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 Trefftzscher 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 Mehrfache Kontakte 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

http://www.springer.com/978-3-642-22827-8

Starr-elastische Robotersysteme
Theorie und Anwendungen
Gattringer, H.
2011, XIV, 276 S. 119 Abb., 22 Abb. in Farbe.,
Hardcover
ISBN: 978-3-642-22827-8