

水上无人系统研究进展及其面临的挑战

张卫东¹ 刘笑成¹ 韩鹏¹

摘要 水上无人系统主要包括无人艇和无人机, 是未来执行水上救援、搜救和监测等任务的主要手段. 本文综述了近年来国内外在水上无人系统方面的最新研究进展, 包括企业界和学术界在无人艇和无人机方面的探索和实践, 介绍了水上无人系统研究在环境感知、航迹规划、避障和同质/异质自主体编队协同和海上弱小目标识别方面的研究成果, 分析讨论了不同方向的研究特点和面临的挑战.

关键词 无人艇, 无人机, 环境感知, 航迹规划, 编队协同

引用格式 张卫东, 刘笑成, 韩鹏. 水上无人系统研究进展及其面临的挑战. 自动化学报, 2020, 46(5): 847–857

DOI 10.16383/j.aas.c190363

Progress and Challenges of Overwater Unmanned Systems

ZHANG Wei-Dong¹ LIU Xiao-Cheng¹ HAN Peng¹

Abstract The overwater unmanned system includes the unmanned surface vehicle (USV) and the unmanned aerial vehicle (UAV), which are the main means to carry out the overwater tasks such as search, rescue, and monitoring in the future. In this paper, the latest research progress about overwater unmanned systems is reviewed, including the exploration and practice of industry and academia about USV and UAV. The research achievements in the field of environmental perception, trajectory planning, obstacle avoidance, the coordination of homogeneous/heterogeneous autonomous agents, and weak small target recognition are introduced and analyzed. The problems and challenges in different directions are discussed.

Key words USV, UAV, environmental perception, track planning, formation coordination

Citation Zhang Wei-Dong, Liu Xiao-Cheng, Han Peng. Progress and challenges of overwater unmanned systems. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(5): 847–857

美国国家科学委员会曾预言: 21 世纪的核心武器是无人作战系统, 目前这一预言正逐渐成为现实. 近年来, 无人系统技术作为改变未来战争规则和社会生活方式的颠覆性技术, 在世界范围内得到快速发展, 不仅成为当前国际学术界和产业界的研究热点, 而且已经上升为我国国家战略的核心内容. 国务院在《中国制造 2025》规划中要求推进无人系统产业化快速发展^[1]. 2017 年发布的国家“新一代人工智能”发展规划中, 无人系统是四个主要的研究方向之一^[2].

我国拥有超过 1.8 万公里的海岸线, 以及众多的河流湖泊. 目前水上救援、搜救和监测等任务主要是由有人水面船艇完成, 面临着力量有限、费用高、效率低、保障难和有人人员伤亡风险等难题, 对费

用低、效率高和无人员伤亡风险的水上无人系统有非常迫切的需求.

水上无人系统主要包括无人艇 (USV) 和无人机 (UAV). 本文综述了近年来国内外在水上无人系统方面的最新研究进展, 分析讨论了不同方向的研究特点和面临的挑战.

1 无人艇研究现状

无人艇具有体积小、速度快、成本低和无人员伤亡风险等优点, 可以在危险区域或者不适宜派遣有人舰船的区域执行任务, 拓展了船舶的水上作业范围, 具有很高的费效比, 因此成为执行搜救、侦察、监测、考古、火力打击、舰艇护航、反水雷和反潜等任务的重要平台. 无人艇的特点是航行在空气和水两种介质的分界面, 控制难度大, 其发展相对其他几类无人系统滞后.

目前, 国内外有很多企业、研究机构和大学开展了无人艇的开发工作.

美国拥有全球最强海上力量, 在无人艇领域的研究处于国际领先地位. 2007 年, 美国海军制定了《海军 USV 总体规划》. 2017 年美国国防费要求案

收稿日期 2019-05-13 录用日期 2020-03-25
Manuscript received May 13, 2019; accepted March 25, 2020
国家重点研发计划 (2017YFE0128500) 资助
Supported by National Key Research and Development Program of China (2017YFE0128500)
本文责任编辑 邓方
Recommended by Associate Editor DENG Fang
1. 上海交通大学自动化系 上海 200240
1. Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240

决定投入 714 亿美元集中开发无人艇,“计划用于监视中国在南海建设的岛礁”。2018 年,美军方发布了最新的《无人系统综合路线图》,对各军种无人系统的作战需求、关键技术和无人系统之间互联互通性进行了总体规划。

实际上,美国海军早在 20 世纪 90 年代后期就研发了具有自我防御功能的“罗伯斯基”无人艇^[3]。美国海军水下作战中心联合 3 家公司于 2002 年开发的“斯巴达侦察兵”是美国代表性的无人艇,艇长 7 米(海港级)/11 米(舰队级),航速 35 节,续航时间 6 小时。2016 年下水试航的“海上猎人”可能是世界上最大的无人艇,艇长 40 米,航速 27 节,续航长达 4.27 万公里。2014 年,美国海军围绕无人系统集群开展了试验,采用了 13 艘无人艇,其中 5 艘采用自主控制,8 艘采用远程遥控。试验中,美海军利用这些无人艇为军舰护航,无人艇集群针对模拟的敌方舰艇快速采取行动,集群式包围了敌方舰艇。2016 年的试验类似,只是无人艇减少为 4 艘,背景改为港口防御。

以色列在无人艇领域有独特的优势^[3],以其本世纪初研发的“保护者”无人艇最为典型。该艇长 11 米,航速 40 节,已部署以色列海军,并出口到新加坡等国家。以色列航空航天工业公司 2014 年初推出的“卡塔那”水面无人艇也是一种代表性型号,艇长 12 米,航速 60 节,续航力 350 海里。此外,以色列国防部研发的“银色马林鱼”,Elbit 公司推出的“黄貂鱼”等无人艇也均具有很高技术水平。

法国(“ROAZ”号)、德国(“STIPS I”等)、意大利(“Charlie”)、英国(“卫兵”)和日本(“UMV-HO”系列)等传统海洋强国也都在无人艇研究与应用方面取得了许多进展。2016 年英国海军在苏格兰西海岸组织了“无人战士”大型无人化装备部署演习,动用了 50 艘无人驾驶快艇,负责海域探索,监控情报收集,以及鱼类侦测等任务。欧洲国防基金 OCEAN2020 计划展示了不同类型的无人平台(如固定翼、旋转翼无人机,无人艇以及无人潜器)通过卫星通信与海军部队的指挥和控制中心对接,实现了海上监视和拦截作战。

在国内,无人艇技术近几年已取得了快速的发展。珠海云洲智能科技有限公司(以下简称珠海云洲)和一些快艇生产企业的技术较为领先。珠海云洲研发了十几种型号的无人艇,典型的如用于海洋测量的 M80,船长 5.65 米,水面探障距离 75 米,航速 12 节,续航力 330 海里。国内快艇龙头企业深圳海斯比船艇科技股份有限公司在已有的数十种快艇基础上开发了 6~13 米系列型号监测、侦察和作战无人艇,典型的如与哈尔滨工程大学联合开发的

“天行 1 号”,当时为国内航速最高的无人艇,船长 12.2 米,航速超过 50 节,续航 1 000 公里。四方智能(武汉)控制技术有限公司开发的“Seafly01”无人艇,船长 10.25 米,航速 45 节,续航 400 公里,其岸基监控平台较为先进。上海大学研制的“精海”系列无人艇曾用于浅海地形测量,典型型号航速 18 节,实现了 3 级海况的航迹跟踪误差小于 3 米,获得了国家技术发明二等奖。大连海事大学开发的“蓝鲸号”已经在海上开展过多次避障试验。华中科技大学东莞研究院开发了多个型号的无人艇。中科院沈阳自动化研究所在无人艇环境感知方面开展了大量扎实的海上测试工作,具有很强的研究实力。上海交通大学开发了动力定位无人艇,参加了全球无人艇挑战赛。动力定位无人艇在定位(如水上定点采样)、精确循迹(如测绘)和靠泊时具有明显的优势。除以上单位之外,武汉理工大学、江苏科技大学、天津大学和福州大学等高校,安徽科微智能科技有限公司、江阴市北海救生设备有限公司、中国航天科技集团有限公司、中国船舶重工集团公司、武汉南华工业设备工程股份有限公司、深圳三方无人技术有限公司、广州中海达卫星导航技术股份有限公司、北京海兰信数据科技股份有限公司和海南今海天无人船科技有限公司天等许多企业也都在对无人艇技术开展研究,开发了试验艇。不同单位结合不同背景进行了一些应用尝试,如上海大学和珠海云洲分别派出了无人艇参与南极科考,珠海云洲、华中科技大学、大连海事大学和上海交通大学都公布了多无人艇编队的演示视频,包括珠海云洲 81 艘无人艇的编队航行,华中科大东莞研究院的多艇编队航行、大连海事大学的多艇编队航行,以及上海交通大学以远海救援和多船海上作业为背景的多船协同。

在学术研究领域,国内外的大学和研究机构在无人艇关键技术方面开展了前沿性研究,取得了许多理论成果。

环境感知对无人艇正常航行至为关键。无人艇通常配备的环境感知设备包括针对中远距离目标的航海雷达、针对中近距离的热像仪、针对近距离的激光雷达和视觉传感器、针对水下探测的前视和侧扫声纳、测量姿态的惯导设备等,其他还有 GPS、数字罗盘和风速计等。在环境感知方法方面,文献[4]针对激光雷达点云数据,采用中值滤波和点云数据聚类方法实现了海面障碍检测,文献[5]利用深度学习的高维特征泛化学习能力,将卷积神经网络用于杂波背景下海上微动目标的检测和分类,文献[6]针对低照度海上目标识别过程中热像仪图像存在干扰的情形,利用直方图均衡化的方法增强了目标与

背景之间的对比度, 文献 [7] 针对无人艇在水面环境中拍摄的图像经常受到水汽或海雾的影响而出现模糊的问题, 提出了水面图像去雾算法的硬件加速方案, 文献 [8] 为了提高多目标舰船视觉跟踪算法的实时性和鲁棒性, 提出了改进的多目标舰船自动跟踪算法, 文献 [9] 从多个方面探讨了无人艇光视觉感知的研究进展, 包括基于水面无人艇的水面图像预处理, 水界线的检测, 利用光视觉的目标检测, 以及水面目标跟踪方法. 《中国海洋大学学报》则在 2017 年第 2 期专门组织了海上船只目标监视检测技术专辑.

无人艇的航迹规划粗略地可分为全局规划和局部规划两个部分. 全局规划通常是静态离线的, 针对电子海图上已标注的障碍物信息和气象水文条件等航路约束规划出时间或者能耗最优路径. 局部规划一般是动态在线进行的, 根据实时感知的未在电子海图上标注的动态和静态障碍物信息, 修正航迹, 实现对障碍物的避障. 但这种划分并不是绝对的.

在航迹规划方面, 采用的主要方法包括基于优化算法的方法、基于规则的方法和基于强化学习的方法. 文献 [10] 提出了无人艇的协同任务规划和自主决策技术, 开发了一种基于快速扩展随机树算法的路径规划方法. 文献 [11] 研究了在网格地图中基于有限角速率的航迹规划算法. 文献 [12] 提出了基于电子海图栅格化建立环境模型的遗传算法, 可实现全局路径快速搜索. 文献 [13] 研究了动态环境下的避障问题, 给出了多艘无人艇之间的避障解决方法. 文献 [14] 针对传统方法控制律过于复杂的问题, 基于深度 Q 网络架构提出了简化深度强化学习避障方法. 原则上, “在公海和连接公海可供海船航行的一切水域中的一切船舶” 都应遵守《国际海上避障规则》. 现有的避障研究很多并没考虑这一约束, 主要难点在于, 优化算法不容易与避障规则结合. 文献 [15] 围绕国际海事避障规则的约束研究了避障算法. 文献 [16] 针对水面无人艇的避障问题介绍了国内外主要研究成果, 总结了水面无人艇避障方法目前存在的一些问题.

早期的无人艇研究侧重于单体系统的研究. 单体系统执行任务的能力有限. 随着技术的发展, 由多个个体组成的系统得到了越来越多的重视, 称为多自主系统. 多自主系统通过多艘无人艇形成编队, 在复杂的环境里相互协同完成单体系统难以完成的复杂任务. 文献 [17] 围绕自主研发的四艘低成本无人艇, 对采样平台, 自主性软件以及海空通信基础设施等进行了研究. 文献 [18] 针对存在时滞现象的无人艇编队队形控制及变换问题, 采用自抗扰控制技术对航向和航速设计了编队控制器, 通过

在传统自抗扰扩张状态观测器的信号输入端增加延迟模块, 解决了由输入延迟所引起的控制器震荡问题. 文献 [19] 根据任务分配将控制框架分为三层: 群体策略设计、运动规划和控制输入设计, 证明了所提出的闭环控制器是半渐近稳定的. 文献 [20] 对多艇协同控制展开了理论研究, 主要包括基于零空间行为控制的协同、无人艇协同路径跟踪的无源性设计和应用拉格朗日乘子法和约束函数的主从式协同控制等. 文献 [21] 以欧盟项目“不确定环境下协同无人异构载体的协同与控制”为背景, 对自主水面航行器协同运动控制的相关问题开展了试验研究. 文献 [22] 对无人艇集群进行了试验研究. 首先机器人离开“基地”进入指定区域, 然后机器人通过发现彼此来聚集在一起, 围绕指定区域完成监测水温的任务, 任务完成后集群回到“基地”. 文献 [23] 主要研究多个自主无人艇在虚拟领导者引导下沿参数化路径的分布式机动问题, 采用了基于优化的指令调节器生成最优制导信号, 证明了分布式机动策略误差的收敛性. 文献 [24] 讨论了欠驱动无人艇的编队控制问题, 利用相邻个体信息提出了一种基于图论的协作控制策略. 文献 [25] 总结了无人船的控制结构, 梳理了多无人船协同控制领域的最新研究进展, 特别是介绍了协同拖曳问题.

尽管国内外在无人艇研究方面取得了许多成果, 但是该领域的研究还处在初始阶段, 远未成熟. 以美国的 RobotX 竞赛为例. 这可能是国际水上机器人领域最有影响的竞赛, 规定了 6 类竞赛科目, 均由实际需求提炼简化形成. 从参赛队伍的表现可以看出, 即便是针对并不非常复杂的科目, 现有技术水平还有待进一步的发展. 目前, 该领域还存在以下几个方面迫切需要解决的关键问题:

1) 航迹跟踪. 对欠驱动无人艇而言, 由于无人艇动力学特性本质上表现为积分形式, 因此采用非常简单的工程控制方法就能实现基本的航迹跟踪功能. 但是, 如果对循迹精度要求较高 (如测绘), 或者对机动性要求较高 (如对抗) 时, 简单的工程方法就很难满足要求, 需要有针对性地考虑无人艇动力学特性存在的欠驱动性、非线性和大惯性等问题. 目前该方面的研究还不够充分, 主要的困难在于理论方法复杂度远高于 PID, 难以应用, 或者在应用时的表现与仿真研究的结果偏差过大.

2) 减摇. 与无人机、无人潜器和无人车有所不同, 无人艇航行在水空两种介质的交界面, 同时受到风浪流等不确定干扰的影响, 不可避免地会产生摇荡. 然而, 艇上工作载荷 (如雷达、摄像头、声纳、测深仪、机枪和导弹发射架等) 和附加装置 (如无人机降落平台) 正常工作时均要求艇身尽量保持平稳.

受到体积和复杂度的限制,大型船舶经常采用的舵龙骨、减摇水舱、减摇鳍、减摇陀螺和舵减摇等减摇技术中,主要是减摇陀螺技术比较适用于无人艇,关于如何进一步降低艇身摇荡的研究文献还非常少.有关单位曾对国内无人艇领先单位做过调研比较,认为目前在减摇和避障方面的水平距离期望还有很大差距.

3) 避障. 避障是无人艇单艇非常基本的、不可或缺的功能,目前还没有得到很好解决. 现有的方法大都只适用于低速航行的无人艇. 主要的困难来自几个方面. 首先,对于中高速航行的无人艇,双艇相向航行的相对速度可能达到 80 节以上,相当于 40 多米/秒,给信息采集、滤波和决策的实时响应带来很大困难;其次,当环境存在混合的未知静态障碍和非合作未知动态障碍时,即便是不考虑国际海上避障规则和实际系统对避障算法复杂性的要求,现有的成果还远不够成熟可靠,有待于开展进一步深入的研究. 最后,现有传感器,特别是水下传感器的性能和可靠性距期望还相差很远.

4) 编队. 目前的无人艇编队的理论研究侧重于分析,以同质多自主体研究为多,较少考虑编队系统的动态响应性能设计问题,并且结果复杂,缺乏能够指导实践的低复杂度设计理论. 从表面上看,无人艇编队的思想很直观,但实际上要真正实现复杂条件下的无人艇编队面临着环境感知、通信与动态组网和分布式协同控制等多方面的挑战. 目前在技术上的实践大都是在通信得到保证的条件下采用工程方法实现的简单编队,譬如按程序指定或者跟踪领导者形成特定队形,还远不能满足实际需求.

5) 博弈. 现有的无人艇集群研究侧重于编队. 编队主要考虑的是合作对象. 更复杂的情形是存在两个无人艇集群之间的博弈,需要面对非合作对象. 该问题的困难之处在于,问题的解不但涉及到多个个体之间的协同和博弈,而且涉及到多个个体之间的相对速度和机动性约束,并且受到动态环境感知能力的限制. 现有的博弈论方法难以直接应用到此类问题. 即便是针对简化后的问题,现有的理论工具也很难给出能够实现的有限复杂度的解.

6) 组网通信. 无人艇之间一般通过无线的方式交换信息. 由于无人艇天线较低,艇艇之间和艇岸之间的通信距离会受到海浪的严重干扰. 当无人艇集群数量较多距离较远时,组网也面临很大的挑战.

2 无人研究现状

无人机与有人机相比具有相当大的优势,比如,成本较低、无人员伤亡风险、功能多样和使用方便等,特别适合在成本限制较严格的场景或在危险的

空域中使用,典型地如地形测绘、灾害救援、战场侦察、农业喷药、影视航拍以及消费娱乐等.

早期的无人机研究多是出于军事目的. 在 20 世纪 60 年代,美国就在越战中使用了无人机执行军事侦察任务. 在第四次中东战争中,以色列使用无人机成功地摧毁了埃及沿运河部署的地空导弹基地.

美国高度重视军用无人机技术. 美国陆军 2010 年发布了《2010—2035 美国陆军无人机系统路线图》^[26]. 2016 年,美国空军发布了《小型无人机系统路线图 2016—2036》,从战略层面肯定了小型无人机系统的前景和价值. 2018 年,美国国防部发布了《无人系统综合路线图 2017—2042》,强调了自主性对于加速无人系统领域进步的重要作用. 美国不同部门近几年设立了众多研究项目,如美国国防高级研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 的“小精灵”项目,美国海军研究局 (ONR) 的 LOCUST 项目,以及美国国防部战略能力办公室 (SCO) 的“山鹑”项目等.

美国也将越来越多的无人机运用到民用领域. 美国国家航空航天局 (NASA) 成立了一个无人机应用中心,专门开展无人机的民用研究,如天气预报和监测冰川消融与热带风暴强度演化过程等. 2007 年森林大火时, NASA 使用了“伊哈纳”无人机评估灾害损失^[26]. 美国科学基金会 2016 年发布的《美国机器人发展规划: 从互联网到机器人》对无人机有专门的讨论. 文献 [27] 根据自主技术在农业、军事和民用领域的需求,介绍了无人机的多种应用.

以色列是无人机技术最为先进的国家之一,已成立了民用无人机审定委员会,开展了多种民用任务的试验飞行评估,并于 2012 年举办了国际无人机系统展会^[26].

俄罗斯空中卫士公司研发了多用途无人机“A-03Nart”,可用于自然灾害救援、人工降雨、道路监控和环境监测等^[26].

欧洲 2006 年开始制定并实施《民用无人机发展路线图》,开发了多种型号的无人机. 2018 年,瑞士宣布要部署欧洲首个国家无人机空管系统.

日本在民用无人机领域开展了许多卓有成效的工作,譬如在农业领域拥有数千架注册无人直升机,操作人员一两万人,广泛采用了无人机进行喷药等农业作业.

我国虽然从 20 世纪六七十年代就开始研制无人机,但进展缓慢. 直到最近十几年无人机技术才得到快速发展,无论是军用还是民用无人机,技术水平都已进入世界先进行列. 近十年,国内与无人机相关的专利申请有近万件. 目前,我国注册的无

人机公司已有数百家, 研制的无人机型多达数百种. 以大疆创新科技有限公司 (以下简称大疆) 无人机为代表的多旋翼无人机在民用领域占领了国际上的大部分市场. 国内各军工集团则开发了种类齐全的军用无人机. 典型地, 如彩虹和翼龙无人机, 已形成批量军贸出口. 同时系列产品在民用领域也被广泛用于测绘、森林防火、海洋监测、航空物探和管道巡线等^[28-29].

在民用领域, 无人机很早就被用于航拍^[28-29]. 大疆在 2013 年初推出的“Phantom”系列飞行器和昊翔电能运动科技有限公司 (YUNEEC) 在 2015 年推出的“Q500”等都是早期航拍领域的代表性产品. 目前的航拍无人机已非常成熟, 典型的如大疆的“Phantom”系列和“Mavic”系列.

无人机也被用于植保, 可实现喷洒农药和种子等. 广州极飞科技有限公司推出的植保无人机已经成功地应用到了新疆地区. 大疆在 2015 年也推出了农业喷洒无人机. 该方向的发展非常快, 国内目前已有生产植保无人机的企业上百家^[28-29].

无人机作为一种新型运输工具, 在边远地区物流运送方面具备很好的应用前景. 网络零售巨头亚马逊公司在 2013 年首次宣布无人机送货的构想, 2015 年公布了一款无人机送货服务的原型机. 国内快递巨头顺丰速运有限公司以及电商北京京东世纪贸易有限公司也进行了无人机送货的测试. 目前该领域的最大障碍不是技术问题, 而是投运成本、安全性, 以及民用无人机监管问题^[28-29].

早期的无人机研发侧重于单机, 近年来有许多机构开始探索无人机群的协同控制. 2015 年, 美国海军实现了 50 架固定翼无人机的集群飞行; 2016 年, 中国进行了 67 架的固定翼无人机集群飞行试验. 2017 年, 美军使用三架战斗机在空中释放了 103 架“山鹑”微型侦察无人机; 2018 年, 中国完成了 200 架固定翼无人机集群陆地起飞试验. 英特尔公司在 2016 年展示了 500 架旋翼无人机的灯光秀; 2018 年中国进行了 1 374 架旋翼无人机的表演. 但是目前无人机群的编队只是简单的程序控制, 还未实现自主协同. 美国正在积极推进这方面的研究. 2018 年, DARPA 启动了“进攻性蜂群战术”项目第二阶段工作, 计划实现 50 个异构无人系统在复杂城市环境中, 在 15~30 分钟内锁定目标.

在学术研究领域, 无人机的研究文献非常多, 主要集中在航迹规划、避撞和编队协同等方面.

无人机的航迹规划是三维的, 增大了航迹规划的复杂性. 文献 [30] 将航迹定义为路径和运动函数的组合, 通过计算气动力矩和升力满足旋翼飞行器

的动力约束, 根据任务要求和约束条件利用非线性约束优化方法得到了最优航迹. 文献 [31] 将进化算法应用于航迹规划问题, 规划出的航迹具备较小代价值. 文献 [32] 将 A* 算法的搜索空间扩展到三维空间, 实现了无人机在复杂环境下的航迹规划. 文献 [33] 将蝗虫算法引入无人机三维航迹规划, 利用地形和约束条件等缩短搜索空间, 给出了三维航迹规划过程, 在预定场景下进行了算法性能测试. 文献 [34] 提出了即时修复式稀疏 A* 算法, 能够快速生成可行航迹. 文献 [35] 将无人机的各种路径规划技术分为代表性技术、协同技术和非协同技术三大类, 针对每一类路径规划方案进行了分析, 探讨了当前的开放性问题.

在避撞方面, 文献 [36] 提出了一种有干扰和障碍环境下的鲁棒非线性控制方法, 在四旋翼无人机上实现了该算法, 并与其他非线性控制方法进行了比较. 文献 [37] 提出了一种利用椭球形状作为障碍物限制区来寻找避让路径的方法. 文献 [38] 建立了基于信息融合的防撞系统, 系统采用了一个超声波传感器和一个激光雷达来进行环境感知. 文献 [39] 针对无人机避障问题提出了一种基于深度学习的四旋翼无人机单目视觉避障方法, 能够识别不同姿态的人, 实现低速飞行下的对人避障. 文献 [40] 提出一种基于事件驱动的无人机强化学习避障算法, 通过在强化学习中加入事件驱动触发机制, 可以在减少无人机决策的同时找到最优路径.

在编队协同方面, 文献 [41] 分析了椋鸟的飞行原理, 利用相邻的很少几个个体实现了三维环境中原始队形向期望队形的动态调整问题. 文献 [42] 设计了一种既适用于领导者又适用于跟随者的编队控制算法, 该算法将领导者隐式地集成到群体中, 并受群体导航反馈的影响, 能够在不发生碰撞的情况下收敛到所需的编队. 文献 [43] 针对异构无人机的编队区域搜索和任务分配问题, 提出了一种基于响应阈值模型的概率决策机制的分布式方法. 文献 [44] 基于机载视觉感知设备和领导者-跟随者协同方法实现了非 GPS 定位密集编队飞行. 文献 [45] 通过将跟随者信息反馈给领导者, 解决了跟随者出现问题时会引起编队失败的问题. 文献 [46] 通过加入 PI 控制, 使得无人机机体振动和闭环系统稳态误差减小, 实现了无人机编队在高速近距情况下的编队. 文献 [47] 从人机共融、变体设计、人工智能和集群对抗方面探讨了无人机自主集群的发展趋势. 文献 [48] 根据所使用的算法和设计的框架, 对多无人机避障方法进行了分类, 讨论了它们的主要特点, 总结了该研究方向的挑战.

在过去的十几年里, 得益于爆发性的市场需求, 无人机产业发展十分迅猛, 在很多方向上出现了工业界实践领先于学术研究的状况, 出现了大量的成熟的产品. 但是目前该领域仍存在以下挑战:

1) 续航. 目前的主流无人机包括多旋翼和固定翼两种, 其中多旋翼无人机应用最为广泛. 多数多旋翼无人机和中小型固定翼无人机主要使用锂电池作为动力, 续航能力非常有限, 大大限制了无人机执行任务的能力.

2) 避障. 在无人机诸多功能中, 避障功能是实现智能化的关键, 特别是在农业、安防、运输和媒体等领域, 避障功能显得尤为重要. 目前技术上比较容易实现的四种避障方式: 红外、超声波、激光和视觉, 都还存在很大局限. 以应用最广泛的视觉避障来讲, 从原理上难以克服复杂环境条件的影响 (譬如存在烟雾); 在感知距离上只有二三十米距离, 难以满足高速飞行时的避障要求.

3) 编队协同. 编队协同是当前无人机领域的热点方向, 包括中美在内的世界上拥有先进无人机技术的国家都在努力攻克相关的技术难题. 现有的无人机灯光秀没有个体之间的协同, 还不是真正意义上的编队. 技术上, 如果每个个体都能实时获得领导者或者全局信息, 相互协同形成编队相对容易实现. 但是对于高速飞行或者大范围飞行的无人机, 通信可能有延迟或者中断, 同时通信拓扑可能动态变化, 导致单个个体不能及时获取全局信息. 在此背景下形成编队协同就非常具有挑战性.

4) 组网通信. 无人机之间只能通过无线的方式交换信息. 对于高速飞行或者大范围飞行的无人机, 或者无人机集群数量较多时, 形成快速可靠的通信和组网是个尚未得到很好解决的问题.

5) 任务需求. 尽管目前有大量的论文开展编队协同研究, 也出现许多尚无清晰定义的新学术名词, 如“涌现”和“激发”等, 但是更多关注的是技术本身, 对任务需求的研究较少. 实际上, 饱和攻击这类无对抗性的任务并不需要复杂的自主编队技术, 无人机完全可以遥控或者半自主飞行. 美军 2015 年的宙斯盾攻击试验表明, 仅需数架无人就可达到明显的突防效果. 那么, 究竟在何种任务中会用到像生物一样的复杂编队, 并且需要个体之间相互激发智能, 对该问题还有待进一步的研究.

3 空海协同研究现状

无人系统编队是近年无人系统领域的重要发展方向, 其理论基础是多主体理论. 在多主体理论中, 研究对象有同质的 (所有自主体的动力学模

型相同或相近) 和异质的 (自主体间有不同的动力学模型) 两大类. 相比于同质多自主体系统, 异质多自主体系统可以利用不同个体的优势形成更强的多维空间信息感知能力, 完成更复杂的工作. 以空海/空地协同为例, 无人机的局限在于续航时间短, 但是具有搜索范围大和通信距离远的优点; 无人艇/无人车续航时间长, 但是搜索范围小和通信距离近. 如果能结合二者的优点, 构成异质多自主体协同系统, 就可大大提升系统完成复杂任务的能力. 譬如在海事救援中, 无人艇的搜救范围很有限, 通过无人机就能大大扩展搜救范围; 在执行反恐或救灾任务中, 地面车辆的观察范围有限, 通过无人机可以获得更好的视野. 空海协同技术的应用前景非常广泛. 概括地说, 凡是在水上应用无人机的地方就可能用到该技术.

目前围绕无人系统的多自主体的研究更多地集中在同质或者近似同质的系统, 对异质多自主体系统的研究还相对较少.

由于空海协同采用的技术与空地协同类似, 只是空海协同要考虑平台的摇摆和移动, 所以我们将空海/空地协同的研究进展一同进行介绍.

空海协同的目的与无人机编队或者无人艇编队有显著的不同. 无人机编队或者无人艇编队的目的是形成期望的队形. 虽然队形也可能变换, 但本质上保持特定队形是重点. 空海协同的关键是无人机着艇. 无人机在着艇过程中更强调的是协同, 而不是保持特定的队形. 无人机-无人艇的相对位置在无人机着艇过程中时刻变化, 不断协同.

根据公开的视频, 空地协同方面, 2016 年德国航空航天中心的研究团队完成了固定翼无人机在有人车顶部的降落试验; 加拿大蒙特利尔理工的研究团队完成了多旋翼无人机在有人车顶部的降落试验. 2017-2018 年, 国内的神州飞行器、西安交通大学、西北工业大学、浙江工业大学、大连海事大学、北京理工大学和上海交通大学等分别完成了多旋翼无人机在有人车顶部或地面的降落试验. 除此之外, 可能还有一些未公布试验视频的团队在开展相关研究.

空海协同方面的公开视频很少. 2013 年, 美国固定翼无人机首次在航母上成功降落. 美国海军 2017 年公布了多旋翼无人机在无人艇上降落的视频. 无人艇采用的是平稳性很好的 RobotX 竞赛艇, 降落平台覆盖艇身, 并配有减摇器. 2018 年上海交通大学完成了基于视觉导航的多旋翼无人机在无人艇上的高精度降落试验, 降落平台半径仅比无人机大 10 cm. 2019 年华中科技大学东莞研究院也完成

了基于视觉导航的无人机着艇试验. 2019 年上海交通大学完成了基于视觉导航的无人机夜间着艇试验.

空海协同系统在军事上有很大应用潜力. 美军对这一颠覆性方向高度重视, 2017 年美国海军水面舰艇协会年会公布了空海协同系统概念图, 由一艘无人艇携带多架多旋翼无人机在海上执行作战任务. 2018 年, 美国海军水面舰艇协会年会展出了一款 60 米长无人舰艇的模型, 艇上配有 MQ-8 “火力侦察兵” 无人机. 同时, 美国海军正在快速开发一种 “幽灵舰队”, 使水面、空中和水下的多个无人系统编队同步作战. 日前, 美军已启动无人航母计划, 委托佛罗里达大西洋大学为其研制一种无人水面 “母舰”, 作为水下无人航行器和遥控无人机的平台, 从而获得多载体、多域能力. 以色列成为全世界第一个列装无人导弹艇 “海上骑士” 的国家, 以色列军方正在计划建立以 “海上骑士” 为中心, 无人机和海军部队协从的 “海上骑士分队”, 实现无人艇和无人机的协同作战. 2017 年 5 月, 法国舰艇建造局组织了一场有无人机、无人艇、无人潜航器三种无人装备参与的协同作战演习.

目前的多旋翼无人机着陆更倾向于采用视觉导航, 主要原因在于 GPS 的成本较高, RTK 信号刷新速率较慢, 在海上可能无法设立参考基站, 在天气变化较大或者云层较厚地区信号的稳定性也不是非常理想, 单独使用难以保证无人机以较高精度可靠地跟踪快速移动的降落平台.

无人机在移动平台上的降落能力非常重要, 这并不是为了单纯的技术演示, 而是有实际的需求. 在空海协同中, 降落平台在复杂海洋环境的影响下, 始终处于动态的移动中. 无人机对移动降落平台的跟踪能力关系到能否可靠地降落. 降落平台的极限移动速度与多个因素相关, 包括飞行器类型、降落平台大小与安装方式、移动轨迹、移动速度变化率和采用的定位手段等.

在学术研究领域已经发表了许多关于多自主体编队的理论研究论文, 但是具体到空地协同或者空海协同, 在万方上只能查到很少的论文. 在至为关键的视觉导航方面, 文献 [49] 提出了一种视觉自主着陆算法, 通过卡尔曼滤波器保证了估计的鲁棒性. 文献 [50] 提出了一种基于图像分割的专家系统, 通过无人机和平台的识别和相对定位来辅助安全着陆. 文献 [51] 对视觉信息进行预测和插补, 采用 AR 模型预测方法对飞行器与降落平台相对位置进行估计, 再采用遗忘因子递归最小二乘法解决系统延迟问题, 取得了较好的效果. 文献 [52] 为了提高

视觉定位的精度以及工作半径, 选择了合适的机载相机以及与之配套的双轴云台, 设计了以二进制编码为基础的标识物识别算法, 并进行了试验. 文献 [53] 对基于视觉和激光雷达的无人机降落方法进行了研究.

在无人机着艇过程中, 对地标的快速和准确识别是其核心问题, 围绕该问题还有很多研究工作要做, 包括:

1) 地标识别. 空地/空海协同最为关键的技术是无人机返航着陆技术. 由于汽车停止后可以静止不动, 所以实际上空地协同对运动中着陆的需求并不迫切. 空海协同则完全不同, 即便是无人艇停止航行, 艇体也无法保持不动. 如果无人艇在航行中, 返航着艇难度会更大. 在这种情形下, 要求无人机能够快速进行地标识别. 由于无人机电荷能力有限, 机载计算机计算能力较弱, 如何快速识别地标是个挑战性的问题.

2) 背景抑制. 无人艇上部空间有限, 通常安装有天线和感知设备及其支架等很多艇上结构物, 所以降落平台通常不会像空地协同一样覆盖车的整个顶部. 由此引发的问题是, 艇上结构物及其阴影, 以及艇身纹理和水面的反光形成复杂干扰, 大大增加了地标识别和无人艇着陆实现的难度. 如何从这些特定的背景下进行干扰抑制还有待进一步研究.

3) 畸变抑制. 虽然空海协同与空地协同采用的技术类似, 但是空海协同更具有挑战性. 在空海协同中, 降落平台始终处于摇摆之中. 而降落平台的摇摆会使无人机采集到的图像产生畸变, 对视觉导航的影响非常大. 为了保证无人机的可靠降落, 除了在无人艇中姿态控制中采用减摇技术, 还需要在图像处理算法中考虑摇摆带来的畸变, 譬如采用空海协同运动预测技术进行畸变的动态抑制. 关于该问题的研究还不多见.

综上所述, 空海协同巡逻搜救系统的研究不仅涉及到 “机” 的控制, 还涉及到 “艇” 的控制; 不仅涉及到图像处理技术, 还涉及到协同控制技术; 不仅涉及到硬件设计, 还涉及到算法开发, 面对的是个涉及多方面技术的非常复杂的系统. 目前该方向的研究还处在初始阶段, 有待于更多研究人员加入, 开展更加全面深入的研究.

4 弱小目标识别研究现状

无论是对无人艇无人机单独或者混合组成的系统, 环境感知能力都是系统正常可靠工作的关键.

水上区域广阔, 无人系统应用经常面临的一个关键问题是弱小目标识别问题, 包括海面目标识别

和空中目标识别. 国际光学工程学会 (SPIE) 曾对弱小目标特征作如下描述: 对比度小于 15%, 信噪比小于 1.5, 成像像素尺寸小于成像平面总尺寸的 0.13% (在 256 像素 \times 256 像素平面上小于 80 像素).

弱小目标识别是一个经典问题, 其挑战性在于, 远距离目标在成像面上的图像面积很小, 由于光学散射和衍射等光学效应, 图像的信噪比很低, 加上存在复杂背景干扰, 使得目标很难从背景中分割出来. 因此弱小目标识别往往是许多军事应用 (如预警系统、精确制导系统和防空系统等) 和民用应用 (如森林防火、医学成像、遥感和海事搜救等) 的技术瓶颈. 国际上以 SPIE 为代表, 每年举行一次“弱小目标信号与数据处理”研讨会, IEEE 国际计算机视觉与模式识别会议 (CVPR) 则经常举办竞赛, 交流弱小目标识别的前沿技术.

随着计算机技术和图像处理技术的进步, 目前基于图像、红外和激光的目标识别系统已经在实际中得到了成功应用. 由于空中对地/对海弱小目标检测的敏感性, 国内外民用产品尚不多见. 大疆公司开发的无人机搭载了国内最为先进的消费级地面目标识别系统, 其“Mavic Pro”无人机地面目标识别系统据说可以检测多种常见物体 (人、汽车、卡车、动物、船、人骑自行车或摩托车等). 彩虹和翼龙系列无人机系统搭载了国内最为先进的工业/军用级目标识别系统, 性能已在实际应用或实战中得到了检验.

在学术研究领域可以找到大量的中英文研究文献, 国内作者论文相当多.

文献 [54] 总结了目前红外弱小目标检测领域各类典型方法的研究现状及最新进展, 对几种不同类型红外弱小目标检测方法进行了实验对比, 对红外弱小目标检测技术的研究进行了总结和展望. 文献 [55] 从空域检测、时域检测及空时混合域检测方面对图像弱小目标检测的理论与应用研究进行了分析与综述, 对弱小目标检测面临的问题及未来的发展方向进行了探讨. 文献 [56] 介绍了红外图像弱小目标探测的技术难点, 对空域滤波法、变换域滤波法、时域滤波法三类典型红外图像弱小目标探测算法进行了综述, 并对常用目标探测算法以及边缘分割方法进行了实验测试, 指出这三类红外图像弱小目标探测算法各有优缺点, 目标探测算法的选取受目标特征和背景特征影响较大. 文献 [57] 针对无人机视觉识别与移动追踪技术介绍了移动目标识别、移动目标追踪、无人机自主飞行与避障等方向的关键技术研究现状. 文献 [58] 对无人机基于视觉的应

用进展进行了综述, 包括基于视觉的位置-姿态控制、姿态估计和映射、障碍物检测以及目标跟踪, 总结了该领域面临的挑战以及未来的发展趋势.

单一检测手段具有一定的局限, 所以海上弱小目标通常采用多源信息融合方法进行识别. 文献 [59] 研究了红外与激光双模复合的探测方式, 可获取目标方位角度-俯仰角度-速度-距离等多维信息, 进行了室外 40 m 距离的外场实验. 文献 [60] 提出基于二维经验模态分解的异常检测算法, 利用了红外多光谱图像的多尺度信息, 可抑制背景杂波和消减高频噪声, 提高检测成功概率. 文献 [61] 提出了一种针对中/长波红外图像的多源信息融合识别方法. 首先提取出目标及其特征利用基于灰色理论的目标关联度计算得到基本概率赋值, 再运用 D-S 证据理论组合规则对多个观测样本的信任度进行决策融合, 得到较好识别效果. 文献 [62] 提出一种弱小红外目标融合检测方法, 通过将多光谱探测器获得的同一场景的多光谱信息组合到一起, 利用它们在时空上的相关性及信息上的互补性, 提高了检测性能. 文献 [63] 提出了一种多波段红外视觉成像系统融合的伪彩色表示算法, 在两个不同的红外波段中利用目标信号之间的相关性来构造一个杂波较少的融合红外图像, 然后将融合的红外图像与假彩色 RGB 表示的视觉图像结合起来, 实现了弱小目标的识别.

目前在弱小目标识别研究方面, 大多数文献都是以陆上目标为背景, 在海上弱小目标识别方面还有很多问题没有得到很好解决, 有的问题是陆上和海上弱小目标识别存在的共性问题, 有的是海上弱小目标识别存在的特殊问题:

1) 水上无人系统高速航行时, 为了保证充分的反应时间, 一般要求在较远的距离上就能检测到目标. 而远距离目标成像面积很小, 可能只有几十个像素甚至几个像素. 与常规目标相比, 弱小目标不但缺乏形状、颜色和纹理等辅助识别信息, 而且经常受到海浪遮蔽, 其检测一直是个难点问题, 还有待于深入研究.

2) 水上弱小目标识别与陆上弱小目标识别相比有不同特点. 我国海域位于太平洋多雾区, 海域内弱小目标识别经常受到雾气的显著影响. 所以基于可见光图像检测弱小目标存在很大局限. 此外, 采用可见光图像还要克服复杂环境条件的影响, 包括海浪的起伏、日光的反射折射和雨雪的干扰. 所以, 通常采用红外方法或者多源信息融合方法进行海上弱小目标识别. 目前的识别率和可靠性还远达不到期望的水平.

3) 在过去的十几年里, 得益于计算机技术的进步, 图像识别技术得到了快速发展. 目前研究人员已经尝试了许多能够想到的图像处理方法, 期望通过改进算法来提高弱小目标识别率的空间越来越小. 目前的研究很多集中在不同性能指标, 如速度和精度的折中方面. 更明显的进步依赖光电传感器本身能力的提升.

4) 目前的无人艇环境感知研究大都是以单艇为背景, 在多艇情形下, 特别是大规模集群的情形下, 环境感知面临艇间遮挡带来的严重挑战. 这是个本质性难点, 有可能要从其他角度入手解决. 这方面的研究成果还很少见.

5 结论

水上无人系统目前的研究是由单个个体向集群、由单一环境向复杂环境、由简单功能向复杂功能发展. 涉及的关键技术包括环境的感知和集群的协同与博弈等. 与单艇单机环境感知相比, 集群环境感知面临的进一步挑战是动态变化个体之间的遮蔽. 与单艇单机控制相比, 集群控制面临的挑战是不同个体在动态对抗中的有效协同方式, 以及博弈策略. 目前这方面的研究还任重而道远.

References

- 1 国务院. 关于印发《中国制造 2025》的通知 [Online], available: http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm, May 8, 2015
- 2 国务院. 关于印发新一代人工智能发展规划的通知, [Online], available: http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-07/20/content_5211996.htm, July 8, 2017
- 3 Wang Shi, Zhang Jian-Qiang, Yang Shu-Hui, Zhang Bo-Lun. Research on development status and combat applications of USVs in worldwide. *Fire Control & Command Control*, 2019, **44**(2): 11–15
(王石, 张建强, 杨舒卉, 张博伦. 国内外无人艇发展现状及典型作战应用研究. 火力与指挥控制, 2019, **44**(2): 11–15)
- 4 Peng Y, Yang Y, Cui J X, Li X M, Pu H Y, Gu J, et al. Development of the USV 'JingHai-I' and sea trials in the southern Yellow Sea. *Ocean Engineering*, 2017, **131**: 186–196
- 5 Su Ning-Yuan, Chen Xiao-Long, Guan Jian, Mou Xiao-Qian, Liu Ning-Bo. Detection and classification of maritime target with micro-motion based on CNNs. *Journal of Radars*, 2018, **7**(5): 565–573
(苏宁远, 陈小龙, 关键, 牟效乾, 刘宁波. 基于卷积神经网络的海上微动目标检测与分类方法. 雷达学报, 2018, **7**(5): 565–573)
- 6 Fang Guang-Jiang, Zhao Min, Guo Hang-Yu, Lin Liang. Target recognition and tracking under low illumination on sea. *Machine Building & Automation*, 2016, **45**(2): 217–219, 227
(房广江, 赵敏, 郭航宇, 林亮. 低照度下的海上目标识别与跟踪. 机械制造与自动化, 2016, **45**(2): 217–219, 227)
- 7 周治国, 钟一鸣, 屈崇. 无人艇的水面图像去雾技术研究与应用. 第十二届全国信号和智能信息处理与应用学术会议论文集. 杭州, 中国: 中国高科技产业化研究会智能信息处理产业化分会, 2018. 240–243
- 8 Zhang Shu-Huai, Dong Chao, Li Bin, Tian Lian-Fang, Chen Ze-Chuang. The automatic tracking method for multi-ship tracking based on TLD. *Periodical of Ocean University of China*, 2017, **47**(2): 128–136
(张树怀, 董超, 李彬, 田联房, 陈泽创. 多目标舰船自动跟踪方法研究. 中国海洋大学学报, 2017, **47**(2): 128–136)
- 9 Wang Bo. Review of development in perception of unmanned surface vehicle based on optical vision. *Ship Science and Technology*, 2019, **41**(12): 44–49
(王博. 无人艇视觉感知研究发展综述. 舰船科学技术, 2019, **41**(12): 44–49)
- 10 Zhuang Jia-Yuan, Zhang Lei, Sun Han-Bing, Su Yu-Min. Improved rapidly exploring random tree algorithm application in unmanned surface vehicle local path planning. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, **47**(1): 112–117
(庄佳园, 张磊, 孙寒冰, 苏玉民. 应用改进随机树算法的无人艇局部路径规划. 哈尔滨工业大学学报, 2015, **47**(1): 112–117)
- 11 Kim H, Kim D, Shin J U, Kim H, Myung H. Angular rate-constrained path planning algorithm for unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering*, 2014, **84**: 37–44
- 12 Fan Yun-Sheng, Zhao Yong-Sheng, Shi Lin-Long, Zhang Yue. Global path planning for unmanned surface vehicle based on grid model of electronic chart. *Navigation of China*, 2017, **40**(1): 47–52, 113
(范云生, 赵永生, 石林龙, 张月. 基于电子海图栅格化的无人水面艇全局路径规划. 中国航海, 2017, **40**(1): 47–52, 113)
- 13 Carvalhosa S, Aguiar A P, Pascoal A. Cooperative motion control of multiple autonomous marine vehicles: collision avoidance in dynamic environments. In: Proceedings of the 7th IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, 2010. Lecce, Italy, 2010. 282–287
- 14 Cheng Y, Zhang W D. Concise deep reinforcement learning obstacle avoidance for underactuated unmanned marine vessels. *Neurocomputing*, 2018, **272**: 63–73
- 15 He Y X, Jin Y, Huang L W, Xiong Y, Chen P F, Mou J M. Quantitative analysis of COLREG rules and seamanship for autonomous collision avoidance at open sea. *Ocean Engineering*, 2017, **140**: 281–291
- 16 Wu Bo, Wen Yuan-Qiao, Wu Bei, Zhou Si-Yang, Xiao Chang-Shi. Review and expectation on collision avoidance method of unmanned surface vessel. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2016, **40**(3): 456–461
(吴博, 文元桥, 吴贝, 周思杨, 肖长诗. 水面无人艇避障方法回顾与展望. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2016, **40**(3): 456–461)
- 17 Curcio J, Leonard J, Patrikalakis A. SCOUT — a low cost autonomous surface platform for research in cooperative autonomy. In: Proceedings of Oceans 2005. Washington, USA: IEEE, 2005. 725–729
- 18 Shen Jia-Ying. Research on Autonomous Formation Control of Unmanned Surface Vehicles [Master thesis], Harbin Engineering University, China, 2019
(沈佳颖. 多无人艇一致性自主编队控制研究 [硕士学位论文], 哈尔滨工程大学, 中国, 2019)
- 19 Qin Z H, Lin Z, Yang D M, Li P. A task-based hierarchical control strategy for autonomous motion of an unmanned surface vehicle swarm. *Applied Ocean Research*, 2017, **65**: 251–261
- 20 Peymani E, Fossen T I. Leader-follower formation of marine craft using constraint forces and Lagrange multipliers. In: Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control. Maui, USA: IEEE, 2012. 2447–2452
- 21 Redding J, Amin J, Bošković J D, Jackson J. Collaborative mis-

- sion planning, autonomy and control technology (COMPACT) for unmanned surface vehicles. In: Proceedings of the 2009 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago, USA: AIAA, 2009. 1–23
- 22 Gomes J, Urbano P, Christensen A L. Evolution of swarm robotics systems with novelty search. *Swarm Intelligence*, 2013, **7**(2–3): 115–144
- 23 Peng Z H, Wang J, Wang D. Distributed maneuvering of autonomous surface vehicles based on neurodynamic optimization and fuzzy approximation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, **26**(3): 1083–1090
- 24 Dong W, Farrell J A. Formation control of multiple underactuated surface vessels. *IET Control Theory & Applications*, 2008, **2**(12): 1077–1085
- 25 王飏, 李博, 高敏, 秦立成. 无人船的协同控制策略综述. *中国水运*, 2019, **19**(2): 3–5
- 26 报告大厅. 国内外无人机发展现状分析 [Online], available: <http://www.chinabgao.com/k/wurenji/29886.html>, November 6, 2017
- 27 Nawaz H, Ali H M, Massan S U R. Applications of unmanned aerial vehicles: a review. *3C Tecnología*, 2019, 85–105
- 28 Yan Dong, Zhou Nai-En. The applications and prospects of CH UAV systems. *Computer Engineering & Software*, 2018, **39**(9): 117–122
(闫东, 周乃恩. 彩虹无人机系列应用及展望. *软件*, 2018, **39**(9): 117–122)
- 29 曹翔. 军民融合形势下无人机产融结合发展趋势分析. *军民两用技术与产品*, 2017, (10): 4–5
- 30 Eliker K, Zhang G Q, Grouni S, Zhang W D. An optimization problem for quadcopter reference flight trajectory generation. *Journal of Advanced Transportation*, 2018: Article No. 6574183
- 31 Nikolos I K, Valavanis K P, Tsourveloudis N C, Kostaras A N. Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2003, **33**(6): 898–912
- 32 Ren T Z, Zhou R, Xia J, Dong Z N. Three-dimensional path planning of UAV based on an improved A* algorithm. In: Proceedings of the 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. Nanjing, China: IEEE, 2016. 140–145
- 33 Cheng Ze-Xin, Li Dong-Sheng, Gao Yang. UAV three-dimensional path planning based on the grasshopper algorithm. *Flight Dynamics*, 2019, **37**(2): 46–50, 55
(程泽新, 李东生, 高杨. 基于蝗虫算法的无人机三维航迹规划. *飞行力学*, 2019, **37**(2): 46–50, 55)
- 34 Wang Sheng-Yin, Long Teng, Wang Zhu, Cai Qi-Sheng. Dynamic path planning using anytime repairing sparse A* algorithm. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, **40**(12): 2714–2721
(王生印, 龙腾, 王祝, 蔡祺生. 基于即时修复式稀疏 A* 算法的动态航迹规划. *系统工程与电子技术*, 2018, **40**(12): 2714–2721)
- 35 Aggarwal S, Kumar N. Path planning techniques for unmanned aerial vehicles: a review, solutions, and challenges. *Computer Communications*, 2020, **149**: 270–299
- 36 Liu Y Y, Rajappa S, Montenbruck J M, Stegagno P, Bühlhoff H, Allgöwer F, et al. Robust nonlinear control approach to non-trivial maneuvers and obstacle avoidance for quadrotor UAV under disturbances. *Robotics and Autonomous Systems*, 2017, **98**: 317–332
- 37 Sasongko R A, Rawikara S S, Tampubolon H J. UAV obstacle avoidance algorithm based on ellipsoid geometry. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, **88**(2–4): 567–581
- 38 Krämer M S, Kuhnert K D. Multi-Sensor fusion for UAV collision avoidance. In: Proceedings of the 2018 International Conference on Mechatronics Systems and Control Engineering. Amsterdam, Netherlands: ACM, 2018. 5–12
- 39 Zhang Wu-Yang, Zhang Wei, Song Fang, Long Lin. Monocular vision obstacle avoidance method for quadcopter based on deep learning. *Journal of Computer Applications*, 2019, **39**(4): 1001–1005
(张午阳, 章伟, 宋芳, 龙林. 基于深度学习的四旋翼无人机单目视觉避障方法. *计算机应用*, 2019, **39**(4): 1001–1005)
- 40 Tang Bo-Wen, Wang Zhi-Wen, Hu Zhen-Huan. Research on Obstacle avoidance for UAV using reinforcement learning based on event driven. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2019, **30**(1): 96–102, 117
(唐博文, 王智文, 胡振寰. 基于事件驱动的无人机强化学习避障研究. *广西科技大学学报*, 2019, **30**(1): 96–102, 117)
- 41 樊邦奎. 基于棕鸟飞行原理的无人机集群技术研究. 全国集群智能与协同控制大会. 北京, 中国: 中国指挥与控制学会, 2019.
- 42 He L L, Bai P, Liang X L, Zhang J Q, Wang W J. Feedback formation control of UAV swarm with multiple implicit leaders. *Aerospace Science and Technology*, 2018, **72**: 327–334
- 43 Kim M H, Baik H, Lee S. Response threshold model based UAV search planning and task allocation. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, **75**(3–4): 625–640
- 44 Saska M, Baca T, Thomas J, Chudoba J, Preucil L, Krajnik T, et al. System for deployment of groups of unmanned micro aerial vehicles in GPS-denied environments using onboard visual relative localization. *Autonomous Robots*, 2017, **41**(4): 919–944
- 45 Aghdam A S, Menhaj M B, Barazandeh F, Abdollahi F. Cooperative load transport with movable load center of mass using multiple quadrotor UAVs. In: Proceedings of the 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation. Qazvin, Iran: IEEE, 2016. 23–27
- 46 Zhang Jia-Long, Yan Jian-Guo, Lv Mao-Long. Application of robust PI control method on the stability of the UAV formation flight. *Flight Dynamics*, 2019, **37**(3): 38–42, 63
(张佳龙, 闫建国, 吕茂隆. 鲁棒 PI 控制方法在无人机编队飞行稳定性中的应用. *飞行力学*, 2019, **37**(3): 38–42, 63)
- 47 Duan Hai-Bin, Qiu Hua-Xin, Chen Lin, Wei Chen. Prospects on unmanned aerial vehicle autonomous swarm technology. *Science & Technology Review*, 2018, **36**(21): 90–98
(段海滨, 邱华鑫, 陈琳, 魏晨. 无人机自主集群技术研究展望. *科技导报*, 2018, **36**(21): 90–98)
- 48 Huang S N, Teo R S H, Tan K K. Collision avoidance of multi unmanned aerial vehicles: a review. *Annual Reviews in Control*, 2019, **48**: 147–164
- 49 Sanchez-Lopez J L, Pestana J, Saripalli S, Campoy P. An approach toward visual autonomous ship board landing of a VTOL UAV. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, **74**(1–2): 113–127
- 50 García-Pulido J A, Pajares G, Dormido S, De La Cruz J M. Recognition of a landing platform for unmanned aerial vehicles by using computer vision-based techniques. *Expert Systems with Applications*, 2017, **76**: 152–165
- 51 Liu Gang. Control Strategy and Application for Vision-based Autonomous Landing of Micro Aircraft Vehicles [Master thesis], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, China, 2014
(刘刚. 基于视觉导航小型无人机自主着陆控制策略研究与应用 [硕士学位论文], 南京航空航天大学, 中国, 2014)
- 52 Zhao Wen-Yi. Research on Vision-based Autonomous Landing System of UAV [Master thesis], Harbin Institute of Technology, China, 2018

(赵文一. 无人机视觉辅助自主降落系统研究 [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 中国, 2018)

- 53 Chen X D, Phang S K, Shan M, Chen B M. System integration of a vision-guided UAV for autonomous landing on moving platform. In: Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Control and Automation. Kathmandu, Nepal: IEEE, 2016. 761–766
- 54 Ren Xiang-Yang, Wang Jie, Ma Tian-Lei, Zhu Xiao-Dong, Bai Ke, Wang Jia-Qi. Review on infrared dim and small target detection Technology. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2020, DOI: 10.13705/j.issn.1671-6841.2019557 (任向阳, 王杰, 马天磊, 朱晓东, 白珂, 王佳奇. 红外弱小目标检测技术综述. *郑州大学学报 (理学版)*, 2020, DOI: 10.13705/j.issn.1671-6841.2019557)
- 55 张利军, 刘勃. 图像弱小目标检测方法及其进展. *自动化与仪器仪表*, 2015, (4): 189–190, 193
- 56 Liu Rang, Wang De-Jiang, Jia Ping, Zhou Da-Biao, Ding Peng. Overview on small target detection technology in infrared image. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, **53**(5): Article No.050004 (刘让, 王德江, 贾平, 周达标, 丁鹏. 红外图像弱小目标探测技术综述. *激光与光电子学进展*, 2016, **53**(5): Article No.050004)
- 57 韩鹏, 耿增显, 刘宏, 韩红蓉. 无人机视觉识别与移动追踪技术综述. *飞航导弹*, 2018, (10): 24–28
- 58 Kanellakis C, Nikolakopoulos G. Survey on computer vision for UAVs: current developments and trends. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, **87**(1): 141–168
- 59 Song Sheng. Research on Key Technologies of Infrared and Laser Dual-mode Compound Detection [Ph. D. dissertation], Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, China, 2017 (宋盛. 红外与激光双模复合探测关键技术研究 [博士学位论文], 中国科学院上海技术物理研究所, 中国, 2017)
- 60 Zhang Guo-Liang. Research on Techniques of Detection and Tracking of multiple Dim Moving Targets from IR Multispectral Image [Ph. D. dissertation], Harbin Institute of Technology, China, 2016 (张国亮. 红外多光谱多个弱小运动目标的检测与跟踪技术研究 [博士学位论文], 哈尔滨工业大学, 中国, 2016)
- 61 Gu Xian-Song, Gao Kun, Zhu Zhen-Yu, Zhang Xin, Han Lu. Fusion recognition based on grey relativity for multi-source infrared dim target. *Laser & Infrared*, 2018, **48**(10): 1258–1263 (顾宪松, 高昆, 朱振宇, 张鑫, 韩璐. 多源红外弱小目标灰色关联融合识别方法. *激光与红外*, 2018, **48**(10): 1258–1263)
- 62 Yao Y, Hao Y H, Wang H Y. Small infrared target detection based on spatio-temporal fusion saliency. In: Proceedings of 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology. Chengdu, China: IEEE, 2017. 1497–1502
- 63 Toet A, Wu T. Small maritime target detection through false color fusion. In: Proceedings of Optics and Photonics in Global Homeland Security IV. Orlando, Florida, United States: SPIE, 2008. Article No.69450V



本文通信作者.

E-mail: wdzhang@sjtu.edu.cn

(ZHANG Wei-Dong Professor in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University, recipient of National Science Fund for Distinguished Young Scholars, Humboldt Fellowship of Germany, and Leader of Excellent Disciplines in Shanghai. At present, he is the director of Shanghai Engineering Research Center for Marine Automation. Winner of IEEE CCTA Best Paper Award and IET CTA Premium Paper. His research interest covers ocean robots and industrial control systems. Corresponding author of this paper.)



刘笑成 上海交通大学自动化系博士研究生. 2016 年获得上海交通大学硕士学位. 主要研究方向为船舶动力定位系统, 轨迹跟踪与避碰.

E-mail: liuxc@sjtu.edu.cn

(LIU Xiao-Cheng Ph. D. candidate in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. He received his master degree from Shanghai Jiao Tong University in 2016. His research interest covers ship dynamic positioning system, trajectory tracking and collision avoidance.)



韩鹏 上海交通大学自动化系博士研究生. 2019 年获得四川大学学士学位. 主要研究方向为无人机、无人艇协同控制.

E-mail: han_ipac@sjtu.edu.cn

(HAN Peng Ph. D. candidate in the Department of Automation, Shanghai Jiao Tong University. He received his bachelor degree from Sichuan University in 2019. His research interest covers UAV/USV cooperative control.)