



Guillaume Stefan Jornod

Predictive Vehicle-to-Vehicle Communications for Fuel-Efficient Platooning



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik

Predictive Vehicle-to-Vehicle Communications for Fuel-Efficient Platooning

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Guillaume Stefan JORNOD
Dipl. Ing. ETH, M.Sc.
aus Levallois-Perret, Frankreich

Eingereicht am: 17.07.2020
Mündliche Prüfung am: 29.10.2020

1. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Thomas KÜRNER
2. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Christoph MECKLENBRÄUKER
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Eduard JORSWIECK

Drückjahr: 2021

Mitteilungen aus dem Institut für Nachrichtentechnik der
Technischen Universität Braunschweig

Band 65

Guillaume Stefan Jornod

**Predictive Vehicle-to-Vehicle Communications
for Fuel-Efficient Platooning**

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

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 978-3-8440-7846-6

ISSN 1865-2484

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

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

Haftungsausschluss

Disclaimer

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

The results, opinions and conclusions expressed in this thesis are not necessarily those of Volkswagen Aktiengesellschaft.



Acknowledgements

THIS thesis presents my original research work. Although this statement suggests that this acknowledgement section would only contain a thank to myself, it can only be shorter than it should (an extended version is available upon request).

First and foremost, I wish to thank my Doktorvater, Thomas Kürner, who advised and guided me through this research endeavour along with the writing of this thesis. I would also like to thank Christoph Mecklenbräuker for taking on the duty of second appraiser and Eduard Jorswieck for endorsing the role of president of the jury. I am grateful for the interesting questions during the defense and the valuable feedback. I thank also all attendees of the defense: your support and interest was such that it overcame the austerity and isolation often associated with an online presentation.

I will also mention here the friends, colleagues and family members that reviewed the thesis and helped me to prepare the defense.

I wish to thank my colleagues from Volkswagen AG; their support enabled a productive work environment and in turns the achievement of this work. The research of Roman Alieiev and Andreas Pfadler directly contributed to the content of this thesis. Thanks also to Sofia Carreira, who worked on the fuel saving models. I would also like to mention Alcherio Martinoli and Milos Vasic from my time at DISAL, EPFL, who introduced me to automotive research and trials before the beginning of my doctorate. To all my co-authors, thank you for the fruitful collaborations, and for getting along with my unrealistic expectations in terms of figure alignment and style consistency.

Now, to the life part of the work-life balance. I wish to thank my friends for all the support that they provided. Special, additional, thanks to Thibault Vatter for helping me in the original design of the PIR conditional estimation model (at this stage, this is an unknown concept to most readers). And special thanks to Laureline Josset, who is cited only here to be consistent with the succinctness that has driven the writing of this whole document.

Last (I think it is usual to add *but not least*), to my family, thank you. Thank you for supporting me unconditionally.

Berlin, December 2020,

Guillaume Stefan JORNOD



Abstract

MOST of the systems supporting our day-to-day life will be automated in a near future: Tasks are taken over by machines one by one. The aim of the automation can be, for instance, avoiding tedious tasks, reducing potential errors, increasing efficiency and improving safety. The development of autonomous vehicles and intelligent transportation systems belongs to this overall process.

Autonomous vehicles will be able to rely on their own sensors to ensure their safe functioning. Their efficiency in terms of road operation and fuel consumption will be greatly improved by their cooperation, which is supported by wireless communications. Truck platooning with low inter-vehicle distances is an example of a cooperative vehicular function. By driving with smaller headways, the trucks experience reduced air drag and, in turn, save fuel.

This function requires a reliable regular exchange of messages. One challenge of vehicular wireless transmissions is the high dynamics of the environment and communication partners. The communication quality of service is subsequently rapidly varying, which makes it difficult for trucks to adapt their functional settings in a reactive manner accordingly. One solution is to develop a predictive system, in which the platoon will anticipate the future communications quality and plan inter-vehicle distance adaptation manoeuvres. This work provides the key elements to enable fuel saving for platooning using predictive communications.

The packet inter-reception time is a key indicator of performance for the quality of communications. Its value drives the minimum inter-vehicle distance for the platoon. Fuel-efficient strategies depending on its variation are implemented, enabling fuel saving with a prediction horizon below 100s. Provided with future quality of service values, an optimization framework yields the maximum fuel saving.

Multiple standards compete for supporting vehicular applications. The resulting radio access technologies need to be evaluated for each specific purposes. A benchmarking framework is developed for evaluating current and future communications technologies—IEEE 802.11p, LTE-V and 5G-V2X—for high-density platooning in an emergency braking scenario.

Methods implementing the concept of predictive quality of service for decentralized vehicular networks on the system level are proposed. Based on historical surrounding communication environment information, they yield an estimation of the packet inter-reception time distribution. The estimation leverages the exponential distribution of the packet inter-reception time and successfully captures its variation by predicting the rate of the distribution.

Another way of using the environmental information in a predictive system is to improve the instantaneous quality on the link level. A Doppler-shift compensation algorithm is employed to improve the performance of high-density platooning. This improvement can be measured by the decreased packet inter-reception time as well as by the reduced deviation from the target inter-vehicle distances.



Kurzfassung

ALLTÄGLICHE Abläufe unseres Lebens werden in naher Zukunft zunehmend automatisiert sein, da immer mehr Aufgaben sukzessiv von Maschinen übernommen werden. Fehlerreduktion, Vermeidung langwieriger Arbeiten oder die Erhöhung der Sicherheit und Leistungsfähigkeit komplexer Systeme – all das sind Beispiele für die ehrgeizig verfolgten Ziele der Automatisierung. Die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen und intelligenten Transportsystemen ist ein wesentlicher Teil dieses Entwicklungsprozesses.

Autonome Fahrzeuge werden dank ihrer Sensorik in der Lage sein, sicher zu fahren. Kooperation, die ihrerseits auf drahtloser Kommunikation beruht, steigert ihre Potenzialausschöpfung im Straßenverkehr erheblich und senkt ihren Kraftstoffverbrauch beträchtlich.

LKW Platooning mit verkürzten Abständen zwischen den Fahrzeugen ist ein hervorragendes Beispiel für kooperatives Fahren: durch die verringerte Distanz zwischen den Fahrzeugen sinkt der Luftwiderstand zwischen den Fahrzeugen, was direkt Kraftstoff einspart.

Um dies zu erreichen, wird ein zuverlässiger, regelmäßiger Austausch von Informationen benötigt. Eine Herausforderung für die drahtlosen Übertragungen von Fahrzeug zu Fahrzeug ist die hohe Dynamik der Fahrzeuge selbst und ihres Umfeldes. Die Kommunikationsqualität schwankt infolgedessen erheblich. Die notwendige Anpassung der funktionalen Eigenschaften wird dadurch erschwert. Eine Lösung ist die Entwicklung eines Prognosesystems. Mit einem solchen System wird die anstehende Kommunikationsqualität vorausgesagt und der Abstand zwischen den Fahrzeugen entsprechend angepasst.

Die Zeitspanne zwischen zwei korrekt empfangenen Nachrichten ist ein wesentlicher Indikator für die Qualität der Kommunikation. Der Abstand zwischen den Fahrzeugen wird von dieser Zeitspanne bestimmt. Es ist somit möglich, kraftstoffwirksame Strategien, die von den Schwankungen dieser Zeitspanne abhängig sind, zu entwickeln. Solche Strategien ermöglichen die Ersparnis von Kraftstoff mit einem Prognosehorizont von weniger als 100 s. Bei einer gegebenen Prognose der Kommunikationsqualität, erlaubt ein Optimierungsmodell die maximale Ersparung von Kraftstoff zu erreichen.

Mehrere Standards bieten sich für die Unterstützung von Fahrzeuganwendungen an. Jede Funkzugangstechnologien benötigt eine Überprüfung für den jeweiligen Anwendungszweck. Ein Benchmarking-Framework dient der Bewertung der aktuellen und zukünftigen Kommunikationstechnologien (IEEE 802.11p, LTE-V and 5G-V2X) für LKW-Platooning.

Methoden die das Konzept einer Prognose der Kommunikationsqualität in dezentralisierten Fahrzeug-Netzwerke implementieren werden bereitgestellt. Historische Daten des Kommunikationsumfeldes werden herangezogen und die Verteilung der Zeitspanne vom Informationsaustausch der miteinander verbundenen Empfangssysteme wird geschätzt. Die Schätzung nutzt die exponentielle Verteilung der Zeitspanne zwischen zwei korrekt empfangen Nachrichten und ergibt den inversen Skalenparameter. Eine solche Methode erfasst erfolgreich die Schwankungen der Zeitspanne.

Eine andere Art, Informationen über das Umfeld zu nutzen, ist die Verbesserung der momentanen Kommunikationsqualität. Ein Algorithmus für Doppler-Verschiebung Kompensation wird für die Verbesserung der Performance des LKW-Platoonings verwendet. Die Leistungssteigerung wird erreicht durch eine verringerte Sollwertabweichung des Fahrzeugabstandes, die wiederum erst durch die reduzierte Zeitspanne zwischen zwei korrekt empfangen Nachrichten im Informationsaustausch ermöglicht wird.



Contents

Acknowledgements	iv
Abstract	vi
Kurzfassung	ix
List of Tables	xx
List of Figures	xxi
Chapter 1 Introduction	1
Part I Context	7
Chapter 2 Platooning	8
2.1 Definitions	9
2.2 Platooning Control	10
2.2.1 Centralized Control	11

2.2.2	Decentralized Control	12
2.3	Use Cases	13
2.3.1	Inter-Vehicle Distance Adaptation . .	13
2.3.2	Emergency Braking	15
2.3.3	Maintain Platoon	16
Chapter 3	Vehicular Networks	18
3.1	Communications Technologies	19
3.1.1	IEEE 802.11p	20
3.1.2	LTE-V	21
3.1.3	5G-V2X	23
3.1.4	LTE-D2D	24
3.2	Predictive Communications	26
3.2.1	Predictive Quality of Service	27
3.2.2	Environment Aware Communications	28
3.3	Simulation Tools	29
Chapter 4	Scope	35
4.1	Motivations	37
4.1.1	Application Requirements	38
4.1.2	V2V technologies	40
4.1.3	System Layer Prediction	40
4.1.4	Link Level Prediction	43
4.2	Structure	44
Part II	Application Adaptation	49
Chapter 5	Functional Requirements for the PIR	50
5.1	Emergency Braking Use Case	52

5.2	Analysis Methodology	54
5.2.1	Data Processing	54
5.2.2	Linear Regression with Polynomial Features	56
5.3	Results and Analysis	58
5.3.1	Functions Mapping PIR to IVD	58
5.3.2	Application to PIR Prediction in Highway Scenario	63
Chapter 6	Fuel Saving for Platooning	65
6.1	Control Model	68
6.1.1	Platooning Control Algorithm	68
6.1.2	Parameters	73
6.2	Method	75
6.2.1	Fuel Consumption Model for HDPL	75
6.2.2	Objectives	78
6.2.3	Scenario and Simulations	81
6.3	Results and Modeling	85
6.3.1	Phase I	86
6.3.2	Phase II	90
6.3.3	Manoeuvre Performance Modeling	93
6.4	Fuel Saving Optimization	97
6.4.1	Fuel Saving Optimization Problem Setting	97
6.4.2	Optimization Results	101

Part III V2V Technologies 107

Chapter 7 Sidelink Technologies Benchmarking Setup 108

7.1	Benchmarking Setup Implementation	109
7.1.1	Communication Models	110
7.1.2	Transmission Evaluation	111
7.1.3	Use Case	112
7.2	Simulations and Results	115
7.2.1	Simulation Settings and Scenarios	115
7.2.2	Key Performance Indicators	116
7.2.3	Simulation Results	116
7.2.4	Discussion	120

Chapter 8 5G Extensions 124

8.1	Simulation Platform Extension	125
8.1.1	Channel Models	126
8.1.2	Radio Access Technologies	128
8.1.3	Simulator Structure	129
8.2	Channel Models Comparison	130
8.2.1	Scenario	130
8.2.2	Results	131
8.3	Radio Access Technologies Performance	134
8.3.1	Scenario	134
8.3.2	Results	136

Part IV Packet Inter-Reception Time Prediction 140

Chapter 9 PIR Prediction Models 141

9.1	Scenario	142
9.1.1	High-Density Platooning System	143

9.1.2	Simulation Platform	144
9.2	Data Set	146
9.2.1	Target: Packet Inter-Reception Time	146
9.2.2	Environmental Model	149
9.2.3	Features Dimensionality	151
9.3	Prediction based on Kernel Density Estimation	153
9.3.1	Prediction Model Formulation	153
9.3.2	Kernel Density Estimation	155
9.3.3	Selected Results	157
9.4	Conditional Density Estimation	159
9.4.1	Conditional Exponential Distribution	161
9.4.2	Model Evaluation	165
9.4.3	Evaluation and Results	167
Chapter 10	On-the-Fly PIR CDE	174
10.1	Scenario and Data	175
10.1.1	Scenario	176
10.1.2	Data Set	177
10.2	Preliminary Analysis	179
10.3	Extended Environmental Model	181
10.3.1	Annulus-Sector Model	183
10.3.2	Learning Approaches	191
10.3.3	Model Parameters Evaluation	193
10.4	On-the-Fly Application	196
10.4.1	On-the-Fly Learning Performance	197
10.4.2	On-the-Fly Prediction	200
Chapter 11	Prediction to Forecast	203
11.1	Sensitivity Analysis	204
11.1.1	Method	205

11.1.2	Results	206
11.1.3	Input Prediction	208
11.2	Local to Global Knowledge	211
11.2.1	Method	212
11.2.2	Results	215
Part V	Link Level Prediction	219
Chapter 12	Environment-Aware Communications – Setup	220
12.1	Link Improvement for Fuel Saving	222
12.1.1	Link Level Challenges of the Vehicular Environment	222
12.1.2	Doppler Frequency Shift in HDPL	224
12.1.3	Impact on Fuel Saving	227
12.2	Sensor-Based Predictive Communications	228
12.2.1	LTE-D2D Simulator Extension	229
12.2.2	Sensor-Based Predictive Communication	233
12.3	HDPL Control Algorithms and Models	236
12.3.1	Control Algorithms	236
12.3.2	Vehicle Model	240
12.4	Scenarios Implementation	242
Chapter 13	Environment-Aware Communications – Applications	245
13.1	Maintain Platoon	246
13.1.1	Scenario Description	246
13.1.2	HDPL Functional Performance	249
13.2	Collaborative Collision Avoidance	255
13.2.1	Scenarios Description	255

13.2.2	Results	259
13.2.3	Discussion	262
Chapter 14	Conclusion	266
14.1	Contributions and Findings	267
14.2	Outlook and Future Work	272
Acronyms		280
Symbol List		289
Bibliography		292