

Inhalt

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	15
2.1	Grundlagen der Lagebeschreibung	15
2.1.1	Koordinatensysteme	15
2.1.2	Freie Vektoren	15
2.1.3	Operationen mit Vektoren	17
2.1.4	Ortsvektoren	19
2.1.5	Anordnung von Elementen in Vektoren und Matrizen	20
2.1.6	Rotationsmatrizen	20
2.1.7	Homogene Matrizen (Frames)	23
2.1.8	Beschreibung der Orientierung durch Euler-Winkel	25
2.1.9	Beschreibung der Orientierung durch Drehvektor und Drehwinkel	29
2.1.10	Freiheitsgrad des Robotereffektors	31
2.1.11	Differenzieren von Vektoren in bewegten Koordinatensystemen	32
2.2	Die Denavit-Hartenberg-Konvention für Industrieroboter	34
2.2.1	Der Industrieroboter mit offener kinematischer Kette	34
2.2.2	Koordinatensysteme und kinematische Parameter nach der Denavit-Hartenberg-Konvention	36
2.2.3	Rotationsmatrizen und homogene Matrizen auf Basis der Denavit-Hartenberg-Parameter	42
2.3	Übungsaufgaben	44
3	Transformationen zwischen Roboter- und Weltkoordinaten	45
3.1	Die Vorwärtstransformation	46
3.2	Die Rückwärtstransformation	47
3.2.1	Mehrdeutigkeiten und Singularitäten	47
3.2.2	Lösungsvoraussetzungen und Lösungsansätze	48
3.2.3	Rückwärtstransformation an einem Zweigelenkroboter	48

3.2.4	Geometrische Rückwärtstransformation für den R6-Knickarmroboter	52
3.3	Kinematische Transformationen mit der Jacobi-Matrix	57
3.3.1	Die Jacobi-Matrix in der Robotik	58
3.3.2	Rückwärtstransformation auf Basis der inversen Jacobi-Matrix	61
3.3.3	Rückwärtstransformation mit der transponierten Jacobi-Matrix	62
3.4	Übungsaufgaben	63
4	Bewegungsart und Interpolation	65
4.1	Übersicht zu den Steuerungsarten	65
4.2	PTP-Bahn und Interpolationsarten	67
4.2.1	Prinzipieller Ablauf der PTP-Steuerung	67
4.2.2	Rampenprofil zur Interpolation	69
4.2.3	Sinoidenprofil zur Interpolation	71
4.2.4	Anpassung an die Interpolationsschrittweite	73
4.2.5	Synchrone PTP	75
4.2.6	Vollsynchrone PTP	76
4.2.7	Beispiel für eine PTP-Bahn	77
4.3	Bahnsteuerung (CP-Steuerung)	79
4.3.1	Prinzipieller Ablauf der Bahnsteuerung	79
4.3.2	Linearinterpolation	80
4.3.3	Zirkularinterpolation	83
4.3.4	Beispiel für eine CP-Bahn	89
4.4	Durchfahren von Zwischenstellungen ohne Stillstand der Achsen	90
4.4.1	PTP-Überschleifen	90
4.4.2	CP-Überschleifen	92
4.4.3	Spline-Interpolation für PTP-Bahn	93
4.4.4	Spline-Interpolation in kartesischen Koordinaten	95
4.5	Übungsaufgaben	97
5	Roboterprogrammierung	101
5.1	Online-Roboterprogrammierung	102
5.1.1	Teach-In-Programmierung	102
5.1.2	Play-Back-Programmierung	104
5.1.3	Master-Slave-Programmierung	105
5.2	Offline-Programmierung	106
5.2.1	Textuelle Programmierung in einer problemorientierten Programmiersprache	107
5.2.2	Grafisch interaktive/CAD-basierte Programmierung	107
5.2.3	Aufgabenorientierte Programmierung	108
5.3	Roboterprogrammiersprachen	110
5.3.1	Sprachelemente von Roboterprogrammiersprachen	111
5.3.2	Programmbeispiel	113
5.4	Programmierunterstützung durch grafische Simulation	115
5.5	Vergleich der verschiedenen Programmierarten	117
5.6	Übungsaufgaben	118

6	Modell der Dynamik	119
6.1	Modell der Dynamik einer Gelenkachse	119
6.1.1	Modell der Mechanik eines Gelenks/Armteils	119
6.1.2	Modell des Antriebsmotors und der Servoelektronik	121
6.1.3	Modell des ideal angenommenen Antriebsstrangs eines Gelenks	123
6.1.4	Gesamtmodell einer Einzelachse bei ideal angenommenem Antriebsstrang	124
6.2	Modell der Mechanik eines Roboterarms mit dem rekursiven Newton-Euler-Verfahren	125
6.2.1	Kinematische Berechnungen	126
6.2.2	Rekursive Berechnung der Gelenkkräfte bzw. -drehmomente ...	130
6.2.3	Anfangswerte für die rekursiven Berechnungen	132
6.2.4	Geeignete Darstellung der Vektoren und Zusammenfassung ...	133
6.2.5	Einfache Beispiele zum Newton-Euler-Verfahren	134
6.2.6	Explizite Berechnung einzelner Komponenten der Bewegungsgleichung	139
6.3	Gesamtmodell der Regelstrecke	143
6.3.1	Modell der Antriebsmotoren und Servoelektronik aller Gelenke	144
6.3.2	Zusammenfassung der Modellgleichungen	146
6.4	Übungsaufgaben	147
7	Regelung	151
7.1	Aufgaben und prinzipielle Strukturen	151
7.2	Dezentrale Gelenkregelung in Kaskadenstruktur	155
7.2.1	Übersicht und Regelstrecke	155
7.2.2	Geschwindigkeitsregelung mit PI-Regler	157
7.2.3	ReDuS-Geschwindigkeitsregler	160
7.2.4	Entwurf des Lagereglers	163
7.2.5	Beispiel für eine dezentrale Lageregelung	168
7.2.6	Hinweise zur Realisierung	172
7.3	Adaptive Einzelgelenkregelungen	174
7.4	Modellbasierte Regelungskonzepte	177
7.4.1	Zentrale Vorsteuerung	177
7.4.2	Entkopplung und Linearisierung	179
7.4.3	Modellbasierte Regelung mit PID-Strukturen	182
7.4.4	Robuste Regelung durch vorgegebenes Verzögerungsverhalten	184
7.4.5	Modellbasierte Lageregelung mit Kaskadenstruktur	187
7.4.6	Hinweise zur Realisierung modellbasierter Gelenkregelungen ..	189
7.4.7	Modellbasierte Lageregelung in kartesischen Koordinaten	190
7.4.8	Beispiel für eine modellbasierte Regelung	192
7.5	Nichtanalytische Regelungsverfahren	194
7.5.1	Fuzzy-Regelungen	194
7.5.2	Neuronale Lernverfahren in der Gelenkregelung	196
7.6	Strukturen von Kraftregelungen	199
7.7	Übungsaufgaben	201

Anhang	203
A Einige Definitionen und Rechenregeln für Matrizen	203
B Aufstellen der Jacobi-Matrix	207
B1 Beschreibung der Bewegung des Effektors in Abhängigkeit von den relativen Geschwindigkeiten der Armteile	207
B2 Berechnung durch Anwendung der kinematischen Gleichungen des Newton-Euler Verfahrens	209
C Modellbildung und Simulation der statischen Reibung	211
C1 Statische Reibung bei einem Einzelgelenk	211
C2 Statische Reibung beim Roboterarm	213
D ManDy: Programmier-, Simulations- und Visualisierungswerkzeug ...	215
E Weitere Simulationswerkzeuge	218
E1 PTP- und CP-Interpolation für einen planaren Zweigenkroboter	218
E2 Spline-Interpolation mit zwei Bahnsegmenten	218
E3 Newton-Euler-Verfahren für Zweigenkroboter	219
E4 Simulation einer Eingelenkregelung	221
Hinweise zur Internetseite	222
Literatur	223
Formelzeichen	231
Index	235