

Inhalt

Vorwort zur 1. Auflage	IX
Vorwort zur 5. Auflage	XIII
1 Komponenten eines Industrieroboters	1
1.1 Definition und Einsatzgebiete von Industrierobotern	1
1.2 Mechanischer Aufbau	3
1.3 Steuerung und Programmierung	7
1.4 Struktur und Aufgaben der Regelung	9
1.5 Neuere Einsatzfelder und Konzepte der Industrierobotik	13
2 Beschreibung einer Roboterstellung	17
2.1 Grundlagen der Lagebeschreibung	17
2.1.1 Koordinatensysteme	17
2.1.2 Freie Vektoren	17
2.1.3 Operationen mit Vektoren	19
2.1.4 Ortsvektoren	21
2.1.5 Anordnung von Elementen in Vektoren und Matrizen	22
2.1.6 Rotationsmatrizen	22
2.1.7 Homogene Matrizen (Frames)	25
2.1.8 Beschreibung der Orientierung durch Euler-Winkel	27
2.1.9 Roll-Pitch-Yaw-Winkel	31
2.1.10 Beschreibung der Orientierung durch Drehvektor und Drehwinkel	32
2.1.11 Freiheitsgrad des Robotereffektors	35
2.1.12 Differenzieren von Vektoren in bewegten Koordinatensystemen	36
2.2 Die Denavit-Hartenberg-Konvention für Industrieroboter	38
2.2.1 Der Industrieroboter mit offener kinematischer Kette	38
2.2.2 Koordinatensysteme und kinematische Parameter nach der Denavit-Hartenberg-Konvention	39
2.2.3 Rotationsmatrizen und homogene Matrizen auf Basis der Denavit-Hartenberg-Parameter	45
2.3 Übungsaufgaben	47

3	Transformationen zwischen Roboter- und Weltkoordinaten ...	49
3.1	Die Vorwärtstransformation	50
3.2	Die Rückwärtstransformation	51
3.2.1	Mehrdeutigkeiten und Singularitäten	51
3.2.2	Lösungsvoraussetzungen und Lösungsansätze	52
3.2.3	Rückwärtstransformation an einem Zweigelenkroboter	52
3.2.4	Rückwärtstransformation an einem SCARA-Roboter	54
3.2.5	Geometrische Rückwärtstransformation für den R6-Knickarmroboter	56
3.3	Kinematische Transformationen mit der Jacobi-Matrix	62
3.3.1	Die Jacobi-Matrix in der Robotik	62
3.3.2	Rückwärtstransformation auf Basis der inversen Jacobi-Matrix	66
3.3.3	Rückwärtstransformation mit der transponierten Jacobi-Matrix	67
3.4	Übungsaufgaben	68
4	Bewegungsart und Interpolation	69
4.1	Übersicht zu den Steuerungsarten	69
4.2	PTP-Bahn und Interpolationsarten	71
4.2.1	Prinzipieller Ablauf der PTP-Steuerung	71
4.2.2	Rampenprofil zur Interpolation	73
4.2.3	Sinoidenprofil zur Interpolation	75
4.2.4	Anpassung an die Interpolationsschrittweite	77
4.2.5	Synchrone PTP	79
4.2.6	Vollsynchrone PTP	80
4.2.7	Beispiel für eine PTP-Bahn	81
4.3	Bahnsteuerung (CP-Steuerung)	83
4.3.1	Prinzipieller Ablauf der Bahnsteuerung	83
4.3.2	Linearinterpolation	84
4.3.3	Zirkularinterpolation	87
4.3.4	Beispiel für eine CP-Bahn	93
4.4	Durchfahren von Zwischenstellungen ohne Stillstand der Achsen	94
4.4.1	PTP-Überschleifen	94
4.4.2	CP-Überschleifen	96
4.4.3	Spline-Interpolation für PTP-Bahn	97
4.4.4	Spline-Interpolation in kartesischen Koordinaten	100
4.5	Übungsaufgaben	104
5	Roboterprogrammierung	107
5.1	Online-Roboterprogrammierung	108
5.1.1	Teach-In-Programmierung	108
5.1.2	Play-Back-Programmierung	110
5.1.3	Master-Slave-Programmierung	111
5.2	Offline-Programmierung	112
5.2.1	Textuelle Programmierung in einer problemorientierten Programmiersprache	113

5.2.2	Grafisch interaktive/CAD-basierte Programmierung	113
5.2.3	Aufgabenorientierte Programmierung	114
5.3	Roboterprogrammiersprachen	116
5.3.1	Sprachelemente von Roboterprogrammiersprachen	117
5.3.2	Programmbeispiel	119
5.4	Programmierunterstützung durch grafische Simulation	122
5.5	Vergleich der verschiedenen Programmierarten	124
5.6	Übungsaufgaben	125
6	Modell der Dynamik	127
6.1	Modell der Dynamik einer Gelenkachse	127
6.1.1	Modell der Mechanik eines Gelenks/Armteils	127
6.1.2	Modell des Antriebsmotors und der Servoelektronik	129
6.1.3	Modell des ideal angenommenen Antriebsstrangs eines Gelenks	131
6.1.4	Gesamtmodell einer Einzelachse bei ideal angenommenem Antriebsstrang	132
6.2	Modell der Mechanik eines Roboterarms mit dem rekursiven Newton-Euler-Verfahren	133
6.2.1	Kinematische Berechnungen	134
6.2.2	Rekursive Berechnung der Gelenkkräfte bzw. -drehmomente ...	138
6.2.3	Anfangswerte für die rekursiven Berechnungen	140
6.2.4	Geeignete Darstellung der Vektoren und Zusammenfassung ...	141
6.2.5	Einfache Beispiele zum Newton-Euler-Verfahren	143
6.2.6	Explizite Berechnung einzelner Komponenten der Bewegungsgleichung	147
6.3	Gesamtmodell der Regelstrecke	152
6.3.1	Modell der Antriebsmotoren und Servoelektronik aller Gelenke	152
6.3.2	Zusammenfassung der Modellgleichungen	154
6.4	Übungsaufgaben	155
7	Regelung	159
7.1	Aufgaben und prinzipielle Strukturen	159
7.2	Dezentrale Gelenkregelung in Kaskadenstruktur	163
7.2.1	Übersicht und Regelstrecke	163
7.2.2	Geschwindigkeitsregelung mit PI-Regler	165
7.2.3	ReDuS-Geschwindigkeitsregler	168
7.2.4	Entwurf des Lagereglers	171
7.2.5	Beispiel für eine dezentrale Lageregelung	177
7.2.6	Hinweise zur Realisierung	181
7.3	Adaptive Einzelgelenkregelungen	182
7.4	Modellbasierte Regelungskonzepte	185
7.4.1	Zentrale Vorsteuerung	186
7.4.2	Entkopplung und Linearisierung	188
7.4.3	Modellbasierte Regelung mit PID-Strukturen	191
7.4.4	Robuste Regelung durch vorgegebenes Verzögerungsverhalten	193

7.4.5	Modellbasierte Lageregelung mit Kaskadenstruktur	196
7.4.6	Hinweise zur Realisierung modellbasierter Gelenkregelungen ..	197
7.4.7	Modellbasierte Lageregelung in kartesischen Koordinaten	198
7.4.8	Beispiel für eine modellbasierte Regelung	200
7.5	Nichtanalytische Regelungsverfahren	202
7.5.1	Fuzzy-Regelungen	202
7.5.2	Neuronale Lernverfahren in der Gelenkregelung	204
7.6	Strukturen von Kraftregelungen	207
7.7	Bildgestützte Regelung	209
7.7.1	Strukturen von Visual Servoing	210
7.7.2	Bildverarbeitung	213
7.7.3	Kameramodell	214
7.7.4	Gelenkbewegungen aus Bildinformationen	216
7.7.5	Visual Servoing mit modellbasierter Gelenkregelung	219
7.8	Externe hybride Regelungskonzepte	220
7.9	Übungsaufgaben	221

Anhang 225

A	Einige Definitionen und Rechenregeln für Matrizen	225
B	Aufstellen der Jacobi-Matrix	229
B1	Beschreibung der Bewegung des Effektors in Abhängigkeit von den relativen Geschwindigkeiten der Armteile	229
B2	Berechnung durch Anwendung der kinematischen Gleichungen des Newton-Euler Verfahrens	231
C	Modellbildung und Simulation der statischen Reibung	233
C1	Statische Reibung bei einem Einzelgelenk	233
C2	Statische Reibung beim Roboterarm	235
D	ManDy: Programmier-, Simulations- und Visualisierungswerkzeug ...	237
E	Weitere Simulationswerkzeuge	240
E1	PTP- und CP-Interpolation für einen planaren Zweigelenkroboter	240
E2	Spline-Interpolation	241
E3	Newton-Euler-Verfahren für Zweigelenkroboter	241
E4	Simulation einer Eingelenkregelung	243

Hinweise zur Internetseite 244

Literatur 245

Formelzeichen 253

Index 257