

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Zielsetzung	1
1.2	Stand der Technik und Einordnung der Arbeit	3
1.3	Vorgehensweise	6
2	Modellierung von Parallelrobotern	7
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
3	Regelkonzepte	31
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
4	Holistische Regelung	59
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
5	Implementierung, zeitdiskrete Umsetzung	105
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
6	Zusammenfassung und Ausblick	127
Anhang		129
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 Subdifferenziale	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
	Literaturverzeichnis	147
	Abkürzungsverzeichnis	155