and the KF-VIR were investigated. From this parametrization rules for end users were derived. Two user studies were conducted. Firstly, a user study in a laboratory environment with 42 participants and secondly, a user study with practical orientation with 24 participants. The aim of these studies was to research how the AKF could improve the guiding of hand-guided robots with a joint space controller. Using the AKF reduces the number of errors by half in average. Furthermore, significant improvements with large effects on test duration, work load and user comfort were shown when using the AKF.

Keywords: physical human-robot interaction, artificial force fields, human model, nonlinear time-delay systems, impedance control, user study

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	XVII
Abbildungsverzeichnis	XXI
Tabellenverzeichnis	XXIII
Symbolverzeichnis	XXV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand von Wissenschaft und Technik	7
2.1 Mensch-Roboter-Interaktion	7
2.1.1 Leichtbauroboter	8
2.1.2 Visuelle Arbeitsraumüberwachung	9
2.1.3 Weitere zusätzliche Schutzmaßnahmen	10
2.1.4 Sicherheitstechnik bei Schwerlastrobotern	10
2.2 Kraftregelungen	11
2.2.1 Impedanzregelung	12
2.2.2 Admittanzregelung	16
2.2.3 Weitere klassische Konzepte	18
2.2.4 Variable Impedanzregelung	19
2.2.5 Weitere moderne Konzepte	21
2.3 Virtuelle Kraftfelder	22
2.3.1 Pfadplanung und Kollisionsvermeidung	22
2.3.2 Weitere Themen	25
2.4 Mensch-Roboter-Kooperation mit mehreren Nutzern	26

2.4.1	Mensch-Roboter-Mensch-Kooperation	26
2.4.2	Mensch-Mensch-Kooperation	27
2.4.3	Telerobotik mit zwei Nutzern	28
2.5	Menschmodelle in der Mensch-Roboter-Kooperation	29
2.6	Stabilitätsbetrachtungen	31
2.7	Redundante Roboter	35
2.8	Nutzerkomfort und Arbeitsbelastung	36
2.9	Schlussfolgerungen	37
3	Assistierende virtuelle Kraftfelder	41
3.1	Das tunnelförmige virtuelle Kraftfeld	41
3.1.1	Grundkonzept	41
3.1.2	Lernphase	43
3.1.3	Anwendungsphase	44
3.2	Das assistierende virtuelle Kraftfeld	48
3.2.1	Grundkonzept	48
3.2.2	Lernphase	49
3.2.3	Anwendungsphase	50
3.3	Griffkonstruktion für die assistierenden Kraftfelder	53
3.4	Assistierende Kraftfelder für anthropomorphe Roboterarme	55
3.4.1	Grundkonzept	55
3.4.2	Lernphase	56
3.4.3	Anwendungsphase	57
3.5	Kraftfeldabhängige variable Impedanzregelung für AKF	64
4	Modelle und Stabilitätsbetrachtungen	67
4.1	Methoden zur Stabilitätsanalyse	68
4.1.1	Stabilität einer speziellen Klasse von nichtlinearen Totzeit- systemen	68
4.1.2	Stabilität einer speziellen Klasse von nichtlinearen Systemen mit multiplen Totzeiten	75
4.2	Menschmodell mit zeitverzögerter aktiver Steifigkeitsrückführung	84
4.2.1	Modelle	84
4.2.2	Ruhelagen	87
4.2.3	Stabilität im nichtlinearen Fall ohne Totzeit	89
4.2.4	Stabilität im linearen Fall mit Totzeit	91
4.3	Passiv/aktives Menschmodell mit Reaktionszeit	94
4.3.1	Modelle	94
4.3.2	Stabilität einer MRK mit linearer virtueller Umgebung	97

4.3.3	Stabilität einer MRK mit nichtlinearer virtueller Umgebung	100
4.4	Vollständiges passiv/aktives Menschmodell mit Reaktionszeit . . .	103
4.4.1	Gesamtmodell	103
4.4.2	Stabilität einer MRK mit linearer virtueller Umgebung . . .	106
4.4.3	Stabilität einer MRK mit nichtlinearer virtueller Umgebung	110
4.5	Validierung der Menschmodelle	112
4.6	Mehrere Nutzer	119
4.6.1	Vier verschiedene Menschmodelle für multiple MRK	119
4.6.2	Beispielsystem: HRH-Kooperation mit einer nichtlinearen virtuellen Umgebung	131
5	Experimentelle Untersuchungen	135
5.1	Definition von Gütekriterien	135
5.2	Identifikation einer geeigneten Parametrierung für das AKF	138
5.2.1	Simulationsstudie	138
5.2.2	Experimentelle Validierung	141
5.3	Identifikation einer geeigneten Parametrierung für die Kraftfeld abhängige variable Impedanzregelung	146
5.3.1	Simulationsstudie	146
5.3.2	Experimentelle Validierung	151
5.4	Nutzerstudie unter Laborbedingungen zur Bestimmung der Leis- tungsfähigkeit des AKF	153
5.4.1	Aufbau der Studie	153
5.4.2	Ergebnisse	159
5.5	Praxisorientierte Nutzerstudie	164
5.5.1	Aufbau der Studie	164
5.5.2	Ergebnisse	172
5.6	Kollisionsvermeidung des anthropomorphen Roboterarms mit AKF	174
6	Diskussion	177
6.1	Methodik	177
6.2	Erkenntnisse der Stabilitätsuntersuchungen	179
6.2.1	Darstellung der gewonnenen Erkenntnisse	179
6.2.2	Kritik an der Methodik und den Resultaten	190
6.2.3	Ausblick	191
6.3	Das assistierende virtuelle Kraftfeld	192
6.3.1	Leistungsfähigkeit	192
6.3.2	Grenzen des AKF	196
6.3.3	Ausblick	198

7 Zusammenfassung und Fazit	201
Anhang	207
Literaturverzeichnis	XXXVII