

Schriftenreihe
Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme
am Institut für Fahrzeugtechnik,
TU Braunschweig



Nr: 1

M.Sc.
Adrian Mark Sonka
2020

Klassifikation und Prädiktion der Verkehrsumgebung für das automatisierte Fahren

Herausgegeben von:
apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze

Klassifikation und Prädiktion der Verkehrsumgebung für das automatisierte Fahren

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation.

von: Adrian Mark Sonka, M.Sc.
aus: Mönchengladbach

eingereicht am: 05.08.2019
mündliche Prüfung am: 24.01.2020

Gutachter: Apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze
Prof. Dr. Ludger Frerichs

Schriftenreihe Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme
am Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig

Band 1

Adrian Mark Sonka

**Klassifikation und Prädiktion der Verkehrsumgebung
für das automatisierte Fahren**

Shaker Verlag
Düren 2020

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2020

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7304-1

ISSN 2700-046X

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

Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig entstanden. Mein Dank gilt zuerst Herrn Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay neben der Übernahme des Prüfungsvorsitzes für das entgegengebrachte Vertrauen, den fachlichen Austausch und ein stets offenes Ohr, die eine große Bereicherung während der letzten Jahre gewesen sind.

Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze danke ich nicht nur für seine Tätigkeit als Gutachter der Prüfungskommission, sondern in besonderer Weise für die eingeräumten Freiheiten, die Förderung durch Übertragen von Verantwortung, das Vertrauen sowie die zahlreichen fachlichen und überfachlichen Gespräche. Herrn Prof. Dr.-Ing. Ludger Frerichs danke ich herzlich für die Übernahme des Koreferates innerhalb der Prüfungskommission.

Bei den vielen Mitarbeitern des Instituts für Fahrzeugtechnik möchte ich mich hiermit für die vielseitige Unterstützung ebenfalls bedanken. Dies gilt für die Kollegin und Kollegen aus der Werkstatt, an dieser Stelle vertreten durch die Leitung von Herrn Maic Rennebach, welche mit Ergebnissen gegläntzt haben, die in der Regel doppelt so schnell und genau erledigt wurden wie versprochen. Darüber hinaus bedanke ich mich bei den Kolleginnen unseres Sekretariats für die Unterstützung in allen administrativen Aufgaben sowie die damit verbundene Geduld. Dank gilt weiterhin Maximilian Flormann, Marcel Kascha und in besonderem Maße Florian Krauns, Silvia Thal und Holger Znamiec für die vielen Gespräche, Unterstützung und gemeinsamen Unternehmungen im und außerhalb des Büros.

Mein Dank richtet sich auch an alle aus meinem familiären und privaten Umfeld für ihren Zuspruch und ihre Unterstützung. Meinen Eltern, auf die ich mich immer verlassen konnte, danke ich ganz besonders dafür, dass sie seit meiner Kindheit meine Interessen gefördert und mir uneingeschränktes Vertrauen entgegengebracht haben.

Unmessbarer Dank gebührt abschließend meiner Frau Viktoria, welche auf Stunden der Abwesenheit mit liebevoller Geduld und Verständnis reagiert sowie mich jeden Tag mit Durchhaltevermögen unterstützt und motiviert hat.

Kurzfassung

Im Zuge der Entwicklung des automatisierten und vernetzten Fahrens entstehen neue Herausforderungen durch die Vorhersage des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer, welche für eine kollisionsfreie Manöverplanung des eigenen Fahrzeugs nötig ist. Auch das bessere Verständnis aufgezeichneter Messdaten ist von hoher Wichtigkeit, da diese in aufbereiteter Form als Lerndaten die Grundlage der Verhaltensprädiktion der Verkehrsumgebung sowie vieler weiterer Anwendungen bilden. Das Ziel der vorliegenden Dissertation ist das Aufzeigen von Synergien, welche sich aus der Verwendung ähnlicher Methoden des maschinellen Lernens für beide Bereiche ergeben, der *Sortierung und Klassifikation* bestehender Messdaten sowie der *Vorhersage des Verhaltens* anderer Verkehrsteilnehmer.

Im ersten Teil werden mit der Fahrzeugsensorik aufgezeichnete Messdaten verwendet, um darin regelbasiert frei durch den Anwender definierbare Manöver zu klassifizieren. Das Verfahren liefert qualitativ gute Ergebnisse, die Autobahnmanöver werden zuvor mit einer neu konzipierten Beschreibungssprache entworfen. Ferner erfolgt mit Fokus auf Autobahn-Spurwechselsituationen eine Klassifikation der Messdaten mit auf maschinellem Lernen und Regeln basierenden, orthogonal wirkenden Algorithmen. Der duale Ansatz sorgt gegenüber einfachen Klassifikatoren für eine Reduktion der falsch positiven Erkennungen um 75% bei leicht geringerer Positiv-Detektionsrate. Mit Hilfe einer Clusteranalyse wird abschließend ein unüberwachtes System untersucht, welches für die Vorbereitung der Klassifikation Messdaten vorsortiert und auch komplexere Situationen wie auffahrende Fahrzeuge erkennt. Umgebungsspezifisch ist eine sorgfältige Wahl des Algorithmus anzustreben. Der zweite Teil widmet sich dem Ziel einer vorausschauenden Prädiktion, zunächst für einsicherende Objekte auf der Autobahn. Durch den Vergleich mit einer umfangreichen Lerndatenbank werden verschiedene Kombinationen online gemessener Objektmerkmale genutzt, um bereits durchschnittlich mehr als 0,6 s vor Überfahrt der Spurmarkierung ein Einscheren zu erkennen. Nur 20% der Ereignisse werden dabei nicht als solche erkannt. Innerstädtisch werden rechtsabbiegende Fahrzeuge an einer großen Forschungskreuzung in Braunschweig prädiziert, diesmal unter Nutzung von Algorithmen, welche mit Infrastrukturdaten angelernt werden. Eine frühzeitige Manövererkennung auch ohne Kenntnis des Ampelstatus erfolgt mit 90% Genauigkeit. Die Trajektorienprädiktion weist bei drei Sekunden Vorausschau eine Abweichung von einer Sekunde bei Vergleich eines festen Zielortes gegenüber dem Realverhalten auf und liefert damit deutlich bessere Ergebnisse als die Annahme einer konstanten Geschwindigkeit als Prädiktionsmethode.

Abstract

With the development of automated and connected driving, new challenges are emerging with the prediction of the behavior of surrounding traffic participants, which is necessary for a collision-free maneuver planning of the own vehicle. An improved understanding of recorded measurement data is of great importance, since in processed form, it can be used as a learning database for behavior prediction algorithms for environmental vehicles as well as many other applications. This thesis, as a primary goal, points out synergies resulting from the usage of similar machine learning methods for addressing both domains, *sorting and classification* of existing measurement data as well as a *behavior prediction* of traffic participants.

In the first part, measurement data that was recorded with the environment sensors of experimental vehicles, is used for a rule-based classification of generic maneuvers defined by the user. The algorithm yields results of good quality, highway maneuvers are designed prior using a novel description language. Furthermore, an algorithm focusing on highway lane change maneuvers, classifies measurement data utilizing orthogonal machine learning and rule based algorithms. This dual approach reduces false positives in comparison to a single classification by 75% with a slightly decreased true positive rate. Unsupervised learning is examined with a cluster analysis, which sorts data as a preparation step for classification. It detects even complex scenarios like highway-entering vehicles, however needing a careful selection of algorithms depending on the application environment. The second part addresses the goal of vehicle prediction, starting with cutting-in vehicles in a highway environment. Using a comprehensive learning database for comparison, different combinations of object features perceived during driving are analyzed, resulting in an average of 0,6 s foresight of the lane marking crossing of an object. Only 20% of the maneuvers are falsely not detected. Urban environments are examined by predicting right turning vehicles in a large research intersection in Braunschweig. This time, algorithms relying on infrastructural learning data are used. An early maneuver recognition without knowledge of the traffic light status is achieved with 90% accuracy. A trajectory prediction, when comparing to the real trajectory at a fixed location, holds an error of one second for a prediction horizon of three seconds and therefore achieves significantly better results than a constant velocity approach as a prediction method.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XIII
Tabellenverzeichnis	XVII
Formelzeichen	XIX
Abkürzungen	XXIII
1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung und Ziel	1
1.2. Inhalte der Arbeit	3
2. Theoretische Grundlagen	5
2.1. Wahrscheinlichkeitstheorie	5
2.1.1. Der Begriff Wahrscheinlichkeit	5
2.1.2. Wahrscheinlichkeitsverteilungen	6
2.1.3. Bedingte Wahrscheinlichkeiten	11
2.2. Maschinelles Lernen	12
2.2.1. Art des Lernens	13
2.2.2. Typ des Modells	14
2.2.3. Ziel des Modells	14
2.2.4. Eingesetzte Methoden	15
2.3. Klassifikationsmethoden	16
2.3.1. Binomiale logistische Regression	16
2.3.2. k-Nearest-Neighbor-Algorithmus	17
2.3.3. Naive Bayes Klassifikator	18
2.3.4. Entscheidungsbäume und Random Forest	19
2.3.5. Künstliche neuronale Netze	21
2.4. Clusteringmethoden	25
2.4.1. Density Based Spatial Clustering of Applications with Noise	25
2.4.2. Trajectory Clustering Algorithmus	27
2.4.3. Self-Organizing Maps	29
2.5. Evaluationsmethoden	31
2.5.1. Konfusionsmatrix	31

2.5.2. Kreuzvalidierung	32
3. Stand der Technik	33
3.1. Funktionsarchitektur automatisierter Fahrzeuge	33
3.2. Forschungslandschaft Datenverständnis und Prädiktion	36
3.2.1. Arbeiten mit deskriptiver Ausrichtung	38
3.2.2. Arbeiten mit prädiktiver Ausrichtung	41
3.3. Forschungsbedarf und Einordnung der eigenen Arbeit	45
4. Toolkette und Methodik	49
4.1. Versuchsträger	49
4.2. Forschungskreuzung	53
4.3. Verwendete Messdaten	54
4.3.1. Messfahrten und Aufzeichnung	54
4.3.2. Datenstruktur	56
4.4. Methodik und Synergien in Klassifikation und Prädiktion	59
5. Manöverklassifikation und Clustering	63
5.1. Klassifikation generischer Manöver	63
5.1.1. Beschreibungssprache und Ergebniskonzept	65
5.1.2. Toolkette und Detektionsprozess	68
5.1.3. Ground Truth Ergebnisevaluation	71
5.2. Spurwechseldetektion auf Autobahnen	75
5.2.1. Dualer Klassifikationsansatz	75
5.2.2. Lerndaten und Konzept der Studie	78
5.2.3. Evaluation und Diskussion der Potenziale	80
5.3. Clusteranalyse	82
5.3.1. Lerndaten und Versuchsdesign	83
5.3.2. Ergebnisse Autobahnfahrt	86
5.3.3. Ergebnisse Stadtfahrt	89
6. Objektverhaltensprädiktion	93
6.1. Entscheidungsprädiktion auf Autobahnen	93
6.1.1. Algorithmus und Merkmale	94
6.1.2. Lerndaten	97
6.1.3. Ergebnisevaluation	101
6.1.4. Einbettung in die Fahrzeugarchitektur	107
6.2. Trajektorienprädiktion in urbanem Umfeld	108
6.2.1. Zweistufige Methodik	110
6.2.2. Vorbereitung und Klassifikation der Lerndaten	111
6.2.3. Manöver-Vorklassifikation	115

6.2.4. Prädiktion von Longitudinaltrajektorien	118
6.2.5. Einbettung in die Fahrzeugarchitektur	123
7. Zusammenfassung und Ausblick	127
Literatur	131
Anhang	
A. Manöverklassifikation	141
B. Clusteranalyse	145
C. Prädiktion	149