

Absolute Lokalisation mobiler Roboter durch Codierungen mit Landmarken

Von der Fakultät Informatik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Torsten Rupp

aus Dielheim

Hauptberichter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Paul Levi

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Rembold

Prof. Dr.-Ing. Dejan E. Lazic

Tag der mündlichen Prüfung: 10.07.2001

Institut für Parallele und Verteilte Höchstleistungsrechner der Universität Stuttgart

2001

Vorwort

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungszentrum Informatik (FZI) in Karlsruhe im Forschungsbereich „Mobilitätsmanagement und Robotik“ (MMR) unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. habil. P. Levi entstanden. Der Bereich befaßt sich unter anderem mit dem Gebiet der autonomen mobilen Roboter. Schwerpunkte der Forschung sind dabei praxisnahe Anwendungen zur Sensordatenauswertung, Lokalisation und Navigation mobiler Roboter in industriellen und nicht-industriellen Umgebungen.

Der Weg zur Promotion ist eine außerordentliche Herausforderung und kann nur mit unterschiedlichen Hilfestellungen gelingen. Mein Dank gilt Prof. Dr. rer. nat. habil. P. Levi, der das Zustandekommen dieser Arbeit ermöglichte und mir den notwendigen wissenschaftlichen Freiraum für die Forschungsarbeit gab. Seine Anregungen lieferten die entscheidenden Impulse zum Fortschritt meiner Arbeit.

Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich besonders herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. U. Rembold und Herrn Prof. Dr.-Ing. D. E. Lazic.

Dankbar bin ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. D. E. Lazic für die enge Zusammenarbeit, die mir wertvolle Denkanstöße gab und mir die rasche Einarbeitung in das umfangreiche Gebiet der Codierungstheorie ermöglichte.

Unterstützt wurde ich auch durch Freunde und Kollegen, die die Phasen des Selbstzweifels aus eigener Erfahrung kannten und mit Geduld und Nachsicht das Werden meiner Arbeit begleiteten. Dankbar bin ich Dr.-Ing. Th. Cord und Dr. rer. nat. M. Rude für die vielen Diskussionen, Anregungen und die offene und konstruktive Kritik, die mir bei vielen Überlegungen sehr weitergeholfen hat. Bedanken möchte ich mich auch bei den geduldigen Lesern der zahlreichen Rohfassungen dieser Arbeit: meinen Kollegen, Elke Mainz und Rainer Rupp. Mein besonderer Dank gilt auch dem Studenten, der bei der Realisierung eines komplexen technischen Systems, wie einem mobilen Roboter, mit großer Motivation mitwirkte: Frank Sonnefeld.

Voller Dank bin ich auch gegenüber meinen Eltern, meinem Bruder und Satoko für den persönlichen Rückhalt. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Karlsruhe, im Juli 2001

Torsten Rupp

*If a man will begin with certainties he will end
with doubts, but if he content to begin with
doubts he shall end in certainties.*

Francis Bacon, Advancement of Learning

Inhalt

1.	Einleitung.....	21
1.1	Mobile Roboter.....	21
1.2	Beispielanwendung: Messeroboter.....	25
1.3	Aufbau der Arbeit.....	25
2.	Problemstellung.....	27
2.1	Übersicht.....	27
2.1.1	Aufbau mobiler Roboter.....	28
2.1.2	Lokalisationsansätze.....	32
2.1.3	Sensorik.....	33
2.2	Anforderungen.....	35
2.3	Aufgabenstellung.....	38
2.4	Zusammenfassung.....	40
3.	Stand der Forschung.....	41
3.1	Interne Lokalisation.....	41
3.2	Externe Lokalisation.....	43
3.3	Vergleich der Lokalisationsverfahren.....	48
3.4	Lokalisation mit Landmarken und Laserscannern.....	51
3.4.1	Einführung.....	51
3.4.2	Meßprinzipien.....	55
3.4.3	Korrespondenzproblem.....	60
3.4.4	Startup-Problem.....	62
3.4.5	Zustandsschätzung.....	64
3.5	Zusammenfassung.....	69
4.	Das neue Lokalisationsverfahren.....	71

4.1	Übersicht.....	71
4.2	Grundlagen	72
4.3	Lokalisation	76
4.3.1	Detektion von Landmarken	76
4.3.2	Berechnung der Roboterlage	80
4.3.3	Relative Lokalisation.....	85
4.3.4	Absolute Lokalisation.....	87
4.3.5	Filterung der Lagedaten.....	87
4.4	Plazierung von Landmarken	92
4.4.1	Zellenaufteilung.....	94
4.4.2	Plazierungskriterien.....	96
4.4.3	Codierung	98
4.4.4	Plazierung von Landmarken.....	106
4.4.5	Decodierung	107
4.4.6	Fehlererkennung und Fehlerkorrektur	108
4.4.7	Lösung des Korrespondenzproblems.....	109
4.4.8	Lösung des Startup-Problems.....	110
4.5	Lokalisation in 3D	112
4.6	Zusammenfassung	113
5.	Systemaufbau.....	114
5.1	Der mobile Roboter James.....	114
5.2	Detektion und Extraktion von Landmarken.....	117
5.3	Algorithmen zur Lokalisation.....	122
5.3.1	Relative Lokalisation.....	122
5.3.2	Absolute Lokalisation.....	123
5.4	Algorithmus zur Berechnung von Codierungen	123

5.5	Zusammenfassung	126
6.	Evaluierung	127
6.1	Evaluierung des Verfahrens zur Berechnung der Roboterlage	127
6.1.1	Künstliche Landmarken.....	127
6.1.2	Natürliche Landmarken	129
6.2	Lokalisation mit künstlichen und natürlichen Landmarken	133
6.2.1	Berechnung einer Codierung	133
6.2.2	Evaluierung der Startup-Lokalisation.....	141
6.3	Lokalisation in einer dynamischen Umgebung	146
6.4	Zusammenfassung	148
7.	Zusammenfassung und Ausblick	151
7.1	Ausgangssituation.....	151
7.2	Neues Lokalisationsverfahren.....	152
7.3	Bewertung des Ansatzes	153
7.4	Weiterentwicklung des Verfahrens	154
	Glossar.....	157
	Literatur.....	163

Tabellen und Abbildungen

Abbildung 1.1: Serviceroboteranwendungen. Links: Reinigungsroboter „AUROR“ (Cybernetix, Frankreich). Rechts: Wachroboter „CyberGuard“ (Cypermotion, USA).....	22
Abbildung 2.1: Teilkomponenten eines mobilen Roboters.....	29
Abbildung 2.2: Das Teilsystem <i>Lokalisation</i> eines mobilen Roboters.....	30
Abbildung 2.3: Positions- und Orientierungsinformationen im Koordinatensystem.....	31
Abbildung 3.1: Übersicht untersuchter Lokalisationsverfahren.	42
Tabelle 3.1: Beispiele für mobile Roboter und die einsetzbaren Lokalisationsverfahren.	48
Tabelle 3.2: Vergleich von Lokalisationsverfahren (interne Lokalisation).....	49
Tabelle 3.3: Vergleich von Lokalisationsverfahren (externe Lokalisation).	50
Abbildung 3.2: Prinzipieller Ablauf der Lokalisation in einem mobilen Roboter.....	52
Abbildung 3.3: Schätzung der Roboterlage mit drei Landmarken und Kreisschnittverfahren: Die Roboterposition ergibt sich als Schnittpunkt der Umkreise um die Dreiecke, die durch die drei Landmarken LM_1 , LM_2 , LM_3 und die Roboterposition gebildet werden.	54
Abbildung 3.4: Abstandsmessung mit Triangulation.....	56
Abbildung 3.5: Abstandsmessung durch Phasenverschiebung.....	57
Abbildung 3.6: Abstandsmessung durch Messung der Schwebungsfrequenz.....	58
Abbildung 3.7: Abstandsmessung mit Puls-Laufzeit-Verfahren.	59
Abbildung 4.1: Übersicht über das Lokalisationsverfahren.....	72
Abbildung 4.2: Erfassung künstlicher Landmarken (Reflektoren) und natürlicher Landmarken (Ecken) in horizontalen Ebenen (x-y-Ebenen) parallel zur Bewegungsebene.	78
Abbildung 4.3: Meßdaten des Laserscanners im Polarkoordinatensystem.....	79
Abbildung 4.4: Berechnung der Roboterorientierung Θ durch Verschieben des Roboters in den Schwerpunkt CM , Berechnung der Landmarkenwinkel	

und Mittelung der Winkeldifferenzen gemessener und korrespondierender Landmarken.	82
Abbildung 4.5: Berechnung der Roboterposition aus Winkelmessungen: Aus den Differenzwinkeln δ_i zweier aufeinanderfolgender Landmarken LM_i und LM_{i+1} ergibt sich ein lineares Gleichungssystem, für das eine Lösung – die Roboterposition – mit kleinstem quadratischen Fehler berechnet wird.....	83
Abbildung 4.6: Fortschreibung einer Positionsschätzung durch Vergrößerung des Intervalls um das Fehlerintervall.	89
Abbildung 4.7: Schätzung der Roboterposition durch Schnittbildung mehrerer Messungen. Die tatsächliche Position befindet sich im Schnittintervall (graues Rechteck).....	90
Abbildung 4.8: Berechnung der Intervallgröße des Positionsfehlers mit Winkel- und Abstandsfehler einer gemessenen Landmarke.....	92
Abbildung 4.9: Beispiele für nicht eindeutige Landmarkenplazierung aufgrund von Hindernissen und eingeschränkter Sensorreichweite.....	93
Abbildung 4.10: Nicht eindeutige Konstellationen von Landmarken: gleiche Konstellationen (links) und symmetrische Konstellationen (rechts).	95
Abbildung 4.11: Approximation gekrümmter Begrenzungen durch Geradenstücke.....	95
Abbildung 4.12: Beispiel für eine Einteilung der Einsatzumgebung in konvexe, sich nicht schneidende Zellen und die zugehörigen begrenzenden Wandsegmente.	96
Abbildung 4.13: Beispiele für Landmarkencluster.	98
Abbildung 4.14: Codierung einer quadratischen Zelle mit $N=6$ Landmarken LM_i an den Wandsegmenten s_i (dicke Linien) mit den sich ergebenden Winkeln α_i , δ_i und Abständen ρ_{ij} und d_{ij}	100
Abbildung 4.15: Darstellung einer Kugelpackung mit $M=8$ Kugeln auf der Oberfläche der Einheitskugel im positiven Bereich von \mathbb{R}^3 (dargestellt sind die Schnittflächen). Die Punkte markieren den zulässigen Bereich der Kugelpositionen auf der Einheitskugel. Die Kugeln haben einen minimalen Abstand von 0.1725 ($\delta_{\min}=5.35^\circ$).....	103

Abbildung 4.16: Beispiel für die Codierung von $M=8$ Zellen mit je $N=3$ Landmarken (weiße Kreise).....	104
Abbildung 4.17: Darstellung einer Kugelpackung mit $M=8$ Kugeln auf der Oberfläche der Einheitskugel in ganz \mathbb{R}^3 (dargestellt sind die Schnittflächen). Die Punkte markieren den zulässigen Bereich der Kugelpositionen auf der Einheitskugel. Die Kugeln haben einen minimalen Abstand von 0.4784 ($\delta=41.2^\circ$).....	105
Abbildung 4.18: Beispiel für die Codierung von $M=8$ Zellen mit je $N=3$ Landmarken und zwei verschiedenen Landmarkenarten (weiße und schwarze Kreise).....	105
Abbildung 4.19: Äquivalente Codierungen durch Rotation der Winkelindizes.	106
Abbildung 4.20: Rekonstruktion eines Landmarkenclusters mit drei Landmarken: Messung von Landmarken (links) und rekonstruiertem Cluster (rechts).	108
Abbildung 5.1: Der mobile Roboter James des FZI.	114
Abbildung 5.2: Aufrißzeichnungen des mobilen Roboters <i>James</i>	117
Abbildung 5.3: Landmarkentypen: einfache Landmarken (Typ 1, links) und Doppellandmarken (Typ 2, rechts), bestehend aus Reflektorstreifen, aufgebracht auf ein Halbprofil.	118
Abbildung 5.4: Berechnung des Liniensegments l zur Geraden $g(\mu)$	120
Abbildung 5.5: Heuristiken zur Eckenextraktion aus Liniensegmenten.	121
Abbildung 5.6: Detektion von natürlichen Landmarken: Scan (links) und extrahierte Liniensegmente und Landmarken (rechts).....	121
Abbildung 5.7: Unterteilung einer Einsatzumgebung in rechteckige Zellen.	124
Abbildung 5.8: Verschieben von Codeworten auf der Oberfläche einer N-dimensionalen Hyperkugel (Darstellung mit $N=3$): Der Verschiebevektor \vec{v} ergibt sich aus den Abstossungskräften der Nachbarcodeworte (Punkte) und einem Dämpfungsfaktor $\alpha \ll 1$	125
Abbildung 6.1: Häufigkeitsverteilung des Winkelfehlers (links) und des Abstandsfehlers (rechts) für eine einzelne künstliche Landmarke, gemessen mit dem RoboSense-Laserscanner (5000 Messungen).	128

Abbildung 6.2: Grundriß der Institutsräume I: Freiflächen (weiß), Wände, Türen (grau) und künstliche Landmarken (kleine Kreise, vergrößerte Darstellung), Meßpositionen (graue Kreise) und ermittelte Roboterlage (schwarze Kreise mit Richtungspfeil).....	130
Abbildung 6.3: Häufigkeitsverteilung des x-Abstands (links) und des y-Abstands (rechts) für eine einzelne natürliche Landmarke, gemessen mit dem SICK-Laserscanner LMS290 (5000 Messungen).	131
Abbildung 6.4: Grundriß der Institutsräume I: Freiflächen (weiß), Wände, Türen (grau) und natürliche Landmarken (Ecken), Meßpositionen (graue Kreise) und ermittelte Roboterlage (schwarze Kreise mit Richtungspfeil).....	132
Abbildung 6.5: Grundriß der Institutsräume I: Freiflächen, Wände und Türen und zur Verfügung stehende Wandsegmente.....	134
Abbildung 6.6: Einteilung der Institutsräume I in $M=4$ konvexe Zellen.....	134
Abbildung 6.7: Codierungen der Institutsräume I mit $N=3$ Landmarken, $M=4$ Zellen und $T=1$ Landmarkentyp.	135
Abbildung 6.8: Codierungen der Institutsräume I mit $N=4$ Landmarken, $M=4$ Zellen und $T=1$ Landmarkentyp.	135
Abbildung 6.9: Codierungen der Institutsräume I mit $N=3$ Landmarken, $M=4$ Zellen und $T=2$ Landmarkentypen.....	136
Abbildung 6.10: Codierungen der Institutsräume I mit $N=4$ Landmarken, $M=4$ Zellen und $T=2$ Landmarkentypen.....	137
Abbildung 6.11: Grundriß der Institutsräume II: Freiflächen, Wände und Türen und zur Verfügung stehende Wandsegmente.	138
Abbildung 6.12: Einteilung der Institutsräume II in $M=7$ konvexe Zellen.	138
Abbildung 6.13: Codierungen der Institutsräume II mit $N=3$ Landmarken, $M=7$ Zellen und $T=1$ Landmarkentyp.	139
Abbildung 6.14: Codierungen der Institutsräume II mit $N=4$ Landmarken, $M=7$ Zellen und $T=1$ Landmarkentyp.	139
Abbildung 6.15: Codierungen der Institutsräume II mit $N=3$ Landmarken, $M=7$ Zellen und $T=2$ Landmarkentypen.....	140

Abbildung 6.16: Codierungen der Institutsräume II mit $N=4$ Landmarken, $M=7$ Zellen und $T=2$ Landmarkentypen.....	140
Abbildung 6.17: Startup-Lokalisation in den Institutsräumen I: Testpositionen (schwarze Kreise mit Richtungspfeil).....	142
Abbildung 6.18: Maximal zulässige Abweichung ε (dicke Linie) und Anzahl sichtbarer Landmarken (gestrichelte Linie) für die Lösung des Startup-Problems in den Institutsräumen I: $N=3$ Landmarken und $T=1$ Landmarkentyp.	144
Abbildung 6.19: Maximal zulässige Abweichung ε (dicke Linie) und Anzahl sichtbarer Landmarken (gestrichelte Linie) für die Lösung des Startup-Problems in den Institutsräumen I. $N=3$ Landmarken und $T=2$ Landmarkentypen.	144
Abbildung 6.20: Maximal zulässige Abweichung ε (dicke Linie) und Anzahl sichtbarer Landmarken (gestrichelte Linie) für die Lösung des Startup-Problems in den Institutsräumen I. $N=4$ Landmarken und $T=1$ Landmarkentyp.	145
Abbildung 6.21: Maximal zulässige Abweichung ε (dicke Linie) und Anzahl sichtbarer Landmarken (gestrichelte Linie) für die Lösung des Startup-Problems in den Institutsräumen I. $N=4$ Landmarken und $T=2$ Landmarkentypen.	145
Abbildung 6.22: Grundriß der Einsatzumgebung auf dem Messegelände: Freiflächen (weiß), Wände und Türen (grau) und installierte künstliche Landmarken (kleine Kreise).	148

Symbolverzeichnis

Der folgende Index enthält die wichtigsten Symbole, die in dieser Arbeit verwendet werden. Die Seitenzahl verweist auf die Textstelle, an der das Symbol zum ersten Mal verwendet wird oder wo es definiert ist.

\vec{p}_t^K	Roboterlage zum Zeitpunkt t im Koordinatensystem K , S. 31
$[x \ y \ \Theta]^T$	Roboterlage in der Ebene, S. 31
$[x \ y \ z \ \Theta \ \Phi \ \Psi]^T$	Roboterlage im Raum, S. 32
LM_i	Landmarke mit Index i , S. 79
α_i	relativer Winkel der Landmarke LM_i zum Roboter, S. 79
d_i	relativer Abstand der Landmarke LM_i zum Roboter, S. 79
LM	Folge von Landmarken, S. 79
\mathbb{N}_i^j	Menge der natürlichen Zahlen mit $\{n i \leq n \leq j\}$, S. 80
LM_i^{real}	gemessene (reale) Landmarken mit Index i , S. 80
$K(i)$	Korrespondenzfunktion, S. 80
LM_i^{map}	Landmarke mit Index i in der Karte, S. 80
LM_i^t	Messung einer Landmarke mit Index i zum Zeitpunkt t , S. 85
\hat{LM}_i	Voraussage für die Landmarke mit Index i , S. 85
$[\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{\Theta}]^T$	Erwartungswert für die Roboterlage in der x-y-Ebene mit Orientierung Θ , S. 87
$[a, \bar{a}]$	Intervall mit $a, \bar{a} \in \mathbb{R} \wedge a \leq \bar{a}$, S. 88
$w([a, \bar{a}])$	Intervalllänge, S. 89
$\Delta\alpha_\varepsilon$	Winkelfehler bei einer Messung, S. 91
Δd_ε	Abstandsfehler bei einer Messung, S. 91
d_{\max}	maximaler Meßabstand zu $\hat{\uparrow}$ Landmarken, S. 91
ΔLM_ε	Positionierungsfehler von $\hat{\uparrow}$ Landmarken (x, y) , S. 91
s_{ij}	Wandbegrenzung (Wandsegment) mit Index ij , S. 96
Z_i	Zelle mit Index i , S. 96
C_i	Codierung mit $\hat{\uparrow}$ Landmarken der Zelle $\hat{\uparrow}Z_i$, S. 98

LMC^N	Landmarkencluster mit $N \uparrow$ Landmarken, S. 99
\mathbf{c}_m	Codewort eines (N, M) -Codes, S. 101
C	Code mit $M \uparrow$ Codeworten der Länge N , S. 101
$\mathbb{R}_{>0}$	Menge der reellen Zahlen mit $x \in \mathbb{R}: x > 0$, S. 101
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen, S. 102
T	Landmarkentyp, S. 106
α'_i	gemessener Winkel zur Landmarke mit Index i , S. 107
ρ'_i	gemessener Abstand zur Landmarke mit Index i , S. 107
LM'_i	gemessene Landmarke mit Index i , S. 107
$d'_{i,j}$	gemessener Abstand von Landmarken mit Index i, j , S. 107
δ'_i	gemessener Innenwinkel an Landmarke mit Index i , S. 107
\mathbf{c}'_m	detektiertes Codewort, S. 107
LM_i^{LMC}	Landmarke mit Index i in einem \uparrow Landmarkencluster, S. 109
\vec{v}_i	Verschiebevektor für die Berechnung von Codierungen, S. 126
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	Abweichung von gemessenem Wert zu tatsächlichem Wert, S. 131
ε	maximal zulässige Abweichung der Landmarkenerfassung, S. 136

Kurzfassung

In modernen Produktionsstätten gehören Roboter bereits zum Alltag: Industrieroboter schweißen Autokarosserien, biegen Blech, fertigen und montieren Einzelteile und führen die Qualitätssicherung durch. Fahrerlose Fahrzeuge transportieren Rohmaterial zu Bearbeitungsstationen, Einzelteile in Lager und Fertigteile in Logistikzentren. Der Grund für den Einsatz von Robotern sind zunehmend komplexere Herstellungsverfahren und Produktionsabläufe, steigende Kosten, erhöhter Zeitdruck und Qualitätsanforderungen. In naher Zukunft werden Roboter zunehmend in neuen Lebensbereichen von Menschen eingesetzt werden. Insbesondere für Dienstleistungen finden mobile Serviceroboter immer mehr Anwendungen, beispielsweise für Transportaufgaben in Krankenhäusern und Büros, zur Unterstützung und Rehabilitation von Behinderten und alten Menschen, für Besucherführungen in Museen und auf Messen oder in der Unterhaltungsbranche.

Die vorliegende Dissertation beschreibt ein neues Konzept zur absoluten Lokalisation mobiler Roboter auf der Basis von künstlichen und natürlichen Landmarken in der Einsatzumgebung. Die Verwendung von Landmarken gestattet den Einsatz des Verfahrens mit beschränktem Aufwand für Rechenleistung und Sensorik auf dem Fahrzeug, so daß es für die obengenannten Anwendungen praktisch nutzbar wird. Das Fahrzeug ist mit Laserscannern ausgestattet, die die relative Position der Landmarken erfassen. Aus den Meßdaten (Abstand und Richtungswinkel) und mit einer Karte bestimmt der Roboter durch ein fehler-tolerantes Rechenverfahren seine absolute Position und Orientierung. Alle Berechnungen werden „onboard“ auf dem Roboter ausgeführt, so daß der Roboter vollständig autonom ist.

In einem Vorverarbeitungsschritt werden die künstlichen Landmarken mit Techniken aus der Codierungstheorie (modifizierte Simplex-Codes) so in der Einsatzumgebung plaziert, daß die Lokalisation robust gegenüber Meßfehlern ist. Zusätzlich wird durch die Plazierung der Landmarken die Einsatzumgebung so codiert, daß der Roboter seine Position und Orientierung nach dem Systemstart und bei Fehlerfunktionen selbständig und sicher bestimmen kann (Lösung des Startup-Problems). Die Einsatzumgebung wird dazu in konvexe „Zellen“ eingeteilt und für jede Zelle wird ein Code bestimmt, der die Zelle eineindeutig identifiziert. Zur Berechnung der Codierungen wird ein Algorithmus zur nicht-linearen Optimierung der Landmarkenplazierung eingesetzt, der die räumliche Struktur der Zellen berücksichtigt. Aus den berechneten Codierungen werden anschließend mit einem Plazie-

rungsalgorithmus Landmarkenposition und Landmarkencluster bestimmt. Der Roboter rekonstruiert aus den gemessenen Landmarken den Landmarkencluster und identifiziert die Zelle mit einem fehlertoleranten Decodierungsverfahren.

Die Navigation mobiler Roboter wird durch den Einsatz eines absoluten Lokalisationssystems nachhaltig verbessert. Durch die Verwendung von künstlichen und natürlichen Landmarken ist nur eine minimale Anpassung der Einsatzumgebung erforderlich bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit auch in wenig strukturierten Umgebungen. Neben der Positions- und Orientierungskorrektur erlaubt die Anwendung von Codierungen mit künstlichen Landmarken die Lösung des Startup-Problems, so daß ein Lokalisationssystem für die Navigation zur Verfügung steht, daß in allen Fällen (Startphase, Normalbetrieb und Neuinitialisierung) einen zuverlässigen Betrieb des Roboters ermöglicht. Für den Einsatz und die Akzeptanz von Servicerobotern durch Benutzer mit geringem technischen Hintergrundwissen ist dies eine wichtige Voraussetzung.

Abstract

Autonomous mobile robots are already part of daily life at many production sides: Robot manipulators are welding cars, bending steel plates, produce and assemble parts and do quality control. Autonomous guided vehicles carry material to processing stations, individual peaces to and from the stock and finished components into logistic centers. The reason for this are more and more complex production processes, increasing costs, less time and higher quality requests. In the near future, mobile robots will be used in new areas of human life. Especially mobile robots will be used increasingly for service tasks, e. g. for carrying goods in hospitals and offices, for support and rehabilitation of disabled or senior citizens, for guiding of visitors through museums and exhibitions or for entertainment.

This Ph.D. thesis presents a new concept for absolute robot localization by using artificial and natural landmarks in the environment. By using landmarks the presented localization system requires only limited computation power and sensors on the vehicle. Thus it can be used for the applications described above. The vehicle is equipped with laser scanners for measuring the relative position of landmarks. The robot determine the absolute position and orientation with a fault-tolerant algorithm by using measurement data of landmarks (distance and direction) and a map. All computation can be done onboard. Thus the robot is completely autonomous.

In a preprocessing step artificial landmarks are placed in the environment by using techniques of the coding theory (modified Simplex codes). Thus the localization is robust against measurement errors. Additionally the environment is encoded by placing the landmarks so that the robot can determine his position and orientation independently after startup or system failure (solution of the startup problem). The environment is subdivided into „cells“ and each cell is encoded by a unique codeword. For calculation of the codewords a non-linear optimization algorithm is used which takes into account the spatial structure of the environment. With a placing algorithm the landmark position and the landmark clusters are calculated. The robot can reconstruct the landmark clusters from the measurement data and can identify the cell with a fault-tolerant decoding algorithm.

With the presented localization system the navigation of mobile robots can be lastingly improved. By using artificial and natural landmarks only a minimal preparation of the environment is necessary. The localization system is robust even in less structured environ-

ments. With the presented localization system, the robot position and orientation can be corrected and the startup problem can be solved. The system is usable for all tasks in practical applications (startup, normal operation and reinitialisation) and permits a reliable operation of the mobile robot. For users with less technical knowledge such capabilities are very important preconditions for the utilization and acceptance of a mobile robot.

1. Einleitung

1.1 Mobile Roboter

Mobile Roboter¹ als fahrerlose Transportsysteme (FTS)² werden in der Industrie und in Logistikzentren heute bereits für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt. Beispielsweise transportieren fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF)³ in der Automobilindustrie zielsicher Fahrzeugteile zwischen den verschiedenen Fertigungsstationen. In Logistikzentren werden mobile Roboter schon seit geraumer Zeit zur Bewältigung des Güterflusses erfolgreich und ökonomisch eingesetzt.

In jüngster Vergangenheit finden sich zunehmend Einsatzgebiete für eine neue Generation mobiler Roboter, beispielsweise im Servicebereich zum Reinigen (Abbildung 1.1, links) oder Sichern von Gebäuden und öffentlichen Flächen (Abbildung 1.1, rechts; [Praßler 98], [Ciccimaro 98], [Holland 95]), als mobile Informationssysteme auf Messen, in Museen und Gebäuden [Burgard 98b], zur Unterstützung und Rehabilitation behinderter Menschen [Yanco 98], als Transportsystem in Krankenhäusern [Evans 94], im Kommunalbereich zur Müllbeseitigung und Pflege öffentlicher Einrichtungen oder in der Landwirtschaft beim Ernteeinsatz [Schraft 98]. Darüber hinaus finden sich in bisher von der Automatisierung wenig beachteten Industriezweigen wie der Bauindustrie, insbesondere im Straßenbau ([Baum 98], [ART 98], [Pampagnis 93]) neue Einsatzmöglichkeiten für mobile Roboter. Auch in Bereichen, in denen der Einsatz menschlicher Arbeitskraft nicht verantwortbar ist, wie Arbeiten in kontaminierten Gebieten [Schraft 98], können mobile Roboter die Arbeitsabläufe sicherer, umweltfreundlicher und zugleich effizienter machen.

¹In dieser Arbeit werden selbstfahrende Fahrzeuge als mobile Roboter bezeichnet.

²FTS – fahrerloses Transportsystem: innerbetriebliche, fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) zum Transport von Gütern innerhalb und außerhalb von Gebäuden [VDI 2510].

³FTF – fahrerloses Transportfahrzeug: flurgebundene Fördermittel mit eigenem Antrieb, automatischer Steuerung und eigener Energieversorgung [VDI 2510].



Abbildung 1.1: Serviceroboteranwendungen. Links: Reinigungsroboter „AUROR“ (Cypernétix, Frankreich). Rechts: Wachroboter „CyperGuard“ (Cypermotion, USA).

In diesen neuen Einsatzgebieten werden weitaus höhere Anforderungen an die mobilen Roboter gestellt als bei fahrerlosen Transportsystemen in abgeschlossenen industriellen Umgebungen. So sind an den Betrieb von Servicerobotern ([Schraft 96], [Schraft 98]), die im Umfeld von Menschen arbeiten, hohe Sicherheitsanforderungen zu stellen. Ein Fehlerverhalten des Roboters, auch in schwierigen und im vorhinein nicht absehbaren Situationen, muß möglichst ausgeschlossen und Kollisions- und Unfallrisiken müssen in jedem Fall vermieden werden.

In der Bauindustrie eingesetzte Roboter müssen auch in unstrukturierten Umgebungen und bei unvollständigen Informationen eine hinreichend gute Arbeitsqualität sicherstellen, um Robotertechniken in diesem Bereich überhaupt wirtschaftlich sinnvoll einsetzen zu können. Die Einsatzumgebung ändert sich fortwährend, und die Robotersysteme sind den schwierigen Verhältnissen, die im Freien anzutreffen sind, wie Sonneneinstrahlung oder Regen, ausgesetzt.

Um den Anforderungen für den Einsatz mobiler Roboter im Servicebereich und in der Industrie gerecht werden zu können, sind Techniken erforderlich, die einen zuverlässigen, sicheren, stabilen und ökonomischen Betrieb ermöglichen. Die mobilen Roboter müssen die ihnen zugewiesene Aufgabe zuverlässig erfüllen, und Unfallrisiken für Menschen, die

sich im Arbeitsbereich des Roboters aufhalten, müssen weitestgehend ausgeschlossen werden können. Die mobilen Roboter sollen Kollisionen mit festen und beweglichen Objekten in jedem Fall vermeiden und auch in Situationen, die in ihrer Programmierung nicht explizit vorgesehen sind, sicher agieren. Beispielsweise müssen mobile Roboter in nicht genau bekannten Fahrsituationen die Geschwindigkeit reduzieren, Ausweichbewegungen durchführen oder gegebenenfalls anhalten. Außerdem hat sich gezeigt, daß die Verwendung mobiler Roboter nur dann sinnvoll ist, wenn sie ökonomisch eingesetzt werden können und Arbeiten schneller, einfacher, flexibler, sicherer oder kostengünstiger erledigen.

Für den Einsatz mobiler Roboter zum Transport von Gütern oder für Serviceaufgaben sind neben der logistischen Ausrüstung und den Serviceeinrichtungen am Roboter Verfahren und Systeme für die Bewegung des Roboters in der Einsatzumgebung erforderlich. Dazu gehört in statischen Umgebungen die Planung des Wegs zum Zielpunkt unter Berücksichtigung der Struktur der Einsatzumgebung, die Berechnung aller durchzuführenden Aktionen des Roboters, um das Ziel zu erreichen (Fahrbefehle, Haltepunkte, Abbiegevorgänge) und die Navigation auf dem geplanten Weg. In dynamischen Umgebungen müssen zusätzlich Kollisionen mit Menschen und Objekten, die den Fahrweg des Roboters blockieren können, sicher erkannt und durch eine dynamische Hindernisumfahrung oder Neuplanung vermieden werden. Für eine zielgerichtete Planung, Navigation und Kollisionsvermeidung ist eine der grundlegendsten Problemstellungen, die beim Einsatz mobiler Roboter gelöst werden muß, die Lokalisation. Unter Lokalisation wird die Bestimmung von Positions- und Orientierungsdaten des Roboters in der Einsatzumgebung verstanden, die für die Bewegung des Roboters relevant sind, beispielsweise die axiale Position auf einer Fahrstraße oder – abhängig von den Aufgaben und Anforderungen an das Robotersystem – die relative x/y-Position bei einer Hindernisumfahrung oder die absolute x/y-Position bei der Fahrt zum Zielpunkt. Erst wenn diese Informationen mit einer hinreichenden Genauigkeit zur Verfügung stehen, kann ein mobiler Roboter eine geeignete Wegstrecke von der aktuellen Position zur Zielposition planen, dieser folgen und dabei Hindernissen sicher ausweichen. Stehen keine geeigneten Daten der Lokalisation zur Verfügung, so ist eine sinnvolle Navigation des Roboters kaum möglich, und die zielgerichtete Planung zur Ausführung von Aufträgen kann ohne Informationen zur aktuellen Position und Orientierung in der Einsatzumgebung nicht durchgeführt werden. Eine genaue und zuverlässige Lokalisation ist die Grundlage für die Aktionen eines mobilen Roboters. Sie ist daher unverzichtbar.

In der Vergangenheit sind unterschiedlichste Systeme für die Lokalisation mobiler Roboter entwickelt worden. Für fahrerlose Transportsysteme in der Industrie haben sich vielfach Spurführungssysteme mit festen Fahrspuren bewährt, wie z. B. am Boden verlegten Leitlinien. Die fahrerlosen Transportfahrzeuge werden mit Hilfe einer einfachen Steuerung, ähnlich einem Schienenfahrzeug, an den Leitlinien entlanggeführt. Diese Techniken lassen sich für mobile Roboter, die nicht ausschließlich festen Fahrspuren folgen können, wie Roboter, die im Servicebereich für Reinigungsaufgaben oder Botendienste eingesetzt werden, nur bedingt einsetzen und schränken die Autonomie sehr stark ein. Die Aktionen dieser Roboter sind nur teilweise fest programmiert. Manche Aktionen, wie Ausweichmanöver, sind abhängig von der augenblicklichen Situation und müssen vom Roboter selbständig geplant und ausgeführt werden. Für Roboter, die im Freien eingesetzt werden, beispielsweise im Straßenverkehr oder im Baubereich, ist die Installation von Spurleitsystemen ökonomisch nicht vertretbar, und für freifahrende Fahrzeuge können Spurleitsysteme kaum sinnvoll eingesetzt werden. Andere Techniken, wie Peilsysteme auf Basis von Lasermeßsystemen, die keine Fahrspuren a priori festlegen, sind für solche Anwendungen besser geeignet, jedoch sind diese Techniken noch nicht so weit ausgereift, daß sie für alle in Frage kommenden Einsatzgebiete geeignet sind und den jeweils gestellten Anforderungen gerecht werden. So müssen bei Peilsystemen die zur Peilung verwendeten Marken für den mobilen Roboter immer sichtbar sein. Für einen Serviceroboter, der sich durch eine Menschenmenge bewegt, kann dies jedoch nicht sichergestellt werden, wenn Menschen oder bewegliche Objekte Peilmarken zeitweise verdecken.

In dieser Arbeit werden die Problemstellung der Lokalisation mobiler Roboter und die Anforderungen an ein Lokalisationssystem in bezug auf die neuen Einsatzgebiete im Service- und Industriebereich untersucht. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Konzeption und Entwicklung eines zuverlässigen und sicheren Lokalisationsverfahrens für isolierte, d. h. unabhängig von anderen Robotern agierende, mobile Service- und Industrieroboter. Das Verfahren kann in Innen- und Außenräumen eingesetzt werden, in denen sich auch Menschen und bewegliche Objekte aufhalten. Es ist so konzipiert, daß es allen in diesen Einsatzumgebungen auftretenden praktischen Anforderungen gerecht wird.

1.2 Beispielanwendung: Messeroboter

Eine Beispielanwendung mobiler Serviceroboter, die in naher Zukunft in der Praxis zu finden sein werden, sind mobile Roboter für Dienstleistungen auf Messen und in Museen. Diese Roboter führen tagsüber Besucher auf Messen und in Museen und bieten Informationen an. Nachts überwachen sie die Ausstellungsräume und agieren als Einbruchs- und Feuermelder. Im Unterschied zu FTS müssen diese Roboter eine größere Flexibilität besitzen und sich auch in dynamischen Einsatzumgebungen zurechtfinden, in der sich Menschen oder bewegliche Objekte befinden. Um einen Messe- oder Museumsroboter sinnvoll einsetzen zu können, muß der Roboter eine hohe Autonomie besitzen und auf unterschiedlichste Situationen sicher und sinnvoll reagieren können. An die Steuerung dieser Roboter werden besondere Anforderungen gestellt: Die Roboter müssen zuverlässig Hindernisse erkennen und ihnen ausweichen können und ausgefeilte Strategien für die Wegplanung besitzen, die auch bei unvorhergesehenen Ereignissen, wie versperrten Wegen, die Roboter das Ziel erreichen lassen. Die Roboter müssen sich in wenig strukturierten und dynamischen Umgebungen zurechtfinden und mit Menschen interagieren können. Für die zuverlässige Lokalisation können bewährte Techniken, wie sie für FTS eingesetzt werden, nicht angewendet werden, wie in Kapitel 3 gezeigt wird. Für den sicheren und ökonomischen Betrieb sind daher neuartige Techniken erforderlich. Ein neuartiges Lokalisationsverfahren, das unter anderem in Anwendungen wie dem Messeroboter einsetzbar ist, wird in dieser Arbeit vorgestellt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Dieser Abschnitt beschreibt die Gliederung der Arbeit und nennt die wesentlichen Punkte der einzelnen Kapitel.

Kapitel 2 gibt zunächst eine Übersicht über den Aufbau mobiler Roboter, unterschiedliche Lokalisationsansätze und die eingesetzte Sensorik. Anschließend werden die Anforderungen an einen mobilen Roboter, der für den Transport von Gütern oder für Serviceaufgaben eingesetzt werden soll, spezifiziert und die daraus abgeleitete Problem- und Aufgabenstellung dieser Arbeit erarbeitet.

Zur Beurteilung einsetzbarer Verfahren zur Lokalisation wird in Kapitel 3 der Stand der Technik bezüglich Lokalisationsverfahren für mobile Roboter zusammengefaßt. Es werden die für Transport- und Serviceroboter einsetzbaren Lokalisationsverfahren, Meßprinzipien und Filterverfahren vorgestellt und verglichen.

Auf dem Stand der Technik aufbauend wird anschließend in Kapitel 4 ein neues Lokalisationsverfahren auf der Basis von Landmarken entwickelt, das die Anforderungen für den praktischen Einsatz mobiler Roboter im Servicebereich und der Industrie erfüllen kann. Es werden die drei Teilprobleme, die relative Lokalisation, die absolute Lokalisation und das Startup-Problem untersucht. Für die relative und absolute Lokalisation werden geeignete Berechnungs- und Filterverfahren vorgestellt. Das Startup-Problem wird mit einem Ansatz gelöst, der künstliche Landmarken geeignet anordnet und eine fehlertolerante Lösung ermöglicht. Dazu werden Codierungen mit Landmarkenclustern untersucht, die die Anwendung von Techniken aus der Codierungstheorie zur Platzierung von Landmarken wie auch zur Erkennung und Korrektur von Fehlern in Sensordaten ermöglichen.

Kapitel 5 erläutert den Systemaufbau und die Umsetzung des vorgestellten Ansatzes. Es werden der für die praktische Evaluierung eingesetzte mobile Roboter *James* und die technischen Komponenten beschrieben. Für die wesentlichen Algorithmen werden die Implementierungen und Anwendungen skizziert.

In Kapitel 6 wird die Evaluierung des Verfahrens in realen Roboteranwendungen dargestellt. Es beschreibt die Experimentierszenarien in mehreren Institutsräumen und bei einer Messe. Die erzielten Ergebnisse und die ermittelten Einschränkungen werden vorgestellt und zusammengefaßt, und die Besonderheiten beim Einsatz des Verfahrens im Freien werden genannt.

Kapitel 7 gibt eine Zusammenfassung der entwickelten Ansätze und eine Bewertung des vorgestellten Verfahrens. Das Kapitel gibt abschließend einen Ausblick auf weitere Arbeiten und mögliche Anwendungen.

2. Problemstellung

Dieses Kapitel gibt eine Einführung in die Problemstellung der vorliegenden Arbeit und eine allgemeine Übersicht über mobile Roboter. Hier werden die Anforderungen an ein Lokalisationssystem für mobile Roboter genannt und die Aufgabenstellung dieser Arbeit konkretisiert.

2.1 Übersicht

Die Lokalisation beschäftigt sich mit der grundlegenden, scheinbar einfach zu beantwortenden Frage „Wo bin ich?“. Für Menschen scheint diese Fragestellung im allgemeinen tatsächlich kein wesentliches Problem darzustellen. Der Mensch findet sich in der Regel in seiner Umwelt mühelos zurecht und ist in der Lage, sich sicher und zielgerichtet zu bewegen. Nur in Ausnahmefällen muß der Mensch besondere Hilfsmittel in Anspruch nehmen, beispielsweise Hinweisschilder oder Karten, um festzustellen, wo er sich befindet. Für einen mobilen Roboter ist diese Frage jedoch nicht so leicht zu beantworten. Daher haben sich viele Arbeiten im Bereich mobiler Roboter mit dieser Fragestellung auseinandergesetzt ([Chen 93], [Borenstein 97], [Besl 89], [Gutmann 96], [Gutmann 98], [Hanebeck 97a], [Leonard 91]).

Selbst hochentwickelte Techniken, wie GPS¹, bieten in vielen Fällen nicht die für Anwendungen von Servicerobotern notwendige Zuverlässigkeit und Genauigkeit, wie in Kapitel 3 ausführlich dargestellt wird. Dabei geht es bei mobilen Robotern in den meisten Fällen nicht einmal darum, sich in einer zunächst völlig fremden Umgebung zurechtzufinden, sondern um die Lösung des Lokalisationsproblems in einer Umgebung, über die in vielen Fällen eine ganze Menge Vorwissen bekannt ist. Solches Vorwissen kann eine Beschreibung wesentlicher Merkmale der Einsatzumgebung des Roboters in einer Karte sein. Die Karte wird dem Roboter entweder vorgegeben oder in einer Vorbereitungsphase selbständig vom Roboter durch eine Explorationsfahrt erstellt.

¹ GPS – Global Positioning System.

Die Exploration, d. h. die Erstellung einer Karte mit für den Roboter wesentlichen Merkmalen wie Landmarken, Freiflächen oder Hindernissen, stellt einen Vorverarbeitungsschritt für die Lokalisation dar. Eine automatische Exploration vereinfacht die Inbetriebnahme eines Robotersystems in einer neuen Einsatzumgebung und ist daher für Serviceroboter, die in sich ändernden Umgebungen eingesetzt werden, von Vorteil, beispielsweise als mobile Besucherführungssysteme und Informationssysteme in Messegeländen. Im regulären Betrieb des Serviceroboters erfolgt dann auf Basis der manuell oder durch Exploration erstellten Karte die Lokalisation, wobei Positionsdaten von Landmarken, Freiflächen und Hindernissen als Vergleichswerte für Sensordaten verwendet werden.

Diese Arbeit konzentriert sich auf Lösungen für das im praktischen Einsatz eines Serviceroboters während der gesamten Betriebszeit auftretende Problem der Lokalisation. Eine Karte mit den für die Lokalisation verwendeten Merkmalen, wie Landmarken oder Freiflächen, wird in dieser Arbeit als gegeben vorausgesetzt.

2.1.1 Aufbau mobiler Roboter

Abbildung 2.1 zeigt den strukturellen Aufbau eines autonomen mobilen Robotersystems. Die Gesamtstruktur ist in drei Ebenen aufgeteilt: die taktisch-reflexive Ebene, die strategische Ebene und die Anwendungsebene ([Levi 94], [Rausch 95], [Becht 97]).

Die taktisch-reflexive Ebene umfaßt die Basisfunktionen des mobilen Roboters, wie Aktuatoren und Aktuatorregelelemente, die Motoren, Lenkung und interne Sensoren, externe Sensoren, Pilot und Odometrie und die Navigation. Unter Aktuatoren werden alle Einrichtungen des mobilen Roboters zusammengefaßt, die nicht direkt für die Fortbewegung eingesetzt werden, wie die Ladeeinrichtungen eines FTF oder die Wasch- und Saugvorrichtungen eines Reinigungsroboters. Die internen Sensoren¹ des Roboters erfassen physikalische Größen innerhalb des Roboters, wie Radumdrehungen, Lenkwinkel, Neigung oder Beschleunigung. Die externen Sensoren¹ erfassen physikalische Größen außerhalb des Roboters, wie Abstände oder Farben von Objekten in der Umgebung. Der Pilot setzt Steuer-

¹Die Bezeichnungen „interne Sensoren“ und „externe Sensoren“ werden in der Literatur verwendet, um zu beschreiben, welche Art von Merkmalen erfaßt werden. Über die Position der Sensoren selbst sollen diese Bezeichnungen jedoch nichts aussagen. Daher müssen interne Sensoren keineswegs innerhalb des mobilen Roboters und externe Sensoren keineswegs außerhalb des mobilen Roboters positioniert sein.

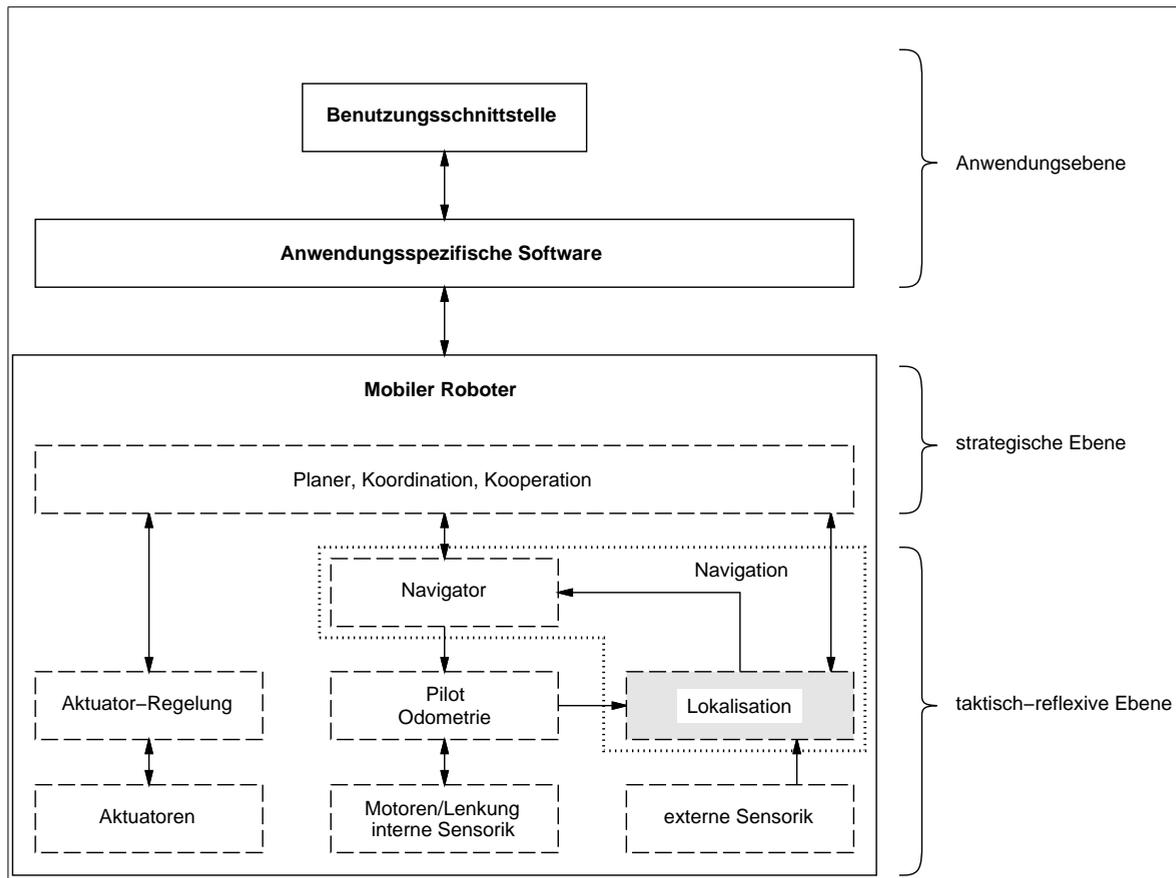


Abbildung 2.1: Teilkomponenten eines mobilen Roboters.

befehle der Navigation in Steuerbefehle für die Antriebs- und Lenkmotoren um und sammelt mit Hilfe der internen Sensoren Odometriedaten. Die Navigation besteht aus dem eigentlichen Navigator und der *Lokalisation*. Der Navigator erzeugt aus den vom Planer vorgegebenen Trajektorien Steuerbefehle für den Piloten. Dem Teilsystem Lokalisation kommt die Aufgabe zu, die Position und die Orientierung des Roboters in der Einsatzumgebung zu bestimmen. Die Lokalisation verwendet dazu die Odometriedaten des Piloten für eine Lageschätzung, die Daten externer Sensoren, wie Abstand und Winkel von Objekten, und Informationen, die der Planer des mobilen Roboters liefert, wie Karten- oder Trajektorien- und Daten. Aus diesen Daten berechnet die Lokalisation die Roboterlage, die dem Navigator und dem Planer zur Verfügung gestellt wird (siehe Abbildung 2.2).

Die strategische Ebene umfaßt abstrakte Funktionalitäten, wie Planung, Koordination und Kooperation. Der Planer setzt allgemein gefaßte Aufträge der Anwendungsebene in konkrete Bewegungsabfolgen um. Der Planer ermittelt Fahrrouten und berechnet Trajekto-

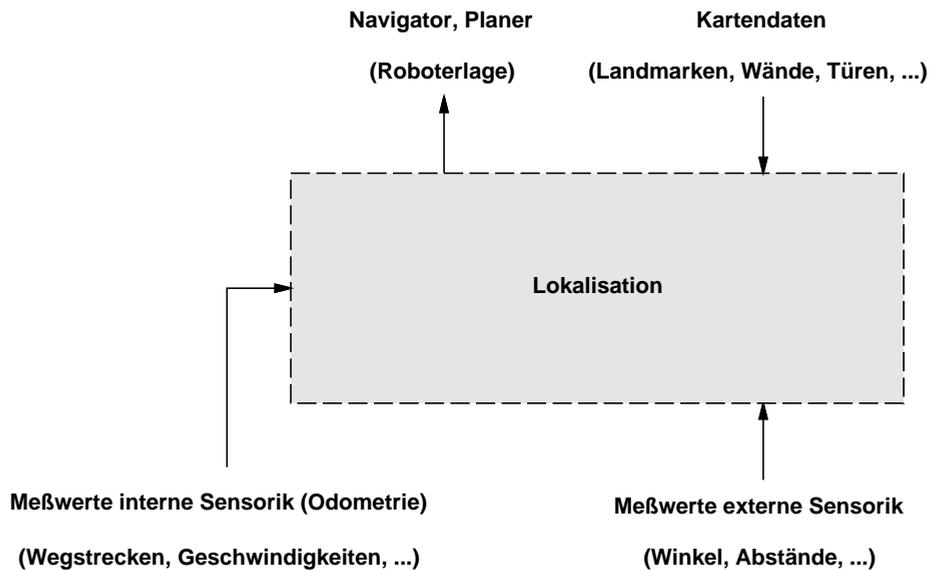


Abbildung 2.2: Das Teilsystem *Lokalisation* eines mobilen Roboters.

rien und gibt die Steuerbefehle für die Aktuatoren vor. Für spezielle Aufgaben mit mehreren eingesetzten Robotern, wie Kolonnenfahrten oder Transport sperriger Güter, werden zusätzlich Koordinations- und Kooperationsverfahren eingesetzt.

Die Anwendungsebene enthält die anwendungsspezifische Software und die Benutzungsschnittstelle. Die anwendungsspezifische Software umfaßt die Funktionalitäten zur Auswahl von Fahrzielen, die Einsatzplanung für die Aktuatorik, die Lastaufnahme und -abgabe oder Einrichtungen zur Ausführung der Serviceleistungen. Die Benutzungsschnittstelle des Robotersystems wird für die Interaktion mit Benutzern eingesetzt.

Für das Navigationssystem und den Planer sind die Positions- und Orientierungsinformationen der Lokalisation unabdingbar für die Ausführung zielgerichteter Manöver. Die Lokalisation ist einer der wichtigsten zentralen Bestandteile des mobilen Roboters. Dies zeigt sich sehr deutlich in praktischen Anwendungen: Ohne ein zuverlässiges und robustes Lokalisationssystem ist ein mobiler Roboter nicht in der Lage, die ihm gestellten Aufgaben praxisgerecht, d. h. schnell, effizient, zuverlässig und fehlertolerant zu erfüllen. Für alle Anwendungen stellt die Lokalisation daher eine der wesentlichsten Funktionalitäten eines mobilen Roboters dar.

Beim Einsatz mobiler Roboter mit Starrkörper¹ gilt es somit im allgemeinen, folgendes Problem zu lösen:

Lokalisation: Verfahren zur Bestimmung der Position x,y,z und der Orientierung Θ,Φ,Ψ zum Zeitpunkt t in einem gegebenen Koordinatensystem K .

Die Positions- und Orientierungsinformation wird formal durch einen Vektor

$$\hat{\rho}_t^K = [x \ y \ z \ \Theta \ \Phi \ \Psi]^T$$

dargestellt. x,y,z beschreiben die Position, Θ,Φ,Ψ die Orientierung im Raum (Richtungs-, Neigungs- und Rollwinkel im mathematisch positiven Sinn), K das verwendete Koordinatensystem und t den Zeitpunkt (siehe Abbildung 2.3).

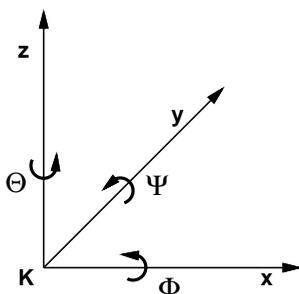


Abbildung 2.3: Positions- und Orientierungsinformationen im Koordinatensystem.

Für manche Anwendungen kann die Bestimmung der räumlichen Position und der Orientierung auf die drei Freiheitsgrade $[x \ y \ \Theta]^T$ eingeschränkt werden, beispielsweise für fahrerlose Transportsysteme, die sich in einer Fabrikhalle in nur einer Ebene bewegen müssen. Für andere Anwendungen, wie die Navigation von Baumaschinen im Straßenbau, sind jedoch bis zu sechs Freiheitsgrade notwendig.

¹ Mobile Roboter, die keinen Starrkörper besitzen, wie mehrgliedrige Rohrroboter, können mehr als die sechs Freiheitsgrade $[x \ y \ z \ \Theta \ \Phi \ \Psi]^T$ besitzen. In dieser Arbeit werden jedoch nur mobile Roboter mit Starrkörper betrachtet.

Im folgenden soll mit „Roboterlage“¹ die Position und Orientierung $[x \ y \ z \ \Theta \ \Phi \ \Psi]^T$ des Roboters gemeint sein, während mit „Roboterposition“ bzw. „Roboterorientierung“ nur die Position $[x \ y \ z]^T$ bzw. Orientierung $[\Theta \ \Phi \ \Psi]^T$ bezeichnet wird. Das Verfahren zur Bestimmung der Roboterlage wird „Lokalisation“ genannt.

2.1.2 Lokalisationsansätze

Die Bestimmung der Roboterlage $\hat{\rho}_t^K$ kann mit unterschiedlicher Zielsetzung durchgeführt werden. Es lassen sich folgende Aufgabenstellungen für die Lokalisation mobiler Roboter in ihrer Einsatzumgebung unterscheiden:

1. Relative Lokalisation zu einem festen Punkt:

Hierunter versteht man das Problem, die relative Lage eines mobilen Roboters bezüglich eines festen, bekannten Punkts, beispielsweise der Lage zu einem früheren Zeitpunkt, zu bestimmen. Die Angabe der Lage erfolgt dabei relativ in Form eines Transformationsvektors $\hat{\rho}_t^{FKS}$ im Fahrzeugkoordinatensystem.² In der Literatur heißt diese Art der Lokalisation auch „Tracking“, wenn der Vorgang fortlaufend wiederholt wird. Das Tracking wird unter anderem für die Koppelnavigation eingesetzt, bei der durch Integration von Geschwindigkeits- und Orientierungsänderungen des Roboters die Lage rekursiv geschätzt wird.

2. Absolute Lokalisation in einer bekannten Umgebung mit Vorwissen zur Position und Orientierung:

Hierunter versteht man das Problem, die absolute Lage des mobilen Roboters bezüglich eines gegebenen Weltkoordinatensystems zu bestimmen. Die Angabe der Lage erfolgt dabei durch einen Vektor $\hat{\rho}_t^{WKS}$ absolut in diesem Koordinatensystem.³

¹ Latombe verwendet „Konfiguration“ (engl. configuration) für die Position und Orientierung des Roboters [Latombe 91]. Dieser Begriff wird in der Literatur jedoch hauptsächlich im Zusammenhang mit Manipulatoren verwendet. Diese besitzen häufig eine weitaus größere Anzahl an Freiheitsgraden und erfordern andere Verfahren zur Lokalisation. Zur Abgrenzung wird daher in dieser Arbeit der Begriff „Lage“ verwendet.

² FKS – Fahrzeugkoordinatensystem. Im Fahrzeugkoordinatensystem werden Position und Orientierung eines Körpers relativ zu einem Punkt, meistens dem Fahrzeugmittelpunkt oder Kontrollpunkt, beschrieben.

³ WKS – Weltkoordinatensystem. Im Weltkoordinatensystem werden Position und Orientierung eines Körpers relativ zu einem festen Punkt (Ursprung) außerhalb des Roboters beschrieben. Der Ursprung des Weltkoordinatensystems ist im allgemeinen frei gewählt.

Zusätzliche Informationen, wie Lageschätzungen zu früheren Zeitpunkten, werden zur Bestimmung von $\hat{\rho}_t^{\text{WKS}}$ verwendet. Die absolute Lokalisation ergibt sich als Sonderfall der relativen Lokalisation, wenn bekannt ist, daß der feste Punkt der Ursprung des gewählten Weltkoordinatensystems ist.

3. Absolute Lokalisation in einer bekannten Umgebung ohne Vorwissen zur Position und Orientierung („Startup-Problem“):

Hierunter versteht man das Problem, die Lage eines mobilen Roboters ohne Vorwissen der ungefähren Lage in einer bekannten Umwelt zu bestimmen. Dieses Problem tritt speziell als sogenanntes „Startup-Problem“ oder „Bootstrap-Problem“ auf (im folgenden nur noch Startup-Problem genannt), wenn der mobile Roboter in seiner Einsatzumgebung eingeschaltet wird oder wenn der Roboter während des Betriebs seine Positions- oder Orientierungsinformation verloren hat und diese neu bestimmen muß. Zu diesem Zeitpunkt besitzt der Roboter keinerlei Vorwissen über seine ungefähre Lage und muß diese daher ohne Vorwissen selbständig bestimmen.¹

2.1.3 Sensorik

Zur Bestimmung der Roboterlage $\hat{\rho}_t^K$ werden mobile Roboter mit unterschiedlichen Sensoren ausgestattet, mit denen physikalische Eigenschaften im Roboter oder der Umgebung erfaßt werden können. Meist kommen mehrere unterschiedliche Sensoren zum Einsatz, da sich mit einem einzelnen Sensor oft nicht alle benötigten Informationen aufnehmen lassen. Die Sensoren setzen ausgewählte Merkmale im Roboter, wie Radumdrehungen, Richtungsänderungen, Beschleunigungen (interne Sensorik) oder der Umgebung, wie Abstand, Richtung, Größe, Farbe oder Form von Objekten (externe Sensorik), in elektrische Größen um. Mit Encodern, Winkelgebern oder Beschleunigungssensoren lassen sich die Bewegungen der Räder, die Lenkrichtung und das Fahrverhalten des Roboters bestimmen. Mit Kompaß- und Gyroskopsystemen können Orientierung und Orientierungsänderungen des Roboters erfaßt, und mit Ultraschallsensoren, Laserscannern, Mikrowellensensoren oder Radarsystemen können auf Basis von Triangulation, Phasenmessung oder Pulslaufzeitmessung

¹ Die Lokalisation in einer unbekanntem Umgebung, die zunächst einmal erkundet werden muß, soll in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden, da die Exploration und die Erstellung einer Karte der Umgebung eine eigene Problemklasse darstellt.

Abstände und Richtungen von Objekten bestimmt werden. Mit Kamerasystemen, Filtertechniken, Verfahren der Mustererkennung und der Bildverarbeitung lassen sich Abstände, Farben und Formen von Objekten in der Umgebung erkennen.

Die Sensorsignale werden über Eingabeschnittstellen in ein Rechnersystem eingelesen. Mit Filter- und Segmentierungsprogrammen lassen sich aus den Sensorendaten die Merkmale, wie zurückgelegter Weg und Richtung, Abstand und Winkel einer Wand oder die Position eines Hindernisses bestimmen und in eine numerische Beschreibung überführen. Mit Hilfe von Sensordatenfusionsverfahren, wie dem Kalman-Filter, lassen sich darüber hinaus Einzelmerkmale aus mehreren Sensoren oder Messungen mit einer besseren Genauigkeit und Qualität extrahieren und Merkmale bestimmen, die mit einem einzelnen Sensor oder einer einzelnen Messung nicht erfaßt werden können.

Auf Basis der numerischen Beschreibungen von Merkmalen des Roboters und der Umgebung kann das Robotersystem selbständig geeignete Handlungen auslösen, wie Kurskorrekturen vornehmen, Hindernissen ausweichen oder Zielpositionen bestimmen. Zur Lokalisation wird aus den extrahierten Merkmalen, wie Abstand und Richtung, die relative Lage des Roboters zu einem Objekt in der Umgebung bestimmt. Aus Größe, Farbe und Form kann auch die Art eines Objekts bestimmt werden, wie eine Passage, eine Türöffnung oder ein Hindernis. Zusammen mit einer metrischen Karte¹, in der alle bekannten Objekte mit ihrer globalen Position und ihren Eigenschaften verzeichnet sind, wird durch Vergleich mit den detektierten Objekten die absolute Lage des Roboters in der Karte bestimmt. Der Vergleich wird in der Literatur als Korrespondenzproblem bezeichnet. Die Lösung des Problems beschreibt die Zuordnung von detektierten Objekten zu bekannten Objekten in einer Karte. Die Lösungen des Korrespondenzproblems sind nicht immer eindeutig. Dies muß bei der absoluten Lokalisation berücksichtigt werden. Kapitel 3 geht auf die Rechenverfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems und zur Lokalisation näher ein. Ist die Roboterlage bekannt, so können die durchzuführenden Aktionen zum Erreichen des Ziels selbständig vom Roboter bestimmt werden. Mit Hilfe der Karte kann der Roboter von der aktuellen Position einen Weg zum Zielpunkt ermitteln und die Fahrroute (Trajektorie) berechnen.

¹ Eine metrische Karte ist erforderlich, da aus Meßdaten, wie Abstand und Richtung, und der räumlichen Struktur der in der Karte gespeicherten Objekte die Roboterlage bestimmt wird.

Wurde ein Hindernis detektiert, so kann der Roboter eine Ausweichbewegung berechnen und ausführen. Sind Fahrwege ganz blockiert, so kann der Roboter eine alternative Fahrroute bestimmen.

2.2 Anforderungen

Mobile Roboter, die in Industrie oder im Servicebereich in dynamischen Umgebungen, in denen sich auch Menschen aufhalten, eingesetzt werden, müssen hohen Anforderungen gerecht werden. An das Lokalisationssystem als eine zentrale Komponente im mobilen Roboter zur Bestimmung der Lage \hat{p}_t^K lassen sich allgemein folgende Anforderungen stellen:

- **Relative und absolute Lokalisation:**
Die relative Lokalisation bestimmt die Lage des Roboters relativ zu einem bekannten Punkt, beispielsweise der Startposition. Die absolute Lokalisation bestimmt die Roboterlage absolut in der Einsatzumgebung des Roboters. Die ermittelte Lage wird in einer Karte verzeichnet.
- **Lokalisation beim Systemstart (Startup-Problem):**
Die Lokalisation beim Systemstart bestimmt die absolute Lage des Roboters nach dem Systemstart oder dem Wiederanlaufen nach einem Fehler. Die Lokalisation beim Systemstart kann im allgemeinen nicht auf vorhergehende Lageschätzungen zurückgreifen und muß daher die Lage des Roboters ausschließlich durch Meßwerte der Sensoren vom aktuellen Zustand aus bestimmen.
- **Hohe Flexibilität:**
Damit der Roboter möglichst flexibel agieren und für unterschiedlichste Aufgaben eingesetzt werden kann, muß das Lokalisationssystem möglichst einfach installiert und an die Einsatzumgebung angepaßt werden können.
- **Hohe Zuverlässigkeit:**
Die Zuverlässigkeit der Lokalisation ist entscheidend für den sicheren und effektiven Betrieb eines mobilen Roboters. Unter Zuverlässigkeit bei der Lokalisation versteht man die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Lageschätzung der tatsächlichen Lage des Roboters entspricht.

- **Robustheit bei Meßfehlern und Störungen:**
Die Lokalisation muß robust sein bei Meßfehlern und Störungen. Die durch die Lokalisation ermittelte Lageschätzung darf durch Meßfehler und Störungen, wie wechselnde Lichtverhältnisse oder Verschmutzungen, nicht soweit verfälscht werden, daß sie für die Navigation des mobilen Roboters unbrauchbar wird.
- **Einsatz in Innenräumen (Indoor) oder im Freien (Outdoor):**
Bei der Lokalisation in Innenräumen sind die Einsatzbedingungen für den Roboter meist gleichartig, während für den Einsatz im Freien zusätzliche Störfaktoren, wie Beleuchtung, Sonneneinstrahlung, Regen oder Staub, berücksichtigt werden müssen.
- **Einfachheit und Benutzerfreundlichkeit:**
Die Lokalisation sollte möglichst einfach und kostengünstig sein, um sie auch auf Robotern einsetzen zu können, für die ein aufwendiges und teures System nicht in Frage kommt, wie z. B. für viele Serviceroboter. Für den Benutzer eines mobilen Roboters muß das System einfach zu bedienen sein und möglichst wenig Fachkenntnisse voraussetzen. Für die Akzeptanz von Servicerobotern ist die Benutzerfreundlichkeit eine wesentliche Voraussetzung.

Wie in Kapitel 3 gezeigt wird, können die existierenden Lokalisationssysteme diesen Anforderungen nur teilweise nachkommen. Der sichere Betrieb eines Serviceroboters erfordert jedoch Systeme, die alle Anforderungen mit einer bekannten, definierten Genauigkeit und Zuverlässigkeit erfüllen können. Besonders zwei Anforderungen sind in den bisher entwickelten Systemen zur Lokalisation mobiler Roboter nicht oder nur ansatzweise betrachtet worden: die Lokalisation beim Systemstart und die Einfachheit des Lokalisationssystems.

Die meisten der in der Literatur beschriebenen Verfahren gehen auf die Problematik der Lokalisation nach dem Systemstart oder beim Wiederanlaufen nach dem Anhalten des Systems, wenn der Roboter keinerlei Positions- oder Orientierungsschätzung besitzt, nicht ein. Diese Verfahren setzen eine hinreichend genau bekannte Startlage voraus, die dem Robotersystem entweder manuell von einem Benutzer zur Verfügung gestellt oder auf eine andere Weise ermittelt werden muß. Einige wenige Ansätze untersuchen Verfahren für das Startup-Problem und entwickeln Techniken, die es dem Roboter mit nur sehr wenig Vorwissen (beispielsweise der Raumnummer in einer Büroumgebung) oder spezieller Sensorik

(GPS, LPS¹) ermöglichen, das Startup-Problem zu lösen. In keinem der Ansätze wird jedoch die Fragestellung hinreichend untersucht, welche Konstellationen gegeben sein müssen, damit sich ein mobiler Roboter in seiner Einsatzumgebung zurechtfinden kann, ohne daß dieser externe Hilfe nach dem Systemstart oder während des Betriebs benötigt.

Viele Verfahren zur Lokalisation erfordern einen hohen Aufwand für die Anpassung der Einsatzumgebung oder die Erfassung und Verarbeitung von Sensordaten. Bei leitlinien- oder gitterbasierten Lokalisationsverfahren muß die gesamte Umgebung, in der der Roboter eingesetzt werden soll, mit Leitlinien oder Transpondern im Boden ausgestattet werden. Bei Ultraschallsensoren muß sichergestellt sein, daß die zu erfassenden Merkmale detektiert und Störungen, wie Übersprechen und Mehrfachreflektionen, sicher erkannt werden. Bei der Verarbeitung von Kamerabildern erfordert die große Menge an Sensordaten leistungsfähige und aufwendige Rechnersysteme und Merkmale, wie Abstände, lassen sich nur mit hohem Aufwand, beispielsweise mit Stereobildverarbeitung, bestimmen. Nur wenige Techniken sind so einfach und kostengünstig, daß sie für einen realen Serviceroboter in Frage kommen. Neben Ultraschall- und Infrarotsystemen sind Laserscanner-basierte Verfahren, die künstliche oder natürliche Landmarken in der Einsatzumgebung für die Lokalisation verwenden, noch einfach und kostengünstig genug, um sie auf breiter Front in Servicerobotern einsetzen zu können. Landmarken sind dabei Merkmale in der Einsatzumgebung, die mit Sensoren eindeutig erfaßt und deren Lage relativ oder absolut bestimmt werden kann.² Diese Techniken sind einfach genug, damit der Einsatz der Sensorsysteme problemlos möglich ist. Es entfallen aufwendige Kalibrierungen, und durch die Verarbeitung der Sensordaten mit Standardrechnern sind sie kostengünstig genug, daß sie in einen Serviceroboter eingebaut werden können.

Es sind einige Verfahren bekannt, die eine genaue und zuverlässige Lokalisation mit Landmarken ermöglichen, beispielsweise das Verfahren von Hanebeck [Hanebeck 97a], bei dem Richtungen zu künstlichen Landmarken und Abstände zu natürlichen Landmarken für

¹ LPS – Local Positioning System. Das LPS verwendet analog zum GPS “Satelliten”, die lokal in der Einsatzumgebung installiert sind, beispielsweise Funk-Barken.

² [Dodds 97] definiert eine Landmarke als ein Objekt, das einen Teil der Einsatzumgebung repräsentiert, der größer als das Objekt selbst ist. Nach dieser Definition ist eine Landmarke ein räumlich kleineres Merkmal, beispielsweise ein an einer Wand befestigtes Schild, das einen räumlich größeren Bereich der Einsatzumgebung, beispielsweise einen Raum, kennzeichnet.

die Lokalisation verwendet werden. Oder das in [Leonard 91] beschriebene Verfahren, das Ultraschallsensoren und Odometrie zur Lokalisation verwendet. Insbesondere Systeme mit künstlichen Landmarken können eine hohe Genauigkeit bieten, wenn die Landmarken geeignet platziert werden. Es sind grundlegende Anforderungen an die Platzierung von Landmarken bekannt, jedoch sind Verfahren, die die Platzierung von Landmarken für die Lokalisation auf Basis von qualitativen Analysen optimieren, bisher kaum untersucht worden. Auch Techniken, die eine optimale Platzierung von Landmarken in der Einsatzumgebung ermöglichen, sind nach dem Wissensstand dieser Arbeit noch nicht entwickelt worden.

Das in dieser Arbeit entwickelte Lokalisationsverfahren auf Basis von Landmarken, die mit Laserscannern erfaßt werden können, läßt sich für fahrerlose Transportfahrzeuge und mobile Serviceroboter einsetzen und verbessert die Navigation dieser Systeme nachhaltig. Die Vermessung von Landmarken zur Lokalisation erlaubt die relative und absolute Lagebestimmung. Eine effiziente Lösung des Startup-Problems kann, wie in Kapitel 4 gezeigt wird, durch eine geeignete Kombination von künstlichen und natürlichen Landmarken gefunden werden. Durch die Verwendung von Laserscannern als Sensoren weist das System eine hohe Zuverlässigkeit und Robustheit gegen Störungen wie wechselnde Lichtverhältnisse, Sonneneinstrahlung oder Staub auf und kann daher auch im Freien und bei Dunkelheit eingesetzt werden. Meßfehler, wie Reflexionen oder nicht detektierte Landmarken, lassen sich meist sehr zuverlässig erkennen und verfälschen die ermittelte Roboterlage nicht. Darüber hinaus werden Laserscanner heute bereits vielfach auf mobilen Robotern als elektronisches Auffahrtschutzsystem eingesetzt, so daß in vielen Fällen kein zusätzliches Sensorsystem installiert werden muß. Laserscanner und Landmarken lassen sich einfach montieren, und die Sensordatenverarbeitung gestaltet sich nicht so komplex und aufwendig wie bei Bildverarbeitungssystemen. Eine Kalibrierung des Systems ist nicht erforderlich, und Wartungsarbeiten fallen nur in sehr geringem Maße an.

2.3 Aufgabenstellung

In dieser Arbeit soll ein Lokalisationssystem entwickelt werden, das für mobile Roboter geeignet ist, die im Servicebereich und in Industrieumgebungen eingesetzt werden. Folgende Aufgaben sollen näher untersucht und Lösungen für diese Teilprobleme entwickelt werden:

- Bestimmung der relativen und absoluten Lage für einen in der Ebene fahrenden Roboter auf Basis von künstlichen und natürlichen Landmarken
- Lokalisation beim Systemstart (Startup-Problem)
- Plazierung von künstlichen Landmarken
- Detektion und Auswahl von natürlichen Landmarken
- Behandlung von Meßfehlern zur Verbesserung der Zuverlässigkeit und Robustheit des Systems
- Modellierung der Unsicherheiten

Die Beschränkung auf einen in der Ebene fahrenden Roboter stellt keine prinzipielle Einschränkung für das System dar. Auf Unterschiede, die sich zwischen der Anwendung des Systems in der Ebene ($\dot{\rho}_t^K = [x \ y \ \Theta]^T$) und der allgemeineren Anwendung im Raum ($\dot{\rho}_t^K = [x \ y \ z \ \Theta \ \Phi \ \Psi]^T$) ergeben, wird in dieser Arbeit an den entsprechenden Stellen hingewiesen werden.

Für die Erfassung von Landmarken werden in dieser Arbeit Laserscanner eingesetzt. Laserscanner sind inzwischen mit guten Leistungsdaten und preisgünstig erhältlich. Sie haben sich auf fahrerlosen Transportsystemen und in vielen Servicerobotern als Sensorsystem zur berührungslosen Abstandsmessung als Standardausrüstung durchgesetzt. Zusätzlich zum Kollisionsschutz können Laserscanner auch für die Erfassung von Landmarken eingesetzt werden. Kapitel 3.4 geht auf die Erfassung von Landmarken mit Laserscannern näher ein. Außer Laserscannern können auch andere Sensorsysteme, beispielsweise Kameras, zur Erfassung von Landmarken eingesetzt werden. Kameras können darüber hinaus detaillierte und zusätzliche Informationen zur Umgebung liefern. Stehen Algorithmen zur Detektion von Landmarken mit Kameras zur Verfügung, so kann das in dieser Arbeit entwickelte Lokalisationsverfahren auch mit Kameras als Sensorsystem eingesetzt werden.

Bevor für die einzelnen Teilaufgaben Lösungen untersucht und entwickelt werden, wird im folgenden Kapitel der Stand der Technik bezüglich Lokalisationsverfahren zusammengefaßt und der Versuch einer einfachen Klassifikation der Verfahren nach ihrer Leistungsfähigkeit und der Verwendbarkeit in mobilen Service- und Industrierobotern unternommen.

2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Übersicht zur Problemstellung der Lokalisation bei mobilen Robotern, die in der Industrie und im Servicebereich eingesetzt werden, gegeben. Es wurde der allgemeine Aufbau von mobilen Robotern vorgestellt, die wichtigsten Komponenten und deren Zusammenspiel dargestellt und die Notwendigkeit für ein zuverlässiges und präzises Lokalisationssystem erläutert. Aufbauend auf dieser Grundlage wurden die verschiedenen Lokalisationsarten (relative Lokalisation, absolute Lokalisation und absolute Lokalisation ohne Vorwissen zur Roboterlage) definiert und die heute für Lokalisationsaufgaben in mobilen Robotern eingesetzte Sensorik beschrieben.

Aufbauend auf den in Kapitel 1 genannten neuen Beispielanwendungen mobiler Roboter in der Industrie und im Servicebereich wurde festgestellt, daß für Serviceroboter zur Zeit noch kein Lokalisationssystem zur Verfügung steht, das in dynamischen Umgebungen, in denen sich auch Menschen aufhalten, zuverlässig und präzise funktioniert. Es sind keine Systeme verfügbar, die die relative und absolute Lokalisation und die Lösung des Startup-Problems ermöglichen und dabei einfach und benutzerfreundlich anzuwenden sind. Auf dieser Grundlage wurden die Anforderungen für ein praktisch einsetzbares Lokalisationssystem abgeleitet und die offenen Fragestellungen aufgezeigt. Abschließend wurde die für diese Arbeit zugrundeliegende Aufgabenstellung für ein neues Lokalisationsverfahren formuliert, das die effiziente und schnelle Lokalisation mobiler Serviceroboter in dynamischen Einsatzumgebungen ermöglicht.

3. Stand der Forschung

In der Forschung sind in der Vergangenheit bereits viele Ansätze zur Lösung des Lokalisationsproblems bei mobilen Robotern untersucht worden ([Borenstein 96a], [Borenstein 96b]). Nur wenige dieser Ansätze wurden soweit entwickelt, daß sie von der Industrie als kommerzielle Anwendung aufgenommen und in fahrerlosen Transportsystemen eingesetzt wurden. Im Servicebereich gibt es bis jetzt nur vereinzelt kommerziell genutzte Umsetzungen mobiler Roboter (beispielsweise [Evans 94], [Endres 98]), und es existieren für diesen Anwendungsbereich noch keine bewährten Techniken zur Lokalisation. In den folgenden Abschnitten wird eine Übersicht zu Lokalisationsverfahren für mobile Roboter gegeben, die in der Forschung untersucht oder bereits industriell umgesetzt worden sind. Außerdem soll analysiert werden, welche Ansätze sowohl kurz- wie langfristig Lösungen für das Lokalisationsproblem für die in Kapitel 1 genannten mobilen Serviceroboter bieten könnten.

Die bisher untersuchten Verfahren zur Lokalisation mobiler Roboter können, wie in Abbildung 3.1 gezeigt, gegliedert werden. Es lassen sich zwei große Gruppen unterscheiden: Verfahren zur internen Lokalisation und solche zur externen Lokalisation. Die interne Lokalisation nutzt ausschließlich Meßgrößen, die sich auf den mobilen Roboter beziehen. Die externe Lokalisation bezieht Meßgrößen ein, die den mobilen Roboter in einen Bezug zu seiner Umgebung setzen. Zusätzlich können auch auf den Roboter bezogene Meßgrößen mitverwendet werden.

Darüber hinaus wird zwischen relativer und absoluter Lokalisation unterschieden. Bei der relativen Lokalisation erfolgt die Bestimmung der Lage des Roboters in einem Koordinatensystem, bezogen auf den mobilen Roboter (FKS). Bei der absoluten Lokalisation erfolgt die Lagebestimmung bezüglich eines äußeren Weltkoordinatensystems (WKS).

3.1 Interne Lokalisation

Die interne Lokalisation, auch Koppelnavigation genannt (engl. Ursprung dead-reckoning: „deduced reckoning“, früher bei der Schifffahrt verwendet) ([Borenstein 96a], [Dixon 97], [Everett 95]), verfolgt Ansätze, bei der ausschließlich Sensoren verwendet werden, die nur

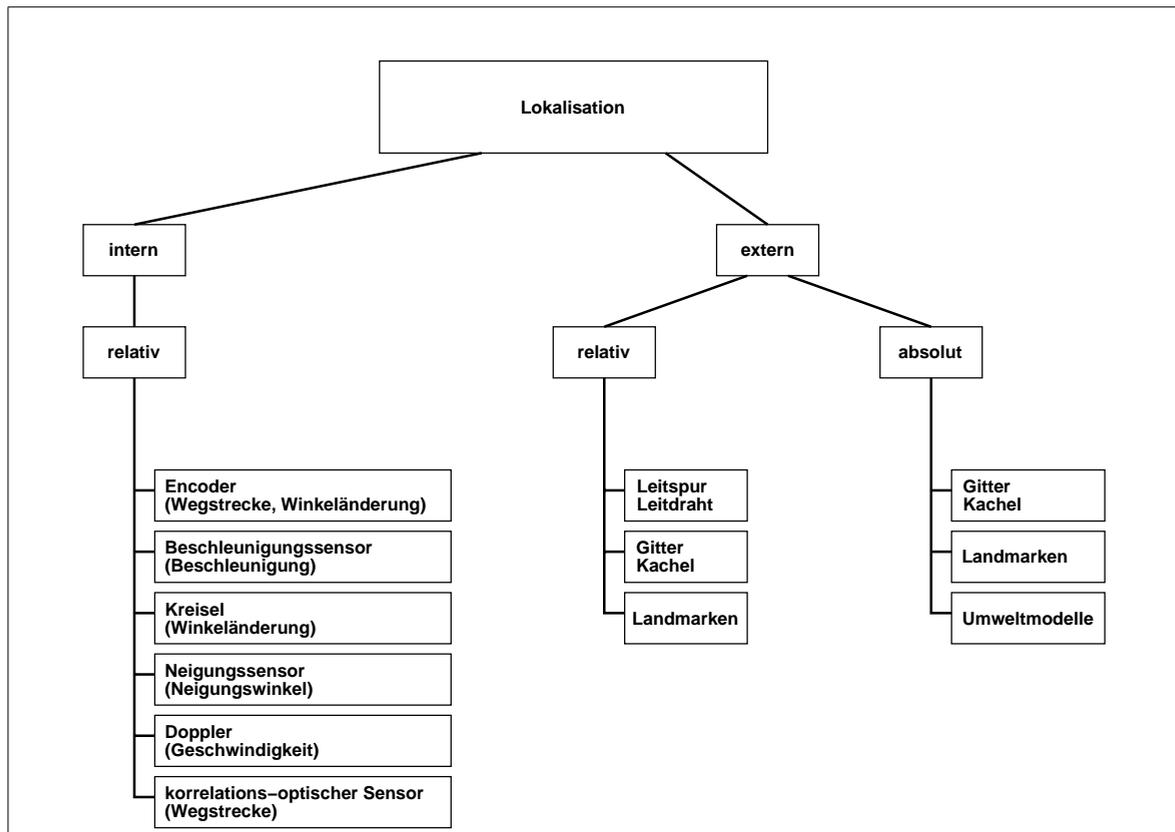


Abbildung 3.1: Übersicht untersuchter Lokalisationsverfahren.

den mobilen Roboter betreffende, sich ändernde Meßgrößen erfassen. Das Grundprinzip des Dead-Reckoning versucht, die Lage des mobilen Roboters aus den Bewegungsänderungen bezüglich eines bekannten Punkts (beispielsweise der letzten bekannten Lage) zu schätzen.¹ Dazu werden Positions- und Orientierungsänderungen mit Sensoren gemessen und die neue Lage durch Rechenverfahren wie dem Kalman-Filter ([Kalman 60], [Maybeck 79], [Welch 95]) bestimmt. Häufig eingesetzte Sensoren sind dabei odometrische Sensoren zur indirekten Wegstreckenmessung ([Borenstein 97], [Borenstein 96c]), wie Inkrementgeber, die Umdrehungen an den Rädern messen, aber auch Systeme zur direkten Wegstreckenmessung, wie Doppler-Systeme oder korrelations-optische Sensoren [Everett 95]. Weitere Sensoren sind Kreiselsysteme und Neigungsmesser zur Erfassung von Orientierungsänderungen oder Trägheitssysteme zur Messung von Beschleunigungen [Kuritsky 90]. Den verschiedenen Sensorsystemen ist die Eigenschaft gemeinsam, daß sie ausschließlich eine

¹ Durch den Einsatz von Sensoren zur informationstechnischen Erfassung physikalischer Effekte, wie Weglänge, Zeit, Geschwindigkeit, sind die Meßgrößen aufgrund von Rauschen immer mit Fehlern behaftet, so daß die Meßdaten nur Schätzwerte für die tatsächlichen, jedoch unbekanntenen Größen sein können.

relative Lokalisation zu einem Anfangswert liefern können. Steht ein Anfangswert nicht zur Verfügung, wie dies beim Systemstart ohne besondere Maßnahmen der Fall ist, so ist eine absolute Lokalisation in einem Weltkoordinatensystem nicht möglich. Durch Integration von fehlerbehafteten Meßwerten, die sich durch Schlupf an den Rädern, Abnutzung, Kalibrierungs- und Meßfehler und Einschränkungen des gewählten Sensormodells ergeben, wächst der Fehler der Lageschätzung bei der internen Lokalisation mit fortschreitender Zeit an. Eine hinreichende Lokalisation ist dann selbst bei gegebenem Anfangswert ab einer bestimmten Zeit bzw. Wegstrecke nicht mehr sinnvoll möglich.

Aufgrund des einfachen Aufbaus der Sensoren und der einfachen und schnellen Datenauswertung wird die interne Lokalisation in nahezu jedem mobilen Roboter als Basis für die Positions- und Orientierungsschätzung verwendet. Wegen des unbeschränkt anwachsenden Fehlers ist es für den praktischen Einsatz eines mobilen Roboters jedoch unumgänglich, diesen Fehler von Zeit zu Zeit zu korrigieren. Möglichkeiten zur Korrektur bieten die Verfahren zur externen Lokalisation, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

3.2 Externe Lokalisation

Für die externe Lokalisation werden Sensorsysteme verwendet, die vom Roboter unabhängige Merkmale in der Umgebung auswerten. Durch den Bezug auf externe Merkmale werden unbeschränkt sich aufsummierende Fehler, wie bei der internen Lokalisation, vermieden. Daher ist die externe Lokalisation als Ergänzung oder Ersatz für die interne Lokalisation unabdingbar. Verfahren zur externen Lokalisation liefern entweder, wie bei der internen Lokalisation, relative Werte im Koordinatensystem des Roboters oder, unter bestimmten Voraussetzungen, auch direkt absolute Werte in einem Weltkoordinatensystem. Die Bestimmung absoluter Werte ermöglicht auch als einzige Technik die direkte Lokalisation des Roboters in einem Weltkoordinatensystem, wie sie für viele Einsatzzwecke notwendig ist. Zur externen Lokalisation sind verschiedene Techniken entwickelt worden:

- **Leitspur/Leitdraht:** Bei diesem Verfahren erfolgt die Lokalisation anhand fester, vorgegebener Spuren, die vom Roboter mechanisch, magnetisch, induktiv oder optisch abgetastet werden. Diese Verfahren haben für die ersten Generationen der fahrerlosen Transportsysteme in der Industrie wegen ihrer hohen Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit großen Anklang gefunden. Nachteilig bei diesem System ist, daß das Verlegen der Spuren, an denen sich die mobilen Roboter ent-

langtasten, sehr aufwendig ist und sie fest in der Einsatzumgebung vorgegeben werden müssen. Der Einsatz der Roboter ist dann auf die Spuren eingeschränkt und wenig flexibel bei Änderungen der Roboterumgebung. Realisiert werden spurgeführte Lokalisationsverfahren durch im Boden eingelassene oder aufgeklebte Metallbänder, stromdurchflossene Drähte oder aufgemalte Leitlinien. Durch die feste Vorgabe der Spuren ist eine freie Navigation des Roboters, wie dies unter anderem für Ausweichmanöver um Hindernisse herum erforderlich ist, nicht möglich. Zudem ist die Lokalisation entlang der Spur meist nicht möglich, sondern nur in einer Dimension quer zur Fahrtrichtung. Der spurgebundenen Lokalisation kommt daher in der Forschung keine Bedeutung mehr zu und findet auch in der Industrie nur noch eingeschränkt Einsatzgebiete.

Eine Variante der Leitspur ist der Leitdraht. Bei diesem Verfahren tastet der mobile Roboter einen seitlich am Fahrweg gespannten Führungsdraht ab. Dieses einfache Verfahren wird in der Bauindustrie zur Lokalisation von Straßenbaumaschinen noch häufig eingesetzt ([Baum 98], [ART 98]), weil in der Umgebung der Baustelle im allgemeinen keinerlei Strukturen vorhanden sind, die als Navigationshilfe geeignet wären. Der Leitdraht stellt z. Z. die einzig sinnvolle Möglichkeit zur Führung von Baumaschinen dar. Das Anbringen des Leitdrahts erfordert jedoch einen hohen Aufwand und ist durch den mechanischen Aufbau nur wenig robust.

- Gitter/Raster: Bei diesem Verfahren erfolgt die Lokalisation mit Hilfe gitter- oder rasterförmig in der Einsatzumgebung angeordneter Merkmale [FROG 2000].¹ Die Lokalisation erfolgt dabei nur diskret an den Gitterpunkten; zwischen den Gitterpunkten fährt der mobile Roboter ausschließlich mit Hilfe interner Sensorik, d. h. der mobile Roboter navigiert zwischen Gitterpunkten frei nur mit der internen Lokalisation. Gitterbasierte Systeme lassen sich durch im Boden eingelassene Magnetpillen oder Transponder realisieren, an denen sich der mobile Roboter „entlangtastet“. Die Lokalisation kann relativ zum letzten passierten Gitterpunkt oder absolut im Gitternetz erfolgen. Dadurch, daß die Gitterpunkte eine Fläche abdecken, sind die möglichen Fahrwege des mobilen Roboters auf diesem Gitter frei wählbar. Dies bietet dem Roboter die Möglichkeit, Ausweichmanöver um Hinder-

¹ engl. FROG – Free Ranging On Grid navigation system.

nisse auszuführen und Fahrrouten flexibel zu wählen. In der Industrie haben gitterbasierte Systeme die leitspurgeführten Systeme daher in vielen Fällen bereits abgelöst.

- **Kacheln:** Die kachelbasierten Systeme sind den Gittersystemen ähnlich. Bei den kachelbasierten Systemen wird die Einsatzumgebung (Boden oder Decke) des Roboters in einem Raster mit Kacheln ausgelegt. Auf den Kacheln sind Muster aufgebracht, die die absolute Position einer Kachel eindeutig identifizieren. Der mobile Roboter nimmt mit einer Kamera die Muster auf den Kacheln auf und decodiert die darin gespeicherten Lokalisationsinformationen. Aus der Position und der Orientierung der Kachel bestimmt der Roboter seine eigene absolute Lage. Neben Kacheln mit deterministischen Mustern [Petriu 96] sind in der Forschung auch leistungsfähigere Verfahren mit zufälligen Mustern und fehlerkorrigierenden Codes untersucht worden, die auch bei verschmutzten und teilweise beschädigten Kacheln eine größtmögliche Robustheit bieten [Cord 97]. Nachteilig bei den Kachelsystemen ist der hohe Aufwand für das Auslegen der Kacheln in der Einsatzumgebung. Im industriellen Bereich haben die Kachelsysteme daher nur in speziellen Umgebungen Einsatz gefunden.
- **Landmarken:** Bei den Verfahren, die Landmarken zur Lokalisation einsetzen, lassen sich zwei Ansätze unterscheiden, die auf unterschiedliche Landmarkenarten ausgerichtet sind: auf künstliche Landmarken und natürliche Landmarken. Eine Landmarke – künstlich oder natürlich – stellt dabei ein Merkmal in der Umgebung des Roboters dar, das mit einem Sensorsystem detektiert werden kann und dessen Position und gegebenenfalls Orientierung relativ oder absolut zum Roboter bekannt ist. Bei künstlichen Landmarken werden dabei aktive Landmarken in Form von Ultraschall-, Licht- oder Radio-Marken ([Boley 96], [Bonnifait 96], [McGillam 88], [Corre 92], [Stella 95]) oder passive Landmarken in Form von Farbmustern oder Reflektoren unterschieden ([Hanebeck 97a], [Hanebeck 97b], [Becker 95], [Durrant-Whyte 95], [Nishizawa 95], [Tsumara 93]). Bei natürlichen Landmarken werden in der Umgebung des Roboters vorhandene, leicht erkennbare Strukturelemente, wie vertikale Linien oder Flächen ([Krotkov 89], [Horn 95a], [Horn 95b], [Atiya 95]), oder bekannte geometrische Elemente, wie Wände ([Leonard 91], [Betke 94], [Bulata 96], [Gonzalez 92], [Hinkel 89], [Sabatini 94]), Ecken ([Yagi 95], [Lallement 98]), oder Objekte wie Türen ([Holenstein 92],

[Thrun 96]) verwendet. Als Sensorsysteme kommen Ultraschallsensoren, Radioempfänger, Laserscanner und Kamerasysteme zum Einsatz, die Richtung, Abstand, Größe und Farbe der Landmarken erfassen.

Die Landmarken sind in einer im Robotersystem gespeicherten Karte verzeichnet. Anhand der mit den Sensoren erfaßten und der in der Karte gespeicherten Landmarken bestimmt der Roboter durch Vergleich eine Zuordnung (Lösung des Korrespondenzproblems) und berechnet daraus seine Lage. Landmarkensysteme haben einen Stand erreicht, der die zuverlässige Anwendung im industriellen Bereich erlaubt. Insbesondere künstliche Landmarken werden zunehmend als Ersatz der Leitdrahtsysteme in fahrerlosen Transportsystemen eingesetzt ([Götting 98], [IBEO 98], [SIMAN 96]). Im Outdoor-Bereich, beispielsweise in der Bauindustrie, stellen Systeme mit künstlichen Landmarken zur Zeit die oft einzig sinnvolle Möglichkeit zur präzisen und zuverlässigen Lokalisation dar.

Eine besondere Form zur Lokalisation mit aktiven Landmarken¹ ist das GPS bzw. DGPS². Bei diesen Verfahren werden Funksignale der 24 GPS-Satelliten zur Lokalisation verwendet, die die Erde in einer Umlaufbahn umkreisen. Aus den gemessenen Signallaufzeiten zu mindestens drei GPS-Satelliten kann der relative Abstand des GPS-Empfängers berechnet und mit einem vierten Satelliten die absolute Position bestimmt werden. Für den zivilen Einsatz steht zur Zeit nur ein künstlich verfälschtes Signal zur Verfügung (engl. „selective availability“, S/A), so daß die erreichbare Genauigkeit bei GPS stark eingeschränkt ist (wenige *m*).³ Mit Hilfe eines Referenzempfängers (DGPS), dessen Position bekannt ist, kann die erzielbare Genauigkeit zwar beträchtlich verbessert werden (einige *cm*), jedoch funktioniert das GPS-Verfahren prinzipbedingt nur im Outdoor-Bereich bei freier Sicht auf mindestens vier der GPS-Satelliten und wenn die Funksignale störungsfrei empfangen

¹ Aktive Landmarken besitzen im Gegensatz zu passiven Landmarken eine eigene Energiequelle und senden Signale aus, beispielsweise Lichtimpulse, Schall- oder Funkwellen, die die Detektierbarkeit der Landmarken mit dem Sensorsystem bei vorhandenen Störungen deutlich verbessert.

² DGPS – Differential Global Positioning System.

³ Die künstliche Signalverfälschung „selective availability“ wurde kürzlich vom GPS-Betreiber, dem amerikanischen Verteidigungsministerium, abgeschaltet, so daß das unverfälschte Signal jetzt auch für zivile Zwecke zur Verfügung steht.

werden können. Diese Einschränkungen reduzieren die Einsatzmöglichkeiten von GPS zur Lokalisation mobiler Roboter auf spezielle Anwendungen, beispielsweise den Einsatz von Robotern für den Straßenbau ([ART 98], [Pampagnis 93]).

- Umweltmodelle: Verfahren, die Umweltmodelle einsetzen, umfassen Techniken, die ein mehr oder weniger naturgetreues Modell der Umgebung des Roboters mit Merkmalen, wie Türen, Fenster, Möblierung oder Landschaftsformen, für die Lokalisation verwenden. Das Modell wird mit Hilfe von Bildverarbeitungsverfahren und Techniken aus der Photogrammetrie [Rüger 87] auf Basis von Lasermeßdaten oder Kamerabildern erstellt. Durch Vergleich von gemessenen Merkmalen mit Merkmalen des erstellten Modells auf Basis von 3D-Beschreibungen oder Höhenkarten wird die Roboterlage bestimmt ([Talluri 92], [Talluri 96]). Die Erstellung des Umweltmodells und das Erkennen von Merkmalen aus den Sensordaten erfordern meist einen hohen Aufwand, ist abhängig von der Umgebung, fehleranfällig und durch die Leistungsfähigkeit der Sensoren und der Techniken zur Modellbildung und Merkmalsextraktion in der Genauigkeit beschränkt, so daß diese Verfahren im industriellen Bereich zur Lokalisation mobiler Roboter bisher noch wenig Einsatzmöglichkeiten gefunden haben.

Tabelle 3.1 zeigt einige Beispiele mobiler Roboter und der einsetzbaren Lokalisationsverfahren. Für fahrerlose Transportsysteme können alle Lokalisationsverfahren eingesetzt werden, da die Einsatzumgebung dieser Systeme meist sehr genau bekannt ist und mit Leitdrähten, Transpondern, Kacheln oder Landmarken entsprechend ausgestattet werden kann. Für Serviceroboter, wie Reinigungsroboter, Sicherheitsroboter, Büroroboter, Hotelroboter oder Krankenhausroboter, die sich auch in dynamischen Umgebungen zurechtfinden müssen, lassen sich landmarkenbasierte Systeme am besten einsetzen. Gitter- oder kachelbasierte Systeme können dann verwendet werden, wenn die Einsatzumgebung mit einem Transpondergitter oder Kacheln ausgestattet werden kann. Bei Baumaschinen reduzieren sich die sinnvoll einsetzbaren Lokalisationsverfahren auf den Leitdraht und auf landmarkenbasierte Systeme, da es im Außenbereich noch keine Alternativen gibt. Umweltmodelle sind für mobile Roboter, die sich in dynamischen Umgebungen oder im Außenbereich bewegen, nur bedingt einsetzbar, da sich die Einsatzumgebung verändern kann. In gering strukturierten Einsatzumgebungen, wie Baustellen, oder völlig unstrukturierten Umgebungen, wie freie Landschaft oder Waldflächen, sind Umweltmodelle kaum einsetzbar, da die Einsatzumgebung sich verändern kann und im allgemeinen nicht genau bekannt ist.

		Leitspur Leitdraht	Gitter	Kachel	Land- marken	Umwelt- modelle
Innenräume	FTF	✓	✓	✓	✓	✓
	Serviceroboter (statische Umgebung)	-	(✓)	(✓)	✓	(✓)
	Serviceroboter (dynamische Umgebung)	-	(✓)	(✓)	✓	-
Außenbereiche	Shuttle-Transporter (FROG)	(✓)	✓	-	✓	(✓)
	Serviceroboter (statische Umgebung)	-	(✓)	-	✓	(✓)
	Serviceroboter (dynamische Umgebung)	-	(✓)	-	✓	-
	Baumaschine (gering strukturierte Umgebung)	✓	-	-	✓	-
	Laufmaschine (unstrukturierte Umge- bung)	-	-	-	✓	-

✓ einsetzbar, (✓) bedingt einsetzbar, - nicht einsetzbar

Tabelle 3.1: Beispiele für mobile Roboter und die einsetzbaren Lokalisationsverfahren.

3.3 Vergleich der Lokalisationsverfahren

Die in Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 genannten Lokalisationsverfahren erfüllen die in Kapitel 2.2 gestellten Anforderungen nur teilweise. Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3 geben einen Überblick über die verschiedenen Verfahren und versuchen einen einfachen Vergleich der Genauigkeiten, der jeweiligen Einschränkungen und der Einsatzmöglichkeiten.

Die interne Lokalisation durch Dead-Reckoning bietet nur eine relative Lokalisation und ist aufgrund der sich bei der Integration aufsummierenden Fehler für eine zuverlässige und genaue Lokalisation in keinem Fall ausreichend. Leitspur- und Leitdrahtverfahren bieten für die meisten Serviceroboteranwendungen eine zu geringe Flexibilität und nur eine eingeschränkte absolute Lokalisation quer zur Leitspur bzw. zum Leitdraht. Gittersysteme bieten

nur eine punktweise Lokalisation an den Gitterpunkten, bei einfachen Systemen nur eine relative Lokalisation (FROG) und im allgemeinen keine Lösung für das Startup-Problem. Kachelsysteme lassen sich im Außenbereich kaum einsetzen und erfordern einen hohen Aufwand bei der Anpassung der Einsatzumgebung, der nicht immer gerechtfertigt oder möglich ist. Lokalisationsverfahren, die mit Ultraschallsensoren oder Radioempfängern Landmarken erfassen, bieten nur eine geringe Genauigkeit und sind aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Störungen wenig robust. Lokalisationsverfahren, die mit Kameras Landmarken erfassen, setzen bekannte Strukturelemente in der Einsatzumgebung voraus, die insbesondere in Außenbereichen nicht immer vorhanden sind oder erfaßt werden können. Darüber hinaus erfordert die Bildverarbeitung eine komplexe und aufwendige Sensordatenverarbeitung, bei vergleichsweise geringer Genauigkeit. GPS und DGPS sind nur im Outdoor-Bereich einsetzbar und bei freier Sicht auf eine ausreichende Anzahl von GPS-Satelliten. Verfahren, die Umweltmodelle verwenden, erfordern einen hohen Aufwand für die Erstellung des Modells und die Erkennung und Zuordnung von Modellmerkmalen und sind wenig robust.

		Einschränkungen	Genauigkeit	Startup-Problem	Outdoor
Intern (relative Lokalisation)	Encoder	sich aufsummierende Fehler	niedrig	-	(✓)
	Doppler-Systeme, korrelations-optische Sensoren	sich aufsummierende Fehler	mittel	-	✓
	Kreisel/Neigungssensor	sich aufsummierende Fehler	niedrig	-	✓
	Trägheitssensor	sich aufsummierende Fehler	niedrig	-	✓

✓ einsetzbar, (✓) bedingt einsetzbar, - nicht einsetzbar

Tabelle 3.2: Vergleich von Lokalisationsverfahren (interne Lokalisation).

Setzt man Aufwand und Einschränkungen der in Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3 aufgeführten Verfahren mit den erzielbaren Genauigkeiten und den Einsatzmöglichkeiten in Relation, so scheinen für Serviceroboter nur einige Systeme für die Lokalisation in Frage zu kommen: spur- und leitdrahtgeführte Systeme, Kachelsysteme und Landmarkensysteme (grau hinterlegte Zeilen in Tabelle 3.3). Spur- und leitdrahtgeführte Systeme können wegen der aufwendigen Installation und des mechanischen Aufbaus nur in speziellen Einsatzumgebungen

		Einschränkungen	Genauigkeit	Startup-Problem	Outdoor
Extern (relative und absolute Lokalisation)	Leitspur	feste Fahrspuren	hoch	-	(✓)
	Leitdraht	nur am Draht, keine Kurven	hoch	-	✓
	Gitterbasierte Systeme (Transponder, Magnetpillen)	nur punktweise Lokalisation, aufwendige Anpassung der Einsatzumgebung	mittel	(✓)	(✓)
	Kachel-Systeme	aufwendige Anpassung der Einsatzumgebung	hoch	✓	-
	künstliche Landmarken	freie Sicht auf Landmarken erforderlich	hoch	✓	✓
	natürliche Landmarken (Ultraschall, Radar)	bekannte Strukturelemente erforderlich, freie Sicht auf Landmarken erforderlich	niedrig	(✓)	✓
	natürliche Landmarken (Laserscanner)	bekannte Strukturelemente erforderlich, freie Sicht auf Landmarken erforderlich	hoch	(✓)	(✓)
	natürliche Landmarken (Bildverarbeitung)	bekannte Strukturelemente erforderlich, freie Sicht auf Landmarken erforderlich, hoher Aufwand für Sensordatenverarbeitung	mittel	(✓)	(✓)
	GPS/DGPS	freie Sicht auf Satelliten erforderlich	niedrig	✓	✓
	Umweltmodelle	bekannte Strukturelemente erforderlich, hoher Aufwand für Sensordatenverarbeitung, Modellgenerierung und Modellvergleich	mittel	(✓)	(✓)

✓ einsetzbar, (✓) bedingt einsetzbar, - nicht einsetzbar

Tabelle 3.3: Vergleich von Lokalisationsverfahren (externe Lokalisation).

eine sinnvolle Anwendung finden, beispielsweise für FTS in der Industrie [VDI 2510] oder Baumaschinen im Straßenbau [ART 98]. Für den Bereich der Servicerobotik kommen leitdrahtgeführte Systeme kaum in Frage. Gitter- und Kachelsysteme werden für einzelne Anwendungen, wie dem ParkShuttle-System von FROG [FROG 2000] erfolgreich eingesetzt. Sie erfordern jedoch eine aufwendige Anpassung der Einsatzumgebung, die nicht immer gerechtfertigt oder möglich ist, wie bei Serviceroboteranwendungen in Hotels und Museen oder an häufig wechselnden Einsatzorten. Landmarkensysteme mit künstlichen Marken und Systeme mit natürlichen Landmarken, die mit Laserscannern erfaßt werden, scheinen das höchste Potential für genaue und zuverlässige Lokalisationssysteme zu bieten und sind noch flexibel genug, um sie in unterschiedlichsten Anwendungen und an häufig wechselnden Einsatzorten sinnvoll einsetzen zu können. Im folgenden soll daher näher auf Verfahren zur Lokalisation mobiler Serviceroboter eingegangen werden, die künstliche und natürliche Landmarken verwenden, die mit Laserscannern erfaßt werden.

3.4 Lokalisation mit Landmarken und Laserscannern

3.4.1 Einführung

Die Lokalisation mit Landmarken stellt eine grundlegende Technik zur Bestimmung von Position und Orientierung dar. In der Seefahrt ist es die Aufgabe des Navigators, die Position und Fahrtrichtung des Schiffs zu bestimmen. In früherer Zeit wurden Sonne und Sterne als natürliche Landmarken, heute werden GPS-Satelliten als künstliche Landmarken verwendet. In der Tierwelt sind natürliche Landmarken eine entscheidende Orientierungshilfe, beispielsweise von Insekten. So orientieren sich Bienen an markanten Objekten, wie Bäumen, Häusern oder Bachläufen, um den Bienenstock oder eine Futterquelle wiederzufinden [Maurer 80]. Auch der Mensch orientiert sich in seiner Umgebung häufig anhand von Landmarken.

Der prinzipielle Ablauf der Lokalisation mit Landmarken ist in Abbildung 3.2 gezeigt. Die Umgebung des Roboters wird mit einem Sensorsystem erfaßt und Winkel, Abstand und Farbe von Objekten werden bestimmt. In den Sensordaten werden durch Merkmalsextraktion geeignete Landmarken detektiert. Mit Hilfe von a priori Wissen, wie Odometrie- oder Kartendaten, werden die detektierten Landmarken bekannten Landmarken zugeordnet

(Korrespondenzproblem). Aus der Lösung des Korrespondenzproblems wird die Roboterlage geschätzt. Zusätzlich kann unter bestimmten Voraussetzungen (siehe Kapitel 4.4.7) das Startup-Problem gelöst und die Startlage geschätzt werden.

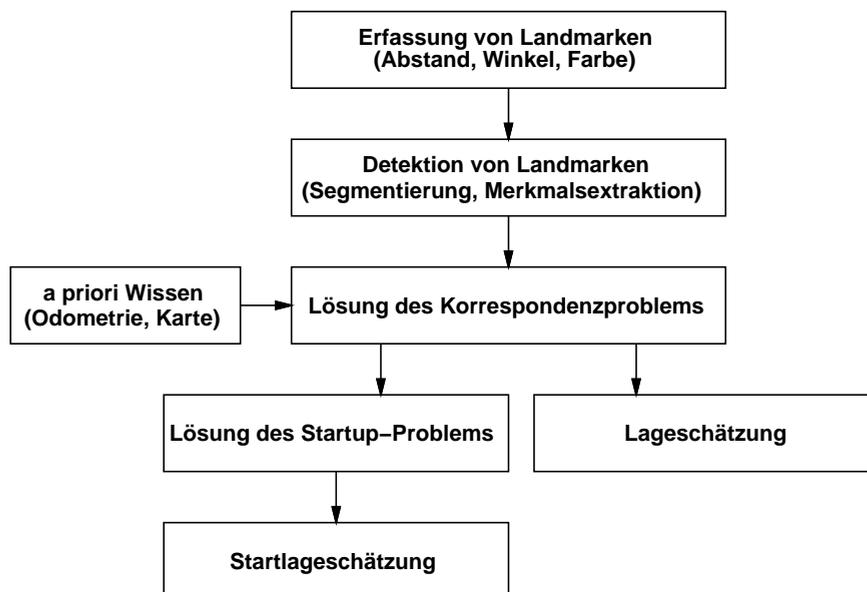


Abbildung 3.2: Prinzipieller Ablauf der Lokalisation in einem mobilen Roboter.

Bei der Lokalisation mit Landmarken lassen sich zwei Arten von Marken unterscheiden: künstliche Landmarken und natürliche Landmarken. Als künstliche Landmarken werden Merkmale bezeichnet, die speziell für die Lokalisation in der Einsatzumgebung platziert werden, wie Licht- oder Funksender, Reflektoren oder optische Markierungen. Künstliche Landmarken sind meist so gestaltet, daß diese möglichst zuverlässig und mit großer Genauigkeit mit einem oder mehreren Sensorsystemen des Roboters erfaßt werden können. Als natürliche Landmarken werden dagegen Merkmale bezeichnet, die in der Einsatzumgebung bereits vorhanden sind und nicht speziell für die Lokalisation installiert wurden. Natürliche Landmarken können daher auch künstliche Objekte sein, beispielsweise Wände oder Türen. Die Erfassung natürlicher Landmarken mit den Sensorsystemen des Roboters gestaltet sich im allgemeinen aufwendiger und schwieriger, da die natürlichen Landmarken nicht an die speziellen Eigenschaften der eingesetzten Sensorsysteme, wie Ultraschall, Laserscanner oder Kamera, angepaßt sind. Für die Verwendung natürlicher Landmarken zur Lokalisation spricht jedoch, daß diese Landmarken vor dem Einsatz des Robotersystems nicht erst instal-

liert werden müssen. Sollen natürliche Landmarken zur Lokalisation verwendet werden, muß jedoch sichergestellt sein, daß das Robotersystem an jeder Stelle der Einsatzumgebung eine ausreichende Anzahl natürlicher Landmarken erfassen kann.

Zur Erfassung von Landmarken lassen sich unterschiedlichste Sensoren einsetzen, die Abstände oder Richtungen von Landmarken relativ zum Roboter bestimmen können. Mit Ultraschall- oder Radarsensoren lassen sich Abstände zu Objekten erfassen, jedoch ist die Richtungsauflösung durch die breite Streuung der Schall- bzw. Funkwellen nur gering und eine Unterscheidung von Objekten anhand der reflektierten Signale kaum möglich. Kamerasysteme bieten eine gute Richtungsauflösung, und es können anhand der Lichtintensitäten Objekte unterschieden werden. Jedoch ist eine direkte Abstandsmessung nicht möglich. Die bei Kamerasystemen anfallenden Datenmengen sind um ein vielfaches höher als bei Ultraschall- oder Radarsensoren und müssen in einem Vorverarbeitungsschritt zunächst aufbereitet werden. Mit Laserscannern lassen sich Abstand und Richtung mit einer hohen Auflösung und Genauigkeit erfassen und anhand der Intensitäten des reflektierten Lichts verschiedene Objekte unterscheiden. Laserscanner werden daher häufig für die Erfassung von künstlichen und natürlichen Landmarken eingesetzt.

Für die Lokalisation mit Landmarken müssen, abhängig von den eingesetzten Sensorsystemen, unterschiedliche Voraussetzungen erfüllt sein ([Sugihara 88], [Chen 93]):

- **Winkelmessung:** Es müssen mindestens drei Landmarken erfaßt werden, die nicht kollinear angeordnet sind. Die Roboterlage ergibt sich aus dem Schnitt zweier Kreise (siehe Abbildung 3.3).
- **Winkel- und Abstandsmessung:** Es müssen mindestens zwei Landmarken erfaßt werden. Die Roboterlage ergibt sich direkt aus dem gemessenen Winkel und den gemessenen Abständen.
- **Winkel- und Abstandsmessung, Kompaß:** Es muß mindestens eine Landmarke erfaßt werden. Die Roboterorientierung wird über den Kompaß bestimmt. Die Roboterposition ergibt sich direkt aus den Winkel- und Abstandsdaten der gemessenen Landmarke.

Diese Voraussetzungen sind die Minimalbedingungen für die Lokalisation mit Landmarken. Darüber hinaus müssen die Positionen der Landmarken in der Umgebung bekannt sein, um aus den Meßwerten die Roboterposition ableiten zu können. Die Positionsdaten der Land-

marken werden daher in einer Karte gespeichert und diese dem Roboter als a priori Wissen zur Verfügung gestellt. Die Positionen der Landmarken können entweder durch manuelles Vermessen oder auch in einer „Explorationsfahrt“ mit dem Robotersystem ermittelt werden.

Für das Lokalisationsproblem mit drei bzw. vier künstlichen oder natürlichen Landmarken wurden unter anderem von Sugihara [Sugihara 88], Stella [Stella 95] und Krotkov [Krotkov 89] geschlossene Lösungen vorgestellt. Sugihara [Sugihara 88] entwickelte Algorithmen zur Lokalisation mittels Richtungen zu Landmarken. Aus der Messung der Richtungswinkel $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ zu drei bekannten Landmarken LM_1, LM_2, LM_3 erfolgt die Bestimmung der Roboterlage durch ein geschlossenes Verfahren mit zwei Kreisschnitten (siehe Abbildung 3.3). In [Stella 95] wird diese Technik mit drei künstlichen Landmarken und einer CCD-Kamera für die Lokalisation verwendet. Krotkov [Krotkov 89] verwendet senkrechte Kanten von Objekten in der Einsatzumgebung als natürliche Landmarken. Mit Hilfe eines Interpretationsbaums werden mögliche Roboterpositionen ermittelt und die Roboterlage durch das Kreisschnittverfahren mit bis zu vier Landmarken bestimmt. Diese Verfahren bieten eine geschlossene und effiziente Lösung für das Lokalisationsproblem mit drei oder vier Landmarken, wenn die Landmarken bekannt sind und keine Verdeckungen von Landmarken auftreten. Um Fehler erkennen und ausgleichen zu können, muß jedoch im allgemeinen eine größere Anzahl Landmarken erfaßt werden (Redundanz).

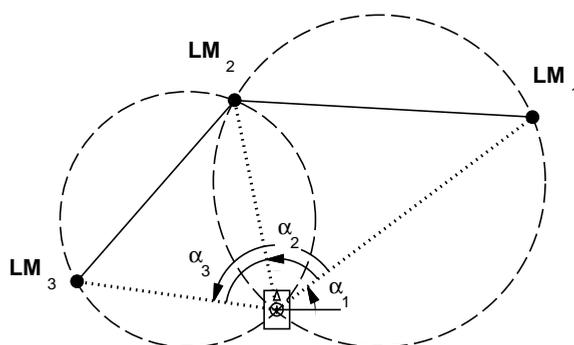


Abbildung 3.3: Schätzung der Roboterlage mit drei Landmarken und Kreisschnittverfahren: Die Roboterposition ergibt sich als Schnittpunkt der Umkreise um die Dreiecke, die durch die drei Landmarken LM_1, LM_2, LM_3 und die Roboterposition gebildet werden.

Ansätze, die eine Auswahl von Landmarken zur Lokalisation verwenden, wurden unter anderem in den Arbeiten [Thrun 96], [Greiner 96], [Sutherland 93a], [Sutherland 93b], [Sutherland 94] und [Arsénio 98] vorgestellt. Diese Ansätze wählen durch Heuristiken, neuronale Netzwerke oder durch Bewertung der Fehlerregionen für die Lokalisation optimal geeignete Landmarken aus einer gemessenen Menge von Landmarken aus und bestimmen mit den ausgewählten Landmarken die Roboterlage. In [Greiner 96] werden durch Filterverfahren und Ansätze aus der Wahrscheinlichkeitstheorie Landmarken ausgewählt, in [Thrun 96] erfolgt die Auswahl durch neuronale Netze und einen Wahrscheinlichkeitsansatz, so daß die Auswahl der verwendeten Landmarken für das eingesetzte Sensorsystem optimiert wird. Sutherland ([Sutherland 93a], [Sutherland 93b], [Sutherland 94]) und Arsénio [Arsénio 98] verwenden Verfahren zur Auswahl von Landmarken, die die Positionsschätzung des Roboters optimieren. Es werden dabei die Landmarken zur Lokalisation ausgewählt, die eine Positionsschätzung mit dem kleinsten Fehler erlauben.

Ansätze, die möglichst alle N Landmarken, die mit den Sensorsystemen erfaßt werden, für die Lösung des Lokalisationsproblems heranziehen, wurden unter anderem von Hanebeck [Hanebeck 97a] und Atiya [Atiya 95] entwickelt. Diese Verfahren bieten die besten Voraussetzungen, um auch mit verdeckten Landmarken und Fehlmessungen zurechtzukommen, da bei diesen Verfahren ein redundanter Anteil vorhanden ist und die Positions- und Orientierungsschätzung durch Filterverfahren optimiert werden kann. Hanebeck entwickelte ein Verfahren zur Lokalisation mobiler Roboter in Indoor-Anwendungen, das auf Basis reiner Winkelmessungen zu reflektierenden künstlichen Landmarken und reiner Abstandsmessungen zu natürlichen Objekten beruht [Hanebeck 97a]. Die künstlichen Landmarken wurden mit einem Laserscanner (Goniometer), die natürlichen Objekte durch Ultraschallsensoren erfaßt. Von Atiya wurden Tripel von natürlichen Landmarken zur Lokalisation verwendet [Atiya 95]. Die Landmarken (senkrechte Kanten in Kamerabildern) wurden durch Stereobildverarbeitung detektiert und der Abstand durch Triangulation bestimmt.

3.4.2 Meßprinzipien

Zur Erfassung künstlicher und natürlicher Landmarken bieten Laserscanner eine hohe Genauigkeit bei ausreichender Geschwindigkeit.¹ Mit dem Laserscanner können Abstand und Richtung zu Landmarken unmittelbar bestimmt werden. Künstliche Landmarken können dabei meist direkt erfaßt werden, wenn sie sich mit dem Laserscanner hinreichend von

anderen Objekten in der Umgebung unterscheiden lassen. Bei natürlichen Landmarken werden Strukturen, wie Geraden oder Ecken, in einem Vorverarbeitungsschritt mit Bildverarbeitungsalgorithmen aus den vom Laserscanner gelieferten Abstands- und Richtungsdaten extrahiert.

Richtungen lassen sich mit Laserscannern sehr einfach und präzise messen, beispielsweise mit rotierenden Spiegelsystemen, deren Winkelpositionen mit Encodern an den Drehachsen bestimmt werden. Die Abstandsmessung gestaltet sich dagegen aufwendiger. Zur Abstandsmessung mit Laserscannern haben sich folgende Techniken besonders bewährt ([Besl 89], [Everett 95], [Poussart 89], [Göpel 92], [Gächter 96]):

- **Triangulation:** Bei der Triangulation wird der Abstand zu einem Objekt in der Umgebung durch den lateralen Versatz des am Objekt reflektierten Laserlichtpunkts im Empfangssystem bestimmt. Die erzielbaren Genauigkeiten sind hoch und reichen bis in den μ -Meterbereich. Das Triangulationsverfahren ist sehr einfach, der Meßbereich jedoch sehr begrenzt. Bei gängigen Laserscannern beträgt er ca. $0.4-7\text{ m}$ ([Hinkel 89], [Pears 93], [Nguyen 95], [Pears 96]). Abbildung 3.4 zeigt das Prinzip der Triangulation.

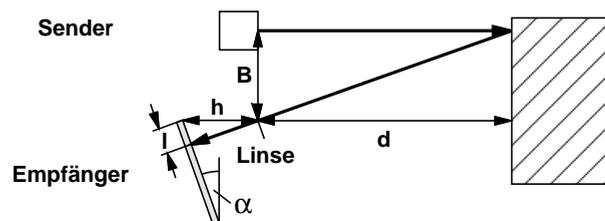


Abbildung 3.4: Abstandsmessung mit Triangulation.

Der Abstand d berechnet sich mit:

$$d = \frac{B \cdot h}{\cos \alpha} \cdot \frac{1}{l}$$

wobei l der gemessene Versatz des Laserlichtpunkts auf dem Empfänger und α die Orientierung des Empfängers relativ zum Sender ist.

¹ Das neueste Modell LMS290 des SICK-Laserscanners [SICK 95] bietet eine Genauigkeit von 15 mm bei 0.5° Auflösung und liefert 25 Scans/s (40 ms/Scan).

- Phasenmessung: Bei der Phasenmessung wird der Abstand zu einem Objekt aus der Verschiebung der Phase der am Objekt reflektierten Laserlichtwelle bestimmt. Der Laserlichtstrahl wird dazu mit einem niederfrequenten Signal f moduliert und die Phasenverschiebung $\Delta\phi$ dieses Signals zwischen ausgesendetem und am Objekt reflektierten Signal gemessen. Der Meßbereich ist abhängig von der gewählten Modulationsfrequenz, und der Abstand zu einem Objekt ist nicht immer eindeutig bestimmbar. Die erzielbaren Genauigkeiten sind hoch und reichen bis in den Sub-Millimeterbereich ([Karl 90], [Miller 90], [Leuze 98]). Abbildung 3.5 zeigt das Prinzip der Phasenmessung.

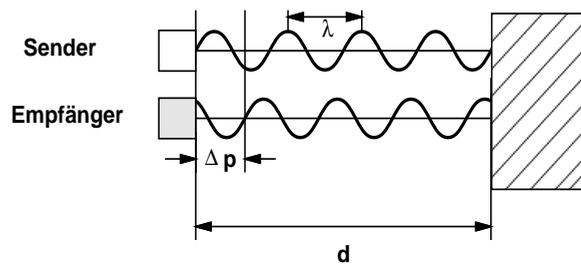


Abbildung 3.5: Abstandsmessung durch Phasenverschiebung.

Der Abstand d berechnet sich mit:

$$d = \frac{c_{gr} \cdot \Delta\phi}{4\pi \cdot f}$$

wobei c_{gr} die Ausbreitungsgeschwindigkeit¹ des Laserlichts, $\Delta\phi$ die gemessene Phasenverschiebung und f die Modulationsfrequenz ist. Der maximale Meßabstand berechnet sich mit:

$$d_{max} = \frac{c_{gr}}{2f}$$

Ist das Meßobjekt weiter entfernt, kann der Abstand nicht mehr eindeutig bestimmt werden.

¹ c_{gr} wird in der Physik als Gruppengeschwindigkeit bezeichnet. Sie hängt ab von der Wellenlänge des Lichts und dem Phasenbrechwert im Ausbreitungsmedium.

- **Frequenzmessung:** Die Bestimmung von Abständen mit der Frequenzmessung stammt ursprünglich aus der Radartechnik. Neuartige Lasermeß- und Regelungstechniken erlauben den Einsatz dieses Verfahrens auch mit Laserlicht. Bei der Frequenzmessung wird der Abstand zu einem Objekt auf ähnliche Weise wie bei der Phasenmessung bestimmt. Der Sender emittiert einen Laserlichtstrahl, dessen Grundfrequenz kontinuierlich und linear variiert. Das an Objekten reflektierte Signal wird vom Empfänger erfaßt und mit dem Frequenzsignal des Senders gemischt. Durch die Überlagerung der Frequenzen entsteht eine Frequenzschwebung Δf (engl. „beat frequency“), die proportional zum Abstand des Objekts ist. Der Meßbereich ist abhängig von der Bandbreite der Frequenzvariation ΔF und der Variationszeit ΔT . Der Abstand zu einem Objekt ist nicht immer eindeutig bestimmbar, der Meßbereich kann jedoch sehr groß gewählt werden. Die erzielbaren Genauigkeiten hängen stark von den Linearitäten der erzeugten Frequenzen ab und können bis in den Millimeterbereich reichen [Borenstein 96a]. Abbildung 3.6 zeigt das Prinzip der Frequenzmessung.

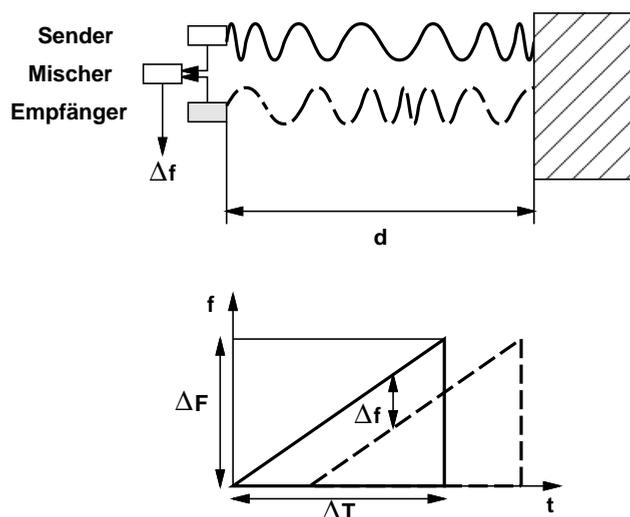


Abbildung 3.6: Abstandsmessung durch Messung der Schwebungsfrequenz.

Der Abstand d berechnet sich mit:

$$d = \frac{c_{\text{gr}} \cdot \Delta T}{2 \cdot \Delta F} \cdot \Delta f$$

wobei c_{gr} die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserlichts, ΔT die Variationszeit, ΔF die Bandbreite der Frequenzvariation und Δf die gemessene Frequenzschwebung ist. Der maximale Meßabstand berechnet sich mit:

$$d_{max} = \frac{c_{gr} \cdot \Delta T}{2}$$

Ist das Meßobjekt weiter entfernt, kann der Abstand nicht mehr eindeutig bestimmt werden.

- Puls-Laufzeitmessung (engl. „trilateration“): Bei der Puls-Laufzeitmessung wird die Zeit erfaßt, die ein Lichtimpuls benötigt, um vom Sender zum Objekt und wieder zurück zum Empfänger zu gelangen. Durch die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts sind die Laufzeiten extrem kurz.¹ Der Meßbereich bei der Puls-Laufzeitmessung kann sehr groß sein und wird im wesentlichen nur durch die Laserleistung und die Empfindlichkeit des Empfängers beschränkt. Störfaktoren können ungleichmäßige Lichtlaufzeiten in Medien mit variierender optischer Dichte, Detektionsfehler, Meßfehler oder Einflüsse der Objektflächenbeschaffenheit sein. Die erzielbare Genauigkeit liegt bei gängigen Laserscannern bei 1-5 cm ([SICK 95], [Cord 95]). Abbildung 3.7 zeigt das Prinzip der Puls-Laufzeitmessung.

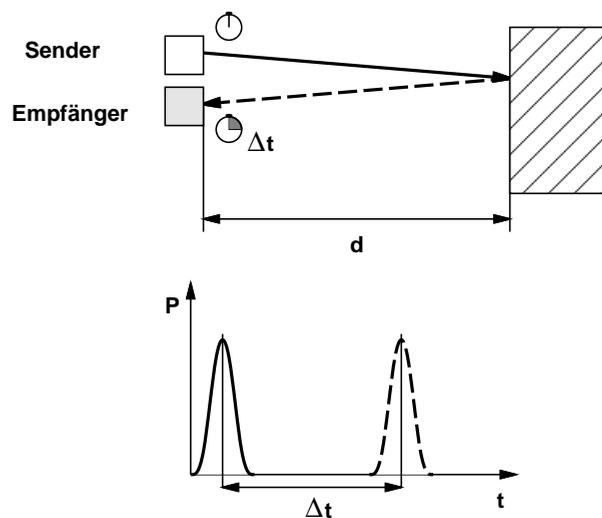


Abbildung 3.7: Abstandsmessung mit Puls-Laufzeit-Verfahren.

¹ Das Licht legt im Vakuum 30cm in nur ca. 10^{-9} s zurück.

Der Abstand d berechnet sich mit:

$$d = \frac{c_{\text{gr}}}{2} \cdot \Delta t$$

wobei c_{gr} die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Laserlichts und Δt die Laufzeit des ausgesendeten Lichtimpuls ist. Die Laufzeiten haben eine Größenordnung von nur 10^{-12} s (1 ps). Sie können mit sogenannten Zeit-Digital-Wandlern (engl. TDC: Time-to-Digital-Converter)¹ mit einer Auflösung von z. Z. bis ca. $30 \cdot 10^{-12} \text{ s}$ (30 ps) gemessen werden [Ruotsalainen 2000].

3.4.3 Korrespondenzproblem

Zur Berechnung der Roboterlage ist es erforderlich, die Zuordnung von gemessenen Landmarken zu Landmarken aus der Karte herzustellen. Diese ist nicht unmittelbar gegeben, wenn gleichartige künstliche Landmarken oder natürliche Landmarken verwendet werden. Zusätzlich wird die Zuordnung in dynamischen Umgebungen, beispielsweise in öffentlichen Gebäuden, wie Messen und Museen (siehe Beispielanwendung mobiler Serviceroboter in Kapitel 1.2), Flughafenterminals oder Bahnhöfen, durch zeitweise von Passanten verdeckte Landmarken und Fehlmessungen an Glasscheiben erschwert. Die Berechnung einer Korrespondenzfunktion, die jeder gemessenen Landmarke eine Landmarke der Karte eindeutig zuordnet, wird Korrespondenzproblem genannt. Es gibt unterschiedliche Ansätze zur Lösung des Korrespondenzproblems:

Nur wenige Verfahren zur Lokalisation mit Landmarken verwenden unterscheidbare Landmarken, wie durch Symbole codierte künstliche Landmarken ([Cox 88], [Becker 95], [Aldon 95], [Klaus-Werner 99]). Detektierte Landmarken können anhand der eindeutigen Symbole leicht Landmarken in der Karte zugeordnet und die Roboterlage durch Berechnung eines Translations- und Rotationsvektors bestimmt werden. Nicht immer ist es jedoch wünschenswert oder möglich, codierte Landmarken zu verwenden. Sensorsysteme, die die Codierung einer Landmarke eindeutig über eine größere Distanz erfassen und decodieren

¹ TDCs wurden zunächst für Analysezwecke in der Teilchenphysik entwickelt, wo ebenfalls extrem kurze Zeiten gemessen werden müssen. Verbreitete Techniken sind digitale Zähler und digitale oder analoge Interpolatoren.

können, wie Bildverarbeitungssysteme, erfordern einen hohen technischen Aufwand und sind fehleranfällig. Zudem lassen sich nur künstliche Landmarken sinnvoll mit einer Codierung ausstatten.

Um auf eine spezielle Codierung der Landmarken verzichten zu können, verwenden die Verfahren zur Lokalisation mit nicht-codierten Landmarken daher gleichartige künstliche Landmarken oder natürliche Landmarken. Setzt man nicht-codierte Landmarken ein, so ist das Korrespondenzproblem nicht mehr ohne weiteres zu lösen, da ein direkter Zuordnungshinweis von gemessenen Landmarken zu Landmarken in der Karte fehlt. Es sind daher Ansätze untersucht worden, wie das Korrespondenzproblem ohne einen solchen direkten Zuordnungshinweis gelöst werden kann.

Das Verfahren von Hanebeck [Hanebeck 97a] verwendet ein Suchverfahren in einem Interpretationsbaum. Ausgehend von einer a priori Positionsschätzung, die manuell angegeben wird oder aus einer früheren Schätzung stammt und der sequentiellen Anordnung der gemessenen Landmarken in Rotationsrichtung des Laserscanners kann das Korrespondenzproblem effizient gelöst werden. Detektierte Landmarken, die nicht in der Karte verzeichnet sind, können anhand der a priori Positionsschätzung erkannt werden und bleiben unberücksichtigt. Für die Lösung des Startup-Problems ist dieser Ansatz jedoch wenig geeignet, da eine fehlerfreie Detektion der Landmarken vorausgesetzt werden müßte.

Das Lokalisationsverfahren von Atiya [Atiya 95] löst das Korrespondenzproblem durch Vergleich von Landmarken-Tripeln. Dabei werden alle möglichen Landmarken-Tripel aus der Karte als Dreiecke betrachtet und durch sechs Parameter beschrieben (drei Winkel und drei Seitenlängen). Detektierte Landmarken werden in Tripel eingeteilt und alle zu den Tripeln passenden Dreiecke aus den Kartendaten bestimmt. Aus dieser Menge wird eine konsistente Zuordnung herausgefiltert. Das Startup-Problem kann mit diesem Ansatz gelöst werden, wenn die Verteilung der Landmarken in der Einsatzumgebung eindeutig bezüglich der erzeugten und zugeordneten Dreieckskonstellationen ist. Im allgemeinen kann dies für natürliche Landmarken jedoch nicht garantiert werden und die Wahrscheinlichkeit paarweise verschiedener Tripel sinkt mit einer steigenden Anzahl von Landmarken.

Karch [Karch 98] entwickelte ein Verfahren, das Korrespondenzen zwischen ähnlichen Polygonstrukturen berechnet. Die Karte der Einsatzumgebung wird dazu in einem Vorverarbeitungsschritt in Sichtbarkeitspolygone unterteilt. Diese Polygone und das Polygon, das aus einer Messung natürlicher Landmarken extrahiert wird, sind Sternpolygone, die mit

Hilfe einer geeigneten Metrik (Polarkoordinatenmetrik) verglichen werden können. Es werden dabei Korrespondenzen zwischen den bezüglich der Metrik nächstliegenden Polygonen hergestellt. Kann keine eindeutige Korrespondenz bestimmt werden, muß der Roboter bewegt werden, bis eine Position in der Einsatzumgebung gefunden ist, die eine eindeutige Korrespondenz liefert. Das Verfahren ist empfindlich gegenüber Objekten, wie beweglichen Hindernissen, die nicht in der Karte verzeichnet sind, und erfordert einen erhöhten Rechenaufwand in Einsatzumgebungen, die eine komplexe polygonale Struktur aufweisen.

Ohne geometrische Interpretation kann bei natürlichen Landmarken mit der Winkelhistogramm-methode die Orientierungsänderung und mit der X-Y-Histogrammmethode die translatorische Verschiebung zwischen zwei Messungen bestimmt werden ([Weiß 94], [Weiß 95]). Diese Methoden setzen jedoch eine weitgehend polygonal strukturierte Umgebung voraus. Eine Erweiterung auf nicht-polygonale Umgebungen wurde mit dem IDC-Algorithmus¹ in [Gutmann 96] bzw. [Lu 97] vorgestellt. Jedoch muß hier vorausgesetzt werden, daß die Umgebung des Roboters sich nur in Grenzen verändert. Insbesondere haben feste oder bewegliche Hindernisse, die nicht in der Karte verzeichnet sind, maßgeblichen Einfluß auf das Ergebnis.

3.4.4 Startup-Problem

Für Anwendungen, wie den in Kapitel 1.2 genannten Messe- und Museumsroboter, ist eine selbständige, zuverlässige und effiziente Lösung des Startup-Problems eine wichtige Grundfunktion. Nur wenn das Startup-Problem sicher und effizient gelöst werden kann, ist der Einsatz mobiler Serviceroboter sinnvoll und ökonomisch möglich. Eine benutzerfreundliche Arbeitsweise ist erst dann gegeben, wenn der Roboter das Startup-Problem selbständig lösen kann. Für die Lokalisation nach dem Systemstart oder dem Wiederanlaufen, nachdem das Robotersystem angehalten wurde, steht im allgemeinen keine a priori Positions- oder Orientierungsschätzung des mobilen Roboters zur Verfügung. Die Lokalisation muß in diesem Fall ohne Vorwissen bezüglich Position und Orientierung erfolgen.

In der Literatur sind nur wenige Ansätze zur Lösung des Startup-Problems beschrieben worden, beispielsweise in [Xu 95], [MacKenzie 94] und [Karch 98]. Die meisten Ansätze zur Roboterlage gehen von einer wenigstens ungefähr bekannten Startlage aus und versu-

¹ IDC – Iterative Dual Correspondence.

chen, diese mit Hilfe von Landmarken zu validieren und zu korrigieren. In nur einigen Arbeiten wird das Startup-Problem näher betrachtet, und zur Lösung werden codierte Landmarken oder spezielle Startlandmarken an definierten Positionen verwendet ([McGillam 88], [Tsumara 93], [Aldon 95]). Eine Reihe weiterer Arbeiten verwenden einen dynamischen Ansatz, bei dem der Roboter zur Lokalisation so lange Bewegungen im Raum ausführt, Meßwerte zu Landmarken an verschiedenen Positionen sammelt und mit Kartendaten vergleicht, bis die Lokalisation eindeutig möglich ist ([Kleinberg 94], [Fox 98a], [Dudek 98], [Duckett 99], [Fox 99]). In [Karch 98] wird ein Ansatz verfolgt, bei dem aus der Polygonstruktur der Einsatzumgebung und durch Vergleich mit einer Karte die Startlage ermittelt wird. Es wird vorausgesetzt, daß die Polygonstruktur detektierbar ist. Nicht eindeutig unterscheidbare Startlagen müssen durch Bewegen des Roboters an eine Position erfolgen, bei der die Lokalisation eindeutig möglich ist. In [Hanebeck 97a] und [Arsénio 98] werden zur Lösung des Startup-Problems, ausgehend von Messungen von künstlichen bzw. natürlichen Landmarken, Hypothesen der Roboterlage beim Systemstart gebildet. Mit Hilfe eines Interpretationsbaums werden konsistente Hypothesen herausgefiltert und so die Roboterlage bestimmt. Dieser Ansatz setzt voraus, daß genau eine Hypothese ausgewählt werden kann. Ist dies aufgrund ähnlicher Landmarkenverteilungen nicht möglich, kann keine eindeutige Startlage ermittelt werden. Fehlmessungen können nur durch einen Konsistenztest mit einer ungefähren Lageschätzung erkannt werden. Steht keine Startlage zur Verfügung und sind codierte Landmarken nicht einsetzbar, so ist die Zuordnung von gemessenen Landmarken zu Landmarken in der Karte im allgemeinen nicht eindeutig möglich. Dürfen bestimmte Bereiche in der Einsatzumgebung nicht befahren werden, wie Treppen- oder Bodenabsätze, die von den Sensoren des Roboters nicht detektiert werden können, so können auch keine Lokalisationsfahrten sicher durchgeführt werden. Die Roboterlage kann dann beim Systemstart oder Wiederanlaufen nicht sicher bestimmt werden.

Eine sichere Lösung des Startup-Problems ist für solche mobilen Roboter erforderlich, für die keine spezielle Startposition vorgesehen werden kann oder die nach Systemausfällen sicher wieder anlaufen müssen. Insbesondere für Serviceroboter kann eine definierte Startposition im allgemeinen nicht vorausgesetzt werden. So sollte ein Reinigungsroboter von der aktuellen Position aus, zu der das Bedienpersonal den Roboter gebracht hat, in der Lage sein, seine Tätigkeit aufzunehmen. Bei mobilen Robotern, die in dynamischen Umgebungen eingesetzt werden, müssen mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Einerseits können die zur Lokalisation benötigten Landmarken zeitweise verdeckt sein, so daß eine neue

Lokalisation zu Zeitpunkten erfolgen muß, bei denen eine genaue Lageschätzung möglicherweise nicht mehr zur Verfügung steht. Andererseits können Systemausfälle durch Konstruktionsfehler, unsachgemäße Behandlung oder Fehlbedienung dazu führen, daß die Lageschätzung stark verfälscht wird oder verloren geht. Die Lösung des Startup-Problems hat daher unmittelbaren Einfluß auf die Robustheit und Bedienbarkeit des Robotersystems und kann daher nicht vernachlässigt werden.

3.4.5 Zustandsschätzung

Zur Berechnung von Position und Orientierung des mobilen Roboters und den zugehörigen Fehlerbeschreibungen aus den durch die interne und externe Lokalisation ermittelten Positions- und Orientierungsdaten werden Schätzverfahren (Filter) verwendet. Der Begriff „Schätzung“ und „Schätzer“ ist dabei gerechtfertigt, selbst wenn das Verfahren analytisch geschlossen ist und keine Approximation in Form einer Linearisierung erfordert. Dadurch, daß grundsätzlich nur fehlerbehaftete Sensormeßwerte zur Verfügung stehen, ist die Messung immer nur eine Schätzung für den tatsächlichen Wert eines Zustands. Die einzelnen Verfahren tragen diesem Umstand auf unterschiedliche Art Rechnung. Im folgenden werden die drei wichtigsten Ansätze zur Schätzung von Zustandsgrößen beschrieben:

1. Methode der kleinsten Fehlerquadrate:

Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate (engl. „least square“, LS oder LSQ) ist ein Verfahren, bei dem die Positions- und Orientierungsschätzung durch Minimierung der Summe der quadratischen Fehler der Einzelmessungen zur Schätzung berechnet wird:

$$\hat{y} = f(\hat{x}) + \hat{\epsilon} \text{ mit } \sum \epsilon_i^2 \text{ minimal.}$$

Das Verfahren ist sehr einfach und kann auch rekursiv angewendet werden ([Boley 96], [Lawson 74]).

2. Probabilistische Schätzverfahren:

Probabilistische Schätzverfahren verwenden statistische Methoden zur Schätzung der Position und Orientierung. Es wird dabei vorausgesetzt, daß die Fehler mit einer bekannten Wahrscheinlichkeitsverteilung auftreten und ein Systemmodell erstellt werden kann.

- Kalman-Filtertechnik: Die Kalman- bzw. die erweiterte Kalman- und iterative Kalman-Filtertechnik sind weit verbreitete probabilistische Schätzverfahren zur Positions- oder Orientierungsschätzung ([Kalman 60], [Maybeck 79], [Bar-Schalom 88], [Welch 95], [Simon 2000]). Der Kalman-Filter ist ein rekursiver Schätzer und kombiniert verschiedene Sensordaten mit a priori Wissen, wie einem Startwert oder einer früheren Messung. In jedem Rekursionsschritt k wird ein Schätzwert $\hat{x}(t_k)$ der Zustandsgröße und die Varianz $\sigma_x^2(t_k)$ als Fehlerbeschreibung berechnet, wobei jede Messung $z(t_k)$ mit bekannter Varianz σ_z^2 den Schätzwert bezüglich des Fehlers verbessert oder unverändert läßt ([Maybeck 79], [Welch 95], [Brown 96]):

$$\begin{aligned}\hat{x}(t_{k+1}^-) &= A\hat{x}(t_k) + Bu \\ \sigma_x^2(t_{k+1}^-) &= A\sigma_x^2(t_k)A^T + \sigma_w^2\end{aligned}\tag{GL 3.1}$$

$$\begin{aligned}\hat{x}(t_{k+1}) &= \hat{x}(t_{k+1}^-) + K(t_{k+1})[z(t_{k+1}) - H\hat{x}(t_{k+1}^-)] \\ \sigma_x^2(t_{k+1}) &= \sigma_x^2(t_{k+1}^-) - K(t_{k+1})H\sigma_x^2(t_{k+1}^-) \\ K(t_{k+1}) &= \frac{\sigma_x^2(t_{k+1}^-)H^T}{H\sigma_x^2(t_{k+1}^-)H^T + \sigma_z^2}\end{aligned}\tag{GL 3.2}$$

wobei $\hat{x}(t_k)$ und $\hat{x}(t_{k+1})$ die Schätzwerte (a posteriori-Werte) sind, u die Fortschreibung mit Rauschen w und der Varianz σ_w^2 und $z(t_{k+1})$ der neue Meßwert mit Rauschen v und der Varianz σ_z^2 . A , B und H sind Abbildungsmatrizen. Die Gleichungen GL 3.1 beschreiben die Vorhersage (Kalman-Prädikation) für den neuen Schätzwert und die neue Varianz des Schätzwerts, die Gleichungen GL 3.2 die Korrektur der Prädikation mit dem Meßwert (Kalman-Korrektur). Die Verstärkungsmatrix K (Kalman-Filter-Gain) legt die Gewichtung des Korrekturwerts $z(t_{k+1}) - H\hat{x}(t_{k+1}^-)$ fest. Besitzt der Meßwert eine große Varianz σ_z^2 , d. h. eine große Meßunsicherheit, wird der Korrekturwert mit kleinem K gewichtet, besitzt dagegen der aktuelle Schätzwert eine große Varianz (die aktuelle Schätzung besitzt eine große Unsicherheit) wird der Korrekturwert mit großem K gewichtet. Durch die gewichtete Korrektur wird der Schätzwert in jedem Schritt optimiert.

Für die Anwendung des Kalman-Filters müssen neben den Varianzen σ_w^2 und σ_z^2 die Startwerte $\hat{x}(t_0)$ und $\sigma_x^2(t_0)$ geeignet gewählt werden. In jedem Filterschritt werden dann lediglich der unmittelbar vorhergehende Filterwert und der neue Meßwert für die Berechnung des neuen Filterwerts benötigt (rekursive Filterung). Diese Eigenschaft stellt einen bedeutenden Vorteil des Kalman-Filters gegenüber anderen Filterverfahren, wie dem Wiener Filter [Brown 96], für die Verarbeitung von Echtzeitdaten dar.

Der Kalman-Filter ist ein optimaler Schätzer bezüglich der berechneten a posteriori Wahrscheinlichkeit (MAP¹) bzw. des minimalen quadratischen Fehlers (MMSE²), wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- die Abbildungsmatrizen A, B, H sind linear
- die auf das System einwirkenden Störgrößen w und v sind weißes Rauschen (zeitlich unkorreliertes, kontinuierliches, gleichmäßiges Spektrum)
- w und v besitzen die Verteilungen $N(0, \sigma_w^2)$ und $N(0, \sigma_z^2)$

In einigen Fällen kann für das zugrundeliegende Sensorsystem keine lineare Modellbeschreibung gefunden werden, d. h. für die Schätz- und Meßgrößen können keine linearen Abbildungs- oder Meßmatrizen angegeben werden. Dann kann der erweiterte Kalman-Filter eingesetzt werden, bei dem die nicht-linearen Anteile durch eine Tayler-Reihenentwicklung approximiert werden. Weiter setzt der Kalman-Filter hinreichend genau bekannte Startwerte $\hat{x}(t_0)$ und $\sigma_x^2(t_0)$ als a priori Wissen voraus. Stehen diese nicht zur Verfügung, so können in vielen Fällen mit dem iterativen Kalman-Filter geeignete Ausgangswerte berechnet werden.

- Markov-Lokalisation: Ein anderer Ansatz wird bei der Markov-Lokalisation verfolgt ([Fox 98a], [Fox 98b], [Fox 98c], [Burgard 97a], [Burgard 97b], [Burgard 98a]). Bei dieser wird jeder möglichen Roboterlage ein Wahrscheinlichkeitswert zugeordnet. Die möglichen Positionen und Orientierungen werden dazu diskretisiert und für jede mögliche Lage x' eine Wahrscheinlichkeit $Bel(X_t = x')$ für die tatsächliche Lage des Roboters berechnet. Aufgrund der

¹ MAP – engl.: Maximum a posteriori.

² MMSE – engl.: Minimum Mean Square Error.

Sensordaten s und den Roboterbewegungen a_t wird mit Hilfe der speziellen Bayes-Formel in jedem Schritt für jede mögliche Lage x' der Wahrscheinlichkeitswert $Bel(X_t = x')$ neu berechnet ([Sachs 92], [Fox 98c]):

$$P(X_t | X_{t-1}, a_{t-1}) = \sum_{x'} P(X_t = x | X_{t-1} = x', a_{t-1}) \cdot Bel(X_{t-1} = x') \quad (\text{GL 3.3})$$

$$Bel(X_t = x) = \frac{P(s|x) \cdot P(X_t | X_{t-1}, a_{t-1})}{P(s|X_t)} \quad (\text{GL 3.4})$$

wobei X_t Roboterlagen, a_t die vom Roboter ausgeführten Bewegungsschritte, x' mögliche Lagen und s Meßwerte sind. Gleichung GL 3.3 beschreibt die Wahrscheinlichkeit für die Roboterlage X_t unter den Voraussetzungen, daß die Roboterlage im Schritt zuvor X_{t-1} war und der Roboter die Bewegung a_{t-1} ausgeführt hat (Aktionsmodell). Gleichung GL 3.4 beschreibt die Wahrscheinlichkeit für die Roboterlage nach der Fusion des Meßwerts s unter der Voraussetzung, daß die Roboterlage x war (Sensormodell). Die Lage x' mit der jeweils höchsten Wahrscheinlichkeit $Bel(X_t = x')$ stellt die Roboterlage dar. Zur Ermittlung der wahrscheinlichsten Roboterlage werden mehrere Sensordaten an normalerweise unterschiedlichen Positionen benötigt. Dies erfordert eine Bewegung des Roboters in der Einsatzumgebung, um unterschiedliche Sensordaten aufnehmen zu können. Da für jede mögliche Roboterlage eine Wahrscheinlichkeit berechnet und gespeichert werden muß, ist ein hoher Rechen- und Speicheraufwand erforderlich. Durch zufällige Auswahl der zu berechnenden und zu speichernden Wahrscheinlichkeiten kann der Aufwand in vielen praxisnahen Umgebungen erheblich reduziert werden [Fox 99]. Da für die Markov-Lokalisation das Modell der Einsatzumgebung nicht vollständig bekannt sein muß, eignet sie sich insbesondere auch zur Kartographierung der zunächst unbekanntem Einsatzumgebung des Roboters.

3. Mengenbasierte Ansätze:

Bei mengenbasierten Ansätzen werden im Unterschied zu stochastischen Verfahren, bei denen Unsicherheiten der Schätzwerte mit Verteilungsfunktionen beschrieben werden, Mengen verwendet, die den Schätzwert beschreiben ([Schweppe 73], [Witsenhausen 68]). Die Mengen werden durch Trägerfunktionen angegeben und können auf unterschiedliche Weise modelliert werden, beispielsweise als Intervalle

[Atiya 95], Ellipsoide [Hanebeck 97a] oder allgemein als Polyeder. Der tatsächliche Wert ist in der Menge enthalten, jedoch wird die Menge als homogen betrachtet und Verteilungsfunktionen werden nicht berücksichtigt. Die Operationen zur Berechnung von Schätzwerten basieren auf der Mengearithmetik, beispielsweise bei Intervallen auf der Intervallarithmetik ([Moore 79], [Alefeld 74]), bei Ellipsoiden oder Polyedern auf Algorithmen zur Berechnung der konvexen Hülle und des Schnitts.

Gegenüber stochastischen Filtern, wie dem Kalman-Filter, können mengenbasierte Ansätze auch bei stark korrelierten Meßdaten (nicht weißem Rauschen), deterministischen Unsicherheiten und nicht-linearen Systemmodellen eingesetzt werden. Der Einsatz von mengenbasierten Filtern erfordert keine aufwendige Systemmodellierung und Parameterschätzung. Besitzen die Meßwerte eine große Streuung, so konvergieren mengenbasierte Filter im allgemeinen rascher als probabilistische Schätzverfahren. Umgekehrt können pessimistische Startwerte (große Unsicherheit) und Meßwerte mit geringer Steuerung zu einem langsamen Konvergenzverhalten führen. Bei der Konzeption von mengenbasierten Filtern ist dies zu berücksichtigen.

Ähnlich wie beim Kalman-Filter können mit mengenbasierten Filtern verschiedene Meßwerte rekursiv fusioniert werden. Es werden lediglich die vorhergehende Mengenbeschreibung und der neue Meßwert für die Berechnung des neuen Filterwerts benötigt. Mengenbasierte Filter sind daher auch zur Datenfusion in Echtzeit einsetzbar.

Schätzverfahren nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate sind am einfachsten, berechnen jedoch nur einen bezüglich des definierten Fehlermaßes optimierten Mittelwert. Die Kalman-Filtertechnik berechnet abhängig von der Qualität eines Eingangswerts einen gewichteten Mittelwert und eine Fehlerabschätzung. Durch die gewichtete Mittelung erlaubt der Kalman-Filter auch die Fusion mehrerer Sensordatenquellen und liefert unter den obengenannten Voraussetzungen optimale Schätzwerte. Für die Anwendung des Kalman-Filters muß im allgemeinen das Systemmodell des Sensorsystems bekannt sein, und es ist ein geeigneter Startwert erforderlich. Die Markov-Lokalisation berechnet für jeden Schätzwert oder eine Auswahl von Schätzwerten eine Wahrscheinlichkeit und kann daher auch bei teilweise unbekanntem Modell eingesetzt werden. Sie erfordert jedoch einen hohen Speicher- und Rechenaufwand, bis die Wahrscheinlichkeit eines Schätzwertes sich

hinreichend von allen anderen unterscheidet. Verfahren, die die Markov-Lokalisation nur auf eine Auswahl von Schätzwerten anwenden, können den Speicher- und Rechenaufwand reduzieren. Die mengenbasierten Ansätze berechnen ähnlich dem Kalman-Filter für einen zu schätzenden Zustand einen Erwartungswert und eine abgeschlossene Unsicherheitsmenge. Da bei mengenbasierten Schätzverfahren für die Störgrößen keine Voraussetzungen bezüglich ihrer Verteilung zu erfüllen sind und auch nicht-lineare Systeme modelliert werden können, sind mengenbasierte Ansätze in der Praxis eine gute Alternative zur Kalman-Filtertechnik [Hager 93].

3.5 Zusammenfassung

Die Verfahren zur Lokalisation mobiler Roboter lassen sich in zwei größere Gruppen unterteilen: die interne und die externe Lokalisation. Die interne Lokalisation bestimmt die Position und Orientierung relativ zum Roboter, die externe Lokalisation erfolgt relativ oder absolut zu einem beliebigen Punkt. Die Verfahren unterscheiden sich in den erzielbaren Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten, den Einschränkungen und den sich daraus ergebenden Einsatzmöglichkeiten (Indoor/Outdoor). Die genannten Verfahren erfüllen die in Kapitel 2.2 gestellten Anforderungen nur teilweise (siehe Kapitel 3.3).

Für den Einsatz auf Servicerobotern existieren keine Ansätze, die unter praxisnahen Bedingungen die relative und absolute Lokalisation ermöglichen und das Startup-Problem lösen können. Existierende Ansätze setzen entweder einen hinreichend genau bekannten Startwert voraus, erfordern eine aufwendige Anpassung der Umgebung oder sind nur unter bestimmten Bedingungen einsetzbar. Es fehlt ein Verfahren, das einfach genug ist, um es auf einem realen Serviceroboter einsetzen zu können, das eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit bietet und das mit einer minimalen Anpassung der Einsatzumgebung auskommt. Es muß die relative und absolute Lokalisation ermöglichen und das Startup-Problem sinnvoll lösen. Ein Verfahren, das dies leisten kann, wird in dieser Arbeit vorgestellt.

Es zeigt sich, daß Verfahren, die künstliche oder natürliche Landmarken mit Laserscannern zur Lokalisation einsetzen, zum gegenwärtigen Zeitpunkt das größte Potential für die in Kapitel 1 genannten Einsatzgebiete bieten. Die Lösung des Korrespondenzproblems ist dabei von zentraler Bedeutung. Es kann sehr einfach mit speziell codierten künstlichen Landmarken gelöst werden. Bei nicht codierten oder natürlichen Landmarken sind jedoch

Verfahren erforderlich, die eine effiziente Zuordnung von gemessenen Landmarken zu Landmarken in der Karte erlauben. Ist das Korrespondenzproblem gelöst, kann die Lokalisation des Roboters durch ein Standardschätzverfahren berechnet werden.

Im folgenden Kapitel wird der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz für ein neuartiges Lokalisationssystem auf Basis von künstlichen und natürlichen Landmarken und Laserscannern dargestellt. Dieses Verfahren kann dabei zur Lösung der in Kapitel 2 genannten Teilprobleme eingesetzt werden und den Anforderungen im Servicebereich und in der Industrie gleichermaßen gerecht werden.

4. Das neue Lokalisationsverfahren

In diesem Kapitel wird das dieser Arbeit zugrundeliegende neuartige Verfahren zur Lokalisation mobiler Roboter erläutert. Zunächst wird der gewählte Ansatz beschrieben, anschließend werden die entwickelten Verfahren zur Lösung des Lokalisationsproblems dargestellt.

4.1 Übersicht

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz zur Lokalisation mobiler Roboter verwendet zur Bestimmung der Roboterlage künstliche und natürliche Landmarken, die mit Laserscannern detektiert werden. Er umfaßt die für den praktischen Einsatz notwendigen drei Formen der Lokalisation: die relative Lokalisation, die absolute Lokalisation und die Lokalisation beim Systemstart (Startup-Problem). Der gewählte Ansatz wird in folgende Schritte unterteilt:

- Vorverarbeitung und Detektion von Landmarken
- Relative Lokalisation
- Absolute Lokalisation
- Eindeutigkeit der Lokalisation
- Lösung des allgemeinen Korrespondenzproblems
- Lösung des Startup-Problems

Abbildung 4.1 zeigt eine Übersicht der in den folgenden Abschnitten näher untersuchten Verfahren. Für die Bestimmung der relativen Lage werden die Sensordaten in einem Vorverarbeitungsschritt zunächst einmal in eine geeignete Darstellung überführt und gefiltert. Anschließend werden in den Sensordaten Landmarken detektiert (Kapitel 4.3.1). Aus aufeinanderfolgenden Messungen von Landmarken wird die relative Verschiebung und Orientierungsänderung zur Korrektur der Roboterlage bestimmt (Kapitel 4.3.2 und Kapitel 4.3.3). Zur Lagekorrektur muß jeweils das Korrespondenzproblem gelöst werden. Für die absolute Lokalisation erfolgt dies mit Hilfe von Vorwissen, wie ungefähren Lage-schätzungen, und den detektierten Landmarken (Kapitel 4.3.4). Für die Lösung des Startup-Problems muß darüber hinaus gewährleistet werden, daß die Lösung des Korrespondenzproblems eindeutig ist und ohne Vorwissen zur Roboterlage gelöst werden kann. Dies wird

erreicht, indem die künstlichen Landmarken nach einer Codierung in der Einsatzumgebung so positioniert werden, daß sich die Anordnungen der künstlichen und natürlichen Landmarken eindeutig unterscheiden und identifizieren lassen.¹ Kapitel 4.4 geht auf die Codierung mit Landmarken ein und stellt eine allgemeine Lösung des Korrespondenzproblems vor.

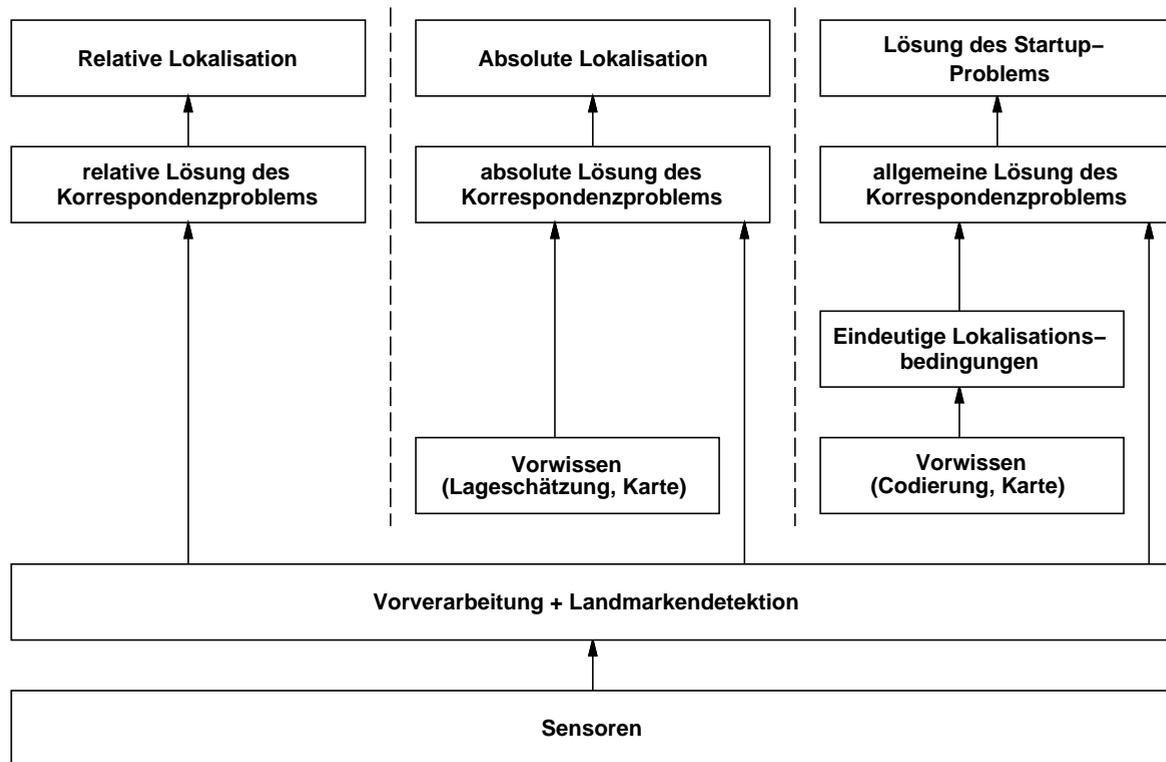


Abbildung 4.1: Übersicht über das Lokalisationsverfahren.

4.2 Grundlagen

Verfahren zur Lokalisation auf Basis von Landmarken und Laserscannern wurden in Kapitel 3 im Stand der Forschung bereits genannt. Die in der Literatur bekannten Verfahren verwenden zur Lokalisation entweder künstliche oder natürliche Landmarken, deren Positionen in einer Karte gespeichert sind. Die Verfahren beziehen dazu eine Auswahl oder alle erfaßten Landmarken in die Bestimmung der Roboterlage ein und setzen unterschiedliche

¹ Die künstlichen Landmarken enthalten keine Codierung und sind gleichartig.

Bedingungen voraus. Sie erfüllen die in Kapitel 2.2 genannten Anforderungen an ein Lokalisationssystem für mobile Roboter im industriellen Umfeld und im Servicebereich nur teilweise.

Verfahren, die ausschließlich Sensoren zur Messung interner Größen, wie Wegstrecken, Geschwindigkeit oder Beschleunigung verwenden, liefern lediglich eine relative Lageschätzung ([Borenstein 97], [Borenstein 96c], [Everett 95], [Kuritsky 90]). Bei der Integration zu einer absoluten Lageschätzung kann aufgrund von Rauschen und Meßfehlern eine erhebliche Abweichung zur tatsächlichen Roboterlage entstehen. Das von Hanebeck [Hanebeck 97a] beschriebene Verfahren setzt eine a priori ungefähr bekannte Roboterposition voraus, um das Korrespondenzproblem effizient lösen und Fehlmessungen behandeln zu können. Für die Lösung des Startup-Problems wäre bei diesem Ansatz eine fehlerfreie Erfassung der sichtbaren Landmarken erforderlich, da Fehlmessungen nur durch einen Konsistenztest mit der ungefähr bekannten aktuellen Position erkannt werden können. Das von Atiya [Atiya 95] vorgestellte Verfahren setzt eine Eindeutigkeit der zur Lösung des Korrespondenzproblems verwendeten Tripel natürlicher Landmarken voraus. Einerseits nimmt diese Eindeutigkeit mit zunehmender Anzahl von Landmarken in der Einsatzumgebung des Roboters jedoch immer weiter ab, andererseits kann nur durch eine hinreichend große Anzahl von Landmarken gewährleistet werden, daß der Roboter auch dann seine Lage bestimmen kann, wenn ein Teil der Marken verdeckt ist oder nicht detektiert werden kann. Zur Lösung des Startup-Problems müßte bei dem von Atiya entwickelten Verfahren die Anzahl der Landmarken limitiert sein und sichergestellt werden, daß die natürlichen Landmarken in allen Fällen unterscheidbare Konstellationen aufweisen.

Das Verfahren von FROG [FROG 2000] weist durch den Einsatz von im Boden verlegten Magneten oder Transpondern nur eine geringe Flexibilität auf, die für viele Serviceroboteranwendungen, wie die Reinigung von Fußböden, Überwachungsaufgaben oder Besucherführung in Museen oder auf Messen, nicht ausreicht. Das Startup-Problem läßt sich mit gitterbasierten Verfahren nur lösen, falls die an den Gitterpunkten angebrachten Markierungen eindeutig unterschieden werden können, beispielsweise durch codierte Transpondermarken. Zusätzlich muß sichergestellt sein, daß der Roboter an jeder Stelle der Einsatzumgebung mindestens einen Transponder erfassen kann. Bedingt durch die geringe Reichweite der Sensoren zur Erfassung der Transpondermarkierungen und der erforderlichen Genauigkeit müßte der Abstand zwischen den Gitterpunkten gering sein. Der Aufwand für die Installation der Markierungen steigt damit beträchtlich an.

Die von Petriu [Petriu 96] und Cord [Cord 97] entwickelten Verfahren zur Lageschätzung mittels codierter Kacheln auf dem Boden oder an der Decke erfordern eine aufwendige Anpassung der Einsatzumgebung. Im Freien sind diese Verfahren kaum einsetzbar. Das von Karch [Karch 98] umgesetzte Verfahren setzt eine einfache polygonale Strukturierung der Einsatzumgebung für die Lokalisation voraus und kann ähnliche Bereiche der Einsatzumgebung nicht voneinander unterscheiden.

Verfahren, die Umweltmodelle einsetzen und mit Sensoren, wie z. B. Kameras, erfaßte Merkmale der Umgebung den Merkmalen im Umweltmodell zuordnen, erfordern einen hohen Aufwand bei der Sensordatenauswertung und müssen mit schwierigen Randbedingungen, wie wechselnde Beleuchtungsverhältnisse und hohe Komplexität der Merkmale, zurechtkommen. In realen Umgebungen mit vielen verschiedenen Objekten oder in Umgebungen, in denen sich Menschen oder bewegliche Hindernisse aufhalten, bieten diese Verfahren vielfach aufgrund der beschränkten Interpretationsfähigkeit komplexer Bildszenen nicht die erforderliche Genauigkeit und Zuverlässigkeit. GPS- und DGPS-basierte Verfahren funktionieren prinzipbedingt nur im Freien bei direkter Sicht zu einer ausreichenden Anzahl von GPS-Satelliten. In bebauten Gebieten, wie z. B. in Städten, ist dies häufig nicht gegeben, so daß die Lokalisation mit GPS und DPGS nicht zuverlässig erfolgen kann.

Für den flexiblen und ökonomischen Einsatz mobiler Roboter in der Industrie und im Servicebereich ist ein Lokalisationssystem erforderlich, das die in Kapitel 2.2 genannten Anforderungen erfüllen kann. Das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren knüpft an die von Hanebeck [Hanebeck 97a] und Atiya [Atiya 95] beschriebenen Ansätze zur Lokalisation mobiler Roboter auf Basis von künstlichen und natürlichen Landmarken an und entwickelt sie so weiter, daß alle genannten Anforderungen erfüllt werden können. Das Verfahren ermöglicht die relative und absolute Lageschätzung und setzt ein neues Konzept auf Basis von Codierungen mit künstlichen Landmarken zur Lösung des Startup-Problems um. Durch den Einsatz künstlicher und natürlicher Landmarken bietet es eine hohe Flexibilität und Zuverlässigkeit und läßt sich in Innenräumen genauso einsetzen wie im Freien. Die Landmarken werden mit Laserscannern erfaßt, wodurch das System weitgehend robust ist gegen Störungen, wie wechselnde Beleuchtungen oder Sonneneinstrahlung, Regen oder Staub. Der Systemaufbau gestaltet sich durch den Einsatz von Standardlaserscannern einfach und kostengünstig, so daß das entwickelte Lokalisationssystem für reale Serviceroboteranwendungen wirtschaftlich einsetzbar ist.

In dieser Arbeit werden künstliche und natürliche Landmarken kombiniert verwendet. Beim kombinierten Einsatz wird einerseits der Aufwand für die Platzierung künstlicher Landmarken durch die Verwendung bereits vorhandener, natürlicher Landmarken reduziert. Andererseits werden nicht flächendeckend verwendbare natürliche Landmarken und Bereiche der Einsatzumgebung, die keine eindeutige Lokalisation mit natürlichen Landmarken erlauben, beispielsweise Außenbereiche oder dynamische Umgebungen wie Messen oder Museen (siehe Beispielanwendung mobiler Serviceroboter in Kapitel 1.2), durch künstliche Landmarken ergänzt. Insgesamt wird damit der Aufwand für die Installation künstlicher Landmarken auf ein Minimum reduziert und gleichzeitig sichergestellt, daß die Lokalisation an jedem Punkt der Einsatzumgebung des Roboters möglich ist. Zusätzlich wird die Verteilung der Landmarken in der Einsatzumgebung so gestaltet, daß Verdeckungen einzelner Landmarken toleriert und Fehlmessungen reduziert werden. Die Codierung der Einsatzumgebung mit künstlichen Landmarken schafft die Voraussetzungen für eine effiziente Lösung des Startup-Problems, wie in Kapitel 4.4.8 gezeigt wird. Somit geht das hier vorgestellte Konzept über die bisher entwickelten Ansätze hinaus.

Für den Nachweis der Umsetzbarkeit und zur Beurteilung der Ergebnisse wurde das entwickelte Verfahren auf einem realen Roboter implementiert und praktisch evaluiert. Dabei wurde das Verfahren soweit wie möglich mit realen Szenarien in verschiedenen Umgebungen, wie sie in Büro- und Industrieumgebungen auftreten können, getestet. Die Ergebnisse sollen nachweisen, inwieweit die in Kapitel 2.2 gestellten Anforderungen erfüllt werden und welche Einschränkungen es gibt.

Als Grundlage für den in dieser Arbeit verfolgten Ansatz dienen folgende Punkte:

1. Zur Lokalisation werden Landmarken in der Einsatzumgebung des mobilen Roboters verwendet. Es sollen künstliche und natürliche Landmarken gleichermaßen berücksichtigt werden, und das Verfahren soll unabhängig von einer speziellen Art von Landmarke angewendet werden können. Einerseits sind künstliche Landmarken erforderlich, wenn keine geeigneten natürlichen Landmarken vorhanden sind, diese nicht zuverlässig detektiert werden können oder bestimmte Anforderungen an die Verteilung der Landmarken gestellt werden, wie bei der Lösung des Startup-Problems (siehe Kapitel 4.4.8). Andererseits reduziert die Verwendung natürlicher Landmarken den Aufwand für die Installation künstlicher Landmarken.
2. An die Landmarken werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die Landmarken befinden sich an einem bekannten, festen Ort in der Einsatzumgebung. In Einsatzumgebungen, in denen sich keine geeigneten natürlichen Landmarken befinden, wie im Freien, und zur eindeutigen Lösung des Startup-Problems werden künstliche Landmarken so an bestimmten, festen Plätzen angelegt, daß die Lokalisation an jedem Punkt der Einsatzumgebung möglich ist. Die künstlichen Landmarken sind gleichartig, um das Sensorsystem zur Detektion einfach zu halten. Die Positionen der künstlichen und natürlichen Landmarken sind mit bekannter Genauigkeit in einer Karte verzeichnet, die in einem vorangehenden Schritt einmalig erstellt und dem mobilen Roboter als a priori Wissen zur Verfügung gestellt wird.
 - Die Landmarken können mit bekannter Zuverlässigkeit und Genauigkeit von den Sensorsystemen des mobilen Roboters erfaßt werden.
 - Die Landmarken sind in so großer Anzahl in der Einsatzumgebung vorhanden, daß der mobile Roboter zu jedem Zeitpunkt eine ausreichende Anzahl von Landmarken zur Lokalisation detektieren kann.
3. Die Ermittlung der relativen und absoluten Roboterlage erfolgt mit den detektierten und den in der Karte gespeicherten Landmarken. Das Verfahren zur Bestimmung der Roboterlage mit diesen Daten und die Filterung werden in Kapitel 4.3 näher erläutert.
4. Das Startup-Problem wird durch ein Verfahren gelöst, das Techniken aus der Codierungstheorie einsetzt, so daß die aktuell von den Sensorsystemen des mobilen Roboters erfaßten Landmarken eindeutig zugeordnet und die Roboterlage beim Systemstart und bei Wiederanlaufen während des Betriebs bestimmt werden kann. Dieses Verfahren wird in Kapitel 4.4 vorgestellt.

4.3 Lokalisation

4.3.1 Detektion von Landmarken

Im ersten Teilschritt werden die von der aktuellen Roboterposition aus sichtbaren Landmarken mit einem Sensorsystem erfaßt und die detektierten Landmarken aus den Sensordaten extrahiert. Der Detektionsalgorithmus unterscheidet dabei zwischen künstlichen und natürlichen Landmarken, die anhand unterschiedlicher Merkmale erkannt werden. Für die

Detektion der Landmarken können unterschiedliche Sensorsysteme verwendet werden, wie Ultraschall, Laserscanner oder Kameras. Laserscanner als Sensorsystem bieten gegenüber anderen verfügbaren Sensorsystemen entscheidende Vorteile:

- Genauigkeit: Durch die geringe Divergenz von Laserlicht¹ kann ein Laserstrahl über Linsensysteme und rotierende Spiegel präzise auf Objekte ausgerichtet werden. Gegenüber anderen Sensorsystemen, wie Ultraschallsensoren, ist die Winkelauflösung beim Laserstrahl um ein vielfaches höher (Laser: $<0.05^\circ$; Ultraschall: $\sim 5-10^\circ$), und moderne Laserscanner bieten bei der Abstandsmessung eine ausreichend hohe Genauigkeit (Laser: $<15\text{ mm}$; Ultraschall: $\sim 10\text{ mm}$) und einen großen Meßbereich (Laser: $>50\text{ m}$; Ultraschall: $<10\text{ m}$). In Laserscannern werden heute ausschließlich Halbleiterlaser eingesetzt, da nur diese genügend Leistung bei geringem Stromverbrauch liefern und kleine Abmessungen besitzen.
- Tiefeninformation: Durch die Abstandsmessung mit dem Laserstrahl werden Tiefeninformationen direkt aus der Umgebung gewonnen. Im Vergleich zu Kamerasystemen, die durch Stereoverfahren Abstände bestimmen, wird die Tiefeninformation beim Laserscanner sehr viel leichter, zuverlässiger und mit größerer Genauigkeit erfaßt.
- Geschwindigkeit: Die Geschwindigkeit, mit der Messungen durchgeführt werden können, ist bei modernen Lasermeßsystemen so hoch, daß mehrere Messungen möglich sind und Fehler schon bei der Datenerfassung durch Filterung minimiert werden können.
- Datenmenge: Die anfallenden Datenmengen sind beim Laserscanner relativ klein.² Die Weiterverarbeitung der Meßdaten kommt ohne aufwendige Spezialhardware für die Berechnung aus und erlaubt die Entwicklung und den Einsatz echtzeitfähiger Algorithmen mit standardmäßig verfügbarer Hardware. Für den wirtschaftlichen Einsatz in einem Serviceroboter ist dies eine wichtige Voraussetzung.

¹Die maximale Divergenz von handelsüblichen Halbleiter-Diodenlasern ist kleiner als 1 mrad . Bei einem Meßabstand von 10 m bedeutet das eine Aufweitung des Laserstrahls auf ca. 3 cm . Das von der Laserdiode abgestrahlte Laserlicht wird an der dünnen Grenzschicht der Diode jedoch stark gebeugt, so daß die Divergenzeigenschaft des Lichts erst mit einer vorgesetzten Optik erreicht wird.

²Ein Datensatz des SICK-Laserscanners LMS290 umfaßt ca. 800 Bytes (0.5° Auflösung).

- Robustheit und Zuverlässigkeit: Der Laserscanner liefert störungsarme und zuverlässige Meßdaten, auch in schwierigen Arbeitsumgebungen, wie im Freien, und ist weitestgehend unabhängig von äußeren Bedingungen wie Lichtverhältnissen, Wetterbedingungen, Temperaturen oder anderen Störungen.
- Kosten: Laserscanner sind im Vergleich zur Kamera mit Bildverarbeitungssystem preisgünstig und in vielen Fällen bereits auf dem Roboter als berührungsloses Auf-fahrtschutzsystem vorhanden. Die anfallenden Daten können mit Standardrechnern verarbeitet werden, so daß die Gesamtkosten niedrig genug sind, um Laserscanner für Serviceroboteranwendungen einsetzen zu können.

In dieser Arbeit werden die künstlichen und natürlichen Landmarken durch Laserscanner in horizontalen Ebenen parallel zur Bewegungsebene (x-y-Ebene) erfaßt, wodurch sich die Umsetzung des Lokalisationsverfahren auf die drei Freiheitsgrade $[x \ y \ \theta]^T$ beschränkt (siehe Abbildung 4.2). Der gewählte Ansatz ist jedoch nicht auf diese Anwendung eingeschränkt. Eine Erweiterung auf den allgemeineren Fall mit bis zu sechs Freiheitsgraden $[x \ y \ z \ \Theta \ \Phi \ \Psi]^T$ wird in Kapitel 4.5 diskutiert.

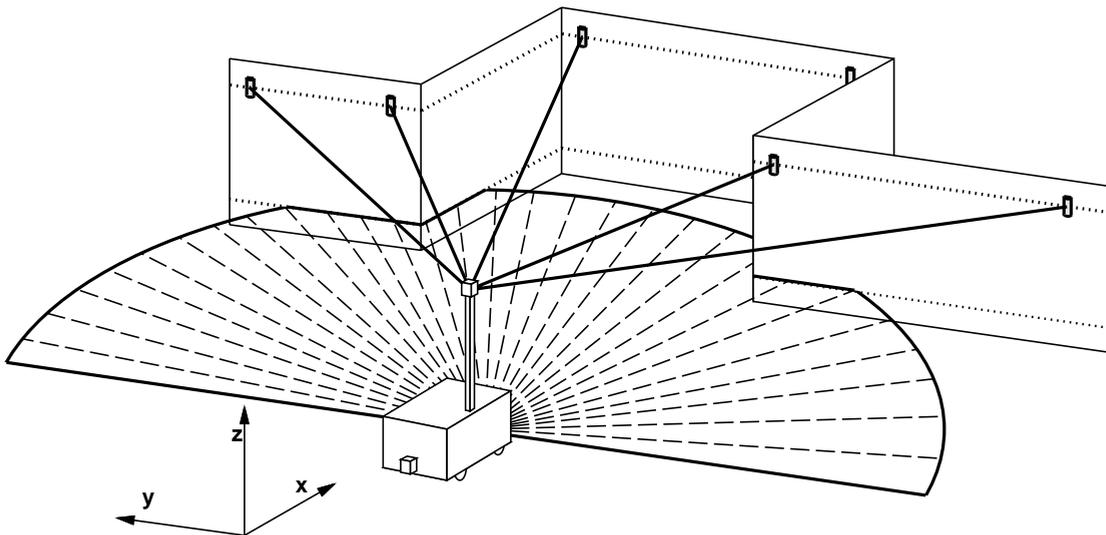


Abbildung 4.2: Erfassung künstlicher Landmarken (Reflektoren) und natürlicher Landmarken (Ecken) in horizontalen Ebenen (x-y-Ebenen) parallel zur Bewegungsebene.

Die vom Laserscanner gelieferten Daten liegen im Polarkoordinatensystem relativ zum Sensor vor (siehe Abbildung 4.3). In einem Vorverarbeitungsschritt müssen aus diesen Daten die Landmarken extrahiert werden. Für die Extraktion von Landmarken aus den Sensordaten können unterschiedliche Filtertechniken und Verfahren der Mustererkennung eingesetzt werden, wie Mittelwertfilter, Cluster-Algorithmen, Algorithmen zur Linienextraktion oder Objekt-Erkennungsalgorithmen. Die Ergebnisdaten der Landmarkendetektion sind dann geordnete Folgen $\mathbf{LM} = [\mathbf{LM}_1, \dots, \mathbf{LM}_n]$ von Tupeln der Form

$$\mathbf{LM}_i = \langle [\alpha_i, d_i, x_i, y_i, s_i]^T | i \in [1, \dots, n] \rangle$$

wobei α_i, d_i die relative Position der Landmarke \mathbf{LM}_i zur Sensorposition in Polarkoordinaten (Richtungswinkel, Abstand) ist, x_i, y_i die relative Position der Landmarke \mathbf{LM}_i in kartesischen Koordinaten und s_i eine Beschreibung der Struktur der Landmarke \mathbf{LM}_i (siehe Abbildung 4.3).

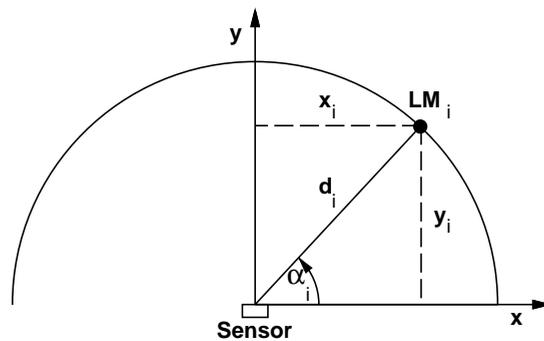


Abbildung 4.3: Meßdaten des Laserscanners im Polarkoordinatensystem.

Die kartesischen Koordinaten berechnen sich aus den Polarkoordinaten durch eine einfache Transformation:

$$\begin{aligned} x_i &= \cos(\alpha_i) d_i \\ y_i &= \sin(\alpha_i) d_i \end{aligned}$$

In der Beschreibung s_i der Landmarke werden zwei Typen unterschieden:

1. Künstliche Landmarken:

Die in dieser Arbeit verwendeten künstlichen Landmarken bestehen aus gleicharti-

gen Reflektorfolien, die an bestimmten Stellen in der Einsatzumgebung des Roboters angebracht werden. Die Positionierung der Landmarken wird in Kapitel 4.4 beschrieben. Mit einem Laserscanner werden Abstand und Winkel der sichtbaren Landmarken erfaßt und für die Weiterverarbeitung in ein Rechnersystem eingelesen. Eine Landmarke läßt sich vom Hintergrund und anderen Objekten mit hoher Zuverlässigkeit und Genauigkeit anhand der Reflektionseigenschaften der Folie unterscheiden.

2. Natürliche Landmarken:

Als natürliche Landmarken werden in dieser Arbeit geradlinige Strukturelemente und Ecken gewählt, die in Büroumgebungen, beispielsweise durch Wände und Türen, gebildet werden. In einem Vorverarbeitungsschritt werden aus den Abstandsdaten des Laserscanners Linien extrahiert und Ecken, die durch Wände und Türen gebildet werden, detektiert. Diese werden dann als natürliche Landmarken für die Lokalisation verwendet. Die Berechnung umfaßt Abstand und Winkel sowie die Größe und andere Merkmale der Geraden und Ecken (Öffnungswinkel, Wandlängen), an welchen die Landmarke detektiert wurde.

4.3.2 Berechnung der Roboterlage

Zur Berechnung der Roboterlage aus Meßwerten und Landmarkendaten sind in der Literatur bereits unterschiedliche Verfahren entwickelt worden (siehe [Betke 94], [Leonard 91], [Hinkel 89], [Weiß 95]). Die kartesischen Koordinaten (Positionen) gemessener Landmarken $LM_i^{\text{real}} \in \mathbf{LM}^{\text{real}}$, $i \in [1, \dots, m]$ im Fahrzeugkoordinatensystem (FKS) und die kartesischen Koordinaten von Landmarken $LM_j^{\text{map}} \in \mathbf{LM}^{\text{map}}$, $j \in [1, \dots, n]$ der Karte im Weltkoordinatensystem (WKS) werden dabei als gegeben vorausgesetzt. Zusätzlich muß eine Korrespondenzfunktion

$$K(i): \mathbb{N}_1^m \rightarrow \mathbb{N}_0^n$$

bekannt sein, die jeder gemessenen Landmarke LM_i^{real} eindeutig eine Landmarke $LM_{K(i)}^{\text{map}}$ der Karte zuordnet. Die Abbildung $K(i) \rightarrow 0$ soll dabei eine fehlende Korrespondenz anzeigen. Kapitel 4.4.7 geht auf die Berechnung der Korrespondenzfunktion im allgemeinen Fall näher ein.

Für $N=3$ Landmarken existieren geschlossene Verfahren zur Berechnung der Roboterlage ([Chen 93], [McGillam 88], [Stella 95], [Krotkov 89]). Für $N>3$ künstliche, punktförmige Landmarken wird die Rotation und Verschiebung der Landmarken LM_i^{real} zu $LM_{K(i)}^{\text{map}}$ mit kleinstem quadratischen Fehler berechnet [Cox 90]. Die Rotation $\Delta\Theta$ erfolgt dabei um den Schwerpunkt, da dieser bezüglich LM^{real} und LM^{map} invariant ist. Die Gleichungen dafür lauten (siehe auch Abbildung 4.4):

$$\mathbf{CM} = \begin{bmatrix} \mathbf{CM}_x \\ \mathbf{CM}_y \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} LM_{i,x} \\ LM_{i,y} \end{bmatrix} \quad (\text{GL 4.1})$$

$$\angle LM_i = \text{atan} \frac{LM_{i,y} - \mathbf{CM}_y}{LM_{i,x} - \mathbf{CM}_x}$$

$$\bar{\Theta}^{\text{real}} = \text{atan} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sin(\angle LM_i)}{\sum_{i=1}^n \cos(\angle LM_i)} \right) \quad (\text{GL 4.2})$$

$$\bar{\Theta}^{\text{map}} = \text{atan} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \sin(\angle LM_{K(i)})}{\sum_{i=1}^n \cos(\angle LM_{K(i)})} \right)$$

$$\Theta = \bar{\Theta}^{\text{real}} - \bar{\Theta}^{\text{map}} \quad (\text{GL 4.3})$$

wobei $\angle LM_i$ die Winkel sind, unter denen die Landmarken LM_i vom Schwerpunkt \mathbf{CM} aus gesehen werden können (Gleichungen GL 4.1). $\bar{\Theta}^{\text{real}}$ und $\bar{\Theta}^{\text{map}}$ sind die mittleren Winkel $\angle LM_i^{\text{map}}$ bzw. $\angle LM_i^{\text{real}}$ (Gleichungen GL 4.2). Die Orientierung Θ ergibt sich aus dem Differenzwinkel von gemessenen Landmarken LM_i^{real} und den korrespondierenden Landmarken $LM_{K(i)}^{\text{map}}$ (Gleichungen GL 4.3).

Die translatorische Verschiebung kann mit

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \mathbf{CM}^{\text{real}} - \mathbf{CM}^{\text{map}} \quad (\text{GL 4.4})$$

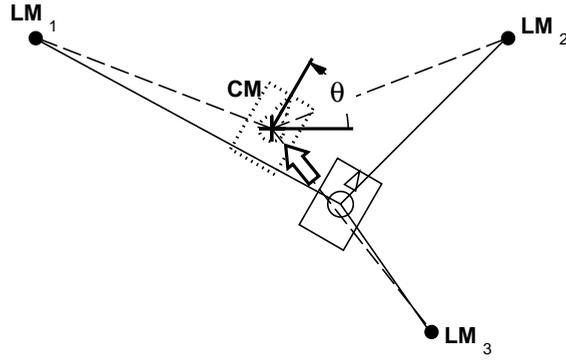


Abbildung 4.4: Berechnung der Roboterorientierung Θ durch Verschieben des Roboters in den Schwerpunkt CM , Berechnung der Landmarkenwinkel und Mittelung der Winkeldifferenzen gemessener und korrespondierender Landmarken.

berechnet werden, jedoch ist die Berechnung über die Schwerpunkte empfindlich gegenüber Fehlern bei der Abstandsmessung (Ausreißer). Ein anderer Ansatz, der aus den Winkeldifferenzen der Landmarken die translatorische Verschiebung bestimmt, wird in [Hanebeck 96a], [Hanebeck 96b] und [Hanebeck 97a] beschrieben. Die Roboterposition $[x \ y]^T$ ergibt sich aus dem Lösungsraum des folgenden, linearen Gleichungssystems (siehe auch Abbildung 4.5):

$$\alpha_i = \text{atan}\left(\frac{LM_{i,y} - y}{LM_{i,x} - x}\right) \quad (\text{GL 4.5})$$

$$\delta_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i = \text{atan}\left(\frac{LM_{i+1,y} - y}{LM_{i+1,x} - x}\right) - \text{atan}\left(\frac{LM_{i,y} - y}{LM_{i,x} - x}\right) \quad (\text{GL 4.6})$$

$$\tan \delta_i = \frac{\frac{LM_{i+1,y} - y}{LM_{i+1,x} - x} - \frac{LM_{i,y} - y}{LM_{i,x} - x}}{1 + \frac{LM_{i+1,y} - y}{LM_{i+1,x} - x} \cdot \frac{LM_{i,y} - y}{LM_{i,x} - x}}$$

$$\tan \delta_i = \frac{\frac{LM_{i+1,y} - y}{LM_{i+1,x} - x} - \frac{LM_{i,y} - y}{LM_{i,x} - x}}{1 + \frac{LM_{i+1,y} - y}{LM_{i+1,x} - x} \cdot \frac{LM_{i,y} - y}{LM_{i,x} - x}} \Rightarrow \cot \delta_i = \frac{1 + \frac{LM_{i+1,y} - y}{LM_{i+1,x} - x} \cdot \frac{LM_{i,y} - y}{LM_{i,x} - x}}{\frac{LM_{i+1,y} - y}{LM_{i+1,x} - x} - \frac{LM_{i,y} - y}{LM_{i,x} - x}}$$

$$\underbrace{\text{LM}_{i+1,y}\text{LM}_{i,y} + \text{LM}_{i+1,x}\text{LM}_{i,x} + \cot\delta_i(\text{LM}_{i+1,x}\text{LM}_{i,y} - \text{LM}_{i+1,y}\text{LM}_{i,x})}_{C_i}$$

$$= \begin{bmatrix} \underbrace{\cot\delta_i(\text{LM}_{i,y} - \text{LM}_{i+1,y}) + \text{LM}_{i+1,x} + \text{LM}_{i,x}}_{A_i} \\ \underbrace{\cot\delta_i(\text{LM}_{i+1,x} - \text{LM}_{i,x}) + \text{LM}_{i+1,y} + \text{LM}_{i,y}}_{B_i} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - x^2 - y^2$$

$$C_i = \begin{bmatrix} A_i & B_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - x^2 - y^2$$

$$C_i - C_{i+1} = \begin{bmatrix} A_i - A_{i+1} & B_i - B_{i+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} C_1 - C_2 \\ \dots \\ C_n - C_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 - A_2 & B_1 - B_2 \\ \dots & \dots \\ A_n - A_1 & B_n - B_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{GL 4.7})$$

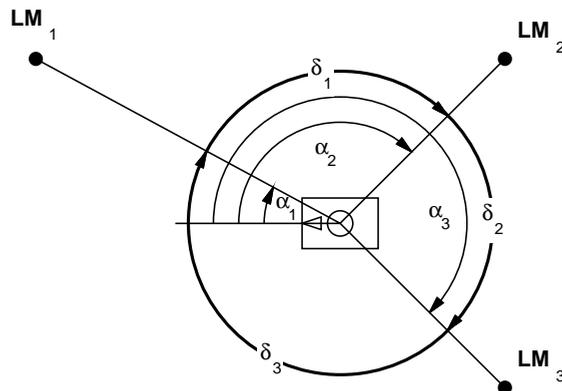


Abbildung 4.5: Berechnung der Roboterposition aus Winkelmessungen: Aus den Differenzwinkeln δ_i zweier aufeinanderfolgender Landmarken LM_i und LM_{i+1} ergibt sich ein lineares Gleichungssystem, für das eine Lösung – die Roboterposition – mit kleinstem quadratischen Fehler berechnet wird.

Gleichung GL 4.5 beschreibt die Winkel α_i , unter denen die Landmarken vom Roboter aus gesehen werden (Messung). Gleichung GL 4.6 beschreibt die Differenzwinkel δ_i zwischen zwei aufeinanderfolgenden Landmarken LM_i und LM_{i+1} , wobei für die Berechnung der Indizes die Modulo-Rechnung bezüglich der Landmarkenanzahl n angewendet wird. Durch Umformen und Auflösen der Gleichung GL 4.6 nach $[x \ y]^T$ erhält man das Gleichungssystem GL 4.7.

Neben den Winkelmessungen zu Landmarken können auch Abstandsmessungen d_i als zusätzliche Restriktionen dem Gleichungssystem hinzugefügt werden. Das Gleichungssystem GL 4.7 wird um diese zusätzliche Information erweitert durch:

$$\begin{aligned} D_i &= LM_{i,x} - \cos(\theta + \alpha_i)d_i = x \\ E_i &= LM_{i,y} - \sin(\theta + \alpha_i)d_i = y \end{aligned}$$

und es ergibt sich das folgende Gleichungssystem:

$$\begin{bmatrix} C_1 - C_2 \\ \dots \\ C_n - C_1 \\ D_1 \\ \dots \\ D_n \\ E_1 \\ \dots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 - A_2 & B_1 - B_2 \\ \dots & \dots \\ A_n - A_1 & B_n - B_1 \\ 1 & 0 \\ \dots & \dots \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \dots & \dots \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (\text{GL 4.8})$$

Aufgrund von Meßfehlern sind die Gleichungssysteme GL 4.7 und GL 4.8 gewöhnlich nicht lösbar.¹ Mit einem numerischen Verfahren, wie dem SVD-Algorithmus² ([Lawson 74], [Press 88]), kann jedoch eine Lösung mit kleinstem quadratischen Fehler berechnet werden. Mit dem erweiterten Gleichungssystem GL 4.8 erzielt man im allgemeinen bessere Ergebnisse.

¹ Das Gleichungssystem hat nur zwei Variablen, jedoch im allgemeinen einen Rang >2 , d. h. es gibt keine Lösung für x, y , die allen Gleichungen genügt.

² SVD-Algorithmus: Singular Value Decomposition [Lawson 74].

4.3.3 Relative Lokalisation

Die relative Lokalisation stellt die einfachste Form der Lokalisation dar. Sie wird zur fortlaufenden Korrektur der Odometriedaten während der Fahrt des Roboters verwendet. In dieser Arbeit werden die Korrekturwerte aus der aktuellen Roboterlage und je zwei aufeinanderfolgenden Messungen von Landmarken berechnet. Es wird vorausgesetzt, daß der Roboter zwischen zwei Messungen nur kleine Positions- und Orientierungsänderungen durchführt, so daß sich die Mengen, Abstände und Richtungen sichtbarer Landmarken zwischen zwei Messungen nur begrenzt verändern.¹

Zur relativen Lokalisation werden zwei Messungen verglichen und der translatorische und rotatorische Versatz bestimmt. Für den Vergleich ist es erforderlich, das relative Korrespondenzproblem zu lösen, d. h. die Landmarken der ersten Messung den entsprechenden Landmarken der zweiten Messung zuzuordnen. Unter der Voraussetzung, daß der Roboter zwischen zwei Messungen nur kleine Positions- und Orientierungsänderungen durchführt, besteht die einfachste Methode darin, eine Landmarke der bezüglich des euklidischen Abstands jeweils nächsten Landmarke der vorhergehenden Messung zuzuordnen [Cox 90].

In dieser Arbeit wird ein Ansatz gewählt, der, ausgehend von der ersten Messung der Landmarken $LM_i^t \in \mathbf{LM}^{\text{real}}, i \in [1, \dots, m]$, anhand der Odometriedaten des Roboters die Positionen der Landmarken \hat{LM}_j^{t+1} für die zweite Messung $LM_i^{t+1} \in \mathbf{LM}^{\text{real}}, i \in [1, \dots, n]$ vorausbestimmt. Die Voraussage wird durch Verschieben der Landmarkenpositionen LM_j^t entlang des Vektors $[-\Delta x \ -\Delta y \ -\Delta \theta]^T$ ermittelt, wobei sich der Verschiebungsvektor aus der mit Odometrie erfaßten Bewegung $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta \theta]^T$ des Roboters zwischen der ersten Messung zum Zeitpunkt t und der zweiten Messung zum Zeitpunkt $t+1$ ergibt.² Ist die Voraussage berechnet, erfolgt die Zuordnung der Landmarken zur Voraussage mittels des kleinsten euklidischen Abstands. Die Korrespondenzfunktion $K(i)$ berechnet sich mit:

¹ Diese Voraussetzung kann für die meisten mobilen Roboter, die sich nur mit geringen Geschwindigkeiten bis zu $1m/s$ ($3.6km/h$) fortbewegen, erfüllt werden.

² Bei der Lokalisation in 3D ergibt sich ein Verschiebevektor $[-\Delta x \ -\Delta y \ -\Delta z \ -\Delta \theta \ -\Delta \Phi \ -\Delta \Psi]^T$.

$$K(i) = \begin{cases} j & \text{falls} & \min_j \left\| \mathbf{LM}_i^{t+1} - \hat{\mathbf{LM}}_j^{t+1} \right\|_2 \leq s_{\max} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die relative Verschiebung und Orientierungsänderung wird mit dem in Kapitel 4.3.2 vorgestellten Verfahren berechnet (siehe GL 4.3 und GL 4.8) und anschließend mit dem in Kapitel 4.3.5 beschriebenen Ansatz gefiltert.

Im allgemeinen können nicht für alle Landmarken \mathbf{LM}_i^{t+1} korrespondierende Landmarken $\hat{\mathbf{LM}}_j^{t+1}$ gefunden werden. So kann der Roboter zum Zeitpunkt $t + 1$ den Sichtbarkeitsbereich einiger Landmarken verlassen haben, es können zeitweise einige Landmarken verdeckt sein oder der Roboter ist in den Sichtbarkeitsbereich neuer Landmarken gelangt. Um die Lagebestimmung robuster gegen Verdeckungen und Meßfehler zu gestalten, werden Landmarken, die während der Fahrt in den Sichtbarkeitsbereich des Roboters gelangen oder diesen verlassen, zunächst nicht für die Bestimmung der Roboterlage verwendet. Dazu wird ein Schwellwert s_{\max} für den maximalen euklidischen Abstand der Korrespondenzfunktion definiert, der durch Experimente bestimmt wird und kleiner ist als der halbe minimale Abstand aller Landmarken. Wird der maximale Abstand für eine Landmarke \mathbf{LM}_i^{t+1} für alle $\hat{\mathbf{LM}}_j^{t+1}$ überschritten, bleibt die Landmarke \mathbf{LM}_i^{t+1} für die Bestimmung der Roboterlage unberücksichtigt. Dieser Ansatz ist gerechtfertigt unter der Voraussetzung, daß der Roboter im Zeitintervall von t und $t + 1$ nur kleine Positions- und Orientierungsänderungen durchführen kann. Durch eine zeitliche Filterung über mehrere Messungen hinweg werden Landmarken, die den Sichtbarkeitsbereich des Roboters verlassen haben, aus der Menge $\mathbf{LM}^{\text{real}}$ entfernt. Neue Landmarken, in deren Sichtbarkeitsbereich der Roboter gelangt, werden durch ein analoges zeitliches Filterverfahren der Menge von Landmarken, die zur Bestimmung der Roboterlage verwendet werden, hinzugefügt.¹ Durch diese Technik wird sichergestellt, daß einerseits kurzfristige Verdeckungen von Landmarken toleriert und andererseits Meßfehler ausgefiltert werden. Dieser Ansatz ermöglicht eine echtzeitfähige Berechnung der Roboterlage, da nur einfache Berechnungen ausgeführt werden müssen.

¹ Da anhand der Messung nicht entschieden werden kann, ob eine Landmarke den Sichtbarkeitsbereich um den Roboter verlassen hat oder durch ein Hindernis verdeckt wird, dürfen nicht sichtbare Landmarken nicht unmittelbar aus der Menge potentiell zu betrachtender Landmarken entfernt werden. Ähnlich muß bei neu hinzukommenden Landmarken verfahren werden, da Fehlmessungen durch reflektierende Gegenstände, wie Fensterscheiben, nicht ausgeschlossen werden können.

Diese Art der relativen Lokalisation ist jedoch nur für die Bestimmung der Roboterlage geeignet, bei der sich die Sichtbarkeitsbereiche von Landmarken während der Fahrt nur beschränkt verändern. Für die absolute Lokalisation und bei starken Änderungen der Sichtbarkeiten von Landmarken wird ein Ansatz zur Bestimmung der Roboterlage verwendet, der zusätzlich a priori Wissen einbezieht. Dieser Ansatz wird im folgenden Kapitel erläutert.

4.3.4 Absolute Lokalisation

Bei der absoluten Lokalisation wird in dieser Arbeit die Roboterlage in der Einsatzumgebung anhand von Meßwerten $LM_i^{\text{real}} \in \mathbf{LM}^{\text{real}}$, $i \in [1, \dots, m]$ und a priori Wissen, wie Landmarken aus einer gegebenen Karte $LM_j^{\text{map}} \in \mathbf{LM}^{\text{map}}$, $j \in [1, \dots, n]$ und der ungefähren Roboterlage $[\hat{x}, \hat{y}, \hat{\Theta}]^T$, bestimmt.

Eine Lösung für das absolute Korrespondenzproblem wird berechnet, indem – ausgehend von der Schätzung der aktuellen Roboterposition – die bezüglich des euklidischen Abstands nächstliegenden Landmarken $LM_j^{\text{map}} \in \mathbf{LM}^{\text{map}}$ den gemessenen Landmarken $LM_i^{\text{real}} \in \mathbf{LM}^{\text{real}}$ zugeordnet werden. Über einen maximalen Abstand s_{max} wird ein Schwellwert festgelegt, mit dem Fehlmessungen (verdeckte Landmarken, unbekannte Landmarken) weitgehend ausgefiltert werden. Die Korrespondenzfunktion $K(i)$ berechnet sich mit:

$$K(i) = \begin{cases} j & \text{falls} & \min_j \|LM_i^{\text{real}} - LM_j^{\text{map}}\|_2 \leq s_{\text{max}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die absolute Position und Orientierung wird mit dem in Kapitel 4.3.2 vorgestellten Verfahren berechnet und anschließend mit dem in Kapitel 4.3.5 beschriebenen Ansatz gefiltert.

4.3.5 Filterung der Lagedaten

Vor einer Verwendung der Lagedaten durch das Navigations- oder Planungssystem müssen die Positions- und Orientierungsinformationen gefiltert werden, um Fehlmessungen erkennen und entfernen zu können. Gleichzeitig können die Meßunsicherheiten reduziert werden,

indem mehrere Messungen und Odometriedaten fusioniert werden. Zur Filterung von Meßdaten lassen sich zwei unterschiedliche Filtertechniken anwenden: probabilistische Filter, wie der Kalman-Filter [Kalman 60], und mengenbasierte Filter ([Schweppe 68], [Schweppe 73]). Der Kalman-Filter oder daraus entstandene Filtertechniken werden vielfach bei Problemstellungen eingesetzt, die die Voraussetzungen für den Kalman-Filter hinreichend erfüllen und für die die notwendigen Filterparameter ermittelt oder gut geschätzt werden können. Kann dies nicht erfüllt werden, müssen andere Filterverfahren, wie Mengenfiter, verwendet werden.

In dieser Arbeit wird zur Filterung ein mengenbasierter Filteransatz verwendet. Die Gründe dafür sind:

- Das Systemmodell zur Filterung der Lagedaten ist nichtlinear, so daß der Einsatz des erweiterten Kalman-Filters erforderlich wird. Der Berechnungsaufwand steigt dadurch an.
- Die Schätzung geeigneter Filterwerte für den Kalman-Filter gestaltet sich bei einem unvollständig bekannten Systemmodell als schwierig.
- Es ist nicht bekannt, welche Verteilung die Störgrößen besitzen, insbesondere, ob mittelwertfreie Normalverteilungen, wie sie der Kalman-Filter benötigt, gegeben sind.
- Die Berechnung der Filterwerte ist durch den mengenbasierten Ansatz leicht graphisch ableitbar und einfach zu implementieren.

Zur Darstellung der Mengen werden Intervalle $[a, \bar{a}]$ mit $a, \bar{a} \in \mathbb{R} \wedge a \leq \bar{a}$ verwendet. Dies ermöglicht den Einsatz effizienter Berechnungsmethoden aus der Intervallarithmetik ([Moore 79], [Alefeld 74]).¹ Jeder Lageschätzung wird eine entsprechende Menge zugeordnet, die die tatsächliche Lage enthält, und jedes Element der Menge stellt eine gültige Lageschätzung dar. Für die Positionsschätzung ergibt sich ein Rechteck, das die tatsächliche Position enthält (siehe Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7); für die Lageschätzung ergibt sich ein Quader:²

¹ Die Modellierung der Unsicherheiten durch Ellipsoide oder allgemein Polyeder ermöglicht kleinere Fehlerintervalle, erfordert jedoch einen beträchtlich höheren Rechenaufwand für die Erweiterung und Schnittbildung ([Schweppe 73], [Hanebeck 97a]). Aus Rechenzeitgründen wird daher auf diese Modellierung verzichtet.

$$\hat{\rho}_t^K = \begin{bmatrix} [\underline{x}, \bar{x}] \\ [\underline{y}, \bar{y}] \\ [\underline{\Theta}, \bar{\Theta}] \end{bmatrix}$$

Die Länge eines Intervalls ist definiert durch:

$$w([\underline{a}, \bar{a}]) = \bar{a} - \underline{a}$$

Die Intervalllänge ist ein Maß dafür, wie gut die Schätzung des tatsächlichen Wertes ist. Kleine Intervalllängen bedeuten eine genauere Schätzung.

Die Fortschreibung eines Meßwertes in Intervallschreibweise ergibt sich aus der Addition des Meßwertintervalls $\hat{\rho}_t^K$ mit einem um den Nullpunkt symmetrischen Fehlerintervall $\Delta \epsilon$ (siehe Abbildung 4.6):

$$\hat{\rho}_{t+1}^K = \hat{\rho}_t^K + \Delta \epsilon = \begin{bmatrix} [\underline{x}_t, \bar{x}_t] \\ [\underline{y}_t, \bar{y}_t] \\ [\underline{\Theta}_t, \bar{\Theta}_t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [-\epsilon_x, \epsilon_x] \\ [-\epsilon_y, \epsilon_y] \\ [-\epsilon_\Theta, \epsilon_\Theta] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\underline{x}_t - \epsilon_x, \bar{x}_t + \epsilon_x] \\ [\underline{y}_t - \epsilon_y, \bar{y}_t + \epsilon_y] \\ [\underline{\Theta}_t - \epsilon_\Theta, \bar{\Theta}_t + \epsilon_\Theta] \end{bmatrix}$$

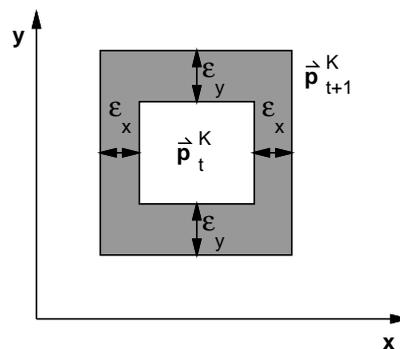


Abbildung 4.6: Fortschreibung einer Positionsschätzung durch Vergrößerung des Intervalls um das Fehlerintervall.

Die Filterung mehrerer Messungen $\hat{\rho}_a^K, \hat{\rho}_b^K$ ergibt sich aus dem Mengenschnitt der Intervalle (siehe Abbildung 4.7):

²Für die Lokalisation in 3D ergibt sich ein Hyperquader.

$$\hat{\mathbf{p}}_a^K \cap \hat{\mathbf{p}}_b^K = \begin{bmatrix} [\underline{x}_a, \bar{x}_a] \\ [\underline{y}_a, \bar{y}_a] \\ [\underline{\Theta}_a, \bar{\Theta}_a] \end{bmatrix} \cap \begin{bmatrix} [\underline{x}_b, \bar{x}_b] \\ [\underline{y}_b, \bar{y}_b] \\ [\underline{\Theta}_b, \bar{\Theta}_b] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\max(\underline{x}_a, \underline{x}_b), \min(\bar{x}_a, \bar{x}_b)] \\ [\max(\underline{y}_a, \underline{y}_b), \min(\bar{y}_a, \bar{y}_b)] \\ [\max(\underline{\Theta}_a, \underline{\Theta}_b), \min(\bar{\Theta}_a, \bar{\Theta}_b)] \end{bmatrix}$$

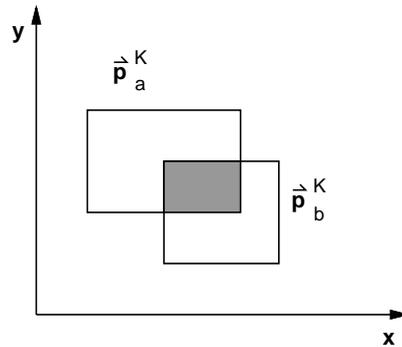


Abbildung 4.7: Schätzung der Roboterposition durch Schnittbildung mehrerer Messungen. Die tatsächliche Position befindet sich im Schnittintervall (graues Rechteck).

Die Fusion mehrerer Schätzwerte durch den Intervallschnitt garantiert, daß das Ergebnisintervall stets kleiner ist und gegen den tatsächlichen Wert konvergiert. Die Filterung durch den Intervallschnitt ermöglicht daher eine Schätzung der Roboterlage aus Lageschätzungen, für die ein Fehlerintervall angegeben werden kann, das die tatsächliche Roboterlage enthält. Das Konvergenzverhalten ist bei mengenbasierten Filtern rascher, wenn die Standardabweichung der Meßwerte groß ist. Außerdem müssen nichtlineare Systemmodelle nicht linearisiert werden [Hager 93]. Für die Anwendung in dieser Arbeit bietet ein mengenbasierter Filter gegenüber probabilistischen Filtern entscheidende Vorteile.

Jedem Meßwert, der mit einem mengenbasierten Filter zu einem Schätzwert fusioniert werden soll, muß ein Fehlerintervall zugeordnet werden. Die Größe des Fehlerintervalls sollte möglichst nicht größer sein als der tatsächliche Fehler, um den zu schätzenden Wert nicht zu überschätzen und einen nur sehr ungenauen Schätzwert zu erhalten. Das Intervall darf aber auch nicht kleiner gewählt werden als der tatsächliche Fehler, um falsche Schätzwerte zu vermeiden. Das Fehlerintervall hängt von folgenden Größen ab:

- die Genauigkeit der Winkelmessung von Landmarken
- die Genauigkeit der Abstandsmessung von Landmarken

- der Genauigkeit der Landmarkenpositionen in der Karte

Die Genauigkeit der Winkel- und Abstandsmessung ergibt sich durch den eingesetzten Laserscanner. Um unabhängig von der Meßrichtung und der Roboterorientierung zu bleiben, werden in dieser Arbeit nur Fehlerintervalle der Form

$$[\underline{\varepsilon}_x, \bar{\varepsilon}_x] = [\underline{\varepsilon}_y, \bar{\varepsilon}_y] \quad |\underline{\varepsilon}_x| = |\bar{\varepsilon}_x| = |\underline{\varepsilon}_y| = |\bar{\varepsilon}_y|$$

verwendet. Die Intervallgröße berechnet sich aus dem Meßfehler $\Delta\alpha_\varepsilon$ für den Winkel und Δd_ε für den Abstand, dem maximalen Meßabstand d_{\max} und dem Positionierungsfehler ΔLM_ε der Landmarken. Zusätzlich muß die Landmarkenbreite mit einem weiteren Winkelfehler $\Delta\beta_\varepsilon$ berücksichtigt werden, da bei der Messung nicht festgelegt ist, wo der Laserstrahl an der Landmarke reflektiert wird. Der Winkelfehler $\Delta\beta_\varepsilon$ wird durch den minimalen Meßabstand d_{\min} abgeschätzt. Die Berechnung der Intervallgröße gestaltet sich wie folgt (siehe auch Abbildung 4.8):

$$\begin{aligned} p_a &= \begin{bmatrix} \cos(\Delta\alpha_\varepsilon) \cdot (d_{\max} + \Delta d_\varepsilon) \\ \sin(\Delta\alpha_\varepsilon) \cdot (d_{\max} + \Delta d_\varepsilon) \end{bmatrix} \\ p_b &= \begin{bmatrix} \cos(-\Delta\alpha_\varepsilon) \cdot (d_{\max} - \Delta d_\varepsilon) \\ \sin(-\Delta\alpha_\varepsilon) \cdot (d_{\max} - \Delta d_\varepsilon) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{GL 4.9})$$

$$\Delta p_\varepsilon = \frac{\|p_a - p_b\|_2}{2}$$

$$[\underline{\varepsilon}_x, \bar{\varepsilon}_x] = [\underline{\varepsilon}_y, \bar{\varepsilon}_y] = [-(\Delta p_\varepsilon + \Delta LM_\varepsilon), \Delta p_\varepsilon + \Delta LM_\varepsilon]$$

$$[\underline{\varepsilon}_\Theta, \bar{\varepsilon}_\Theta] = [-(\Delta\alpha_\varepsilon + \Delta\beta_\varepsilon), \Delta\alpha_\varepsilon + \Delta\beta_\varepsilon]$$

p_a und p_b sind zwei Extrempunkte des Kreissegmentstücks, das die gemessene Landmarke bei gegebenem Winkel- und Abstandsfehler enthält (siehe Abbildung 4.8). Der Abstand von p_a und p_b , vergrößert um den zusätzlichen Landmarkenpositionierungsfehler ΔLM_ε , ergibt die Fehlerintervalle $[\underline{\varepsilon}_x, \bar{\varepsilon}_x] = [\underline{\varepsilon}_y, \bar{\varepsilon}_y]$, die die tatsächliche Roboterposition enthalten.

Das Fehlerintervall $[\underline{\varepsilon}_\Theta, \bar{\varepsilon}_\Theta]$ für den Winkelfehler wird aus dem Meßfehler $\Delta\alpha_\varepsilon$ des Winkels zur Landmarke und dem Winkelfehler $\Delta\beta_\varepsilon$, der sich aus der Breite der Landmarke ergibt, bestimmt.

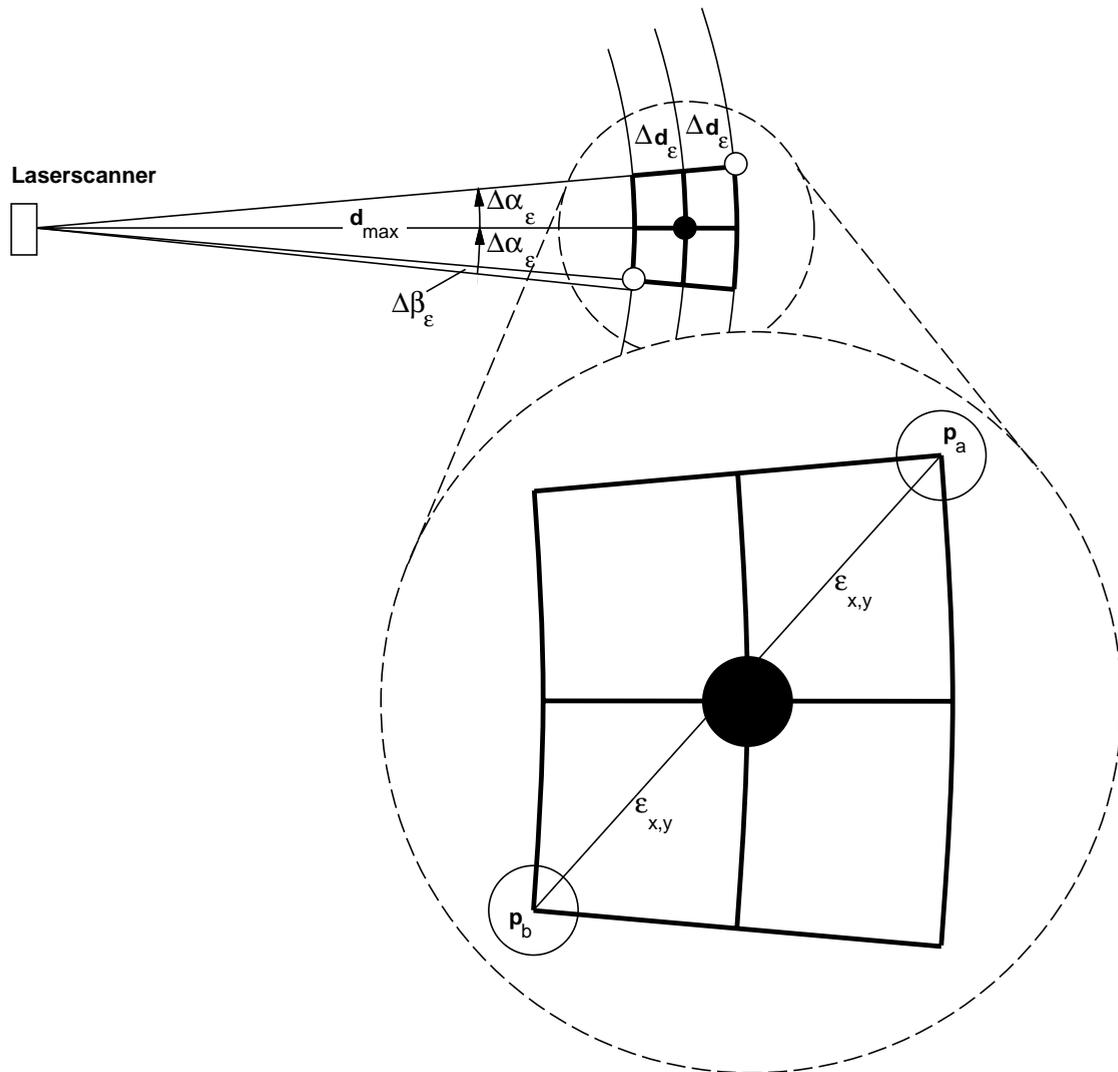


Abbildung 4.8: Berechnung der Intervallgröße des Positionsfehlers mit Winkel- und Abstandsfehler einer gemessenen Landmarke.

4.4 Platzierung von Landmarken

Für die absolute Lokalisation und die Lösbarkeit des Startup-Problems ist eine geeignete Platzierung von künstlichen Landmarken entscheidend. Nur wenn die Platzierung der Landmarken hinreichend „gut“ ist, kann die absolute Lokalisation und die Lösung des Startup-Problems überhaupt gelingen. Die Platzierung der Landmarken beeinflusst darüber hinaus die Genauigkeit der Lageschätzung und die Zuverlässigkeit des Lokalisationsverfahrens bei teilweise verdeckten Landmarken und Fehlmessungen [Rupp 2000]. In dieser Arbeit kommt daher der geeigneten Platzierung künstlicher Landmarken eine besondere Bedeutung

zu. Für die Lokalisation wenig geeignete Landmarkenplatzierungen können leicht gefunden werden. Abbildung 4.9 zeigt einige Beispiele, bei der die Lokalisation aufgrund der eingeschränkten Sensorreichweite des Roboters oder wegen Hindernissen, wie Wänden, nicht eindeutig möglich ist.

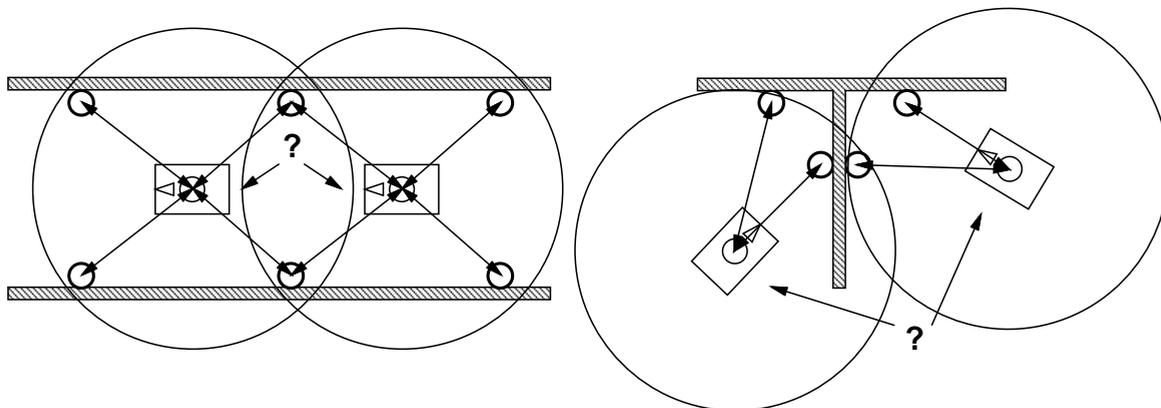


Abbildung 4.9: Beispiele für nicht eindeutige Landmarkenplatzierung aufgrund von Hindernissen und eingeschränkter Sensorreichweite.

In der Literatur wird die Platzierung von Landmarken in der Einsatzumgebung des Roboters kaum betrachtet. Es werden lediglich Mindestkriterien bezüglich der Landmarkenpositionen genannt, wie die Lösbarkeit des „3-Punkt-Problems“ in [McGillam 88], [Talluri 93], [Stella 95]. Der Ansatz in [Zhang 92] untersucht die optimale Platzierung der Sensoren auf dem Roboter, betrachtet jedoch geeignete Positionen von Landmarken, die zur Lokalisation verwendet werden, nicht. In [Tashiro 95] wird ein iteratives Verfahren vorgestellt, das – ausgehend von einer Anfangskonfiguration – künstliche Landmarken entlang von Wänden verschiebt, bis ein Optimum gefunden ist. Dabei werden spezielle aktive Landmarken verwendet, so daß die Lage anhand einer einzelnen Landmarke berechnet werden kann. Der Ansatz optimiert die Positionen der Landmarken jedoch nur bezüglich des sich ergebenden Lokalisationsfehlers und geht auf eine optimierte Platzierung von Landmarken zur Lösung des Startup-Problems nicht ein. In [Becker 95] werden die notwendigen Bedingungen für die Platzierung von künstlichen Landmarken in der Einsatzumgebung diskutiert. Auf die konkrete Platzierung und das Startup-Problem wird nicht eingegangen.

In diesem Kapitel wird untersucht, wie Landmarken platziert sein müssen, damit die absolute Lokalisation möglich ist und das Startup-Problem gelöst werden kann. Es wird ein Verfahren vorgestellt, das eine optimale Platzierung der künstlichen Landmarken bei gegebener

Struktur der Einsatzumgebung berechnet, so daß korrespondierende Landmarken eindeutig gefunden werden können. Das Verfahren basiert auf dem Ansatz, die Einsatzumgebung in einzelne Zellen zu unterteilen und diese Zellen so mit zusätzlichen künstlichen Landmarken auszustatten, daß das Korrespondenzproblem in jeder Zelle eindeutig lösbar ist. Zur Ausstattung der Zellen werden Techniken aus der Codierungstheorie eingesetzt, die die optimale Platzierung der künstlichen Landmarken eindeutig bestimmen und außerdem eine Fehlererkennung und Fehlerkorrektur bei Meßunsicherheiten und Meßfehlern ermöglichen.

4.4.1 Zellenaufteilung

Für die Platzierung von Landmarken müssen Kriterien angegeben werden, die eine Aussage darüber erlauben, ob die Lokalisation in jedem Punkt der Einsatzumgebung, den der Roboter erreichen kann, möglich ist. Die Auswahl von Kriterien hängt davon ab, welche Informationen für die Lokalisation genutzt werden können. In dieser Arbeit werden künstliche und – soweit möglich – natürliche Landmarken in der Ebene parallel zur Bewegungsebene (x-y-Ebene) für die Lokalisation verwendet.¹ Für die optimierte Platzierung der künstlichen Landmarken ist zu untersuchen, welche Konstellationen sich für jeden Punkt der Einsatzumgebung ergeben können. Lassen sich die Landmarken so platzieren, daß die sich ergebenden Konstellationen an jedem Punkt der Einsatzumgebung mit den Sensorsystemen des Roboters eindeutig unterscheidbar sind, kann das Korrespondenzproblem allgemein gelöst werden. Eine Konstellation ist dann eindeutig, wenn

- sie sich paarweise von allen anderen unterscheidet und
- sie in sich keine Symmetrien aufweist.²

Abbildung 4.10 zeigt einige nicht eindeutige Konstellationen von Landmarken.

Um die Verschiedenheit der Konstellationen untereinander sicherstellen zu können, wird folgender Ansatz verwendet:

¹ Bei der Anwendung im Raum sind analog zu ebenen Strukturen die Strukturen im Raum zu untersuchen.

² Einige Landmarkenkonstellationen, wie regelmäßige n-Ecken, weisen Symmetrien auf, die keine eindeutige Lösung des Korrespondenzproblems zulassen.

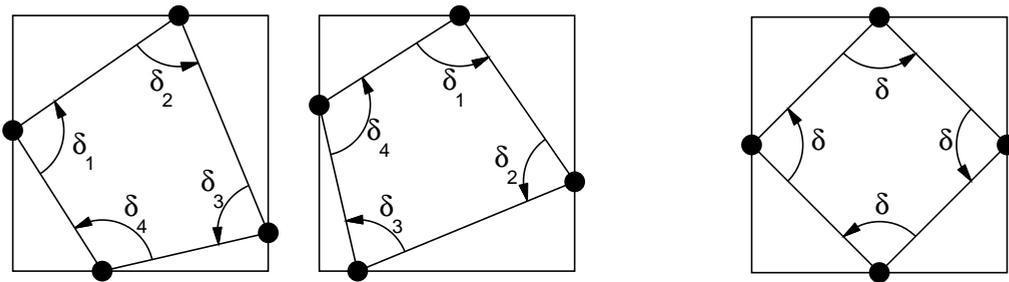


Abbildung 4.10: Nicht eindeutige Konstellationen von Landmarken: gleiche Konstellationen (links) und symmetrische Konstellationen (rechts).

Es wird vorausgesetzt, daß die Landmarken in der Einsatzumgebung nur an Begrenzungen, wie Wänden oder Säulen, angebracht werden sollen und nicht frei im Raum. Es wird weiter vorausgesetzt, daß die Einsatzumgebung des Roboters durch Geradenstücke begrenzt wird. In Gebäuden kann dies gewöhnlich ohne weiteres vorausgesetzt werden, andernfalls können nicht gerade Begrenzungen durch eine Reihe von Segmenten, wie in Abbildung 4.11 gezeigt, approximiert werden, ohne daß dies die Einsetzbarkeit des Verfahrens einschränkt.

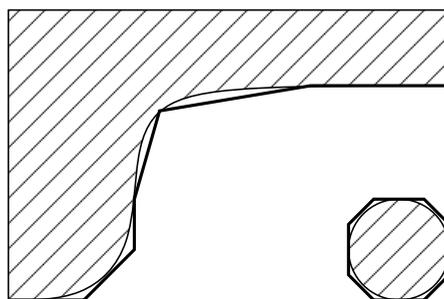


Abbildung 4.11: Approximation gekrümmter Begrenzungen durch Geradenstücke.

Die so strukturierte Einsatzumgebung des Roboters wird in sich nicht überlappende Zellen unterteilt. Eine Zelle Z_i wird in dieser Arbeit als konvexer Teilbereich der Einsatzumgebung definiert:¹

¹ Für die Lokalisation in 3D kann dieselbe Zelleneinteilung verwendet werden, falls die Einsatzumgebung sich ohne strukturelle Veränderung entlang der z-Koordinatenachse in die x-y-Ebene projizieren läßt. Andernfalls sind konvexe Polyeder zu betrachten.

Definition: $Z_i \subseteq \mathbb{R}^2$ mit

$$\forall x_1, x_2 \in Z_i, \lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}: \{ \lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2 : \lambda_1, \lambda_2 \geq 0, \lambda_1 + \lambda_2 = 1 \}$$

und $\forall i \neq j: Z_i \cap Z_j = \emptyset$.

Diese Definition stellt sicher, daß innerhalb einer Zelle keine Abschattungen durch nichtbewegliche Objekte auftreten. Fehlmessungen, die durch Abschattungen (nicht detektierte Landmarken) entstehen, können dann nur durch bewegliche Objekte verursacht werden. Zusätzlich wird gefordert, daß die Zellen sich nicht überlappen, d. h. paarweise disjunkt sind.

Zu jeder Zelle Z_i gibt es eine Folge von begrenzenden Wandsegmenten $s_{ij}(\lambda) = p_{ij} + \lambda v_{ij}$. Wandsegmente stellen die Bereiche in der Einsatzumgebung dar, die für die Platzierung künstlicher Landmarken in Frage kommen. Abbildung 4.12 zeigt ein einfaches Beispiel einer Einteilung der Einsatzumgebung in Zellen und den zugehörigen Wandsegmenten.

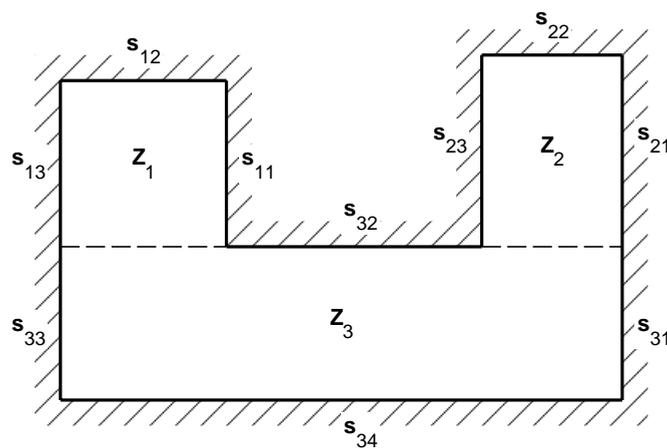


Abbildung 4.12: Beispiel für eine Einteilung der Einsatzumgebung in konvexe, sich nicht schneidende Zellen und die zugehörigen begrenzenden Wandsegmente.

4.4.2 Platzierungskriterien

Auf Grundlage der Einteilung der Einsatzumgebung in Zellen Z_i können nun folgende Kriterien für die Platzierung von Landmarken definiert werden:

Überdeckungskriterium

Zur Lokalisation muß die Einsatzumgebung des Roboters mit einer ausreichenden Anzahl von Landmarken ausgestattet sein. Dies wird erreicht, indem die Landmarken so an den Segmenten s_{ij} angebracht werden, daß die zugehörigen Zellen Z_i die Einsatzumgebung vollständig abdecken. Das erste Kriterium für die Platzierung der Landmarken ist daher die Überdeckung der Einsatzumgebung mit Zellen Z_i (Überdeckungskriterium).

Minimierungskriterium

Der Aufwand für die Installation von Landmarken steigt mit der Anzahl der Landmarken. Da die Anzahl von Landmarken in jeder Zelle durch die im folgenden Kapitel definierte Codierung vorgegeben ist, ist es anzustreben, die Anzahl der Zellen zu minimieren (Minimierungskriterium). Dies wird erreicht, indem eine Überdeckung der Einsatzumgebung mit minimaler Anzahl an Zellen Z_i gesucht wird.

Unabhängigkeitskriterium

Für die Lösung des Startup-Problems müssen die sichtbaren Landmarken eine eindeutige Struktur aufweisen. Kann für jede Zelle Z_i eine solche Struktur unabhängig von allen anderen gewählt werden, so ist das Startup-Problem in jeder Zelle eindeutig lösbar (Unabhängigkeitskriterium). Die Anordnung von Landmarken an den zu einer Zelle Z_i zugehörigen Segmenten s_{ij} kann jedoch nur dann unabhängig von allen anderen Zellen erfolgen, wenn in der Zelle Z_i nur Wandsegmente s_{ij} gesehen werden können, d. h. der Schnitt von Wandsegmenten s_{ij} und s_{kl} ist für alle $ij \neq kl$ leer. Im allgemeinen kann jedoch für eine Einsatzumgebung keine solche Überdeckung mit Zellen Z_i gefunden werden. Es ist daher mit Ausnahme spezieller Fälle unvermeidbar, daß es Wandsegmente gibt, die in mehreren Zellen sichtbar sind. Für diese Wandsegmente entsteht das Problem, daß dort angebrachte Landmarken für mehrere Zellen sichtbar sind. Die Lösung des Korrespondenzproblems wird dadurch erschwert. Durch die Verwendung einer festen Anzahl von Landmarken in jeder Zelle kann das Korrespondenzproblem jedoch auch dann im allgemeinen gelöst werden, wenn nur Teilmengen sichtbarer Landmarken betrachtet werden.

4.4.3 Codierung

Die Menge der Zellen Z_i definiert eine Menge von Segmenten s_{ik} , die für die Platzierung der Landmarken verwendet werden. Um eine eindeutige Lösung des Startup-Problems zu gewährleisten, wird für jede Zelle Z_i die Platzierung der Landmarken an den zugehörigen Segmenten s_{ij} so gestaltet, daß sich eine eindeutige „Codierung“ C_i für diese Zelle ergibt. Die Codierung C_i einer Zelle ist wie folgt definiert:

Definition: Eine Codierung C_i ist eine Folge von Landmarken LM_{ik} und deren Positionen in der Einsatzumgebung, die bezüglich der zugehörigen Zelle Z_i eindeutig von allen anderen Codierungen C_j mit $j \neq i$ unterschieden werden kann.

Die Konstruktion von Codierungen in dieser Arbeit basiert auf einem erweiterten, neuen Ansatz mit „Landmarkenclustern“.¹ Landmarkencluster sind zweidimensionale Anordnungen von Landmarken in der Ebene.² Solche Strukturen können Landmarken-Paare als „Strecke“, Landmarken-Tripel als „Dreieck“ oder n-elementige Landmarkenfolgen als „Polygon“ sein. Abbildung 4.13 zeigt einige Beispiele für solche Landmarkencluster.

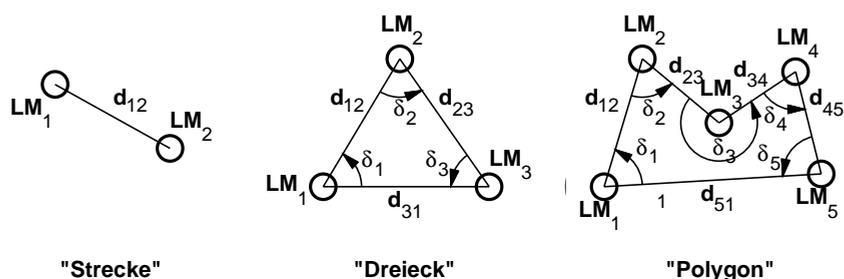


Abbildung 4.13: Beispiele für Landmarkencluster.

¹ Atiya [Atiya 95] und Karch [Karch 98] verwenden einfache Dreiecke bzw. Sternpolygone als Landmarkencluster, die durch die Struktur der Einsatzumgebung gegeben sind. Der Ansatz in dieser Arbeit geht durch die Verallgemeinerung auf definierbare Clusterformen darüber hinaus und setzt dies nutzbringend für die Lösung des Startup-Problems ein, wie in Kapitel 4.4.8 gezeigt wird.

² Bei der Lokalisation in 3D ergeben sich räumliche Anordnungen von Landmarken.

Ein Landmarkencluster (LMC) wird durch eine Folge von Abständen $d_{i,i+1}$ zwischen je zwei Landmarken LM_i , LM_{i+1} und Winkeln $\alpha_{i-1,i,i+1}$ zwischen je drei Landmarken LM_{i-1} , LM_i und LM_{i+1} bestimmt. Die Definition für ein Landmarkencluster in dieser Arbeit ist:

Definition: Ein Landmarkencluster LMC_i wird durch eine Folge von Abständen $d_{i,j,j+1}$ zwischen zwei aufeinanderfolgenden Landmarken $LM_{i,j}$, $LM_{i,j+1}$ und dem Innenwinkel δ_{ij} (mathematisch positiv) zwischen drei aufeinanderfolgenden Landmarken $LM_{i,j-1}$, $LM_{i,j}$ und $LM_{i,j+1}$ bestimmt.

Formal soll ein Cluster mit N Landmarken der Zelle Z_i wie folgt dargestellt werden:

$$LMC_i^N = \langle d_{i,1,2}, \delta_{i1}, \dots, d_{i,N-1,1}, \delta_{iN} \rangle$$

Da die zu codierenden Zellen Z_i konvex sind, können Landmarkencluster als konvexe Polygone dargestellt werden, die im folgenden als Identifikationspolygone bezeichnet werden. Abbildung 4.14 zeigt ein Beispiel einer Codierung einer quadratischen Zelle mit $N=6$ Landmarken an den Wandsegmenten. Daraus ergibt sich folgender Landmarkencluster:

$$LMC^{N=6} = \langle d_{12}, \delta_1, d_{23}, \delta_2, d_{34}, \delta_3, d_{45}, \delta_4, d_{56}, \delta_5, d_{61} \rangle$$

Für jede Zelle Z_i muß eine Codierung C_i gefunden werden, die sich von allen anderen Codierungen eindeutig unterscheidet und die sich durch Messen der Abstände und Winkel von Landmarken rekonstruieren läßt. Zur Berechnung einer Codierung eignen sich invariante Eigenschaften des Landmarkenclusters am besten. Dies können sein (siehe auch Abbildung 4.14):

- Abstände ρ_{ij} der Landmarken von der Roboterposition
- die gemessenen Winkel α_i der Landmarken von einer Position aus
- die Innenwinkel δ_i an den Landmarken des Clusters
- die Landmarkenabstände d_{ij} des Clusters

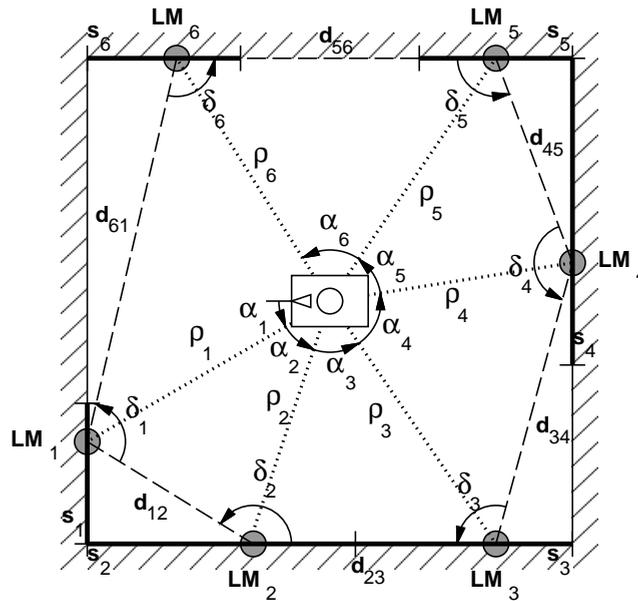


Abbildung 4.14: Codierung einer quadratischen Zelle mit $N=6$ Landmarken LM_i an den Wandsegmenten s_i (dicke Linien) mit den sich ergebenden Winkeln α_i , δ_i und Abständen ρ_{ij} und d_{ij} .

Für Berechnung einer Codierung müssen Codeworte gleicher Länge M gefunden werden, die für die Optimierung zusätzlich normiert werden müssen. Da die Abstände ρ_{ij} der Landmarken und die gemessenen Winkel α_i von der Roboterposition abhängig sind, eignen sich diese Eigenschaften nur bedingt für die Berechnung einer Codierung.¹ Die Innenwinkel δ_i und die Landmarkenabstände d_{ij} können unabhängig von der Roboterposition ermittelt werden, so daß diese Eigenschaften für die Berechnung einer Codierung besser geeignet sind. Für die Innenwinkel δ_i gilt nach [Zwillinger 96]:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i = (N-2)\pi \quad (\text{GL 4.10})$$

unabhängig von der Raumgröße. Für die Berechnung einer Codierung wird dies zur Normierung verwendet, so daß gilt:

¹ Für die Identifikation einer Zelle ist ihre Größe ein eindeutiges Merkmal, wenn vorausgesetzt werden kann, daß alle Zellen eine unterschiedliche Größe besitzen und diese vom Roboter detektiert werden können. Im allgemeinen gilt dies jedoch nicht, beispielsweise bei gleichartigen Büroräumen.

$$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{(N-2)\pi} = 1$$

Die Codierung C_i für eine Zelle Z_i läßt sich unter diesen Voraussetzungen durch ein Codewort \mathbf{c}_m eines (N,M) -Codes C wie folgt darstellen:¹

$$\begin{aligned} C &= \{\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_M\} \\ \mathbf{c}_m &= (c_{1m}, \dots, c_{Nm}) \\ c_{nm} &= \frac{\delta_{nm}}{(N-2)\pi} \in \mathbb{R}_{>0} \end{aligned} \quad (\text{GL 4.11})$$

wobei δ_{nm} die Innenwinkel an den Landmarken LM_{nm} des Landmarkenclusters LMC_m^N , N die Anzahl der Landmarken und M die Anzahl der Zellen sind. Die Codesymbole c_{nm} sind über den Term $(N-2)\pi$ normiert (siehe Gleichung GL 4.10).

Die Suche nach möglichst verschiedenen Codierungen C_i ist äquivalent zu der Aufgabe, den Abstand der Codeworte \mathbf{c}_{m_1} und \mathbf{c}_{m_2} bezüglich einer Abstandsnorm zu maximieren:

$$\max \|\mathbf{c}_{m_1} - \mathbf{c}_{m_2}\|_2 \quad (\text{GL 4.12})$$

Dabei sind folgende Restriktionen zu berücksichtigen:

$$\forall \delta_{nm}: \delta_{nm} \in [\underline{\delta}, \bar{\delta}] \subseteq (0, \pi] \quad (\text{R1})$$

$$\forall LM_{nm}: LM_{nm} = p_{nm} + \lambda_{nm} v_{nm} \text{ mit } 0 \leq \lambda_{nm} \leq 1 \quad (\text{R2})$$

$$\forall LM_{nm_1}, LM_{nm_2}: \|LM_{nm_1} - LM_{nm_2}\|_2 \geq d_{\min} \quad (\text{R3})$$

Die Bedingungen fordern, daß die Winkel δ_{nm} in einem gegebenen Intervall enthalten sind und nicht entartet sein dürfen (0 oder größer 180° , Restriktion R1), die Landmarken sich an Wandsegmenten befinden müssen (Geradengleichung, Restriktion R2) und der Abstand zweier Landmarken einen vorgegebenen Mindestabstand d_{\min} nicht unterschreiten darf (Restriktion R3). Mit der Restriktion 1 wird gefordert, daß nur konvexe Identifikationspoly-

¹ Die Notation für Codes und Codeworte ist der Codierungstheorie entnommen. Ein (N,M) -Code bezeichnet eine Codierung mit M Codeworten der Länge N .

gone berechnet werden dürfen, mit der Restriktion 2 wird die Struktur der Einsatzumgebung berücksichtigt, beispielsweise Türen und Fenster, an denen keine Landmarken plaziert werden dürfen. Die Restriktion 3 stellt sicher, daß die Landmarken so plaziert werden, daß sie mit den eingesetzten Sensorsystemen noch unterschieden werden können.

Die Maximierung des Abstands von M Codeworten \mathbf{c}_m bezüglich einer Abstandsnorm ist ein klassisches Optimierungsproblem aus der Codierungstheorie [MacWilliams 77]. Für die Konstruktion der Codierungen C_i lassen sich damit Verfahren und Ergebnisse aus der Codierungstheorie anwenden. Die Codeworte \mathbf{c}_m können als Punkte auf einem N -dimensionalen Hyperkörper betrachtet werden. Die Suche nach verschiedenen Codeworten entspricht dann dem Verschieben der Punkte auf der Oberfläche des Hyperkörpers, so daß der Abstand der Punkte maximal wird. Für die Codeworte aus Gleichung GL 4.11 ergibt sich ein N -dimensionaler Hyperpolyeder. Bei der Verschiebung der Punkte müssen die Begrenzungen an den Kanten des Hyperpolyeders berücksichtigt werden. Die Umsetzung eines Algorithmus zur Berechnung der Verschiebungen wird dadurch komplex. Durch eine Abwandlung der Codewortkonstruktion in Gleichung GL 4.11 kann die Berechnung auf die Verschiebung von Punkten an der Oberfläche einer Hyperkugel vereinfacht werden. Die Berechnungsvorschrift eines Codesymbols c_{nm} ergibt sich zu:

$$c_{nm} = \sqrt{\frac{\delta_{nm}}{(N-2)\pi}} \in \mathbb{R}_{>0} \quad (\text{GL 4.13})$$

Es gilt:

$$\sum_{i=1}^n c_{nm}^2 = 1$$

Unter diesen Voraussetzungen entspricht die Maximierung der Abstandsnorm (Gleichung GL 4.12) der M Codeworte der Lösung des Kugelpackungsproblems, d. h. der dichtesten Anordnung von M Hyperkugeln mit maximalem Radius auf der Oberfläche einer Einheitshyperkugel in \mathbb{R}^N ([Flores 60], [Sloane 96], [Melissen 97], [Sloane 98], [Conway 99], [Stewart 99]). Abbildung 4.15 zeigt ein Beispiel für eine Kugelpackung mit $M=8$ Kugeln auf der Einheitskugel in $\mathbb{R}_{>0}^3$ (Kreisscheiben) und euklidischer Abstandsnorm für 8 gleiche Zellen. Die Kugeln haben einen minimalen Abstand von 0.1725. Dies entspricht einem minimalen Winkelunterschied der Codeworte von $\delta_{\min} = 5.35^\circ$. Der Abstand von den Sei-

tenflächen (siehe eingezeichnetes Kugeldreieck in Abbildung 4.15) beträgt mindestens 0.2357. Dies entspricht einem minimalen Winkel $\delta_{\min} = 10.0^\circ$. Abbildung 4.16 zeigt die sich daraus ergebenden Codierungen der 8 Zellen.

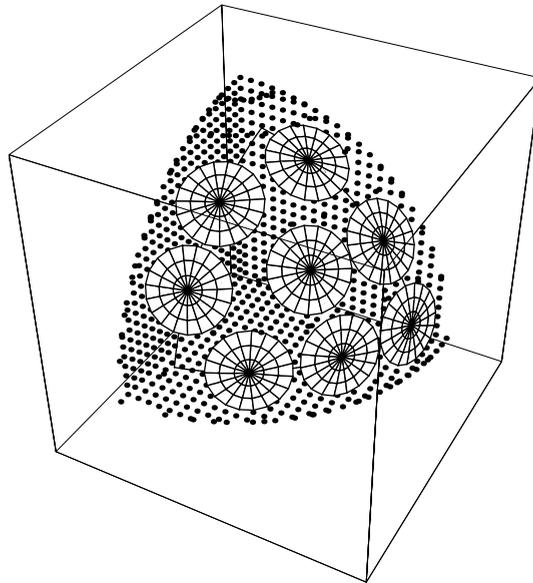


Abbildung 4.15: Darstellung einer Kugelpackung mit $M=8$ Kugeln auf der Oberfläche der Einheitskugel im positiven Bereich von \mathbb{R}^3 (dargestellt sind die Schnittflächen). Die Punkte markieren den zulässigen Bereich der Kugelpositionen auf der Einheitskugel. Die Kugeln haben einen minimalen Abstand von 0.1725 ($\delta_{\min}=5.35^\circ$).

In \mathbb{R}^N gibt es optimale Anordnungen von Hyperkugeln als Simplex, für die einige Lösungen bekannt sind ([MacWilliams 77], [Song 94]). Für die Codierung der Zellen können jedoch nur Winkel $\delta_{nm} \in [\underline{\delta}, \bar{\delta}] \subseteq (0, \pi)$ auftreten, so daß Simplex-Codes nicht direkt anwendbar sind, da in Simplex-Codes beliebige reelle Werte auftreten können. Zusätzlich schränken Randbedingungen, wie Fenster oder Türen, die Auswahl eines Codes weiter ein. Durch den Einsatz zweier unterschiedlicher Landmarken kann durch den Landmarkentyp jedem Innenwinkel δ_{nm} zusätzlich ein Vorzeichen zugeordnet werden, so daß sich der zur Verfügung stehende Raum für die Berechnung der Codeworte beträchtlich vergrößern läßt. Die zusätzlichen Randbedingungen (siehe R1, R2 und R3) erlauben jedoch den direkten Einsatz von Simplex-Codes auch bei unterschiedlichen Landmarkentypen im allgemeinen nicht. Abbildung 4.17 zeigt eine Kugelpackung von $M=8$ Kugeln auf der Einheitskugel in ganz \mathbb{R}^3 und Abbildung 4.18 die sich daraus ergebenden Codierungen für die gleichen Zel-

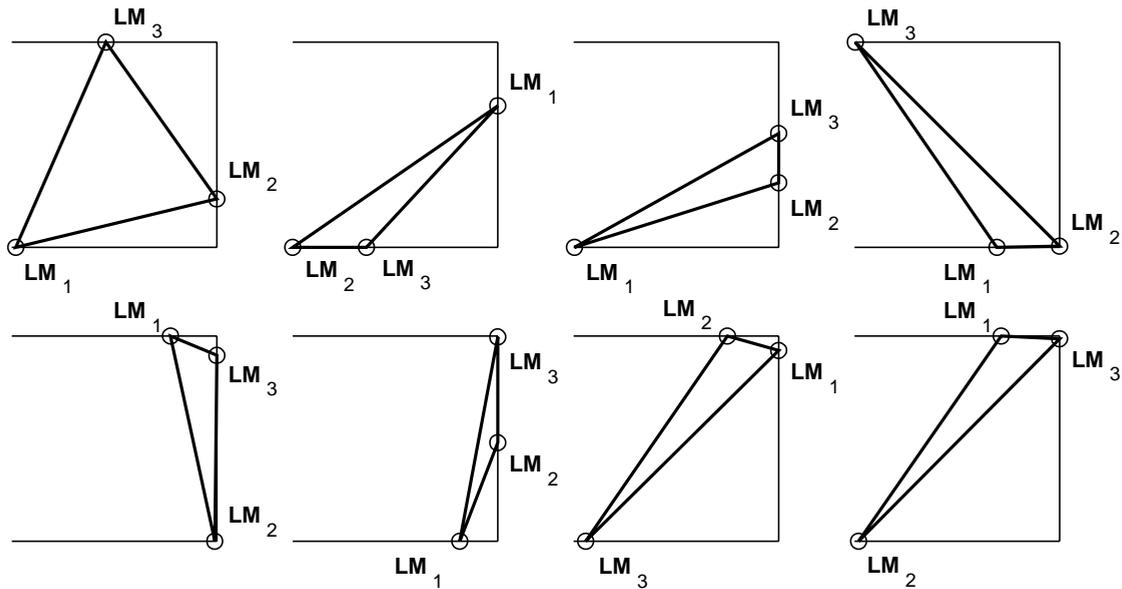


Abbildung 4.16: Beispiel für die Codierung von $M=8$ Zellen mit je $N=3$ Landmarken (weiße Kreise).

len wie in Abbildung 4.15 und Abbildung 4.16. Durch den Einsatz zweier verschiedener künstlicher Landmarken vergrößert sich der minimale Abstand der Kugeln auf 0.4784 . Dies entspricht einem minimalen Winkelunterschied der Codeworte von $\delta_{\min} = 41.20^\circ$. Im Vergleich zu $\delta_{\min} = 5.35^\circ$ bei der Verwendung nur eines Landmarkentyps ist dies eine deutliche Verbesserung der Unterscheidbarkeit verschiedener Codeworte.

Außer den Beschränkungen für die Winkel δ_{nm} muß zusätzlich bei der Auswahl einer Codierung berücksichtigt werden, daß es keine ausgezeichneten Landmarken gibt. Die Landmarke LM_{nm} , die den Anfang eines Codeworts \mathbf{c}_m darstellt, kann in einer Folge von gemessenen Landmarken LM_{1m}, \dots, LM_{Nm} nicht unmittelbar bestimmt werden. Die Werte c_{nm} des Codeworts \mathbf{c}_m können beliebig „rotiert“ sein, d. h. die Codeworte:

$$\mathbf{c}_m = (c_{R(1)m}, \dots, c_{R(N)m}) \text{ mit } R(i) = i + c, c \in \mathbb{N}_0^1 \quad (\text{GL 4.14})$$

¹ Für die Landmarkenindizes ist die Modulo-Rechnung anzuwenden.

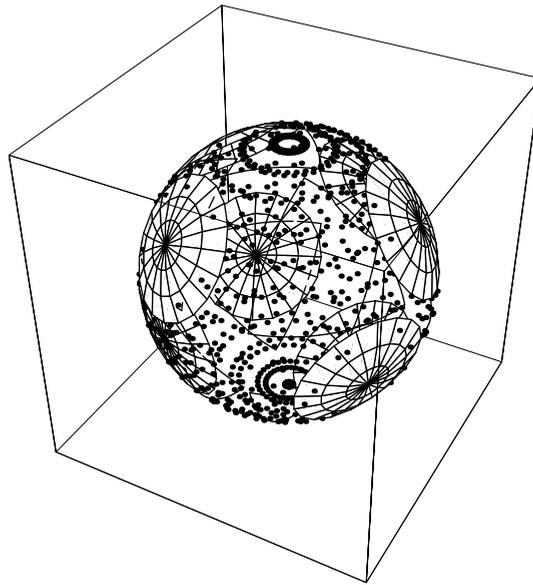


Abbildung 4.17: Darstellung einer Kugelpackung mit $M=8$ Kugeln auf der Oberfläche der Einheitskugel in ganz \mathbb{R}^3 (dargestellt sind die Schnittflächen). Die Punkte markieren den zulässigen Bereich der Kugelpositionen auf der Einheitskugel. Die Kugeln haben einen minimalen Abstand von 0.4784 ($\delta=41.2^\circ$).

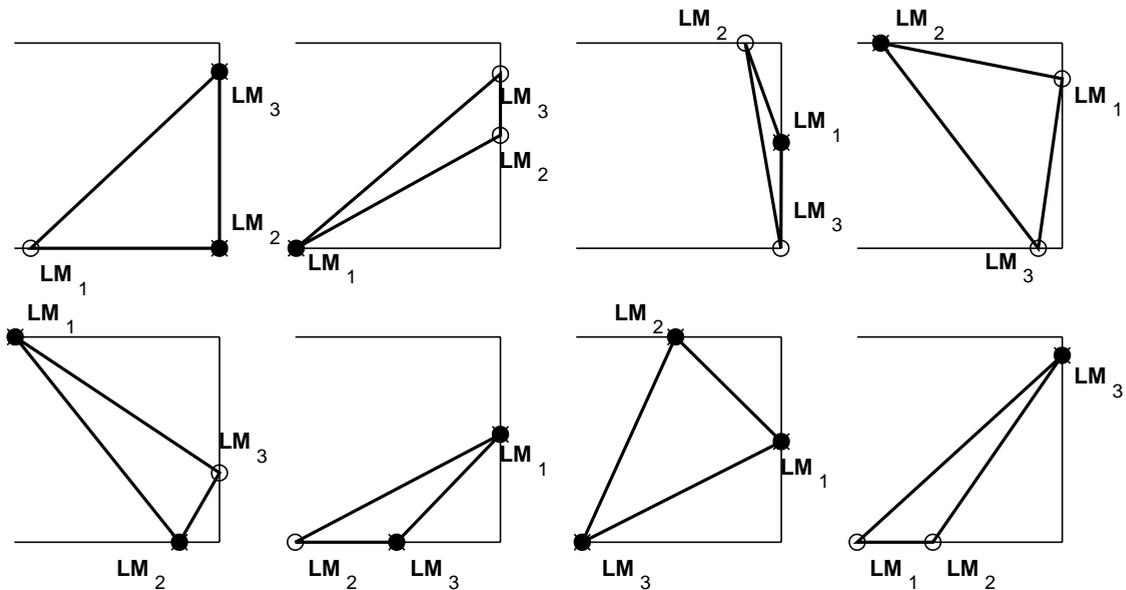


Abbildung 4.18: Beispiel für die Codierung von $M=8$ Zellen mit je $N=3$ Landmarken und zwei verschiedenen Landmarkenarten (weiße und schwarze Kreise).

ergeben sich aus demselben Landmarkencluster. Daher sind alle Codeworte äquivalent, die durch Rotation der Winkelindizes entstehen. Abbildung 4.19 zeigt ein Beispiel für zwei äquivalente Codierungen mit $N=3$ Landmarken.

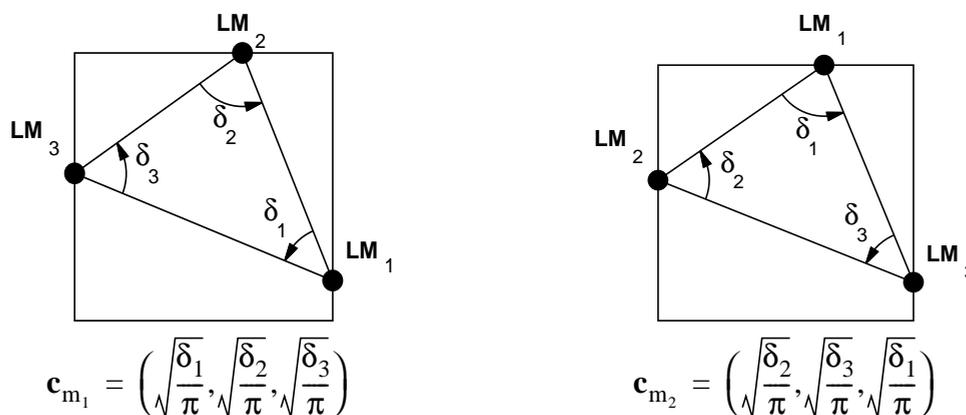


Abbildung 4.19: Äquivalente Codierungen durch Rotation der Winkelindizes.

4.4.4 Platzierung von Landmarken

Ist der Code C berechnet, kann die konkrete Platzierung der Landmarken in den Zellen Z_i bestimmt werden. Die Werte für die Innenwinkel δ_{nm} berechnen sich aus:

$$\delta_{nm} = c_{nm}^2 (N - 2) \pi$$

Werden unterschiedliche künstliche Landmarken eingesetzt, so ergibt sich der Landmarkentyp T aus dem Vorzeichen von c_{nm} :

$$T = \begin{cases} \text{Typ1} & c_{nm} \geq 0 \\ \text{Typ2} & c_{nm} < 0 \end{cases}$$

Die Winkel δ_{nm} legen lediglich die „Form“ des Landmarkenclusters in der Zelle Z_n fest, nicht jedoch die konkreten Positionen der Landmarken LM_{nm} an den Wandsegmenten. In einem weiteren Schritt müssen passende Landmarkencluster unter der Berücksichtigung der in Kapitel 4.4.3 genannten Restriktionen bestimmt werden. Von Ausnahmen abgesehen gibt es keine eindeutig bestimmten Lösungen für das Einpassen der Landmarkencluster in die gegebenen Raumstrukturen. Insbesondere sind auch Clusterformen nicht ausgeschlossen,

bei denen die einzelnen Landmarken nur geringe Abstände aufweisen oder sehr kleine Cluster entstehen. An die Konstruktion der Landmarkencluster und die Platzierung der Landmarken wird folgende Anforderung gestellt:

$$\forall i,j: \max \|LM_i - LM_j\|_2$$

d. h., der Abstand aller Landmarken soll maximiert werden. Unter den möglichen Landmarkenclustern werden diejenigen ausgewählt, die diese Anforderung optimal erfüllen.

4.4.5 Decodierung

Für die Identifikation und die Lösung des Korrespondenzproblems muß der in einem Landmarkencluster enthaltene Code wieder decodiert werden. Die Decodierung erfolgt in umgekehrter Weise wie die Codierung. Die Winkel α'_i , Abstände $\rho'_{i,j}$ und der Typ $S'(LM_{Typ})$ der von der aktuellen Roboterposition aus sichtbaren Landmarken LM'_i werden gemessen (vgl. Abbildung 4.14). Aus diesen Daten wird die Struktur des Landmarkenclusters rekonstruiert und ein Codewort \mathbf{c}'_m aus den Winkeln zwischen drei aufeinanderfolgenden Landmarken und den Landmarkentypen bestimmt (Kosinussatz, siehe auch Abbildung 4.20):¹

$$LM'_i = \begin{bmatrix} \cos(\alpha'_i) \rho'_i \\ \sin(\alpha'_i) \rho'_i \end{bmatrix}$$

$$d'_{i,j} = \|LM'_i, LM'_j\|_2$$

$$\delta'_i = \arccos\left(\frac{d'^2_{i,i+1} + d'^2_{i-1,i} - d'^2_{i-1,i+1}}{2d'_{i,i+1} d'_{i-1,i}}\right)$$

$$\mathbf{c}'_m = (c'_{1m}, \dots, c'_{Nm})$$

$$c'_{nm} = S'(LM_{Typ}) \cdot \sqrt{\frac{\delta'_n}{(N-2)\pi}}$$

$$S'(LM_{Typ}) = \begin{cases} 1 & [LM_{Typ} = Typ1] \\ -1 & [LM_{Typ} = Typ2] \end{cases}$$

¹ Für die Landmarkenindizes ist die Modulo-Rechnung anzuwenden.

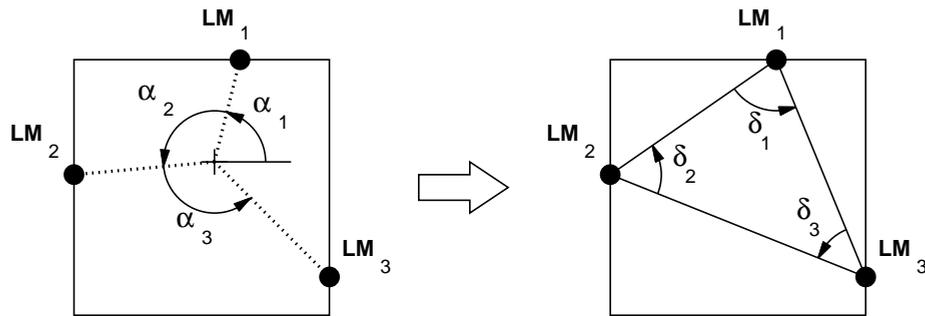


Abbildung 4.20: Rekonstruktion eines Landmarkenclusters mit drei Landmarken: Messung von Landmarken (links) und rekonstruiertem Cluster (rechts).

Aufgrund von Meßfehlern bei der Bestimmung der Winkel und Abstände einzelner Landmarken und Fehlmessungen durch Verdeckungen von Landmarken oder der Detektion unbekannter Landmarken entspricht das Codewort \mathbf{c}'_m im allgemeinen keinem gültigen Codewort \mathbf{c}_m , $m = 1, \dots, M$. Da es keine ausgezeichneten Landmarken gibt (siehe GL 4.14), müssen alle Codeworte $\mathbf{c}_m = (c_{R(1)m}, \dots, c_{R(N)m})$, die durch Rotationen der c_{nm} mit $R(i) = i + c, c \in [0, m - 1]^1$ entstehen, betrachtet werden. Die Auswahl eines gültigen Codeworts \mathbf{c}_m zu den aus Meßwerten bestimmten Codeworten \mathbf{c}'_m erfolgt durch Berechnen des nächstliegenden gültigen Codeworts bezüglich des euklidischen Abstands:

$$\min_{1 \leq j \leq M} \|\mathbf{c}'_m - \mathbf{c}_j\|_2$$

4.4.6 Fehlererkennung und Fehlerkorrektur

Bei der Erfassung von Landmarken mit den Sensorsystemen des Roboters kann nicht ausgeschlossen werden, daß Fehlmessungen zustandekommen: einerseits durch Landmarken, die wegen Verdeckungen oder Störungen nicht erkannt werden (engl. „false negative landmark“) oder durch Detektionen von Landmarken, die nicht in der Karte verzeichnet sind (engl. „false positive landmark“, [Atiya 93]).

Durch den Einsatz einer eindeutigen Codierung zur Platzierung künstlicher Landmarken in einer Zelle mit Codierungen, deren Abstand maximal ist, werden die Voraussetzungen für die Fehlererkennung und Fehlerkorrektur geschaffen.

¹ Für die Landmarkenindizes ist die Modulo-Rechnung anzuwenden.

Die Ähnlichkeit zweier Codeworte \mathbf{c}_{m_1} , \mathbf{c}_{m_2} wird durch deren Hammingabstand h bestimmt. Der Hammingabstand h ist für Codeworte gleicher Länge definiert und gibt die Anzahl der Stellen an, in denen sich zwei Codeworte unterscheiden [MacWilliams 77]. Der minimale Hammingabstand h_{\min} aller Codeworte (Hammingzahl) legt die Möglichkeiten der Fehlererkennung und Fehlerkorrektur fest. Positionierungsfehler in den Landmarken resultieren in einer Winkelabweichung, während verdeckte Landmarken zu fehlenden Winkelwerten und unbekannte Landmarken zu zusätzlichen Werten führen. Falls die Anzahl gemessener Landmarken N' der erwarteten Anzahl N entspricht ($N' = N$), realisiert die Zuordnung des detektierten Codeworts \mathbf{c}'_m zum nächstliegenden gültigen Codewort $\mathbf{c}_m \in C$ die für den gewählten Code optimale Fehlerkorrektur. Falls $N' \neq N$ gilt, ist zu ermitteln, welche Landmarken nicht detektiert wurden ($N' < N$) bzw. welche Landmarken unbekannt sind ($N' > N$). Werden zu wenig Landmarken detektiert ($N' < N$), werden sukzessive Landmarken aus gültigen Codeworten ergänzt und das nächstliegende Codewort bestimmt. Werden zuviel Landmarken detektiert ($N' > N$), werden Teilmengen von Landmarken betrachtet und das nächstliegende Codewort der Teilmenge mit kleinstem Fehler bestimmt.

4.4.7 Lösung des Korrespondenzproblems

Die Lösung des Korrespondenzproblems (siehe Kapitel 3.4.3) ist ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit. Zur Lösung des Korrespondenzproblems müssen die aus den Sensordaten extrahierten Landmarken $LM_i^{\text{real}} \in \mathbf{LM}^{\text{real}}$ bekannten Landmarken $LM_j^{\text{map}} \in \mathbf{LM}^{\text{map}}$ einer Karte zugeordnet werden. Da in dieser Arbeit gleichartige künstliche und natürliche Landmarken verwendet werden, können die Landmarken nicht unterschieden und direkt den Landmarken in der Karte zugeordnet werden. Die in Kapitel 4.4.3 vorgestellte Codierung von Zellen mit Landmarkenclustern erlaubt es jedoch, eine Zelle eindeutig zu identifizieren. Die Lösung des Korrespondenzproblems wird dadurch auf die Aufgabe reduziert, eine Korrespondenzfunktion $K(i)$ zu finden, die gemessene Landmarken $LM_i^{\text{real}} \in \mathbf{LM}^{\text{real}}$ den Landmarken $LM_j^{\text{LMC}} \in \mathbf{LM}^{\text{LMC}}$ des identifizierten Clusters zuordnet. Die konvexe Struktur der Landmarkencluster stellt sicher, daß die Landmarken eines Clusters bezüglich der Winkel, unter denen sie innerhalb der zugehörigen Zelle zu sehen sind, sortiert sind. Es sind daher nur die Korrespondenzfunktionen zu untersuchen, die eine „Rotation“ der Landmarken LM_i^{real} bezüglich LM_j^{LMC} darstellen. Dabei müssen aufgrund von Fehlmessungen

nicht alle Landmarken zugeordnet werden können. Aus der Menge der möglichen Korrespondenzfunktionen wird diejenige ausgewählt, die den quadratischen Abstandsfehler der Landmarken minimiert:

$$\min_{K(i)} \sum \left\| \text{LM}_i^{\text{real}} - \text{LM}_{K(i)}^{\text{LMC}} \right\|_2^2$$

Die Anzahl möglicher Korrespondenzfunktionen ist beschränkt und berechenbar und kann daher auf einem Rechner implementiert werden.

4.4.8 Lösung des Startup-Problems

Für die Bestimmung der Roboterlage nach dem Systemstart oder dem Wiederanlaufen nach einem Systemfehler ist die Lösung des Korrespondenzproblems ohne a priori Wissen bezüglich der Roboterlage (Startup-Problem) eine zentrale Fragestellung. In der Literatur wird das Startup-Problem kaum betrachtet, wie in Kapitel 3.4.4 dargestellt wurde. Für eine konkrete Lösung des Startup-Problems wird das Verfahren zur Lösung des Korrespondenzproblems daher so erweitert, daß das Startup-Problem unter realen Bedingungen gelöst werden kann.

Sollen für die Lokalisation nur nicht-codierte künstliche oder natürliche Landmarken verwendet werden, weil codierte Landmarken ein aufwendigeres Sensorsystem erfordern und die Fehlerkorrekturmöglichkeiten bei Verdeckungen erheblich einschränken, so ist ohne eine Startlage die Zuordnung von gemessenen Landmarken zu Landmarken in der Karte nicht in jedem Fall eindeutig möglich. Darüber hinaus können natürliche Landmarken nicht genutzt werden, da sich diese nicht sinnvoll codieren lassen. Die in dieser Arbeit verwendeten Codierungen für konvexe Bereiche der Einsatzumgebung (Zellen) können für die Lösung des Startup-Problems ohne spezielle Landmarken, beispielsweise codierte Landmarken, und ohne Lokalisationsfahrten verwendet werden. Dafür entscheidend ist die eindeutige Lösung des Korrespondenzproblems ohne Vorwissen bezüglich Position und Orientierung des Roboters. Eine eindeutige Lösung des Korrespondenzproblems kann dann gefunden werden, wenn sichergestellt ist, daß die Landmarkenpositionen an jedem vom Roboter erreichbaren Punkt der Einsatzumgebung eindeutig sind. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Messungen von Landmarken einerseits Unsicherheiten aufweisen und

andererseits ein Teil der Landmarken verdeckt sein kann.¹ Der Ansatz mit der eindeutigen Codierung von Zellen durch Landmarkencluster kann dies leisten. Die Lösung des Startup-Problems stützt sich auf zwei Teillösungen:

- An jedem Punkt der Einsatzumgebung, den der Roboter erreichen kann, wird die Korrespondenzfunktion $K(i)$ berechnet.
- Es kann festgestellt werden, ob die Korrespondenzfunktion $K(i)$ eine eindeutige Zuordnung berechnet.

Eine Korrespondenzfunktion $K(i)$ kann immer dann berechnet werden, wenn unter Berücksichtigung von Fehlmessungen die Codierung \mathbf{c}_m der Zelle Z_m noch decodierbar ist. Die Eindeutigkeit kann erreicht werden, wenn nur solche Codierungen \mathbf{c}_m zugelassen werden, die bezüglich der Rotation eindeutig bleiben, d. h., für keine zwei Codierungen $\mathbf{c}_{m_i} = (c_{1m_i}, \dots, c_{Nm_i})$ und $\mathbf{c}_{m_j} = (c_{1m_j}, \dots, c_{Nm_j})$ mit $i \neq j$ gibt es eine Funktion der Form:

$$R(i) = i + c, c \in \mathbb{N}_1^2$$

so, daß gilt:

$$\forall k: \delta_{ik} = \delta_{jR(k)}$$

Bei der Auswahl von Codierungen muß dies zusätzlich zu den in Kapitel 4.4.3 genannten Restriktionen berücksichtigt werden.

¹ Für die Berechnung der relativen Roboterlage aus Abständen und Winkeln zu Landmarken müssen mindestens zwei Landmarken sichtbar sein. Für eine eindeutige Lösung des Startup-Problems bei teilweise verdeckten Landmarken sind jedoch mehr Landmarken erforderlich.

² Für die Landmarkenindizes ist die Modulo-Rechnung anzuwenden.

4.5 Lokalisation in 3D

Für die Erweiterung der in den vorherigen Kapiteln dargestellten Ansätze zur Lokalisation in 3D auf die sechs Freiheitsgrade $[x \ y \ z \ \Theta \ \Phi \ \Psi]^T$ kann ein Laserscanner eingesetzt werden, der zu Landmarken den Abstand und sowohl den Richtungs- als auch den Höhenwinkel erfassen kann. Die Darstellung einer Folge von Landmarken erweitert sich dann zu (vergleiche Kapitel 4.3.1):

$$LM_i = \langle [\alpha_i \ \beta_i \ d_i \ x_i \ y_i \ z_i \ s_i]^T | i \in [1 \dots n] \rangle$$

wobei α_i, β_i, d_i die relative Position der Landmarke LM_i zur Sensorposition in Polarkoordinaten in 3D (Richtungs- und Höhenwinkel, Abstand) und x_i, y_i, z_i die relative Position der Landmarke LM_i in kartesischen Koordinaten in 3D zur Sensorposition ist. Die kartesischen Koordinaten ergeben sich durch eine einfache Transformation:

$$\begin{aligned} x_i &= \cos(\alpha_i) \sin(\beta_i) d_i \\ y_i &= \sin(\alpha_i) \sin(\beta_i) d_i \\ z_i &= \cos(\beta_i) d_i \end{aligned}$$

Die Suche nach Landmarkenclustern und die Platzierung der Landmarken werden dann auf die drei Dimensionen $[x, y, z]^T$ erweitert. Ein Landmarkencluster in 3D ist definiert durch:

$$LMC_i^n = \langle d_{i,1,2}, \delta_{i1}, \zeta_{i1}, \dots, d_{i,n-1,1}, \delta_{in}, \zeta_{in} \rangle$$

mit Richtungswinkel δ_{ik} und Höhenwinkel ζ_{ik} zwischen je drei Landmarken. Für jeden Cluster können zwei Codierungen angegeben werden, mit denen die Roboterposition $[x, y, z]^T$ und die Roboterorientierung $[\Theta, \Phi, \Psi]^T$ berechnet werden können:

$$\begin{aligned} C_a &= \{c_{a,1}, \dots, c_{a,M}\} & c_{a,m} &= (c_{a,1m}, \dots, c_{a,Nm}) & c_{a,nm} &= \sqrt{\frac{\delta_{nm}}{(N-2)\pi}} \in \mathbb{R} \\ C_b &= \{c_{b,1}, \dots, c_{b,M}\} & c_{b,m} &= (c_{b,1m}, \dots, c_{b,Nm}) & c_{b,nm} &= \sqrt{\frac{\zeta_{nm}}{(N-2)\pi}} \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

Der vorgestellte Ansatz zur Berechnung der Codierungen und der Lokalisation wird dann in analoger Weise verwendet.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden ein neues Konzept und die Ansätze zur Lokalisation mobiler Roboter vorgestellt. Als Basis für die Lokalisation dienen gleichartige künstliche und natürliche Landmarken. Es wurde ein Rechenverfahren angegeben, das die Position und Orientierung des Roboters anhand von Winkeln und Abständen zu Landmarken bei einer gegebenen Korrespondenzfunktion (Landmarkenzuordnung) berechnet. Neben der relativen und absoluten Lokalisation sind die Lösung des Korrespondenzproblems und des Startup-Problems sowie die Entwicklung eines Verfahrens für die optimierte Platzierung künstlicher Landmarken die Kernpunkte dieser Arbeit. Der Einsatz von Codierungen mit Landmarkenclustern auf Basis von optimalen Codes und die Anwendung von Techniken aus der Codierungstheorie stellen einen neuen Ansatz für diese Problemstellungen dar. Es wird damit einerseits die Zuverlässigkeit bei der Lösung des Korrespondenzproblems erhöht, indem Fehlzugeordnungen von Landmarken durch den Einsatz von fehlererkennenden und fehlerkorrigierenden Codes reduziert werden. Andererseits bilden unterscheidbare und eindeutig identifizierbare Landmarkencluster die Voraussetzung für eine eineindeutige Lösung des Startup-Problems.

Es wurde ein Ansatz vorgestellt, wie zusätzliche künstliche Landmarken in der Einsatzumgebung so platziert werden können, daß die Lokalisation an jeder Stelle der Einsatzumgebung eindeutig ist. Der Ansatz unterteilt die Einsatzumgebung in konvexe Bereiche bezüglich Wandsegmente und berechnet für diese eine Codierung mit künstlichen Landmarken. Natürliche Landmarken können zusätzlich verwendet werden. Ein Optimierungsverfahren wählt die sich maximal unterscheidenden Codierungen aus, so daß die Roboterlage ohne a priori Wissen bezüglich Position oder Orientierung vollständig statisch bestimmbar ist (Lösung des Startup-Problems). Der Einsatz von Verfahren zur Fehlererkennung und Fehlerkorrektur aus der Codierungstheorie ermöglicht die Lösung des Korrespondenzproblems auch bei Meßfehlern und Fehldetektionen. Ein Ausblick auf die Anwendung der vorgestellten Ansätze für die Lokalisation in 3D schließt dieses Kapitel ab.

5. Systemaufbau

Die in Kapitel 4 vorgestellten Ansätze wurden auf einem realen Robotersystem implementiert und evaluiert. In diesem Kapitel wird das verwendete System beschrieben und die wichtigsten eingesetzten Algorithmen zu den in Kapitel 4 skizzierten Verfahren vorgestellt.

5.1 Der mobile Roboter *James*

Die Entwicklung und Evaluierung der Algorithmen für die in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren erfolgt mit dem mobilen Roboter *James* (siehe Abbildung 5.1).



Abbildung 5.1: Der mobile Roboter *James* des FZI.

Der Roboter *James* ist ein vollständig autonomes, mobiles System, das für den Einsatz in Bürouräumen und in öffentlichen Gebäuden konzipiert ist. Es dient als Experimentierplattform zur Entwicklung und Test von Sensorsystemen und Algorithmen zur Navigation autonomer mobiler Roboter. Neben Antriebssystemen, Energieversorgung und Rechneinheiten besitzt der Roboter mehrere Sensorsysteme zur Navigation und zur Hinderniserkennung:

- 24 Ultraschallsensoren, die in einer Höhe von ca. 30 cm ringförmig um den Roboter angeordnet sind
- je ein abstandsmessender Laserscanner an der Vorder- und Rückseite zur Erfassung natürlicher Landmarken und Hindernisse
- ein weiterer Laserscanner oben auf dem Roboter zur Erfassung künstlicher Landmarken
- ein Kamerasystem zur Objekterkennung und -verfolgung

Die Steuerung und die Sensordatenverarbeitung erfolgen vollständig auf mehreren, zusammengeschalteten VME-Bus-Rechnern (*MC68040/25MHz* und *PPC750/300MHz*) „onboard“ auf dem Roboter. Über einen zusätzlichen Panel-PC mit Touchscreen-Eingabe an der Roboterrückseite können dem Roboter Befehle erteilt und Ergebnisse abgelesen werden. Zusätzlich besitzt der Roboter für die Ausgabe von Zuständen und Ereignissen ein Synthesystem für natürliche Sprache. Außerdem ist der Roboter mit einem Funk-Modem zur Kommunikation mit der Außenwelt ausgestattet. Alle Steuer- und Sensordatenauswertungsprogramme laufen unter dem Echtzeitbetriebssystem *VxWorks* [VxWorks 97] auf dem Roboter. Der Panel-PC mit der Benutzungsschnittstelle arbeitet mit dem Betriebssystem *Linux*. Die Programmentwicklung erfolgt „offboard“ auf Standard-Unix-Rechnern oder PCs. Die fertigen Programmteile werden dann über das Funkmodem beim Systemstart von der Zentralstation oder lokal von der in den Panel-PC eingebauten Festplatte geladen.

Für die Erfassung von Landmarken stehen zwei unterschiedliche Laserscanner als Sensoren zur Verfügung:¹

¹ Der Einsatz zweier unterschiedlicher Laserscanner kann durch Verwendung eines Laserscanners, der künstliche Landmarken und natürliche Objekte erfassen und unterscheiden kann, vermieden werden. Eine neuentwickelte Version des SICK LMS wird dies ermöglichen.

- Zwei abstands- und winkelmessende Laserscanner SICK LMS290 zur Erfassung natürlicher Landmarken [SICK 95]: Diese Laserscanner erfassen den relativen Abstand und die Richtung zum nächsten Objekt (natürliche Landmarke) in der Umgebung in einer Ebene parallel zur Bewegungsebene (x-y-Ebene). Die Abstandsmessung erfolgt auf Basis der Puls-Laufzeitmessung. Derartige Laserscanner werden bereits heute vielfach als berührungsloses Bumpersystem auf mobilen Robotern und FTS eingesetzt [Schürmann 94]. Als Bumpersystem ist der LMS in Bodennähe in einer Höhe von ca. *10 cm* angebracht. Es ist je ein Laserscanner vorne und hinten am Roboter montiert (siehe Abbildung 5.2). Der Winkelbereich der Laserscanner umfaßt je 180° bei einer Winkelauflösung von 0.5° . Der maximale Meßbereich beträgt ca. *50 m*. Die Genauigkeit der Abstandsmessung wird mit $\pm 16 \text{ mm}$ angegeben [SICK 95]. An das Onboard-Rechnersystem wird der Laserscanner über eine RS422-Schnittstelle mit einer Datentransfer-Rate von *500 kBit/s* angekoppelt.
- Ein abstands- und winkelmessender RoboSense-Laserscanner [SIMAN 96] zur Erfassung künstlicher Landmarken: Dieser Laserscanner erfaßt Reflektorstreifen als künstliche Landmarken in einer Ebene parallel zur Bewegungsebene (x-y-Ebene). Der Laserscanner ist auf einer Vorrichtung in ca. *2 m* Höhe montiert (siehe Abbildung 5.2), um Verdeckungen von Landmarken durch Personen oder bewegliche Objekte im Raum zu reduzieren. Dadurch kann der Laserscanner in den meisten Fällen ungehindert die Landmarken in der Einsatzumgebung erfassen.¹ Der Winkelmeßbereich zu reflektierenden künstlichen Landmarken beträgt 360° , der maximale Abstand bei den eingesetzten Landmarken ca. *10 m*. Die Genauigkeit der Winkelmessung wird vom Hersteller mit 0.17° angegeben, die der Abstandsmessung mit *25 mm* [SIMAN 96]. Dieser Laserscanner ist über eine RS232-Schnittstelle mit *9600 Bit/s* an das Onboard-Rechnersystem angeschlossen.

¹Das bisher auf dem Roboter eingesetzte System zur Bestimmung der Roboterlage auf Basis künstlicher Landmarken konnte Verdeckungen von Landmarken nur sehr begrenzt tolerieren. Indem der Laserscanner an einer günstigen Position auf dem Roboter montiert wurde, sollen Verdeckungen daher möglichst vermieden werden.

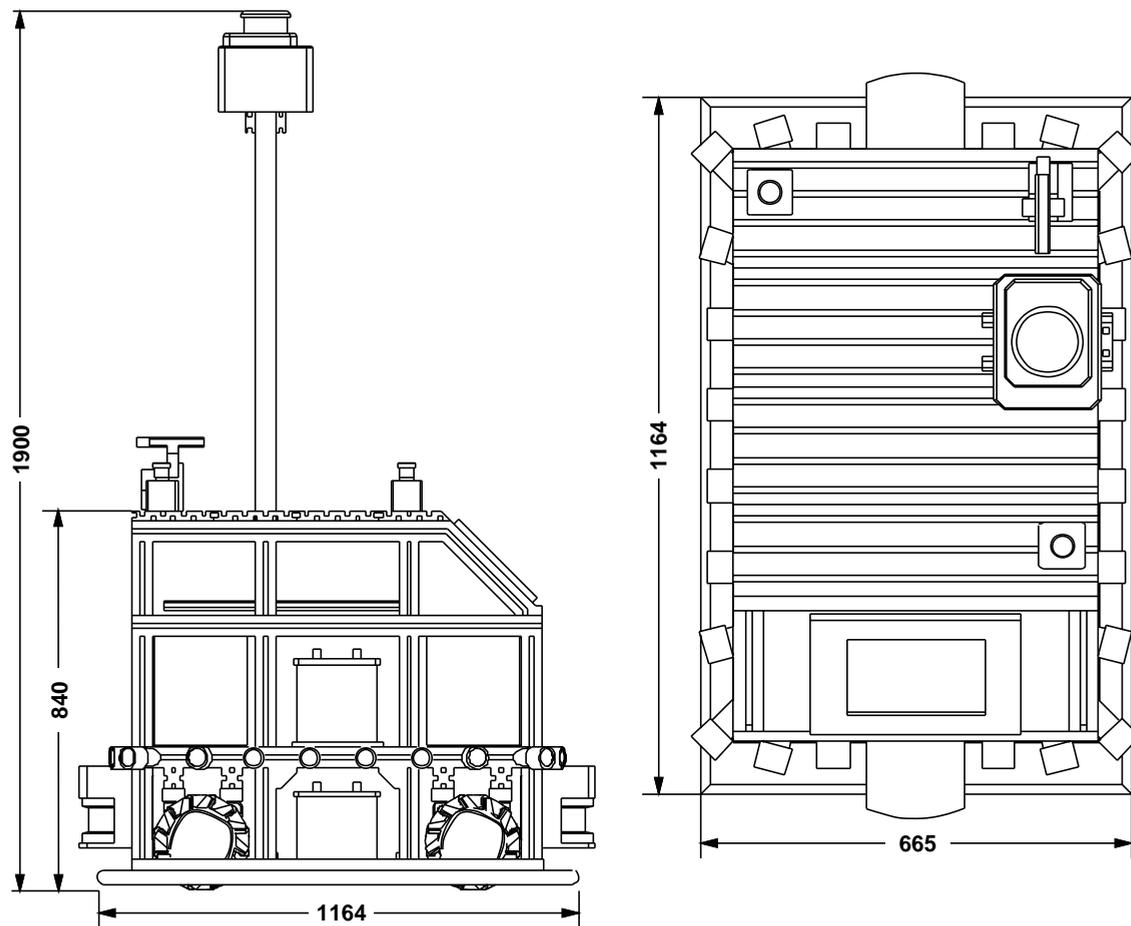


Abbildung 5.2: Aufrißzeichnungen des mobilen Roboters *James*.

5.2 Detektion und Extraktion von Landmarken

Die künstlichen Landmarken können mit dem winkel- und abstandsmessenden RoboSense-Laserscanner oben auf dem Roboter direkt erfaßt werden. Der Scanner liefert fortlaufend zu allen sichtbaren Landmarken die Polarkoordinaten (Richtungswinkel und Abstand). Als künstliche Landmarken wurden Reflektorstreifen verwendet, die auf halbrunde Profile der Größe $200 \times 50 \text{ mm}$ aufgebracht wurden. Die Unterscheidung zweier unterschiedlicher Landmarkentypen erfolgt durch einfache Landmarken und Doppelmarken wie in Abbildung 5.3 gezeigt. In einem Vorverarbeitungsschritt bei der Landmarkendetektion werden Doppelmarken aus je zwei einfachen Landmarken extrahiert.

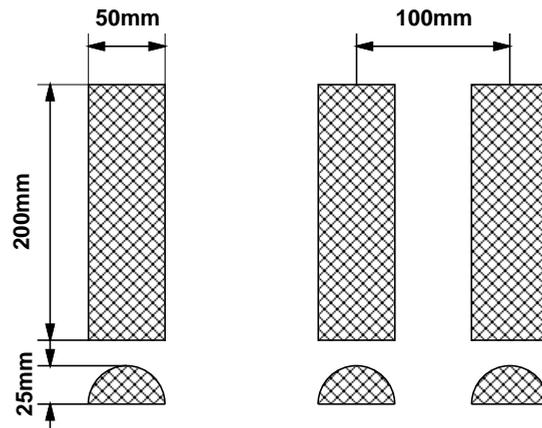


Abbildung 5.3: Landmarkentypen: einfache Landmarken (Typ 1, links) und Doppelmarken (Typ 2, rechts), bestehend aus Reflektorstreifen, aufgebracht auf ein Halbprofil.

Als natürliche Landmarken werden in dieser Arbeit Ecken verwendet. Diese lassen sich mit hoher Zuverlässigkeit mit den abstandsmessenden Laserscannern SICK LMS290 erfassen. Bei einer Datenübertragungsrate von 500 kBit/s steht alle 40 ms ein neues Abstandsbild der Umgebung in einem Bereich von 180° zur Verfügung.

Detektion und Extraktion von natürlichen Landmarken in den Laserscanner-Abstandsdaten erfolgen in drei Schritten:

1. Einlesen eines Datensatzes (Scan) vom Laserscanner
2. Detektion von geraden Liniensegmenten
3. Extraktion von Ecken

Die Detektion gerader Liniensegmente erfolgt mit einem leistungsfähigen Liniensegmentierungsalgorithmus, der Liniensegmente, die durch Wände, Türen oder andere senkrechte Objekte mit planen Oberflächen im Sichtbereich des Laserscanners gebildet werden, auch bei starkem Rauschen mit hoher Zuverlässigkeit erkennt. Der Liniendetektionsalgorithmus basiert auf den in [Arras 97], [Arras 96] und [Rupp 98] entwickelten und erprobten Verfahren. Das Verfahrensprinzip soll hier kurz zusammengefaßt werden:

Der Laserscanner liefert eine geordnete Folge von Meßpunkten p_i in Polarkoordinaten:

$$\langle p_i | p_i = [\delta_i, \alpha_i]^T, i \in 1, \dots, n \rangle$$

Durch jeweils m benachbarte Punkte $p_{i-\lfloor m/2 \rfloor}, \dots, p_i, \dots, p_{i+\lfloor m/2 \rfloor}$ wird eine Gerade im Sinne kleinster Fehlerquadrate gelegt [Duda 73] und in die Hessesche Normalform überführt (GL 5.1):

$$\begin{aligned} x_i &= \cos(\delta_i) d_i \\ y_i &= \sin(\delta_i) d_i \end{aligned}$$

$$x_i \cos(\alpha) + y_i \sin(\alpha) - r = 0 \quad (\text{GL 5.1})$$

Punkte, die auf einer Geraden liegen, nehmen bei dieser Darstellung gleiche Werte für α und r an. Mit einem Clusteringverfahren können daher alle Punkte gefunden werden, die annähernd auf Geraden liegen ([Späth 83], [Hartigan 75]). Die Ordnung in der Folge von Meßpunkten bestimmt zusammenhängende Geradenstücke. Durch iteratives Zusammenfassen von Geradenstücken und Neuberechnen einer Gerade mit der Eigenvektor-Methode¹ können effizient maximal große Geradensegmente in den Laserscannerdaten detektiert werden [Duda 73]:

Die Berechnung einer mittleren Geraden durch n Punkte $p_i = [x_i, y_i]^T$ mit der Eigenvektor-Methode erfolgt durch Verschieben der Punkte in den Schwerpunkt M (GL 5.2) und Berechnen des größten Eigenwerts λ_{\max} von Gleichung GL 5.3:

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{i,x} \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_{i,y} \end{bmatrix} \\ p'_i &= p_i - M \end{aligned} \quad (\text{GL 5.2})$$

¹ Die Eigenvektor-Methode berechnet eine Gerade mit kleinsten Fehlerquadraten.

$$S = \sum_{i=1}^n p'_i \cdot p'^T_i = \begin{bmatrix} \sum x_i x_i & \sum x_i y_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i y_i \end{bmatrix}$$

$$\min_N d(N)^2 = N \cdot S \cdot N^T \quad (\text{GL 5.3})$$

$$\det(S - \lambda E) = \begin{vmatrix} \sum x_i x_i - \lambda & \sum x_i y_i \\ \sum y_i x_i & \sum y_i y_i - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

Die Gerade $g(\mu)$ mit kleinsten Fehlerquadraten berechnet sich mit λ_{\max} :

$$g(\mu) = \begin{cases} M + \mu \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{\sum x_i - \lambda_{\max}}{\sum x_i y_i} \end{bmatrix} & \text{falls } \sum x_i y_i \neq 0 \\ M + \mu \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{GL 5.4})$$

Ein Liniensegment l ergibt sich aus der Geraden $g(\mu)$, indem der erste und letzte Meßpunkt der für die Berechnung verwendeten Meßpunkte auf die Gerade projiziert werden (siehe Abbildung 5.4).

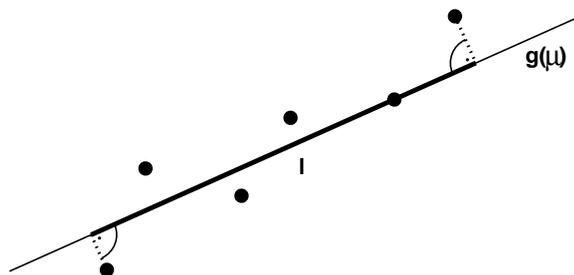


Abbildung 5.4: Berechnung des Liniensegments l zur Geraden $g(\mu)$.

Sind die Liniensegmente detektiert, können die Landmarken extrahiert werden. Da zur Extraktion keine aufwendige Objekterkennung eingesetzt werden soll – dies würde die Verarbeitung der vom Laserscanner gelieferten Daten in Echtzeit erschweren – werden durch

einfache Heuristiken Ecken als Landmarken extrahiert. Zur Extraktion der Landmarken werden alle aufeinanderfolgenden Liniensegmente l_i und l_{i+1} auf folgende Eigenschaften überprüft (siehe auch Abbildung 5.5):

- Orientierung: Es werden nur solche Liniensegmentpaare als Landmarken akzeptiert, die einen genügend großen Orientierungsunterschied aufweisen (Winkel zwischen Segmenten)
- Abstand: Der euklidische Abstand zwischen den Liniensegmenten darf einen vorgegebenen konstanten Wert nicht überschreiten
- Länge: Die Liniensegmente dürfen eine vorgegebene minimale Länge nicht unterschreiten

Erfüllt ein Liniensegmentpaar (l_i, l_{i+1}) diese Eigenschaften, wird im Schnittpunkt der zugehörigen Geraden eine Ecke v_i als Landmarke LM_i detektiert.

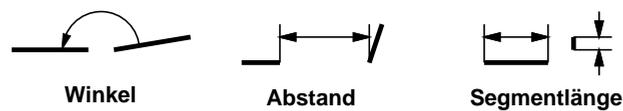


Abbildung 5.5: Heuristiken zur Eckenextraktion aus Liniensegmenten.

Abbildung 5.6 zeigt einen Datensatz des Laserscanners in kartesischen Koordinaten (links) und die detektierten Liniensegmente und extrahierten Landmarken (rechts).

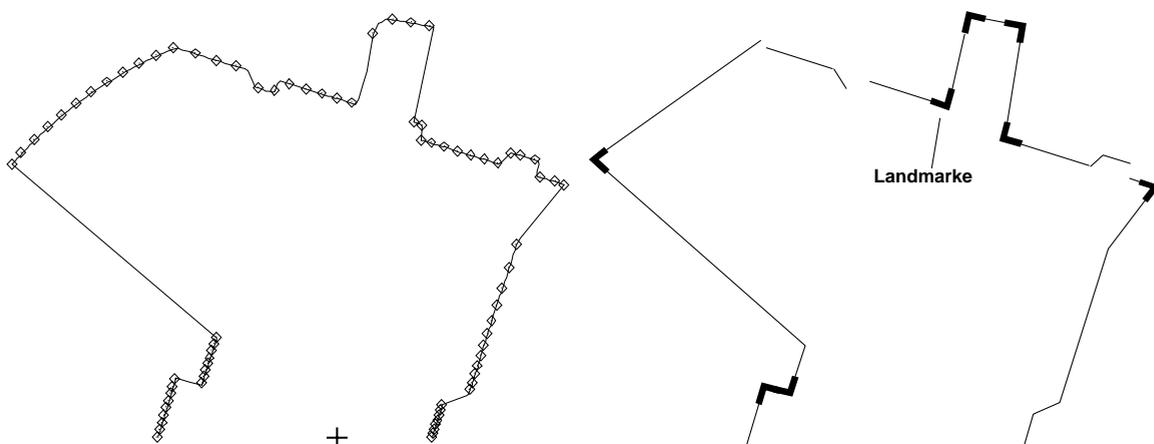


Abbildung 5.6: Detektion von natürlichen Landmarken: Scan (links) und extrahierte Liniensegmente und Landmarken (rechts).

5.3 Algorithmen zur Lokalisation

5.3.1 Relative Lokalisation

Ausgehend von den Landmarken $LM_i^{t+1} \in \mathbf{LM}^{\text{real}}$ der aktuellen Messung und den Landmarken $LM_i^t \in \mathbf{LM}^t$ der vorhergehenden Messung erfolgt die relative Lokalisation des Roboters mit dem in Kapitel 4.3.3 skizzierten Verfahren. Die Odometrie liefert einen Schätzwert $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta \theta]^T$ für die relative Roboterbewegung zwischen den Messungen zum Zeitpunkt t und $t+1$, der für die Berechnung der Voraussage der Landmarken \hat{LM}_i^{t+1} verwendet wird. Aus der Voraussage werden die Landmarken mit kleinstem euklidischen Abstand als korrespondierende Landmarken ermittelt. Nachdem die neue Roboterlage bestimmt ist, wird die Menge \mathbf{LM}^t in die Menge \mathbf{LM}^{t+1} überführt, indem nicht mehr sichtbare Landmarken entfernt und neue Landmarken hinzugefügt werden.¹ Der Algorithmus für die relative Lokalisation gestaltet sich wie folgt:

1. $\mathbf{LM}^t = \emptyset$

2. Wiederhole:

- 2.1 Die Voraussage der Landmarkenpositionen \hat{LM}_i^{t+1} wird mit allen LM_i^t und

der Roboterbewegung $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta \theta]^T$ berechnet:

$$\hat{LM}_i^{t+1} = \begin{bmatrix} -\Delta x \\ -\Delta y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(-\Delta \theta) & -\sin(-\Delta \theta) \\ \sin(-\Delta \theta) & \cos(-\Delta \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} LM_{i,x}^t \\ LM_{i,y}^t \end{bmatrix} \quad LM_i^t \in \mathbf{LM}^t$$

- 2.2 Berechne die Korrespondenzfunktion:

$$K(i) = \begin{cases} j & \text{falls} \quad \min_j \|LM_i^{t+1} - \hat{LM}_j^{t+1}\| \leq s_{\max} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad LM_i^{t+1} \in \mathbf{LM}^{\text{real}}$$

¹ Das Entfernen oder Hinzufügen von Landmarken erfolgt über einen zeitlichen Filter, so daß kurzzeitig verdeckte Landmarken und Fehlmessungen keinen Einfluß auf das Ergebnis haben.

2.3 Berechne die Roboterlage $\hat{\rho}_{t+1}^{\text{FKS}}$ mit dem in Kapitel 4.3.2 in den Gleichungen GL 4.1, GL 4.2 und GL 4.8 beschriebenen Verfahren.

2.4 Entferne nicht mehr sichtbare Landmarken und füge neue Landmarken hinzu:

$$\mathbf{LM}^{t+1} = \mathbf{LM}^t \setminus \{LM_i^t \mid LM_i^t \text{ nicht mehr sichtbar}\} \cup \{LM_i^t \mid LM_i^t \text{ sichtbar}\}^1$$

5.3.2 Absolute Lokalisation

Für die Berechnung der absoluten Roboterlage $\hat{\rho}_{t+1}^{\text{WKS}}$ werden, ausgehend von der aktuellen Positionsschätzung $\hat{\rho}_t^{\text{WKS}}$, diejenigen Landmarken $LM_j^{\text{map}} \in \mathbf{LM}^{\text{map}}$ in einer Karte ermittelt, die den kleinsten euklidischen Abstand zu den gemessenen Landmarken $LM_i^{\text{real,WKS}} \in \mathbf{LM}^{\text{real}}$ besitzen. Der Algorithmus für die Bestimmung der absoluten Roboterlage gestaltet sich wie folgt:

1. Berechne LM_i^{real} aus der aktuellen Positionsschätzung $\hat{\rho}_t^{\text{WKS}}$, den gemessenen Winkeln $\alpha_{t+1,i}$ und den gemessenen Abständen $d_{t+1,i}$:

$$LM_i^{\text{real}} = \begin{bmatrix} \hat{\rho}_{t,x}^{\text{WKS}} + \cos(\hat{\rho}_{t,\theta}^{\text{WKS}} + \alpha_{t+1,i}) \cdot d_{t+1,i} \\ \hat{\rho}_{t,y}^{\text{WKS}} + \sin(\hat{\rho}_{t,\theta}^{\text{WKS}} + \alpha_{t+1,i}) \cdot d_{t+1,i} \end{bmatrix}$$

2. Berechne die Korrespondenzfunktion:

$$K(i) = \begin{cases} j & \text{falls} \quad \min_j \|LM_i^{\text{real}} - LM_j^{\text{map}}\|_2 \leq s_{\text{max}} \quad LM_j^{\text{map}} \in \mathbf{LM}^{\text{map}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

3. Berechne die Roboterlage $\hat{\rho}_{t+1}^{\text{WKS}}$ mit dem in Kapitel 4.3.2 in den Gleichungen GL 4.1, GL 4.2 und GL 4.8 beschriebenen Verfahren.

5.4 Algorithmus zur Berechnung von Codierungen

Die Plazierung der Landmarken in der Einsatzumgebung basiert auf dem in Kapitel 4.4 vorgestellten Verfahren. Für die Lösung des Korrespondenzproblems wurde in Kapitel 4.4.7 ein Ansatz vorgestellt, der auf der Codierung von Landmarkenclustern beruht. Dazu wird

die Einsatzumgebung in disjunkte, konvexe Zellen unterteilt und für jede Zelle Z_m ein Codewort $\mathbf{c}_m = (c_{1m}, \dots, c_{Nm})$ berechnet (siehe Gleichung GL 4.12 und GL 4.13). Der paarweise euklidische Abstand zwischen den Codeworten muß maximal sein. Das Codewort \mathbf{c}_m gibt die Platzierung von künstlichen Landmarken in der Zelle Z_m vor.

Die Unterteilung der Einsatzumgebung in disjunkte, konvexe Zellen Z_m kann mit einem Scan-Line- oder einem Triangulations-Algorithmus berechnet werden. Es gibt im allgemeinen keine eindeutige Lösung, jedoch genügt es, eine beliebige Unterteilung zu finden, deren Zellenanzahl möglichst klein ist. Abbildung 5.7 zeigt ein Beispiel für die Unterteilung einer Einsatzumgebung in rechteckige Zellen.

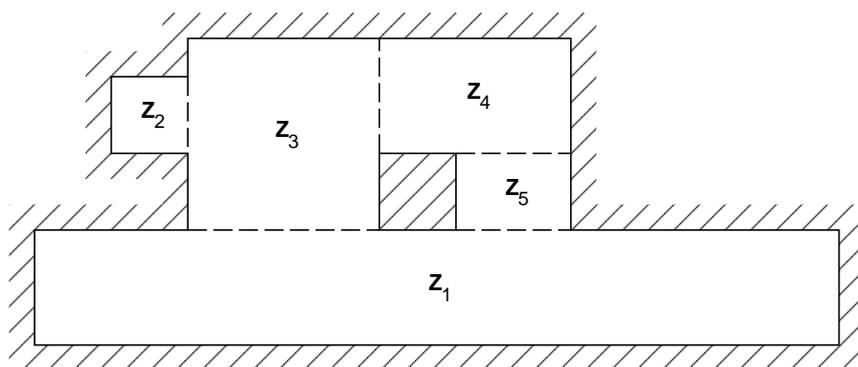


Abbildung 5.7: Unterteilung einer Einsatzumgebung in rechteckige Zellen.

Die Berechnung eines optimalen Codes C ist in der Codierungstheorie als ein schwieriges Problem bekannt [Cover 87].¹ Nur für einige Codelängen sind optimale Codes bekannt ([Sloane 96], [Stewart 99]). Eine allgemeine Lösung ist zur Zeit noch nicht in Sicht. In dieser Arbeit wird die Berechnung eines optimalen Codes durch die in Kapitel 4.4.3 genannten Restriktionen zusätzlich erschwert. Die Berechnung eines global optimalen Codes ist jedoch nicht erforderlich. Eine Näherungslösung ist ausreichend, wenn sich die Codeworte hinreichend unterscheiden. Aus diesen Gründen werden mit einem iterativen Algorithmus, der – ausgehend von einem gültigen, zufälligen Code – einzelne Codeworte entlang eines Vektors $\vec{v} \in \mathbb{R}_{>0}^N$ auf der Oberfläche einer N -dimensionalen Hyperkugel verschiebt, so daß

¹ Beispielsweise konnte die von Johannes Kepler bereits 1611 aufgestellte Vermutung der optimalen Kugelpackung in \mathbb{R}^3 erst vor kurzem bewiesen werden [Hales 98], [Pöppe 99].

der minimale euklidische Abstand d_{\min} der Codeworte \mathbf{c}_m maximiert wird (siehe Gleichung GL 4.12). Der Verschiebevektor für eine Codierung berechnet sich aus der Summe der „Abstoßungskräfte“ aller anderen Codeworte:

$$d_{\min} = \min_{\forall i \neq j} \|\mathbf{c}_{m_i} - \mathbf{c}_{m_j}\|_2$$

$$\hat{\mathbf{v}} = \alpha \cdot \sum_{\forall j \neq i} \frac{\mathbf{c}_{m_i} - \mathbf{c}_{m_j}}{\|\mathbf{c}_{m_i} - \mathbf{c}_{m_j}\|_2^c}$$

wobei $c > 1$ die Abstoßungskraft bestimmt und ein Dämpfungsfaktor $\alpha \ll 1$ dafür sorgt, daß keine Oszillationserscheinungen auftreten.

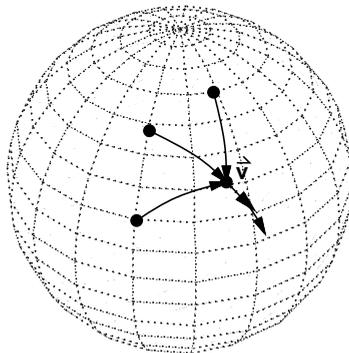


Abbildung 5.8: Verschieben von Codeworten auf der Oberfläche einer N-dimensionalen Hyperkugel (Darstellung mit $N=3$): Der Verschiebevektor $\hat{\mathbf{v}}$ ergibt sich aus den Abstoßungskräften der Nachbarcodeworte (Punkte) und einem Dämpfungsfaktor $\alpha \ll 1$.

Der Algorithmus verschiebt die Codeworte \mathbf{c}_m iterativ, bis sich d_{\min} nicht mehr wesentlich verändert. Da es abhängig von den Startcodierungen auch lokale Optima geben kann, werden mehrere verschiedene, zufällige Startcodierungen untersucht und die Menge von Codierungen mit maximalem Abstand d_{\min} ausgewählt. Der Algorithmus für die Berechnung einer möglichen Codierung gestaltet sich damit wie folgt:

1. Erzeuge eine zufällige, gültige Startcodierung C
2. Wiederhole bis $d_{\min} \approx \text{const.}$:

2.1 Wiederhole für alle i :

2.1.1 Berechne Verschiebevektor $\hat{v}_i = \alpha \cdot \sum_{\forall j \neq i} \frac{\mathbf{c}_{m_i} - \mathbf{c}_{m_j}}{\|\mathbf{c}_{m_i} - \mathbf{c}_{m_j}\|_2^c}$ mit $\alpha \ll 1, c > 1$

2.1.2 Berechne neue Codierung $\mathbf{c}'_{m_i} = \mathbf{c}_{m_i} + \hat{v}_i$

2.2 Prüfe, ob gültige Codierung bezüglich der Restriktion in Kapitel 4.4.3

2.3 Berechne minimalen euklidischen Abstand $d_{\min} = \min_{\forall i \neq j} \|\mathbf{c}'_{m_i} - \mathbf{c}'_{m_j}\|_2$

Ist die Codierung berechnet, so kann anschließend die konkrete Platzierung der künstlichen Landmarken bestimmt werden. Aus den Codeworten \mathbf{c}_m werden die Innenwinkel δ_{m_i} der Identifikationspolygone berechnet. Mit einem weiteren iterativen Algorithmus wird ein Polygon mit den berechneten Innenwinkeln so in die zugehörige Zelle Z_m eingepaßt, daß die Landmarken auf den vordefinierten Wandsegmenten s_{m_j} platziert werden können.

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden das verwendete Robotersystem, die Sensoren sowie die Implementierungen der in Kapitel 4 skizzierten Konzepte beschrieben. Die vorgestellten Implementierungen sind einfach genug, um sie in einem mobilen Serviceroboter mit begrenzter Rechenleistung und Speicherkapazität einsetzen zu können. Für die Praxistauglichkeit des Verfahrens ist dies eine wichtige Voraussetzung.

Zur Erfassung von künstlichen und natürlichen Landmarken werden zwei unterschiedliche Laserscanner eingesetzt. Zu künstlichen Landmarken werden Abstand und Richtung direkt gemessen, natürliche Landmarken werden durch einen leistungsfähigen Liniextraktionsalgorithmus in den Punktdaten des Laserscanners detektiert.

Des weiteren wurden die Algorithmen für die Berechnung der relativen und absoluten Roboterlage und der Codierung von Zellen vorgestellt. Ausgehend von einer graphischen Beschreibung der Einsatzumgebung wurde gezeigt, wie die Einsatzumgebung unterteilt werden kann, damit der in Kapitel 4.4 vorgestellte Ansatz zur Platzierung von künstlichen Landmarken umgesetzt werden kann. Darauf aufbauend wurde der Algorithmus zur Berechnung von Codierungen mit künstlichen Landmarken präsentiert und ein Algorithmus zur Berechnung der konkreten Platzierung der Landmarken vorgestellt.

6. Evaluierung

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ansätze sind mit dem mobilen Roboter *James* in mehreren Einsatzumgebungen evaluiert worden. Die Evaluierung erfolgte in nachgestellten Praxissituationen, wie sie bei Roboteranwendungen im Servicebereich, beispielsweise für Transportdienste in Büroräumen oder für die Besucherführung in Museen und auf Messen auftreten. In diesem Kapitel werden die durchgeführten Experimente und die ermittelten Ergebnisse präsentiert, diskutiert und bewertet.

Die Evaluierung wurde in drei unterschiedlichen Umgebungen in den Institutsräumen und während einer Anwendung des mobilen Roboters *James* bei einer Messe durchgeführt. Dafür wurde jeweils die räumliche Struktur des Instituts bzw. der Einsatzumgebung des Roboters auf der Messe in eine Karte eingetragen und in den Roboter eingelesen. Für die Lokalisation wurden künstliche Landmarken, wie in Kapitel 5.2 beschrieben, und – soweit verfügbar – natürliche Landmarken verwendet. Die Landmarken wurden mit den auf dem Roboter montierten Laserscannern erfaßt und die Meßdaten mit dem auf dem Roboter installierten Rechner verarbeitet. Die Berechnung der Codierungen und der Landmarkenplatzierung erfolgte jeweils in einem Vorverarbeitungsschritt auf einem Desktop-Rechner.

6.1 Evaluierung des Verfahrens zur Berechnung der Roboterlage

6.1.1 Künstliche Landmarken

Für die Evaluierung des Berechnungsverfahrens zur relativen und absoluten Lageschätzung wurden in den Institutsräumen künstliche Landmarken angebracht. Zur Ermittlung der statistischen Fehlerrate des RoboSense-Sensors zur Erfassung künstlicher Landmarken wurden in einem Versuchsaufbau mit einer einzelnen Landmarke die Standardabweichung und der maximale Fehler für den gemessenen Winkel und Abstand bestimmt. Abbildung 6.1 zeigt die ermittelte Häufigkeitsverteilung für 5000 Messungen. Die Standardabweichungen und maximalen Fehler sind in Tabelle 6.1 aufgeführt. Es zeigt sich, daß die Meßwerte nahezu eine Normalverteilung mit Mittelwert 0 besitzen. Der maximale Abstandsfehler ist mit 0.2312 m relativ groß, die 1.96σ -Standardabweichung (95% alle Meßwerte) mit 0.0490 m für die Anwendung in dieser Arbeit jedoch ausreichend.

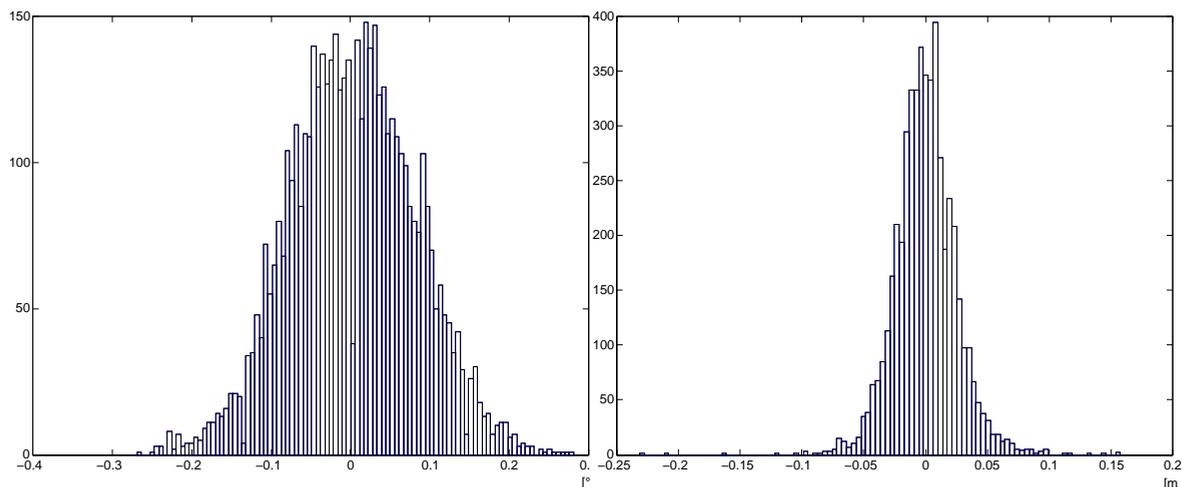


Abbildung 6.1: Häufigkeitsverteilung des Winkelfehlers (links) und des Abstandsfehlers (rechts) für eine einzelne künstliche Landmarke, gemessen mit dem RoboSense-Laserscanner (5000 Messungen).

σ_α	σ_d	$\max \varepsilon_\alpha$	$\max \varepsilon_d$	$1.96\sigma_\alpha$ (95 %)	$1.96\sigma_d$ (95 %)
0.0798°	0.0250 m	0.2777°	0.2312 m	0.1564°	0.0490 m

Tabelle 6.1: Standardabweichung und maximaler Fehler von gemessenem Winkel und Abstand einer einzelnen künstlichen Landmarke gemessen mit dem RoboSense-Laserscanner (5000 Messungen).

Für die Evaluierung des Berechnungsverfahrens der Roboterlage wurden die künstlichen Landmarken noch manuell, ohne den in Kapitel 4.4 beschriebenen Ansatz zur Landmarkenplatzierung platziert. Abbildung 6.2 zeigt den Grundriß der Institutsräume I und die Positionen der an den Wänden befestigten künstlichen Landmarken (kleine Kreise). Der Roboter wurde an mehrere Positionen in den Institutsräumen bewegt (Abbildung 6.2, graue Kreise mit Richtungspfeil) und die Roboterlage mit dem in Kapitel 5.3.2 vorgestellten Verfahren bestimmt (Abbildung 6.2, schwarze Kreise mit Richtungspfeil). Je 1000 Messungen wurden mit dem in Kapitel 4.3.5 beschriebenen mengenbasierten Filter fusioniert. Die Fehlerintervallgröße für eine Lageschätzung wurde dabei mit GL 4.9 berechnet. Für die Berechnung wurde $\Delta\alpha_\varepsilon = 2.58\sigma_\alpha = 0.206^\circ$, $\Delta d_\varepsilon = 2.58\sigma_d = 0.0644\text{ m}$ (dies entspricht einer

Akzeptanz von 99 % aller Meßwerte für die Datenfusion) und $d_{\max} = 10m$ gesetzt. Für die Landmarkenpositionierung wurden die Schätzwerte $\Delta LM_{\epsilon} = 0.10m$ und $\Delta\beta_{\epsilon} = 1.5^{\circ}$ gewählt.¹ Daraus ergab sich folgende Fehlerintervallgröße (siehe Gleichung GL 4.9):

$$[\epsilon_x, \bar{\epsilon}_x] = [\epsilon_y, \bar{\epsilon}_y] = [-0.248m, 0.248m]$$

$$[\epsilon_{\Theta}, \bar{\epsilon}_{\Theta}] = [-1.706^{\circ}, 1.706^{\circ}]$$

Mit dieser Fehlerintervallgröße wurde die Roboterlage ermittelt und mit den manuell vermessenen Werten verglichen. Die maximale Abweichung betrug $\pm 16\text{ cm}/\pm 2.8^{\circ}$ (siehe Tabelle 6.2), wobei der Odometriefehler an den Positionen 1 bis 7 kontinuierlich zunahm.² Wie die Standardabweichung des RoboSense-Sensors erwarten läßt, ergeben sich größere Fehlerintervalle für die Positionsdaten, während die Orientierung des Roboters genauer ermittelt werden kann. Eine weitere Verbesserung der Lageschätzung bis auf die Meßabweichungen des eingesetzten Laserscanners und die Beschränkungen durch die Landmarkengrößen kann durch eine präzisere Vermessung der platzierten künstlichen Landmarken und der erstellten Karte erreicht werden. Die Evaluierung des Berechnungsverfahrens erfolgte mit manuell vermessenen Kartendaten und Landmarkenpositionen.³

6.1.2 Natürliche Landmarken

In einer zweiten Versuchsreihe wurden die Evaluierung der Detektion und die Lokalisation mit natürlichen Landmarken durchgeführt, wie in Kapitel 5.2 und Kapitel 5.3 beschrieben. Die Fehlerrate des SICK-Scanners LMS290 wurde in einer ähnlichen Versuchsanordnung wie beim RoboSense-Scanner mit einer einzelnen natürlichen Landmarke ermittelt. Abbildung 6.3 zeigt die Häufigkeitsverteilungen in x- und y-Richtung. Es sind Gruppierun-

¹ Die künstlichen Landmarken besitzen eine Breite von 50 mm . Der minimale Meßabstand wird mit $d_{\min} = 1.0m$ angenommen. Dies ergibt einen Winkelfehler von $\Delta\beta \approx 1.5^{\circ}$.

² Die eingesetzten MECANUM-Räder besitzen auf weichem oder unebenem Untergrund, wie Teppichboden oder Kacheln, einen großen Schlupf in x- und y-Richtung. Dies führt zu einem erheblichen Fehler in der mit Odometrie ermittelten Roboterlage.

³ Durch die handvermessenen Karten- und Landmarkendaten muß mit größeren Abweichungen zu den tatsächlichen Gegebenheiten gerechnet werden, da sich die Meßfehler akkumulieren.

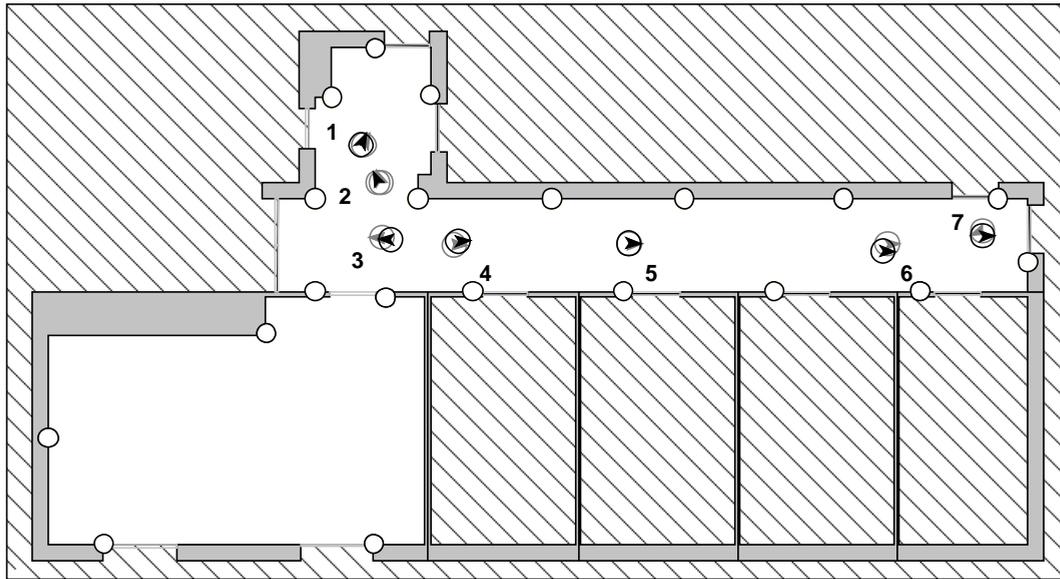


Abbildung 6.2: Grundriß der Institutsräume I: Freiflächen (weiß), Wände, Türen (grau) und künstliche Landmarken (kleine Kreise, vergrößerte Darstellung), Meßpositionen (graue Kreise) und ermittelte Roboterlage (schwarze Kreise mit Richtungspfeil).

	Vermessen			#	Berechnet			Fehlerintervall			Korrekturwert		
	x	y	Θ [m,m,°]		x	y	Θ [m,m,°]	x	y	Θ [m,m,°]	x	y	Θ [m,m,°]
1	5.96	7.52	64.9	1000	5.90	7.52	65.7	0.20	0.21	2.9	-0.06	0.00	0.8
2	6.28	6.82	114.0	1000	6.23	6.81	114.9	0.23	0.22	2.7	-0.04	-0.02	0.9
3	6.30	5.78	179.9	818	6.47	5.74	180.5	0.00	0.04	0.0	0.16	-0.04	0.5
4	7.66	5.64	0.0	666	7.73	5.71	1.0	0.00	0.15	2.4	0.06	0.07	1.0
5	10.96	5.66	0.0	986	10.95	5.67	0.5	0.13	0.19	2.9	0.01	0.01	0.5
6	15.82	5.66	-0.6	522	15.74	5.52	0.8	0.09	0.08	2.6	-0.08	-0.14	1.4
7	17.61	5.91	204.2	940	17.62	5.81	206.9	0.20	0.19	1.5	0.01	-0.10	2.8

Tabelle 6.2: Versuchsergebnisse zur Lokalisation mit künstlichen Landmarken: Vermessene Lage, Anzahl ausgewerteter Messungen (# von 1000), berechnete Lage, Größe des Fehlerintervalls und Korrekturwerte für 7 Meßpositionen.

gen von nahezu normalverteilten Meßwerten zu sehen. Die Gruppierungen entstehen durch die Winkelauflösung des Laserscanners von nur 0.5° .¹ Die ermittelten Standardabweichungen und maximalen Fehler sind in Tabelle 6.3 aufgeführt.

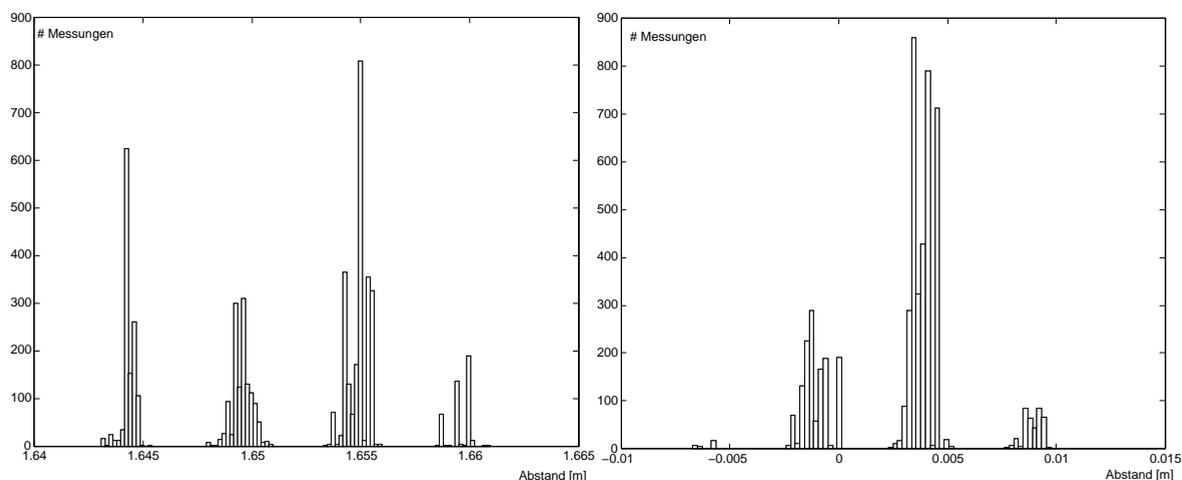


Abbildung 6.3: Häufigkeitsverteilung des x-Abstands (links) und des y-Abstands (rechts) für eine einzelne natürliche Landmarke, gemessen mit dem SICK-Laserscanner LMS290 (5000 Messungen).

σ_x	σ_y	$\max \epsilon_x$	$\max \epsilon_y$	$1.96\sigma_x$ (95 %)	$1.96\sigma_y$ (95 %)
0.0048 m	0.0028 m	0.0095 m	0.0117 m	0.0095 m	0.0055 m

Tabelle 6.3: Standardabweichung und maximaler Fehler von gemessenem Winkel und Abstand einer einzelnen natürlichen Landmarke, gemessen mit dem SICK-Laserscanner LMS290 (5000 Messungen).

Abbildung 6.4 zeigt einen Grundriß der Institutsräume I, die natürlichen Landmarken an Ecken und Türen (dicke Linien) und die Meßpositionen (graue Kreise). Im Vergleich zur Lokalisation mit künstlichen Landmarken ergab die Lokalisation mit natürlichen Landmarken eine kleinere Abweichung zu der handvermessenen Lage (ca. $\pm 6\text{ cm}/\pm 3^\circ$, siehe

¹Die gezeigten Meßwerte sind in einem Versuchsaufbau mit einem relativen Abstand von $(x,y)=(1.65\text{ m},0.0\text{ m})$ zu einer konvexen Ecke als Landmarke ermittelt worden. Die Verschiebung von ca. 0.0055m in y-Richtung entspricht ca. 0.19° , das ist grob die halbe Winkelauflösung des Scanners (0.5°). Die Erfassung des Winkels erfolgt im SICK-Scanner LMS290 in aufeinanderfolgenden Messungen, jeweils um eine halbe Winkelauflösung versetzt, so daß die in Abbildung 6.3 dargestellten Gruppierungen entstehen.

Tabelle 6.4). Dies ist auf die höhere Meßgenauigkeit bei der Abstandsermittlung des eingesetzten SICK-Sensors zurückzuführen. Jedoch zeigte sich, daß an drei der sieben Meßpositionen eine Lokalisation mit natürlichen Landmarken aufgrund fehlender Landmarken in der Umgebung nicht möglich war. An einer Meßposition war die Abweichung zur handvermessenen Lage sehr groß ($27\text{ cm}/6^\circ$, Meßposition 6 in Abbildung 6.4). Zusätzlich ergaben sich weitere Ungenauigkeiten durch die manuell erstellte und idealisierte Karte (geradlinige Wände, rechtwinklige Ecken). Für die Navigation eines mobilen Roboters in den Institutsräumen war die erzielte Genauigkeit jedoch ausreichend. Lediglich an Engstellen, wie Türen, war eine zusätzliche Korrektur der Lage durch eine genauere Vermessung der Umgebungsstruktur, beispielsweise des Türrahmens, erforderlich.

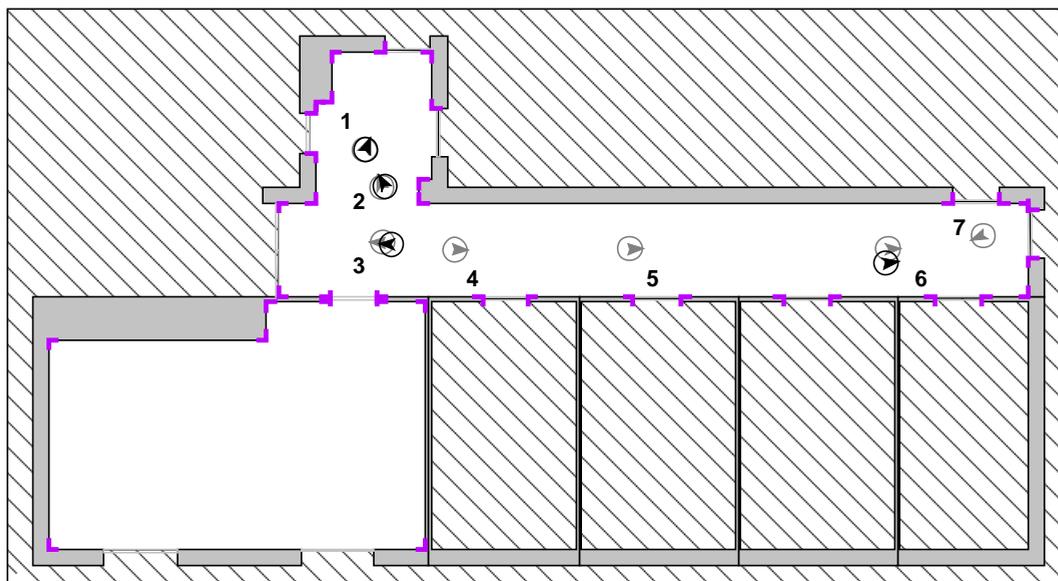


Abbildung 6.4: Grundriß der Institutsräume I: Freiflächen (weiß), Wände, Türen (grau) und natürliche Landmarken (Ecken), Meßpositionen (graue Kreise) und ermittelte Roboterlage (schwarze Kreise mit Richtungspfeil).

	Vermessen			#	Berechnet			Fehlerintervall			Korrekturwert		
	x,y,Θ [m,m,°]				x,y,Θ [m,m,°]			x,y,Θ [m,m,°]			x,y,Θ [m,m,°]		
1	5.96	7.52	64.9	100	5.98	7.52	67.7	0.00	0.00	0.2	0.02	0.00	2.8
2	6.28	6.82	114.0	100	6.34	6.83	117.1	0.00	0.00	0.0	0.06	0.00	3.1
3	6.30	5.78	179.9	99	6.34	5.79	180.9	0.00	0.00	0.4	0.04	0.01	1.0
4	7.66	5.64	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	10.96	5.66	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	15.82	5.66	-0.6	84	15.78	5.39	5.4	0.00	0.00	0.4	-0.04	-0.27	6.0
7	17.61	5.91	204.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 6.4: Versuchsergebnisse zur Lokalisation mit natürlichen Landmarken: Vermessene Lage, Anzahl ausgewerteter Messungen (# von 100), berechnete Lage und Größe des Fehlerintervalls für 7 Meßpositionen.

6.2 Lokalisation mit künstlichen und natürlichen Landmarken

6.2.1 Berechnung einer Codierung

Institutsräume I

Für die Institutsräume I wurden mit dem in Kapitel 4.4 vorgestellten Verfahren unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Räume und Wandsegmente (siehe Abbildung 6.5) mehrere Codierungen berechnet. Für jede Zelle wurden Codierungen mit dem in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Algorithmus berechnet und die künstlichen Landmarken nach diesen Codierungen in den Zellen plaziert. Da Landmarken nicht an Fenstern, Türöffnungen und durch Mobiliar belegte Wandsegmente plaziert werden können, stand nur ein Teil der Wandsegmente für die Platzierung von Landmarken zur Verfügung (siehe dicke Linien in Abbildung 6.5). Abbildung 6.6 zeigt die verwendete Einteilung der Einsatzumgebung in $M=4$ konvexe Zellen. Bei der Berechnung der Zellcodierungen wurde dies durch Restriktionen berücksichtigt, so daß nur Platzierungen von Landmarken berechnet wurden,

die zu den zur Verfügung stehenden Wandsegmenten passen. Abbildung 6.7 und Abbildung 6.8 zeigen die aus den berechneten Codierungen abgeleiteten Anordnungen künstlicher Landmarken (Identifikationspolygone) mit $N \in \{3,4\}$ Landmarken.

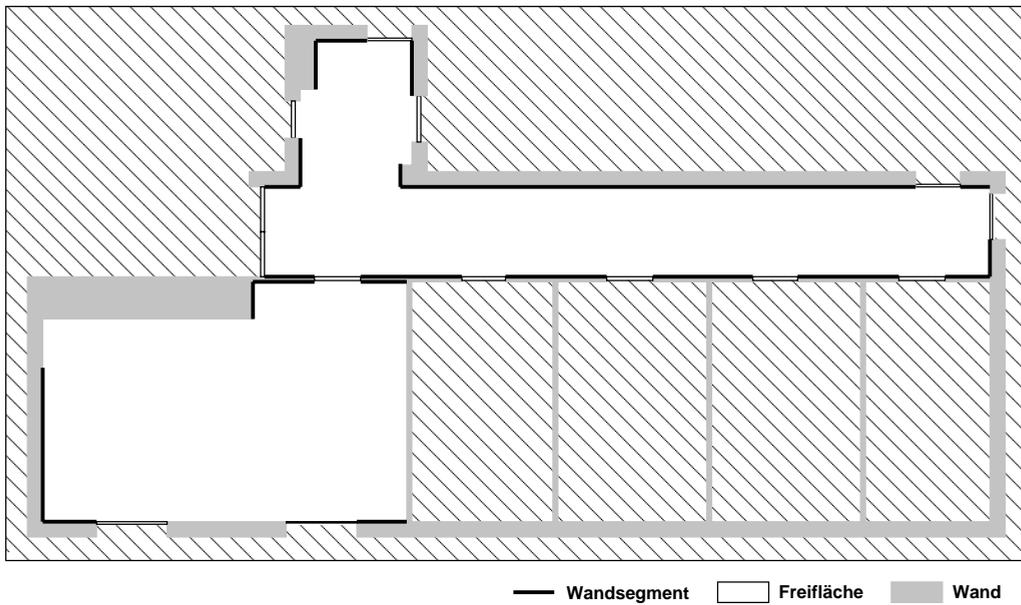


Abbildung 6.5: Grundriß der Institutsräume I: Freiflächen, Wände und Türen und zur Verfügung stehende Wandsegmente.

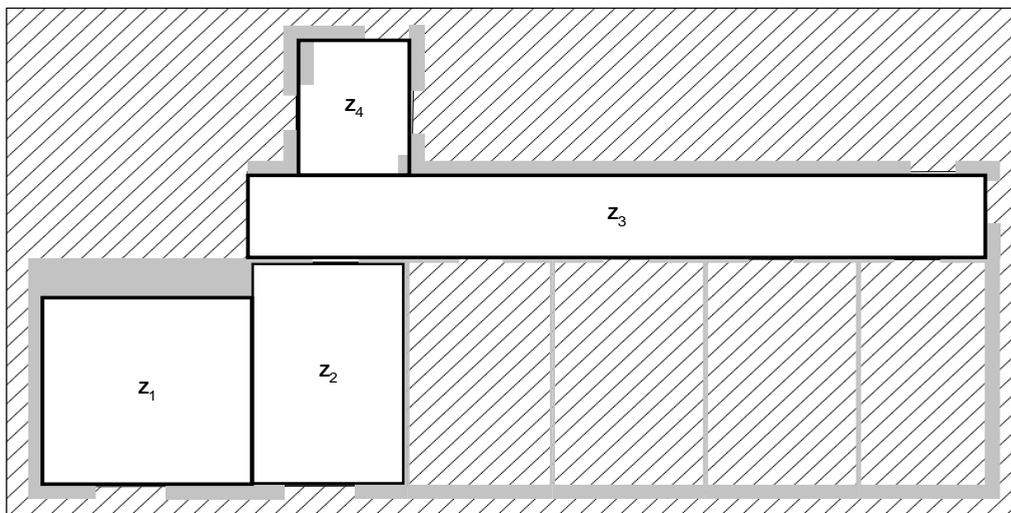


Abbildung 6.6: Einteilung der Institutsräume I in $M=4$ konvexe Zellen.

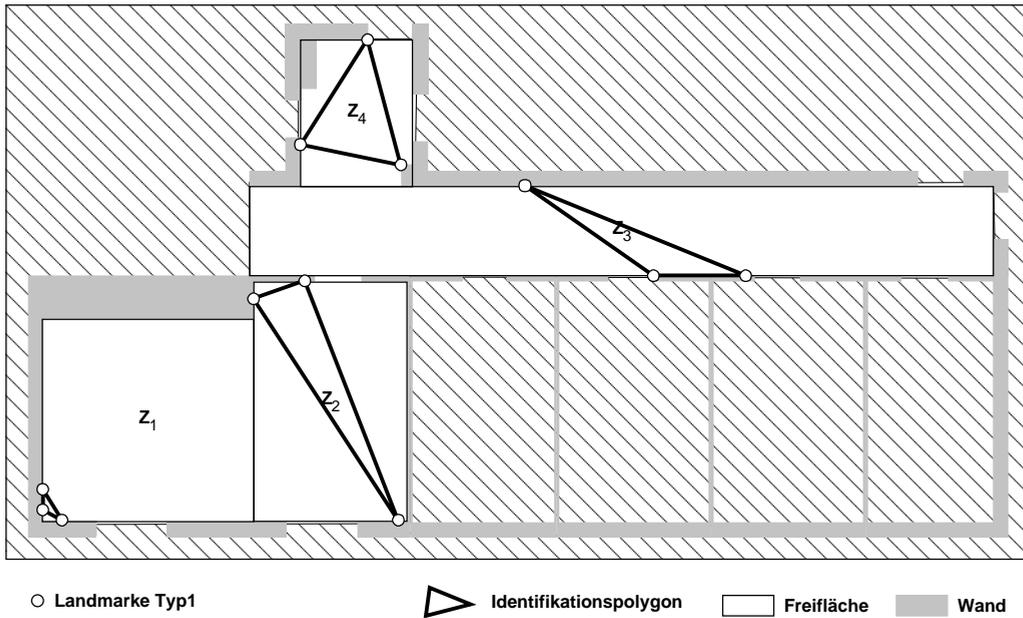


Abbildung 6.7: Codierungen der Institutsräume I mit $N=3$ Landmarken, $M=4$ Zellen und $T=1$ Landmarkentyp.

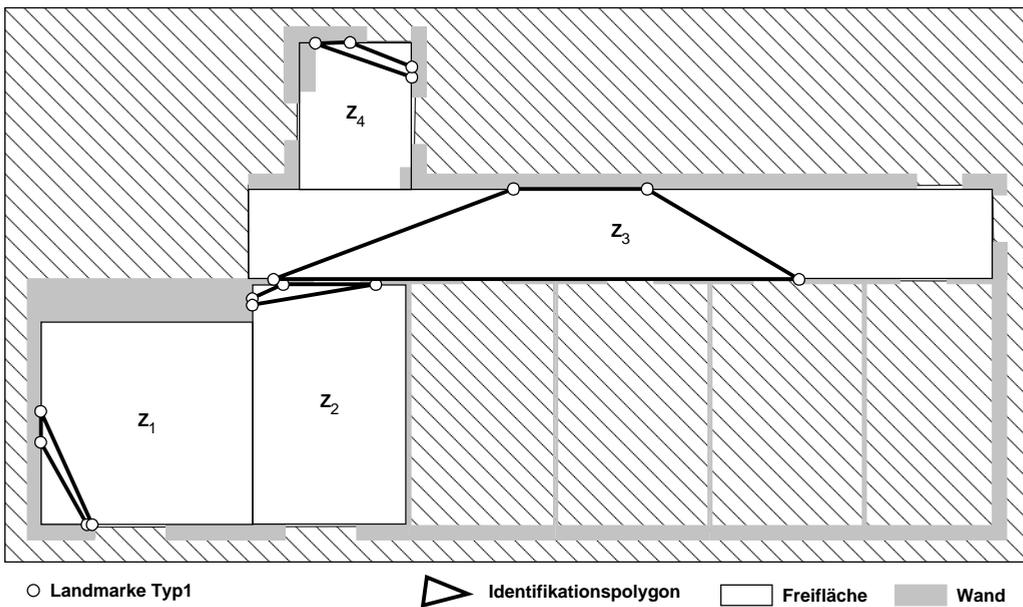


Abbildung 6.8: Codierungen der Institutsräume I mit $N=4$ Landmarken, $M=4$ Zellen und $T=1$ Landmarkentyp.

Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 zeigen Codierungen der Institutsräume I mit zwei unterschiedlichen Landmarkentypen (weiße und schwarze Kreise). Tabelle 6.5 zeigt die maximal korrigierbaren Fehler bei der Landmarkenerfassung, so daß 95 % aller Messungen korrekt decodiert werden können. Der Fehler beschreibt die maximal erlaubte Abweichung ε einer gemessenen Landmarke zu der in der Karte gespeicherten Landmarke. Er wurde den Meßwerten als Störung in Form von weißem Rauschen hinzugefügt. Es zeigt sich, daß die zulässigen Meßfehler stark ansteigen dürfen, wenn der Codewortabstand der eingesetzten Codierung groß wird. Da sich der Codewortabstand durch den Einsatz von zwei unterschiedlichen Landmarkentypen um ein vielfaches vergrößern läßt, bieten unterschiedliche Landmarkentypen bessere Korrekturmöglichkeiten bei Meßfehlern.

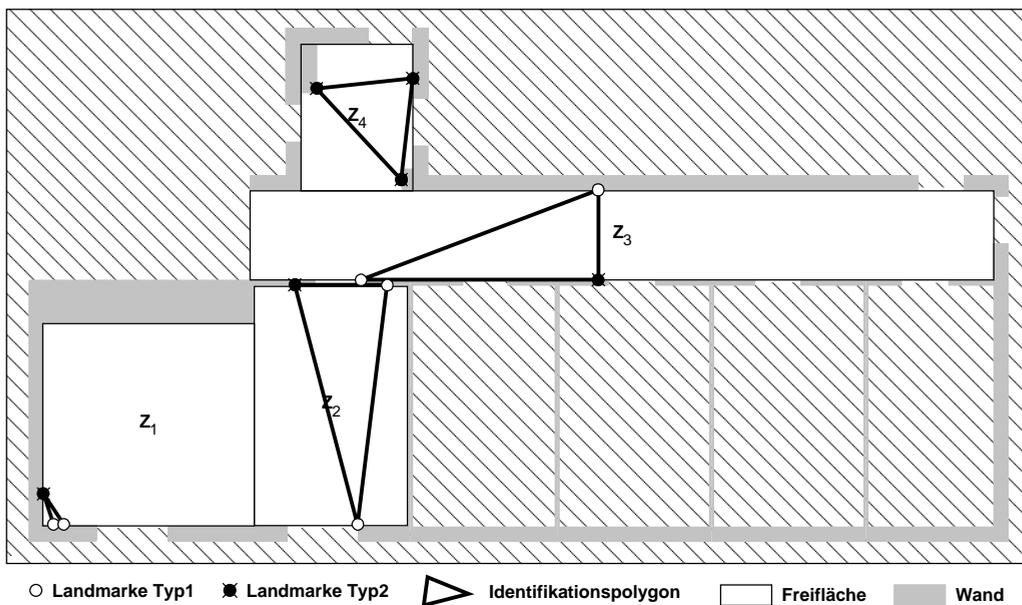


Abbildung 6.9: Codierungen der Institutsräume I mit $N=3$ Landmarken, $M=4$ Zellen und $T=2$ Landmarkentypen.

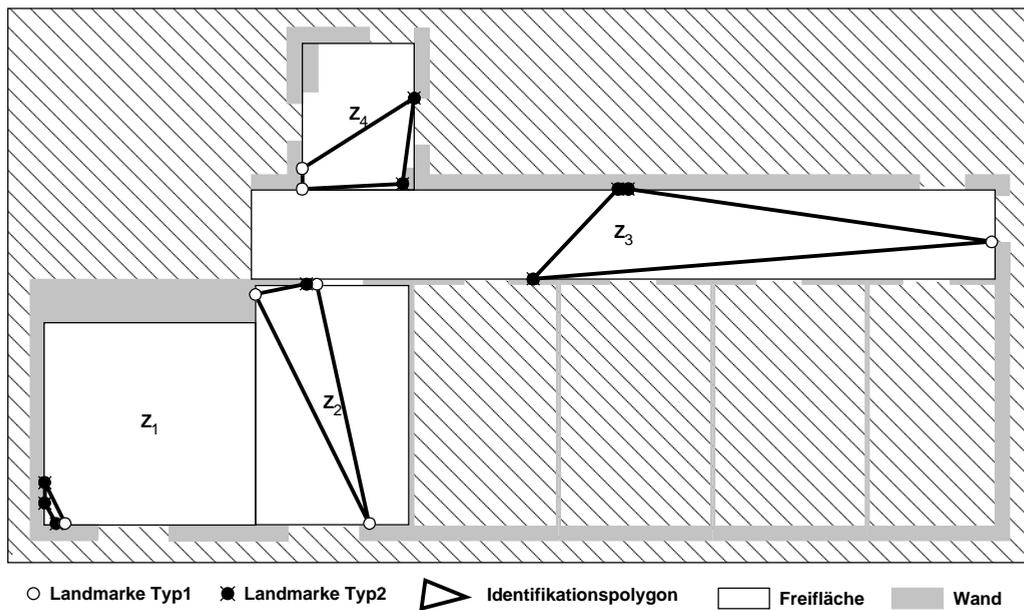


Abbildung 6.10: Codierungen der Institutsräume I mit $N=4$ Landmarken, $M=4$ Zellen und $T=2$ Landmarkentypen.

N	M	T	min. Codewortabstand	max. korrigierbarer Fehler [m]			
				z_1	z_2	z_3	z_4
3	4	1	0.1828	0.054	0.346	0.265	0.410
4	4	1	0.1100	0.031	0.052	0.656	0.054
3	4	2	0.4391	0.197	1.070	0.820	>5.000
4	4	2	0.5338	0.357	0.893	1.199	1.107

Tabelle 6.5: Max. korrigierbare Meßfehler der Landmarkenerfassung bei 95 % korrekt decodierter Landmarkencluster in den Institutsräumen I (1000 Messungen).

Institutsräume II

In einer zweiten Versuchsreihe wurden für die Institutsräume II Codierungen mit künstlichen Landmarken berechnet. Abbildung 6.11 zeigt den Grundriß der Institutsräume II und die zur Verfügung stehenden Wandsegmente, Abbildung 6.12 zeigt die Einteilung in konvexe Zellen.

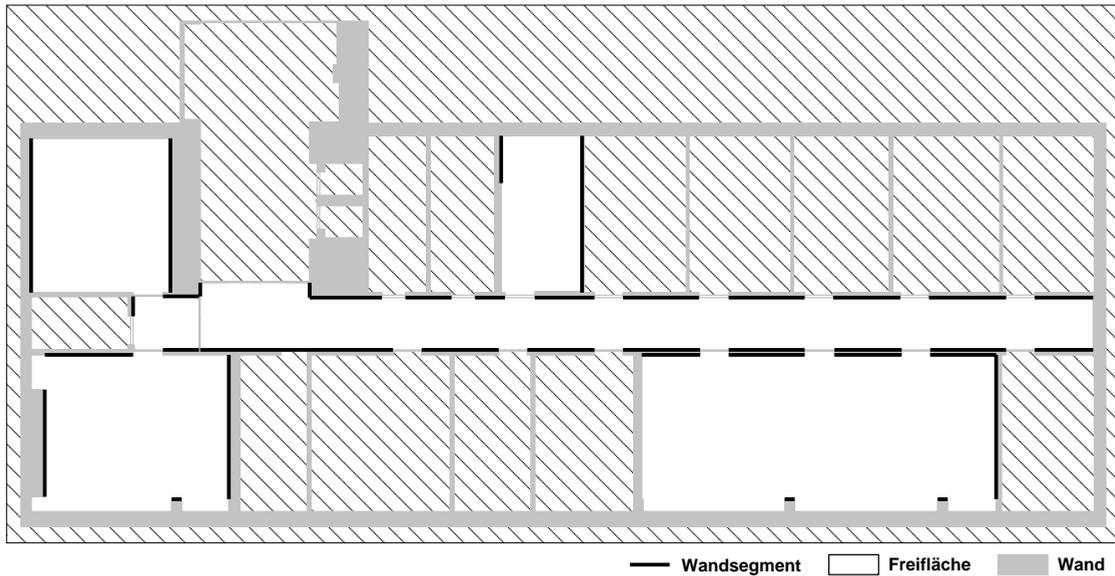


Abbildung 6.11: Grundriß der Institutsräume II: Freiflächen, Wände und Türen und zur Verfügung stehende Wandsegmente.

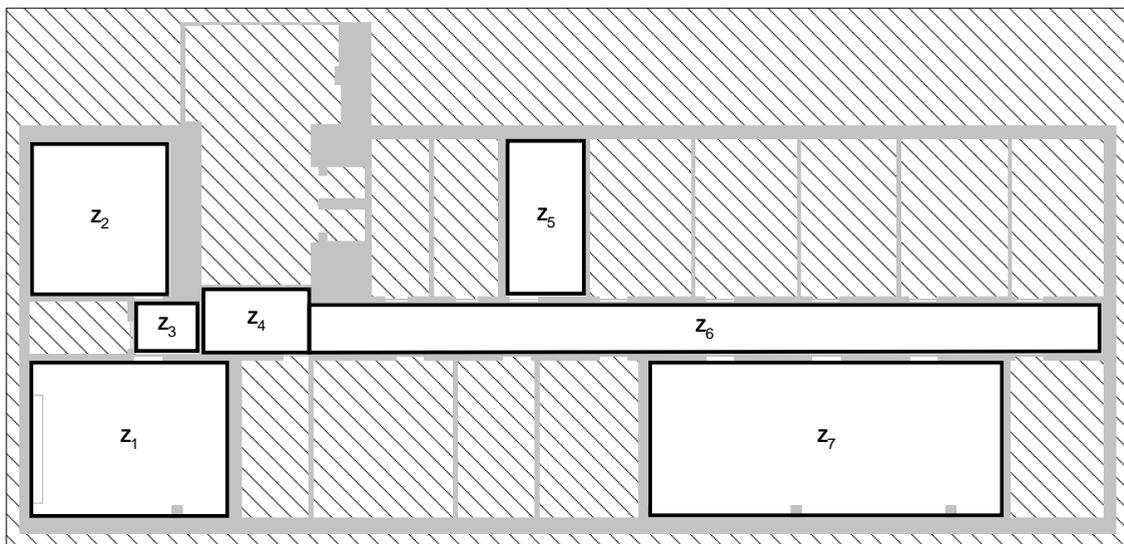


Abbildung 6.12: Einteilung der Institutsräume II in $M=7$ konvexe Zellen.

In Abbildung 6.13, Abbildung 6.14, Abbildung 6.15 und Abbildung 6.16 sind die aus den berechneten Codierungen abgeleiteten Landmarkenanordnungen mit $N \in \{3,4\}$, $M=7$ und $T \in \{1,2\}$ dargestellt.

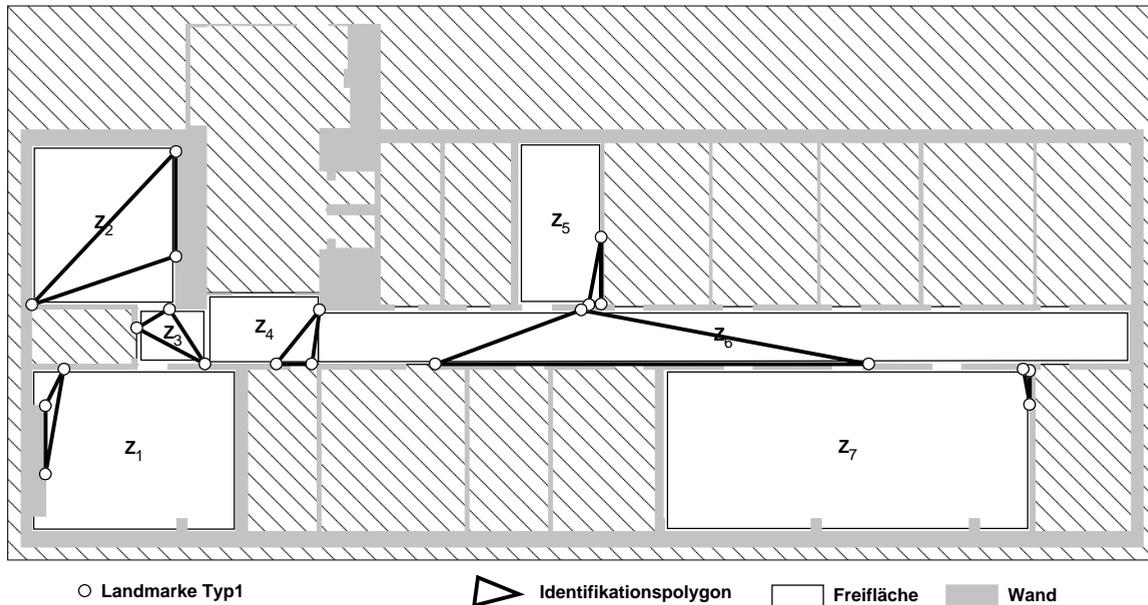


Abbildung 6.13: Codierungen der Institutsräume II mit $N=3$ Landmarken, $M=7$ Zellen und $T=1$ Landmarkentyp.

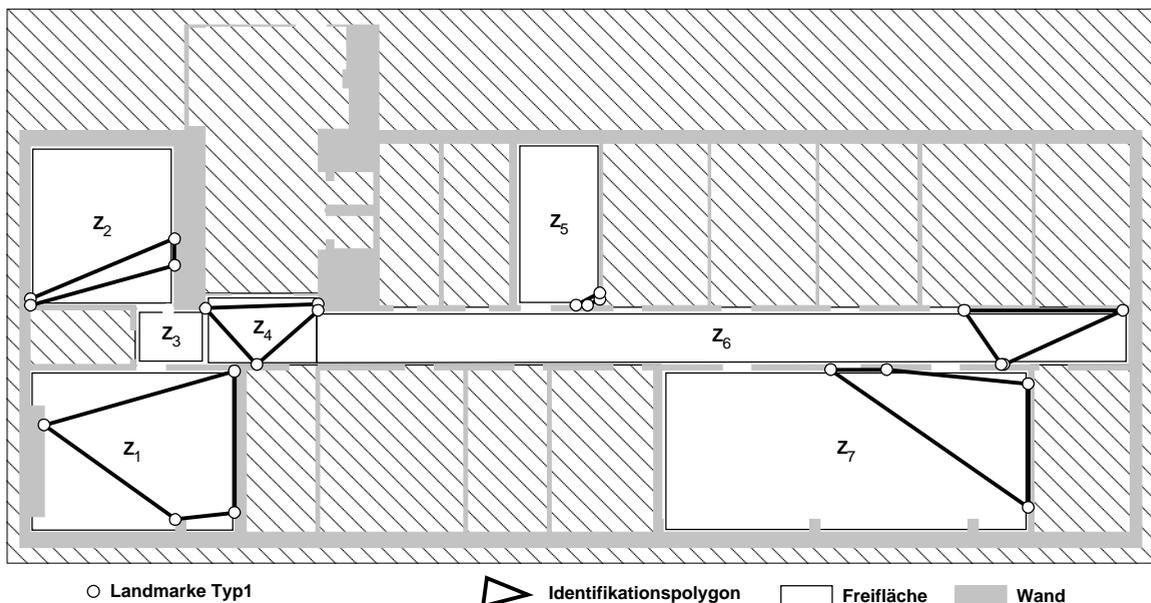


Abbildung 6.14: Codierungen der Institutsräume II mit $N=4$ Landmarken, $M=7$ Zellen und $T=1$ Landmarkentyp.

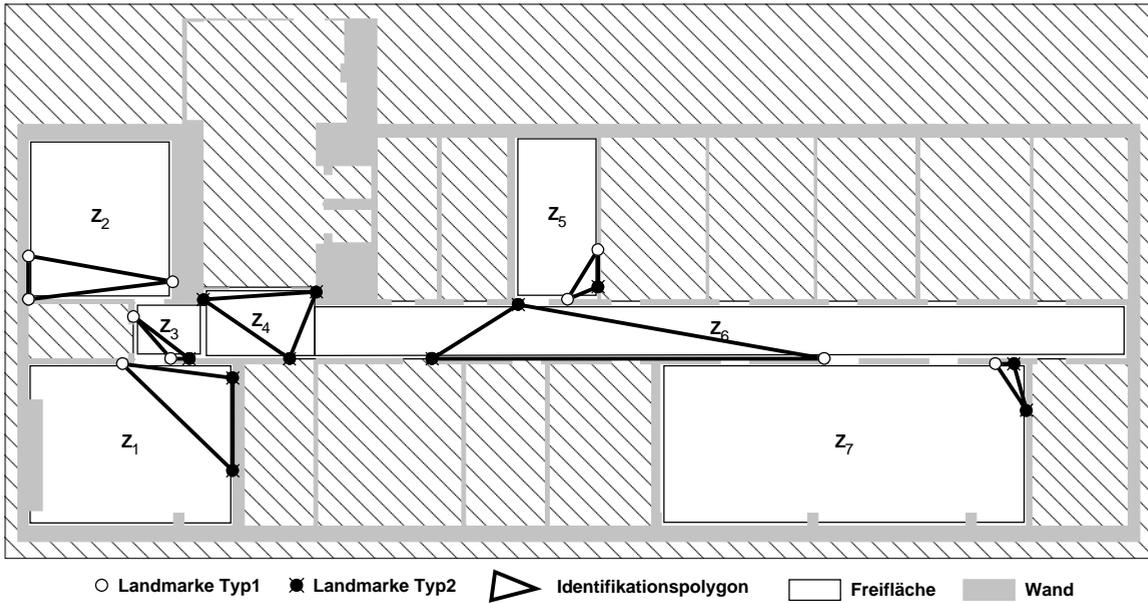


Abbildung 6.15: Codierungen der Institutsräume II mit $N=3$ Landmarken, $M=7$ Zellen und $T=2$ Landmarkentypen.

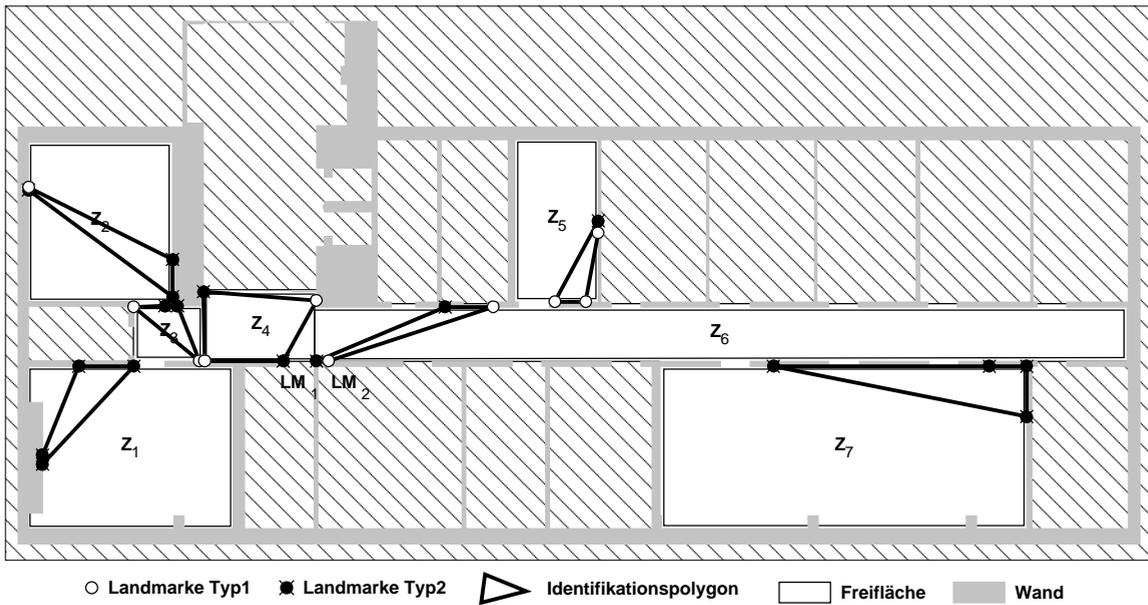


Abbildung 6.16: Codierungen der Institutsräume II mit $N=4$ Landmarken, $M=7$ Zellen und $T=2$ Landmarkentypen.

Tabelle 6.6 zeigt die maximal zulässige Abweichung bei der Landmarkenerfassung an, so daß 95 % aller Messungen in jeder Zelle korrekt decodiert werden können. Im allgemeinen ermöglicht ein größerer Codewortabstand die Korrektur von größeren Abweichungen. Durch die Restriktionen, die durch die Raumstruktur gegeben sind, gibt es jedoch Ausnahmen, wie die teilweise kleineren, maximal korrigierbaren Fehler bei $N=3, M=4, T=2$ und $N=4, M=4, T=2$ von 0.096 m gegenüber 0.740 m in Zelle Z_1 und 0.296 m gegenüber 0.946 m in Zelle zeigen (siehe Tabelle 6.6). Darüber hinaus können Landmarken, die mit nur sehr kleinen Winkel- und Abstandsdifferenzen gemessen werden, nur schwer unterschieden werden, so daß es zu Vertauschungen kommen kann (siehe Landmarke LM_1 und LM_2 in Abbildung 6.16). In diesem Fall können die Identifikationspolygone „kippen“, wie bei $N=4, M=4, T=2$ in Tabelle 6.6 bei Zelle Z_6 gezeigt, die bei Abweichungen $>0.021\text{ m}$ als Zelle Z_4 erkannt wird.

N	M	T	min. Codewortabstand	max. korrigierbarer Fehler [m]						
				Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7
3	4	1	0.0898	0.271	0.262	0.103	0.220	0.071	0.700	0.038
4	4	1	0.0960	0.463	0.056	0.062	0.062	0.050	0.008	0.359
3	4	2	0.2151	0.740	0.946	0.295	1.264	0.447	1.239	0.187
4	4	2	0.2117	0.096	0.296	0.465	1.248	0.815	0.021	0.369

Tabelle 6.6: Max. korrigierbare Abweichungen der Landmarkenerfassung bei 95 % korrekt decodierter Landmarkencluster in den Institutsräumen II (1000 Messungen).

6.2.2 Evaluierung der Startup-Lokalisation

Zur Evaluierung der Startup-Lokalisation wurde der Roboter manuell an mehreren Stellen in jeder Zelle der Institutsräume I plziert (siehe Abbildung 6.17) und der in Kapitel 4.4.5 beschriebene Algorithmus zur Bestimmung der Startup-Lage verwendet, um die initiale Roboterlage zu bestimmen. Die Versuchsreihe wurde mit mehreren berechneten Codierungen von Landmarkenclustern durchgeführt. Unterschiedlich große Meßfehler wurden durch Störung der Meßwerte mit weißem Rauschen hinzugefügt. Tabelle 6.7, Abbildung 6.18 und Abbildung 6.20 zeigen die Ergebnisse der Startup-Lokalisation. Für jede Meßposition ist die Anzahl $\#LM$ sichtbarer Landmarken, die zugehörige Zelle und der praktische ermittelte

maximal zulässige Abweichung ϵ angegeben, um in jedem Fall die korrekte Identifikationen bestimmen zu können. Die maximale Abweichung ist unabhängig von der Meßposition innerhalb einer Zelle, wenn sich die Menge der sichtbaren Landmarken nicht verändert. Dies ergibt sich aus der Rekonstruktionen des Identifikationspolygons, die unabhängig von der Lage des Roboters innerhalb einer Zelle erfolgt (siehe Kapitel 4.4). Es zeigt sich, daß sich die maximale Abweichung an den Positionen reduziert, an denen eine große Anzahl Landmarken sichtbar ist. Da sich nur Landmarkentypen unterscheiden lassen, die Marken sonst jedoch gleichartig sind, können einzelne Landmarkencluster in einer großen Menge gemessener Landmarken nur bei kleinen Abweichungen korrekt identifiziert werden. Die Eindeutigkeit bei der Decodierung der Zelle nimmt dadurch bei einer größeren Anzahl Landmarken ab.

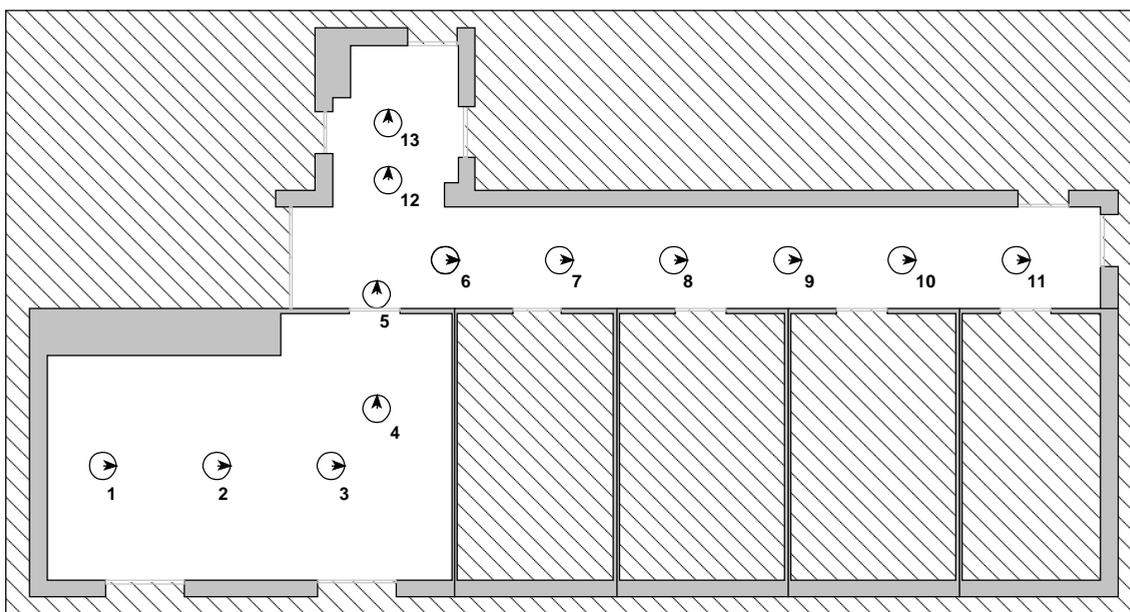


Abbildung 6.17: Startup-Lokalisation in den Institutsräumen I: Testpositionen (schwarze Kreise mit Richtungspfeil).

#	Z_i	$N=3, T=1$		$N=3, T=2$		$N=4, T=1$		$N=4, T=2$	
		#LM	ϵ [m]						
1	1	5	0.398	5	0.078	6	0.023	6	0.318
2	1	5	0.273	6	0.253	6	0.041	7	0.046
3	1	8	0.142	8	0.291	11	0.039	10	0.109
4	1	8	0.076	7	0.265	10	0.031	10	0.093
5	3	10	0.187	10	0.203	10	0.281	14	0.945
6	3	8	0.125	7	0.744	8	3.007	11	0.343
7	3	5	0.255	3	0.894	5	2.572	7	0.066
8	3	3	0.251	3	0.660	4	2.257	8	0.296
9	4	3	0.251	3	0.421	4	2.257	6	0.750
10	4	3	0.251	3	0.296	4	2.507	5	0.875
11	4	3	0.265	3	0.234	4	2.507	5	0.822
12	4	3	0.314	5	0.410	5	0.085	7	0.175
13	4	3	0.314	5	0.421	5	0.085	6	0.318

Tabelle 6.7: Ergebnisse der Startup-Lokalisation in den Institutsräumen I: Es sind die Meßpositionen (#), die zugehörige Zelle Z_i , die Anzahl #LM sichtbarer Landmarken und die maximal zulässige Abweichung ϵ bei 100% korrekter Decodierung angegeben.

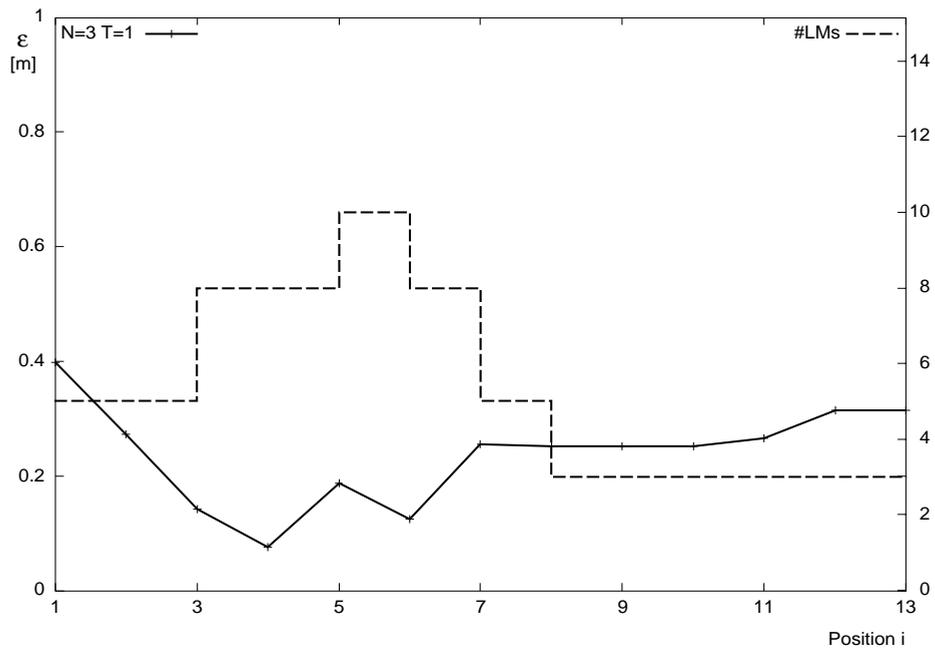


Abbildung 6.18: Maximal zulässige Abweichung ε (dicke Linie) und Anzahl sichtbarer Landmarken (gestrichelte Linie) für die Lösung des Startup-Problems in den Institutsräumen I: $N=3$ Landmarken und $T=1$ Landmarkentyp.

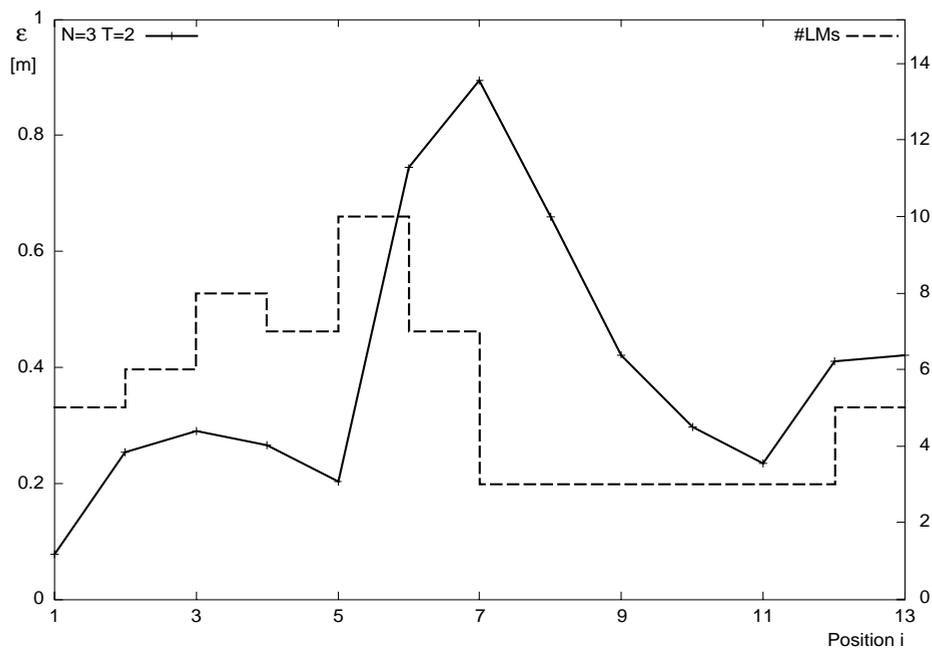


Abbildung 6.19: Maximal zulässige Abweichung ε (dicke Linie) und Anzahl sichtbarer Landmarken (gestrichelte Linie) für die Lösung des Startup-Problems in den Institutsräumen I. $N=3$ Landmarken und $T=2$ Landmarkentypen.

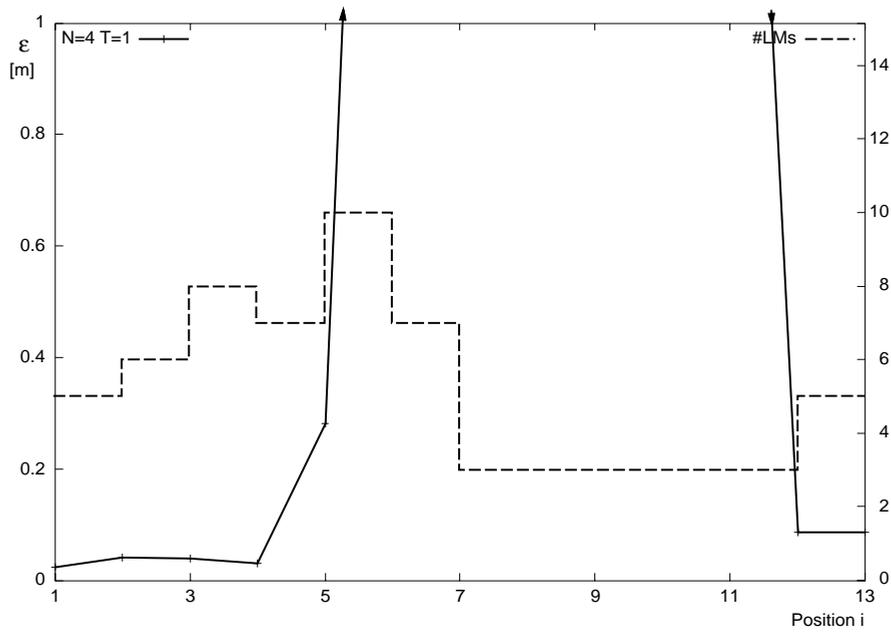


Abbildung 6.20: Maximal zulässige Abweichung ϵ (dicke Linie) und Anzahl sichtbarer Landmarken (gestrichelte Linie) für die Lösung des Startup-Problems in den Institutsräumen I. $N=4$ Landmarken und $T=1$ Landmarkentyp.^a

^a Die Abbildung zeigt die Abweichungen bis max. 1 m.

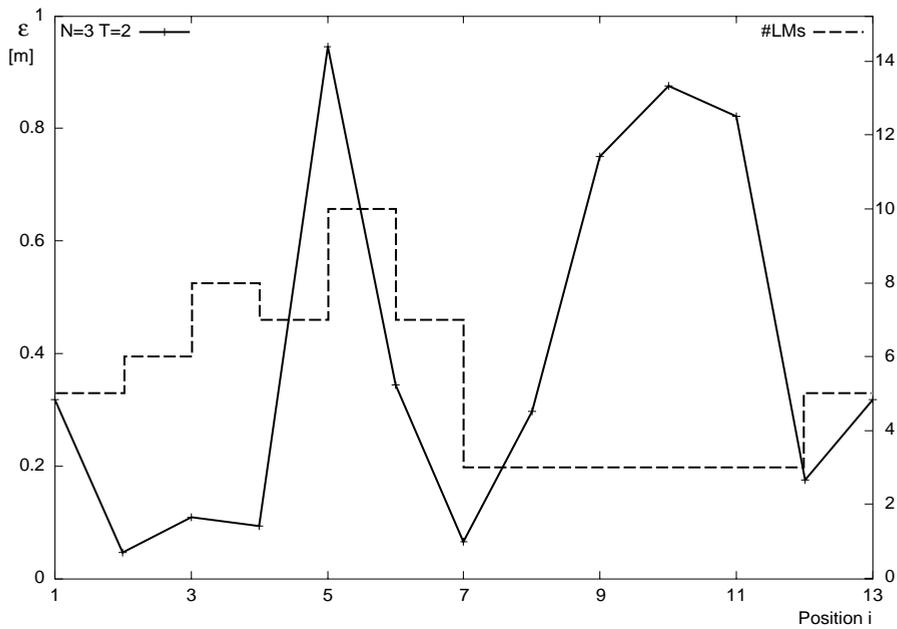


Abbildung 6.21: Maximal zulässige Abweichung ϵ (dicke Linie) und Anzahl sichtbarer Landmarken (gestrichelte Linie) für die Lösung des Startup-Problems in den Institutsräumen I. $N=4$ Landmarken und $T=2$ Landmarkentypen.

Die zulässigen Abweichungen bei der Landmarkendetektion schwanken zwischen 0.023 m und 3.007 m . Bei einigen Codierungen werden an manchen Positionen nur kleine Fehler zugelassen, beispielsweise die Positionen 2–5 bei $N=3$ und $T=1$. Die Positionen 1–5 erweisen sich als kritisch durch die große Anzahl sichtbarer Landmarken von mehreren Zellen (siehe Abbildung 6.17).

Die für die Bestimmung der Startup-Lage benötigte Rechenzeit wird durch die Anzahl k sichtbarer Landmarken und die Anzahl j der Landmarken in einem Landmarkencluster bestimmt. Der Aufwand kann durch die O-Notation

$$\frac{k!}{j!(k-j)!} \cdot O(k \cdot j)$$

abgeschätzt werden. In den praktischen Versuchen ergaben sich Rechenzeiten von weniger als 30 s , in den meisten Fällen weniger als 10 s .

Die Ergebnisse zeigen, daß das Startup-Problem mit den in dieser Arbeit entwickelten Codierungen von Landmarkenclustern effizient gelöst werden kann und dabei Fehler in der Positionsbestimmung der Landmarken und Landmarkendetektion toleriert werden können. Der praktische Rechenaufwand ist durch die kleine Anzahl von Landmarken sehr beschränkt.

6.3 Lokalisation in einer dynamischen Umgebung

Neben der Evaluierung in den Institutsräumen konnte das entwickelte Lokalisationsverfahren im Rahmen einer Anwendung als Besucherführungs- und Besucherinformationssystem in der hochdynamischen Umgebung einer Messe getestet werden. Bei dieser Anwendung hatte der Roboter die Aufgabe, selbständig vorgegebene Zielpunkte anzusteuern und Messebesuchern Informationen anzubieten. Während der Fahrt mußten vom Roboter dynamische Hindernisse erkannt und selbständig Ausweichmanöver berechnet und ausgeführt werden. Auftretende Meßfehler mußte das System tolerieren und Störungen beseitigen können. Neben einer effizienten Routenplanung, der Navigation in einer Umgebung, in der sich Menschen aufhalten, und der sicheren Hinderniserkennung mußte der mobile Roboter zudem in der Lage sein, unter den gegebenen Bedingungen in den Messeräumen seine eigene Position und Orientierung zu bestimmen. Dies mußte auch nach Systemausfällen

und bei zeitweise verdeckten Landmarken zuverlässig möglich sein. In dem für den Roboter vorgesehenen Einsatzgebiet erwies sich dies aufgrund der Raumgröße und der Vielzahl von dynamischen Einflüssen als eine schwierige Aufgabe.

In einem Vorverarbeitungsschritt wurden für die Lokalisation die Kartendaten der Einsatzumgebung auf dem Messegelände vom Roboter eingelesen (Abbildung 6.22). Aufgrund der stark unterschiedlichen und wenig strukturierten Umgebung (Messestände, Sitzecken, Garderoben) mit nur wenig geeigneten natürlichen Landmarken (keine geradlinigen Wandbegrenzungen, viele Glasscheiben) mußte die Einsatzumgebung für die Lokalisation mit künstlichen Landmarken ausgestattet werden. Die Lokalisation mit natürlichen Landmarken erwies sich als zu wenig zuverlässig und robust, insbesondere wenn eine größere Anzahl von Menschen in der Umgebung des Roboters die Erkennung natürlicher Landmarken erschwerte. Da die Einsatzumgebung auf dem Messegelände nur aus einem großen Raum bestand, war darüber hinaus eine Codierung unterschiedlicher Räume nicht erforderlich. Abbildung 6.22 zeigt die Grundrisse der Einsatzumgebung und die installierten künstlichen Landmarken (kleine Kreise) an Wänden und Säulen.

Die Raumgröße der Einsatzumgebung erwies sich als problematisch: Der zur Erfassung der künstlichen Landmarken eingesetzte Laserscanner hatte eine auf ca. *10 m* beschränkte Reichweite. Es konnten daher nicht immer alle Landmarken in der Einsatzumgebung erfaßt werden, die sichtbar waren. In der Raummitte entstand ein Bereich, in dem eine Lokalisation weder mit künstlichen noch natürlichen Landmarken möglich war. Der Roboter mußte daher in diesem Bereich ausschließlich mit Odometrie navigieren und konnte seine Position und Orientierung erst dann wieder korrigieren, wenn in den Randbereichen des Raums wieder Landmarken erfaßt wurden. Für die Navigation stellte dies kein Problem dar, da in der Raummitte keinerlei Einschränkungen bezüglich der Fahrtrouten bestanden und die Kollisionserkennung und Hindernisumfahrung unabhängig funktionierten. Das Startup-Problem konnte in diesem toten Bereich jedoch nicht gelöst werden. War eine Neubestimmung der Roboterlage in diesem Bereich erforderlich, so mußte der Roboter zunächst ohne Informationen bezüglich der Roboterlage den Bereich verlassen und in Sensorreichweite der installierten künstlichen Landmarken gelangen, um die korrekte Lage zu bestimmen. In allen anderen Bereichen der Einsatzumgebung konnte der Verlust der Positions- oder Orientierungsinformation des Roboters in allen Fällen korrigiert werden.

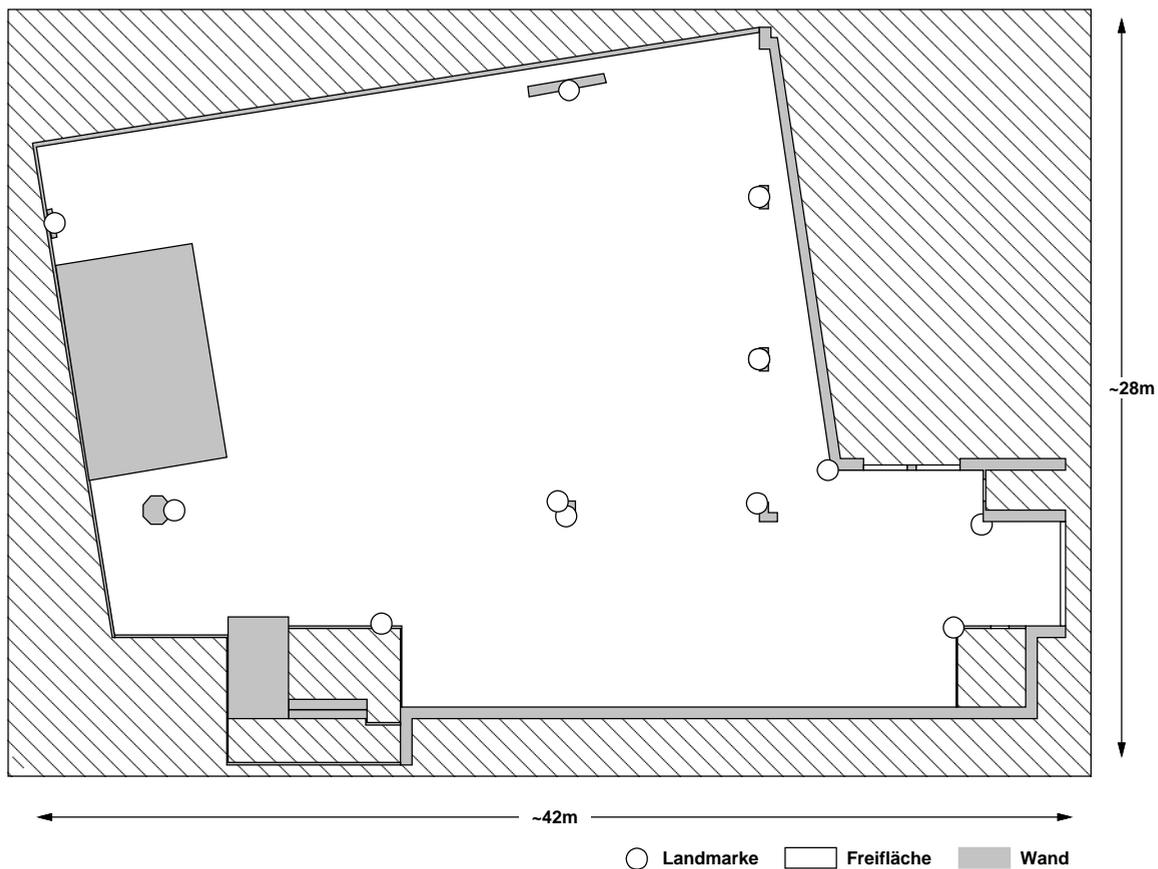


Abbildung 6.22: Grundriß der Einsatzumgebung auf dem Messegelände: Freiflächen (weiß), Wände und Türen (grau) und installierte künstliche Landmarken (kleine Kreise).

Beim Einsatz des Verfahrens auf einem Roboter, der sich in großflächigen Außenbereichen bewegt, sind außer starker Sonneneinstrahlung, die im ungünstigen Fällen die eingesetzten Laserscanner blenden können, ähnliche Einschränkungen zu beachten und diese bei der Einteilung der Einsatzumgebung in Zellen besonders zu berücksichtigen.

6.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die mit dem mobilen Roboter *James* durchgeführten Experimente für die Evaluierung des in Kapitel 4 entwickelten neuen Lokalisationsverfahrens vorgestellt. Die Versuche in den Institutsräumen I und II und während einer Messe mit künstlichen und natürlichen Landmarken zeigen die Umsetzbarkeit und Leistungsfähigkeit der eingesetzten Verfahren und Codierungen mit Landmarkenclustern. Das Verfahren zur Berechnung der

Roboterlage aus gemessenen Landmarken und Landmarken der Karte liefert Ergebnisse, deren Genauigkeiten nahe an denjenigen der eingesetzten Laserscanner und der zur Verfügung stehenden Karte liegen. Die verbleibenden Abweichungen der in den Versuchen ermittelten Daten sind auf die handvermessene und idealisierte Karte (geradlinige Wände, rechtwinklige Ecken) und die Meßgenauigkeiten der Sensoren zurückzuführen.

Die Lokalisation mit künstlichen Landmarken erwies sich – mit den gegebenen Einschränkungen wie z. B. der Sensormeßweite – als robust. Ab drei sichtbaren künstlichen Landmarken erfolgt die Lokalisation sehr zuverlässig. Für den praktischen Einsatz bedeutet dies, daß die Lokalisation mit künstlichen Landmarken sicher erfolgen kann, durch die relativ geringe Anzahl notwendiger Landmarken flexibel ist und nur wenige Einschränkungen aufweist. Lediglich in großen Räumen, für die die Sensorreichweite nicht ausreichend ist, oder bei zu wenig vorhandenen freien Wandsegmenten für die Platzierung der Landmarken waren bei der Lokalisation mit künstlichen Landmarken Probleme aufgetreten. Der geringe Aufwand für die Installation der Landmarken und die Anwendbarkeit in unterschiedlichen Umgebungen stellen jedoch einen guten Kompromiß für praxisgerechte Anwendungen dar.

Die Lokalisation mit natürlichen Landmarken zeigt Schwächen bei der Erkennung der Landmarken. Der gewählte Ansatz, bei dem Ecken als Landmarken verwendet werden, ist robust gegenüber Meßungenauigkeiten in den Sensoren, so daß bei sichtbaren Landmarken sogar bessere Meßergebnisse erzielt werden können als mit künstlichen Landmarken. Befinden sich um den Roboter jedoch bewegliche Hindernisse, wie beispielsweise Menschen, können nicht immer genügend natürliche Landmarken erfaßt werden, so daß eine Lokalisation zeitweise nicht möglich ist. Auch bei gleichartigen und sehr großen Räumen mit wenigen Strukturmerkmalen erweist sich die Lokalisation mit natürlichen Landmarken für den Einsatz auf einem Serviceroboter als zu wenig robust und zuverlässig.

Zur Lösung des Startup-Problems wurden Codierungen unter Berücksichtigung der baulichen Einschränkungen der Einsatzumgebung berechnet. Die Codierungen von Zellen der Einsatzumgebung mit Landmarkenclustern erweist sich als robust gegenüber Meßfehlern, nicht detektierten Landmarken oder zuviel detektierten Landmarken. Die Einsatzfähigkeit in Umgebungen wie Büros wurde damit nachgewiesen. In anderen Einsatzumgebungen, wie in dem gezeigten Beispiel bei einer Messe, ergeben sich jedoch Einsatzbedingungen, wie beispielsweise große Räume und eine beschränkte Sensormeßweite, die die Lösung des Startup-Problems durch Codierungen mit Landmarkenclustern erschweren und teilweise

unmöglich werden lassen. Dies stellt jedoch nur in Ausnahmefällen eine praxisrelevante Einschränkung dar, beispielsweise bei großflächigen Einsatzumgebungen, die der Roboter nur teilweise befahren darf. In diesem Fall muß über zusätzliche Sensoren die unerlaubte Befahrung gesperrter Bereiche in der Einsatzumgebung verhindert oder ein Sensorsystem mit ausreichender Reichweite eingesetzt werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die entwickelten Ansätze und die erarbeiteten Resultate dieser Arbeit im Überblick dargestellt. Es erfolgt eine Beschreibung der Ausgangssituation, die Darstellung des neuen Lokalisationsverfahrens und eine Bewertung der erzielten Ergebnisse in bezug auf den Stand der Technik.

7.1 Ausgangssituation

Für den effizienten und ökonomischen Einsatz mobiler Roboter in der Industrie und im Servicebereich sind zuverlässige und genaue Sensorsysteme sowie flexible und intelligente Steuerungssysteme eine wichtige Voraussetzung. Für die sichere Navigation werden robuste, leistungsfähige und kostengünstige Lokalisationsverfahren zur Bestimmung von Position und Orientierung des Roboters in der Einsatzumgebung benötigt.

Zur Lokalisation mobiler Roboter sind in der Vergangenheit unterschiedliche Ansätze und Verfahren entwickelt worden. Neben internen Sensoren zur Erfassung von Wegstrecken, Winkeländerungen und Beschleunigungen werden zusätzliche Sensoren zur Erfassung externer Merkmale wie Abstände und Richtungen verwendet. Als Sensoren kommen dabei Taster, Antennen, Ultraschall, Laserscanner oder Kamerasysteme zum Einsatz. Viele dieser Ansätze und Verfahren können jedoch die Anforderungen in industriellen Umgebungen und im Servicebereich nicht erfüllen. So können Systeme, die ausschließlich Verfahren mit internen Sensoren, wie Odometrie, verwenden, durch den anwachsenden Driftfehler nicht sinnvoll eingesetzt werden. Systeme, die externe Sensoren einsetzen, erfordern entweder einen hohen Aufwand bei der Anpassung der Einsatzumgebung, wie Leitdraht-, Gitter- oder Kachelsysteme, oder bieten nur geringe Genauigkeiten, wie Ultraschall- und Radarsysteme. Kamerasysteme erfordern einen erheblichen Hardwareaufwand und bieten für Lokalisationsaufgaben in realen Einsatzumgebungen oft nur geringe Zuverlässigkeiten und Genauigkeiten. Laserscanner bieten eine hohe Zuverlässigkeit und Genauigkeit und sind inzwischen kostengünstig genug, daß diese Sensoren zunehmend in mobilen Robotern zur Erfassung von Abständen und Richtungen eingesetzt werden. Für die Lokalisation lassen sich Laserscanner zur Erfassung von Landmarken vorteilhaft einsetzen. In der Literatur sind einige Verfahren beschrieben, die künstliche oder natürliche Landmarken zur Lokalisation ver-

wenden. In industriellen Umgebungen werden diese Verfahren zur Führung fahrerloser Transportsysteme bereits zunehmend eingesetzt. Für andere Aufgaben, beispielsweise im Servicebereich, lassen sich diese Systeme jedoch aufgrund der unstrukturierten und dynamischeren Einsatzumgebungen nur mit Einschränkungen verwenden. Insbesondere die für einen sicheren Betrieb notwendige Zuverlässigkeit bei teilweise verdeckten Landmarken und der sichere Systemstart nach dem Einschalten des Roboters oder bei einem Fehler ist bei diesen Systemen nicht gegeben.

7.2 Neues Lokalisationsverfahren

In dieser Arbeit wurde ein neues Lokalisationsverfahren auf Basis eines kombinierten Einsatzes künstlicher und natürlicher Landmarken vorgestellt. Die Landmarken werden mit handelsüblichen Laserscannern erfaßt (RoboSense, SICK LMS), und aus den Abständen und Richtungen zu einzelnen Landmarken werden die relative und absolute Roboterlage bestimmt. Der kombinierte Einsatz künstlicher und natürlicher Landmarken erlaubt es, die Einsatzumgebung mit minimalem Aufwand anzupassen und die Verteilung der Landmarken so zu gestalten, daß auch teilweise verdeckte Landmarken die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Lokalisation nicht beeinträchtigen. Darüber hinaus werden die künstlichen Landmarken so platziert, daß der Roboter in der Lage ist, an jeder Stelle der Einsatzumgebung seine globale Position und Orientierung zu bestimmen (Lösung des Startup-Problems). Das Verfahren ist so konzipiert, daß es auf einem mobilen Serviceroboter einsetzbar ist.

Als künstliche Landmarken werden gleichartige Reflektorstreifen verwendet, die an geeigneten Stellen in der Einsatzumgebung platziert werden. Als natürliche Landmarken werden Ecken an Wänden und Türen verwendet, die sich im Abstandsbild eines Laserscanners mit relativ einfachen Verfahren der Mustererkennung detektieren lassen. In einem Vorverarbeitungsschritt werden die natürlichen Landmarken (Ecken) in der Einsatzumgebung in eine Karte eingetragen. Die Einsatzumgebung wird anschließend in konvexe Bereiche unterteilt, und für jeden Bereich wird eine Codierung berechnet. Die Codierungen legen die Platzierung von zusätzlichen künstlichen, nicht-codierten Landmarken in Bereichen fest, in denen sich keine oder sich nicht genügend unterscheidende natürliche Landmarken befinden. Die Codierungen erlauben einerseits die eindeutige Identifikation der Bereiche und die Lösung des Startup-Problems und andererseits das Erkennen und Korrigieren von

Abweichungen durch den Einsatz von Verfahren der Codierungstheorie. Dadurch können auch teilweise verdeckte Landmarken toleriert und unvermeidbare Meßfehler korrigiert werden.

Für die relative Lokalisation auf Basis der künstlichen und natürlichen Landmarken wurde ein einfaches und schnelles Verfahren eingesetzt, das die Korrespondenz von Landmarken zweier Messungen mit Hilfe von Odometriedaten herstellt. Bei einer gegebenen Startposition und kontinuierlichen Meßwerten ist dieses Verfahren bereits gut geeignet, um die durch Drift entstehenden Fehler der Odometrie zu korrigieren. Für die absolute Lokalisation bei teilweise verdeckten Landmarken wurde ein Ansatz aus der Literatur übernommen und erweitert, der bei gegebener Korrespondenz detektierter Landmarken und Landmarken einer Karte die Roboterlage durch effizientes Lösen eines Gleichungssystems bestimmt. Zur Lösung des Korrespondenzproblems wurde ein neuer Ansatz auf Basis von Landmarkenclustern vorgestellt. Dieser Ansatz verwendet Anordnungen von detektierten Landmarken (Landmarkencluster) und ordnet diese mit Verfahren der Codierungstheorie einem passenden Landmarkencluster der Karte zu. Durch die im Vorverarbeitungsschritt berechneten und gewählten Plazierungen künstlicher Landmarken wird dieser Ansatz so erweitert, daß er zusätzlich für die Bestimmung der globalen Roboterlage einsetzbar ist.

Der entwickelte Ansatz wurde in Simulationen und auf dem mobilen Roboter *James* implementiert und getestet. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß der entwickelte Ansatz die gestellten Anforderungen erfüllen kann.

7.3 Bewertung des Ansatzes

Ein Vergleich der existierenden Ansätze zur Lokalisation mobiler Roboter wurde in Kapitel 3.3, eine Abgrenzung zu konkurrierenden Verfahren wurde in Kapitel 4 dargestellt. Die in der vorliegenden Arbeit erzielten Fortschritte lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Einsatz eines Laserscannersystems mit Landmarken ermöglicht eine sichere und zuverlässige Lokalisation mobiler Roboter. Der Ansatz ermöglicht die relative und absolute Lokalisation mit einer hohen Genauigkeit. Fehlmessungen und verdeckte Landmarken werden erkannt und beeinträchtigen die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Lokalisation nicht.

- Durch den kombinierten Einsatz künstlicher und natürlicher Landmarken wird der Aufwand für die Anpassung der Einsatzumgebung auf ein Minimum reduziert. Das Verfahren ist auch in Umgebungen einsetzbar, in denen nicht ausreichend natürliche Landmarken zur Verfügung stehen. Zusätzlich ermöglicht der kombinierte Einsatz die gezielte Platzierung künstlicher Landmarken an Stellen der Einsatzumgebung, an denen sich nicht ausreichend oder sich nicht hinreichend unterscheidbare natürliche Landmarken befinden. Die Zuverlässigkeit der Lokalisation wird dadurch auch bei teilweise verdeckten Landmarken flächendeckend erhalten.
- Durch die gezielte Platzierung von künstlichen Landmarken wird die Einsatzumgebung so codiert, daß das Startup-Problem an jeder Stelle der Einsatzumgebung eindeutig lösbar ist. Dies verbessert die praktische Anwendung mobiler Serviceroboter erheblich.
- Die Kosten für den Einsatz des Lokalisationsverfahrens auf einem realen Serviceroboter werden im wesentlichen durch die eingesetzten Laserscanner bestimmt. In vielen Fällen werden Laserscanner bereits für andere Aufgaben in einem mobilen Roboter eingesetzt, beispielsweise als berührungsloser Sicherheitsbumper. Bereits vorhandene Laserscanner lassen sich daher zusätzlich für die Lokalisation verwenden. Die Installation künstlicher Landmarken verursacht einmalige Kosten und wird durch den kombinierten Einsatz mit bereits vorhandenen natürlichen Landmarken reduziert. Die Kartenerstellung verursacht ebenfalls nur einmalige Kosten und kann mit einem geeigneten Kartographierungsverfahren auch automatisiert werden. Zusätzlich kann die erstellte Karte von anderen Teilsystemen des Roboters, wie dem Planer, mitverwendet werden.

7.4 Weiterentwicklung des Verfahrens

Für die Weiterentwicklung des vorgestellten Verfahrens gibt es mehrere Anknüpfungspunkte:

- Das vorgestellte Lokalisationssystem sollte in realen Anwendungen weiter getestet werden, um die Anwendbarkeit und die Grenzen genauer erfassen zu können. Dabei sollte auch ein Test im Freien durchgeführt werden, um die Robustheit des Verfahrens

bei Wettereinwirkungen, wie Sonnenlicht oder Regen, zu evaluieren. Darüber hinaus ist die Implementierung der Software auf noch enthaltene Fehler in der Umsetzung und der Numerik zu testen.

- Die Ermittlung von Codierungen und konkreten Landmarkenpositionen (Identifikationspolygone) erfordert in der verfügbaren Implementierung sehr aufwendige Berechnungen. Da diese in einem Vorverarbeitungsschritt durchgeführt werden, ist der Aufwand für den Betrieb des Roboters nicht relevant. Für eine einfache schnellere praktische Einsetzbarkeit wäre es jedoch wünschenswert, effizientere oder parallele Algorithmen einzusetzen, die es dem Benutzer erlauben, komplexere und besser optimierte Codierungen und Landmarkenpositionen in einer akzeptablen Zeit zu berechnen.
- In der vorgestellten Umsetzung werden zwei Laserscanner eingesetzt, die künstliche und natürliche Landmarken detektieren können. Zur Vereinfachung des Systems und zur Kostenreduktion wäre anzustreben, mit einem Laserscanner beide Landmarkentypen zu erfassen. Das neueste Modell des SICK LMS bietet diese Option, jedoch wäre eine bessere Winkelauflösung bei der Erfassung künstlicher Landmarken wünschenswert.¹ Alternativ wäre auch der Einsatz einer Kamera zur Erfassung natürlicher Landmarken sinnvoll. Diese könnte bei einer größeren Anzahl dynamischer Hindernisse um den Roboter noch ausreichend Merkmale in der Einsatzumgebung als natürliche Landmarken detektieren.
- Das entwickelte Lokalisationsverfahren könnte darüber hinaus mit einem Kartographieverfahren verbunden werden, so daß die manuelle Erstellung von Kartendaten entfällt. Die optimierten Positionen künstlicher Landmarken könnten nach Erstellung der Karte direkt berechnet und ausgegeben werden. Für die Erhöhung der Akzeptanz durch den Benutzer wäre dies eine wichtige Voraussetzung.

Die vorliegende Arbeit stellt ein neues, zuverlässiges und praktisch einsetzbares Lokalisationsverfahren für mobile Roboter vor. Durch dieses Verfahren können Anwendungen mobiler Roboter in industriellen und nicht-industriellen Umgebungen, wie beim Transport von Gütern, bei der Überwachung und Reinigung von Gebäuden oder als mobile Informations- und Führungssysteme flexibler, sicherer und benutzerfreundlicher gestaltet werden. Für den realen Einsatz mobiler Roboter für unterschiedlichste Serviceaufgaben stellen diese Eigen-

¹ Die höchste Winkelauflösung des SICK LMS290 beträgt 0.25° .

schaften wichtige Grundlagen dar. Durch das vorgestellte Verfahren erschließt sich ein großes Potential an Einsatzmöglichkeiten mobiler Roboter, das bisher nicht oder wenig genutzt wurde und das über die bisherigen Anwendungsszenarien hinausgeht.

Glossar

Das Glossar enthält Begriffe und ihre Definitionen, die in dieser Arbeit verwendet werden. Die Seitenzahl verweist auf die Textstelle, an der der Begriff zum ersten Mal erwähnt wird oder wo er definiert ist.

3-Punkt-Problem	Bestimmung der ↑Roboterlage aus 3 nicht-kolinearen Punkten, S. 93
absolute Lage	↑Roboterlage in einem gewählten Weltkoordinatensystem (↑WKS), S. 32
Aktuator	Technische Einrichtung zur Fortbewegung eines mobilen Roboters (Motor, Lenkung) oder zur Handhabung (Manipulator, Greifer), S. 28
a priori Wissen	Wissen, das zur Lösung eines Problems vorausgesetzt werden kann, beispielsweise zur Verfügung gestellte Kartendaten oder Positions- und Orientierungsschätzungen, S. 54
Encoder	↑Sensor zur Erfassung von Impulsen oder Umdrehungen. In mobilen Robotern häufig zur indirekten Wegstreckenmessung durch Messen der Radumdrehungen (↑Odometrie) eingesetzt, S. 33
Exploration	Erstellen einer ↑Karte während einer selbständigen Erkundungsfahrt des Roboters, S. 28
externe Sensoren	↑Sensoren zur Erfassung physikalischer Größen außerhalb des Roboters, beispielsweise Abstände oder Richtungen zu Objekten, S. 28
Filter	Verfahren zur Verarbeitung fehlerbehafteter Meßwerte und zur Bestimmung eines Schätzwertes. In Rechnern normalerweise ausschließlich digitale Filter, S. 64
false negative landmark	Nicht detektierte ↑Landmarke, die vorhanden ist, weil sie beispielsweise verdeckt ist, S. 108
false positive landmark	Detektierte ↑Landmarke, die nicht vorhanden ist, beispielsweise eine Spiegelung einer existierenden Landmarke, S. 108

FKS	<u>F</u> ahrzeug <u>k</u> oordinatensystem: Koordinatensystem relativ zum Roboter, S. 32
Frequenzmessung	Verfahren zur Abstandsmessung durch Messung der Schwingungsfrequenz zweier Frequenzsignale, S. 58
FTS	<u>F</u> ahrerloses <u>T</u> ransport <u>s</u> ystem: innerbetriebliche \uparrow FTFe zum Transport von Gütern innerhalb und außerhalb von Gebäuden, S. 21
FTF	<u>F</u> ahrerloses <u>T</u> ransport <u>f</u> ahrzeug: flurgebundene Fördermittel mit eigenem Antrieb. Sie sind automatisch gesteuert und besitzen eine eigene Energieversorgung, S. 21
GPS	<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem: satellitengestütztes System zur Bestimmung der Position auf der Erdoberfläche, S. 27
Gyroskop	\uparrow Sensor zur Erfassung von Orientierungsänderungen. Neben mechanischen Gyroskopen gibt es auch piezoelektrische und optische Gyroskopsensoren, S. 33
Hammingabstand	Anzahl verschiedener, korrespondierender Symbole zweier Codeworte, S. 109
Hammingzahl	Minimaler \uparrow Hammingabstand einer Codewortmenge, S. 109
Identifikationspolygon	Konvexes Polygon zur eindeutigen Identifikation einer \uparrow Zelle, S. 109
interne Sensoren	\uparrow Sensoren zur Erfassung physikalischer Größen innerhalb des Roboters, beispielsweise Radumdrehungen, Lenkwinkel, Neigung oder Beschleunigung, S. 28
Kalman-Filter	\uparrow probabilistisches Filterverfahren zur Fusion von Sensordaten. Unter bestimmten Bedingungen (Normalverteilung, Linearität) optimaler Filter. Weitere Kalman-Filter: erweiterte Kalman-Filter (Kalman-Filter mit Linearisierung), iterative Kalman-Filter (Kalman-Filter mit iterativer Anwendung), S. 65

Karte	Datenstruktur, die Positions-, Orientierungsinformationen und weitere relevante Daten zu Landmarken, Freiflächen, Hindernissen und anderem aus der Einsatzumgebung des Roboters enthält, S. 27
Kompaß	↑Sensor zur Erfassung der absoluten Orientierungen, S. 33
Koppelnavigation (engl. Dead-Reckoning)	<p>Mit Koppelnavigation werden alle Verfahren bezeichnet, die eine relative Positionsschätzung durchführen, indem die Positionsänderungen des Fahrzeugs von einem bekannten (vorherigen) Punkt aus gemessen werden. Ein Beispiel für Koppelnavigation ist die ↑Odometrie, die zurückgelegte Wegstrecken ermittelt. Ein anderes Beispiel sind ↑Gyroskop-Systeme, die Orientierungsänderungen messen, Beschleunigungsmesser u. a. Die Koppelnavigation kommt ursprünglich aus der Schifffahrt, wo der Steuermann die Position des Schiffes durch wiederholtes Messen und Aufzeichnung der zurückgelegten Wegstrecken und Richtungen bestimmt.</p> <p>Philip A. Rowe, Jr., 1996: <i>„Navigation Trivia: Why do they say ‚dead reckoning‘? Well, that goes back to the days of early sailing ships. Things that didn‘t move in the water were referred to as ‚dead in the water‘, stationary. The ship‘ s position at any time was related to landmarks or features on the earth which did not move, things that were dead in the water. Hence, dead reckoning refers to calculating the ship‘ s position relative to stationary objects. That term is still used today, even in modern high-speed airplanes. It will probably be used by space navigators too.“</i>, S. 32</p>
Korrespondenzfunktion	Lösung des ↑Korrespondenzproblems, S. 32
Korrespondenzproblem	Das Korrespondenzproblem beschreibt die Aufgabe, detektierte ↑Landmarken den bekannten Landmarken in einer ↑Karte zuzuordnen, S. 34

künstliche Landmarken	↑Landmarken, die für die Lokalisation konstruiert sind und in der Einsatzumgebung angebracht werden, S. 52
Kugelpackungsproblem	Das Kugelpackungsproblem beschreibt die Aufgabe, die dichteste Packung von gleichartigen Kugeln zu bestimmen, so daß sich die Kugeln nicht überschneiden. In der Codierungstheorie werden Lösungen des Kugelpackungsproblems für die Konstruktion optimaler Codes verwendet, S. 102
Landmarke	Merkmal in der Einsatzumgebung des Roboters, das mit einem ↑Sensor eindeutig erfaßt und dessen Lage relativ oder absolut bestimmt werden kann, S. 37
Landmarkencluster	Menge von ↑Landmarken mit einer räumlichen Strukturierung, S. 98
Lokalisation	Verfahren zur Bestimmung der ↑Roboterlage für einen mobilen Roboter, S. 32
LPS	<u>L</u> ocal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem: ein ähnlich dem ↑GPS auf künstlichen Satelliten basierendes System zur Positionsbestimmung, das in Innenräumen angebracht wird, S. 37
mengenbasierte Filter	Filterverfahren (↑Filter), bei dem die Unsicherheiten durch Mengen (Intervalle, Ellipsoide, Polyeder) modelliert werden, S. 67
mobiler Roboter	selbstfahrendes Fahrzeug, S. 21
natürliche Landmarken	↑Landmarken, die in der Einsatzumgebung vorhanden sind und neben ihrem eigentlichen Nutzen zur ↑Lokalisation verwendet werden können, S. 52
Navigation	Softwarekomponente eines ↑mobilen Roboters zur Bewegung des Roboters von einem gegebenen Ausgangspunkt zu einem gewählten Zielpunkt entlang einer festgelegten ↑Trajektorie, S. 28
Odometrie	↑Dead-Reckoning-Verfahren, bei dem zur relativen Positionsschätzung die zurückgelegte Wegstrecke gemessen wird. Odometrie wird häufig in Form von Encodern realisiert, die die Radumdrehungen eines Fahrzeugs messen, S. 28

Pilot	Steuerkomponente für die Antriebs- und Lenkmotoren eines ↑mobilen Roboters, S. 28
Phasenmessung	Verfahren zur Abstandsbestimmung durch Messung der Phasenverschiebung zweier Frequenzsignale, S. 57
probabilistische Filter	Filterverfahren (↑Filter), bei dem die Unsicherheiten durch Methoden aus der Wahrscheinlichkeitsrechnung (z. B. Verteilungsfunktionen) modelliert werden, S. 64
Pulslaufzeitmessung (engl. „trilateration“)	Verfahren zur Abstandsbestimmung auf Basis von Laufzeitmessung eines Signals, S. 59
relative Lage	↑Roboterlage relativ zu einem bekannten Punkt im Fahrzeugkoordinatensystem (↑FKS), S. 32
Roboterlage	Die Roboterlage bezeichnet die Position und Orientierung $[x \ y \ z \ \Theta \ \Phi \ \Psi]^T$ des Roboters in der Einsatzumgebung, S. 32
Roboterorientierung	Die Roboterorientierung bezeichnet nur die Orientierung $[\Theta \ \Phi \ \Psi]^T$ des Roboters in der Einsatzumgebung, S. 32
Roboterposition	Die Roboterposition bezeichnet nur die Position $[x \ y \ z]^T$ des Roboters in der Einsatzumgebung, S. 32
Sensor	Technisches Gerät zur Umwandlung von physikalischen, chemischen oder technischen Größen in elektrische Größen, S. 33
Serviceroboter	<p>International Federation of Robotics (IFR), 1994:</p> <p><i>„A robot which operates semi or fully autonomously to perform services useful to the well being of humans and equipment, excluding manufacturing operations.“</i></p> <p>Schraft, Rolf Dieter; Volz, Hansjörg: Serviceroboter: <i>Innovative Technik in Dienstleistung und Versorgung</i>, Springer-Verlag, 1996:</p> <p><i>„Ein Serviceroboter ist eine freiprogrammierbare Bewegungseinrichtung, die teil- oder vollautomatisch Dienstleistungen verrichtet. Dienstleistungen sind dabei Tätigkeiten, die nicht der direkten industriellen Erzeugung von Sachgütern, sondern</i></p>

der Verrichtung von Leistungen an Menschen und Einrichtungen dienen.“, S. 22

Simplex-Code	Optimaler Code, der zur Korrektur von Fehlern bei der Datenübertragung eingesetzt wird, S. 103
Startup-Problem	Bestimmung der initialen ↑Roboterlage ohne Vorwissen bezüglich der Position und Orientierung des Roboters, S. 33
TDC	<u>T</u> ime- <u>D</u> igital- <u>C</u> onverter: elektronisches Bauteil zur Messung extrem kurzer Zeitintervalle, S. 60
Trajektorie	Fahrroute des Roboters mit Beschreibung der Kurvenformen, Kontrollpunkte und Geschwindigkeitenprofile, S. 29
Triangulation	Verfahren zur Abstandsbestimmung auf Basis von Winkelmessungen in einem Dreieck, S. 56
WKS	<u>W</u> elt <u>k</u> oordinatensystem: Koordinatensystem relativ zu einem festen Punkt in der Einsatzumgebung, S. 32
Zelle	Konvexer Bereich der Einsatzumgebung des Roboters, S. 96

Literatur

- Alefeld 74 Alefeld, G.; Herzberger, J.: *Einführung in die Intervallrechnung*, Reihe Informatik, Bd. 12, Wissenschaftsverlag, Mannheim, Deutschland, 1974
- Aldon 95 Aldon, M. J.; Benoit, M.: *Localization System of the Hospital Transport Robot FIRST*, IFAC, Helsinki, Espoo, Finland, 12.–14. Juni 1995
- Arras 96 Arras, Kai Oliver; Vestli, Sjur J.; Tschichold-Gürman, Nadine N.: *Echtzeitfähige Merkmalsextraktion und Situationsinterpretation aus Laserscannerdaten*, Autonome Mobile Systeme (AMS), S. 57–66, München, Deutschland, 14.–15. Oktober 1996
- Arras 97 Arras, Kai Oliver; Siegwart, Roland Y.: *Feature Extraction and Scene Interpretation for Map-Based Navigation and Map Building*, Proceedings of SPIE 3210, 1997
- Arsénio 98 Arsénio, Artur; Riberiro, M. Isabel: *Active Range Sensing for Mobile Localization*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 1066–1071, Victoria, B. C., Kanada, 13.–17. Oktober, 1998
- ART 98 ART: *Automated and Robotics-based Techniques: New Solutions for Road Construction and Maintenance*, Final Report, Project RO-97-SC1007, DGVII Transport Research Program, 1998
- Atiya 93 Atiya, Sami; Hager, Gregory D.: *Real-Time Vision-Based Robot Localisation*, Proceedings of the IEEE Transactions on Robotics and Automation, Bd. 9, Nr. 6, S. 785–800, Dezember 1993
- Atiya 95 Atiya, Sami: *Navigation von mobilen Robotern mit Hilfe bildgebender Sensoren: Ein Mengenbasierter Ansatz*, Dissertation, Sicherheitstechnische Regelungs- und Meßtechnik an der Bergischen Universität Wuppertal, Fortschrittberichte VDI, Reihe 8, Nr. 456, VDI Verlag Düsseldorf, Deutschland, 1995
- Bar-Schalom 88 Bar-Schalom, Yaakov; Fortmann, Thomas E.: *Tracking and Data Association*, Boston, Massachusetts, Academic Press Inc., USA, 1988

- Baum 98 Baum, Winfried; Bayer, Gerhard; Dahlkemper, Jörg; Fritz, Matthias; Halter, Markus; Rohrmoser, Bertram: *Leitdrahtlose Navigation von Baumaschinen, Technik und Technologien des Straßenbaus*, 3. Internationales Symposium Technik und Technologie des Straßenbaus, München, Deutschland, 3. April 1998
- Becht 97 Becht, M.; Muscholl, M.; Levi, P.: *Ein Framework für Kooperationsverfahren zwischen Roboteragenten*, Autonome Mobile Systeme (AMS), S. 166–177, Stuttgart, Deutschland, 6.–7. Oktober 1997
- Becker 95 Becker, Craig; Salas, Joaquin; Tokusei, Kentaro; Latombe, Jean-Claude: *Reliable Navigation Using Landmarks*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 401–406, Nagoya, Aichi, Japan, 1995
- Besl 89 Besl, Paul J.: *Active Optical Range Imaging Sensors*, Advances in Machine Vision, Sanz, Jorge L. C., S. 1–63, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1989
- Betke 94 Betke, Margrit; Gurvits, Leonid: *Mobile Robot Localization Using Landmarks*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 135–142, München, Deutschland, 1994
- Boley 96 Boley, Daniel L.; Steinmetz, Erik S.; Sutherland, Karen T.: *Robot Localization from Landmarks using Recursive Total Least Squares*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1381–1386, Minneapolis, Minnesota, USA, April 1996
- Bonnifait 96 Bonnifait, Ph.; Garcia, G.: *A Multisensor Localization Algorithm for Mobile Robots and its Real-Time Experimental Validation*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1395–1400, Minneapolis, Minnesota, USA, April 1996
- Borenstein 96a Borenstein J.; Everett, H. R.; Feng, L.: *Where am I? Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*, University of Michigan, USA, April 1996

- Borenstein 96b Borenstein, J.; Everett, B.; Feng, L.: *Navigating Mobile Robots: Systems and Techniques*, A. K. Peters, Ltd., Wellesley, Massachusetts, USA, 1996
- Borenstein 96c Borenstein, Johann; Feng, Liqiang: *Measurement and Correction of Systematic Odometry Errors in Mobile Robots*, IEEE Transactions on Robotics and Automation (RA), Bd. 12, Nr. 5, Oktober 1996
- Borenstein 97 Borenstein, J.; Everett, H. R.; Feng, L.; Wehe, D.: *Mobile Robot Positioning – Sensors and Techniques*, Invited paper for the Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots, Bd. 14, Nr. 4, S. 231–249, April 1997
- Bronstein 89 Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*, BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1989
- Brown 96 Brown, Robert Grover; Hwang, Patrick Y. C.: *Introduction to random signals and applied Kalman filtering*, 3. Auflage, John Wiley&Sons, New York, 1996
- Bulata 96 Bulata, Hanna; Devy, Michel: *Incremental Construction of a Landmark-based and Topological Model of Indoor Environments by a Mobile Robot*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1054–1060, Minneapolis, Minnesota, USA, April 1996
- Burgard 97a Burgard, Wolfram; Fox, Dieter; Thrun, Sebastian: *Active Mobile Robot Localization*, Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), Nagoya, Aichi, Japan, 23.-29. August 1997
- Burgard 97b Burgard, Wolfram; Fox, Dieter; Hennig, Daniel: *Fast Grid-based Position Tracking for Mobile Robots*, Proceedings of the 21th German Conference on Artificial Intelligenz, Springer Verlag (KI), Deutschland, 1997

- Burgard 98a Burgard, Wolfram; Derr, Andreas; Cremers, Armin B.: *Integrating Global Position Estimation and Position Tracking for Mobile Robots: The Dynamic Markov Localization Approach*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Victoria, B. C., Kanada, 13.–17. Oktober, 1998
- Burgard 98b Burgard, Wolfram; Cremers, Armin B.; Fox, Dieter; Hähnel, Dirk; Lakemeyer, Gerhard; Steiner, Walter; Thrun, Sebastian: *The Interactive Museum Tour-Guide Robot*, Proceedings of the Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence (AAAI), Madison, Wisconsin, 1998
- Chen 93 Chen, C. H.: *Handbook of pattern recognition & computer vision*, Kapitel 4.4, S. 769–801, World Scientific Publication, Singapore, 1993
- Ciccimaro 98 Ciccimaro, D. A.; Everett, H. R.; Gilbreath, G. A.; Tran, T. T.: *An Automated Security Response Robot*, SPIE Proceedings 3525: Mobile Robots XIII and Intelligent Transportation Systems (SPIE), Boston, Massachusetts, 1.–5. November 1998
- Conway 99 Conway, J. H.; Sloane, N.J.A.: *Sphere Packings, Lattices and Groups*, 3. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1999
- Cord 95 Cord, Thomas; Li, Sheng; Hanczak, Andrzej: *Mobile Autonome Roboter zum Transport von Containern*, Autonome Mobile Systeme (AMS), S. 1–9, Karlsruhe, Deutschland, 30. November.–1. Dezember 1995
- Cord 97 Cord, Thomas: *Absolute Lokalisation mobiler Roboter durch Codierung der Einsatzumgebung*, Dissertation, Universität Karlsruhe, Infix, Sankt Augustin, Deutschland, Juni 1997
- Cover 87 Cover, Thomas M.; Gopinath, B.: *Open problems in communication and computation*, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1987

- Cox 88 Cox, Ingemar J.: *Blanche: An autonomous robot vehicle for structured environments*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 978–982, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 24.–29. April 1988
- Cox 90 Cox, Ingemar J.: *Blanche: Position Estimation for an Autonomous Robot Vehicle*, Autonomous Robot Vehicles, Cox, J. Ingemar; Wilfong, Gordon T., S. 221–228, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1990
- Corre 92 Corre, J. F. Le; Garcia, G.: *Real Time Determination of the Location and Speed of Mobile Robots Running on Non-Planar Surfaces*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 2594–2599, Nice, Frankreich, April 1992
- Dixon 97 Dixon, Jonathan; Henlich, Oliver: *Mobile Robot Navigation*, Final Report, 10. Juni 1997
- Dodds 97 Dodds, Zachary; Hager, Gregory D.: *A Color Interest Operator for Landmark-based Navigation*, Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, S. 655–660, Providence, Rhode, Island, 27.–28. Juli 1997
- Duckett 99 Duckett, Tom; Nehmzow, Ulrich: *Knowing Your Place in the Real World*, Proceedings of Eurobot (Eurobot), Zürich, Schweiz, 6.–8. September 1999
- Duda 73 Duda, Richard O.; Hart, Peter E.: *Pattern Classification and Scene Analysis*, Stanford Research Institute, Menlo Part, California, Wiley, New York, USA, 1973
- Dudek 98 Dudek, Gregory; Romanik, Kathleen; Whitesides, Sue: *Global localization: Localizing a Robot with Minimum Travel*, SIAM Journal on Computing, Bd. 27, Nr. 2, S. 583–604, April 1998
- Durrant-Whyte 95 Durrant-Whyte, Hugh; Bell, Edward; Avery, Philip: *The Design of a Radar-Based Navigation-System for Large Outdoor Vehicles*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 764–769, Nagoya, Aichi, Japan, 1995

- Endres 98 Endres, H.; Feiten, W.; Lawitzky, G.: *Field Test of a Navigation System: Autonomous Cleaning in Supermarkets*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Leuven, Belgien, 16.–21. Mai 1998
- Evans 94 Evans, John M.: *HelpMate®: An Autonomous Mobile Robot Courier for Hospitals*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 1695–1700, München, Deutschland, 1994
- Everett 95 Everett, H. R.: *Sensors for Mobile Robots: Theory and Applications*, A. K. Peters, Ltd., Wellesley, Massachusetts, USA, 1995
- Flores 60 Flores, I.; Grey, L.: *Optimization of Reference Signals for Character Recognition Systems*, IRE Transactions on Electronic Computers, März 1960
- Fox 98a Fox, Dieter; Burgard, Wolfram; Thrun, Sebastian: *Active Markov Localization for Mobile Robots*, Robotics and Autonomous Systems, Bd. 25, S. 195-207, 1998
- Fox 98b Fox, Dieter; Burgard, Wolfram; Thrun, Sebastian; Cremers, Armin B.: *Position Estimation for Mobile Robots in Dynamic Environments*, Proceedings of the 5. National Conference on Artificial Intelligence (AAAI), Madison, Wisconsin, USA, 1998
- Fox 98c Fox, Dieter: *Markov Localization: A Probabilistic Framework for Mobile Robot Localization and Navigation*, Dissertation, Universität Bonn, Deutschland, 1998
- Fox 99 Fox, Dieter; Burgard, Wolfram; Dellaert, Frank; Thrun, Sebastian: *Monte Carlo Localization: Efficient Position Estimation for Mobile Robots*, Proceedings of the 16. Conference on Artificial Intelligence (AAAI), Orlando, Florida, USA, 1999
- FROG 2000 *ParkShuttle Kralingse Zoom – Rivium*, Capelle a/d IJssel, Niederlande, August 2000
- Gächter 96 Gächter, Stefan; Tschirky, Maurus: *Berührungslose Distanzmessung – ein Technologieüberblick*, Diplomarbeit, NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, Deutschland, 1996

- Göpel 92 Göpel, W.; Hesse, J.; Zemel, J. N.: *Sensors – A Comprehensive Survey*, Volume 6, Optical Sensors, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, Deutschland, 1992
- Götting 98 *Laserscannersystem mit Positionierung HG-435-A*, Götting KG, Deutschland, 1998
- Gonzalez 92 Gonzalez, Javier; Stentz, Anthony; Ollero, Anibal: *An Iconic Position Estimator for a 2D Laser Range Finder*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 2646–2651, Nice, Frankreich, April 1992
- Greiner 96 Greiner, Russel; Isukapalli, Ramana: *Learning to Select Useful Landmarks*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, S. 437–449, Juni 1996
- Guibas 95 Guibas, Leonidas J.; Motwani, Rajeev: *The Robot Localisation Problem*, Algorithmic Foundations of Robotics, A. K. Peters, S. 569–282, 1995
- Gutmann 96 Gutmann, Jens-Steffen: *Vergleich von Algorithmen zur Selbstlokalisierung eines mobilen Roboters*, Diplomarbeit an der Universität Ulm, Fakultät für Informatik, Deutschland, 1996
- Gutmann 98 Gutmann, Jens-Steffen; Burgard, Wolfram; Fox, Dieter; Konolige, Kurt: *An Experimental Comparison of Localisation Methods*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Victoria, B. C., Kanada, 13.–17. Oktober, 1998
- Hager 93 Hager, Gregory D.; Engelson, Sean P.; Atiya, Sami: *On Comparing Statistical and Set-Based Methods in Sensor Data Fusion*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 352–358, Scottsdale, Atlanta, USA, Mai 1993
- Hales 98 Hales, Thomas C.: *An Overview of the Kepler Conjecture*, Department of Math, University of Michigan, USA, 1998

- Hanebeck 96a Hanebeck, Uwe D.; Schmidt, Günther: *Set Theoretic Localization of Fast Mobile Robots Using an Angle Measurement Technique*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1387–1393, Minneapolis, Minnesota, USA, April 1996
- Hanebeck 96b Hanebeck, U. D.; Schmidt, G.: *Localization of Fast Mobile Robots Based on an Advanced Angle-Measurement Technique*, IFAC Control Engineering Practice, Bd. 4, Nr. 8, S. 1109–1118, 1996
- Hanebeck 97a Hanebeck, U. D.: *Lokalisierung eines mobilen Roboters mittels effizienter Auswertung von Sensordaten und mengenbasierter Zustandsschätzung*, Dissertation, Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik der Technischen Universität München, Fortschrittberichte VDI, Reihe 8, Nr. 643, VDI Verlag Düsseldorf, Deutschland, 1997
- Hanebeck 97b Hanebeck, U. D.; Fischer, C.; Schmidt, G.: *ROMAN A Mobile Robotic Assistant for Indoor Service Applications*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 518–525, Grenoble, Frankreich, 1997
- Hartigan 75 Hartigan, John A.: *Clustering Algorithms*, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 1975
- Hinkel 89 Hinkel, Ralf; Weidmann, Michael: *First Results in Real Time Estimation with a Laser Radar*, Autonome Mobile Systeme (AMS), S. 126–136, München, Deutschland, 30. November 1989
- Holenstein 92 Holenstein, Alois A.; Müller, Markus; Badreddin, Essam: *Mobile Robot Localisation in a Structured Environment Cluttered with Obstacles*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 2576–2581, Nice, Frankreich, 1992
- Holland 95 Holland, J. M.; Martin, A.; Smurlo, R.P.; Everett, H.R.: *MDARS Interior Platform*, Association of Unmanned Vehicle Systems, 22nd Annual Symposium and Exhibition (AUVS), Washington, D.C., USA, 10.–12. Juli, 1995.

- Horn 95a Horn, Joachim; Schmidt, Günther: *Continuous Localization of a Mobile Robot Based on 3D-Laser-Range-Data, Predicted Sensor Images and Dead-Reckoning*, Robotics and Autonomous Systems, Special Issue „Research on Autonomous Mobile Robots“, Bd. 14, S. 99–118, 1995
- Horn 95b Horn, Joachim; Schmidt, Günther: *Continuous Localization for Long-Range Indoor Navigation of Mobile Robots*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 387–394, Nagoya, Aichi, Japan, 1995
- IBEO 98 *LD Family*, IBEO Lasertechnik, 1998
- Kalman 60 Kalman, R.E.: *A new approach to linear filtering and prediction problems*, Transactions ASME, Series D, Journal of Basic Engineering, S. 35–45, Bd. 82, März 1960
- Karch 98 Karch, Oliver; Noltemeier, Hartmut: *Using Polygon Distances for Localization*, Proceedings of the IEEE Conference of the Industrial Electronics Society, Aachen, Deutschland, August 1998
- Karl 90 Karl, G.: *Eine 3D-Laserentfernungskamera zur Bewegungsführung mobiler Roboter*, Dissertation, Technische Universität München, Deutschland, 1990
- Klaus-Werner 99 Klaus-Werner, Jörg; Gattung, Torsten; Weber, Joachim: *Supporting Mobile Robot Localization By Visual Bar Code Recognition*, Proceedings of the Conference on Robotics and Applications (RA), Santa Barbara, Kalifornien, USA, 28–30. Oktober 1999
- Kleinberg 94 Kleinberg, Jon M.: *The Localization Problem for Mobile Robots*, Proceedings of the 35th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, Santa Fe, New Mexico, 20.–22. November 1994
- Krotkov 89 Krotkov, E.: *Mobile Robot Localization Using a Single Image*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 978–983, Scottsdale, Arizona, USA, Mai 1989
- Kuritsky 90 Kuritsky, Morris M.; Goldstein, Murray S.: *Inertial Navigation, Autonomous Robot Vehicles*, Cox, J. Ingemar; Wilfong, Gordon T., S. 96–116, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1990

- Lallement 98 Lallement, A.; Siadat, A.; Dufaut, M.; Husson, R.: *Laser-Vision Cooperation for Map Building and Landmarks Recognition*, Proceedings of the ISIC/CIRA/ISAS Joint Conference, S. 387–392, Gaithersburg, Maryland, USA, 14.–17. September 1998
- Latombe 91 Latombe, Jean-Claude: *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publisher, 1991
- Lawson 74 Lawson, Charles L.; Hanson, Richard J.: *Solving Least Squares Problems*, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1974
- Leonard 91 Leonard, J. John; Durrant-Whyte, Hugh F.: *Mobile Robot Localisation by Tracking Geometric Beacons*, Proceedings of IEEE Transactions on Robotics and Automation (ICRA), Bd. 7, Nr. 3, S. 376–382, Los Alamitos, California, USA, Juni 1991
- Leuze 98 *rotoScan*, Leuze-Lumiflex Inc., Deutschland, 1998
- Levi 94 Levi, P.; Bräunle, Th.; Muscholl, M.; Rausch, A.: *Architektur und Ziele der Kooperativen Mobilen Robotersysteme Stuttgart*, Autonome Mobile Systeme (AMS), S. 262–273, Stuttgart, Deutschland, 13.–14. Oktober 1994
- Lu 97 Lu, Feng; Milios, Evangelos: *Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Bd. 18, S. 249–275, 1997
- MacKenzie 94 MacKenzie, Paul; Dudek, Gregory: *Precise Positioning Using Model-Based Maps*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1615–1621, San Diego, California, USA, 8.–13. Mai 1994
- MacWilliams 77 MacWilliams, F. J.; Sloane, N. J. A.: *The Theory of Error-Correcting Codes*, Mathematical Library, Bd. 16, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, Nord-Holland, 1977
- Maurer 80 Maurer, Brigitte: *Die visuelle Lokalisation der Honigbiene (Apis Mellifera) anhand eines experimentell variierbaren Landmarkenpanoramas*, Dissertation, Universität Zürich, Schweiz, 1980
- Maybeck 79 Maybeck, Peter S.: *Stochastic models, estimation and control*, Volume 1, Academic Press, New York, USA, 1979

- McGillam 88 McGillam, Clare D.; Rappaport, Theodore S.: *Infra-red Location System for Navigation of Autonomous Vehicles*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1236–1238, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 24.–29. April 1988
- Melissen 97 Melissen, Hans: *Packing and Covering with Circles*, Dissertation, Nr. 1470, Den Haag, Niederlande, 1997
- Miller 90 Miller, Gabriel L.; Wagner, Eric R.: *An Optical Rangefinder for Autonomous Robot Cart Navigation*, Autonomous Robot Vehicles, Cox, J. Ingemar; Wilfong, Gordon T., S. 122–134, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1990
- Moore 79 Moore, Ramon E.: *Methods and Applications of Interval Analysis*, SIAM, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 1979
- Nguyen 95 Nguyen, Hoa G.; Blackburn, Michael R.: *A Simple Method for Range Finding via Laser Triangulation*, Technical Document 2734, Januar 1995
- Nishizawa 95 Nishizawa, Toshihiro; Ohya, Akihisa; Yuta, Shin'ichi: *An Implementation of On-board Position Estimation for a Mobile Robot*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1423–1428, Nagoya, Aichi, Japan, 1995
- Pampagnis 93 Pampagnis, Luc-Henri; Peyret, François; Garcia, Gaëtan: *Architecture of a GPS-based Guiding System for Road Compaction*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 2833–2839, Leuven, Belgien, 16.–21. Mai 1998
- Pears 93 Pears, Nicolas; Probert, Penelope: *An Optical Range Sensor for Mobile Robot Guidance*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 659–664, Scottsdale, Atlanta, USA, Mai 1993
- Pears 96 Pears, Nicolas: *An Intelligent Active Range Sensor for Vehicle Guidance: System Overview*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 81–88, Minneapolis, Minnesota, USA, April 96

- Petriu 96 Petriu, E. M.; Ionescu, D.; Petriu, D. C.; Yeung, S. K.; Lavoie, P.; Trif, N.: *Absolute Position Measurement Applications Of Pseudo-Random Encoding*, IEEE International Workshop on Emergent Technologies for Instrumentation and Measurement, S. 119–126, Como, Italien, 1996
- Pöppe 99 Pöppe, Christoph von: *Der Beweis der Keplerschen Vermutung*, Spektrum der Wissenschaft, S.10–14, Heidelberg, Deutschland, April 1999
- Poussart 89 Poussart, Denis; Laurendeau, Denis: *3-D Sensing for Industrial Computer Vision*, Advances in Machine Vision, Sanz, Jorge L. C., S. 123–59, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1989
- Praßler 98 Praßler, Erwin; Dillmann, Rüdiger; Kuntze, Helge-Björn: *Robotik in Deutschland*, Shaker Verlag, Aachen, Deutschland, 1998
- Press 88 Press, William H.; Flannery, Brian P.; Teukolsky, Saul A.; Vetterling, William T.: *Numerical Recipes in C*, Cambridge University Press, New York, USA, 1988
- Rausch 95 Rausch, W. A.; Oswald, N.; Bräunle, Th.; Levi, P.: *Kooperation mobiler Roboter in COMROS*, Autonome Mobile Systeme (AMS), S. 220–229, Karlsruhe, Deutschland, 30. Oktober–1. Dezember 1995
- Rüger 87 Rüger, W.; Pietschner, J.; Regensburger, K.: *Photogrammetrie: Verfahren und Geräte zur Kartenherstellung*, 5. Auflage, Verlag für Bauwesen, Berlin, Deutschland, 1987
- Ruotsalainen 2000 Ruotsalainen, E.R.; Rahkonen, T.; Kostamovaara J.: *An Integrated Time-to-Digital Converter with 30ps Single-Shot Precision*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Bd. 35, Nr. 10, S. 1507–1510, Oktober 2000
- Rupp 98 Rupp, Torsten; Cord, Thomas; Levi, Paul: *Objekterkennung und Schutzfeldüberwachung mit einem Laserscanner für eine neue Generation von Müllfahrzeugen*, Autonome Mobile Systeme (AMS), S. 255–262, Karlsruhe, Deutschland, 30. November–1. Dezember 1998

- Rupp 2000 Rupp, T.; Levi, P.: *Optimized Landmark Arrangement for Absolute Localization – A Practical Approach*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 448–453, Takamatsu, Japan, 1.–3. November 2000
- Sabatini 94 Sabatini, Angelo M.; Benedetto, Orazio Di: *Towards a Robust Methodology for Mobile Robot Localisation Using Sonar*, Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, (ICRA), S. 3142–3148, Bd. 4, San Diego, Kalifornien, USA, 8.–13. Mai 1994
- Sachs 92 Sachs, Lothar: *Angewandte Statistik: Anwendung statistischer Methoden*, 7. Auflage, Springer-Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1992
- Schürmann 94 Schürmann, W.; Wetteborn, H.: *PLS – Personen- und Kollisionschutz für FTS*, Tagungsband zur FTS-Fachtagung, Dortmund, Deutschland, 28. September 1994
- Schraft 96 Schraft, Rolf Dieter; Volz, Hansjörg: *Serviceroboter: Innovative Technik in Dienstleistung und Versorgung*, Springer Verlag, 1996
- Schraft 98 Schraft, Rolf D.; Schmierer, Gernot: *Serviceroboter: Produkte, Szenarien, Visionen*, Springer Verlag, Heidelberg, Deutschland, 1998
- Schweppe 68 Schweppe, Fred C.: *Recursive State Estimation: Unknown but Bounded Errors and System Inputs*, IEEE Transactions on Automatic Control, Bd. AC-13, Nr. 1, Februar 1968
- Schweppe 73 Schweppe, Fred C.: *Uncertain dynamic systems*, Prentice-Hall Inc., Electrical Engineering Series, USA, 1973
- SICK 95 *PLS und PLS-Benutzer-Software Tastender Laser-Scanner*, SICK opto electronic, Deutschland, 1995
- SIMAN 96 *Operating Instructions for RoboSense Type-A Systems*, SIMAN, Israel, 1996
- Simon 2000 Simon, Dan: *Kalman Filtering*, Innovatia Software, 2000
- Sloane 96 Sloane, N. J. A.: *Kugelpackungen im Raum*, Moderne Mathematik, G. Faltings, Spektrum, Akademischer Verlag, Heidelberg, Deutschland, S. 112–123, 1996

- Sloane 98 Sloane, N. J. A.: *The Sphere Packing Problem*, Documenta Mathematica, Extra Volume ICM, S. 1–9, 1998
- Song 94 Song, Hong Y.; Golomb, Solomon W.: *Some New Constructions for Simplex Codes*, IEEE Transactions on Information Theory, Bd. 40, Nr. 2, S. 504–507, März 1994
- Späth 83 Späth, Helmuth: *Cluster-Formation und -Analyse*, Universität Oldenbourg, Oldenbourg Verlag GmbH, München, Deutschland, 1983
- Stella 95 Stella, Ettore; Distanto, Arcangelo: *Self-location of a mobile robot by estimation of camera parameters*, Robotics and Autonomous Systems, Bd. 15, S. 179–187, 1995
- Stewart 99 Stewart, Ian von: *Wie viele kreisförmige Kekse passen auf ein Kuchenblech*, Spektrum der Wissenschaft, S. 112–114, Heidelberg, Deutschland, März 1999
- Sugihara 88 Sugihara, Kokichi: *Some location problems for robot navigation using a single camera*, Computer Vision, Graphics, and Image Processing, Bd. 42, Nr. 1, S. 112–129, 1988
- Sutherland 93a Sutherland, Karen T.; Thompson, William B.: *Inexact Navigation*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1–7, Scottsdale, Atlanta, USA, Mai 1993
- Sutherland 93b Sutherland, Karen T.: *Landmark Selection for Accurate Navigation*, Proceedings of DARPA Image Understanding Workshop, 1993
- Sutherland 94 Sutherland, Karen T.; Thompson, William B.: *Localizing in Unstructured Environments: Dealing with the Errors*, IEEE Transactions on Robotics and Automation (RA), Bd. 10, Heft 6, S. 740–754, Dezember 1994
- Talluri 92 Talluri, Raj; Aggarwal, J. K.: *Position Estimation for an Autonomous Mobile Robot in an Outdoor Environment*, IEEE Transactions on Robotics and Automation (RA), Bd. 8, Nr. 5, S. 573–584, Oktober 1992

- Talluri 93 Talluri, Raj; Aggarwal, J. K.: *Position Estimation Techniques for a Mobile Robot – A Review*, Handbook of Pattern Recognition and Computer Vision, S. 769–801, C. H. Chen, World Scientific Publication, Singapore, 1993
- Talluri 96 Talluri, Raj; Aggarwal, J. K.: *Mobile Robot Self-Location Using Model-Image Feature Correspondence*, IEEE Transactions on Robotics and Automation (RA), Bd. 12, Nr. 1, S. 63–77, Februar 1996
- Tashiro 95 Tashiro, Kenji; Ota, Jun; Lin, Yeuan C.; Arai, Tamio: *Design of the Optimal Arrangement of Artificial Landmarks*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 407–413, Nagoya, Aichi, Japan, 1995
- Thrun 96 Thrun, Sebastian: *A Bayesian Approach to Landmark Discovery and Active Perception in Mobile Robot Navigation*, CMU-CS-96-122, Carnegie Mellon University, Pittsburg, USA, 1996
- Tsumara 93 Tsumara, Toshihiro; Okubo, Hiroshi; Komatsu, Nobuo: *A 3-D Position and Attitude Measurement System Using Laser Scanners and Corner Cubes*, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), S. 604–611, Yokohama, Japan, 26.–30. Juli 1993
- VDI 2510 VDI 2510: *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*, VDI-Richtlinie, Deutschland, November 1992
- VxWorks 97 VxWorks® *Programmer's Guide 5.3.1 und VxWorks® Reference Manual V5.3.1*, WindRiver Systems Inc., 1997
- Weiß 94 Weiß, Gerhard; Wetzler, Christopher; Puttkamer, Ewald von: *Positions- und Orientierungsbestimmung von bewegten Systemen in Gebäuden durch Korrelation von Laserradardaten*, Autonome Mobile Systeme (AMS), S. 55–64, Stuttgart, Deutschland, 13.–14. Oktober 1994
- Weiß 95 Weiß, G.; Puttkamer, E. v: *A Map Based on Laserscans without Geometric Interpretation*, IAS-4, S. 403–407, Karlsruhe, Deutschland, März 1995

- Welch 95 Welch, Greg; Bishop, Gary: *An Introduction to the Kalman Filter*, Department of Computer Science, University of North Carolina, TR95-041, Chapel Hill, USA, 1995
- Witsenhausen 68 Witsenhausen, H. S.: *Sets of Possible States of Linear Systems Given Perturbed Observations*, IEEE Transactions on Automatic Control, Oktober 1968
- Xu 95 Xu, H.; Van Brussel, H.; Schutter, J. De; Vandorpe, J.: *Sensor Fusion and Positioning of the Mobile Robot LiAS*, Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Systems, S. 246–253, Karlsruhe, Deutschland, 27.–30. März 1995
- Yagi 95 Yagi, Yasui; Nishizawa, Yoshimitsu; Yachida, Masahiko: *Map-Based Navigation for a Mobile Robot with Omnidirectional Image Sensor COPIS*, IEEE Transactions on Robotics and Automation (RA), Bd. 11, Nr. 5, S. 634–648, Oktober 1995
- Yanco 98 Yanco, Holly A.: *Integrating robotic research: A survey of robotic wheelchair development*, Spring Symposium on Integrating Robotic Research (AAAI), Stanford, Kalifornien, USA, März 1998
- Zhang 92 Zhang, Hong: *Optimal Sensor Placement*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), S. 1825–1830, Nice, Frankreich, 1992
- Zwillinger 96 Zwillinger, Daniel; Krantz, Steven G.; Rosen, Kenneth, H.: *Standard Mathematical Tables and Formulae*, CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, USA, 1996

Lebenslauf

Torsten Rupp, geboren am 19.01.1968 in Dielheim

1974-1979 Grund- und Hauptschule Dielheim

1979-1985 Realschule Wiesloch/Waibstadt

1985-1988 Technisches Gymnasium Sinsheim

1989-1996 Studium der Informatik an der Universität Karlsruhe

1996 Diplomarbeit bei Prof. Dr.-Ing. U. Rembold mit dem Thema: „Kollisionsvermeidung mobiler Roboter durch koordinierte, sensorgeführte Manöver“

1996-2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Dr. rer. nat. P. Levi am Forschungszentrum Informatik (FZI) an der Universität Karlsruhe