

目录结构

0 引言

1 国内外无人机集群技...

1.1 国外无人机集群技术研究现状

1.2 国内无人机集群技术研究现状

2 国内外无人机集群技...

3 无人机集群技术发展...

3.1 无人机集群态势感知与信息共享

3.2 无人机集群编队与智能决策控制

3.3 无人机集群中有人机与无人机协同技术

3.4 无人机集群移动Ad Hoc网络技术

4 无人机集群技术发展...

4.1 人工智能推动仿生智能无人机集群

4.2 有人机与无人机共融集群

4.3 5G网联无人机集群

4.4 基于视觉的无人机集群

5 结 论

文内图表

图1 典型生物集群行为

图2 无人机集群任务规划分层结构示意图

参考文献

航空兵器 2020,27(04),25-32 DOI:10.12132/JSSN.1673-5048.2019.0218

无人机集群技术研究现状与趋势

李鹏举 毛鹏军 耿乾 黄传鹏 方翥 张家瑞
河南科技大学

导出/参考文献 分享 创建引文跟踪 收藏

摘 要: 近年来,无人机集群技术概念的提出及发展有效解决了单个无人机作业时载荷相对较小、信息感知能力相对较弱的不足。无人机集群技术的研究与应用已成为无人机技术发展的一个重要方向,无人机集群不但机间的密切协作有效提升载荷能力和信息处理能力,并且具有很高的“自愈”能力和很强的鲁棒性。本文介绍集群技术的相关概念、国内外无人机集群技术研究现状、差异以及无人机集群发展的关键技术和未来无人机集群发展趋势,为开展无人机集群的研究提供理论基础。

关键词: 无人机; 集群技术; 集群控制; 集群编队; 多机协同;

作者简介: 李鹏举(1989-),男,河南平顶山人,硕士研究生,研究方向是无人机飞行控制系统。; *毛鹏军(1972-),阳人,教授,研究方向是无人机控制系统、智能控制系统。E-mail:memaopengjun@163.com;

收稿日期: 2019-10-12

基金: 河南省重大科技专项(181100110100); 河南省高校科技创新团队支持计划(19IRTSTHN021);

Research Status and Trend of UAV Swarm Technology

Li Pengju Mao Pengjun Geng Qian Huang Chuanpeng Fang Qian Zhang
Jiarui
Henan University of Science and Technology

Abstract: In recent years, the concept of UAV swarm technology is put forward and developed, which solves the deficiency of relatively small load and relatively weak information perception processing ability of the UAV. The research and application of UAV swarm technology has become an important direction of UAV technology development. UAV swarm not only can effectively improve the load capacity and information processing capacity through close cooperation between individual UAV, but also has high self-healing ability and robustness. This paper introduces the related concepts of UAV swarm technology, the research status and difference of UAV swarm technology at home and abroad, the key technologies of UAV swarm development and development trend of UAV swarm, so as to provide theoretical basis for future research of UAV swarm.

Keyword: UAV; swarm technology; swarm control; swarm formation; multiple UAVs operation;

Received: 2019-10-12

0 引言

集群概念源于生物学研究。自然界中,欧椋鸟群、雁群、蚁群、蜂群、狼群等大量个体聚集时往往能协调一致、令人震撼的集群运动场景^[1,2]。法国生物学家Grassé基于白蚁筑巢行为,首次提出生物集群概念,研究智能集群^[3]。典型生物集群行为如图1所示。

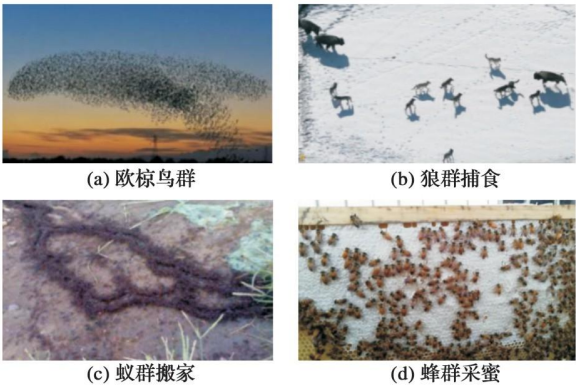


图1 典型生物集群行为

Fig.1 Typical biological swarm behavior

单无人机的应用受自身条件限制, 面对应用环境日益复杂及任务多样, 颇显局限^[4]。为解决单机应用的局限, 国空军科学顾问委员会提出未来无人机的应用将是集群的方式^[5]。

无人机集群是指由一定数量的同类或异类无人机组成, 利用信息交互与反馈、激励与响应, 实现相互间自适应动态环境, 共同完成特定任务的自主式空中智能系统^[4]。其不是多无人机间的简单编队, 而是通过必要协调使之产生集群协同效应, 从而具备执行复杂多变、危险任务的能力。未来, 无人机集群协同完成任务将成为产业应用的重要方面。无人机集群既能最大限度地发挥无人机的优势, 提高整体的载荷能力和信息感知处理能力, 避免单无人机执行任务时被攻击或任务效率不高的问题。

1 国内外无人机集群技术研究现状

无人机已被各国广泛用于国防建设和民用领域, 随着无人机技术的深入研究, 无人机自主集群系统能够通过协作完成各种复杂多变的任务, 并且具备卓越的协调性、智能性和自主性, 已成为无人机研究的一个重要方向。

1.1 国外无人机集群技术研究现状

1.1.1 无人机集群分层控制研究现状

对无人机集群实施有效地控制是完成各种复杂集群任务的基础。Cook等认为, 无人机集群任务规划问题是一个组合优化问题, 拟从运筹学角度, 采用分层控制方法解决此类问题^[7]。Boskovic等将无人机集群任务规划问题分解为决策层、路径规划层、轨迹生成层和控制层^[8,9], 其中, 决策层负责无人机集群系统中的任务规划与分配和任务评估等; 路径规划层负责将任务决策数据转换成航路点, 以引导无人机完成任务、规避障碍; 轨迹生成层负责根据航路点生成无人机通过航路点的可飞路径; 控制层控制无人机按照生成的轨迹飞行。集群任务规划分层结构如图2所示。

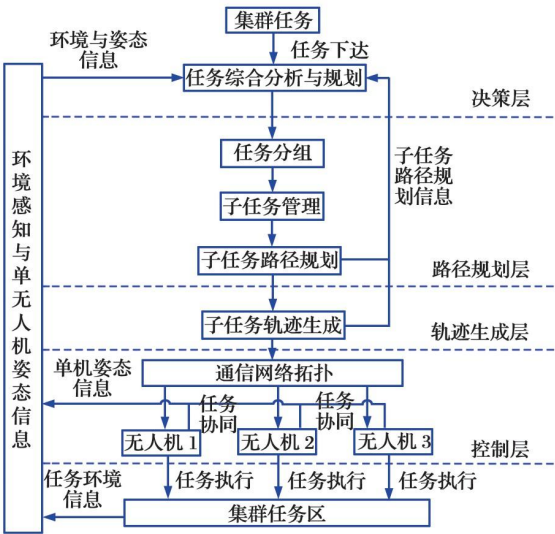


图2 无人机集群任务规划分层结构示意图

Fig.2 Hierarchical structure of UAV swarm mission planning

Tsourdou等从多无人机任务协同路径规划方面将多机协同任务规划分为集群任务规划分配层、协同路径规划和控制层^[10]。研究表明,分层控制能降低无人机集群中任务分配问题的复杂性,提高集群任务分配效率。

1.1.2 无人机集群控制系统研究现状

根据集群控制系统中有无控制中心节点,分为集中式控制与分布式控制系统。集中式控制系统是由控制中心完成系统的任务规划和协同工作,多机系统中的无人机只作为任务的执行者。目前,已有多种集中式任务规划方法,如多旅行商问题、车辆路由问题、网络流模型、混合整数线性规划等^[4]。其中网络流模型、混合整数规划多用于解决多任务。

分布式控制系统中没有控制中心节点,对单机来说在系统中地位是平等的,采用自主管理、协商的方法完成任务。如欧洲信息社会技术计划(IST)开展的异构无人机集群实时协同与控制项目(COMETS)^[11]采用的就是异构集群分布式实时控制技术。

1.1.3 无人机集群任务协同算法研究现状

Ramirez-Atencia等针对无人机集群任务规划复杂问题,提出一种改进型多目标遗传算法^[12]。Edison等针对多机集群系统对执行多任务目标易受时间先后顺序约束的情况,采用图论描述方法,结合时间、资源、路径等因素建立了协同多任务分配问题的组合优化模型^[13]。采用上述算法虽然能找到问题最优解,但随着问题规模的扩大也会增大。为降低大型问题的计算量,Rasmussen等提出基于树搜索算法解决无人机集群的任务规划问题,该算法既能快速找到问题最优解,又能避免确定性搜索算法计算量大的缺点。

1.1.4 无人机集群体系结构研究现状

无人机集群的动态性和复杂性特征决定了其体系结构复杂多变。研究中,大多采用层次递进型体系结构提高集群系统复杂性,提高集群系统运行效率。代表性研究有:Caloud等将无人机集群体系结构分为任务分解、规划和执行控制四层,并建立GOPHER体系结构模型^[15]。Parker基于行为建立ALLIANCE分布式体系结构,具有容错和自适应性的多机协调体系结构^[16]。Langle等为解决多机体系结构协调问题,建立了KAMARA分布式模型研究多机容错行为和误差纠正^[17]。

1.1.5 无人机集群通信网络研究现状

无人机集群通信网络拓扑结构有别于单机与地面站的通信拓扑,是一种立体全方位通信网络拓扑。集群感知系统不仅是无人机集群通信的基础,还是无人机集群编队重要信息的获取通道。为解决无人机集群通信延迟、数据丢失、信号衰落问题,Ghazal等基于谐波叠加方法建立IMT-A信道模型^[18]。由于无人机集群系统应用场景通常在室外环境,为此,Milica等^[19]基于室外环境中红外波段光谱的信号传输及相关的光天线通信(OWC)技术建立无人机的自由空间光通信系统,在一定程度上能解决通信带宽、数据拥堵、时延等问题,并基于光电信号转换在视距范围内能够满足系统要求,但易受大气低温、海拔和气压的影响。

1.2 国内无人机集群技术研究现状

国内对无人机集群技术的研究起步较晚,但对无人机集群技术任务规划研究比较深入。目前,国内多家科研院所对多无人机系统的协同感知与信息共享、路径实时规划、自主编队与编队重构、智能协同决策等技术开展了大量研究^[20,21,22,23]。2017年6月,中国电子科技集团成功完成119架小型固定翼无人机集群飞行试验^[24]。

1.2.1 无人机集群任务规划研究现状

无人机集群任务指需要多机协同完成的任务。无人机集群任务规划指针对不同任务,无人机集群系统选择任务策略,对任务实施分组、规划完成,具有复杂性、准确性及实时性的特点。任务分配时既要保证任务效益最大化、不同无人机执行任务均衡性,又要尽量减少任务执行时间、缩短任务执行路径。

Hu等为解决集群无人机任务分配计算难度,将多无人机任务分配问题分为目标聚类、集群分配和目标分配三个子问题,并进行实验,结果显示同等情况下该方法效率更高^[25]。岳源等根据多无人机系统协同的特点,结合路程、通信、传感器能力、无人机自主化水平,建立无人机集群侦察优势函数,并根据该函数建立目标任务分配模型,运用粒子群算法对多无人机侦察目标进行研究^[26]。龙涛在合同网协议基础上提出一种有限中心的分布式控制系统,用于解决多无人机的任务分配问题^[27]。王庆贺等提出使用改进遗传算法解决多无人机协同过程中目标分配问题,采用特定染色体及染色体并利用环境信息,解决路径约束问题,建立飞行代价模型,该改进算法改善了遗传算法早熟问题,收敛更快^[28]。张浩森等采用蚁群算法,建立目标群简化数学模型,解决了在目标区域被对方探测的时间和最小的问题^[29]。Wei等提出一种任务分配和调度的混合控制框架,并将动态数据驱动系统应用于该框架,很好地解决

机集群的动态任务规划问题^[30]。王国强等提出一种基于VR-Forces的分布式无人机编队协同的任务规划问题,解决了多无人机编队实验成本和风险高的问题^[31]。

1.2.2 无人机集群路径规划研究现状

无人机集群路径规划不仅要保证全局路径最优,完成任务时间最短,还要保证任务中单机能够避障、单机之间避免碰撞。为此,高晓光、宋绍梅等采用分层方式,将无人机集群的系统航路规划问题分为协同管理层、路径规划层和迹控制层,较好地解决航路规划问题^[32,33]。丁琳等基于Voronoi图,引入协同变量及函数,生成与威胁相关的路径,并通过集结点得出状态图,使无人机集群都能到达任务目标,共同完成任务^[34]。柳长安等通过对多无人机协同路径规划的研究,提出采用无人机执行任务的总时间来衡量路径规划的优劣,将执行侦察任务的有效时间转化为侦察飞行距离,以此评价路径规划的优劣^[35]。严平等为解决无人机在未知复杂环境下的多任务航路规划问题,提出多任务航路规划框架,能够实时解决遭遇威胁航路规划问题,以避免碰撞造成无人机损毁^[36]。赵敏等为达到减少无人机集群完成任务总时间和尽量缩短各无人机的航程,最大限度发挥无人机集群效能的目的,提出启发式的任务和路径规划方法,能够提高无人机集群效率并降低无人机集群的动力消耗^[37]。周欢等为解决无人机集群的规避问题,提出规模集群系统控制的缺点,提出基于规则的无人机集群系统飞行与规避自主协同控制方法^[38]。

1.2.3 无人机集群信息通信研究现状

无人机集群能否达到预定的作战效能,关键在于信息的获取与传递,无人机信息通信高效运作是取得战场优势的关键^[39]。杨江华以蚂蚁觅食行为作为理论模型,对蚁群算法进行研究,提出了以信息素视图的无人机协同方法,提高了无人机集群的鲁棒性,降低了无人机集群通信问题对集群系统的干扰^[40]。曹菊红等提出多无人机系统控制方法,并通过专用通信实时共享信息,提高了无人机自主决策攻击能力^[41]。周绍磊等针对多无人机间通信拓扑结构变化的情况,基于一致性方法设计编队控制器,解决了通信拓扑改变下无人机集群轨迹控制与时变编队控制问题。Liu等基于IMT-A信道模型非平稳衰落特性,建立随机宽带动态信道仿真模型,但硬件难以实现^[43]。夏进等提出改进型SOS信道模型,实现平稳和非平稳衰落信道的模拟,保证了通信信号的连续性,切换步骤简单,易于实现^[44]。

1.2.4 无人机集群编队队形研究现状

合理的无人机编队队形既能保证无人机集群在安全条件下快速完成集群任务,又能节省无人机的动力。Zhang等通过对雁群的观察和研究,讨论了无人机编队飞行与雁群飞行间的仿生理论,提出仿雁群飞行方式的多无人机编队控制方法理论,有效增加无人机编队飞行的稳定性,且减少无人机集群能量消耗^[45]。叶圣涛等针对无人机编队中算法复杂、信息交互量大的问题,提出基于智能涌现下的分布式无人机集群编队控制策略,建立无人机的行为模型,使无人机在复杂条件下形成稳定的多机编队,但没有考虑通信延迟、数据丢包和通信噪声的问题^[46]。针对传统无人机集群在侦查中难以自适应调整以匹配不同侦察环境的问题,提出基于区域信息熵的“数字草履虫”物量变化模型,并设计了目标区域—无人机集群持续侦察体系中的规模控制方法,在复杂的任务背景下,提高无人机集群编队的可重构性和柔性^[47]。陈杰敏等基于主从式编队与通信拓扑理论,建立二阶一致性编队控制系统,保证编队的稳定飞行^[48]。

1.2.5 无人机集群控制策略研究现状

无人机集群控制策略是无人机集群的基础,能解决不同类型无人机的集群编队、队形保持与重构等相关问题。李欣等针对控制对象不确定、目标任务复杂多变,提出集群智能控制的概念^[50]。段海滨等从生物群集和群体相似性出发,分析二者自主控制的对应关系,并探讨了无人机集群自主控制的核心问题^[51]。罗德林等为提升无人机集群对抗策略的有效性,提出将多agent系统应用到无人机集群系统中,将单机视为独立的agent,建立独立的单机行为集^[52]。景晓年等为解决无人机集群的运动控制问题,基于无人机的避碰、聚集和速度匹配规则,提出一种基于规则的运动控制方法,并建立集群动力学模型和运动控制模型^[53]。朱创等基于分层控制和封装思想,将无人机控制系统分为执行层和决策层,应用领导—跟随协同编队控制算法,搭建分布式控制的无人机集群编队控制验证系统^[54]。

2 国内外无人机集群技术研究差异

国外对无人机集群技术的研究开始较早,侧重于整体性研究。主要对无人机集群结构框架、控制与优化、任务管理与协同等进行深入研究,且取得一定成效。如美国国防部高级研究计划局主导的自主编队混合控制方法(A),对协同任务分配、协同路径规划、混合主动与自主编队控制、协同跟踪、信息共享等有关无人机集群进行全面的研究。美国广域搜索弹药项目(WASM)^[55]通过建立Multi UAV协同控制仿真平台,采用分层控制与优化^[56],研究了复杂任务背景下如何增强无人机集群协同全域搜索与打击能力。2006年,美国空军技术研究院基

制的同构或异构无人机集群自组织行为,建立自组织框架,使集群无人机通过自然选择和遗传变异实现自身不断优化,产生对环境和作战任务的自适应能力^[57]。

国内由于现有技术限制,无人机集群技术整体研究处于起步阶段,但对多无人机自主协同控制中的信息传输、编队与队形、避障与避碰等技术研究较为深入,理论成果较多,其中采用基于分层递阶法进行协同控制取得的成果最多。如在多机协同方面,基于分层递阶控制思想,研究了多机任务分配、多机航迹规划、多机编队等;在群体智能研究方面,北京航空航天大学段海滨教授长期从事基于仿生智能的无人机自主控制研究,研究著。

3 无人机集群技术发展的关键技术

无人机集群对环境的对抗性和任务的复杂性,决定了其必须具有高度的自主能力和协同能力。无人机集群建模中,忽略了历史因素对个体的影响,将其简化为当前状态的运动决策系统^[58]。应将实际的因素加入群如视觉感知、集群中单机对外部不良因素的快速准确反应以及个体间的交互等,充分考虑各种因素对群体影响。综合分析可以看出无人机集群技术发展的一些关键技术。

3.1 无人机集群态势感知与信息共享

无人机集群的态势感知与信息共享是无人机集群自主控制与决策的基础^[59]。对于无人机集群来说,集群的单机既是通信的网络节点,又是信息感知与处理的节点。不同单机可搭载不同的传感器获取不同范围、不同维度的信息,单机通过相互间的密切协同,可以将不同无人机的信息进行融合、共享,为集群系统决策提供信息支持。无人机集群信息共享利用其集群飞行的通信系统,不仅能够应对强电磁干扰下的通信延迟、丢包等情况,还能实现信息传递给其他个体,从而避免因单机感知能力、信息处理能力的限制导致集群系统功能的低下。

3.2 无人机集群编队与智能决策控制

编队是无人机集群执行任务的形式和基础^[60]。在无人机集群编队的控制中要解决两个关键问题:一是编队生成与保持,不同几何图形的队形生成与变换,编队队形不变情况下的收缩、扩张以及旋转等;二是避障以及避障的动态调整与重构,如遇到障碍时队形的分离与结合,成员增加或减少时的队形调整等^[59]。

无人机集群智能决策控制是实现无人机集群优势的核心^[59]。针对复杂环境,动态任务目标、威胁等变化,需具备实时任务调整和路径规划能力,除态势感知与信息共享外,还需实现无人机集群智能决策控制,以快速变化,提高无人机集群完成任务的效率和鲁棒性。

3.3 无人机集群中有人机与无人机协同技术

受无人机集群技术理论研究与发展限制,短时间内实现无人机的全自主智能控制难度较大。有人机与无人机协同是一个重要集群技术,有人机与无人机集群协同不等同于一般的不同类型的简单协同。人工智能、有人系统与无人系统的深度融合协同将成为未来无人机集群技术发展的重要方向^[59]。集群系统中有人机与无人机的协同实现了无人机进行态势信息感知和有人机进行任务判断决策空间上的分离,可完成高难度、高精度、复杂条件下的任务。

3.4 无人机集群移动Ad Hoc网络技术

Ad Hoc网是一种多跳的、无中心的、自组织无线网络,又称为多跳网(Multi-Hop Network)、自组织网络(Self-Organizing Network)。网络中没有固定的节点,每个节点都是活动的,并且随机地与其他节点保持联系。每一节点能作为一个路由器,能发现、连接、维持其他节点路由的功能。

国外无人机集群Ad Hoc网络研究处于初级阶段,国内的研究较少,目前无人机集群通信网主要是采用基于地面站对无人机实施控制。未来无人机集群网络的基础是移动Ad Hoc网络,能够根据无人机集群的规模快速扩大和缩小,网络结构具有高的灵活性、扩展性和抗毁性。

4 无人机集群技术发展趋势

随着人工智能的发展,特别是智能化无人机技术的发展,无人机集群系统将越来越复杂但也越来越智能。无人机集群已从简单的多机协同发展到成百上千架无人机协同。军事上,无人机集群系统从简单的执行侦察任务发展成复杂情况下的察打一体任务。在集群无人机编队情况看,无人机集群已从简单的长机、僚机的交互协同模型发展到根据任务发展变化自组织编队的自主协同。在人机交互方面,无人机集群正向人机智能交互方向发展。

4.1 人工智能推动仿生智能无人机集群

在国发[2017]35号《新一代人工智能发展规划》中指出开展群体智能基础理论研究, 研究群体智能结构组织方法、群体智能激励机制与涌现机理、群体智能学习理论与方法、群体智能通用计算范式与模型^[61]。2月, 在我国工业和信息化部发布的《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划(2018~2020)》中指出, 人工智能创新产品, 促进人工智能技术的产业化, 将无人机列为八大重点培育产品, 并开展无人机智能飞控系统^[62]。基于人工智能设计无人机集群分布式控制框架, 使得系统中的无人机仅在局部感知能力下, 通过集群技术, 同其他无人机组建自组织智能交互网络, 并在外界环境触发作用下, 实现复杂的行为模式, 具备学习能力, 全面涌现出智能^[63]。

通过对自然界中的蚂蚁、鸟类、狼群等群居性生物研究, 发现其具有高度集中协调一致的特点, 表现出智能。目前对群集生物中的自组织性、自修复等的群体智能研究还在理论研究阶段, 未来将生物的群集智能用于无人机集群控制当中, 将会使集群无人机具备仿生智能。

4.2 有人机与无人机共融集群

由于现阶段无人机的感知系统、运算处理系统、决策系统智能化程度不高, 不能在复杂的环境下自主完成任务。因此, 采用有人机与无人机组成共融无人机集群完成任务, 既能很好发挥有人机运算能力和人的决策处理能力, 又能充分发挥无人机机动性强、隐身性好的优势, 共融无人机集群将成为无人机集群的发展趋势。美国空军发布《小型无人机系统飞行规划2016~2036》^[64], 强调了有人机与无人机的集群共融作战, 并针对“机”集群作战进行了说明, 就是发展有人机与无人机集群编队作战。在《新一代人工智能发展规划》^[61]中也提出“人机协同”, 并把人机共融协同作为发展新一代人工智能关键共性技术体系的重点任务之一。中国工程院提出“下一代机器人将实现人机共融”^[65]。由此可见, 未来无人机集群的发展方向之一将是有人机与无人机的集群。

4.3 5G网联无人机集群

据无人机行业有关预测, 未来5年全球无人机市场的价值空间在705亿美元, 涵盖世界各国和各个运用领域。无人机产业的发展存在空域、数据链等痛点, 无人机飞行的空域可以通过政府出台相关政策予以解决。无数据链痛点同样也是无人机集群发展的壁垒。随着5G技术的发展与成熟, 未来5G网联无人机能够利用5G网络低空立体覆盖、传输速度快, 数据延迟低等优点解决数据链痛点, 能够实时监测任何一架无人机的运行。无人机集群势必使无人机集群的编队与编队重构、任务协同、异构无人机的协同、人机协同等无人机集群发挥到极致。5G网联无人机将助推无人机集群技术的发展。

4.4 基于视觉的无人机集群

自然界中的生物感知外界物体的大小、形状、明暗、颜色、空间位置、距离等重要信息, 80%以上是通过视觉功能获取的。基于深度学习技术的视觉感知在机器人、无人机等智能体上的应用已非常广泛且日趋成熟。特别是基于视觉的导航与避障技术的研究, 实现了无人机在没有GPS或GPS信号弱的情况下实现导航和避障。无人机通过视觉控制技术的成熟, 使无人机集群能够利用立体视觉技术进行信息获取与交互、集群任务协同编队与队形变换, 完成复杂条件下目标识别判断与精准任务成为可能。

5 结论

在遂行任务中, 无人机集群系统本身所具有的“自愈”能力和强鲁棒性能有效解决现有单机系统的不足, 但集群技术的研究还存在以下局限性:

(1) 目前, 无人机集群技术的研究多处于理论和试验阶段, 现行的多无人机编队大部分是基于地面站对集群无人机或对其分组进行的控制, 还未真正实现无人机集群的自主控制。基于深度强化学习技术的无人机集群决策、自主任务协同、编队队形与变换、机间信息交互共享等方面的研究还不够深入。

(2) 研究生物智能群体模型, 往往只考虑群体当前状态进行决策研究, 在建模时进行模型简化, 但是生物具有记忆功能的, 忽略了历史状态的生物群集模型, 映射到无人机集群模型进行分析与仿真、群体智能决策研究, 无人机集群系统模型的部分结果失真。

(3) 无人机集群中多智能体间的信息通信与交互呈现出立体空间、通信主体多变等特性, 目前对无人机集群研究还不够深入。现阶段的通信技术存在数据传输延迟、丢包, 且不能及时进行变主体、多方位通信, 不能

机集群态势感知技术, 难以满足无人机集群通信要求。5G通信技术的发展与应用是提升无人机集群通信与智能化能力的重要途径。

总之, 新一代人工智能技术是实现无人机集群技术自主决策的技术之首, 立足于人工智能, 开发基于群体无人机集群控制系统, 实现无人机集群群体智能的技术集成, 是新一代无人机集群技术研究的主要方向。具备集群智能的无人机集群不仅在国防科技领域大显身手, 在民用如地质勘探、智慧交通、抢险救灾、农林植保、物流等领域将大有可为^[66]。

参考文献

- [1] Duan H B,Zhang X Y.Phase Transition of Vortexlike Self-Propelled Particles Induced by a Hostile Particle [J].Physical Review E,2015,92(1):012701.
- [2] 段海滨,孙昌浩,史玉回.群体智能研究进展[J].中国自动化学会通讯,2013,34(3):65-74.Duan Haibin,Sun Changhao,Shi Yuhui. Advances in Swarm Intelligence Research[J].China Association of Automation News Letters,2013,34(3):65-74.(in Chinese)
- [3] Grassé P P.La Reconstruction du nid et les Coordinations Interindividuelles chez *Bellicositermes Natalensis* et *Termitodes* sp.la Théorie de la Stigmergie:Essai d'Interprétation du Comportement des Termites Constructeurs [J].Insectes Sociaux,1959,6(1):41-80.
- [4] 梁晓龙,张佳强,吕娜.无人机集群[M].西安:西北工业大学出版社,2018.Liang Xiaolong,Zhang Jiaqiang,Lü Na.UAV Swarm Intelligence[M].Xi'an:Northwestern Polytechnical University Press,2018.(in Chinese)
- [5] Banda S,Doyle J,Murray R M.Research Needs in Dynamics and Control for Uninhabited Aerial Vehicles (UAVs) [J].IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A,2010,40(1):1-12. www.cds.caltech.edu/~murray/notes/uav-nov97.pdf.1997-12-15/2009-06-03.
- [6] Hauert S,Leven S,Varga M,et al.Reynolds Flocking in Reality with Fixed-Wing Robots:Communication Range vs. Turning Rate[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems,2011:5015-5020.
- [7] Cook W J,Cunningham W H,Pulleyblank W R,et al.Combinatorial Optimization[M].New York:John Wiley & Sons,1981.
- [8] Boskovic J D,Prasanth R,Mehra R K.A Multi-Layer Control Architecture for Unmanned Aerial Vehicles[C]//Proceedings of the 2002 American Control Conference,2002:1825-1830.
- [9] Boskovic J D,Prasanth R,Mehra R K.A Multi-Layer Autonomous Intelligent Control Architecture for Unmanned Aerial Vehicles[C]//Proceedings of the 2004 American Nuclear Society Conference on Nuclear Science and Engineering,2004:1(12):605-628.
- [10] Tsourdos A,White B,Shanmugavel M.Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles[M].New York:John Wiley & Sons,2011.
- [11] Ollero A,Lacroix S,Merino L,et al.Multiple Eyes in the Skies:Architecture and Perception Issues in the COMET Unmanned Air Vehicles Project[J].IEEE Robotics & Automation Magazine,2005,12(2):46-57.
- [12] Ramirez-Atencia C,R-Moreno M D,Camacho D.Handling Swarm of UAVs Based on Evolutionary Multi-Objective Optimization[J].Progress in Artificial Intelligence,2017 (6):263-274.
- [13] Edison E,Shima T.Integrated Task Assignment and Path Optimization for Cooperating Uninhabited Aerial Vehicles Using Genetic Algorithms[J].Computers & Operations Research,2011,38(1):340-356.
- [14] Rasmussen S J,Shima T.Tree Search Algorithm for Assigning Cooperating UAVs to Multiple Tasks[J].International Journal of Robust and Nonlinear Control,2007,18(2):135-153.
- [15] Caloud P,Choi W Y,Latombe J-C,et al.Indoor Automation with Many Mobile Robots[C]// IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems ,Towards a New Frontier of Applications,1990.
- [16] Parker L E.ALLIANCE:An Architecture of Fault Tolerant Multirobot Cooperation[J].IEEE Transactions on Robotics and Automation,1998,14(2):220-240.
- [17] Längle T,Lueth T C,Rembold U,et al.A Distributed Control Architecture for Autonomous Mobile Robots-Implementation of the Karlsruhe Multi-Agent Robot Architecture(KAMARA)[J].Advanced Robotics,1997,12(4):411-431.
- [18] Ghazal A,Wang C X,Ai B,et al.A Nonstationary Wideband MIMO Channel Model for High-Mobility Intelligent Transportation Systems[J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2015,16 (2):885- 897.
- [19] Milica P,Milan N.Overview of UAV Based Free-Space Optical Communication Systems [J].Springer Nature Switzerland,2019:270-277.
- [20] Duan H B,Yang Q,Deng Y M,et al.Unmanned Aerial Systems Coordinate Target Allocation Based on Wolf Behavior[J].Science China:Information Sciences,2019,62(1):014201.
- [21] 杨庆,段海滨.仿鸿雁编队的无人机集群飞行验证[J].工程科学学报,2019,41(12):1599-1608.Yang Qing,Duan Haibin. Validation of Unmanned Aerial Vehicle Swarm Behavioral Mechanism Underlying the Formation of Anser Cygnoides [J].Chinese Journal of Engineering,2019,41(12):1599-1608.(in Chinese)
- [22] 段海滨,霍梦真,范彦铭.仿鹰群智能的无人机集群协同对抗飞行验证[J].控制理论与应用,2018,35(12):1812- 1819.Duan Haibin,Huo Mengzhen,Fan Yanming.Flight Verification of Multiple UAVs Collaborative Air Combat Imitating the Intelligent Eagle[J].Control Theory and Applications,2018,35(12):1812- 1819.

n Hawks[J].Control Theory and Applications,2018,35(12):1812-1819.(in Chinese)

[23] 国防科大智能科学学院试验无人机集群自主作战[N/OL].解放军报.(2017-12-05) [2019-06-27].http://www.mod.gov.cn/content_4799038.htm.The School of Intelligent Science at the National University of Defense Science and Technology is Experimenting with Autonomous Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Swarm Operations [N/OL].Liberation Army Daily.(2017-12-05) [2019-06-27].http://www.mod.gov.cn/topnews/content_4799038.htm.(in Chinese)

[24] 中国电子科技集团成功完成无人机集群飞行试验[J].机器人技术与应用,2017,1(4):11.China Electronics Technology Journal Successfully Completed the Flight Test of UAV Swarm[J].Robot Technique and Application,2017,1(4):11.(in Chinese)

[25] Hu X X,Ma H W,Ye Q S,et al.Hierarchical Method of Task Assignment for Multiple Cooperating UAV Teams [J].Systems Engineering and Electronics,2015,26(5):1000-1009.

[26] 岳源,屈高敏.分布式多无人机协同侦察目标分配研究[J].兵器装备工程学报,2018,39(3):57-61.Yue Yuan,Qu Gaomin. Research on Distributed Multi UAV Cooperative Reconnaissance Task Allocation[J].Journal of Armament Engineering,2018,39(3):57-61.(in Chinese)

[27] 龙涛.多UCAV协同任务控制中分布式任务[D].长沙:国防科学技术大学,2006.Long Tao.Research on Distributed Task Planning and Coordination for Multiple UCAVs Cooperative Mission Control[D].Changsha:National University of Defense Technology,2006.(in Chinese)

[28] 王庆贺,万刚,柴峥,等.基于改进遗传算法的多机协同多目标分配方法[J].计算机应用研究,2018,35(9):2597-2601.Wang Qinghe,Wan Gang,Chai Zheng,et al.Multiple Targets Assignment of Multiple UAVs' Cooperation Based on Improved Genetic Algorithm[J].Application Research of Computers,2018,35(9):2597-2601.(in Chinese)

[29] 张浩森,高东阳,白羽,等.基于蚁群算法的多无人机协同任务规划研究[J].北京建筑大学学报,2017,33(2):29-34.Zhang Haosen,Dongyang,Bai Yu,et al.Collaborative Tasks Planning Research for Multi-UAV Based on Ant Colony Algorithm[J].Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2017,33(2):29-34.(in Chinese)

[30] Wei Y,Blake M B,Madey G R.An Operation-Time Simulation Framework for UAV Swarm Configuration and Mission Planning[J].Procedia Computer Science,2013,18:1949-1958.

[31] 王国强,罗贺,胡笑旋.无人机编队协同任务规划仿真系统研究[J].系统仿真学报,2014,26(8):1856-1862.Wang Guoqiang,Luo He,Hu Xiaoxuan.Research on UAV Formation Coordinated Task Planning Simulation System [J].Journal of System Simulation,2014,26(8):1856-1862.(in Chinese)

[32] 高晓光,符小卫,宋绍梅.多UCAV航迹规划研究[J].系统工程理论与实践,2004,24(5):140-143.Gao Xiaoguang,Fu Xiaowei,Shaomei.Trajectory Planning for Multiple Uninhabited Combat Air Vehicles[J].Systems Engineering-Theory & Practice,2004,24(5):140-143.(in Chinese)

[33] 宋绍梅,张克,关世义.基于层次分解策略的无人机多机协同航线规划方法研究[J].战术导弹技术,2004(1):44-48.Song Shaomei,Zhang Ke,Guan Shiyi.A Trajectory Planning Method Based on Hierarchy Decomposition Strategy for Coordination of Unmanned Air Vehicles[J].Tactical Missile Technology,2004(1):44-48.(in Chinese)

[34] 丁琳,高晓光,王健,等.针对突发威胁的无人机多机协同路径规划的方法[J].火力与指挥控制,2005,30(7):5-8.Ding Lin,Gao Xiaoguang,Wang Jian,et al.Research on Method of Multiple UAVs Cooperative Path Planning for Pop-Up Threats[J].Fire Control & Command Control,2005,30(7):5-8.(in Chinese)

[35] 柳长安,王和平,李为吉.基于遗传算法的无人机协同侦察航路规划[J].飞机设计,2003(1):47-52.Liu Chang'an,Wang Weiji.Cooperative Reconnaissance Path Planning for UAV Based on GA Algorithms[J].Aircraft Design,2003(1):47-52.(in Chinese)

[36] 严平,丁明跃,周成平,等.飞行器多任务在线实时航迹规划[J].航空学报,2004,25(5):485-489.Yan Ping,Ding Mingyue,Zhou Chengping,et al.On-Line Real-Time Multiple-Mission Route Planning for Air Vehicle[J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2004,25(5):485-489.(in Chinese)

[37] 赵敏,姚敏.无人机群变航迹多任务综合规划方法研究[J].电子科技大学学报,2010,39(4):560-563.Zhao Min,Yao Min. Changeable Path Planning and Multi-Task Assignment Optimization Design for Unmanned Aerial Vehicles Cluster[J].Journal of University of Electronic Science and Technology of China,2010,39(4):560-563.(in Chinese)

[38] 周欢,赵辉,韩统,等.基于规则的无人机集群飞行与规避协同控制[J].系统工程与电子技术,2016,38(6):1374-1382.Zhou Huan,Zhao Hui,Han Tong,et al.Cooperative Flight and Evasion Control of UAV Swarm Based on Rules[J].Systems Engineering and Electronics,2016,38(6):1374-1382.(in Chinese)

[39] 廖方圆,周华吉,李京华,等.无人机群通信网络态势感知研究现状与发展趋势[J].航空兵器,2019,26(4):16-22.Liao Fangyuan,Huaji,Li Jinghua,et al.Research Status and Development Trend of Situational Awareness in UAV Swarm Communication Networks[J].Aero Weaponry,2019,26(4):16-22.(in Chinese)

[40] 杨华江.求解未知环境下多无人机任务自组织的蚁群算法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2007.Yang Huajiang. Research on Ant Colony Algorithm for Self-Organization of UAVs' Mission in Unknown Environment[D].Changsha:National University of Defense Technology,2007.(in Chinese)

[41] 曹菊红,高晓光.多架无人机协同作战智能指挥控制系统[J].火力与指挥控制,2003,28(5):22-24.Cao Juhong,Gao Xiaoguang. Intelligent-Based Design for MULTI-UCAV Intelligent Command and Control Cooperative System[J].Fire Control & Command Control,2003,28(5):22-24.(in Chinese)

- [42] 周绍磊,祁亚辉,张雷,等.切换拓扑下无人机集群系统时变编队控制[J].航空学报,2017,38(4):259-267.Zhou Shaolei,Qi ang Lei,et al.Time-Varying Formation Control of UAV Swarm Systems with Switching Topologies[J].Acta Aeronautica Sinica,2017,38(4):259-267.(in Chinese)
- [43] Liu L,Tao C,Qiu J H,et al.The Dynamic Evolution of Multipath Components in High-Speed Railway in Viaduct S From the Birth-Death Process Point of View[C]//2012 IEEE 23rd International Symposium on Personal,Indoor and N dio Communications,Sydney,2012:1774-1778.
- [44] 夏进,姜子木,王成华,等.基于MATLAB的无人机通信信道模型的设计[J/OL].航空兵器.DOI:10.12132/ISSN.1673-5048.6.Xia Jin,Jiang Zimu,Wang Chenghua,et al.Design of UAV Communication Channel Model Based on MATLAB [J/OL] aponry.DOI:10.12132/ISSN.1673-5048.2018.0066.(in Chinese)
- [45] Zhou Z W,Duan H B,Fan Y M.Unmanned Aerial Vehicle Close Formation Control Based on the Behavior Mecl Wild Geese[J].Scientia Sinica (Technologica),2017,47(3):230-238.
- [46] 叶圣涛,方洋旺,朱圣怡.基于智能突现的无人机群自主编队控制研究[J].火力与指挥控制,2018,43 (12):165-169.Ye Sh ang Yangwang,Zhu Shengyi.Autonomous Formation Control for UAV Swarm Based on Intelligent Emergence[J].Fir & Command Control,2018,43(12):165-169.(in Chinese)
- [47] 井田,王涛,王维平,等.一种持续侦察无人机集群规模自适应调控方法[J].计算机研究与发展,2018,55(6):1254-1262.Jir ang Tao,Wang Weiping,et al.An Adaptive Scale Control Method of Multiple UAVs for Persistent Surveillance[J].Jour mputer Research and Development,2018,55(6):1254-1262.(in Chinese)
- [48] 陈杰敏,吴发林,耿澄浩,等.四旋翼无人机一致性编队飞行控制方法[J].航空兵器,2017(6):25-31.Chen Jiemin,Wu Falin enghao,et al.Consensus-Based Formation Control Approach for Quadrotor UAVs[J].Aero Wea-ponry,2017(6):25-3 ese)
- [49] 韩泉泉.混合编队无人机的协同控制[D].西安:西安电子科技大学,2011.Han Quanquan.Cooperative Control of Hybri on UAV[D].Xi'an:Xidian University,2011.(in Chinese)
- [50] 李欣,李若琼,董海鹰.基于仿生群体协同的集群智能控制研究[J].电气自动化,2006,28(4):3-5.Li Xin,Li Ruoqiong,Dong Study on Collective Intelligence Control Based on Model of Swarm Cooperative[J].Electrical Automation,2006,28(Chinese)
- [51] 段海滨,李沛.基于生物群集行为的无人机集群控制[J].科技导报,2017,35(7):17-25.Duan Haibin,Li Pei.Autonomous C r Unmanned Aerial Vehicle Swarms Based on Biological Collective Behaviors[J].Science & Technology Review,201 7-25.(in Chinese)
- [52] 罗德林,张海洋,谢荣增,等.基于多agent系统的大规模无人机集群对抗[J].控制理论与应用,2015,32 (11):1498-1504.Li hang Haiyang,Xie Rongzeng,et al.Unmanned Aerial Vehicles Swarm Conflict Based on Multi-Agent System[" ^ ntri & Applications,2015,32(11):1498-1504.(in Chinese)
- [53] 景晓年,梁晓龙,孙强,等.基于规则的无人机集群运动控制[J].计算机仿真,2016,33(9):50-54.Jing Xiaonian,Liang Xiac Qiang,et al.Motion Control of UAVs Based on Rules[J].Computer Simulation,2016,33(9):50-54.(in Chinese)
- [54] 朱创创,梁晓龙,张佳强,等.无人机集群编队控制演示验证系统[J].北京航空航天大学学报,2018,44 (8):1739-1747.Zhu huang,Liang Xiaolong,Zhang Jiaqiang,et al.Demonstration and Verification System for UAV Swarm Formation Contr nal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2018,44(8):1739-1747.(in Chinese)
- [55] Schumacher C,Chandler P R,Rasmussen S R.Task Allocation for Wide Area Search Munitions via Network Flo ation[C]//AIAA Guidance,Navigation and Control Conference,Montreal,Canada,2001:4130- 4147.
- [56] Rasmussen S J,Chandler P R.MultiUAV:A Multiple UAV Simu-lation for Investigation of Cooperative Control [C dings of the Winter Simulation Conference,2002:869-877.
- [57] Price I C.Evolving Self-Organized Behavior for Homogeneous and Heterogeneous UAV or UCAV Swarms[D].Ot rce Institute of Technology,2006.
- [58] Biro D,Sasaki T,Portugal S.Bringing a Time-Depth Perspective to Collective Animal Behaviour[J].Trends in Eci volution,2016,31(7):550-562.
- [59] 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 Haibin,Qiu Huaxin.Unmanned hicle Swarm Autonomous Control Based on Swarm Intelligence[M].Beijing:Science Press,2018.(in Chinese)
- [60] Dong X W,Zhou Y,Ren Z,et al.Time-Varying Formation Control for Unmanned Aerial Vehicles with Switching In Topologies[J].Control Engineering Practice,2016,46:26-36.
- [61] 《新一代人工智能发展规划》[Z].国发[2017]35号,2017-07-20.Planning for the Development of a New Generatio cial Intelligence[Z].No.[2017] 35,2017-07-20.(in Chinese)
- [62] 《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划(2018-2020)》[Z].工信部科[2017]315号,2017-12-14.A Three-Year / n to Promote the Development of a New Generation of Artificial Intelligence Industry(2018-2020)[Z].No.[2017]315, 14.(in Chinese)
- [63] 樊邦奎,张瑞雨.无人机系统与人工智能[J].武汉大学学报:信息科学版,2017,42(11):1523-1529.Fan Bangkui,Zhang R anned Aircraft System and Artificial Intelligence[J].Geomaticsand Information Science of Wuhan University,2017,43 3-1529.(in Chinese)

[64] Robert O.Small Unmanned Aircraft Systems (SUAS) Flight Plan:2016-2036[R].United States Air Force,2016.

[65] 段海滨,邱华鑫,陈琳,等.无人机自主集群技术研究展望[J].科技导报,2018,36(21):90-98.Duan Haibin,Qiu Huaxin,Chen Lin,et al.Prospects on Unmanned Aerial Vehicle Autonomous Swarm Technology[J].Science & Technology Review,2018,36(21):90-98.(in Chinese)

[66] 吕强,马建业,王国胜,等.基于视觉伺服的小型四旋翼无人机自主飞行控制研究进展[J].科技导报,2016,34(24):68-73.Lü Qiang, Ma Jianye, Wang Guosheng, et al. A Review of Achievement in Small Quadrotor Autonomous Flight Control Based on Visual Servoing[J].Science & Technology Review,2016,34(24):68-73.(in Chinese)

[关于我们](#) [CNKI荣誉](#) [版权公告](#) [客服中心](#) [在线咨询](#) [用户建议](#) [知网推广](#)

读者服务

[购买知网卡](#)
[充值中心](#)
[我的CNKI](#)
[帮助中心](#)

CNKI常用软件下载

[CAJViewer浏览器](#)
[知网研学 \(原E-Study\)](#)
[工具书桌面检索软件](#)

特色服务

[手机知网](#)
[杂志订阅](#)
[数字出版物订阅](#)

客服咨询

订卡热线: 400-819-9993
服务热线: 400-810-9888
在线咨询: [help.cnki.net](#)
邮件咨询: [help@cnki.net](#)
客服微博: [@cnkiweibo](#)

京ICP证040431号 网络出版服务许可证 (总网出证)
京公网安备11010802020460号
© 1998-2019中国知网(CNKI)
《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司
KDN平台基础技术由KBASE 11.0提供
您当前IP: 121.249.15.21