

学校编码: 10384  
学 号: 200424010

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

基于视觉的汽车自动驾驶系统关键技术研究

Research on Navigation Techniques Based on Machine  
Vision for Automatic Driving System

许华荣

指导教师姓名: 郭东辉教授

专 业 名 称: 凝聚态物理

论文提交日期:

论文答辩时间:

学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2011年3月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 摘 要

在基于视觉的汽车自动驾驶系统中，视觉传感器模仿了驾驶员的眼睛功能，获取道路信息，提取车道线，检测障碍物；汽车自动驾驶系统利用这些信息控制汽车沿着车道安全行驶。摄像机标定解决了图像坐标系与世界坐标系之间的转换关系，是基于视觉的汽车自动驾驶系统的前提；车道线提取和车道建模是汽车自动驾驶系统的基础；障碍物检测是汽车自动驾驶安全行驶的保证；车道跟踪的性能直接影响汽车驾驶的准确性和舒适性。鲁棒性和实时性是基于视觉的汽车自动驾驶技术的主要瓶颈，针对这种情况，本文在视觉导航系统摄像机动态标定、车道检测与跟踪、障碍物检测等方面开展了研究。

本论文研究的创新之处在于：

(1) 提出一种简捷、实用的摄像机参数在线标定算法。该算法仅需借助一组平行的道路标识线和一组与地面垂直的平行线来确定摄像机参数。在摄像机高度已知的条件下，该算法可以从图像中得到目标物在现实世界坐标中位置。

(2) 提出一种新的基于均匀非周期 B 样条曲线模型的结构化道路检测算法。为了准确定位道路弯道位置，该算法运用最大转向偏差定位方法求解车道模型的控制点。

(3) 基于计算动词理论，根据汽车自动驾驶控制系统的特性以及驾驶舒适性的要求，建立计算动词控制规则，控制 PID 参数的自整定，实现适合汽车自动驾驶系统的 PID 控制策略。

(4) 基于牛顿的万有引力定律，定义一种新的分类器，即反  $n$  次方引力场分类器，并利用该分类器对视频帧的不同光流数据进行分类，分离出道路光流和障碍物光流，从而实现障碍物检测的目的。

为了实现系统小型化，并为今后向产品化过渡，本文把以上算法移植到 DM6446 嵌入式系统上，实现了汽车自动驾驶系统的部分功能。

**关键词：** 自动驾驶；机器视觉；参数标定； 车道检测；障碍物检测

厦门大学博硕士学位论文摘要库

## Abstract

In vision-based automatic driving systems, vision sensors play the role of the driver's eyes to obtain road information, extract lane, detect obstacle, which guarantee the vehicle's safety along the lane. Camera calibration has resolved the relations of the image coordinate and world coordinate system and is one of the key technologies in the vision-based automatic driving systems. Lane marking extraction and road modeling are the base components of the automatic driving system. Obstacle detection is a vehicle autopilot guarantee of safe driving. Road tracking performance directly affects accuracy and driving comfort. Robustness and real-time is the main bottleneck in vision-based automatic driving. Based on these reasons, this dissertation has carried out research on the dynamic camera calibration, lane detection and tracking, obstacle detection in the visual navigation system.

The innovative aspects of this thesis are as follows:

(1) Propose a simple and practical camera parameters online calibration algorithm. The algorithm needs a set of parallel lines and a set of road signs and the parallel lines perpendicular to the ground to determine the camera parameters. With the height of the camera, the target location coordinates in the real world can be obtained from the image by the algorithm.

(2) A new structure road detection algorithm based on non-uniform B-spline curve model is given. In order to accurately locate the road corner position, the algorithm uses the maximum deviation of position shift method to position the control points of the road model.

(3) Based on computational verb theory, with the requirements of the automatic driving vehicle control system features and driving comfort, rules for calculating the verb control is established to control PID parameters in the self-tuning mode and to achieve PID control strategy for automatic driving systems.

(4) Based on Newton's law of gravitation, this dissertation has given a definition

to a new classifier, that is, the inverse  $n^{\text{th}}$  power gravitation classifier with which the optical flow data of video frame will be analyzed into different sorts, thus separating road optical flow and obstacle optical flow and achieving the purpose of obstacle detection.

In order to achieve system miniaturization and the transition to the product in the future, this dissertation has planted the algorithms to DM6446 embedded systems, and implemented parts of the functions for a vehicle autopilot system.

**Key Words:** Automatic Driving, Machine Vision, Parameters Calibration, Lane Detection, Obstacle Detection

目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 自动驾驶系统及其应用 .....	2
1.3 关键技术及其研究进展 .....	10
1.4 研究工作的重点 .....	18
1.5 本文的章节安排 .....	19
<b>第二章 相关基础知识</b> .....	21
2.1 机器视觉与投影模型 .....	21
2.2 车道模型及其拟合方法 .....	26
2.3 驾驶控制模型与智能算法 .....	31
2.4 光流计算理论及其经典算法 .....	41
2.5 本章小结 .....	46
<b>第三章 摄像机参数动态标定</b> .....	47
3.1 引言 .....	47
3.2 摄像机模型 .....	48
3.3 摄像机标定算法 .....	51
3.4 摄像机参数动态标定算法 .....	54
3.5 实验结果分析 .....	60
3.6 本章小结 .....	64
<b>第四章 车道检测与跟踪</b> .....	65
4.1 引言 .....	65
4.2 车道检测 .....	66
4.3 车道跟踪 .....	73
4.4 实验结果分析 .....	82
4.5 本章小结 .....	85



第五章 基于光流的障碍物检测.....	86
5.1 引言.....	86
5.2 改进的 Lucas-Kanade 算法.....	87
5.3 基于反 n 次方引力场的分类器.....	89
5.4 障碍物检测技术.....	96
5.5 本章小结.....	103
第六章 汽车自动驾驶系统原型.....	104
6.1 引言.....	104
6.2 汽车自动驾驶系统架构.....	104
6.3 汽车自动驾驶系统的功能模块.....	105
6.4 汽车自动驾驶系统的实现.....	108
6.5 本章小结.....	120
第七章 总结和展望.....	121
7.1 总结.....	121
7.2 展望.....	123
参考文献.....	124
攻读博士学位期间发表的论文、科研工作.....	137
致    谢.....	139

## Table of Contents

<b>1. Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Outline .....	1
1.2 Automatic driving system and it's actuality.....	2
1.3 Key technology of vision navigation and it's development.....	10
1.4 Synopsis of our works .....	18
1.5 Arrangement of the thesis .....	19
<b>2. Basis of Related Knowledge .....</b>	<b>21</b>
2.1 Machine vision and project model.....	21
2.2 Lane model and fitting method .....	26
2.3 Driving control model and intelligent algorithm.....	31
2.4 Theory of optical compute and classical algorithm.....	41
2.5 Section conclusion .....	46
<b>3. Camera parameters dynamic calibration .....</b>	<b>47</b>
3.1 Outline .....	47
3.2 Camera model.....	48
3.3 Classical camera calibration algorithm.....	51
3.4 Camera parameters dynamic calibration.....	54
3.5 Analysis of experiment result.....	60
3.6 Section conclusion .....	64
<b>4. Lane detection and tracking.....</b>	<b>65</b>
4.1 Outline .....	65
4.2 Lane detection.....	66
4.3 Lane tracking.....	73
4.4 Analysis of experiment result.....	82
4.5 Section conclusion .....	85

<b>5. Obstacle detection based on optical flow.....</b>	<b>86</b>
5.1 Outline .....	86
5.2 Improved Lucas-Kanade algorithm.....	87
5.3 The inverse $n^{\text{th}}$ power gravitation classifier.....	89
5.4 Obstacle detection .....	96
5.5 Section conclusion .....	103
<b>6. Prototype of automatic driving system.....</b>	<b>104</b>
6.1 Outline .....	104
6.2 Automatic driving system frame .....	104
6.3 Automatic driving system model.....	105
6.4 Reality of automatic driving system.....	108
6.5 Section conclusion .....	120
<b>7. Conclusion and Future Work .....</b>	<b>121</b>
7.1 Conclusion .....	121
7.2 Future work .....	123
<b>References .....</b>	<b>124</b>
<b>Publications and Projects.....</b>	<b>137</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>139</b>

## 第一章 绪论

本文的研究目的是针对基于视觉的汽车自动驾驶系统的关键技术，如摄像机参数的动态标定、车道的检测与跟踪、障碍物检测等技术，给出了稳定可靠的解决方法。本章首先介绍了自动驾驶汽车的研究现状，分析了视觉感知系统的特点，指出了利用视觉导航的优势；然后介绍目前基于视觉的自动驾驶汽车系统的关键技术以及其存在的问题，并针对这些问题，提出了本文要重点解决的关键技术。最后简要介绍本文中其他各章节的内容安排。

### 1.1 引言

随着经济的蓬勃发展，汽车已成为人们出行的主要交通工具之一。然而，在汽车拥有量的快速增长的同时，交通安全、交通堵塞和环境污染等问题也日益突出。全球范围内每年因道路交通事故而造成的死亡人数估计为120万人，导致受伤或致残的人数更是在千万人之上，造成每年超过5000亿美元的损失。预计到2020年道路交通伤害将成为全球疾病负担的第三大诱因。今天，道路交通伤害是造成5~29岁人的第二大死因[1]。

发展与道路相关的安全系统已成为当今的热点研究课题，是解决或缓解道路交通问题的有效途径之一。美国、日本、欧洲等发达国家已经着手大力发展智能交通系统（ITS：Intelligent Transportation System）。2002年，我国科技部正式启动了“十五”科技攻关计划项目：“智能交通系统关键技术开发示范工程”[2]。

智能交通系统是指将先进的信息技术、数据通讯传输技术、电子传感技术、电子控制技术以及计算机处理技术等有效地集成于交通管理体系，建立一整套能在全方位、大范围内发挥作用的，智能、准确、高效、实时的综合交通和管理系统[3, 4]。

智能交通系统涉及到驾驶员、汽车和道路环境三个因素。在这三个因素中，由于驾驶员的疏忽而导致的交通事故占的比例最高。在英国，交通事故唯一由驾驶员因素引起的占65%，在美国是57%；而与驾驶员因素有关的交通事故在英国占95%，在美国是94%；在中国主要由于驾驶员因素引起的交通事故也占九成以

上 [5]。所以，驾驶员的疏忽被认为是产生交通事故的主要原因之一。如何减少驾驶员的原因而引起的交通事故，已经成为汽车安全领域的研究重点。利用高新技术发展具有辅助驾驶或自动驾驶功能的汽车驾驶系统是解决驾驶员因素的有效途径之一。德国 Daimler-Benz 公司 1992 年的研究报告指出，如果给驾驶员的事故警告能提前 0.5 秒，那么 60% 的汽车追尾事故可以避免；如果提前 1.5 秒警告则 90% 的追尾事故可以避免 [6]。

由此，各国科研机构已经着手研发具有自主导航能力的汽车自动驾驶系统，以期替代驾驶员的驾驶，减少或避免各种交通事故的发生。

## 1.2 自动驾驶系统及其应用

### 1.2.1 自动驾驶系统

汽车自动驾驶系统利用车载传感器，如激光雷达、磁传感器、里程计、GPS、视觉传感器等环境感知设备获得汽车位姿、道路及障碍物信息，通过计算机系统对这些信息进行数据融合，并按一定的控制策略实现汽车的自动驾驶。

自动驾驶系统的体系结构一般分为环境感知层、决策控制层和操作执行层 [7]。其中，环境感知层为各种传感器，为决策控制层提供车辆所在道路及周围的环境信息。为了提高环境感知的可靠性，一般采用多传感器信息的数据融合技术。决策控制层利用人工智能、自动控制等理论对环境感知层所获得的信息做出决策，并向执行机构发出控制命令，包括转向、刹车或加速等的控制。操作执行层主要指各种执行器，包括转向、调速、制动等执行装置。图 1-1 是一种典型自动驾驶系统体系结构。

图 1-2 是美国谷歌公司研制的无人驾驶汽车 [8]。经过实验测试，该车能顺利通过了旧金山地标建筑金门大桥，穿梭于该市的斜坡街道之间，多次出入谷歌公司办公大楼，并成功绕塔霍湖行驶一圈。除了在等待红灯过程中被追尾，该车没有出现其他交通事故。

20 世纪 50 年代初，美国 Barrett Electronics 公司研制了世界上第一台自动驾驶汽车系统 (Automated Guided Vehicle System, AGVS)。该系统使用以真空管技术为基础的控制器，实现小车在一条钢丝绳导引的道路上行驶 [9]。至 20

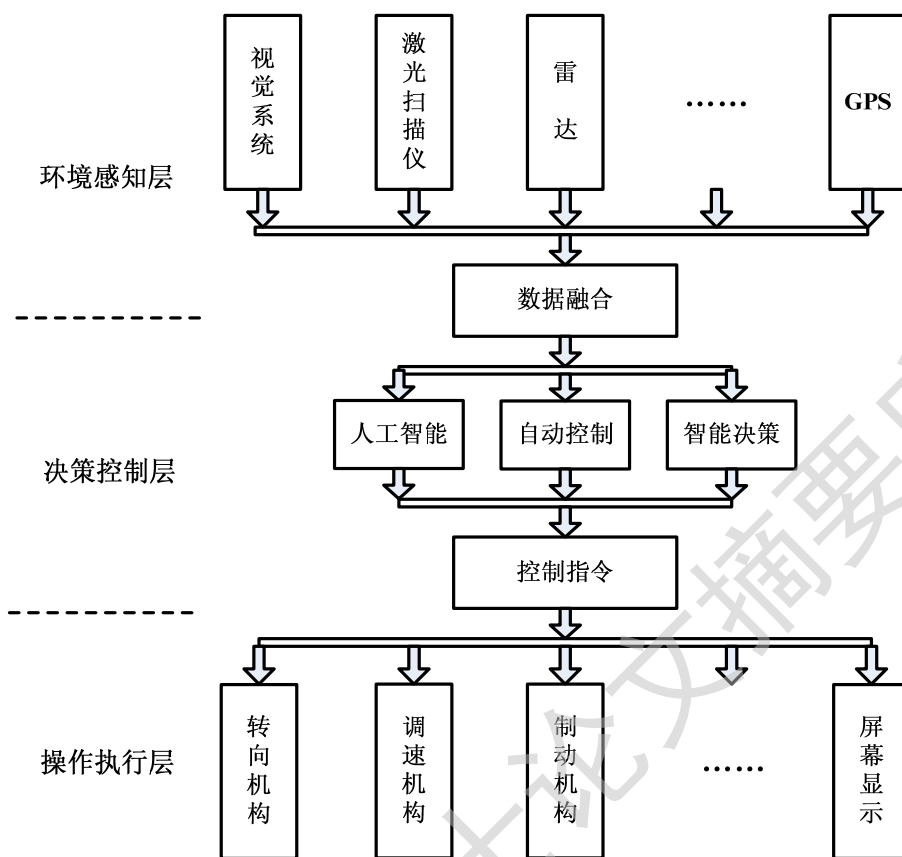


图 1-1 自动驾驶系统体系结构[7]



图 1-2 美国谷歌公司的无人驾驶汽车[8]

世纪六、七十年代，瑞典的 Schiinder-Digitron 公司与 Volvo Kalmar 公司联

合成功研制了一种可以载人的自动驾驶轿车，并成功应用到汽车的装配生产线上。鉴于 Kalmar 工厂采用 AGVS 获得了明显的经济效益，许多西欧国家纷纷效仿 Volvo 公司，逐步使用 AGVS 作为装配生产线中的运输工具。到了 20 世纪 80 年代，伴随着与汽车自动驾驶技术密切相关的计算机、传感器、通信技术、人工智能的飞速发展，国内、外掀起了汽车自动驾驶技术的研究热潮。

### (1) 国外研究现状

在国外，比较早开展汽车自动驾驶系统研究的国家有美国、欧洲、日本等。

#### 美国

1984 年，在美国国防高级研究计划署 DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 的支持下，产生了具有代表性的研究成果，如美国卡内基梅隆大学 (Carnegie Mellon University, CMU) 开发的 Navlab 自主车辆[10]、马里兰大学研制的自主陆地车辆等[11]。1992 年，美国 DARPA 启动了 DEMO I 计划，研制了三种型号的自动驾驶实验车，实现在复杂环境下的自主导航。继 DEMO I 计划之后，美国分别于 1996 年启动了 DEMO II 计划[12]，1997 年启动了 DEMO III 计划[13]。美国曾先后研制了 10 辆自动驾驶车辆，都具有在复杂环境下满足军事需求的自动驾驶能力。1998 年亚利桑那大学研制的 VISTA 自动驾驶汽车[14]，通过惯性导航测量单元、车载差分 GPS 传感器、雷达传感器等设备获取汽车的位置，并通过条形码读卡器读取铺在地面上的条形码以获取汽车的速度。同样在 DARPA 的资助下，美国军方于 2001 年开始研制第一代无人地面战斗汽车“蜘蛛”，以及第二代无人地面战斗汽车“粉碎机”，它们主要完成监视和侦查任务。此外，CMU 和通用联合开发了 BOSS 无人驾驶汽车，美国洛克希德马丁公司开发了多功能通用无人驾驶汽车。

#### 欧洲

1986 年，欧洲启动了高效与安全交通规章计划 (PROMETHEUS) [15]，该计划以欧洲汽车生产厂商为中心，主要考虑车辆控制性能以及安全系统。该计划经过八年研发的，产生一些具有代表性的车辆安全系统。1998 年 6 月，意大利帕尔玛大学研制的 ARGO 无人驾驶车辆[16]，进行了 2000 公里的长距离实验，自主行驶的距离达到总路程的 94%。该实验车的核心是 GOLD (Generic Obstacle and Lane Detection) 视觉系统，它以道路平坦假设为前提进行道路障碍物检测和车

道检测。德国慕尼黑联邦国防大学(the Universitat der Bundeswehr Munchen)与德国奔驰汽车公司联合研制了 VaMP 无人驾驶车辆[17]。该实验车采用视觉导航,通过实地行驶试验,大概 95%的路程可以实现自主行驶。

### 日本

早在 1991 年,日本国土交通省主导的 ASV 项目开始启动[18],该项目历经 9 年,分两期完成。第一期(1991-1995),这个阶段的主要任务包括概念设计、单元技术研究、系统技术研究、实验车制作和模范试验的实施;第二期(1996-2000),这个阶段的主要任务包括开发目标的设定、单元技术实用化及系统综合技术研究开发、实际实验车制作和实际试验的实施。

### (2) 国内研究现状

与美国、欧洲等发达国家和地区相比,我国在自动驾驶技术研究方面起步较晚,而且研究单位主要集中在高校和科研院所。在“八五”期间,由国防科技大学、南京理工大学、清华大学、浙江大学和北京理工大学联合研究的 ATB-1 自动驾驶车辆于 1995 年通过了国家相关部门的验收;“九五”期间,第二代 ATB-2 于 2001 年通过了国家相关部门验收。该车能在结构化道路及非结构化的乡村道路上实现自动驾驶,具有车道保持、避障、越野及岔路转弯等功能,其自主行驶的最高速度为 74.5km/h;在“十五”期间,由南京理工大学、国防科技大学、浙江大学、清华大学等单位联合研制的第三代 ATB-3 于 2005 年通过了国家相关部门的验收,并获得了高度评价。

“十五”期间,国防科技大学研制了新一代地面自动驾驶车辆 CITAV-IV[19],该车配备了陀螺,里程仪、转速仪和双目摄像机,能在高速公路车道上跟车行驶,并具有超车等功能。于 2000 年 6 月在长沙市的绕城公路上进行了自动驾驶实验,其最高时速可以达到 75.7 公里;清华大学开发了 THMR-V 系统[20],该系统装备了彩色摄像机、磁罗盘、测距仪和差分 GPS,能够在高速公路和一般道路上自动驾驶,具有遥控驾驶、路径规则等功能。于 2002 年 10 月在公路上进行视觉导航实验,车道线自动跟踪平均时速为 100 公里,最高时速达 150 公里;西安交通大学研制了 SpringRobot 自动驾驶车辆[21],该车装备了毫米波雷达、激光雷达、差分 GPS、逐行扫描摄像机等多种传感器。进行多次实验测试,主要测试内容包括道路检测与跟踪、车道检测、行人检测、多传感器融合、车辆控制等,于 2005



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库