

第一本无人驾驶 技术书

刘少山 唐 洁 著
吴 双 李力耘



内容简介

第一本无人驾驶技术书

刘少山 唐洁 著
吴双 李力耘

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

无人驾驶是一个复杂的系统，涉及的技术点种类多且跨度大，入门者常常不知从何入手。本书首先宏观地呈现了无人驾驶的整体技术架构，概述了无人驾驶中涉及的各项技术点。在读者对无人驾驶技术有了宏观认识后，本书深入浅出地讲解了无人驾驶定位导航、感知、决策与控制等算法，深度学习在无人驾驶中的应用，无人驾驶系统软件和硬件平台，无人驾驶安全及无人驾驶云平台等多个主要技术点。本书的作者都是无人驾驶行业的从业者与研究人员，有着多年无人驾驶及人工智能技术的实战经验。

本书从实用的角度出发，以期帮助对无人驾驶技术（特别是人工智能在无人驾驶中的应用）感兴趣的从业者与相关人士实现对无人驾驶行业的快速入门，以及对无人驾驶技术的深度理解与应用实践。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

第一本无人驾驶技术书 / 刘少山等著. —北京：电子工业出版社，2017.6
ISBN 978-7-121-31355-4

I. ①第… II. ①刘… III. ①人工智能—算法—研究 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 077646 号

策划编辑：郑柳洁

责任编辑：郑柳洁

印 刷：三河市鑫金马印装有限公司

装 订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：720×1000 1/16 印张：13.75 字数：261 千字

版 次：2017 年 6 月第 1 版

印 次：2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价：59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：010-51260888-819, faq@phei.com.cn。



好评袭来

本书深入浅出地呈现了无人驾驶这个复杂的系统。书中包括无人驾驶定位与感知算法、无人驾驶决策与控制算法、深度学习在无人驾驶中的应用、无人驾驶系统、无人驾驶云平台、无人驾驶安全等章节，既宏观地呈现了无人驾驶技术的架构，又很好地深入到无人驾驶涉及的每个技术点。我相当同意书中的观点：无人驾驶并不是一个技术点，而是众多技术点的集合。无人车上路行驶的前提是每一个技术点都要做得很好，这就代表在每个技术点上都有很好的创新机会。例如，在无人驾驶芯片的设计上，使用低能耗的 ARM 架构加上不同的加速芯片（GPU、FPGA、DSP、ASIC）在性能与能耗上有很大优势。我仔细阅读完本书后，对整个无人驾驶系统架构有了很好的认识，当我想更深入地了解一个技术点时，本书也提供了很好的文献信息让我深入学习。毫不夸张地说，本书让我在短时间内对无人驾驶技术有了很好的了解。

ARM 董事会成员、全球副总裁、中国区总裁 吴昂雄

作为一名科技行业的从业者，我有幸近距离观察了许多所谓的颠覆性技术的生命周期。我的感受是人们会将一项技术的近期作用无限夸大，对这项技术的长期演化往往估计不足。这一次大家对“无人驾驶”的态度也一样，大多数人仅仅把“无人驾驶”看成一项技术，认为只要搞定算法、搞定传感器、搞定云与端的传输等就万事大吉，我们就进入了完全自动驾驶的时代。我认为这种想法很危险，首先，这是一种发明家而非创新家、投机者而非创业者的心态；其次，这些人没有充分认识到“无人驾驶”有着极大的安全属性与社会属性，他们可能会谈到政府管制的问题，但很少考虑人口结构及其背后的消费心理及消费习

惯问题。这种拿着锤子找钉子的做法对“无人驾驶”的落地很不利。

作为从业者之一，我坚定看好“无人驾驶”这一产业的长期趋势及其巨大的经济与社会效益，但在短期内，我们除了做好技术准备外，更应该把眼光放长远，虚心地研究市场、研究用户、研究监管者、研究利益相关方，脚踏实地一步一个脚印，共同实现“无人驾驶”这一可预见的未来。本书是我读过的有关“无人驾驶”最系统、最严谨的著作，值得有志于从事此行业的朋友认真阅读。

舜宇光学科技（集团）有限公司总裁、执行董事 孙泱

刘少山带领的是一个专业而高效的硅谷精英团队！感谢他们的努力，将神秘高端的无人驾驶技术拉下神坛，并以庖丁解牛般的专业功底逐层剖析。这本诞生于工业界的无人驾驶图书，将极大地缩短开发者、爱好者，以及相关人士迅速切入，并深入学习和投身于人工智能无人驾驶这一热点领域的进程，实属可贵。

CSDN &《程序员》总编 孟迎霞

很高兴看到本书书稿，我认为这是一本无人驾驶方面的专业书籍，对技术发展现状和工业实现都进行了很好的描述，并对未来做出了展望。书中内容包括了各个层面面临的技术挑战和可能的技术解决方案，特别是在决策控制部分有精彩的描述。我相信本书对在校学生、研究生，以及工业界相关技术人员都有所帮助！

清华大学教授、博士生导师 樊平毅

当前，人工智能引起了全球性的关注，是一个可能改变世界的创新技术。无人驾驶技术是人工智能领域最重要的分支之一，其涉及的学科众多，是一个融会了大量新技术的工程实践。本书试图揭开无人驾驶技术的神秘面纱，使读者能够很快建立对无人驾驶技术的全面认识。本书从工程师的角度出发，全面介绍了无人驾驶技术涉及的核心方向，包括环境感知、车载传感器、规划控制，等等。书中涉及无人驾驶的多个技术方向自成体系，针对每个方向中的核心内容讨论了系统的技术思路和解决方案，在很多重要的技术上给出了颇具深度的细节示例。本书作者有深厚的硅谷工程师背景，作者描述的无人驾驶技术已经不是象牙塔里的学术，而是贴近社会并即将走进大众生活的新一代科技产品的实践。

电子科技大学教授、博士生导师 雷维礼

目录

| | | |
|----------|----------------------------|-----------|
| 1 | 无人车：正在开始的未来 | 1 |
| 1.1 | 正在走来的无人驾驶..... | 2 |
| 1.2 | 自动驾驶的分级..... | 4 |
| 1.3 | 无人驾驶系统简介..... | 7 |
| 1.4 | 序幕刚启..... | 18 |
| 1.5 | 参考资料..... | 18 |
| 2 | 光学雷达在无人驾驶技术中的应用 | 21 |
| 2.1 | 无人驾驶技术简介..... | 21 |
| 2.2 | 光学雷达基础知识..... | 22 |
| 2.3 | LiDAR 在无人驾驶技术中的应用领域..... | 24 |
| 2.4 | LiDAR 技术面临的挑战..... | 26 |
| 2.5 | 展望未来..... | 28 |
| 2.6 | 参考资料..... | 28 |
| 3 | GPS 及惯性传感器在无人驾驶中的应用 | 30 |
| 3.1 | 无人驾驶定位技术..... | 30 |

| | | |
|-----|---------------------|----|
| 3.2 | GPS 简介 | 31 |
| 3.3 | 惯性传感器简介 | 34 |
| 3.4 | GPS 和惯性传感器的融合 | 36 |
| 3.5 | 结论 | 37 |
| 3.6 | 参考资料 | 38 |

4 基于计算机视觉的无人驾驶感知系统 39

| | | |
|-----|--------------------------|----|
| 4.1 | 无人驾驶的感知 | 39 |
| 4.2 | KITTI 数据集 | 40 |
| 4.3 | 计算机视觉能帮助无人车解决的问题 | 42 |
| 4.4 | Optical Flow 和立体视觉 | 43 |
| 4.5 | 物体的识别与追踪 | 45 |
| 4.6 | 视觉里程计算法 | 47 |
| 4.7 | 结论 | 48 |
| 4.8 | 参考资料 | 49 |

5 卷积神经网络在无人驾驶中的应用 50

| | | |
|-----|--------------------|----|
| 5.1 | CNN 简介 | 50 |
| 5.2 | 无人驾驶双目 3D 感知 | 51 |
| 5.3 | 无人驾驶物体检测 | 54 |
| 5.4 | 结论 | 59 |
| 5.5 | 参考资料 | 59 |

6 增强学习在无人驾驶中的应用 61

| | | |
|-----|------------------|----|
| 6.1 | 增强学习简介 | 61 |
| 6.2 | 增强学习算法 | 63 |
| 6.3 | 使用增强学习帮助决策 | 68 |
| 6.4 | 无人驾驶的决策介绍 | 70 |
| 6.5 | 参考资料 | 74 |

| | | |
|-----------|-----------------------|------------|
| 7 | 无人驾驶的规划与控制 | 75 |
| 7.1 | 规划与控制简介 | 75 |
| 7.2 | 路由寻径 | 77 |
| 7.3 | 行为决策 | 84 |
| 7.4 | 动作规划 | 93 |
| 7.5 | 反馈控制 | 101 |
| 7.6 | 无人车规划控制结语 | 105 |
| 7.7 | 参考资料 | 105 |
| 8 | 基于 ROS 的无人驾驶系统 | 108 |
| 8.1 | 无人驾驶：多种技术的集成 | 108 |
| 8.2 | 机器人操作系统（ROS）简介 | 110 |
| 8.3 | 系统可靠性 | 115 |
| 8.4 | 系统通信性能提升 | 116 |
| 8.5 | 系统资源管理与安全性 | 117 |
| 8.6 | 结论 | 118 |
| 8.7 | 参考资料 | 118 |
| 9 | 无人驾驶的硬件平台 | 120 |
| 9.1 | 无人驾驶：复杂系统 | 120 |
| 9.2 | 传感器平台 | 121 |
| 9.3 | 计算平台 | 140 |
| 9.4 | 控制平台 | 150 |
| 9.5 | 结论 | 157 |
| 9.6 | 参考资料 | 158 |
| 10 | 无人驾驶系统安全 | 160 |
| 10.1 | 针对无人驾驶的安全威胁 | 160 |
| 10.2 | 无人驾驶传感器的安全 | 160 |
| 10.3 | 无人驾驶操作系统的安全 | 162 |

| | | |
|------|-------------|-----|
| 10.4 | 无人驾驶控制系统的安全 | 163 |
| 10.5 | 车联网通信系统的安全性 | 165 |
| 10.6 | 安全模型校验方法 | 168 |
| 10.7 | 参考资料 | 169 |

11 基于 Spark 与 ROS 的分布式无人驾驶模拟平台 171

| | | |
|------|--------------------|-----|
| 11.1 | 无人驾驶模拟技术 | 171 |
| 11.2 | 基于 ROS 的无人驾驶模拟器 | 173 |
| 11.3 | 基于 Spark 的分布式的模拟平台 | 175 |
| 11.4 | 结论 | 178 |
| 11.5 | 参考资料 | 178 |

12 无人驾驶中的高精度地图 180

| | | |
|------|-------------|-----|
| 12.1 | 电子地图分类 | 180 |
| 12.2 | 高精度地图的特点 | 183 |
| 12.3 | 高精度地图的生产 | 185 |
| 12.4 | 无人驾驶场景中的应用 | 188 |
| 12.5 | 高精度地图的现状与结论 | 190 |
| 12.6 | 参考资料 | 191 |

13 无人驾驶的未来 192

| | | |
|------|-----------|-----|
| 13.1 | 无人驾驶的商业前景 | 192 |
| 13.2 | 无人车面临的障碍 | 194 |
| 13.3 | 无人驾驶产业 | 198 |
| 13.4 | 全球化下的无人驾驶 | 203 |
| 13.5 | 无人驾驶发展对策 | 205 |
| 13.6 | 可预见的未来 | 207 |
| 13.7 | 参考资料 | 208 |

1

无人车：正在开始的未来

我们已经拉开了全自动无人驾驶的序幕，在幕布之后精彩的未来将如何，让我们先回顾一下硅谷的发展历史，再以此展望无人驾驶的未来。如图 1-1 所示，现代信息技术始于 20 世纪 60 年代，仙童电子和 Intel 通过硅晶体微处理器技术的创新开创了信息技术的新时代，这也是硅谷的起源。微处理器技术极大地提高了工业化生产力，推进了现代工业的发展。20 世纪 80 年代，随着 Xerox Alto、Apple Lisa 及 Microsoft Windows 等软件系统的发展，图形界面被广泛应用，个人电脑的概念出现并开始普及，现代信息技术以此为基础普惠众人。

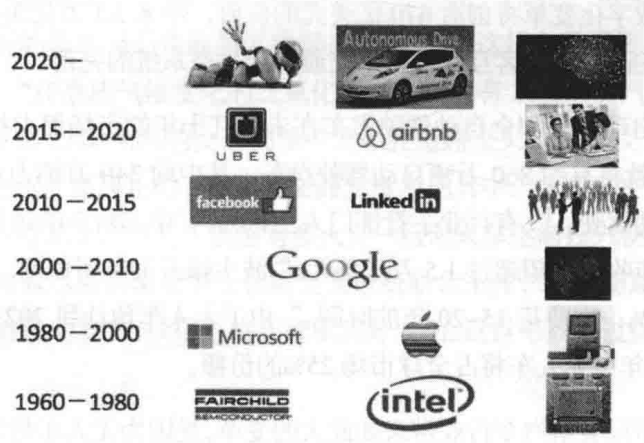


图 1-1 现代信息技术发展史

21 世纪初，在个人电脑逐步普及并被大规模应用的背景下，Google 的出现通过互联网和搜索引擎的方式将人与浩瀚如星海的信息互联起来了，至此，现代信息技术发展到了第三阶段。始于 2004 年的 Facebook 通过革新的社交网络模式将现代信息技术推进到了第四阶段。至此，人类的交往互联方式从线下扩展到了线上，人类社会在万维网上有了初始的迁移并逐步地成熟完善。

随着互联网人口规模的膨胀，Airbnb 与 Uber 等公司通过共享经济的思维把人类社会的经济模式直接推广到了互联网社会，利用互联网+移动设备等直接连接不同用户的经济行为，得到了大范围的成功。信息技术每一阶段的发展及其随后驱动的革新，都极大地改变了人类对信息的访问需求和获取方式。尤其对后几个阶段而言，互联网是一个基础性条件，大多数的服务是通过互联网传达给终端用户的。

现在，我们走到了信息技术发展的第六阶段，机器人开始作为服务的承载体出现，其中的一个具体事例就是无人驾驶的产品化。无人驾驶并不是一个单一的新技术，而是一系列技术的整合，通过众多技术的有效融合，在无人驾车的情况下安全地送达乘客。本章会介绍无人驾驶的分级、ADAS 中的关键应用、无人驾驶中涉及的多项技术并讨论如何安全高效地在无人驾驶系统中完成技术的整合。

1.1 正在走来的无人驾驶

预计到 2021 年，无人车将进入市场，从此开启一个崭新的阶段。^[1]世界经济论坛估计，汽车行业的数字化变革将创造 670 亿美元的价值，带来 3.1 万亿美元的社会效益，^[2]其中包括无人车的改进、乘客互联及整个交通行业生态系统的完善。

据估计，半自动驾驶和全自动驾驶汽车在未来几十年的市场潜力相当大。例如，到 2035 年，仅中国就将有约 860 万辆自动驾驶汽车，其中约 340 万辆为全自动无人驾驶，520 万辆为半自动驾驶。^[3]有行业主管部门人士认为，“中国轿车的销售，巴士、出租车和相关交通服务年收入有望超过 1.5 万亿美元。”波士顿咨询集团预测，“无人车的全球市场份额要达到 25%，需要花 15~20 年的时间。”由于无人车预计到 2021 年才上市，这意味着 2035—2040 年，无人车将占全球市场 25% 的份额。

无人驾驶之所以会给汽车行业带来如此大的变革，是因为无人车带来的影响是空前的。研究表明，在增强高速公路安全、缓解交通拥堵、减少空气污染等领域，无人驾驶会带来

颠覆性的改善。

1. 增强高速公路安全

高速公路事故是全世界面临的重大问题。在美国，每年估计有 35000 人死于车祸，在中国这一数字约为 260000 人。^[4] 日本每年高速公路事故死亡人数为 4000 左右。^[5] 根据世界卫生组织统计，全世界每年有 124 万人死于高速公路事故。^[6] 据估计，致命车祸每年会造成 2600 亿美元的损失，而车祸致伤会带来 3650 亿美元的损失。高速公路事故每年导致 6250 亿美元的损失。^[7] 美国兰德公司研究显示，“在 2011 年车祸死亡事故中 39% 涉及酒驾。”^[8] 几乎可以肯定，在这方面，无人车将带来大幅改善，避免车祸伤亡。在中国，约有 60% 的交通事故和骑车人、行人或电动自行车与小轿车和卡车相撞有关。^[9] 在美国的机动车事故中，有 94% 与人为失误有关。^[10] 美国高速公路安全保险研究所的一项研究表明，全部安装自动安全装置能使高速公路事故死亡数量减少 31%，每年将挽救 11000 条生命。^[11] 这类装置包括前部碰撞警告体系、碰撞制动、车道偏离警告和盲点探测。

2. 缓解交通拥堵

交通拥堵几乎是每个大都市都面临的问题。以美国为例，每位司机每年平均遇到 40 小时的交通堵塞，年均成本为 1210 亿美元。^[12] 在莫斯科、伊斯坦布尔、墨西哥城或里约热内卢，浪费的时间更长，“每位司机每年将在交通拥堵中度过超过 100 小时。”^[13] 在中国，汽车数量超过 100 万辆的城市有 35 个，超过 200 万辆的城市有 10 个。在最繁忙的市区，约有 75% 的道路会出现高峰拥堵。”中国私家车总数已达 1.26 亿辆，同比增加 15%，^[14] 仅北京就有 560 万辆汽车。^[15] Donald Shoup 的研究发现，都市区 30% 的交通拥堵是由于司机为了寻找附近的停车场而在商务区绕圈造成的。^[16] 这是交通拥挤、空气污染和环境恶化的重要原因。“在造成气候变化的二氧化碳排放中约有 30% 来自汽车”。^[17] 另外，根据估算，在都市中有 23%~45% 的交通拥堵中发生在道路交叉处。^[18] 交通灯和停车标志不能发挥作用，因为它们是静止的，无法将交通流量考虑其中。绿灯或红灯是按照固定间隔提前设定好的，不管某个方向的车流量有多大。一旦无人车逐渐投入使用，并占到车流量比较大的比例，车载感应器将能够与智能交通系统联合工作，优化道路交叉口的车流量。红绿灯的间隔也将是动态的，根据道路车流量实时变动。这样可以通过提高车辆通行效率，缓解拥堵。

3. 疏解停车难问题

完成停车时，无人车能将每侧人为预留的空间减少 10 厘米，每个停车位就可以减少 1.95 平方米，此外层高也可以按照车身进行设计。通过无人车与传统汽车共享车库，所需要的车库空间将减少 26%。如果车库直供自动泊车汽车使用，则所需的车库空间将减少 62%。节省的土地可以用于建设其他对行车和行人更加友好的街道，同时也节省了消费者停车和取车的时间。

4. 减少空气污染

汽车是造成空气质量下降的主要原因之一。兰德公司的研究表明，“无人驾驶技术能提高燃料效率，通过更顺畅的加速、减速，能比手动驾驶提高 4%~10% 的燃料效率。”^[19] 由于工业区的烟雾与汽车数量有关，增加无人车的数量能减少空气污染。一项 2016 年的研究估计，“等红灯或交通拥堵时汽车造成的污染比车辆行驶时高 40%。”^[20] 无人车共享系统也能带来减排和节能的好处。德克萨斯大学奥斯汀分校的研究人员研究了二氧化硫、一氧化碳、氮氧化物、挥发性有机化合物、温室气体和细小颗粒物。结果发现，“使用无人车共享系统不仅节省能源，还能减少各种污染物的排放。”^[21] 约车公司 Uber 发现，该公司在旧金山和洛杉矶的车辆出行中分别有 50% 和 30% 是多乘客拼车。在全球范围内，这一数字为 20%。^[22] 无论是传统车，还是无人车，拼车的乘客越多，对环境越好，也越能缓解交通拥堵。改变一车一人的模式将能大大改善空气质量。

1.2 自动驾驶的分级

2013 年，美国国家公路交通安全管理局（NHTSA，制定各种监管和标准）发布了汽车自动化的五级标准，将自动驾驶功能分为 5 个级别：0~4 级^[23]，以应对汽车主动安全技术的爆发增长。先看 NHTSA 下的定义，如图 1-2 所示。

(1) Level 0：无自动化。没有任何自动驾驶功能、技术，司机对汽车所有功能拥有绝对控制权。驾驶员需要负责启动、制动、操作和观察道路状况。任何驾驶辅助技术，只要仍需要人控制汽车，都属于 Level 0。所以现有的前向碰撞预警、车道偏离预警，以及自动雨刷和自动前灯控制，虽然有一定的智能化，但是都仍属于 Level 0。

自动驾驶分级

| 美国国家公路交通安全管理局 (NHTSA)、美国汽车工程师学会 (SAE) 自动驾驶分级标准 | | | | | | | |
|--|----------------------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| 分级 | NHTSA | L0 | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 |
| 称谓(SAE) | 无自动化 | | 驾驶支持 | 部分自动化 | 有条件自动化 | 高度自动化 | 完全自动化 |
| SAE定义 | 由人类驾驶者全权驾驶汽车, 在行驶过程中可以得到警告 | | 通过驾驶环境对方向盘和加速减速中的一项操作提供支持, 其余由人类操作 | 通过驾驶环境对方向盘和加速减速中的多项操作提供支持, 其余由人类操作 | 由无人驾驶系统完成所有的驾驶操作, 根据系统要求, 人类提供适当的应答 | 由无人驾驶系统完成所有的驾驶操作, 根据系统要求, 人类不一定提供所有的应答。限定道路和环境条件 | 由无人驾驶系统完成所有的驾驶操作, 可能的情况下, 人类接管, 不限定道路和环境条件 |
| 主体 | 驾驶操作 | 人类驾驶者/系统 | | 系统 | | | |
| | 周边监控 | 人类驾驶者 | | 系统 | | | |
| | 支援 | 人类驾驶者 | | 系统 | | | |
| | 系统作用域 | 无 | | 全域 | | | |

图 1-2 NHTSA 和 SAE 对自动驾驶的分级比较

(2) Level 1: 单一功能级的自动化。驾驶员仍然对行车安全负责, 不过可以放弃部分控制权给系统管理, 某些功能已经自动进行, 比如常见的自适应巡航 (Adaptive Cruise Control, ACC)、应急刹车辅助 (Emergency Brake Assist, EBA) 和车道保持 (Lane-Keep Support, LKS)。Level 1 的特点是只有单一功能, 驾驶员无法做到手和脚同时不操控。

(3) Level 2: 部分自动化。司机和汽车来分享控制权, 驾驶员在某些预设环境下可以不操作汽车, 即手脚同时离开控制, 但驾驶员仍需要随时待命, 对驾驶安全负责, 并随时准备在短时间内接管汽车驾驶权。比如结合了 ACC 和 LKS 形成的跟车功能。Level 2 的核心不在于要有两个以上的功能, 而在于驾驶员可以不再作为主要操作者。Tesla 推送的 autopilot 也是 Level 2 的功能。

(4) Level 3: 有条件自动化。在有限情况下实现自动控制, 比如在预设的路段 (如高速和人流较少的城市路段), 汽车自动驾驶可以完全负责整个车辆的操控, 但是当遇到紧急情况, 驾驶员仍需要在某些时候接管汽车, 但有足够的预警时间, 如即将进入修路的路段 (Road work ahead)。Level 3 将解放驾驶员, 即对行车安全不再负责, 不必监视道路状况。

(5) Level 4: 完全自动化 (无人驾驶), 无须司机或乘客的干预。在无须人协助的情况下由出发地驶向目的地。仅需起点和终点信息, 汽车将全程负责行车安全, 并完全不依赖驾驶员干涉。行车时可以没有人乘坐 (如空车货运)。

另一个对自动驾驶的分级来自美国机动工程师协会 (SAE), 其定义自动驾驶技术共

分为 0~5 级。^[24]SAE 的定义在自动驾驶 0~3 级与 NHTSA 一致,分别强调的是无自动化、驾驶支持、部分自动化与条件下的自动化。唯一的区别在于 SAE 对 NHTSA 的完全自动化进行了进一步细分,强调了行车对环境与道路的要求。SAE-Level4 下的自动驾驶需要在特定的道路条件下进行,比如封闭的园区或者固定的行车线路等,可以说是面向特定场景下的高度自动化驾驶。SAE-Level5 则对行车环境不加限制,可以自动地应对各种复杂的车辆、新人和道路环境。

综上所述,不同 Level 所实现的自动驾驶功能也是逐层递增的,ADAS (Advanced Driving Assistant System) 即高级驾驶辅助系统,属于自动驾驶 0~2 级。如表 1-1 所示,L0 中实现的功能仅能够进行传感探测和决策报警,比如夜视系统、交通标识识别、行人检测、车道偏离警告等。L1 实现单一控制类功能,如支持主动紧急制动、自适应巡航控制系统等,只要实现其中之一就可达到 L1。L2 实现了多种控制类功能,如具有 AEB 和 LKA 等功能的车辆。L3 实现了特定条件下的自动驾驶,当超出特定条件时将由人类驾驶员接管驾驶。SAE 中的 L4 是指在特定条件下的无人驾驶,如封闭园区固定线路的无人驾驶等,例如百度在乌镇景区运营的无人驾驶服务。而 SAE 中的 L5 就是终极目标,完全无人驾驶。无人驾驶就是自动驾驶的最高级,它是自动驾驶的最终形态。

表 1-1 逐层递增的自动驾驶功能

| NHTSA | L0 | L1 | L2 | L3 | L4 | | |
|-------|--|---|--------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|
| SAE | L0 | L1 | L2 | L3 | L4 | L5 | |
| 功能 | 无自动化 | 驾驶支持 | 部分自动化 | 有条件自动化 | 高度自动化 | 完全自动化 | |
| 特征 | 夜视 行人检测 交通标志识别 盲点检测 并线辅助 后排路口交通警报 车道偏离警告 | 自适应巡航驾驶系统 自动紧急制动 停车辅助系统 前向碰撞预警系统 车身电子稳定系统 | 组合功能 (L1/L2 组合) | 车道保持辅助系统 拥挤辅助驾驶 | 特定条件 部分任务 | 特定条件 全部任务 | 全部条件 全部任务 |
| | ADAS | | | 自动驾驶 | | | |

全自动无人车可能比半自动驾驶汽车更安全,因为其可以在车辆行驶时排除人为错误和不明智的判断。例如,弗吉尼亚理工大学交通学院的调查表明,“L3级自动驾驶车辆的司机回应接管车辆的请求平均需要17秒,而在这个时间内,一辆时速65英里(105千米)的汽车已经开出1621英尺(494米)——超过5个足球场的长度。”百度的工程师也发现了类似的结果。司机从看到路面物体到踩刹车需要1.2秒,远远长于车载计算机所用的0.2秒。这一时间差意味着,如果汽车时速是120千米(75英里),等到司机停车时,车子已经开出了40米(44码),而如果是车载计算机做判断,则开出的距离只有6.7米(7码)。在很多事故中,这一差距将决定乘客的生死。由此可见,站在自动驾驶最高级的无人驾驶才是汽车行业未来发展的“终极目标”。

1.3 无人驾驶系统简介

无人驾驶系统是一个复杂的系统,如图1-3所示,系统主要由三部分组成:算法端、Client端和云端。其中算法端包括面向传感、感知和决策等关键步骤的算法;Client端包括机器人操作系统及硬件平台;云端包括数据存储、模拟、高精度地图绘制及深度学习模型训练。

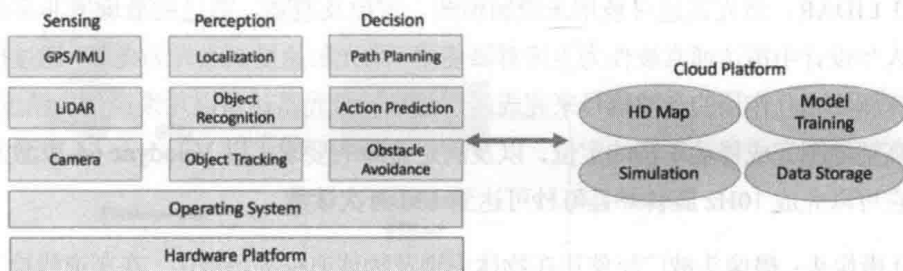


图 1-3 无人驾驶系统架构图

算法端从传感器原始数据中提取有意义的信息以了解周遭的环境情况,并根据环境变化做出决策。Client端融合多种算法以满足实时性与可靠性的要求。举例来说,传感器以60Hz的速度产生原始数据,Client端需要保证最长的流水线处理周期也能在16ms内完成。云平台为无人车提供离线计算及存储功能。通过云平台,我们能够测试新的算法、更新高精度地图并训练更加有效的识别、追踪和决策模型。

1.3.1 无人驾驶算法

算法系统由几部分组成：第一，传感，并从传感器原始数据中提取有意义信息；第二，感知，以定位无人车所在位置及感知现在所处的环境；第三，决策，以便可靠、安全地抵达目的地。

1. 传感

通常来说，一辆无人车装备有许多不同类型的主传感器。每一种类型的传感器各自有不同的优劣，因此，来自不同传感器的传感数据应该有效地进行融合。现在无人驾驶中普遍使用的传感器包括以下几种。

(1) GPS/IMU: GPS/IMU 传感系统通过高达 200 Hz 频率的全球定位和惯性更新数据，以帮助无人车完成自我定位。GPS 是一个相对准确的定位用传感器，但是它的更新频率过低，仅有 10Hz，不足以提供足够实时的位置更新。IMU 的准确度随着时间降低，因此在长时间距离内并不能保证位置更新的准确性；但是，它有着 GPS 所欠缺的实时性，IMU 的更新频率可以达到 200Hz 或者更高。通过整合 GPS 与 IMU，我们可以为车辆定位提供既准确又足够实时的位置更新。

(2) LIDAR: 激光雷达可被用来绘制地图、定位及避障。雷达的准确率非常高，因此在无人车设计中雷达通常被作为主传感器使用。激光雷达是以激光为光源，通过探测激光与被探测物相互作用的光波信号来完成遥感测量。激光雷达可以用来产生高精度地图，并针对高精地图完成移动车辆的定位，以及满足避障的要求。以 Velodyne 64-束激光雷达为例，它可以完成 10Hz 旋转并且每秒可达到 130 万次读数。

(3) 摄像头: 摄像头被广泛使用在物体识别及物体追踪等场景中，在车道线检测、交通灯侦测、人行道检测中都以摄像头为主要解决方案。为了加强安全性，现有的无人车实现通常在车身周围使用至少八个摄像头，分别从前、后、左、右四个维度完成物体发现、识别、追踪等任务。这些摄像头通常以 60Hz 的频率工作，当多个摄像头同时工作时，将产生高达 1.8GB 每秒的巨额数据量。

(4) 雷达和声呐: 雷达把电磁波的能量发射至空间中某一方向，处在此方向上的物体反射该电磁波，雷达通过接收此反射波，以提取该物体的某些有关信息，包括目标物体至雷达的距离、距离变化率或径向速度、方位、高度等。雷达和声呐系统是避障的最后一道保障。雷达和声呐产生的数据用来表示在车的前进方向上最近障碍物的距离。一旦系统检