

基于生物群集行为的无人机集群控制

段海滨, 李沛

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院; 飞行器控制一体化技术国防科技重点实验室, 北京 100083

摘要 生物群集行为是一种普遍存在的自然现象, 群体中的个体利用简单的规则、局部的交互, 形成了鲁棒性强、自适应度高、可扩展性好的自组织行为, 在系统层面体现为智能的涌现。本文首先简要叙述了蚁群、蜂群、鸽群、鱼群等典型的生物群集, 并从组织结构的分分布式、行为主体的简单性、作用模式的灵活性、系统整体的智能性等方面分析了生物群体智能的特点。然后, 介绍了部分具有代表性的无人机集群项目, 总结了无人机集群的关键技术, 包括集群态势感知、自主编队控制、智能协同决策。最后, 从生物群集和无人机集群在直观上的相似性出发, 分析了生物群体和无人机集群自主控制的映射关系, 并探讨了仿生物群集的无人机集群自主控制中的核心问题。

关键词 生物群集行为; 无人机; 集群; 自主控制

无人机起源于军事领域, 经过几十年的发展, 目前已经进入了快速发展期, 种类越来越多, 应用领域不断拓展, 任务类型越来越广泛。“平台无人, 系统有人”是无人机系统的基本特征, 与有人飞机相比, 无人机可有效避免人员伤亡, 具有持续工作能力强、全寿命周期成本低等特点, 在尺寸、速度和机动性等方面也具有独特的优势^[1-4]。在军事领域, 无人机可以执行情报、侦察、监视、干扰和打击等任务, 在民用方面, 可用于农业植保、森林防火、电力(管道)巡检和地质勘探。随着无人机的自主能力和智能化水平不断提高, 其控制方式逐步从简单的遥控、程控方式向人机智能融合交互控制, 甚至是全自主控制方向发展, 其任务空域也逐步从执行情报、监视与侦察任务的安全性空域向干扰、打击等对抗性空域发展。由于单架无人机所能携带的任务载荷相对单一, 执行任务能力有限, 而通过多架无人机的能力互补和行动协调, 可实现整个系统效能的提升, 无人机的应用样式逐步从单平台向多平台“集群”方向发展^[5-6]。

生物群集行为是一种普遍存在的

自然现象, 从成群迁移的角马、集体飞行的鸽子、结队巡游的鱼类, 到觅食的蚂蚁、采蜜的蜜蜂, 乃至细菌等微生物、细胞和蛋白质, 不同尺度的生命体都存在着复杂的群体行为^[7-9]。在生物群体中, 个体的感知/行动能力有限, 遵循简单的行为规则, 却能够通过相互协作完成迁徙、觅食、筑巢、御敌等复杂的团队活动, 在群体层面上呈现出有序的自组织协调行为。生物群体既能形成协调有序的集体运动模式, 又能快速、一致地应对外界刺激, 表现出分布式、自组织、协作性、稳定性等特点以及对环境的适应能力。这种高效灵活的运动模式的内在机理和作用规律, 长期以来一直是生物群集研究的核心问题。

若缺乏科学、高效的决策方法与控制策略, 无人机集群将难以发挥协同的优势, 无人机之间可能会在时间、空间和任务层面上存在矛盾, 发生冲突、碰撞的危险, 导致既定任务无法完成。因此, 建立一种高效的无人机集群管理和控制体系, 对于应对复杂、动态、不确定的战场环境, 最大化地发挥无人机自身性能具有极其重要的现实意义。而生物群体行为中所体现的分分布式、自适

应、鲁棒性等特点, 与实现无人机集群协调自主控制的要求相符合。研究生物群集行为的内部作用机理, 并将其映射到无人机集群协调自主控制中, 可以提高无人机在复杂环境条件下的智能决策和规划能力。

1 生物群体智能

对于群集运动现象的观察和思考最早可追溯到两千年前对成群掠鸟的观察, 近年来生物群集的研究吸引了越来越多的科研人员的兴趣, 从生物学家、物理学家、数学家到控制工程师等科研人员均试图解释鱼群、鸟群及其他群集生物在没有统一控制的情况下如何达到飞行或游行方向一致, 从而进行各种各样的群体活动^[10-12]。随着科学技术的发展, 以全球定位系统(GPS)定位跟踪、视频分析(单/双/多目)、声呐成像为代表的经济、高质量的观测技术, 使得人们对生物群集行为的观测更加便捷, 对于群集中个体的空间聚集性、运动的有序性有了更加深入的理解。本节首先概述蚁群、蜂群、鸟群、鱼群这几种群集行为的特点(图1), 然后对生物群体智能的概念和内涵进行分析。

收稿日期: 2016-11-25; 修回日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61333004)

作者简介: 段海滨, 教授, 研究方向为仿生智能与无人机自主控制, 电子邮箱: hbduan@buaa.edu.cn

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.07.001

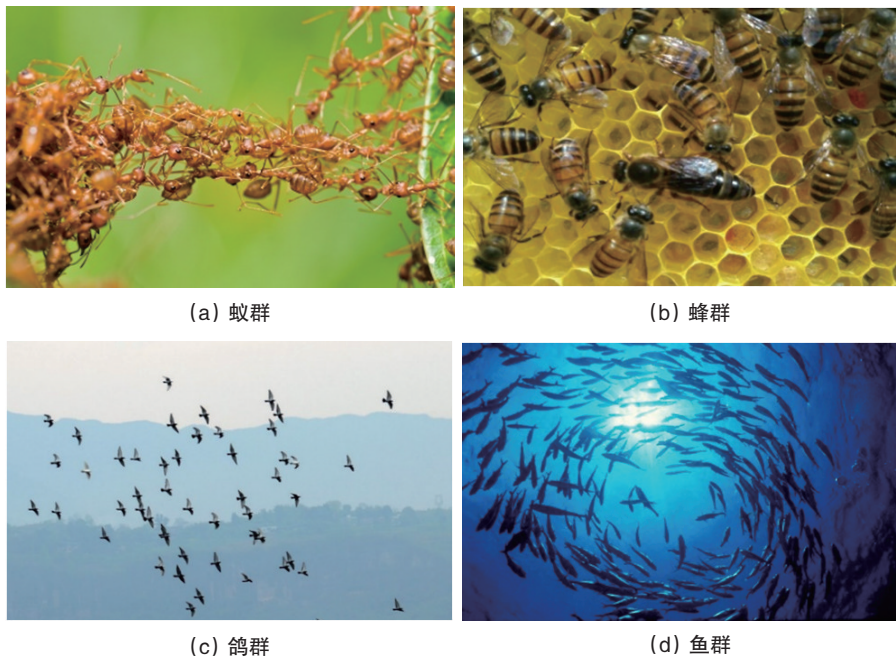


图1 典型的生物群集行为

Fig. 1 Typical biological collective behaviors

1.1 典型生物群集行为

蚂蚁群体是一种广为人知的高度结构化的社会组织,其觅食行为是一种典型的群集行为。蚂蚁在活动过程中会释放出信息素,其他蚂蚁可以检测出信息素的浓度,并确定自身前进的方向。信息素会随着时间的推移逐渐挥发,蚂蚁走过的路径上信息素浓度会得到加强,从而促使更多蚂蚁选择该路径,形成正反馈过程^[13-15]。蚁群通过这种简单的信息交流,实现正反馈的信息学习机制,从而找出食物源和巢穴之间的最短路径。

蜂群中的蜜蜂只能完成单一的任务,但是蜜蜂通过摇摆舞、气味等多种信息交流方式,进而使得整个蜂群能够协同完成多种工作,如收集花粉、构建蜂巢等,实现自组织行为^[16-17]。在蜂群采集花粉的过程中,负责寻找蜜源的工蜂通过探索寻找合适的食物源。当发现蜜源后,会返回蜂巢通过“摇摆舞”交互蜜源信息,其舞蹈动作及幅度与蜜源到蜂巢的距离,花蜜的数量、品种以及质量等相关。其他采蜜蜂根据舞姿的不同决定自身觅食的蜜源,从而逐步形成在较优蜜源处的聚集。

鸽群是大量自治个体的集合,通过个体之间的交互,使得整个鸽群呈现出

复杂的宏观涌现行为^[18-20]。鸽群中的个体遵循一种拓扑距离交互的方式,即鸽子自身仅与周围一定数量的个体进行信息交互。研究者指出,鸽群在飞行过程中呈现出一定的层级作用网络,高等级个体起到引领作用,低等级个体的行为会受到高等级个体的影响,这种网络结构使得群体在应对外界刺激或躲避障碍时反应迅速^[21]。当飞行轨迹平滑时,个体尽力与其周围邻居的平均方向保持一致,而当出现突然急转弯变向时,个体迅速与高等级个体保持一致。

水中成群游动的鱼群,会随着洋流和食物而进行整齐划一的游动,在遇到捕食者攻击时,鱼群边缘的个体会产生快速躲避的行为,并带动整个鱼群做出迅疾的反应^[22]。鱼是通过观察同伴身体两侧的侧线调节自己的游向和速度,维持相互之间的适当距离,进而形成整个鱼群特定的自组织方式。涡旋运动在鱼群中极为常见,这种运动形式具有局部稳定特性,可以达到干扰和分散捕食者注意力的效果。在遇到突发情况时,鱼群的涡旋可能会出现相变行为,从涡旋运动转换为水平迁徙运动。群体系统这种从涡旋运动到水平迁徙运动的相变行为的产生依赖于敌对个体的运动速度和威胁范围。

1.2 概念和内涵

生物群体所呈现出的各种协调有序的集体运动模式,由个体之间相对简单的局部自组织交互作用产生,在环境中表现出分布式、自适应、鲁棒性等智能特性,使系统在整体层面上涌现出单个个体不可能达成的智能现象^[23]。随着计算机的发展,Reynolds在1987年提出了BOID模型,该模型遵循聚集、分离、速度匹配3个原则,实现了对鸟群行为的模拟^[24]。群体智能这个叫法,最早由Beni等在关于细胞机器人系统的论述中引入^[25],该概念形成的一个显著标志是1999年由牛津大学出版社出版的Bonabeau等编写的一本专著《Swarm intelligence: From natural to artificial systems》^[26]。大多数现有的研究认为群集行为体现出了五大基本原则^[27]:邻近原则,即群集中的成员能够进行简单的空间和时间计算;品质原则,即能够响应环境中的品质因子;多样性反应原则,要求群集行动范围不应该太窄;稳定性原则,要求群集不应在每次环境变化时都改变自身的行为;适应性原则,群集在所需代价不太高的情况下,能够在适当的时候改变自身的行为。生物群集行为具有以下特点。

1) 组织结构的分布式。

生物群体中不存在中心节点,个体遵循简单的行为规则,仅具备局部的感知、规划和通信能力,通过与环境 and 邻近同伴进行信息交互从而适时地改变自身的行为模式以适应动态环境。群集系统具有较强的鲁棒性,不会由于某一个体或部分个体出现故障而对系统整体造成影响,表现出一定自愈能力。

2) 行为主体的简单性。

群体中个体的能力或遵循的行为规则非常简单,每个个体仅执行一项或者有限的几项动作,并针对外部情况做出简单的几种反应,这种看似笨拙的个体行为却使它们组成的群体极其高效,体现出智能的涌现。但生物群集系统不是个体的简单相加,而是通过个体之间的组织、协调、合作,实现能力的倍增。以蚂蚁为例,尽管蚂蚁个体比较简单,但整个蚂蚁群体却表现为一个高度

机构化的社会组织,在许多情况下能完成远远超过蚂蚁个体能力的复杂任务,如通过信息素的作用找到食物源和巢穴之间的最短路径。

3) 作用模式的灵活性。

灵活性主要体现在群体对于环境的适应性。在遇到环境变化时,群集中的个体通过改变自身行为适应环境的变化。如鸟群在遇到捕食者时能迅速做出集体逃避动作,鱼群在受到鲨鱼攻击时会改变自身旋涡运动,以获得更强的生存能力。这些群体中表现出的灵活性,与系统群集运动的稳定性是相矛盾的,而自然界中的生物群体,往往兼具稳定性和灵活性,这种奇妙的特性的内部作用机制,是群集行为研究的一项重要内容。物理学家提出一种假设,生物群集工作在系统相变的临界点附近,使得系统在保持稳定性同时又具备灵活性,这也是生物群集体现智能的一个重要方面。

4) 系统整体的智能性。

在生物群体中,个体通过感知周围的环境信息,进行信息的交换和共享,按照一定的行为规则,对外部刺激做出响应,通过调整自身状态来增强群体的生存能力,这个过程即为学习和进化的过程。群体中的个体通过环境反馈的状态适应性地改变自身行为,实现策略、经验的学习,以获取自身对外部环境的最佳适应性。群体的学习和进化包含时间、空间两个方面,在时间上表现为个体对自身历史经验的学习,在空间上表现为与其他个体、外部环境间的交互学习。

2 无人机集群系统

随着无人自主技术的深化应用,开发无人机集群系统已成为无人机的一个重要发展方向,通过紧密的协作,无人机集群体系可以体现出比人工系统更卓越的协调性、智能性和自主能力^[28]。美国致力于打造无人机集群,力保军事技术全球领先,通过国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)、海军研究局和众多实验室等组织机构,在无人机集

群高风险/高回报的概念验证研究方面成效显著。美国国防部发布的《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,并指出“全自主集群”是无人机自主控制的最高等级,预计 2025 年后无人机将具备全自主集群能力^[29]。2016 年 5 月 17 日,美空军发布《小型无人机系统飞行规划 2016—2036》,从战略层面肯定小型无人机系统的前景和价值^[30],规划中对“蜂群”、“编组”、“忠诚僚机”3 种集群作战概念进行了阐述,其中“编组”是人对人,“忠诚僚机”是人机对机,“蜂群”是机对机,从侧面印证了无人机集群发展的重要性。

2.1 典型无人机集群系统

典型的无人机集群系统研究包括匈牙利罗兰大学的室外四旋翼自主集群、美国海军研究生院 50 架固定翼飞机集群飞行、“小精灵”(Gremlins)项目、“拒止环境中的协同作战”(Collaborative Operations in Denied Environment, CODE)项目、“体系综合集成技术及试验”(System of Systems Integration Technology and Experimentation, SoSITE)项目、“低成本无人机集群技术”(Low-Cost UAV Swarming Technology, LOCUST)项目、“集群使能攻击战术”(Offensive Swarm-Enabled Tactics, OFFSET)项目。

匈牙利罗兰大学 Tamás Vicsek 团队在 2014 年实现了 10 架四旋翼在室外环境下的自主集群飞行^[31-32],该项工作被《Nature》报道^[33]。它最大的特点是在任务决策层利用了生物群集行为机制,

实现了像鸟群一样的自主飞行,四旋翼通过与临近个体进行信息交互实现自主决策,不存在中心控制节点(图 2)。项目利用基于自驱动粒子的运动机制,实现了四旋翼集群在 GPS 噪声、通信延迟和故障环境下的稳定飞行,包括有界区域内的碰撞规避和聚集,队形的稳定保持(网格、旋转环和直线),以及群集目标跟踪。

美国海军研究生院 Timothy Chung 团队在 2015 年实现了 50 架固定翼飞机的集群飞行,该次试验打破了由他们保持的一人操控 30 架无人机的记录^[34-35]。他们研制的链传动弹射器每 30 s 可发射一架无人机,无人机按照主从模式飞行,利用无线自组织网络进行信息交互和共享(图 3)。与以往每架飞机需要一个操作员不同,该项目通过集群地面控制站实现了同时对 50 架无人机的控制,它的一个工作重点是实现操控权的转移,将控制权逐渐转移至飞行器,使飞机进行自主飞行和决策,以减轻操作人员的压力。

DARPA“小精灵”项目致力于发展高效、低廉的分布式空中作战技术,旨在促进空中作战概念的转变^[36]。该项目通过载机(轰炸机、运输机等大型平台)在防区外发射携带有侦察或电子战载荷的无人机集群,通过集群内部的信息共享与协同,突破敌方防御系统,执行侦察与电子攻击任务,并在任务完成后对幸存的无人机进行回收(图 4)。这些无人机将配备多种不同载荷,具有数量大、尺寸小、廉价、可重复使用等特点,目前拟采用 C-130 运输机作为载机

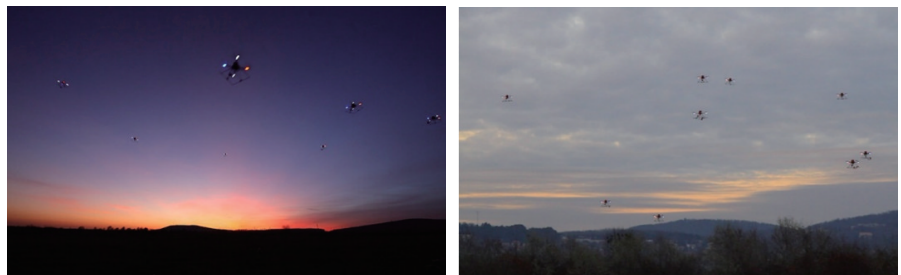


图 2 Tamás Vicsek 教授团队的室外多四旋翼自主编队飞行(图片来源: <https://hal.elte.hu/flocking/wiki/public/en/projects/CollectiveMotionOfFlyingRobots>)

Fig. 2 Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots by Tamás Vicsek's group



图3 Timothy Chung 团队的50架无人机集群飞行(图片来源:https://wiki.nps.edu/display/~thchung/ARSENL)

Fig. 3 Field experimentation with 50 fixed-wing UAVs by Timothy Chung's group



图4 “小精灵”计划

(图片来源:http://www.darpa.mil/program/gremlins, http://www.ifuun.com/a2016618165811/)

Fig. 4 "Gremlins" project

进行空中回收,具体技术方案细节尚未公布。

DARPA 在 2015 年发布的“拒止环境中的协同作战”项目^[37],希望搭建一个模块化的软件架构。与现有标准相比,该架构可以抗“带宽限制”以及“通

信中断”,有利于指挥人员在电子对抗、通信降级等不利条件下保持态势感知并控制无人机,从而提高无人机在高对抗环境中的自主性和协同作战能力,同时降低对操作人员数量及成本的要求(图5)。目前该项目已经进入第二阶

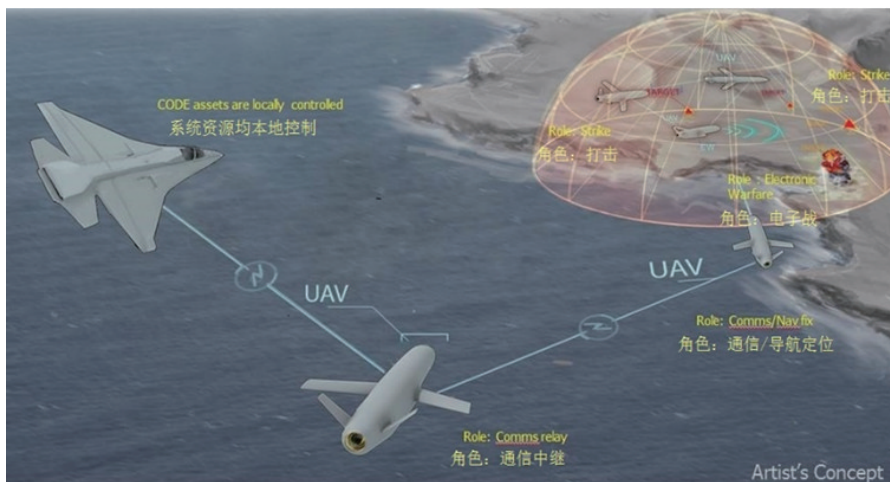


图5 “拒止环境中的协同作战”项目

(图片来源:http://www.darpa.mil/program/collaborative-operations-in-denied-environment)

Fig. 5 Collaborative operations in Denied Environment

段,第3阶段将验证单人控制最多6架无人机的能力,在区域拒止和其他复杂环境下进行目标搜索、目标识别和交战之类的任务。

DARPA 主持的“体系综合集成技术及试验”项目^[38],聚焦于发展分布式空战的概念、架构和技术集成工具,希望以现有航空系统能力为基础,通过开放式系统架构,把传感器、武器、定位导航和授时以及数据链等能力拆分到大量可实时通信的平台上,执行侦察监视和目标打击任务(图6)。这种开放式的系统架构为发展可互换的组件和平台提供了统一的技术标准和工具,便于进行快速的升级和替换。该项目希望依托开放式系统架构,实现系统的快速整合,实现分布式作战。

美国海军研究局开展的“低成本无人机集群技术”项目(又称蝗虫计划)^[39],在2016年4月完成了30架无人机连续发射和编组飞行试验(图7)。项目开发了一套多管发射装置,可以实现陆基、舰载无人机的连续发射。同造价昂贵的有人战机、制导炸弹等高精尖武器相比,该系统在拥有信息化系统各要素支持的同时,造价却远远低于前者。美国海军负责无人系统的 Frank Kelley 在美国国际无人系统协会主办的2016年“国防无人系统”大会上,阐释了海军关于无人系统技术的8个目标,其中第6个为“实现无人机集群及突袭”。

为显著提升小型地面部队在城市环境下的作战效能,DARPA 在2016年12月启动了“集群使能攻击战术”项目^[40],希望开发并演示验证100多个作战相关的集群战术,应用于无人机和/或地面无人车辆集群(>100个,图8)。项目旨在提供一种集群战术快速生成工具,对这些战术的有效性进行评估,未来可将其中效能最好的集群战术应用于实战。为实现以上目标,项目寻求构建一个支持开放式系统架构的活跃的集群战术开发生态系统,该系统具备先进的人-集群接口、实时的网络化虚拟环境以及社区驱动的集群战术交换门户,可协助参与者设计集群战术、组合协同行为和集群算法。

System of Systems (SoS) Integration Technology and Experimentation (SoSITE)

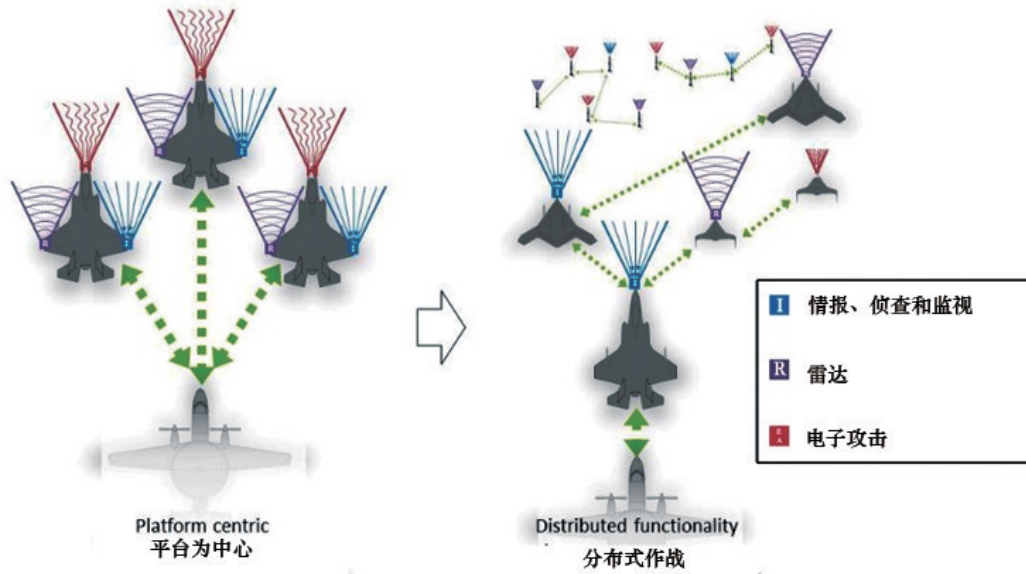


图6 “体系系统集成技术及试验”项目

(图片来源: <http://www.darpa.mil/news-events/2015-03-30>)

Fig. 6 System of Systems Integration Technology and Experimentation

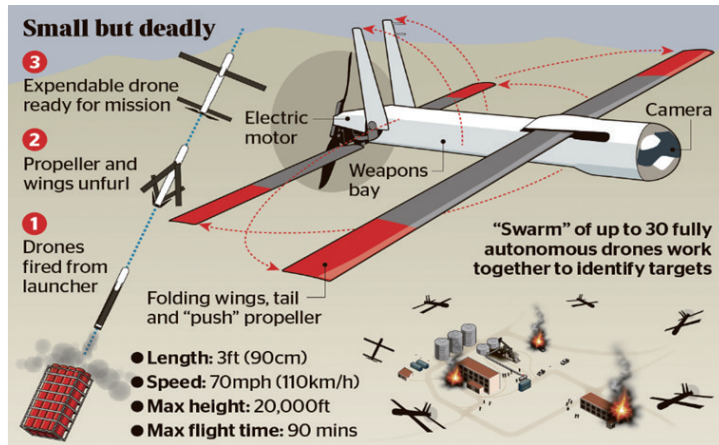


图7 “低成本无人机集群技术”项目 (图片来源: <http://www.thetimes.co.uk/tto/news/uk/defence/article4413947.ece#tab-4>)

Fig. 7 Low-cost UAV swarming technology, LOCUST

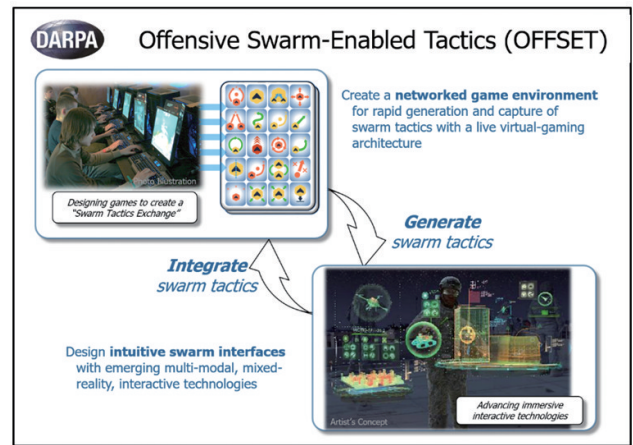


图8 “集群使能攻击战术”项目 (图片来源: <http://www.darpa.mil/news-events/2016-12-07>)

Fig. 8 Offensive swarm-enabled tactics, OFFSET

2.2 无人机集群控制关键技术

在未来信息化、网络化、体系对抗作战环境下,无人机集群相对单无人机系统,利用其规模优势,能够完成更加复杂的任务,具有更好地鲁棒性,更强的生存能力,同时也具有巨大的成本优势,是无人机重要发展方向^[41]。目前对于无人机集群的研究多处于概念研究和初步验证阶段,如何将自组织机制引

入无人机平台,真正实现复杂、动态、不确定环境下的无人机集群还面临一系列问题,需要解决的关键问题包括:集群感知与态势共享、多无人机自主编队飞行、集群智能协同决策等。

1) 集群协同态势感知和共享。

多无人机协同态势感知是无人机集群控制和决策的基础。在无人机集群中,多架无人机可配备不同的传感

器,通过相互协同工作,获得更大的范围、更高的精度及更强的鲁棒性。要实现态势的协同感知,需要进行协同目标探测、目标识别和融合估计、协同态势理解和共享,以获取完整、清晰、准确的信息,为决策提供支持。在集群信息共享的过程中,如何将感知到的目标、平台状态信息传递到其他个体,使得整个系统既能满足可用带宽限制以减小被

侦测到的概率,又能满足协同控制和决策的需要,是非常重要的问题。因此,有必要面向集群飞行进行通信系统设计,以应对强电磁干扰环境下通信的延迟、丢包、异步等情况,克服由于分布式的应用环境、平台计算能力差异导致的空间、时间不确定性。此外,在无人机集群自组织系统中,无人机作为通信网络节点,其空间的分布决定了网络的拓扑结构,而不同的网络拓扑结构有着不同的通信性能。考虑通信算法和控制技术的耦合,研究基于通信质量约束的集群控制方法,有效提高无人机集群完成任务的效能。

2) 无人机集群自主编队控制。

编队飞行是无人机集群执行任务的基础和基本形式。编队控制是指无人机集群在执行任务过程中,控制无人机形成并保持一定的几何构型,以适应平台性能、战场环境、战术任务等需求的技术。编队控制主要解决两方面的问题:一是编队的生成和保持,包括面向空间、时间和通信拓扑的构型优化,不同几何形态间的队形切换,队形不变条件下的编队收缩、扩张和旋转等;二是编队构型的动态调整和重构,如遇到障碍物时编队的分离与重新融合,编队成员增加或减少时的队形调整,以及作战目标改变、威胁环境变化等其他突发情况下的编队重构。广义的编队飞行也包括在像鸟群一样的集群飞行,集群整体不一定保持特定的几何队形,但内部的个体具备感知与规避能力,能够通过集群内部的信息共享和决策,实现协同自主飞行。

3) 无人机集群协同智能决策。

无人机集群协同决策是实现无人机集群优势的核心。无人机协同决策的目标,就是针对高对抗的战场环境,提高系统的整体生存能力,在可能损失部分无人机的条件下,加强整个系统的生存能力,确保任务的完成率。无人机集群协同决策的内容包括威胁的判断、目标优先权的排序及目标分配等任务的动态分配与调度,需要重点考虑多机之间的任务分配的冲突消解,消除多机之间的任务耦合,应对动态、不确定的

外部环境,实现基于任务和无人机能力的协同决策,制定高效合理的任务计划,使得无人机在执行任务的生存概率和作战效能达到最佳。针对高对抗、强不确定及时间敏感的环境中随时可能出现的包括任务目标改变、威胁和环境变化、集群成员损伤等突发情况,需要无人机集群具备实时任务调整和重规划的能力,快速响应外界环境的变化,提高任务效率和使用灵活性。

3 基于生物群集行为的无人机集群控制

3.1 生物群集与多无人机系统的映射机制

生物群集和无人机集群在直观上存在着诸多相似性(表1)。

1) 组织结构上的分布式。生物群集中不存在中心控制节点,各自通过与邻近同伴进行信息交互从而改变自身的行为;无人机集群中不存在传统意义上的指挥控制站,每架无人机根据自身感知到的局部信息,自主地进行行动和决策。

2) 行为主体的简单性。生物群体中单个个体的能力或遵循的规则非常简单,每个个体仅执行一项或者有限的几项动作,并针对外部情况做出简单的几种反应,如蚂蚁、蜜蜂等无论从感知能力、运动能力,还是行为能力都极其简单;与普通的无人机不同,无人机集群一般要求无人机尺寸小、价格低廉,仅能携带一定的传感器或载荷,具有部分的感知能力,自主等级不高。

3) 作用模式的灵活性。生物群体

对环境变化往往具有较强的适应性,在遇到威胁和变化时能够快速一致地应对,如鸟群、鱼群在遇到捕食者时能迅速做出集体逃避动作;无人机集群多处于不完全、不确定、高动态的任务环境,需要具有较强的灵活性来获取平台更强的生存能力。

4) 系统整体的智能性。群居性动物中,看似笨拙的个体行为通过相互协作却使它们组成的群体有着极高的效率,体现出智能的涌现;无人机集群一方面希望利用平台的数量实现其规模优势,另一方面也希望实现无人机集群通过相互的组织协调,引入智能性实现能力的倍增。

无人机集群相对于单个无人机,具有更好的鲁棒性、适应性,如何对集群系统进行设计,使之能够相互协调合作,完成复杂的任务,具有重要的实际意义。目前对于多无人机特别是无人机集群的设计一般是采取自上而下的思想,严重依赖工程经验和反复试凑。基于行为的设计也是一种常见的方法,它通过对个体的行为进行配置、研究、完善,直到得到满足要求的整体群集行为。这种自下而上的设计方法的灵感往往来源于对自然中生物群体的观察,加深群集行为和数学模型的理解可使设计更加简单。目前对于群集运动的理论建模研究,帮助研究者解释了群集行为和智能涌现的部分规律,但很多模型对于个体交互的定义大都建立在一些未经证实的假设之上,并无法完全揭示生物群集行为的内在机理。倘若有效掌握自然界群集行为与智能

表1 生物群集和无人机集群的映射关系

Table 1 Relationship between collective behaviors and UAV swarms

| 特点 | 生物群集 | 无人机集群 |
|----------|-------------------------|------------------------|
| 组织结构的分布式 | 不存在中心节点,各自通过与邻近同伴进行信息交互 | 不存在的指挥控制站,各无人机自主地进行决策 |
| 行为主体的简单性 | 个体能力(感知/行为)、遵循的行为规则非常简单 | 尺寸小、价格低廉,仅能携带部分传感器或载荷 |
| 作用模式的灵活性 | 对环境变化具有较强的适应性,能够躲避捕食者 | 应对信息不完全、环境不确定、高动态的任务环境 |
| 系统整体的智能性 | 组成的群体有着极高的效率,智能的涌现 | 规模效应使得其作战能力倍增,生存力提高 |

的产生机理,预测群集行为的发展演化,深刻理解系统进化的实质性规律,设计出一种完全自下而上的关于个体关联、群集运动、群体决策、智能涌现的群集控制方法,对于无人机集群的设计无疑有着重大的参考意义。

3.2 仿生物群集行为的无人机集群自主控制

生物集群中所体现的分布式、自适应、鲁棒性等特点,与无人机集群实现协调自主控制的要求相符合。通过研究生物群体智能,并将其映射到无人机集群协调自主控制领域中,可以提高其在复杂环境条件下的自主决策和规划能力,使得系统中的无人机仅仅在局部感知能力下,通过同其他无人机以及环境的相互作用实现复杂的行为模式。无人机通过收集和历史信息来适应环境,进行个体“知识”的更新。这样,无人机通过与集群中其他个体的交互,进行历史经验学习和社会学习,不断进化,从而获得更强的生存能力以及对环境的适应性,从集群的宏观尺度上表现为智能的涌现。若某个无人机出现故障,其他无人机检测不到其信号会自动填补其位置,在集群系统层面表现为具备“自愈”能力;若有新的无人机集群加入,只要与边界处的无人机建立通信,新的集群会迅速完成融合。这样,整个系统不仅具有强鲁棒性,同时在数量上的可扩展性极强。

共识主动性(stigmergy)是生物群体中的一个核心概念,它被用来表示是生物个体自治的信息协调机制。蚂蚁的大脑或基因中并没有巢穴建造的计划、组织和控制机制,个体间也没有直接的交流,但是蚂蚁个体通过识别其他蚂蚁留下的信息素,达成共识,共同完成了复杂和精致的蚁巢建造。生物群体在没有控制中心和直接交流的条件下,通过同频共振识别其他个体遗留的信息和留存物,进行自发的后续活动,

这就是所谓的共识主动性。这种间接的通信机制,为缺乏记忆、交流的简单个体提供了一种高效的合作机制。在无人机集群中,通信是无人机之间进行控制和决策行为的基础,传统意义上的通信是一种显式通信,需要装载机间高速数据链共享目标信息、态势信息和指挥控制信息,且往往处于强电磁干扰环境中。如果将生物群集中的共识主动性这种隐式通信和传统的数据链显式通信的优势结合起来,通过隐式通信进行群集成员之间的底层协调,在出现隐式通信无法解决的冲突或死锁时再利用显式通信进行协调加以解决,无疑能够增强群集系统的鲁棒性。从信息流的角度,研究群集内各成员之间的通信机制,既可以增强系统的协调协作能力、容错能力,又可以提高通信效率,避免通信中的瓶颈效应。

通过对生物群集中的空间聚集性、运动的有序性、环境的适应性进行深入研究,建立群集运动理论模型,分析个体行为与群体特性之间的关系,可建立起微观个体和宏观整体之间的联系,从而指导群集系统的设计和控制,这样可以根据系统的性能指标要求,通过对个体进行设计使得整个群体产生期望的行为。生物群集行为中的速度-精度权衡问题是一项重点的研究。从控制理论角度看,正反馈和负反馈作为群集行为的两个基本内在要素,对于群集智能行为的形成起到了重要的作用。其中,正反馈对初始时刻系统微弱的变化进行强化促使系统应对外界环境变化,而负反馈起到阻尼作用,抑制扰动输入,正反馈对应快速性,负反馈对应稳定性(精度)。在群集行为中,这两种因素如何权衡,使得群体一方面能够快速应对环境变化(如鸟群在遇到捕食者时能迅速做出集体逃避动作),另一方面群体在遇到一定干扰的情况下仍能够保持稳定,即速度-精度的权衡,深

入研究其内在作用过程有助于实现对群集的控制,也是群集行为智慧性的重要体现。

4 结论与展望

对于蚁群、蜂群、鸟群、鱼群等生物群体大规模有序群集运动发生机理的探究,吸引了不同学科领域研究者的广泛关注。生物群体通过简单的规则、局部的交互,形成了具有鲁棒性强、自适应度高、可扩展性好的整体行为,而这正是无人机集群所期望的特性。通过研究生物群集行为,并将其映射到无人机集群协调自主控制领域中,有望提高其在复杂环境条件下的自主决策和规划能力。对于生物群集行为和无人机集群进行深入研究,一方面希望通过利用生物群集内部的作用机理和协调机制,解决当前无人机集群系统设计中的问题,如飞行管理和控制、协同决策、信息共享。另一方面,也希望借助生物群集赋予无人机集群学习和进化能力、“自愈”和“融合”能力,真正实现全自主的无人机集群。

目前,尽管人们通过理论建模、实证分析,对生物群集行为的发生机理有了一定的理解,但关于群体智能的自组织涌现机制还有待进一步深入研究。无人机集群目前更多的关注点在其规模效应,希望通过相互协同,降低飞行器平台成本,以数量优势压制敌人,保持武器系统的性能优势,提升平台的生存能力。与蜂群只是形式和直观上的相似,若能通过模拟生物行为机制,引入智能性,无疑能更大程度提高系统的效能,可实现战斗力指数增长。无人机集群带来了巨大的优势,集群技术也必将在未来的应用中扮演重要角色,那么对于反无人机集群技术的研究,如无人机集群的对抗等也应成为一个研究和思考的重点。

参考文献 (References)

- [1] 王英勋, 蔡志浩. 无人机的自主飞行控制[J]. 航空制造技术, 2009(8): 26–31.
Wang Yingxun, Cai Zhihao. Autonomous flight control of unmanned aerial vehicle[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(8): 26–31.
- [2] 陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究[J]. 航空学报, 2011, 32(6): 1075–1083.
Chen Zongji, Wei Jinzhong, Wang Yingxun, et al. UAV autonomous control levels and system structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(6): 1075–1083.
- [3] Qiu H X, Chen W, Dou Rui, et al. Fully autonomous flying: from collective motion in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarms[J]. Science China Information Sciences, 2015, 58(12): 1–3.
- [4] Duan H B, Li P. Bio-inspired computation in unmanned aerial vehicles[M]. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 2014.
- [5] 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 Yifeng, Xiao Xiangjiang, Ke Guanyan. Operation concept and key techniques of unmanned aerial vehicle swarms[J]. National Defense Science & Technology, 2013, 34(5), 37–43.
- [6] Duan H B, Liu S Q. Unmanned air/ground vehicles heterogeneous cooperative techniques: current status and prospects[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(5): 1349–1355.
- [7] Vicsek T, Zafeiris A. Collective motion[J]. Physics Reports, 2012, 517(3–4): 71–140.
- [8] 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. Progress in swarm intelligence[J]. Communications of CAA, 2013, 34(3): 65–74.
- [9] 段海滨, 张祥银, 徐春芳. 仿生智能计算[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Duan Haibin, Zhang Xiangyin, Xu Chunfang. Bio-inspired computing[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [10] Cavagna A, Cimarelli A, Giardina I, et al. Scale-free correlations in starling flocks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(26): 11865–11870.
- [11] Bialek W, Cavagna A, Giardina I, et al. Social interactions dominate speed control in poising natural flocks near criticality[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(20): 7212–7217.
- [12] Vicsek T, Czirok A, Ben-Jacob E, et al. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles[J]. Physical Review Letters, 1995, 75(6): 1226–1229.
- [13] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, 1996, 26(1): 29–41.
- [14] 段海滨. 蚁群算法原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Duan Haibin. Ant colony algorithms: theory and applications[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [15] Bonabeau E G, Dorigo M, Theraulaz G. Inspiration for optimization from social insect behavior[J]. Nature, 2000, 406(6791): 39–42.
- [16] Fathian M, Amiri B, Maroosi A. Application of honey bee mating optimization algorithm on clustering[J]. Applied Mathematics and Computation, 2007, 190(2): 1502–1513.
- [17] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Journal of Global Optimization, 2007, 39(3): 459–471.
- [18] Usherwood J R, Stavrou M, Lowe J C, et al. Flying in a flock comes at a cost in pigeons[J]. Nature, 2011, 474(7352): 494–497.
- [19] 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 Huaxin, Duan Haibin, Fan Yanming. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks. Control Theory & Applications, 2015, 32(10): 1298–1304.
- [20] Duan H, Qiao P. Pigeon-inspired optimization: A new swarm intelligence optimizer for air robot path planning[J]. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 2014, 7(1): 24–37.
- [21] Nagy M, Ákos Z, Biro D, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks[J]. Nature, 2010, 464(7290): 890–893.
- [22] Swain D T, Couzin I D, Leonard N E. Real-time feedback-controlled robotic fish for behavioral experiments with fish schools[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 150–163.
- [23] 段海滨, 邵山, 苏丙未, 等. 基于仿生智能的无人作战飞机控制技术发展新思路[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(8): 853–860.
Duan Haibin, Shao Shan, Su Bingwei, et al. New development thoughts on the bio-inspired intelligence based control for unmanned combat aerial vehicle[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 40(8): 853–860.
- [24] Reynolds C W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model[J]. Acm Siggraph Computer Graphics, 1987, 21(4): 25–34.
- [25] Beni G, Wang J. Swarm intelligence in cellular robotic systems[C]. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, Tuscany, Italy, June 26 – 30, 1989.
- [26] Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G. Swarm intelligence: from natural to artificial systems[M]. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- [27] Millonas M. Swarm, phase transitions, and collective intelligence[M]//Computational Intelligence: A Dynamic System Perspective. New Jersey: Addison Wesley, 1993:137–151.
- [28] Hauert S, Leven S, Varga M. Reynolds flocking in reality with fixed-wing robots: communication range vs. maximum turning rate[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, CA, USA, September 25–30, 2011.
- [29] Cambone S. Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005—2030[R]. Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [30] Robert O. Small unmanned aircraft systems (SUAS) flight plan: 2016—2036[R]. United States Air Force, 2016.

- [31] Vasarhelyi G, Viragh C, Somorjai G, et al. Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Chicago, IL, USA, September 14–18, 2014.
- [32] Virágh C, Vásárhelyi G, Tarcai N, et al. Flocking algorithm for autonomous flying robots[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2014, 9(2): 025012:1–025012:11.
- [33] Yong E. Autonomous drones flock like birds[EB/OL]. (2016–04–05)[2016–11–25]. <http://www.nature.com/news/autonomous-drones-flock-like-birds-1.14776>.
- [34] Chung T H, Clement M R, Day M A, et al. Live-fly, large-scale field experimentation for large numbers of fixed-wing UAVs[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Stockholm, Sweden, May 16–21, 2016.
- [35] Day M A, Clement M R, Russo J D, et al. Multi-UAV software systems and simulation architecture[C]. International Conference on Unmanned Aircraft Systems, Denver, Colorado, USA, June 9–12, 2015.
- [36] Daniel P. Gremlins[EB/OL]. (2014–06–09)[2016–11–25]. <http://www.darpa.mil/program/gremlins>.
- [37] Ledé J C. Collaborative operations in denied environment (CODE)[EB/OL]. (2015–01–21)[2016–11–25]. <http://www.darpa.mil/program/collaborative-operations-in-denied-environment>.
- [38] DARPA Public Affairs. Operating in contested environments[EB/OL]. (2015–03–30)[2016–11–25]. <http://www.darpa.mil/news-events/2015-03-30>.
- [39] Office of Naval Research. LOCUST: Autonomous, swarming UAVs fly into the future[EB/OL]. (2015–04–14) [2016–11–25]. <http://www.onr.navy.mil/en/Media-Center/Press-Releases/2015/LOCUST-low-cost-UAV-swarm-ONR.aspx>.
- [40] DARPA Public Affairs. OFFSET envisions swarm capabilities for small urban ground units[EB/OL]. (2016–12–07) [2016–11–25]. <http://www.darpa.mil/news-events/2016-12-07>.
- [41] 范彦铭. 无人机的自主与智能控制[J]. 中国科学(技术科学), 2017, 47(3): 221–229.
Fan Yanming. Autonomous and intelligent control of the unmanned aerial vehicle[J]. Science Sinica Technologica, 2017, 47(3): 221–229.

Autonomous control for unmanned aerial vehicle swarms based on biological collective behaviors

DUAN Haibin, LI Pei

School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University; Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, Beijing 100083, China

Abstract Through simple rules and local interactions, social groups exhibit robust, scalable and flexible global behaviors, which are useful for applications in engineering areas. In this paper, we first introduce collective behaviors of biological systems, such as colonies of ants, flocks of birds, colonies of bees and schools of fish, and summarize the properties of these social groups. Then we analyze the key techniques of unmanned aerial vehicle (UAV) swarms, including mass UAV management and control, swarm perception and situation sharing, multiple UAV autonomous formation flight, and swarm cooperative decision making. Afterwards, we briefly sort the UAV swarms that take inspiration from the self-organized behaviors of social animals. Finally, we outline open problems and possible research directions in collective motion.

Keywords collective behaviors; unmanned aerial vehicles; swarm; autonomous control

(责任编辑 刘志远)