

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
Verzeichnis der im Text diskutierten Matlab-Demos, Matlab-Funktionen und Matlab-Live-Skripte	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Historie	2
1.2 Elemente der Mehrkörperdynamik	2
1.3 Anwendungsgebiete	3
1.4 Computergerechte Notation	4
1.5 Namenskonvention für Matlab-Skripte und -Funktionen	5
Literatur 1	6
2 Dynamik des starren Körpers	7
2.1 Lagebeschreibung	8
2.1.1 Koordinatensysteme	8
2.1.2 Starrkörperbedingung	8
2.1.3 Körperfestes Koordinatensystem	9
2.1.4 Kardan-Winkel	9
2.1.5 Vektortransformation	10
2.1.6 Euler-Winkel	12
2.1.7 Drehung um eine beliebige Achse	12
2.1.8 Euler-Parameter	14
2.1.9 Orthogonalitätsbedingung	16
2.1.10 Zusammenfassung	16
2.2 Geschwindigkeit	17
2.2.1 Allgemeine Relativbewegung	17
2.2.2 Starrkörperbewegung	18
2.3 Winkelgeschwindigkeit	18
2.3.1 Definition	18
2.3.2 Kardan-Winkel	18
2.3.3 Euler-Winkel	20
2.3.4 Euler-Parameter	22
2.4 Bewegungsgleichungen	23
2.4.1 Impulssatz	23
2.4.2 Drallsatz	24
2.4.3 Zustandsgleichung	26
2.5 Beispiel: Schiefer Wurf mit Luftwiderstand	27
2.6 Beispiel: Quader im homogenen Schwerfeld	30
2.6.1 Mathematische Beschreibung	30
2.6.2 Simulation	31
2.6.3 Drift in den Euler-Parametern	32
2.6.4 Eulersche Kreiselgleichung	33
Übungsbeispiele zu Kapitel 2	35
Links zu den Lösungen 2	37
Literatur 2	38

3	Starre Körper mit elastischen Verbindungselementen	39
3.1	Bushings	40
3.1.1	Kraft- und Momentenwirkung	40
3.1.2	Beispiel räumliches Doppelpendel	41
3.2	Beidseitig gelenkig gelagertes Kraftelement	46
3.2.1	Topologie	46
3.2.2	Kraft- und Momentenwirkung	47
3.2.3	Beispiel Laufkatze mit Last	48
3.2.4	Ein dynamisches Kraftelement	53
3.3	Integrationsverfahren	55
3.3.1	Allgemeines	55
3.3.2	Explizite Verfahren	55
3.3.3	Implizite Verfahren	56
3.3.4	Numerische Dämpfung	58
3.3.5	Typisches Verhalten expliziter und impliziter Solver	60
3.3.6	Dünnbesetzte Jacobi-Matrix	62
3.3.7	Fazit	63
3.4	Kontaktelemente	64
3.4.1	Ersatzmodell	64
3.4.2	Modellierung der Normalkraft	64
3.4.3	Seilkräfte am Beispiel eines Bungee-Sprungs	70
3.4.4	Reibeffekte	73
3.4.5	Regularisiertes Reibgesetz	74
3.4.6	Beispiel Würfel mit Bodenkontakten	74
3.4.7	Ein dynamisches Reibkraftmodell	77
3.4.8	Das LuGre Reibmodell	79
3.4.9	Vergleich verschiedener Reibkraftmodelle	80
3.4.10	Spezielle Kontaktelemente	88
	Übungsbeispiele zu Kapitel 3	89
	Links zu den Lösungen 3	95
	Literatur 3	95
4	Starre Körper mit kinematischen Bindungen	97
4.1	Rollende Münze	98
4.1.1	Modellbildung	98
4.1.2	Orientierung und Lage	98
4.1.3	Geschwindigkeiten	100
4.1.4	Bewegungsgleichungen	101
4.2	Methoden und Prinzipie	103
4.2.1	Überblick	103
4.2.2	Euler-Lagrange-Gleichungen	104
4.2.3	Kinetische Energie und deren partielle Ableitungen	106
4.2.4	Verallgemeinerte Kräfte und Momente	108
4.2.5	Euler-Lagrange-Gleichungen für einen starren Körper	109
4.2.6	Verallgemeinerter Drehimpuls	109
4.2.7	Differential-Algebraisches System vom Index 1	110
4.2.8	Jourdain und D'Alembert	113
4.3	Räumliches Doppelpendel mit Kugelgelenken	114
4.3.1	Lage	114
4.3.2	Geschwindigkeit	115
4.3.3	Beschleunigung	116
4.3.4	Verallgemeinerte Kräfte und Momente	117
4.3.5	Massenmatrix	118
4.3.6	Zustandsänderung	119
4.3.7	Simulationsergebnisse	119
4.4	Rekursiver Algorithmus	122
4.4.1	Kinematik	122
4.4.2	Bewegungsgleichung	124
4.4.3	Elimination der Zwangskräfte	124

4.4.4	Zusammenfassung	126
4.4.5	Topologie von Mehrkörpersystemen	126
4.5	Ebenes Mehrfachpendel	127
4.5.1	Erste Vorwärtsrekursion	127
4.5.2	Rückwärtsrekursion	131
4.5.3	Zweite Vorwärtsrekursion	132
4.5.4	Programmtechnische Realisierung	132
4.6	Einfach geschlossene kinematische Schleifen	137
4.6.1	Beispiel Laufkatze mit Last	137
4.6.2	Bindungsgleichungen	137
4.6.3	Kinematik	139
4.6.4	Bewegungsgleichung	140
4.6.5	Simulationsergebnisse	141
4.7	Differential-Algebraische Gleichungen	142
4.7.1	Schnittmethode	142
4.7.2	Lagrange-Multiplikatoren	143
4.7.3	Index-Reduktion	144
4.7.4	Räumliches Doppelpendel	145
4.7.5	Gear-Gupta-Leimkuhler-Stabilisierung	149
4.7.6	Baumgarte-Stabilisierung	150
4.7.7	Index 3 Solver	152
4.7.8	Bindungsgleichungen und Anzahl der Freiheitsgrade	153
4.7.9	Redundante Bindungen	154
4.8	Konsequenzen	156
	Übungsbeispiele zu Kapitel 4	157
	Links zu den Lösungen 4	160
	Literatur 4	160
5	Analyse von Mehrkörpersystemen	161
5.1	Gleichgewicht	162
5.1.1	Definition und Bestimmungsgleichungen	162
5.1.2	Nichtlineare Gleichungslöser	162
5.1.3	Simulation des Einschwingverhaltens	165
5.1.4	Minimierung der potentiellen Energie	166
5.2	Eigendynamik	167
5.2.1	Linearisierung	167
5.2.2	Eigenwerte und Eigenvektoren	169
5.2.3	Beispiel Räumliches Doppelpendel	170
5.2.4	Beispiel Traktor mit gefederter Vorderachse	171
5.3	Fremderregung	177
5.3.1	Überblick	177
5.3.2	Sprungantwort	178
5.3.3	Harmonische Erregung	180
5.3.4	Erregung durch Gleitsinus	180
5.3.5	Stochastische Erregung	181
5.4	Optimierung	183
5.4.1	Allgemeines	183
5.4.2	Beispiel optimales Einschwingen	183
5.5	Inverse Kinematik	185
5.5.1	Aufgabenstellung	185
5.5.2	Lösungsansätze	185
5.5.3	Beispiel Positions- und Bahnvorgabe	187
5.6	Inverse Dynamik	191
5.6.1	Lage, Geschwindigkeit und Beschleunigung	191
5.6.2	Stellkräfte und -momente	191
5.6.3	Beispiel Bahnsteuerung	192
	Übungsbeispiele zu Kapitel 5	193
	Links zu den Lösungen 5	197
	Literatur 5	198

6	Elastische Körper	199
6.1	Einleitung	200
6.1.1	Anwendungsgebiete	200
6.1.2	Modellvorstellungen	200
6.1.3	Bewegtes Bezugssystem	201
6.1.4	Relative Punkt-Kinematik	202
6.2	Einfaches Balkenmodell	203
6.2.1	Modell-Vorstellung	203
6.2.2	Euler-Bernoulli-Hypothese	204
6.2.3	Eigenschwingungen	207
6.2.4	Näherungslösungen	209
6.2.5	Gleichgewicht am verformten Balkenelement	211
6.3	Lumped Mass Modelle	214
6.3.1	Modellvorstellung	214
6.3.2	Bewegungsgleichungen im bewegten Referenzsystem	215
6.3.3	Nichtlineare Dynamik des Lumped Mass Systems	219
6.3.4	Linearisierung und Eigendynamik	223
6.4	Einbindung Finiten Elemente	225
	Übungsbeispiele zu Kapitel 6	226
	Links zu den Lösungen 6	228
	Literatur 6	228
7	Anwendungsbeispiel aus der Fahrzeugtechnik	229
7.1	Motivation	230
7.2	Aufbau einer MacPherson-Achse	231
7.2.1	Gesamte Achse	231
7.2.2	Teilmodell Radaufhängung	231
7.3	Analytische Beschreibung	232
7.3.1	Bewegungen, Bindungen und Freiheitsgrade	232
7.3.2	Problemangepasste Lagebeschreibung	235
7.3.3	Geschwindigkeit	238
7.3.4	Beschleunigung	241
7.3.5	Kinematische Analyse	242
7.4	ADAMS-Modell	245
7.4.1	Vorbereitende Schritte	245
7.4.2	Modell-Körper	247
7.4.3	Bindungen	248
7.4.4	Kinematische Analyse	249
7.4.5	Schraubenfeder	249
7.4.6	Dämpfer	250
7.4.7	Reifen und Felge	252
7.5	SIMPACT-Modell	253
7.5.1	Vorbemerkung	253
7.5.2	Topologie	253
7.5.3	Relative Beschreibung	254
7.6	Modellerweiterungen	255
	Literatur 7	256