

:: :: :: Theories and Practices of Self-Driving Vehicle :: :: ::

无人驾驶

原理与实践

申泽邦 雍宾宾 周庆国 李良 李冠憬◎编著



机械工业出版社
China Machine Press

:: :: :: Theories and Practices of Self-Driving Vehicle :: :: ::

无人驾驶

原理与实践

申泽邦 雍宾宾 周庆国 李良 李冠憬◎编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

无人驾驶原理与实践 / 申泽邦等编著 . —北京: 机械工业出版社, 2019.1

ISBN 978-7-111-61499-9

I. 无… II. 申… III. 汽车驾驶 - 无人驾驶 - 研究 IV. U471.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 275930 号

本书从原理到实践系统地介绍了无人驾驶汽车软件系统, 包含无人驾驶系统的基本概念和原理, 涵盖 ROS 编程、机器学习和深度学习等入门知识, 以及广泛使用的环境感知、定位、传感器融合、路径规划、行为决策、动作规划和高级控制算法, 同时介绍了深度强化学习、端到端无人驾驶等学术研究方向。

本书适合希望进入无人驾驶汽车行业的技术人员和高校学生作为技术入门书籍, 亦可作为无人驾驶应用研究的工具书。

无人驾驶原理与实践

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 余洁

责任校对: 殷虹

印刷: 中国电影出版社印刷厂

版次: 2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 186mm×240mm 1/16

印张: 16 (含 0.25 印张彩插)

书号: ISBN 978-7-111-61499-9

定价: 69.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

华章科技
HZBOOKS | Science & Technology





图 1-4 使用激光雷达绘制的点云地图

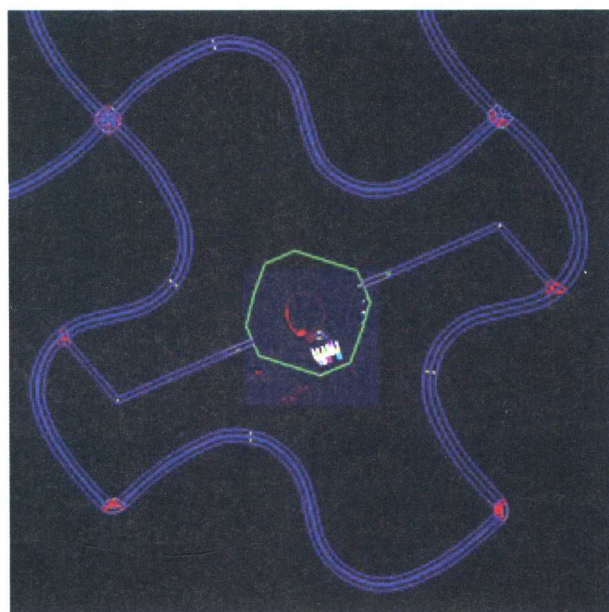


图 1-5 一个简单的路网图

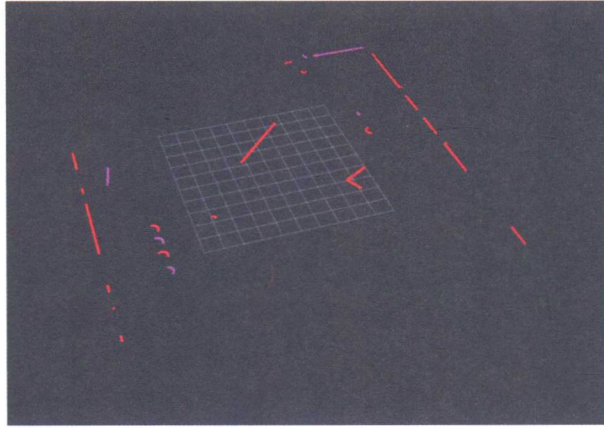


图 2-7 激光扫描结果

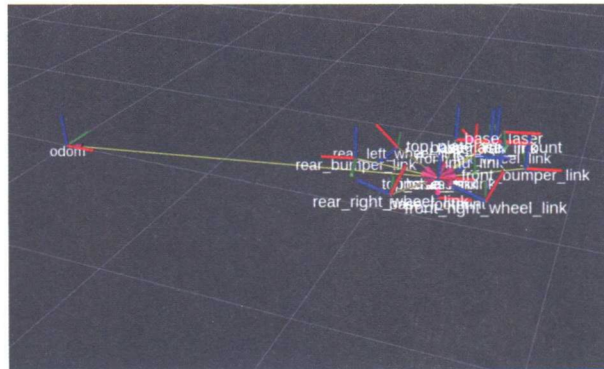


图 2-17 Rviz 下机器人的各个参考系可视化结果

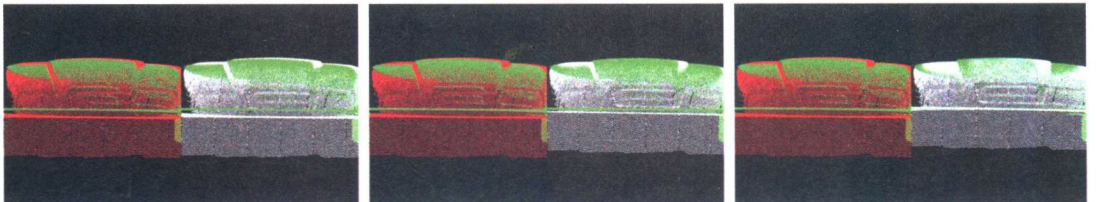


图 3-3 ICP 应用匹配过程

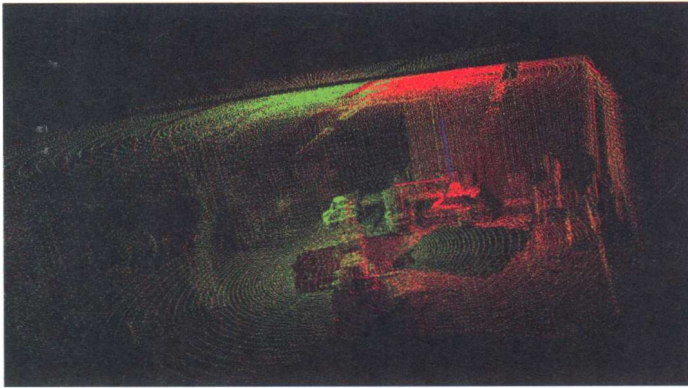


图 3-7 实例运行结果图

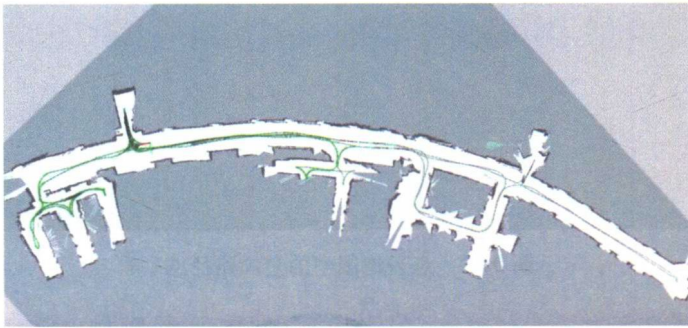


图 3-12 SLAM 示意图



图 5-5 通过调整参数，模型就能表现出不同的能力

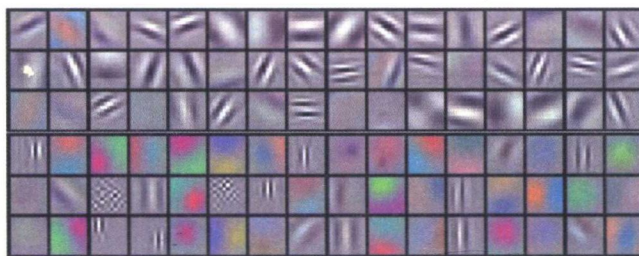


图 6-25 同一个卷积层中各个卷积核的可视化效果

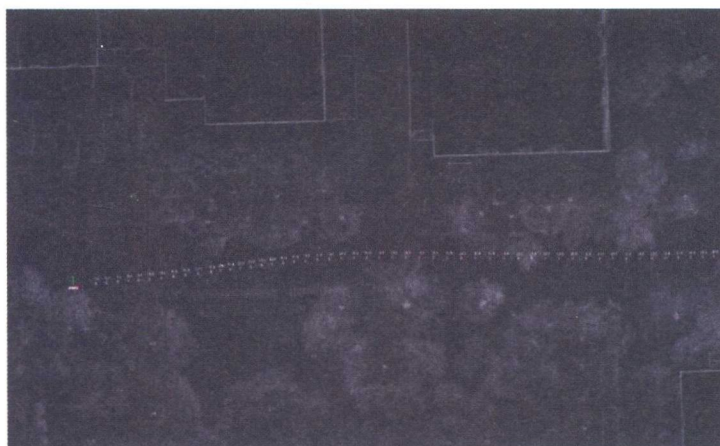


图 9-17 点云地图中的全局路径点

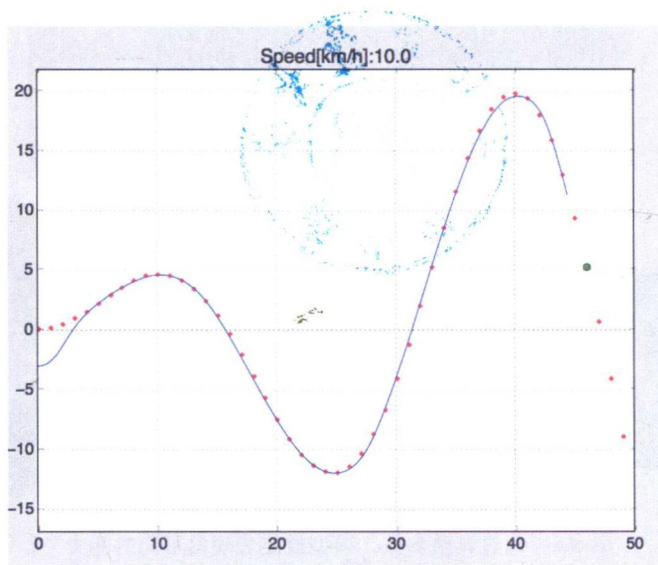


图 9-20 纯追踪控制器追踪效果

Praise | 本书赞誉

近两年来，自动驾驶技术随着人工智能和汽车行业的飞速发展，逐渐成为业界焦点。自动驾驶技术是传统汽车产业与人工智能、物联网技术、高性能计算芯片等新兴科技深度融合的产物，其本质是汽车产业的升级。本书从自动驾驶的基本原理入手，到技术工程实践，深入浅出地阐述了自动驾驶系统级的核心技术要点，是学习、掌握自动驾驶技术不可多得的一本好书，推荐阅读。

小鹏汽车，自动驾驶部门副总监 肖志光

无人驾驶汽车是当下最热门的科技话题之一，热到似乎明年、下个月、明天我们就可以开上无人驾驶汽车，似乎我们许多人还没来得及成为一个司机，许多老司机就要被机器人抢走了工作。而事实上，又有多少人真正了解无人驾驶技术，了解它的分级、技术实现路径、技术成熟时间点。本书是一本非常好的技术入门读物，对于所有想了解自动驾驶技术，未来想从事自动驾驶相关工作的人来说，这都是一份很好的学习资料。

小鹏汽车，产品部副总裁 纪宇

本书理论和实践相结合，涵盖了无人/自动驾驶常用的内容与方向，丰富、翔实、分析透彻，可读性极强，是国内非常难得的一本中文无人驾驶系统性学习资料。

小鹏汽车，AI首席科学家 郭彦东

本书是自动驾驶专家的力作，强力推荐。

景驰科技，CEO 韩旭

无人驾驶作为改变人类出行方式的科技，逐渐成为新的风口。本书涵盖了无人驾驶技术的主要技术领域，并按照难易程度重新排序，由易到难循序渐进，很适合对自动驾驶技术感兴趣的读者阅读。

景驰科技，运营总监 陈云峰

IV

无人驾驶无疑会是人类生活方式的重大变革，想要一窥行业究竟，不妨跟本书作者一起以通俗易懂的方式探索无人驾驶技术的当下与未来。

Kneron Inc, CEO 刘峻诚

With the development of sensor and AI technologies, autonomous driving is becoming a reality. Through integration and cooperation with the Internet of Things, autonomous vehicle will profoundly change our society in the near future. This book systematically introduces the key technologies of L4 autonomous driving. Focusing on both algorithm principles and practical applications, this book is a good choice for readers to quickly enter into this industry.

Autoware, Tier IV, Inc, President & CEO 武田一哉

50多年前的 Apollo 登月计划，人类踏出了探索未知月球的第一步。在未知前，人们无所畏惧，勇于探索，就如同今日在自动驾驶领域里，越来越多的科学家、工程师在探索着如何将人工智能、大数据、高性能计算芯片等先进技术，与传统的汽车行业进行深度融合，在进一步提升驾驶安全的前提下，解放人类的双手，让人类可以在运筹帷幄的同时仰望星空。本书作者在自动驾驶领域从事前瞻性的研究工作，不断累积、消化和整理经验与知识，并且出繁入简、深入浅出地将研究成果分享给各位有志于在自动驾驶领域不断探索的伙伴。自动驾驶技术依然挑战重重，但是未来却一片光明，与大家共勉，推荐阅读。

百度美国研究院，Apollo 平台资深架构师 缪景皓

本书深入浅出地介绍了整个无人驾驶软件系统的基本原理和关键算法，并且带有大量实战用例，是无人驾驶的入门首选。

IEEE Fellow, 圣塔克拉拉大学教授 林楠

这是我看过最系统、最全面，同时兼具实践案例的无人驾驶技术入门好书，强烈推荐给每位有志于投身无人驾驶产业的工程师。

Pix Moving 无人驾驶, CEO 喻川

无人驾驶是当前汽车工业的重要发展方向，而当前无人驾驶技术的入门门槛颇高，本书大大降低了读者开展无人驾驶研究和学习的成本，是一本“接地气”的无人驾驶技术书。

国家千人计划专家，神目科技，董事长 刘靖峰

Foreword | 序

近年来，随着人工智能技术（尤其是深度神经网络）的发展，无人驾驶系统中的感知和综合决策等问题正在逐步得到解决。神经网络算法能够识别出物体的属性，并且能够在综合感知信息和定位结果之后做出类似于人类驾驶员的合理决策，这表明无人驾驶正在向我们走来。虽然通用人工智能仍然“遥远”，但可以预言，无人驾驶汽车将在不久的将来得到普及，而基于无人驾驶技术的世界也给了我们无限的想象空间。

我国无人驾驶汽车的研究起步较晚，关键理论研究薄弱，特别是相关专业人才比较欠缺。要加快国内无人驾驶的发展，就必须重视无人驾驶相关专业人才的培养。目前，国内无人驾驶相关的教程和书籍也比较欠缺，为了给广大初学者提供一本高质量的无人驾驶主题书籍，本书主要作者与国内一线无人驾驶科研团队负责人、一线新能源汽车厂商无人驾驶技术专家合作，共同编写了这本无人驾驶技术教材。本书有以下特点：

1) 自成体系。本书的内容覆盖无人驾驶技术中的感知、规划和控制三大模块，对无人驾驶的整个技术栈进行了全面深入的介绍。

2) 内容充实。本书既包括相关原理的讲解，又包括相应的实践代码。

3) 适应面广。本书适用于希望进入无人驾驶汽车行业的技术人员和高校学生，既可作为入门书籍，也可作为无人驾驶应用研究的工具书籍。

本书的主要作者来自兰州大学未来计算研究院，所在团队的主要研究方向为深度学习、计算机视觉和自动驾驶技术。特别是团队成员申泽邦于2018年5月参加“快·开”全球无人驾驶挑战赛，获得全尺寸组第一名的成绩。该团队于2017年正式开始研究无人驾驶，是甘肃省第一个无人驾驶科研机构 and 创业团队，致力于推动西北地区无人驾驶学科和产业的发展。该团队在不到两年的时间完成了“从0到1”的突破，目前已经发展为以激光雷达、摄像头等多传感器融合和感知算法为特长，具备园区内L4级别无人驾驶系统研发能力的研究团队。同时国内一线无人驾驶科研团队负责人、一线新能源汽车厂商无人驾驶技术专家也为本书提供了相关的内容和技术支持，使得本书具有非常完善的知识结构。

潘毅

美国佐治亚州立大学计算机系校董教授，系主任

前言 | Preface

随着近年来机器学习和强化学习理论的发展，众多研究领域和产业掀起了一场人工智能变革。其中，无人驾驶技术深受深度学习和计算机视觉发展的影响，其理论已经日趋成熟，正在向产业化落地迈进。

无人驾驶已经不再遥远。2017年4月，工业和信息化部、国家发展和改革委员会、科技部在印发的《汽车产业中长期发展规划》中提出：到2020年，汽车DA（驾驶辅助）、PA（部分自动驾驶）、CA（有条件自动驾驶）系统新车装配率超过50%，网联式驾驶辅助系统装配率达到10%，满足智慧交通城市建设需求。到2025年，汽车DA、PA、CA新车装配率达到80%，其中PA、CA级新车装配率达到25%，高度和完全自动驾驶汽车开始进入市场。

依托长期以来的技术积累和近期人工智能领域的突破，加之日趋成熟的政策，无人驾驶正在向人们走来。各大互联网公司和汽车巨头大量投入资源发展无人驾驶技术的事实表明，无人驾驶已经逐步成为信息产业和汽车行业的大势所趋。

与当前国内无人驾驶领域快速增长形成鲜明对比的是国内相关专业人才的欠缺，无人驾驶领域的顶尖人才仍然集中于欧洲、美国、日本等发达国家和地区。早在十几年前，美国国防部就举办了DARPA Grand Challenge无人驾驶挑战赛，当今全球最顶尖的无人驾驶团队和技术领袖多数是在该赛事中成名的。该比赛也催生了大量无人驾驶关键算法、无人驾驶系统设计理念等，可谓是现代无人驾驶的重要里程碑。相比之下，我国全自动无人驾驶汽车的研究起步晚，关键理论薄弱，专业人才欠缺。因此，要保持国内无人驾驶发展的后劲，就必须重视无人驾驶相关专业人才的培养。

本书即在此大背景下产生。无人驾驶是一个综合了多个学科的应用领域，这些学科包括机器人学、自动化控制、机器学习、机器视觉、移动通信、智能交通、车辆工程等。也正是由于无人驾驶的综合性，目前国内系统介绍无人驾驶的技术书籍相当匮乏。市面上现有的无人驾驶技术中文书籍多为科普类，读者很难通过其真正完成无人驾驶相关技术的理论入门和实战训练。本书旨在通过相对完整的无人驾驶理论介绍和简单易上手的实例帮助读者实现技术入门，让读者对无人驾驶软件系统的整个技术栈有一定的了解。

本书作者包括国内一线无人驾驶科研团队负责人、一线新能源汽车厂商无人驾驶技术专家，他们对整个无人驾驶技术栈有着全面深入的研究，同时拥有丰富的工业应用实践经验。通过本书，读者将系统学习并实战无人驾驶软件系统的感知、规划和控制基础算法，掌握 ROS 编程，学习并实践多传感器融合方法，学习机器学习、深度学习和强化学习等人工智能方法在无人驾驶中的应用，还将初步了解更接近工业应用的复杂方法。考虑到工业界多使用 Python 进行算法原型设计，使用 C++ 进行产品实现，故本书的实践部分采用 Python 和 C++ 两种编程语言。在阅读本书前，读者应当具备基础的 Python 或 C++ 编程能力，并且掌握基本的线性代数和概率论等数学知识。

本书适用于希望进入无人驾驶汽车行业的技术人员和高校学生，可作为技术入门书籍，亦可作为无人驾驶应用研究的工具书籍。本书提供了 ROS 编程、点云匹配定位、基于卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波的传感器融合、机器学习图像识别、深度学习目标检测、优化轨迹的动作规划算法、纯追踪算法等大量编程实例，方便读者实践。配套源代码可从华章官网下载。

本书从开始编写到出版历时近一年，在此感谢兰州大学未来计算研究院无人驾驶团队的王金强、肖子超、孙宇等人对内容的贡献，同时感谢黄航、漆昱涛等人对内容的审阅。限于作者的学识，加之编写经验不足，本书难免有疏漏之处，肯请各位同行和读者批评指正。

申泽邦 周庆国

2018年9月

教学建议^① | Suggestion

教学章节	教学要求	课时
第1章 初识无人驾驶系统	了解无人驾驶的基本概念和现状	2
	掌握无人驾驶系统的基本框架 了解环境感知、定位的概念 了解规划分层理念 了解基本的反馈控制理念	2
	掌握开发环境和工具的配置方法	2
	掌握 ROS 的基本理念 掌握 ROS 的编程语法 熟练使用 ROS 下的多种可视化和调试工具	4
第2章 ROS 入门	实践基于 Husky 机器人的 ROS 简单编程和控制器	2
	了解无人车定位的基本原理	2
第3章 无人驾驶系统的 定位方法	掌握迭代最近点算法的基本原理	2
	掌握正态分布变换算法的基本原理 使用 PCL 库实践正态分布变换	3
	理解 GPS 和惯性组合导航的基本原理 理解 SLAM 定位方法	2
	掌握卡尔曼滤波的基本原理及其在无人驾驶传感器融合中的作用 使用 Python 实现卡尔曼滤波器	2
第4章 状态估计和 传感器融合	掌握基本的运动模型，以及扩展卡尔曼滤波的基本原理 使用 Python 实现扩展卡尔曼滤波器	2
	理解无损卡尔曼滤波的基本原理	1
	掌握机器学习和监督学习的基本概念 理解机器学习的方法	2
第5章 机器学习和 神经网络基础	掌握神经网络的基本原理 使用 Keras 实践神经网络	2
	理解深度前馈神经网络 掌握深度学习中基本的正则化方法 实践基于神经网络的交通标志识别	4
第6章 深度学习和 无人驾驶视觉感知	掌握卷积神经网络的基本原理 实践基于 YOLO 的车辆检测	2

① 如采用本书作为高校相关专业无人驾驶课程的教材，可参考本建议安排授课内容。

(续)

教学章节	教学要求	课时
第7章 迁移学习和端到端 无人驾驶	掌握迁移学习的基本原理 理解端到端无人驾驶的工作模式	1
	在模拟器下实践端到端无人驾驶	1
第8章 无人驾驶规划入门	理解无人驾驶系统的三层规划结构 掌握基于A*的规划方法	2
	理解无人驾驶行为规划层 掌握基于有限状态机的行为规划方法	2
	了解基于样条插值的路径生成方法,并通过Python实践基于Frenet坐标系的优化轨迹动作规划算法,实践最优轨迹动作优化算法	4
第9章 车辆模型和高级控制	了解运动学和动力学自行车模型 掌握反馈控制基本方法 掌握并实践PID控制器	2
	掌握并实践纯追踪轨迹追踪算法 理解模型预测控制的基本流程	4
第10章 深度强化学习及其 在自动驾驶中的应用	理解强化学习的基本概念和原理 掌握深度Q值网络算法 实践深度确定性策略梯度在TORCS中的应用	2
总课时		54

说明:本书作为无人驾驶技术入门和实践教材及工具书,建议学生具备基础的编程能力,同时掌握概率论、线性代数的基本知识,建议面向高年级计算机、自动化等方向本科及硕士研究生。

目 录 | Contents

本书赞誉
序
前言
教学建议

第 1 章 初识无人驾驶系统 1

1.1 什么是无人驾驶 1

- 1.1.1 无人驾驶的分级
标准 2
- 1.1.2 无人驾驶到底有
多难 3

1.2 为什么需要无人驾驶 5

- 1.2.1 提高道路交通安全 5
- 1.2.2 缓解城市交通拥堵 6
- 1.2.3 提升出行效率 6
- 1.2.4 降低驾驶者的门槛 6

1.3 无人驾驶系统的基本框架 7

- 1.3.1 环境感知 8
- 1.3.2 定位 10
- 1.3.3 任务规划 11
- 1.3.4 行为规划 12
- 1.3.5 动作规划 13
- 1.3.6 控制系统 15
- 1.3.7 小结 16

1.4 开发环境配置 17

- 1.4.1 简单环境安装 17
- 1.4.2 ROS 安装 18
- 1.4.3 OpenCV 安装 19

1.5 本章参考文献 19

第 2 章 ROS 入门 21

2.1 ROS 简介 21

- 2.1.1 ROS 是什么 21
- 2.1.2 ROS 的历史 22
- 2.1.3 ROS 的特性 22

2.2 ROS 的核心概念 22

2.3 catkin 创建系统 25

2.4 ROS 中的项目组织结构 26

2.5 基于 Husky 模拟器的实践 27

2.6 ROS 的基本编程 30

- 2.6.1 ROS C++ 编程 30
- 2.6.2 编写简单的发布和
订阅程序 32
- 2.6.3 ROS 中的参数服务 34
- 2.6.4 基于 Husky 机器人的
小案例 35

2.7 ROS Service 39

2.8 ROS Action 42

2.9	ROS 中的常用工具	43	4.1.3	卡尔曼滤波在无人 驾驶汽车感知模块 中的应用	74
2.9.1	Rviz	43	4.2	高级运动模型和扩展卡尔曼 滤波	83
2.9.2	rqt	44	4.2.1	应用于车辆追踪的高级 运动模型	83
2.9.3	TF 坐标转换系统	45	4.2.2	扩展卡尔曼滤波	85
2.9.4	URDF 和 SDF	46	4.3	无损卡尔曼滤波	97
2.10	本章参考文献	47	4.3.1	运动模型	98
第3章 无人驾驶系统的定位 方法			4.3.2	非线性过程模型和 测量模型	99
3.1	实现定位的原理	49	4.3.3	无损变换	99
3.2	迭代最近点算法	50	4.3.4	预测	100
3.3	正态分布变换	53	4.3.5	测量更新	101
3.3.1	NDT 算法介绍	54	4.3.6	小结	103
3.3.2	NDT 算法的基本步骤	55	4.4	本章参考文献	103
3.3.3	NDT 算法的优点	55	第5章 机器学习和神经网络 基础		
3.3.4	NDT 算法实例	57	5.1	机器学习基本概念	105
3.4	基于 GPS + 惯性组合导航的 定位系统	60	5.2	监督学习	107
3.4.1	定位原理	61	5.2.1	经验风险最小化	107
3.4.2	不同传感器的定位 融合实现	63	5.2.2	模型、过拟合和 欠拟合	108
3.5	基于 SLAM 的定位系统	64	5.2.3	“一定的算法” —— 梯度下降算法	110
3.5.1	SLAM 定位原理	65	5.2.4	小结	111
3.5.2	SLAM 应用	67	5.3	神经网络基础	111
3.6	本章参考文献	69	5.3.1	神经网络基本结构	112
第4章 状态估计和传感器 融合			5.3.2	无限容量——拟合	
4.1	卡尔曼滤波和状态估计	70			
4.1.1	背景知识	70			
4.1.2	卡尔曼滤波	71			