

doi: 10.7690/bgzdh.2021.03.002

无人机集群智能涌现与演化建模论述

许瑞明

(军事科学院评估论证研究中心, 北京 100091)

摘要: 为研究无人机集群复杂性及智能生成机理, 阐述无人机集群智能涌现与演化的概念及方法。针对无人机集群智能涌现的信息融合、在线任务规划、陌生环境下搜索与攻击优化和集群队形控制 4 个应用领域, 论述其建模需求及原理, 提出无人机集群智能演化的规则、算法和案例 3 个具体演化方向, 并论述实现演化的建模途径, 可对进一步研究无人机集群智能涌现和演化建模提供理论参考。

关键词: 无人机; 集群作战; 智能涌现; 智能演化; 建模

中图分类号: E917 **文献标志码:** A

Discussion on Intelligent Emergence and Evolution Modeling of UAV Cluster

Xu Ruiming

(Center of Assessment & Demonstration Research, Academy of Military Science, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to study complexity and intelligent generation mechanism of UAV cluster, the concepts and methods of intelligent emergence and intelligent evolution of UAV cluster are expounded. This paper discusses the requirements and principles of intelligent emergence modeling for four application areas of UAV cluster intelligent emergence: information fusion, online task planning, search and attack optimization in unfamiliar environment and cluster formation control. This paper puts forward three evolution directions of UAV cluster intelligence, rule evolution, algorithm evolution and case evolution, and discusses the modeling approach to achieve the evolution. It can provide reference for further research on intelligent emergence and intelligent evolution of UAV cluster.

Keywords: UAV; cluster operations; intelligent emergence; intelligent evolution; modeling

0 引言

无人机集群作为一类特殊的系统, 具有涌现、演化、非线性、不确定性、开放性、分布式作战和体系稳定性等诸多特性, 但只有涌现和演化最能体现无人机集群的复杂性特征。其中, 智能涌现和智能演化是无人机集群涌现与演化的重点。无人机集群智能涌现和智能演化建模既是探索无人机集群复杂性之需, 又是研究无人机集群智能生成机理之需。

1 智能涌现建模

1.1 智能涌现概念

系统科学将整体才具有、孤立的部分及其总和不具有的特性称为整体涌现性, 简称涌现性。通常涌现性具有结构效应和规模效应 2 种^[1]。结构效应如侦察、打击、通信、导航和干扰等不同类型的无人机平台通过适当的组织, 形成执行对地/舰打击的无人作战系统, 实现不同类型力量组合“1+1>2”的效果。规模效应如众多无人机平台从不同方向同时对同一目标实施攻击, 达到令防御方防不胜防、

顾此失彼的效果。

除了常规的结构效应、规模效应外, 无人机集群还具有特殊的整体涌现行为——集群智能涌现。关于集群智能涌现概念, 最早来自于对自然界中蜜蜂、蚂蚁等昆虫群体行为的研究。这些昆虫个体的智能并不高, 看起来并没有集中的指挥, 但他们却能协同工作, 依靠群体的能力, 发挥出超出个体的宏观层面上的智能^[2-3]。这种将个体具有简单智能, 通过个体间、个体与环境间的交互产生的整体层面的智能行为现象称为集群智能涌现。

1.2 智能涌现建模方法

基于 Agent 的建模是迄今为止智能涌现建模最为有效的方法。

Agent 的概念在不同的领域具有不同的含义^[4]。在人工智能领域, Agent 被看作“智能体”, 指在某一环境中运行, 并能响应环境的变化, 灵活、自主地采取行动以满足其设计目标的计算实体, 一般具有某种程度的感知、推理、学习、自适应和协作能力。在建模仿真领域, 把组成复杂系统的具有主动

收稿日期: 2020-11-20; 修回日期: 2020-12-25

作者简介: 许瑞明(1963—), 男, 江苏人, 硕士, 研究员, 从事军事运筹学、作战建模与仿真、无人系统作战运用研究。

E-mail: 2557263279@qq.com。

性的个体或单元称为 Agent，主要研究这些 Agent 的个体行为如何导致整个系统的整体“涌现”行为。

如图 1 所示,单个 Agent 的基本结构由感知器、效应器和处理器 3 部分构成。Agent 的结构通常分为反应型、慎思型以及混合型 3 种,三者不同之处在于处理器的差异。反应型 Agent 的处理器只是简单地对外部刺激做出反应,可采用简单的 if-then 规则或神经网络模型实现反应行为。慎思型 Agent 的处理器将感知的环境对 Agent 作用信息与历史数据进行对照融合,针对需要达到的目标规划 Agent 的行动计划做出决策。反应型 Agent 能快速响应环境刺激与变化,但其智能性较低。慎思型 Agent 具有较高的智能性,能体现为达到目标主动行动的特性,但无法对环境的变化做出快速响应。混合型 Agent 综合了二者的优点,既具有较高的智能,又具有较快的响应速度。

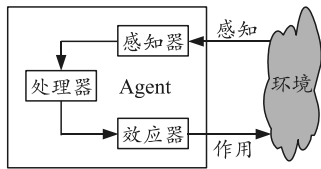


图 1 Agent 基本结构

单个 Agent 的能力有限,而现实问题比较复杂;因此,需要将多个 Agent 连接起来,通过他们之间的协同工作共同完成复杂的任务。这种多 Agent 协同工作组成的系统称为多 Agent 系统。

实现多 Agent 协同工作的关键是建立 Agent 之间的通信和交互关系。不同类别的多 Agent 系统,其个体 Agent 之间的通信方式不同。蚂蚁以信息素作为媒介与其他蚂蚁进行通信,蜜蜂通过舞姿与其他个体分享信息,无人机之间通过无线信道及飞行姿态实现通信。个体 Agent 之间交互的内容也各不相同,蚂蚁、蜜蜂与同伴之间只是交流有关食物等方面的信息,而无人机间交流的信息要丰富得多,包括敌目标类型、数量、位置、运动方向和速度等情报信息,无人机的任务、机动路线等规划信息等。多 Agent 建模除了构建单个 Agent 模型外,还要构建 Agent 间的作用关系模型。Agent 间的作用关系模型与个体 Agent 的感知器、效应器模型有关联但不同。个体 Agent 的感知器、效应器模型着重对通信和交互效果建模,作用关系模型则要对随时间变化的通信和交互关系进行建模。

1.3 无人机集群智能涌现建模

无人机集群的智能涌现,主要体现在信息融合、

在线任务规划、陌生环境下搜索与攻击优化和集群队形控制领域。

1.3.1 信息融合

信息融合是指人们通过对空间分布的多源信息——各种传感器的时空采样,对所关心的目标进行检测、关联(相关)、跟踪、估计和综合等多级多功能处理,以更高的精度、较高的概率或置信度得到所需要的目标状态和身份估计,以及完整、及时的态势和威胁评估,为指挥员提供有用的决策信息^[5]。

信息融合体系结构有集中式、分布式 2 种基本类型,但只有分布式信息融合才能实现信息融合的智能涌现。在分布式信息融合中,主要有本地融合和融合中心 2 类 Agent。群体智能无人系统的融合任务由多个本地融合 Agent 和融合中心 Agent 按照预先约定规则共同协作完成。如对运动目标的信息融合,本地融合 Agent 完成局部估计,融合中心 Agent 基于局部估计完成全局估计。信息融合的任何单个 Agent 都不具备独立完成融合任务的能力,但将各个 Agent 通过有限的通信联络组织起来,就可以完成较为复杂的信息融合任务。分布式信息融合结构如图 2 所示。

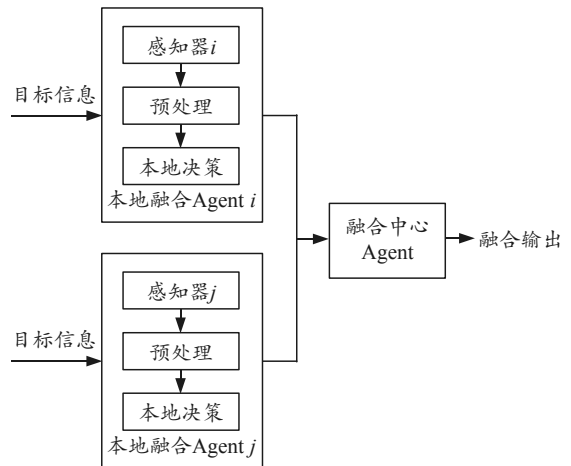


图 2 分布式信息融合结构

分布式信息融合本地融合 Agent 预处理完成初级滤波,对于雷达来说,预处理主要包括点迹过滤、点迹合并和去野值;本地决策完成传感器级航迹估计与局部分类。融合中心 Agent 完成航迹关联、融合级状态估计和全局分类。

多源信息融合涉及到多方面的理论和技术,并没有统一的算法能够适应所有的场景,所以在应用上,需要针对不同的应用背景选择相应的算法。比较典型的信息融合算法有卡尔曼滤波法、模糊推理法、神经网络法、产生式规则法、贝叶斯概率推理

法和 Dempster-Shafer 证据推理法等。

从类别看，分布式信息融合本地融合 Agent 和融合中心 Agent 均属于慎思型 Agent，但还不是具有复杂功能的慎思型 Agent，因为其规划功能(规划各个传感器的探测任务)或者没有，或者不太复杂。

另外，无论是本地融合 Agent 还是融合中心 Agent，都属于无人机 Agent 的一个组成部分。

1.3.2 在线任务规划

无人机集群在线任务规划是无人机处在飞行状态下瞬时完成的任务规划工作。在线任务规划应在预先的离线任务规划基础上进行，主要完成任务分解、任务分配和航路规划等工作。

无人机集群在线任务规划中，各个参与任务规划的无人机地位是平等的，在协同任务规划期间多次与其他无人机交换任务规划信息，最终各无人机共同完成在线任务规划工作。文献[6]研究了无人机集群分布式在线任务规划问题，提出了如图3所示的无人机集群协同任务规划框架。

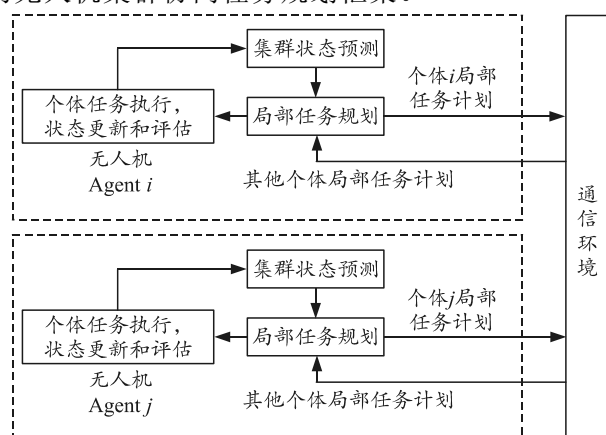


图3 无人机集群协同任务规划框架

分布式在线协同任务规划中各个无人机 Agent 在线任务规划的循环步骤：个体任务执行、状态更新和评估、集群状态预测、局部任务规划。其中，状态评估指结合任务需求形成对当前任务执行状态的判断，如任务时间紧迫程度、任务执行危险程度等。在无人机 Agent 进行局部任务规划时要与其他无人机 Agent 进行交互规划过程信息和结果信息。无人机集群协同任务规划采用异步并行推进策略。异步并行推进策略是一种真正的多节点独立化分布式并行推进方式，各节点按照各自的速度推进，仅将其他节点当前得到的子问题的解作为参考和约束，从而形成对原问题求解状态的整体认识。在线任务规划中的任务分解主要采用基于规则的推理方法实现；任务分配、航路规划多采用启发式优化方

法实现。

从类别看，无人机集群在线任务规划中的无人机 Agent 属于慎思型 Agent。

1.3.3 陌生环境下搜索与攻击优化

一批危险小型目标(如暴恐分子)处于陌生环境中，迫切需要发现与清除，但目标在何处，到达目标的路径均未知。因为陌生环境无法进行预先规划，只能运用现实的军事力量去搜索。廉价、功能简单的具有群体智能的无人机集群为执行这样的搜索和攻击行动提供了一种可行选择。

无人机集群执行搜索和攻击行动有3个主要的步骤：

- 1) 隐蔽接近任务区域。无人机集群根据指令，自主飞行到任务区域附近隐蔽集结。
- 2) 搜索目标。各搜索无人机按一定搜索策略进行搜索，发现目标或到达指定时间后报告搜索情况。
- 3) 对目标攻击。攻击无人机根据搜索无人机提供的环境信息，选择优化路径，飞行至目标区域，对目标实施攻击。

无人机集群执行搜索和攻击行动需要一定的规则支持，这些规则主要包括目标搜索、路径选择和目标选择规则等。

目标搜索规则规定在每个决策点(每隔一段时间或机动一定距离)无人机个体搜索机动的方向。目标搜索规则可简可繁。最简单的搜索规则是无限定角度的随机搜索，即每个决策点在 360° 范围内随机选择搜索机动的方向。为提高搜索效率，无人机应尽量避免重复搜索，这样搜索规则可能会趋于复杂。稍微复杂的搜索规则是与已经搜索区域保持较小的重复角度的基础上的随机搜索。

路径选择规则是选择从出发地到达目标所在位置的优化路径。最简单的路径选择规则是比较各个发现目标的无人机的路径，选择其中最短的一条即可。比较复杂的路径选择规则是分段优化规则，但需要较复杂的配套算法予以支持。

目标选择规则规定对目标区域多个目标攻击的选择策略。最简单的目标选择规则是攻击无人机到达目标区后，随机选择一个目标进行攻击，后续攻击无人机在未被选择目标中随机选择一个目标进行攻击，也可规定以目标体积大小、所持武器类型等作为选择依据的规则。

陌生环境下，针对小型目标执行搜索与攻击的无人机只需要简单的智能。这样的无人机可归类为

反应型 Agent, 其处理器只需能够处理简单的 if-then 规则和具有简单的计算能力即可担负相应的任务。通过多个这样的 Agent 个体之间的交互及 Agent 个体与环境的交互, 作为由多个 Agent 个体组成的群体能够发现目标, 优选攻击路径, 以规定的策略(非劣解)攻击目标, 实现一定程度的整体智能涌现。

1.3.4 集群队形控制

无人机集群队形控制基本功能是实现集群队形保持, 高级功能包括队形切换、缩放、旋转以及避障等。

无人机集群队形控制有集中式和分布式控制 2 种方式。分布式控制只需要局部信息、无中心计算节点, 具有通信量小和可靠性高等优点, 更适用于数量众多的小微型无人机集群的队形控制^[7]。由于小微型无人机电荷量小, 无法搭载复杂的计算设备, 则基于简单规则的分布式队形控制成为解决数量众多的小微型无人机集群的队形控制的一种可行的技术途径。

Reynolds 于 1986 年提出 Boid 集群运动模型以及聚集 (cohesion)、分离 (separation) 和对齐 (alignment) 等个体飞行行为准则^[8]。基于 Boid 模型等研究成果所构建的规则, 无人机集群能够完成队形保持、避障等基本动作, 实现集群队形基于简单规则的有限智能控制。

文献[9]研究了基于规则的无人机集群运动控制问题, 构建了无人机集群避撞、聚集和速度匹配等规则, 通过仿真验证了基于规则实现无人机集群运动控制的可行性。避撞规则指在飞行过程中无人机与无人机之间需保持一定的横向间隔、纵向距离和高度差(三者满足其一即可)以保证飞行安全, 同时防止与障碍物相撞; 聚集规则指无人机之间有互相靠拢的趋势以形成编队; 速度匹配指集群内所有无人机需保持相同的速度(允许在执行机动动作时适当调整自身速度)以保证集群的整体运动。

基于规则的无人机集群队形控制中的无人机个体是典型的反应型 Agent, 其决策采用 if-then 规则实现。

2 智能演化建模

2.1 智能演化概念

系统的结构、状态、特性、行为和功能等随着时间的推移而发生变化, 称为系统的演化。系统

的演化既可以是定性性质的改变, 又可以是定量特征的变化。系统演化的动力既可以来自系统内部, 即组分之间的合作、竞争、矛盾等导致系统关联方式的改变, 进而引起系统功能及其他特性的改变; 系统演化的动力也可来自外部, 环境的变化及环境与系统相互联系和作用方式的变化, 都会在不同程度上导致系统内部发生变化, 包括组分特性、结构方式的改变^[1]。

智能演化是系统与智能相关的特性、行为、功能随着时间的推移而发生的变化, 是系统演化的一个重要内容。无人机集群智能演化是一个离散渐进、虚实结合的过程。离散渐进是指无人机集群执行任务是离散的, 每执行一次任务, 其智能能力就有所提高。虚实结合的“实”指从实际执行任务的案例中学习, “虚”指以实际案例为基础, 通过举一反三构建虚拟案例进行学习。

2.2 智能演化建模方法

智能演化建模的主要方法是机器学习方法。机器学习方法是指通过计算的手段, 从以“数据”形式体现的“经验”中产生反映经验中潜在规律“模型”(model)的一种智能生成方法。机器学习按照学习形式分为“监督学习”(supervised learning)和“无监督学习”(unsupervised learning)2 类, 分类和回归是前者的代表, 聚类则是后者的代表^[10]。常见的计算学习算法有决策树、神经网络(含深度学习)、支持向量机、贝叶斯分类器、随机森林、聚类和强化学习等算法。

基于案例的推理是另一种机器学习方法, 不需要复杂的学习算法, 处理机构简单, 非常容易实现。

2.3 无人机集群智能演化建模

智能演化在智能涌现基础上实现, 因而无人机集群智能演化建模可基于智能涌现架构实现, 智能演化建模是对智能涌现建模的补充。

根据无人机集群智能涌现建模分析, 考虑机器学习应用到无人机集群智能演化的技术可行性, 无人机集群智能演化的途径主要是改变集群智能涌现生成的规则和算法, 以及增加基于案例推理所依据的案例(事实)。

2.3.1 规则演化建模

规则演化通过规则生成、规则优选和规则参数优化等实现。

规则生成有自顶向下和自底向上 2 种方法^[10]。

自顶向下法从比较一般的规则开始, 逐渐添加新文字以缩小规则覆盖范围, 直到满足预定条件为止, 该方法是规则逐渐“特化”(specialization)的过程。自底向上即从比较特殊的规则开始, 逐渐删除文字以扩大规则覆盖范围, 直到满足条件为止, 是规则逐渐“泛化”(generalization)过程。规则优选通过规则排序和淘汰劣等规则实现。规则参数优化通过修改规则参数使规则更有效。

无人机集群规则演化包括问题求解规则和实体行动规则演化 2 类。

2.3.1.1 问题求解规则

可以演化改进的问题求解规则为任务分解和任务分配规则。

1) 任务分解规则。

为了实现任务分解的自动化, 任务分解规则通常需要明确各个子任务及执行优先级、子任务指标要求(如毁伤率要求)、子任务间时序要求、协同要求(协同关系、空间协同要求、时间协同要求、电磁频谱协同要求等)、协同要求满足程度(百分比)等。

任务分解规则的演化途径一是更新规则, 二是修改规则参数。更新规则靠机器学习难度较大, 而修改规则参数通过机器学习完全可以做到。任务分解规则中可以修改的规则参数有子任务优先级、协同要求满足程度等。

2) 任务分配规则。

任务分配主要靠任务分配算法实现, 任务分配规则起辅助作用。

任务分配规则主要有编组规则和编组-任务匹配规则 2 类。编组规则规定多少架、哪些种类无人机可以编为一组; 编组-任务匹配规则规定哪些编组可以执行哪些任务, 并明确编组-任务匹配优先级。

任务分配规则的演化途径: 一是删除效率低下的编组规则和编组-任务匹配规则, 二是修改编组-任务匹配优先级(属于规则优选范畴)。

2.3.1.2 实体行动规则

可对陌生环境下搜索与攻击优化中的目标搜索规则、目标选择规则做演化改进。对于目标搜索规则, 可修改优化搜索的重复角度; 对于目标选择规则, 可修改选择准则(属于规则优选范畴)。

集群队形控制规则演化采用自顶向下方法细化避撞、聚集和速度匹配规则内容, 如针对不同任务类型、不同威胁条件, 确定避撞、聚集和速度匹配规则具体的规则参数。

2.3.2 算法演化建模

算法演化主要是优化算法参数。

神经网络、群体智能优化算法是无人机集群智能生成的重要方法。神经网络方法是信息融合领域目标分类、威胁识别的重要方法。群体智能优化算法是任务分配、航路规划的重要方法。

神经网络方法是天生的机器学习方法, 本质是通过修改连接权重和阈值来逼近某一特定性质的连续函数, 而修改连接权重和阈值通过机器学习达成。

群体智能优化算法虽然有多种, 但这些算法均具有模拟自然界相关生物组织和生物系统的智能特征^[11]。这些算法或多或少都有一些算法控制参数, 如蚁群算法的信息启发因子、信息素挥发系数、粒子群算法的加速因子等^[12]。此类算法能否成功与算法的控制参数设置有很大关系。采用机器学习方法, 通过多样本比较可以优化这些算法参数。

2.3.3 案例演化建模^[13]

案例演化即通过对无人机集群作战案例知识的积累, 实现基于案例的推理及提高案例推理的适应性。案例演化建模即案例推演建模。无人机集群智能演化的案例推理主要应用于信息融合中的威胁判断、任务分解和任务分配等领域。

基于案例推理本质上是一种基于记忆的推理, 也是一种重要的机器学习方法。基于案例推理遇到新问题时, 在案例库中检索过去解决的类似问题及其解决方案, 并比较新、旧问题发生的背景和时间差异, 对旧案例解决方案进行调整和修改以解决新的问题; 对解决新问题的方案进行评价和学习, 并将其保存到案例库中。

基于案例的推理主要需要解决案例表示、案例检索、案例的调整和修改、案例评价等问题。

案例一般由问题的描述、相应的解决方案以及方案实施效果 3 部分组成, 因此案例一般可表述为三元组的形式〈问题; 解决方案; 实施效果〉。对于问题、解决方案、实施效果的表示可采用框架等知识表示方法。案例检索有多种方法, 基于距离的相似性度量方法是一种简单有效的方法。案例的调整和修改由系统和用户共同完成, 系统根据提前预定的某种案例修改策略来对相似案例的解决方案进行调整和修改, 并将调整和修改后的方案交给用户; 用户再根据需求和新情况对案例进行修改和调整, 最终产生适用于新问题的解决方案。