

Motion-Cueing-Algorithmen für eine realitätsnahe Bewegungssimulation

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Martin Fischer
aus (Geburtsort): Braunschweig

eingereicht am: 18. Februar 2009
mündliche Prüfung am: 29. Mai 2009

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Karsten Lemmer
Prof. Dr.-Ing. Walter Schumacher

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	i
Vorwort des Autors	iii
Kurzfassung	iv
Abstract	v
Nomenklatur	ix
1 Einleitung	1
1.1 Anwendungsgebiete und Nutzen der Fahrsimulation	1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit	2
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Motion Cueing – Begriffsklärung	5
2.1.1 Motion Cueing	5
2.1.2 Algorithmen	5
2.1.3 Phaseneinteilung	6
2.1.4 Fehlertypen	6
2.1.5 Washout	6
2.1.6 Tilt Coordination	7
2.1.7 In-the-Loop-Methoden	7
2.2 Bewegungswahrnehmung	7
2.2.1 Menschliche Wahrnehmungssysteme	8
2.2.2 Weitere Wahrnehmungsmechanismen	11
2.2.3 Modellbildung	14
2.3 Filtereigenschaften	20
2.4 Koordinatensysteme und -transformation	22
2.5 Statistische Kenngrößen	25
2.6 Übersicht über die Grundlagen	25
3 Stand der Forschung	27
3.1 Klassische Motion-Cueing-Algorithmen	27
3.1.1 Classical Washout	27
3.1.2 Optimal Control	29
3.1.3 Coordinated Adaptive	31

3.2	Weiterführende Ansätze	32
3.2.1	Nichtlinearer Hochpassfilter	32
3.2.2	Frequenzabhängige Skalierung	32
3.2.3	Kompensationsfilter	33
3.2.4	Fahrspurbasierte Algorithmen	34
3.2.5	Modellbasierte prädiktive Regelung	35
3.3	Simulatorspezifische Algorithmen	36
3.3.1	Multi-Freiheitsgrad-Algorithmus	36
3.3.2	Spherical Washout	37
3.4	Zusammenfassende Übersicht über den Stand der Forschung	39
4	Methodik und Einflussgrößen des Motion Cueing	41
4.1	Bewertung von Algorithmen	41
4.1.1	Subjektive Kriterien	42
4.1.2	Objektive Kriterien	46
4.1.3	Objektivierung subjektiver Kriterien	48
4.2	Algorithmen-Design und Wahrnehmungskriterien	54
4.2.1	Fahrdynamische Eingangssignale	55
4.2.2	Skalierung	57
4.2.3	Filtereffekte	59
4.2.4	Tilt Coordination und Drehungseinflüsse	65
4.2.5	Limitierung	73
4.2.6	Weitere wahrnehmungsrelevante Faktoren	83
4.3	Parametrierung	88
4.3.1	Methodische Optimierung	89
4.3.2	Driver-in-the-Loop-Tuning	92
4.3.3	Vergleich der Tuning-Methoden	94
4.4	Bewegungssystem	97
4.4.1	Arbeitsraum	99
4.4.2	Systemdynamik	104
4.5	Zusammenfassung der Methodik und Einflussgrößen	116
5	Resultierende neue Motion-Cueing-Algorithmen	121
5.1	Fast Tilt Coordination	121
5.2	Coordinated Head Rotation	123

5.3	Bewertung der neuen Ansätze	124
5.3.1	Analyse der charakteristischen Eigenschaften	125
5.3.2	Einordnung in den Kontext der Simulation	129
5.4	Zusammenfassung der neuen Algorithmen	132
6	Zusammenfassung	135
	Literaturverzeichnis	139
	Anhang	153
A	Dynamischer DLR-Fahrsimulator SimCar	153
B	Bewegungsplattformen im Überblick	156
C	Herleitungen	159
D	Visualisierung des Arbeitsraumes	166
E	Übersicht über Simulator-Studien	168
F	Parametrierungen der Motion-Cueing-Algorithmen	172
G	Eigene Versuche	174