

Dipl.-Inform. Oliver Deussen, Magdeburg

Untersuchung effizienter Verfahren zur Bewegungs- simulation deformierbarer Körper

Reihe **20**: Rechnerunterstützte
Verfahren

Nr. **215**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Aufgabenstellung	2
1.2	Stand der Forschung	3
1.2.1	Starre Körper und Mehrkörpersysteme	3
1.2.2	Deformierbare Körper	3
1.2.3	Nodale Netzmodelle	5
1.3	Erzielte Ergebnisse	5
1.3.1	Bewertung nodaler Netzmodelle	5
1.3.2	Generierung nodaler Netzmodelle	6
1.3.3	Anwendungen	6
1.4	Übersicht über die folgenden Kapitel	7
2	Grundlagen aus der Mechanik	8
2.1	Kinematik	9
2.2	Kinetik	9
2.2.1	Massenpunkte	12
2.2.2	Darstellung von Körpern als Massenpunktsysteme	13
2.3	Mehrere starre Körper	16
2.3.1	Verallgemeinerte Koordinaten	17
2.3.2	Virtuelle Verschiebungen	17
2.3.3	Einfluß von Zwangskräften	17
2.4	Das Verfahren von Newton-Euler	18
2.5	Deformierbare Körper	19
2.5.1	Finite-Elemente-Verfahren	21
2.5.2	Fachwerke	25
2.5.3	Berechnung des Kraft-Gleichgewichtszustandes	27
2.5.4	Auswertung der Bewegungsgleichungen	28
2.5.5	Eigenfrequenzen	30
2.5.6	Nodale Netzmodelle	30
2.6	Resümee	33
3	Bewertung nodaler Netzmodelle	34
3.1	Vergleich punktweiser und matrixorientierter Rechnung bei Netzmodellen	34

3.1.1	Schrittweitenkontrolle bei punktweiser Auswertung	
3.1.2	Rechenzeitvergleich bei unterschiedlichen Systemen	
3.2	Nodale Netzmodelle und andere finite Elemente	
3.2.1	Element-Steifigkeitsmatrizen, Kraft-Gleichgewichtszustände	
3.2.2	Dynamisches Verhalten, dynamische Simulation	
3.3	Integrationsverfahren	
3.3.1	Vorauswahl	
3.3.2	Runge-Kutta Verfahren	
3.3.3	Runge-Kutta-Fehlberg Verfahren	
3.3.4	Explizite Extrapolationsverfahren	
3.4	Numerische Untersuchung der Integrationsverfahren	
3.4.1	Referenzdaten	
3.4.2	Untersuchungsmethode	
3.4.3	Ergebnisse	
3.5	Übertragung auf nodale Netzmodelle mit globaler Schrittweitensteuerung	
3.5.1	Optimierte Berechnung für spezielle Systeme	
3.6	Resümee	
4	Optimale nodale Netzmodelle: Punktpositionierung	5
4.1	Generelle Anforderungen	5
4.2	Regelmäßige Punktverteilung	5
4.2.1	Vorauswahl	6
4.2.2	Randbehandlung	6
4.3	Stochastische Punktverteilung	6
4.3.1	Delaunay-Triangulierung	6
4.3.2	Berechnung von Delaunay-Triangulationen	6
4.3.3	Kantenlängen von Delaunay-Triangulierungen	6
4.4	Bearbeitung stochastischer Punktmengen	6
4.4.1	Statistische Bewertung	6
4.5	Randlose Voronoi-Iteration	6
4.6	Resümee	7
5	Ermittlung der Massenverteilung	7
5.1	Lösung mit möglichst gleichverteilten Massen	7
5.1.1	Problem: Negative Massen	7
5.2	Deformationen	7
5.3	Momentenberechnung aus Oberflächendaten	7
5.4	Optimierung von Punktpositionen	7
5.5	Resümee	7
6	Optimierung der Elastizitätseigenschaften	8

6.1	Das Verfahren im Überblick	80
6.2	Untersuchte Optimierungsverfahren	81
6.2.1	Gradientenabstieg	81
6.2.2	Minimumsuche	82
6.2.3	Simulated Annealing	83
6.3	Bestimmung von Referenzverformungen	86
6.3.1	Analytische Bestimmung	86
6.3.2	Morphologische Vorgehensweise	89
6.4	Bestimmung von Eigenfrequenzen	89
6.4.1	Berechnung der Eigenfrequenzen endlicher nodaler Netzmodelle	90
6.4.2	Eigenfrequenzen für Netzmodelle mit beliebig vielen Freiheitsgraden	90
6.5	Elastizitätsoptimierung	91
6.5.1	Berechnung des statischen Systemverhaltens	91
6.5.2	Berechnung der Kosten	93
6.5.3	Globale Optimierung	93
6.5.4	Lokale Optimierung	96
6.6	Bestimmung initialer Parameterwerte	98
6.7	Bewertung der Optimierungsverfahren, Ergebnisse	100
6.7.1	Bewertungskriterien	100
6.7.2	Globale Optimierung	100
6.7.3	Lokale Optimierung	104
6.8	Verhalten der unterschiedlichen Verbindungsstrukturen	107
6.8.1	Statisches Verhalten	107
6.8.2	Dynamisches Verhalten, Eigenfrequenzen	110
6.8.3	Resümee: Geeignete Verbindungsstrukturen	111
6.9	Optimierung unterschiedlicher Körpereigenschaften	111
6.9.1	Anisotrope Körper	111
6.9.2	Inhomogene Körper	113
6.9.3	Nichtlineare Elastizität	113
6.9.4	Viskosität	114
6.10	Resümee	115
7	Anwendungen, Diskussion und Ausblick	116
7.1	Anwendungsbeispiele	116
7.1.1	Operationssimulation	116
7.1.2	Nachbearbeitung von Bildsegmentierungen	117
7.1.3	Computeranimationen	118
7.2	Diskussion der erzielten Resultate, Ausblick	119
7.2.1	Einordnung nodaler Netzmodelle	119
7.2.2	Numerische Untersuchung nodaler Netzmodelle	120
7.2.3	Optimale nodale Netzmodelle	120

A	Optimierte Auswertung von Differentialgleichungen zweiter Ordnung	121
B	Steife nodale Netzmodelle	124
B.1	Nodale Netzmodelle	125
B.2	Stabilität	125
B.2.1	Euler-Verfahren	125
B.2.2	Explizite Runge-Kutta-Verfahren	126
B.2.3	Explizite Extrapolationsverfahren	126
C	Kombinierte Ordnungs- und Schrittweitensteuerung in Extrapolationsverfahren	127
C.1	Schrittweitensteuerung	127
C.2	Ordnungssteuerung	128
C.2.1	Konvergenz in Zeile $k-1$	128
C.2.2	Konvergenzüberwachung	129
C.2.3	Konvergenz in Zeile k	129
C.2.4	Zweite Konvergenzüberwachung	129
C.2.5	Konvergenz in Zeile $k+1$	130
C.2.6	Tips zur Implementierung	130
D	Bewegungsgleichungen für Doppelpendel	131
D.1	Mathematisches Doppelpendel	131
D.2	Elastisches Doppelpendel	131
E	Ergebnisse der numerischen Untersuchung	133
E.1	Einfluß der Anfangsschrittweite	133
E.2	Einfluß der Schrittweitensteuerung und Fehlertoleranz	133
F	Ergebnisse der randlosen Voronoi-Iteration	136
G	Ergebnisse Elastizitätsoptimierung	138
	Literatur	142