

Dipl.-Phys. Peter Weckesser, Karlsruhe

**Aktiver Einsatz eines
Multisensorsystems zur
Exploration der Umwelt mit
einem mobilen Roboter**

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

Nr. **654**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Begriffsdefinitionen	3
1.2	Das mobile Robotersystem PRIAMOS	5
1.3	Aufgabenstellung und Beitrag dieser Arbeit	7
1.4	Gliederung der Arbeit	9
2	Sensorsysteme für mobile Roboter - ein Überblick	11
2.1	Sensoren für mobile Roboter	11
2.1.1	Das allgemeine Sensormodell	15
2.2	Interne Sensoren	15
2.2.1	Odometrie-Sensoren	15
2.2.2	Gyroskope	16
2.3	Externe Sensoren	16
2.3.1	Ultraschallsensoren	16
2.3.2	CCD-Kameras	18
2.3.2.1	Geometrische Erfassung einer Szene	19
2.3.2.2	Aktive Kamerasysteme	20
2.3.3	Laserscanner	22
2.4	Aktiver Sensoreinsatz und Sensorfusion	23
2.5	Umweltexploration	25
2.6	Mobile Roboter und deren Sensorsysteme	26
3	Geometrische Szenenrekonstruktion mit CCD-Kameras	29
3.1	Digitale Kameras	31
3.2	Kameramodellierung und Kalibrierung	34
3.2.1	Das Lochkameramodell	35
3.2.2	Koordinatensysteme	38
3.2.3	Innere und äußere Orientierung	39
3.2.4	Direkte Lineare Transformation	43
3.2.4.1	Bestimmung der DLT-Matrix	44
3.2.4.2	Weitere Kalibrierungsverfahren	47
3.3	Kalibrierung eines aktiven Kamerasystems	47
3.3.1	Steuerung der externen Kameraparameter	50
3.3.2	Steuerung der internen Kameraparameter	53
3.4	Bestimmung von Stereo-Korrespondenzen	55
3.4.1	Kombination von gebiets- und merkmalsbasierten Zuordnungsverfahren	56

3.4.1.1	Epipolare Geometrie	57
3.4.1.2	Korrelationsverfahren	58
3.4.1.3	Ein Beispiel für die trinokulare Zuordnung von Kanten- segmenten	60
3.5	Szenenrekonstruktion	60
3.5.1	Unsicherheit der Szenenrekonstruktion	62
3.5.1.1	Explizite Fehlerabschätzung nach Gauß	63
3.5.2	Repräsentation von Kanten in einer dreidimensionalen Umwelt . . .	64
3.5.3	Szenenrekonstruktion anhand eines Beispiels	65
4	Geometrische Szenenerfassung mit abstandsmessenden Laserscannern	67
4.1	Planar messende Laserscanner	67
4.1.1	Experimentelle Untersuchungen zur Meßgenauigkeit	69
4.1.2	Repräsentation der Unsicherheit der Einzelmessung	71
4.2	Segmentierung der Abstandsmessungen	72
4.2.1	Unsicherheit der symbolischen Repräsentation	73
5	Steuerung eines aktiven Multisensorsystems zur Roboternavigation	78
5.1	Systemmodelle für die Auswertung von Sensordaten	79
5.1.1	Systemmodell für ein aktives Multisensorsystem	79
5.2	Anwendung des Systemmodells zur Roboternavigation	82
5.2.1	Abbildung des Systemmodells auf die Diskurswelt	83
5.3	Strukturwissen für die Roboternavigation	83
5.3.1	Umweltmodelle	83
5.3.1.1	Geometrisches Umweltmodell	84
5.3.1.2	Topologisches Umweltmodell	86
5.3.1.3	Generische Modelle für Objekte des Umweltmodells	86
5.4	Aufgabenbeschreibung	87
5.5	Prozeßwissen für die Roboternavigation	87
5.6	Steuerung eines aktiven Multisensorsystems	88
5.6.1	Kooperativer Einsatz von Odometrie, Kamerasystem und Laser- scanner	88
5.6.1.1	Zustandsschätzung mit Hilfe von internen Sensoren	88
5.6.1.2	Transformation der Primitive von Roboter- auf Umwelt- koordinaten	89
5.6.2	Steuerbare Parameter der Bildauswertung	90
5.6.2.1	Steuerbare Parameter bei der Bildakquisition	91
5.6.2.2	Steuerung der Detektion von Grauwertkanten	93
5.6.2.3	Extraktion von linearen Kantensegmenten	95
5.6.2.4	Hough-Filterung	96
5.6.2.5	Steuerung der Stereo-Korrespondenzfindung und der Stereo- Rekonstruktion	99
5.6.3	Steuerbare Parameter bei der Auswertung der Abstandsmessungen des Laserscanners	99
5.7	Einsatz des Multisensorsystems zur Roboternavigation	100
5.7.1	Kollisionsvermeidung	101
5.7.2	Zustandsbestimmung	101

5.7.2.1	Zustandsbestimmung mit Hilfe von Landmarken	102
5.7.2.2	Orientierungsbestimmung mit Fluchtgeraden	104
6	Exploration unbekannter Umwelten	108
6.1	Explorationsaufgaben	109
6.1.1	Explorationsstrategie in einer unbekanntem Umwelt	109
6.2	Sensorfusion zur geometrischen Umweltmodellierung	111
6.2.1	Zuordnung und Fusion von Daten- und Modellkanten	113
6.2.1.1	Mahalanobisdistanz für lineare Kantensegmente	115
6.2.1.2	Zuordnung und Fusion von parallelen Daten- und Modellkanten	116
6.2.1.3	Fusion von zueinander senkrechten Kanten	121
6.2.2	Inkrementelle Modellierung der Umwelt	123
6.2.2.1	Zustandsbestimmung bei der Modellierung	123
6.3	Experimentelle Ergebnisse bei der Umweltexploration	125
6.3.1	Zweidimensionale Modellierung der Umwelt	125
6.3.2	Dreidimensionale Modellierung der Umwelt	128
6.3.2.1	Modellierung einer Korridorumgebung	128
6.3.2.2	Modellierung einer Laborumgebung	130
6.4	Klassifikation von Szenenbereichsmerkmalen	133
6.4.1	Klassifikation von für Navigationsaufgaben relevanten Objekten	134
6.4.2	Landmarkenerkennung	136
6.4.3	Experimentelle Ergebnisse	136
7	Diskussion und Ausblick	139
7.1	Zusammenfassung und Diskussion	139
7.2	Ausblick	141
7.2.1	Entfernungsbildkameras	142
	Literaturverzeichnis	145
	Stichwortverzeichnis	157