
IPA-IAO

Forschung und Praxis

Band 166

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

Herausgeber: H. J. Warnecke und H.- J. Bullinger



Raimund Menges

**Synthese und Simulation
dreidimensionaler
Hand-Arm-Bewegungen
an manuellen
Montagearbeitsplätzen**

Mit 70 Abbildungen und 2 Tabellen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg GmbH 1992

Dipl.-Ing. Raimund Menges

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), 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 978-3-540-55752-4 ISBN 978-3-662-10188-9 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-10188-9

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 1992.

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1992

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
62/3020-6 5 4 3 2 1 0

Geleitwort der Herausgeber

Futuristische Bilder werden heute entworfen:

- o Roboter bauen Roboter,
- o Breitbandinformationssysteme transferieren riesige Datenmengen in Sekunden um die ganze Welt.

Von der "mensenleeren Fabrik" wird da gesprochen und vom "papierlosen Büro". Wörtlich genommen muß man beides als Utopie bezeichnen, aber der Entwicklungstrend geht sicher zur "automatischen Fertigung" und zum "rechnerunterstützten Büro". Forschung bedarf der Perspektive, Forschung benötigt aber auch die Rückkopplung zur Praxis - insbesondere im Bereich der Produktionstechnik und der Arbeitswissenschaft.

Für eine Industriegesellschaft hat die Produktionstechnik eine Schlüsselstellung. Mechanisierung und Automatisierung haben es uns in den letzten Jahren erlaubt, die Produktivität unserer Wirtschaft ständig zu verbessern. In der Vergangenheit stand dabei die Leistungssteigerung einzelner Maschinen und Verfahren im Vordergrund. Heute wissen wir, daß wir das Zusammenspiel der verschiedenen Unternehmensbereiche stärker beachten müssen. In der Fertigung selbst konzipieren wir flexible Fertigungssysteme, die viele verkettete Einzelmaschinen beinhalten. Dort, wo es Produkt und Produktionsprogramm zulassen, denken wir intensiv über die Verknüpfung von Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Fertigung und Qualitätskontrolle nach. Rechnerunterstützte Informationssysteme helfen dabei und sollen zum CIM (Computer Integrated Manufacturing) führen und CAD (Computer Aided Design) und CAM (Computer Aided Manufacturing) vereinen. Auch die Büroarbeit wird neu durchdacht und mit Hilfe vernetzter Computersysteme teilweise automatisiert und mit den anderen Unternehmensfunktionen verbunden. Information ist zu einem Produktionsfaktor geworden, und die Art und Weise, wie man damit umgeht, wird mit über den Unternehmenserfolg entscheiden.

Der Erfolg in unseren Unternehmen hängt auch in der Zukunft entscheidend von den dort arbeitenden Menschen ab. Rationalisierung und Automatisierung müssen deshalb im Zusammenhang mit Fragen der Arbeitsgestaltung betrieben werden, unter Berücksichtigung der Bedürfnisse der Mitarbeiter und unter Beachtung der erforderlichen Qualifikationen. Investitionen in Maschinen und Anlagen müssen deshalb in der Produktion wie im Büro durch Investitionen in die Qualifikation der Mitarbeiter begleitet werden. Bereits im Planungsstadium müssen Technik, Organisation und Soziales integrativ betrachtet und mit gleichrangigen Gestaltungszielen belegt werden.

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.

Beispielhaft sei hier an den großen Bereich der Informationsverarbeitung im Betrieb erinnert, der von der Angebotserstellung über Konstruktion und Arbeitsvorbereitung, bis hin zur Fertigungssteuerung und Qualitätskontrolle reicht. Beim Materialfluß geht es um die richtige Aus-

wahl und den Einsatz von Fördermitteln sowie Anordnung und Ausstattung von Lagern. Große Aufmerksamkeit wird in nächster Zukunft auch der weiteren Automatisierung der Handhabung von Werkstücken und Werkzeugen sowie der Montage von Produkten geschenkt werden.

Von der Forschung muß in diesem Zusammenhang ein Beitrag zum Einsatz fortschrittlicher intelligenter Computersysteme erfolgen. Planungsprozesse müssen durch Softwaresysteme unterstützt und Arbeitsbedingungen wissenschaftlich analysiert und neu gestaltet werden.

Die von den Herausgebern geleiteten Institute, das

- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart (IFF),
- 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:

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung "Computergestützte Ingenieursysteme" am Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO) in Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. H.-J. Bullinger, Leiter des Instituts für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT) der Universität Stuttgart und des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), danke ich für seine wohlwollende Unterstützung und großzügige Förderung der Arbeit.

Mein Dank gilt ferner Herrn Prof. Dr.-Ing. W. O. Schiehlen, Direktor des Instituts B für Mechanik der Universität Stuttgart für die eingehende Durchsicht der Arbeit und die sich daraus ergebenden Hinweise.

Allen Mitarbeitern des Instituts, die mir durch kritische Anregungen und die stete Diskussionsbereitschaft bei der Erarbeitung dieser Dissertation sehr geholfen haben, danke ich ebenfalls. Dieser Dank gilt insbesondere den Herren Dr.-Ing. K. Lay, Dipl.-Ing. T. Fischer, Dipl.-Inform. D. Proß, B. Wolfer und U. Eigenmann sowie Frau W. Grünbauer für die Übernahme der umfangreichen Schreib- und Korrekturarbeiten.

Stuttgart, April 1992

Raimund Menges

Inhalt	Seite
0 Verzeichnis von Abkürzungen und verwendeten Größen	12
1 Einleitung	16
1.1 Begriffsdefinitionen	17
1.2 Ziel und Inhalt der Arbeit	19
1.3 Übersicht zum Stand der biomechanischen Modelle zur Bewegungssynthese	21
2 Das biomechanische Modell des Hand-Arm-Systems	30
2.1 Kinematische Modellierung des Hand-Arm-Systems	30
2.1.1 Das Hand-Arm-System als offene kinematische Kette	34
2.1.2 Idealisierungen im kinematischen Modell	37
2.1.2.1 Gelenkmodelle	39
2.1.2.2 Muskelmodelle	44
2.1.3 Das inverse kinematische Problem	47
2.2 Kinetische Modellierung des Hand-Arm-Systems	49
2.2.1 Koordinatensysteme der Körper und Gelenke	51
2.2.2 Relative und absolute Kinematik (Lage, Geschwindigkeit, Beschleunigung)	51
2.2.3 Bewegungsgleichungen	53
2.3 Geometrische Gestalt	55
2.3.1 Anthropometrische Daten	56
2.3.2 Automatische Generierung der Modellgeometrie	58
2.4 Graphische Darstellung des Modells und seiner Bewegungen	60
3 Synthese und Simulation von Bewegungen des Hand-Arm-Systems	63
3.1 Einfacher Lösungsansatz - Lokale Bewegungsstrategien	64
3.1.1 Minimale Quadratsumme der Winkelinkremente	69
3.1.2 Minimale Potentielle Energie	70
3.1.3 Einhaltung der Bewegungsraumgrenzen und Annäherungen	71
3.1.3.1 Freiheitsgrade mit ungekoppelten Bewegungsraumgrenzen	72
3.1.3.2 Freiheitsgrade mit gekoppelten Bewegungsraumgrenzen	76
3.2 Erweiterter Lösungsansatz - globale Bewegungsstrategien	78
3.3 Manuelle Steuerung von Hand-Arm-Bewegungen	82

4 Validierung des Simulationsmodells	86
4.1 Untersuchungsziel und Versuchsaufgabe	86
4.2 Versuchsaufbau	90
4.2.1 Bewegungsmeßeinrichtung VIOCN	90
4.2.2 Konstruktion und Funktionsprinzip des Experimentalaufbaus "Bewegungsmeßstand"	92
4.3 Versuchsdurchführung	97
4.4 Versuchsauswertung	103
4.4.1 Vergleich der Meßdaten mit synthetisierten Bewegungen des Modells und Ermittlung optimaler Parametersätze für das Simulationsmodell	103
4.4.2 Darstellung, Bewertung und statistische Betrachtung der Ergebnisse	104
4.4.3 Fehlerbetrachtung	126
5 Zusammenfassung und Ausblick	130
6 Literatur	134
Anhang	
A Homogene Koordinaten und Koordinatensysteme	148
B Gleichungen und Quellenangaben zur Dimensionierung des Gesamtmodells	153
C Gemessene Körpermaße des Probandenkollektivs	167
D Berechnung der Greifkugelpositionen am Experimentalaufbau	168
E Anbringen der Marker auf der Haut der Probanden und Ermittlung von Lage und Orientierung der Gelenke aus den gemessenen Markerpositionen	172
F Hard- und Softwarevoraussetzungen	185
G Matrixschaltungen zur Auswertung der Tastsensorsignale von den Greifkugel am Experimentalaufbau	187
H Aufbereitung der in den Experimenten gewonnenen Meßdaten	188

I	Ebenen und Richtungen im Raum im Bereich des Körpers	193
J	Hinweise bezüglich der Implementierung des entwickelten Programmsystems GRIBS (<u>G</u>raphisch <u>i</u>nteraktive <u>B</u>ewegungssynthese des Hand-Arm-Systems)	195

0 Verzeichnis von Abkürzungen und verwendeten Größen

Abkürzungen

AMASS	ADTECH Motion Analysis Software System
FG	Freiheitsgrad
IAO	Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
LED	Light Emitting Diod
LGS	Lineares Gleichungssystem
M	Marker (M1 = Marker 1, usw.)
MB	Megabyte
VMS	Virtual Memory System

Verwendete Größen

Große Lateinische Buchstaben

$\underline{0}, \underline{Q}$ oder \underline{O}	Nullvektor, Nullmatrix
$\underline{A}, \underline{A}^*$	Jacobi-Matrix, linearisierte Abbildungsfunktion des linearen Vektorraumes von $\underline{\phi}$ auf den linearen Vektorraum von \underline{x} , bzw. erweiterte Jacobi-Matrix
ΔAS	Abstand zwischen dem Akromium und dem Mittelpunkt des Schultergelenks
AL	Armlänge der Probanden
B_{EB}	Ellenbogenbreite
\underline{B}_m	Gemessene Position des Brustbeins
DUDV	Dicke des Unterarms am Handgelenk (dorsal - volar)
\underline{E}	Einheitsmatrix
\underline{E}	Position des Ellenbogengelenks
$F(\phi_{oi})$	Funktion der Veränderlichen ϕ_{oi}
\underline{F}_i	Vektor der eingprägten Kräfte am Körperglied i
G	Stark nichtlineare Abbildungsfunktion
$G(\phi_{oi}), G^*(\phi_{oi})$	Funktionen der Veränderlichen ϕ_{oi}
\underline{H}	Position des Handgelenks
$j^T \underline{T}_j$	Transformation vom Koordinatensystem j in das System j'
L_{OA}	Oberarmlänge
L_{SB}	Schlüsselbeinlänge

L_{UA}	Unterarmlänge
\underline{M}	Verallgemeinerte Massenmatrix
\underline{M}_i	Gemessene Position des Markers i ($i = 1 - 10$)
P	Wert eines Kostenfunktional (Zielfunktion)
P_{AL}	Aus der Armlänge berechnetes Perzentil
\underline{Q}	Vektor der verallgemeinerten eingepprägten Kräfte
\underline{R}	Rotationsmatrix
\underline{S}	Position des Schultergelenks
SB	Schulterbreite
SHT	Schulterhöhe über der Tischkante
SK_{AL}	Faktor zur Skalierung der Armlänge
\underline{T}	Abbildungsfunktion (Transformationsmatrix)
\underline{T}_i	Transformation vom lokalen körperfesten Koordinatensystem i in das Inertialsystem I
\underline{T}_i	Vektor der eingepprägten Momente am Körperglied i
$i\underline{T}_j$	Transformation vom Koordinatensystem j in das System i
$\underline{V}_S, \underline{V}_B$	Verschiebungsvektoren
$\underline{W}, \underline{W}^*$	Positiv definite quadratische Matrizen zur Gewichtung der einzelnen Freiheitsgrade innerhalb der Zielfunktionen
\underline{Z}	Vektor der quadratisch approximierten Vertikalkoordinaten der Schwerpunkte der Körperglieder

Kleine lateinische Buchstaben

a_i	Vorfaktor zur Gewichtung einzelner Zielfunktionen gegeneinander
a_i, b_i	Halbachsen der Ellipse, die den zulässigen Bewegungsbereich am Gelenk i beschreibt (zwei Freiheitsgrade mit gekoppelten Bewegungsraumgrenzen)
\underline{b}	Vektor der verallgemeinerten Kreiselkräfte
d	Abstand der Schulter von der Tischkante
$d_{j,k'}, c_{j,k'}, s_{j,k'}$	Komponenten des Verschiebungsvektors $\underline{j}_{r,j,k'}$
\underline{e}_i	Einheitsvektor in Längsrichtung des i -ten Körpergliedes
g	Erdbeschleunigung
\underline{q}	Lagevektor des Oberarms
\underline{p}_i	Ortsvektor im Koordinatensystem i
\underline{p}_j	Ortsvektor im Koordinatensystem j

\underline{q}	Verallgemeinerte Koordinaten (Vektor der aktuellen Werte der Winkel in den Freiheitsgraden des Hand-Arm-Systems)
r_j	j-te Halbachse eines Ellipsoids im linearen Vektorraum der $\underline{\phi}$
$\underline{r}_{j,k'}$	Verschiebungsvektor zwischen zwei benachbarten Drehgelenken
m_i	Masse von Körperglied i
\underline{s}	Lagevektor des Schlüsselbeins
\underline{s}_i	Position des Schwerpunktes vom Körperglied i
$\underline{\dot{s}}_i(\dot{\phi})$	Pseudo-Geschwindigkeit (Geschwindigkeit des Körpergliedes i, wenn am Gelenk j "Einheitsgeschwindigkeit" vorliegt, alle anderen Freiheitsgrade aber in Ruhe sind)
$\underline{\ddot{s}}_{j,k'}$	Relative Beschleunigung des Koordinatensystems k' bezüglich dem System j, ausgedrückt im System j'
$\underline{\dot{s}}_{j,k'}$	Relative Geschwindigkeit des Koordinatensystems k' bezüglich dem System j, ausgedrückt im System j'
\underline{u}	Lagevektor des Unterarms
\underline{v}	Verschiebungsvektor
$\underline{w}, \underline{w}^*$	Vektoren zur Gewichtung der Freiheitsgrade innerhalb der Zielfunktionen
\underline{x}	Vektor der bei der Optimierung abhängigen Größen

Griechische Buchstaben

$\alpha_{j,k'}$	Verschränkungswinkel zwischen zwei benachbarten Gelenkachsen z_j und $z_{k'}$
$\Delta\phi$	Vektor der Änderungen der Gelenkwinkel an den Freiheitsgraden
$\Delta\underline{x}$	Vektor der Änderungen der bei der Optimierung abhängigen Größen
$\Delta\underline{v}$	Zusammengesetzter Vektor aus $\Delta\phi$ und $\Delta\underline{x}$
$\delta\underline{s}_i, \delta\phi_i$	Virtuelle Verschiebungen des Schwerpunktes bzw. eines Gelenkwinkels von Körperglied i
$\underline{\theta}_{s_i}$	Trägheitstensor von Körperglied i, bezogen auf den Schwerpunkt
$\underline{\lambda}$	Vektor der Lagrange-Multiplikatoren
φ_j	Drehwinkel eines Drehgelenks
$\underline{\phi}$	Vektor aller Gelenkwinkel
ϕ_i	Gelenkwinkel eines Freiheitsgrades
$\phi_{i,x}, \phi_{i,y}, \phi_{i,z}$	Gelenkwinkel eines Freiheitsgrades, um die x-, y- bzw. z-Achse eines lokalen körperfesten Koordinatensystems drehend

$\tilde{\omega}_i^{(j)}$

Pseudo-Winkelgeschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit des Körpergliedes i, wenn am Gelenk j "Einheitswinkelgeschwindigkeit" vorliegt, alle anderen Freiheitsgrade aber in Ruhe sind)

${}^j\omega_{j',j}$

relative Winkelgeschwindigkeit des Koordinatensystems j bezüglich dem System j', ausgedrückt im System j'

${}^j\dot{\omega}_{j',j}$

relative Winkelbeschleunigung

∇

Nabla-Operator