

ISW 53

Berichte aus dem Institut für Steuerungstechnik
der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen
der Universität Stuttgart

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. G. Stute †

M. KEPPELER

Führungsgrößenerzeugung für numerisch bahngesteuerte Industrieroboter



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1984

D 93

Mit 63 Abbildungen

ISBN 978-3-540-13774-0 ISBN 978-3-662-07317-9 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-07317-9

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Weg und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Die Vergütungsansprüche des § 54, Abs. 2 UrhG werden durch die „Verwertungsgesellschaft Wort“, München, wahrgenommen.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1984

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo 1984

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 frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Geleitwort des Herausgebers

Das Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen der Universität Stuttgart befaßt sich mit den neuen Entwicklungen der Werkzeugmaschinen und anderen Fertigungseinrichtungen, die insbesondere durch den erhöhten Anteil der Steuerungstechnik an den Gesamtanlagen gekennzeichnet sind. Dabei stehen die numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen in Programmierung, Steuerung, Konstruktion und Arbeitseinsatz sowie die vermehrte Verwendung des Digitalrechners in Konstruktion und Fertigung im Vordergrund des Interesses.

Im Rahmen dieser Buchreihe sollen in zwangloser Folge drei bis fünf Berichte pro Jahr erscheinen, in welchen über einzelne Forschungsarbeiten berichtet wird. Vorzugsweise kommen hierbei Forschungsergebnisse, Dissertationen, Vorlesungsmanuskripte und Seminararbeiten zur Veröffentlichung.

Diese Berichte sollen dem in der Praxis stehenden Ingenieur zur Weiterbildung dienen und helfen, Aufgaben auf diesem Gebiet der Steuerungstechnik zu lösen. Der Studierende kann mit diesen Berichten sein Wissen vertiefen.

Unter dem Gesichtspunkt einer schnellen und kostengünstigen Drucklegung wird auf besondere Ausstattung verzichtet und die Buchreihe im Fotodruck hergestellt.

Der Herausgeber dankt dem Springer-Verlag für Hinweise zur äußeren Gestaltung und Übernahme des Buchvertriebs.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Stute, dem viel zu früh verstorbenen Leiter des Instituts, bin ich für seine großzügige Unterstützung und die wertvollen Anregungen, die zum Entstehen dieser Arbeit beitrugen, zu besonderem Dank verpflichtet.

Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Storr danke ich für seine kritischen Anmerkungen zu Form und Inhalt der Arbeit und die sich daraus ergebenden Hinweise.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-J. Warnecke für die eingehende Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich all denen danken, die durch wertvolle Diskussionen und anregende Kritik zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere den Herren Dr.-Ing. H. Erne, Dipl.-Ing. G. Gruhler, Dipl.-Ing. W. Ruoff und Dipl.-Ing. K.-H. Wurst.

Manfred Keppeler

	INHALT	Seite
	Formelzeichen und Abkürzungen	8
1	<u>Einführung und Aufgabenstellung</u>	12
2	<u>Beschreibung von Bewegungsabläufen in raumfesten oder werkstückbezogenen kartesischen Koordinatensystemen</u>	15
2.1	Definition der Werkzeugorientierung	17
2.2	Interpolation	22
2.2.1	Linearinterpolation	22
2.2.2	Fahren von Kreisbahnen als Sonderfall der Linearinterpolation	25
2.2.3	Zirkularinterpolation	27
2.3	Erzeugung komplexer Bewegungsbahnen durch automatische Wahl der Interpolationsart Linear- bzw. Zirkularinterpolation	33
2.3.1	Stützpunktauswahl bei der Linearinterpolation	34
2.3.2	Stützpunktauswahl bei der Zirkularinterpolation	36
2.3.3	Kriterium für die Wahl der Interpolationsart	39
2.4	Erzeugung komplexer Bewegungsbahnen durch Interpolationsverfahren mit Hilfe kubischer Splines	40
2.4.1	Interpolation mit natürlichen Splinefunktionen	40
2.4.2	Dynamische Splineinterpolation	45
2.4.3	Dynamische Splineinterpolation mit vorausschauender Koeffizientenberechnung	48
2.5	Beschleunigungsgesteuerte Führungsgrößenzeugung	50
3	<u>Bahnabweichungen</u>	54
3.1	Dynamische Bahnabweichungen	54
3.2	Bahnabweichungen aufgrund der Lageregelabweichung	55
3.3	Kinematische Bahnabweichungen	57
4	<u>Koordinatentransformation</u>	62
4.1	Ermittlung der Transformationsgleichungen	64
4.1.1	Herleitung der Transformationsgleichungen für einen fünfachsigigen Industrieroboter	65

4.2	Berechnung der mathematischen Grundfunktionen	69
4.2.1	Berechnung trigonometrischer Funktionen über Tabellen	69
4.3	Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme	72
4.3.1	Iterationsverfahren zur Lösung nichtlinearer Gleichungssysteme	72
4.3.2	Die Newtonsche Methode und ihre Varianten	73
4.3.3	Verallgemeinerte lineare Methoden	74
4.3.4	Minimierungsmethoden	75
4.3.5	Untersuchung der Iterationsverfahren	76
4.3.6	Singularität der Jacobischen Matrix	77
4.3.7	Anwendung von Iterationsverfahren zur Lösung der Transformationsgleichungen eines fünffachigen Handhabungssystems	78
4.4	Darstellung der Rückwärtstransformation über die geschlossene Lösung	82
4.5	Kinematisch überbestimmte Systeme	84
4.6	Führungsgrößenvorgabe beim Erkennen von Unstetigkeitsstellen im Verlauf der Lageführungsgrößen	85
4.7	Zusammenfassung der Teilergebnisse und daraus abgeleitete Folgerungen	86
5	<u>Erstellung der Bewegungsprogramme</u>	88
5.1	Variation der Bezugskoordinatensysteme	89
5.1.1	Raumfeste Koordinaten	90
5.1.2	Werkstückkoordinaten	91
5.1.3	Greifer- oder Werkzeugkoordinaten	92
5.1.4	Achskordinaten	95
5.2	Änderung der Werkzeugparameter	95
5.3	Bandsynchronisation mit geometrischem Zusammenhang	96
6	<u>Optimierung der Führungsgrößenerzeugung bei der Realisierung einer Roboter-CNC</u>	99
6.1	Organisation der Führungsgrößenerzeugung	100
6.1.1	Wechsel zwischen Vorbereitungs- und Rekursionsphase	101

6.1.2	Verbesserung des Führungsgrößenverlaufs durch Multitaskverwaltung	104
6.1.3	Einfluß der Multitaskverwaltung auf die Koordinatentransformation	107
6.2	Reduzierung der Taktzeit durch ein Mehrprozessorsystem	108
6.2.1	Konzept und Realisierung einer Mehrprozessorlösung	109
6.3	Oberprüfung der durch die Führungsgrößenerzeugung erreichbaren Bahngenauigkeit und Bewertung der Ergebnisse	114
7	<u>Zusammenfassung und Ausblick</u>	119
	Schrifttum	122

Formelzeichen

a	Intervallgrenze, Konstante (allgemein), Polynomkoeffizient
<u>A</u>	Matrix
A*	transformiertes Koordinatensystem
a _f	Führungsbeschleunigung
a _B	Bahnbeschleunigung
b	Intervallgrenze, Konstante (allgemein), Polynomkoeffizient
c	Konstante (allgemein), Polynomkoeffizient
d	Konstante (allgemein), Polynomkoeffizient
<u>D</u>	Transformationsmatrix
d _{ik}	Abstand des Punktes i zur Geraden g _{ak} bzw. zum Kreis mit der Zählvariablen k
d _p	paralleler Bahnversatz
e	Konstante (allgemein), Polynomkoeffizient
<u>e</u> *	Basisvektor des Koordinatensystems A*
f	Konstante (allgemein), Polynomkoeffizient
F	Funktion
F _{kin}	kinematischer Fehler
g	Gerade
G	Funktion
h	Achskoordinate des Handhabungssystems, Stützpunkt Abstand
<u>I</u>	Einheitsmatrix
<u>J</u>	Jacobische Matrix
k	Skalierungsfaktor, Taktzahl, Zählvariable
K _v	Geschwindigkeitsverstärkung
l	Länge
<u>l</u>	Teilvektor
L	Lineare Funktion
M	Mittelpunkt
<u>n</u>	Normalenvektor
<u>n</u> ⁰	Einheitsvektor
<u>p</u>	Ortsvektor
P	Punkt
P _f	Fußpunkt

\underline{q}	Verschiebevektor
r	Radius, Raumkoordinate
\underline{r}	Richtungsvektor
\underline{r}_p	Ortsvektor
s	Weg
s^*	fiktiver Weg
\underline{s}	Ortsvektor
S	Splinefunktion
s_B	Beschleunigungsstrecke
Δs	Wegzunahme
t	Zeit
T	Abtastzeit
t_B	Beschleunigungszeit
T_S	Synchronisationszeitpunkt
u	Richtungswinkel des Werkzeugvektors
u_B	Bahngeschwindigkeit
u_{prog}	programmierte Bahngeschwindigkeit
u_s	Sollgeschwindigkeit (Stellgröße)
u_x	Vorschubgeschwindigkeit in x-Richtung
u_y	Vorschubgeschwindigkeit in y-Richtung
v	Richtungswinkel des Werkzeugvektors
v_A	Anstellwinkel des Werkzeugvektors an eine Kreisbahn
v_K	Winkel zwischen der x-Achse und der Geraden durch den Kreismittelpunkt und einen Kreispunkt bei einem in der x-y-Ebene liegenden Kreis
w	Richtungswinkel des Werkzeugvektors
\underline{w}	Werkzeugvektor
x	allgemeine kartesische Koordinate
Δx	Lageregelabweichung
y	allgemeine kartesische Koordinate
z	allgemeine kartesische Koordinate
α	Verdrehwinkel, Hilfsgröße
β	Verdrehwinkel, Hilfsgröße
δ	Winkelschritt
ϵ	Bahntoleranz
η	Hilfsgröße
λ	Parameter

μ	Eigenwert, Hilfsgröße
τ	Interpolationsparameter
$\Delta\tau$	Parameteränderung
φ	Drehwinkel
ω	Winkelgeschwindigkeit, Hilfsgröße

Mehrfach benutzte Indizes

a	Anfangs-
e	End-
G	Greifer-
i	Istwert, Zählvariable $i=1,2,\dots$
k	Zählvariable $k=1,2,\dots$
M	Mittelpunkt-
m	Parabelscheitelpunkt-
n	Zählvariable $n=1,2,\dots$
P	Projektion
R	Raum-
Rk	Richtungskosinus
s	Sollwert
T	Transportsystem-
W	Werkstück-
x	in x-Richtung
y	in y-Richtung
z	in z-Richtung

Abkürzungen

B-Achse	Drehachse des Roboters parallel zur y-Koordinate
C-Achse	Drehachse des Roboters parallel zur z-Koordinate
CAD	<u>C</u> omputer <u>a</u> ided <u>d</u> esign
CNC	<u>C</u> omputerized <u>n</u> umerical <u>c</u> ontrol
D-Achse	Handachse des Roboters parallel zur x-Koordinate (Rollachse)
2D-	zweidimensional

3D-	dreidimensional
H	Hilfsebene
H-Achse	Handachse des Roboters parallel zur y-Koordinate (Nickachse)
HHS	Handhabungssystem
NC	<u>N</u> umerical <u>c</u> ontrol
P-Achse	Handachse des Roboters parallel zur z-Koordinate (Gierachse)
R-Achse	Radialachse des Roboters im Zylinderkoordinaten- system
S	Durchstoßpunkt
WZM	Werkzeugmaschine
Z-Achse	Vertikalachse des Roboters