



Fahrassistenz für Elektrorollstühle

Dženan Džafić

Department of Computer Science

Technical Report

Fahrassistenz für Elektrorollstühle

Von der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der
RWTH Aachen University zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dženan Džafić, Master of Science
aus Titovo Užice

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. Stefan Kowalewski
Universitätsprofessor Dr. Rory A. Cooper

Tag der mündlichen Prüfung: 14. September 2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Dženan Džafić
Lehrstuhl Informatik 11
dzafic@embedded.rwth-aachen.de

Aachener Informatik Bericht AIB-2024-02

Herausgeber: Fachgruppe Informatik
RWTH Aachen University
Ahornstr. 55
52074 Aachen
GERMANY

ISSN 0935-3232

Dženan Džafić

Fahrassistenz für Elektrorollstühle

Shaker Verlag
Düren 2024

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2023)

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9536-4

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Abstract

Modern smartphone apps support people in many ways in today's society, be it daily activities or a specific information query. Another major utility of smartphone is navigation, and answering the question "how does a person get from A to B". Most everyone is familiar with popular navigation apps, particularly Google Maps. However, over two millions Germans lives with a disability requiring a wheelchair [1], which is not one of the modes addressed by these navigation apps. And since electric chairs have a limited battery capacity, their range is also limited. Many paths are not barrier-free (i.e. they present their own obstacles) and uneven flooring introduces a danger of tipping over, so often extra travel is needed to avoid such risks. Additionally, not all paths present a smooth surface for wheelchairs, where a cobble stone road may lead to great discomfort. The eNav project aims to address these specific issues, to design a novel navigation system for wheelchair users, and to ultimately increase the quality of live for people with reduced mobility. In addition to accessibility, the energy consumption of the electric wheelchair is also in the foreground. In this way, the system informs the user about the anticipated energy consumption, so that he or she can avoid being stranded. The development of the eNav system demonstrates how to prepare geographical map data in such a way as to allow eNav energy-efficient routing and barrier avoidance. The procurement and generation of necessary data sources plays a central role. A modified A* algorithm ensures that this is possible. The use of multimodal dynamic routing ensures shorter travel times and lower energy consumption. An study shows that in the city of Aachen there exists a more energy-efficient route in 41% of all investigated routes compared to the shortest route.

Kurzzusammenfassung

In der heutigen Gesellschaft unterstützen Smartphone-Apps die Menschen in den meisten Bereichen. Seien es Planungen von täglichen Aktivitäten oder die spezifische Suche nach Information. Ein weiterer sehr großer Anwendungsbereich ist die Frage: “Wie kommt ein Mensch von A nach B?”. Bei den meisten Menschen kommen Navigationsapps wie z.B. Google-Maps etc. zum Einsatz. Für über zwei Millionen der Deutschen ist dies nicht immer möglich [1], da Menschen mit einer schweren Behinderung andere Anforderungen haben. Denn viele Wege sind nicht barrierefrei, die Akkukapazität des Elektrollstuhls ist beschränkt und damit auch ihre Reichweite, oder der Bodenbelag ist für ihren Rollstuhl so uneben, dass eine erhöhte Kippgefahr besteht. Zusätzlich dazu bewirken einige Bodenbeläge eine drastische Senkung des Komforts für den Rollstuhlfahrer, der stark darauf durchgeschüttelt wird. Genau an diesem Punkt setzt diese Arbeit mit dem Projekt eNav an. eNav ist ein Navigationssystem für Rollstuhlfahrer mit dem Ziel die Lebensqualität von Menschen mit Mobilitätseinschränkung zu erhöhen. Dabei steht neben der Barrierefreiheit auch der Energieverbrauch des Elektrorollstuhls im Vordergrund. Das System informiert den Benutzer über den Energieverbrauch, sodass dieser nicht mitten auf dem Weg stehen bleibt. Die Entwicklung des eNav Systems zeigt, wie es möglich ist das Kartenmaterial aufzubereiten, um mit eNav barrierefreies energieeffizientes Routen zu ermöglichen und was dafür notwendig ist. Die Beschaffung und Erzeugung der dafür benötigten Datenquellen spielt hier eine zentrale Rolle. Ein dafür modifizierter A*-Algorithmus sorgt dann für energieeffizientes Routen. Das Multimodale Dynamische Routing verkürzt die Reisezeit und reduziert den Energieverbrauch, indem es den öffentlichen Nahverkehr einbezieht. Eine Untersuchung zeigt, dass in der Stadt Aachen in 41% allen untersuchten Routen eine energieeffizientere Route im Vergleich zur kürzesten Route existiert. Der Benutzer kann die Vorteile von eNav mit Hilfe eines Routenplaners und einer Navigations-App nutzen.

Vorwort

Als ich im 2007 nach Aachen zum Studieren kam, musste ich feststellen, dass die Reichweite meines Elektrorollstuhls erheblich abnahm. Diese ist am Niederrhein viel höher. Die Ursache dafür lag für mich auf der Hand: Es liegt an der topografischen Lage, da Aachen vielen hohen Steigungen ausgesetzt ist. Damit wurde der Grundstein des eNav-Projekts gelegt. Irgendwann kam ich auf die Idee, dass neben der kürzesten Route und der schnellsten Route auch eine energieeffiziente Route existieren kann. Natürlich war es auch notwendig, dass ich diese ganze Route befahren kann, was bedeutet, dass alle Routen die Anforderungen der Barrierefreiheit erfüllen müssen. So begann ein langer Weg zu einem Navigationssystem, das es sich zur Aufgabe gemacht hat, die Lebensqualität von Menschen mit Mobilitätseinschränkungen zu verbessern. Schnell wurde mir klar, wie viele Möglichkeiten mein Studienfach Informatik bietet dieser Menschengruppe zu helfen. Hier nutzte ich die Vorteile der Tatsache, dass ich in beiden Welten zuhause bin. Einerseits weiß ich genau, was Menschen mit Mobilitätseinschränkungen für besondere Anforderungen haben, um von Punkt A nach Punkt B zu kommen. Andererseits kann ich die Möglichkeiten der Informationstechnologie nutzen, um diese Mängel zu minimieren. Während meiner Zeit der Erforschung und Entwicklung stellte sich schnell heraus, dass Barrierefreiheit und Akku-Reichweite nicht die einzigen möglichen Ansätze für Verbesserungen sind, sondern weitere Aspekte wie Komfort und Sicherheit auch eine Rolle spielen. Gleichzeitig erhielt ich auch von Nicht-Rollstuhlfahrern ein großes positives Feedback, da sie mit Kinderwagen oder Fahrrädern ähnlichen Hürden ausgesetzt sind, sodass eNav letztendlich vielen Menschen eine Unterstützung bietet. Dies war für mich eine noch größere Motivation, es in die Tat umzusetzen.



Hinweis:

Bitte beachten Sie, dass auf Grund der Lesbarkeit **die Quellenangabe nur in [#] hinter der Abbildungsbeschriftung ist**. Alle Abbildungen mit [#] sind entweder “*Abbildung entnommen aus [#]*”, “*Abbildung angelehnt an [#]*” oder “*Teile der Abbildung entnommen aus [#]*.”

Danksagung

Meine aufrichtige Dankbarkeit und Wertschätzung möchte ich all jenen Personen entgegenbringen, die mich während meiner Doktorarbeit unterstützt haben.

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Stefan Kowalewski, für seine unermüdliche Anleitung, Ermutigung und fachliche Expertise danken. Seine Anleitung war von unschätzbarem Wert für den Erfolg dieser Arbeit. Besonders möchte ich hervorheben, dass Prof. Dr.-Ing. Kowalewski mich permanent an meine Grenzen geführt hat und mir dadurch ermöglicht hat, kontinuierlich zu wachsen und mich weiterzuentwickeln. Ein herzlicher Dank geht auch an meinen Zweitgutachter, Prof. Dr. Rory A. Cooper, für seine fachliche Unterstützung und Ratschläge während der Forschung. Besonders hervorzuheben ist seine großzügige Unterstützung, die es mir ermöglicht hat, ein Auslandssemester in Pittsburgh zu absolvieren. Diese wertvolle Erfahrung hat meine Perspektive erweitert und meine akademische sowie persönliche Entwicklung nachhaltig bereichert. Ein besonderer Dank gilt auch meinem Drittprüfer, Prof. Dr. rer. nat. Horst Lichter, und meinem Beisitzer, Prof. Dr. phil. Gerhard Lakemeyer, für ihre wertvollen Einsichten und ihre Bereitschaft, an meiner Prüfung teilzunehmen.

Meinen herzlichen Dank möchte ich auch meine Eltern Izet und Jasmina, sowie meiner Schwester Džana und ihren Ehemann Mirza aussprechen für ihre bedingungslose Liebe, Unterstützung und Geduld während meiner akademischen Reise. Ihre Ermutigung hat mich stets vorangebracht, auch in den schwierigsten Zeiten.

Ebenso danke ich meinen Kollegen und Freunden, insbesondere Milica Mülders, Pierre Peter Schoonbrood und Dr. Dominik Franke, für ihre moralische Unterstützung, aufmunternde Worte und hilfreichen Diskussionen während der gesamten Studienzeit. Ihre fachlichen Inputs und die zahlreichen Diskussionen über unsere gemeinsamen Forschungsprojekte, die Arbeit an verschiedenen Veröffentlichungen und Papers sowie unsere Medienauftritte haben mir viel Spaß gemacht und meinen Forschungsprozess bereichert. Ein besonderer Dank geht an meinen langjährigen Arbeitssistenten Danni Baumeister für seine unermüdliche Hilfe und sein Engagement während unserer gemeinsamen Zeit.

Mein Dank geht auch an meine Lehrer, Brigitta Huneus, Dr. Otwin Loeser, Maria Schoffs, Heinz Heiermann und Uli Lapp, die mich wegen meiner Behinderung unterstützt haben und maßgeblich dazu beigetragen haben, dass ich die Möglichkeit erhalten habe, mein Abitur abzuschließen und ein Studium zu beginnen. Ihre unermüdliche Unterstützung und ihr Einsatz, insbesondere während meiner Auseinandersetzungen mit den Behörden, haben mir die Tür zu einer akademischen Ausbildung geöffnet.

Schließlich möchte ich allen anderen Personen danken, die auf irgendeine Weise dazu beigetragen haben, dass diese Arbeit möglich wurde. Ihre Beiträge sind unermesslich geschätzt. Vielen Dank an alle, die dazu beigetragen haben, dass dieses Projekt erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

Dženan Džafić

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Gliederung der Arbeit	2
1.2	Vorveröffentlichungen	3
2	Was muss eNav können?	7
2.1	Rollstühle	7
2.1.1	Aktivrollstühle	7
2.1.2	Elektrollstühle	7
2.1.3	Energieverbrauchsmodell	9
2.1.4	Barrieren für Rollstühle	10
2.2	Herausforderung	10
2.3	Anforderungen	12
3	Verwandte Projekte zu eNav	15
3.1	mPass	15
3.2	OpenRouteService	15
3.2.1	RollstuhlRouting.de	17
3.3	EasyWheel	17
3.4	Path 2.0	18
3.5	Vergleich	19
4	Routenplaner	21
4.1	XML	21
4.2	Einführung der HTML5-Technologie	21
4.3	Einstellungen und Eingabe-Möglichkeiten	27
4.4	Energieeffizienteste und kürzeste Route	28
4.5	Point Of Interest (POI)	28
4.5.1	Darstellung der POI	28
4.6	Beobachtungen während der Entwicklung	30
4.7	Evaluation durch Benutzerstudie	31
4.7.1	Testaufbau	31
4.7.2	Probanden	32
4.7.3	Fragebögen	32
4.7.4	Ergebnisse der Fragebögen	32
4.7.5	Ergebnisse der Beobachtung	32
4.7.6	Fazit der Evaluation	33

5	eNav-App als User-Interface	35
5.1	AndNav-App mit eNav als Erweiterung	35
5.2	Hybride eNav-App (Cordova)	36
5.2.1	Evaluation der hybriden App	37
5.3	Native eNav App	38
5.4	Hybride vs. native App	39
5.5	Energiemanagement der nativen App	40
5.5.1	Analyse der Hardware-Komponenten auf Energieverbrauch	40
5.5.2	Energiesparmodus von eNav	42
5.5.3	Evaluation	43
5.6	Evaluation der eNav-App	44
5.6.1	Testaufbau	44
5.6.2	Auswertung der Fragebögen	44
5.6.3	Ergebnisse der Beobachtung	45
5.6.4	Fazit der Evaluation	46
6	Kartenmaterial	47
6.1	Grundlagen	47
6.1.1	Gesetzliche Richtlinien	48
6.1.2	OpenStreetMaps	48
6.1.3	Airborne Laser Scanning	49
6.1.4	Crowdsourcing	49
6.1.5	Points-of-Interest (POI)	50
6.2	Barrierefreies Straßennetz	51
6.2.1	Identifikation barrierefreier Wege	51
6.2.2	Barrierenmeldung	56
6.2.3	Barrierenerkennung durch Fahrverhalten	57
6.2.4	Barrierenerkennung basierend auf Smartbandtechnologie	61
6.2.5	Barriereerkennung basierend auf Basis von MEBot	62
6.3	3D-Karten	64
6.4	Nutzung und Identifikation des Bodenbelags	64
6.4.1	Verwandte Arbeiten	65
6.4.2	Bodenbelagdaten Stadt Aachen	67
6.4.3	Bodenbelagserkennung	67
6.4.4	Bodenbelagserkennungsmodell	69
6.4.5	Evaluation der Bodenbelagserkennung	71
6.5	Integration der Point of Interest	74
6.6	Öffentlicher Nahverkehr	74
7	Routen-Optimierung	75
7.1	Definition der Graphen	75
7.2	A*-Algorithmus	76
7.3	Abbildung der Karte	78
7.3.1	Java-Objekt	78

7.3.2	Relationale Datenbank	79
7.3.3	Nicht-relationale Datenbank (Graph-Datenbank)	79
7.3.4	Graph-Objekt vs. PostgreSQL vs. Neo4j	82
7.4	Energieeffizientes Routen	83
7.4.1	Verwandte Arbeiten	90
7.4.2	Kürzeste Route vs. effiziente Route	91
7.5	SpiderWebGraph (SWG)	93
7.6	Multimodales Dynamisches Routen (MumoDyRo)	95
7.6.1	Realisierung des MumoDyRo	97
7.6.2	Evaluation von MumoDyRo	99
8	Software Architektur	107
8.1	Karten-Parser	108
8.2	Implementierung des Webclients	109
8.3	Implementierung der nativen eNav-App	110
8.3.1	Implementierung von MumoDyRo	113
9	Zusammenfassung	115
9.1	Ausblick	115
9.1.1	Fazit	116