



国家科学技术学术著作
出版基金资助出版

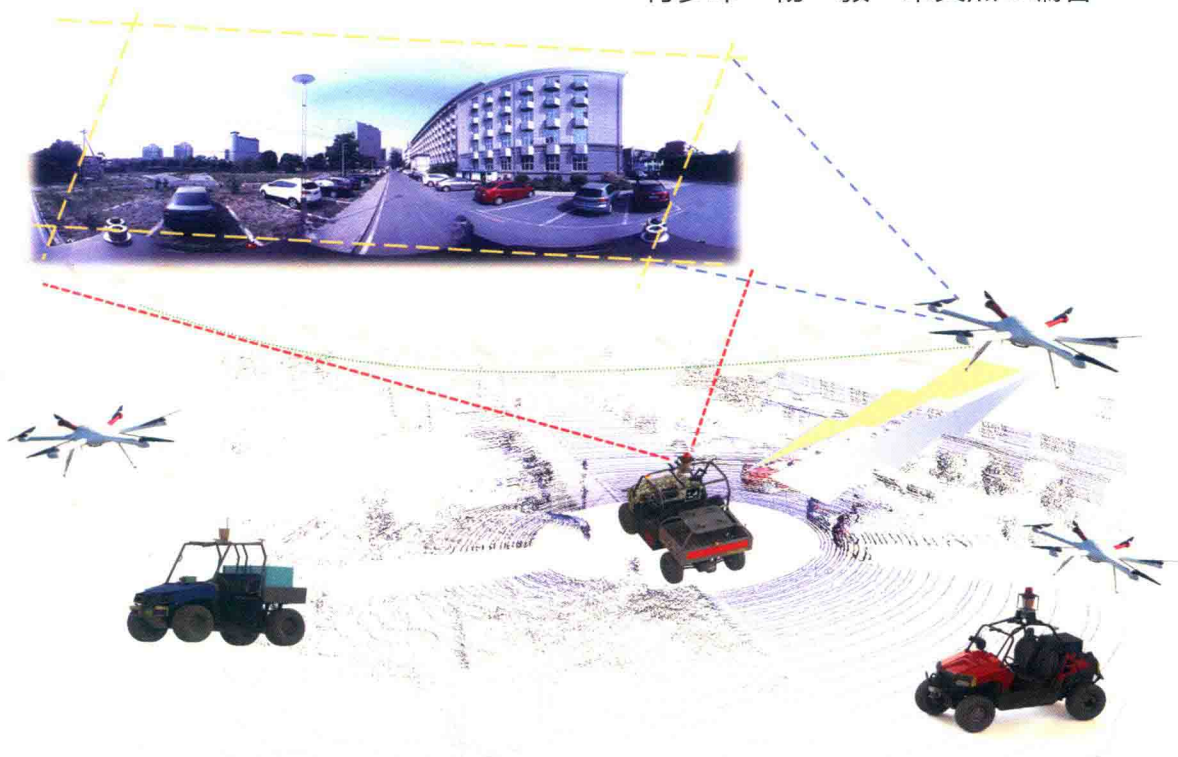
★ ★ ★ ★ ★
“十四五”时期

国家重点出版物出版专项规划项目

陆上无人系统 行驶空间自主导航

DRIVING SPACE-BASED AUTONOMOUS NAVIGATION
FOR OVERLAND UNMANNED SYSTEM

付梦印 杨毅 宋文杰◎编著



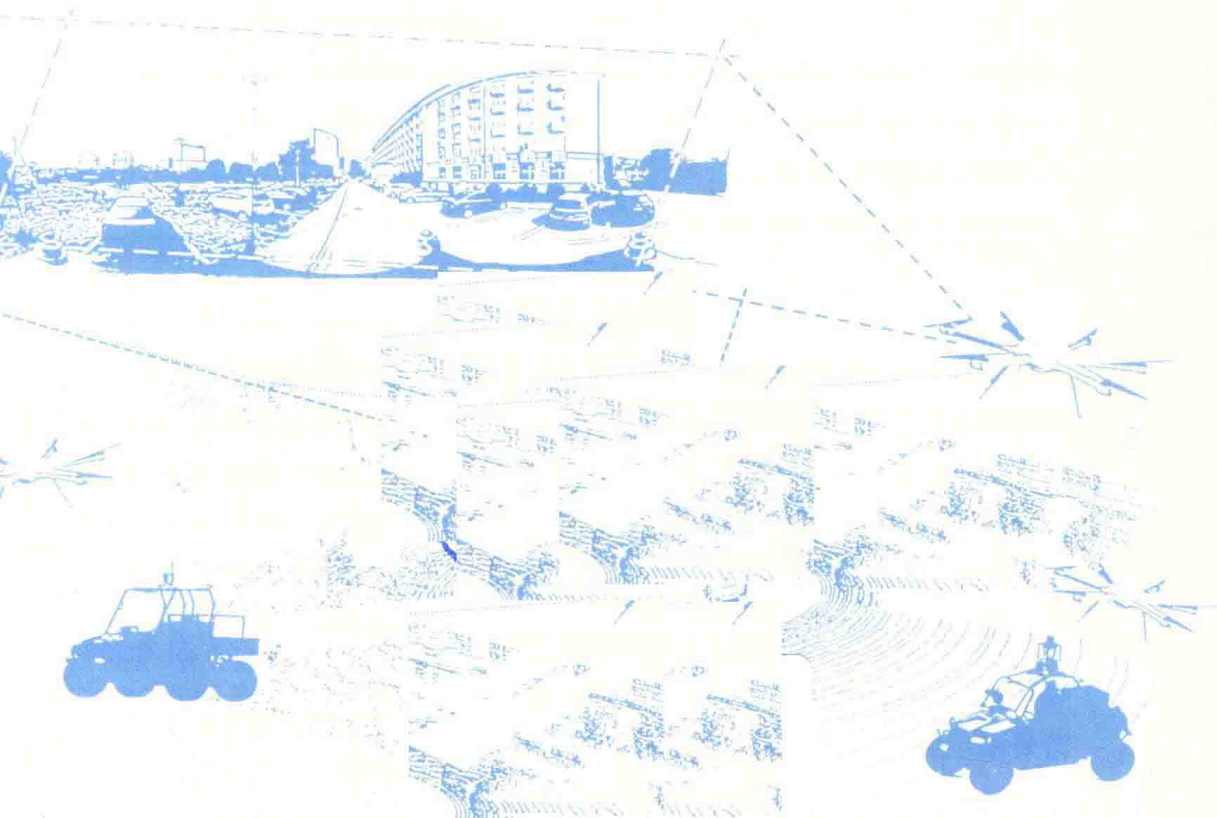
 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

陆上无人系统 行驶空间自主导航

DRIVING SPACE-BASED AUTONOMOUS NAVIGATION
FOR OVERLAND UNMANNED SYSTEM

付梦印 杨毅 宋文杰◎编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

自主导航是陆上无人系统实现智能化、协同化运行的核心关键技术,是一个综合性高、交叉性强、理论与实践紧密结合的研究领域。本书完整系统地提出并构建了适用于无人车、无人机等多类型平台的陆上无人系统自主导航技术体系,从系统架构、理论方法、关键技术、典型应用等方面进行了详细介绍。

本书可供从事无人系统自主导航技术研究的相关科研院所的专业技术人员和导航、控制、机器人等相关专业的研究生学习,也可为相关领域的研究人员提供理论与工程实践参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

陆上无人系统行驶空间自主导航 / 付梦印, 杨毅,
宋文杰编著. -- 北京: 北京理工大学出版社, 2021. 11

ISBN 978 - 7 - 5763 - 0391 - 9

I. ①陆… II. ①付… ②杨… ③宋… III. ①无人值守 - 智能系统 - 导航 - 研究 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 195946 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68944723(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

刷 / 雅迪云印(天津)科技有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 21.25

责任编辑 / 曾 仙

字 数 / 335 千字

文案编辑 / 曾 仙

版 次 / 2021 年 11 月第 1 版 2021 年 11 月第 1 次印刷

责任校对 / 周瑞红

定 价 / 136.00 元

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换



FOREWORD | 前言

随着信息革命向纵深推进，智能无人系统已在农业、医疗、教育、交通、安防和军事等领域得到广泛应用与发展。空中有无人机，地面有无人车，全域无人系统装备发展如火如荼，而不同空间或不同形式的无人平台均依赖于自主导航技术。面向复杂、动态、多约束的地面与近地面作业场景，需要构建适用于无人车、无人机等平台的陆上无人系统自主导航技术体系，以确保多类型无人平台在结构化道路、非结构化道路、非道路区域及近地面空域下可以连续、实时地自主协同工作。

北京理工大学自动化学院组合导航与智能导航团队长期从事无人系统自主导航技术研究，突破了无人系统自主导航过程涉及的全局高精度地图构建、全局任务及路径规划、传感器信息融合及精确定位、局部路径规划及运动控制等核心关键技术，提出并构建了以“度量感知”“语义认知”“行为策控”为基础的陆上无人系统行驶空间自主导航体系架构，研究成果在“跨越险阻”陆上无人系统挑战赛、“中国智能车未来挑战赛”等国内外军事、民用无人系统顶级赛事中成功应用并取得优异成绩。在此统一理论框架下，本书首先简要介绍了陆上无人系统的研究背景和发展现状，并概括性地阐述了陆上无人系统行驶空间构建的基本原理。然后，以行驶空间概念为基础，逐章详细介绍了多传感器标定、全局地图构建、图像信息语义理解、激光信息语义理解、路径规划和运动控制等关键技术。最后，本书列举了度量空间、语义空间、行为空间和跨域协同导航中若干实



践特例，以辅助读者更好地理解和应用各章所述的相关技术。

本书相关研究得到了国家自然科学基金联合基金重点支持项目 (No. U1913203)、国家自然科学基金面上项目 (No. 61973034、No. 61473042)、国家自然科学基金青年项目 (No. 61903034) 的支持，本书的出版得到了国家科学技术学术著作出版基金和“十四五”时期国家重点出版物出版专项规划项目的支持，在此表示衷心感谢！在本书编写过程中，张婷、杨帅聪、封志奇、唐笛、张满、刘室先等提供了极大帮助，感谢他们的努力；王新宇、张凯、张立天、闫光、邱凡、汪稚力、张宽、王冬生、张鲁、李浩、朱敏昭、王健行、苏圣、王俊博等提供了丰富的资料与素材，在此深表感谢。同时，本书参考了大量文献，在此向相关作者表示感谢！

付梦印
2021 年 9 月



CONTENTS | 目录

第1章 陆上无人系统概述 1

- 1.1 陆上无人系统简介 1
- 1.2 陆上无人系统现状与发展 3
- 1.3 陆上无人系统自主导航体系架构 9
- 1.4 行驶空间概述 12
- 1.5 本书的主要内容 14

第2章 度量空间：多传感器标定 17

- 2.1 双目相机成像与标定 17
 - 2.1.1 相机模型与畸变校正 17
 - 2.1.2 双目相机成像原理与标定方法 24
 - 2.1.3 双目相机标定实例 26
- 2.2 全景相机成像与标定 35
 - 2.2.1 多项式通用相机模型 35
 - 2.2.2 全景相机系统空间感知模型 37
 - 2.2.3 全景相机系统内参标定方法 39
 - 2.2.4 全景相机系统外参标定方法 40
 - 2.2.5 全景相机系统标定实例 41



2.3 激光雷达与相机的标定	47
2.3.1 激光雷达与相机联合感知模型	47
2.3.2 激光雷达与相机联合标定实例	49
2.4 本章小结	56

第3章 度量空间：全局地图构建 57

3.1 地图构建技术概述	57
3.2 三维激光点云地图构建	60
3.2.1 投影图获取	61
3.2.2 特征提取	62
3.2.3 帧间位姿配准	65
3.2.4 后端位姿优化	70
3.3 二维激光占据栅格地图构建	76
3.3.1 激光扫描信息预处理	77
3.3.2 关键点提取	79
3.3.3 扫描匹配与位姿优化	81
3.3.4 栅格地图构建及更新	86
3.4 稀疏特征点云地图构建	87
3.4.1 视觉里程计	88
3.4.2 后端位姿优化	93
3.4.3 稀疏特征点云地图构建	97
3.5 稠密彩色点云地图构建	99
3.5.1 稠密视差计算	100
3.5.2 多视图融合	105
3.6 地空协同联合定位与建图	111
3.6.1 系统框架	113
3.6.2 基于语义信息优化的激光里程计	114
3.6.3 基于学习的交叉视角配准算法	119
3.6.4 多视角位姿优化	128
3.7 本章小结	131

第4章 语义空间：图像信息语义理解 133

4.1 像素级语义分割	133
-------------------	-----



4.1.1	从全连接到全卷积	134
4.1.2	优化算法	143
4.1.3	像素级语义分割野外环境测试	147
4.2	图像目标检测、定位与跟踪	151
4.2.1	目标识别算法概述	151
4.2.2	视觉目标跟踪	163
4.3	本章小结	173

第5章 语义空间：激光信息语义理解 175

5.1	激光点云目标检测	176
5.1.1	三维目标的数学表达方法和基于分类器的分类策略	176
5.1.2	难点及主流方法	178
5.2	激光点云目标检测方法设计	181
5.2.1	极坐标栅格地图构建	181
5.2.2	可通行区域提取	183
5.2.3	基于全局运动补偿与混合高斯模型的 动态目标检测算法	185
5.3	激光点云语义模型识别方法	190
5.3.1	三维点云的地面点滤波	193
5.3.2	点云分割	196
5.3.3	训练样本生成	200
5.3.4	离线语义模型训练	201
5.3.5	点云块在线识别	212
5.3.6	激光点云语义模型识别测试	213
5.4	本章小结	215

第6章 行为空间：路径规划 217

6.1	代价地图构建	218
6.2	行为决策	219
6.3	全局路径规划	220
6.3.1	基于搜索的方法	222
6.3.2	基于采样的方法	236
6.4	局部路径规划	238



6.4.1 非结构化环境下的局部路径规划	240
6.4.2 结构化环境下的局部路径规划	242
6.5 本章小结	249

第7章 行为空间：运动控制 251

7.1 车辆模型构建	251
7.1.1 运动学模型构建	251
7.1.2 动力学模型构建	256
7.2 路径跟踪与控制	262
7.2.1 运动控制问题描述	263
7.2.2 局部参考轨迹特征分析	264
7.2.3 控制器设计	267
7.2.4 运动控制系统的稳定条件分析	274
7.3 本章小结	282

第8章 行驶空间自主导航系统实例 283

8.1 度量空间构建实例	283
8.1.1 测试数据来源	284
8.1.2 稀疏点云地图构建	285
8.2 语义空间构建实例	287
8.2.1 测试数据来源	288
8.2.2 全景语义分割实例	288
8.3 行为空间构建实例	289
8.3.1 多源信息融合与局部地图构建	290
8.3.2 自动驾驶决策与规划	291
8.4 行驶空间协同实例	295
8.4.1 空地无人平台协同实例	295
8.4.2 无人车跟驰实例	299
8.5 本章小结	302

参考文献 305

第 1 章

陆上无人系统概述

随着人工智能、自动控制、动力与能源、新材料等技术日臻成熟，无人系统呈现智能化、多域化、协同化发展态势，其将机械、电气、信息、网络等技术融为一体，将人类认识世界、改造世界、利用世界的能力提高到一个新水平，在军事、安防、民生等领域崭露头角，推动生产方式、生活方式、作战模式、社会文化和社会治理等方面发生深刻的颠覆性变化。其中，面向地面与近地面等人类活动空间的无人系统对人类的影响最为突出，是无人系统研究的重中之重，统称为陆上无人系统。

1.1 陆上无人系统简介

陆上无人系统是面向复杂、动态、多约束的地面与近地面环境，由平台、任务载荷、指挥控制系统及天-空-地信息网络等组成，控制科学与工程、计算机科学与技术、信息与通信工程、机械工程、人工智能、航空宇航科学与技术等多学科交叉融合的综合系统（图 1.1）。该系统所具备的自主导航功能可保障多类型无人平台在结构化道路、非结构化道路、非道路区域、近地面空域下连续、实时地自主协同工作。

陆上无人系统所涉及的平台一般包括无人车和无人机等（图 1.2），多类型无人平台通过天-空-地信息网络进行信息交互，并基于指挥控制系统完成大范围地面、近地面协同调度与导航，以克服单一平台感知视角有限、行为决策片面、规划响应迟滞以及卫星定位拒止等挑战，其系统工作示意图如图 1.3 所示。为应对大范围、高动态复杂环境下多目标自主导航

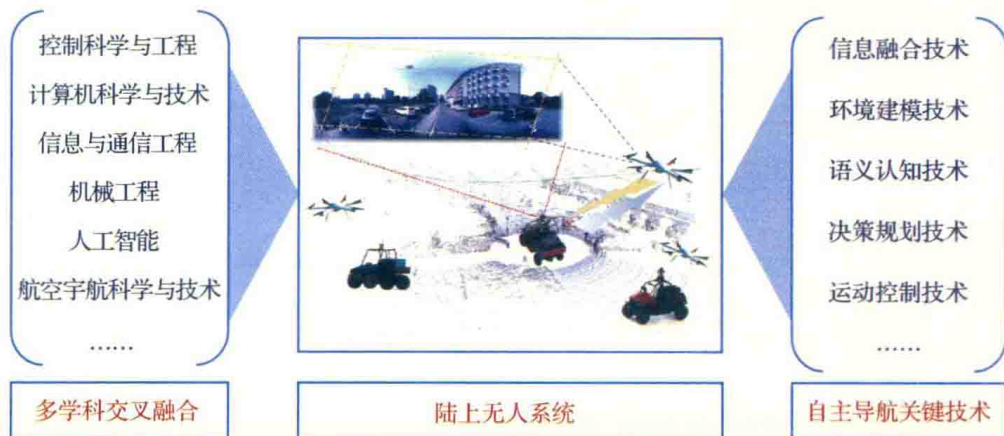


图 1.1 陆上无人系统关键技术

任务，无人车、无人机及物联感知平台等采取多视角布局方式，通过多模态异构传感器联合标定，针对大范围、不全知、高动态复杂环境，进行语义感知、动态环境理解及地图构建等任务；在全局地图构建、多无人平台精确定位和实时多语义目标状态分析的基础上，通过任务联合优化、协同规划决策，实时生成多无人平台期望目标点和全局最优路径簇；在多任务多路径智能决策的基础上，各类型无人平台结合自身运动特性进行规划状态跟踪，实现各类平台的最优控制。其中，无人车作为高续航、多功能平台，在目标区域内执行巡逻、侦察、报警等任务；无人机具备高机动、快部署、广视角等优势，能够在复杂环境中完成快速感知、协同构图与定位、目标跟踪及预测等服务；交通、安防摄像机等物联感知平台在大范围部署后，与无人车和无人机形成联动，可有效扩大整体系统的环境感知、全局规划和任务执行范围。



图 1.2 陆上无人系统主要平台示意图



图 1.3 陆上无人系统工作示意图

1.2 陆上无人系统现状与发展

陆上无人系统主要由无人车、无人机等平台组成，涉及单一无人平台自主导航以及多无人平台协同导航相关技术。本节将分别分析无人车、无人机以及地空协同系统的国内外研究现状与发展。

无人车概念是在 1939 年纽约世界博览会上被提出的，当时由通用汽车公司赞助研制了一款由电动机驱动并由无线电控制的全自动汽车^[1]。无人车技术于 20 世纪 80 年代步入高速发展阶段，以美国国防高级研究规划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 组织的无人车地面挑战赛参赛车辆为主要代表，如卡耐基梅隆大学的 Boss^[2]、斯坦福大学的 Stanley^[3] 等。连续多年获得高关注度的挑战赛以评估无人车在越野、城市道路等复杂多变环境下的自动驾驶水平为宗旨，将世界无人车研究推向了新高度，同时极大地推进了美国在无人车技术上的发展。在极端环境探测方面，以美国国家航空航天局的“Spirit”“Opportunity”以及“Curiosity”火星探测车为代表，无人车在航天领域中一直发挥着重要作用。相比美国，欧盟各国针对无人车技术也投入了巨大的研究力度，其主要研究计划包括 1987—1995 年的 PROMETHEUS 计划以及 2004—2008 年的 PReVENT 计划



等。1994年，戴姆勒奔驰和德国国防大学研制出两款全自动汽车 VaMp^[4]和 Vita-2，在巴黎三车道公路上以速度 130 km/h 顺利行驶超过 1 000 km，被认为是真正意义的无人车。1995年，德国国防大学改装的 S-Class 奔驰全自动汽车进行了一次 1 600 km 测试（从慕尼黑出发，到哥本哈根后返回），在德国高速公路上速度高达 175 km/h，自动驾驶部分达 95%。2010年，意大利帕尔玛大学研制的 VIAC 进行了 13 万千米无人驾驶实验，成功到达上海，完成了无人车历史上第一次洲际旅行。此外，日本、以色列、韩国、加拿大等国家的一些研究机构也在无人车技术方面取得了一系列研究成果。

近年来，无人车研究及开发主体逐渐由研究型实验室转向了实体企业，更大程度地加快了无人技术的发展。其中，既包括谷歌、优步、特斯拉等科技公司，也有福特、宝马等传统车企。2012年5月，谷歌在美国内华达州获得了美国首个自动驾驶汽车许可证，并于同年8月宣布其研发的自动驾驶汽车已经在计算机的控制下安全行驶 30 万英里^①。根据特斯拉在 2020 年公布的数据，其 Autopilot 自动驾驶系统行驶里程累计总量已达 30 亿英里。同时，该公司还在 2021 年的 Autopilot 安全性报告中指出：“在开启 Autopilot 功能的情况下，车辆每行驶 334 万英里会发生一起事故，而在未启用 Autopilot 的情况下，车辆每行驶 192 万英里就会发生一起事故”。根据美国高速交通安全管理局（NHTSA）制定的汽车自动化等级划分^[5]，作为目前全球最为领先的研究水平，谷歌、特斯拉等研究机构的无人车仍处于第 3 阶段，即有条件自动化水平。由此可见，虽然无人车技术已在全球范围内得到广泛研究和提升，但仍存在很大的发展空间。国外无人车部分研究成果如图 1.4 所示。

相比欧美等发达地区和国家，我国无人车相关研究起步较晚^[6]。第八个五年计划期间，由北京理工大学、国防科技大学等 5 家单位联合研制成功了 ATB 无人车，这是我国第一个实现自动驾驶的无人车。为进一步促进国内无人车技术的发展，国家自然科学基金委发布了“视听觉信息认知计算”重大研究计划。在该计划支持下，自 2009 年起，“中国智能车未来挑战赛”已举办多届，比赛规模逐年扩大且考核科目难度不断增加，从最初的基本道路通行到社会车辆交互、高速公路收费、高架桥通行等，该赛事极大地推动了我国无人车技术的研究进展。在诸多研究单位中，涌现出了

^① 1 英里 \approx 1.6 km。



(a)



(b)



(c)



(d)

图 1.4 国外无人车部分研究成果

- (a) 卡耐基梅隆大学无人车——Boss; (b) 斯坦福大学无人车——Stanley;
 (c) 美国“好奇号”火星探测车; (d) 谷歌旗下 Waymo 公司无人车

军事交通学院、西安交通大学、国防科技大学、北京理工大学等知名团队。其中，2011年7月，国防科技大学研制的红旗HQ3首次完成了从长沙到武汉（286 km）的高速全程自动驾驶试验，全程平均速度为87 km/h，创造了我国自主研发无人车在复杂交通状况下自动驾驶的新纪录。同时，为加速推进我军地面无人作战平台的装备与发展，陆军装备部已举办了多届面向野外环境的“跨越险阻”陆上无人系统挑战赛。该赛事主要包括野外战场行驶、阻断道路重规划、弹坑避让等高难度项目。其中，国防科技大学、北京理工大学、军事交通学院等单位在比赛中发挥出色，取得了优异成绩。

此外，无人车技术也引起了国内企业界的广泛关注，主要有百度、腾讯、华为等高新科技公司和小鹏汽车、吉利、蔚来等车企^[7]。同时，国内也涌现出众多与无人车相关的新型创业公司，典型代表主要有小马智行、图森未来、毫末智行、文远知行、AutoX等。2015年，百度公司在城市道路环境、环路以及高速公路等混合路口下成功实现了国内首次全自动无人驾驶。目前，百度公司旗下的无人车累计路测里程超过2 500万千米，已获得



中国自动驾驶牌照 411 张（其中载人牌照 231 张），测试车辆已超过 500 辆。2020 年以来，百度的自动驾驶出租车已实现在无人驾驶测试路段的常态化运营。2020 年 2 月，国家发展改革委、中央网信办等 11 个部门联合印发了《智能汽车创新发展战略》，着力推动智能汽车创新发展。我国在发展无人驾驶技术方面具有独特的优势：广阔覆盖的通信基础设施和网络规模、5G 通信等创新领域的领先地位以及逐步成熟完善的汽车产业，能够为无人驾驶技术的发展提供良好的技术基础和全面保障。国内无人车部分研究成果如图 1.5 所示。

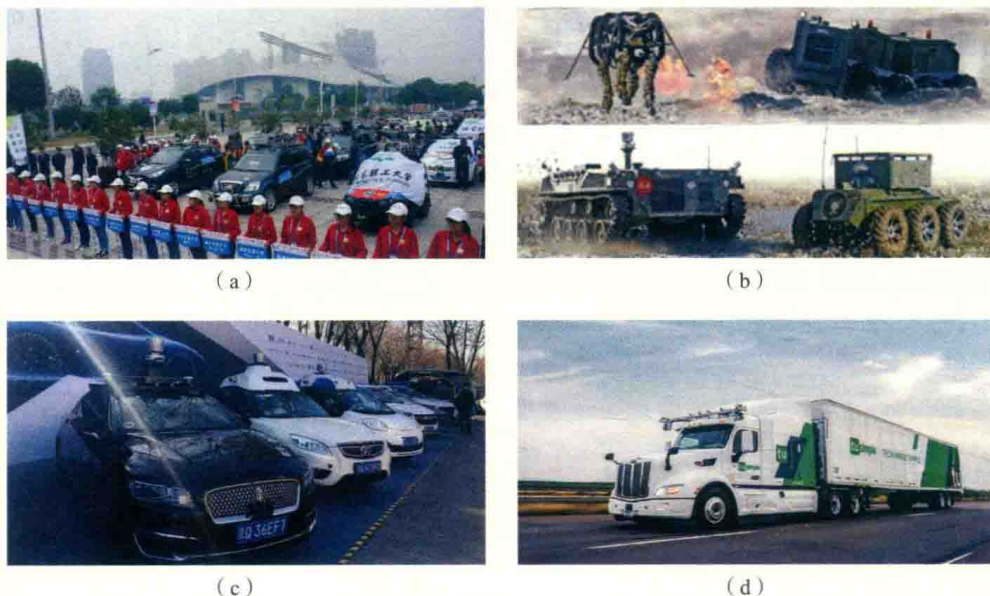


图 1.5 国内无人车部分研究成果

- (a) “中国智能车未来挑战赛”参赛车辆；(b) “跨越险阻-2016”参赛车辆；
(c) 百度 Apollo 自动驾驶平台；(d) 图森未来无人重型卡车

无人机是利用无线电遥控设备和自主程序控制装置操纵的不载人飞机。无人机可以基于不同程度的自主控制，从无线电遥控飞行的半自动控制到半自主控制，再到完全自主控制^[8]。从发展历史来看，无人机技术起源于 20 世纪初期，在第一次世界大战爆发前的 1900 年左右，已经有部分气球炸弹、靶机等被研制出来。第一次世界大战的爆发使得无人机技术获得发展机会，英国、美国等国家陆续开始了无人机技术的研发。例如，1916 年，英国军事航空学会指定 A. M. Low 教授研发遥控无人机投弹；1917 年，美国第一架无人机在纽约长滩试飞成功，但此类飞机仅作为炸弹使用，既无法实现回收，也无法完成遥控操作、自主飞行等复杂任务。



20 世纪 80 年代开始, 军用无人机技术的成熟化使其开始进入民用领域, 这也是本书将重点讨论的领域。目前各国政府、企业均大力发展无人机技术, 可见民用无人机在发展初期主要借助政府的资金投入和区域试点, 而无人机技术的应用可以在科研、监测、农业植保、环保、送货等领域带来经济效益, 提升工作质量。目前知名的无人机公司主要有法国的 Parrot 公司、美国的 3D Robotics 公司、我国的大疆创新科技有限公司 (DJI) 等。

无人机系统一般由地面站、飞机、链路三个核心部分组成。地面站是整个无人机系统的指挥控制中心, 专门用于对无人机进行地面控制和管理^[9]。飞机是无人机系统的主体, 其核心组件是飞行控制系统 (简称“飞控”), 这是飞行器稳定飞行的保证。链路主要负责飞机与地面站之间的通信, 通过多种通信方式将飞机的飞行数据实时传输到地面站, 并将地面站发出的控制信号传输给飞机, 从而使得无人机按照既定的指令飞行。常见的无人机系统主要分为固定翼无人机和旋翼无人机, 国内外经典无人机研究成果如图 1.6 所示。大型固定翼无人机主要用于军事领域。典型无人机有: 美国的 RQ-4 “全球鹰” 攻击无人机, 翼展 35.4 m、长 13.5 m、高 4.62 m、最快飞行速度为 644 km/h、最大起飞质量为 11 622 kg、最高飞行高度为 18 000 m、续航时间为 42 h; 我国的彩虹-5 无人机, 翼展超过 20 m、最大载重为 1 000 kg、续航时间为 40 h。



(a)



(b)



(c)



(d)

图 1.6 国内外经典无人机研究成果

(a) “全球鹰” 无人机; (b) 彩虹无人机; (c) Draganflyer 无人机; (d) 大疆无人机



旋翼无人机起源于 20 世纪初，在 21 世纪初得到迅速发展。2004 年，美国 Spectrolutions 公司推出 Draganflyer 系列多旋翼无人机，早期用于商用，目前 Draganflyer Commander 的续航时间为 45 min、最大载重为 1 000 kg；国内旋翼无人机以大疆为代表，最新的经纬 M300 RTK 四旋翼无人机的最长飞行时间为 55 min、最大载重为 2.7 kg、最大可承受风速为 15 m/s、最高飞行高度为 7 000 m。

无论是固定翼无人机还是旋翼无人机，均能克服地面地形约束、遮挡等困难，协助无人车实现远距离、大范围快速侦查、预警、制图、打击等任务。因此，结合无人车与无人机形成一套地空协同系统是陆上无人系统自主导航性能提升的有效途径。

地空协同系统是由无人车和无人机组成的跨域无人系统，既可单机自主执行任务，又可多机跨域交互协同。在第一次世界大战中，飞行器广泛应用于侦察、通信、炮校等辅助性任务，为地面部队提供支援和保障，成为地空跨域协同的较早范例。进入 21 世纪，随着自主导航、人工智能等技术的迅猛发展，地空协同系统真正进入无人时代。国内外经典的地空协同无人系统如图 1.7 所示。

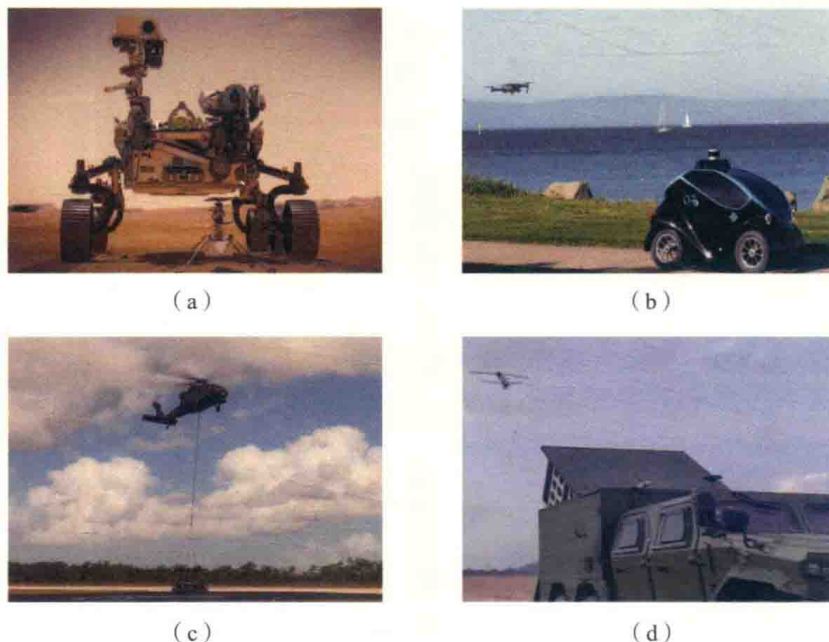


图 1.7 国内外经典地空协同无人系统

- (a) 美国 NASA “毅力号”火星车与“机智号”无人机；(b) Otsaw 地空协同系统；
(c) 卡内基梅隆大学地空协同系统；(d) 中国电科地空协同系统