

2023年无人机热点回眸

段海滨¹, 梅宇¹, 赵彦杰², 霍梦真¹, 牛轶峰³, 王寅⁴, 袁莞迈², 邓亦敏¹, 范彦铭⁵, 朱纪洪⁶, 李轩⁷, 罗德林⁸

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083
2. 中国电子科技集团公司信息科学研究院, 北京 100086
3. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073
4. 南京航空航天大学航天学院, 南京 210016
5. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035
6. 清华大学精密仪器系, 北京 100084
7. 鹏城实验室数学与理论部, 深圳 518000
8. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361102

摘要 2023年, 无人机技术方面实现了革新和突破, 展现出了引人瞩目的技术创新进展和广泛的应用态势。从无人机管控政策、无人机技术革新、无人机关键技术、无人机集群验证、反无人机技术等多个角度全方位分析了2023年无人机的科技热点。随着视觉应急避障技术、智能自主飞行能力的提升, 无人机性能和功能均得到了显著提升。随着无人机的不断普及和应用, 无人机集群的关键技术、作战样式和平台建设也不断完善, 行业定制化、自主智能化、跨域实战化依然是无人机未来发展的重要方向。

关键词 无人机; 行业规范; 技术革新; 集群智能

无人机作为新一代人工智能领域的代表性前沿技术, 正以惊人的速度在全球范围内迅猛发展。从最初的军事应用到如今的商业、农业、工业、科学研究等诸多领域, 无人机前沿理论和创新技术正不断引领着航空科技领域的新质能力创新和提升。在商业领域, 无人机被用于物流和运输、航拍和摄

影、快递服务等。在农业领域, 无人机可以进行植保喷洒、土壤检测、作物检测等。在科学研究中, 无人机可用于环境监测、气象监测、野生动物保护等。这些广泛的应用领域展示了无人机技术的巨大潜力。

针对无人机的迅速发展和多样化应用, 明确的政策行规是确保无人机行业可持续发展的关键。

收稿日期: 2023-12-15; 修回日期: 2024-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(T2121003, U20B2071, 91948204)

作者简介: 段海滨, 教授, 研究方向为无人机仿生自主控制、计算机仿生视觉和仿生智能计算, 电子信箱: hbduan@buaa.edu.cn

引用格式: 段海滨, 梅宇, 赵彦杰, 等. 2023年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2024, 42(1): 217-231; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.01.014

这些政策行规旨在维护公众安全、保护个人隐私、促进空域管理和规范商业操作^[1-3]。

随着人工智能技术的快速进步,无人机技术正朝着更加智能化、自主化、安全可靠的方向发展。无人机的感知能力、决策能力和协同能力得到进一步提升,使其能够应对更加复杂和多变的任务需求。特别是仿生智能技术在无人机领域的应用具有重要意义,无人机不仅能穿梭在狭窄空巷,还能实行全天候跨域作业,通过结合先进的视觉技术和强大的人工智能算法,能够实现智能化的视觉避障和自主导航,提高其在复杂环境下的飞行安全性和任务执行能力。同时无人机集群系统作为一种新兴技术,具有许多独特的优势和吸引力,正在引起广泛关注。其强大的协同合作能力,扩展覆盖范围和强大的任务灵活性已经成为当前技术的研究热点。随着高度自主化和创新潜力等关键问题不断被突破,无人机集群系统将推动无人机技术的进一步发展,并为未来的发展带来更多的可能性^[4-5]。

无人机已经成为现代战争不可或缺的角色,其在军事应用中发挥着关键的作用,随着技术的不断进步,无人机在侦察、监视、打击和战场支援等方面表现出了卓越的能力。在美国海军“艾森豪威尔”号航母打击群进入波斯湾时,伊朗无人机出动拍摄美国海军航母穿行动态,无人机编队使伊朗能够监视波斯湾地区的每艘美国船只^[6],可以看出无人机集群编队在侦察作战中发挥的重要作用。面对日益复杂的军事挑战和多样化的任务需求,无人机集群系统的自主化和系统能力具有重要意义。此外,无人机“智能、无人、集群”的作战模式具有突出的优势和战略意义,通过智能化技术的应用,无人机的灵活性和机动性,以及集群作战模式的协同能力,可以协助军队在现代战争中获得更大的优势和胜利。随着技术的不断进步,这一模式将进一步发展和完善,为军事领域智能化转型提供更多创新的解决方法^[7]。

本文回顾 2023 年无人机领域的研究进展,并对代表性关键技术和未来发展趋势进行分析和展望。

1 无人机管控政策

在无人机技术的迅猛发展和广泛应用下,制定行业标准成为当今社会亟待解决的重要问题。随着无人机的数量不断增加,涉及的行业范围也越来越广泛,包括航空、农业、物流、娱乐等领域,然而,由于缺乏统一的行业标准,无人机的设计、制造、操作和管理存在着各种差异和不一致性。

制定行业标准的背景在于确保无人机的安全性和可靠性。2023 年 1 月,国务院发布的《扩大内需战略规划纲要》强调要“释放通用航空的消费潜力”,应当高度重视培育低空经济,推进体制机制创新^[8]。2023 年 3 月,中国民用航空局发布的《“十四五”通用航空发展专项规划》提出深化拓展无人机应用,大力发展智能无人驾驶航空器驱动的低空经济,聚焦体系,加强无人机适航管理体系建设^[9]。2023 年 5 月,工业和信息化部提出中国主导制定的 2 项无人机领域国际标准:《民用多旋翼无人机系统试验方法》和《轻小型无人机用电动能源系统技术要求》。这 2 个文件提供了对多旋翼无人机系统测试和评估的方法,并且涵盖了对电动能源系统的安全性和可靠性方面的要求,从而确保能提高无人机飞行性能^[10]。2023 年 6 月,工业和信息化部发布了《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》,规定了民用无人驾驶航空器的管理以及空域和飞行活动管理,还包含了监督管理和应急处置的方案,比较全面地涵盖了市面上的无人飞行器的规定,该项规定自 2024 年 1 月 1 日起实行^[11]。由于现在民用无人机伤人事件频频出现,社会反响比较大,最终市场监管总局在 2023 年 6 月发布了《民用无人驾驶航空器系统安全要求》,该政策的推出,要求系统设计和制造符合严格的安全标准,对于保护民众安全具有重要意义^[12]。2023 年 11 月,美国国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发布了模拟地面附近的空中出租车安全,内容包括这些车辆在靠近地面时的表现,进一步推动了制定适应这一新兴交通方式的空中飞行规定^[13]。2023 年 10 月,工业和信息化部提出中国主导制定的 3 项无人机领域国际标准,包括《民用轻小型固定翼无人

机飞行性能试验方法》《民用轻小型无人机旋翼叶片对人体锐性伤害评估与试验方法》和《民用轻小型无人机系统低气压环境下试验方法》,第1份文件能有效解决民用轻小型固定翼无人机飞行性能试验项目不统一的问题;第2份文件可指导民用无人机系统安全性设计、制造与优化;第3份文件能有效解决低气压环境下民用轻小型无人机系统检测环境不可控、试验方法不统一等问题^[14]。2023年10月,中国民用航空局公开了一份文件《民用无人驾驶航空器系统物流运行通用要求 第1部分:海岛场景》,文件是针对海岛场景,意味着关注海岛地区的特殊环境、资源受限、交通状况等因素。该文件目的在于制定适应海岛环境的无人机物流运行要求,从而提高物流效率^[15]。2023年11月,中央军委装备发展部决定对特定无人驾驶航空飞行器或无人驾驶飞艇相关物项实施出口管制,以维护国家的安全和利益^[16]。2023年12月,国家标准化管理委员会发布了关于提前实施《民用无人驾驶航空器系统安全要求》国家标准主要条款的通知,这是为了响应《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》,该文件的目的是确保无人飞行器系统在运行过程中的安全性。它涵盖无人驾驶航空器的设计和制造要求,从而确保无人机飞行的安全操作并且推动了行业内的安全标准化^[17]。为了加强民用无人驾驶航空器无线电管理工作,维护空中电波秩序,保证各种无线电业务的正常进行,自2024年1月1日起实行《民用无人驾驶航空器无线电管理暂行方法》^[18]。

规范无人机标准体系的建设对无人机发展具有重要作用,这不仅促进了无人机产业的健康发展,并且还提供了统一的技术规范和标准,这有助于提高产业的整体水平和竞争力。未来随着更健全的体系建立,可以实现无人机在各个领域的广泛应用和发展。

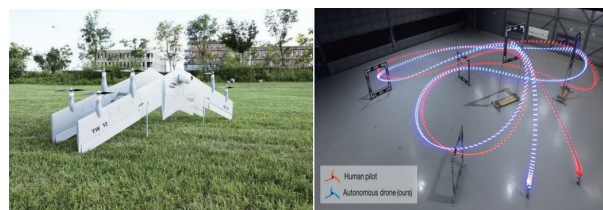
2 无人机技术革新

无人机技术的革新正在以惊人的速度推动着航空领域的巨大变革。随着传感器技术、人工智能和自主导航技术的突破,2023年各式各样的无人

机层出不穷,在无人机遮挡问题、视觉避障和仿生智能自主领域都取得了重要的进展。

2.1 新式无人机

电路系统是国民经济的重要组成部分之一,在无人机的助力下,电路巡检也迎来了“航母模式”。巡检车搭载20组电池,可以满足4架无人机全天候不间断作业,可实现多机集群作业,巡检效率最高是现有水平的4倍^[19]。在第25届中国国际高新技术成果交易会上,由中国科学院长春光机所自主研发制造的双飞翼垂直起降固定翼无人机(图1(a))亮相。这款新型无人机采用“双飞翼+多旋翼”气动布局,为全球首创,可以实现竖直状态下的垂直起降^[20]。为搭载“阿纳多卢”号航母,土耳其TB-3察打一体无人机应运而生,TB-3无人机机翼下武器挂点增加到了6个,具备较高的打击精度,还兼具视距和超视距通信能力,可在复杂环境下执行远距离侦察、监视、海上作战和对岸打击等任务^[21]。



(a) 双飞翼垂直起降固定翼无人机 (b) 自主无人机和人类飞手竞赛

图1 2023年无人机技术创新发展

2.2 无人机避障和遮挡问题

无人机环境感知与认知是实现无人机智能化的“助燃剂”。在无人机识别、跟踪等以视觉为导向的任务时,经常面临目标被遮挡的挑战。现有研究针对单机和多机提出了解决方案。Li等^[22]将遮挡问题归纳为特征混淆问题和局部聚合特征,提出了遮挡引导多任务网络的方案,利用多任务交互作用解决遮挡对象的特征混淆问题,开发了遮挡解耦检测头和两阶段渐进细化检测技术,充分利用遮挡定位结果并解决局部聚合特征问题,提高无人机图像中的目标检测性能。该研究给出了遮挡问题的分类特征,并且基于这一分类特征,Liu等^[23]利用多无人机不同视角的特征,进行跨无人机目标补充克服多目标跟踪任务中的遮挡问题,并收集了一个具有

遮挡属性的多无人机多目标跟踪数据集,为多无人机多目标检测和跟踪任务提供了基准数据集和基线算法。

就无人机而言,只实现避障还远远不够,无人机的反应时间和避障能力一定是未来研究的重点。Müller等^[24]介绍了一种基于新型毫米级的多区域时间飞行传感器和通用无模型控制策略的轻量级障碍物规避系统,旨在为自主小型无人机提供可靠且高效的避障能力。该算法仅使用无人机210 μs的处理功率(占总处理能力的0.3%),每秒15帧,并在先前未探索过的室内环境中实现了100%的可靠性。Marcucci等^[25]介绍了一种新的机器人运动规划方法,名为GCS(graphs of convex sets),GCS框架可以高效可靠地规划避障轨迹。

针对外界环境变化太快,单一的避障轨迹可能满足不了市面上的需求。针对这个问题,Stache等^[26]研究了无人机精确语义分割的自适应路径规划问题,提出了一种在线规划算法,该算法对无人机的路径进行调整,以获得在输入图像中检测到的具有精细细节的区域所需的高分辨率语义分割结果。基于上述无人机路径的调整,不同的搜索算法之间差异较大,基于这一变化,Wu等^[27]设计了一个解决了基于网格搜索算法的路径规划软件的问题和正确性的框架。在此框架下,提出了一种基于变形测试的方法,提出了3种基于操作的变形关系,并对目标软件进行了验证。在对软件进行分析时,对人工注入故障的版本和正式发布的版本都进行了处理。

随着无人机技术不断创新,Kaufmann等^[28]开发了仅搭载机载摄像头和自主竞速无人机系统,该系统将在仿真中训练的深度强化学习算法与真实世界中收集的飞行数据相结合,分别训练了神经网络表示的感知策略和控制策略,能够达到人类专业飞行员水平并在多次比赛中超越人类竞速冠军(图1(b)),成为移动机器人和机器智能研究领域的里程碑。该小组宋云龙等通过对比强化学习(reinforcement learning, RL)和最优控制(optimal control, OC)方法在自主无人机竞速比赛上的控制性能^[29],发现RL在竞速任务上优于OC方法,且RL相对于OC的根

本优势不是更好地优化了目标,而是优化了更好的任务级目标,因为OC将问题分解为规划和控制2部分会限制控制器的行为范围。为了解决能从视觉输入中提取任务的问题,Chahine^[30]等提出一种基于液态神经网络的模仿学习的方法,使得无人机可以从离线的人类演示中学习执行视觉导航任务,进一步推广到与受训环境相似的未见过的场景中。该方法可去掉不相关的特征,从而掌握能够转移到新环境中的导航技术。实验表明,无论是在微分方程还是封闭形式表示,这种水平的决策鲁棒性是液态网络所独有的。为了解决驱动预测中的不确定性问题,Sanket等^[31]提出了一种基于网络类的不确定性预测方法,实现了依靠单目相机而非深度传感器的动态避障、密集场景导航、飞跃未知狭窄缝隙和分割物体堆等挑战。随着观测手段的不断革新,段海滨等^[32]认为自然界中鸽子群体智能的研究迄今一直在路上,并且展望了鸽群优化的未来发展趋势且将进一步联合鸟类学者开展鸽群智能机理研究。为解决生物多样性的规模监测这一问题,Aucone等^[33]通过使用空中机器人在树冠外枝上采样eDNA来调查生物多样性,无人机将力感应与基于触觉的控制策略相结合,以建立并保持与树枝上表面的接触。研究表明无人机可以自主降落在刚度在1~10³ N/m之间的各种树枝上。

3 无人机关键技术

3.1 无人机集群通信导航

无人机集群的通信与导航是确保无人机集群环境感知、任务规划和协同控制等功能的关键技术之一。随着集群通信与导航技术的持续进步,可以提升无人机集群的协同能力和任务效率,实现更为复杂和高效的执行任务。然而也存在信号干扰、通信延迟和导航精度等问题,需要不断进行优化和改进。为了满足无人机集群在协同工作和任务执行中的交互需求,Meng等^[34]针对基于无人机的通信感知一体化(integrated sensing and communication, ISAC)技术在第六代移动通信技术(6G)无线网络中的应用进行了介绍,重点突出了支持无人机的

ISAC 并提出了优化系统性能的解决方案。Zhao 等^[35]针对无人机运动和姿态变化对信道的影响,基于传统的 ISAC 技术提出了一种信道估计方法。这些研究进度加速了用于估计信号在信道传输时所经历的衰落、延迟和失真等效应。将无人机的感知、通信和控制三者结合在一起,有效地增强了具有抖动效应的无人机通信系统的性能。当然,信道中数据量过大可能会导致冗余,为了解决这个问题,赵拓等^[36]提出一种基于通信网络节点聚类的多无人机动态目标分配算法 CU-CBBA (clustered consensus-based bundle algorithm),通过引入通信网络节点聚类策略,根据节点的属性,建立网络节点重要性排序模型,并选取一组关键节点进行聚类。与其他相关算法相比,CU-CBBA 算法在通信规模、收敛速度和迭代稳定性等方面表现出较好的性能,展示了基于通信网络节点聚类的多无人机动态目标分配算法。

导航系统对于无人机的飞行也至关重要。基于单一传感器的导航方法包括惯性导航、卫星导航和视觉导航。其中,基于视觉的导航由于其强大的环境感知能力和适应性,成为当前研究的热点领域。通过不断的技术创新和改进,无人机导航系统才能得以应对挑战。Wang 等^[37]针对无人机对海上无人艇等目标的识别问题,通过引入空层和两级结构,提出一种基于深度学习的视觉导航架构,从无人机航拍图像中提取无人艇和漂浮物的位置信息(图 2)。为了解决大视场与高分辨率之间的矛盾,徐小斌等^[38]针对该问题提出了一种仿猛禽视觉多分辨率机制,利用长短焦距很好地处理这类问题。

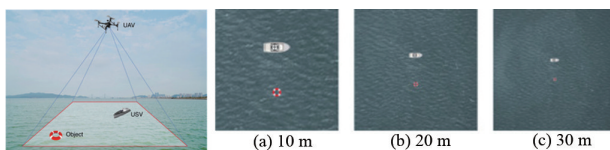
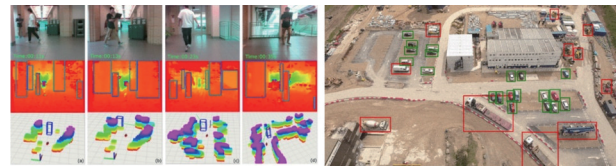


图2 无人机基于视觉传感器海上目标识别

Gao 等^[39]针对狭窄而复杂的室内设施巡检问题,基于同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术提出一种将激光雷达 SLAM 和视觉 SLAM 融合在一起的同步定位和测绘方法,为 2 架无人机提供鲁棒的定位和三维测绘信

息。Xu 等^[40]针对狭小空间中实时动态环境感知问题,采用 3D 混合地图,使用占体表示静态障碍物(图 3(a)),并跟踪动态障碍物作为边界框,提出了一种新颖的动态障碍物跟踪方案,用于无人机自主导航(图 3(b))。



(a) 新颖的动态障碍物跟踪 (b) 不同类型传感器识别动态占体

图3 在 I 形走廊中可视化试验

由于基于单一传感器的导航系统存在一些局限性,如有限的感知范围、对特定环境的依赖性、数据处理困难和缺乏冗余性等,因此仅依靠单一传感器模式很难同时满足应用需求并为无人机集群提供鲁棒且准确的导航定位解决方案。为了提高无人机集群导航系统的性能和可靠性,通常需要进行多传感器融合,以充分利用不同类型传感器的优势,从而提升系统的可靠性、鲁棒性和时空覆盖性。针对在没有全球导航卫星系统信号情况下的固定翼无人机容易出现水平位置漂移问题,Gallo 团队提出了一种基于惯性导航系统(inertial navigation system, INS)输出的先验信息对无人机上安装的视觉导航系统(visual navigation system, VNS)的位姿估计非线性优化进行补充的方法,所提出的惯性辅助可视导航系统模型实现了自主无人机全球卫星导航^[41]。Lin 等^[42]针对无人机在没有导航信号的室内环境下导航定位问题,采用对超宽带(ultra wide band, UWB)短时位置变化的约束来改善视觉惯性里程计(visual-inertial odometry, VIO)系统的位姿估计结果,将 VIO 系统的局部位姿估计器与 UWB 定位的全局约束进行融合,提出了一种结合 UWB 定位技术来提高 VIO 精度的方法,有效地实现了无累积误差的平滑室内导航定位。

3.2 无人机自主飞行和跟踪控制

无人机的自主飞行和跟踪控制是无人机技术的关键要素。无人机能通过自主飞行技术,感知周围环境的信息(包括地面障碍物、气象状况等)从而做出适应性调整。Çoban 等^[43]针对一种小型无人机

的自主飞行性能问题,研究了在给定参数(机翼锥度比和机翼展弦比)的约束下,通过随机优化这些参数就可以恢复无人机的自主飞行的性能。Zhao等^[44]提出了一种鲁棒规划框架,能够在机载计算资源有限的情况下稳定地支持复杂未知环境下的自主飞行任务。Choi等^[45]提出了一个基于模块化的强化学习算法通过将复杂任务划分为简单的任务分别进行学习,然后将他们连接起来,通过将信息从一个模块迁移到另一个模块来实现更快地学习,从而为无人机自主飞行提供了便利的条件。

跟踪控制是无人机实现对目标的追踪和控制的关键技术,一旦目标被锁定,无人机可以很准确地锁定和跟踪目标。Zhu等^[46]提出了一种基于连续相对距离信息的主从多无人机协同定位方法,该技术是利用了惯性短时间的位置约束和无人机的距离约束来实现高精度的协同定位,可以有效解决传统的基于距离的协同定位问题。Yang等^[47]提出了基于机器学习的数据驱动方法,采用了非线性动力学控制的稀疏知识来系统辨识,从而更有利于达到跟踪控制的效果。Liu等^[48]针对四旋翼的轨迹跟踪问题,提出了一种基于全驱动系统方法的控制方案,同时引入了跟踪微分器和拓展状态观测器来处理不确定性,从而使得四旋翼获得令人满意的跟踪效果。除此之外,Zhang等^[49]提出了迄今为止最大的公共无人机跟踪基准多模态无人机物体跟踪数据集,以促进深度无人机跟踪器的开发和评估。牛轱团队提出了一种针对多固定翼无人机的时间协调路径跟踪控制策略,该策略利用了敏捷飞行器的强大机动能力,并考虑了期望的末端滚转角^[50]。通过采用优化方法并设计惩罚函数,得到滚转角序列。姿态内环控制在空间中运行,允许对大偏差进行控制。高保真度仿真验证了所提出方法的有效性。

3.3 无人机集群任务规划

无人机集群任务规划是实现无人机智能化的重要手段之一,无人机集群通过个体之间的信息融合和能力互补,形成多样化的任务能力,实现更复杂、更高效的任务。无人机集群任务规划的研究主要集中在任务分配和路径规划2个方面。

任务分配问题是建立无人机与任务之间的映

射关系的优化问题,通常涉及多个约束条件;航迹规划是在任务条件约束下路径寻优的问题。关于任务分配问题上,Gao等^[51]提出了一种基于风险的多目标协同任务分配模型。为了改进遗传算法的性能,引入了快速非支配排序方法和精英保留策略。还提出了一种快速定位解锁方法,从而实现更高效的解锁过程。王克浩团队针对资源、优先级和时序约束下的多无人机协同任务分配问题进行了研究,提出了一种相互独立可调的全自适应交叉熵(mutually independent adjustable fully adaptive cross-entropy, MIAFACE)算法和具有多项式时间复杂度的相互关联的可调的全自适应交叉熵(mutually correlative adjustable fully adaptive cross-entropy, MCAFACE)算法,成功解决了任务优先级和任务耦合的问题^[52]。Jiang等^[53]针对现有启发式算法在求解大规模或者高维多无人机任务分配时性能会下降容易陷入局部收敛的问题进行了研究。根据目标函数定义了新的优势关系,对优势度的计算方法进行了改进,最后采用逐步排序的方法取代了启发式算法迭代搜索解空间的方法。Yuan等^[54]针对无人机集群任务分配中全局性和收敛速度之间的矛盾进行了研究,提出了一种混合群体智能算法。Wang等^[55]针对异构多无人机在不同时间段的协同作战问题进行了研究,提出了异构多无人机多级协同任务分配算法,考虑了约束条件的扩展,并建立了协同多任务分配模型,在算法中考虑了多架无人机在不同任务不同阶段的异构协同匹配执行关系。Jia等^[56]针对无人机集群的多任务分配问题,考虑了炸弹载荷和损伤损失等各种约束条件,提出了一种改进的混合离散粒子群优化算法。

路径规划问题的重要性在于它可以提高效率、优化资源利用、提高自动化水平、优化交通流、提高安全性和风险管理,并为个人导航和位置服务提供定制化的解决方案,这使得路径规划成为许多实际应用和领域中不可或缺的关键技术。Xu等^[57]针对具有路径长度、机动性、防撞、通信要求和障碍物等约束条件的多无人机协同路径规划问题,提出了一种综合学习动态多群体粒子群优化算法(comprehensive learning dynamic multi-swarm particle

swarm optimization, CL-DMSPSO)的有效路径规划方法,在多无人机高质量可飞行路径的有效规划方面优于其他粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法。Zhang等^[58]针对动态环境下的无人机三维路径规划问题,提出了一种环境探索孪生延迟深度确定性策略梯度(environment exploration twin delayed deep deterministic, EE-TD3)算法,可以有效避免冲突,提高训练效率,实现更快的收敛速度。罗喜伶团队针对复杂动态障碍物环境下的无人机三维航迹优化问题,提出了一种多层轨迹规划(multi-tier trajectory planning, MTTP)方法,将固有复杂的三维轨迹优化问题转化为风险距离最小化模型^[59]。与传统的基于通信的方案相比,该方法具备更优越的航迹规划性能,飞行距离缩短了8.49%,任务成功率提高了10%。Samir等^[60]就无线电资源分配和通信方案配比提出了高复杂度分支约简定界算法,从而寻找到相对较小规模场景的全局最优解,并且通过一个有效的连续凸逼近的次优算法从而获得了更大的网络结果,从而保证了低资源物联网设备的需要。

3.4 无人机集群协同控制

无人机集群协同控制是体现无人机集群集成化、自主化与智能化的关键技术之一,受到国内外学者广泛关注。借鉴生物的自主行为,仿生智能自主使无人机能够以更智能、更自主的方式行动,段海滨等^[61]借鉴生物群智能让无人机之间的协同行为和信息共享,从而集群能够以更高效更精确的方式完成任务。集群控制根据控制方式不同主要分为一致性控制、蜂拥控制(图4)、合围控制与编队控制。一致性理论控制的核心目标是找到一种合适且高效的控制协议使得整个无人机集群所有节点状态达到一致,因其具有丰富的理论基础,一致性控制理论是国内外学者研究最多的方向。胡树欣等^[62]针对四旋翼无人机队形保持、编队避障问题,基于安全模型预测控制(security-model predictive control, S-MPC)、多阶一致性理论提出了一种分布式多无人机协同避障控制算法,通过引入控制障碍函数约束不仅实现了提前避障而且耗能更少。

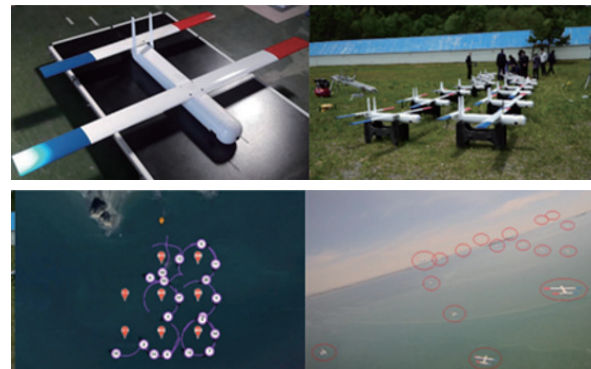


图4 小型固定翼无人机蜂拥控制实飞验证

Dixit等^[63]针对无人机集群在阵风干扰复杂环境下的编队控制问题,提出了一种自适应滑模控制(sliding mode control, SMC)模型,利用李雅普诺夫理论建立了其闭环系统稳定性分析,并通过仿真证明了该模型的有效性。Yan等^[64]同样针对该问题提出了一种结合卡尔曼共识滤波(kalman consensus filtering, KCF)和固定时间扰动观测器(fixed-time disturbance perturbation observer, FTDOB)的多约束模型预测控制(model predictive control, MPC)模型,通过实验证明可以抵消外部扰动对无人机编队的影响。蜂拥控制受到自然界群居动物的集体行为启发,集群中的节点只需要遵循简单的几个规则即可实现群集并完成指定的任务,因此,逐渐成为无人机集群协同控制的热点。Yan等^[65]针对多固定翼无人机在复杂环境中的避障问题,将防碰撞蜂拥任务分解为多个子任务,基于多智能体强化学习提出了基于任务特定课程的多智能体深度强化学习(task-specific curriculum-based multi agent deep reinforcement learning, TSCAL)方法,通过硬件在环仿真实验验证了该方法的有效性。Song等^[66]针对小型固定翼无人机集群密集编队控制问题,结合势场、矢量场和加强的协议3种控制协议提出了一种自适应模型,并通过18架小型固定翼无人机对所提算法模型进行了实飞验证。自主空中加油作为一种远程远海作战的重要模式,对无人机之间的协调控制要求也极高,其中,段海滨团队在2023年1月解决了一系列无人机空中自主加油的问题,开展了系统性创新型工作^[67]。

3.5 无人机自主决策对抗

无人机自主决策对抗是未来无人机系统发展的重要方向之一,通过不断提升无人机的感知、推理和决策能力,可以使无人机在复杂和对抗环境中更加智能、灵活和可靠。Hou等^[68]针对无人作战飞行器自主空中对抗难以设计的问题,提出了一种分层决策的方法(state-event-condition-action, SECA)框架继承了有限状态机和事件一条件一动作框架并成功应用于机器人导航任务。Gong等^[69]针对多无人机协同空战决策问题,提出了一种基于多智能体深度强化学习理论的多无人机协同机动决策方法,将值分解网络,强化学习理论和嵌入式协同空战经验奖励函数结合,提出了基于网络分3部分可观测马尔可夫决策过程的空战协同策略框架,然后再策略优化,以达到提高协同作战场景中无人机之间的协同程度。Li等^[70]在人机游戏环境下,提出了一种机动决策方法,将Horizon建模为人类与UCAV(unmanned combat air vehicle)的博弈,显著降低了运算量。Xia等^[71]制定了一种协同集成的分布式模块化框架,能追踪多个对手,做出连续而迅速地决策,以及开发了移动自适应网络的控制运动机制和复合运动控制机制,使每架无人机都能驶向猎物或者远离任何接近的目标。

在国内外研究中,动态机动决策是无人机对抗领域的最重要的一项,是指无人机系统在飞行过程中根据实时环境信息和任务需求,灵活调整飞行姿态和路径的决策能力。针对无人机合作对抗的复杂性和不确定性,Wu等^[72]采用多策略纳什均衡求解办法融合粒子群算法,通过引入自适应惯性权重和局部变异策略保证了动态决策能力的稳固。Ren等^[73]提出了一种合作基于不完全信息动态博弈的多无人机空战机动决策的方法,该方法建立基于多智能体深度确定性策略梯度的强化学习框架,以获得完美贝叶斯-纳什均衡解决空战游戏模型。Abdallaoui等^[74]提出决策的主要共同目标是考虑不确定性、不可预测的情况和驱动任务,提出一种适应全局和鲁棒的解决方案。

4 无人机集群验证

随着无人机自主技术的发展,多无人机协同控制的研究已成为无人机发展的一个重要方向。通过集群协同作业,多无人机体现了比单架无人机更高的任务执行效率以及更卓越的协调性、智能性以及自主能力。由于多无人机集群协同作业的巨大优势,美国国防高级研究计划局(defense advanced research projects agency, DARPA)、海军研究局等研究机构对多无人机集群协同作业的概念验证进行了大量的研究。2023年2月,首艘具备自主能力的“阿巴拉契科拉”号快速运输舰入列,该舰排水量1515 t,成为当前美国海军最大的无人舰^[75]。2023年5月,美国海军太平洋舰队开始了第二次多域无人能力演习,即“无人系统一体化战斗问题(unmanned systems integrated battle problem, UxSIBP)”演习,编号为23.1,即2023年第1次。这是一场由美国海军第3舰队负责实施的战术战斗演练活动,聚焦验证无人系统运用情况,测试和开展“舰队中心FC(fleet-centric)”概念和能力。此次演习的重点是海上和水下的远程火力、监视和侦察、指挥和控制,以及重新构筑情报。参演装备包括:“海猎”和“海鹰”中型排水量无人水面舰艇、RQ-20 PUMA无人机系统和“MANTAS T-38”魔鬼鱼(Devil Ray)无人水面艇^[76](图5(a))。2023年10月,美国海军中央司令部(NAVCENT)举行了“数字魔爪”DT(Digital Talon)演习,旨在开展新型尖端无人系统和人工智能技术的作战应用,增强海军有人-无人编队作战能力,提高无人系统的杀伤力。美国海军中央司令部第59特遣部队展示了无人平台在“有人-无人编队”模式下与传统载人舰船配合的能



(a) 美国MQ-9B“海上卫士”无人机 (b) 美国海军中央司令部举行了“数字魔爪”演习

图5 2023年无人机集群交战发展

力,可将12种不同的无人机系统、水面无人舰艇和 水下无人潜航器等无人系统和有人系统整合在一起,识别和瞄准海上模拟敌对力量,在多域作战中实现跨域聚能^[77](图5(b))。

Qamar等^[78]提出了一种多无人机系统下的任务分配算法,该算法基于性能影响(performance impact, PI)任务评分机制,通过迭代更新每个无人机的任务列表,并与相邻无人机共享任务信息来达成共识。在任务选择过程中,考虑了任务优先级、截止时间、距离等因素。相较于传统的PI算法,该算法增加了电池寿命限制这一约束条件,使得任务分配更加合理。该算法解决了多无人机系统下如何高效地分配任务给各个无人机的问题,特别是在紧急救援等场景中具有重要意义。王峰等^[79]开发一种基于拐点的协同多目标粒子群优化的异构无人机协同多任务分配方法,构建了一个基于多种约束条件的异构无人机协同多任务分配模型,并提出多目标粒子群优化算法来解决这个问题。该算法采用基于拐点的学习策略来更新外部档案集,同时引入基于学习的粒子更新策略和基于区间扰动的局部搜索策略来提高算法的收敛性和多样性。滕康等^[80]提出了一种改进的“当前”统计模型自适应滤波算法,改进算法对机动目标跟踪较传统算法具有更好的效果,提高了跟踪精度。王传云等^[81]提出的无人机多目标连续鲁棒跟踪算法(unmanned aerial vehicle multiple object tracking, UAVS-MOT)解决了复杂场景及远距离探测条件下无人机集群目标之间相互遮挡、无人机为弱小目标等原因造成的检测精度降低和跟踪精度降低问题。Wang等^[82]通过综合观测器在邻域间的动态特性,提出了一种新型的协同跟踪控制器,以解决模型不确定性和非线性动力学参数不一致的问题(图6(a))。Cheng等^[83]提出了一种包含多架无人机和多架地面无人飞行器的LF(leader-follower)异构多智能体系统(heterogeneous multi-agent systems, HMAS)在执行器故障和干扰下的容错编队控制方案。Wang等^[84]研究了一组同时受外部干扰和切换通信拓扑的四旋翼机的分布式编队控制问题,结合了每个四旋翼飞行器的

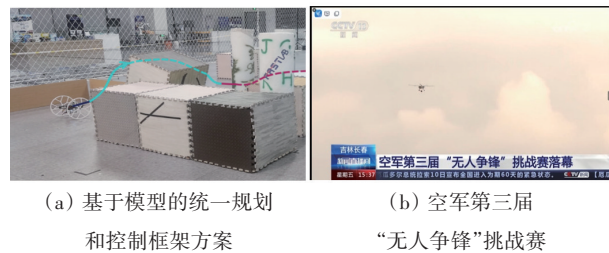


图6 2023年无人机集群控制与自主决策对抗

位置和姿态控制律提出了鲁棒控制器,保证了推力相对于位置误差有界。

2023年8月,空军在吉林长春成功举办第三届“无人争锋”挑战赛,大赛设置了拒止环境穿越竞速、无人加受油、使命召唤、空中回收等新质作战样式,其中设置“异构协同召唤打击”科目,通过旋翼无人机侦搜目标位置,引导固定翼无人机投掷模拟弹药打击,考核有人、无人协同作战、目标精确定位识别能力。段海滨团队第一次成功实现了自空军“无人争锋”智能无人机集群系统挑战赛创立以来纯固定翼无人机的空中自主加油,并在“使命召唤”等比赛科目中斩获佳绩(图6(b))^[85]。

2023年8月,由南京理工大学、国防科技大学、中国航天科工集团等联合主办的2023“照萤杯”智能无人系统应用挑战赛在南京理工大学江阴校区成功举办(图7)。本届大赛设置基础赛道、算法赛道、自主赛道、表演赛道4大赛道,分为F1TENTH无人车竞速中国赛、无人车避障、快递速达、飞行避障、协同追踪、空地协同6个竞赛科目和1个水面水下表演科目。大赛核心内容与未来无人系统应用高度契合,为智能无人系统研究领域展示更多的新进展、新成果、新应用,推动国内智能无人系统技术创新和产学研用深度融合。

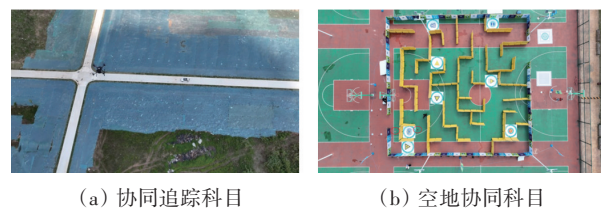


图7 2023“照萤杯”智能无人系统应用挑战赛

5 反无人机技术

随着无人机行业的迅猛发展,无人机所引发的各类问题也日益严重,对安全带来了风险和隐患。为了有效地应对这些问题,无人机反制技术引起了全球范围内的关注和重视。一些国家在反无人机领域的研究起步比较早^[86]。2023年8月初,由英国牵头的五国预计为乌克兰提供价值1.15亿美元的防空装备,其中包括与挪威国防公司康士伯签订的一份价值5600万英镑的合同,提供MSI-DS战鹰圣骑士系统,该系统是专为增强近距离防空的机动性而开发,可以高效跟踪和摧毁无人机^[87]。2023年8月底在俄罗斯“军队-2023”论坛上亮相的新式反无人机装备,其中重点装备包括ZAK-23E防空武器系统(图8(a))、“镰刀-VS6”武器系统(图8(b))和“蝶螭”干扰装置,ZAK-23E防空武器系统装置在有效射程范围内可有效拦截固定翼飞机、无人机、直升机、空对面精确制导弹药、巡航导弹等空中来袭兵器。“镰刀-VS6”武器系统(图8(b))主要用于对各类无人机和巡飞弹的控制、导航和通信信号进行干扰。“蝶螭”干扰装置是俄罗斯圣彼得堡无人机制造商实验室展示的一种模块化杀伤式反无人机武器^[88]。在俄乌冲突中,反无人机系统也有着非常不错的表现,例如在2023年9月份,乌克兰接受了挪威康斯博格防务与航空航天公司交付的“皮层台风”反无人机系统,“皮层台风”是为应对无人机开发的,可通过多种方式应对无人机威胁,包括监视系统、遥控武器站,还有“月神”无人机具备实时侦察、分类和识别目标的能力。全系统由地面控制站以及快速维修设备组成^[89]。2023年10月,美国雷神技术公司宣布,在美国陆军年度夏季试验期间,成功演示验证了“低慢小无人机一体化防御系



(a) ZAK-23E防空武器系统 (b) “镰刀-VS6”武器系统

图8 2023年反无人机技术

统”的任务能力,低慢小无人机一体化防御系统中Ku波段雷达进行全向持续探测,成功跟踪了由30多架无人机组成的复杂蜂群^[90],2023年11月,美国在沙特阿拉伯的一次演习中展示了“猎人”“杀手”和迷你枪的远程操作武器系统的通用平台(common remotely operated weapon station, CROWS)版本的反无人机集装箱,打击力度密集,即使在偏远和艰苦的地方也可以随时部署^[91]。

2023年10月,美国陆军将反无人机能力提升至排级,采取措施增强其对抗小型无人机的能力。陆军联合反小型无人机系统办公室正在领导这些工作,应对质量从0.55磅到超过1000磅的无人机。第82空降师和第1骑兵师已经具备了反无人机能力,计划将其扩展到排级,提供手持和电子战能力。来自陆军各个专业的士兵将被指派来操作这些系统。

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所为了增强对“低、慢、小”无人机的检测和识别,将深度学习目标检测和超分辨率特征相结合。设计了一种轻型无人机检测模型并进行了现场验证,在传统的YOLOv4算法的基础上,对改进后的网络进行了定量分析,显著减小其深度和宽度^[92]。Huang等^[93]提出了一种通用的红外无人机跟踪基准,称为Anti-UAV410。该基准包括总共410个视频,其中包含超过438 K手动注释的边界框。为了应对复杂环境中无人机跟踪的挑战,研究给出了一种新的方法,称为暹罗无人机跟踪器(Siamese drone tracker, SiamDT)结合了双语义特征提取机制,该机制对动态背景杂波中的目标进行显式建模,从而能够有效跟踪小型无人机。Choi等^[94]把ALOHA协议修改为无人机中一群无人机的快速识别通信环境,能快速检测并且利用空闲的时间间隙向无人机发送控制信息,因此该协议控制无人机蜂群的进入更具有适应性和反馈性。为了应对这种“小”“快”“灵”的大规模集群无人机,Souli等^[95]在2023年2月提出了一种新的多智能体干扰系统,其中一组协作的自主智能体采用检测、跟踪、干扰和自定位及基于机会信号的相对定位系统,结合惯性和视觉测量从而更好地跟踪并且拦截无人机。同年,面向地面用户如何应对空中智能干扰无人机的不确定性的挑战,

Feng等^[96]提出了一种多智能体强化学习的无模型方法来解决上述问题,为了解决基于维度爆炸的问题以及局部最优收敛性的问题,还提出了一种基于Beta的策略优化算法能够实现稳定只干扰无人机的策略。

无人机技术和反无人机技术之间存在着一种矛盾而又互补的关系。随着无人机技术的不断发展和应用,反无人机技术也在不断完善和创新,以保障社会的安全和秩序。反无人机技术的发展涉及无人机探测、识别和中和等方面的技术创新。尤其是人工智能技术的应用,使得反无人机技术的探测和识别能力进一步增强。为了促进反无人机行业的发展和推动技术革新,制定相应的政策支持和标准规范是非常重要的。

6 结论

从无人机管控政策、技术革新、关键技术、集群验证和反无人机技术等方面总结了2023年无人机军民两用方面的全新的发展。中国的无人机发展正在推动着包括航空、物流、农业、测绘、应急救援等多个领域的革新和变革。在相关管控政策的约束下,无人机在低空空域得到了有效的发展。视觉避障、人工智能、无人自主仿生智能等技术的应用使得无人机之间的协作可以实现更复杂的任务和更高效的工作方式。同时,与其他无人装备的跨域合作也可以在整个智能系统中实现更大的协同效应,同时也为军事作战提供了许多新的可能性和优势。无人机的关键技术突破对其发展和应用产生了深远的影响^[97],飞行性能的提升、自主决策能力的增强以及应用领域的扩展都给软件算法的不断突破和硬件设备的性能带来极大的挑战,必将推动无人机的快速发展,推动其迈向一个新的台阶。

参考文献(References)

- [1] 段海滨, 申燕凯, 王寅, 等. 2018年无人机领域热点评述[J]. 科技导报, 2019, 37(3): 82-90.
- [2] 段海滨, 申燕凯, 赵彦杰, 等. 2019年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(1): 170-187.
- [3] 段海滨, 申燕凯, 赵彦杰, 等. 2020年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2021, 39(1): 233-247.
- [4] 段海滨, 何杭轩, 赵彦杰, 等. 2021年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2022, 40(1): 215-227.
- [5] 段海滨, 何杭轩, 赵彦杰, 等. 2022年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2023, 41(1): 215-229.
- [6] 美航母进入波斯湾, 伊朗紧盯[N]. 环球时报, 2023-11-30(8).
- [7] 梁晓龙, 杨爱武, 张佳强, 等. 无人集群博弈对抗系统仿真验证及决策关键技术综述[J/OL]. 系统仿真学报, [2023-12-02]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.jos-s.23-0072>.
- [8] 五方面着力促进低空经济发展[EB/OL]. (2023-01-31)[2023-12-01]. http://www.jjckb.cn/2023-01/31/c_131069-3816.htm.
- [9] 加快无人机监管改革 驱动低空经济发展[EB/OL]. (2023-03-06)[2023-12-01]. http://www.caacnews.com.cn/2023zhuanti/2023lh/2023lhzd/202303/t20230306_136438-9.html.
- [10] 我国主导制定的两项无人机领域国际标准正式发布[EB/OL]. (2023-05-15)[2023-12-01]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/zbes/gzdt/art/2023/art_dda359fd502e4f5e91a-ba6139ae78b9b.html.
- [11] 无人驾驶航空器飞行管理暂行条例[EB/OL]. (2023-05-31)[2023-12-01]. https://wap.miit.gov.cn/jgsj/zfs/xzfg/art/2023/art_ece2749074fd4c53a915b964d2264fd8.html.
- [12] GB 42590—2023《民用无人驾驶航空器系统安全要求》[EB/OL]. (2023-06-02)[2023-12-02]. https://www.samr.gov.cn/xw/tp/art/2023/art_c10d94e98310480d84567dc3a-d5a1a11.html.
- [13] NASA. Five ways NASA supercomputing takes missions from concept to reality[EB/OL]. (2023-11-13)[2023-12-01]. <https://www.nasa.gov/general/five-ways-nasa-super-computing-takes-missions-from-concept-to-reality>.
- [14] 我国主导制定的三项无人机领域国际标准正式发布[EB/OL]. (2023-10-26)[2023-12-01]. https://wap.miit.gov.cn/xwdt/gxdt/sjdt/art/2023/art_16d9b1ccd06d4ba1a6f-66e6dbab858bb.html.
- [15] 《民用无人驾驶航空器系统物流运行通用要求第1部分: 海岛场景》的通知[EB/OL]. (2023-10-30)[2023-12-01]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/BZGF/HYBZ/202310/t20231031_221872.html.
- [16] 国家国防科工局, 中央军委装备发展部. 关于对无人机相关物项实施出口管制[EB/OL]. (2023-11-15)[2024-01-08]. <http://qa.mofcom.gov.cn/article/ddfg/tz-zhch/202311/20231103453639.shtml>.

- [17] 国家标准化管理委员会关于提前实施《民用无人驾驶航空器系统安全要求》国家标准主要条款的通知[EB/OL]. (2023-11-30)[2023-12-01]. https://www.sac.gov.cn/xw/tzgg/art/2023/_e7a662baaac64301a4b78507d5bf4-c71.html.
- [18] 工业和信息化部《民用无人驾驶航空器无线电管理暂行办法》[EB/OL]. (2023-12-29)[2024-01-05]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/wgj/bmgz/art/2023/art_6b8e0b9d39-a449fabd34fd492de6e1eb.html.
- [19] 给输电线路“体检”，无人机“小航母”来了[EB/OL]. (2023-11-14)[2023-12-05]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1782507192806466403&wfr=spider&for=pc>.
- [20] 全球首创！中国科学院长春光机所自主研发制造的新型无人机[EB/OL]. (2023-11-22)[2023-12-05]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1783226966548780022&wfr=spider&for=pc>.
- [21] 土耳其舰载无人机完成首飞[EB/OL]. (2023-11-28)[2023-12-05]. https://m.gmw.cn/2023-11/28/content_13-03584609.htm.
- [22] Li X, Diao W, Mao Y, et al. OGMN: Occlusion-guided multi-task network for object detection in uav images[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, 199: 242-257.
- [23] Liu Z H, Shang Y Y, Li T M, et al. Robust multi-drone multi-target tracking to resolve target occlusion: A benchmark[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2023, 25: 1462-1475.
- [24] Müller H, Niculescu V, Polonelli T, et al. Robust and efficient depth-based obstacle avoidance for autonomous miniaturized UAVs[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2023, 39(6): 4935-4951.
- [25] Marcucci T, Petersen M, Von Wrangel D, et al. Motion planning around obstacles with convex optimization[J]. *Science Robotics*, 2023, 8(84): eadf7843.
- [26] Stache F, Westheider J, Magistri F, et al. Adaptive path planning for UAVs for multi-resolution semantic segmentation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, 159: 104288.
- [27] Wu L Y, Xi Z Y, Zheng Z, et al. Application of metamorphic testing on UAV path planning software[J]. *Journal of Systems and Software*, 2023, 21: 111769.
- [28] Kaufmann E, Bauersfeld L, Loquercio A, et al. Champion-level drone racing using deep reinforcement learning[J]. *Nature*, 2023, 620(7976): 982-987.
- [29] Song Y, Romero A, Müller M, et al. Reaching the limit in autonomous racing: Optimal control versus reinforcement learning[J]. *Science Robotics*, 2023, 8(82): eadg14-62.
- [30] Chahine M, Hasani R, Kao P, et al. Robust flight navigation out of distribution with liquid neural networks[J]. *Science Robotics*, 2023, 8(77): eadc8892.
- [31] Sanket N J, Singh C D, Fermüller C, et al. Ajna: Generalized deep uncertainty for minimal perception on parsimonious robots[J]. *Science Robotics*, 2023, 8(81): eadd5-139.
- [32] 段海滨, 霍梦真. 鸽群优化[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [33] Aucone E, Kirchgeorg S, Valentini A, et al. Drone-assisted collection of environmental DNA from tree branches for biodiversity monitoring[J]. *Science Robotics*, 2023, 8(74): eadd5762.
- [34] Meng K T, Wu Q Q, Xu J, et al. UAV-enabled integrated sensing and communication: Opportunities and challenges[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, doi: 10.1109/MWC.131.2200442.
- [35] Zhao J W, Gao F F, Jia W M, et al. Integrated sensing and communications for UAV communications with jittering effect[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2023, 12(4): 758-762.
- [36] 赵拓, 邓汉强, 高佳隆, 等. 基于网络节点聚类的多无人机动态目标分配[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(4): 695-708.
- [37] Wang Y D, Liu W Z, Liu J, et al. Cooperative USV-UAV marine search and rescue with visual navigation and reinforcement learning-based control[J]. *ISA Transactions*, 2023, 137: 222-235.
- [38] 徐小斌, 段海滨, 曾志刚. 仿猛禽视觉多分辨率的海上无人艇协同跟踪[J]. *智能系统学报*, 2023, 4: 867-877.
- [39] Gao C X, Wang X Y, Wang R Y, et al. A UAV-based explore-then-exploit system for autonomous indoor facility inspection and scene reconstruction[J]. *Automation in Construction*, 2023, 148: 104753.
- [40] Xu Z F. A real-time dynamic obstacle tracking and mapping system for UAV navigation and collision avoidance with an RGB-D camera[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. London, United Kingdom: IEEE, 2023: 10645-10651.
- [41] Gallo E, Barrientos A. GNSS-denied semi-direct visual navigation for autonomous UAVs aided by PI-inspired inertial priors[J]. *Aerospace*, 2023, 10(3): 220.
- [42] Lin H Y, Zhan J R. GNSS-denied UAV indoor navigation with UWB incorporated visual inertial odometry[J].

- Measurement, 2023, 206: 112256.
- [43] Çoban S. Stochastic redesign of mini UAV wing for maximizing autonomous flight performance[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2023, 2: 2667.
- [44] Zhao Y H, Yan L, Dai J C, et al. Robust planning system for fast autonomous flight in complex unknown environment using sparse directed frontier points[J]. Drones, 2023, 7(3): 219.
- [45] Choi J, Kim H M, Hwang H J, et al. Modular reinforcement learning for autonomous UAV flight control[J]. Drones, 2023, 7(7): 418.
- [46] Zhu X D, Lai J Z, Zhou B C, et al. A cooperative localization method for leader-follower multiple UAVs using continuous relative ranging information[J]. Guidance, Navigation and Control, 2023, 3(2): 2350010.
- [47] Yang G B, Wang T, Yang M, et al. Adaptive tracking control for unknown dynamics systems with SINDYc-based sparse identification[J]. Guidance, Navigation and Control, 2023, 3(2): 2350009.
- [48] Liu G Q, Li B, Duan G R. An optimal FASA approach for UAV trajectory tracking control[J]. Guidance, Navigation and Control, 2023, 3(2): 2350015.
- [49] Zhang C H, Huang G J, Liu L, et al. Webuav-3M: A benchmark for unveiling the power of million-scale deep UAV tracking[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2023, 45(7): 9186-9205.
- [50] Zou F, Li J, Niu Y F. Time-coordinated path following for multiple agile fixed-wing UAVs with end-roll expectations[J]. Guidance, Navigation and Control, 2023, doi: 10.1142/S2737480723500206.
- [51] Gao X H, Wang L, Yu X Y, et al. Conditional probability based multi-objective cooperative task assignment for heterogeneous UAVs[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 123: 106404.
- [52] Wang K H, Zhang X, Qiao X Y, et al. Adjustable fully adaptive cross-entropy algorithms for task assignment of multi-UAVs[J]. Drones, 2023, 7(3): 204.
- [53] Jiang H H, Wang G Y, Liu Q, et al. Hierarchical multi-UAVs task assignment based on dominance rough sets [J]. Applied Soft Computing, 2023, 143: 110445.
- [54] Yuan D P. UAVS task assignment based on hybrid swarm intelligence algorithm[C]//2023 8th International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC). Dalian, China: IEEE, 2023: 783-788.
- [55] Wang W F, Ru L, Lv M L, et al. Multi-time-stage collaborative task assignment for heterogeneous UAVs using CBBA[C]//2023 9th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Beijing, China: IEEE, 2023: 193-198.
- [56] Jia Z S, Xiao B, Qian H Y. Improved mixed discrete particle swarms based multi-task assignment for UAVs[C]//2023 IEEE 12th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS). Xiangtan, China: IEEE, 2023: 442-448.
- [57] Xu L, Cao X B, Du W B, et al. Cooperative path planning optimization for multiple UAVs with communication constraints[J]. Knowledge-based Systems, 2023, 260: 110164.
- [58] Zhang D Y, Li X W, Ren G Q, et al. Three-dimensional path planning of UAVs in a complex dynamic environment based on environment exploration twin delayed deep deterministic policy gradient[J]. Symmetry, 2023, 15(7): 1371.
- [59] Luo X L, Zhang T Y, Xu W X, et al. Multi-tier 3D trajectory planning for cellular-connected UAVs in complex urban environments[J]. Symmetry, 2023, 15(9): 1628.
- [60] Samir M, Sharafeddine S, Assi C M, et al. UAV trajectory planning for data collection from time-constrained iot devices[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 19(1): 34-46.
- [61] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [62] 胡树欣, 张安, 孙嫚忆, 等. 基于一致性理论和S-MPC的四旋翼编队协同避障[J]. 系统工程与电子技术, 2023, doi: 11.2422.TN.20230905.2126.004.
- [63] Dixit A, Agrawal P, Misra A, et al. Adaptive sliding mode controller based consensus protocol for swarm of UAVs[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2023, 95(4): 619-628.
- [64] Yan D H, Zhang W G, Chen H, et al. Robust control strategy for multi-UAVs system using MPC combined with Kalman-consensus filter and disturbance observer [J]. ISA Transactions, 2023, 135: 35-51.
- [65] Yan C, Wang C, Xiang X J, et al. Collision-avoiding flocking with multiple fixed-wing UAVs in obstacle-cluttered environments: A task-specific curriculum-based MADRL approach[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2023, doi: 10.1109/TNNLS.2023.3245124.
- [66] Song Y, Lim S, Myung H, et al. Distributed swarm system with hybrid-flocking control for small fixed-wing

- UAVs: Algorithms and flight experiments[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 229: 120457.
- [67] 段海滨, 孙永斌. 无人机空中加油自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [68] Hou Y Q, Liang X L, Zhang J Q, et al. Hierarchical decision-making framework for multipleUCAVs autonomous confrontation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2023, 72(11): 13953–13968.
- [69] Gong Z H, Xu Y, Luo D L. UAV cooperative air combat maneuvering confrontation based on multi-agent reinforcement learning[J]. *Unmanned Systems*, 2023, 11(3): 273–286.
- [70] Li S Y, Wu Q X, Du B, et al. Autonomous maneuver decision-making ofUCAV with incomplete information in human-computer gaming[J]. *Drones*, 2023, 7(3): 157.
- [71] Xia W, Zhou Z Y, Jiang W Y, et al. Dynamic UAV swarm confrontation: An imitation based on mobile adaptive networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59(5): 7183–7202.
- [72] Wu P C, Wang H Q, Liang G W, et al. Research on unmanned aerial vehicle cluster collaborative countermeasures based on dynamic non-zero-sum game under asymmetric and uncertain information[J]. *Aerospace*, 2023, 10(8): 711.
- [73] Ren Z, Zhang D, Tang S, et al. Cooperative maneuver decision making for multi-UAV air combat based on incomplete information dynamic game[J]. *Defence Technology*, 2023, 27: 308–317.
- [74] Abdallaoui S, Ikaouassen H, Kribèche A, et al. Autonomous vehicle control systems—state of the art of decision-making and maneuver execution[J]. *Authorea*, 2023: 1–12.
- [75] 美国海军加快兵力调整步伐, 图谋打造无人舰队维持海上霸权[EB/OL]. (2023-09-28)[2023-12-02]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1778237524515707882&wfr=spider&for=pc>.
- [76] 美海军太平洋舰队5月1日启动其第二次“无人系统一体化战斗问题”演习[EB/OL]. (2023-05-08)[2023-12-02]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=23094048990-43594863075>.
- [77] 美海军举办“数字魔爪”演习以提高无人系统的杀伤力[EB/OL]. (2023-11-07)[2023-12-02]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUxMTAyNzc0NQ==&mid=22475189-77&idx=1&sn=1ad19e7376f01e3acd4d4f43b681a7a&chksm=f97b344fce0cbd59981ad8d8d8cf7b56f22ba423af24-cc36adedcfac33433bdcc2bf9bb0c4d&scene=27.
- [78] Qamar R A, Sarfraz M, Rahman A, et al. Multi-criterion multi-UAV task allocation under dynamic conditions[J]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2023, 35(9): 101734.
- [79] 王峰, 黄子路, 孟臣, 等. 基于KnCMPSO算法的异构无人机协同多任务分配[J]. *自动化学报*, 2023, 49(2): 399–414.
- [80] 滕康, 周勇. 基于当前统计模型改进的机动目标自适应跟踪算法[J]. *现代雷达*, 2023, 1: 1–9.
- [81] 王传云, 苏阳, 王琳霖, 等. 面向反制无人机集群的多目标连续鲁棒跟踪算法[J]. *航空学报*, 2023, 1: 1–15.
- [82] Wang B H, Chen W S, Zhang B, et al. A nonlinear observer-based approach to robust cooperative tracking for heterogeneous spacecraft attitude control and formation applications[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2023, 68(1): 400–407.
- [83] Cheng W L, Zhang K, Jiang B. Fixed-time fault-tolerant formation control for a cooperative heterogeneous multi-agent system with prescribed performance[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2023, 53(1): 462–474.
- [84] Wang Y H, Yu G, Xie W, et al. Robust saturated formation tracking control of multiple quadrotors with switching communication topologies[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2023, 10(6): 3744–3753.
- [85] 空军第三届“无人争锋”挑战赛落幕[EB/OL]. (2023-08-11)[2023-12-02]. <https://tv.cctv.cn/2023/08/11/VIDEmg-8bo1b511ycQdXnpJLW230811.shtml>.
- [86] 张珣, 张静, 胡中雨. 国外无人机反制技术发展探析[J]. *数字通信世界*, 2023(4): 4–6.
- [87] 英国牵头的五国将为乌克兰提供价值1.15亿美元的防空装备[EB/OL]. (2023-08-18)[2023-12-02]. <https://baijiahao.baidu.com/sid=1774557468477040954&wfr=spider&for=pc>.
- [88] “军队-2023”国际军事技术论坛 新式反无人机装备[EB/OL]. (2023-09-01)[2023-12-02]. https://mil.sohu.com/a/716814629_121245527.
- [89] 乌克兰接收新装备, 反无人机系统、“月神”NG无人机[EB/OL]. (2023-09-11)[2023-12-02]. <https://weibo.com/ttarticle/p/show?id=2309404944831502745834>.
- [90] 雷神技术验证低慢小无人机防御系统, 美陆军正在重建近程防空力量[EB/OL]. (2023-10-25)[2023-12-02]. <https://mil.ifeng.com/c/8UlaRC6qI9R>.
- [91] 美国陆军战士集装箱军用反无人机系统[EB/OL]. (2023-11-23)[2023-12-03]. <https://mp.weixin.qq.com/s?>

- __biz=MzI4OTkyNDgxNA==&mid=2247867493&idx=2-&sn=e0894b443b6795ba848ca8.
- [92] Dong Y X, Ma Y J, Li Y, et al. High-precision real-time UAV target recognition based on improved YOLOv4 [J]. Computer Communications, 2023, 206: 124-132.
- [93] Huang B, Li J N, Chen J J, et al. Anti-UAV410: A thermal infrared benchmark and customized scheme for tracking drones in the wild[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2023(1): 1-14.
- [94] Choi H H, Oh J, Kang K M, et al. Idle-less slotted ALOHA protocol for drone swarm identification[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(8): 11080-11085.
- [95] Souli N, Kolios P, Ellinas G. Multi-agent system for rogue drone interception[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2023, 8(4): 2221-2228.
- [96] Feng Z K, Huang M X, Wu Y Y, et al. Approximating nash equilibrium for anti-UAV jamming Markov game using a novel event-triggered multi-agent reinforcement learning[J]. Neural Networks, 2023, 161: 330-342.
- [97] 钟春来, 杨洋, 曹立佳, 等. 基于视觉的无人机自主着陆研究综述[J]. 航空兵器, 2023, 30(5): 104-114.

Review of technological hotspots of unmanned aerial vehicle in 2023

DUAN Haibin¹, MEI Yu¹, ZHAO Yanjie², HUO Mengzhen¹, NIU Yifeng³, WANG Yin⁴, YUAN Wanmai², DENG Yimin¹, FAN Yanming⁵, ZHU Jihong⁶, LI Xuan⁷, LUO Delin⁸

1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China
2. Information Science Academy of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100086, China
3. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China
4. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
5. Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110035, China
6. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China
7. Department of Mathematics and Theory, Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518000, China
8. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract In 2023 innovations and breakthroughs were achieved in UAV technology, showing remarkable technological innovation progress and wide application situation. This paper comprehensively analyzes the scientific and technological hotspots of UAV in 2023 from multiple perspectives, such as UAV control policy, technology innovation, key technologies, UAV cluster verification, and anti-UAV technology. With the improvement of visual emergency obstacle avoidance technology and intelligent autonomous flight ability, the performance and function of UAV were significantly improved. With the continuous popularization and application of Uavs, the key technologies, combat styles and platform construction of UAV swarms were also constantly improving. Industry customization, independent intelligence and cross-domain actual combat are still important directions for the future development of UAVs.

Keywords unmanned aerial vehicle; industry standards; technological innovation; swarm intelligence ●



(责任编辑 徐丽娇)