

无人驾驶汽车工程技术人员入门书

百度硅谷一线资深工程师

IEEE计算机协会主席 Jean-Luc Gaudiot 先生

等 联袂编著

无人驾驶

双色
版

人工智能如何颠覆汽车

[中]刘少山 李力耘 唐洁 吴双 [美]琼卢克·高迪奥特 (Jean-Luc Gaudiot) | 著

史津竹 安靖雅 代凯 葛林鹤 | 译

马芳武 | 主审

CREATING AUTONOMOUS VEHICLE SYSTEMS

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



无人驾驶：人工智能如何颠覆汽车

[中] 刘少山 李力耘 唐洁 吴双 著
[美] 琼卢克·高迪奥特 (Jean-Luc Gaudiot)
史津竹 安靖雅 代凯 葛林鹤 译
马芳武 主审



机械工业出版社

《无人驾驶：人工智能如何颠覆汽车》是为从事无人驾驶车辆（智能网联汽车）开发相关工作人员的入门技术书。作者分享了他们打造无人驾驶车辆系统的实践经验。本书由9章组成，第1章概述了无人驾驶系统；第2章着重介绍无人驾驶车辆定位技术；第3章讨论了传统的环境感知技术；第4章讨论基于深度学习的环境感知技术；第5章介绍了行为预测和路径规划技术；第6章着重介绍运动决策、规划与控制子系统的反馈控制；第7章介绍基于增强学习的规划和控制技术；第8章深入研究无人驾驶客户端系统的设计细节；第9章详细介绍了无人驾驶云平台。

本书对在校大学生、研究人员和相关从业人员都大有益处。无论你是本科生还是研究生，只要对无人驾驶感兴趣，都可以在这里找到无人驾驶技术的全面介绍。

Original English language edition published by Morgan and Claypool publishers

Copyright © 2018 Morgan and Claypool Publishers

All Rights Reserved Morgan and Claypool Publishers

The simplified Chinese translation rights arranged through Righttol Media（本书中文简体版权经由锐拓传媒取得 Email: copyright@righttol.com）

This title is published in China by China Machine Press with license from MORGAN & CLAYPOOL PUBLISHERS. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书由 MORGAN & CLAYPOOL PUBLISHERS 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内（不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区）出版与发行。未经许可的出口，视为违反著作权法，将受法律制裁。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2018-0567 号。

图书在版编目（CIP）数据

无人驾驶：人工智能如何颠覆汽车 / 刘少山等著；
史津竹等译. —北京：机械工业出版社，2018. 11
书名原文：Creating Autonomous Vehicle Systems
ISBN 978-7-111-61117-2

I. ①无… II. ①刘… ②史… III. ①汽车驾驶—无人驾驶—研究 IV. ①U471.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 231922 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：母云红

责任编辑：母云红

责任校对：李 杉

责任印制：孙 炜

天津嘉恒印务有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·12 印张·2 插页·173 千字

0 001—4 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-61117-2

定价：79.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com



图 2-7 粒子滤波器定位实例

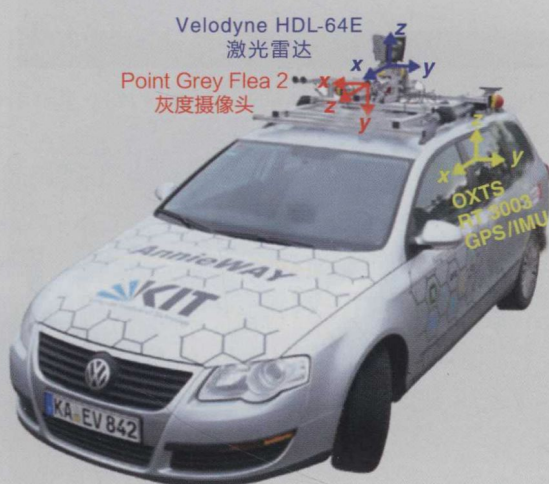


图 3-1 KITTI 车辆^[34]



图 3-2 立体数据 (上) 和光流数据 (下) (来源于参考文献 [10], 经许可使用)



图 3-7 基于 Cityscapes 数据集的苏黎世场景语义分割（来源于参考文献 [11]，经许可使用）



图 3-11 估计运动目标、光流和场景流（来源于参考文献 [29]，经许可使用）



图 3-13 MDP^[33] 示例 (经许可使用)

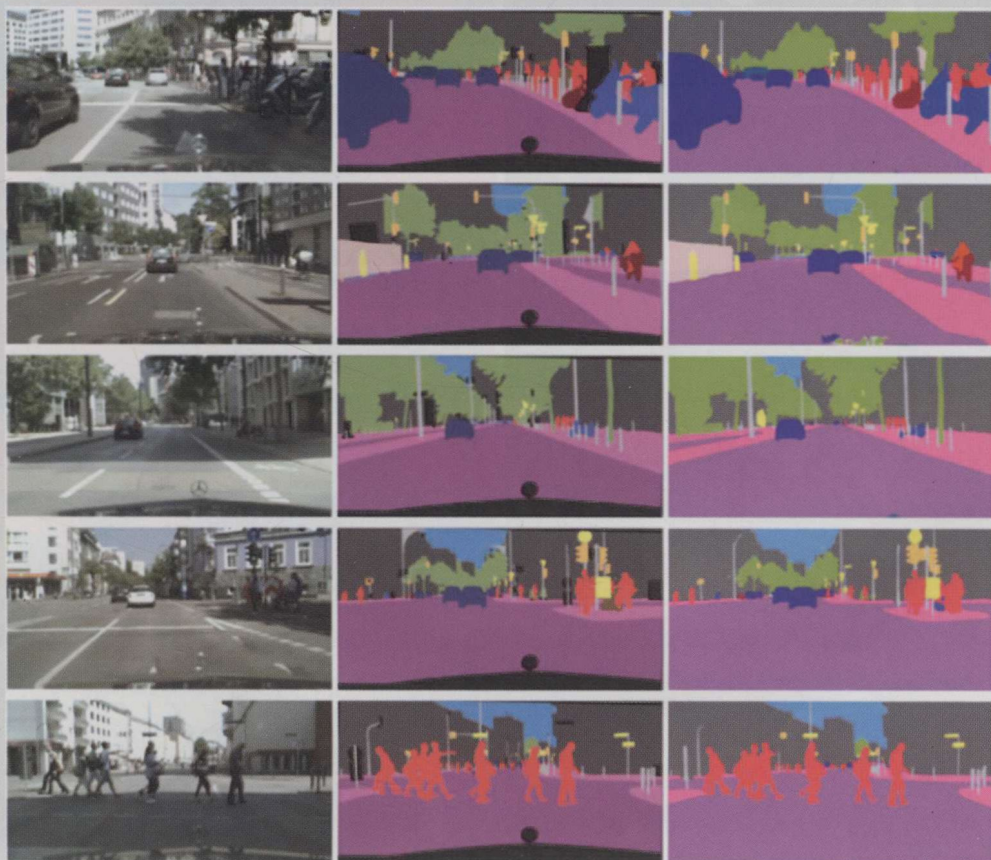


图 4-7 PSPNet 的结果示例 (基于参考文献 [13])

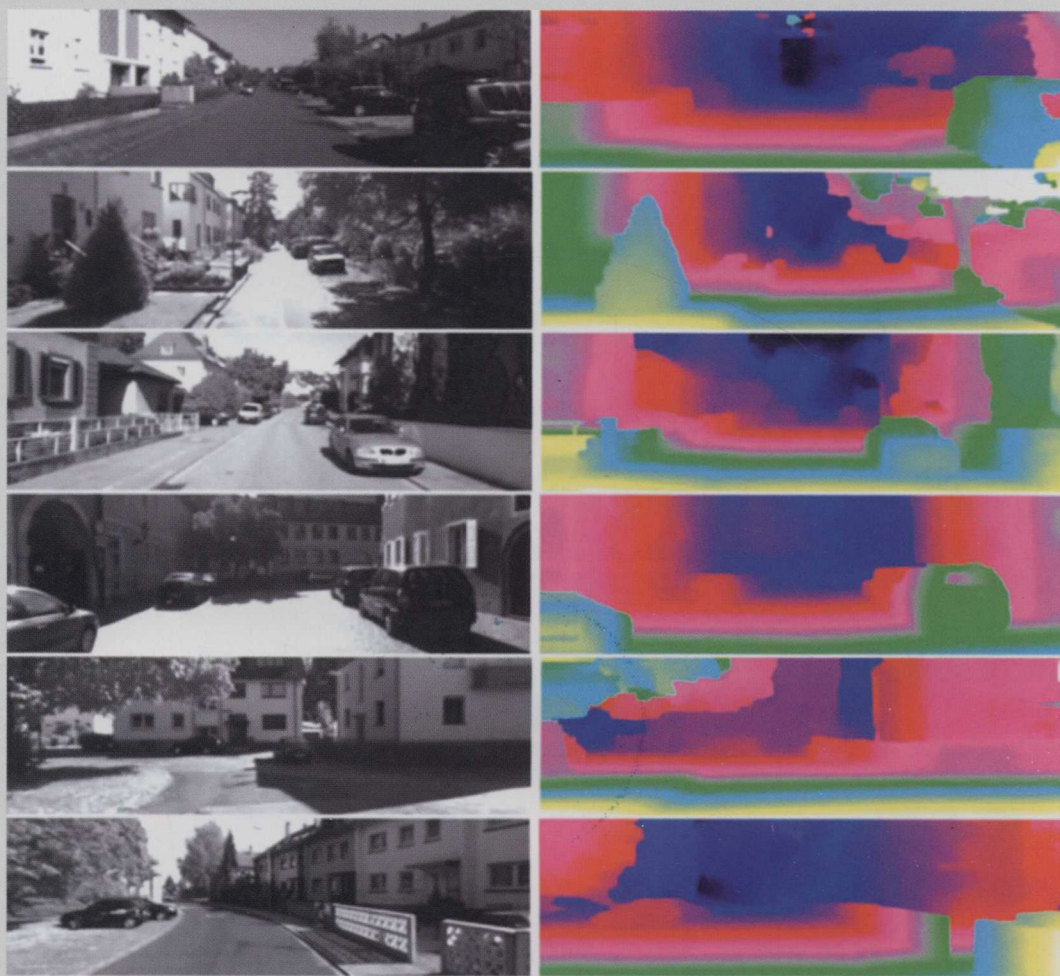


图 4-9 基于 KITTI 2012 测试集的立体估计 (基于参考文献 [14])

无人驾驶汽车技术是当今最为火热的技术之一。随着智能汽车上路逐渐成为现实，越来越多的研究者参与其中，普通大众也对其津津乐道。的确，正如本书的作者所言，无人驾驶正处于曙光时期。然而，无人驾驶汽车技术涉及诸多领域，包括计算机软硬件、人工智能、信息技术、车辆工程、自动控制等，对于入门者而言过于庞杂，让人迷茫不知所措。如果无法对无人驾驶汽车技术全局有个初步的认识，就不知道各个领域发展的最新现状，也无法找到最适合自己的研究领域。这本书正好解决了上述痛点。

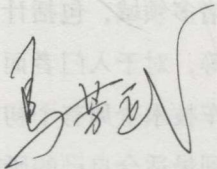
记得当初我看到这本书的英文版后如获至宝，仿佛在纷繁复杂的无人驾驶汽车技术深深幽林中，寻觅到了捷径，又或者像乘上了无人机，看见了这片森林的全貌。这本书的作者们在各自的领域里造诣深厚，有着丰富的无人驾驶汽车技术研究开发经验。它深入浅出，引人入胜，很适合作为无人驾驶汽车技术入门和总览图书阅读。因此，我非常荣幸能够向中国读者推荐这本书，让更多的同行了解无人驾驶汽车技术。

在吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室，我非常幸运拥有一群天资聪颖而又勤奋好学的博士、硕士研究生。为了抢时间，他们将春节等假期都奉献于本书的翻译。本书前言及第三、四章由史津竹主译，第二章由代凯主译，第五章由葛林鹤主译，第六章由单子桐主译，第七、八章由左世奇主译，第九章由安靖雅主译，第一章集体完成翻译。为了使读者更加形象直观地理解本书内容，译者团队对插图进行了统一翻译。同时，为了还原原书作者表达的意思，既保证本书的专业性，又不失信、达、雅的阅读效果，这些译者进行了多轮的审稿和参考文献阅读，并邀请美国哥伦比亚大学硕士毕业生王博

协助审阅，力求为读者提供最佳的原书体验。

在我翻阅这本书时，这些研究生都自发地加入这本书的翻译工作中，我一度为他们的这种热情而感动。我知道，就像无数的汽车从业者一样，他们对无人驾驶汽车技术的探索有着强烈的热情与冲动，我相信只要具备了这种神奇的力量，在今后的课题研究中他们定会无往而不胜。这些学子是我的骄傲，也是中国的未来和希望。

最后，我深深希望这本书能为入门者指点迷津，为初学者提供参考，希望你们能借助这本书领略无人驾驶汽车的魅力，更希望你们能尽快成长，为中国汽车事业的发展增添动力。



FISITA 技术委员会主席

SAE Fellow

吉林大学教授

无人驾驶车辆，无论是在陆地、水上还是在空中，都出现在我们身边，并不断寻找无数新的应用场景，比如无人驾驶出租车服务到偏远地区。过去几十年持续的技术进步使得这些创新成为可能，同时也需要克服很多艰巨的难题以实现无人驾驶系统性能高效、实用、安全。

因此，本书的目的是对这些难题进行介绍，并引导读者了解一些常见的解决方案。高超的技术水平、软硬件的完全集成以及云平台的深度协同是最终成功的必要条件。无人驾驶在地面车辆，或者更具体地说，在城市、乡村道路环境中的车辆以及越野车辆中的应用是本书介绍的重点。本书面向学术界或工业界的工程师，目的在于展示在无人驾驶车辆研发过程中遇到的问题、解决方案和未来的研究热点，具体包括感知与认知、执行控制以及云端服务器。本书罗列出大量的参考文献资料，将帮助读者快速阅览前人的工作。

下面对本书的结构做简单介绍。

第1章简述了信息技术的发展历史，并对无人驾驶系统体系结构和所需的相关基础设施的算法进行了概述。

定位是无人驾驶最重要的任务之一。第2章介绍了最常用的无人驾驶定位方法，详细讲述了全球导航卫星系统、惯性定位导航系统、激光雷达和轮式里程计的原理和优缺点，并讨论了各个方法的融合。

第3章介绍了目标检测，即基于传感器数据的环境理解，并探究各种目前使用的算法，包括场景理解、图像流、目标跟踪等。

第4章介绍了深度学习在无人驾驶环境感知系统的应用，包括大型数据集以及需要高度复杂计算的图像分类、目标检测、语义分割等，其中详细讲

述了目标检测、语义分割和图像流。

当无人驾驶车辆对环境进行理解时，它必须以某种方式预测未来的事件（例如在其附近的另一辆车辆的运动）并规划自己的路线，这是第5章的主要内容。

接下来的第6章，对生成决策、规划和控制进行了更细致的阐述，并对在遇到潜在的正交决策以及解决方案冲突时（例如，一个模块推荐换道，而另一个模块已经在所述车道中检测到障碍物）各个模块间的相互反馈，尤其是决策生成（马尔可夫决策过程，基于场景的分治法）和运动规划的算法进行了介绍。

第7章展示了在基于强化学习的规划和控制方面补充设计的需要，以便在无人驾驶系统的开发过程中将情境与场景完全集成。

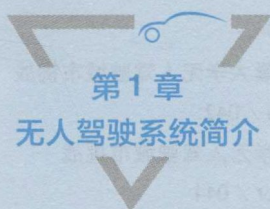
车载计算平台是第8章的主题，它包括对机器人操作系统的介绍，然后是对所使用的实际硬件的总结，同时提出了使用异构计算以满足实时计算以及实际车载（功耗和散热）的强烈需求。这意味着必须使用各种处理单元，包括通用中央处理器（CPU）、图形处理器（GPU）、现场可编程逻辑门阵列（FPGA）等。

最后，第9章介绍了用于“捆绑在一起”的云平台的基础架构，该架构为新算法开发、离线深度学习模型训练和高精度地图生成服务提供分布式仿真测试。

编 者

目 录

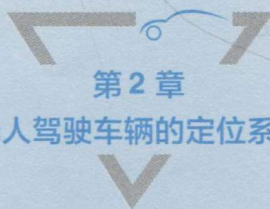
序 前言



第1章

无人驾驶系统简介

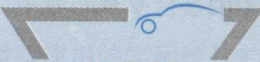
- 1.1 无人驾驶技术概述 / 002
- 1.2 无人驾驶算法 / 002
 - 1.2.1 传感 / 003
 - 1.2.2 感知 / 004
 - 1.2.3 目标识别与跟踪 / 006
 - 1.2.4 决策 / 006
- 1.3 无人驾驶客户端系统 / 008
 - 1.3.1 机器人操作系统 / 008
 - 1.3.2 硬件平台 / 011
- 1.4 无人驾驶云平台 / 011
 - 1.4.1 仿真模拟 / 011
 - 1.4.2 高精度地图生成 / 012
 - 1.4.3 深度学习模型训练 / 013
- 1.5 一切刚刚开始 / 014



第2章

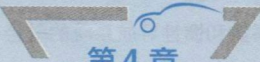
无人驾驶车辆的定位系统

- 2.1 采用全球导航卫星系统定位 / 015
 - 2.1.1 GNSS 概述 / 015
 - 2.1.2 GNSS 误差分析 / 017
 - 2.1.3 星基增强系统 / 018
 - 2.1.4 载波相位差分技术和差分 GNSS / 019
 - 2.1.5 精确点定位 / 020
 - 2.1.6 全球定位系统和惯性导航系统的融合 / 022
- 2.2 采用激光雷达和高精度地图定位 / 023
 - 2.2.1 激光雷达概述 / 023
 - 2.2.2 高精度地图概述 / 026
 - 2.2.3 激光雷达和高精度地图定位 / 030
- 2.3 视觉里程计 / 034
 - 2.3.1 立体视觉里程计 / 035
 - 2.3.2 单目视觉里程计 / 036



第3章

无人驾驶的感知系统



第4章

深度学习在无人驾驶感知系统中的应用



2.3.3 视觉惯性里程计 / 036

2.4 航位推算和轮式里程计 / 038

2.4.1 轮式编码器 / 038

2.4.2 轮式里程计误差 / 039

2.4.3 减少轮式里程计误差 / 040

2.5 多传感器融合 / 042

2.5.1 卡内基梅隆大学无人驾驶城市挑战
赛车 Boss / 042

2.5.2 斯坦福大学无人驾驶城市挑战
赛车 Junior / 044

2.5.3 梅赛德斯-奔驰无人驾驶车 Bertha / 045

参考文献 / 047

3.1 概述 / 051

3.2 数据集 / 052

3.3 目标识别 / 054

3.4 语义分割 / 056

3.5 立体视觉、光流和场景流 / 058

3.5.1 立体视觉与深度信息 / 058

3.5.2 光流 / 059

3.5.3 场景流 / 059

3.6 目标跟踪 / 061

3.7 总结 / 063

参考文献 / 064

4.1 卷积神经网络 / 068

4.2 目标检测 / 069

4.3 语义分割 / 072

4.4 立体视觉和光流 / 075

4.4.1 立体视觉 / 075

4.4.2 光流 / 076

4.5 总结 / 079

参考文献 / 080

第5章 预测与路径规划

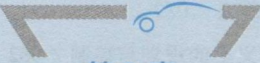
- 5.1 规划与控制模块概览 / 082
 - 5.1.1 架构: 广义上的规划与控制 / 082
 - 5.1.2 各个模块的范围: 以模块的方式解决问题 / 084
- 5.2 交通预测 / 087
 - 5.2.1 将行为预测作为分类问题 / 088
 - 5.2.2 车辆轨迹生成 / 093
- 5.3 车道级的路径规划 / 094
 - 5.3.1 为路径规划创建权重有向图 / 096
 - 5.3.2 典型的路径规划算法 / 098
 - 5.3.3 规划图损失: 强弱路径规划 / 102
- 5.4 总结 / 103
- 参考文献 / 103

第6章 决策、规划和控制

- 6.1 行为决策 / 105
 - 6.1.1 马尔可夫决策过程方法 / 107
 - 6.1.2 基于场景的分治法 / 109
- 6.2 运动规划 / 116
 - 6.2.1 车辆模型、道路模型、SL 坐标系 / 118
 - 6.2.2 划分为路径规划和速度规划的运动规划 / 119
 - 6.2.3 划分为纵向规划和横向规划的运动规划 / 126
- 6.3 反馈控制 / 130
 - 6.3.1 自行车模型 / 130
 - 6.3.2 PID 控制 / 132
- 6.4 总结 / 133
- 参考文献 / 134

第7章 基于增强学习 的规划和控制

- 7.1 概述 / 136
- 7.2 增强学习 / 138
 - 7.2.1 Q-学习 / 140
 - 7.2.2 ACTOR-CRITIC 方法 / 144
- 7.3 无人驾驶中基于学习的规划和控制 / 146
 - 7.3.1 行为决策中的增强学习 / 147
 - 7.3.2 基于增强学习的规划和控制 / 147
- 7.4 总结 / 150
- 参考文献 / 150



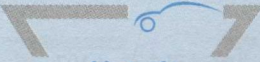
第8章

无人驾驶客户端系统



- 8.1 无人驾驶系统：一个复杂的系统 / 152
- 8.2 无人驾驶的操作系统 / 154
 - 8.2.1 ROS 综述 / 154
 - 8.2.2 系统可靠性 / 156
 - 8.2.3 性能优化 / 157
 - 8.2.4 资源管理与安全性 / 157
- 8.3 计算平台 / 158
 - 8.3.1 计算平台的实现 / 158
 - 8.3.2 现有的计算解决方案 / 159
 - 8.3.3 计算机体系结构设计的探索 / 160

参考文献 / 164



第9章

无人驾驶云平台



- 9.1 概述 / 165
- 9.2 基础架构 / 166
 - 9.2.1 分布式计算框架 / 167
 - 9.2.2 分布式存储 / 167
 - 9.2.3 异构计算 / 168
- 9.3 仿真模拟 / 170
 - 9.3.1 BinPipeRDD / 171
 - 9.3.2 连接 ROS 与 Spark 引擎 / 172
 - 9.3.3 性能表现 / 173
- 9.4 模型训练 / 173
 - 9.4.1 为什么使用 Spark 引擎 / 174
 - 9.4.2 训练平台架构 / 175
 - 9.4.3 异构计算 / 176
- 9.5 高精度地图生成 / 176
 - 9.5.1 高精度地图 / 177
 - 9.5.2 云端地图生成 / 178

9.6 总结 / 179

参考文献 / 179

第1章 无人驾驶系统简介



我们正处于未来无人驾驶的曙光时期，要了解未来可能是什么，通常会回溯历史，所以让我们从这里开始。

信息技术始于20世纪60年代，飞兆半导体和英特尔通过生产微处理器奠定了信息技术的基础，并作为副产品创造了硅谷。虽然微处理器技术大大提高了生产力，但是普通公众对这些技术的使用很有限。到了20世纪80年代，微软和苹果公司通过引入图形用户界面，奠定了第二层信息技术，实现了“每个家庭都有一台PC或MAC”的愿景。在2000年左右，以Google（谷歌）为代表的互联网公司通过连接人和信息，奠定了第三层信息技术。例如，通过Google，信息提供者和信息消费者可以间接联系起来。接着在2010年左右，Facebook（脸书）、LinkedIn（领英）等社交网络公司通过有效地将人类社会接入互联网，使人们直接互相联系，奠定了第四层信息技术。在以互联网为基础的人类社会人口达到了显著规模后，2015年左右，Uber（优步）和Airbnb（爱彼迎）的出现奠定了第五层信息技术，提供以互联网为基础的人类社会服务，形成一个互联网为基础的商业社会。尽管Uber和Airbnb为我们提供了通过互联网访问服务提供商的有效手段，但这些服务仍然由人类提供。



1.1 无人驾驶技术概述

如图 1-1 所示，无人驾驶不是单一技术，而是一个由许多子系统组成的高度复杂的系统。让我们把它分成三个主要组成部分：算法，包括传感、感知和决策（需要对复杂情况进行推理）；客户端系统，包括操作系统和硬件平台；云平台，包括高精度地图、模型训练、仿真模拟和数据存储。

算法子系统从传感器原始数据中提取有意义的信息来理解环境，并对未来行为做出决策。客户端系统将这些算法集成在一起，以满足实时性和可靠性要求。例如，如果摄像机以 60 Hz 的频率产生数据，则客户端系统需要确保在不到 16 ms 时间内完成处理流程。云平台提供离线计算和无人驾驶汽车的存储能力。借助云平台，可以测试新的算法，更新高精度地图，更好地训练识别、跟踪和决策模型。

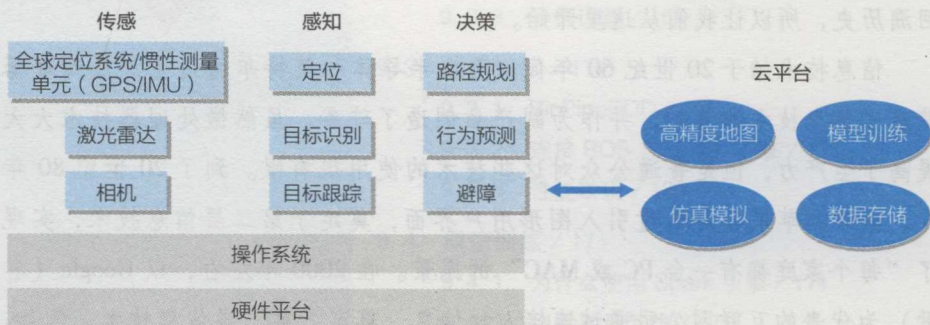


图 1-1 无人驾驶系统架构

1.2 无人驾驶算法

这里的算法包括三个部分：传感、感知和决策。其中传感部分负责从传感器获取的原始数据中提取有用信息；感知部分负责定位车辆并理解其所处的周围环境；决策部分负责采取相应的操作以使车辆安全地到达目的地。