

CO=hS~  
c^zi^.cn-  
fcZ-3

# Industrieroboter und Handhabungsgeräte

Aufbau, Einsatz, Dynamik,  
Modellbildung und Regelung

von

Prof. Dr. Kurt Desoyer  
Doz. Dr. Peter Kopacek  
Prof. Dr. Inge Troch,  
Technische Universität Wien

Mit 159 Abbildungen und 10 Tabellen

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1985

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Einleitung	11
<b>1. Grundlagen</b>	<b>13</b>
1.1 <i>Einteilung von Handhabungsgeräten</i>	13
1.2 <i>Aufbau von Handhabungsgeräten</i>	16
1.2.1 Greiferführungsgetriebe	16
1.2.2 Greifer	19
1.2.3 Antriebe	21
1.2.4 Steuerungen	23
1.2.5 Wegmeßsysteme	30
1.2.6 Erkennungssysteme (Sensoren)	31
1.3 <i>Einsatz und Einsatzbeispiele</i>	35
1.3.1 Industrieroboter-Einsatz beim Punktschweißen	39
1.3.2 Lichtbogenschweißen mit Industrierobotern	46
1.3.3 Industrieroboter-Einsatz beim Verformen	50
1.3.4 Industrieroboter-Einsatz für Handlungsaufgaben	51
1.3.5 Industrieroboter-Einsatz für Beschichtungsaufgaben	54
1.3.6 Industrieroboter in der Montage	55
1.4 <i>Zusammenfassung</i>	57
<b>2. Geometrie, Kinematik und Kinetik von Industrierobotern</b>	<b>59</b>
2.1 <i>Einleitung und Betrachtungen an einem kartesischen Greiferführungsgetriebe</i>	59
2.2 <i>Geradlinige Bewegungen</i>	63
2.3 <i>Vorbemerkungen zur Umkehr der geometrischen Zusammenhänge</i>	65
2.4 <i>Greiferführungsgetriebe des Typs D-S<sup>n</sup>-S<sup>m</sup> mit Exzentrizität</i>	67
2.4.1 Geometrische Zusammenhänge	67
2.4.2 Kinematische Zusammenhänge	70
2.4.3 Kinetik des D-S <sup>n</sup> -S <sup>m</sup> -Typs, Herleitung der Drivegleichungen	72
2.4.4 Beispiel einer Energiespar-Überlegung	75
2.4.5 Zusammenfassung der Drivegleichungen	76
2.5 <i>Greiferführungsgetriebe des Typs D-D<sup>n</sup>-D<sup>m</sup> mit Exzentrizitäten</i>	78
2.5.1 Geometrische Zusammenhänge	80
2.5.2 Zahlenbeispiel zum Abschnitt 2.5.1	84

## Inhaltsverzeichnis

2.5.3	Anschluß eines Greifers der Bauart $D_q-D^\wedge-Dj_\perp$ . . . . .	86
2.5.3.1	Berechnung der Winkel $\wedge$ bis $\text{isip}_5$ . . . . .	87
2.5.3.2	Zahlenbeispiel zum Abschnitt 2.5.3.1. . . . .	92
2.5.3.3	Bewegung eines auf der Greiferlängsachse festen Punktes auf einer vorgegebenen Bahnkurve. . . . .	94
2.5.3.4	Der Sonderfall $C_5 = 0$ . . . . .	98
2.5.3.5	Berechnung des Drehwinkels $\sphericalangle_6$ . . . . .	99
2.5.4	Anschluß eines Greifers der Bauart $Dj-D^\wedge-D^\wedge$ . . . . .	101
2.5.4.1	Berechnung der Winkel $\wedge$ bis $\sphericalangle_5$ . . . . .	101
2.5.4.2	Der Spezialfall $S_5 = 0$ . . . . .	106
2.5.4.3	Berechnung des Winkels $\sphericalangle_6$ . . . . .	106
2.6	<i>Compu tergerech te rekursive Berechnung der Gesch windigkeiten und Beschleunigungen gliedfester Punkte.</i> . . . . .	107
2.6.1	Grundlagen. . . . .	107
2.6.2	Herleitung der Rekursionsformeln für die kinematischen Größen . . . . .	109
2.6.3	Zusammenstellung computergerechter Rekursionsformeln für die Berechnung der kinematischen Größen. . . . .	111
2.7	<i>Anwendung der Gleichungen des Abschnittes 2.6.3 auf den DDD-Greiferführungsmechanismus nach Abb. 2.6.1.</i> . . . . .	114
2.7.1	Zusammenstellung der Drehmatrizen. . . . .	114
2.7.2	Berechnung der kinematischen Größen. . . . .	115
2.8	<i>Herleitung der Bewegungsgleichungen mehrgliedriger Robotermechanismen.</i> . . . . .	118
2.8.1	Vorbemerkungen. . . . .	118
2.8.2	Rekursive Berechnung der Kräfte und Momente in den Gelenken, Herleitung des Gleichungssystems. . . . .	119
2.8.3	Zusammenstellung der Rekursionsformeln für die Berechnung der Kräfte und Momente in den Gelenken. . . . .	124
2.8.4	Ermittlung der Drives. . . . .	127
2.8.5	Berechnung der Motormomente. . . . .	128
2.9	<i>Anwendung der Gleichungen des Abschnittes 2.8 zur Herleitung der Bewegungsgleichungen für das DDD-Greiferführungsgetriebe nach Abb. 2.5.1.</i> . . . . .	129
2.10	<i>Greiferführungsgetriebe der Typen <math>D-D^\wedge-S^\wedge S-D\backslash\backslash SL</math> und <math>S-D^\wedge-Si</math> mit Exzentrizitäten.</i> . . . . .	144
2.10.1	Geometrische Zusammenhänge und deren Umkehr. . . . .	145
2.10.2	Anschluß eines Greifers der Bauart $D_q-Dx-Dx$ . . . . .	148
2.10.3	Anschluß eines Greifers der Bauart $D_rDi-Dj^\wedge$ . . . . .	152
2.10.4	Kinematik des $S-Dj^\wedge-Dj^\wedge-S^\wedge$ -Greiferführungsgetriebes mit Exzentrizitäten. . . . .	156
2.10.5	Kinetik des $S-D^\wedge-D^\wedge-S^\wedge$ -Greiferführungsgetriebes mit Exzentrizitäten. . . . .	158
2.10.6	Zusammenstellung der hergeleiteten Drivegleichungen. . . . .	166
2.10.6.1	$D-D^\wedge-S^\wedge$ -Greiferführungsgetriebe. . . . .	166
2.10.6.2	$S-Du-Sx$ -Greiferführungsgetriebe. . . . .	170

2.11	<i>Greiferführungsgetriebe des Typs S-D\ -D\  mit Exzentrizitäten . . .</i>	173
2.11.1	Geometrische Zusammenhänge und deren Umkehr. . . . .	173
2.11.2	Kinematische Größen. . . . .	174
2.11.3	Kinetik. . . . .	174
2.11.4	Einfluß einer Belastung in expliziter Darstellung. . . . .	175
<b>3.</b>	<b>Modellerstellung. . . . .</b>	<b>177</b>
3.1	<i>Modelle von Greiferführungsgetrieben. . . . .</i>	179
3.1.1	Externe Modelle des Typs DSS. . . . .	179
3.1.1.1	Nichtlineare Modelle. . . . .	179
3.1.1.2	Lineare Modelle. . . . .	182
3.1.2	Interne Modelle für das Greiferführungsgetriebe DSS. . . . .	186
3.1.3	Modelle gebräuchlicher Greiferführungsgetriebe. . . . .	191
3.2	<i>Modelle für Antriebe. . . . .</i>	194
3.2.1	Elektrische Antriebe. . . . .	194
3.2.2	Pneumatische Antriebe. . . . .	198
3.2.3	Hydraulische Antriebe. . . . .	201
3.3	<i>Getriebe. . . . .</i>	202
3.4	<i>Modelle des Gesamtsystems. . . . .</i>	204
3.4.1	Allgemeines. . . . .	204
3.4.2	Beispiel: Elektromotorisch angetriebener DSS-Roboter. . . . .	204
3.4.3	Vereinfachte Modelle. . . . .	210
3.5	<i>Zusammenfassung. . . . .</i>	211
<b>4.</b>	<b>Steuerung und Regelung von Industrierobotern. . . . .</b>	<b>213</b>
4.1	<i>Einleitung und Übersicht. . . . .</i>	213
4.2	<i>Regelung und Steuerung der Einzelachsen. . . . .</i>	220
4.2.1	Punkt-zu-Punkt-Bewegungen. . . . .	220
4.2.1.1	Unkoordinierte Punkt-zu-Punkt-Bewegungen. . . . .	220
4.2.1.2	Regelung einer einzelnen Roboterachse. . . . .	221
4.2.1.3	Regelung mehrerer Achsen. . . . .	228
4.2.1.4	Ergänzende Bemerkungen. . . . .	236
4.2.1.5	Koordinierte Punkt-zu-Punkt-Bewegungen — Allgemeines. . . . .	238
4.2.1.6	Koordinierte zeitoptimale Punkt-zu-Punkt-Bewegungen. . . . .	238
4.2.1.7	Koordinierte Punkt-zu-Punkt-Bewegung für Abtastregler. . . . .	241
4.2.2	Bahnsteuerung. . . . .	243
4.2.2.1	Einleitung. . . . .	243
4.2.2.2	Methoden der Bahnsteuerung. . . . .	246
4.2.2.3	Feedforward-Kompensation der Nichtlinearitäten. . . . .	247
4.2.2.4	Nichtlineare Entkopplung. . . . .	252
4.2.2.5	Lineare Zustandsrückführung. . . . .	259
4.2.2.6	Steuerung mit unterlagerter Regelung. . . . .	261
4.2.3	Steuerung in Umweltkoordinaten. . . . .	266
4.2.3.1	Allgemeines. . . . .	266
4.2.3.2	Positionssteuerung (RMPC). . . . .	269
4.2.3.3	Geschwindigkeitssteuerung (RMRC). . . . .	270

## Inhaltsverzeichnis

4.23.4	Durchführung der Steuerung in Umweltkoordinaten . . . . .	281
4.2.3.5	Bahnsteuerung in Umweltkoordinaten ohne Zeitparametrisierung .	283
4.2.3.6	Kraftregelung . . . . .	284
4.23.7	Nichtlineare Entkopplung in Umweltkoordinaten . . . . .	286
4.23.8	Zur Berechnung von Nominalsteuerung bzw. Entkopplung . . . . .	287
4.2.4	Adaptive Regelung der Achsen . . . . .	293
4.2.5	Sliding Mode-Steuerung . . . . .	300
4.2.6	Optimale Steuerung . . . . .	303
43	<i>Bahnberechnung</i> . . . . .	305
43.1	Einleitung . . . . .	305
43.2	Geradlinige Verbindung zweier Punkte . . . . .	307
43.3	Verbindung von drei Punkten durch einen Kreis-, Parabel- oder Hyperbelbogen - Realisierbarkeitsfragen . . . . .	310
4.3.4	Zeitparametrisierung der Bewegungsbahn . . . . .	311
4.3.4.1	Bewegung entlang einer zwischen zwei Punkten vorgegebenen Bahn . . . . .	311
4.3.4.2	Bewegungsbahn mit stetiger Geschwindigkeit . . . . .	312
4.3.4.3	Bahnsteuerung ohne Anhalten mit stetigen Beschleunigungen . . .	316
4.3.4.4	Bahnberechnung mit Hilfe kubischer Polynome — Optimierung der Bahn . . . . .	321
4.3.4.5	Bahnerzeugung in Umweltkoordinaten (Cartesian Motion). . . . .	325
43.4.6	Bahnen für das Arbeiten an bewegten Objekten . . . . .	328
43.4.7	Optimale Parametrisierung der Bewegungsbahn . . . . .	329
43.5	Roboter mit redundanten Freiheitsgraden . . . . .	330
4.3.5.1	Allgemeins . . . . .	330
4.3.5.2	Bahnberechnung für Roboter mit redundanten Freiheitsgraden . .	332
43.6	Dokumentation kontinuierlicher Bahnen . . . . .	334
43.6.1	Approximation durch einen Polygonzug . . . . .	335
43.6.2	Approximation einer beliebigen Bewegungsbahn durch kubische Splines . . . . .	337
43.6.3	Darstellung der Bahn mit Hilfe von Bahngrundelementen . . . . .	338
4.4	<i>Bemerkungen zur Programmierung</i> . . . . .	339
<b>5.</b>	<b>Entwicklungstendenzen und Ausblick</b> . . . . .	<b>344</b>
5.1	<i>Robotermechanik</i> . . . . .	345
5.2	<i>Regelung</i> . . . . .	347
5.3	<i>Sensoren</i> . . . . .	348
5.4	<i>Werkstückerkennung</i> . . . . .	349
5.5	<i>Antikollisionsprobleme</i> . . . . .	350
5.6	<i>Nicht ortsfeste Roboter</i> . . . . .	351
5.7	<i>Programmierung</i> . . . . .	352
Anhang A: Grundlagen der Mechanik . . . . .		353
Anhang B1: Grundlagen der Regelungstechnik . . . . .		361
Anhang B2: Pseudoinverse (Moore-Penrose-Inverse) einer Matrix . . . . .		378
Literaturverzeichnis . . . . .		381
Stichwortverzeichnis . . . . .		390