

# Inhalt

1	Überblick.....	1
1.1	Grundlagen.....	1
1.2	Kleine Terminologie der Robotertechnik.....	2
1.2.1	Manipulator.....	2
1.2.2	Teleoperator.....	3
1.2.3	Industriemanipulatoren.....	3
1.3	Geometrie der Manipulatoren.....	3
1.3.1	Kartesische Geometrie.....	4
1.3.2	Zylindrische Geometrie.....	4
1.3.3	Sphärische Geometrie.....	6
1.3.4	Gelenkgeometrie.....	10
1.4.1	Begrenzter Arbeitsbereich: Mechanische Anschlagsteuerung ...	10
1.4.2	Servogesteuerte Roboter.....	11
1.4.3	Bahnsteuerung.....	12
1.5	Bausteine eines Robotersystems.....	13
1.5.1	Stellglied.....	13
1.6	Überblick.....	15
1.7	Zusammenfassung.....	17
1.8	Aufgaben.....	18
2	Erfassung von Lage und Geschwindigkeit.....	19
2.1	Digital/Analog-Umsetzer.....	20
2.2	Analog-Digital-Umsetzer.....	21
2.3	Analoge Positionsmessung.....	27
2.4	Digitale Messung von Position und Geschwindigkeit.....	27
2.4.1	Optische Winkelcodierer.....	29
2.5	Zähler.....	32
2.5.1	Decodierung des inkrementellen Codierers mit Hilfe einer sequentiellen Maschine.....	32
2.5.2	Decodierung des inkrementellen Codierers mit Hilfe von Synchronisierflipflops.....	34

2.5.2	Anordnungsbetrachtungen .....	38
2.6	Hardware zur Geschwindigkeitsmessung .....	38
2.7	Richtungsbestimmung .....	42
2.8	Schätzung der Ist-Geschwindigkeit aufgrund der Messung .....	42
2.9	Schlußfolgerung und eine alternative Anordnung .....	43
2.10	Zusammenfassung .....	44
2.11	Aufgaben .....	46
3	Störsignale in Digitalschaltungen .....	49
3.1	Störsignalquellen .....	50
3.2	Externe Störsignale und der Schmitt-Trigger .....	51
3.3	Übersprechen .....	62
3.4	Abschirmung zur Unterdrückung von externen Störsignalen .....	54
3.5	Erdung .....	56
3.6	Übertragungsleitungen .....	60
3.7	Kollektorstromspitzen .....	73
3.8	Zusammenfassung .....	77
3.9	Aufgaben .....	79
4	Stellantriebe .....	81
4.1	Der Gleichstrommotor .....	81
4.1.1	Belastung von Gleichstrommotoren .....	85
4.1.2	Antrieb des Gleichstrommotors .....	87
4.2	Schrittmotoren .....	92
4.2.1	Aufbau des Schrittmotors .....	92
4.2.2	Der Schrittmotortreiber .....	94
4.2.3	Leistung von Schrittmotoren .....	95
4.3	Hydraulische Stellantriebe .....	96
4.3.1	Arbeitsprinzipien hydraulischer Stellantriebe .....	96
4.3.2	Betrachtungen zur Realisierung .....	98
4.4	Pneumatische Stellantriebe .....	100
4.5	Zusammenfassung .....	104
4.6	Aufgaben .....	105
5	Steuerung (Regelung) .....	107
5.1	Proportionalregelung .....	107
5.2	Das Problem der Proportionalabweichung .....	111
5.3	Überschwingung .....	112
5.4	Abtaststeuerglieder .....	115

5.5	Der spannungsgesteuerte Gleichstrommotor .....	117
5.6	Wahl der Servoverstärkung .....	119
5.7	Die Wahl der gesteuerten Variablen .....	122
5.8	Zusammenfassung .....	121
5.9	Aufgaben .....	126
6	Koordinatensysteme für Roboter .....	127
6.1	Position und Orientierung .....	127
6.2	Koordinatensysteme .....	129
6.3	Rotationen .....	131
6.4	Homogene Koordinaten .....	132
6.5	Bezugssysteme .....	136
6.6	Zusammenfassung .....	142
6.7	Aufgaben .....	143
7	Kinematik der Position .....	147
7.1	Beziehungen zwischen Gliedern und Gelenken .....	147
7.1.1	Kinematische Gleichungen des $\theta$ - $r$ -Manipulators .....	148
7.1.2	Definition von Koordinatensystemen für Rotationsgelenke (s. Abb. 7.3) .....	150
7.1.3	Definitionen von Koordinatensystemen für prismatische Gelenke .....	152
7.1.4	Berechnung von ${}^R T_H$ aus den $A$ -Matrizen .....	154
7.1.5	Kinematische Gleichungen für den Manipulator mit Gelenkgeometrie .....	155
7.2	Bestimmung der Orientierung; ein inverses Problem .....	157
7.2.1	DBN-Darstellung der Orientierung .....	158
7.2.2	Eulersche Winkel .....	162
7.2.3	Darstellungen der Orientierung .....	162
7.2.4	Zusammenfassung: Die kinematische Vorwärtstransformation ..	163
7.3	Die "Armlösung" .....	164
7.3.1	Lösung für den $\theta$ - $r$ -Manipulator .....	164
7.3.2	Lösung für einen Manipulator mit Gelenkgeometrie .....	167
7.4	Rechnerische Probleme der Kinematik .....	171
7.4.1	Entartungen .....	171
7.5	Schlußfolgerung .....	172
7.6	Zusammenfassung .....	173
7.7	Aufgaben .....	174
	Anhang: Definitionen von Koordinatensystemen für prismatische Gelenke .....	175

8	Differentialbewegungen und die Jacobi-Matrix .....	179
8.1	Differentialbewegung .....	180
8.2	Die Jacobi-Matrix .....	184
8.2.1	Die Jacobi-Matrix des $\theta$ - $r$ -Manipulators .....	185
8.2.2	Koordinatentransformation für Differentialbewegungen .....	188
8.2.3	Die Jacobi-Matrix eines allgemeinen Manipulators .....	192
8.3	Die invertierte Jacobi-Matrix .....	200
8.3.1	Numerische Inversion .....	200
8.3.2	Symbolische Inversion .....	201
8.3.2	Differenzieren der inversen kinematischen Transformation .....	202
8.4	Schlußfolgerung .....	204
8.5	Zusammenfassung .....	205
8.6	Aufgaben .....	206
9	Bahnsteuerung .....	209
9.1	Bahnaufzeichnung .....	210
9.2	Steuerung nach kartesischen Koordinaten .....	212
9.2.1	Off-line-Bahnberechnung .....	212
9.2.2	Bahnsteuerungspolynome .....	215
9.2.3	Bahnsteuerungen auf einer vorausberechneten Bahn .....	220
9.3	Kombinierte Steuerung durch Interpolation .....	226
9.4	Schlußfolgerung .....	231
9.5	Zusammenfassung .....	232
9.6	Aufgaben .....	233
10	Kinetik .....	235
10.1	Herleitung der Kinetik .....	236
10.1.1	Das kinetische Modell des $\theta - r$ -Manipulators .....	236
10.1.2	Lagrangesche Kinetik .....	237
10.2	Kräfte und Drehmomente .....	240
10.3	Der Schwierigkeitsgrad der Lösung .....	244
10.4	Verwendung kinetischer .....	244
10.4.1	Entwurf von Manipulatoren .....	245
10.4.2	Entwurf des Arbeitsraumes und Planung der Bahn .....	245
10.4.3	Anwendung der Kinetik bei der Echtzeitsteuerung .....	246
10.5	Wahl der Servoverstärkungen .....	247
10.6	Schlußfolgerung .....	248
10.7	Zusammenfassung .....	249
10.8	Aufgaben .....	250

---

11	Kraftsteuerung und Nachgiebigkeit .....	251
11.1	Problem der Kraftsteuerung .....	251
11.2	Umsetzung von Kräften und Drehmomenten .....	255
11.3	Direkte Kraftmessung .....	259
11.4	Nachgiebigkeit .....	261
11.4.1	Aktive Nachgiebigkeit .....	261
11.4.2	Passive Nachgiebigkeit .....	261
11.5	Hybridsteuerung .....	263
11.6	Schlußfolgerung .....	270
11.7	Zusammenfassung .....	271
11.8	Aufgaben .....	272
12	Sensoren .....	273
12.1	Taktile Sensoren .....	273
12.2	Näherungssensoren .....	277
12.2.1	Optische Näherungsmelder .....	278
12.2.2	Optische Entfernungsmessung durch Reflexion .....	279
12.2.3	Näherungssensoren nach dem Triangulationsverfahren .....	281
12.3	Entfernungsmessung mit Ultraschall .....	283
12.4	Schlußfolgerung .....	284
12.5	Zusammenfassung .....	285
12.6	Aufgaben .....	286
13	Bildererkennung mit Computer .....	287
13.1	Grundsätzliche Betrachtungen .....	287
13.1.1	Die Erzeugung eines digitalen Bildes .....	287
13.1.2	Der Abtastvorgang .....	290
13.2	Bildverarbeitungsfunktionen .....	297
13.3	Hardware zur Bilderfassung .....	300
13.3.1	Der Bildpuffer .....	300
13.4	Segmentierung .....	302
13.4.1	Segmentierung durch Schwellenwertbildung .....	303
13.5	Gestalterkennungsgeräte .....	309
13.5.1	Charakteristische Merkmale .....	310
13.6	Verwendung von Gestalterkennungsgeräten .....	313
13.7	Strukturierte Beleuchtung .....	316
13.7.1	Silhouettenverfahren .....	317
13.7.2	Entfernungstriangulation .....	319
13.7.3	Entfernungssensoren .....	320

XX	Inhalt	
13.8	Schlußfolgerung .....	321
13.9	Zusammenfassung .....	322
13.10	Aufgaben .....	324
14	Computerarchitekturen .....	329
14.1	Schnellere Software .....	329
14.1.1	Ganzzahlarithmetik .....	329
14.1.2	Berechnung trigonometrischer Funktionen .....	331
14.1.3	Matrixoperationen .....	333
14.2	Berechnungsalternativen: Hardware .....	334
14.2.1	Der Universalcomputer .....	334
14.2.2	Verteilung über Verknüpfungen .....	336
14.2.3	Verteilung nach Funktionen .....	337
14.2.4	Kundenspezifische Hardware .....	338
14.3	Kundenhardware aus Standardmodulen .....	339
14.4	Hierarchische Steuerung .....	340
14.5	Schlußfolgerung .....	343
14.6	Zusammenfassung .....	345
14.7	Aufgaben .....	345
15	Programmiersprachen für Roboter .....	347
15.1	Die Hardware-Ebene .....	347
15.2	Die Punktsteuerungsebene .....	348
15.3	Die Bewegungsebene .....	350
15.4	Strukturierte Programmiersebene .....	354
15.5	Aufgabenorientierte Ebene .....	359
15.6	Schlußfolgerung .....	362
	Literatur .....	363
	Register .....	375