

OODA-L 模式下的智能无人集群作战仿真建模框架*

邹立岩, 张明智, 柏俊汝

(国防大学 联合作战学院, 北京 100091)

摘要:介绍了智能无人集群作战的相关概念,为反映智能无人仿真实体的自主能力和适应能力,提出将学习过程显性化的观察-判断-决策-行动-学习(Observe, Orient, Decide, Act and Learning, OODA-L)模式,并进一步扩展为适用于集群协同的Co-OODA-L模式。在智能无人仿真实体的总体描述上,采用马尔可夫决策过程进行数学抽象处理,提出智能无人Agent的三域分层结构。为体现智能无人集群作战的自主协同、分布式等特点,提出了利用神经网络将可变数量的智能无人Agent融合为同构或异构集群进行协同作战建模的体系结构。

关键词:无人集群;仿真实体;OODA;协同作战;建模框架

中图分类号:TP18; TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2021)04-163-08

Modeling framework for intelligent unmanned swarm operation simulation under OODA-L pattern

ZOU Liyan, ZHANG Mingzhi, BAI Junru

(Joint Operations College, National Defense University, Beijing 100091, China)

Abstract: The related concept of intelligent unmanned swarm operation was introduced. In order to reflect the autonomous capability and adaptive capability of intelligent unmanned simulation entity, the OODA-L (observe, orient, decide, act and learning) pattern was proposed to make the learning process explicit, and was further extended to Co-OODA-L pattern. In the general description of the intelligent unmanned simulation entity, Markov decision process was adopted to carry out the mathematical abstraction, and a three-domain hierarchical structure of intelligent unmanned Agent was proposed. In order to embody the characteristics of autonomous cooperation and distribution of intelligent unmanned swarm operation, an architecture for cooperative operation modeling of swarm was proposed, which uses an artificial neural network to integrate a variable number of intelligent unmanned Agents into a homogeneous or heterogeneous swarm.

Keywords: unmanned swarm; simulation entity; OODA; cooperative operation; modeling framework

随着人工智能(Artificial Intelligence, AI)技术的不断发展,智能无人装备将成为未来智能化战争中的新兴作战力量。与此同时,随着分布式作战概念的提出和发展^[1],以一定数量的智能无人装备组成无人集群来遂行特定的作战任务,被认为是未来智能化战争的典型作战样式,也是当前军事理论研究的前沿和热点问题。由于目前智能无人集群作战尚处于概念研究阶段,因此采用建模仿真方法率先对这一新型作战样式进行前瞻性和探索性研究,可以为未来智能无人集群作战力量的发展和运用提供理论支撑,具有重要的现实意义。本文首先分析了智能无人仿真实体的智能特性需求,在此基础上提出一种将学习过程显性化的OODA-L模式及其扩展形

式;然后给出了智能无人仿真实体的总体描述;最后提出智能无人集群协同作战建模的体系结构。上述内容,旨在从高层上探讨如何对具有较高自主能力的智能无人集群进行作战建模与仿真的理论和方法。

1 智能无人集群作战的相关概念

1.1 无人系统及无人集群

无人系统(unmanned systems)^[2-3]是指在陆、海、空、天各作战域内执行任务的战场机器人系统,如无人车、无人艇、无人潜航器、无人机等无人装备。智能无人系统(intelligent unmanned systems)是指具备一定感知、判断、决策以及自主行为能力的无人系统。无人集群(unmanned

* 收稿日期:2019-12-17

基金项目:国家部委基金资助项目(41401030303)

作者简介:邹立岩(1983—),男,辽宁丹东人,博士研究生,E-mail:zouliyan66@126.com;

张明智(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:zmingz2021@126.com

swarms)是指由一定数量的无人系统组成的集群,具有网络化沟通、自适应协同和集群智能三大基本特征^[4],在接到指令后能够自主完成任务,因此也称为智能无人集群。无人集群在内涵上与机器人集群(robotic swarms)^[5]、集群机器人(swarm robotics)^[6-7]、智能集群(intelligent swarms)^[5,8]以及群化武器^[9]等概念相似,可以认为是同一概念在不同研究视角和不同发展时期的不同表述方式。

1.2 集群作战及智能无人集群作战

一般而言,集群作战(swarming)具有下列特点^[10]:一是以破坏对手的战斗能力聚合为主要作战目的;二是作战单元主要以小型化、分散化、能互联、具有自主或半自主能力的机动单元为主,且作战单元之间能够互相协作;三是要求集成指挥、控制、通信、情报、监视、侦察等能力,并具备待命、包围并发动持续的脉冲式攻击的能力;四是强调采取分布式的队形,以灵活的协同方式和精心设计的组织架构,采取中心化的战略和去中心化的战术,从多个方向对作战目标发起全面攻击。

根据上述集群作战的特点,将其延伸到以智能无人系统为主要作战单元的集群当中,便可演绎出智能无人集群作战的概念,其主要优势体现在:经济优势、数量优势、协同与情报优势^[11]、速度优势等方面。

2 OODA-L 模式的提出

在智能无人集群作战仿真建模中,对智能无人仿真实体建模的重点和难点是其较高的智能水平,而传统的无人集群作战模型中经常采用的自上而下的集中控制思想通常难以表达智能无人仿真实体高度智能化的战场适应能力和协同能力。为此,提出一种具有学习、进化特征的智能无人仿真实体的智能特性表达模式——观察-判断-决策-行动-学习(Observe, Orient, Decide, Act and Learning, OODA-L)模式。

2.1 智能无人仿真实体的智能特性需求

智能无人仿真实体的显著特征是拥有较高的自主能力和适应能力,低级别智能区别于高级别智能的标志在于智能体是否具有感知、理解、决策和学习等能力^[10]。自主能力表现在:智能无人仿真实体能够感知不断变化的自身性能、任务目标、限制条件以及所处的战场环境,及时地做出新的行为规划或对原来的规划进行重规划。同时,在涉及集群作战时,行为规划和执行是一个协同处

理的过程,智能作战仿真实体不仅要具有自主规划能力,而且要能够推断自身决策对其他仿真实体产生的影响^[8],从而衡量自身决策的正确与否。适应能力表现在:智能无人仿真实体具备能够与环境以及其他仿真实体进行交互作用的一种能力。在这种持续的交互作用过程中,主体不断学习或积累经验,并根据学到的经验改变自身的结构和行为方式^[12],其核心是学习能力。

自主能力与适应能力之间是相辅相成、循环演进的关系,这是复杂适应系统(Complex Adaptive System, CAS)的重要特征。在作战仿真建模中,智能问题通常以规则为基础,以各种适合规则的方法表达,很多情况下是用“If-then-else”的形式表示^[13]。因此,基于规则的智能特性主要表现为:智能无人仿真实体通过对当前环境的感知,从现有规则集中选择某一自主行为去执行,而后通过与环境的交互作用,学习产生新的规则并对原有规则集进行更新,进而调整自身行为,这一过程循环往复进行,如图 1 所示。

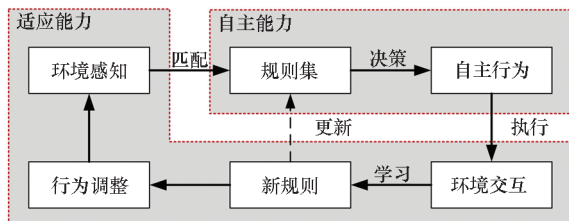


图 1 自主能力与适应能力的相互作用

Fig. 1 Interactions between autonomous capability and adaptive capability

2.2 智能无人仿真实体的智能特性表达

由 2.1 节可知,智能特性表达应当着重反映自主能力和适应能力,两种能力都是在与作战环境的互动过程中不断进化的。但传统的作战仿真实体建模,大多是基于预先、固定的规则来表达智能问题,难以体现“智能”的学习及进化特征。为解决这一问题,提出一种将 OODA 循环与学习过程相融合的智能特性表达模式,简称 OODA-L 模式。OODA 循环之所以可以用于表达上述智能特性,是由于 OODA 循环描述的作战过程本身与 CAS 产生适应性的过程具有相似性。实际上,OODA 循环的提出者博伊德也是 CAS 理论的坚定支持者,OODA 循环的概念不仅被用于说明战争的胜利往往取决于更快地完成 OODA 循环的能力,同样也与 CAS 模式的作用、进化及适应过程有紧密联系^[14]。OODA 循环中的“观察”等同于智能无人仿真实体对环境的感知;“判断”等

同于将感知到的信息进行处理并与规则集进行匹配的过程;“决策”等同于根据所匹配的规则选择自主行为的过程;“行动”等同于决策之后对自主行为的执行过程。OODA 循环还隐含了一个十分重要的步骤,即“学习”的过程。学到的经验将会对“判断”和“决策”产生指导作用,这也是战争系统能够产生适应性以及智能无人

仿真实体产生“智能”的根本原因。其中,“学习”的方式包括无人干预的学习即完全自主产生新的规则,有人干预的学习即由人类总结新规则并纳入规则集,以及两者相结合的方式。在 OODA-L 模式下,通过将“学习”过程显性化,可以表示智能无人仿真实体的智能特性演进的完整过程,如图 2 所示。

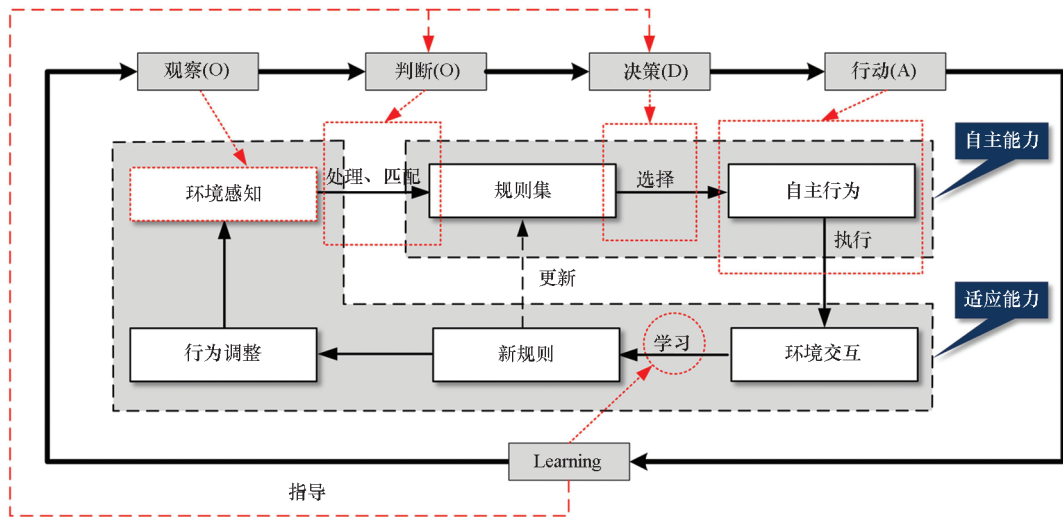


图2 OODA-L 循环与智能特性的演进过程

Fig. 2 Evolution of OODA-L cycles and intelligent features

值得注意的是,OODA-L 模式下的智能特性,不再是一种静态属性,而是一个不断发展变化的动态过程。“智能”应当视为在周期过程中逐渐演进的一种特性,而非固定不变的特性。OODA-L 模式下的智能特性如图 3 所示,智能无人仿真实体在初始阶段仅具备一定的初始自主能力,但是随着 OODA-L 循环的大量迭代运行,其自主能力不断提升,适应能力不断增强。最终,无人仿真实体的智能特性体现为一个非线性的上升过程,其智能水平在逐渐加强过程中趋于收敛。

由一定数量的相对简单的个体通过相互关联、互相协作而形成的有机整体,能够在宏观层面涌现出群体智能 (swarm intelligence)^[18],从而具备更高级、多样化的功能,进而完成更加综合、复杂的任务。这里的“简单”是相对整体而言,并不排除个体本身具有一定的复杂性,需要视具体的集群类型而定。传统上的集群行为建模主要受到生物集群的启发,并从中抽象出相应的自组织行为规则。典型代表如 Reynolds^[19]等提出的“类鸟群”模型,每个“类鸟”通过感知邻居行为以作出反应,在遵循凝聚性 (cohesion)、分离性 (separation) 和对齐性 (alignment) 三条基本规则的前提下,整个类鸟群将展现出如同真实鸟群一般的一致行为。将上述思想用于集群作战仿真建模,一般需要预先对集群个体的行为能力和行为规则作出适当的简化、抽象和假设。例如在作战仿真平台 ISSAC^[20] 和 EINSTEIN^[21] 中,驱动 Agent 运行的局部感知和交互机制,就是受到类鸟群行为的启发扩展而来的^[22]。这一建模方法在后来出现的许多更加复杂的基于 Agent 的作战仿真平台如 MANA^[23]、WISDOM II^[24]、SEAS^[25] 中均被广泛地应用于集群作战行为涌现机理的研究。

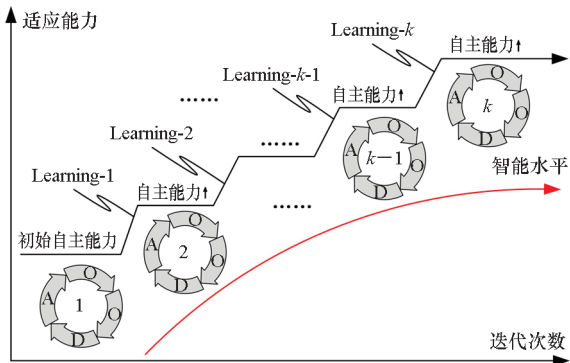


图3 OODA-L 模式下的智能特性

Fig. 3 Intelligent features under OODA-L pattern

2.3 智能无人仿真实体的集群协同模式

集群行为在本质上是一种自组织活动,它是

然而,这种依据“简单”规则的集群行为建模

方法,本身较难适用于复杂多变的战场环境,且随着 AI 技术的进步,更难以体现智能无人集群作战的高度自主协同特点。因此,在 2.2 节的基础上,进一步将 OODA-L 模式扩展为 Co-OODA-L (Cooperative OODA-L) 模式,用于描述智能无人仿真实体的集群协同模式,如图 4 所示。

在图 4 中,智能无人 Agent 代表一个智能无人仿真实体,集群之间存在协同观察、协同判断、协同决策、协同行动、协同学习的交互性关系。将

智能无人集群视为一个整体,相当于形成一个具有全局视角的虚拟全局智能体,它存在于每个智能无人 Agent 的本地,与集群内其他 Agent 之间通过数据链共享信息。全局智能体在观察、判断、决策和行动过程中,以全局为中心,在集群整体的角度进行综合权衡和协调,如图 5 所示^[26]。其最终在集群个体的作战行为产生的效果不一定最优,但集群整体作战行为产生的效果却为最佳,相当于具有了群体智能。

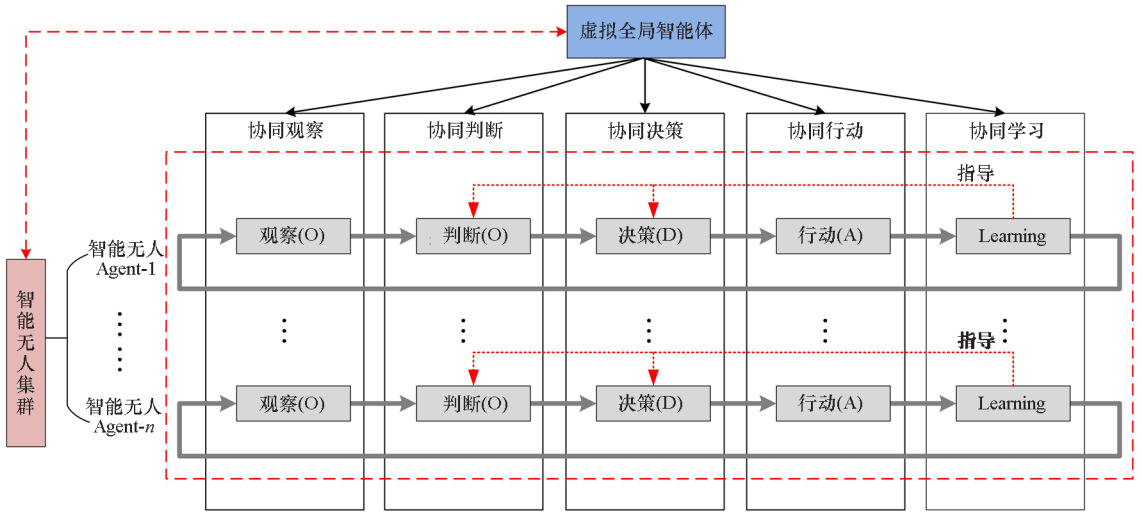


图 4 智能无人集群的 Co-OODA-L 循环

Fig. 4 Co-OODA-L cycle of intelligent unmanned swarm

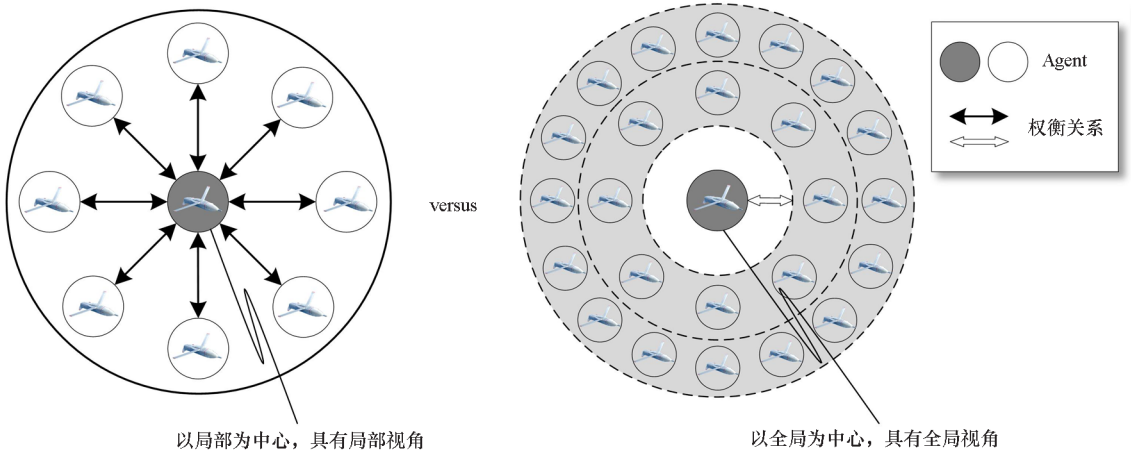


图 5 智能无人 Agent 的局部视角与全局视角对比

Fig. 5 Comparison between the local and global perspectives of the intelligent unmanned Agent

值得注意的是,虚拟全局智能体区别于自上而下的全局控制,其职能是辅助集群内的个体获取和处理全局信息,并在集群内进行沟通和协调,并非如自上而下的全局控制一般要取代个体作出决策,其具体的行为决策还是由智能无人 Agent 自行作出,只不过这种决策在虚拟全局智能体的辅助下更具宏观视角。

3 智能无人仿真实体的总体描述

3.1 智能无人仿真实体的数学抽象

将智能无人仿真实体统一抽象为智能体 Agent,则 Agent 的作战活动可以表示为马尔可夫决策过程(Markov Decision Process, MDP)^[15-16],每个 Agent 用四元组 $\langle S, A, T, R \rangle$ ^[10]表示,其中:

S 表示 Agent 的状态空间,包括智能无人仿真实体所能感知到的自身状态信息和环境状态信息,对应于 OODA-L 模式中的“观察”和“判断”环节。

A 表示 Agent 的动作空间,包括智能无人仿真实体可以采取的各种动作(作战行为),对应于 OODA-L 模式中的“行动”环节。

T 为 $S \times A \times S \rightarrow [0, 1]$,表示 Agent 的状态转移函数,是智能无人仿真实体从一个状态转移到另一个状态的概率。

R 为 $S \times A \rightarrow \mathbb{R}$,表示 Agent 的奖励函数,是智能无人仿真实体在每个状态上采取某个作战行为之后,作战仿真环境给予的反馈值。

在 MDP 中,Agent 的目标是找到一个最优的作战行为策略 π^* ,使它在任意状态 s 和任意时间步 t 下的长期累积折扣奖励和最大。

$$V^*(s) = \max_{\pi} E_{\pi} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r^{t+k} \mid s^t = s \right\} \quad (1)$$

式中: π 为 $S \times A \rightarrow [0, 1]$,表示 Agent 的作战行为策略,对应于 OODA-L 模式中的“决策”环节,是 Agent 用于决策的“大脑”; E_{π} 表示策略 π 下的期望值; $\gamma \in [0, 1]$ 为折扣率; k 为未来某一时刻的时间步序号; r^{t+k} 为 Agent 在时间步 $t+k$ 上获得的即时奖励。式(1)代表智能无人仿真实体在作战仿真环境中进行学习的目标,可等价地表示为:

$$Q^*(s, a) = \max_{\pi} E_{\pi} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k r^{t+k} \mid s^t = s, a^t = a \right\} \quad (2)$$

式中, $Q^*(s, a)$ 表示“状态-动作”对 (s, a) 在最优策略下所获得的长期累积折扣奖励。式(1)中的 $V^*(s)$ 和式(2)中的 $Q^*(s, a)$ 分别称为 MDP 的最优状态值函数和最优动作值函数,而最优策略 π^* 则可以通过计算 $V^*(s)$ 或 $Q^*(s, a)$ 得到。

智能无人仿真实体的动作寻优原理如图 6 所示。从某一初始值函数 V 和初始策略 π 出发,智能无人仿真实体通过策略评估学习到 π 的状态值函数 V^{π} 并赋值给 V ,而后根据 V 的值取贪心策

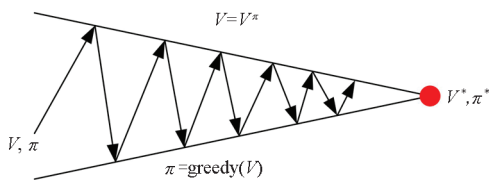


图 6 智能无人仿真实体的动作寻优原理

Fig. 6 Action optimization principle of intelligent unmanned simulation entity

略后,又可以通过策略改进得到新的 π ,每次迭代的过程对应于 OODA-L 模式中的“学习”环节。经过多次迭代, V 和 π 将最终收敛到最优值 V^* 和 π^* ,从而得到智能无人仿真实体的最优作战行为策略。

3.2 智能无人仿真实体的组成结构

传统上,作战仿真建模中的 Agent 具有如图 7 所示结构。

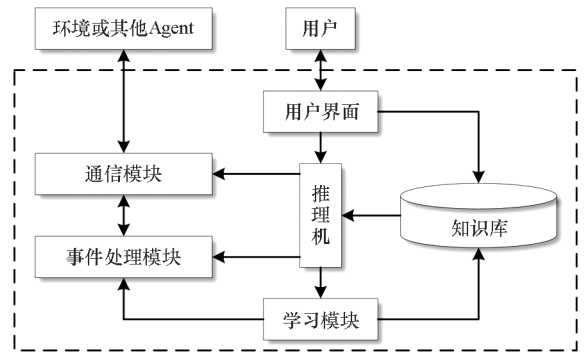


图 7 Agent 的一般结构

Fig. 7 General structure of Agent

在图 7 中,Agent 的智能特性表达是通过知识库、推理机和学习模块组成的专家系统构成,属于人工智能中符号主义学派^[17]的观点即知识表示,但该结构中的知识库构建一般较为困难。而 OODA-L 模式,属于人工智能中行为主义学派^[17]的观点,无须构建过于复杂的知识库和推理机。同时,借鉴 CAS 理论中的“开放”理念,强调将 Agent 视为一个开放的子系统,其智能特性是在与外界复杂环境建立起“观察-判断-决策-行动”的高级行为机制基础上,通过 Agent 不断地与仿真环境交互迭代,以此进化出“智能”的作战行为。

为实现 OODA-L 模式,提出智能无人 Agent 建模的四个基本思路:①智能无人 Agent 所具有的基本行为能力,应当依据现实中无人作战装备的基本组成结构和功能配置,进一步抽象而来。②智能无人 Agent 应当由相互分离的底层技能模型、中层行为模型和高层智能模型组成。③智能无人 Agent 的某一具体行为可由单个或多个技能模型组成,智能模型可视为 Agent 在时序范围内,依据策略对作战行为的选择和运用。④智能无人 Agent 应当是一种开放、可扩展的模型,可以根据需要对技能模型、行为模型进行扩充。基于上述四点,构建智能无人 Agent 的三层分层结构,如图 8 所示。

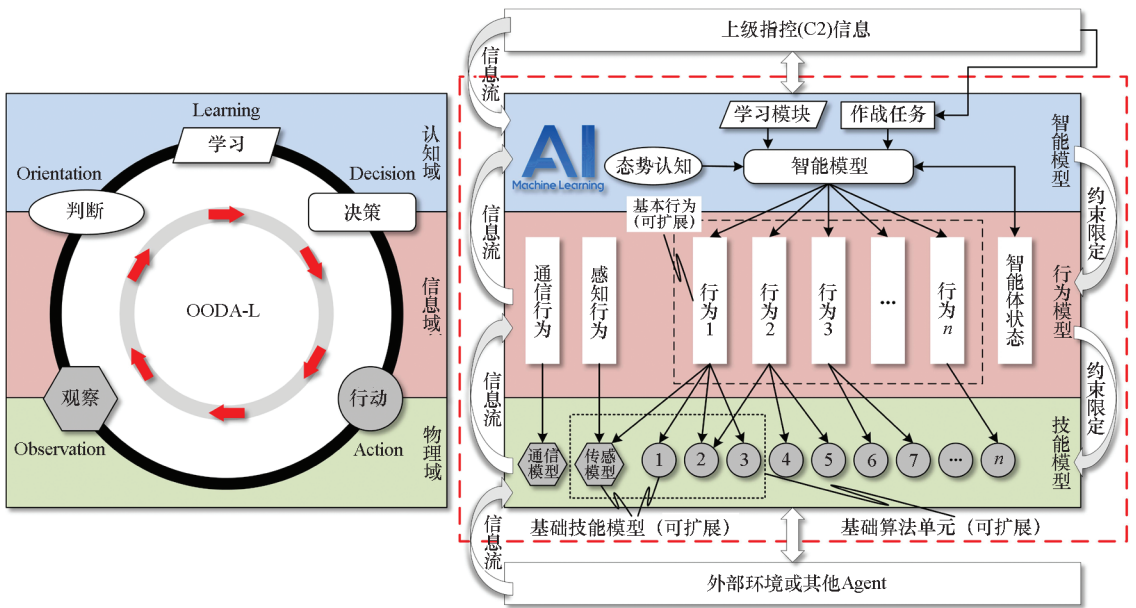


图 8 智能无人 Agent 的三域分层结构

Fig. 8 Three-domain hierarchical structure of intelligent unmanned Agent

在图 8 中:①智能模型对应于认知域,该模型主要是根据上级指控信息、预定的作战任务以及对作战态势的认知,对下一步应当采取的作战行为作出决策。同时,智能无人 Agent 的状态在执行某一行为时,也随之改变。②行为模型对应于信息域,该模型主要描述智能无人 Agent 的行为能力,这里将行为模型视为信息行为,主要是因为信息域充当了认知域与物理域之间的媒介,起着“黏合剂”的作用,如图 8 左侧的图例所示。从建模角度,行为模型承担的功能是将物理域模型的输出值进行综合并以信息交互的方式反馈给智能模型,从作用的本质上看,它是将 OODA 循环的各个环节连接起来的中介,仍然是一种信息行为。另外,由于通信行为和感知行为属于智能无人 Agent 的常态行为,比较特殊,故单独列出,以区别于其他行为。③技能模型对应于物理域,该模型更加贴近于装备的硬件层面,强调对物理实体功能的描述,是能够直接与外界环境或其他 Agent 发生交互的物理仿真模型,如雷达的探测模型、导弹的毁伤模型、飞机的空气动力模型、武器的控制模型等。技能模型比行为模型粒度更细,一个行为模型包含一定量的先验知识,可以看作某个行为对基础技能的一种调用,它由多个技能的序列、算法或规则集组成。

综上所述,可以将智能无人 Agent 的组成结构特点总结为:智能模型是学习出来的,行为模型是抽象或规划出来的,技能模型是相对固定的。智能模型决定智能无人 Agent 该“做”什么,行为

模型决定“做”的具体内容和方式,技能模型负责将“做”贯彻落实。

4 智能无人集群协同作战建模的体系结构

协同行为是智能无人集群作战仿真建模的关键所在,结合 2.3 节提出的 Co-OODA-L 模式,提出智能无人集群协同作战建模的体系结构,如图 9 所示。

在图 9 中,设定智能无人集群采用分布式集群架构,各 Agent 之间相互独立,集群内部可通过数据链实现信息共享。该体系结构的运行过程为:①智能无人 Agent 通过协同感知外部环境,使全局战场状态信息在集群内部共享。②各智能无人 Agent 结合自身视角,利用人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)构成的态势认知网络,对全局战场状态进行协同“思考”。③各智能无人 Agent 将“思考”后的信息,通过通信层/集群作战协调层(兼虚拟全局智能体),进行充分的沟通和协调,该层也由 ANN 构成,在具体实现上可采用循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)及其变体或替代形式。④将沟通和协调后的信息反馈给同样由 ANN 构成的策略网络,各 Agent 按照策略网络的输出选择相应的作战行为,并在作战仿真环境中具体执行。⑤智能模型对协同作战行为的执行效果进行综合评估,并改进和优化智能无人 Agent 的作战行为选择。上述过程,将通过人不在回路的作战仿真环境进行大量迭代运行,直至智能无人 Agent 学习到满足要

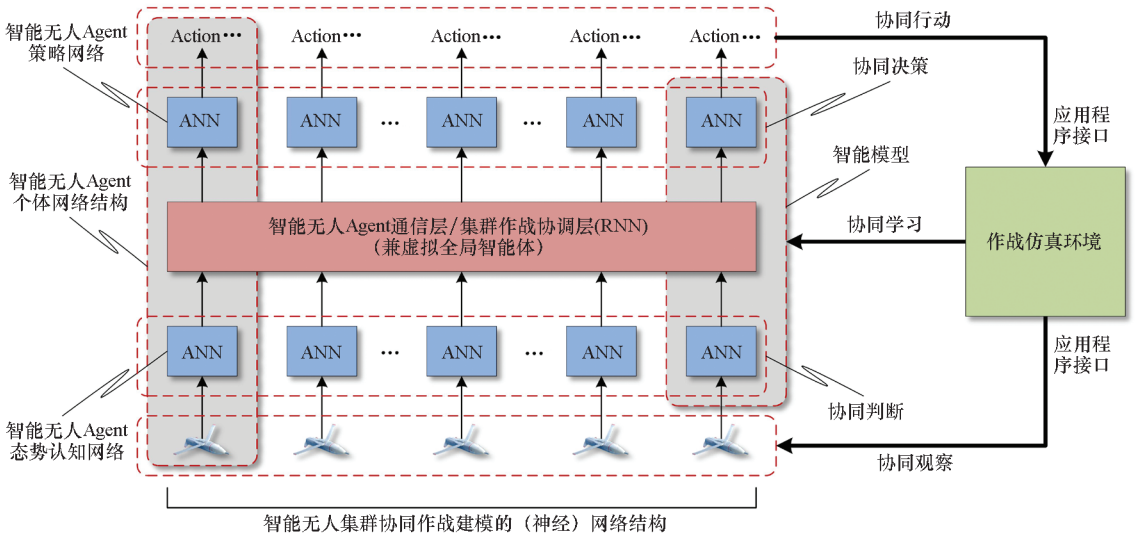


图9 智能无人集群协同作战建模的体系结构

Fig.9 Architecture of cooperative operation modeling of intelligent unmanned swarm

求的智能模型。相比传统的集群行为建模方法,该体系结构具有下列特点:

1)各智能无人 Agent 共用相同的神经网络结构(包括态势认知网络、策略网络和通信网络)及参数,可适用于可变 Agent 数量的集群;另外,由于采用了分布式结构,可同时适用于同构或异构集群的建模,在经过充分的训练和学习后,智能无人 Agent 将会产生高度自主的集群协同作战能力。

2)各智能无人 Agent 的行为决策,并非简单的“If - then - else”式结构,不单纯追求集群行为的一致性,而是通过对外部环境的感知和思考,同时兼顾其他 Agent 可能采取的行为,进而推理出自身的行为决策,从而使智能无人 Agent 个体具有了一种全局思维能力。

3)智能无人 Agent 的策略网络经过作战仿真环境的训练而不断优化,因而每个 Agent 都具有自学习和自成长特性,相比基于固定规则的 Agent 而言,具有更好的适应能力和泛化性能,能够应对未知环境的不确定性,后续还能够通过不断地自我学习来进一步提升自身的智能水平。

5 结论

建模框架是从高层对仿真建模活动提供的方法指导。本文针对智能无人仿真实体的智能特性需求,提出一种能够反映智能无人仿真实体自主能力和适应能力的 OODA-L 模式,并将其扩展为适用于集群做的 Co-OODA-L 模式。在 OODA-L 模式下,采用 MDP 对智能无人 Agent 进行数学描述,并给出智能无人 Agent 的三域分层结构描述。

在 Co-OODA-L 模式下,探讨了分布式体系结构下智能无人集群协同作战建模的(神经)网络结构及其特点。下一步,将根据所提建模框架,重点结合具体的智能无人集群作战任务背景,搭建仿真实验环境和智能无人 Agent 模型,构建相关算法,开展细化研究。

参考文献 (References)

- [1] 邹立岩, 张明智. 马赛克战视角下的智能无人机集群作战概念研究[J]. 战术导弹技术, 2020(6): 67 - 74. ZOU Liyan, ZHANG Mingzhi. Research on the concept of intelligent UAV swarm operation under mosaic warfare viewpoint[J]. Tactical Missile Technology, 2020(6): 67 - 74. (in Chinese)
- [2] Department of Defense. Unmanned systems integrated roadmap: FY2011 - 2036 [R]. Washington DC: DoD, 2011.
- [3] Department of Defense. Unmanned systems integrated roadmap: FY2017 - 2042 [R]. Washington DC: DoD, 2017.
- [4] 陈航辉. 集群作战时代已经到来[N]. 中国国防报, 2018 - 01 - 30(4). CHEN Hanghui. Has the era of swarm warfare come [N]. China National Defense Daily, 2018 - 01 - 30 (4). (in Chinese)
- [5] PAUL S. Robotics on the battlefield part II: the coming swarm [R]. Washington DC: Center for a New American Security, 2014.
- [6] EROLS, WILLIAM M S. Swarm robotics: SAB 2004 international workshop revised selected papers [M]. Santa Monica: Springer, 2004.
- [7] EROLS, WILLIAM M S. Swarm robotics: second SAB international workshop revised selected papers [M]. Santa Monica: Springer, 2006.
- [8] 宋瑞, 杨雪榕, 潘升东. 智能集群关键技术及军事应用研究 [C]//第五届中国指挥控制大会论文集, 2017: 115 - 119.

- SONG Rui, YANG Xuerong, PAN Shengdong. The research on the key technologies and military applications of intelligent swarm [C]//Proceedings of the 5th China Command and Control Conference, 2017: 115-119. (in Chinese)
- [9] 马建光, 张乃千. 群化武器: 开启智能作战新纪元[N]. 解放军报, 2017-05-12(11).
- MA Jianguang, ZHANG Naiqian. Swarm weapons: opening a new era of intelligent warfare [N]. Chinese People's Liberation Army Daily, 2017-5-12(11). (in Chinese)
- [10] 邹立岩, 张明智, 柏俊汝. 一种基于OODA-L的智能无人集群作战仿真建模框架[C]//中国系统仿真与虚拟现实技术高层论坛论文集, 2019: 241-248.
- ZOU Liyan, ZHANG Mingzhi, BAI Junru. A simulation modeling framework for intelligent unmanned swarm operation based on OODA-L [C]// Proceedings of China System Simulation and Virtual Reality Technology High-level Forum, 2019: 241-248. (in Chinese)
- [11] 叶东辉. 机器人集群作战的优势所在: 数量、协同、情报、速度[J]. 防务视点, 2015(1): 7-9.
- YE Donghui. Advantages of robot swarm warfare: quantity, coordination, intelligence and speed [J]. Defense Perspective, 2015(1): 7-9. (in Chinese)
- [12] 罗小明, 朱延雷, 何榕. 基于复杂适应系统的装备作战试验体系贡献度评估[J]. 装甲兵工程学院学报, 2015, 29(2): 1-6.
- LUO Xiaoming, ZHU Yanlei, HE Rong. Evaluation of contribution for equipment operational test system based on complex adaptive system[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2015, 29(2): 1-6. (in Chinese)
- [13] 胡晓峰, 司光亚, 吴琳. 战争模拟原理与系统[M]. 北京: 国防大学出版社, 2009: 263-264.
- HU Xiaofeng, SI Guangya, WU Lin, et al. Principles and systems of war gaming and simulation [M]. Beijing: National Defense University Press, 2009: 263-264. (in Chinese)
- [14] 奥辛格. 科学·战略·战争——约翰·博伊德的战略理论[M]. 杨斌, 姚云竹, 译. 北京: 军事科学出版社, 2009.
- OSINGH F P B. Science, strategy and war: the strategic theory of John Boyd [M]. Translated by YANG Bin, YAO Yunzhu. Beijing: Military Science Press, 2009. (in Chinese)
- [15] SUTTON R S, ANDREW G B. Reinforcement learning: an introduction [M]. 2nd ed. Cambridge, Mass.: The MIT Press, 2018.
- [16] 胡裕靖, 高阳. 多智能体强化学习中的博弈、均衡和知识迁移[M]//王崇骏, 史忠植, 常亮, 等. 多智能体系统及应用: 第2卷. 北京: 清华大学出版社, 2017: 17-47.
- HU Yujing, GAO Yang. Game, equilibrium and knowledge transfer in multi-agent reinforcement learning [C]// WANG Chongjun, SHI Zhongzhi, CHANG Liang, et al. Multi-agent systems and their application: volume 2. Beijing: Tsinghua University Press, 2017: 17-47. (in Chinese)
- [17] 史忠植. 人工智能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- SHI Zhongzhi. Artificial intelligence [M]. Beijing: China Machine Press, 2018. (in Chinese)
- [18] 梁晓龙, 孙强, 尹忠海, 等. 大规模无人系统集群智能控制方法综述[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(1): 11-16.
- LIANG Xiaolong, SUN Qiang, YIN Zhonghai, et al. Review on large-scale unmanned system swarm intelligence control method [J]. Application Research of Computers, 2015, 32(1): 11-16. (in Chinese)
- [19] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools; a distributed behavioral model[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987, 21(4): 25-34.
- [20] ILACHINSKI A. Irreducible semi-autonomous adaptive combat (ISAAC): an artificial-life approach to landwarfare [R]. Defense Technical Information Center, 1997.
- [21] ILACHINSKI A. Artificial war [M]. Singapore: World Scientific, 2004.
- [22] ILACHINSKI A. AI, robots, and swarms issues, questions, and recommended studies[R]. Arlington: CNA, 2017.
- [23] ANDERSON M A. Agent-based modelling in the New Zealand defence force [C]//Proceedings of the International Defense and Homeland Security Simulation Workshop, 2013: 61-66.
- [24] HOLLIDAY P. SWARMM—a mobility modelling tool for tactical military networks [C]//Proceedings of IEEE Military Communications Conference, 2008: 1-7.
- [25] 陈欣, 张浩, 罗俊荣, 等. 分析论证仿真系统[M]. 北京: 军事科学出版社, 2009.
- CHEN Xin, ZHANG Hao, LUO Junrong, et al. Analysis and demonstration simulation system [M]. Beijing: Military Science Press, 2009. (in Chinese)
- [26] 邹立岩, 张明智, 荣明. 智能无人机集群概念及主要发展趋势分析[J]. 战术导弹技术, 2019(5): 1-11.
- ZOU Liyan, ZHANG Mingzhi, RONG Ming. Analysis of intelligent unmanned aircraft systems swarm concept and main development trend [J]. Tactical Missile Technology, 2019(5): 1-11. (in Chinese)