

Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern

Insbesondere mit Parallelkinematik

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität
- Universität der Bundeswehr Hamburg -
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von
Dipl.-Wi.-Ing. Lukas Beyer
aus Speyer

Hamburg 2004

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Peter Wulfsberg
Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Arno Behrens

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Oktober 2004

Forschungsberichte aus dem Laboratorium Fertigungstechnik

Band 1

Lukas Beyer

Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern

Insbesondere mit Parallelkinematik

Shaker Verlag
Aachen 2005

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität, Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2005

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3681-3

ISSN 1860-2886

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 Dissertation ist das Ergebnis meiner langjährigen Arbeit am Laboratorium Fertigungstechnik des Institutes für Konstruktions- und Fertigungstechnik an der Helmut-Schmidt-Universität Hamburg. Mein aufrichtiger Dank gilt dem ehemaligen Leiter des Institutes, Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Arno Behrens, für die Eröffnung der Möglichkeit, an seinem Lehrstuhl zu promovieren, für seine nahezu väterliche Führung und das intensive Korreferat. In diesem Zusammenhang danke ich außerdem Herrn Dr.-Ing. Eberhard Roos für seine Fürsprache.

Dem derzeitigen Vertreter der Professur Fertigungstechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg, gebührt mein Dank für die uneingeschränkte Unterstützung meiner Arbeit und die Gewährung des erforderlichen Freiraumes, das Beistehen neuer Ideen sowie das sorgfältige Lektorat.

Weiterhin danke ich den Kollegen am Laboratorium Fertigungstechnik für sowohl wissenschaftliche als auch private Unterstützung und wünsche Ihnen viel Erfolg bei ihrer weiteren Arbeit und genügend Freiraum, um deren Früchte zu genießen.

Außerdem gilt mein Dank den zahlreichen Studenten, die mit ihren Arbeiten die meine nachhaltig unterstützt haben, vor allem den Herren Dias, Pätzold, Leppin, Friedrich, Bénistan, Beisch, vor dem Brocke und Richter, sowie der Zentralwerkstatt, hier insbesondere Herrn Mathies. Weiterhin herzlichen Dank an Herrn Dr.-Ing. habil. Jörg Wollnack von der TU Hamburg-Harburg für seine Hilfe bei Modellierungsfragen und an die GKSS in Geesthacht, speziell Herrn Dr. dos Santos und Herrn Alexander von Strombeck, für die Unterstützung der Tricept-Versuche.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die mir diesen Weg geebnet haben, sowie meiner Familie, die ihn mir immer freigehalten hat.

Hamburg, im Mai 2004

42.

Douglas Adams – "The Hitchhiker's Guide to the Galaxy"

Abkürzungen

3D	Dreidimensional
6D	Sechsdimensional
A/D	Analog/Digital
AP	Accuracy of pose (Pose-Absolutgenauigkeit)
AT	Accuracy of trajectory (Bahn-Absolutgenauigkeit)
BKS	Basiskoordinatensystem
CCD	Charge coupled device (lichtempfindlicher Chip)
CIRC	Zirkularbewegung
CMM	Coordinate measurement machine (CMM)
CP	Continuous path (Bahnbewegung)
DH	Denavit-Hartenberg (kinematische Beschreibungsform)
DKP	Direktes kinematisches Problem (Vorwärtstransformation)
DMS	Direct Measurement System
FKS	Flanschkoordinatensystem
FSW	Friction stir welding (Reibrührschweißen)
HM	Hayati-Mirmirani (kinematische Beschreibungsform)
IKP	Inverses kinematisches Problem (Rückwärtstransformation)
IMTS	International Machine Tool Show (Werkzeugmaschinenmesse, Chicago)
IEEE1394	Firewire, iLink (PC-Schnittstelle)
IR	Industrieroboter
KOS	Koordinatensystem
LED	Light emitting diode (Leuchtdiode)
LIN	Linearbewegung
LM	Levenberg-Marquardt-Verfahren
OLP	Off-line-Programmierung
PHG	Programmierhandgerät
PIR	Parallelkinematischer Industrieroboter
PKM	Parallelkinematische Maschine
PTP	Point-to-point (Punkt-zu-Punkt-Bewegung)

RC	Robot control (Robotersteuerung)
RCS	Robot control software
RDS	Realistische Dynamiksimulation
ROSY	Robot Optimization System
RPY	Roll, Pitch, Yaw (Drehreihenfolge für Kardanwinkel)
RP	Repeatability of pose (Pose-Wiederholgenauigkeit)
RT	Repeatability of trajectory (Bahn-Wiederholgenauigkeit)
RRS	Realistische Roboter-Simulation
RSC	Réseau scanning camera
SVD	Single value decomposition (Singularwertzerlegung)
TCP	Tool center point (Werkzeugarbeitspunkt)
TKS	Toolkoordinatensystem
TNS	Trägheitsnavigationssystem
USB	Universal serial bus (universeller serieller Bus)
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VRC	Virtual Robot Controller
WOK	Werkstatorientierte Kalibrierung
Wst	Werkstück
WstKS	Werkstückkoordinatensystem
Wz	Werkzeug
WzKS	Werkzeugkoordinatensystem
WZM	Werkzeugmaschine

Formelzeichen

x	Skalar
\vec{x}	Vektor
X	Matrix
x_s, y_s, z_s	Sollposition
\vec{y}_M	Ergebnisvektor der Modellfunktion
\vec{y}_S	Ergebnisvektor des realen Systems
\vec{p}	Parametervektor
\vec{r}	Vektor des Restfehlers
\vec{f}	Modellfunktion
R	Rotationsmatrix
E	Einheitsmatrix
J	Jacobimatrix (Matrix der partiellen Ableitungen)
D	Diagonalmatrix
\vec{p}_{i_MES}	Meßpunkte
\vec{p}_{i_REF}	Referenzpunkte
$\vec{p}_{i,j}$	Positionsvektoren bei der Werkzeugvermessung
A_T, B_T, C_T	Werkzeugorientierung
R_{FKS}	Orientierung des FKS bei der Werkzeugvermessung
R_{TKS}	Orientierung des TKS bei der Werkzeugvermessung
R_{REF}	Referenzorientierung bei der Werkzeugvermessung
l, l_0	Länge
α	Wärmeausdehnungskoeffizient
T_0	Ausgangstemperatur
T_m	mittlere Temperatur

T_B	Beharrungstemperatur
$\dot{\Phi}$	Wärmestrom
c_m	spezifische Wärmekapazität
R	Wärmeübergangswiderstand
T_t	thermische Zeitkonstante
\underline{T}	Vektor der Achsmomente
$\underline{\varphi}$	Vektor der Achswinkel
$H(\underline{\varphi})$	Trägheitstensor mit Hauptachsen- und Deviationsmomenten
$\underline{C}(\underline{\varphi}, \dot{\underline{\varphi}})$	Vektor der aus den Coriolis- und Zentrifugalkräften resultierenden Momente
$\underline{D}(\underline{\varphi}, \dot{\underline{\varphi}})$	Vektor der Reibmomente auf Grund Coulomb'scher und viskoser Reibung
$\underline{G}(\underline{\varphi})$	Vektor der Gravitationsmomente
\underline{M}	Vektor der Störmomente auf Grund der Kräfte und Momente am TCP
k_V	Verstärkungsfaktor
τ	Antriebsmoment
i	Getriebeübersetzung
f	Vektor der generalisierten Kräfte
E_k	kinetische Energie
E_p	potentielle Energie
q	Vektor der generalisierten Koordinaten
F	eingeprägte Kräfte
m	Masse des Elements
a	Beschleunigung
M	eingeprägte Momente
H	Trägheitsmatrix
ω	Winkelgeschwindigkeit
l	Impuls
D	Drehimpuls

Kurzzusammenfassung

Die absolute Positioniergenauigkeit von Industrierobotern ist für bestimmte Aufgaben oft unzureichend. Insbesondere bei hochpräzisen Anwendungen können bezüglich Off-line-Programmierung und Austauschbarkeit Genauigkeitsprobleme auftreten, deren Beseitigung sehr zeit- und kostenintensiv sein kann.

Roboter mit Parallelkinematik können durch Ihre höhere Steifigkeit eine bessere Wiederholgenauigkeit erreichen und größere Kräfte aufbringen als konventionelle Knickarmroboter. Mit fortschrittlichen Kalibriermethoden ist es möglich, eine Absolutgenauigkeit von 0,1 mm dauerhaft zu gewährleisten, wodurch neue Anwendungsgebiete in der Fertigungstechnik erschlossen werden können, beispielsweise bei der spanenden Bearbeitung oder bei der Blechumformung.

Schlüsselwörter: Industrieroboter, Kalibrierung, Parallelkinematik

Abstract

The accuracy of pose of today's industrial robots often is unsatisfactory for special applications. Particularly in connection with off-line programming and exchangeability accuracy problems may occur with high precision tasks which can be very time-consuming and costly to solve.

Industrial robots with parallel kinematics can achieve a better accuracy of repeatability and they can apply larger forces than conventional standard robots due to the higher stiffness of their mechanical structure. With advanced calibration methods it is possible to guarantee an accuracy of pose of 0,1 mm permanently, which enables new application areas in production engineering to be developed, for example in cutting processes or in sheet metal forming.

Keywords: industrial robot, calibration, parallel kinematics

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1. Themengebiet	1
1.2. Problemstellung	2
2. Stand der Forschung.....	5
2.1. Definitionen	5
2.2. Grundlagen	6
2.2.1. Kenngrößen von Industrierobotern	6
2.2.2. Programmierverfahren für Industrieroboter	8
2.2.3. Entwicklung parallelkinematischer Maschinen	13
2.3. Kalibrierung von Knickarmrobotern	16
2.3.1. Fehlereinflüsse	16
2.3.2. Mögliche Meßverfahren	19
2.3.3. Mögliche Kalibriermethoden	25
2.4. Kalibrierung von Parallelkinematiken	27
2.5. Temperaturkompensation	31
2.6. Dynamikkompensation	34
2.7. Zusammenfassung	37
3. Zielsetzung.....	39
3.1. Vorgehensweise	39
3.2. Systemanforderungen	42
4. Entwicklung der Hardware.....	45
4.1. Festlegung des Meßprinzips	45
4.2. Bestimmung der erforderlichen Auflösung	46
4.3. Untersuchung verschiedener Sensoren	46
4.3.1. Laser-Testsystem	47
4.3.2. Kamera-Testsystem	49
4.3.3. Vergleich	54
4.4. Endgültiges Kamerasystem	55
4.5. Eigenschaften von ROSY	58

5. Entwicklung der Software.....	61
5.1. Algorithmen zur Werkzeugkalibrierung	62
5.1.1. Berechnung der Position des Werkzeugkorrekturvektors	63
5.1.2. Berechnung der Orientierung des Werkzeugkorrekturvektors	65
5.2. Algorithmen zur Werkstückkalibrierung	66
5.3. Algorithmen zur Roboterkalibrierung	70
5.3.1. Aufstellen der Modelle	70
5.3.2. Festlegung der Meßstrategie	85
5.3.3. Entwicklung der Parameteridentifikation	87
5.3.4. Auswahl des Optimierungsverfahrens	89
5.3.5. Minimierung der Modelle	92
5.3.6. Kompensation der Parameterfehler	95
5.4. Anwendung der Programmkorrektur	98
5.4.1. Implementierung verschiedener Robotersprachen	98
5.4.2. Werkzeugkompensation	99
5.4.3. Werkstückkompensation	99
5.4.4. Roboterkompensation	100
6. Anwendungsbeispiele.....	103
6.1. Serielle Roboter	103
6.1.1. Medizintechnik	103
6.1.2. In-Line-Meßtechnik	104
6.2. Hybridroboter	105
6.2.1. Rollfalzen	105
6.2.2. Reibrührschweißen	106
6.2.3. Laserhartlöten	107
6.3. Parallelroboter	109
6.4. Weitere Beispiele	110
7. Ergebnisse der statischen Kalibrierung.....	111
7.1. Serielle Kinematiken	111
7.1.1. Mitsubishi RV-1A	111
7.1.2. KUKA KR45	115
7.2. Hybridkinematiken	116
7.2.1. ABB IRB 6400	116

7.2.2. Neos TR600	117
7.2.3. SEF SRT60	119
7.3. Parallelkinematiken	120
7.3.1. Fanuc F-200i	120
8. Kompensation thermischer Verlagerungen.....	123
8.1. Unterschiede zwischen seriellen und parallelen Strukturen	123
8.2. Vorgehensweise zur Kompensation	124
8.2.1. Thermische Modellbildung	124
8.2.2. Mögliche Kompensationsstrategien	125
8.3. Auswahl und Realisierung	129
8.4. Ergebnisse	132
8.4.1. Versuchsbedingungen	132
8.4.2. Dauerversuch ohne Kompensation	133
8.4.3. Dauerversuch mit Kompensation	134
8.4.4. Zusammenfassung	136
9. Vorschlag zur Verbesserung der Bahngenaugkeit.....	137
9.1. Realistische Robotersimulation	138
9.2. Kinetische Modellbildung	140
9.3. Realistische Dynamiksimulation	145
10. Schlußbetrachtungen.....	149
10.1. Zusammenfassung	149
10.2. Vergleich	150
10.3. Ausblick	152
Referenzen.....	155
Literaturverzeichnis	155
Themenrelevante Studien- und Diplomarbeiten	163
Lebenslauf.....	165