

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Übersicht	1
1.1.1	Klassische Industrieroboter	1
1.1.2	Parallelkinematiken	3
1.1.3	Serviceroboter	3
1.1.4	Elastische Roboter	5
1.2	Definitionen	6
1.2.1	Gelenke	6
1.2.2	Konfigurationsraum	6
1.2.3	Operationsraum - Task Space	6
1.2.4	Redundanz	6
1.2.5	Singularität	7
1.3	Robotercharakteristik	7
1.4	Stand der Technik	9
1.4.1	Modellbildung für starre Robotersysteme	9
1.4.2	Modellbildung für elastische Robotersysteme	11
1.4.3	Elastische Roboter	11
1.4.4	Industrieroboter	12
1.4.5	Redundante Roboter	13
1.4.6	Fahrende Roboter	14
1.4.7	Bewegungsplattformen	14
1.5	Gliederung der Arbeit	15

Teil I Theorie

2	Kinematik	21
2.1	Transformationen zwischen Vektoren und Koordinatensystemen	21
2.1.1	Position und Drehmatrizen	21
2.1.2	Räumliche Drehungen	22
2.2	Geschwindigkeiten	29
2.2.1	Translationsgeschwindigkeiten	29

2.2.2	Rotationsgeschwindigkeiten	30
2.3	Beschleunigungen	32
2.3.1	Translationsbeschleunigungen	32
2.3.2	Winkelbeschleunigungen	33
2.4	Lineare Kinematik Bernoulli-Euler Balken	33
2.5	Lineare Kinematik Timoshenko Balken	35
2.6	Mehrkörperkinematik	36
2.6.1	Topologie baumstrukturierter Mehrkörpersysteme	37
2.6.2	Kinematische Kette	38
3	Dynamik	41
3.1	Zentralgleichung	41
3.2	Hamel-Boltzmann Gleichung	42
3.3	Lagrange Gleichungen 2-ter Art	42
3.4	Projektionsgleichung	43
3.5	Zusammenfassung	44
4	Projektionsgleichung	47
4.1	Projektionsgleichung - Subsysteme	47
4.1.1	Darstellung mittels Zwischenvariablen	48
4.1.2	Zusammenfügen des Subsystems	50
4.1.3	Synthese	50
4.2	Allgemeine Modellierung eines Roboters	56
4.2.1	Kinematische Kette	56
4.2.2	Subsysteme	57
5	Elastische Systeme	63
5.1	Elastizitätstheorie	63
5.1.1	Cauchyscher Spannungstensor	63
5.1.2	Elastisches Potential - Verzerrungstensor	65
5.1.3	Hookesches Gesetz	66
5.1.4	Treffitzscher Spannungstensor	67
5.1.5	Green-Lagrangescher Verzerrungstensor	68
5.1.6	Elastisches Potential - Bernoulli-Euler Balken	70
5.1.7	Elastisches Potential Timoshenko Balken	71
5.2	Bewegungsgleichung	72
5.3	Beispiel Bernoulli-Euler Balken	74
5.3.1	Partielle Differentialgleichung	75
5.3.2	Randbedingungen	75
5.4	Beispiel Timoshenko Balken	76
5.4.1	Partielle Differentialgleichung	77
5.4.2	Randbedingungen	78
5.4.3	Übergang auf neue Koordinaten - Vernachlässigung des Schubeinflusses	78
5.4.4	Elimination des Biegewinkels β_B	79

5.5	Dynamische Steifigkeit	80
5.6	Lösung	83
5.7	Ausblick Mehrkörpersysteme	83
6	Ritz Verfahren	85
6.1	Galerkin Verfahren	85
6.1.1	Erweitertes Galerkin Verfahren	86
6.2	Ritz Verfahren	87
6.3	Mehrkörpersysteme	88
6.3.1	Dynamische Steifigkeitsanteile	88
6.3.2	Subsysteme	90
6.3.3	Kinematische Kette	91
6.3.4	Gesamtsystem	92
7	Bindungen	93
7.1	Projektion in neue Koordinaten	93
7.2	Kontaktkräfte	94
7.2.1	Explizite Berechnung der Kontaktkräfte	95
7.2.2	Rekursive Formulierung - Algebraischer Ansatz	96
7.2.3	Rekursive Formulierung - Ansatz über Bindungsgleichung .	97
7.2.4	Geschlossene kinematische Schleifen	100
7.2.5	Mehrrechte Kontakt	100
7.3	Bindungsstabilisierung	101
7.4	Stoß	102
7.4.1	Rekursives Verfahren - Stoß	104
7.5	Numerisches Beispiel	105

Teil II Anwendungen

8	Elastische Knickarmroboter	111
8.1	Aufbau	111
8.2	Modellbildung	112
8.2.1	Elastischer Balken	112
8.2.2	Gesamtsystem	118
8.3	Regelung	119
8.3.1	Bahnkorrektur - Minimalform	119
8.3.2	Bahnkorrektur - Rekursive Form	121
8.3.3	Schwingungsdämpfung	124
8.4	Zusammenfassung	125
9	Elastische Linearroboter	129
9.1	Einleitung	129
9.2	Modellbildung	130
9.2.1	Teleskopachse	130
9.2.2	Gesamtsystem	136
9.3	Schwingungsunterdrückung	137

9.4 Ergebnisse	138
9.5 Zusammenfassung und Ausblick	139
10 Industrieroboter	141
10.1 Einleitung	141
10.2 Grundanforderung	142
10.2.1 Dynamisches Modell	142
10.2.2 Parameteridentifikation	143
10.2.3 Modellverifikation	146
10.3 Geometrische Kalibrierung	146
10.3.1 Unterscheidung der geometrischen Fehler	147
10.3.2 Berechnung der Parameter	149
10.4 Regelung	151
10.4.1 PD- Regelung mit Momentenvorsteuerung	152
10.4.2 Computed Torque Regelung	153
10.4.3 Dezentrale Regelung mit Schätzung	154
10.5 Optimale Bahnen	157
10.5.1 Definierte Bahnen	158
10.5.2 Punkt-zu-Punkt Bahnen	162
10.6 Zusammenfassung	163
11 Redundante modulare Roboter	165
11.1 Aufbau	165
11.2 Kinematik	167
11.2.1 Vorwärtskinematik	167
11.2.2 Inverse Kinematik	169
11.2.3 Bahnplanung	172
11.3 Dynamik	173
11.3.1 Subsystem Formulierung	173
11.3.2 Kinematische Kette	175
11.3.3 Bewegungsgleichung	175
11.4 Aktive Impedanzregelung	176
11.5 Passive Impedanz Regelung	177
11.5.1 Endeffektor Impedanzregelung	177
11.5.2 Nullraum Impedanzregelung	182
11.5.3 Implementierung - Gesamtregelung	182
11.6 Zusammenfassung	183
12 Fahrende Roboter	185
12.1 Segway Modell	185
12.1.1 Aufbau	186
12.1.2 Modellbildung	188
12.1.3 Regelung	192
12.1.4 Experimentelle Ergebnisse	197
12.1.5 Zusammenfassung	199

12.2	Vierrad Modell	200
12.2.1	Einleitung	200
12.2.2	Kinematik	201
12.2.3	Flachheit des nichtholonomen Systems	203
12.2.4	Quasistatische Zustandsrückführung	206
12.2.5	Ergebnisse	207
12.2.6	Zusammenfassung	208
13	Bewegungsplattformen	209
13.1	Aufbau	209
13.2	Kinematik	211
13.2.1	Inverse Kinematik	211
13.2.2	Vorwärtskinematik	212
13.3	Dynamik	212
13.4	Regelung	214
13.5	Bewegungssimulatoren	215
13.6	Washout Filter	217
13.7	Zusammenfassung	218
14	Rotordynamik	219
14.1	Mechanisches Rotormodell	219
14.1.1	Modellbildung	220
14.2	Experiment	230
14.2.1	Hochlauf ohne Unwucht	230
14.2.2	Hochlauf mit Unwucht	230
14.3	Antriebsstrang	232
14.4	Zusammenfassung	235
A	Kinematische Eigenschaften	237
A.1	Transformationen Achse/Winkel - Quaternionen	237
A.2	Eigenschaften der Kreuzprodukte	237
A.3	Drehgeschwindigkeit für Quaternionen	238
A.4	Relative Winkelgeschwindigkeit	239
B	Detaillierte Herleitung $O(n)$-Verfahren	241
B.1	Drei Subsysteme	241
B.2	Verallgemeinerung	244
C	Detaillierte Herleitung rekursive Kontaktmodellierung	245
C.1	Drei Subsysteme - Endpunktkontakt	245
C.2	Verallgemeinerung	249
D	Detaillierte Herleitung rekursive Stoßmodellierung	251
D.1	Drei Subsysteme - Endpunktstoß	251
D.2	Verallgemeinerung	255

E Hamilton Prinzip Timoshenko Balken	257
Symbolverzeichnis	259
Literaturverzeichnis	265
Sachverzeichnis	273