

	Seiten-Nr.
1. EINFÜHRUNG	1
<u>1.1. Übersicht</u>	1
<u>1.2. Dynamik von Manipulatoren</u>	7
1.2.1. Kinematik	7
1.2.2. Kinetik	11
1.2.3. Steuerung und Regelung	12
<u>1.3. Sensorik</u>	17
2. KINEMATIK	20
<u>2.1. Modellierung von Industrierobotern (IR)</u>	20
2.1.1. Mehrkörpersystem (MKS) mit Baumstruktur	20
2.1.2. Bindungen	22
<u>2.2. Wahl von Koordinaten und Koordinatensysteme</u>	24
2.2.1. Strukturbasis, Bezugsbasis	24
2.2.2. Lage und Orientierung einzelner Teilkörper	25
2.2.3. Wahl der Minimalkoordinaten	26
<u>2.3. Rekursive Berechnung der Winkel- und Schwerpunktgeschwindigkeiten einzelner Teilkörper</u>	27
2.3.1. Koordinatensystemorientierungen einzelner Teilkörper und deren Winkelgeschwindigkeiten	27
2.3.2. Inertiale Lagekoordinaten einzelner Teilkörper und deren Schwerpunktgeschwindigkeiten	32
2.3.3. DENAVIT-HARTENBERG-Transformation	37

<u>2.4. Transformation von Inertialkoordinaten auf Minimalkoordinaten - Das allgemeine inverse Problem</u>	48
2.4.1. Problemformulierung	48
2.4.2. Ein modifiziertes NEWTON-Verfahren zur Lösung des inversen Problems	54
<u>2.5. Bahnbeschreibung</u>	60
2.5.1. Allgemeines	60
2.5.2. Lineare Interpolation zwischen zwei Positionen im Konfigurationsraum	61
2.5.3. Spline-Interpolation zwischen einer Folge von Positionen im Konfigurationsraum	64
2.5.3.1. Formulierung des Problems	64
2.5.3.2. Beispiel	66
2.5.3.3. Approximation mit kubischen Splinefunktionen	68
3. KINETIK	72
<u>3.1. Annahmen, Voraussetzungen</u>	72
<u>3.2. Grundlegende Begriffe und Kräftearten</u>	74
3.2.1. Systemgrenzen und äußere Kräfte	74
3.2.2. Innere Kräfte	78
3.2.3. Kraftgesetze	80
3.2.3.1. Gewichtskräfte	80
3.2.3.2. Federkräfte, Dämpfungskräfte	81
3.2.3.3. Stellkräfte und Stellmomente	82
3.2.3.4. Reibungskräfte und Reibungsmomente	83

<u>3.3. Bewegungsgleichungen für Roboter mit Baumstruktur</u>	85
3.3.1. Leistungsbilanz passiver Kräfte und Momente	85
3.3.2. Die Bewegungsgleichungen nach NEWTON-EULER	94
3.3.3. Ergänzungen und Anmerkungen	98
3.3.3.1. Bestimmung der absoluten Winkelbeschleunigungen	98
3.3.3.2. Zur Herleitung der Bewegungsgleichungen nach LAGRANGE	99
3.3.3.3. Geometrische Aspekte zur Transformation zwischen Arbeitsraum und Konfigurationsraum	100
3.3.4. Einige Möglichkeiten der Auswertung	103
3.3.4.1. Bestimmung des Bewegungsablaufs bei gegebenen Kräften und Momenten	103
3.3.4.2. Bestimmung der Stellkräfte und Stellmomente bei vorgegebenem Bewegungsablauf	104
3.3.4.3. Bestimmung der Zeitlösung für den Bahnparameter bei vorgegebener Bahn im Konfigurationsraum	112
<u>3.4. Probleme der Bahnplanung</u>	120
3.4.1. Bewegungsgleichungen in Koordinaten eines "begleitenden Dreibeins" einer Sollbahn	121
3.4.2. Bestimmung des zeitlichen Verlaufes der Sollbahn mit Hilfe eines Optimierungskriteriums	126
3.4.2.1. Die zeitoptimale Sollbahn	129
3.4.2.2. Beispiele	138

	Seiten-Nr.
4. OPTIMIERUNG VON INDUSTRIEROBOTERN	142
<u>4.1. Problemstellung</u>	142
4.1.1. Vorbemerkung	142
4.1.2. Zustandsraumdarstellung und Steuergrößen des Systems	143
4.1.3. Mathematische Formulierung des Optimierungsproblems	147
<u>4.2. Theoretische Grundlagen zur Optimierung dynamischer Modelle</u>	154
4.2.1. Notwendige Optimalitätsbedingungen und HAMILTON-kanonische Differentialgleichungen	154
4.2.1.1. Formulierung der Optimierungsaufgabe	154
4.2.1.2. Modifiziertes Optimierungsproblem	155
4.2.1.3. Gesamtlösungssystem	160
4.2.2. Anmerkungen zu den notwendigen Optimalitätsbedingungen	161
4.2.2.1. Notwendige Optimalitätsbedingungen als Standardrandwertproblem (RWP) formuliert	161
4.2.2.2. Rückführung auf ein Randwertproblem mit fester oberer Grenze	166
4.2.2.3. Notwendige Optimalitätsbedingungen bei fester Endzeit	168
4.2.2.4. Notwendige Optimalitätsbedingungen im nichtautonomen Fall	168
4.2.2.5. Hinreichende Bedingung für ein relatives Minimum	169
4.2.3. Beispiel für die Optimierung mit unbeschränkten Stellgrößen	170

	Seiten-Nr.
4.2.4. Das Maximumprinzip von PONTRYAGIN	173
4.2.4.1. Allgemeine Bemerkungen	173
4.2.4.2. Das Maximumprinzip	174
<u>4.3. Dynamische Programmierung</u>	178
4.3.1. Einführung-Optimalitätsprinzip	178
4.3.2. Mathematische Formulierung	181
4.3.3. Beispiel: Optimale Roboterbahnen	185
<u>4.4. Numerische Verfahren zur Lösung des Optimierungsproblems der Roboterdynamik</u>	188
4.4.1. Einteilung	188
4.4.2. Lösung nichtlinearer Randwertproble- me durch Rückführung auf Anfangswert- probleme ("Einfachschießen")	190
4.4.3. Mehrziel-Verfahren ("Multiple- Shooting")	192
4.4.4. Die Berücksichtigung algebraischer Nebenbedingungen bei der numerischen Lösung von Randwertproblemen	196
4.4.5. Beispiel mit explizit bekannter Steuerfunktion	199
4.4.6. Allgemeines NEWTON-Verfahren (Quasi- linearisierung) zur Lösung von Randwertproblemen	210
5. REGELUNG VON INDUSTRIEROBOTERN	213
<u>5.1. Einleitung</u>	213
<u>5.2. Regelungstechnische Grundlagen</u>	216
5.2.1. Allgemeines Regelkreiskonzept	216
5.2.2. Einige Beispiele für lineare zeitkon- tinuierliche Systeme	221

5.2.2.1. Einfacher Fall einer Polvorgabe	221
5.2.2.2. Modale Regelung	222
5.2.3. Lineare, zeitdiskrete Systeme	225
5.2.4. Optimale lineare Regler	226
5.2.5. Beispiel eines nichtlinearen Reglers	229
<u>5.3. Steuerungen und Regelungen bei Industrieroboter</u>	233
<u>5.4. Einige Regelkonzepte für Roboter</u>	236
5.4.1. Entkoppelte Einzelgelenk-Regelung	236
5.4.2. Roboter-Regelungen um eine Bezugsbahn	238
5.4.2.1. Methoden der nichtlinearen Entkopplung	238
5.4.2.2. Linearisierung um eine Referenztrajektorie	241
5.4.3. Adaptive Regelungskonzepte	242
5.4.4. Nichtlineare Roboterregelungen	246
6. ANHANG (Begriffskatalog)	247
7. LITERATURVERZEICHNIS	257
8. SACHWORTVERZEICHNIS	264