

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Symbole	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Struktur der Arbeit	3
1.3 Eigener Beitrag	4
2 Mathematische Grundlagen	5
2.1 Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie	5
2.1.1 Zufallsexperiment	5
2.1.2 Zufallsgröße	6
2.1.3 Zufallsvektor	8
2.1.4 Erwartungswerte und Momente	8
2.1.5 Endliche Zufallsmengen	9
2.1.6 Bedingte Wahrscheinlichkeit	10
2.1.7 Stochastische Unabhängigkeit	10
2.1.8 Marginalisierung	11
2.2 Schätzwerte	12
2.3 Normalverteilte Zufallsgrößen	13
2.3.1 Dichte der Normalverteilung	13
2.3.2 Affine Abbildungen	14
2.3.3 Marginalisierung und bedingte Dichten	14
2.3.4 Summation	15
2.3.5 Multiplikation	15
2.4 Metrik	16
2.4.1 <i>Minkowski</i> -Norm	16
2.4.2 <i>Mahalanobis</i> -Distanz	16
2.4.3 <i>Fréchet</i> -Distanz	17
3 Bayes'sche Zustandsschätzung	19
3.1 Systemmodell für Systeme mit vektorwertigem Zustand	20
3.2 <i>Bayes</i> -Rekursion	21

3.3	Kalman-Filter	25
4	Handhabung nichtnormalverteilter und nichtlinearer Modelle	27
4.1	Approximation der Systemfunktionen	27
4.1.1	Taylor-Reihen	27
4.1.2	Interpolation der Systemfunktionen	30
4.2	Dichteapproximationen	30
4.2.1	Unscented-Transformation	30
4.2.2	Partikeldarstellungen	33
4.3	Gauß-Summen	41
4.3.1	Reduktion	42
4.4	Experimente	46
4.5	Diskussion	50
5	Mehrmodell-Ansätze	53
5.1	Prädiktionsschritt	54
5.1.1	Modellierung mittels Markov-Ketten	56
5.1.2	Klassifikationsbasierte Modellierung	57
5.1.3	Modellwahl	58
5.2	Korrekturschritt	59
5.2.1	Bestimmung der Modus-Likelihood	60
5.3	Experimente	60
5.3.1	Modell-Satz	61
5.3.2	Modell-Parameter	63
5.3.3	Filter-Implementierung	65
5.3.4	Simulationsergebnisse	67
6	Mehrobjekt-Zustandsschätzung	71
6.1	Anwendung im Automobilbereich	72
6.1.1	Vorüberlegungen und Rahmenbedingungen	73
6.1.2	Vorgeschlagenes Rahmenwerk	78
6.2	Statistik für endliche Zufallsmengen	80
6.2.1	Mengenableitung und Mengenintegral	81
6.2.2	Bayes-Rekursion für endliche Zufallsmengen	82
6.2.3	Wahrscheinlichkeitserzeugendes Funktional	83
6.2.4	Probability hypothesis density	87
6.3	Konkrete Mehrobjekt-Zustandsschätzer	87
6.3.1	Entwurf von Mehrobjekt-Zustandsschätzern	88
6.3.2	Prädiktions-WEF des Mehrobjekt-Zustandes	90

6.3.3	Verbund-WEF für Messungen, Objekte und Sensor	90
6.3.4	<i>Probability-Hypothesis-Density-Filter</i>	91
6.3.5	<i>Joint-Integrated-Probabilistic-Data-Association-Filter</i>	93
6.3.6	<i>Cardinality-Balanced-Multi-Target-Multi-Bernoulli-Filter</i>	97
6.3.7	Implementierungshürden	99
6.4	Mehrobjekt-Zustandsschätzung mit modifizierter <i>Likelihood</i>	104
6.4.1	Messmodell und Verbund-WEF für Messungen, Objekte und Sensor	104
6.4.2	<i>Probability-Hypothesis-Density-Filter</i>	107
6.4.3	<i>Joint-Integrated-Probabilistic-Data-Association-Filter</i>	108
6.4.4	<i>Cardinality-Balanced-Multi-Target-Multi-Bernoulli-Filter</i>	110
6.4.5	Implementierungen	113
6.5	Experimente	123
6.5.1	<i>Optimal-Subpattern-Assignment</i> -Metrik	123
6.5.2	Simulation	126
7	Zusammenfassung und Ausblick	139
A	σ-Punkt-Mengen	141
A.1	Skalierung	141
A.2	Skalierte symmetrische σ -Punkte	142
A.3	Sphärischer-Simplex σ -Punkte	142
A.4	<i>Cubature-Kalman-Filter</i>	143
B	Wichtige Klassen endlicher Zufallsmengen	145
B.1	<i>Poisson</i> -verteilte endliche Zufallsmengen	145
B.2	<i>Bernoulli</i> -verteilte endliche Zufallsmengen	146
B.3	<i>Multi-Bernoulli</i> -verteilte endliche Zufallsmengen	147
C	Bewegungsmodelle	149
C.1	Kinematische Bewegungsmodelle	149
C.1.1	Gleichförmige Bewegung	149
C.1.2	Bewegung mit konstanter Beschleunigung	150
C.1.3	Bewegung mit konstanter Beschleunigung und Gierrate	150
C.2	Mehrobjekt-Bewegungsmodell	152

D	Sensormodelle	155
D.1	Modelle für Detektionen	155
D.1.1	Radar/Lidar	155
D.1.2	Mono-/Stereokamera	156
D.2	Modell für Messungen	159
E	Herleitungen	161
E.1	Linearität des Erwartungswertes	161
E.2	Korrekturschritt mit zwei unabhängigen Sensoren	161
E.3	Randdichte und bedingte Dichte bei bekannter Größe	162
E.4	Transitionsdichte bei gegebener Partikelposition	162
E.5	Quotientenregel für WEF	163
E.6	Binomische Formel für endliche Mengen	163
E.7	Prädiktion des PHD-Filters	163
E.8	Ableitung des Verbund-WEFs für PHD-Filter	164
E.9	Prädiktion des JIPDA-Filters	166
E.10	Ableitung des Verbund-WEFs für JIPDA-Filter	166
E.11	Ableitung des Verbund-WEFs für CBMeMber-Filter	167
E.12	Ableitung des modifizierten Verbund-WEFs für PHD-Filter	169
E.13	WEF der Fehldetektions-Hypothesen im CBMeMber-Filter	170
E.14	PHD der detektionsinduzierten Hypothesen im CBMeMber-Filter	171
E.15	PHD des Sensorzustandes im CBMeMber-Filter mit modi- fizierter <i>Likelihood</i>	172
E.16	Rekursive Berechnung der Subassoziations- <i>Likelihood</i> und -Matrix	173
F	Pseudocode für die effiziente Berechnung von A	175
	Literaturverzeichnis	177