

# 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>iv</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>v</b>
<b>List of Figures and Tables</b>	<b>vi</b>
<b>List of Abbreviations and Symbols</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Wat moet er vermeld worden . . . . .	1
<b>2 Comfort definition and modelling</b>	<b>3</b>
2.1 The First Topic of the Chapter . . . . .	4
2.2 A Second Topic . . . . .	4
2.3 Conclusion . . . . .	4
<b>3 The Learning Algorithm</b>	<b>5</b>
3.1 The First Topic of this Chapter . . . . .	7
3.2 Figures . . . . .	7
3.3 Tables . . . . .	7
3.4 Conclusion . . . . .	8
<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>
A.1 More Lorem . . . . .	19
A.2 Lorem 51 . . . . .	19
<b>B The Last Appendix</b>	<b>21</b>
B.1 Lorem 20-24 . . . . .	21
B.2 Lorem 25-27 . . . . .	21
<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

3.1 The KU Leuven logo. . . . .	7
---------------------------------	---

## List of Tables

3.1 A table with the wrong layout. . . . .	7
3.2 A table with the correct layout. . . . .	7



# List of Abbreviations and Symbols

## Abbreviations

LoG	Laplacian-of-Gaussian
MSE	Mean Square error
PSNR	Peak Signal-to-Noise ratio

## Symbols

42	“The Answer to the Ultimate Question of Life, the Universe, and Everything” according to <a href="#">[1]</a>
$c$	Speed of light
$E$	Energy
$m$	Mass
$\pi$	The number pi



# Chapter 1

## Introduction

Zoek hier een bron die een quote maakt over zelfrijdende wagens. Inspiratie in thesissen en taak voertuigsystemen (iemand die er veel van weet)

### 1.1 Wat moet er vermeld worden

Goed refereren naar de bronnen waar over spreekt. Bespreek de vooruitgangen die gemaakt zijn in het gebruik van zelf rijden wagens en probeer te verkopen wrm het nu nuttig is om naast veiligheid te kijken naar comfort.

wagenziektes verminderen een klant koopt een auto waar hij zich goed in voelt  
→ comfort is specifiek comfort = vertrouwen

(meer op het einde van de introductie) Dit hoofdstuk geeft vooral een overzicht over de theorie en de opbouw van het probleem. Wat zijn de doelen van het project  
→ zie slides / wat is de probleemstelling. Wat is de kapstok → drie stappen learning, planning, controlling, validatie Hoe zal het er in grote lijnen uit gaan zien en welke softwares zijn er allemaal aan te pas gekomen Welke voorzieningen heeft Siemens hieromtrent.

Wat is een optimal control problem en wat is model predictive control? (zie paper VS) → wat dieper ingaan op wat ik geleerd heb bij het vak optimization → zie ook important thesis notes van optimization

Maak een overview van het control sequence → flowchart zoals op p5 zwitser. Maak zo veel mogelijk om de stromingen van de stappen bijvoorbeeld 3 stappen in project goed weer te geven. Veel figuren!



## 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/037026938791197X?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.

### 2.1 The First Topic of the Chapter

First comes the introduction to this topic.

#### 2.1.1 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.

### 2.2 A Second Topic

#### 2.2.1 Another item

### 2.3 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 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 verwarren.

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)





FIGURE 3.1: The KU Leuven logo.

gnats	gram	\$13.65
	each	.01
gnu	stuffed	92.50
emu		33.33
armadillo	frozen	8.99

TABLE 3.1: A table with the wrong layout.

Item		
Animal	Description	Price (\$)
Gnat	per gram	13.65
	each	0.01
Gnu	stuffed	92.50
Emu	stuffed	33.33
Armadillo	frozen	8.99

TABLE 3.2: A table with the correct layout.

## 3.1 The First Topic of this Chapter

### 3.1.1 An item

A master's thesis is never an isolated work. This means that your text must contain references. On-line documents[3] as well as books[2] can be referenced.

## 3.2 Figures

Figures are used to add illustrations to the text. The Figure 3.1 shows the KU Leuven logo as an illustration.

## 3.3 Tables

Tables are used to present data neatly arranged. A table is normally not a spreadsheet! Compare Table 3.1 en Table 3.2: which table do you prefer?

#### **3.4 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 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[\[1\]](#).

### A.1 More Lorem

#### A.1.1 Lorem 15–17

#### A.1.2 Lorem 18–19

### A.2 Lorem 51



## Appendix B

# The Last Appendix

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

### **B.1    Lorem 20-24**

### **B.2    Lorem 25-27**





# Bibliography

- [1] D. Adams. *The Hitchhiker's Guide to the Galaxy*. Del Rey (reprint), 1995. ISBN-13: 978-0345391803.
- [2] T. Pratchett and N. Gaiman. *Good Omens: The Nice and Accurate Prophecies of Agnes Nutter, Witch*. HarperTorch (reprint), 2006. ISBN-13: 978-0060853983.
- [3] Wikipedia. Thesis or dissertation. URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Thesis\\_or\\_dissertation](http://en.wikipedia.org/wiki/Thesis_or_dissertation), last checked on 2010-01-07.