

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung . . . . .	1
1.2 Stand der Technik und Einordnung der Arbeit . . . . .	3
1.3 Vorgehensweise . . . . .	6
<b>2 Modellierung von Parallelrobotern</b>	<b>7</b>
2.1 Kinematik . . . . .	7
2.2 Kinetostatik . . . . .	10
2.2.1 Redundanz und Elastizität: Interpretation der Jacobimatrix . . . . .	11
2.2.2 Zeitableitung passiver Winkel . . . . .	12
2.3 Dynamik . . . . .	15
2.3.1 Bestimmung der Coriolismatrix mit Christoffelsymbolen . . . . .	17
2.3.2 Diskrete Modellierung . . . . .	17
2.3.3 Koordinatentransformation . . . . .	19
2.4 Koordinatensystem für Strukturelastizitäten . . . . .	21
2.5 Umgebungskontakt . . . . .	22
2.5.1 Stoßprozesse . . . . .	23
2.5.1.1 Umgebungsgeometrie . . . . .	23
2.5.1.2 Moreaus Stoßprozess . . . . .	24
2.5.2 Coulomb'sche Reibung als Bipotential . . . . .	26
2.6 Aktorik und Begrenzungen . . . . .	28
2.6.1 Stellgrößenbeschränkungen und statisches Modell . . . . .	29
2.6.2 Anstiegsbegrenzungen und dynamisches Modell . . . . .	30
<b>3 Regelkonzepte</b>	<b>31</b>
3.1 Linearisierungskonzepte . . . . .	31
3.1.1 Exakte Linearisierung, Inverse Dynamics Control . . . . .	32
3.1.2 Computed Torque Feedforward . . . . .	33
3.1.3 Equivalent Control . . . . .	33

3.1.4	Einfluss der Aktorik und Parameterunsicherheiten . . . . .	34
3.1.5	Vorsteuerungen und Bedingungen für Referenzwerte . . . . .	36
3.1.6	Vergleich . . . . .	37
3.2	Strukturelastizitäten . . . . .	38
3.3	Redundanz . . . . .	42
3.4	Lineares Framework . . . . .	42
3.4.1	Kaskadierung . . . . .	42
3.4.2	Beobachterbasiertes Design . . . . .	44
3.4.3	Sliding-Mode-Regelung . . . . .	46
3.4.4	Vergleich . . . . .	49
3.4.5	Regelung im dualen Raum (Kraftregelung) . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Holistische Regelung</b> . . . . .	<b>59</b>
4.1	Störungen und deren Einfluss: Windup . . . . .	59
4.1.1	Stoßprozesse . . . . .	60
4.1.2	Coulomb'sche Reibung . . . . .	65
4.1.3	Parameterunsicherheiten . . . . .	70
4.1.4	Aktor-Dynamik: Bode-Integral und „Wasserbett-Effekt“ . . . . .	72
4.1.5	Windup . . . . .	74
4.2	Anti-Windup-Konzept . . . . .	76
4.2.1	Kriterien zur Windup-Charakterisierung und Zielsetzung . . . . .	76
4.2.2	Klassische Anti-Windup-Strukturen . . . . .	79
4.2.3	Beobachterbasierte Interpretation und generalisiertes Framework . .	81
4.3	Anti-Windup-Design . . . . .	82
4.3.1	Designparameter . . . . .	83
4.3.2	Kaskadierung . . . . .	85
4.3.3	Statisches Anti-Windup: Einachsenfall . . . . .	87
4.3.4	Direktionalität – dynamisches Anti-Windup im Mehrachsenfall . .	88
4.3.5	Anwendung bei verschiedenen Linearisierungskonzepten . . . . .	92
4.4	Experimentelle Ergebnisse: Fünfgelenk . . . . .	94
4.4.1	Berücksichtigung des Linearisierungskonzepts und Ausblick . . . . .	101
<b>5</b>	<b>Implementierung, zeitdiskrete Umsetzung</b> . . . . .	<b>105</b>
5.1	Zeitdiskretisierung . . . . .	105
5.2	Schleifenstrukturen – Problematik in Anti-Windup-Strukturen . . . . .	107
5.2.1	Berechnungsreihenfolge und Updates . . . . .	108
5.2.2	Fundamentalschleifen und Menge aller Schleifen . . . . .	109

5.2.3	Schleifendetektion . . . . .	112
5.3	Algebraische Schleifen . . . . .	114
5.3.1	Analyse und Stabilität . . . . .	114
5.3.2	Lösungsansätze und Fehlerquellen . . . . .	117
5.3.2.1	Gleichungssystembasierte Lösung . . . . .	118
5.3.2.2	Empfindlichkeits-Funktionsbasierte Lösung . . . . .	119
5.4	Regler-Framework und Realisierung der Anti-Windup-Struktur . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>127</b>
<b>Anhang</b>		<b>129</b>
A	Verallgemeinerte Ableitungen . . . . .	129
B	Matrizen . . . . .	130
B.1	Kronecker-Produkt und Identitäten . . . . .	130
B.2	Pseudo-Inverse . . . . .	131
C	Massen-, Coriolismatrizen und Christoffel-Symbole . . . . .	131
C.1	Eigenschaften . . . . .	132
D	Transformation von Bewegungsdifferentialgleichungen . . . . .	133
E	Konvexe Analysis . . . . .	135
E.1	Konvexe Mengen, Kegel und Funktionen . . . . .	135
E.2	Duale und polare konvexe Mengen . . . . .	135
E.3	Normal- und Tangentialkegel . . . . .	136
E.4	Indikatorfunktion konvexer Mengen . . . . .	136
E.5	Verallgemeinerte Ableitung und Subdifferentiale . . . . .	137
E.6	Konjugierte Funktionen, Fenchel-Ungleichung . . . . .	137
E.7	Superpotential- und Bipotential-Funktionen . . . . .	138
E.8	Euklidische und Schrauben-Projektion . . . . .	139
F	Differentielle Flachheit . . . . .	139
G	Bode-Integral der Empfindlichkeits-Funktion, „Wasserbett-Effekt“ . . . . .	140
H	Übertragungsfunktionen in geschlossenen Kreisen . . . . .	142
H.1	Empfindlichkeits- und Kreisübertragungsfunktionen (MIMO) . . . . .	142
H.2	Interpretation: Regler als beobachterbasierte Zustandsrückführung .	143
H.3	Zeitdiskretisierung im Zustandsraum . . . . .	145
<b>Literaturverzeichnis</b>		<b>147</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>		<b>155</b>