



专题：无人机空地无线通信技术

面向群体快速融合的仿生无人机集群架构

曾子鸣¹, 董超¹, 朱小军², 贾子晔¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 211106;
2. 南京航空航天大学计算机科学与技术学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 无人机集群作战是未来战场的重要组成部分。集群内的无人机通过协作, 进行载荷的互补与任务协调, 以提升系统整体性能。自然界中如蚂蚁、狼、鸽子、鱼等群体, 其个体与单架无人机行为类似, 而蚁群、狼群、鸽群又能依靠个体间的规则, 通过协调与组织实现更为复杂的行为。不同生物集群展现的能力不同, 在战场上能承担的任务也各不相同。从生物集群的群体特征出发, 考虑生物间的拓扑和交流机制, 提出了一种仿生无人机集群的融合架构。不同种类的仿生无人机集群自由地融合, 增强了无人机集群的异构性, 提高仿生无人机集群架构的协调能力。

关键词: 仿生无人机集群; 无人机集群架构; 无人机队形重构

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022240

Bionic UAV architecture for fast swarm fusion

ZENG Ziming¹, DONG Chao¹, ZHU Xiaojun², JIA Ziye¹

1. School of Electronic Information Engineering, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China
2. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of
Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: UAV swarm operation is an important part of the future battlefield. UAVs in the cluster cooperate to complement each other and coordinate tasks to improve the overall performance of the system. In animal groups such as ants, wolves, pigeons, fish, etc., their individuals behave similarly to a single drone, while ant colonies, wolves, and pigeon colonies can rely on the rules between individuals to achieve more complex behaviors through group coordination and organization. Different creatures exhibit different abilities and can undertake different tasks on the battlefield. Considering the topology and communication mechanism between creatures, a fusion architecture of bionic drone swarms was proposed which aims to enable different types of bionic UAV swarms to be freely integrated and improve the coordination level of the whole UAV swarm architecture.

Key words: bionic UAV, UAV swarm architecture, UAV formation reconfiguration

收稿日期: 2022-06-07; 修回日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61931011, No.61972199); 江苏省自然科学基金资助项目 (No. BK20220883); 中央高校基本科研业务费 (No.NS2022045)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61931011, No.61972199), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No. BK20220883), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No.NS2022045)



0 引言

无人机因其在移动性、成本与环境适应性上的优势,成了目前战场上不可或缺的作战部分。目前的单架察打一体无人机适合低强度的冲突作战,在猛烈的电子干扰环境中难以发挥既定作用。在抗打击上,多架无人机组成的无人机集群有潜力成为战场中执行任务的主流选择。无人机集群通过群内协作,构成察、打、扰一体化的多功能无人机集群。在这种分布作战中,携带不同载荷的无人机通过协作,进行载荷互补和任务协调,可实现整个系统的提升,应对敌方的防空体系,完成武装侦察、目标侦测、阵地防护、精确打击、特殊任务执行等工作任务^[1]。无人机集群不是多架单一无人机的简单组合,飞行器操控也不是传统的一人操纵一机的模式。面对错综复杂的空域形势和强干扰的任务环境,无人机集群需要有自主调整集群状态的能力。无人机集群与较弱耦合的单架无人机相比,有更强的环境适应性、更稳定的系统鲁棒性和更高效的任务处理能力。

最初无人机集群的概念衍生自生物集群。对于生物集群的研究最初来源于1952年的法国生物学家 Pierre Paul Grasse^[2],研究发现昆虫之间能够在高度结构化的框架下通过分工、控制等级和任务协调,完成远超个体智能化程度的复杂任务。类似蜂群、鸽群、鱼群等生物群体都存在类似的群集行为^[3]。蜂群中的蜂王、工蜂、雄蜂具有不同的形态和职能,它们分工合作从而维系集群的生存和繁衍;蚁群通过“信息素浓度”当作指示从而找出到达食物的最短路径;鱼群通过观察身边鱼的游动以调整自身的姿态,使整个鱼群宏观上可以高速地集体游动;雁群在季节性迁移的过程中,总会排成固定的队形,每组雁的数量也在一定的范围内。诸如上述,群集内个体简单的行为结合会导致更为复杂的行为。看似无序的个体在组织规则的约束下,在集群层面上宏观地体现

出了高度组织性。在战场中,无人机的任务种类可以分为侦察、作战、通信、靶机等。不同的生物集群行为在战场环境中可以能够匹配对应的无人机的任务,侦察、攻击等行为可以采用与之相对应的集群模式^[4-5]。本文提出了一种基于生物集群的融合机制。不同的生物集群间因为生物特性,存在不同的交流机制。对应到无人机中,这可以是无人机的路由协议、编队模型等。无人机小队如果受到敌方的干扰或摧毁,所剩无人机数量无法完成目标任务。生物集群融合机制可以支持受到摧毁的无人机集群进行重组、规划,以保证在受到敌方干扰的情况下,除了依靠无人机本身的抗干扰能力,无人机集群能迅速组织无人机的有生力量,完成既定目标。对于大规模集群而言,这种基于任务的集群重组机制能够缩短受打击无人机集群重新集合编队的时间,提高了集群整体的任务效率。同时,本文提出了一种集群重构过程。当集群出现因成员减少而无法完成目标任务时,剩余的成员可以通过重构加入其他的集群。受损的无人机群不用重新飞回地面站进行集结,从而提高了无人机集群完成任务的效率。

1 生物无人机集群融合挑战

仿生无人机集群的最大特点是异构性。在一个整体的作战框架下能够同时存在多类不同的无人机集群类型,它们各具作战特色,负担着各自任务所需要的载荷。这一点从对应的生物集群可以看出。不同的生物集群能通过协作完成集群目标,且集群个体体现出的群体智能各有特色^[6]。这些生物群体间交流方式,是由生物个体与群体自身所生活的环境与生物自身所具有的能力所决定的。对于狼群来说,捕猎的目标和群体出动的狼群数量会因为季节而产生变化。狼群个体因其高效的信息交流能力,在捕猎过程中频繁地与伙伴交互,利用角色间调度共同协调狩猎行动。这种能力是诸如蚁群、鱼群等群体所不具有的。但

蚁群、鸽群也有各自完成集群捕食、迁移等行为所需要的交流方法。将这类差异现象类比到无人机集群上,在同一个架构上要容纳不同的仿生集群,必须考虑不同无人机集群间的交流方式差异性,例如集群间的拓扑方式和通信方式。下面将从生物集群特性出发,分析无人机集群与生物集群的映射关系^[7]。

生物集群行为是一种普遍存在的自然现象:鸟类以某一种队形进行飞翔,蜜蜂自组织地寻找蜜源,狼群的捕食合作等。生物群体通过个体层面上简单的信息交互与决策,在整个系统层面宏观地涌现高度的自组织性、一致性、鲁棒性。群体智能概念来自对这类生物群体表现的统一、复杂行为的观察。本文将介绍 4 种典型的生物群集行为,分别为鸽群、蚁群、狼群以及鱼群,并总结这 4 种集群的群体生活习惯以及群体内的交流机制^[8]。

1.1 鸽群

鸽群中的个体,遵循了一种拓扑距离交互的方式,每只鸽子仅与自身周围一定数量的个体进行沟通。鸽群中除了领头鸽外,其余的跟随者也存在层级网络关系^[9-12]。鸽子可以影响同层的邻近鸽子或者更下层的鸽子,但无法对上层鸽子造成影响。在鸽群飞行时,这类的层级网络结构的群体在飞行时应对障碍的处理更加迅速。飞行过程中,个体的飞行参数也会与周围邻居的鸽子尽可能保持一致。

1.2 蚁群

蚁群是一种高度结构化的社会组织,蚂蚁迁移以及觅食都是典型的群集行为。一般的蚁群由蚁后、雄蚁、工蚁和兵蚁组成,各类蚁种都有其严谨的分工。蚂蚁群体尽管庞大,但其运作目标十分简单,即收集食物与筑巢。蚂蚁在活动过程中会释放信息素^[13-14],并确定个体前进方向,而收集食物的蚁群都可以通过触角感受这类信息,从而更多的蚂蚁会选择留有信息素的路径,形成正向反馈。在通信方式上,蚁群通信是一种一对

多的手段,通过类似于广播并转发的方式,发送信息素。收到信息素的蚂蚁同样会确定食物的方向,并且释放信息素。蚁群能通过这种简单大量的信息交流,达到找出食物源和筑巢的任务目标。

1.3 狼群

狼群是一类团结的集群,它们有着一套十分森严的等级制度。狼群生活范围广,能适应不同的地理环境,这与它们的生活习惯有很强的关系。一般来说,狼有 3 种模式,分别为独居、成对活动以及群居^[3]。当环境条件好、食物充足时,小型的动物数量多,森林生态系统下的狼一般是独自行动或是两只配对个体一起行动,这样已经足够它们收获满足生存的食物数量。而当季节寒冷时,狼群一般以牦牛、鹿等大型蹄类动物为食,这时往往需要团队配合,此时的狼以群居的模式生存。在狼群的集体围捕过程中,也体现了集群智能。在围捕过程中,狼群依靠高效的组织分工,利用角色间调度和默契配合完成了协调的狩猎行动^[15]。狼的个体可以认为是高度智能化的无人机。狼与同伴频繁地交互进行合作狩猎,综合考虑了猎物的移动、特征、状态等要素采取相应的联合围捕策略。

1.4 鱼群

海洋中的鱼群是一类密度相当高的群体。可以看到上千条的鱼个体集结前进,这种集群行为可以有效地保护体型较小的鱼类不受外敌的侵袭。鱼群大部分时间都会随着洋流和食物的位置,纷乱而有序地运动。当鱼群遭遇捕食者攻击时,鱼群会迅速散开。远离捕食者后又会迅速集结。鱼类的大脑没有狼群这类哺乳动物发达,它们依靠一些简单的机制进行应答而形成了整群鱼特定的自组织方式^[16-18]。

- 侧线反馈机制:鱼的身体两侧都有一条颜色特殊的侧线,每条鱼以周围 1、2 条同伴的侧线为观察标志,调节自己的游向和速度,以维持适当的距离。



- 聚群行为：鱼类会趋向与周围的个体聚集成紧凑的集体，无论数量多少。这样能使弱小的鱼类个体成团进行觅食或躲避捕食者。
- 追尾行为：当群体中的某一条鱼发现食物后，团队中的其余鱼会跟随该个体的尾部进行游动。

1.5 集群运作特点引起的挑战

不同集群的结构特征以及集群行为赖以产生的个体交流机制与无人机集群都能相对应。生物集群与无人机集群运作逻辑对比见表1，具有以下特点：组织结构的分布式、行为主体的简单性、作用模式的灵活性、系统整体的智能性^[7]。生物集群体现的分工合作、适应不同环境、集群整体保持稳定等特点与无人机集群作战时的运作特点相符合^[19-22]。

不同的生物集群因为集群生活环境和个体生理结构原因，有不同的交流机制，在映射到无人机集群时，不同的生物集群模式可以用于相应的任务环境。无人机战场的环境是异构的，存在多种类型的无人机群。但不同类型的无人机群间合作较少，若是A类机群因成员损毁无法完成任务，地面站只能重新派遣A类机群继续完成任务，而无法当即指派B类机群继续完成。这是因为不同机群负担着各自的特殊载荷，B类机群若不含此类载荷便无法完成任务。但也有一种情况，A类机群的载荷无人机仍然存活，但机群成员减少过多导致无法完成任务。此时A类机群如果可以加入其他机群，则能继续完成之前的任务。本文

考虑了一种将A类机群和B类机群融合变换的架构，以此处理不同仿生集群无人机运作交流方式不同的问题。每种集群都有各自的拓扑方式。例如鸽群遵循层级网络的飞行方式、狼群的集群呈三角形，使狼群成员少、分布广，蚁群呈直线型排列方式。而依托在不同的队形拓扑上，集群的成员遵循不同的通信方式。在各自的规则中，无人机位置的重要性不同。鸽群队形时，领航者位于层级网络顶部的头鸽。若将鸽群的层级队列分解为狼群的多个三角形队列，该过程需要经过领导者选举，确定鸽群中谁来承担多个狼群的领导者。进一步进行计算编队变换的位置，从鸽群散开成狼群。

总的来说，不同的仿生集群根据其集群特色可以在战场上承担相应类型的任务。但也正是如此，若要将异构的仿生集群集成到同一个架构中，也必须考虑这些集群之间的差异^[23]，从而进行转换。

1.6 集群通信拓扑与队形拓扑

无人机集群的运作过程中，其拓扑结构可以分为两类。第一类是队形拓扑，即集群内无人机实际的分布位置。集群的编队控制是实现无人机集群自主飞行的关键问题。在编队控制问题中，两架或两架以上的无人机在特定的规则秩序进行协同飞行，使所有无人机按照预定的队形沿航线飞行，无人机之间的位置关系保持相对固定。目前，无人机保持队形拓扑的主要方法有跟随一领航法、虚拟结构法、基于行为法、人工势场法、

表1 生物集群与无人机集群运作逻辑对比

特点	生物集群	集群实例	无人机集群
组织结构的分布式	不存在中心节点，各自与邻近个体通信	狼群围猎时，常采取包抄战术	去中心化程度高，呈现分布式架构
行为主体的简单性	动物个体遵循非常简单的行为规则与通信规则	鱼群的个体通过侧线反馈机制，能有效躲避捕食者	单个无人机成本低，功能较少，可承担的任务单一
作用模式的灵活性	对环境的变化具有适应性	面对不同的风速时，鸽子会采取不同的队形前进	需要面对位置的战场环境以及多变的任务需求
系统整体的智能性	组成的集群效率更高，涌现基于群体的智能行为	蚁群通过信息素交流，共同完成迁移、进食等行为	无人机集群通过协同作战，达到更高的作战效率

基于图论的方法等^[7]。此外,一致性理论也被应用在无人机编队的问题中。第二类是通信拓扑,通信拓扑被用于描述集群内无人机个体的信息传输。通信拓扑由通信网络图和通信权重系数组成。通信网络图指示了多智能体系统中个体的链路存在情况。通信权重系数描述了该条通信链路的重要程度。目前被用于无人机网络的通信网络拓扑有星状、网状、混合状、簇树状拓扑结构^[31]。此外,也有更复杂的随机网络模型在被运用于无人机集群网络中。例如,随机网络模型、小世界网络模型、无标度网络模型和分层网络模型。在不同的通信拓扑结构中,节点间的数据传输与信息融合的方式不同,使网络的一些性能(如功耗、通信距离、鲁棒性)会有所差异。

与所描述的生物群体类似,不同的通信拓扑在同一场景的表现性能会有差异。对于鸽群而言,小世界网络模型具有更高密度的拓扑以及更弱影响力的领导者(基于领导者-跟随者模型)^[32]。分层网络模型产生的虚拟领导者距离更远。当通信场景从生物群体转换到无人机集群时,队形拓扑和通信拓扑可以不一定是强绑定的。对于某一类队形而言,集群可以根据环境或者任务需求更换通信拓扑。或是在某一固定的通信拓扑下,进行编队队形的变换。无人机集群的通信拓扑与队形拓扑的组合变换提高了在动态环境给无人机集群的任务能力,增强了面临不确定场景的鲁棒性。

2 仿生集群融合架构

考虑生物集群与无人机集群的相似性,本文以 3 类生物集群的交流机制为基础,定义了一种面向任务的无人机战场网络架构。首先,定义战场无人机的 3 类具体任务为:对目标的导航、对敌方的协同攻击以及对战场信息的侦察。根据这 3 类任务,提出了一种仿生集群的融合架构:集群内的无人机若遭遇电子干扰出现了成员损失后,可以进行重新融合编队,以继续完成目

标任务。

2.1 基于生物行为的无人机集群

2.1.1 基于狼群行为的无人机集群

基于狼群行为的无人机集群的特点为组织分工多、交互频繁、交互信息复杂。这要求无人机集群形成的簇群多、簇的成员少。在狼群无人机进行围猎的过程中,簇之间有负责交互的无人机,簇之间的交互内容相对簇群内可以相对简单。在簇之间,可以针对打击目标的位置信息进行交互,形成簇间的围猎。簇内可以对目标猎物的运动状态,环境信息进行交互。最后,由单个簇或者多个簇的多架无人机进行协同攻击。

2.1.2 基于鸽群行为的无人机集群

基于鸽群行为的无人机集群特点在于其层级网络架构。层级网络架构的通信压力更小,应对变化的能力更迅速。适合主要应用于目标导航的任务,在导航过程中,层级交互模式的信息传递比平等交互模式更快,且信息流按照高个体流向低个体,信息传递是单向的。这样的交互模式可以补偿单个个体导航的误差,使整个鸽群无人机能更稳定地以鸽群姿态进行编队飞行^[24-27]。

2.1.3 基于蚁群行为的无人机集群

基于蚁群行为的无人机集群特点在于蚂蚁信息素的传播是一种广播模式。当蚂蚁释放信息素后,其寻找食物的整个蚁群可以根据道路上信息素浓度进行判断。蚁群的优势在于传播的信息足够简单,对于任务决策要求较少,较适用于信息侦察等任务。派出的蚁群无人机对周围环境的信息(如频谱环境、战场地理环境)进行收集,同时遇到战略目标可以与释放信息素一样对集群中的其他个体进行广播,从而完成侦察监督搜寻目标的任务。

2.2 仿生集群融合架构

本文提出了一种仿生无人机集群架构。生物集群具有各自的通信方式和组网模型。狼群模型可以被认为是一种通信能力强的无人机个体。



相比鸽群或蚁群这种与邻居交流的群体，狼群的通信量更大。无论从拓扑上还是通信方式上，不同的生物集群都应在无人机的编队和通信协议上有相应的映射。本文从编队出发，提出了一种群体融合的模式。该模型在以下情况中能发挥作用：离开编队的无人机，可以立即与其他集群形成编队；整个无人机集群受到攻击，剩下的成员无法完成任务，此时可以与其他集群融合；两个各自持有特色载荷的无人机编队，通过融合组成能力更强的编队，完成复杂性更高的任务。

仿生无人机集群编队重构的目标是对两类拓扑结构的无人机集群进行重新配置^[28-30]。失去任务完成能力的无人机被认定为待征召节点。正在执行任务的集群如果搜寻到了待征召节点，则启动重构程序。主无人机重新计算加入待征召节点后的新无人机队形。编队的重构分为 3 个阶段：重构请求；编队分析；编队机动操作。当编队完成以上 3 个阶段后，整个集群以新的编队队形继续前进。

（1）阶段一，重构请求

重构请求阶段是整个重构的起始阶段。重构请求一般由数量少的无人机发出。当无人机集群部分成员受损，导致整个集群无法完成任务时，集群内的剩余无人机便开始向外发送重构请求。请求剩余的无人机接入新的集群编队。待接入的无人机发出请求后，由集群的领航者进行分析，决定是否要接收。集群确认接收新无人机后，发出确认回复，双方进入编队阶段。

（2）阶段二，编队分析

在双方确认开始重构后，集群进行位置分析阶段。在该阶段，由鸽群层级网络的中间层作为中心节点负责信息传递，从而最大限度地减少由位置信息通信造成的通信损耗。领航无人机收到来自待征召节点的确认指令后，根据新的无人机

数量生成新的编队队形，并由中心节点发布位置信息。生成新的编队队形后，头鸽直接飞到新队形的对应领航位置。对于鸽群队形的每一个层级，分别对层级中的每个位置计算其到无人机的距离，并进行排序。这样能保证每个位置是由最近的无人机占据的，减小了无人机到达最新编队位置的总距离。同时距离排序只在层级内进行，降低了整体的运算复杂度。另外，为了防止冗余计算，位置排序时，只计算当前层级的无人机与待加入无人机的距离。例如，新编队队形中第二层级鸽群的无人机位置，将仅允许原始队列中第二层级的无人机和待加入无人机参加位置排序。如果原第二层级无人机在新编队第二层级的选拔排序中落选，将参与第三层级的排序。这样能保证待加入的无人机可以以最小的距离加入新无人机编队。

整个过程基本包括以下 4 个步骤。

步骤 1，中间层鸽群发布位置信息。

步骤 2，对于每个鸽群层级，确定其候补无人机的名额。

步骤 3，计算层级中每个位置到候选无人机的距离并排序。

步骤 4，将飞行编队中的每个位置分配给距离最近的无人机。

（3）阶段三，编队机动操作

机动性步骤分为 3 种状态。首先，无人机鸽群将根据层级顺序依次进行高度移动（沿 Z 方向移动），然后朝目标位置移动（沿 X、Y 方向移动），到达目标位置后在原地待命。在每种状态下，中间层无人机将向其余无人机发送消息。当其余无人机收到消息时，它将执行移动并在移动完成后回复确认。鸽群的每一层完成移动时，层级的最边侧会向中心层无人机发送消息，以标定该层级鸽群完成编队。中心层无人机接收层级确认信息，将进行下一层级的编队机动。当所有从属无人机都发送过确认信息（并且中间层无人机也已到达其位置）时，中

间层无人机将确认完成编队变换过程。在发送确认信息的过程中,会出现无人机发送消息给相异层级的无人机通信能耗小于发送给相邻层级的无人机的情况。但在仿生无人机集群的架构模型中,无人机按照集群间的结构规则接受管理。即对于鸽群而言,鸽群无人机按照层级网络排列,在重构时按照层级顺序进行重组,每层设置相应的无人机作为管理者。按照层级顺序有序地进行重新编队。无人机编队变换过程如图 1 所示。

3 实验仿真

本文的实验在 MATLAB 2017 上进行,用于测试编队融合的有效性以及各类参数。鸽群编队重构示意图如图 2 所示,初始鸽群无人机集群设置了 3 层网络,共 6 架无人机。其中,包含一架领航无人机与 5 架僚机。5 架僚机分为两个等级:2 号与 3 号为一级僚机,属于第二层级;4 号、5 号和 6 号属于第三层级。新生成的编队信息由第二层级

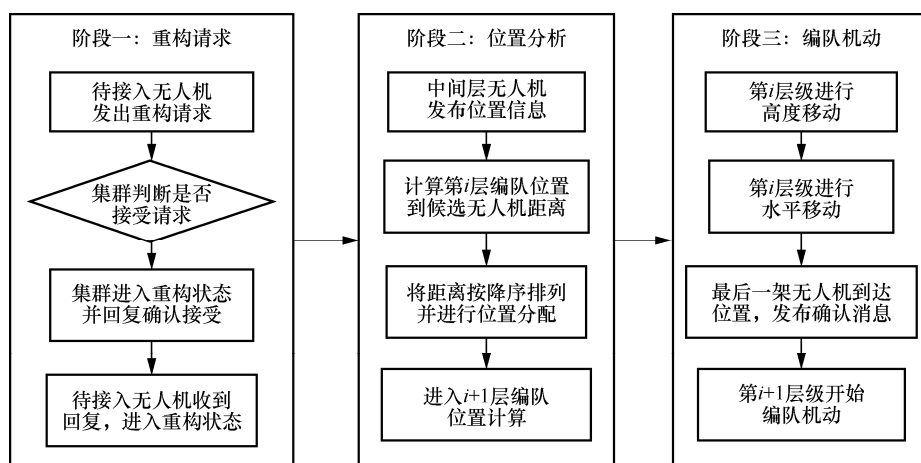


图 1 无人机编队变换过程

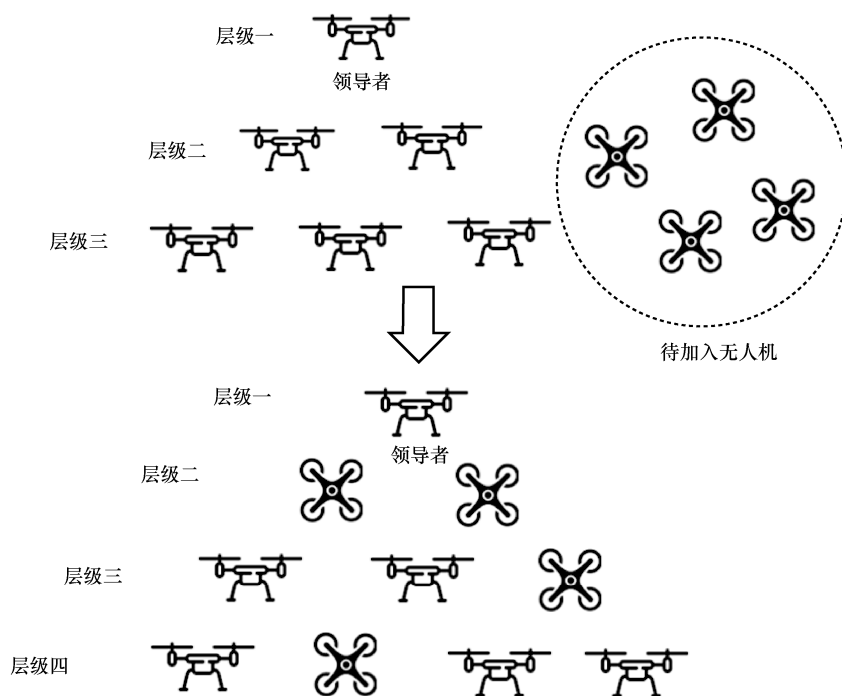


图 2 鸽群编队重构示意图



的 2 号无人机发布。待接入节点设置为 a、b、c、d 4 个, 新生成编队队形为四层网络, 第四层级包含 4 架无人机。

初始鸽群无人机 1~6 号与待加入节点 a~d 的位置信息见表 2。初始鸽群与待加入无人机的层级关系见表 3。

表 2 无人机初始位置信息

无人机编号	x/m	y/m	h/m
1	6	6	6
2	5	6	5
3	6	5	5
4	4	6	4
5	5	5	4
6	6	4	4
a	6	6	5
b	6	5	6
c	5	5	6
d	4	5	6

表 3 无人机层级示意图

无人机类型	鸽群层级	无人机编号
领航者无人机	一	1
跟随者无人机	二	2、3
	三	4、5、6
待接收无人机	无	a、b、c、d

仿真共分为两个阶段: 第 1 阶段, 无人机群根据新加入的节点进行位置分配。每个无人机被分到新的位置信息。第 2 阶段, 无人机群按照层级顺序进行编队机动。每一层级的无人机先在 Z 轴方向移动, 再从 X、Y 平面移动到目标位置。经过位置分析后, 新鸽群编队无人机位置信息见表 4, 新编队形成的层级关系见表 5。

鸽群编队重构位置变化如图 3 所示, 无人机群重构位置变化如图 4 所示, 在仿真过程中, 无人机群的层级关系发生了变化。原属于第二层级的 2 号、3 号无人机变为了第三层级。第二层级的无人机变为新加入的 a、b 节点。同样, 原属于第三层级的无人机均变为第四层级。

表 4 新鸽群编队无人机位置信息

无人机编号	x/m	y/m	h/m
1	10	10	10
2	8	10	8
3	9	9	8
4	7	10	7
5	10	7	7
6	9	8	7
a	9	10	9
b	10	9	9
c	10	8	8
d	8	9	7

表 5 新鸽群编队无人机层级示意图

无人机类型	鸽群层级	无人机编号
领航者无人机	一	1
跟随者无人机	二	a、b
	三	2、3、c
	四	4、d、6、5

4 结束语

多无人机自主集群飞行是使无人机集群完成更复杂任务的关键技术之一。无人机集群使无人机能通过并行工作加强无人机的任务完成能力。在此基础上, 加强无人机间的协调能力尤为重要。仿生无人机集群是无人机间协调技术研究的一个重要的方向。仿生集群将无人机集群的视角聚焦生物集群本身, 通过模仿生物集群间个体的特殊交流机制以达到更好的集群间协调效果。在此情况下, 提出了一种融合多种仿生无人机集群的架构。在考虑重构问题时, 以生物群体的内部网络关系为优先。例如鸽群重构时, 强调了以层级网络的次序进行位置分配。在下一步工作中, 将考虑不同仿生集群的通信拓扑与队形拓扑的关联。在面对各类任务环境时, 在同一队型拓扑上不同的通信拓扑结构会有不同的效果。因此, 不同仿生网络群体间的拓扑变化以及通信层面上的差异将被重点考虑, 以达到更好的集群协调效果。

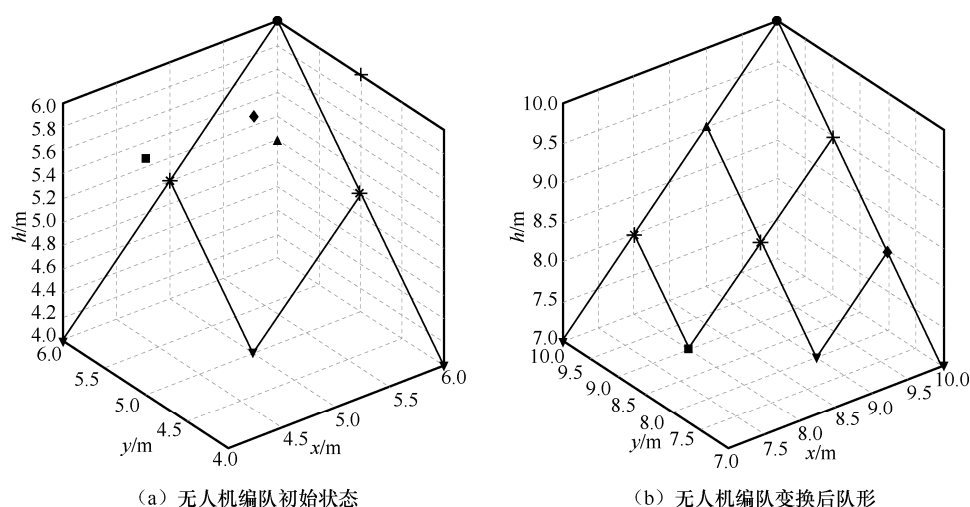


图3 鸽群编队重构位置变化

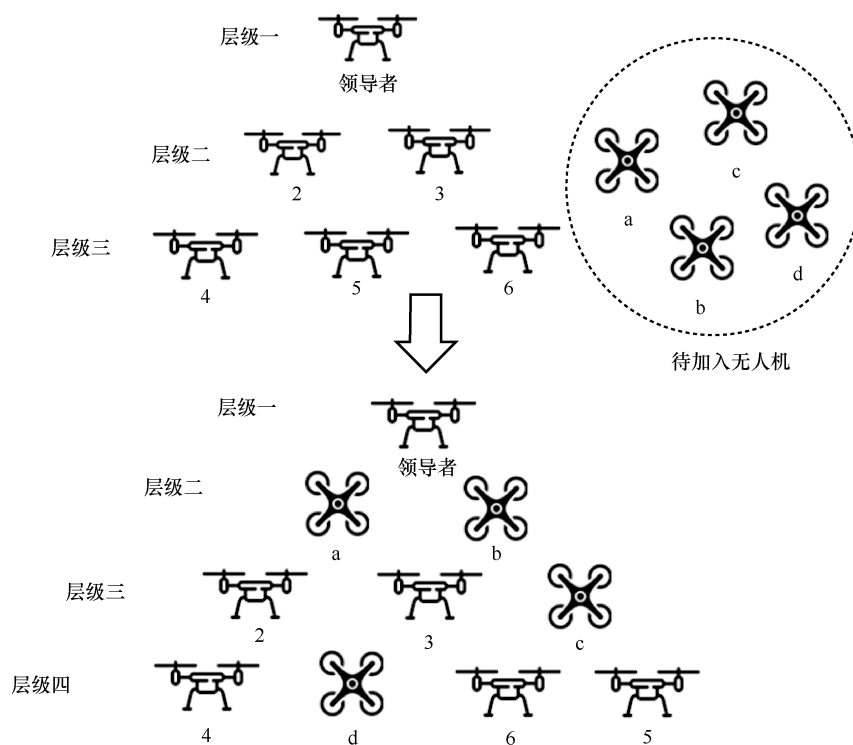


图4 无人机群重构位置变化

参考文献:

- [1] 邹立岩, 张明智, 柏俊汝, 等. 无人机集群作战建模与仿真研究综述[J]. 战术导弹技术, 2021(3): 98-108.
- ZOU L Y, ZHANG M Z, BAI J R, et al. A survey of modeling and simulation of UAS swarm operation[J]. Tactical Missile Technology, 2021(3): 98-108.
- [2] THERAULAZ G, BONABEAU E. A brief history of stigmergy[J]. Artificial Life, 1999, 5(2): 97-116.
- [3] 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 H B, LI P. Autonomous control for unmanned aerial vehicle swarms based on biological collective behaviors[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(7): 17-25.
- [4] 孙佳琛, 王金龙, 陈瑾, 等. 群体智能协同通信: 愿景、模型和关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(3): 307-317.
- SUN J C, WANG J L, CHEN J, et al. Cooperative communication



- based on swarm intelligence: vision, model, and key technology[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(3): 307-317.
- [5] TAHIR A, BÖLING J, HAGHBAYAN M H, et al. Swarms of unmanned aerial vehicles—A survey[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2019, 16: 100106.
- [6] 吴新峰, 顾鑫, 陆婷婷, 等. 一种基于马赛克战理念的协同作战系统设计: 方案设想及关键技术探索[J]. *指挥与控制学报*, 2020, 6(3): 278-283.
- WU X F, GU X, LU T T, et al. Design of cooperative operation system based on mosaic warfare concept: scheme assumption and key technology exploration[J]. *Journal of Command and Control*, 2020, 6(3): 278-283.
- [7] 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 intelligence[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [8] 尚玉昌. 动物行为学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- SHANG Y C. *Ethology*[M]. Beijing: Peking University Press, 2005.
- [9] 邱华鑫, 段海滨, 范彦铭. 基于鸽群行为机制的多无人机自主编队[J]. *控制理论与应用*, 2015, 32(10): 1298-1304.
- QIU H X, DUAN H B, FAN Y M. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks[J]. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(10): 1298-1304.
- [10] 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 Q, DUAN H B. Verification of unmanned aerial vehicle swarm behavioral mechanism underlying the formation of *Anser cygnoides*[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(12): 1599-1608.
- [11] 邱华鑫, 段海滨, 范彦铭, 等. 鸽群交互模式切换模型及其同步性分析[J]. *智能系统学报*, 2020, 15(2): 334-343.
- QIU H X, DUAN H B, FAN Y M, et al. Pigeon flock interaction pattern switching model and its synchronization analysis[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2020, 15(2): 334-343.
- [12] 范林飞. 基于鸽群算法的多无人机协同编队[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- FAN L F. Cooperative formation of multi-UAVs based on pigeon algorithm[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [13] 郑超学. 基于红外信息素通信的仿生蚁群觅食路径规划研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.
- ZHENG C X. Research on foraging path planning of bionic ant colony based on infrared pheromone communication[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.
- [14] DORIGO M, STÜTZLE T. The ant colony optimization metaheuristic: algorithms, applications, and advances handbook of metaheuristics[M]. 2003.
- [15] ZHAO D S, LI X X, YANG J. An improved wolf pack algorithm for sustainable machining parameter optimization[C]//*Proceedings of 2018 IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 34-38.
- [16] 李晓磊. 一种新型的智能优化方法—人工鱼群算法[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- LI X L. A new intelligent optimization method-artificial fish school algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [17] SUN W F, TANG M, ZHANG L J, et al. A survey of using swarm intelligence algorithms in IoT[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(5): 1420.
- [18] NAYYAR A, LE D N, NHU N G. The handbook titled “advances in swarm intelligence for optimizing problems in computer science”[M]. S.I.: Taylor & Francis Group, 2018.
- [19] ARNOLD R, CAREY K, ABRUZZO B, et al. What is A robot swarm: a definition for swarming robotics[C]//*Proceedings of 2019 IEEE 10th Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 74-81.
- [20] ZHOU Y K, RAO B, WANG W. UAV swarm intelligence: recent advances and future trends[J]. *IEEE Access*, 2019(8): 183856-183878.
- [21] 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.
- [22] HASSANIEN A, EMARY E. *Swarm Intelligence*[M]. S.I.: CRC Press, 2015.
- [23] 王钦禾, 尹永鑫, 杨宁. 多无人机编队飞行控制关键技术[C]//*北京力学学会第二十七届学术年会论文集*. [出版地: 出版者不详], 2021: 28-29.
- WANG Q H, YIN Y X, YANG N. Key technologies of flight control of multi-UAV formation[C]//*Proceedings of the 27th Annual Conference of Beijing Institute of Mechanics*. [S.I.: s.n.], 2021: 28-29.
- [24] 李腾. 有人/无人机协同编队控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- LI T. Cooperative formation control technology for manned/unmanned aerial vehicles[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [25] 乔琛. 面向无人机集群的协同编队控制算法与仿真实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

- QIAO C. Collaborative formation control algorithm and simulation for UAV swarm[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [26] COUZIN I D, KRAUSE J, FRANKS N R, et al. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move[J]. Nature, 2005, 433(7025): 513-516.
- [27] 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.
- [28] WUBBEN J, AZNAR P, FABRA F, et al. Toward secure, efficient, and seamless reconfiguration of UAV swarm formations[C]//Proceedings of 2020 IEEE/ACM 24th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [29] 朱文金, 王罗昊佑, 蔡志强, 等. 考虑级联失效的可重构网络抗毁性研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(4): 839-846.
- ZHU W J, WANG L, CAI Z Q, et al. Resilience analysis for reconfigurable network with cascading failures[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(4): 839-846.
- [30] 王璨, 高辰子. 无人机集群通信网络拓扑重构及关键技术研究[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(5): 49-52, 82.
- WANG C, GAO C Z. Research on communication networks topology reconstruction and key technologies of UAV swarm[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(5): 49-52, 82.
- [31] 左嘉娴. 无人机集群网络拓扑重构及关键技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- ZUO J X. Research on Topological reconstruction of UAV swarm network and key technology[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.
- [32] SOUZA F C, SANTOS S R B D, DE OLIVEIRA A M, et al. Influence of network topology on UAVs formation control based on distributed consensus[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Systems Conference (SysCon). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-8.

[作者简介]



曾子鸣 (1999-), 男, 南京航空航天大学电子信息工程学院硕士生, 主要研究方向为仿生无人机集群架构。



董超 (1980-), 男, 南京航空航天大学电子信息工程学院院长助理、教授、博士生导师, 万人计划青年拔尖人才, 江苏省 333 工程“中青年学术技术带头人”, 主要研究方向为无人机蜂群自组织网络、空天地一体智联网、边缘网络智能、无人机协同智能应用、大规模无线网络仿真等。



朱小军 (1986-), 男, 南京航空航天大学计算机科学与技术学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线网络和无人机网络。



贾子晔 (1990-), 女, 南京航空航天大学电子信息工程学院副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为空天地一体化网络、卫星网络、无人机组网、网络功能虚拟化等方向的相关基础理论和应用技术。