
Inhaltsverzeichnis

1	Zum Einstieg: Worum geht es?	1
1.1	Was ist ein Roboter?	1
1.2	Beispiele für mobile Roboter	4
1.2.1	Staubsauger„roboter“	7
1.2.2	Marserkundung: Spirit und Opportunity	8
1.2.3	Wüstenrallye: Stanley	9
1.2.4	Roboterfußball: Tribot	11
1.2.5	Simulierte Roboter: Zum Beispiel KURT	13
1.3	Übersicht	15
2	Sensorik	23
2.1	Allgemeines	23
2.2	Bewegungsmessung	28
2.2.1	Drehwinkelmessung	28
2.2.2	Beschleunigungssensoren	31
2.3	Ausrichtungsmessung	32
2.3.1	Kompasse	33
2.3.2	Inklinometer	33
2.4	Globale Positionsbestimmungssysteme	33
2.4.1	GPS	34
2.4.2	Differentielles GPS	35
2.4.3	GLONASS, Galileo und Compass	36
2.5	Entfernungsmessung	36
2.5.1	Messprinzipien	37
2.5.2	Ultraschall-Entfernungsmesser	39
2.5.3	Infrarotsensoren	40
2.5.4	Laserscanner	42
2.5.5	Radar	49
2.6	Kameras und Kameramodelle	51
2.6.1	Omnidirektionale Kameras	55
2.6.2	Stereokameras	57

2.6.3	3D-Kameras	60
3	Sensordatenverarbeitung	67
3.1	Entfernungsdaten	67
3.1.1	Messfehler filtern	67
3.1.2	Linienerkennung	69
3.2	Bildmerkmale	74
3.2.1	Faltungen von Bildern	76
3.2.2	Kantenerkennung	76
3.2.3	Eckenerkennung und der Harris Corner Detektor	80
3.2.4	SIFT-Merkmale	81
3.2.5	SURF-Merkmale	85
3.2.6	Haar-Merkmale	89
3.3	Stereobildverarbeitung	91
3.4	Optischer Fluss und Struktur aus Bewegung	95
3.4.1	Optischer Fluss	95
3.4.2	Struktur aus Bewegung	98
4	Fortbewegung	103
4.1	Einleitung	103
4.1.1	Radfahrzeuge	105
4.1.2	Laufmaschinen	109
4.2	Bewegungsschätzung	110
4.2.1	Differentialantrieb	111
4.2.2	Einachsige Lenkung	114
4.2.3	Omnidirektionaler Antrieb	118
4.3	Bayes- und Kalman-Filter	123
4.3.1	Grundlagen	124
4.3.2	Bayes-Filter	128
4.3.3	Kalman-Filter	133
4.4	Fusion von Odometriedaten	144
4.4.1	Gyrodometrie	144
4.4.2	Winkelhistogramme	147
5	Lokalisierung in Karten	155
5.1	Karten	155
5.1.1	Karten zur Lokalisierung	160
5.1.2	Karten zur Lokalisierung & Pfadplanung: Rasterkarten	164
5.1.3	Karten zur Pfadplanung	166
5.2	Triangulation	170
5.2.1	Der Rückwärtsschnitt	170
5.2.2	Der Vorwärtsschnitt über Dreieckswinkel	172
5.2.3	Triangulation mit Entfernungswerten: Der Bogenschnitt	176
5.3	Lokalisierungs-Algorithmen	176
5.3.1	2D-Scanmatching	177

5.3.2	Lokalisierung an Linien	189
5.3.3	Merkmalsbasierte Lokalisierung	191
5.3.4	Kalman-Lokalisierung	193
5.3.5	Markow-Lokalisierung	201
5.3.6	Monte-Carlo-Lokalisierung	204
6	Kartierung	221
6.1	Überblick	221
6.2	Kartierung bei bekannten Posen	226
6.3	Inkrementelles SLAM	229
6.3.1	EKF-SLAM	229
6.3.2	FastSLAM	232
6.4	Vollständiges SLAM	239
6.4.1	GraphSLAM	239
6.4.2	Scanmatching-basiertes GraphSLAM	241
6.4.3	6D-SLAM	249
7	Navigation	261
7.1	Hintergrund	261
7.2	Navigation auf Basis von Reflexen: Braitenberg-Vehikel	264
7.3	Reaktive Navigation	266
7.3.1	Freiraumnavigation mit Spurfahrt	266
7.3.2	Konturverfolgung	268
7.3.3	Bug-Algorithmen	268
7.4	Pfadplanung	272
7.4.1	Sichtbarkeitsgraphen	275
7.4.2	Probabilistische Straßenkarten	276
7.4.3	Voronoi-Diagramme als Straßenkarten	278
7.4.4	Pfadplanung in Raster- und Zellkarten	280
7.4.5	Potenzialfelder	281
7.4.6	Pfadpläne ausführen	284
7.5	Explorationsplanung	285
7.5.1	Theorie zur Polygonexploration	286
7.5.2	Polygonexploration	288
7.5.3	Planen in Rasterkarten	290
7.6	Planbasierte Robotersteuerung	290
7.6.1	Planungsdomänen und -algorithmen	293
7.6.2	Warum fällt Robotern das Planen schwer?	295
8	Umgebungsdateninterpretation	301
8.1	Objektverankerung	302
8.2	Semantische Karten	306
8.2.1	Wissensrepräsentation und Inferenz	307
8.2.2	Was ist eine semantische Karte?	310
8.2.3	Kartierung für semantische Karten	312

9	Roboterkontrollarchitekturen	317
9.1	Architekturschemata	320
9.2	ROS	326
9.2.1	Design-Prinzipien	326
9.2.2	Nomenklatur	329
9.2.3	Anwendungen	329
10	Ausblick	335
A	Mathematische Grundlagen	343
A.1	Rotation	343
A.1.1	Rotationsdarstellung	343
A.1.2	Rotationsmatrizen	344
A.1.3	Homogene Koordinaten	346
A.2	Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitstheorie	347
A.3	Lösen linearer Gleichungssysteme	352
A.4	Hauptkomponentenanalyse	353
B	Algorithmische Grundlagen	359
B.1	Suchverfahren	359
B.1.1	Tiefen- und Breitensuche	359
B.1.2	Der A*-Algorithmus	360
B.2	Bäume zur Raumrepräsentation	362
B.2.1	kD-Bäume	362
B.2.2	Quadrees	366
B.2.3	Octrees	366
C	Regelungstechnische Grundlagen	369