

FORTSCHRITT-  
BERICHTE

**VDI**

Dipl.-Ing. Uwe Hanebeck, München

**Lokalisierung eines  
mobilen Roboters mittels  
effizienter Auswertung  
von Sensordaten  
und mengenbasierter  
Zustandsschätzung**

Reihe **8**: Meß-, Steuerungs-  
und Regelungstechnik

Nr. **643**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Notation</b>	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Anforderungen und Ziele . . . . .	1
1.3 Stand der Technik und Beitrag dieser Arbeit . . . . .	3
1.4 Übersicht über die Arbeit . . . . .	5
<b>2 Mengenbasierte Zustandsschätzung</b>	<b>6</b>
Einleitung . . . . .	6
2.1 Bekannte Ansätze . . . . .	6
2.2 Ziel und verfolgte Methodik . . . . .	8
2.3 Überblick über das Kapitel . . . . .	8
2.4 Kombination von Zustandsschätzungen . . . . .	9
2.4.1 Hüllellipsoid für die Schnittmenge zweier Ellipsoide . . . . .	10
2.4.2 Effizienter Überlappungstest für zwei Ellipsoide . . . . .	11
2.4.3 Minimalvolumiges Hüllellipsoid für die Schnittmenge . . . . .	13
2.5 Zustandsschätzung für statische Systeme . . . . .	15
2.5.1 Das Systemmodell . . . . .	15
2.5.2 Menge aller Zustände definiert durch die Beobachtung . . . . .	15
2.5.3 Mengenbasierter Hypothesentest . . . . .	16
2.6 Zustandsschätzung für dynamische Systeme . . . . .	16
2.6.1 Das Systemmodell . . . . .	17
2.6.2 Mengenbasierte Prädiktion des Systemzustands . . . . .	17
2.6.3 Mengenbasierte Fusion von Prädiktion und Messung . . . . .	18
2.6.4 Spezialfall: Skalare Messung . . . . .	22
2.7 Robuste Zustandsschätzung . . . . .	25
2.7.1 Schwächen der vorgestellten Zustandsschätzer . . . . .	25
2.7.2 Erhöhung der Robustheit durch Konsistenzmaße . . . . .	25
Wesentliche Ergebnisse des Kapitels . . . . .	28

<b>3</b>	<b>Lokalisierung eines mobilen Roboters</b>	<b>29</b>
	Einleitung . . . . .	29
3.1	Anschauliche Beschreibung des Lokalisierungsverfahrens . . . . .	30
3.2	Umweltmodell . . . . .	32
3.3	Bestimmung der initialen Roboterlage . . . . .	34
	3.3.1 Schnelle Exploration des Interpretationsbaums . . . . .	36
	3.3.2 Behandlung von Fehlmessungen . . . . .	37
3.4	Fortschreibung der Roboterlage durch Koppelnavigation . . . . .	38
	3.4.1 Koppelnavigationsgleichungen . . . . .	38
	3.4.2 Perturbationsanalyse für die Koppelnavigation . . . . .	39
	3.4.3 Omnidirektionale Roboter mit konventionellen Rädern . . . . .	40
3.5	Rekursive Lokalisierung mit Winkelmeßsystemen . . . . .	41
	3.5.1 Bestimmung potentiell sichtbarer Landmarken . . . . .	42
	3.5.2 Aufstellen von Winkelhypothesen . . . . .	43
	3.5.3 Menge der Roboterlagen definiert durch die Winkelmessung . . . . .	44
	3.5.4 Fusion der Winkelmessung mit prädizierter Roboterlage . . . . .	44
	3.5.5 Zusammenfassung . . . . .	44
3.6	Rekursive Lokalisierung mit Distanzsensor-Arrays . . . . .	45
	3.6.1 Dynamische Rekonfigurierung . . . . .	46
	3.6.2 Bildung von Meßhypothesen zur Vermeidung von Störungen . . . . .	48
	3.6.3 Zeitmultiplex-Verfahren zur Erhöhung der Meßrate . . . . .	49
	3.6.4 Sensor-Arrays zur Vermessung von Umweltmerkmalen . . . . .	51
	3.6.5 Roboterlage aus gemessener Landmarkenlage . . . . .	52
	3.6.6 Fusion einer Messung mit der prädizierten Roboterlage . . . . .	53
	3.6.7 Zusammenfassung . . . . .	53
3.7	Fusion der Daten des Multisensorsystems . . . . .	53
	3.7.1 Vorteile eines Multisensorsystems . . . . .	53
	3.7.2 Dezentrale Fusion der Sensordaten . . . . .	55
	3.7.3 Gesamtübersicht zur rekursiven Lokalisierung . . . . .	58
	Wesentliche Ergebnisse des Kapitels . . . . .	58

<b>4</b>	<b>Effiziente Auswertung von Sensordaten</b>	<b>60</b>
	Einleitung . . . . .	60
4.1	Winkelmeßsysteme . . . . .	60
4.1.1	Formulierung des Problems . . . . .	60
4.1.2	Bekannte Ansätze . . . . .	62
4.1.3	Ein lineares Gleichungssystem für die Beobachterposition . . . . .	62
4.1.4	Perturbationsanalyse . . . . .	63
4.1.5	Bestimmung der Beobachterposition . . . . .	64
4.2	Distanzsensor-Arrays beliebiger Geometrie . . . . .	65
4.2.1	Formulierung des Problems . . . . .	65
4.2.2	Bekannte Ansätze . . . . .	66
4.2.3	Landmarkenmodelle . . . . .	66
4.2.4	Bestimmung der Position von punktförmigen Landmarken . . . . .	67
4.2.5	Bestimmung der Lage von ebenen Landmarken . . . . .	71
4.2.6	Unterscheidung von Landmarkentypen . . . . .	73
4.2.7	Spezialfall: Lineare Arrays . . . . .	73
4.2.8	Spezialfall: Planare Arrays . . . . .	76
4.2.9	Rekursive Formulierung . . . . .	76
	Wesentliche Ergebnisse des Kapitels . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Experimentelle Validierung</b>	<b>81</b>
	Einleitung . . . . .	81
5.1	Multisensorsystem . . . . .	82
5.1.1	Odometrie und Kreisel . . . . .	83
5.1.2	Winkelmeßsystem . . . . .	84
5.1.3	Ultraschallsensor-Array . . . . .	85
5.2	Langstreckenexperiment: Flächendeckende Inspektion . . . . .	87
	Wesentliche Ergebnisse des Kapitels . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>92</b>
<b>A</b>	<b>Ergänzungen zur Auswertung von Sensordaten</b>	<b>94</b>
A.1	Berechnung des Landmarkenabstands gemäß (4.14) . . . . .	94
A.2	Jacobi-Matrizen zu Abschnitt 4.1.4 . . . . .	95

<b>B Mengenbasierte Zustandsschätzung</b>	<b>96</b>
B.1 Beschreibung von Ellipsoiden . . . . .	96
B.2 Affine Transformation eines Ellipsoids . . . . .	96
B.3 Volumen eines Ellipsoids . . . . .	96
B.4 Transformation eines Ellipsoidenpaars . . . . .	97
B.5 MINKOWSKI-Summe zweier Ellipsoide . . . . .	98
B.5.1 Spezialfall: Addition von skalaren Größen . . . . .	99
B.6 Zusammenfassung von Zuständen . . . . .	100
B.7 Ergänzungen zur statischen Zustandsschätzung . . . . .	101
B.7.1 Beweis von Satz 2.5 . . . . .	101
B.7.2 Beweis von Satz 2.6 . . . . .	101
<b>C Das SSI-Filter</b>	<b>102</b>
C.1 Problemformulierung . . . . .	102
C.2 Zwei Informationsquellen . . . . .	103
C.2.1 Stochastische Fehler beliebiger Dichte . . . . .	103
C.2.2 Gaußverteilte stochastische Fehler . . . . .	104
C.3 $N$ Informationsquellen . . . . .	106
C.3.1 Stochastische Fehler beliebiger Dichte . . . . .	106
C.3.2 Gaußverteilte stochastische Fehler . . . . .	108
C.4 Simulative Beispiele zur Lokalisierung mobiler Roboter . . . . .	108
C.5 Schlußbemerkungen . . . . .	110
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>112</b>