

2022年无人机热点回眸

段海滨¹, 何杭轩¹, 赵彦杰², 王寅³, 霍梦真¹, 牛轶峰⁴, 范彦铭⁵, 朱纪洪⁶,
袁莞迈², 邓亦敏¹, 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, 仿生自主飞行系统研究组, 北京 100083
2. 中国电子科技集团公司智能科技研究院, 北京 100086
3. 南京航空航天大学航天学院, 南京 210016
4. 国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073
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, 虚拟现实基础研究室, 深圳 518000
8. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361102

摘要 2022年, 无人机技术研究加速推进, 并取得了一系列突破性进展。从无人机政策法规、设计实现、关键技术、人机交互、反无人机等方面回顾了2022年无人机领域热点和动向。随着视觉导航、人工智能技术的进步与普及, 无人机综合能力不断提升, 应用领域持续扩大, 无人机集群关键技术、平台建设与执行任务样式不断完善, 自主化、智能化、跨域化、集群化、体系化是当前无人机的技术发展趋势。

关键词 无人机; 行业规范; 科技热点; 集群智能

随着技术更新迭代与逐步成熟, 无人机产业规模不断扩大, 大众接触无人机的门槛越来越低, 工业级无人机在农业作业、安防巡逻、资源勘探、抗震救灾、森林防火、禁毒侦察等方面发挥着越来越重要的作用, 成为人们不可缺失的“得力助手”。与此

同时, 新兴行业应用不断被开发, 物流运输、空中交通领域逐步展现蓬勃活力, 为智慧物流、智慧城市、智慧工业的建设添砖加瓦。新政策、新法规、新标准的持续出台保障了无人机行业的健康、可持续发展。

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2023-01-05

基金项目: 科技部科技创新2030—“新一代人工智能”重大项目(2018AAA0102403); 国家自然科学基金项目(91948204, U19B2029, 61876187, T2121003, U20B2071)

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, 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; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.

01.016

无人机的潜力不断被挖掘,与仿生智能相融合的新构型无人机层出不穷,不仅可在狭窄空域中飞行,还能实现跨域作业,功能愈发多样化。随着微电子、视觉导航、人工智能等前沿技术的发展,无人机的敏捷性、智能性、自主性大幅提升。同时,无人机集群作业的优势日加彰显,吸引了世界各地研究者的广泛关注,无人机集群技术依然是当前的研究热点和制高点。随着协同合作、感知交互、人机共融、协同评估等关键技术的不断突破,无人机集群的应用领域将得到进一步深化,自主化、智能化、跨域化、集群化、体系化依然是当前无人机的技术发展趋势。

无人机已是目前军事领域的重要作战力量。在2022年的俄乌冲突中,无人机的运用在一定程度上决定了战役的走向^[1],在作战行动中已成为不可替代的重要力量。随着作战范围的不断扩大,任务场景的快速变化,无人机技术朝着集群自主、跨域协同和人机共融的模式不断转化,体现出智能化、体系化的特征。随着人工智能的发展与深度融合,无人机系统具有更强的自主性(即任务和运动规划的能力)以及更高的智能化水平(即决策和推理的能力),也将在作战模式中承担主要作战角色^[2]。

本研究回顾2022年无人机领域的相关技术研究进展,对部分关键技术和未来发展趋势进行分析和展望。

1 无人机商业应用与政策

从无人机的商业应用模式来看,消费级无人机市场已趋近饱和,工业无人机逐渐深入崛起,特别是新冠疫情暴发以来,无人机行业在疫情期间大显身手,作为智能无人化工作的代表,无人机具有高效无休的工作能力,零接触的工作特点,成为阻断疫情传播的防控利器。农业无人机已在各地得到广泛应用,推动农业向新技术发展,助力乡村振兴。安防巡逻无人机辅助构建移动巡逻监控体系,可及时应对突发情况。除植保、巡逻外,物流以及空中交通是无人机商用发展的前沿方向。为进一步促

进行行业发展,各国纷纷布局相关赛道,加速完善基础设施,制定行业标准。

2022年6月,欧盟航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)发布了城市垂直起降空中出租车运营的拟议规则,内容包括垂直起降数量限制、运营高度限制以及线路规划,进一步补充了欧盟无人驾驶飞机系统的运行规范,是首个发布针对垂直起降飞机运营的综合监管框架的航空监管机构^[3]。2022年7月,英国政府发布了《在英国推进自主空运商用无人机节省资金和挽救生命(Advancing Airborne Autonomy Commercial Drones Saving Money and Saving Lives in the UK)》政策性文件(图1(a)),提出将加大对无人机技术扶持力度,建立监管框架,通过无人机推动社会经济发展,并在2030年实现商用无人机在英国全国范围内的普及^[4]。



(a) 英国自主空运商用
无人机政策性文件

(b) 《信息技术 无人
集群 术语》团体标准

图1 2022年无人机行业指南与标准

2020年美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出的“先进空中交通(Advanced Air Mobility, AAM)”项目持续推进,2022年3月,NASA与美国国防研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)合作,对S-76B商用直升机进行飞行测试,内容包括测试自主飞行系统响应能力以及人机交互性能,旨在推动垂直起降无人机技术发展,以适应未来空中交通需求^[5]。2022年11月,美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)发布提案,

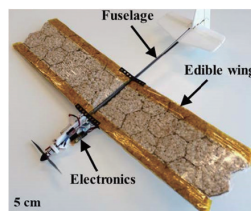
将垂直起降飞机运营纳入航空商业运营的法规中,并发布了相关适航标准^[6]。物流无人机还可应用于军事补给。美国海军空战中心飞机部(Naval Air Warfare Center Aircraft Division, NAWCAD)计划在航空母舰上部署多架货运无人机,用于配送所需电子零件或组件,适航无人机需要能够在强风等恶劣环境下降落在移动船上^[7]。

2022年5月,中国电子技术标准化研究院和北京航空航天大学等多家单位发布并正式实施了《信息技术 无人集群 术语》团体标准(图1(b)),界定了智能无人集群系统的架构、感知、控制、通信、任务和评估的术语和定义,适用于智能无人集群系统的设计、研制、使用和维护以及相关技术的贸易及交流^[8]。2022年8月,由中国牵头制定的第2项无人机领域国际标准ISO 24356: 2022《系留无人机系统通用要求》正式发布,该标准的发布标志着中国在世界无人机领域技术和市场的持续认可^[9]。中国民航局^[10]首次编制航空物流发展专项规划,并于2022年2月印发《“十四五”航空物流发展专项规划》,明确提出支持无人机物流行业探索,建立相关规章标准体系。9月,交通运输部发布了《无人机物流配送运行要求》(以下简称《要求》),规定了支线无人机物流、末端无人机物流的运行标准,于2022年12月13日正式实施^[11]。10月,交通运输部印发《交通运输智慧物流标准体系建设指南》,与无人机物流相关的有4项标准,不仅有《无人机快递投递服务规范》《要求》,还增加有《邮政快递无人机监管信息交互规范》以及突出智慧物流特征的《物流配送5G应用技术要求》^[12]。云南、深圳、四川、湖南、浙江等地响应“十四五”规划,纷纷出台无人机相关规划与条例,鼓励高端工业无人机在运输、应急救援、巡查等方面的应用^[13]。

发展低空空域是国内外普遍趋势。规范标准体系建设在适应无人机发展需要的同时促进行业发展。中国无人机产业发展迅猛,在国际舞台上发挥越来越重要的作用。随着第五代通信技术(5G)、物联网、人工智能等新一代信息技术的成熟与普及,无人机各类创新应用将不断拓展,无人机行业规模将持续扩大,不断迈向新的台阶。

2 新概念无人机设计实现技术

物流无人机有着巨大的发展前景,但是目前的商业物流无人机多为旋翼机,携带物品质量不超过其自身质量的10%~30%。为提高无人机的载重比,瑞士洛桑联邦理工学院Floreato团队与荷兰瓦格宁根大学研究人员^[14]合作研发了一款可食用固定翼运输无人机(图2(a)),专用于赈灾中食物运输。该无人机机翼采用大米饼干制作,其飞行性能也在实际环境中得到了验证。此外,为进一步提高物流无人机的通用性,Floreato团队^[15]设计了一种可拼接物流旋翼机,以包裹作为机身,团队设计的软件能够根据包裹大小选取合适机型并生成相应的控制参数。飞行汽车是面向城市立体交通和未来出行的新型交通工具,是解决城市发展面临的交通拥堵和环境污染的有效路径。2022年11月,北京理工大学与多家单位联合发布了由中国工程院院士项昌乐团队研发的全球首款载人级两座智能分体式飞行汽车工程样车(图2(b)),通过陆空协同精确感知定位、智能决策规划和自动引导对接等技术实现模块组合重构,并可切换陆空不同行驶模式^[16]。



(a) 瑞士洛桑联邦理工学院
可食用固定翼运输无人机



(b) 北京理工大学飞
行汽车工程样车

图2 2022年新概念无人机新突破

仿生无人机由于机械结构与生物类似,具有较好的环境适应性,是当前研究热点。英国伦敦帝国理工学院Zhang等^[17]受自然界中蜜蜂筑巢的启发,提出了一套无人机群增材制造系统。该系统由2类无人机组成,一类用于3D打印材料,一类用于测量打印质量。该系统基于实时模型预测控制方法,可在有人监督下打印最高2.05 m的结构(图3(a))。美国华盛顿大学Fuller等^[18]设计了一种质量仅10 mg的微型飞行器,受果蝇视觉启发,其中传

感器只使用了三轴加速度计以及一个面向地面的光流微型相机。该飞行器上的视觉处理算法能够测量视觉移动速度以及侧向移动速率,从而计算风速抵抗风扰。受猛禽捕猎启发,洛桑联邦理工学院 Stewart 等^[19]基于固定翼无人机,设计了仿鹰爪的被动式驱动机械爪,并实现了飞行员操纵下无人机的高速抓取(图 3(b))。西班牙塞维利亚大学 Zufferey^[20]开发出一款仿鹰腿爪系统,应用在扑翼无人机,完成了自主降落树枝上的过程,该方法可以在 25 ms 内完成抓取树枝和复飞过程,为无人机提供了新颖的鸟类栖息能力。小型旋翼飞行器在具有高敏捷性和强机动性的同时,会不可避免消耗较多能量。香港城市大学 Bai 等^[21]从节约能源的角度出发,研发了一款仿翅果结构的微型无人机(图 3(c))。该无人机通过双桨叶旋转驱动,能够实现位置与姿态控制,具有近 25 min 的续航能力。北京航空航天大学文力团队^[22]开发了一种水空两栖旋翼无人机(图 3(d)),采用自折叠桨叶,能够实现从水中到空中的快速起飞。该旋翼机还带有仿鲫鱼吸盘结构的装置,可轻松吸附于水陆中不同物体表面,还可附着于移动物体,从而达到节约能源的目的。

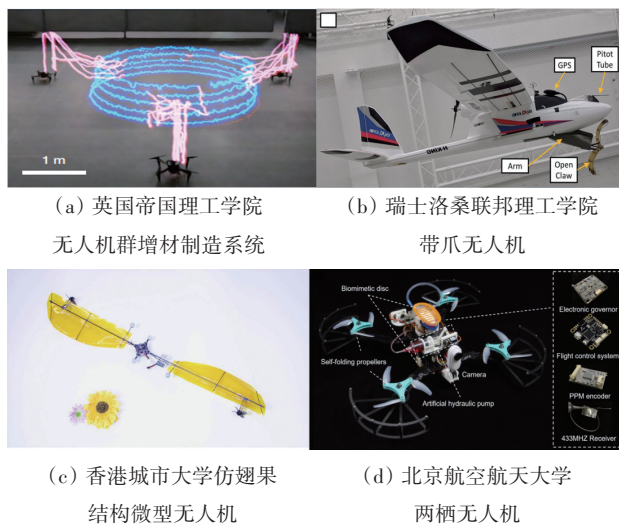
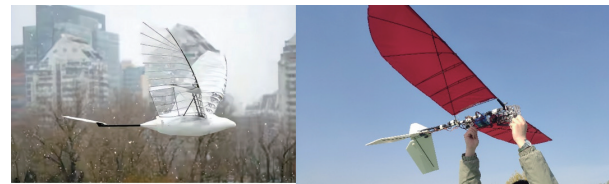


图 3 2022 年无人机应用创新与技术拓展新突破

仿生扑翼无人机在军事领域具有广阔的应用前景。北京航空航天大学焦宗夏团队^[23]提出了“扑翼推进波”理论,将周期扑翼运动构建为时均解析波动运输模型,可通过扑翼复杂参数快速评估气动性能,并设计了双关节大鸟型扑翼飞行器(图 4

(a)),理论飞行效率超过大部分固定翼飞机,能够实现长航时飞行。北京科技大学贺威团队^[24]基于质量分布与能量损耗理论分析,设计了一种轻型仿鹰扑翼无人机(图 4(b)),续航时长达 110 min,可在山地、森林、城市等不同复杂场景下执行侦察任务。西北工业大学宋笔锋团队^[25]提出了一种仿蝙蝠变形翼的飞翼驱动方式,实现了扑翼无人机在平飞时将翼变形和扑打进行耦合,在机动时将两者解耦的飞行方式,提高了滚转轴的机动性。



(a) 北京航空航天大学双关节
大鸟型扑翼飞行器

(b) 北京科技大学仿猎鹰
扑翼飞行器

图 4 2022 年扑翼飞行器新突破

3 无人机关键技术

1) 环境感知与定位。

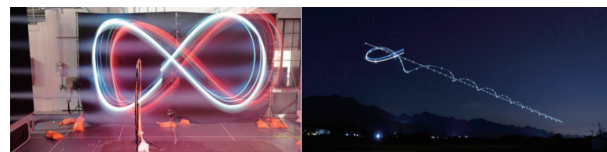
多机同时定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)是目前的研究热点,但大多数算法往往存在收敛速度慢或数据传输量大的问题。美国麻省理工大学 How 团队^[26]提出了一种分布式姿态估计算法,既能保证准确性又可提高通信效率。麻省理工学院 Rosinol 等^[27]提出的 Kimera 定位建图算法具有轻量级、定位精度高的特点,方便研究人员跨域使用。基于此,How 团队^[28]提出一种名为 Kimera-Multi 的稠密尺度-语义 SLAM 算法,每个机器人利用 Kimera 进行局部轨迹和 3D 网格估计,在通信范围内的 2 个机器人能够进行位置识别,相对位姿估计,以及鲁棒分布式轨迹估计,具有较高精确度以及鲁棒性。美国宾夕法尼亚大学 Kumar 团队^[29]针对主动度量-语义建图问题,提出利用多无人机轨迹规划进行度量-语义建图,以减小地图模型中语义信息和几何信息的不确定性。此外,该团队^[30]还提出一种全球定位系统(GPS)有限条件下的异构分布式无人系统,地面无车群体利用无人机建立的语义地图实现避障及路径规划。

瑞士苏黎世大学 Polizzi 等^[31]提出一种多无人机可扩展的热惯导里程算法(thermal-inertial odometry, TIO),其中前端利用在线光度校准算法细化热像图,以增强特征跟踪和位置识别能力,后端使用一种数据融合方法来降低数据存储量以及计算量,无人机间的通信则通过基于关键帧的请求-应答数据交换方式进行,从而达到减少数据传输量的目的,提高通信效率。针对具有相似或相同视觉特征的目标,国防科技大学牛轶峰团队^[32]提出了一种基于三角形拓扑序列的多无人机视觉传感器全局一致目标关联算法,利用目标相对位置构造三角拓扑序列,通过相似变换不变性计算拓扑序列相似度,并根据全局目标关联一致性设计了一种最优关联算法,使得关联精度得到进一步提升。此外,该团队^[33]还提出了一种多模型无迹卡尔曼滤波方法(multiple model unscented kalman filter, IMMUKF),利用多无人机协同获取目标三维位置信息,实现端到端目标定位,并通过实物验证其有效性。北京理工大学邓方团队^[34]针对大型室外环境下的空地目标协同搜索与定位问题,开发了由一架无人机和多个地面平台组成的空地系统,采用分布式分层架构与相应的分布式估计算法,实现对目标位置的准确估计。此外,无人机具有空中平台的领域优势形成更强的多维空间信息感知能力。天津大学胡清华团队^[35]在详细分析了无人机目标检测和跟踪领域的现状,总结了当前研究面临的挑战后,提出了无人机感知方向最大规模的 VisDrone 数据集,该数据能够对无人机平台的视觉分析算法进行广泛的训练和评估。大连理工大学的卢湖川团队^[36]针对多目标跟踪检测器在无人机视频上性能不佳的问题,开发了自适应运动滤波模块,利用梯度平衡焦损来解决不平衡分类和小目标跟踪问题。

2) 无人机自主飞行与跟踪控制。

机器学习方法被普遍应用到无人机控制中。针对高动态环境下四旋翼精确跟踪控制,美国加州理工大学 O'Connell 等^[37]提出一种元学习算法(domain adversarially invariant meta-learning, DAIML),将元学习作为离线学习方法,与在线自适应控制相结合,实现了在 6 级风下无人机轨迹跟踪控制(图 5

(a))。麻省理工学院 How 团队^[38]提出一种数据增广方法来提高模仿学习中数据利用率,并结合鲁棒管道模型预测控制(robust tube model predictive controller, RTMPC)方法实现了基于视觉运动的四旋翼控制。西湖大学智能无人系统实验室针对变螺距四旋翼无人机,将深度确定性梯度策略(deep deterministic gradient policy, DDPG)方法作为控制器在仿真中实现了 spinning 机动以及 tic-toc 机动^[39]。受自然界中鸟类追捕鸟类启发,该实验室与北京理工大学、韩国科学技术高级研究所提出了一种仅依靠方位信息进行无人机空中追捕的方法,通过伪线性卡尔曼滤波进行状态信息估计,基于可观性分析设计了无人机追踪制导律并结合无人机的运动提高观测性(图 5(b))^[40]。瑞士苏黎世大学 Foehn 等^[41]提出了一种基于视觉的高敏捷性四旋翼平台,具有高推重比以及高转矩-惯性比,仿真和实际环境中的实验表明,该平台能够用于四旋翼快速控制、轨迹跟踪以及基于学习算法等领域的研究。清华大学朱纪洪团队^[42-43]设计了一种新型分布式推进倾转旋翼无人机,既能像旋翼机产生强大拉力,又能像固定翼无人机具有高效巡航能力。团队深入研究了倾转旋翼无人机的气动特性,并设计了一种变增益姿态控制器,同时利用外环飞行速度来补偿力矩阻尼效应,提高飞行鲁棒性。



(a) 美国加州理工大学 6 级风下无人机轨迹跟踪 (b) 西湖大学无人机空中追捕

图 5 2022 年无人机自主控制技术进展

3) 无人机路径规划与避障。

无人机最优轨迹飞行问题可以分成 2 个时序子问题,一是求解最优路径,二是轨迹跟踪控制。然而,这种求解方法不仅需要考虑到无人机模型约束,还需要考虑时间分配问题,因此进行路径重规划计算量巨大。为提高无人机路径规划问题的实时性,麻省理工大学 How 团队^[44]利用模仿学习训练实时路径规划求解器(Deep-PANTHER),能够在

动态环境下进行路径重规划,在保证与专家经验具有相似代价的同时大大降低时间成本。加州理工大学 Nakka 等^[45]提出了一种序列凸规划方法(generalized polynomial chaos-based sequential convex programming, gPC-SCP),用于解决航天器路径规划问题,并实现了实际环境中航天器推力器及参数不确定情况下避障检测。苏黎世大学 Romero 等^[46]提出了基于模型预测控制的无人机路径规划与跟踪控制方法(model predictive contouring control, MPCC),将路径规划与控制一体化设计,并应用于穿越机的竞速飞行(图6),实现了旋翼机时间最优控制。宾夕法尼亚大学 Kumar 团队^[47]基于运动规划图(motion planning graph)设计了一种差量参数,用来描述最优轨迹成本,通过自适应最小化该参数,实现了无人机以 2.5 m/s 的速度在森林中穿行。

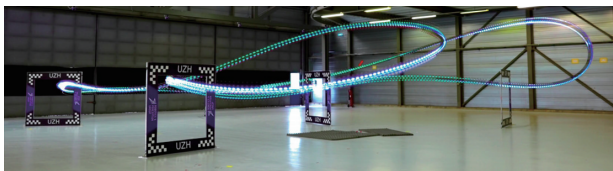
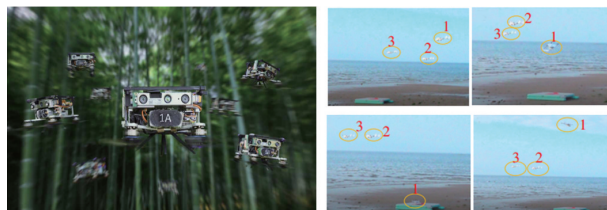


图6 瑞士苏黎世大学穿越机轨迹规划与跟踪控制

4) 集群协同控制。

无人机集群相比单个无人机具有规模优势,而利用不同功能的无人机进行优势互补,可进一步提升无人机集群完成更复杂任务的能力。宾夕法尼亚大学 Kumar 团队^[48]针对多机器人任务规划问题,提出了任务图概念,将任务按照优先级排序,并依据任务图设计奖励函数,其中考虑了机器人联盟大小对任务绩效的影响以及任务的性能对从属任务的影响,提高了集群协同效率。为实现非结构化的复杂环境中的快速自主飞行,需要无人机群能够在算力受限的平台上实时生成最优飞行路径,对无人机的飞行性能、计算效率、通信效率提出了新的要求。浙江大学 FAST 实验室将无人机轨迹最优性、可扩展性、高效计算及尺寸大小统一考虑,提出将轨迹规划看作一个基于目标追踪的多目标优化问题,并使无人机个体间以松耦合通信的方式共享轨迹,成功实现无人机群在未知复杂环境下的避障与目标追踪(图7(a))^[49]。中国电子科技集团公司智

能科技研究院梁月乾等^[50]针对多区域完全覆盖问题,提出了一种路径点调整方法来消除覆盖不完全或冗余的现象,并提出一种快速求解算法实现无人机集群的高效覆盖。由于精确的相对位置信息在实际环境下不易获得,西湖大学智能无人系统实验室提出仅使用方位信息,在给定收敛时间的条件下,实现无人机无领导者及领导-跟随模式下的编队控制^[51]。中国电子科技集团公司智能科技研究院隋维舜等^[52]提出了一种非奇异终端滑模控制方法,实现了有限时间无人机集群编队控制。无人机-艇协同在人员搜救、海水质量监测、海上反潜等领域具有广泛的应用价值,但无人机群如何协同平稳着艇依然是尚待解决的技术难题。北京航空航天大学段海滨团队^[53]提出并实现了一种仿鹰眼视觉的垂直起降固定翼无人机群协同海上着艇方法架构(图7(b))。当无人机编队靠近无人艇并识别出标志位时,无人机编队首先由 GPS 定位转换为仿鹰眼视觉辅助定位,通过反步法控制器,利用相对高度实现编队的依次着艇。



(a) 浙江大学无人机

集群目标追踪

(b) 北京航空航天大学

无人机集群海上着艇

图7 2022年无人机集群控制与规划技术进展

2022年9月,中国工程院、西北工业大学、中国航天科工集团有限公司、国防科技大学联合主办的2022国际自主无人系统大会(ICAUS 2022)在西安成功举办。国内外无人系统领域专家学者分享最新学术见解,探讨智能无人系统行业领域发展方向,为无人系统创新与发展贡献智慧和力量^[54]。作为ICAUS大会的活动之一,2022年“爱生杯”智能无人系统应用挑战赛于2022年8月在西安举办,大赛设置无人车竞速、无人车避障、飞行避障、快递速达、协同追踪5个科目,进一步推动无人系统智能感知、认知、交互、协同等关键共用技术的创新发展^[55]。2022年12月,2022第五届无人系统大会暨

珠海市香洲区无人系统产业大会在广东省珠海市开幕。本届大会由中国航空学会、珠海市香洲区人民政府、中国科学院无人机应用与管控中心联合主办,集“‘香洲杯’无人系统创新大赛”“无人系统战法演练”“无人系统创新技术成果展”等系列活动于一体,打造一场“沉浸式”科技盛宴,全方位展现科技企业发展成果,推动更多优质产业项目落地^[56]。由中国空军主办、电子科技集团智能院承办的“无人争锋”挑战赛定位于无人智能集群技术,侧重无人机集群智能实飞验证。通过多架微型无人机飞行竞技,挖掘先进技术成果,持续推进关键核心技术的转化应用(图8(a)),该赛事计划于2023年3季度在河北涞水举办^[57]。2022年11月,“智领群蜂2022”国际无人蜂群技术大赛赛事发布会在珠海航展新闻中心举行,该大赛由中国航空学会、北京航空航天大学大学主办,第一代任务着重于空中无人蜂群的技术能力突破,综合考量无人蜂群的智能感知与智能任务分配等群智能涌现技术。以自然灾害搜救为任务背景,各参赛队伍将通过智能算法的设计,以6架无人机平台组成的无人蜂群,完成蜂群避障快速集结、协同自主搜索2项任务(图8(b))^[58]。



(a) “无人争锋”挑战赛 (b) “智领群蜂2022”
比赛场景想定图

图8 2023年无人机集群赛事

5) 对抗环境下集群博弈。

对抗环境下集群博弈技术是无人机智能化军事应用的基础和共性技术,是解决无人机作战方案生成、任务规划及临机决策等智能化的关键,同时也是训练模拟、自主集群无人化作战等军事关键领域智能化水平提升的核心。因此,在网络环境下,研究对抗环境下无人机集群博弈技术具有重要的理论意义和军事价值。土耳其伊斯坦布尔技术大学 Özbek 等^[59]基于 HARFANG 3D 开发了一种战斗机狗斗仿真环境,采用深度强化学习对模型进行训

练,实现了指定点导航以及视距内对抗(“狗斗”)。目前的开源软件支持一对多,5对5以及60对60的对抗模式(图9(a))。清华大学朱纪洪团队^[60]提出了基于预知博弈树的空战人工智能(AI)算法框架,使用 Unity3D 搭建了一套贴于真实空战场景的仿真环境,通过空战 AI 对抗实验验证了算法的有效性。北京航空航天大学张岱峰等^[61]通过建立合围势能、空间交互机制等模型,基于一致性目标观测器设计了一种多无人机目标合围控制律,为解决无人机集群在对抗环境下由远及近深入作战区域过程中合围控制策略等自主控制问题提供了一条创新的途径(图9(b))。自主机动决策作为空对空对抗的一项关键技术,近年来受到广泛关注。北京航空航天大学段海滨团队^[62-63]提出了一种基于改进鸽群优化算法的无人机空战机动决策方法,预测每次机动过程中敌方无人机的作战状态,以快速、准确地实现无人机在空战过程中的自主机动决策。厦门大学罗德林团队^[64]采用异步的基于优势函数的演员-评论家(asynchronous advantage actor-critic, A3C)强化学习方法研究了双机的智能空战对抗决策方法,并提出了一种基于多智能体强化学习的多机协同空战对抗智能决策方法,通过仿真分析初步验证了该方法的可行性^[65]。南京航空航天大学甄子洋团队^[66]针对海上无人机集群对抗提出了一种基于分布式拍卖算法的有限数据共享无人机决策模型,通过分别设计攻击行为和防御行为,实现不完全信息下的无人机群攻防决策。



(a) 土耳其伊斯坦布尔
技术大学“狗斗”仿真环境 (b) 北京航空航天大学
红蓝对抗场景演示

图9 2022年无人机集群对抗技术进展

4 人机交互技术

无人机具有设计灵活、功能多样的特点,可以担任多种角色,执行烦琐、危险的任务。无人机作

为僚机时,可通过红外线、电磁、雷达或视觉传感器来扩大飞行员或操作员的态势感知能力,还可作为友军的通信节点,或通过干扰敌方雷达、通信或其他信号进行电子战行动。携带武器的无人机还可与有人驾驶飞机一起进行空对空或空对地打击,从而给敌人带来多重威胁。因此,人机协同作战逐渐成为现代战争中的主要作战形式。人机协同离不开人机交互,如何将人的智慧与机的智能相结合,是目前正待解决的关键技术。

2022年1月,作为“拒止环境协同作战(Collaborative Operations in Denied Environment, CODE)”项目的一部分,美国通用原子公司(General Atomics)对1架MQ-20复仇者真机与5架硬件在环虚拟机的协同搜索任务进行测试。该现实-虚拟编队利用虚拟红外搜索和跟踪传感器网络进行探测,当虚拟敌方进入指定的搜索区域,编队将利用人工智能算法决定哪架飞机自动脱离编队并执行空对空战术^[67]。2022年2月,DARPA与西科斯基公司合作实现了UH-60“黑鹰”直升机的首次无人飞行。该直升机搭载有“机组人员驾驶舱内自动化系统(aircrew labor in-cockpit automation system, ALIAS)”,未来有望实现有人无人合作可选驾驶模式^[68]。2022年2月,美国BAE系统公司与国防部战略能力办公室(Defense's Strategic Capabilities Office, SCO)成功完成了有人无人编队技术的飞行试验。该公司的底层有人无人编队算法可在战术边缘实现分散式自主决策,使架构能够轻松适应新任务并融入未来技术。软件开发工具包还可允许第三方引入新的算法和技术来支持未来的任务(图10(a))^[69]。2022年7月,美国臭鼬工厂公布一项有人无人分布式团队协同作战概念,与以往的“有人机-忠诚僚机”概念有所不同,新概念指出一架有人驾驶的战斗机可配备有多架不同功能的无人机,实现无人机间、有人-无人机间高效互补协作^[70]。2022年6月,中国陆军第80集团军某合成旅针对无人装备开展人装协同演练,利用无人机执行引导打击、定点爆破以及中继通信等任务,提升了有人无人协同作战能力(图10(b))^[71]。2022年4月,国防科技大学立足未来城市战场,以空地协同察打一



(a) 美国BAE公司完成有人无人编队飞行试验 (b) 中国陆军人装协同演练

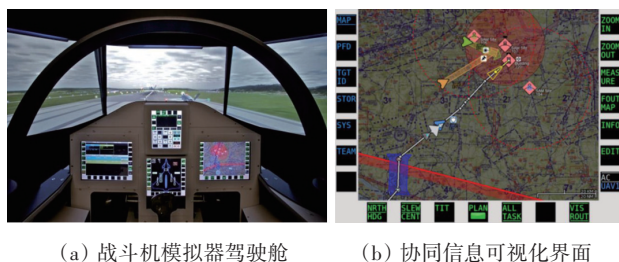


(c) 国防科技大学无人机技术与保障岗综合演练 (d) 美国卡耐基梅隆大学意图识别仿真环境

图10 2022年人机交互技术进展

体任务为背景开展了无人机技术与保障岗综合演练,验证了人机协同和空地协同等任务能力(图10(c))^[72]。

有人/无人机作战模式逐步向能力互补、分组分群方向发展。针对多用户之间共享无人系统的问题,德国慕尼黑国防军大学Schulte团队^[73]提出了一种分级方法,主指挥员可以接收次指挥员使用同一无人系统的请求,并开发了一种任务规划器,能够生成和评估考虑主次指挥员需求的解决方案,辅助主指挥员决策(图11)。团队研究结果表明,较高的自动化水平可对绩效产生积极的影响,但会导致态势感知能力下降。美国卡耐基梅隆大学Sycara团队^[74]指出,人机混合集群相比纯智能体集群,其异构性可能导致群体更为脆弱,因此提出利用群体保护指挥员的方法。团队利用深度神经网络(deep neural network, DNN)对群体和敌方进行训练,使敌方识别群体中的领导者,并与人类识别领导者进行准确度对比。研究表明当对群体和敌方进行联合训练时,DNN的识别机制与人类的识别机制并不相同,因此提出可利用两者的差异,将人的智能融入人工智能中,提高人工智能的识别能力^[75]。北京航空航天大学霍梦真等^[76]针对大规模有人/无人机集群中通信链路终端问题,提出了一种基于牵引控制的有人/无人分布式通信方法,使得异构集群在弱连接的有效减少通信负荷。



(a) 战斗机模拟器驾驶舱 (b) 协同信息可视化界面

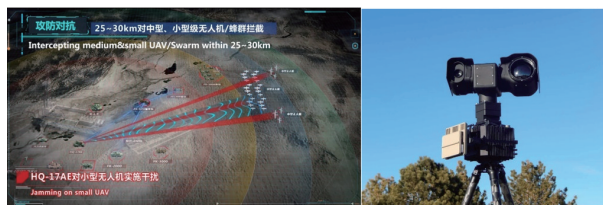
图 11 德国慕尼黑联邦国防军大学
有人/无人集群模拟系统

在人机交互过程中,人的认知和意识与机的态势感知交互融合至关重要。如何刻画人的意识,将人的意识作用于“机”上,是待解决的关键技术。洛桑联邦理工学院 Macchini 等^[77]研究了人通过不同躯干,即通过躯体运动、手臂运动与手部运动远程操控虚拟旋翼机精确度的影响。研究表明,单纯利用人体躯干驱动无人机运动并不是最优的解决方案,还需要将生物力和行为因素纳入人类意图识别范围。洛桑联邦理工学院 Dell'Agnola 等^[78]结合呼吸、心电图等多种生理信号,基于支持向量机提出一种操作员认知负荷实时监测算法,能够识别操作员认知负荷高低,从而辅助完成人机交互任务。美国匹兹堡大学和卡耐基梅隆大学的研究人员^[79]则从“机”的角度考虑,使智能体具备人类意图识别能力。研究人员提出了一种智能心智理论模型,包含信念生成及更新模块、行为判断和预测模块,能够通过观察队员行为推断其意图。研究人员将该模型放入虚拟城市搜索营救任务中进行训练(图 10(d)),研究表明该模型的意图推断能力比真实人的推断能力更强。

5 反无人机技术

随着技术进步,无人机个体变得更加小型轻便、敏捷灵活,这给无人机的识别与监测带来更大挑战,也迫使反无人机技术不断更新迭代。为应对无人机及蜂群攻击作战,中国航天科工集团第二研究院在 2022 年中国国际航空航天博览会中展出了一套反无人机体系,将“目标探测、指挥控制、拦抗防御”三项技术集成到一起,实现远距离拦截大型无人机,对中、小型无人机/蜂群多层次拦截,实现

对“低、慢、小”无人机目标的快速响应,准确跟踪以及多层次防御(图 12(a))^[80-81]。美国反无人机公司 Liteye 在 2022 年 2 月推出了一款便携式反无人机系统,采用多域传感器技术,结合了 3D 雷达、高清光电和红外传感器以及中波长红外线,可在多种环境条件下运行(图 12(b))^[82]。2022 年 5 月,该公司与美国国防部(Department of Defense, DoD)签署 1210 万美元的合同,为其提供反无人机系统及地面监视产品^[83]。波兰武器公司(Zakłady Mechaniczne Tarnów, ZMT)于 2022 年测试了一款带有多功能雷达和勃朗宁型 12.7 mm WKLK 机枪的反无人机系统,可在 3 km 处捕获纳米级无人机,在 5 km 处捕获微型无人机,并且在至少 10 km 的距离处检测到小型无人机^[84]。美国 BAE 系统公司于 2022 年 11 月完成了对其先进精确杀伤武器系统的测试。该系统可有效打击装甲、静止和移动目标,可从喷气式飞机、直升机、卡车、船只等不同载体上发射。在演示中,5 枚 70 mm 火箭击落了不同型号无人机,包括 11.3~23 kg 级,飞行速度超过每小时 161 km 的无人机^[85]。俄罗斯公司 PPSH 实验室推出了一款新的反无人机机枪 LPD-802,可在最远 1.5 km 的距离内干扰无人机卫星信号以及控制通道,同时兼备长运行时间^[86]。印度经济炸药公司(Economic Explosives Limited, EEL)正在开发一种基于微型导弹的反无人机系统,具备硬杀伤和软杀伤能力,可有效打击 2 km 范围内敌方无人机,并与雷达和干扰器无缝集成^[87]。



(a) 航天科工二院反无人机系统 (b) 美国 Liteye 公司反
无人机装备

图 12 2022 年反无人机技术

西湖大学智能无人系统实验室基于四旋翼构建了一套微小无人机识别定位及跟踪系统,提出利用全景立体相机网络进行无人机识别与定位,并在中心节点将各感知节点的轨迹信息进行融合。网

络中的每个节点由 16 个镜头组成,形成 360°全景相机,网络观测距离可达 80 m^[88]。大连理工大学 Zhao 等^[89]基于视觉检测发布了一套图片-视频无人机数据集,可用于无人机检测与追踪,并提出了一种探测追踪融合方法,提升了无人机检测性能。波兰西里西亚理工大学 Dudezyk 等^[90]将主动式与被动式多种传感器数据进行融合,基于条件互补滤波和多阶段聚类方法实现了三维空间中无人机检测识别。立陶宛维尔纽斯大学 Rudys 等^[91]提出一种空中反无人机系统,使用装有高分辨率雷达的固定翼无人机进行反无人机探测,当识别到目标后,释放旋翼无人机,利用绳索缠绕的方式破坏敌方无人机桨叶旋转。该系统已进行初步验证。塞浦路斯大学 Valianti 等^[92]在考虑能源消耗、传感器感知范围限制的基础上设计了一种无人机群组协同追捕的方法,通过估计目标运动状态,可同时对敌方多架无人机进行反制。

无人机技术与反无人机技术是一种“道高一尺,魔高一丈”的矛与盾关系,既是对立的,又是互补的。无人机技术发展促进反无人机技术进步。搭载人工智能技术,反无人机探测识别能力进一步加强,结合不同打击技术与打击模式,反无人机技术发展前景广阔,行业领域规模将不断扩大。出台相应的政策支持与标准规范可进一步扶持反无人机行业发展,推动技术革新。

6 结论

从无人机法规政策、设计实现、关键技术、人机交互、反无人机技术等方面系统回顾和总结了 2022 年无人机军用与民用部分热点和发展新态势。中国无人机产业发展迅猛,在国际舞台上发挥越来越重要的作用。在相关法规与标准的指导下,无人机在低空空域的应用进一步拓宽。

人工智能、视觉导航等技术的发展是提升无人机能力特别是集群智能自主能力的关键技术手段^[93-95],如何挖掘与体现无人系统内部个体的智能性,平衡个体个性与群体同步性的矛盾,是自主智能无人机系统面临的新挑战^[2]。正如北京航空航天

大学段海滨在 2022 年 7 月 13 日出版的《人民日报》专稿《无人机集群应用前景广阔》一文中所言,“无人机集群应用前景广阔,但目前还存在‘有智无慧、有感无情、有专无通、有协无同’的瓶颈,自主能力仍待提高”^[96]。发展无人机集群技术,增强无人机智能感知能力、机间自主协作能力、无人机与其他无人装备的跨域合作能力以及人机混合协同能力是目前无人机领域的研究热点与焦点。随着未来无人系统面向的场景愈发多样化和具体化,执行任务的复杂程度越来越高,无人系统必将依然向智能化、自主化、跨域化、集群化、体系化方向迅速发展,特别是面向特殊任务场景的无人机技术也不断获得新的突破。

参考文献 (References)

- [1] 崔勇平, 邢清华. 从俄乌战争看无人机对野战防空的挑战和启示[J]. 航天电子对抗, 2022, 38(4): 1-3.
- [2] Chen J, Sun J, Wang G. From unmanned systems to autonomous intelligent systems[J]. Engineering, 2022, 12(5): 16-19.
- [3] AINonline. EASA proposes rules for urban VTOL air taxis [EB/OL]. (2022-06-30) [2022-11-26]. <https://www.ainonline.com/aviation-news/general-aviation/2022-06-30/easa-proposes-rules-urban-vtol-air-taxis>.
- [4] GOV.UK. Advancing airborne autonomy: Use of commercial drones in the UK [EB/OL]. (2022-07-18) [2022-11-26]. <https://www.gov.uk/government/publications/advancing-airborne-autonomy-use-of-commercial-drones-in-the-uk>.
- [5] NASA. NASA tests advanced air mobility automation concepts with Sikorsky and DARPA [EB/OL]. (2022-08-16) [2022-11-26]. <https://www.nasa.gov/feature/nasa-tests-advanced-air-mobility-automation-concepts-with-sikorsky-and-darpa>.
- [6] Shepardson D. U.S. proposes rules to advance flying taxi operations [EB/OL]. (2022-06-30) [2022-11-26]. <https://news.yahoo.com/u-proposes-rules-advance-flying-14355-2763.html>.
- [7] USNI News. Navy to deploy up to four cargo drones on an aircraft carrier this year [EB/OL]. (2022-04-12) [2022-11-26]. <https://news.usni.org/2022/04/12/navy-to-deploy-four-cargo-drones-on-an-aircraft-carrier-this-year#:~:te>

- xt=A%20logistics%20Unmanned%20Air%20System%20-%28UAS%29%20prototype%2C%20called,with%20the%20NAWCAD%20experimentation%20office%20told%20USNI%20News.
- [8] 中国电子工业标准化技术协会. 信息技术 无人集群术语: T/CESA 1192—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [9] 国务院国有资产监督管理委员会. 中方牵头制定的第二项无人机领域国际标准正式发布[EB/OL]. (2022-08-18) [2022-11-26]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588124/c25782843/content.html>.
- [10] 中国民用航空局. “十四五”航空物流发展专项规划[EB/OL]. (2022-02-16) [2022-11-26]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/FZGH/202202/t20220216_211785.html.
- [11] 交通运输部标准化信息系统. 无人机物流配送运行要求[EB/OL]. (2022-09-13) [2022-11-26]. <https://jst.mot.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=deb836eba355a49a-38de6a57ec830ec3>.
- [12] 中华人民共和国交通运输部. 交通运输部 国家标准化管理委员会关于印发《交通运输智慧物流标准体系建设指南》的通知[EB/OL]. (2022-10-24) [2022-11-26]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/kjs/202210/t2022102-4_3699366.html.
- [13] 深圳市无人机行业协会. 无人机及其物流、应急应用领域政策汇编[EB/OL]. (2022-08-08) [2022-11-26]. http://www.szuavia.org/news_cen.php?id=6216.
- [14] Kwak B, Shintake J, Zhang L, et al. Towards edible drones for rescue missions: Design and flight of nutritional wings[J]. arXiv preprint arXiv: 2211.04149, 2022.
- [15] Schiano F, Kornatowski P, Cencetti L, et al. Reconfigurable drone system for transportation of parcels with variable mass and size[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 12150–12157.
- [16] 研制成功, 飞行汽车来了[EB/OL]. (2022-11-19) [2022-11-26]. <https://mp.weixin.qq.com/s/ubn-euoIW6Qcb471-nqOuxw>.
- [17] Zhang K, Chermprayong P, Xiao F, et al. Aerial additive manufacturing with multiple autonomous robots[J]. Nature, 2022, 609: 709–717.
- [18] Fuller S, Yu Z, Talwekar Y. A gyroscope-free visual-inertial flight control and wind sensing system for 10-mg robots[J]. Science Robotics, 2022, 7(72): 8184.
- [19] Stewart W, Ajanic E, Muller M, et al. How to swoop and grasp like a bird with a passive claw for a high-speed grasping[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022, 27(5): 3527.
- [20] Zufferey R, Tormo-Barbero J, Feliu-Talegón D, et al. How ornithopters can perch autonomously on a branch[J]. Nature Communications, 2022, 13: 7713.
- [21] Bai S, He Q, Chirarattananon P. A bioinspired revolving-wing drone with passive attitude stability and efficient hovering flight[J]. Science Robotics, 2022, 7(66): 5913.
- [22] Li L, Wang S, Zhang Y, et al. Aerial-aquatic robots capable of crossing the air-water boundary and hitchhiking on surfaces[J]. Science Robotics, 2022, 7(66): 6695.
- [23] 北京航空航天大学. 新世界纪录! 北航创扑翼式无人机单次充电飞行最长时间[EB/OL]. (2022-10-20) [2022-11-26]. <https://mp.weixin.qq.com/s/XlsdhvBuQA-nym1x5E4tHjQ>.
- [24] Wu X, He W, Wang Q, et al. A long-endurance flapping-wing robot based on mass distribution and energy consume method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, doi: 10.1109/TIE.2022.3213905.
- [25] Chen A, Song B, Wang Z, et al. A novel actuation strategy for an agile bioinspired FWAV performing a morphing-coupled wingbeat pattern[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022, doi: 10.1109/TRO.2022.3189812.
- [26] Tian Y, How J. Spectral sparsification for communication-efficient collaborative rotation and translation estimation[DB/OL]. arXiv preprint: 2210.05020v2, 2022.
- [27] Rosinol A, Violette A, Abate M, et al. Kimera: From SLAM to spatial perception with 3D dynamic scene graphs[J]. International Journal of Robotics Research, 2021, 40(12/14): 1510–1546.
- [28] Tian Y, Chang Y, Arias F, et al. Kimera-multi: Robust, distributed, dense metric-semantic SLAM for multi-robot systems[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2022, 38(4): 2022–2038.
- [29] Liu X, Prabhu A, Cladera F, et al. Active metric-semantic mapping by multiple aerial robots[DB/OL]. arXiv preprint: 2209.08465v3, 2022.
- [30] Miller I, Cladera F, Smith T, et al. Stronger together: Air-ground robotic collaboration using semantics[J]. arXiv preprint arXiv: 2206.14289v1, 2022.
- [31] Polizzi V, Hewitt R, Hidalgo-Carri’o J, et al. Data-efficient collaborative decentralized thermal-inertial odometry[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2022, 7(4): 10681–10688.
- [32] Li X, Wu L, Niu Y, et al. Multi-target association for UAVs based on triangular topological sequence[J]. Drones, 2022, 6: 119.

- [33] Lin B, Wu L, Niu Y. End-to-end vision-based cooperative target geo-localization for multiple micro UAVs[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2022, 106: 13.
- [34] Zhu P, Wen L, Du D, et al. Detection and tracking meet drones challenge[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2021, 44(11): 7380–7399.
- [35] Liu S, Li X, Lu H, et al. Multi-object tracking meets moving UAV[C]//*Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New Orleans, USA: IEEE, 2022: 8876–8885.
- [36] Zhang L, Gao F, Deng F, et al. Distributed estimation of a layered architecture for collaborative air-ground target geolocation in outdoor environments[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 70(3): 2822–2832.
- [37] O’Connell M, Shi G, Shi X, et al. Neural-fly enables rapid learning for agile flight in strong winds[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(66): 597.
- [38] Tagliabue A, How J. Output feedback tube MPC-guided data augmentation for robust, efficient sensorimotor policy learning[DB/OL]. arXiv preprint: 2210.10127v1, 2022.
- [39] Wang Z, Gross R, Zhao S. Aerobatic Tic-Toc control of planar quadcopters via reinforcement learning[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 2140–2147.
- [40] Li J, Ning Z, He S, et al. Three-dimensional bearing-only target following via observability-enhanced helical guidance[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, doi: 10.1109/TRO.2022.3218268.
- [41] Foehn P, Kaufmann E, Romero A, et al. Agilicious: Open-source and open-hardware agile quadrotor for vision-based flight[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(67): 6259.
- [42] Zhang S, Yang Y, Wang X, et al. Modeling and dynamic analysis of a distributed propulsion tilt-rotor aircraft[C]//*AIAA AVIATION 2022 Forum*. Chicago, USA: AIAA, 2022.
- [43] Zhu J H, Yang Y J, Wang X Y, et al. Attitude control of a novel tilt-wing UAV in hovering flight[J]. *Science China Information Science*, 2022, doi: 10.1007/s11432-022-3605-5.
- [44] Tordesillas J, How J. Deep-panther: Learning-based perception-aware trajectory planner in dynamic environments[DB/OL]. arXiv preprint: 2209.01268v1, 2022.
- [45] Nakka Y, Chung S. Trajectory optimization of chance-constrained nonlinear stochastic systems for motion planning under uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, doi:10.1109/TRO.2022.3197072.
- [46] Romero A, Foehn S, Scaramuzza D. Model predictive contouring control for time-optimal quadrotor flight[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2022, doi: 10.1109/TRO.2022.3173711.
- [47] Lipschitz L, Liu X, Tao Y, et al. Experiments in adaptive replanning for fast autonomous flight in forests[J]. arXiv preprint arXiv:2203.01370v1, 2022.
- [48] Gosrich W, Mayya S, Narayan S, et al. Multi-robot coordination and cooperation with task precedence relationships[DB/OL]. arXiv preprint: 2209.14417v1, 2022.
- [49] Zhou X, Wen X, Wang Z, et al. Swarm of micro flying robots in the wild[J]. *Science Robotics*, 2022, 7(66): 5954.
- [50] Liang Y, Yang Y, Zhao Y. Multi-area complete coverage with fixed-wing UAV swarms based on modified ant colony algorithm[C]//*5th IEEE International Conference on Unmanned Systems*. Guangzhou, China: IEEE, 2022: 732–737.
- [51] Li Z, Tnunay H, Zhao S, et al. Bearing-only formation control with pre-specified convergence time[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(1): 620–629.
- [52] Sui W, Yang Y, Yuan W, et al. Fixed-time formation tracking control for multi-UAV system via nonsingular terminal sliding mode approach[C]//*International Conference on Guidance, Navigation and Control*. Harbin, China: Springer, 2022: 1045.
- [53] Yuan Y, Xu X, Duan H, et al. Eagle vision-based coordinate landing control framework of unmanned aerial vehicles on an unmanned surface vehicle[J]. *Guidance, Navigation and Control*, 2022, 2(4): 2250023.
- [54] 无人系统技术. 智能无人系统创造未来 | 2022 国际自主无人系统大会 (ICAUS 2022) 顺利召开 [EB/OL]. (2022-02-25)[2022-11-26]. https://mp.weixin.qq.com/s/Z1v4-nkPyjvj_EFzxWZM8Q.
- [55] 重磅赛事,即将开启! | 2022 年“爱生杯”智能无人系统应用挑战赛 [EB/OL]. (2022-02-25)[2022-11-26]. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA5MTM4MTU4MA==&mid=2652044135&idx=2&sn=65adb6841597653d4-3baae0e83853&chksm=8b9b1144bcec9852760eb4a-08f7a6827537bf5fe64d2a4e02b5a0a2a14480960240928-a7f445&scene=27.
- [56] 2022 第五届无人系统大会在广东珠海开幕 [EB/OL]. (2022-12-28)[2022-12-29]. <https://proapi.jingjiribao.cn/detail.html?id=435600>.
- [57] 央视军事. 空军广发“英雄帖”! [EB/OL]. (2022-11-09)

- [2022-11-26]. <https://mp.weixin.qq.com/s/DA7V4JOBBy-Qh2l98eUSKlg>.
- [58] IUSC 国际无人蜂群技术大赛. “智领群蜂 2022” 国际无人蜂群技术大赛在珠海航展震撼发布[EB/OL]. (2022-11-09)[2022-11-26]. <https://mp.weixin.qq.com/s/Yq44K-Uy7liJbwfjKJKg9TA>.
- [59] Özbek M M, Yıldırım S, Aksoy M, et al. Harfang3D dog-fight sandbox: A reinforcement learning research platform for the customized control tasks of fighter aircrafts [J]. arXiv preprint arXiv: 2210.07282, 2022.
- [60] 周文卿, 朱纪洪, 匡敏驰, 等. 基于预知博弈树的多无人机群智协同空战算法[J]. 中国科学: 技术科学, 2022, 52, doi: 10.1360/SST-2021-0294.
- [61] Zhang D, Duan H, Zeng Z. Leader - follower interactive potential for target enclosing of perception-limited UAV groups[J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(1): 856-867.
- [62] Ruan W, Duan H, Deng Y. Autonomous maneuver decisions via transfer learning pigeon-inspired optimization for UCAVs in dogfight engagements[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(9): 1639-1657.
- [63] Duan H, Lei Y, Xia J, et al. Autonomous maneuver decision for unmanned aerial vehicle via improved pigeon-inspired optimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2022, doi: 10.1109/TAES.2022.3221691.
- [64] Fan Z, Xu Y, Kang Y, et al. Air combat maneuver decision method based on A3C deep reinforcement learning [J]. Machines, 2022, 10: 1033.
- [65] Gong Z, Xu Y, Luo D. Cooperative air combat maneuvering confrontation based on multi-agent reinforcement learning[J]. Unmanned Systems, 2022, 10(3): 1-14.
- [66] Shahid S, Zhen Z, Javaid U, et al. Offense-defense distributed decision making for swarm vs. swarm confrontation while attacking the aircraft carriers[J]. Drones, 2022, 6: 271.
- [67] General Atomics. GA-ASI Pairs Avenger with virtual UAS to demo autonomous search and follow[EB/OL]. (2022-02-25)[2022-11-26]. <https://www.ga.com/ga-asi-pairs-avenger-with-virtual-uas-to-demo-autonomous-search-follow>.
- [68] Sterenfeld E. DARPA, Sikorsky complete first autonomous Black Hawk flight without backup pilots inside[EB/OL]. (2022-02-08) [2022-11-26]. <https://insidedefense.com/daily-news/darpa-sikorsky-complete-first-autonomous-black-hawk-flight-without-backup-pilots-inside>.
- [69] BAE Systems. BAE Systems demonstrates manned-unmanned teaming capabilities in flight test[EB/OL]. (2022-03-01)[2022-11-26]. <https://www.baesystems.com/en-us/article/bae-systems-demonstrates-manned-unmanned-teaming-capabilities-in-flight-test>.
- [70] Cooper N. John Clark: Lockheed eyeing distributed manned-unmanned teaming concept for air force[EB/OL]. (2022-07-18)[2022-11-26]. <https://blog.executivebiz.com/2022/07/lockheed-eyeing-distributed-manned-unmanned-teaming-concept-for-air-force/#:~:text=by%20Naomi%20Cooper%20July%2018%2C%202022%2C%2011%3A59%20am,with%20future%20autonomous%20systems%2C%20Defense%20News%20reported%20Friday>.
- [71] ZAKER. “有人”“无人”协同作战! 这场演练相当燃! [EB/OL]. (2022-06-29)[2022-11-26]. <http://app.myzaker.com/news/article.php?pk=62bbb8921bc8e069520000-1b>.
- [72] 国防科大. 无人机、无人车联合“输出”, 这场毕业综合演练超硬核! [EB/OL]. (2022-04-06) [2022-11-26]. http://www.81.cn/2022zt/2022-04/06/content_10151052.htm.
- [73] Roth G, Schulte A. Experimental evaluation of mission-planning support in multi-user manned-unmanned teaming applications with shared unmanned systems[J]. Human Factors in Robots, Drones and Unmanned Systems, 2022, 57: 46-53.
- [74] Deka A, Sycara K, Walker P, et al. Human vs. deep neural network performance at a leader identification task [C]//65th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, Sage, 2021: 1152-1156.
- [75] Deka A, Sycara K, Walker P, et al. The robustness of human advantage in swarm leader identification[C]//66th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society, 2022: 550-554.
- [76] Huo M, Duan H, Zeng Z. Multicenter consensus for large-scale heterogeneous manned/unmanned aerial team with random link failure via pinning Control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2022, 69(12): 4924-4928.
- [77] Macchini M, Frogg J, Schinao F, et al. Does spontaneous motion lead to intuitive Body-Machine Interfaces? A fitness study of different body segments for wearable telerobotics[C]//31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication. Napoli, Italy: IEEE, 2022: 115-121.
- [78] Dell’Agnola F, Jao P, Arza A, et al. Machine-learning

- based monitoring of cognitive workload in rescue missions with drones[J]. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 2022, 26(9): 4751–4762.
- [79] Li H, Oguntola I, Hughes D, et al. Theory of mind modeling in search and rescue teams[C]//31st IEEE International Conference on Robot and Human Interactive Communication Napoli, Italy: IEEE, 2022: 483–189.
- [80] 这个紧迫的战场难题, 中国有了解决方案[EB/OL]. (2022-11-06)[2022-11-26]. https://m.thepaper.cn/baijia-hao_20617539.
- [81] 无人机. 航天科工集团反无人机体系[EB/OL]. (2022-06-11) [2022-11-26]. <https://mp.weixin.qq.com/s/LmmwnJAnOcdf3YgpNx6Xg>.
- [82] Manuel R. Liteye unveils man-portable counter-drone system[EB/OL]. (2022-02-02)[2022-11-26]. <https://www.thedefensepost.com/2022/09/02/liteye-counter-uas/>.
- [83] Crumley B. Liteye Systems wins DoD's \$12.1 million counter-drone deal[EB/OL]. (2022-05-17)[2022-11-26]. <https://dronedj.com/2022/05/17/liteye-systems-wins-dods-12-1-million-counter-drone-deal/>.
- [84] Unmanned Airspace. Product discription[EB/OL]. (2022-06-11)[2022-11-26]. <https://www.unmannedairspace.info/c-uas-search/zaklady-mechaniczne-tarnow/>.
- [85] Inder Singh Bisht. BAE demonstrates APKWS effectiveness against fast drones[EB/OL]. (2022-12-01) [2022-12-09]. <https://www.thedefensepost.com/2022/12/01/bae-apkws-fast-drones/>.
- [86] Tass. Russia's anti-drone gun capable of 'stunning' American UAVs undergoes tests[EB/OL]. (2022-06-11) [2022-11-26]. <https://tass.com/defense/1530699>.
- [87] IDRW. EEL developing micro-missile for anti-drone operations[EB/OL]. (2022-03-24) [2022-11-26]. <https://idrw.org/eel-developing-micro-missile-for-anti-drone-operations/>.
- [88] Zheng Y, Zheng C, Zhang X, et al. Detection, localization, and tracking of multiple MAVs with panoramic stereo camera networks[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, doi: 10.1109/TASE.2022.3176294.
- [89] Zhao J, Zhang J, Li D, et al. Vision-based anti-UAV detection and tracking[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(12): 25323–25334.
- [90] Dudczyk J, Czyba R, Skrzypczyk K. Multi-sensory data fusion in terms of UAV detection in 3D space[J]. *Sensors*, 2022, 22: 4323.
- [91] Rudys S, Laučys A, Ragulis P, et al. Hostile UAV detection and neutralization using a UAV system[J]. *Drones*, 2022, 6: 250.
- [92] Valianti P, Kolios P, Ellinas G. Energy-aware tracking and jamming rogue UAVs using a swarm of pursuer UAV agents[J]. *IEEE Systems Journal*, 2022, doi: 10.1109/JSYST.2022.3179632.
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] 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.
- [96] 段海滨. 无人机集群应用前景广阔[N]. *人民日报*, 2022-7-13(15).

Review of technological hotspots of unmanned aerial vehicle in 2022

DUAN Haibin¹, HE Hangxuan¹, ZHAO Yanjie², WANG Yin³, Huo Mengzhen¹, NIU Yifeng⁴, FAN Yanming⁵, ZHU Jihong⁶,
YUAN Wanmai², DENG Yimin¹, LI Xuan⁷, LUO Delin⁸

1. Bio-inspired Autonomous Flight System (BAFS) Research Group, School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China
2. Artificial Intelligence Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100086, China
3. College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China
4. College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, 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. Virtual Reality Fundamental Research Laboratory, Department of Mathematics and Theories, Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518000, China
8. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract Unmanned aerial vehicle (UAV) developed fast and made a series of breakthroughs in 2022. This paper summarizes and analyses UAV hotspots and trends in 2022 in terms of UAV regulations, design and realization, key technologies, human-robot interaction and anti-UAV technologies. With the progress and popularization of visual navigation technology and artificial intelligence technology, the comprehensive capability of UAVs continued to improve and their application fields kept on expanding. Key technologies, platform construction and task-executing styles of UAV swarm were constantly improving, and UAV swarm became more automated, intelligent, cross-domain, clusterized and systematized.

Keywords unmanned aerial vehicle(UAV); industry standards; technological hotspots; swarm intelligence ●



(责任编辑 徐丽娇)