

Estimating Traffic Signal States by Exploiting Sparse Low-Frequency Floating Car Data

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Steffen Axer, M. Sc.
geboren am 25.02.1985
aus Henstedt-Ulzburg

Eingereicht am: 30.03.2017
Disputation am: 27.07.2017

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing Bernhard Friedrich
Prof. Dr.-Ing Markus Friedrich

(2017)

INSTITUT FÜR VERKEHR UND STADTBAUWESEN
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG
UNIV.-PROF. DR.-ING. BERNHARD FRIEDRICH

**Schriftenreihe
Heft 61**

Steffen Axer

**Estimating Traffic Signal States by
Exploiting Sparse Low-Frequency Floating
Car Data**

**SHAKER
VERLAG**

Aachen 2017

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5513-9

ISSN 1615-2948

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Danksagung

Ich möchte mich in erster Linie bei Prof. Dr.-Ing. Bernhard Friedrich für die Betreuung dieser Doktorarbeit bedanken. Die äußerst konstruktiven Gespräche und Ratschläge sowie die hervorragende technische Ausstattung des Instituts haben einen essentiellen Beitrag zur Entwicklung dieser Arbeit geleistet. Zudem bedanke ich mich herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich für die Übernahme des Koreferats.

Weiterhin möchte ich mich insbesondere bei meinen ehemaligen Kollegen Ralf Kutzner, Federico Pascucci und Sebastian Vogt für die vielen fruchtbaren Diskussionen sowie für den Aufbau und die Versorgung diverser Simulationsszenarien bedanken.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Familie sowie an meine Ehefrau Caroline, die mich während der gesamten Entstehungszeit dieser Arbeit mit all ihrer Kraft begleitet, motiviert und unterstützt hat. Ohne euch wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Abschließend bedanke ich mich bei der Abteilung Entwicklung Verkehrsinformation des ADAC für die Bereitstellung notwendiger Floating Car Data sowie der Abteilung Verkehrsmanagement des Kreisverwaltungsreferates der Stadt München für das zur Verfügung stellen notwendiger Referenzschaltzeitdaten.

Kurzfassung

Zukünftige Fahrerassistenzsysteme benötigen häufig netzweit verfügbare Informationen über den zu erwartenden Signalzustand an einer Lichtsignalanlage (LSA). Aktuelle Verfahren zur Signalzustandsschätzung basieren dabei auf der Auswertung von Zustandsdaten einzelner LSA, die über eine zentrale Servereinheit gesteuert werden. Die flächendeckende Versorgung von Signalzustandsschätzungen ist somit ein aufwändiges Unterfangen, da Datenverbindungen zu zahlreiche Verkehrsbehörden aufgebaut werden müssen. Die zunehmende Verbreitung Smartphone-gestützter Navigationssysteme sowie vernetzter Fahrzeuge hat in den letzten Jahren zu einem starken Anstieg sogenannter Floating Car Data (FCD) geführt. Die nahezu flächendeckend verfügbaren Daten ermöglichen die effiziente und netzweite Schätzung verkehrsrelevanter Informationsgrößen, wie z.B. Signalzustandsschätzung von LSA.

In dieser Arbeit wurde eine neuartige Methode zur Schätzung von Signalzuständen an LSA auf Basis realer FCD entwickelt und unter Realbedingungen getestet. Im Vorfeld dieser Entwicklung wurde der aktuelle Forschungsstand zu diesem Themenfeld analysiert. Um die Datenbeschaffenheit einer realen, kommerziell verfügbaren FCD-Quelle zu verstehen, wurde im Zuge der Arbeit ein jährlicher FC-Datensatz des ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club) an zwei ausgewählten Knotenpunkten in München analysiert.

Motiviert durch das verhältnismäßig geringe Trajektorienaufkommen der genutzten Datenquelle, wurde eine durchgängige Methodik zur Verarbeitung weniger Trajektorien mit zeitlich niedriger Datenauflösung entwickelt. Die Methodik ermöglicht dabei die Schätzung werktäglicher, typischer Signalprogrammparameter, wie z.B. der Umlauf- und Freigabezeit für einzelne Stunden im Tagesgang. Die berechneten Parameter können unter definierten Randbedingungen zur Schätzung zukünftiger Signalzustände verwendet werden.

Zur möglichst effizienten Datennutzung wurde ein neuartiges, auf einem Hypothesentest basiertes Verfahren zur Schätzung der Umlaufzeit entwickelt. Die Methodik wertet historische Querungsvorgänge an der Haltlinie einer

LSA aus. Die beobachtenden Ereignisse werden mittels Modulo Operator in den Zeitstrahl einer hypothetischen Umlaufzeit projiziert. Ausschließlich die Verwendung der korrekten Umlaufzeit führt zu einer Konzentration der Querungsvorgänge innerhalb der Umlaufzeit. Dieser Effekt kann mittels Hypothesentest statistisch zur Identifikation der wahren Umlaufzeit ausgenutzt werden. Das entwickelte Verfahren wurde mit einer Monte-Carlo-Simulation analysiert.

Ein weiteres wesentliches Ziel der Arbeit war die robuste Schätzung von Freigabezeiten an einzelnen Fahrströmen unter Nutzung der zur Verfügung gestellten Daten. Das hierzu neu entwickelte Verfahren wertet Querungsvorgänge sowie die Anzahl wartender Fahrzeuge über die Umlaufzeit aus. Mittels eines iterativen Klassifikationsprozesses werden einzelne Umlaufsekunden in Abhängigkeit des Datenaufkommens zu einer zeitlich konsistenten Freigabezeit verarbeitet. Hierzu berechnet das Verfahren einen selbst-kalibrierten Häufigkeitsgrenzwert, den es gilt zu überschreiten. Zur Plausibilisierung des Freigabezeitintervalls setzt die Methodik auf einen ebenfalls iterativen Selbstprüfungsprozess, bei dem es gilt, daten- und zeitspezifische Randbedingungen einzuhalten. Die Prüfmethodik gewährleistet robuste Ergebnisse, auch bei einem geringen Trajektorienaufkommen.

Darüber hinaus widmet sich die Arbeit mit der Entwicklung eines Verfahrens zur Freigabezeitüberprüfung an Konfliktströmen einem bisher noch nicht ausreichend betrachteten Forschungsthema. Konflikte zwischen geschätzten Freigabezeiten treten dabei insbesondere an verkehrsabhängigen LSA auf. Wesentliche Voraussetzung für die entwickelte Methodik ist das Vorhandensein von Freigabezeitschätzungen auf allen Konfliktströmen des Knotenpunktes. Zur Erreichung dieser Anforderung wurde ein Clusterverfahren zur Erkennung von Stunden mit ähnlichen Signalprogrammparameter entwickelt. Die gruppierten Stunden können zusätzlich aggregiert werden und ermöglichen damit auch die Berechnung von Freigabezeiten auf Fahrströmen mit geringem FCD Aufkommen. Der Ansatz wurde im Zuge einer Simulationsstudie hinsichtlich der korrekten Funktionsweise überprüft.

Die Methodik zur Schätzung von Signalprogrammparametern sowie zur Prädiktion von Signalzuständen wurde unter Realbedingungen an vier ausgewählten LSA in München kalibriert und validiert. Die erreichte Qualität der Zustandsschätzung wurde mittels unterschiedlicher statistischer Indikatoren analysiert und bewertet.

Abstract

Many emerging driving assistance concepts require a network wide accessible information of future traffic signal states. Nowadays traffic signal state prediction approaches are strictly limited to work only at individual cities, as these methods require a data interconnection to a centralized traffic signal control server. The increasing availability of Floating Car Data (FCD) caused by the popular use of smartphone navigation and connected vehicles offers a very promising data source that allows to deduce cost-efficient estimates of traffic related information for large networks, such as signal timing parameters and traffic signal states.

In this thesis, a novel methodology for the traffic signal state prediction based on real-world FCD has been developed and evaluated. In advance of this development process, the thesis presented the latest state-of-the-art of a trajectory-based traffic signal state prediction. In order to understand the data characteristics of a real-world, commercially available FCD source, this work analyzed a one year dataset obtained from the ADAC (General German Automobile Club) at two major intersections in Munich (Germany).

Motivated by the obtained, sparse and likewise low-frequently sampled trajectory volumes, this work developed a comprehensive methodology that covers all major aspects of the trajectory processing in order to infer hourly estimates of the signal timing parameters, such as the cycle length and the green intervals typically used on workdays. The signal timing parameters allow moreover the prediction of future traffic signal states with respect to different described constraints.

To utilize the trajectory volumes efficiently, the thesis developed a novel, hypothesis-based cycle length estimation procedure. The approach estimates the typical cycle length for an hour by analyzing vehicle stop bar crossing events. These events are projected into the time scale of potential cycle length candidates by the help of a modulo operation. Only the correct cycle length causes a concentration of crossing events within the tested cycle time. To infer the true cycle length, concentrated trajectories are exploited by the help of

a hypothesis test. The developed concept has been analyzed for a fixed-time controlled intersection by means of a Monte-Carlo-Simulation.

The next major objective of this thesis was the development of a robust green interval estimation methodology that is capable to deduce the green interval by exploiting sparse crossing events as well as stopped vehicles. The novel concept is based on an iterative classification procedure that infers the green interval by analyzing the number of counted crossing events per cycle second. The approach determines automatically a reasonable data threshold that needs to be exceeded in order to classify a cycle second to the signal state green. A rule-based and iterative self-verification process checks the consistency of the found green interval, which makes the methodology robust when working with small trajectory samples sizes.

In addition, the research of this thesis closed the gap of a missing green interval verification procedure that checks potentially overlapping green intervals of conflicting movements, mainly caused by traffic actuation. As the developed concept requires ideally green interval estimates on all conflicting movements, the thesis developed moreover a novel cluster-based approach that tries to identify hours with very similar signal timing parameters. The trajectory data set is once again aggregated over the found time cluster to enable even on movements with less volumes the estimation of signal timing parameters. The correct functionality of the developed clustering procedure was tested with the help of simulation study.

Finally, the developed traffic signal state prediction concept was calibrated and validated at four real-world intersections in Munich (Germany), accompanied by a set statistical indicators in order to assess and analyze the traffic signal state prediction quality.

Contents

1	Introduction	1
1.1	Motivation	1
1.2	Objectives	2
1.3	Outline	4
2	State-of-the-art of Science and Technology	5
2.1	Basics of Traffic Signal Control	5
2.2	Traffic Signal Control Strategies	7
2.2.1	Fixed-Time Control	7
2.2.2	Vehicle Actuated Control	8
2.2.3	Adaptive Traffic Control Systems	8
2.3	Technical Concept of Floating Car Data	9
2.4	FCD-based Traffic Signal State Prediction	10
2.5	Need for Research and Methodology	15
3	Fundamentals	17
3.1	Characteristics of Empirical Floating Car Data	17
3.2	General Concept and Constraints	20
3.3	Statistical Indicators	23
4	Methodology	27
4.1	Data Preprocessing	27
4.1.1	Graph and Intersection Model	27
4.1.2	Spatial Map Matching and Path Inference	28
4.1.3	Processing Stopped Vehicles	32
4.2	Exploited Trajectory Information	34
4.2.1	Crossing Events	34
4.2.2	Stopped Vehicles	36
4.3	Filtering Erroneous Trajectories	37
4.3.1	Trajectory Classification with STC	39

4.3.2	Trajectory Classification with LOGIT	41
4.3.3	Trajectory Classification with RF	43
4.3.4	Conclusion	44
4.4	Estimating the Cycle Length	45
4.5	Estimating the Green Interval	51
4.5.1	Simple Green Interval Estimation	51
4.5.2	Combined Green Interval Estimation	62
4.6	Result Clustering and Time Assignment	70
4.6.1	Concept	70
4.6.2	Concept Verification	74
4.7	Verification of Conflicting Green Intervals	77
4.7.1	Intergreen Time Calculation	77
4.7.2	Verification and Adjustment Procedure	79
4.8	Composed Estimation Process and Result Classes	83
5	Evaluation	87
5.1	Calibration	87
5.1.1	Objectives	87
5.1.2	Cycle Length Estimation	90
5.1.3	Calibration Procedure	91
5.1.4	Evaluating Estimated Signal Timing Parameters	95
5.1.5	Conclusion	102
5.2	Validation	105
5.2.1	Cycle Length Estimation	105
5.2.2	Evaluating Estimated Signal Timing Parameters	108
5.2.3	Conclusion	114
6	Conclusion	115
6.1	Summary	115
6.2	Outlook on Further Research	119
A	Publications	123
B	Trajectory Volumes	125
B.1	Ingolstädter Straße / Frankfurter Ring	126
B.2	Dachauer Straße / Georg-Brauchle-Ring	127
C	Simulative Experiments	129
C.1	Estimation Output at Fixed-Time Intersection	130
C.2	Estimation Output - Trajectory Filtering	133
C.3	Estimation Output at Actuated Intersection	134
C.4	Exemplary Clustering and Time Assignment	135
D	Real World Experiments	137
D.1	Ingolstädter Straße / Frankfurter Ring	138

D.1.1	Estimated Green Intervals	138
D.1.2	Available Trajectory Volumes	139
D.1.3	Estimation Quality	140
D.2	Ingolstädter Straße / Neuherbergstraße	143
D.2.1	Estimated Green Intervals	143
D.2.2	Available Trajectory Volumes	144
D.2.3	Estimation Quality	145
D.3	Dachauer Straße / Georg-Brauchle-Ring	146
D.3.1	Estimated Green Intervals	146
D.3.2	Available Trajectory Volumes	148
D.3.3	Estimation Quality	149
D.3.4	Ground Truth Signal Timing	150
D.4	Frankfurter Ring / Ungererstraße	152
D.4.1	Estimated Green Intervals	152
D.4.2	Available Trajectory Volumes	153
D.4.3	Estimation Quality	154
D.4.4	Ground Truth Signal Timing	157
E	Pseudocodes	159
E.1	Best Cluster Selection	160
E.2	Binary State Vector Substitution Logic	161
F	Backward calculation methods	163
	Bibliography	165