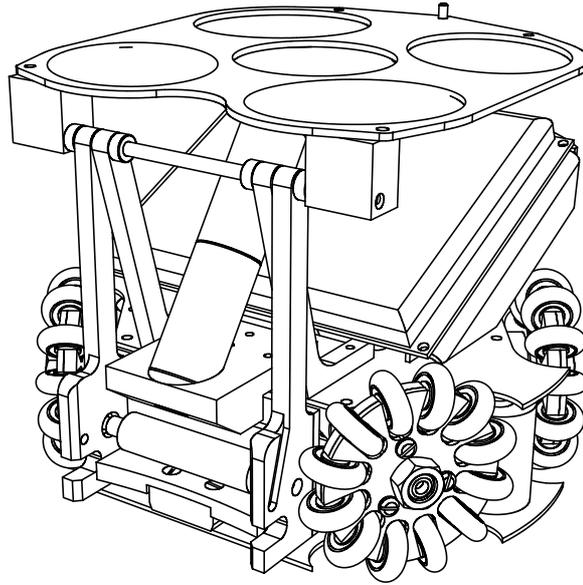


Lernmethoden für autonome mobile Roboter



Am Fachbereich Mathematik und Informatik
der Freien Universität Berlin

eingereichte Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften

vorgelegt von Alexander Gloye

2005

Betreuer:

Prof. Dr. Raúl Rojas
Institut für Informatik
Freie Universität Berlin
Takustraße 9
14195 Berlin

Gutachter:

Prof. Dr. Raúl Rojas
Prof. Dr. Ingo Rechenberg (Technische Universität Berlin)

Datum der Disputation:

11. Februar 2005

Danksagung

Mein Dank geht an Professor Raúl Rojas für die Betreuung des Dissertationsvorhabens. Er war jederzeit gesprächsbereit und durch seine Ideen und Anregungen bei kontroversen Diskussionen immer ein wertvoller Gesprächspartner.

Weiterhin möchte ich mich bei den Mitgliedern der FU-Fighters bedanken, mit denen ich gemeinsam Teile des Gesamtsystems entworfen, modifiziert und programmiert habe sowie zusammen den ersten Platz in der Small-Size-Liga bei der RoboCup-Weltmeisterschaft 2004 in Portugal erreichte. Insbesondere möchte ich Sven Behnke, Anna Egorova, Bastian Hecht, Michael Schreiber, Mark Simon, Oliver Tenchio, Fabian Wiesel und Lars Wolters erwähnen und ihnen für die freundschaftliche Zusammenarbeit danken.

Für die Durchsicht und Korrekturen des Manuskripts danke ich Marco Block, Anna Egorova, Bastian Hecht, Wolf Lindstrot, Süreç Özcan, Jasmin Opitz, Mark Simon und Fabian Wiesel.

Mein ganz besonderer Dank gilt Anna, die mich in allen Phasen des Dissertationsvorhabens in jeglicher Form unterstützt hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Zielsetzung und Motivation	11
1.2	Industrie- und Dienstleistungs-Roboter	12
1.3	Robotik als Schwerpunkt der KI	12
1.4	Robotik heute	13
1.5	Überblick	15
2	RoboCup als Benchmark	17
2.1	Warum Roboter-Fußball?	18
2.2	Geschichte von RoboCup	20
2.3	RoboCup Ligen	22
2.3.1	Simulationsliga	22
2.3.2	Small-Size-Liga	23
2.3.3	Middle Size Liga	25
2.3.4	4-Legged-Liga	27
2.3.5	Liga der Humanoiden	27
2.3.6	Nicht fußballspezifische Ligen	29
3	Lernen in der Robotik	33
3.1	Lernalgorithmen	33
3.1.1	Vorwärtsgerichtete Neuronale Netze	34
3.1.2	Verstärkungslernen	35

3.1.3	Genetische Algorithmen	38
3.2	Lernmethoden und Anwendungen	39
3.2.1	Simulation	39
3.2.2	Modularisierung	40
3.2.3	Lernen aus Übungsaufgaben	41
3.2.4	Lernen durch Emotionen	41
3.3	Lernen beim RoboCup	41
3.3.1	Simulationsliga	42
3.3.2	Middle-Size-Liga	43
3.3.3	4-Legged-Liga	43
4	Eingesetzte Roboterplattform	45
4.1	Systemüberblick	45
4.2	Bildverarbeitung	46
4.2.1	Bilderfassung	47
4.2.2	Farbkodierung der Identität der Roboter	48
4.2.3	Auswerten der Bilder	50
4.2.4	Kalibrierung der Bildverarbeitung	55
4.3	Verhaltenskontrolle	59
4.3.1	Subsumption Architektur	60
4.3.2	Dual-Dynamics	60
4.3.3	Verwendete Verhaltensarchitektur	61
4.3.4	Beispiel einer Verhaltenssequenz	64
4.4	Pfadplanung	65
4.4.1	Potenzialfeldmethode	65
4.4.2	Geschwindigkeitssteigerung	66
4.5	Simulationsmodul	67
4.6	Verteilte Daten	67
4.7	Kommunikation	68
4.7.1	Vom PC zum Roboter	68

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	7
4.7.2 Paketkodierung	69
4.7.3 Vom Roboter zum PC	70
4.8 Roboterelektronik	71
4.9 Roboterhardware	72
4.10 Mikrocontrollersoftware	72
4.10.1 Roboterkoordinaten und Radgeschwindigkeiten	74
4.10.2 PID-Controller	75
5 Lernen der Roboterdynamik	77
5.1 Einleitung	77
5.2 Überall Verzögerung	78
5.3 Quellen des Delays	80
5.4 Delaymessung	82
5.5 Datenaufbereitung	84
5.6 Trainings- und Test-Daten	85
5.7 Vorhersagemethoden	86
5.8 Untersuchte Vorhersageverfahren	87
5.8.1 Einfache Vorhersage	87
5.8.2 Lineare Vorhersage	89
5.8.3 Vorwärtsgerichtetes Netz	90
5.9 Ergebnisse	91
5.9.1 Positionsvorhersage	92
5.9.2 Orientierungsvorhersage	93
5.9.3 Vorhersage ohne Fahrwerte	93
5.10 Verbesserung der Vorhersage	94
5.11 Vorhersagegenauigkeit	96
5.11.1 Roboterverhalten	96
5.11.2 Gemessene Bildverarbeitungsgenauigkeit	96
5.11.3 Berechnete Bildverarbeitungsgenauigkeit	99
5.12 Zusammenfassung	100

6	Gelernte Robotersimulation	105
6.1	Das verwendete Simulationssystem	106
6.2	Adaption der gelernten Vorhersage	107
6.3	Simulationsansätze	108
6.3.1	Vereinfachtes physikalisches Modell	109
6.3.2	Simulation durch Vorhersage vier Frames in die Zukunft	109
6.3.3	Simulation durch Vorhersage ein Frame in die Zukunft	110
6.4	Ergebnisse	111
6.5	Andere Ansätze	111
6.6	Zusammenfassung	115
7	Besser fahren lernen	117
7.1	Einleitung	117
7.2	Korrektur durch Vorhersage	119
7.2.1	Start-Up Korrektur	119
7.2.2	Online Korrektur	120
7.3	Zwischenergebnis	121
7.4	Korrektur mit angepasster Vorhersage	123
7.5	Eine bessere Richtung	125
7.6	Zusammenfassung	126
8	Fehlertoleranz lernen	129
8.1	Der sensible Regelkreis	130
8.1.1	PID-Regelung ohne Defekte	130
8.1.2	Fahrsimulation mit Defekten	132
8.2	Fehlerkompensation und Erkennung defekter Hardware	132
8.3	Ergebnisse	134
8.4	Zusammenfassung und Ausblick	135
9	Lernen von Steuerungs-Parametern	137
9.1	Vorarbeiten	138

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	9
9.2 Optimales Regeln	139
9.3 Parameter lernen	140
9.4 Bremskurve	142
9.5 Lernmethode	143
9.6 Ergebnisse	145
9.7 Ausblick und Zusammenfassung	147
Zusammenfassung	149
Literaturverzeichnis	153
Anlagen gemäß Promotionsordnung	169
Kurzfassung	169
Erklärung	171

