

引用格式: 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 023732. WANG X K, LIU Z H, CONG Y R, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: Review and outlook[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(4): 023732 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2019.23732

小型固定翼无人机集群综述和未来发展

综述

王祥科^{*}, 刘志宏, 丛一睿, 李杰, 陈浩

国防科技大学 智能科学学院, 长沙 410073

摘要: 围绕小型固定翼无人机集群这一难度高、发展快、应用前景广阔、多学科交叉的新方向,从集群系统内涵、现有典型项目、关键技术 3 个角度综述了国内外小型固定翼无人机集群的研究现状。在系统梳理集群系统内涵和应用优势的基础上,从集群协同模式探索、分布指挥体系构建、核心关键技术突破和集群验证等 4 个视角总结现有典型项目,从体系架构、通信组网、决策与规划、飞机平台、集群飞行、集群安全与集群指控等 7 个核心点综述了技术研究现状。最后,综合小型固定翼无人机集群中亟需解决的关键技术,展望了这一领域未来的发展趋势。

关键词: 无人机集群; 协同模式; 体系架构; 通信组网; 决策规划; 集群飞行

中图分类号: V249; V328.31; TP242.6

文献标识码: A

文章编号: 1000-6893(2020)04-023732-26

在自然界中,为弥补个体能力的有限,诸多生物种群都能通过个体相互之间交流和合作呈现出某种群体行为,比如鱼群的结群游弋、鸟群聚集迁徙以及蚂蚁协同搬运等。这些生物界的观察激励了研究人员深入探索集群系统群体行为的原理和模式,以期实现仅通过系统内局部的信息交换,使外部呈现出规则有序的协同行为的工作机制。受此激励,人们希望开发像鸟群、鱼群一样自由集结可以执行全局任务的无人机集群系统。

近年来,无人机集群因其潜在的巨大应用价值得到快速发展。一般而言,集群借助无人机机间的局部交互实现机群的群体行为从而解决全局性的协同任务。无人机集群,能够以分布方式完成大量单机系统无法完成,或者由群体更有效完成的任务。相比于旋翼无人机,固定翼无人机具有速度快、载重大、航程长等特点,在执行任务方面具有明显的优势。特别地,小型固定翼无人机由于具有体积小、成本低、易使用的优点,是适宜

于大规模集群使用的理想平台^[1]。

在此背景下,本文从集群系统内涵、现有典型项目、关键技术 3 个角度出发,对国内外小型固定翼无人机集群进行了全面综述。其中,在系统内涵方面,在介绍无人机集群系统基本概念的基础上,分析了无人机集群协同执行任务的优势,并给出了其在军民领域的广泛应用。在典型项目方面,从集群协同模式、指挥体系架构、基础性研究、集群验证 4 个视角总结现有典型项目。在关键技术方面,对体系架构、通信组网、决策与规划、飞机平台、集群飞行、集群指控等核心要素进行深度分析。此基础上,展望了未来小型固定翼无人机集群的发展趋势。具体而言,在给出无人机集群系统的概念和内涵基础上,本文的主要工作和贡献包括:

1) 系统总结了无人机集群项目的研究现状。采用自顶向下的方法,首次从集群协同模式探索、分布式指挥体系构建、核心关键技术突破和集群

收稿日期: 2019-11-10; 退修日期: 2019-11-28; 录用日期: 2019-12-16; 网络出版时间: 2019-12-31 16:30

网络出版地址: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200402.html>

基金项目: 国家自然科学基金(61973309, 61801494, 61906209)

^{*} 通信作者. E-mail: xkwang@nudt.edu.cn

验证等方面综述了近年集群领域的代表性工作。

2) 从机载约束、数量规模、任务耦合、复杂动力学等角度深入分析了固定翼无人机集群控制的挑战。在此基础上,按照集群协同的技术体系,分别综述了体系架构、通信与组网、决策与规划、平台系统、集群飞行、集群安全、集群指控等核心关键技术的研究进展。

3) 针对小型固定翼无人机特点和面临的复杂环境任务需求,从群体智能牵引、多样化任务导向、分布在线处理、意外事件响应、低成本轻质化特色和平行仿真手段等角度,系统展望了这一领域未来的发展趋势。

1 无人机集群系统介绍

1.1 无人机集群系统基本概念

无人机集群是将大量无人机在开放体系架构下综合集成,以平台间协同控制为基础,以提升协同任务能力为目标的分布式系统^[1]。一般而言,集群中的无人机不具有全局信息,通过相邻无人机间的交互,实现机群的群体行为,达到全局性协同目标^[2-4]。由于无人机集群行为是个体之间交互的结果,并不依赖于起主控作用的个体,因此集群系统通常具有鲁棒性、规模弹性和灵活性^[3-4]。

从生物集群,例如蚁群、蜂群等典型群体的特点出发,集群中的个体通常自主能力有限,但是群体通常具有3个典型特点:

1) 去中心化:系统没有主导节点,一旦集群中任何个体消失或丧失功能,整个群体依然有序地执行任务。

2) 自主化:无人人为操控,且所有个体观察临近个体状态控制自身行为,但并不对任何其他个体产生直接控制作用。

3) 自治化:所有个体形成稳定的集群结构,一旦任何个体脱离群体或因任何原因改变群体结构,新集群结构会快速形成并保持稳定。

1.2 无人机集群协同执行任务具有诸多优势

固定翼无人机集群协同执行任务已经成为无人机系统应用的重要发展趋势。自20世纪90年代以来,无人机在军民领域受到了空前的关注并得到了迅速发展。因响应速度快、使用成本低、部

署灵活等独特优势,无人机被普遍认为是未来信息化发展的重要平台。但是,由于环境复杂性和任务多样性,单无人机通常难以满足很多实际任务需求,比如复杂恶劣的战场环境,遮蔽物众多的城市环境等,单无人机由于机载设备数量、感知视点及范围受限等缺陷,通常难以执行持续目标跟踪、全方位饱和攻击等任务。故而,集群协同执行任务逐渐成为趋势。相比于单个无人机,拥有分布式特征的无人机集群在协同执行任务方面具有诸多优势。具体而言:

1) 具有分布并行感知、计算和执行能力,更好的容错性和鲁棒性等。集群中的多架无人机可以通过异质传感器的互补搭配,实现传感的并行响应;可以通过执行器分别执行子任务,实现总任务的分布执行。当部分无人机出现故障时,其他无人机可以替代它完成预定任务,使集群系统具有较高的容错性和鲁棒性。比如,在使用集群执行察打一体任务时,无人机集群可调整不同无人机携带的不同侦察设备(如光电吊舱、合成孔径雷达(SAR))的姿态,对目标进行全方位、多角度探测,提高感知范围和精度;可从多视角进行态势感知,比如重点区域/敏感目标的三维实时重构、隐藏/伪装目标的深度挖掘和学习分类等,获取不完全甚至冲突的局部态势信息;同时也可以对显著目标的异常行为进行分析和预判,比如敌方人员是否准备发动袭击、车辆/坦克是否集结进入作战准备、导弹是否进入发射状态、作战飞机是否准备起飞等;可从不同角度对同一高价值目标同时发动全方位饱和攻击,提高杀伤力和命中率。当由于自身故障或敌方攻击造成的部分无人机损失时,集群系统可通过敏捷重组,确保对重点目标的观测或打击效能不降级。

2) 可提升任务执行能力,完成单机完成不好或者不能完成的任务。协作的无人集群系统能够实现超过单个智能无人系统叠加的功能和效率,具备良好的包容性和扩展性。在大地测量和气象观测等领域,无人机集群携带分布载荷可完成单机无法完成的多点测量任务;在环境监测等领域,可组成移动传感器网络有效监测大范围的空气质量。在军事领域,无人机集群可以形成点面结合、灵活分组的自主系统,完成单个大型人机无法完成的任务。比如执行协同察打任务的无人机集

群,部分无人机可以执行未知区域搜索的任务,部分无人机可以执行重点目标跟踪的任务,部分无人机可以执行目标打击任务等;甚至可通过接力方式,实现对穿越山洞等遮蔽环境目标的持续跟踪。

3) 具有更高的经济可承受性。通过合理的布局 and 协同控制,能够使用分散式的低成本无人机集群系统代替成本高昂的单个复杂系统,实现更多的经济效益。基于小型化、集成化、模块化的设计理念,和信息化、自动化、网络化的管理使用方式,可极大降低无人平台的生产、运输、维护、保障、使用成本。1 000 架规模的无人机集群系统,其成本将低于 1 颗侦察卫星或 1 架有人机,但其综合效能有望超越 1 颗侦察卫星或 1 架有人机。

1.3 无人机集群在军民领域有广泛的应用

面对日益复杂的任务环境,小型固定翼无人机集群的运用越发广泛。由多个无人机组成在任务上相互关联的集群执行复杂任务的样式将成为未来军民领域无人机使用的一种重要样式,目前已在货物递送^[5]、环境保护^[6]、灾难响应^[7]、农林作业^[8]、森林防火^[9]、安防巡逻^[10]、目标搜索与追踪^[11]等领域得到应用。

在民用领域,无人机集群在智能交通、物流运输、森林火灾监测、地质灾害探测、农业植保、国土资源监测、对地观测和遥感、高速公路管理、小区环境监测等场景中具备特有的优势。比如,在国土资源监测中,无人机集群以协同模式同时对区域进行监控,可以很大程度上实现区域的同步监控,增加有效覆盖面积,节约执行任务时间。

军事领域中,无人机自主集群势必成为未来作战的主流趋势。无人机集群将带来作战模式的颠覆性变革,可广泛应用于广域搜索侦查监视、边境巡逻搜救、城市反恐维稳等领域,并可衍生新的作战模式,提升体系作战效能。从 2001 年开始,美军先后发布了 8 版无人机/无人系统路线图,指导无人系统的顶层设计和规划发展。早在 2005 年,美军国防部发布的《无人机系统路线图 2005—2030》将无人机自主控制等级分为 1~10 级,包括单机自主、多机自主、集群自主(分布式控制、群组战略目标、全自主集群)3 个层面,并预计 2025 年后将具备全自主集群能力^[12]。2016 年 5 月,美国

空军发布了首份针对小型无人机系统(起飞重量低于 600 千克)的飞行规划——《2016—2036 年小型无人机系统飞行规划》,从战略层面肯定了小型无人机系统的前景和价值,并对集群作战概念进行了阐述^[13]。

无人机集群因其典型优势,有望在未来战场的协同探测、协同攻击、干扰压制等各方面发挥巨大作用,成为一支不可忽视的新质力量。

在协同探测方面,无人机集群在战场上可以协同执行各种侦察、监视任务,对某一军事敏感区域实行常态化不间断监控,以全面获取战场环境监测和评估信息;在通信中继、电子对抗、和欺骗迷惑等方面,无人机集群也具有更高的成功率。特别地,分布式的系统拓扑结构使系统无中心脆弱点,损失部分平台对集群整体任务能力的影响不大,抗毁性好;同时,损毁补充替换简便,系统维护成本低。

在协同攻击方面,无人机集群攻击可避免飞行员伤亡,并且成本可承受,这是完全不同于以往的一种新的“缠斗”方式。任何飞行器,不管是有人还是无人的,都可能被单个导弹打下来,但是无人机集群却能够承受多次打击,继续完成任务。无人机集群系统将迫使敌人形成了“大炮打蚊子”的作战劣势,即使部分无人机被对方摧毁,也不影响集群系统的整体作战能力,通过队形的重组和任务的重新分配,实现核心攻击任务能力不降级。

在干扰压制方面,无人机集群在攻防两端显著成本不对称。集群中的无人机通常是典型“低小慢”目标,易于躲避敌方雷达防空系统,但对无人机实施打击却通常需要动用精确打击武器,如果敌方发动饱和式攻击,将耗尽其防御武器。以美军“提康德罗加”级巡洋舰为例,该巡洋舰装备了“宙斯盾”系统,最多可同时监视空中 240 个目标。如果无人机集群超过 250 个,同时又是一种“低小慢”的空中目标,将导致其监视能力达到饱和。因此,无人机集群系统可以“引诱式”耗尽对手的高价值攻击武器,从而增加对手攻击的相对成本,以规模优势给对方造成惨重的损失。又如,可以利用无人机集群搜索隐形战斗机和导弹发射车引诱对方开机,让可消耗的无人机“自杀式”打前阵,让宝贵的有人机/有人车殿后,可能有助于

在未来战争中减少人员和昂贵装备损失。在过去,数量较少的极度昂贵的有人机是战场的标准配置,但是在未来的几年中,大量便宜的、消耗性的无人机将广泛地出现在战场上。

2 典型项目研究现状

近年来,无人机集群成为各国争先研究的热点,不断有集群项目的突破性报道。本节从协同模式探索、分布式指挥体系、核心技术突破和集群验证等方面总结了近年的代表性工作。

2.1 创新协同理论,探索集群协同的模式

日益增多的无人机系统,势必引起其使用模式的颠覆性变革。目前,美军装备的无人机数量已经多于1万架,超过了有人机的数量。如此众多的无人机系统,如何最大效能的发挥作用?对此,集群使用的模式应运而生。正如二战初期,坦克由分散到集中使用带来了“闪电战”革新,小型无人机的集群化应用有可能会像坦克“闪电战”一样,形成新的颠覆性军事能力。

为充分发挥集群数量和低成本优势,并融于现有体系,以美军方为代表,人们探索了各种集群协同模式,并设计了大量作战想定,从顶层指导无人机集群的发展。典型协同模式包括:无人机集群协同、无人机集群和有人机协同、和大型载具协同、以及和其他无人装备的跨域协同等。

2.1.1 无人机集群协同

无人机集群协同是指采用大量(>10 数量级)低成本无人机平台,以机间通信为基础,以机间智能协同为核心,形成大规模的同构集群系统。海军研究生院在2012年发表了《无人机群攻击:驱逐舰的防护系统选择》^[1],为探讨驱逐舰对无人机集群协同攻击的防护问题,设计了小型固定翼无人机集群协同作战的想定,见图1。驱逐舰为“宙斯盾”系统,集成了干扰器、诱饵弹、“标准”系列面对空导弹、127 mm舰炮和2座“密集阵”近防武器系统;无人机集群由8架速度为250 km/h的无人机组成,部分自主飞行,部分受附近渔船遥控。

研究团队对这一作战模式进行了大量模拟仿真。500次蒙特卡罗仿真结果分析表明:平均约3.82架无人机能够突破驱逐舰的防御系统;在电



图1 美海军无人机集群攻击驱逐舰想定^[1]

Fig. 1 Scenario of US naval UAV swarm attacking a destroyer^[1]

子干扰、雷达诱饵、烟雾弹等各类额外防护手段中,最有效的为增加2门近防炮进行拦截,即使如此,平均约2.5架无人机击中驱逐舰。该结果意味着:可以使用大量廉价的无人机攻击严密防守的舰艇,这些无人机总成本仅与一枚导弹相当,具有极高的效费比。

2.1.2 无人机集群和有人机协同

无人机集群和有人机协同指的是将无人机集群和有人机一起混合编组,共同执行任务。短期内无人机的智能化水平难以达到有人平台的程度;故而,在相当长的一段时间内,无人平台和有人平台将相互补充,分工协作,共同完成复杂的作战任务,形成颠覆性作战能力^[14]。为此,人们设计了各种无人机集群和有人机协同的作战想定。其中典型想定为美国通用原子公司提出的“复仇者”(Avenger)无人机集群与F-22战斗机协同对地攻击概念^[15](图2)。想定中,4架F-22战斗机和16架“复仇者”组成2个集群。F-22机组位于后端指挥支援,“复仇者”集群协同突防,摧毁敌地空导弹阵地。

2.1.3 无人机集群和大型载具协同

为解决无人机集群的快速/远距可达的问题,可以将无人机集群和各种大型载具协同。采用航母或者空中母机携带无人机集群抵达作战区域,而后快速释放无人机,形成威慑性作战能力。比较典型的想定包括X-47B集群和航母的协同想定^[16],和国防部预先研究计划局(Defense Ad-

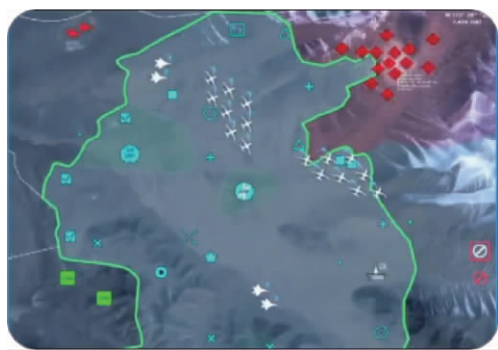


图2 通用原子“复仇者”集群与 F-22 协同对地攻击^[15]

Fig. 2 Coordinated simultaneous air-to-ground attack by general atomics avenger swarm and F-22^[15]

vanced Research Projects Agency, DARPA) 的空中航母计划。

X-47B 集群和航母协同想定: 美军构想 3 艘航母组成打击集群 (CSG), 在绝对安全区域起飞 30~40 架隐身无人机, 代替有人机对重点目标分批打击, 如图 3^[16] 所示。在 6 019 km 时, 12 架隐身无人机形成一个中队出动, 重点打击沿海区域的防空力量; 接着, 当 CSG 行进至距海岸 3 241 km 时, 6 架无人机形成集群前出, 降低反介入威胁, 增加水面舰艇的安全性; 最后, CSG 行进至距海岸 926 km 时, 7 架无人作战飞行系统 (UCAS) 形成集群防空压制, CSG 开始密集攻击, 此时, 水面舰艇和有人驾驶战斗机加入战斗。该集群作战构想为航空母舰提供更强大的防区外攻击能力, 并增强海军的前沿部署和持续作战能力。特别需要指出的是, 目前虽然 X-47B 无人机已经转化为空中加油机项目, 但是以无人机集群代替有人机进行第 1 波次的攻击, 仍然是《无人系统路线图》中的主要作战模式之一。

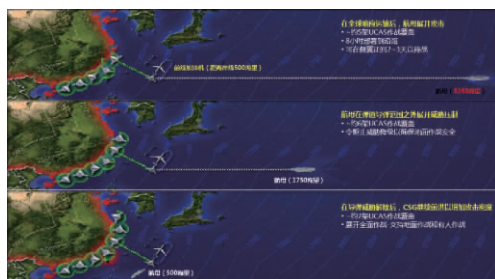


图3 X-47B 集群和航母协同攻击想定^[16]

Fig. 3 Coordinated attack by X-47B swarm and aircraft carrier^[16]

DARPA 的“空中航母”构想, 如图 4 所示: 所谓“空中航母”就是保障无人机空中运载、操作使用和任务控制的大型航空平台。它能够在飞行中释放出无人机, 对无人机的作战运用进行控制, 并对完成任务的无人机进行回收、加油、挂弹和维修等保障作业。传统空中作战任务大都采用大型有人机完成, 但存在牺牲飞行员生命的风险; 采用无人机虽然能够克服这些风险, 但飞行高度较低, 航程和续航能力也有限。所以用大型有人驾驶飞机携带、发射和回收多个小型无人机联合作战的方案, 将能最好地将两者各自的特点相结合: 既可以同时延长有人驾驶飞机和无人机的作战航程, 又增强了整体的安全性, 从而能以有效成本实现突破性的功能, 用于执行情报、监视、侦察和作战各种任务。



图4 DARPA 空中航母想象图

Fig. 4 Flying aircraft carrier of DARPA

2.1.4 无人机集群和其他无人装备跨域协同

无人机集群和其他无人装备协同指的是将无人机集群和无人车、无人艇或者无人潜航器等无人装备协同, 共同执行任务。不同无人装备之间的跨域协同, 有利于发挥各自的优势, 更有针对性地高效完成任务。代表性的想定为 DARPA 的“进攻性蜂群使能战术” (Offensive Swarm-Enabled Tactics, OFFSET) 项目 (见图 5)^[17]。城市作战中, 高耸的建筑物、狭窄的空间以及受限的视野形成的“城市峡谷”, 限制了军事移动和战术实施。无人机和无人车在城市地区的空中侦察和建筑清剿作战中具有明显优势。为此, DARPA 启动了 OFFSET 项目, 旨在利用大规模空中和地面自主机器人, 大幅提升城市作战能力。项目设想利用 250 个以上的无人机或无人车的跨域集群, 在 8 个城市街区自主执行 6 小时的区域隔绝任务。

图5 OFFSET 跨域协同设想^[17]Fig. 5 OFFSET coordination scenario^[17]

2.2 强调体系协同,构建分布式指挥架构

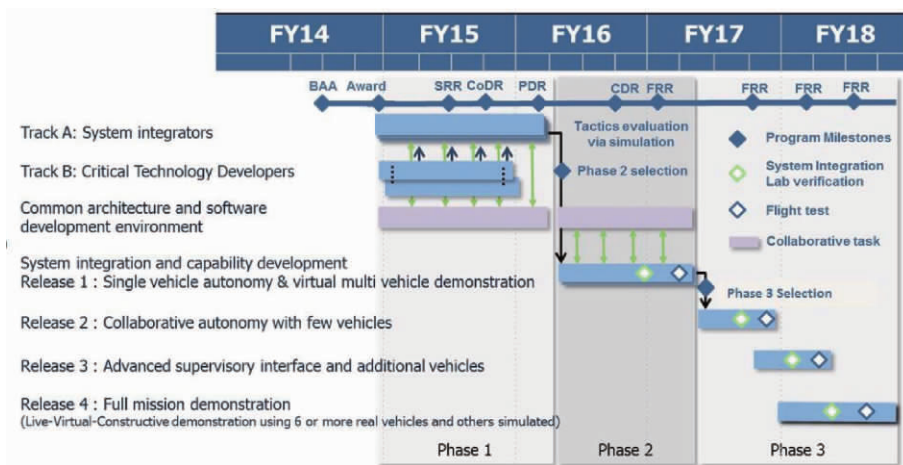
分布式体系作战概念已成为指导美军装备发展的重要思想。无人机集群系统是典型的分布式作战力量。为克服高成本、单一庞大的多功能平台的内在问题,发挥网络化无人平台优势,在DARPA等机构牵引下,美军持久开展分布式作战体系研究,力争构筑新的分布式指挥架构。主要项目包括:拒止环境中协同行动(Collaborative Operations in Denied Environment, CODE)^[18],系统的系统集成技术和试验(System of Systems Integration Technology & Experimentation, SoSITE)^[19]和分布式作战管理(Distributed Battle Management, DBM)^[20]等。

1) CODE:旨在开发基础性的算法和软件,使得现有无人机能够以最小代价,在最小监督下协同工作,使得当前多人操作1架无人机的模式

到1人同时操作6架或更多的无人机,以提高美军在拒止或对抗空域中分布式行动能力。项目按照计划分3阶段执行(如图6)^[18]。2018年11月,项目演示了装备CODE软件的无人机系统在“反介入区域拒止”环境下适应和响应意外威胁的能力。在真实/虚拟/构造环境下中,6架真实无人机和24架虚拟无人机,接收指挥官的任务目标后,自主协同导航、搜索、定位;并在通信和GPS拒止环境中,与模拟综合防空系统保护下的计划和突发的目标作战。CODE的可扩展能力极大增强了现有空中平台的生存性、灵活性和有效性,并减少无人系统的开发时间和成本。

2) SoSITE:开展分布式航空作战体系架构研究,发展能够快速集成任务系统/模块到体系的技术,并验证体系在战场中的有效性和鲁棒性。目标是使用简单的、廉价的无人机等平台组成集群,在开放性系统架构下,进行多作战平台和信息传输整合,最终优化作战形成分布式战力的方法。例如连接有人和无人机或者空中和地面载具、或者多种基础设施组件。

项目计划分2阶段进行,如图7^[19]所示。2018年7月,洛·马公司臭鼬工厂和DARPA开展了系列SoSITE项目飞行试验,验证了如何应用SoS方法和手段在对抗环境中对包括空、天、地、海、网络空间的各个作战域内的系统进行快速无缝的集成。该项目的成果可将任务系统快速并经济上可承受地集成到现有架构中,有助美军在瞬息万变的作战环境中维持作战优势。

图6 CODE 项目计划图^[18]Fig. 6 Plan of CODE program^[18]

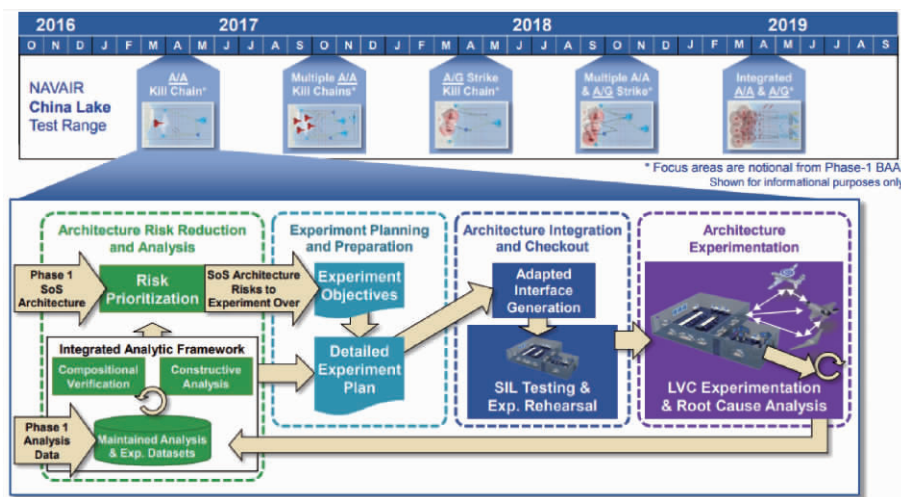


图 7 SoSITE 项目计划图^[19]

Fig. 7 Plan of SoSITE program^[19]

3) DBM: SoSITE 项目明确提出了发展分布式空战的概念、架构及技术集成工具,这必然带来组合爆炸的难题。针对这一挑战,DBM 项目借助开发和验证分布式决策辅助软件,提供分布式的规划、控制以及态势理解等解决方案,以指导空战管理和空对地攻击等任务。在完成第 1 阶段论证和关键算法设计后,2017 年 9 月,DARPA 和 AFRL 进行了首轮飞行试验,验证了通信中断后多机系统可继续执行任务能力;2018 年 3 月,BAE 公司赢得了最终阶段合同,预计将于 2019 年 8 月或 9 月进行最后的飞行演示验证。

2.3 加强基础研究,突破核心关键技术

集合人工智能、控制理论、机器人、系统工程和生物学等领域专家,从自然集群的自组织机理着手,突破分布式集群体系架构、集群持久协同、协同感知-判断-决策-行动(OODA)、群体智能等核心技术,并将其应用到集群系统中。关键技术的研发大多由高校和具有强大科研实力的科技公司主导完成,其中决策与控制相关的技术进展参见第 3 节。这里主要介绍部分有较大影响的牵引性项目。

美国麻省理工学院 How 教授领导的小组自 2006 年起开展“无人机集群健康管理”(UAV Swarm Health Management)项目^[21]。“大规模分布式飞行器集群,在长时间任务中是有很大大潜力以提供性能优势的。然而,如果没有一个高度集成的健康管理系统,这些性能优势是很难发挥

出来的”。基于此,项目设计了无人机集群和地面车辆健康状态的任务规划算法,例如确定平台失效对任务的影响、使用真实硬件设备来验证加油和维护调度的最优策略等。10 架四旋翼无人机系统的 300 余次测试验证了算法的有效性。

美国宾夕法尼亚大学 GRASP(通用机器人自动控制、传感器和感知)实验室认为:未来将依赖于小型平台和传感器组成的大型网络在动态、资源有限的敌对环境中执行任务。为此,他们围绕集群协同:OODA 回路展开研究,包括体系架构、分布感知、协同同步定位建图、编队飞行等。特别值得提及的是:2012 年他们成功让 16~20 架小型四旋翼无人机(73 g)在室内组成各种形状的飞行编队(图 8)^[22],这是研究人员第 1 次实现了 10 架以上无人机的集群飞行,取得了轰动性的演示效应。

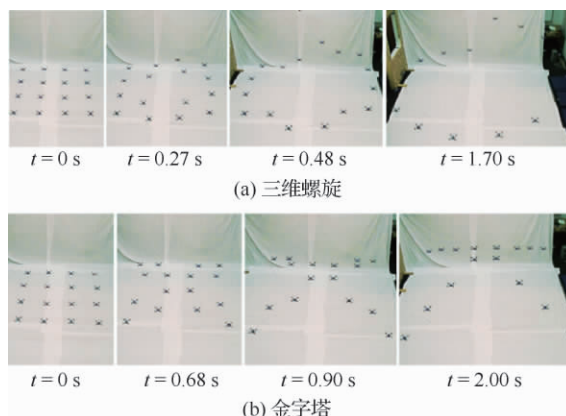


图 8 16 架无人机形成三维螺旋和金字塔^[22]

Fig. 8 Team of 16 UAVs forming a three-dimensional helix and pyramid^[22]

在 GRASP 实验室旋翼机编队飞行的激励下,中美两国的科技公司在无人机集群数量上不断突破,使得无人机集群灯光秀逐步成为各大型活动的“标配”。2015 年 11 月,英特尔公司在德国汉堡实现了 100 架四旋翼的室外灯光秀表演,从此拉开了无人机集群灯光秀的序幕^[23];2018 年英特尔公司在其成立 50 周年的庆典上放飞 2018 架无人机,曾创造了当时一次性使用无人机数量最多的世界纪录^[24]。国内亿航^[25]、高巨创新^[26]等公司,也多次完成无人机集群灯光秀表演。2019 年 7 月,高巨创新公司在建国 70 周年之际,完成了 2100 架无人机集群的灯光秀表演(如图 9^[26]所示)。一般认为,灯光秀表演中的每一架无人机都已预先设定好轨迹,以轨迹跟踪或集中控制的方式完成^[27]。

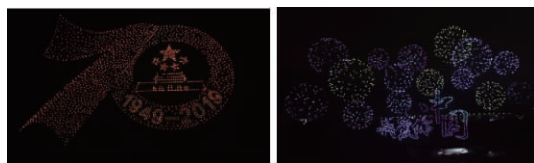


图 9 高巨创新公司庆祝建国 70 周年的灯光秀表演^[26]
Fig. 9 Light show performance by High Great to celebrate the 70th anniversary of the founding of the People's Republic of China^[26]

集群协同算法的开发和验证在地面机器人集群上开展的更为深入。考虑到规模因素,地面机器人集群往往严格控制单机器人的体积和成本。瑞士洛桑联邦理工学院开发了用于教学的 e-puck 机器人,每个机器人的直径仅有 7.5 cm,造价约 250 欧元^[28];在此基础上,实现了 20 个 e-puck 机器人的聚集、觅食等协同行为^[29]。德国斯图加特大学设计了尺寸为 30 mm×30 mm×20 mm 的 Jasmine 机器人,并在 3 m×3 m 的区域内实现了规模达到 105 个机器人的聚集行为^[30]。美国哈佛大学 Radhika Nagpal 教授团队设计的 Kilobot 机器人,直径为 3.3 cm,单个造价仅为 14 美元,机器人只能通过振动的方式以 1 cm/s 的速度运动^[31];基于 Kilobot 机器人,该团队设计了觅食、编队等协同行为,并进行了上千规模(1024)的集群演示,集群系统在运行 12 h 之后,能够自动排成“K”字形、五角星、扳手等图案^[32],如图 10 所示。这也是机器人集群的规模首次达到千量级。

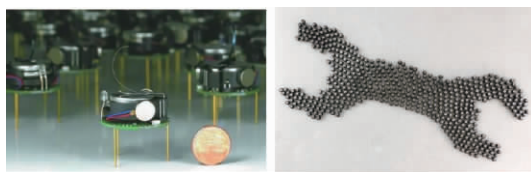


图 10 Kilobot 机器人及其形成的扳手图案^[32]
Fig. 10 Kilobot and wrench formed by 1024 kilobots^[32]

群体智能也被普遍视为集群系统能力提升的关键技术,受到了多个领域研究者的普遍关注。群体智能往往被看作是对自然界的生物智能的模拟,通过设计简单规则使能力较弱的一群个体最终进化生成较复杂的群体行为。大量的代表性成果发表在 Nature 和 Science 及其子刊上。除 Kilobot 机器人外,近年来取得的代表性成果还有:哈佛大学的 Werfel 等受白蚁启发,设计了 3 个机器人,基于简单规则和局部感知最终可搭建金字塔等形状^[33];比利时布鲁塞尔自由大学的两位研究人员使用 e-puck 构建的 20 个机器人集群经过群体演化后,能够自行学会并掌握先前设计者并为其指明的动作序列^[34]。2019 年,中国青年学者李曙光与他的合作者共同完成设计的粒子机器人登上 Nature 封面,该机器人通过信息交换和力学协同模拟了生物细胞的运动,能够实现搬运物体和向光源移动^[35]。

2.4 加紧集群验证,形成非对称优势

为推动无人机集群形成任务能力,在协同模式和关键技术的牵引下,国内外研究机构开展了大量的集群协同飞行试验验证,力争尽快形成非对称集群优势。美正在开展的代表性项目包括:低成本无人机集群技术^[36]、“山鹑”无人机集群^[37]、近战隐蔽自主一次性无人机^[38]、可空中回收无人机集群“小精灵”^[39]等。项目基本情况如表 1 所示。

低成本无人机集群技术(LOW-Cost Unmanned aerial vehicle Swarming Technology, LOCUST)项目由美国海军研究办公室(Office of Naval Research, ONR)主导,采用无人机集群协同模式(见图 11)^[36]。旨在快速释放大量小型无人机,通过自适应组网及自主协同,以压倒性数量优势赢得战争。项目发展了如郊狼(Coyote)等系列小型折叠翼无人机和多管发射装置。2016 年 4 月,美海军实现

表 1 典型无人机集群项目
Table 1 Typical programs of UAV swarms

典型蜂群系统	应用场景	无人机平台能力	规模	发射/回收	主管单位
低成本无人机 集群技术 (LOCUST)	舰船前出侦察	郊狼无人机(时速 140 km, 航时 1 h, 重量<5.9 kg)	30 (2016 年)	管射(1 架/s), 陆地滑降	美国海军 研究办公室
山鹑集群	代替空射诱饵, 执行 诱导欺骗、前出侦察 等任务	山鹑无人机(3D 打印, 机长<0.3 m, 重量<0.5 kg)	103 (2017 年)	飞机抛撒	美国战略 能力办公室
近战隐蔽自主 一次性无人机(CI- CADA)	形成探测矩阵, 用于 收集气象资料	微型无人机(3D 打印, 重量<65 g)	>100 (2019 年)	大型无人机抛撒	美国海军 研究实验室
小精灵	区域 ISR、电子战、 破坏导弹防御系统	小精灵无人机(重量 320 kg, 马赫速度 0.8, 载重>50 kg, 作战半径>900 km, 航时 3 h, 重复使用 20 次以上)	8 (2020 计划)	B52/-13 投送, C130 回收(30 分 钟 4 架)	DARPA



图 11 LOCUST 项目的郊狼无人机及编队飞行^[36]
Fig. 11 Coyote UAV and its formation flight in
LOCUST program^[36]

了 30 架郊狼无人机的快速发射(1 架/s)和自主编队飞行的技术验证。

山鹑(Perdix)无人机集群项目由美国战略能力办公室(Strategic Capabilities Office, SCO)主导, 采用有人战机投放无人机集群代替空射诱饵等, 执行诱导欺骗、前出侦查等任务。2016 年 10 月, 完成由 3 架 F/A-18 战斗机空中投放 103 架“山鹑”无人机的演示验证, 集群展现了一些高级的行为如集群决策、自适应编队以及集群自愈性, 如图 12 所示^[37]。

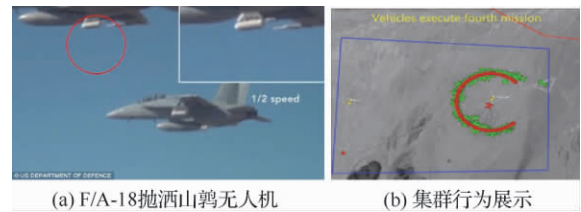


图 12 山鹑”(Perdix)无人机集群演示^[37]
Fig. 12 Perdix UAV swarm demonstration^[37]

近战隐蔽自主一次性无人机(Close-In Covert Autonomous Disposable Aircraft, CICADA)项目由美国海军研究实验室(Naval Research Laboratory, NRL)发起。项目旨在开发低成本一次性微型无人机, 每架只携带微型电子传感器, 比如天气、温度、湿度和气压传感器等, 借助大型载体像播种一样向某个区域大量“播种”, 形成庞大而稳定的“探测矩阵”。2017 年 4 月, 美海军从 P-3 侦察机上一次性释放 32 架 CICADA 微型无人机; 在 2019 年 4 月, 4 架大型无人机(Hives)释放了 100 多架小型 CICADA 微型无人机编队, 用于收集区域的气象资料, 如图 13 所示^[38]。

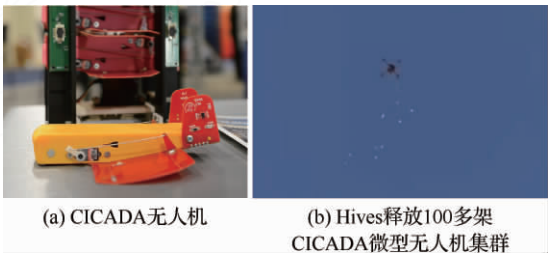
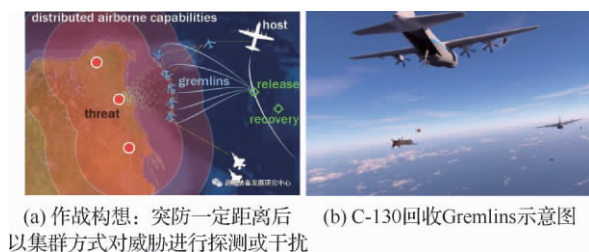


图 13 CICADA 无人机集群演示^[38]
Fig. 13 CICADA UAV swarm demonstration^[38]

可空中回收无人机集群“小精灵”(Gremlins)项目(见图 14)^[39]由 DARPA 主导。项目设想让现有大型飞机充当“空中航母”, 在敌防御射程外发射成群小型无人机; 当任务结束后 C-130 运输机将小型无人机回收, 在 24 h 内完成重置并等待下次使用。项目于 2015 年 9 月启动, 目前正处于第 3 阶段, 计划 2020 年春完成全流程试验, 具备

图 14 “小精灵”项目^[39]Fig. 14 Gremlins program^[39]

在 C-130 上一个操作员最多控制 8 架无人机以及在半小时内空中回收 4 架无人机的能力。

美国之外,各区域强国也积极开展各类集群试验。欧盟在未来空战系统中,将空射无人机集群作为未来实施防区外精确战术打击和集群式饱和攻击的核心手段。印度也于 2019 年发布了首个无人机集群概念项目 ALFA-S (Air-Launched Flexible Asset-Swarm),计划通过战斗机发射大量差大一体无人机,执行对地防空打击任务^[40]。土耳其国营 STM 军工集团展示了 20 架 7 kg 的四旋翼无人机集群作战反恐的概念演示^[41]。

中国也积极开展固定翼无人机集群的飞行验证^[4]。中国电子科技集团(简称中电科集团)先后完成了 67 架、119 架、200 架的固定翼无人机集群飞行。2018 年 1 月,国防科技大学智能科学学院无人机系统创新团队针对无人机集群自主协同展开试验飞行^[42],20 余架无人机相继起飞,在空中集结编队,飞向指定区域完成侦察任务,验证了分组分簇自适应分布体系架构、并行感知与行为意图预判、按需探测自组织任务规划、极低人机比集群监督控制、以意外事件处理为核心的集群自主飞行控制等多项关键技术。北京航空航天大学仿生自主飞行系统研究组结合生物群体智能深入研究了无人机集群编队、目标分配、目标跟踪、集群围捕等任务的关键技术^[43],并于 2018 年 5 月完成基于狼群行为机制的无人机协同任务分配的飞行验证,如图 15 所示。

3 关键技术研究现状及分析

以无人机为典型代表的无人集群系统中,如此众多的单体如何不冲突地一起工作?关键在于集群控制。无人机集群协同控制是指大量无人机平台配合完成 OODA 循环的全回路^[44],使各平

台在“正确的时间、到达正确地点、执行正确的任务”,获得“ $1+1+\dots+1 \gg N$ ”的集群协同效能,且具备去中心化、自主化和自治化的特点。图 16 从 OODA 的视角,给出了目前关于集群协同的典型研究方向,包括协同观测、协同侦察、协同定位与建图、任务分配、任务规划、聚集、蜂拥、编队等。

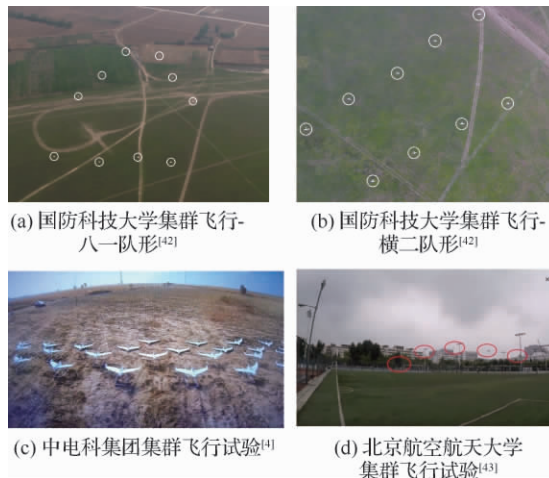


图 15 中国开展的典型集群飞行演示实验

Fig. 15 Typical swarm flight demonstrations in China

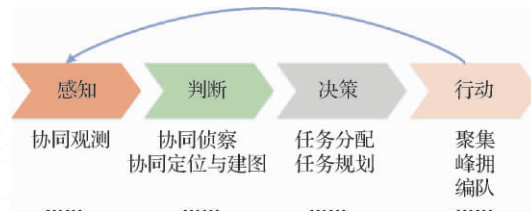


图 16 集群协同的典型研究方向

Fig. 16 Typical research directions of swarm coordination

无人机集群协同涉及 OODA 循环的全任务回路,势必将成为未来高技术战争背景下各大国之间竞争的技术高点。本节将专注于集群于 OODA 回路中末端环节,围绕分布式“决策和行动”的关键技术展开。

3.1 集群控制的挑战

无人机集群控制本质上可以看作是寻找对整个大系统的最优控制策略,其复杂性主要体现在以下 6 个方面:

1) 数量多:通常考虑几十上百,甚至成千上万架无人机,协同难度随着数量增加急剧增加。

2) 异构性: 集群成员通常具有相同基础平台, 但是配置的传感器、侦察/武器载荷可能不同, 导致完成特定任务的能力也不同。在执行任务过程中需要对集群成员按照不同能力进行合理分配。

3) 任务多: 集群通常需要同步并行完成不同的任务; 不同类型的任务具有不同的要求, 且任务之间可能存在约束关系。

4) 约束多: 除无人机系统性能约束外, 还包括战术要求约束、战场环境约束、通信约束、平台空间约束、时间约束、任务耦合约束、航迹防撞约束等以及约束间大量错综复杂的耦合交联关系。

5) 动态变化: 集群执行任务面对的态势通常动态变化, 且目标、威胁、任务以及无人机本身状态均处于不断变化中; 特别地, 在对抗环境中决策和行动可能受到敌方决策和行动的影响。

6) 不确定性: 由于传感器信息的不确定性和通信信息的不确定性, 无人机对当前态势的感知也是不确定的。

以上各个方面的因素交织在一起, 形成的建模复杂性、组合多样性、信息不确定性、计算复杂性和时间紧迫性, 以及无人机集群成本受限/动力学复杂/机载资源有限等特点, 使得无人机集群控制问题极富挑战, 如图 17 所示。

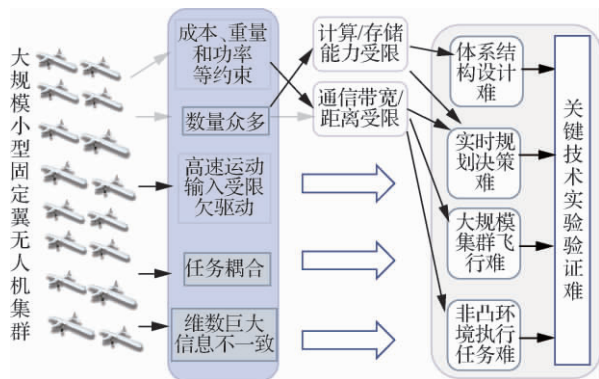


图 17 大规模小型固定翼无人机集群控制的挑战

Fig. 17 Challenges brought by control of large swarm of small fixed-wing UAVs

3.1.1 重量/功耗/空间/成本限制对机载通信、计算和存储能力的约束

小型固定翼无人机可供载荷使用的重量、功率和空间非常有限。以某小型固定翼无人机为例, 其可用载荷重量(不包括电池、机体重量) $\leq 1.5 \text{ kg}$,

可用载荷体积 $< 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$, 可用功率 $< 60 \text{ W}$ 。同时, 要建立成本可承受的无人机集群系统, 单机成本不能过高; 考虑到无人机系统的安全和冗余设计, 分解到各核心载荷上的成本非常受限。苛刻的载荷重量、功耗、空间以及成本约束, 使得自驾仪、计算/存储设备、自定位/机间定位设备、通信/感知等载荷的集成设计非常具有挑战性。考虑到设备性能和功耗/体积/重量以及价格等往往互相制约, 故而各类载荷的性能必须折衷设计, 使得机载通信、计算和存储的性能非常受限。

3.1.2 数量规模给集群控制带来的挑战

集群系统的性能受梅特卡夫定律的影响, 即数量规模的增大将导致协同难度的指数上升, 在系统实现、集群管理、协同控制等技术上存在拐点效应, 在系统性能如收敛性和稳定性等方面存在天花板效应。同时, 小型固定翼无人机集群系统的通信距离和带宽等性能受限, 通信网络拓扑结构的设计存在约束, 难以做到大容量的机间信息分发和任意拓扑结构传输, 进一步压缩了大集群系统在理论上的最优性能。特别地, 当机间信息流和数据流存在拥塞时, 集群系统的性能会急剧恶化。故而, 大集群和通信受限都对体系结构设计、协同规划决策、集群飞行控制、低人机比指控等提出了苛刻的要求。如何实现大规模的无人机集群协同控制, 尚是一个极富挑战的课题。

3.1.3 任务耦合、局部信息不一致和维数爆炸给集群控制带来的挑战

集群通常可以采用“点面结合”的方式同时遂行多重任务, 但是集群任务通常具有不确定性, 且彼此耦合。例如在集群协同区域侦查和目标抵近跟踪的典型任务中, 侦察和跟踪任务耦合, 地面目标数量/运动状态不断变化(动态出现/被遮蔽, 且不规则运动等), 无人机数量不断变化(部分损毁/部分返航补充燃料/部分通信失联等)、环境区域复杂(山区环境, 通常为不规则的非凸构型)等, 导致集群任务协同通常无法得到闭式的全局优化解。进一步, 集群采用分布式感知/通信和邻域协作方式, 机间的信息传递步长有限, 导致机间信息不一致性, 更进一步加剧了优化的难度。另一方

面,集群协同需要考虑多平台空间约束、时间约束、任务耦合约束、航迹防撞约束等以及约束间大量错综复杂的耦合交联关系,使得决策变量数量成倍增加;固定翼无人机动力的复杂性更增添了优化约束的复杂度。故而,任务的复杂性/多样性和集群数量导致决策空间急剧膨胀和高度耦合,使得集群控制问题建模困难、求解困难。维数的增加必然带来规划时间性能的降低,对于时敏性任务,必须在算法最优性和时间性能之间权衡。特别地,由于集群系统的计算/存储能力极度受限而数量规模巨大,更是对集群控制带来了巨大的挑战。

3.1.4 无人机动力学给集群任务协同带来的挑战

黄琳院士指出:“运动体所表现出的具有强非线性、强实时变与强耦合性和高不确定性的特征使得问题变得特别困难,例如…非线性非完整约束、…欠驱动问题…”^[45]。小型固定翼无人机是典型的欠驱动、非线性高速运动体,存在巡航速度、最大/最小速度/角速度等约束,且其空气动力学参数和飞行速度密切耦合。以“双子星”无人机为例,其巡航速度约为 16 m/s,失速速度约为 12 m/s,最大速度约 23 m/s。并且,无人机在飞行中不可避免地受到机体振颤和阵风等影响,但是由于机体重量轻、推力小,主动抗风性能较差。故而,固定翼无人机因其强非线性特点,在集群协同的规划决策、起飞降落、通信组网、集群飞行等方面均比“准静态”的旋翼无人机集群复杂得多。

3.2 集群控制关键技术研究现状

以集群协同遂行“OODA”控制回路为背景,国内外在集群体系架构、集群通信与组网、集群决策与规划、集群无人机系统、集群飞行与队形重构、集群安全、集群指控等关键技术领域开展了大量理论和应用研究

3.2.1 集群体系架构

采用何种结构将多个无人平台组合起来发挥更大效能,是集群实现首先要解决的问题。根据信息交互的策略,现有集群架构通常可分为集中式和分布式架构。分布式架构具有较好的扩充性和容错性,能够将突发影响限制在局部范围内,适

宜于大规模系统。例如,美国海军的 LOCUST 项目就采用典型分布式架构。

不同于单体体系架构,集群体系必须综合设计集群间以及单机内部结构。过去几年,无人机集群领域进行了较多体系结构相关的研究。Sanchez-Lopez 等^[46-47]针对多无人机系统提出了一种混合反应/慎思式的开源体系架构 Aero-Stack,包含了反应、执行、慎思、反思和社会等 5 层。Grabe 等^[48]提出一种异构无人机集群的端到端控制框架 Telekyb,其高层任务(例如任务规划等)集中运行在地面端。Boskovic 等^[49]提出无人机群的 6 层分层结构 CoMPACT,有效结合了任务规划、动态重分配、反应式运动规划和突发式生物启发群体行为等,将任务执行分为任务、功能、团队、班排、无人机等级别。但是:上述工作均主要针对小规模四旋翼无人机集群,并没有针对固定翼无人机设计,特别是没有考虑固定翼无人机高速运动所需的强实时性。相比之下,Chung 等提出了一个群体系统并演示了多达 50 个固定翼无人机的实时飞行实验^[50]。然而,该工作更多地集中在无人机集群的系统实现设计,包括自主发射、起降和飞行等,不支持集体行为和任务协调等。

总体而言,集群体系架构领域还存在以下挑战:① 规模可扩展性:绝大多数工作只在小规模系统(通常 2~5 架)验证。随着规模增加,不论在理论还是系统实现上,集群系统的难度指数上升,体系结构设计也更有挑战。② 多样性:现有方案通常只关注特殊领域,很少可以适用多种任务。然而,高度自治化的集群系统需要支持多样化任务。另外,目前集群架构设计主要针对旋翼无人机集群,还欠缺适宜于执行多样化任务的大规模固定翼无人机集群的体系架构。

3.2.2 集群通信与组网

机间通信是集群协同的基础之一。集群通信一般考虑空中无人机和机面控制站之间,以及集群无人机之间的通信。无人机集群的地面控制站,通常配备有通信设备(常使用未经许可的无线电频段,如 900 MHz),采用点对多点或广播方式,向无人机发送控制命令和接收遥测数据^[51]。通常,遥测数据包括 GPS 信息、无人机状态信息

以及机载载荷的感知信息等。集群无人机之间的通信主要用于无人机之间的状态和载荷信息交互。本节主要关注集群无人机之间的通信。固定翼无人机集群由于节点数量多、任务种类多、飞行速度快、相对时空关系变化频繁以及信息传递的即时性和突发性等,使得集群之间的通信和组网具有很大的挑战性。

通信体系结构是无人机组网设计的核心内容之一,合适的网络结构,可以提高通信数据以及上层任务执行的效率和可靠性。当前的无人机集群通常采用2种通信架构形式之一,分别为基于基础设施的集群架构和基于自组网(ad-hoc)的集群架构。

基于基础设施的架构包含基站(例如和地面站相连的地面基站或者通信卫星),所有的无人机都和基站直接相连^[52]。基站接收集群中所有无人机的遥测信息,并转发给其他所有或部分无人机。故而,该架构也可称为以基站为中心的通信组网。该架构优势在于:①可以借助地面高性能计算设备进行复杂的实时计算和优化。②机间联网不是必需的,可以减少无人机的有效负载^[52-53]。但是基于基础设施的架构严重依赖于基站,系统缺乏冗余性,且基站和无人机之间的通信可能容易受到干扰;如果基站受到攻击或干扰,整个集群的可操作性将受到损害。同时,基于基础设施的架构要求所有无人机都必须在基站的传播范围内;特别地,小型无人机的负载能力极度有限,与基础设施建立可靠通信所需的硬件可能会限制基于基础设施的集群功效,限制了集群无人机的运动范围。另一个缺点是缺乏分布式决策能力,通常通过地面站协调所有无人机的决策。和集中式体系架构类似,随着规模的增加,通信数量、决策维数等存在维数爆炸的问题,限制了集群规模的增加;同时,不可避免地存在通信时延,使得系统难以实时响应决策。

基于自组网的集群架构将无线自组网和无人机集群结合。无线自组网不依赖于基础设施,无需路由器或接入点;相反,基于动态路由算法动态分配节点。近年来,人们将移动和车载自组网概念拓展到无人机网络通信中,形成飞行自组网(FANET)^[52-55]。无人机间的信息交互,不依赖于任何已有的基础设施,而是临时建立起适应节

点动态变化的机器对机器(M2M)通信网络^[56];不需无线接入点(Access Point),但是至少有一个网络中的节点连接一个地面基站或者卫星。文献^[57]从移动性、拓扑和能耗等方面比较了移动自组网、车载自组网和无人机自组网,并比较分析了各种自组网的路由协议和节能策略。文献^[58]综述了无人机集群在民用领域,包括搜索援救、覆盖侦查和运送物品等应用中通信组网的特点和需求。和移动或车载自组网相比,飞行自组网具有自身特点。①节点的高速移动和拓扑的高动态变化。典型的移动和车载自组网节点通常是人和汽车,而飞行自组网节点则是高速飞行的无人机,移动度远高于移动或车载自组网,导致其拓扑变化比移动或车载自组网更为频繁。②节点稀疏性和网络异构性。集群中的无人机执行任务时通常是分散分布的,机间距离大都千米级,远大于移动或车载自组网节点间的距离,导致空域内节点密度较低。同时,实际应用中,无人机还需和卫星、有人机、地面机器人等不同类型的平台通信,网络拓扑可能分层分布。③节点任务的多样性。无人机集群系统可能包括不同类型的传感器,并且每个传感器可能需要不同的数据传输策略。比如,需同时支持高频/实时的控制/决策通信需求(时延毫秒级)和协同感知等任务需求的大容量(M级)机间传输;支持突发任务响应,可随时发起点对点或者点对多点的通信。④更高可靠性和更低重量要求。小型无人机载荷重量有限;同时空中无人机一旦失控,很容易造成机毁人亡。故而,飞行自组网在严格限制端机重量条件下,对网络协议和软硬件可靠性有严苛要求。目前,其仍面临着严峻的技术挑战:

1) 有限的单跳距离^[52,55]:飞行自组网的建立依赖于每架无人机之间的单跳通信,而要想通过有限的机载能力实现可靠的通信,其单跳距离往往受到了限制,这成为了约束飞行自组网技术发展的重要因素之一。

2) 难以可靠控制的丢包率^[59]:飞行自组网中,对动态路由的配置提出了很高的要求,迅速改变的物理层道会使原有拓扑的路径变得不再可靠,从而导致数据的大量丢包,这会严重限制无人机集群的任务执行能力。

另一方面,在基础架构、硬件设备、通信带宽

等固定的情况下,根据任务需求进行通信调度,可最大限度地挖掘通信系统的性能。目前,协同飞行任务中的通信需求研究较多。通常,其通信拓扑要求无向连通或存在有向生成树,拓扑切换和通信时延等存在必要条件^[60-61]。但是,目前对其他任务,比如协同探测、协同规划等通信需求的研究较少。

3.2.3 集群决策与规划

集群规划的内涵是“在线实时为集群内的每架无人机生成从当前/起始位置到目标位置的运动任务,要求集群任务总代价最低(较低),同时实现集群内相互避碰以及避免与环境碰撞”。

和体系结构一样,规划决策可以采用集中或分散式方法解决。集中方法中,有一个中心节点可以获得所有无人机的信息,问题转化为对整个集群的单一优化问题^[62]。分散方法中,每架无人机依赖获得的全局或者局部信息单独求解^[63]。介于两者之间的是半分散式系统^[64],它充分利用无人机的分布式计算能力,但仍然需要中心节点进行信息融合或全局约束条件的判断。

无人机集群的规划决策可以涉及不同层次,部分算法直接作用于无人机的控制输入,部分算法则聚焦于无人机的任务或行为。POMDPs提供了一种优化的数学框架来建模无人机与环境交互过程^[65],可在同一框架内通过优化合并的目标函数实现不同层次策略的组合,因此得到了广泛的使用。对于无人机集群系统,POMDPs可以扩展为MPOMDPs(集中式)或Dec-POMDPs(分散式)^[66-67]等。进一步,为解决集群信息不一致和状态不确定问题,考虑信息融合的多无人机POMDPs求解算法也得到了研究^[67-68]。

集群任务的不确定性,给规划决策带来了极大挑战。任务规划通常是PSPACE完整的,寻求精确解的规划算法仅限于在低维系统可行。集群通常由大量个体组成,同时还具有底层空间的高维度特性,导致维度巨大且计算复杂。规划算法对问题维度呈指数依赖,即使离线都难以求解。进一步,与地面机器人相比,无人机速度更快,动力学系统更复杂,机载计算能力更有限,故而,无人机的规划决策算法必须尽可能降低计算量,且具有强实时性。美国空军技术研究院以无人集群

广域搜索/打击一体化任务为研究背景,通过群间任务分配、群内任务协调、路径规划和轨迹优化4个层次的分层优化,使得无人平台能够针对复杂任务实现层次化协调,极大地减小了在线计算负载。但是,总体而言,为适应瞬息万变的复杂动态环境,如何实现兼顾优化性和快速性的动态决策和任务/航迹重规划,仍然还是挑战性的问题。

3.2.4 集群无人机平台系统

集群无人机平台系统,包括平台和飞行控制系统,是集群形成能力的基础。集群具备的优势与无人机系统的特性息息相关,合理的平台设计和精确的飞行控制能大幅提升集群性能。

无人机平台是集群遂行多种任务的载体,其性能和作用范围也在不断增加。伴随性能增加,平台的成本也在不断增加,如何兼顾平台成本和性能是集群走向实战的必由之路^[69-70]。集群内部信息需要交互与反馈,动作需要协同与配合,任务需要分工与合作,这些都需要平台和载荷的参与^[71-72]。通常而言,集群采用低成本的常规中小型无人机(10~100 kg),其性能差异并不明显。单平台主要评价指标有:航时、巡航速度、最大航程、最大升限、载荷能力、机动性(最小转弯半径、爬升速率、下降速率等)、稳定性、跟踪定位性能等。除此之外,集群无人机平台更关注自组织、自适应和信息交互特性。特别地,考虑到集群的数量优势,集群无人机应特别注重成本控制,包括低成本结构设计、模块化组装调试、数字化精确飞控与导航、小型化能源动力和多功能组网通信等。以美军“小精灵”无人机为例,其设计目标为作战半径555~926 km;续航时间1~3 h;设计载重27.3~54.5 kg;飞行速度0.7~0.8马赫;发射高度12 192 m以上;推进系统可选型现役发动机、改进型动机或全新设计型发动机;有效载荷功率800~1 200 W;有效载荷模块化设计,应包括光电/红外传感器、无线电系统等;无人机至少可重复使用20次,具备空基发射回收能力;出厂单价(不包括载荷)低于70万美元/台。

飞行控制系统为无人机提供了精确飞行和适应复杂环境的能力。低成本固定翼无人机的飞行控制具有较大的挑战性,主要包括:

1) 模型不精确:固定翼无人机气动复杂、操

纵耦合,且可控制性不足。特别地,由于成本原因,小型无人机很难采用风洞吹风等手段建立准确的动力学模型。

2) 交叉耦合:固定翼无人机的动力学和控制严重耦合。通常情况下,无人机平台控制采用解耦方法分内层姿态和外层位置控制。然而,这2层间是严重耦合的,如协调转弯时涉及滚转和航线控制,速度控制也通常和高度耦合。

3) 噪声:一般来说,传感器越昂贵,测量就越精确。因此,集群中对无人机的低成本要求导致了其获取信息的噪声和不准确。

4) 风扰:无人机飞行过程不可避免地受到风的干扰。风扰,尤其是侧风对无人机飞行影响重大。在集群任务飞行中,无人机常需低空飞行(通常低于1000 m,甚至不超过100 m),以便对地面物体进行抵近观察。低空飞行的风扰给控制影响更为严重。对于小型固定翼无人机来说气流扰动的速度会占到无人机巡航速度的20%~60%。

为解决飞行控制问题,研究人员开展了许多理论和工程研究。各种开源自驾仪被广泛的应用在小型固定翼无人机系统中^[70]。它们一般采用分层控制策略,通常包含位置层、姿态层和执行层,各层采用不同的控制频率^[69]。各层控制方法大多采用各种比例-微分(PD)控制或者自抗扰控制(ADRC)^[73]。特别地,运动控制,包括轨迹跟踪和路径跟踪控制,作为无人机自主飞行的直接体现,在近年受到广泛关注^[74-75]。相比于轨迹跟踪,路径跟踪无需考虑时间参数化表示,在集群任务飞行中得到了广泛的应用。各类路径跟踪算法通常可以划分为线性和非线性控制方法。线性方法主要包括比例-积分-微分(PID)^[76],线性二次型调节器(LQR)^[77-78]等,非线性方法包括矢量场法^[79-81],视线法^[82],虚拟跟踪目标法^[83],基于非线性控制理论方法等^[84-86]。文献^[87]针对小型固定翼无人机的路径跟踪问题,分析比较了5种算法的性能,分别为逐点法(carrot-chasing),非线性导航律(NLGL),纯追踪和视线法(PLOS),LQR,和矢量场(VF)法。结论表明在直线和圆形路径跟踪中,VF法的跟踪精度等性能最高。但是针对更一般意义上的曲线路径跟踪问题,目前还没有类似的比较性研究。

集群无人机另一个具有挑战性的问题为自主

起飞和着陆。与单个无人机相比,集群无人机的自主起降具有更大的挑战性。需考虑3方面的问题:

1) 鲁棒性:因为集群中的无人机可能具有不同负载、不同质量分布和不同机械条件,且在不同的风场条件中工作,故而起降控制在存在质量变化、机械不确定或风扰时应具有较好鲁棒性。

2) 快速性:因为集群无人机数量多,需要尽可能地降低单个无人机的起飞或着陆时间,以最大限度地延长任务时间。

3) 意外事件的快速处理:为避免连续起降过程中的连锁反应,应快速地处理起降过程中可能的突发事件。

目前,专门针对集群无人机特性的起降控制研究还很少,还值得在理论和工程中进行进一步的探索。

3.2.5 集群飞行与队形重构

集群自主飞行是无人机协同执行任务的基础,也是在复杂环境中遂行集群突防、分布探测和分布打击等基本任务。面对不同的任务剖面、环境约束或者任务变化,集群通常需要变换队形以高效完成任务。故而,队形保持和重构的效果决定了无人机集群协同执行能力的有效性。

集群自主飞行与队形重构是指设计分布式控制律使无人机集群保持特定三维结构的姿态和位置稳定飞行,达到时间和空间的同步,并能自动根据外部环境和任务动态调整队形。但是,固定翼无人机欠驱动和输入受限等模型约束,以及外部干扰、信息不完全等不确定条件,使得传统的多智能体协同控制方法难以直接扩展应用。学者们围绕编队控制,产生了一大批丰硕的理论成果,可参考综述文章^[60-61,88-89]。

常用到的集群飞行控制方法脱胎于常见的多智能体协同控制方法,下面主要介绍领航-跟随法和虚拟结构法。

1) 领航-跟随法:将集群中某架无人机或引入一虚拟的无人机作为领航者(长机),其余无人机作为跟随者(僚机)一起随领航者运动。该方法是目前无人机编队控制中应用最普遍、最基础的一种方法。Leader-follower控制律主要是针对跟随者的控制律,领航者则需要采用其他的控制

手段。例如,文献[90-91]采用无线电信号控制领航者,针对跟随者设计了跟踪领航者的编队控制律,实现了2架固定翼无人机的编队飞行;其中,跟随者控制律分为外环和内环2层,外环控制器以最小化跟随者相对于领航者的位置误差为目标,生成期望的滚转角和俯仰角以交给内环控制。文献[92]使领航者沿航线飞行,跟随者借助于机载的视角传感器估计领航者的位置,利用设计的编队控制律,实现了2架固定翼无人机按两倍翼展距离的紧密编队飞行。北京航空航天大学段海滨教授所在的研究团队将领航-跟随法结合文献[93]中鸽群的分层策略^[93],设计了小规模无人机集群的分布式控制方法,并通过8架无人机的集群仿真对算法加以验证^[94]。文献[50]对20架固定翼无人机采用领航-跟随法进行了飞行验证,但是该文献并未给出控制律的具体形式。而文献[90-94]虽针对固定翼无人机设计了跟随领航者的控制律,但是未作闭环系统稳定性的分析,也未考虑固定翼无人机控制受限的影响。

值得一提的是,领航-跟随法作为最基本的编队控制框架,很容易与其他方法——如势场法^[95-96]等相结合,还可应用诸如模型预测控制^[97]、滑模控制^[96,98-99]。领航-跟随法的主要问题是当领航者损毁后,可能会导致整个编队的瘫痪,为解决这一问题,很多研究使用虚拟领航者,并将编队中多个真实的个体作为虚拟领航者的直接跟随者^[100-101],以避免全局领航者损毁后“牵一发而动全身”。文献[100]研究了虚拟领航者的轨迹对各无人机已知的情况,以及虚拟领航者始终为当前无人机编队重心时的情况,并用3架固定翼无人机对控制律加以验证。文献[102]研究了虚拟领航者的状态仅对部分无人机已知,需对其他无人机设计分布式估计器估计虚拟领航者的位置,从而实现协同控制的问题。

2) 虚拟结构法。最早由文献[103]提出,其核心思想是每个无人机跟随一个移动的刚性结构上的固定点。加拿大多伦多大学的刘洪涛教授团队利用虚拟结构法研究了多无人机的运动协调问题,并进行了数值仿真^[104]。文献[105]提出一种动态虚拟结构编队控制方法,可使固定翼无人机沿规划的编队轨迹飞行时完成队形变换。

虚拟结构法很好地避免了传统领航-跟随法

当全局领航者损毁后,整个编队面临瘫痪的问题。事实上,虚拟领航者本质上也是将传统的领航-跟随法与虚拟结构法相结合^[100]。虚拟领航者可以看成是基于虚拟结构法确定,每个无人机相对于虚拟领航者保持期望的位形,这一点又类似于领航-跟随法中对于跟随者的控制。由此,虚拟结构法与领航-跟随法二者的界限在一定程度上也变得模糊。文献[106]在基于虚拟结构法设计三维空间内固定翼无人机的编队控制策略时,文献[107]基于虚拟结构法设计独轮车群体队形保持控制律时,都用到了虚拟领航者这一概念。

对于小型固定翼无人机,由于受最小前向速度和非线性动力学的约束,集群飞行面临着新的挑战。目前关于固定翼无人机集群飞行的研究还较少。Gu等^[90]设计了“外环导航/内环控制”的内外环结构的编队控制器;Xargay等^[75]研究了严格时序约束条件下的多无人机协同路径跟踪问题;美国海军研究院完成了50架规模的固定翼集群飞行演示验证,但并未涉及大规模集群的队形保持、队形变换等协同控制问题^[50]。故而,如何基于小型固定翼的平台性能约束,并考虑非理想通信等不确定性条件,实现大规模无人机集群飞行,仍然是一个挑战性问题。

3.2.6 集群安全与冲突消解

无人机集群的安全控制是系统能够顺利执行飞行任务的关键技术之一,主要包括集群飞行安全和集群使用安全。

集群飞行安全指在复杂环境中,集群能够无碰撞地飞行,主要包括集群内部的机间防撞和对集群外部障碍的规避。一方面,无人机集群的任务环境通常较为复杂,例如建筑物密布的城市环境、山峰悬崖林立的山区环境、树木飞鸟集聚的森林环境甚至动态未知的战场环境等,无人机集群飞行中不可避免地面临与环境中各种障碍物发生碰撞的危险;另一方面无人机的数量规模不断扩大,集群内各无人机在队形变换以及任务调度过程中极有可能因为路径交叉以及飞行不确定性等因素而发生碰撞冲突。近年来无人机的撞击事故频频发生。2014—2016年间,官方报道的无人机与大型客机危险接近、发生撞击的事件一共达到24起。2017年以来的情况更加严峻,相关的事故

接连发生并且被频频报道。因此进行集群系统飞行安全控制的研究至关重要。

集群飞行安全控制问题的核心是碰撞规避问题。现有研究已经提出了各种各样的理论方法^[108-111]。综合考虑各种方法的作用时间、适用场景以及理论基础,主要可分为路径规划、优化控制、以及反应式控制 3 类。

1) 基于路径规划的碰撞规避^[112]: 基于先验信息的全局路径规划算法最先应用于障碍规避的相关研究中,相关算法也扩展到了多智能体系统,从而实现全局的协同路径规划,但是该类算法对动态环境障碍的可扩展性较低。目前,基于传感器在线感知的局部路径规划算法更多地用于动态环境的碰撞规避研究。相关方法包括 A^* 、 D^* 等图搜索算法,混合整数线性规划等数值优化算法,遗传算法、粒子群算法等启发式算法,以及势场法。路径规划用于冲突消解通常能够得到一条优化的无碰撞的飞行路径,但是缺点通常是反应时间长,并且对于运动受限的固定翼无人机,不一定能够找到可行解^[109-110]。

2) 基于优化控制的碰撞规避^[113]: 基于优化控制的碰撞规避包括基于博弈论的方法、基于遗传的方法、和基于预测控制的方法等。其中模型预测控制方法凭借其预测模型、滚动时域、和反馈校正 3 个机制,能够显式的处理各种约束条件,在碰撞规避问题中得到了大量的研究成果。并且,针对多智能体系统发展而来的分布式模型预测控制方法,能够显式的应对子系统之间的耦合约束,因此在多机器人和多无人机系统的研究中也得到了众多学者的关注。存在的问题是,非线性、不确定性以及运动受限等系统特点对模型预测控制算法的理论分析带来了很大挑战,关于鲁棒模型预测控制、非线性模型预测控制以及分布式模型预测控制的相关理论研究有待进一步研究和发展^[114]。

3) 基于反应式控制的碰撞规避^[115]: 反应式的碰撞规避方法主要包括基于规则的、和基于几何的 2 类。其中典型的算法包括速度障碍法、互惠速度障碍法等。该算法也进一步扩展至多智能体以及群体运动场景。该类算法的典型优点是响应快^[109,115]。

综上,基于路径规划的碰撞规避更新周期较长,适用于较远距离的碰撞冲突场景;基于优化控

制的碰撞规避的灵活性和适应性更强,适用于中短距离范围的冲突场景;基于反应式控制的碰撞规避反应时间短,对动态场景的响应速度快,以最高优先级保证安全,适用于近距离尤其是各种突发的紧急碰撞冲突场景。尽管现有研究多种多样,但一个关键问题是:现有方法大多针对单一或者特定的冲突场景,缺乏针对一体化任务环境的整体性系统解决方案。

集群使用安全是集群运用过程中安全相关问题,包括集群网络安全、导航欺骗安全等。网络安全方面,主要针对无人机集群通信被干扰或者部分无人机损毁(例如攻击与诱捕等)后的响应。一种方案是进行通信中断/平台损毁后的拓扑重构^[116-117],另一方案是设计具有一定抗毁性的通信拓扑^[118-119]。导航欺骗方面,主要针对机载 GPS 等导航系统模拟信号诱骗的响应。一种方案为加强导航信号的识别和校核,另一种方法为研究各种 GPS 拒止环境中的导航技术,比如仿生导航^[120]、视觉导航^[121]等。

3.2.7 集群指挥控制

无人机集群协同极大地提高了遂行复杂任务的能力,但与此同时,随着集群中无人机平台数量/类型的不断增加、任务类型的不断扩展,如何高效地管控无人机集群,实现低人机比的集群指挥控制面临着严峻的挑战。

近年来,国内外在多无人机系统指挥控制技术方面已取得了丰硕的成果。美国诺·格、通用原子、波音、洛·马、雷神等参与军方项目的公司已经进行了深入研究,并开展了相应的飞行试验。例如,美国雷神公司利用混合主动人机交互技术,推出能同时控制多架无人作战飞机的驾驶舱(UCS)^[122],是全世界第一种可以同时操纵多达 8 架空中、陆地或海上不同无人作战飞机的地基驾驶舱。Proxy 航空系统公司利用其开发的通用分布式管理系统(UDMS)^[123],完成了 2 架“SkyWatcher”与 2 架“SkyRaider”无人机的协同飞行验证,并能够支持多达 12 个空中节点和超过 30 个地面节点(包括传感器)的指挥控制。在美国软件使能计划(Software Enabled Control, SEC)^[124]相关试验中,麻省理工的研究人员研制出的有人机对无人机制导系统能使驾驶员通过飞行级英语语音指令制导控

制另一架无人机,使无人机能够及时对突然改变的计划做出反应并避开意外威胁。但是,对于无人机集群的指挥控制技术,尚处于萌芽发展阶段。

为满足低人机比集群指控的要求,提高指挥员指控水平和态势认知水平,需要研究适合指挥员习惯的语义逻辑任务描述方法,以更贴近于人类的方式对集群下达指控指令,综合运用语音/手势/眼动/触觉等多种模式相结合的集群指控手段,来提高指挥员的指控水平,降低其认知负担和工作负荷,实现低人机比条件下集群指控。Shah 和 Breazeal^[125]提出,现有的人机交互系统主要通过显式信息(明确的口头信息等)及隐式信息(表情、手势以及注视方向等)来实现人机交互控制。在显式信息交互方面,文献^[126]中机器人能使用各种参考系(以自我、对象或外部为中心)有效响应人类的口头命令;文献^[127]通过中央任务管理器将任务分配给机器人,进一步通过口头交流有关目标、能力、计划和成就的信息来完成协调。在隐式信息交互方面,文献^[128]使用机器目光建立共同注意力,将点头用于巩固彼此的理解;进一步,文献^[129]使用人的注视信息进行意图解释,例如犹豫或是搜索跑动对象;文献^[130]介绍了基于手势的人机交互并将其分为 2 类,其中自由形式的交互允许用户使用指示性手势选择机器人的子集并分配目标和轨迹,而形状受限的交互要求用户只对定义了整个形状自由度所对应的子集实施控制;文献^[131]提出一种系统用于生成新一代的脑群控制接口,并为操作员提供对多智能体系统的丰富控制能力。

此外,随着任务复杂度、任务执行环境高动态不确定性的影响,集群指控技术还需具备更高的自动化和智能化程度,将操作员从基本的任务剖面中解放出来,使其关注更高层次的决策与关键事件确认,通过智能化辅助决策系统,以“人在回路之上”方式完成无人机集群同步协调控制,提升动态不确定条件下任务执行的有效性及时效性,实现精细化、高效性的集群指挥。美国 DARPA 早在 2007 年启动了“深绿(Deep Green)”计划^[132],其核心是通过分析推断指挥员意图,形成作战方案的备选集合,提高指挥员的临机决策速度。2016 年,美军启动了指挥官虚拟参谋(Commander's Virtual Staff)项目^[133],旨在通过认知

计算,高效处理战场态势数据,自主推荐任务清单,辅助指挥员进行决策。Stodola 和 Mazal^[134]提出了一个战术决策辅助系统 TDSS,并建立了基于无人机编队侦察监视的战术辅助模型。此外,国防科技大学王菡等^[135-136]提出了基于指挥人员关注度和操作模型的信息调度算法,并提出了基于“人”疲劳度和错误率模型的自适应自主调度策略,实现了人-系统交互与功能分配的柔性切换过程。

4 未来发展趋势

无人机集群兼具机械化、信息化和智能化的特点,有望在未来军民领域发挥重大作用,但是目前尚不具备在复杂环境中分布执行任务的能力。集群协同的关键技术,如体系架构、通信组网、规划决策、集群飞行等,虽然开展的研究较多,但是较少针对小型固定翼无人机的特点和复杂环境的任务需求展开。未来集群系统的发展,可以从以下 6 个方面考虑。

4.1 以群体智能为牵引,构建具有任务能力的无人机集群系统

群体智能广泛存在于狼群围猎、鸟群迁徙等生物群体活动和群策群力、头脑风暴等人类社会活动中。其基本原理是通过个体之间的合作与竞争,聚合简单个体行为形成群体合力,完成单纯依靠数量叠加所无法胜任的复杂任务。无人机集群具有较强的运动能力和一定的感知决策能力,可模仿狼群、鸟群等生物群体活动,以无中心自组织的方式协同完成复杂任务。故而,一方面无人机集群是群体智能技术验证和应用的理想载体之一;另一方面群体智能将赋能无人机集群系统,使得其能更高效地完成各类任务。

目前群体智能和集群系统的研究均较多,但是很多研究都停留在理论层面。特别地,如何有效结合两者,如何根据群体智能的需求构建无人机集群系统,如何根据任务需求提升集群系统的智能程度,开辟一条从理论到实践切实可行的方法路线尚有待于突破。

4.2 以多样化任务为导向,设计易扩展互操作的集群体系结构

集群系统本质为数量众多的独立同构/异构

实体通过通信构成交联的复杂巨系统。随着规模增加,集群系统的复杂度不论在理论研究还是系统实现上,均呈指数上升。故而,体系结构的设计一方面要解决该复杂系统的信息流/控制流的交互组织问题,另一方面也需要尽量在软件/硬件上降低系统的耦合度和复杂性。通过规范化/标准化的软件模块、硬件组件和机间交互协议的设计,将不同数量,甚至是不同类型的无人平台高效地结合在一起,是体系结构等顶层设计面临的挑战。特别地,现有集群系统往往只考虑执行单一任务,但未来期望集群系统能够遂行多种不同的任务,比如同时兼顾边境巡查、区域封控、通信阻塞等,体系结构的设计需要同时考虑多样化任务需求。故而设计规模易扩展、适宜于不同任务的体系结构,是集群系统必须考虑的顶层设计。

4.3 以分布式在线处理为特征,提升协同 OODA 回路响应时间和行为决策能力

无人机集群需考虑多平台空间约束、时间约束、任务耦合约束以及相互耦合关系等,其状态空间将随无人机的数量呈幂指数增长,使得集群系统的“OODA”必须以分布方式进行。同时,集群可以采用多平台多视角等相关关系,提升“OODA”的效能。但是,现有“OODA”回路的相关算法大多采用集中式处理,很难直接扩展到规模较大、且可利用相关关系的集群系统中。另一方面,集群系统机载计算和存储能力非常有限。但是集群在动态时变环境中,比如对时敏目标的察打一体中,需要很强的实时性。需要较大计算/存储的 OODA 算法无法直接在集群系统中使用或者难以满足快速 OODA 的需求。故而,满足机载性能要求,采用分布式处理的快速“OODA”相关算法,将是集群系统未来的重要发展方向。

4.4 以意外事件处理为核心,设计大规模集群协同飞行控制算法

目前,固定翼无人机集群飞行规模已达 100 架以上,但尚未见公开发表的学术论文。系统规模的进一步增大,关键在于其可扩展性研究。良好的可扩展性可以确保无人机动态加入和退出集群时,系统仍然能够维持较好的稳定性,并能够保持较好的控制精度。故而,集群规模可扩展性研究在理论与

实际应用上具有巨大的价值。

另一方面,现有飞行主要是在理想环境中进行。面向实际任务时,不可避免地存在各种意外情况,比如无人机部分损毁、各类空中移动障碍、突发天气变化、通信干扰压制、导航欺骗等。以意外事件处理为核心研究大规模集群稳健协同问题,将是无人机集群系统执行对抗性任务的行为基础。

4.5 以低成本轻质化为特色,牵引无人机系统平台/载荷/通信系统的研制

集群系统往往以规模优势取代质量优势,且不畏惧部分平台的损毁,故而大规模集群系统往往严格限制单机系统的成本,包括平台、机载控制器、感知/打击载荷、以及通信端机等。同时,小型固定翼无人机的挂载重量非常有限,对上述载荷的重量也有严格要求。现有的无人机载荷往往追求大而全,性能较高,但是质量较重、价格较高,并不适合在无人机集群上直接使用。故而,研发满足集群需求的低成本轻质化平台和载荷,对集群任务能力的形成至关重要。

4.6 以平行仿真为手段,构建虚实结合的标准化开放性集群协同测试环境

集群系统的发展方兴未艾,但是大规模集群的试验验证,组织困难且成本高昂,很大程度上限制了集群系统的能力提升。另一方面,集群协同理论和关键技术的研究缺乏整体牵引性,各种集群协同算法烟囱式发展,缺乏统一的基本任务、基础平台和可行的比较评判。一种可行的方式是采用平行仿真手段构建虚实结合的集群系统,既包含部分实物系统,也可任意添加高保真度的虚拟无人机系统,两者混合执行任务。同时,设计典型任务,构建标准任务环境和开发接口,并以竞赛的方式推广开放开源给相关研究单位,协力推动群体协同系统任务能力的提升。

5 结 论

本文从无人机系统内涵、现有典型项目、关键技术 3 个角度出发,对国内外小型固定翼无人机集群进行了全面综述。其中,在系统内涵方面,首先介绍了无人机集群系统的基本概念,分析了无人机集群协同执行任务的优点,并给出了其在军

民领域的广泛应用。在典型项目方面,从集群协同模式、指挥体系架构、基础性研究、集群验证4个视角总结现有典型项目。在关键技术方面,对体系架构、通信组网、决策与规划、飞机平台、集群飞行、集群指控等核心要素进行深度分析。在此基础上,论文展望了未来小型固定翼无人机集群的发展趋势,期望能够对未来无人集群系统的发展起到一定的牵引作用。

参 考 文 献

- [1] PHAM L V, DICKERSON B, SANDERS J, et al. UAV swarm attack: Protection system alternatives for destroyers [R]. Monterey, CA: Naval Postgraduate School, 2012.
- [2] ROBERT O W, THOMAS P E. The unmanned combat air system carrier demonstration program: A new dawn for naval aviation? [R] Washington, D. C.: Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2007.
- [3] DUAN H B, YANG Q, DENG Y M, et al. Unmanned aerial systems coordinate target allocation based on wolf behaviors[J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(1): 0114201.
- [4] 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.
DUAN H B, SHEN Y K, WANG Y, et al. Review of technological hot spots of unmanned aerial vehicle in 2018 [J]. Science and Technology Review, 2019, 37(3): 82-90 (in Chinese).
- [5] SPURNY V, BĀČA T, SASKA M, et al. Cooperative autonomous search, grasping, and delivering in a treasure hunt scenario by a team of unmanned aerial vehicles [J]. Journal of Field Robotics, 2019, 36(1): 125-148.
- [6] HAN J, XU Y, DI L, et al. Low-cost multi-UAV technologies for contour mapping of nuclear radiation field [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2013, 70(1-4): 401-410.
- [7] MAZA I, CABALLERO F, CAPITÁN J, et al. Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications [J]. Journal of Intelligent and Robotic systems, 2011, 61(1-4): 563-585.
- [8] TECHY L, SCHMALE I, DAVID G, et al. Coordinated aerobiological sampling of a plant pathogen in the lower atmosphere using two autonomous unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(3): 335-343.
- [9] MERINO L, CABALLERO F, MARTINEZ-DE D J R, et al. A cooperative perception system for multiple UAVs: Application to automatic detection of forest fires [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(3-4): 165-184.
- [10] KELLER J, THAKUR D, LIKHACHEV M, et al. Coordinated path planning for fixed-wing UAS conducting persistent surveillance missions [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(1): 17-24.
- [11] MENG W, HE Z, SU R, et al. Decentralized multi-UAV flight autonomy for moving convoys search and track [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(4): 1480-1487.
- [12] Defense Industry Daily Staff. USA's unmanned aircraft systems roadmap 2005-2030 [EB/OL]. (2005-08-29) [2019-11-14]. <https://www.defenseindustrydaily.com/us-as-unmanned-aircraft-systems-roadmap-20052030-01094/>.
- [13] Air Force Public Affairs. Flight plan outlines next 20 years for RPA [EB/OL]. (2016-05-17) [2019-11-14]. <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/774728/flight-plan-outlines-next-20-years-for-rpa/>.
- [14] 陈杰, 辛斌. 有人/无人系统自主协同的关键科学问题[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(9): 1270-1274.
CHEN J, XIN B. Key scientific problems in the autonomous cooperation of manned-unmanned systems [J]. Scientia Sinica: Informationis, 2018, 48(9): 1270-1274 (in Chinese).
- [15] 牛轶峰, 肖湘江, 柯冠岩. 无人机集群作战概念及关键技术分析[J]. 国防科技, 2013, 34(5): 37-43.
NIU Y F, XIAO X J, KE G Y. Operation concept and key techniques of unmanned aerial vehicle swarms[J]. National Defense Science and Technology, 2013, 34(5): 37-43 (in Chinese).
- [16] LILIE L T, BEN O L, ANGIN P, et al. A simulation study of ad hoc networking of UAVs with opportunistic resource utilization networks [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 38: 3-15.
- [17] DARPA. Offensive swarm-enabled tactics (OFFSET) [EB/OL]. (2016-12-07) [2019-11-14]. <https://www.darpa.mil/program/offensive-swarm-enabled-tactics>
- [18] DARPA. Collaborative operations in denied environment (CODE) [EB/OL]. (2018-11-28) [2019-11-14]. <https://www.darpa.mil/program/collaborative-operations-in-denied-environment>.
- [19] DARPA. System of systems integration technology and experimentation (SoSITE) [EB/OL]. (2016-10-27) [2019-11-14]. <https://www.darpa.mil/program/system-of-systems-integration-technology-and-experimentation>.
- [20] DARPA. Distributed battle management (DBM) [EB/OL]. (2018-02-13) [2019-11-14]. <https://www.darpa.mil/program/distributed-battle-management>.
- [21] VALENTI M, BETHKE B, HOW J P, et al. Embedding

- health management into mission tasking for UAV teams [C] // American Control Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 5777-5783.
- [22] KUSHLEYEV A, MELLINGER D, POWERS C, et al. Towards a swarm of agile micro quadrotors [J]. *Autonomous Robots*, 2013, 35(4): 287-300.
- [23] HIESLMAIR M. Drone 100: A world record featuring 100 points [EB/OL]. (2016-01-12) [2019-09-14]. <https://ars.electonica.art/feature/en/drone100/>.
- [24] INTEL. Experience a record breaking performance [EB/OL]. (2019-07-18) [2019-09-14]. <https://www.intel.com/content/www/us/en/technology-innovation/aerial-technology-light-show.html>.
- [25] EHANG. Ehang drone formation flight [EB/OL] (2017-02-11) [2019-11-14]. <http://www.ehang.com/formation/>.
- [26] HIGH GREAT. 30 cities-lighting up China [EB/OL]. (2019-07-24) [2019-11-14]. <http://droneshow.hg-fly.com/en/>.
- [27] VÁSÁRHELYI G, VIRÁGH C, SOMORJAI G, et al. Optimized flocking of autonomous drones in confined environments [J]. *Science Robotics*, 2018, 3(20): 3536.
- [28] MONDADA F, BONANI M, RAEMY X, et al. The e-puck, a robot designed for education in engineering [C] // Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, 2009: 59-65.
- [29] FRANCESCA G, BRAMBILLA M, BRUTSCHY A, et al. AutoMoDe: A novel approach to the automatic design of control software for robot swarms [J]. *Swarm Intelligence*, 2014, 8(2): 89-112.
- [30] KERNBACH S, THENIUS R, KERNBACH O, et al. Re-embodiment of honeybee aggregation behavior in an artificial micro-robotic system [J]. *Adaptive Behavior*, 2009, 17(3): 237-259.
- [31] RUBENSTEIN M, AHLER C, HOFF N, et al. Kilobot: A low cost robot with scalable operations designed for collective behaviors [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2014, 62(7): 966-975.
- [32] RUBENSTEIN M, CORNEJO A, NAGPAL R. Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm [J]. *Science*, 2014, 345(6198): 795-799.
- [33] WERFEL J, PETERSEN K, NAGPAL R. Designing collective behavior in a termite-inspired robot construction team [J]. *Science*, 2014, 343(6172): 754-758.
- [34] GARATTONI L, BIRATTARI M. Autonomous task sequencing in a robot swarm [J]. *Science Robotics*, 2018, 3(20): 0430.
- [35] LI S G, BATRA R, BROWN D, et al. Particle robotics based on statistical mechanics of loosely coupled components [J]. *Nature*, 2019, 567(7748): 361-365.
- [36] ONR. LOCUST: Autonomous, swarming UAVs fly into the future [EB/OL]. (2015-04-14) [2019-09-14]. <https://www.onr.navy.mil/en/Media-Center/Press-Releases/2015/LOCUST-low-cost-UAV-swarm-ONR>.
- [37] MEHTA A. Pentagon launches 103 unit drone swarm [EB/OL]. (2017-01-10) [2019-09-14]. <https://www.defensenews.com/air/2017/01/10/pentagon-launches-103-unit-drone-swarm/>.
- [38] The Maritime Executive. Nasa, U. S. navy team up to test microdrones [EB/OL]. (2019-04-22) [2019-09-14]. <https://www.maritime-executive.com/article/nasa-u-s-navy-team-up-to-test-microdrones>.
- [39] DARPA. Gremlins on track for demonstration flights in 2019 [EB/OL]. (2018-05-09) [2019-09-14]. <https://www.darpa.mil/news-events/2018-05-09>.
- [40] India TV News Desk. Development of swarms of drones underway to take out airstrikes like Balakot [EB/OL]. (2019-07-12) [2019-11-14]. <https://www.indiatvnews.com/news/india-swarms-of-drones-balakot-airstrike-534581>.
- [41] Defense Systems & Equipment International (DSEI). STM introduces mini-UAV systems to the world [EB/OL]. (2019-09-10) [2019-11-14]. <https://armadainternational.com/2019/09/stm-introduces-mini-uav-systems-to-the-world/>.
- [42] WANG X K, SHEN L C, LIU Z H, et al. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: Methods and experiments [J]. *Science China Information Sciences*, 2019, 62(11): 212204.
- [43] 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.
- DUAN H B, QIU H X. Unmanned aerial vehicle swarm autonomous control based on swarm intelligent [M]. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese).
- [44] BOYD J. A discourse on winning and losing [M]. Alabama: Air University Press, 2018.
- [45] 黄琳. 为什么做, 做什么和发展战略——控制科学学科发展战略研讨会约稿前言 [J]. *自动化学报*, 2013, 39(2): 97-100.
- HUANG L. Future development in control science: Why, what and strategy [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(2): 97-100 (in Chinese).
- [46] SANCHEZ-LOPEZ J, PESTANA J, PUENTE P, et al. A reliable open-source system architecture for the fast designing and prototyping of autonomous multi-UAV systems: Simulation and experimentation [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2015, 84, 1-19.
- [47] SANCHEZ-LOPEZ J, FERNANDEZ RAS, BAVLE H, et al. Aerostack: An architecture and open-source software framework for aerial robotics [C] // International

- Conference on Unmanned Aircraft Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 332-341.
- [48] GRABE B, RIEDEL M, BULTHOFF H, et al. The telekyb framework for a modular and extendible ROS-based quadrotor control [C]// European Conference on Mobile Robots. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013: 19-25.
- [49] BOSKOVIC J, KNOEBEL N, MOSHTAGH N J, et al. Collaborative mission planning & autonomous control technology (compact) system employing swarms of UAVs [C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston, VA: AIAA, 2009: 1-24.
- [50] CHUNG T, CLEMENT M, DAY M, et al. Jones, live-fly, large-scale field experimentation for large numbers of fixed-wing UAVs [C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 1255-1262.
- [51] CAMPION M, RANGANATHAN P, FARUQUE S. UAV swarm communication and control architectures: A review [J]. Journal of Unmanned Vehicle Systems, 2019, 7(2): 93-106.
- [52] BEKMEZCI I, SAHINGOZ O, TEMEL S. Flying ad-hoc networks (FANETs): A survey [J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1254-70.
- [53] SIVAKUMAR A, TAN C. UAV swarm coordination using cooperative control for establishing a wireless communications backbone [C]// International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010: 1157-1164.
- [54] 卓琨, 张衡附, 郑博, 等. 无人机自组网研究进展综述 [J]. 电信科学, 2015, 31(4): 134-144.
- ZHUO K, ZHANG H F, ZHENG B, et al. Progress of UAV Ad Hoc network: A survey [J]. Telecommunications Science, 2015, 31(4): 134-144 (in Chinese).
- [55] SAHINGOZ O. Networking models in flying Ad-hoc networks (FANETs): Concepts and challenges [J]. Journal of Intelligent and Robotic systems, 2014, 74 (1-2): 513-527.
- [56] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 18(2): 1123-1152.
- [57] XIE J, WAN Y, KIM J, et al. A survey and analysis of mobility models for airborne networks [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 16(3): 1221-1238.
- [58] HAYAT S, YANMAZ E, MUZAFFAR R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2624-2661.
- [59] ZHOU Y, LI J, LAMONT L, et al. Modeling of packet dropout for UAV wireless communications [C]// International Conference on Computing, Networking and Communications, 2012: 677-682.
- [60] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 1-14.
- ZONG Q, WANG D D, SHAO S K, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 1-14 (in Chinese).
- [61] WANG X K, ZENG Z W, CONG Y R. Multi-agent distributed coordination control: Developments and directions via graph viewpoint [J]. Neurocomputing, 2016, 199: 204-218.
- [62] CHOI H, BRUNET L, HOW J. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(4): 912-926.
- [63] GANCET J, HATTENBERGER G, ALAMI R, et al. Task planning and control for a multi-UAV system: architecture and algorithms [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 1017-1022.
- [64] CAPITAN J, MERINO L, OLLERO A. Decentralized cooperation of multiple UAS for multi-target surveillance under uncertainties [C]// International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 1196-1202.
- [65] CAPITAN J, SPAAN M, MERINO L, et al. Decentralized multi-robot cooperation with auctioned POMDPs [J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(6): 650-671.
- [66] LANILLOS P, GAN S, BESADA-PORTAS E, et al. Multi-UAV target search using decentralized gradient-based negotiation with expected observation [J]. Information Sciences, 2014, 282: 92-110.
- [67] AKSELROD D, SINHA A, KIRUBARAJAN T. Hierarchical markov decision processes based distributed data fusion and collaborative sensor management for multitarget multisensor tracking applications [C]// IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 157-164.
- [68] BERNARD M, KONDAK K, MAZA I, et al. Autonomous transportation and deployment with aerial robots for search and rescue missions [J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28(6): 914-931.
- [69] BEARD R, MCLAIN T. Small unmanned aircraft: The Practice [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2012.
- [70] CHAO H, CAO Y, CHEN Y. Autopilots for small unmanned aerial vehicles: A survey [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2010, 8(1):

- 36-44.
- [71] GOERZEN C, KONG Z, METTLER B. A survey of motion planning algorithms from the perspective of autonomous UAV guidance [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010, 57 (1-4): 65-100.
- [72] JOHNSON E, KANNAN S. Adaptive trajectory control for autonomous helicopters [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2005, 28 (3): 524-538.
- [73] HAN J. From PID to active disturbance rejection control [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(3): 900-906.
- [74] AMBROSINO G, ARIOLA M, CINIGLIO U, et al. Path generation and tracking in 3-D for UAVs [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2009, 17 (4): 980-988.
- [75] XARGAY E, DOBROKHODOV V, KAMINER I, et al. Time-critical cooperative control of multiple autonomous vehicles[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2012, 32 (5): 49-73.
- [76] RHEE R, PARK S. A tight path following algorithm of an UAS based on PID control [C]//SICE Annual Conference, 2010: 1270-1273
- [77] KUKRETI C, KUMAR M. Genetically tuned LQR based path following for UAVs under wind disturbance [C]//International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2016: 267-274.
- [78] RATNOO A, SUJIT P, KOTHARI M. Optimal path following for high wind flights [C]// Proceedings of IFAC World Congress, 2011: 12985-12990.
- [79] NELSON D, BARBER D, MCLAIN T, et al. Vector-field path following for miniature air vehicles [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23(3): 519-529.
- [80] WANG Y J, WANG X K, ZHAO S L, et al. Vector field based sliding mode control of curved path following for miniature unmanned aerial vehicles in winds [J]. *Journal of Systems Science and Complexity*, 2018, 31(1): 302-324.
- [81] ZHAO S L, WANG X K, LIN Z Y, et al. Integrating vector field approach and input-to-state stability for curved path following for unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems*, 2018, 99: 1-8.
- [82] LEKKAS A, FOSSEN T. Integral LOS path following for curved paths based on a monotone cubic hermite spline parametrization [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(6): 2287-2301.
- [83] COELHO P, NUNES U. Path-following control of mobile robots in presence of uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(2): 252-261.
- [84] FAULWASSER T, FINDEISEN R. Nonlinear model predictive control for constrained output path following[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(4): 1026-1039.
- [85] MORRO A, SGORBISSA A, ZACCARIA R. Path following for unicycle robots with an arbitrary path curvature [J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(5): 1016-1023.
- [86] KAMINER I, XARGAY E, HOVAKIMYAN N, et al. Path following for small unmanned aerial vehicles using L1 adaptive augmentation of commercial autopilots [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2010, 33(2): 550-564.
- [87] SUJIT P, SARIPALLI S, SOUSA J. Unmanned aerial vehicle path following: A survey and analysis of algorithms for fixed-wing unmanned aerial vehicles [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2014, 34(1): 42-59.
- [88] ZHU B, XIE L, HAN D, et al. A survey on recent progress in control of swarm systems [J]. *Science China Information Sciences*, 2017, 60(7): 070201.
- [89] CHUNG S, PARANJAPE A, DAMES P, et al. A survey on aerial swarm robotics[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2018, 34(4): 837-855.
- [90] GU Y, SEANOR B, CAMPA G, et al. Design and flight testing evaluation of formation control laws [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14 (6): 1105-1112.
- [91] CAMPA G, GU Y, SEANOR B, et al. Design and flight-testing of non-linear formation control laws[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(9): 1077-1092.
- [92] WILSON D, GOKTOGAN A, SUKKARIEH S. Vision-aided guidance and navigation for close formation flight [J]. *Journal of Field Robotics*, 2016, 33(5): 661-686.
- [93] NAGY M, AKOS Z, BIRO D, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks [J]. *Nature*, 2010, 464(7290): 890.
- [94] LUO Q N, DUAN H B. Distributed UAV flocking control based on homing pigeon hierarchical strategies [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 70: 257-264.
- [95] KOWNACKI C, AMBROZIAK L. Local and asymmetrical potential field approach to leader tracking problem in rigid formations of fixed-wing UAVs [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 68: 465-474.
- [96] NAIR R, KARKI H, SHUKLA A, et al. Fault-tolerant formation control of nonholonomic robots using fast adaptive gain nonsingular terminal sliding mode control [J]. *IEEE Systems Journal*, 2019, 13(1): 1006-1017.
- [97] SUN Z, DAI L, XIA Y, et al. Event-based model predictive tracking control of nonholonomic systems with coupled input constraint and bounded disturbances [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2017, 63 (2):

- 608-615.
- [98] FAHIMI F. Sliding-mode formation control for underactuated surface vessels[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(3): 617-622.
- [99] DEFOORT M, FLOQUET T, KOKOSY A, et al. Sliding-mode formation control for cooperative autonomous mobile robots [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 3944-3953.
- [100] WATANABE Y, AMIEZ A, CHAVENT P. Fully-autonomous coordinated flight of multiple UAVs using decentralized virtual leader approach[C]// IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013: 5736-5741.
- [101] LU X, LU R, CHEN S, et al. Finite-time distributed tracking control for multi-agent systems with a virtual leader [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2013, 60(2): 352-362.
- [102] YU X, LIU L. Distributed formation control of nonholonomic vehicles subject to velocity constraints[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1289-1298.
- [103] LEWIS M, TAN K. High precision formation control of mobile robots using virtual structures [J]. Autonomous robots, 1997, 4(4): 387-403.
- [104] LI N, LIU H. Formation UAV flight control using virtual structure and motion synchronization [C]// American Control Conference, 2008: 1782-1787.
- [105] LOW C. A dynamic virtual structure formation control for fixed-wing UAVs [C]// IEEE International Conference on Control and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 627-632.
- [106] REZAEI H, ABDOLLAHI F. Motion synchronization in unmanned aircrafts formation control with communication delays[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2013, 18(3): 744-756.
- [107] LI Q, JIANG Z. Pattern preserving path following of unicycle teams with communication delays[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(9): 1149-1164.
- [108] CONDE R, ALEJO D, COBANO J, et al. Conflict detection and resolution method for cooperating unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, 65(1-4): 495-505.
- [109] ZHANG X, DU Y, GU B, et al. Survey of safety management approaches to unmanned aerial vehicles and enabling technologies [J]. Journal of Communications and Information Networks, 2018, 3(4): 1-14.
- [110] MAHJRI I, DHRAIEF A, BELGHITH A. A review on collision avoidance systems for unmanned aerial vehicles [C]// International Workshop on Communication Technologies for Vehicles, 2015: 203-214.
- [111] JENIE Y I, VAN KAMPEN E J, ELLERBROEK J, et al. Taxonomy of conflict detection and resolution approaches for unmanned aerial vehicle in an integrated airspace [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 18(3): 558-567.
- [112] DADKHAH N, METTLER B. Survey of motion planning literature in the presence of uncertainty: Considerations for UAV guidance[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, 65(1-4): 233-246.
- [113] DAI L, CAO Q, XIA Y, et al. Distributed MPC for formation of multi-agent systems with collision avoidance and obstacle avoidance[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(4): 2068-2085.
- [114] ALONSO-MORA J, BEARDSLEY P, SIEGWART R. Cooperative collision avoidance for nonholonomic robots [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(2): 404-420.
- [115] HOY M, MATVEEV A S, SAVKIN A V. Algorithms for collision-free navigation of mobile robots in complex cluttered environments: A survey [J]. Robotica, 2015, 33(3): 463-497.
- [116] HENDRICKX J M, FIDAN B, YU C, et al. Formation reorganization by primitive operations on directed graphs [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2008, 53(4): 968-979.
- [117] WANG X K, WANG X, ZHANG D B, et al. A liquid sphere-inspired physicomimetics approach for multiagent formation control[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2018, 28(15): 4565-4583.
- [118] 王强. 面向任务的多智能体系统抗毁性拓扑结构构建与群集控制[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- WANG Q. Task-oriented fault-tolerant topology and flocking control for multi-agent systems[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [119] YANG L. Building K-connected neighborhood graphs for isometric data embedding [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(5): 827-831.
- [120] 金仁成, 谢林达, 魏巍, 等. 一种用于仿生导航无人机航姿求解的混合滤波方法[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(5): 74-81.
- JIN R C, XIE L D, WEI W, et al. A hybrid filter method for attitude determination of UAV in bionic navigation[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(5): 74-81 (in Chinese).
- [121] 薛杨, 孙永荣, 赵科东, 等. 基准地图测绘下的视觉导航算法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 22-27.
- XUE Y, SUN Y R, ZHAO K D, et al. Visual navigation algorithm based on standard mapping [J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(10): 22-27 (in Chinese).

- [122] 张国忠, 沈林成, 朱华勇. 多无人机监督控制技术的发展现状及启示[J]. 国防科技, 2009, 30(4): 5-10.
ZHANG G Z, SHEN L C, ZHU H Y. The current situation and enlightenment of supervisory control technology for multiple UAVs[J]. National Defense Science and Technology, 2009, 30(4): 5-10 (in Chinese).
- [123] TOTH S, HUGHES W, LADAS A. Wide-area littoral discreet observation: Success at the tactical edge[C]// Ground/Air Multisensor Interoperability, Integration, and Networking for Persistent ISR III, 2012: 838916.
- [124] 彭辉, 相晓嘉, 吴立珍, 等. 有人机/无人机协同任务控制系统[J]. 航空学报, 2008, 29(S1): 135-141.
PENG H, XIANG X J, WU L Z, et al. Cooperative mission control system for a manned vehicle and unmanned aerial vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(S1): 135-141 (in Chinese).
- [125] SHAH J, BREAZEL C. An empirical analysis of team coordination behaviors and action planning with application to human-robot teaming[J]. Human Factors, 2010, 52(2): 234-245.
- [126] TRAFTON J, CASSIMATIS N, BUGAJSKA M, et al. Enabling effective human-robot interaction using perspective-taking in robots[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2005, 35(4): 460-470.
- [127] FONG T, KUNZ C, HIATT L, et al. The human-robot interaction operating system[C]//Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-Robot Interaction. New York: ACM, 2006: 41-48.
- [128] LOCKERD A, BREAZEL C. Tutelage and socially guided robot learning[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 3475-3480.
- [129] SAKITA K, OGAWARA K, MURAKAMI S, et al. Flexible cooperation between human and robot by interpreting human intention from gaze information[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2004: 846-851.
- [130] ALONSO-MORA J, LOHAUS S H, LEEMANN P, et al. Gesture based human-multi-robot swarm interaction and its application to an interactive display[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 5948-5953.
- [131] ARTEMIADIS P. Brain-swarm control interfaces: The transition from controlling one robot to a swarm of robots[J]. Advances in Robotics & Automation, 2016, 5: e127.
- [132] 金欣. “深绿”及 AlphaGo 对指挥与控制智能化的启示[J]. 指挥与控制学报, 2016, 2(3): 202-207.
JIN X. Inspiration to intelligent command and control from deep green and AlphaGo [J]. Journal of Command and Control, 2016, 2(3): 202-207 (in Chinese).
- [133] LI T. Analysis and inspiration to intelligent command and control [C]//Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing, 2017: 579-585.
- [134] STODOLA P, MAZAL J. Tactical decision support system to aid commanders in their decision-making [C]//International Workshop on Modelling and Simulation for Autonomous Systems, 2016: 396-406.
- [135] WANG C, ZHU Y T, WEN X, et al. Multi-video supervisory target tracking improved by interactive on-line learning [C]//British Human Computer Interaction Conference, 2018: 1-5
- [136] ZHU Y T, WANG C, NIU Y, et al. hTLD: A human-in-the-loop target detect and tracking method for UAV [C]//IEEE/CSAA Guidance, Navigation and Control Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2018: 2063-2068.

(责任编辑: 苏磊)

Miniature fixed-wing UAV swarms: Review and outlook

WANG Xiangke^{*}, LIU Zhihong, CONG Yirui, LI Jie, CHEN Hao

College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China

Abstract: Focusing on the new direction of miniature fixed-wing UAV swarms, this paper summarizes their recent developments from three aspects, i. e., the connotation of the swarm system, the existing typical programs, and the key technologies. After a systematic introduction of the connotation and application advantages of the swarm system, the existing typical programs are summarized from four perspectives: swarm collaborative mode exploration, distributed command system construction, key technology breakthroughs, and swarm verification. The current developments of technical research are reviewed in seven key points, including system architecture, communication and networking, decision-making and planning, aircraft platform, swarm flight, swarm security and swarm command and control. Finally, the future developments in the field of miniature fixed-wing UAV swarms are forecasted.

Keywords: UAV swarms; swarm collaborative mode; system architecture; communication and networking; decision-making and planning; swarm flight

Received: 2019-11-10; Revised: 2019-11-28; Accepted: 2019-12-16; Published online: 2019-12-31 16:30

URL: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200402.html>

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61973309, 61801494, 61906209)

^{*} Corresponding author. E-mail: xkwang@nudt.edu.cn