

Alexander David Keck

Methoden zur hochdynamischen und hochgenauen Bahnregelung von Messmaschinen mit multiskaliger Sensorik

Band 38

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



METHODEN ZUR HOCHDYNAMISCHEN UND HOCHGENAUEN BAHNREGELUNG VON MESSMASCHINEN MIT MULTISKALIGER SENSORIK

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

vorgelegt von
Alexander David Keck
geboren in Ludwigsburg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Christoph Ament
Tag der mündlichen Prüfung: 26. Juli 2017

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 38

Alexander David Keck

Methoden zur hochdynamischen und hochgenauen Bahnregelung
von Messmaschinen mit multiskaliger Sensorik

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Informationen 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., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5694-5

ISSN 1863-9046

DOI 10.2370/9783844056945

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • Email: info@shaker.de

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart. Ich möchte zuerst dem Direktor des Instituts, Herrn Oliver Sawodny, für die Möglichkeit zum Sammeln wertvoller Erfahrungen in zahlreichen Projekten des Instituts und die Möglichkeit zur Promotion, vor allem aber für das große entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten Freiheiten sowie die rasche Erstellung des Hauptberichts dieser Arbeit danken. Herrn Christoph Ament, Inhaber des Lehrstuhls Regelungstechnik in der Ingenieurinformatik der Universität Augsburg, danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Mitberichts. Wesentliche Inhalte dieser Arbeit entstanden während der Bearbeitung zweier Kooperationsprojekte mit dem Institut für Technische Optik, welche von der Baden-Württemberg-Stiftung und der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wurden. An dieser Stelle möchte ich meinem langjährigen Kooperationspartner Marc Gronle für die äußerst produktive, pragmatische und erfolgreiche Zusammenarbeit danken. Für wichtige Impulse bei der Konzeption und Durchführung dieser Projekte möchte ich mich bei Tobias Haist bedanken.

Mein ganz besonderer Dank gilt den zahlreichen Weggefährten am Institut, von denen viele zu persönlichen Freunden geworden sind. Die zahlreichen Denkanstöße, Hilfestellungen und fachlichen, aber auch die weniger fachlichen Diskussionen während dieser Zeit, betrachte ich als einen der größten Vorzüge meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter sowie als wichtige Grundlage für die vorliegende Dissertation. Ohne Zögern wurde die am Institut vorhandene langjährige Erfahrung und Kompetenz stets gerne geteilt. Insbesondere im Zusammenhang mit der Dissertation möchte ich die enge fachliche Zusammenarbeit mit Michael Böhm, den umfangreichen Austausch mit Benjamin Henke, die stets verlässliche Hilfestellung von Karl Lukas Knierim und die stetige Unterstützung durch Martin Glück hervorheben. Die vorliegende Dissertation wäre indes ohne die thematische Vorarbeit von Jan Zimmermann und Thomas Ruppel, die Hilfe bei der Konzeption dieser Arbeit durch Eckhard Arnold und die vielfältige Unterstützung durch Michael Zeitz nicht entstanden. Für die immerwährende tatkräftige und verlässliche Hilfe in organisatorischen, technischen und vielen weiteren Belangen möchte ich mich bei Gerlind Preisenhammer, Corina Hommel, Emy Akkan, Peter Bachhuber, Joachim Endler, Sven Gutekunst und Philipp Arnold bedanken. Meinen Studenten danke ich für ihre fleißige Mitarbeit und zahlreiche fruchtbare Diskussionen. Meinen zahlreichen weiteren Freunden vom Institut danke ich für ihre Freundschaft und die besonders angenehme und stets aufmunternde sowie humorvolle Atmosphäre.

Nicht zuletzt gilt mein ausdrücklicher Dank meiner Familie und meinen Freunden für die verlässliche und liebevolle Unterstützung und den bedingungslosen Rückhalt während Studium und Promotion. Ihr habt mir stets Beistand geleistet, den Rücken freigehalten und an mich geglaubt.

Stuttgart, im Juli 2017

Alexander David Keck

KURZZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel aktueller Bestrebungen im Bereich der Fertigung mechanischer Bauteile ist die Steigerung sowohl der Fertigungsgeschwindigkeit, als auch der Flexibilität der Fertigung bezüglich Bauteilgeometrien und -spezifikationen. Ein wichtiger Baustein hierfür ist eine vollumfängliche und automatische Qualitätsinspektion aller produzierten Bauteile im Fertigungsprozess. Die hieraus folgenden anspruchsvollen messtechnischen Aufgabenstellungen können nur durch die intelligente Kombination moderner Sensoren mit hochgenauen und hochdynamischen Messmaschinen und flexiblen Automatisierungs- und Regelungssystemen erfüllt werden. Moderne optische Sensoren verfügen über die benötigte Leistungsfähigkeit, wenn sie gegenüber dem Werkstück unter Einhaltung der durch die Messaufgabe definierten Spezifikationen bewegt werden können. Dies gilt insbesondere für multiskalige Messsysteme, welche durch die hierarchische Kombination mehrere Einzelsensoren größere Inspektionsgeschwindigkeiten als einzelne Sensoren ermöglichen und zudem ein größeres Spektrum an Bauteilspezifikationen überprüfen können. Die Bewegungen der einzelnen Sensoren müssen hierbei von dem Automatisierungssystem geplant und von der Messmaschine mit zugehörigem Regelungssystem durchgeführt werden. Da im Falle der multisensorischen oder multiskaligen Messtechnik unterschiedliche Sensoren mit unterschiedlichen Anforderungen an das Bewegungssystem mit ein und derselben Messmaschine positioniert werden, muss das zugehörige Regelungssystem zudem die benötigte Flexibilität bereitstellen.

In der vorliegenden Arbeit werden daher schwerpunktmäßig drei Teilaspekte einer solchen Qualitätsinspektion betrachtet und an einem gemeinsam mit dem Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart (ITO) auf Basis eines modifizierten Formtesters *Mahr MarForm MFU 100* beispielhaft realisierten multiskaligen Messsystem demonstriert. Zunächst wird auf die Planung der durchzuführenden Bewegungen des Sensors gegenüber dem Werkstück eingegangen. Aufgrund der sich durch die Eigenschaften der verschiedenen vorhandenen optischen Sensoren und durchzuführenden Inspektionsaufgaben stark unterscheidenden Anforderungen an diese Bahnplanung, müssen zwei auf unterschiedlichen Ansätzen basierende Bahnplanungssysteme eingesetzt werden. Diese Bahnplaner werden vorgestellt und ihr Einsatz demonstriert.

Die verbleibenden beiden Teilaspekte beschäftigen sich mit der Durchführung der durch die Bahnplanungssysteme geplanten Bewegungen mit der Messmaschine. Hierbei treten zwei kritische Fälle auf. Sollen einerseits Sensoren mit sehr hoher Auflösung aber kleinem Messfeld über die Werkstückoberfläche geführt werden, müssen Bewegungen mit sehr kleinen Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Hierbei stellt die Reibung in den Positionierachsen den dominanten genauigkeitslimitierenden Einfluss dar. Um auch unter dem Einfluss der Reibung eine hohe Bahngenauigkeit sicherstellen zu können, wird ein auf dem elastoplastischen Reibmodell basierendes, modellbasiertes Reibungskompensationssystem eingesetzt. Das elastoplastische Reibmodell wurde zu diesem Zweck ausgewählt, da es trotz der geringen Modellordnung von eins und des daher vergleichsweise kleinen Parametersatzes das reale Verhalten der Reibung mit hoher Güte abbil-

det. Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis der Parameter des elastoplastischen Reibmodells für die betrachteten Positionierachsen. Die Identifikation der Reibparameter wird daher ausführlich betrachtet und zwei unterschiedliche Identifikationsverfahren vorgestellt und verglichen. Sind die Reibparameter ermittelt, so kann das vorsteuernde Reibungskompensationssystem entworfen und implementiert werden. Dieses vorsteuernde Reibungskompensationssystem wird mit einer linearen Zwei-Freiheitsgrade-Regelung kombiniert und kann auch als Zusatzsystem für bestehende Regelungen im industriellen Umfeld eingesetzt werden. Die durch das Reibungskompensationssystem erzielte Verbesserung der Bahngenauigkeit wird anhand von Messdaten demonstriert.

Den dritten Teilaspekt der vorliegenden Arbeit stellt die Modellierung und Kompensation der bei sehr schnellen Bewegungen auftretenden dynamischen Bahnfehler dar. Diese werden durch die Einwirkung der zur Beschleunigung der Achsen benötigten großen Kräfte auf die nicht unendlich steife Maschinenstruktur hervorgerufen und führen zu einer Verfälschung der realen Position des Tool Center Point (TCP) gegenüber dem Werkstück, welche nicht oder nicht vollständig in den Achscodern sichtbar ist und daher vom Achsregelungssystem auch nicht oder nicht vollständig kompensiert werden kann. Üblicherweise werden solche dynamischen Fehler durch die Beschränkung der dynamischen Größen der Bewegungen auf konservative Werte vermieden, wodurch jedoch die volle Ausnutzung des Potentials schnell messender Sensoren verhindert wird. Als Alternative zu konservativen Beschränkungen wird in der vorliegenden Arbeit eine Methode zur modellbasierten Kompensation dieser dynamischen Fehler vorgestellt, welche die auftretenden Bahnfehler aktiv kompensiert anstatt diese durch dynamische Einschränkungen zu vermeiden. Zur Formulierung des Modells der dynamischen Fehler werden die Messwerte der Achscodern mit den realen Tool Center Point (TCP)-Position verglichen. Die reale TCP-Position wird durch ein vom Institut für Technische Optik der Universität Stuttgart (ITO) entwickeltes optisches Messsystem mit holographischer Mehrpunktprojektion erfasst und kann so zur Modellierung der dynamischen Fehler und zur Identifikation der Parameter dieses Modells genutzt werden. Das vorliegende Bahnregelungssystem der Messmaschine wird dann um ein auf diesem Modell basierendes Zwei-Freiheitsgrade-Kompensationssystem erweitert, welches die Achsantriebe so ansteuert, dass die modellierten dynamischen Fehler während der Bewegung verringert werden. Die somit erreichte Reduktion der dynamischen Fehler wird anhand von Messdaten evaluiert, wobei wiederum die tatsächliche TCP-Position mit dem optischen Messsystem erfasst wird.

ABSTRACT

Current efforts in the production of mechanical components are aimed at increasing both the throughput and the flexibility of production facilities and processes with regard to changing component geometries and specifications. A key aspect in these efforts is the integration of automated quality inspection systems, capable of inspecting all produced components, into the production process. The challenging measurement tasks resulting from this can only be satisfied by a sophisticated combination of modern optical sensors with highly accurate and fast measuring machines and flexible automation and control systems. Modern optical sensors are able to provide the required performance, if they can be moved relatively to the workpiece according to the specifications defined by the measurement task. This is particularly challenging in the case of multiscale measurement systems, based on the hierarchical combination of different sensors, allowing for shorter inspection times and comprising the inspection of a larger variety of component specifications. The motions of the different sensors towards the workpiece have to be planned by the automation system and conducted by the measuring machine and its control system. In the case of multisensor or multiscale measuring systems, different sensors with different demands on the motion system are mounted on a single measuring machine. The flexibility has thus to be provided by the control system.

In this thesis, three aspects of a multiscale quality inspection are covered. A multiscale measurement system was implemented based on a modified *Mahr MarForm MFU 100* formtester in cooperation with the Institute of Applied Optics (ITO) and serves as a demonstration system for the presented investigations. First of all, the utilized methods for planning the motions of the sensors towards the workpiece are described. Because of the largely differing demands of the available optical sensors and the inspection tasks on the motion planning system, two separate planning systems based on different approaches have to be implemented. These two motion planning systems are described and their application for measurement tasks is demonstrated.

The remaining two aspects of this thesis are concerned with the execution of the motions planned by these motion planning systems. Two critical cases occur. In the first case, sensors with very high resolutions but small measuring fields have to be moved along the workpiece surface at very small velocities. The friction force present in the motion system poses the main limit for the achievable path accuracy in this case. A model-based friction compensation utilizing the elastoelastic friction model is designed and implemented in order to achieve a high path accuracy in spite of the influence of the friction force. The elastoelastic friction model was chosen for this task, due to its low model order of one and the accordingly small parameter set and its ability to still reproduce the real frictional behavior well. The knowledge of the parameters of this model for the regarded positioning axes is a prerequisite for the application of the model-based friction compensation system. Two parameter identification techniques for the elastoelastic friction model are thus explained in detail and compared. Once the

frictional parameter for the positioning axes are obtained, the friction compensation system can be designed and implemented. This feedforward friction compensation system is combined with a linear two-degree-of-freedom control system and can also be used as an add-on system for existing control systems in industrial applications. The path accuracy improvement achieved by the friction compensation system is demonstrated in measurements.

The third aspect of this thesis is composed by the modelling and compensation of path errors occurring during very fast motions of measuring machines. These dynamic errors are caused by the impact of the large acceleration forces required for these motions on the machine structure with its finite stiffness. As a result, the relative position of the Tool Center Point (TCP) towards the workpiece is falsified. This effect is not or not entirely visible in the encoders and can thus not or not entirely be compensated for by the axis control systems. The usual approach to this problem is the limitation of the motion dynamics to conservative values, avoiding the excitation of dynamic errors. However, this approach also restricts the potential of the application of modern optical sensors. As an alternative to this approach, a technique for the model-based compensation of such dynamic errors is proposed in this thesis. The objective is to compensate for the dynamic errors instead of avoiding these by posing conservative dynamic limitations to the motions. The actual TCP-position is compared to the position indicated by the encoders in order to derive a dynamic model for the errors. A measurement of the actual TCP-position is obtained for this purpose using an optical measuring system with holographic multipoint projection developed by the ITO specifically for this purpose. The existing axis control systems is augmented by a two-degree-of-freedom compensation system based on this model. The dynamic errors are attenuated during motion by this compensation system, which modifies the axis drives' control effort in order to do so. The achieved reduction of dynamic errors is demonstrated using measurements of the actual TCP-position which were obtained by the optical measuring system.

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	v
Kurzzusammenfassung & Abstract	vi
1 Einleitung	1
1.1 Gliederung der Arbeit	6
2 Multisensorische Messmaschine	9
2.1 Maschinenachsen	10
2.1.1 x- und z-Achse	11
2.1.2 y-Achse	11
2.1.3 b-Achse	11
2.1.4 Vorgängerversion der y-Achse	12
2.2 Einbindung der y-Achse in das Koordinatensystem	13
2.3 Maschinensteuerung	16
3 Multiskalige Prüftechnik	21
3.1 Eingesetzte optische Sensoren	22
3.2 Messablauf	24
3.3 Automatisierungs- und regelungstechnische Aufgabenstellungen	26
3.4 Bahnplanung und Trajektoriengenerierung	27
3.4.1 Bahnplanung	27
3.4.2 Trajektoriengenerierung	28
3.4.3 Punkt-zu-Punkt-Bahnplaner und Trajektoriengenerator	29
3.4.4 Punktwolken-Bahnplaner	34
3.4.5 Online-Trajektoriengenerierung	39
3.5 Beispielmessung	42
3.6 Kurzzusammenfassung	45
4 Reibungsmodellierung, -identifikation und -kompensation	47
4.1 Stand der Technik	48
4.2 Wirkung der Reibkraft auf ein Positioniersystem	50
4.3 Reibmodelle	51
4.3.1 Statische Reibmodelle	52
4.3.2 Dynamische Reibmodelle	54
4.4 Identifikation der Modellparameter des elastoplastischen Reibmodells	61
4.4.1 Identifikation der Stribeck-Kurve	61
4.4.2 Identifikation der Parameter des Borstenmodells mit Krafttrajektorien	63
4.5 Positionsregelungssystem mit modellbasierter Reibungskompensation	66
4.5.1 Lineare Vorsteuerung und Regelung	67
4.5.2 Reibkraftschätzung und -kompensation	68

Inhaltsverzeichnis

4.6	Ergebnisse	78
4.6.1	Niedrige Geschwindigkeit	78
4.6.2	Hohe Geschwindigkeit	87
4.7	Eine alternative Methode zur Identifikation der Borstenparameter	90
4.7.1	Simulationsmodell zum Vergleich der Identifikationsmethoden	90
4.7.2	Identifikation der Borstenparameter durch Frequenzgangmessung	95
4.7.3	Untersuchung der y-Achse des Messaufbaus	98
4.8	Kurzzusammenfassung	117
5	Identifikation und Kompensation dynamischer Fehler	121
5.1	Stand der Technik	122
5.2	Genauigkeitsbeeinträchtigende dynamische Effekte der Messmaschine	123
5.3	Bestimmung der TCP-Position durch den optischen Mehrpunktsensor	126
5.4	Modellidentifikation mit dem optischen Mehrpunktsensor	131
5.5	Modellbasiertes dynamisches Kompensationssystem	140
5.5.1	Anpassung der Rückführung	140
5.5.2	Flachheitsbasierte Vorsteuerung	142
5.5.3	Ergebnisse	144
5.5.4	Erweiterung auf mehrere Achsen mit Verkopplung	145
5.6	Kurzzusammenfassung	145
6	Zusammenfassung	148
	Abkürzungsverzeichnis & Glossar	153
	Symbolverzeichnis	154
	Abbildungsverzeichnis	156
	Tabellenverzeichnis	161
	Literaturverzeichnis	162