
Untersuchung von robusten modellprädiktiven Regelungen zur Anwendung in der Flugführung

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte
Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Heike Sylvia Meinert

aus Rüsselsheim am Main

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. U. Klingauf
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski
Tag der Einreichung:	10.03.2011
Tag der mündlichen Prüfung:	18.05.2011

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	ix
Symbole und Abkürzungen	xix
1 Einführung	1
1.1 Motivation	3
1.2 Beitrag dieser Arbeit	5
1.3 Struktur der Arbeit	7
2 Regelungskonzepte in der Flugführung	11
2.1 Entwicklung der Flugregelung und Flugführung	12
2.2 Aufbau von modernen Flugregelungssystemen	13
2.3 Funktionen moderner Flugregelungssysteme	14
2.3.1 Grundlagen der Flugzeugsteuerung	15
2.3.2 Basisregelung - <i>Stability Augmentation System</i>	16
2.3.3 Flugbahnregelung - <i>Flight Guidance</i>	19
2.3.4 Missionsplanung - <i>Flight Management System</i>	21
2.3.5 Systemintegration	22
2.4 Anforderungen an Flugregelungssysteme	22
2.5 Entwurf von Basis- und Bahnregelungen	24
2.5.1 Polvorgabe	26
2.5.2 Linear-quadratische Regelung	26
2.5.3 Robuste Regelung	26
2.5.4 Dynamische Inversion	27
2.5.5 Model Following	28
2.5.6 Verwendung von Beobachtern und Filtern	28
2.5.7 Aktuelle Forschung	28
2.6 Zusammenfassung	30
3 Modellprädiktive Regelungen	31
3.1 Historie der modellprädiktiven Regelungen	32
3.2 Das Konzept modellprädiktiver Regelungen	34
3.3 Modelle für die Prädiktion in der modellprädiktiven Regelung	37
3.3.1 Modellklassen	37
3.3.2 Einbeziehung von Beschränkungen	52
3.3.3 Verwendung eines Beobachters	56
3.3.4 Geeignete Modelle für MPC in der Flugführung	57
3.4 Berechnung des Regelgesetzes: Optimierung	58
3.4.1 Regulation	59

3.4.2	Folgeregelung	60
3.5	Stabilität von modellprädiktiven Regelungen	62
3.5.1	Unendliche Prädiktionshorizonte	63
3.5.2	Verwendung von mengentheoretischen Ansätzen	63
3.6	Explizite MPC: Die offline Lösung des Optimierungsproblems	64
3.7	Implementierung einer modellprädiktiven Regelung im geschlossenen Kreis	66
3.7.1	Simulationsumgebung	66
3.7.2	Simulationsbeispiel	67
3.8	Aktuelle Forschung	70
3.8.1	Fuzzy MPC	71
3.8.2	Hybride MPC	71
3.8.3	Explizite und Robuste MPC	72
3.9	Zusammenfassung	72
4	Robuste modellprädiktive Regelungen	75
4.1	Überblick über Verfahren der robusten modellprädiktiven Regelung	75
4.2	Beschreibung von Unsicherheiten	77
4.2.1	Parametrische und polytope Unsicherheiten	78
4.2.2	Strukturierte Unsicherheiten	79
4.2.3	Unstrukturierte Unsicherheiten	81
4.3	Mengentheoretische Ansätze in der modellprädiktiven Regelung	81
4.3.1	Invariante Mengen	81
4.3.2	Rechenregeln für Mengen	83
4.4	Min-Max modellprädiktive Regelung	84
4.4.1	Robuste modellprädiktive Regelung im offenen und geschlossenen Kreis	84
4.4.2	Robuste Min-Max MPC mit linearen Matrixungleichungen	86
4.4.3	Explizite robuste Min-Max MPC mit linearen Matrixungleichungen	89
4.4.4	Stabilität von Min-Max modellprädiktiven Regelungen	90
4.4.5	Entwurf von Min-Max modellprädiktiven Regelungen	90
4.4.6	Beispiel einer Min-Max modellprädiktiven Regelung	91
4.5	Aktuelle Forschung	95
4.5.1	Stochastische Formulierungen	95
4.5.2	Model Scheduling	95
4.5.3	Verwendung eines dynamischen Beobachters	96
4.6	Zusammenfassung	97
5	Entwurf einer Tube-Based MPC	99
5.1	Allgemeine Formulierung von Tube-Based modellprädiktiven Regelungen	101
5.2	Garantie robuster Stabilität	102
5.3	Tube-based MPC für Systeme mit parametrischen und polytopen Unsicherheiten	104
5.4	Tube-Based MPC zur Folgeregung	105
5.5	Eigenschaften und Entwurf von Tube-Based modellprädiktiven Regelungen	109
5.6	Beispiel für eine Tube-Based modellprädiktive Regelung	110

5.6.1	Explizite Formulierung des Tube-Based modellprädiktiven Reglers	113
5.6.2	Tube-Based modellprädiktive Folgeregung	115
5.7	Aktuelle Forschung	117
5.8	Zusammenfassung	117
6	Robuste modellprädiktive Regelungen in der Flugführung	119
6.1	Konzepte zur Einbindung von modellprädiktiven Regelungen in die Flugregelung	120
6.1.1	Modellprädiktive Regelungen als Teil der Flugbahnregelung	121
6.1.2	Modellprädiktive Regelungen als Teil der Missionsplanung	123
6.2	Modellbildung	124
6.2.1	Zustandsraummodell zur lateralen Flugführung	125
6.3	Untersuchung von RMPC für die Anwendung in der lateralen Flugführung	129
6.3.1	Vergleichsentswurf einer linearen Flugbahnregelung	130
6.3.2	Min-Max modellprädiktive Regelung	132
6.3.3	Tube-Based modellprädiktive Regelung	136
6.3.4	Auswertung der Rechenzeiten	141
6.3.5	Weitere Schritte	144
6.4	Zusammenfassung	144
7	Zusammenfassung und Ausblick	147
A	Mathematischer Anhang	153
A.1	Konvexe Optimierung	153
A.2	Eigenschaften von Mengen	154
A.3	Polytope	155
B	Algorithmen	157
B.1	Allgemeiner MPC Algorithmus	157
B.2	Berechnung invarianter Mengen	158
	Abbildungsverzeichnis	160
	Literaturverzeichnis	176