

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Abkürzungsverzeichnis	xiii
Symbolverzeichnis	xv
Abbildungsverzeichnis	xvii
Tabellenverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund, Problemstellung und Ziel	3
1.2 Wissenschaftlicher Beitrag	4
1.3 Aufbau der Arbeit	5
2 Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Methoden der Roboterprogrammierung	7
2.1.1 Indirekte Roboterprogrammierung	9
2.1.2 Direkte Roboterprogrammierung	11
2.1.3 Automatisierte Roboterprogrammierung	13
2.1.4 Konvergenz und Sample-Effizienz in Reinforcement Learning	25
2.2 Methoden und Grundlagen von Robotersystemen	31
2.2.1 Roboterkinematik	31

ix

Inhaltsverzeichnis

2.2.2	Roboterdynamik	32
2.2.3	Hand-Auge-Koordination	33
2.2.4	Bayessche Optimierung	35
2.2.5	Vergleich von RL-Algorithmen	37
2.2.6	Perzeption und Umweltmodellierung	39
2.3	Zusammenfassung und Forschungslücke	49
3	Problemanalyse und Lösungskonzept	51
3.1	Problemanalyse	51
3.2	Lösungskonzept	53
3.3	Abgrenzung des Forschungsbereichs	54
4	Entwicklung von Methoden zur Umweltperzeption und Kartie- rung	57
4.1	Rendering-Pipeline	57
4.2	MASKED-DON: Instanz-Segmentierung mit Dense Object De- skription	62
4.3	Kartierung	66
4.3.1	Voxel-Kartierung erweitert mit Dense Object Deskrip- toren	66
4.4	Visuelles Perzeptions-Framework	68
4.5	Experimente	72
4.5.1	Training	72
4.5.2	Instanz-Segmentierung	76
4.5.3	Deskriptorinspektion von MASKED-DON	76
4.5.4	Erweitertes Training	80
4.6	Zusammenfassung	82
5	Erlernen von Roboter manipulationsfähigkeiten	83
5.1	Generalisierte zyklische Lernraten für Deep Reinforcement Learning	84
5.1.1	Zyklische Lernraten	84
5.1.2	Experimente	87

5.2	Simulationsbasiertes Erlernen von Roboter manipulati- onsfähigkeiten	92
5.2.1	Feature-Space Formalismus	92
5.2.2	Feature-Space Reinforcement Learning	94
5.2.3	Feature-Set Selektion	99
5.2.4	Simulationsumgebung und Implementierung	104
5.3	Experimente	109
5.3.1	Reacher	109
5.3.2	Peg-in-Hole	113
5.3.3	Pick-and-Place	119
5.4	Automatisierte Feature-Set Selektion	124
5.5	Schlussfolgerung	132
6	Simulation-zu-Realität Transfer und experimentelle Validierung	135
6.1	Demonstratorsystem und Testumgebung	135
6.2	Simulation-zu-Realität Transfer	136
6.3	Experimentelle Validierung	139
6.4	Analyse und Bewertung der realweltlichen Experimente . .	145
6.5	Zusammenfassung und Diskussion	147
7	Zusammenfassung und Ausblick	149
7.1	Schlussfolgerungen	149
7.2	Ausblick	151
	Literatur	153