

Zur Fehlerkompensation und Bahnkorrektur für eine mobile Großmanipulator-Anwendung

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

vorgelegt von
Dipl. - Ing. Klaus Dieter Rupp
aus Ingelfingen

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing., Dr. h.c. mult. H.-J. Warnecke

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing., Dr. h.c. W. Schiehlen

Tag der Einreichung: 20.12.95

Tag der mündlichen Prüfung: 29.11.96

Klaus Dieter Rupp

**Zur Fehlerkompensation
und Bahnkorrektur für eine
mobile Großmanipulator-
Anwendung**

Mit 48 Abbildungen und 17 Tabellen



Springer

Dr.-Ing. Klaus Dieter Rupp

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Dr.-Ing. E. h. H. J. Warnecke

o. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. H.-J. Bullinger

o. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN-13: 978-3-540-62625-1 e-ISBN-13: 978-3-642-47896-3

DOI: 10.1007/ 978-3-642-47896-3

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1997.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Gesamtherstellung: Copydruck GmbH, Heimsheim

SPIN 10570609

62/3020-543210

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muß, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, die die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muß dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z.B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern geleiteten Institute, das

- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart (IFF),
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT)
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe "IPA-IAO - Forschung und Praxis" herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluß dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Springer-Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

H.J. Warnecke H.-J. Bullinger

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt dem früheren Leiter des Institutes und jetzigen Präsidenten der Fraunhofergesellschaft, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c.mult. H.-J. Warnecke für seine großzügige Förderung, die entscheidend zur erfolgreichen Durchführung der Arbeit beigetragen hat

Herrn Prof. Dr.-Ing Dr. h.c. W. Schiehlen danke ich für die Übernahme des Mitberichts.

Aus dem Kreis der Kollegen des Institutes, die mich durch ihre Mitarbeit und anregende Kritik unterstützt haben, möchte ich die Herren Prof. Dr. Ing. R.D. Schraft, Dr. Ing. M. Schweitzer, Dr. Ing. W. Engeln, Dipl.-Ing. T.F. Herkommer und Dipl.-Ing. H. Biesinger besonders erwähnen.

Dank gebührt auch Dr.-Ing. M.C. Wanner, Dipl.-Ing. H. Veit und Dipl.-Ing. O. Wurst sowie den Mitarbeitern von PMW und der DLH die im Projekt SKYWASH mitwirkten und dadurch viel zum Erfolg der Arbeit beigetragen haben.

Der Familie Wenderoth danke ich für die eingehende Durchsicht der Arbeit und die sich daraus ergebenden Anregungen.

Bei meinen Eltern und meiner Freundin möchte ich mich ebenfalls bedanken, da Sie die Voraussetzungen für die Anfertigung der Arbeit geschaffen haben.

Stuttgart, 1996

Klaus Dieter Rupp

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	13
1 Einleitung	17
1.1 Problemstellung	17
1.2 Zielsetzung	18
1.3 Vorgehensweise	19
2 Ausgangssituation	20
2.1 Abgrenzung von Begriffen	20
2.2 Situation bei der Flugzeugwäsche	21
2.3 Stand der Technik	24
2.3.1 Hochflexible Handhabungssysteme	24
2.3.2 Geometrieverarbeitung für hochflexible Handhabungssysteme	
2.3.3 Toleranzausgleichssysteme	27
2.3.4 Steuerungstechnik für hochflexible Handhabungssysteme	29
2.3.5 Prozeßrechnertechnik zur Steuerung und Überwachung von Manipulatoren	30
2.3.6 Mensch-Maschine-Schnittstelle für Manipulatoren	31
3 Anforderungen und Ziele	32
3.1 Entwicklungsschwerpunkte	32
3.2 Allgemeine Anforderungen der Wäsche an das System	33
3.3 Anforderungen an die Steuerungstechnik	34
3.3.1 Anforderungen an die Bewegungssteuerung	34
3.3.2 Anforderungen an die Sensorik	34
3.3.3 Anforderungen an den Bordrechner	35
4 Einsatz von Großmanipulatoren für die Flugzeugwäsche	
- Verfahren und Fehleranalyse	36
4.1 Die automatisierte Flugzeugwäsche mit Großmanipulatoren	36
4.2 Wesentliche Prozesse der automatisierten Flugzeugwäsche	38

4.2.1	Definition der wesentlichen Prozesse	38
4.2.2	Off-Line-Programmierung	39
4.2.3	Spezifikation des Prozesses der Wäsche	40
4.3	Bestimmen der relativen Lage des Manipulators zum Flugzeug	40
4.4	Integration der Wascheinrichtung	41
4.5	Abschätzung der Toleranzen	42
4.5.1	Fehler beim Bestimmen der relativen Lage des Manipulators zum Flugzeug	42
4.5.2	Deformation des Manipulators	42
4.5.3	Restfehler bei der Kalibrierung	43
4.5.4	Abschätzung des Einflusses der Dynamik des Manipulators	43
4.5.5	Abschätzung des Einflusses der Achsregelung	43
4.5.6	Klassifizierung der Fehler	44
4.6	Bahnplanung für Großmanipulatoren bei der Flugzeugwäsche	45
4.6.1	Off-Line-Programmierung	45
4.6.2	Planung der Bahnsequenzen	45
4.6.3	Planung der Manipulatorkonfigurationen	47
4.7	Kompensation von Ungenauigkeiten	48
4.7.1	Kalibrierung des Gesamtsystems	48
4.7.2	Kompensation aufstellungsortabhängiger Geometriegrößen	49
4.7.3	Bahnkorrektur	49
4.8	Einbindung des Bordrechners ins Gesamtsystem	50
4.9	Konzeption des Bordrechners	52
5	Kompensation statischer Fehler	53
5.1	Spezifikation der Koordinatentransformation	53
5.1.1	Spezifikation der verwendeten Koordinatensysteme	53
5.1.2	Spezifikation der Vorwärtstransformation	55
5.1.3	Definition der Bindungsgleichungen	56
5.2	Spezifikation der Rückwärtstransformation	58
5.2.1	Bestimmen von kleinen Orientierungsfehlern	58
5.2.2	Betrachtung der Vorwärtstransformation auf Geschwindigkeitsebene	61

5.2.3 Berechnung der Jacobimatrix und deren verallgemeinerter Inversen	62
5.2.4 Verfahren der Rückwärtstransformation	63
5.3 Kompensation der Einflüsse, die nicht vom Aufstellungsort abhängen	64
5.3.1 Kompensation allgemeiner Einflüsse	64
5.3.2 Kalibrierung des Manipulators	65
5.4 Kompensation der Manipulatordeformation	67
5.4.1 Erstellen eines Ersatzmodells	67
5.4.2 Kraftrechnung am Manipulator	68
5.4.3 Deformationsrechnung am Manipulatorarm	69
5.4.4 Bestimmung der Lage des Werkzeuges unter Berücksichtigung der Deformation	71
5.5 Kompensation der relativen Lage	72
5.5.1 Transformationen zur Bestimmung der relativen Lage	72
5.5.2 Auswahl des Aufstellungsrasters und die Vorkompensation der Drehlage	72
5.5.3 Spiegelung der Aufstellung	73
5.5.4 Auswahl der relevanten Gelenke und Berechnen der Jacobimatrix	74
5.5.5 Skalierung des Ausgangsvektors	75
5.5.6 Transformationen zur Kompensation der relativen Lage	76
6 Bahnkorrektur	79
6.1 Ablaufüberwachung	79
6.1.1 Funktion der Ablaufüberwachung	79
6.1.2 Überwachung der Wascheinrichtung	80
6.1.3 Überwachen der Kräfte am Manipulator	81
6.1.4 Überwachen der Position an der Waschbürste	85
6.2 Struktur des Bahnkorrektursystems und Adaption	86
6.3 Funktionsweise der Adaption und Bahnfehlerkompensation	87
6.3.1 Berechnung eines virtuellen Berührungspunktes	87
6.3.2 Transformation auf die Adaptionsachsen	88
6.3.3 Bahnfehlerkorrektur	89
6.4 Online Bahnkorrektur	89

6.4.1 Wirkungsweise der Bahnkorrektur	89
6.4.2 Zeitverhalten der Bahnkorrektur	89
6.4.3 Voraussetzungen und Randbedingungen der Bahnkorrektur	90
6.4.4 Bestimmen der Korrekturrichtung	91
6.4.5 Ablauf der Bahnkorrektur	93
7 Realisierung des Bordrechnersystems	95
7.1 Aufbau der Bordrechner-Hardware	95
7.2 Aufbau der Softwarestruktur	97
7.2.1 Gesamtstruktur der Bordrechner-Software	97
7.2.2 Datenverwaltung auf dem Bordrechner	98
7.2.3 Beschreibung der Softwaremodule auf dem PC	99
7.2.4 Module auf dem Echtzeitsystem	101
7.2.5 Geometrieverarbeitung	102
7.3 Die Ablaufsteuerung des Waschprozesses im Bordrechner	103
8 Erprobung des Verfahrens	106
8.1 Der Ablauf einer automatisierten Flugzeugwäsche	106
8.1.1 Aufstellungsphase	106
8.1.2 Durchführen der Flugzeugwäsche (Waschphase)	109
8.2 Geometrieverarbeitung	113
8.2.1 Test der absoluten Genauigkeit	113
8.2.2 Transformation aller Programme auf die momentane Referenzlage	113
8.3 Bahnkorrektursystem und Ablaufüberwachung	115
9 Zusammenfassung und Ausblick	118
9.1 Zusammenfassung	118
9.2 Ausblick	120
10 Literaturverzeichnis	121

0 Abkürzungen und Formelzeichen

Skalare Größen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	m ²	Kolbenfläche
a		Gewichtungsfaktor
a,b,c	rad	Kleine Deformationswinkel eines Gelenks
α,β,γ	rad	Kleine Verdrillungen eines Gelenks
g	m/s ²	Gravitationskonstante
h		Räumlicher Einflußvektor zur Bewertung des shift
k, λ		Verstärkungsfaktoren
m	kg	Masse
p	V	Abgetastetes Signal
φ	rad	Orientierungswinkel der Waschbürste
θ_i	rad	Achswinkel der Achse i
S		Gütemaß einer Minimierung
s	m	Hub des Hydraulikzylinders
T	s	Abtastperiode
w_v		Maß für die Manipulierbarkeit der Gesamtkinematik
$v_{s,i}$		Maß für die Manipulierbarkeit der einzelnen Gelenke i
x,y,z	m	Koordinatenrichtungen eines Koordinatensystems

Vektoren und Matrizen

Formel- zeichen	Einheit	Bedeutung
A		Matrix der Kraftübertragung am Gelenk
${}^{i,j}D$		Homogene Transformationsmatrix für den Übergang des Koordinatensystems i nach j
E		Einheitsmatrix
e		Einheitsvektor eines Koordinatensystems
F_i	N	Vektor der Gelenkkraft an der Achse i
G		Matrix der Deformation für Eigengewicht
h		Rückführungsmatrix für Beobachter
H		Vektor zur Ansteuerung des Nullraum
J		Jacobimatrix
J_N		Nullraum der Jakobimatrix
J_Q^+		Verallgemeinerte Inverse der Jacobimatrix
M	N/m	Momentenvektor
M		Matrix der Deformation für Kraftübertragung
p		Quarternion zur Darstellung der Orientierung eines Punktes im Raum
$P[i]$		Koordinaten des Bahnpunktes i
Q		Diagonalmatrix zur Gewichtung der verallgemeinerten Inversen
Θ	rad	Vektor der Achswinkel des Manipulators
R		Jacobimatrix der Adaption
${}^i r_{k,j}$	m	Verschiebeoperator des Koordinatensystems k nach j im System i
S	m	Verschiebevektor der Bahnkorrektur (shift)
${}^{i,j}T$		Drehung des Koordinatensystems i nach j
W		Gewichtungsmatrix für die Manipulierbarkeit
X	m	Position eines Punktes im Raum

Verwendete Indices:

Index	Bedeutung
dyn	Dynamischer Anteil
FO	Flugzeugbasis
g	Index für Schwerkraft
i,k,j	Indices für Gelenke und Koordinatensysteme
O	Manipulatorbasis
Q	Quotient als Qualitätsmaß
q	Index für die Bewertung des Ölvolumenstromes
Ref	Referenzsystem
ref	Bezugs-Koordinaten
SO	Sensorbasis
soll	Soll-Koordinaten
TCP	Tool Center Point
TEL	Index der Teleskopachse
t	Zeitindex
R	Index für die Reibkraft
r	Index für die Regelabweichung
max, min	Index für obere und untere Grenze

Vorzeichen und Operatoren:

Operator	Bedeutung
Δ	Differenz
∂	Partielle Ableitung eines Vektors
\sum	Summe
$\prod_{i=0}^n$	Produkt über die Indices i für i=0 bis i=n
\tilde{u}	Operator des Kreuzproduktes für den Vektor u
\ddot{x}	Operator der 2. zeitlichen Ableitung einer Position \underline{x}
\hat{x}	Geschätzte Größe einer Variablen \underline{x}
x'	Fehlerbehaftete Größe einer Variablen \underline{x}

det	Determinante einer Matrix
c	Cosinus eines Winkels
s	Sinus eines Winkels
MIN	Kleinster Wert aus einer Menge von Werten
MAX	Größter Wert aus einer Menge von Werten

Abkürzungen:

Abkürzung	Bedeutung
CNC	C omputer N umerical C ontroller (Rechnergestützte numerische Steuerung)
CSMA/CD	C arrier S ense M ultiple A ccess / C ollision D etection (Übertragungsverfahren für serielle Bussysteme)
DDE	D ynamic D ata E xchange (dynamischer Austausch von Daten von 2 Programmen nach dem client-server-Prinzip)
DLL	D ynamic L ink L ibrary (Bibliothek, die erst zur Laufzeit gebunden wird, kann von mehreren Programmen gleichzeitig benutzt werden.)
DNC	D irect N umerical C ontrol (Schnittstelle einer Roboter-Steuerung zur direkten numerischen Ansteuerung)
DOF	D egrees O f F reedom (Freiheitsgrade des Systems)
DPM	D ual- P orted- M emory (Speicher mit zwei Zugriffsports)
EBK	Entfernungsbildkamera
EMV	E lektromagnetische V erträglichkeit
HfH	H ochflexibles H andhabungssystem
IRC	I ndustrial R obot C ontrol
LAMA	L arge M anipulator
SPS	S peicherprogrammierbare Steuerung
TCP	T ool C enter P oint (Mittelpunkt des Werkzeuges)

Begriffe:

Begriff	Bedeutung
shift	Verschiebung der Weltkoordinaten eines Bahnpunktes