

Intelligente Handlungsstrategien für autonome mobile Systeme

Habilitationsschrift

vorgelegt

im Fachbereich

Elektrotechnik und Informationstechnik
der FernUniversität
in Hagen

von

Dr.-Ing. Michael Gerke
aus Herne

Berichte aus der Robotik

Michael Gerke

**Intelligente Handlungsstrategien
für autonome mobile Systeme**

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hagen, Univ., Habil.-Schr., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0004-7

ISSN 1434-8098

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagungen

Die hier vorgelegte Habilitationsschrift entstand auf Grund meiner Forschungsarbeiten an der FernUniversität Hagen in Deutschland und an der San Diego State University (SDSU) in Kalifornien.

In dieser Forschungszeit war ich zunächst im Fachbereich Elektrotechnik der FernUniversität Hagen als Wissenschaftlicher Assistent (bei Prof. Dr.-Ing. H. Hoyer, Lehrgebiet Prozesssteuerung und Regelungstechnik) tätig und anschließend im Department of Mathematics and Computer Science als Visiting Professor des Robotics and Intelligent Systems Labs (Leitung: Prof. Dr. M. Tarokh und Prof. Dr. M. Vuskovic). Die Schlussphase dieser Habilitationsschrift fiel in der Zeit meiner Professorenvertretung an der FernUniversität Hagen.

Bei **Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Hoyer** bedanke ich mich hiermit für die gewohnt souveränen und konzeptionell weitblickenden Motivationen zu dieser Arbeit. Es ist mir aber ebenso wichtig, hier auch seine menschliche Unterstützung und seinen uneigennütigen Rückhalt zu erwähnen; beides hat er mir gewährt, als ich mit ihm meine Planungen zu einem Forschungsaufenthalt in den U.S.A. diskutiert habe.

Für die Übernahme der Gutachtertätigkeit zu dieser Habilitationsschrift sage ich auch **Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Bretthauer** meinen herzlichen Dank. Seine Leitungsfunktion am Forschungszentrum Karlsruhe und seine Vorstandstätigkeit in der GMA des VDI/VDE machen gewiss ein straffes Zeitmanagement erforderlich; um so mehr freue ich mich über seine Unterstützung und Gesprächsbereitschaft sowie zahlreiche Anregungen zu dieser Arbeit.

Herrn Prof. Mahmoud Tarokh danke ich für die kollegiale Offenheit und Wärme, mit der er mir und meiner Familie das Einleben in San Diego erleichtert hat. Wissenschaftlich hat er mir vorbehaltlos Türen zu neuartigen Problemstellungen geöffnet. Sehr wertvoll waren für mich dabei auch seine Forschungskontakte zum Jet Propulsion Laboratory (JPL) in Pasadena, durch die ich an Teilaspekten der NASA-Marsfahrzeuge (u.a. dem Rover Rocky-7) mitwirken konnte.

Der **Deutschen Forschungsgemeinschaft** (DFG) sage ich Dank dafür, dass sie mir einen wissenschaftlichen Auslandsaufenthalt (Forschungsstipendium GE 821/4-1) in den U.S.A. ermöglicht hat. Erst dadurch konnte ich an Forschungsproblemen mitarbeiten, die sich mit entsprechendem Praxisbezug in Deutschland nicht stellen. Ich wünsche der DFG, dass ihr stets eine ausreichende Finanzierungsmöglichkeit auch für Forschungsaufenthalte von jüngeren Wissenschaftlern (m/w) zur Verfügung steht.

Bleibt noch meine Familie zu erwähnen:

Meinen Eltern **Helmut** und **Irene** danke ich für die lebenslange, begleitende Unterstützung und ihr liebevolles Interesse an meiner wissenschaftlichen Tätigkeit.

Nur wer selber Kinder hat, vermag die Kraft und den Mut meiner **Ehefrau Sigrid** annähernd einzuschätzen, als wir uns gemeinsam zum Auslandsaufenthalt entschlossen haben. Meinem **Sohn Jonas** (damals 3 Jahre) und meiner **Tochter Jördis** (damals 1 Jahr) ebenso wie meiner Frau bin ich dankbar für viele Stunden voller Freude und neuartiger Lebenserfahrungen (aber auch ein wenig Heimweh) in San Diego, California, der schönsten Stadt des Universums.

Herne im November 2002

Vorwort

Zu Beginn erlaube ich mir, meine Motivationen zu dieser Abhandlung von 'Intelligenten Handlungsstrategien für autonome mobile Systeme' darzustellen.

Schon während meiner früheren Arbeiten in Deutschland, aber insbesondere bei meinen Quellenrecherchen zum Mars-Rover-Projekt in San Diego (ab 1997) ist mir aufgefallen, dass es noch einen erstaunlichen Mangel an wissenschaftlichen Einführungen in die Thematik der autonomen mobilen Systeme gibt, die sowohl die erforderliche Breite als auch eine hinreichende Tiefe besitzen (Stand: 1998). Dies gilt durchaus auch für den Bereich der englischsprachigen Literatur, um so mehr jedoch für deutschsprachige Darstellungen. Ein Großteil dieser Bücher kommt nicht weit über illustrierte Darstellungen mobiler Systeme, Baugruppen und Komponenten hinaus. Mit etwas Glück findet man in solchen Einführungen Literaturlisten, die auf mehr oder weniger gut greifbare Beiträge in Fachzeitschriften und auf entsprechende Konferenz-Veröffentlichungen hinweisen.

Studenten, Entwicklungsingenieure und auch Wissenschaftler mit erwachendem Interesse an autonomen mobilen Systemen sind berechtigterweise frustriert, da ob dieser Mängel ein Einarbeiten in die Thematik zu einer schrittweisen Wissensakquisition aus vielen unterschiedlichen Quellen führt. Der damit verbundene Aufwand sowohl für die Beschaffung wissenschaftlicher Quellen als auch für deren Verarbeitung (unterschiedliche Sprachen, Darstellungsformen, Notationen) ist erheblich.

Ein umfassendes Gesamtwerk zu den verschiedenen Problemstellungen bei

autonomen mobilen Systemen ist natürlich mit einem erheblichen Realisierungsaufwand verbunden und bedarf vermutlich eines kompetenten Autorentams unterschiedlicher fachlicher Herkunft.

So findet man typischerweise grundsätzliche Probleme der Fahrzeugkinematik und Dynamik, verknüpft mit mess- und regelungstechnischen Anwendungen am mobilen System. Dies sind Domänen der Ingenieurwissenschaften. Sobald der zusätzliche Anspruch einer gewissen (Teil-)Autonomie der Fahrzeugaktionen hinzukommt, ergeben sich fächerübergreifende Aufgaben insbesondere im Zusammenwirken mit der Mathematik und Informatik.

Eine besondere Bedeutung für den aus technischer Sicht interessierten Leser erlangen zunehmend neuartige Wissensdomänen in der Schnittmenge der Biologie, Informatik und Ingenieurwissenschaft ('Bionik') und in der Schnittmenge der Sozialwissenschaften und Informatik ('Sozionik'), ergänzt durch Fachwissen zu (Multi-)Agentensystemen.

Ich kann mit dieser Habilitationsschrift den identifizierten Mangel nicht beheben, zumal ein solches Werk eine andere Intention verfolgt. Dennoch werde mich in diesem Beitrag zum Bereich von intelligenten Handlungsstrategien für autonome mobile Robotersysteme äußern und dabei besonders auf die mir aus eigener Forschungstätigkeit vertrauten Gebiete konzentrieren, zudem aber stets versuchen auch übergreifende Gesichtspunkte anzusprechen.

In diesem Sinne angrenzende wissenschaftliche Zusammenhänge werde ich skizzieren.

Diese Vorgehensweise möchte ich kurz konkretisieren:

Unter dem Titel 'Intelligente Handlungsstrategien für autonome mobile Systeme' vereinigen sich bereits sehr unterschiedliche Gesichtspunkte, die je nach Betrachter anders akzentuiert sein können.

So geht mit jeder Art von technischen **Systemen** ein gewisses System-Engineering einher, das durchaus systemunabhängig ist. Es umfasst Design, Kommunikation, Logistik und vieles andere mehr.

Die Eigenschaft der **Mobilität** eines technischen Systems lenkt das Augenmerk stärker auf kinematische und dynamische Aspekte von Fahrzeugen.

Mit der **Autonomie** kommen auf niederer (bewegungsnaher, auch reflektiver) Ebene die Umweltwahrnehmung und Visualisierung (Messtechnik) sowie die Bewegungskoordination (Regelungstechnik) hinzu; auf höherer (agierender, auch intelligenter) Ebene erlauben Verfahren der Bewegungsplanung und Kollisionsvermeidung autonomes, also nicht teleoperatives Fahrverhalten. Natürlich sind die Grenzen zwischen den Bereichen fließend und können (wiederum je nach Betrachter) anders gezogen werden. Eine Diskussion darüber ist müßig und soll hier nicht erfolgen.

Ich werde mich in dieser Habilitationsschrift im Wesentlichen mit intelligenten Strategien beschäftigen, die ein selbstständiges Agieren des mobilen Systems in seiner Umwelt erlauben. Das Agieren hat dabei keinen explorativen Charakter, sondern dient dem Erreichen vordefinierter Aufgaben und Ziele.

Somit machen

- Verfahren zur vorbereitenden Missionsplanung unter Berücksichtigung von Missionszielen, Vorkenntnissen zum Terrain und energieeffizienter Fahrrouten,
- Verfahren zur Bahnplanung und Optimierung (path planning and optimization) in bekannter bzw. teilweise bekannter Fahrzeugumgebung,
- Verfahren zur Bahnadaption und Neuplanung (path replanning) unter Einbeziehung von zusätzlich gewonnenen Umgebungsinformationen (On-line Sensorik)
- sowie Verfahren zur echtzeitfähigen Kollisionsvermeidung (collision avoidance) in erkannten Konfliktsituationen (online/realtime, Sensorik und Reaktion/Reflex)

den Kern dieser Arbeit aus.

Damit diese Ausführungen jedoch nicht ausschließlich auf der hohen Abstraktionsebene (wie z.B. von Punktmassen-Bewegungen in rudimentären

Objektumgebungen) stattfindet, werde ich mich auch häufig praktischen Anwendungen (z.B. dem Mars-Rover) zuwenden. Dadurch wird klar, dass der Schritt von der theoretischen Punktbewegung in Ebene oder Raum hin zum realen mobilen System ein erheblicher ist.

Die benannten Inhalte dieser Abhandlung sind einerseits die Zusammenführungen von vielen interessanten Verfahren und Methoden aus der Literatur, andererseits ergänzt um eigene Forschungsarbeiten auf diesen Gebieten.

Die Zusammenführung erfolgt hier, um der obigen Kritik zu begegnen und -zumindestens ansatzweise- die Problematiken in einem verständlichen Zusammenhang darzustellen. Wo immer eigene wissenschaftliche Ideen, Beiträge und Ergebnisse verfügbar waren, sind diese auch eingeflossen.

Eine deutliche Anmerkung ist noch zu den Verfahren der autonomen Bahnplanung, Optimierung und Neuplanung erforderlich. Hier unterscheide ich zwischen sogenannten **klassischen** Suchverfahren und **intelligenten** (auch adaptiven) Verfahren. Dies soll den klassischen Verfahren nicht eine gewisse immanente Intelligenz absprechen (wie auch?), sondern sie von Verfahren abgrenzen, die auf Methoden der 'Computational Intelligence' (Neuronale Netze, Fuzzy-Logik und -Control, Evolutionäre Strategien) beruhen.

Die klassischen Verfahren beruhen hingegen auf nicht-trivialen mathematischen und algorithmischen Suchtechniken (z.B. A^* -search) oder Anwendung von Lösungsmethoden für physikalische Analogien (z.B. Potentialfeld).

Diese Abgrenzung ist mir wichtig, um mich verstärkt Verfahren der 'Computational Intelligence' zuwenden zu können. Diese befinden sich zum Teil auch im Grenzbereich zu verhaltensbasierten (behavior-based) Methoden.

Der stärker an konventionellen Methoden interessierte Leser wird im weitverbreiteten Buch von Jean-Claude LATOMBE ¹ bestens bedient.

Dem geduldigen Leser dieser Habilitationsschrift wünsche ich dieselbe Spannung und Faszination bei der Lektüre, die sich bei mir immer wieder einstellt,

¹ Jean-Claude Latombe, *Robot motion planning*, The Kluwer international series in engineering and computer science, Kluwer Academic Publishers, 1991

wenn ich mit neuen Ideen und Lösungsansätzen insbesondere aus dem Gebiet der 'Computational Intelligence' konfrontiert bin. Zudem hoffe ich natürlich auch, mit den fachlich angrenzenden Beschreibungen in der Breite ein gewisses Verständnis für die komplexe Problematik der autonomen mobilen Systeme zu wecken und in der Tiefe dem entsprechend Interessierten eine erste Hilfestellung (statt eines bloßen Literaturhinweises) geben zu können.

San Diego, Mai 1998

und

Hagen, November 2002

Michael Gerke

Vorwort zur 2.Auflage

Während die 1. Auflage dieser Habilitationsschrift vor allem akademischen Zwecken diene, soll die hier vorliegende 2. Auflage auf mehrfachen Wunsch hin auch einer breiteren Leserschaft zur Verfügung gestellt werden.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der - als Motivation für die ursprüngliche Auflage dienende - Mangel an verfügbarer Literatur im Bereich der mobilen, autonomen Robotersysteme sich inzwischen deutlich relativiert hat.

So kann diese 2. Auflage nun als Rückblick auf eine wichtige Entwicklungsphase in der jüngeren Vergangenheit dienen, ohne dass die darin angeführten Verfahren an Aktualität verloren hätten. Im Gegenteil: diese sind inzwischen vom Autor weiter entwickelt worden und werden im Bereich seiner aktuellen Forschungsthematik 'Flugrobotik' adaptiert.

Hagen, November 2010

Michael Gerke

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Historie	2
1.1.1	Mobile Systeme und deren Navigation	2
1.1.2	Autonomie und Intelligenz	8
1.1.2.1	Fuzzy Logik	17
1.1.2.2	Neuronale Netze	20
1.1.2.3	Genetische Optimierung	25
1.2	Meilensteine	29
1.2.1	Gehmaschinen	31
1.2.1.1	The Phoney Pony	35
1.2.1.2	Der General Electric Quadruped	36
1.2.1.3	CMU Hexapode	37
1.2.1.4	Die TITAN-Serie	39
1.2.1.5	Besondere Entwicklungen	40
1.2.2	Radgetriebene Systeme	41
1.2.2.1	SRI: Shakey the Robot	42
1.2.2.2	Das Stanford Cart	43
1.2.2.3	HILARE und HILARE II	45

1.2.2.4	NavLab II (CMU)	47
1.2.2.5	Der JPL-Rover	49
1.2.2.6	Omnidirektionale Fahrzeuge	50
1.3	Aktuelle Entwicklungen in Deutschland	56
1.3.1	Gehmaschinen	58
1.3.2	Roboter-Fußball	60
1.3.3	Service-Roboter	62
1.3.4	Sensorik	64
2	Szenarien	82
2.1	Einleitung	82
2.2	Weltraum-Exploration	82
2.2.1	Der Planet Mars	84
2.2.2	Mars-Missionen	86
2.2.3	Planetare Rover-Fahrzeuge	88
2.2.4	Outdoor-Navigation	95
2.3	Serviceroboter	103
2.3.1	Mobile Roboter im Pflegebereich	104
2.3.2	Indoor-Navigation	111
2.4	Autonomie und Handlungsstrategien	115
2.4.1	Autonome mobile Agenten	115
2.4.1.1	Motivation von Agenten	116
2.4.1.2	Verwandte Fachgebiete	118
2.4.1.3	Modelle von Agenten	122
3	Grundzüge der Navigation	133
3.1	Motivation	133

3.2	Hierarchie-Ebenen der Navigation	138
3.3	Komponenten der Navigation	142
3.3.1	Globale Bahnplanung	145
3.3.2	Lokal-reaktive Kollisionsvermeidung	148
4	Ein neues Verfahren zur optimalen Routenplanung: das optische Analogon	155
4.1	Planung optimaler Einsatzrouten für autonome mobile Robo- tersysteme in Einsatzgebieten mit inhomogenem Terrain . . .	155
4.1.1	Einleitung	155
4.1.2	Beam Propagation Method	158
4.1.3	Grundgleichungen	159
4.1.4	Homogene Medien	160
4.2	Beispiele von zerklüfteten Umgebungen	162
4.2.1	Attraktive und Repulsive Regionen	163
4.2.2	Primitive Landschaft	165
4.2.3	Kritisches Beispiel	166
4.3	Weitere Verbesserungen	168
4.4	Bemerkungen und Ausblick	173
5	Ein Verfahren zur globalen Bahnplanung: der genetische Bahnplaner	177
5.1	Genetische Bahnplanung für mobile Roboter	177
5.1.1	Einleitung	177
5.2	Der genetische Bahnplaner	181
5.2.1	Konzept	181
5.2.2	Initialisierung	183

5.2.3	Genetische Operatoren	185
5.2.3.1	Crossover	186
5.2.3.2	Mutation	187
5.2.3.3	Tightening	188
5.2.4	Im Wettstreit: Evaluation of Fittest	189
5.3	Resultate und Bewertungen	192
5.3.1	Problemspezifische Initialisierung	193
5.4	Ein erweiterter Bahnplaner	195
5.4.1	Gezielte Verbesserungen	196
5.4.1.1	Initialisierung	196
5.4.1.2	Bewertung der Fitness	197
5.4.1.3	Nachbearbeitung genetischer Lösungen	199
5.4.1.4	Forderung der Schlankheit	201
5.4.2	Untersuchung an Landschaften	203
5.5	Ein hybrider Bahnplaner	209
5.5.1	Integration von Höheninformation	209
5.5.2	Aufbau eines hybriden Planers	212
5.5.2.1	Konventionelle Wegsuche	212
5.5.2.2	Genetische Wegoptimierung	216
6	Eine FUZZY-Strategie zur Kollisionsvermeidung	227
6.1	Einleitung	227
6.2	Strategie der FUZZY Kollisionsvermeidung	230
6.2.1	Komponenten der FUZZY-Kollisionsvermeidung	231
6.2.2	Problemspezifisches Koordinatensystem	231
6.2.2.1	Der Reduzierte Aktuelle Roboter	234

6.2.2.2	Fuzzifizierung	237
6.2.3	FUZZY-Inferenz	240
6.2.4	Defuzzifizierung	244
6.2.5	Auswahl der definitiven Trajektorie	244
6.2.5.1	Transformation in Gelenkkoordinaten	244
6.3	Laborversuche	245
6.3.1	Einführung	245
6.3.2	Systembeschreibung	246
6.3.3	Eine sensorbasierte Kollisionsvorhersage	248
6.3.3.1	2D-Bildverarbeitung	249
6.3.3.2	3D-Bildverarbeitung	251
6.3.3.3	Kamera-Modellierung und Kalibrierung	251
6.3.3.4	Das Problem der Korrespondenzen	252
6.3.4	Die Fuzzy-Kollisionsvermeidung	254
6.3.5	Experimente	257
7	Allgemeine Hinweise zu intelligenten Strategien	263
8	Zusammenfassung	267