

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung und Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	2
<b>2 Ausgangssituation</b>	<b>5</b>
2.1 Definitionen und Begriffe . . . . .	5
2.2 Anwendungsfelder für multifunktionale mobile Serviceroboter . . . . .	5
2.2.1 Erfüllung von Haushaltsaufgaben . . . . .	6
2.2.2 Anwendungen im gewerblichen Umfeld . . . . .	7
2.2.3 Erkunden und Bergen bei Katastrophen . . . . .	8
2.2.4 Erkundung und Probenentnahme bei Weltraummissionen . . . . .	8
2.2.5 Bewertung der Anwendungsfelder und Abgrenzung der Arbeit . . . . .	9
<b>3 Analyse der Aufgabenstellung und Ableitung von Anforderungen</b>	<b>13</b>
3.1 Anforderungen für Navigation und Manipulation . . . . .	13
3.2 Anforderungen für Visualisierung und Interaktion . . . . .	14
3.3 Anforderungen für die Planung von Aktionen . . . . .	14
3.4 Weitere Anforderungen . . . . .	15
<b>4 Stand der Technik</b>	<b>17</b>
4.1 3-D-Tiefenbildkameras . . . . .	17
4.1.1 Kameras nach dem Prinzip der Phasenverschiebung . . . . .	17
4.1.2 Kameras nach dem Prinzip der Triangulation . . . . .	20
4.1.3 Bewertung der 3-D-Tiefenbildkameras . . . . .	22
4.2 Umgebungserfassung in der Servicerobotik . . . . .	23
4.2.1 3-D-Umgebungserfassung in der Teleoperation . . . . .	23
4.2.2 3-D-Umgebungserfassung in der autonomen Robotik . . . . .	25
4.3 Einzeltechnologien für 3-D-Umgebungserfassung . . . . .	28
4.3.1 Vorverarbeitung . . . . .	28
4.3.2 Nachbarschaftssuche in Punktwolken . . . . .	30
4.3.3 Normalenvektoren . . . . .	30
4.3.4 Rauschfilter . . . . .	31
4.3.5 3-D-Merkmale . . . . .	32
4.3.6 Registrierung . . . . .	33
4.3.7 Segmentierung . . . . .	34
4.3.8 Oberflächenrekonstruktion . . . . .	36
4.4 Kartenrepräsentationen . . . . .	36
4.5 Übertragung von 3-D-Daten über Netzwerke . . . . .	38

4.6	Ansätze zum teil-autonomen Betrieb . . . . .	39
4.7	Folgerungen aus dem Stand der Technik . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Entwurf des Verfahrens zur 3-D-Umgebungserfassung</b>	<b>43</b>
5.1	Anwendungsszenario und Zielrobotersystem . . . . .	43
5.2	Konzeption des Verfahrens zur 3-D-Umgebungserfassung . . . . .	43
5.2.1	Entwurf der Repräsentation für das Umgebungsmodell . . . . .	44
5.2.2	Verarbeitungsschritte zur Erzeugung der Repräsentation . . . . .	46
<b>6</b>	<b>Entwurf und Umsetzung der Einzelkomponenten</b>	<b>49</b>
6.1	Nachbarschaftssuche in Punktwolken . . . . .	49
6.1.1	Bewertung . . . . .	50
6.2	Punktnormalen . . . . .	51
6.2.1	Vergleich der Verfahren zur Berechnung von Normalenvektoren . . . . .	51
6.3	Rauschfilter . . . . .	53
6.3.1	Amplituden- und Abrisskantenfilter für TOF-Kameras . . . . .	53
6.3.2	Allgemeine Rauschfilter . . . . .	57
6.3.3	Aufbau einer Filterkaskade . . . . .	59
6.4	Registrierung . . . . .	60
6.4.1	Fast Range Image Registration (FRIR) . . . . .	61
6.4.2	Evaluierung . . . . .	66
6.5	3-D-Punktmerkmale . . . . .	71
6.5.1	Radius-based Surface Descriptor (RSD) . . . . .	72
6.5.2	Principal Curvatures (PC) . . . . .	73
6.5.3	Fast Point Feature Histograms (FPFH) . . . . .	74
6.5.4	Klassifizierung von Oberflächenpunkten . . . . .	76
6.5.5	Evaluierung . . . . .	77
6.6	Segmentierung . . . . .	80
6.6.1	Ebenensegmentierung mit RANSAC (ERS) . . . . .	81
6.6.2	Graph-basiertes Region Growing und Punktklassifikation (GRG) . . . . .	82
6.6.3	Evaluierung . . . . .	87
6.7	Aufbau einer geometrische Karte . . . . .	93
6.7.1	Verarbeitung von Ebenenpolygonen . . . . .	93
6.7.2	Verarbeitung von Zylindern . . . . .	94
6.7.3	Evaluierung . . . . .	97
<b>7</b>	<b>Verknüpfung der Einzelkomponenten und Validierung</b>	<b>103</b>
7.1	Verknüpfung der Einzelkomponenten . . . . .	103
7.2	Übertragung des Umgebungsmodells über ein Netzwerk . . . . .	103
7.3	Überprüfung der Anforderungen . . . . .	105
7.4	Validierung der Funktionalität . . . . .	107
7.4.1	Validierung in der Simulation . . . . .	107
7.4.2	Validierung auf Care-O-bot® 3 . . . . .	107
7.5	Anwendungsbeispiel „Hol- und Bringdienst“ . . . . .	109

---

<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>111</b>
<b>A Evaluierung von Klassifizierungsproblemen</b>	<b>113</b>
<b>B Datensatz für die Evaluierung</b>	<b>115</b>
<b>C Principal Component Analysis (PCA)</b>	<b>117</b>
<b>D Basisgeometrien</b>	<b>119</b>
D.1 Ebene . . . . .	119
D.2 Zylinder . . . . .	120
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>121</b>