

2021年无人机热点回眸

段海滨¹, 何杭轩¹, 赵彦杰², 王寅³, 牛轶峰⁴, 袁莞迈², 邓亦敏¹, 范彦铭⁵, 魏晨¹, 罗德林⁶

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信息科学研究院, 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. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361102

摘要 随着人工智能技术的发展以及机载任务平台性能的提升, 2021年无人机技术与应用呈现新的发展态势。从无人机政策法规、自主控制、反无人机、应用领域等多方面回顾了2021年无人机的技术研究热点, 分析了无人机技术领域未来的发展动向。人工智能、视觉导航等技术使无人机综合能力更加强大, 也使其应用领域向更宽、更深、更综合方向拓展, 尤其是人与机器人的共融联系随着人机交互技术的提升也更为紧密。综合而言, 无人机向微型化、集群化、智能化、跨域化发展是必然趋势, 无人机与人工智能的深度融合与跨平台实际应用仍然是当今和未来的研究热点。

关键词 无人机; 政策法规; 技术热点; 集群智能

无人机发展至今, 已经走过了100余年的历程。无人机具有体积小、造价低、使用方便、对环境要求低、生存能力较强等优点, 已经由当初的“旧时王谢堂前燕”到如今的“飞入寻常百姓家”, 且在诸多领域中发挥着不可替代的重要作用。

中国是消费级无人机的研制大国, 近年来, 随

着消费级无人机市场的日趋饱和, 工业级无人机逐渐成为新兴的产业主体^[1], 已经融入日常工作生活, 并在电力巡检、防火消杀、交通巡逻、治安监控、应急减灾、资源勘探、环境监测、森林防火、动物保护、禁毒侦察、环境保护、海洋监测、水资源开发、农业作业、灾害监测、城市规划、数字城市等领域发挥愈

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2021-12-30

基金项目: 科技部科技创新 2030 重大项目(2018AAA0102403); 国家自然科学基金项目(T2121003, U20B2071, 91948204, U19B2029, U1913602, 61876187)

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. 2021年无人机热点回眸[J]. 科技导报, 2022, 40(1): 215-227; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.

01.016

来愈重要的作用。为保障行业健康和可持续发展,新政策、新法规不断出台,特别是无人机行业标准和国家标准也在不断颁布实施,进一步促进了这一行业的规范化和科学化。随着人工智能、视觉导航、微电子等前沿技术的突破,无人机与多学科交叉融合使新构型无人机不断涌现,并随着人机交互技术研究的不断深入,应用领域进一步拓宽和深化。

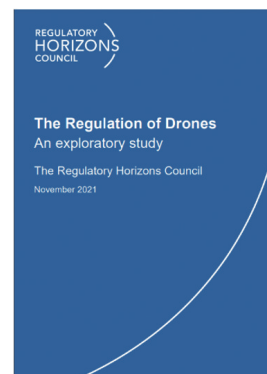
当今世界,国际安全形势不稳定性、不确定性增加,特别是新冠肺炎疫情发生以来,世界和平依然面临多元威胁,无人机也已成为军事行动中不可或缺的重要作战力量。通过搭载人工智能等关键核心技术,无人机从执行侦察任务到实现空中格斗,任务类型愈发多样,复杂程度不断升级。随着对信息融合、信息共享的需求增加,单架无人机已不再满足军事需求,无人机集群、有人/无人机协同、无人机与海域、陆地等无人系统跨域联合作战将成为未来现代化战争的必然趋势。

人工智能已经是国家乃至全世界的重大发展战略和产业,突破人工智能关键核心技术是“十四五”时期中国建设世界科技强国面临的重要技术问题,也给无人机的技术升级带来了良好契机。随着人工智能技术深度发展,无人机潜力不断被挖掘,2021年是“十四五”规划的开局之年,中国无人机产业继续保持了快速发展的良好势头,无人机应用创新与科研成果层出不穷。为适应高动态、非结构的复杂环境,无人机集群自主控制仍然是当前研究热点与技术难点。导航控制、组网通信和决策规划等科研创新进一步提升,引领无人机向智能化、集群化、跨域化发展,同时推动无人机反制技术体系开辟与拓展。本文回顾2021年无人机相关的研究进展,对部分关键技术和未来发展趋势进行分析和展望。

1 强化无人机管控政策

全球无人机行业发展迅猛,商用、消费级无人机市场逐年增长,为解决企业、消费者等存在的无人机领域痛点问题,挖掘无人机行业潜在效益,各国纷纷出台政策,促进无人机行业的良好发展。

欧盟航空安全局(European Union Aviation Safety Agency, EASA)和意大利航空导航服务商(Italian Air Navigation Service Provider, ENAV)签署协议,拟在国际航空领域中具有共同利益的各个领域进行合作,旨在创造协同效应,并根据安全、高效和可持续性的目标支持航空业的发展。该协议将支持空中导航服务领域的联合活动和合作,包括无人机交通管理平台的开发^[2]。在欧洲飞手需持有飞行执照才可以飞行^[3],但其无人机条例仍然需要进一步细化,比如需要考虑无人机飞行轨迹的危险性和鲁棒性,无人飞行平台以及飞手水平^[4]。除此之外,英国于2020年12月31日修改了《无人机条例》,意在与欧盟航空安全局的规定保持一致,以保证无人机在欧洲自由飞行。新条例删除了只限制商用无人机飞行的规定,着重关注于无人机的类型和飞行地点。英国监管地平线委员会(Regulatory Horizons Council, RHC)于2021年11月发出一份针对无人机监管的调研报告(图1(a)),报告中建议在考虑无人机风险的同时深入挖掘无人机的潜在利益,探索相关无人新兴市场带来的数字平台和数据问题,加速无人机监管标准化进程^[5]。美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)在2020年12月颁布了终版无人机政策并于2021年开始生效,允许无人机在人群上空和夜间飞行。政策中要求无人机不能有暴露在外的桨叶,且夜间需配备防撞灯。随着越来越多的无人机应用于商业运输,这一政策是迈向更加安全有效管理空域中无人机的重要一步^[6]。



(a) 无人机监管调研报告

智能无人集群系统发展白皮书

— 2021 版 —



中国电子技术标准化研究院

2021年11月

(b) 智能无人集群系统
发展白皮书

图1 无人机/无人系统报告

国内无人机行业近年来也受到各级政府的高度重视和国家产业政策的重点支持。国家出台了多项政策,鼓励民用无人机行业健康快速发展。2021年6月11日,国务院办公厅正式印发《国务院2021年度立法工作计划》,其中明确了为进一步使国家治理效能得到新提升,提请全国人大常委会审议《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》等若干条例,根据立法计划,无人驾驶航空器飞行管理暂行条例由中央军委联合参谋部、交通运输部起草,是中国无人机立法取得重大进展的标志。2021年3月,中国民用航空局(简称民航局)发布《民用微轻小型无人驾驶航空器运行识别概念及要求(暂行)》,在考虑国际主流规范的情况下,针对微轻小型无人驾驶航空器给出总体概念以及运行管理要求^[7]。同月,为进一步明确试验基地相关规定,民航局出台《民用无人驾驶航空试验基地(试验区)管理办法》,对申请地区的基本条件、布局选址等提出要求,以及明确试验区设立、暂停与退出机制^[8]。2021年8月13日,民航局发布了《中国民用航空局关于推进民航统计现代化改革的若干意见》,研究提出民航新业态、新模式统计思路与实施路径,推进航空物流、无人机等新兴领域统计调查^[9]。2021年10月28日,交通运输部印发《交通运输“十四五”立法规划》,明确将推动《中华人民共和国民用航空法(修订)》《无人驾驶航空器飞行管理暂行条例》颁布实施,研究修订《中华人民共和国民用航空器适航管理条例》,确保民航飞行安全,促进民用航空事业持续健康高质量发展^[10]。2021年11月,中国电子技术标准化研究院颁布《智能无人集群系统发展白皮书》(图1(b)),提出了迫切需要建立统一的智能无人集群技术体系和标准体系,为产业发展指导产品全生命周期的设计、研制、使用和维护等^[11],随后成立了无人集群研究组,拟制定无人集群的系列行业、国家和国际标准。

综上所述,随着无人机行业的日趋成熟,民用无人机使用率逐年增加,各国都在采取积极措施推进无人机行业的健康、可持续发展。相比过去几年,无人机相关政策与法规在2021年得到了进一步细化,内容更加完善明确,监管措施得以强化,以

促进无人机行业的合法化运行。未来,无人机的空中飞行与运行将会有国际化的趋势,无人机主体将由消费级无人机向商用无人机转化,相应城市空中交通运输也将开启规模市场^[1]。

2 应用扩展与技术革新

2021年,无人机作为逐渐成熟的空中平台,与传统行业相结合,在航空航天、军事、气象探测、植保等领域中均展现出其广阔发展前景与无限潜力。同时,新构型仿生无人机的研发与应用为无人机行业注入新活力,也为跨域融合发展开辟新蓝海。

2020年7月30日从美国佛罗里达州发射的“毅力号”(Perseverance)火星探测器经过漫长的太空旅行,于北京时间2021年2月19日凌晨4点55分左右成功在火星着陆,开启了生命搜寻之旅。“毅力号”火星探测器不仅携带有火星车,还搭载了一架“机智号”(Ingenuity)无人机(图2(a))。该无人机最高飞行高度为5 m,最大飞行距离300 m,用于近地观察和洞穴、峡谷等的观测。2021年4月19日该无人机在火星上进行了首飞,完成3 m高度悬停30 s的高难度动作,成为了人类历史上首架在其他行星上飞行的可控无人飞行器^[12]。网站“The Drive”2021年7月29日报道,美国马丁公司制造的V-Bat可垂直起降无人机将与人工智能公司Shield AI的人工智能技术结合,从而获得自主和集群能力,并且计划在没有GPS的情况下提高无人机的任务执行能力^[13]。据德国传感器公司亨索尔特官网报道,公司将于2024年底前协助军方研究利用人工智能进行无人机群的战术级决策,在复杂任务中压制敌方空防,以及优化防御系统中不同成员的交互^[14]。国内,2021年3月24日,一架载有急救用血的无人机降落在浙江大学医学院附属第二医院(浙大二院)滨江院区专用停机坪,这条医用无人机血液运输航线由浙江省血液中心和浙大二院共同建立,是全国首个无人机急救送血专用航线。北京航空航天大学“冯如三号”团队研制的25~100 kg级油动固定翼无人机能够持续飞行80 h 46 min 35 s,国际航空联合会(Fédération Aéronautique In-

ternationale, FAI)正式将该续航时间作为新的世界纪录。“冯如三号-100型”无人机跃居全世界油动固定翼无人机(重量等级无差别)续航时间的榜首^[15]。2021年8月,无人机从舟山定海区的象山岗,装载梭子蟹、大黄鱼等20 kg海鲜特产跨海直飞回上海金山,这是自2020年底民航总局启动13个民用无人驾驶航空试验基地(试验区)以来,中国首次使用垂直起降固定翼无人驾驶飞行器进行的超长距离海岛场景物流运输实践。2021年7月中旬,河南省突遭大规模极端强降雨,部分区域发生洪涝灾害,7月21日,国家应急管理部紧急调派“翼龙”无人机空中应急通信平台进入米河镇通信中断区,利用该平台搭载的移动公网基站,实现了约50 km²范围长时稳定的连续移动信号覆盖。11月27日,中国航空工业集团有限公司自主研制的“翼龙-10”搭载多种气象探测载荷,成功完成了飞行试验,向建设以无人机为主体的空基观测体系迈出了重要一步^[16]。山东冠县用10架无人机结合其他监控检测设备,将环保、住建、执法等多个部门的12项生态环境检测系统融为一体,打造空天地“啄木鸟”智慧监管平台,为环境巡查和执法工作提供了便利,提升了工作效率和完成任务质量^[17]。

农业植保是无人机民用和商用的重要市场之一^[1],2021年新技术、新应用也在不断扩大和改变着市场规模和应用模式。英国埃塞克斯大学Su等^[18]利用无人机搭载相机对植被进行拍照,结合U-Net深度学习网络,解决小麦黄锈病监测问题。Su将该问题转化为有监督的像素分类问题。研究表明,五频段多光谱图像比传统彩色图像更能提高图像的分割性能。无人机也通过机-机协同、机-车协同等同构或异构方法大放异彩。瑞士苏黎世联邦理工学院Preto等^[19]开展了利用无人系统进行精细化种植的研究,提出了采用旋翼无人机对植被进行空中巡逻监测的植保方案,通过视觉巡检的方法监测作物密度、杂草压力等状况,将指令发送给无人车,随后无人车自主规划航路,达到目标点进行任务作业。荷兰PATS Indoor Drone Solutions公司受夜间蝙蝠捕捉飞蛾的启发,研发了一款自主捕

捉害虫的无人机,利用小型监测站监测室内空域,通过视觉系统区分害虫和益虫,控制和引导无人机撞向飞蛾,从而解决了温室中存在有害昆虫的问题^[20]。

仿生无人机也是2021年无人机行业发展的重要方向。风媒种子体积小、质量轻,能随风进行远距离传播。韩国崇实大学研究人员基于此特点,联合美国西北大学等高校研究人员共同设计了一种在环境中受控制、无动力的微型三维机械结构,这种微型飞行器结构巧妙,材料可降解,在未来有望辅助实现环境监测^[21]。加州理工学院研究人员受鸟类启发打造了一种能走能飞的双足机器人。这种机器人基于倒立摆模型设计控制器,通过优化旋翼控制输入,由旋翼辅助行走,机器人的走和飞2种模式的切换通过足部的接触传感器判断^[22]。美国斯坦福大学与荷兰格罗宁根大学合作研发了一种仿游隼足部的机器脚爪(图2(b)),可被动地将冲击能量转化为抓握力,从而动态地栖息在复杂的表面上,抓握不规则形状的物体^[23]。利用这种机器脚爪,旋翼机能够在各种表面起飞与停留,同时节省能耗,进一步拓展无人机应用领域。固定翼无人机的栖息停靠因为需要达到动能平衡,相比旋翼机更为困难。在停靠时动能太大容易摧毁无人机,动能减小过多容易造成无人机失速坠落。一般固定翼的动能平衡通过调节俯仰角来完成,但较为危险。瑞士洛桑联邦理工学院Floreato等设计了一种机头带抓爪的固定翼无人机,能够在不同姿态下通过机械装置吸收和存储撞击时的动能来进行停靠^[24]。小型生物也能给人以启迪。Floreato等还发现瓢虫能够在摔倒时利用翅鞘自行扶正,由此在微型无人机固定翼上方加入一对仿翅鞘翼。研究表明,这种方法不仅能够增强微型固定翼无人机自我扶正能力,同时不影响飞机的气动效率^[25]。麻省理工学院Chen等制造出一种扑翼式微型仿昆虫无人机,不仅能够控制悬停,还可在碰撞后快速恢复,该无人机具有高升阻比,由一种新的介电弹性体驱动器提供动力,其功率密度和效率相比之前的工作有较大提升(图2(c))^[26]。

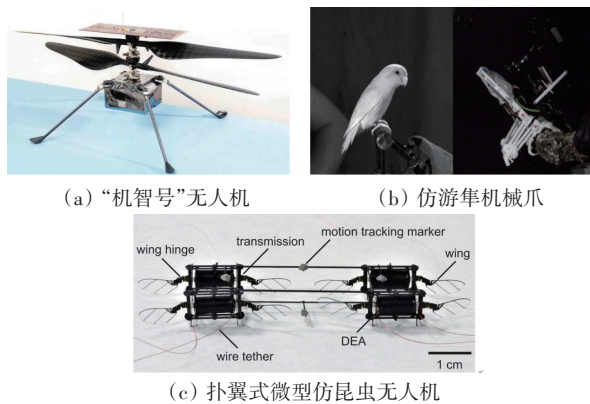


图2 2021年无人机总体设计技术新突破

3 无人机自主控制关键技术

1) 导航与通信技术。

导航技术通常由3个过程组成:感知、映射和规划。同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术作为一种运动体状态估计的方法,在机器人、无人机等领域占有重要地位。利用SLAM算法实现位置估计的方法一般有2种,一种是视觉里程计,另一种是雷达里程计。但传统SLAM技术在大规模的非结构动态环境下往往不能取得较好的性能。针对这个问题,语义SLAM方法应运而生^[27]。宾夕法尼亚大学Liu等^[28]利用激光雷达和SLAM生成语义地图,纠正视觉-惯导产生的漂移,并同无人机控制环相结合,实现了在密集树林中、弱GPS环境下的无人机快速飞行。许多现有的激光雷达测速方法需要等激光雷达的整个扫描数据再进行处理,这导致姿态估计具有较大延迟。为了减小这种延迟,宾夕法尼亚大学Qu等^[29]通过全景深度图将雷达扫描分段化,其数据分段存储在环形缓冲器中,每一段进入缓冲器后立即与前一段进行融合,实验证明了该方法在大大减小测量延迟的同时保持大数据吞吐量。

虽然传统导航方式具有一定可行性,但由于其执行流程较多,容易产生时间延迟和误差累积,无法适应高速避障飞行。苏黎世大学Loquercio等^[30]借鉴端到端学习的方法,提出采用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)将传感器数据映射到无人机控制量上,在仿真环境中进行训练。

该方法在实际外场环境的验证中获得了较高的成功率(图3(a))。实际场景比仿真更为复杂的原因在于需要考虑风扰等不确定因素,为了解决这个问题,麻省理工学院Paris等^[31]通过4个分布在无人机表面的气流传感器估计无人机空速,并用递归神经网络(recurrent neural network, RNN)估计旋翼和传感器之间的气动作用。模仿学习也被用于无人机导航中。麻省理工学院Tagliabue等^[32]设计了一种新型的鲁棒管模型预测控制器(robust tube model predictive controller, RTMPC)作为专家经验进行四旋翼无人机轨迹跟踪训练。由于训练的模型有误差,Tagliabue等巧妙利用鲁棒管特性提出了一种数据增广方法进行误差修正。该方法一定程度上增强了模型的鲁棒性,同时使训练更加高效。神经网络可以为无人系统提供经验上的性能提升,但也给系统的安全特性分析带来挑战,麻省理工学院Everett等^[33]提出一种凸松弛算法,对具有神经网络控制器的闭环系统进行了轨迹正向可达集的分析与求解,该算法与其他经典算法相比计算速度更快,误差更小。

印度安娜大学Raja等^[34]利用中央控制器对无人机群按照距离远近进行组网控制,并采用A*算法进行轨迹规划。为防止GPS欺骗,Raja提出采用信息加密方式进行信息传输。但集中式控制由于通信限制无法进行大规模集群,因此研究更多采用分布式控制方法。美国麻省理工学院与宾夕法尼亚大学共同提出了一种算法将集群中的通信数量量化为拓扑图中的度,并用Transformer算法根据拓扑图进行通信选择,以达到最小化通信量的目的^[35]。大规模分布式无人机集群仍然受到无线通信的限制。随着无人机数量的增加,通信数据量增大,通信波道可能达到饱和。而有线网络一般能提供更长的传输距离、更高的网速和更高的可靠性。上海大学Gao等^[36]针对机载ad hoc网络,设计了一种数据路由决策方案。在利用曼哈顿移动模型构建道路地图的基础上,用有线传输进行对地通信,在机-机通信中采用ad hoc无线网络,并用改进贪心算法实时选择下一多跳节点。实验表明这种机载ad hoc网络更具有可靠性。瑞士洛桑联邦理工

学院 Schilling 等^[37]不采用传统的通信方式,而是依据动物群体中利用视觉完成群体运动,提出了一种二维的基于视觉的无人机集群探测和跟踪方法。每架无人机装有全向相机,通过已训练的神经网络定位临近无人机,根据视觉获得相对位置和相对速度,该方法与 Reynolds 集群控制方法相结合,实现了3架无人机的外场飞行验证。

2) 集群协同控制与规划。

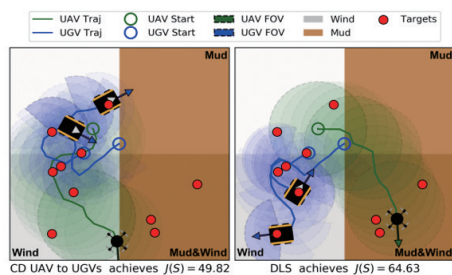
无人机集群相比单个无人机具有冗余度高、搜索范围广、任务执行能力强等优势,能够应用于复杂场景。近年来无人机集群的研究不断深入,应用场景也不断增多。斐济太平洋大学 Kumar 等^[38]提出了一种基于李雅普诺夫方法的分布式速度控制器,从运动学层面对二维无人机集群进行控制,实现了无碰撞动态避障,但该方法要求每个个体知道所有个体的位置,可扩展性不佳。北京航空航天大学 Zhang 等^[39]设计了一种双领导者的仿轴承结构编队,只通过个体与第一领导者的相对位置进行定位,不需要知道全局个体位置信息,具备更高的灵活性和可扩展性。国防科技大学 Li 等^[40]针对空地协同中视觉特征无法完成目标关联的问题,融合基于视轴线的阈值法与改进的拓扑相似度关联方法,仅利用目标之间的相对位置关系实现了多目标关联,进而基于空地无人系统实现了多目标的高精度定位。

对执行检查、探索或搜索和救援等任务的系统,多机器人覆盖问题(coverage problem)是一个基本模块。巴西帕拉联邦大学 Medeiros 等^[41]将无人机集群应用在洪灾搜索中,并提出了一种节省无人机能耗的控制算法,即将首先发现移动目标的无人机作为领导者,其他无人机作为中继通信点,将影像实时传送给地面站,以达到节省能耗的目的。宾夕法尼亚大学 Tolstaya 等^[42]将覆盖问题离散化为位置空间图,将机器人当作图中节点,并训练神经网络来模仿开环轨迹规划求解器,以达到集群数量可扩展的目的。中国台湾中央大学 Chen 等^[43]将无人机作为空中基站,在空-陆无线缓存网络下对无人机群设计了一种分布式三维轨迹规划方法,用来跟踪地面移动端。该方法分为2个阶段:第一阶段

中利用 K 均值聚类算法将地面移动端分配给距离最近的无人机群,第二阶段用 Q-learning 算法动态调整无人机位置,以达到最大网络吞吐量。麻省理工学院 Cai 等^[44]针对无人机-无人车异构集群动态路径规划提出了一种基于局部搜索的分布式算法(图3(b)),该算法利用分块矩阵的结构,使集群中每个个体通过不断提出有利于自己的轨迹以达到使总的集群的目标函数最大的目的。为了降低算法的计算量和个体间的通信次数,该算法按个体表现排序后再进行搜索,并在搜索初期使个体的表现尽可能增大目标函数值。在物流运输情境下,澳大利亚新南威尔士大学 Huang 等^[45]针对无人机-地面车辆协同路径规划问题,综合考虑机-车路径遍历时间间等待时间的耦合性以及无人机电池寿命,提出了一种基于改进标号法的算法,求解最小时间路径。通过2021年来无人机代表性关键技术发展趋势可知,无人机将越来越多搭载人工智能技术,从顶层与底层控制实现核心关键技术的创新突破。



(a) 野外高速飞行



(b) 无人机-无人车协同异构

图3 2021年无人机部分自主控制关键技术

4 无人机集群验证

简单的无人机集群已由集中式控制的方式实现,但在复杂环境、复杂任务、通信约束等情况下实

现面向实际工程应用的无人机大规模自主集群还有较大差距。

由于可能发生碰撞,现有模型中很少有无人机集群能够在密集杂乱的环境下飞行。避障主要通过定义虚拟排斥个体来完成,这些虚拟个体环绕在障碍物边界,但这会导致集群中个体在遇到障碍物时减速,倘若降低虚拟个体的排斥力来保持快速飞行,又会引发碰撞问题。此外,为模拟现实世界,一般的模型通常包含大量具有相互依赖关系的参数。考虑这些因素,瑞士洛桑联邦理工学院 Soria 等^[46]提出一种采用非线性模型预测的控制方法,利用集中式控制实现 5 架无人机在复杂环境中的避障。其中,代价函数的定义考虑了 4 个方面:(1) 使个体之间保持规定距离;(2) 推动个体保持规定速度;(3) 操控集群沿着既定方向飞行;(4) 尽量减少个体变速从而保证飞行轨迹光滑,提高效能。但是,集中式方法会限制无人机集群规模,该方法中求解凸优化问题算法要求的算力较高,Soria 等对此进行了创新改进,提出了一种分布式模型预测控制方法以达到一定规模的集群协调控制,通过地面站在线程之间交换信息来模拟无人机相邻个体之间的信息交互,实现了无人机集群自组织避障飞行(图 4(a))。该方法能够在不同环境、传感器噪声水平达 70% 的情况下控制大规模无人机飞行,并用 16 架旋翼无人机在室内有障碍环境中得到验证^[47]。荷兰、西班牙和哈佛大学的研究人员开发出了一种非结构环境下集群避障规划算法,能使 37.5 g 微型

四轴旋翼机集群在有障碍的未知、无 GPS 环境下绘制区域地图,定位气体泄漏源。该算法采用粒子群算法进行未知环境的路径规划,使旋翼机沿着墙壁或障碍物呈锯齿状前进,同时可避免与其他无人机碰撞^[48]。

2021 年 1 月 15 日,印度首次在建军节阅兵式上展示了一种进攻性无人机集群系统,该系统由 75 架无人机组成,可自主识别和击落目标^[49]。据以色列时报报道,以色列军队在加沙战役中部署了小群四旋翼无人机,每架无人机用于监控特定土地。当检测到火箭或迫击炮发射时,其他武装飞机或地面部队会攻击火源^[50]。美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)表示,10 月 29 日第 4 次“小精灵(Gremlins)”项目部署中,2 架无人机成功完成所有编队飞行位置和安全任务,并且一架无人机被成功回收(图 4(b)),这是美军从母舰部署大批无人机的重要里程碑^[51]。此外,DARPA 的“进攻性蜂群使能战术(OFFensive Swarm-Enabled Tactics, OFFSET)”项目也于 2021 年进行了现场综合试验(FX-6),试验中展示的技术包括使用了 2 个蜂群系统进行组合协同操作,并行使用虚拟和现实蜂群单元,利用沉浸式蜂群界面对蜂群进行指挥控制^[52]。

无人机比赛是检验无人机技术的“试金石”,无人机集群大赛可驱动智能无人机集群技术发展,并推动科技创新与无人机创新人才培养。尽管 2021 年全球新冠肺炎疫情此起彼伏,7 月,第二届空军“无人争锋”智能无人机集群系统挑战赛在河北涿水中国电科电子科技园成功举办(图 4(c))。比赛分为公开赛和邀请赛 2 个阶段,共吸引了来自军内单位、军工企业、研究机构、高校、民企等领域的 51 支队伍、500 余人参赛。该赛事突出自主控制、任务协同、群体智能、虚实结合、实战考核,进一步强化了近实战环境下对集群系统各项技术的检验。9 月,2021 年“智能无人系统应用挑战赛”在湖南长沙成功举办,本次大赛以“无人自主,勇争先锋”为主题,邀请来自多家单位的 10 余支队伍,分别在“快递速达”“飞行避障”“协同追踪”3 个赛道进行角逐,比赛核心内容与未来无人系统应用高度契

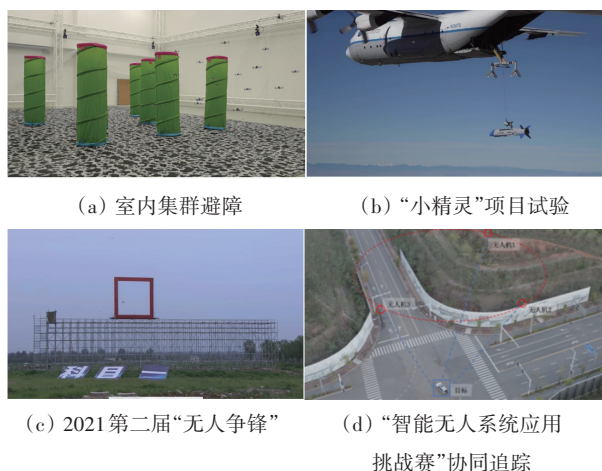


图 4 2021 年无人机集群技术的部分验证

合。大赛进一步推动了无人系统智能感知、认知、交互、协同等关键共用技术的发展,参赛单位以赛为媒,深入交流、凝聚共识、共商合作,共同推动智能无人系统及相关产业的创新与发展(图4(d))。

5 人机交互技术

人机交互技术(human-computer interaction techniques)是指通过计算机输入、输出设备,以有效的方式实现人与计算机对话的技术。无人机用于辅助人完成具有一定复杂度的任务。尽管随着科技发展,无人机智能化程度越来越高,但仍不能满足人类需求,无人机发展需要人类智慧,因此这种需求是双向的,使人机交互成为一种无人机领域的发展趋势。

在国家“十四五”规划中,虚拟现实和增强现实产业被列为数字经济重点产业,虚拟现实也是实现人机交互的一种重要手段,具有广阔发展前景。通常在虚拟现实中拟人的虚拟形象更符合人类直觉,也更能使用户获得沉浸式体验,对非拟人虚拟形象,如虚拟无人机,瑞士洛桑联邦理工学院 Macchini 等^[53]研究成果验证了为了增强体验感,需要第一人称视角和第三人称视角相配合(图5(a))。考虑到人操作无人机飞行需要进行专业训练,为方便新手操作无人机,瑞士洛桑联邦理工学院 Ramachandran 等采取了一种更直觉式的方法:将人类躯体运动直接与无人机飞行指令映射。Ramachandran 设计了一种可穿戴触觉袖套,使用者可以移动手肘和手腕对虚拟无人机进行平面控制并进行避障^[54]。在

无人机集群领域,人类的介入一方面可以利用自身感知和决策提高无人机这一“弱智能”的任务执行效率,另一方面可以随着任务目标的变化传达意图的变化^[55]。Macchini 等^[56]利用机器学习中的岭回归模型作为映射函数,使得人能够通过手势操纵虚拟无人机群。这种方法可以依据用户习惯个性化定制人机交互模式,可以通过控制无人机群的位置或速度对无人机群进行控制。

人机交互也通过其他不同的方式体现。杭州师范大学 Zheng 等^[57]针对电力传输网络修复场景,提出了一种协同进化算法,同时进化无人机调度和人员调度问题,为每个无人机调度匹配最佳人员调度方案,并基于目标函数对无人机调度方案进行反馈改进,在实际场景中成功得到应用。瑞士、德国、意大利几所大学研究人员^[58]共同提出了一种纳米无人机控制算法,设计卷积神经网络实现纳米无人机从利用相机感知到自主控制功能,使其能够与移动的人保持固定距离。瑞士苏黎世联邦理工学院 Tognon 等^[59]为听障或视障人士开发出一种牵引式无人机,通过弹性绳索将人导引至目的地,该方法将人当作质量弹簧阻尼器系统,对人-绳索-无人机进行系统建模与控制器设计,在此基础上考虑人的实际运动情况,设计了一种路径跟踪算法,并进行了实物验证。

虽然目前无人机集群技术已经取得一定的进展,但由于目前无人机自卫和空中对抗能力不足,易面临被干扰、诱骗和打击的危险。有人机与无人机组成的混合集群编队协同作战,技术难度上要小于“全无人机集群”作战。美国 DARPA“空战演进计划(Air Combat Evolution, ACE)”项目于2021年2月开展2 vs 1模拟AI混战,由2架友方“蓝色”F-16以团队形式对抗敌方“红色”飞机,这为2021年年底的第二阶段现场小型飞机混战打下基础。ACE项目是实现 DARPA“马赛克战”而设计的几个项目之一,旨在用最新技术不断升级有人-无人协同系统^[60]。美国兰德公司于2021年初发布关于“马赛克战”的3份报告《布洛托上校博弈对马赛克战的启示》《分布式杀伤链:免疫系统和海军对马赛克战的启示》《基于代理的模型对马赛克战的启示》,进一



图5 2021年无人人机交互部分技术

步推动“马赛克战”发展^[61]。美国提出的“忠诚僚机”无人机经过3年已有较大进展。波音公司和澳大利亚皇家空军于2021年3月1日宣布,“忠诚僚机”无人机首飞成功^[62]。4月19日,美国海军首次进行了由太平洋舰队领导的“无人系统综合战斗问题21(UxS IBP 21)”演习,作战包括机动、目标瞄准与攻击、情报、侦察和监视,目的是将多领域有人和无人系统整合到不同作战场景中^[63]。有人机-无人机协同作战需要考虑飞行员的工作负荷。近年来随着技术发展,关于有人机-无人机的研究不再单纯地将有人机当作“强智能”进行任务分配,把无人机作为执行任务的“弱智能”。法国图卢兹大学 Singh 等^[64]将有人机与无人机当作平等的智能体,在此前提下基于生理信号,即心电图、眼球追踪和脑电图,采用机器学习分类器描述和估计飞行员的工作负荷(图5(b))。德国慕尼黑国防军大学 Schwerd 等^[65]为防止飞行员对无人系统产生依赖,提出一种认知状态估计框架,通过实时评估飞行员的注意力分配和态势感知,识别可能导致飞行员表现下降或失误的情况(图5(c))。

6 反无人机技术

有无人机的地方,也有反无人机系统。反无人机系统是无人机产业蓬勃发展的过程中应运而生的产物。随着无人机平台与集群技术的发展,基于无人机的作战行动渐趋频繁,也进一步促生了防空武器新的增长点——无人机防御系统。波兰塔尔努夫机械厂和华沙董布罗夫斯基军队技术学院正在研发一种对抗小无人机的防御系统,配备有多管机枪和无线电定位系统,目前已完成了电源系统、控制系统以及机枪单元的测试^[66]。在第15届阿布扎比国际防务展上,俄罗斯参展方提供了 REX-2 反无人机步枪、“驱蚊巡逻”系统等10余型装备组成的无人机防御解决方案^[67]。英国 Blighter 公司在2021年发布了新多模雷达白皮书,指出多模雷达可同时扫描空域、陆地和水域,为边境安全和无人机监测提供了最有效的解决方案^[68]。美国 DARPA 的机动部队保护计划在佛罗里达州艾格林空

军基地成功测试了一种反无人机系统,该系统首先通过雷达识别潜在威胁,可以发射不同的小型无人机拦截器,其主要拦截方式是将众多串飘带射入无人机螺旋桨,进而干扰无人机作业^[69]。卢森堡大学 Brust 等^[70]提出了一种基于无人机集群的无人机反制系统,设计巡航、探测、拦截和反击4种模式,并针对通信障碍情况设计了一种自平衡机制,使集群能够在无GPS情况下自组织编队对抗单架敌方无人机。国防科技大学谢海斌等^[71]针对无人机集群反制技术进行剖析,总结出探测识别、平台摧毁、链路干扰欺骗等为有效无人机集群打击手段,并进行了可行性分析,为未来无人机集群反制技术发展提供参考。

为打击民用无人机“黑飞”现状,中科防务科技(山东)有限公司在青岛成功测试一套无人机反制系统。该系统在侦测识别基础上,采用电磁干扰和导航诱骗,将无人机诱骗到指定的安全位置进行降落^[72]。无线设备可以通过射频指纹来识别,烟台大学 Cai 等^[73]基于射频指纹技术设计了一种无人机识别系统,通过采集和分析无人机在不同飞行模式下的射频信号,训练神经网络,以达到识别并进行反制的目的。中国科学院大学和北方电子设备研究所联合发布了首个反无人机多模态数据集,含有318段可见光-红外视频对,给出了无人机追踪评估标准,并提出了一种复杂环境下多模态小目标跟踪算法。研究表明,该算法在目标跟踪上相比现有算法性能最优^[74]。

综上所述,无人机反制技术主要用于满足反无人机作战需求、维护空中安全秩序。当前无人机反制研究较为零散,还未形成体系,且技术应用具有一定局限性,无法多方面满足反无人机需求。随着无人机技术发展,反无人机理论与技术还需要进一步深入研究,使其具备更加灵活和高效的侦察与拦截能力。

7 结论

从无人机管控政策、关键技术、集群验证、应用扩展、人机交互和反无人机技术等方面回顾和总结

了2021年无人机军用与民用部分热点和发展新态势。随着无人机消费级市场逐渐饱和,产业主体将由消费级无人机向商业级无人机转型。在技术发展与法规政策引领下,无人机应用领域不断扩大,新的无人机市场如空中运输等也将应运而生。加强人工智能、视觉导航等新一代信息技术与无人机深度融合是提升无人机能力的重要方式,随着智能感知、智能决策、智能控制、人机融合等关键技术的突破,无人机将向微型化、集群化、智能化、跨域化发展,并与其他跨域平台融合应用,无人机的智能自主能力和执行复杂任务效能必将得到进一步提升。

参考文献(References)

- [1] AUVSC. 洞见|全球民用无人机融入空域战略与我国对策[EB/OL]. (2021-06-28)[2021-12-02]. https://mp.weixin.qq.com/s/uDcw9s6l_Yr_VD_n_77yCQ.
- [2] EASA. EASA and ENAV signed a memorandum of cooperation[EB/OL]. (2021-10-26)[2021-11-29]. <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/news/easa-and-enav-signed-memorandum-cooperation>.
- [3] Drone Site Surveys. Drone laws UK 2021 (Updated May 2021)[EB/OL]. (2021-05-20)[2021-11-29]. <https://drone-sitesurveys.co.uk/drone-laws-uk/>.
- [4] Alamouri A, Lampert A, Gerke M. An exploratory investigation of UAS regulations in Europe and the impact on effective use and economic potential[J]. *Drones*, 2021, 5(3): 63-79.
- [5] Gov. UK. Regulatory horizons council: The regulation of drones[EB/OL]. (2021-11-01)[2021-11-29]. <https://www.gov.uk/government/publications/regulatory-horizons-council-the-regulation-of-drones>.
- [6] New rules allowing small drones to fly over people in U.S. take effect[EB/OL]. (2021-04-21)[2021-11-29]. <https://www.usnews.com/news/top-news/articles/2021-04-21/new-rules-allowing-small-drones-to-fly-over-people-in-us-take-effect>.
- [7] 中国民航局. 关于《民用微轻小型无人驾驶航空器运行识别概念及要求(暂行)》公开征求意见的通知[EB/OL]. (2021-03-10)[2021-11-29]. http://www.caac.gov.cn/HD-JL/YJZJ/202103/t20210310_206727.html.
- [8] 中国民航局. 民航局关于印发《民用无人驾驶航空试验基地(试验区)建设工作指引》的通知[EB/OL]. (2021-05-21)[2021-11-29]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TZTG/202005/t20200522_202732.html.
- [9] 中国民航局. 中国民用航空局关于推进民航统计现代化改革的若干意见[EB/OL]. (2021-08-13)[2021-11-29]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/ZCFBJD/202108/t20210830_209048.html.
- [10] 交通运输部办公厅关于印发《交通运输“十四五”立法规划》的通知[EB/OL]. (2021-10-28)[2021-12-02]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/12/content_5650426.htm.
- [11] 中国电子技术标准化研究院. 智能无人集群系统发展白皮书[R]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2021.
- [12] 杨先碧. “机智号”要想在火星上飞起来, 可比在地球上难多了[EB/OL]. (2021-03-06)[2021-12-10]. https://mp.weixin.qq.com/s/aUcCPs4zNiEx_zRI0eZpsA.
- [13] New swarming capability planned for the V-Bat vertical takeoff and landing drone[EB/OL]. (2021-07-29)[2021-12-10]. <https://www.thedrive.com/the-war-zone/41755/new-swarming-capability-planned-for-the-v-bat-vertical-takeoff-and-landing-drone>.
- [14] Hensoldt simulates defence systems of the future[EB/OL]. (2021-11-04)[2021-12-02]. <https://www.hensoldt.net/news/hensoldt-simulates-defence-systems-of-the-future/>.
- [15] 航小萱. 北航学子, 再破世界纪录! [EB/OL]. (2021-10-03)[2021-12-10]. https://mp.weixin.qq.com/s/360NG-eHIXh_12qDyOCl6VQ.
- [16] 常庆星. “翼龙”-10 无人机成功执行海洋气象观测科研试验任务[EB/OL]. (2021-11-30)[2021-12-02]. http://ep.cannews.com.cn/publish/zghkb7/html/4642/node_192682.html.
- [17] 山东冠县“啄木鸟”聪明灵敏又可靠[EB/OL]. (2021-12-01)[2021-12-06]. http://49.5.6.212/html/2021-12/01/content_71810.htm.
- [18] Su J, Yi D, Su B, et al. Aerial visual perception in smart farming: Field study of wheat yellow rust monitoring[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3): 2242-2249.
- [19] Pretto A, Aravecchia S, Burgard W, et al. Building an aerial-ground robotics system for precision farming: An adaptable solution[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2021, 28(3): 29-49.
- [20] Pulone S. Voices of disruption[EB/OL]. (2021-10-04)[2021-12-02]. <https://terpenesandtesting.com/pats-indoor-drone-solutions/>.
- [21] Kim B H, Li K, Kim J T. et al. Three-dimensional electronic microfliers inspired by wind-dispersed seeds[J].

- Nature, 2021, 597: 503–510.
- [22] Kim K, Spieler P, Lupu E S, et al. A bipedal walking robot that can fly, slackline, and skateboard[J]. *Science Robotics*, 2021, 6: eabf8136.
- [23] Roderick W R T, Cutkosky M R, Lentink D. Bird-inspired dynamic grasping and perching in arboreal environments[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(61): eabj7562.
- [24] Stewart W, Guarino L, Piskarev Y, et al. Passive perching with energy storage for winged aerial robots[J/OL]. *Advanced Intelligent Systems*. [2021-12-02]. doi: 10.1002/aisy.202100150.
- [25] Vourtsis C, Rochel V C, Serrano F R, et al. Insect inspired self-righting for fixed-wing drones[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 6805–6812.
- [26] Chen Y F, Xu S Y, Ren Z J, et al. Collision resilient insect-scale soft-actuated aerial robots with high agility [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(5): 1752–1764.
- [27] Minoda K, Schilling F, Wüest V, et al. Viode: A simulated dataset to address the challenges of visual-inertial odometry in dynamic environments[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 1343–1350.
- [28] Liu X, Nardari G V, Ojeda F C, et al. Large-scale autonomous flight with real-time semantic SLAM under dense forest canopy[J]. *arXiv Preprint*, 2021, arXiv: 2109.06479v2.
- [29] Qu C, Shivakumar S S, Liu W, et al. Llol: Low-latency odometry for spinning lidars[J]. *arXiv Preprint*, 2021, arXiv:2110.01725v1.
- [30] Loquercio A, Kaufmann E, Ranfil R, et al. Learning high-speed flight in the wild[J]. *Science Robotics*, 2021, 6(59): eabg5810.
- [31] Paris A, Tagliabue A, How J P. Autonomous MAV landing on a moving platform with estimation of unknown turbulent wind conditions[C]//AIAA Scitech 2021 Forum. Nashville: AIAA, 2021: 0378.
- [32] Tagliabue A, Kim D K, Everett M, et al. Demonstration-efficient guided policy search via imitation of robust tube MPC[J]. *arXiv Preprint*, 2021, arXiv:2109.09910v2.
- [33] Everett M, Habibi G, How J P. Efficient reachability analysis of closed-loop systems with neural network controllers[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an: IEEE, 2021: 4384–4390.
- [34] Raja G, Anbalagan S, Ganapathisubramaniyan A, et al. Efficient and secured swarm pattern multi-UAV communication[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(7): 7050–7058.
- [35] Inala J P, Yang Y C, Paulos J, et al. Neurosymbolic transformers for multi-agent communication[J]. *arXiv Preprint*, 2021, arXiv: 2101.03238v1.
- [36] Gao H H, Liu C, Li Y, et al. V₂VR: Reliable hybrid-network-oriented V2V data transmission and routing considering RSUs and connectivity probability[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(6): 3533–3546.
- [37] Schilling F, Schiano F, Floreano D. Vision-based drone flocking in outdoor environments[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(2): 2954–2961.
- [38] Kumar S A, Vanualailai J, Sharma B, et al. Velocity controllers for a swarm of unmanned aerial vehicles[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2021, 22: 100198.
- [39] Zhang Y, Wang X, Wang S, et al. Distributed bearing-based formation control of unmanned aerial vehicle swarm via global orientation estimation[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 35(1): 44–58.
- [40] Li X D, Wu L Z, Niu Y F, et al. Topological similarity based multi-target correlation localization for aerial-ground systems[J]. *Guidance, Navigation and Control*, 2021, 1(3): 2150016–1–25.
- [41] Medeiros I, Boukerche A, Cerqueira E. Swarmed and energy-aware unmanned aerial vehicle system for video delivery of mobile objects[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(1): 766–779.
- [42] Tolstaya E, Paulos J, Kumar V, et al. Multi-robot coverage and exploration using spatial graph neural networks [C]//2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 8944–8950.
- [43] Chen Y, Liao K, Ku M, et al. Multi-agent reinforcement learning based 3D trajectory design in aerial-terrestrial wireless caching networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(8): 8201–8215.
- [44] Cai X, Schlotfeldt B, Khosoussi K, et al. Non-monotone energy-aware information gathering for heterogeneous robot teams[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 8859–8865.
- [45] Huang H, Savkin A V, Huang C. Reliable path planning for drone delivery using a stochastic time-dependent public transportation network[J]. *IEEE Transactions*

- on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(8): 4941–4950.
- [46] Soria E, Schiano F, Floreano D. Predictive control of aerial swarms in cluttered environments[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2021, 3: 545–554.
- [47] Soria E, Schiano F, Floreano D. Distributed predictive drone swarms in cluttered environments[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(1): 73–80.
- [48] Duisterhof B P, Li S, Burgués J, et al. Sniffy bug: A fully autonomous swarm of gas-seeking nano quadcopters in cluttered environments[C]//2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 9099–9106.
- [49] Army Day 2021: Offensive swarm drone system demonstrates capabilities for the first time[EB/OL]. (2021-01-15) [2021-12-07]. <https://www.msn.com/en-in/video/news/army-day-2021-offensive-swarm-drone-system-demonstrates-capabilities-for-the-first-time/vi-BB1cLX4c>.
- [50] GROSS J A. In apparent world first, IDF deployed drone swarms in Gaza fighting[EB/OL]. (2021-07-10) [2021-12-07]. <https://www.timesofisrael.com/in-apparent-world-first-idf-deployed-drone-swarms-in-gaza-fighting/>.
- [51] Losey S. DARPA nabs Gremlin drone in midair for first time[EB/OL]. (2021-11-06) [2021-12-07]. <https://www.defensenews.com/unmanned/2021/11/05/darpa-nabs-gremlin-drone-in-midair-for-first-time/>.
- [52] James W. 进攻性蜂群使能战术 OFFSET 完成最终场地测试 [EB/OL]. (2021-12-15) [2021-12-10]. <https://mp.weixin.qq.com/s/hNrbR3mC6yjkWYiZRqSRKA>.
- [53] Macchini M, Lortkipanidze M, Schiano F, et al. The impact of virtual reality and viewpoints in body motion based drone teleoperation[C]//2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). Piscataway, NJ: IEEE, 2021: 511–518.
- [54] Ramachandran V, Macchini M, Floreano D. Arm-wrist haptic sleeve for drone teleoperation[J/OL]. *IEEE Robotics and Automation Letters*. [2021-12-02]. doi: 10.1109/LRA.2021.3122107.
- [55] Kolling A, Walker P, Chakraborty N, et al. Human interaction with robot swarms: A survey[J]. *IEEE Transactions on human-machine systems*, 2015, 46(1): 9–26.
- [56] Macchini M, Matteis L D, Schiano F, et al. Personalized human-swarm interaction through hand motion[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6(4): 8341–8348.
- [57] Zheng Y, Du Y, Su Z, et al. Evolutionary human-UAV cooperation for transmission network restoration[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(3): 1648–1657.
- [58] Palossi D, Zimmerman N, Burrello A, et al. Fully on-board AI-powered human-drone pose estimation on ultra-low power autonomous flying nano-UAVs[J/OL]. *IEEE Internet of Things Journal*. [2021-12-02]. doi: 10.1109/JIOT.2021.3091643.
- [59] Tognon M, Alami R, Siciliano B. Physical human-robot interaction with a tethered aerial vehicle: Application to a force-based human guiding problem[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2021, 37(3): 723–734.
- [60] Johns Hopkins APL bridges the gap with next phase of DARPA's ACE program[EB/OL]. (2021-04-08) [2021-12-14]. <https://www.jhuapl.edu/PressRelease/210408b-APL-bridges-gap-next-phase-DARPA-ACE>.
- [61] 王彤. 美国兰德公司发布“马赛克战”新报告, 加速推动概念发展[EB/OL]. (2021-12-14) [2021-12-14]. <https://mp.weixin.qq.com/s/NAgPXKcaqMI5gPP7UXPacg>.
- [62] D'Urso S. Let's talk about Boeing Loyal Wingman unmanned aerial vehicle's first flight[EB/OL]. (2021-03-03) [2021-12-08]. <https://theaviationist.com/2021/03/03/lets-talk-about-boeing-loyal-wingman-unmanned-aerial-vehicles-first-flight/>.
- [63] U.S. Navy begins first manned-unmanned naval capabilities exercise in the Pacific[EB/OL]. (2021-04-22) [2021-12-15]. <https://www.armadainternational.com/2021/04/u-s-navy-begins-first-manned-unmanned-naval-capabilities-exercise-in-the-pacific/>.
- [64] Singh G, Chanel C P C, Roy R N. Mental workload estimation based on physiological features for pilot-UAV teaming applications[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2021, 15: 692878.
- [65] Schwerd S, Schulte A. Operator state estimation to enable adaptive assistance in manned-unmanned-teaming [J]. *Cognitive Systems Research*, 2021, 67: 73–83.
- [66] Wojtyra D, Waclawik K, Krenc K, et al. Concept for the construction and application of a counter-UAV defence system[J]. *Problemy Mechatroniki: Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*, 2021, 12(1): 87–100.
- [67] 杨王诗剑. 无人装备占据展台“C位”——透视第15届阿布扎比国际防务展[EB/OL]. (2021-03-18) [2021-11-29]. <https://m.gmw.cn/baijia/2021-03/18/34695765.html>.
- [68] Radford M. Multi-mode radar white paper[R/OL]. (2021-

- 02-26)[2021-12-09]. <https://www.blighter.com/wp-content/uploads/multi-mode-radar-white-paper.pdf>.
- [69] Strout N. DARPA's newest system kills drones with stringy streamers[EB/OL]. (2021-06-09) [2021-12-10]. <https://www.c4isrnet.com/unmanned/2021/06/08/darpas-newest-system-kills-drones-with-stringy-streamers/>.
- [70] Brust M, Danoy G, Stolfi D H, et al. Swarm-based counter UAV defense system[J]. Discover Internet Things, 2021, 1: 2.
- [71] 谢海斌, 闫家鼎, 庄东晔, 等. 无人机集群反制技术剖析[J]. 国防科技, 2021, 42(4): 10-16.
- [72] 王凯. 最快1秒内实施控制! 新无人机反制系统在青岛成功进行设备测试[EB/OL]. (2021-03-12)[2021-12-02]. https://news.qingdaonews.com/qingdao/2021-03/12/content_22616770.htm.
- [73] Cai Z, Liu Z, Kou L. Reliable UAV monitoring system using deep learning approaches[J/OL]. IEEE Transactions on Reliability. [2021-12-02]. doi: 10.1109/TR.2021.3119068.
- [74] Jiang N, Wang K, Peng X, et al. Anti-UAV: A large multi-modal benchmark for UAV tracking[J]. arXiv preprint, 2021, arXiv: 2101.08466v3.

Review of technological hotspots of unmanned aerial vehicle in 2021

DUAN Haibin¹, HE Hangxuan¹, ZHAO Yanjie², WANG Yin³, NIU Yifeng⁴, YUAN Wanmai², DENG Yimin¹, FAN Yanming⁵, WEI Chen¹, LUO Delin⁶

1. Bio-inspired Autonomous Flight System (BAFS) Research Group, 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 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. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China

Abstract With the development of artificial intelligence and enhancement of airborne task platform performance, the unmanned aerial vehicle (UAV) technology and its application have presented a new development situation. This paper summarizes and analyzes the technological hotspots of UAVs in 2021 with respect to UAV regulations, autonomous control technologies, anti-UAV technologies and application fields for UAVs. Artificial intelligence and visual navigation technology not only enable UAVs to acquire more powerful functions but also largely extend and deepen the comprehensive application field. Especially, the human-robot will be getting closer and closer with the constant improvement of human-robot interaction technology. In summary, UAVs will be more miniaturized, clustered, intelligent and cross-domain. The deep integration with artificial intelligence and cross-platform practical applications of UAVs are still hotspots for the present and future.

Keywords unmanned aerial vehicle; policy and regulation; technological hotspots; swarm intelligence ●



(责任编辑 徐丽娇)