

# Einsatz von Industrierobotern als Koordinatenmessgeräte

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs  
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur (FH)  
Dennis Derfling  
aus Hamburg.

Hamburg 2013

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl  
Institut für Flugzeug-Produktionstechnik  
Technische Universität Hamburg-Harburg

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Juli 2013

Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und  
Fertigungstechnik

Band 30

**Dennis Derfling**

**Einsatz von Industrierobotern  
als Koordinatenmessgeräte**

Shaker Verlag  
Aachen 2013

**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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2383-1

ISSN 1861-5260

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Laboratorium Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr. Jens P. Wulfsberg, dem Leiter des Laboratorium Fertigungstechnik, für die Eröffnung der Möglichkeit am LaFT zu promovieren, die uneingeschränkte Unterstützung meiner Arbeit und die große Freiheit, die er mir bei der Erstellung dieser Arbeit und in der Zeit am Lehrstuhl eingeräumt hat.

Prof. Dr. Thorsten Schüppstuhl danke ich für die bereitwillige Übernahme des Koreferats, das entgegengebrachte Interesse und das sorgfältige Lektorat.

In besonderem Maße bin ich Henry Loitz und Dr. Hubert Lettenbauer zu Dank verpflichtet, da sie es waren, die mich zum Laboratorium Fertigungstechnik geführt haben. Ohne ihr Engagement hätte ich zweifellos einen anderen Weg eingeschlagen.

Für die schöne gemeinsame Zeit danke ich allen Mitarbeitern des Lehrstuhls. Hervorheben möchte ich hier besonders meine langjährigen Kollegen Henry Loitz und Dr. Robert Ludwig. Nicht nur die Zusammenarbeit und der fachliche Gedankenaustausch im Rahmen unseres gemeinsamen Arbeitsgebiets der Robotik, sondern insbesondere die zahllosen „Klönchnacks“, die nicht selten in kontroverse Wortgefechte mündeten, haben einen besonderen Zusammenhalt geschaffen. Meinen Kollegen Nils Clausing, Henry Hameister, Robert Weidner, Nanxi Kong, Silka Grimske, Benny Röhlig, Carsten Oberländer, Kim Schwake, Dr. Jörg Lehmann, Dr. Mahdi Terzi, Pascal Krenz und Dr. Peter Kohrs danke ich für das freundschaftliche Verhältnis und die gegenseitige Unterstützung. Dr. Lukas Beyer wird mir als stets hilfreicher Ansprechpartner und als bemerkenswerter Individualist in Erinnerung bleiben. Ein besonderer Dank gilt Robert Weidner für seine

außerordentlich große Hilfsbereitschaft. Schließlich danke ich meinen Studien- und Diplomarbeitern, den studentischen Hilfskräften sowie den Mitarbeitern des Labors und der zentralen Werkstatt für ihre tatkräftige Unterstützung.

Weiterer Dank gilt meinen Freunden, von denen ich Dr. Malte Schwab besonders hervorheben möchte, da er sich wie kein anderer in meine Situation hineinversetzen konnte und mir deshalb eine besondere Hilfe bei der Erstellung dieser Arbeit war.

Großer Dank gebührt auch meinen Eltern, die mir stets gut zugesprochen, mich uneingeschränkt gefördert und mir damit vieles ermöglicht haben.

Von ganzem Herzen bedanke ich mich bei meiner Frau Ines für ihren bedingungslosen Rückhalt, ihre grenzenlose Geduld und ihren liebevollen Zuspruch.

Hamburg, im September 2013

Dennis Derfling

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen	xi
Abkürzungsverzeichnis	xiii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand des Wissens und der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Herkömmliche Koordinatenmesstechnik . . . . .	3
2.1.1 Grundprinzip . . . . .	3
2.1.2 Standardkinematik und Standardmesskonzepte . . . . .	8
2.1.3 Andere Kinematiken . . . . .	11
2.2 Messen mit Industrierobotern . . . . .	16
2.3 Kalibrierung . . . . .	23
2.3.1 Kinematische Modellierung . . . . .	27
2.3.1.1 Starrkörpermodelle für ideale Gelenke . . . . .	28
2.3.1.2 Starrkörpermodelle für nichtideale Gelenke mit einem Freiheitsgrad . . . . .	31
2.3.1.3 Getriebemodelle . . . . .	34
2.3.1.4 Elastizitätsmodelle . . . . .	34
2.3.1.5 Fehlerkompensationsmodelle auf Wertetabellenbasis . . . . .	35
2.3.1.6 Sonstige Modelle . . . . .	36
2.3.2 Ausgleichsrechnung . . . . .	37
2.3.3 Partielle Poseinformationen . . . . .	38
2.3.4 Prinzip der kinematischen Schleife . . . . .	39
2.3.5 Taxonomie von Hollerbach und Wampler . . . . .	40
2.3.6 Messtechnisches Schließen der kinematischen Kette . . . . .	42
2.3.7 Selbstkalibrierung mit Kalibrierkörpern . . . . .	43
2.3.8 Werkzeugkalibrierung . . . . .	46

2.3.9	Messkopfkalibrierung . . . . .	47
2.4	Visual Servoing . . . . .	48
2.5	Sensorregelung . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Ziel und Vorgehensweise</b>	<b>53</b>
<b>4</b>	<b>Grundlagen einer verallgemeinerten Koordinatenmesstechnik</b>	<b>59</b>
4.1	Formelemente . . . . .	59
4.1.1	Die Spezielle Euklidische Gruppe . . . . .	59
4.1.2	Mannigfaltigkeiten . . . . .	61
4.1.3	Parametrisierungen der Speziellen Euklidischen Gruppe . . . . .	63
4.1.4	Symmetriegruppe eines Formelements . . . . .	64
4.1.5	Verallgemeinerte Koordinaten . . . . .	65
4.1.6	Systematische Herleitung der Formelementtypen . . . . .	67
4.1.7	Formelement-Beispiele . . . . .	70
4.1.8	Restringierte Formelemente . . . . .	71
4.2	Das allgemeine Koordinatenmessgerät . . . . .	72
4.3	Messender Messkopf . . . . .	74
4.3.1	Die Messrelation . . . . .	74
4.3.2	Projektionen und Selektionen . . . . .	74
4.3.3	Eigenschaften von Koordinatenmessgeräten mit messendem Messkopf . . . . .	78
4.3.4	Beispiel: Zweiachs-Roboter erfasst Abstand zu einem Punkt auf einer Geraden . . . . .	82
4.3.5	Beispiel: Kartesisches KMG mit messendem Kugelmesstaster . . . . .	84
4.3.6	Beispiel: Lageerfassung eines Prismas mit vier Laser-triangulationssensoren . . . . .	85
4.4	Schaltender Messkopf . . . . .	86
4.4.1	Eigenschaften von Koordinatenmessgeräten mit schaltendem Messkopf . . . . .	87
4.4.2	Mehrere Schaltbedingungen . . . . .	89
4.4.3	Beispiel: Kartesisches Koordinatenmessgerät mit schaltendem Kugelmesstaster . . . . .	90
<b>5</b>	<b>Messkonzept für Koordinatenmessroboter</b>	<b>93</b>
5.1	Beurteilung der herkömmlichen Messkonzepte . . . . .	94



---

5.2	Messender Messkopf im Schaltbetrieb . . . . .	96
<b>6</b>	<b>Antastregelung</b>	<b>99</b>
6.1	Modellierung der Regelstrecke . . . . .	100
6.2	Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	102
6.3	Redundante Messkopf-Freiheitsgrade . . . . .	104
6.4	Reglerauswahl . . . . .	105
6.5	Bestimmung der Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	105
6.5.1	Abhängigkeit der Messwert-Jacobi-Matrix von der Messkopfpose und der Formelementlage . . . . .	106
6.5.2	Analytische Herleitung . . . . .	107
6.5.3	Konstante Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	109
6.5.4	Automatische Ermittlung der zum Sollmesswert gehörigen Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	111
6.6	Festlegung der Reglerverstärkung . . . . .	112
<b>7</b>	<b>Kalibrierung</b>	<b>115</b>
7.1	Selbstkalibrierung mit Kalibrierkörpern . . . . .	118
7.2	Zwangsbedingungen . . . . .	119
7.3	Lösungsfindung . . . . .	122
7.4	Neuermittlung der Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	127
7.5	Messkopfkalibrierung mit einem herkömmlichen Koordinatenmessgerät . . . . .	127
7.6	Werkzeugkalibrierung . . . . .	128
<b>8</b>	<b>Messunsicherheit</b>	<b>129</b>
8.1	Annahme- und Bestätigungsprüfung . . . . .	133
8.2	Experimentelle Ermittlung der aufgabenspezifischen Mess- und Positionierungsunsicherheit . . . . .	137
<b>9</b>	<b>Koordinatenmessroboter-Framework</b>	<b>141</b>
9.1	Framework-Architektur . . . . .	144
9.2	Parametrisierungen für Formelemente . . . . .	148
9.3	Kinematische Modellierung . . . . .	151
9.4	Einschränkung des Arbeitsraums . . . . .	156
9.5	Antastregelung . . . . .	157
9.5.1	Messkopfgeschwindigkeit als Stellwert . . . . .	160

---

9.5.2	Gelenkgeschwindigkeiten als Stellwerte . . . . .	161
9.5.3	Kumulative Bahnkorrektur . . . . .	162
9.5.4	Absolute Bahnkorrektur . . . . .	166
9.5.5	Static-Look-And-Move . . . . .	168
9.6	Automatische Bestimmung der Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	170
9.7	Eingabe der Zwangsbedingungen . . . . .	172
9.8	Selbstkalibrierung . . . . .	174
<b>10</b>	<b>Herstellung von Nietbohrungen in der Flugzeugrumpfmontage</b>	<b>179</b>
10.1	Mess- und Bearbeitungsaufgabe . . . . .	181
10.2	Roboter . . . . .	182
10.3	Messkopf . . . . .	183
10.4	Antastregelung . . . . .	186
10.5	Kalibrierung mit einem herkömmlichen Koordinatenmessgerät . . . . .	187
10.6	Selbstkalibrierung . . . . .	188
10.7	Ermittlung des Bohrer-TCPF . . . . .	191
10.8	Ermittlung der Messwert-Jacobi-Matrix . . . . .	195
10.9	Bestimmung der Unsicherheiten . . . . .	196
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>199</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>205</b>