

Modellierung und Simulation von Fußgängerverkehr

Entwicklung mathematischer Ansätze für
Soziale Kräfte und Navigationsgraphen

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Mario Höcker
geboren am 31. Mai 1977 in Melle

2010

Referent:

PD Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt

Korreferenten:

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich

PD Dr.-Ing. habil. Volker Berkhahn

Gutachter:

Prof. Dr. Armin Seyfried

Tag der Promotion: 10. Juni 2010

Berichte aus der Bauinformatik

Mario Höcker

**Modellierung und Simulation
von Fußgängerverkehr**

Entwicklung mathematischer Ansätze für
Soziale Kräfte und Navigationsgraphen

Shaker Verlag
Aachen 2010

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.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9298-0

ISSN 1612-6262

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

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauinformatik der Leibniz Universität Hannover in den Jahren 2005 bis 2010.

Ich bedanke mich besonders bei PD Dr.-Ing. habil. Peter Milbradt, der mich bereits in meiner Studienzeit gefördert, mich später zu dieser Arbeit angeregt, mich dabei betreut und schließlich das Hauptreferat übernommen hat. Die zahlreichen fachlichen Diskussionen mit ihm haben mir stets neue Impulse gegeben und mich in meiner Arbeit bestärkt.

Ebenso gebührt mein Dank PD Dr.-Ing. habil. Volker Berkhahn, der mich während meiner Tätigkeit am Institut für Bauinformatik bei zahlreichen Fragen mit seinen Ratschlägen unterstützt hat und zuletzt als Korreferent meiner Dissertation zur Verfügung stand.

Zudem bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich, Institut für Verkehr und Stadtbauwesen, TU Braunschweig für sein Interesse an dieser Arbeit und für die Übernahme des Korreferats. Prof. Dr.-Ing. habil. Monika Sester, Institut für Kartographie und Geoinformatik sei für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes gedankt.

Ein besonderer Dank gebührt auch Prof. Dr. Armin Seyfried, Division Mathematics and Education, Forschungszentrum Jülich für sein Interesse an meiner Forschung, für den regelmäßigen fachlichen Austausch mit aufschlussreichen Diskussionen und schließlich für die Übernahme der Gutachterposition.

Darüber hinaus bedanke ich mich sehr bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Bauinformatik für die langjährige freundliche Zusammenarbeit und für die vielfältige Unterstützung in der Endphase meiner Dissertation, besonders am Tag der mündlichen Prüfung.

Ein großes Dankeschön geht auch an Dr.-Ing. Martin Rose, der die Entwicklung des Programms JWalkerS am Institut für Bauinformatik initiiert und mich dadurch auf die Modellierung und Simulation von Fußgängerverkehr aufmerksam gemacht hat.

Schließlich bedanke ich mich sehr herzlich bei meiner Familie für ihre moralische Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit.

Das größte Dankeschön gebührt meiner Lebensgefährtin Kristin, die mich nicht nur in den schwierigen Phasen meiner Promotion mit ihrer Geduld, mit ihrem Verständnis und mit ihrem Rückhalt bestärkt und motiviert hat.

Hannover, im Juli 2010

Mario Höcker

Kurzfassung

Fußgängersimulationen werden eingesetzt, um Fluchtwegsysteme in komplexen baulichen Anlagen zu planen, zu betreiben und zu optimieren. Die Simulationsprogramme basieren in der Regel auf mikroskopischen Modellen, welche die Dynamik einzelner Fußgänger und ihre räumliche Orientierung mit mathematischen Formeln beschreiben.

Im Fokus dieser Arbeit stehen das Soziale Kräfte-Modell und ein graphenbasiertes Navigationsmodell. Das Soziale Kräfte-Modell beschreibt die individuelle Dynamik mit anziehenden und abstoßenden Kräften, ein Navigationsgraph repräsentiert Wege in einem Gebäude mit Knoten als lokale Ziele und Kanten als Sichtverbindungen. Für beide Schwerpunkte werden grundlegende Ansätze diskutiert, Defizite erläutert und neue mathematische Methoden formuliert. Das Soziale Kräfte-Modell wird um Methoden erweitert, die den individuellen dynamischen Platzbedarf inklusive Schritten und seitlichen Schwankungen, die Fokussierung der individuellen Sicht bis hin zum Tunnelblick und das individuelle Abstandhalten zu fremden Fußgängern und Hindernissen abhängig von der Relativgeschwindigkeit beschreiben. Bezüglich der Struktur von Navigationsgraphen liefert diese Arbeit neue Kriterien, um die Lage und Form von Zielknoten bei Ecken realistisch festzulegen und um Sichtkanten auf eine minimale Menge zu reduzieren. Darüber hinaus werden eine Regionenalgebra für Treppen und Rolltreppen und ein A-Stern-Algorithmus zur heuristischen Navigation dargelegt.

Durch die vorgenommenen Modifikationen und Weiterentwicklungen reproduziert das Soziale Kräfte-Modell den Zusammenhang zwischen Dichte und Geschwindigkeit der Fußgängerdynamik plausibel und zuverlässig. Dieses wird im Rahmen einer Modellvalidierung für Fußgängerfolgen und -schlangen sowie für unidirektionale Staus vor Engstellen gezeigt. Dabei wird auch auf kollektive Bewegungsmuster wie Dichtewellen und bidirektionale Bahnen eingegangen. Im Zuge der Validierung wird ein genetischer Algorithmus hergeleitet, mit dem sich die Parameter und damit das Verhalten eines Bewegungsmodells an beliebige Bewegungsszenarien und Zielfunktionen anpassen lassen. Zur Veranschaulichung wird ein Fundamentaldia-gramm als Zielfunktion definiert.

Zum Abschluss dieser Arbeit wird das modifizierte Modell angewendet, um die Fußgängerdynamik im Hauptbahnhof Hannover exemplarisch zu untersuchen.

Schlüsselwörter: Fußgängerverkehr, Soziale Kräfte-Modell, Navigationsgraph, genetische Algorithmen, Parameteranpassung, Evakuierungssimulation

Abstract

Pedestrian dynamics simulations are used when it comes to planning, operating and optimizing escape route systems of complex buildings. Simulation programs are usually based on microscopic models describing pedestrian movement and spatial orientation by mathematical formulae.

This thesis focuses on the Social Force model and a graph-based navigation model. The Social Force model describes individual dynamics by means of attractive and repulsive forces, while a navigation graph represents the routes within a building in terms of destination nodes and visibility edges. For both models, basic approaches will be discussed, deficits will be revealed and new mathematical methods formulated. The Social Force model is extended by methods describing the following phenomena: individual space requirement for steps and lateral swaying, individual focussing including tunnel view, and behavioural patterns concerning the distance kept from other pedestrians and obstacles, depending on the relative velocity. With regard to the structure of navigation graphs, this thesis contains new criteria to realistically define positions and forms of destination nodes close to corners and to reduce visibility edges to a minimal set. Furthermore, a regional algebra for stairs and escalators as well as an A-Star-algorithm for heuristic navigation will be presented.

The introduction of new mathematical methods enables the Social Force model to reproduce the relation between density and velocity of pedestrian dynamics with an increase in plausibly and reliability. This behaviour will be shown in the context of a model validation for single lane movements as well as for unidirectional bottleneck flows. In addition, collective movement phenomena such as density waves and bidirectional paths will be discussed. In the course of the validation process, a genetic algorithm suitable for adjusting parameters and consequently for adjusting a dynamics model to any given scenario and target function will be formulated. For illustration, a fundamental diagram will be defined as target function.

Finally, the modified model will be applied to analyze pedestrian dynamics in a specific environment. The setting selected for this application is Hanover Central Station.

Keywords: pedestrian dynamics, Social Force model, navigation graph, genetic algorithms, parameter adjustment, evacuation simulation

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
Kapitel 2 Phänomenologie der Fußgängerdynamik.....	5
2.1 Individuelle Eigenschaften.....	5
2.1.1 Geschwindigkeit.....	5
2.1.2 Platzbedarf.....	7
2.1.3 Abstandhalten.....	8
2.1.4 Räumliche Orientierung.....	9
2.2 Kollektive Bewegungsmuster.....	10
2.2.1 Dichtewellen.....	10
2.2.2 Bahnen.....	11
2.2.3 Staus vor Engstellen.....	12
2.3 Fundamentaldiagramme.....	14
Kapitel 3 Das Soziale Kräfte-Modell.....	19
3.1 Stand der Forschung.....	19
3.1.1 Klassischer Ansatz.....	20
3.1.1.1 Antriebskraft.....	21
3.1.1.2 Abstoßende Kräfte.....	23
3.1.2 Ansatz von Helbing, Farkas, Molnár und Viscek.....	28
3.1.2.1 Antriebskraft.....	28
3.1.2.2 Abstoßende Kräfte.....	29
3.1.3 Ansatz von Johansson, Helbing und Shukla.....	34
3.1.3.1 Abstoßende Kräfte.....	34
3.2 Modifikation und Entwicklung.....	37
3.2.1 Antriebskraft.....	37
3.2.2 Abstoßende Kräfte.....	37
3.2.2.1 Trennung von Territorialeffekten und physischen Kräften.....	38
3.2.2.2 Begrenzung der individuellen Sichtweite.....	38
3.2.2.3 Schritte und seitliche Schwankungen.....	42
3.2.2.4 Begrenzung des Sichtwinkels mit Tunnelblick.....	48
3.2.2.5 Relativ-Geschwindigkeitsabhängiges Abstandhalten.....	53
Kapitel 4 Graphenbasierte Navigation.....	61
4.1 Stand der Forschung.....	61

4.1.1 Ansatz von Molnár.....	61
4.1.2 Ansatz von Stucki.....	63
4.2 Modifikation und Entwicklung.....	66
4.2.1 Erreichbarkeit und Sichtbarkeit von Zielen.....	66
4.2.2 Strukturierung von Sichtbarkeitsgraphen.....	68
4.2.2.1 Räumliche Orientierung an Ecken.....	68
4.2.2.2 Integration von Flächensegmenten.....	73
4.2.2.3 Ebenenverbindungen.....	79
4.2.3 Bewertung und Suche von Wegen.....	83
Kapitel 5 Kalibrierung mit genetischen Algorithmen.....	91
5.1 Konzeptionierung einer Parameteranpassung.....	91
5.1.1 Kodierung und Initialisierung.....	92
5.1.2 Evaluation.....	93
5.1.3 Selektion.....	93
5.1.4 Reproduktion.....	94
5.2 Ein Fundamentaldiagramm als Zielfunktion.....	95
Kapitel 6 Validierung.....	101
6.1 Folgen und Schlangen.....	102
6.2 Unidirektionale Staus vor Engstellen.....	114
6.3 Bidirektionale Bahnen.....	123
Kapitel 7 Anwendung.....	127
Kapitel 8 Zusammenfassung und Ausblick.....	139
Abbildungsverzeichnis.....	149
Literaturverzeichnis.....	153