



# 从狼群智能到无人机集群协同决策

段海滨<sup>1\*</sup>, 张岱峰<sup>1</sup>, 范彦铭<sup>2</sup>, 邓亦敏<sup>1</sup>

1. 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重点实验室仿生自主飞行系统研究组, 北京 100083

2. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035

\* 通信作者. E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2018-06-23; 接受日期: 2018-09-06; 网络出版日期: 2019-01-03

国家杰出青年科学基金 (批准号: 61425008)、国家自然科学基金 (批准号: 61333004) 和北京航空航天大学博士研究生卓越学术基金 (2018 年度) 资助项目

**摘要** 无人机协同作战是未来战场的一种重要作战模式, 而环境和态势的不确定性使得无人机集群协同决策成为支撑集群协同作战亟待突破的一项关键技术. 狼群具有较强的认知与协作能力, 能够在复杂环境下迅速对目标进行跟踪和包围. 其中所体现的信息认知与分工协作等智能行为特征, 与无人机集群对抗决策需求相符. 因此, 研究狼群智能行为机理, 并应用于无人机集群系统对抗任务, 对解决无人机集群协同决策问题具有重要借鉴意义.

**关键词** 无人机集群, 协同决策, 狼群智能, 认知与协作

## 1 引言

无人机集群系统 (unmanned aerial swarm systems, UASS) 是由众多自主控制的无人机组成, 可执行对地、对海、对空协同作战任务, 并且具有可回收、可重复使用等特点的多无人系统<sup>[1]</sup>. 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, 其突出特点是利用其协同互补优势突破单架无人机的任务包线, 执行更为复杂的作战任务, 并且保证足够的鲁棒性和生存能力<sup>[2]</sup>. 集群对抗是未来战场的重要作战模式, 而空中格斗和电磁干扰是无人机集群对抗的两种主要方式. 多无人机空战具体表现为多组无人机的相互占位、拦截, 以及协作缠斗<sup>[3]</sup>, 而电磁对抗环境则呈现超视距、信号干扰、环境多变, 以及虚假目标扩散等多种新型对抗形式<sup>[4]</sup>. 对抗环境要求无人机集群积极采取饱和和攻击、协调避障, 以及队形分散、集中、跟随和援助等有利策略, 以提升对抗环境适应性. 然而, 目前无人机集群协同决策技术还存在众多难点亟待克服. 其中, 态势感知和决策手段既是支撑协同决策的关键技术, 又是必须攻关的瓶颈. 态势感知要求无人机集群具备高精度、动态稳定的环境认知能力<sup>[3]</sup>, 然而现有单机探测手段难以同时兼顾上述需求, 需要构建有效的多机协同感知方法. 决策手段包括无人机集群的动态任务分配与协调控制机制, 负责引导集群以特定方式执行任务. 然而, 当前研究缺少面

**引用格式:** 段海滨, 张岱峰, 范彦铭, 等. 从狼群智能到无人机集群协同决策. 中国科学: 信息科学, 2019, 49: 112–118, doi: 10.1360/N112018-00168  
Duan H B, Zhang D F, Fan Y M, et al. From wolf pack intelligence to UAV swarm cooperative decision-making (in Chinese). Sci Sin Inform, 2019, 49: 112–118, doi: 10.1360/N112018-00168

表1 狼群、鸟群、鱼群、蚁群多方面特征对照表

Table 1 Comparison of the characteristics of wolves, birds, fish school and ant colony

Property	Wolf pack	Bird flock	Fish school	Ant colony
Cognition	Strong	General	General	Weak
Adaptivity	Strong	General	Weak	Weak
Sociality	Rigorous	Hierarchies	Unknown	Rigorous
Motion characters	Selective topology	Fixed topology	Fixed domain	Pheromone

向复杂对抗性任务的决策方法或体系. 当面对信息不完全的对抗环境时, 传统规划方法不易处理任务执行中可能出现的多机任务冲突, 而大规模计算手段又缺乏实时决策能力, 这些瓶颈使得兼具适应性和快速性的决策手段成为协同决策亟待解决的难点之一.

生物群集行为是自然界存在的一种普遍现象<sup>[1,5]</sup>, 先前的研究已表明人们可以通过模仿鸟群、鱼群、蜂群等行为, 研究其群体性决策机制, 进而用于构建集群系统的决策系统框架<sup>[6]</sup>. 狼群在认知、分工, 以及复杂环境适应性等方面具有突出的优势<sup>[7]</sup>, 尤其在群集行为中体现出主动学习、紧密配合, 以及快速响应等特征, 呈现出群智能的独特性质. 表1列举了狼群、鸟群、鱼群, 以及蚁群在几种行为方面的不同特点<sup>[8~10]</sup>. 在空战格斗等对抗环境下, 无人机集群所面临的是高动态的拒止环境. 与一般飞行环境相比, 对抗环境普遍存在敌方目标的信号干扰和火力威胁, 这使得无人机集群必须具备在有限探测能力下的快速精确的动作响应. 狼群群集行为体现出较强的应变能力和组织能力, 使得狼群系统即使在危险环境下也不会出现失控和崩溃, 面对比自身体型更大、力量更强的猎物能够采取灵活的配合与决策将其制服, 面对食物或领地竞争等突发事件也能够及时组织成员参与化解. 由此可见, 狼群群集行为与对抗环境下的无人机集群机动飞行紧密契合, 将狼群智能应用于无人机集群协同决策与控制过程, 对提升无人机集群对抗能力具有重要借鉴意义.

## 2 狼群智能行为

### 2.1 环境学习与认知

狼群作为一类认知能力强且组织严密的动物种群, 善于在恶劣的自然环境中保持自身的生存优势, 这与其较强的环境适应性不无关联. 狼群依赖对环境的学习和理解提升环境适应性, 善于把握目标的细微特征, 通过对微妙信息的挖掘和关联, 迅速掌握目标整体行为特征<sup>[11]</sup>. 另外, 狼群也会依靠群体的力量进行环境的感知, 通过与同伴亲近或呼唤, 建立个体之间的信息交流, 进而扩大感知范围. Hiestand<sup>[12]</sup>通过方向判别与跟踪试验, 对比研究狼群的环境认知能力特征. 实验过程中, 设定不同的环境标志以引导狼群和牧羊犬, 进而观察其行为表现. 随着标志物数量的增加和其空间分布的变化, 方位辨别复杂度会逐步增加. 观测结果发现, 狼群在新环境中体现了较强的三维定向能力和敏捷性, 能够通过反复观察排除错误的方向指引. Lampe等<sup>[13]</sup>根据狼群驯化行为特征, 分析其在人为指示下的学习与事物辨别能力. 其中, 人为指示任务包括一组人为提供的对象选择任务, 以测试狼群在交际、行为和因果辨识等认知方面的能力. 观测结果发现, 狼群在因果关系辨别中表现突出, 从而进一步推断狼群具有较强的事物记忆和关联属性. Udell等<sup>[14]</sup>发现狼群在与人类的交互行为中能够对人类提供的行为暗示表现出较高的敏感性, 可以较快地理解人为指示, 并执行指示任务.

### 2.2 围捕协同决策

围捕过程是体现狼群协同决策的重要依据<sup>[15]</sup>, 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协调一致的狩猎行动. 组织分工与群体交互是围捕协同决策的两个主要层面. 由于狼群内部普遍存在社会等级<sup>[16]</sup>, 各等级之间的利益与分工划分较为稳定. 而随着环境的变化, 个体等级会根据优胜劣汰不断进化, 强壮的个体始终能够得到领导者地位<sup>[17]</sup>, 从而维护整个群落的社会稳定. 在围捕行为中, 狼群通过社会等级调度成员的任务属性, 利用成员间紧密的合作关系, 完成对大型目标的成功捕获. Baan 等<sup>[18]</sup> 通过对野外狼群的长期观测, 着重对其内部可能存在的矛盾消解机制进行了实证研究. 观测结果得出在合作狩猎过程中, 不同等级的成员之间会通过和解优先的策略降低对抗或冲突概率, 进而提升系统整体稳定性. Palagi 等<sup>[19]</sup> 发现野生狼群在内部竞争出现后存在主动和解的现象, 保证等级地位低的个体也能够获得收益.

群体决策与行动的一致性依赖于成员的频繁交互. 为研究狼群交互机理, 研究人员通常会采集围捕过程中的运动轨迹, 进而分析个体交互、空间分布、层级结构、群组构型等特性<sup>[20]</sup>. Schlägel 等<sup>[21]</sup> 通过采集野生狼群的移动数据, 获得其位置特征分布图, 利用数据拟合得到了狼群的时空相关运动模型. 通过进一步的模型仿真, 得出狼群行为策略与环境信息和历史信息具有相关性. Cassidy 等<sup>[22]</sup> 通过长期的实证观察和分析提出种群规模、成员组成和空间移动方向与狼群狩猎过程存在相关性, 其中种群构成方式是影响其猎捕攻击效率的主要因素.

### 3 狼群智能与无人机集群映射机理

狼群智能与无人机集群协同决策在映射机理上存在一致性. 首先, 两者行为特征相似. 狼群系统在狩猎等威胁环境下的群集行为是典型的动态演变过程, 面对威胁目标需要利用快速准确的决策手段选择性地采取有利于自身的行动策略以实现对目标的牵制. 对抗环境下的无人机集群则是在高动态的拒止环境下, 面对对抗目标需要进行分布式决策与控制<sup>[23]</sup>, 通过协同配合完成小组范围内对目标的夹击或追踪. 其次, 两者在环境认知方面的需求相似. 狼群需要借助团队配合和互助进行大范围狩猎环境的搜捕, 掌握围捕环境和狩猎目标的典型特征. 无人机集群在拒止环境下需要借助多机信息交互和融合实现对动态目标的识别跟踪、对干扰信号的过滤. 再次, 两者的协同机制相似. 狼群系统稳定性和决策的一致性依赖于其内部的社会等级结构, 由于成员之间具有明确的交互关系, 当领导者确定群体任务并得到群集成员的认同后, 狼群系统会迅速做出正确决策. 无人机集群则通过建立本机与相邻友机的通信拓扑, 在集群成员之间达到决策的一致性协议<sup>[24]</sup>, 结合准确的态势感知信息, 做出有利于态势发展的机动策略. 综上所述, 狼群智能行为机制可作为强化无人机集群对抗决策的重要依据.

如图 1 所示, 映射机理可着重从环境认知与决策机制两个方面考虑. 在认知方面, 可借鉴狼群认知行为形态学特征, 抽象出一种群集态势信息感知计算模型. 其中, 参照狼群对狩猎目标动态变化的敏感特征, 在计算模型中综合考虑对抗目标移动、外在特征、环境变化率等因素, 挖掘感兴趣区域. 以非监督式学习为框架, 结合多机对抗目标信息共享, 利用信息融合提升对抗目标的预测和定位精度. 在决策机制方面, 可通过狼群在合作狩猎场景下群体成员的运动相关性, 结合其社会组织与等级特性, 建立狼群合作狩猎运动模型, 并制定成员交互规则. 基于群集运动研究中的个体协调运动模型 (如 Reynolds 三原则), 考虑机动飞行、通信范围、任务激励等约束, 分别设计无人机集群协调运动动力学模型和拓扑规则, 构建多机协同控制律, 保证集群运动的协调一致. 为应对频繁出现的外部干扰和突发情况, 可以对狼群合作狩猎运动进行阶段性分解, 构建任务状态切换图以实时应对状态突变, 以增强集群的快速响应.

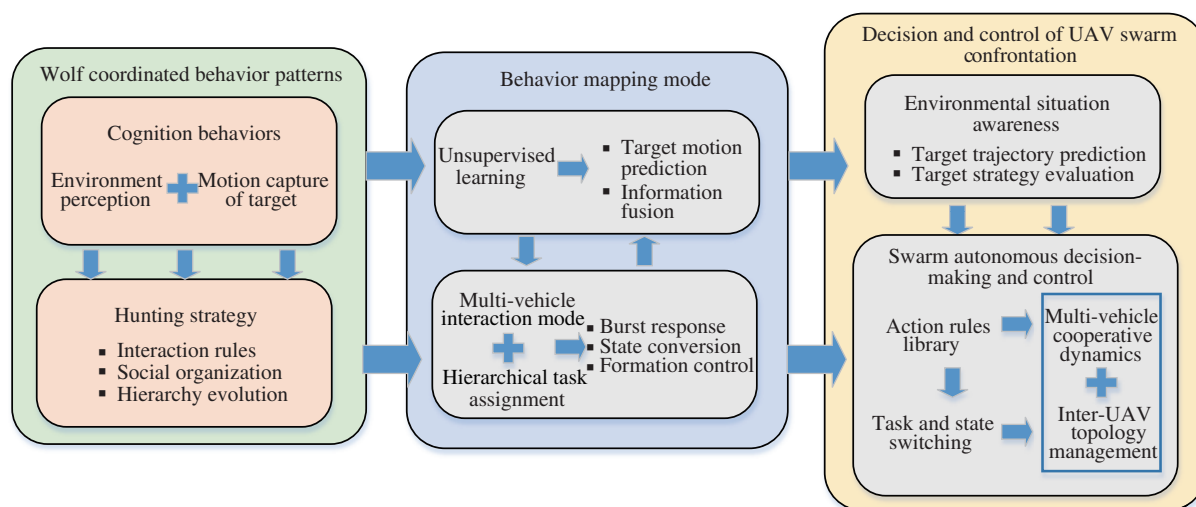


图1 (网络版彩图) 从狼群智能到无人机集群对抗决策的映射机理

**Figure 1** (Color online) Mapping mechanism from the wolf pack intelligence to the decision-making of UAV swarm confrontation

#### 4 狼群智能在无人机集群系统中的应用

近年来,随着人工智能、仿生学等跨学科在工程技术领域的快速发展,基于狼群行为特征的多无人系统协调控制与协同决策技术成为了广泛研究的热点.无人机集群作为一类特殊的多无人系统,其决策机理与多无人系统相一致. Weitzenfeld<sup>[25]</sup> 借鉴狼群捕猎行为提出了一种多机器人驱动控制框架,可实现捕猎和躲避等不同任务形态动作.在该狼群捕猎行为模型中,狼群被分为头狼和猛狼两类,每种角色可根据探测信息的质量进行策略切换.通过硬件平台试验和相关数据的记录和分析,可使机器人模拟狼群游走、跟随、攻击、躲避等行为和任务. Madden 等<sup>[26]</sup> 基于狼群围捕的实证化研究,重新定义了 Weitzenfeld 的围捕模型.在该模型中,狼群中角色以一种基于物理力引导的方式发生变化,同时增加了对猎物逃跑行为的反应策略. Duan 等<sup>[27]</sup> 提出了一种基于狼群行为机制的自主编队控制方法,采用人工势场法设计了多无人机协同编队控制器,基于狼群社会组织关系确定了无人机层次编队模型.通过分析多个无人机自主编队与狼群编队行为之间的映射关系,设计了基于狼群层级行为机制的编队保持控制器. Escobedo 等<sup>[28]</sup> 设计了一系列多智能体系统的移动策略,以模拟狼群围捕场景.该控制策略分为两个基于最小安全距离和驱动力控制的分散控制规则,通过调节相关系数能够再现狼群捕猎行为中跟踪猎物、追捕、包围猎物等主要特征.

#### 5 研究展望

狼群智能不仅是纯生物学和行为学研究的重要课题,也是物理、信息科学甚至控制论领域的研究热点,其在协调运动、认知理论等方面的应用已成为解决和优化交叉学科领域问题的重要参考来源.然而,受制于实验条件,人们对于狼群行为的认识大多还停留在实验现象的表面,对于其内在机制的思考还有待进一步深入:

(1) 在智能认知方面,现有行为学研究往往只考虑了片面的环境因素,导致观测结果不具有普适

性, 且认知理论研究相对较少, 需要有效的理论基础支撑;

(2) 在社会性研究方面, 有关狼群狩猎过程中的角色分配和分工机制的研究较为广泛, 然而这类研究大多还是基于单一场景的观测试验, 对于环境变化下的分工机制还需深入理解;

(3) 在交互方式方面, 现有研究很少结合将实证化数据与相关理论建模相结合, 建立既符合实证现象又具有说服力的狼群协同决策模型, 是未来研究发展的主要趋势。

关于狼群智能在无人机集群中的应用研究, 未来研究趋势可总结如下:

(1) 狼群系统的抽象与简化. 狼群系统是自然界的复杂系统, 呈现出类型繁多的行为模态. 狼群智能技术需要从狼群系统的复杂行为中进行提炼和抽象, 经过模型和工程需求的相互匹配, 才能用于设计集群智能. 对于复杂系统而言, 关键特征的提取和简化常常能够事半功倍. 因此, 狼群系统特征行为模态的抽象化研究对于狼群智能的工程化应用有重要意义。

(2) 狼群智能的理论性研究. 人类在研究生物智能时不仅要注重仿生技术的功效, 更应该理解其内在规律的可塑性. 仿生技术的理论化, 狼群智能决策算法的模型化, 是人们深入理解狼群智能行为机理, 拓展集群智能技术应用的必经之路。

(3) 狼群智能向无人机集群智能的转化. 正如人工智能应用于机器以提升其智能化一样, 狼群智能应用于无人机集群是以提升其任务能力为根本目的. 无人机集群在动态对抗环境下需要动态感知、快速决策和足够的系统一致性. 因此, 狼群智能技术研究首要应是面向无人机集群行为模型和工程需求. 在此基础上, 探索生物种群的本质规律, 结合理论建模和工程手段优化无人机集群系统的控制与决策体系。

## 6 结论

狼群作为一类认知能力强且组织严密的生物群体, 具有鲜明的认知、协作与环境适应能力, 其智能行为机制对于无人机集群系统的决策设计具有很强的借鉴意义. 模拟狼群在合作狩猎中的行为机制, 有助于无人机集群对抗决策体系的优化设计. 本文对近年来狼群行为机制及其在无人机集群系统领域的相关研究进展进行了总结和概述, 提出了狼群智能与无人机集群协同决策相融合的若干思路和建议, 并对后续研究重点进行了展望。

## 参考文献

- 1 Duan H B, Qiu H X. Unmanned Aerial Vehicle Swarm Autonomous Control Based on Swarm Intelligence. Beijing: Science Press, 2018 [段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制. 北京: 科学出版社, 2018]
- 2 Duan H B, Li P. Autonomous control for unmanned aerial vehicle swarms based on biological collective behaviors. Sci Technol Rev, 2017, 35: 17–25 [段海滨, 李沛. 基于生物群集行为的无人机集群控制. 科技导报, 2017, 35: 17–25]
- 3 Luo D L, Xu Y, Zhang J P. New progresses on UAV swarm confrontation. Sci Technol Rev, 2017, 35: 26–31 [罗德林, 徐扬, 张金鹏. 无人机集群对抗技术新进展. 科技导报, 2017, 35: 26–31]
- 4 Kim D G, Park G H, Kim H N, et al. Computationally efficient TDOA/FDOA estimation for unknown communication signals in electronic warfare systems. IEEE Trans Aerosp Electron Syst, 2018, 54: 77–89
- 5 Qiu H X, Duan H B. From collective flight in bird flocks to unmanned aerial vehicle autonomous swarm formation. Chinese J Eng, 2017, 39: 317–322 [邱华鑫, 段海滨. 从鸟群群集飞行到无人机自主集群编队. 工程科学学报, 2017, 39: 317–322]
- 6 Couzin I. Collective minds. Nature, 2007, 445: 715
- 7 Udell M A R, Dorey N R, Wynne C D L. Wolves outperform dogs in following human social cues. Animal Behav, 2008, 76: 1767–1773

- 8 Ballerini M, Cabibbo N, Candelier R, et al. Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: evidence from a field study. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2008, 105: 1232–1237
- 9 Nagy M, Ákos Z, Biro D, et al. Hierarchical group dynamics in pigeon flocks. *Nature*, 2010, 464: 890–893
- 10 Vicsek T, Zafeiris A. Collective motion. *Phys Rep*, 2012, 517: 71–140
- 11 Bentosela M, Wynne C D L, D’Orazio M, et al. Sociability and gazing toward humans in dogs and wolves: simple behaviors with broad implications. *Jrnl Exper Anal Behav*, 2016, 105: 68–75
- 12 Hiestand L. A comparison of problem-solving and spatial orientation in the wolf (*canis lupus*) and dog (*canis familiaris*). *Behav Genet*, 2011, 41: 840–857
- 13 Lampe M, Bräuer J, Kaminski J, et al. The effects of domestication and ontogeny on cognition in dogs and wolves. *Sci Rep*, 2017, 7: 11690
- 14 Udell M A R, Dorey N R, Wynne C D L. The performance of stray dogs (*canis familiaris*) living in a shelter on human-guided object-choice tasks. *Animal Behav*, 2010, 79: 717–725
- 15 MacNulty D R, Smith D W, Mech L D, et al. Nonlinear effects of group size on the success of wolves hunting elk. *Behav Ecol*, 2012, 23: 75–82
- 16 Bonanni R, Cafazzo S, Abis A, et al. Age-graded dominance hierarchies and social tolerance in packs of free-ranging dogs. *Behav Ecol*, 2017, 28: 1004–1020
- 17 MacNulty D R, Mech L D, Smith D W. A proposed ethogram of large-carnivore predatory behavior, exemplified by the wolf. *J Mammalogy*, 2007, 88: 595–605
- 18 Baan C, Bergmüller R, Smith D W, et al. Conflict management in free-ranging wolves, *canis lupus*. *Animal Behav*, 2014, 90: 327–334
- 19 Palagi E, Cordoni G. Postconflict third-party affiliation in *canis lupus*: do wolves share similarities with the great apes? *Animal Behav*, 2009, 78: 979–986
- 20 Dickie M, Serrouya R, Mcnay S, et al. Faster and farther: wolf movement on linear features and implications for hunting behaviour. *J Appl Ecol*, 2017, 54: 253–263
- 21 Schlägel U E, Merrill E H, Lewis M A. Territory surveillance and prey management: wolves keep track of space and time. *Ecol Evol*, 2017, 7: 8388–8405
- 22 Cassidy K A, MacNulty D R, Stahler D R, et al. Group composition effects on aggressive interpack interactions of gray wolves in Yellowstone National Park. *Behav Ecol*, 2015, 26: 637–642
- 23 Qiu H X, Duan H B, Fan Y M. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation based on the behavior mechanism in pigeon flocks. *Control Theory Appl*, 2015, 32: 1298–1304 [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. *控制理论与应用*, 2015, 32: 1298–1304]
- 24 Niu Y F, Xiao X J, Ke G Y. Operation concept and key techniques of unmanned aerial vehicle swarms. *Defense Technol Rev*, 2013, 34: 37–43 [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. *国防科技*, 2013, 34: 37–43]
- 25 Weitzenfeld A. A prey catching and predator avoidance neural-schema architecture for single and multiple robots. *J Intell Robot Syst*, 2008, 51: 203–233
- 26 Madden J D, Arkin R C, Macnulty D R. Multi-robot system based on model of wolf hunting behavior to emulate wolf and elk interactions. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Tianjin, 2010. 1043–1050
- 27 Chen H H, Duan H B. Multiple unmanned aerial vehicle autonomous formation via wolf packs mechanism. In: *Proceedings of IEEE/CSAA International Conference on Aircraft Utility Systems*, Beijing, 2016. 606–610
- 28 Escobedo R, Muro C, Spector L, et al. Group size, individual role differentiation and effectiveness of cooperation in a homogeneous group of hunters. *J R Soc Interface*, 2014, 11: 20140204

## From wolf pack intelligence to UAV swarm cooperative decision-making

Haibin DUAN<sup>1\*</sup>, Daifeng ZHANG<sup>1</sup>, Yanming FAN<sup>2</sup> & Yimin DENG<sup>1</sup>

1. *Bio-inspired Autonomous Flight Systems Research Group, Science and Technology on Aircraft Control Laboratory, School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China;*



2. *Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110035, China*

\* Corresponding author. E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

**Abstract** Cooperative decision-making of UAVs under complex environments is a crucial mode of combat in future battlefields. Given the uncertainties of the environment and states, the coordination and automation of UAV swarms is a challenging issue faced during swarm combat. Wolves can fast track and enclose the target under complicated surroundings because of their outstanding cognition and cooperation abilities during hunting. The characteristics indicated by the aforementioned intelligent behaviors, such as information recognition and cooperative motion, are consistent with the swarm policy requirements of perception and coordination. The cooperation mechanism of wolf packs should be studied, and its application to UAV swarm combat to obtain a solution for UAV swarm autonomous decision-making needs to be addressed.

**Keywords** UAV swarm, cooperative decision-making, wolf pack intelligence, cognition and cooperation



**Haibin DUAN** was born in 1976. He received his Ph.D. degree in control theory and control engineering from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA) in 2005. Currently, he is a full professor in School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University. He is the vice director of State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems and the leader of the Bio-inspired Autonomous Flight Systems (BAFS)

Research Group. He was an academic visitor at National University of Singapore (NUS) in 2007, a senior visiting scholar at the University of Suwon (USW) of South Korea in 2011, an engineer at Shenyang Aircraft Design Research Institute, Aviation Industry of China (AVIC) in 2006, and a technician at China Aviation Motor Control System Institute from 1996 to 2000. His current research interests include bio-inspired computing, biological computer vision, and multi-UAV autonomous formation control.



**Daifeng ZHANG** was born in 1991. He received his B.S. degree in automation from Hefei University of Technology (HFUT), Anhui, China in 2013, and M.S. degree in control theory and engineering from Beihang University, Beijing, China in 2016. He is currently pursuing his Ph.D. degree in guidance, navigation, and control of aerial vehicles at School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University.

His current research interests include navigation, control and decision of unmanned aerial vehicles, bio-inspired computation, and artificial intelligence.



**Yanming FAN** was born in 1964. He received his B.S. and M.S. degrees from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1985 and 1988, respectively, and his Ph.D. degree from China Aviation Establishment in 2014. He is currently the Ph.D. supervisor, research fellow, and deputy chief engineer of Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Aviation Industry Cooperation of China (AVIC). Dr. Fan is

the deputy director of Technical Committee on Guidance, Navigation and Control (TCGNC), Chinese Society of Aeronautics and Astronautics (CSAA). Additionally, he is the chief expert of AVIC and the adjunct professor of Beihang University and Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. His current research interests include flight control system research and design, signal and image processing, advanced flight control law design and simulation, and flight training simulator design.



**Yimin DENG** was born in 1989. He received his B.S. and Ph.D. degrees from School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University in 2011 and 2017, respectively. He is currently an assistant professor in School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University. Dr. Deng is enrolled in Young Elite Scientists Sponsorship Program by Chinese Association for Science and Technology and Young Top Talent Support Program by Beihang University. His current research interests include biological computer vision and autonomous flight control.