

Michael Ringkowski

Dynamische Präzisionsregelung einer Messmaschine mit redundanten Zusatzachsen

Band 58

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



Dynamische Präzisionsregelung einer Messmaschine mit redundanten Zusatzachsen

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

vorgelegt von
Michael Ringkowski
geboren in Böblingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. techn. Georg Schitter
Tag der mündlichen Prüfung: 19.04.2021

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2021

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 58

Michael Ringkowski

**Dynamische Präzisionsregelung einer Messmaschine
mit redundanten Zusatzachsen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8027-8

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart im Zeitraum von Juli 2017 bis Dezember 2020 entstanden. Die Untersuchungen wurden im Projekt „DynRef 2 – Dynamische Referenzierung von Koordinatenmess- und Bearbeitungsmaschinen“ gemeinsam mit dem Institut für Technische Optik (ITO) durchgeführt und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell unterstützt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Oliver Sawodny für die Betreuung der Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen. Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. techn. Georg Schitter der Technischen Universität Wien für die freundliche Übernahme des Mitberichts und Herrn Prof. Dr. rer. nat. Alois Herkommer der Universität Stuttgart für den Vorsitz der Prüfungskommission bedanken.

Eine wichtige Grundlage für meine Untersuchungen stellt das am ITO parallel weiterentwickelte Kamerasensorsystem dar. Daher ein großes Dankeschön an Simon Hartlieb und Tobias Haist für die sehr angenehme und produktive Zusammenarbeit.

Für die bereitwillige und kontinuierliche Unterstützung durch die Kolleginnen und Kollegen des Sekretariats und der Werkstatt, welche eine produktive Arbeitsumgebung ermöglichen, bin ich sehr dankbar.

Ein großes Dankeschön gebührt zudem allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ISYS, besonders meinen Bürokollegen und -nachbarn, für die hervorragende fachliche Zusammenarbeit und Bereitschaft zur Diskussion verschiedenster Herausforderungen. Insbesondere bin ich den fleißigen Korrekturlesern für ihre Zeit, Einsatz und wertvollen Kommentare zum Dank verpflichtet.

Weiterhin habe ich den Zusammenhalt bei Aktivitäten wie dem wöchentlichen Frühsport mit Fußball und Beachvolleyball sowie den analogen und digitalen Strategieseminaren sehr genossen.

Abschließend ein herzliches Dankeschön an meine Familie und Freunde, die mich immer motivierend unterstützt haben. Insbesondere meiner Frau Merie bin ich unendlich dankbar für die gegenseitige Unterstützung, das aufgebrachte Verständnis und den bedingungslosen Rückhalt in allen Phasen.

Stuttgart, April 2021

Michael Ringkowski

Kurzfassung

Präzise Messmaschinen stellen einen integralen Bestandteil moderner Produktionsanlagen dar. Für einen hohen Durchsatz ist eine Verkürzung der Messzyklen essentiell. Dies lässt sich zum Beispiel durch Lockerung der klassischerweise sehr konservativen dynamischen Achsbeschränkungen erreichen. Dadurch ergeben sich erhöhte Beschleunigungskräfte und aufgrund von endlicher Steifigkeit der Maschinenelemente dynamische Abweichungen der tatsächlichen TCP-Position von der statisch erwarteten Position. In der vorliegenden Arbeit wird die tatsächliche TCP-Position (engl. Tool-Center-Point, TCP) mittels eines neuartigen kamerabasierten Sensorsystems mit Sub-Mikrometernauigkeit erfasst. Somit besteht die Möglichkeit der softwaretechnischen Kompensation dynamischer Fehler und einer TCP-Folgeregulation für scannende Anwendungen.

In diesem Kontext werden in der vorliegenden Arbeit modellbasierte Ansätze zur präzisen und genauen TCP-Trajektorienfolgeregulation untersucht. Zunächst werden Methoden zur dynamischen Präzisionsregelung der Hauptachse eines modifizierten Formtesters mit redundanten Zusatzachsen betrachtet. An der Hauptachse tritt eine starke ortsabhängige Variation der Reibung auf, welche sich mit konventionellen dynamischen Reibungsmodellen nur im Mittel abbilden lässt. Eine vorsteuernde Kompensation führt bei höheren Geschwindigkeiten zu hochfrequenten Störungen aufgrund der nichtkompensierten Reibung, welche den größten limitierenden Faktor für eine genaue dynamische Trajektorienfolge darstellen. Daher werden modellbasierte Störgrößenkompensationsstrategien als zusätzliches Element einer Zwei-Freiheitsgradstruktur für das Regelungskonzept untersucht. Weiterhin führen Messmaschinen häufig sich wiederholende Fahrten durch, weshalb datenbasierte, repetitiv lernende Regelmodule als zusätzliche Maßnahme für eine weitere Reduktion des Folgefehlers der Hauptachse betrachtet werden.

Die TCP-Folgeregulation setzt eine genaue Schätzung der tatsächlichen TCP-Position aus den verzögerten und im Vergleich zum Regelungssystem mit einer geringeren Abtastrate erhaltenen Messungen des Kamerasystems voraus, wozu modellbasierte Konzepte und eine datenbasierte Erweiterung betrachtet werden. Anschließend wird auf der übergeordneten Referenzgrößenebene die zusätzliche Dynamik der redundanten Antriebsachsen zur Reduktion der Folgefehler der Hauptachse und der Kompensation der dynamischen TCP-Abweichungen untersucht. Für die TCP-Folgeregulation werden eine Fehleraufschaltung und ein optimierungsbasierter, modellprädiktiver Ansatz betrachtet. Mithilfe der vorgestellten Methoden zur Trajektorienzuteilung und Regelung lässt sich mittels Simulationen ein signifikant verbessertes dynamisches Folgeverhalten zeigen. Die Konzepte werden anhand des Versuchsaufbaus der Messmaschine experimentell validiert.

Abstract

Precise measuring machines are an integral part of modern manufacturing processes and shortening of measuring cycles is required for high throughput. This can be achieved, e. g., by relaxing the traditionally very conservative dynamic axis restrictions. This results in increased acceleration forces and, due to finite stiffness of the machine elements, dynamic deviations of the actual tool-center-point (TCP) position from the statically calculated one. In this work, the actual TCP position is detected with sub-micrometer accuracy by a novel camera-based sensor system. This enables software-based compensation of dynamic errors and a TCP tracking control for scanning applications.

In this context, the present work investigates model-based approaches for precise and accurate TCP trajectory tracking control. First, methods for dynamic precision control of the main axis of a modified formtester with additional redundant axes are considered. The main axis shows strong location-dependent variations of the friction force and conventional friction modelling reflects this variation only as an average. At higher speeds, feedforward compensation leads to high-frequency disturbances due to uncompensated friction, which is the largest limiting factor for dynamic trajectory tracking control. Therefore, model-based disturbance compensation strategies are investigated as an additional element of a two degrees of freedom control structure. Furthermore, measuring machines often perform repetitive tasks and in this context data-based, repetitive learning control modules are considered for a further reduction of the tracking error of the main axis.

Tracking control of the TCP requires an exact reconstruction of the actual TCP position from the delayed and, compared to the control system, lower sampling rate measurements of the camera system. Subsequently, the additional dynamics of the redundant axes are exploited for the reduction of the tracking errors of the main axis and the compensation of the dynamic TCP deviations. For the TCP-control a feedforward error and an optimization-based, model-predictive approach are considered on the higher level of the reference variables. The presented methods for trajectory allocation and control show a significantly improved dynamic tracking behavior in simulation and the concepts are validated using the experimental setup of the measuring machine.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Literatur und Einordnung	4
1.2.1	Schnelle und präzise Folgereglung	4
1.2.2	Dynamische Abweichungen der TCP-Position	10
1.2.3	Redundante Zusatzachsen	11
1.2.4	Einordnung zu vorangegangenen Arbeiten	12
1.3	Ziele und Aufbau der Arbeit	13
2	Präzisionsmessmaschine mit redundanten Zusatzachsen	17
2.1	Aufbau Messmaschine und Steuerungssystem	18
2.2	Aktorik	20
2.2.1	Hauptantriebsachse	20
2.2.2	Redundante Antriebsachsen	21
2.3	Sensorik	22
2.3.1	Antriebsachsen	22
2.3.2	TCP-Positionsmessung mittels 3D-Kamerasystem	25
2.3.3	Weitere verwendete Sensorik	28
2.4	Modellierung	29
2.4.1	Hauptantriebsachse	29
2.4.2	Reibungsmodellierung	30
2.4.3	Redundante Antriebsachsen	39
2.4.4	Dynamische Positionierungsfehler	39
2.4.5	Übergeordnetes Gesamtmodell	43
2.5	Parameteridentifikation und Validierung	44
2.5.1	Parameteridentifikation der Teilsysteme	44
2.5.2	Modellvalidierung	55
2.6	Kurzzusammenfassung	58
3	Regelung der Hauptachse	59
3.1	Trajektoriengenerierung	61
3.2	Flachheitsbasierte Vorsteuerung	63
3.2.1	Flachheitsbasierter Vorsteuerungsentwurf	63
3.2.2	Diskretisierungseffekte	66
3.3	Rückführung	67
3.3.1	PD-Regler als Kaskadenstruktur	67
3.3.2	Automatisierte modellbasierte robuste Reglerauslegung	69

3.4	Störgrößenschätzung und -aufschaltung	71
3.4.1	Störgrößenbeobachter im Frequenzbereich	71
3.4.2	Erweiterter Zustandsbeobachter	74
3.5	Repetitiv lernendes Zusatzregelmodul	77
3.5.1	Konventioneller repetitiver Regler	77
3.5.2	Modifizierter repetitiver Regler	80
3.6	Ergebnisse	83
3.6.1	Simulation	83
3.6.2	Messung	89
3.7	Kurzzusammenfassung	94
4	Schätzung der TCP-Position	95
4.1	Klassische Konzepte	96
4.1.1	Multiraten-Kalman-Filter mit Totzeitkompensation	96
4.1.2	Erweiterung um Beschleunigungssensoren	102
4.2	Datenerweitertes Konzept	103
4.2.1	Regression mit Gaußprozessen	103
4.2.2	Szenariobasierte lokale Gaußprozesse	107
4.2.3	Einbindung in das Kalman Filter	109
4.3	Ergebnisse	112
4.3.1	Simulationsergebnisse	112
4.3.2	Experimentelle Ergebnisse	115
4.4	Kurzzusammenfassung	118
5	Regelung der TCP-Position mit redundanten Zusatzachsen	119
5.1	Übersicht DSA-Regelkonzepte	120
5.1.1	Eingrößenentwurf	120
5.1.2	Mehrgrößenentwurf	123
5.2	Modifizierte Entkopplungsstruktur als Fehleraufschaltung	125
5.3	Optimierungsbasierte Trajektorienzuteilung	127
5.3.1	Optimalsteuerungsproblem zur Trajektorienzuteilung	127
5.3.2	Offline Lösung für den gesamten Horizont als Vorsteuerung	129
5.3.3	Online Lösung mit kurzem Horizont als Rückführung	132
5.4	Simulations- und Messergebnisse	134
5.4.1	Simulationsergebnisse	134
5.4.2	Experimentelle Validierung mittels Messergebnissen	137
5.5	Kurzzusammenfassung	140
6	Zusammenfassung	141
A	Anhang	145
A.1	Grundlagen zur Parameteridentifikation	145
	Abkürzungsverzeichnis	150

Symbolverzeichnis	152
Abbildungsverzeichnis	157
Tabellenverzeichnis	161
Literaturverzeichnis	163