

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	3
1.2	Ansätze zur Lokalisierung von mobilen Robotern	7
1.2.1	Verfahren zur Ermittlung der absoluten Lage eines mobilen Roboters	7
1.2.2	Verfahren zur Ermittlung der relativen Lage und Aufbau einer Landkarte	13
1.2.3	Behandlung der Unsicherheit	15
1.2.4	Bewertung der Ansätze und offene Fragen	19
1.3	Beitrag dieser Arbeit	22
2	Mengenbasierte und probabilistische Ansätze	26
2.1	Auswertung von Sensordaten	26
2.1.1	Schätzungsproblem	27
2.1.2	Zuordnungsproblem	28
2.2	Mengentheoretische Ansätze	29
2.2.1	Grundlagen	29
2.2.2	Existierende Ansätze	31
2.3	Intervallararithmetik	34
2.3.1	Überblick	34
2.3.2	Grundlagen der Intervallararithmetik	35
2.3.3	Die Schätzung von Parametern	38
2.4	Probabilistische Ansätze	42
2.4.1	Rekursive Schätzung	43
2.4.2	Iterierter Erweiterter Kalman-Filter	46
2.4.3	Zuordnungsproblem: Mahalanobis-Distanz	47
3	Lokalisierung eines mobilen Roboters	49
3.1	Sensormodell	50
3.1.1	Abbildungsmodell eines Szenenpunktes mit einer Kamera	51
3.1.2	Modellierung der Roboterlage	53
3.1.3	Modellierung der Stereo-Kameraanordnung	55
3.1.4	Modellierung der Abbildung vertikaler Landmarken	55
3.2	Problemformulierung und Lösungsansatz	57
3.2.1	Formulierung	59
3.2.2	Lösungsansatz	60
3.3	Problem der Stereo-Triangulation	61
3.3.1	Unsicherheitsfreie Lösung	62
3.3.2	Berücksichtigung der Unsicherheit	65
3.3.3	Veränderliche Basislänge der Stereo-Anordnung	75
3.3.4	Algorithmus zur Stereo-Triangulation	76
3.3.5	Dynamisches Modell zur Stereo-Triangulation	77

3.4	Lösung des Korrespondenzproblems	80
3.4.1	Dreiecksbeschreibung von Punkten und Stereo-Regionen	82
3.4.2	Algorithmus zur Suche nach konsistenten Dreiecken	88
3.4.3	Algorithmus zur Trennung von konsistenten Dreiecken	91
3.4.4	Komplexität der Algorithmen	94
3.4.5	Erweiterungen zur Berücksichtigung der Unsicherheit in der Weltkarte	94
3.5	Schätzung der Roboterlage	97
3.5.1	Unsicherheitsfreie Weltkarte	97
3.5.2	Berücksichtigung der Unsicherheit in der Weltkarte	101
3.5.3	Dynamisches Modell zur Schätzung der Roboterlage	102
4	Probabilistischer Ansatz	104
4.1	Stereo-Triangulation	104
4.2	Korrespondenzproblem	107
4.3	Schätzung der Roboterlage	110
5	Experimentierumgebung und Verfahrensablauf	113
5.1	Technische Umgebung	115
5.1.1	Der mobile Roboter der Universität Karlsruhe	115
5.1.2	Schlitten-Stereo-Anordnung	116
5.2	Rechnerumgebung	117
5.2.1	Das Bildauswertesystem VISTA	117
5.2.2	Der Arbeitsplatzrechner	122
5.3	Verfahrensablauf und Rechnerstruktur	123
5.3.1	Erste Entwicklungsphase	123
5.3.2	Zweite Entwicklungsphase	126
6	Experimentelle Ergebnisse	128
6.1	Systemparameter und Kalibrierung	128
6.1.1	Kalibrierung der CCD-Kameras	128
6.1.2	Bestimmung der Unsicherheit	129
6.2	Erste Entwicklungsphase	132
6.2.1	Experiment 1	132
6.2.2	Experiment 2	134
6.3	Zweite Entwicklungsphase	137
6.3.1	Beschreibung der Experimente	137
6.3.2	Mengenbasierter Ansatz	141
6.3.3	Probabilistischer Ansatz	142
6.3.4	Gegenüberstellung von mengenbasiertem und probabilistischem Ansatz	152
7	Diskussion und Ausblick	154
A	Mathematische Notation	157
B	Mengen und Intervalle	159
B.1	Mengen und Abbildungen	159
B.2	Intervalle und Intervallarithmetik	159
C	Homogene Transformationen	163

D Untersuchungen zu Kapitel 3	165
D.1 Maximaler Winkel zwischen Stereo-Regionen	165
E Probabilistische Schätzung	167
E.1 Iteriertes Erweitertes Kalman-Filter	167
E.2 Zuordnungsproblem	168
E.3 Stereo-Triangulation	169
E.4 Korrespondenzproblem	170
E.5 Schätzung der Roboterlage	171
Anhang	157
Literaturverzeichnis	173