

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v	
1	Einleitung	1
2	Lineare Systeme	5
2.1	Zustandsraumdarstellung linearer Systeme	7
2.2	Eigenwerte und Eigenvektoren	9
2.3	Lineare Systeme im Zeitdiskreten	15
2.4	Nichtlinearitäten	24
3	Inertiale Navigation	27
3.1	Koordinatensysteme	28
3.1.1	WGS84-Erdmodell	30
3.1.2	Transformationen	32
3.1.3	Nomenklatur	34
3.2	Lagedarstellungen	36
3.2.1	Eulerwinkel	37
3.2.2	Orientierungsvektor und Quaternion	39
3.2.3	Richtungskosinusmatrix	44
3.3	Strapdown-Rechnung	45
3.3.1	Lage	45
3.3.2	Geschwindigkeit	52
3.3.3	Position	60
3.4	Fehlercharakteristik eines Inertialnavigationssystems	61
3.4.1	Drehratensensoren	61
3.4.2	Beschleunigungsmesser	66
3.4.3	Generische Inertialsensorfehlermodelle	68
3.4.4	Kurzzeitcharakteristik	73
3.4.5	Langzeitcharakteristik	75
3.5	Initialisierung	77

4	Satellitennavigation	83
4.1	Navstar GPS Systemüberblick	83
4.2	Funktionsprinzip eines GPS-Empfängers	85
4.2.1	GPS-Signalstruktur	86
4.2.2	Akquisition	92
4.2.3	Tracking	95
4.3	GPS-Beobachtungsgrößen	100
4.3.1	Pseudorange	100
4.3.2	Trägerphasenmessung	104
4.3.3	Deltarange	107
4.3.4	Fehlerquellen	108
4.3.5	Differential GPS	109
4.4	GPS-Modernisierung	110
4.5	Galileo Systemüberblick	111
5	Grundlagen der Stochastik	117
5.1	Die Zufallsvariable	117
5.1.1	Wahrscheinlichkeitsdichte	117
5.1.2	Gaußverteilung	120
5.2	Stochastische Prozesse	123
5.2.1	Weißes Rauschen	124
5.2.2	Zeitkorreliertes Rauschen	125
6	Das Kalman-Filter	129
6.1	Kalman-Filter-Gleichungen	130
6.1.1	Herleitung über normalverteilte Zufallsvektoren	130
6.1.2	Herleitung über Minimierung einer Kostenfunktion	133
6.1.3	Diskussion der Filtergleichungen	136
6.2	Beobachtbarkeit	140
6.3	Übergang kontinuierlich - diskret	141
6.4	Nichtlineare System- und Messmodelle	143
6.4.1	Linearisiertes Kalman-Filter	143
6.4.2	Erweitertes Kalman-Filter	146
6.4.3	Sigma-Point-Kalman-Filter	147
6.4.4	Kalman-Filter 2. Ordnung	155
6.5	Filterung bei zeitkorreliertem Rauschen	156
6.5.1	Erweiterung des Zustandsvektors	157
6.5.2	Messwertdifferenzen	158

6.6	Covariance Intersection	159
6.6.1	Bekannte Kreuzkorrelationen	160
6.6.2	Unbekannte Kreuzkorrelationen	162
6.7	Adaptive Filterung	167
6.7.1	Interacting Multiple Model Filter: Problemformulierung	167
6.7.2	Herleitung der IMM-Filtergleichungen	168
7	Monte-Carlo-Methoden	177
7.1	Chapman-Kolmogorov-Gleichung	177
7.2	Berücksichtigung von Beobachtungen	179
7.3	Partikelfilter	180
7.3.1	Repräsentation der WDF	180
7.3.2	Propagationsschritt	181
7.3.3	Estimationsschritt	181
7.3.4	Resampling	182
7.3.5	Simulationsergebnisse	184
8	Anwendungsbeispiel GPS/INS-Integration	189
8.1	GPS/INS-Integrationsstrategien	190
8.1.1	Loosely Coupled System	190
8.1.2	Tightly Coupled System	191
8.1.3	Ultra-Tight Integration und Deep Integration	191
8.2	Entwurf eines Navigationsfilters	192
8.2.1	Systemmodell	192
8.2.2	Messmodelle	203
8.2.3	Korrektur der totalen Größen	210
8.2.4	Vergleich von Loosely Coupled und Tightly Coupled Systemen	212
8.3	Nutzung von Trägerphasenmessungen	215
8.3.1	Carrier Aided Smoothing	217
8.3.2	Festlegung der Trägerphasenmehrdeutigkeitswerte	218
8.3.3	Zeitlich differenzierte Trägerphasenmessungen	221
8.4	Verzögerte Verfügbarkeit von Messwerten	229
8.5	Integrity Monitoring	236
8.6	Sigma-Point-Kalman-Filter	237
8.6.1	Nichtlinearität eines Schätzproblems	237
8.6.2	Simulationsergebnisse	240
8.6.3	Theoretischer Vergleich mit Objektverfolgung	249
8.7	Fixed-Interval Smoother	251
8.7.1	Gleichungen des RTS-Smothers	251
8.7.2	Simulationsergebnisse	253

9	Anwendungsbeispiel Transfer Alignment	255
9.1	Konventionelle Transfer-Alignment-Verfahren	255
9.2	Rapid Transfer Alignment	256
9.3	Effiziente Berücksichtigung von Zeitkorrelationen	259
9.3.1	Propagationsschritt	261
9.3.2	Messwertverarbeitung	262
9.3.3	Diskussion der Filtergleichungen	263
9.4	Numerische Simulation	264
9.4.1	Erzeugung von Inertialsensordaten	265
9.4.2	Ergebnisse	266
9.5	Adaptive Schätzung der Rauschprozessmodelle	269
9.5.1	Identifikation anhand von Messwertdifferenzen	270
9.5.2	Ergebnisse	273
10	Anwendungsbeispiel unbemanntes Fluggerät	277
10.1	Beobachtbarkeit des Yaw-Winkels	279
10.1.1	Stützung mit Erdmagnetfeldmessungen	281
10.2	Stabilisierung bei GPS-Ausfall	283
10.2.1	Systemmodell des Lagefilters	284
10.2.2	Stützung mit Beschleunigungsmessungen	284
10.3	Systemsimulation	285
10.3.1	Funktionsprinzip des Fluggeräts	287
10.3.2	Mathematisches Modell	287
10.3.3	Einfluss der Trajektoriendynamik	292
10.3.4	Schätzung von Modellparametern	293
10.3.5	Ergebnisse der Gesamtsystemsimulation	297
10.4	Experimentelle Verifikation	298
10.4.1	Kalibration der Beschleunigungsmesser	300
10.4.2	Ergebnisse	303
A	Sherman-Morrison-Woodbury-Formel	307
B	Differentiation von Spuren von Matrizen	311
C	MATLAB-Code zum Beispiel Abschnitt 7.3.5	313
Symbolverzeichnis		316
Literaturverzeichnis		323
Index		333