

# Autonomous Driving in Dynamic Environments

THÈSE N° 4143 (2008)

PRÉSENTÉE LE 15 SEPTEMBRE 2008

À LA FACULTE SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR  
LABORATOIRE DE SYSTÈMES AUTONOMES 1  
PROGRAMME DOCTORAL EN SYSTÈMES DE PRODUCTION ET ROBOTIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

**Sascha KOLSKI**

Diplom im Studiengang Informatik, Universität Stuttgart, Allemagne  
et de nationalité allemande

acceptée sur proposition du jury:

Prof. M.-O. Hongler, président du jury

Prof. R. Siegwart, directeur de thèse

Dr D. Ferguson, rapporteur

Prof. L. Guzzela, rapporteur

Dr A. Sulzmann, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Suisse  
2008

# Abstract

With the bigger number of cars on our roads every year, also the potential danger to die or get injured in road traffic increases. Most of these accidents are due to human error, while driver assistant systems like ESP help making traffic more safe. To increase this effect, advanced driver assistant systems are under development and a whole body of research is performed all over the world to enable autonomous driving on our roads.

In this context in 2004 the work for this thesis was started focusing on the question on how to enable autonomous driving in dynamic traffic scenes, especially considering dynamic obstacles. An autonomous driving demonstrator was built that was a platform for research in the field of autonomous navigation in both structured on road environments and unstructured environments like parking lots.

Driving among other traffic participants needs a deep understanding of their behaviors to predict their possible behaviors and act accordingly to ensure safe driving.

The algorithms presented in this thesis were widely tested on the SmartTer vehicle at EPFL and ETH and during the preparation of the DARPA Urban Challenge entry of the Tartanracing Team at Carnegie Mellon University in Pittsburgh, Pennsylvania, USA. In the SPARC project (Secure Propulsion using Advanced Redundant Control) the experiences gained from autonomous driving research were also applied to advanced driver assistant systems and showed the strong link between autonomous driving and driver assistant systems.

**Keywords:** autonomous driving, driver assistance systems, obstacle avoidance

# Zusammenfassung

Mit der weltweiten jährlichen Zunahme des Strassenverkehrs steigt auch die Anzahl von Verletzungen und Todesfällen im Strassenverkehr. Da die meisten dieser Unfälle aufgrund von menschlichen Fehlern passieren, helfen moderne Fahrerassistenzsysteme, solche Unfälle zu vermeiden. Um diesen Effekt zu verstärken und mehr Unfälle zu vermeiden werden verbesserte Fahrerassistenzsysteme entwickelt und die Forschung im Bereich des autonomen Fahrens vorangegetrieben.

In diesem Kontext hat im Jahr 2004 die Arbeit für diese Dissertation mit der Frage begonnen, wie autonomes Fahren in alltäglichen Verkehrssituationen möglich sein kann. Dabei wurde ein besonderes Augenmerk auf die Dynamik der Verkehrssituation und die Bewegung der anderen Verkehrsteilnehmer gelegt. Es wurde ein Demonstrator für autonomes Fahren aufgebaut, der als Forschungsplattform für Algorithmen zum Fahren sowohl in strukturierten Umgebungen, also auf Strassen, wie auch in unstrukturierten Umgebungen, wie z.B. auf Parkplätzen, diente.

In diesem Zusammenhang ist das Erkennen und Verstehen von anderen Verkehrsteilnehmern und ihren Absichten besonders wichtig, um ein sicheres Fahren zu gewährleisten.

Die Algorithmen, die in dieser Arbeit beschrieben werden, wurden auf unseren Testfahrzeugen in der Schweiz, aber auch während der Vorbereitung und Durchführung der DARPA Urban Challenge im Team Tartanracing an der Carnegie Mellon University in Pittsburgh, USA ausgiebig getestet. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts SPARC (Secure Propulsion Using Advanced Redundant Control) wurden diese Erfahrungen auf Fahrerassistenzsysteme angewendet, was den tiefen Zusammenhang von Autonomem Fahren und Fahrerassistenzsystemen aufzeigt.

**Schlüsselwörter:** Autonomes Fahren, Fahrerassistenzsysteme, Kollisionsvermeidung

# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Related Work and state of the art . . . . .	2
1.1.1	Darpa challenges . . . . .	5
1.1.2	European research projects . . . . .	6
1.2	Thesis statement . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Vehicle - Setting up an autonomous car</b>	<b>9</b>
2.1	Smart . . . . .	10
2.1.1	Actuators . . . . .	11
2.1.2	Sensors . . . . .	14
2.1.2.1	Proprioceptive sensors . . . . .	14
2.1.2.2	Exteroceptive sensors . . . . .	14
2.2	SmartTer . . . . .	15
2.2.1	Vehicle base . . . . .	15
2.2.2	Vehicle modifications . . . . .	16
2.2.3	Sensors . . . . .	18
2.2.4	Computational power and software architecture . . . . .	22
2.2.5	Vehicle control . . . . .	25
2.2.6	Localization . . . . .	26
2.3	Boss . . . . .	28

## CONTENTS

---

2.3.1	Vehicle and modifications . . . . .	28
2.3.2	Sensors . . . . .	30
2.4	Conclusions and future work . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Autonomous driving in static environments</b>	<b>33</b>
3.1	Related Work and State of the Art . . . . .	34
3.2	Autonomous Driving in structured and unstructured environments	36
3.2.1	Localization . . . . .	36
3.2.2	Lane Detection . . . . .	40
3.2.3	Perceiving and Mapping Obstacles . . . . .	41
3.2.4	Global Path Planning . . . . .	43
3.2.5	Local Planning . . . . .	46
3.2.6	Combining global and local motion planning . . . . .	47
3.3	Experiments . . . . .	49
3.3.1	Experimental setup . . . . .	49
3.3.2	Experimental Results . . . . .	49
3.4	Conclusions . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Autonomous Driving in dynamic environments</b>	<b>55</b>
4.1	Problem Statement . . . . .	56
4.2	Related work and state of the art . . . . .	58
4.3	Dynamic collision avoidance . . . . .	60
4.3.1	Perception and environment models . . . . .	60
4.3.2	Predicting dynamic obstacles . . . . .	62
4.4	Path planning under the presence of dynamic obstacles . . . . .	63
4.4.1	Local planning with dynamic obstacles . . . . .	67
4.4.1.1	Computational complexity . . . . .	72
4.4.2	Experiments and results . . . . .	73
4.5	Conclusions . . . . .	75

<b>5</b>	<b>Conclusions and outlook</b>	<b>77</b>
----------	--------------------------------	-----------