

# Model identification and learning control in autonomous driving

Stijn Staring

Thesis voorgedragen tot het behalen  
van de graad van Master of Science  
in de ingenieurswetenschappen:  
elektrotechniek, optie Elektronica en  
geïntegreerde schakelingen

**Promotor:**

Prof. dr. ir. Jan Swevers

**Assessoren:**

Prof. dr. ir. Bert Pluymers  
Prof. dr. ir. Herman Bruyninckx

**Begeleider:**

dr. ir. Son Tong

© Copyright KU Leuven

Without written permission of the thesis supervisor and the author it is forbidden to reproduce or adapt in any form or by any means any part of this publication. Requests for obtaining the right to reproduce or utilize parts of this publication should be addressed to ESAT, Kasteelpark Arenberg 10 postbus 2440, B-3001 Heverlee, +32-16-321130 or by email [info@esat.kuleuven.be](mailto:info@esat.kuleuven.be).

A written permission of the thesis supervisor is also required to use the methods, products, schematics and programmes described in this work for industrial or commercial use, and for submitting this publication in scientific contests.

Zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van zowel de promotor als de auteur is overnemen, kopiëren, gebruiken of realiseren van deze uitgave of gedeelten ervan verboden. Voor aanvragen tot of informatie i.v.m. het overnemen en/of gebruik en/of realisatie van gedeelten uit deze publicatie, wend u tot ESAT, Kasteelpark Arenberg 10 postbus 2440, B-3001 Heverlee, +32-16-321130 of via e-mail [info@esat.kuleuven.be](mailto:info@esat.kuleuven.be).

Voorafgaande schriftelijke toestemming van de promotor is eveneens vereist voor het aanwenden van de in deze masterproef beschreven (originele) methoden, producten, schakelingen en programma's voor industrieel of commercieel nut en voor de inzending van deze publicatie ter deelname aan wetenschappelijke prijzen of wedstrijden.

# Preface

I would like to thank my family in the first place. During the history of my studies they always have been my biggest fans and I want to show my gratitude for the opportunities they have given me. I also want to thank my promoter Professor Swevers at the KU Leuven and Dr. Tong my mentor at Siemens for the professional discussions and tips they have given me in order to improve results.

*Stijn Staring*

# Contents

<b>Preface</b>	<b>i</b>
<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>iv</b>
<b>List of Figures and Tables</b>	<b>v</b>
<b>List of Abbreviations and Symbols</b>	<b>vi</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2 Comfort definition and modelling</b>	<b>3</b>
<b>3 The Learning Algorithm</b>	<b>5</b>
3.1 The First Topic of this Chapter . . . . .	7
<b>4 Path Planning MPC</b>	<b>9</b>
4.1 The First Topic of the Chapter . . . . .	9
4.2 A Second Topic . . . . .	10
4.3 Conclusion . . . . .	10
<b>5 Path tracking MPC</b>	<b>11</b>
5.1 The First Topic of this Chapter . . . . .	11
5.2 The Second Topic . . . . .	11
5.3 Conclusion . . . . .	11
<b>6 Validatie</b>	<b>13</b>
6.1 The First Topic of this Chapter . . . . .	13
6.2 The Second Topic . . . . .	13
6.3 Conclusion . . . . .	13
<b>7 Conclusion</b>	<b>15</b>
<b>A The First Appendix</b>	<b>19</b>
<b>B The Last Appendix</b>	<b>21</b>
<b>Bibliography</b>	<b>23</b>

# Abstract

The **abstract** environment contains a more extensive overview of the work. But it should be limited to one page.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

# Samenvatting

In dit **abstract** environment wordt een al dan niet uitgebreide Nederlandse samenvatting van het werk gegeven. Wanneer de tekst voor een Nederlandstalige master in het Engels wordt geschreven, wordt hier normaal een uitgebreide samenvatting verwacht, bijvoorbeeld een tiental bladzijden.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

# List of Figures and Tables

## List of Figures

1.1	Concept visualization of autonomous driving. (source: <a href="#">[2]</a> ) . . . . .	1
-----	---	---

## List of Tables

# List of Abbreviations and Symbols

## Abbreviations

LoG      Laplacian-of-Gaussian

## Symbols

42      “The Answer to the Ultimate Question of Life, the Universe, and Everything”  
according to [?]  
 $c$       Speed of light



# Chapter 1

## Introduction

### 1.0.1 Importance of topic

"Society expects autonomous vehicles to be held to a higher standard than human drivers." [5] This quote is setting the tone of the technology in autonomous driving. In order to be accepted to the public, autonomous vehicles should perform as least as good as the conventional human driver on parameters as for example safety. Despite widespread research on self-driving vehicles the acceptance by the user stays only limited.[1] The purchase behaviour of customers can be linked with a good feeling which is directly connected with comfort. Also in order to gain more trust by the public it is clear that the challenge of making autonomous vehicles as comfortable as possible, should be tackled. This immediately leads to the questions what comfort during driving exactly is and how to measure it.

Driving comfort is a personal experience and also depend on the current emotional state of the driver. This means that more than one driving style for autonomous vehicle-driving should be identified for a certain vehicle. [7] The state of the driver can be communicated with the vehicle at the start of the ride.



FIGURE 1.1: Concept visualization of autonomous driving. (source: [2])

### 1.0.2 Link with previous studies and problem formulation

In order to identify the specific comfort preferences of the driver, it should be able to learn them by demonstration. [4]

Despite that each driver has its own preferences, they are based on a common notion of comfort where only different trade-offs are made. For example some drivers prefer more aggressive driving behaviour than others which will manifest itself in a different trade off of different comfort criteria than for example a defensive drivers. This will later in this thesis be translated into a comfort objective where different weights are used in order to quantify different comfort trade-offs made.

In order to find comfort criteria which can be used to distinguish different drivers, research about the notion of comfort is necessary. Passenger surveys in public road transport about carsickness [6] have revealed that lateral motions and non-smooth driving behaviour could be best correlated with car sickness. There is a consensus reached about the contribution of continuous trajectories to the prevention of motion sickness and the natural feel of paths.[3] This means that higher order kinematic variables like accelerations and jerks also should be considered in the assessment of comfort.

### 1.0.3 Thesis objective

The goal of this thesis is to build further on the research of learning by demonstration which stayed with a theoretical idea. [4]. The investigation is mainly focussed on the practical implementation and validation of a learning algorithm that is able to capture user specific driving preferences in weights of a comfort objective function. The learning process is to be done offline. The next step will be to cast this in a path planning MPC formulation which will be calculating online feasible and comfortable paths whereafter a there is looked at an MPC tracking algorithm to follow the planned path.

The execution of this research is conducted with the support of "Siemens Digital Industries Software - NVH R&D engineering department" located in Leuven which made it possible to preserve the direct link with reality. Software was made available e.g. Simcenter Amesim and the possibility to validate the obtained algorithms with real driver data made it possible to make the results that could be obtained more significant.

*Aanvullen Bespreek de layout van de thesis die gebruikt werd -> check of wat verteld werd in de inleiding nog correct is. Wat is de kapstok?*

## Chapter 2

# Comfort definition and modelling

Dan komt de vraag wat is comfort precies? Literatuur studie... Waarnaar kan men kijken als men het over comfort heeft. Lane change bekeken om comfort te valideren → zeg dat er geen iso standaarden aanwezig zijn. Hoe wordt een bestuurder gemodelleerd → dit wordt gedaan door een kansverdeling. Waarom is entropie nuttig om deze bestuurder te kunnen bekijken? Doe hier meer onderzoek over en verantwoord het gebruik hiervan. Conclusie komt af met comfort parameters die verder worden gebruikt als features. Bij de uitleg van de features en waarom er versnelling en acceleratie wordt gebruikt, baseer ook op paper 7 van hoofdpaper Wat wordt er in de literatuur al gebruikt om comfort te modelleren en geef een overzicht.

Leg uit hoe komt aan entropy distribution komt → kan beroep doen op ref 2 en 20 van het hoofdrapport (both are assuming an exponential distribution) (IMPORTANT) Dit is de reden voor het gebruik van de maximum entropie distributie: To learn observed behavior, we aim to model the distribution that underlies the empirical sample trajectories. Following Abbeel and Ng [1], we aim to find a model that induces distributions that match, in expectation, the feature values  $f_D$  of the empirical trajectories  $D$ , yielding  $E_p(x)[f(x)] = f_D = \frac{1}{|D|} \sum_{x \in D} f(x)$ : (1) In general, however, there is not a unique distribution that matches the features. Ziebart et al. [24] resolve this ambiguity by applying the principle of maximum entropy [10], which states that the distribution with the highest entropy represents the given information best since it does not favor any particular outcome besides the observed constraints. (this is the least biased distribution) Modelling expected features by hybrid monte carlo method: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S037026938791197X?token=71567B7640C402F2FF578E34E3BB7914> paper: Feature-based prediction of trajectories for socially compliant navigation which states that the distribution with the highest entropy represents the given information best since it does not favor any particular outcome besides the observed constraints.



## Chapter 3

# The Learning Algorithm

Herinner de lezer nog even de structuur die gaat worden gevolgd. Learning, planning, tracking, validatie. Dit hoofdstuk zal over het learning gaan. Hoe is algorithm opgebouwd? Wrm wordt dit zo gedaan? Welke vehicle modellen wordt er gebruikt? Wrm mag men hier een simple vehicle mode gebruiken? Dit is gemachtigd omdat men hier de omgeving wil scannen voor een feasible pad → dit wordt trager gedaan dan de tracking.(tracking zal gebruik maken van een meer complex model) Path planning ligt focus vooral op de omgeving. Goed refereren naar het rapport en VS rapport Wat zijn de assumpties die werden genomen?

Hoe zal de methode gevalideerd worden? Leg de twee methodes uit: code generatie en kijken of de wegings factoren terug gevonden kunnen worden? Mappen de feature values met de values van het geobserveerde pad? → is het doel dat gevolgd probeert te worden haalbaar?

Ga hier niet meer te diep in op de entropie. Leg het hier meer intuïtief uit om de lezer niet te verwaren.

Vermeld afleiding van algortihm. Leg uit in Thesis hoe komt aan gradient die gebruikt. Zie papers: Ziebart et al and Kretzschmar et al.

Modeleer een andere bestuurder. Can try to reproduce a data set with a change of parameters which represents a different driver. Can check that the learned model is also different. Hiermee aantonen dat er ook echt andere wegingsfactoren worden gegenereerd en dat de specifieke driving characteristics worden meegenomen.

Ligt een tipje van de sluier op : hoe zal de data gegenereerd worden? (dit moet kort blijven) Plot simulink model en duidt de blokken aan die zullen worden ingevuld. Hier gaat dieper in gegaan worden in de volgende hoofdstukken.

Maak een vermelding dat men het menselijke gedrag van het geleerde model kan nagaan met een Turing test.

Maak een plotje zoals paper Learning to Predict Trajectories of Cooperatively Navigating Agents → feature variance afwijking en average error. (zelfde plotjes als al de papers)

Check uitgebreide samenvatting van hoofdpaper op oneNote.

### 3. THE LEARNING ALGORITHM

---

Schrijf een paragraaf over de theta update → zie RPROP methode → beschrijf waarom beter is dan andere methodes die gezien werden. Bespreek hoe de parameters werden gekozen.

Kan vermelding maken dat in deze thesis de features zijn gekozen met de hand → men kan proberen om de features ook te leren van data (Characterizing Driving Styles with Deep Learning)

## **3.1 The First Topic of this Chapter**





## Chapter 4

# Path Planning MPC

MPC → path planning met het gevonden model.

Ga hier volledig in op wat MPC is. Valideer de MPC code door na te gaan wat de invloed is bij het variëren van de gevonden parameters. Hoeveel zal het verschillen? Ga in op het gebruikte point model/non-linear model en bespreek de gelijkenissen en de verschillen van het learning algorithm. (zie ook notes VS en verbeteringen NAETS)

### 4.1 The First Topic of the Chapter

First comes the introduction to this topic.

#### 4.1.1 An item

Please don't abuse enumerations: short enumerations shouldn't use “`itemize`” or “`enumerate`” environments. So *never write*:

The Eiffel tower has three floors:

- the first one;
- the second one;
- the third one.

But write:

The Eiffel tower has three floors: the first one, the second one, and the third one.

### **4.2 A Second Topic**

#### **4.2.1 Another item**

### **4.3 Conclusion**

The final section of the chapter gives an overview of the important results of this chapter. This implies that the introductory chapter and the concluding chapter don't need a conclusion.

## Chapter 5

# Path tracking MPC

MPC → path tracking met non lin model. Bespreek non lin model Bespreek resultaten. Valideer de resultaten. Wat gebeurt er als de parameters iets anders worden geschat? Zeker de parameters voor de banden zijn moeilijk om te schatten. Bespreek de tekort komingen van de het model en valideer het model hoe de referentie wordt getrackt met andere parameter values. hoe robuust is de mpc? (Zei paper VS)

Hier kan men praten over de implementatie in het simulink model. Het zou goed zijn om het ACADO model te vervangen door een tracking MPC die in CasADi geschreven is. (reference path to follow wordt niet geupdated maar blijft constant in model → dit is niet hoe het werkt in de realiteit.) Kan als echt tegoei wilt doen ook inladen in de template die gekregen heb van Flavia → PID vervangen door MPC en path planner. Een simulink model is nodig om er het 15 dof vehicle model in te kunnen verwerken.

### 5.1 The First Topic of this Chapter

#### 5.1.1 Item 1

Sub-item 1

Sub-item 2

#### 5.1.2 Item 2

### 5.2 The Second Topic

### 5.3 Conclusion



## Chapter 6

# Validatie

Bespreek de validatie van de methode. Implementeer simulaties in prescan. Bespreek de verschillende software tools bij Siemens → Amesim, simulink, prescan. Hoe werken ze samen en hoe wordt de validatie precies gedaan? Wat zijn de resultaten? Install amesim and write a chapter about how the dataset is generated. How is the amesim model defined etc.

### 6.1 The First Topic of this Chapter

#### 6.1.1 Item 1

Sub-item 1

Sub-item 2

#### 6.1.2 Item 2

### 6.2 The Second Topic

### 6.3 Conclusion



## Chapter 7

# Conclusion

The final chapter contains the overall conclusion. It also contains suggestions for future work and industrial applications.





# Appendices



# Appendix A

## The First Appendix

Appendices hold useful data which is not essential to understand the work done in the master's thesis. An example is a (program) source. An appendix can also have sections as well as figures and references[?].



## Appendix B

# The Last Appendix

Appendices are numbered with letters, but the sections and subsections use arabic numerals, as can be seen below.



# Bibliography

- [1] I. Bae, J. Moon, and J. Seo. Toward a comfortable driving experience for a self-driving shuttle bus. *Electronics (Switzerland)*, 8(9):1–13, 2019.
- [2] E. David. Will autonomous vehicles be safe to use? | Cybersecurity & Technology News | Secure Futures | Kaspersky.
- [3] M. Elbanhawi, M. Simic, and R. Jazar. In the Passenger Seat: Investigating Ride Comfort Measures in Autonomous Cars. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 7(3):4–17, 2015.
- [4] M. Kuderer, S. Gulati, and W. Burgard. Learning driving styles for autonomous vehicles from demonstration. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2015-June(June):2641–2646, 2015.
- [5] Prof. Amnon Shashua. Experience Counts, Particularly in Safety-Critical Areas | Intel Newsroom, mar 2018.
- [6] M. Turner and M. J. Griffin. Motion sickness in public road transport: The effect of driver, route and vehicle. *Ergonomics*, 42(12):1646–1664, 1999.
- [7] Yusof N.B.M. *Comfort in Autonomous Car : Mitigating Motion Sickness by Enhancing Situation Awareness through Haptic Displays* Nidzamuddin Md . Yusof. Number 2019. Eindhoven, 2019.