

【引用格式】尤岳, 黄昱申, 陈科. 无人潜航器交战行为分层建模方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(5): 622-628.

无人潜航器交战行为分层建模方法

尤 岳¹, 黄昱申^{2,*}, 陈 科¹

(1. 海军研究院, 北京 100161; 2. 江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222061)

摘 要 无人潜航器是水下智能化作战技术的重要突破口, 然而目前其自主能力不足, 无法支持水下无人自主作战。针对该问题, 提出了一种基于有限状态机和行为树的无人潜航器交战行为分层建模方法, 面向无人潜航器打击目标任务, 设计行为模型框架与交战行为模型。该模型结合了有限状态机和行为树的优点, 具有高解耦性、结构精简、易于修改与复用的特点, 能够支撑无人航行器交战行为的定制化开发, 并进一步根据任务剖面形成任务清单, 支持无人航行器智能化作战。

关键词 无人潜航器; 有限状态机; 行为树; 行为模型

中图分类号 TP301.6

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)05-0622-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.05.013

A Hierarchical Modeling Method of UUV Combat Actions

YOU Yue¹, HUANG Yushen^{2,*}, CHEN Ke¹

(1. Academy of Naval Research, Beijing 100161, China;

2. Jiangsu Automation Research Institute of CSSC, Lianyungang 222061, China)

Abstract Unmanned underwater vehicles (UUVs) are an important breakthrough in underwater intelligent combat technology. However, the autonomous capability is insufficient at present and cannot support underwater unmanned autonomous combat. To solve this problem, a hierarchical modeling method of UUV combat actions based on finite state machine and behavior tree is proposed. The behavior model framework and combat behavior model are designed for target attack tasks. The model takes the advantages of the finite state machine and the behavior tree to obtain uncoupled frame, reduced structure and good portability. It can support customized development of UUV combat actions, and generate a task list according to the task profile to support UUV intelligent combat.

Key words UUV; finite state machine; behavior tree; behavior model

0 引言

无人潜航器相比有人潜艇, 具有成本低、目标特征小、不怕牺牲的不对称特点, 未来有望颠覆水下战形态。水下作战具有突出的弱联通特点, 指挥平台无法与无人潜航器保持实时通信, 实现实时指挥, 无人潜航器需具备较高的自主能力和智能化水平, 才有可能在动态对抗中完成既定任务^[1-2]。当前, 水下无人装备尚处于智能化水平的初级阶段, 如何科学准确地实现典型作战任务下的交战行为建模, 是突破水下无人装备智能化的关键一步。兵

力的行为过程可以简单描述为: 在任务目标和领域知识的支撑下, 仿真兵力战场环境数据、任务指令等输入信息, 依托行为规则推理当前态势下的行动, 生成决策行动方案^[3]。为驱动兵力的自主行为, 需设计一种高效、具有良好层次结构和解耦性、支持模型的行为描述和功能分解的模型体系结构, 对建模工作的开展提供支撑^[4-5]。

本文拟采用有限状态机和行为树结合的方法实现兵力行为建模。有限状态机以描述实体的状态转换规则见长, 而行为树善于构建精细化行为模型, 将两者结合, 能够清晰地表示各状态间的转换

收稿日期: 2023-05-05

作者简介: 尤岳 (1988-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水下作战仿真与指挥辅助决策研究。

*通信作者: 黄昱申 (1994-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水下无人指挥决策技术研究。

关系, 同时实现高解耦性的交战行为形式化表示。

1 国内外研究现状

当前国内无人平台行为建模研究大多根据具体行为逻辑与约束, 利用典型建模方法, 构建行为模型, 并基于仿真工具进行验证。行为树使用模块化的方式描述了一组有限任务之间的切换, 常用于面向特定任务的仿真兵力行为模型构建。冷志成等从仿真兵力模型构建总体设计入手, 首先设计模型体系框架, 再根据具体仿真兵力行为逻辑构建行为树模型, 实现了局部模型与整体框架的统筹设计^[6]。有限状态机方法通过构建有限个状态及这些状态之间的转移和动作行为的数学模型, 在满足条件的情况下, 实现状态机状态之间的转换^[7], 往往应用于仿真兵力的任务序列执行。国防科技大学的董倩等采用了分层建模思想, 以有限状态机描述无人机的任务架构, 并将具体的行为模型集成至各状态, 实现无人机行动分层智能规划^[8]。

国外的无人兵力建模研究往往更加注重工程化实现。美国的分布式侦察与探测系统 (CADRE)^[9] 是面向海底静态目标识别任务的水下无人系统, 其框架可兼容异构水下无人编组, 3 类无人潜航器分别执行通信导航、搜索分类以及目标识别任务。CADRE 系统采用可扩展性和模块化设计, 实现无人编组的有效通信与协作。该系统面向特定任务设计、开发, 且技术成熟度高, 具有较强的实用属性。

2 行为模型框架

行为树是树状结构, 相对于有限状态机的网状结构, 其耦合性更低, 更容易有效控制节点间的冲突, 有利于实现较为复杂的行为逻辑, 适用于描述兵力实体的行为序列; 有限状态机实现兵力状态的转移, 相当于在执行具体行为的同时监控兵力状态参数, 当参数符合状态转移规则时, 系统能够根据规则转移至另一状态。单独使用行为树方法也能够同时描述行为序列与状态切换的逻辑结构, 但构建的行为树较为复杂, 增加了行为模型的设计难度, 且不利于用户理解行为模型中的逻辑关系。

本文提出基于行为树和有限状态机的混合行

为模型框架, 构建状态与行为子树的对应关系, 通过状态的转移控制行为子树的转换。以包含 3 类状态的行为模型为例, 行为模型框架如图 1 所示。在有限状态机的基础上, 每个状态对应包含 1 个行为子树。系统处于某状态时, 执行对应的行为子树, 同时监控兵力状态参数。若状态参数未满足状态转移条件, 则持续执行当前行为子树; 若满足状态转移条件, 则转移至新的状态, 执行该状态对应的行为子树。

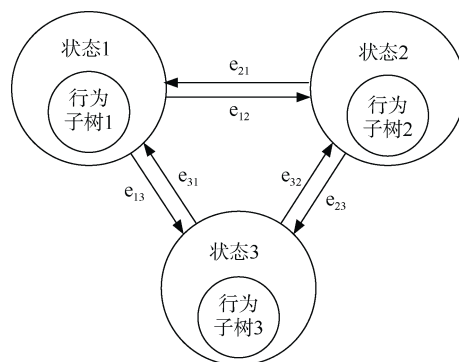


图1 结合有限状态机与行为树的行为模型框架

Fig. 1 Behavior model frame based on finite state machine and behavior tree

3 无人潜航器有限状态机设计

根据无人潜航器打击目标任务流程, 设计其有限状态机。无人潜航器打击目标任务主要流程如下:

- 1) 无人潜航器在阵地内待机, 接收任务指令后前往任务地点开始搜索目标;
- 2) 探测发现目标后开始跟踪目标, 并尽可能保持一定的跟踪距离;
- 3) 持续跟踪目标一定时间后, 准备开展攻击行动, 若目标立即可攻则立刻进行鱼雷攻击, 若目标非立即可攻则占位机动寻找攻击机会, 直至具备攻击条件;
- 4) 若多次攻击后, 潜航器的武器耗尽, 仍未命中目标, 则判定潜航器失去任务能力, 任务终止;
- 5) 若鱼雷命中, 则任务完成。

搜索、跟踪、攻击 3 类行为是上述任务流程的核心, 各行间相互独立, 且相互衔接的逻辑清晰, 易于构建相应的行为子树。据此构建无人潜航器打

击任务状态集 $S=\{S_0=\text{待机}, S_1=\text{搜索}, S_2=\text{跟踪}, S_3=\text{攻击}, S_4=\text{丧失任务能力}, S_5=\text{完成任务}\}$; 状态转移触发条件集 $E=\{e_0=\text{接收任务指令}, e_1=\text{发现目标}, e_2=\text{丢失目标}, e_3=\text{持续跟踪时间达到 } 10 \text{ min}, e_4=\text{武器消耗殆尽}, e_5=\text{鱼雷命中}\}$; 无人潜航器关键属性集 $A=\{a_0=\text{发现目标与否}, a_1=\text{目标距离}, a_2=\text{持续跟踪时间}, a_3=\text{目标可攻性}, a_4=\text{鱼雷是否命中}, a_5=\text{武器余量}\}$ 。无人潜航器打击任务有限状态机如图 2 所示。

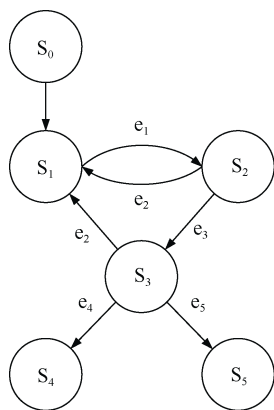


图 2 无人潜航器打击任务有限状态机

Fig. 2 Finite situation machine of UUV attack task

4 行为分层建模方法

作为一种决策建模工具，行为树同时具有表示、决定和控制平台行为的功能。行为树采用序列、选择、并发等控制节点，能够灵活地组织表示各种方案。通过对条件节点的检测，使反应式的策略响应能够在原静态计划的基础上得到支持，从而可以泛化行为树来表示决策树^[10]。通过定义各种类型的装饰节点，可使其表达计划和策略的灵活度进一步提高。行为树使用统一的界面规范，所有的节点在每一个运行周期中都会回到节点状态。这种机制可以对决策模型的运行情况进行实时监控并及时做出反应，而统一的接口则让每一个行为子树都可独立运行，能够有效支持模型扩展。综上所述，使用行为树作为仿真兵力决策模型的表示方法，可以满足生成的模型具有可解释性，易于试验、调试和校验，并可重复使用、易于扩展的需求^[11]。

对一支仿真兵力而言，往往难以使用一个完整

的行为树表示其决策模型，通常需要将其功能按实体的作战任务进行分类，构建对应的任务子树，并由主树调用，从而构建任务选择逻辑。然而，无人潜航器的各类行为之间的衔接逻辑较为复杂，并且随着任务进程的推进，可能出现 2 类任务交替切换的情况，以主行为树表达各行为之间的选择与转换关系较为繁琐。因此，本文在一般行为树方法的基础上将主行为树替换为有限状态机，将行为子树包含在相应状态中。面向无人潜航器打击目标场景，针对搜索、跟踪、攻击 3 类主要行为，构建行为子树，如图 3-5 所示。

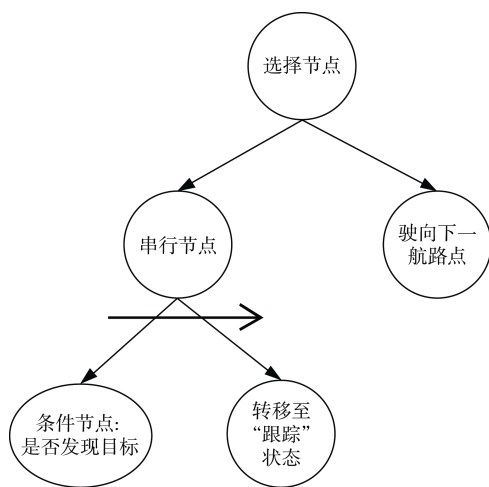


图 3 搜索行为子树

Fig. 3 Behavior subtree of search action

各行为子树的逻辑结构十分清晰，但若仅采用行为树方法描述完整的兵力行为规则，须将行为子树进行组合，形成规模较大、结构复杂的行为树，不仅设计难度明显提升，且不易于修改与复用。本文提出一种基于有限状态机和行为树的分层行为建模方法，以无人潜航器的打击任务为场景，构建行为模型。

1) 想定背景。

为能落实有限状态机模型中的各项约束，建模需要依托更加具体的想定背景。以无人潜航器伏击水面目标任务为背景，想定态势如图 6 所示。红方兵力为 1 艘无人潜航器，在 30 n mile × 10 n mile 的阵地内执行环形搜索，若发现蓝方目标则执行跟踪任务，稳定跟踪 10 min 后即可执行攻击任务；蓝

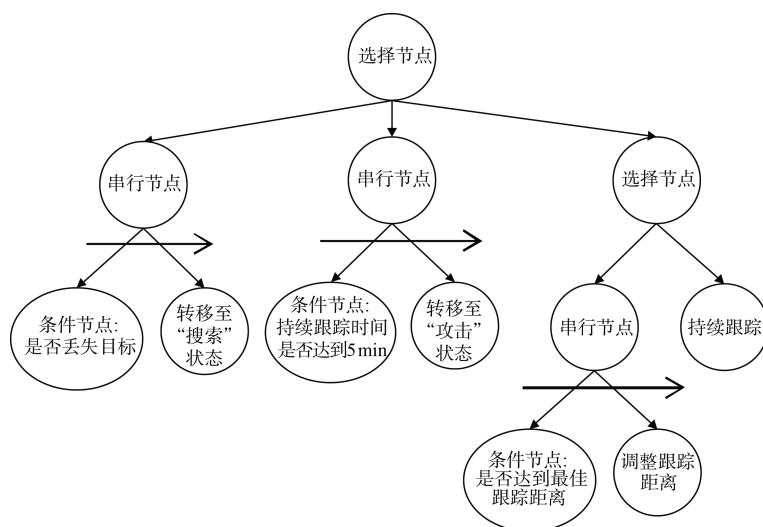


图 4 跟踪行为子树

Fig. 4 Behavior subtree of track action

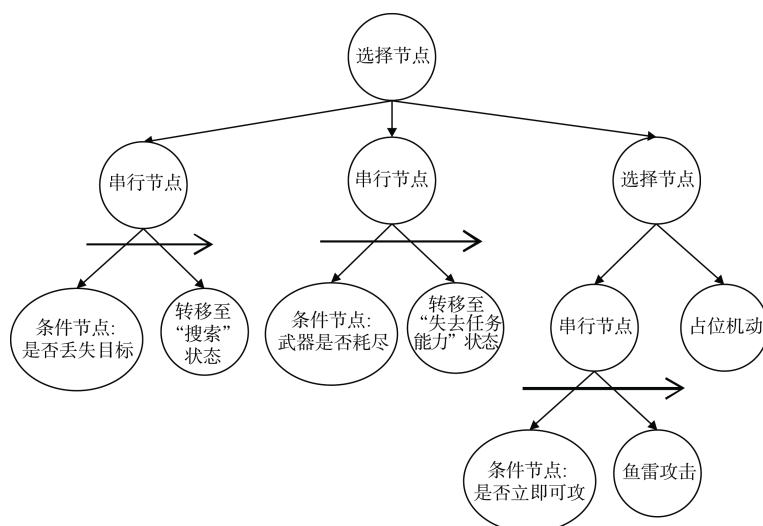


图 5 攻击行为子树

Fig. 5 Behavior subtree of attack action

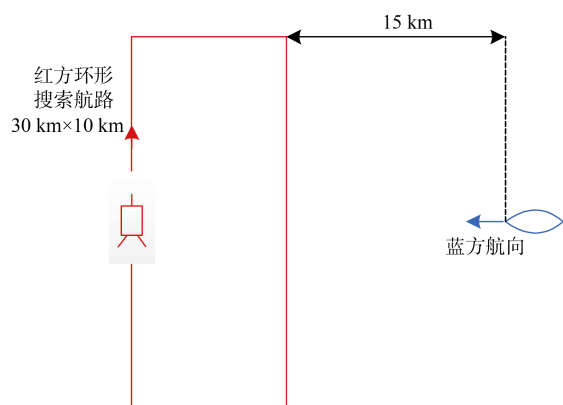


图 6 想定初始态势

Fig. 6 Initial situation of a scenario

方兵力为 1 艘海洋监视船, 预计将垂直经过红方无人潜航器阵地, 当蓝方海洋监视船发现无人潜航器时, 则以最大航速脱离。双方兵力参数如表 1 所示。其中, 续航时间指保持最大航速航行的最长时间。海洋监视船续航时间长, 不考虑其燃料耗尽的情形。

2) 行为模型构建。

利用第 2 章中设计的有限状态机, 可将各行为子树统合在一起。同时, 以状态转移条件替代行为子树之间的连接关系, 能够对第 3 章中设计的行为子树进行简化, 使行为逻辑更为简明易懂。在该模型框架下, 状态和行为的建模是相互独立的, 便于

状态和行为的编辑和复用。如图 7 所示,原行为子树中的状态转移判断节点转变为各状态间的转换条件,行为子树的结构更加精简,同时能够清晰地表示各状态间的转移关系。对于无人潜航器能力约

束以及图 3-5 中的条件约束,须将其形式化表示为行为规则,如表 2 所示。对于能力约束,将其表示为条令式规则,推演全流程须始终满足该类规则内容;对于条件约束,将其表示为触发式规则,在满

表 1 红蓝双方兵力参数
Table 1 Parameters of red and blue CGFs

序号	兵力种类	数量	所属方	巡航航速/kn	最大航速/kn	探测距离/km	射程/km	武器数量	续航时间/h
1	无人潜航器	1	红方	4	8	10	5	2	4
2	海洋监视船	1	蓝方	6	12	5	—	0	—

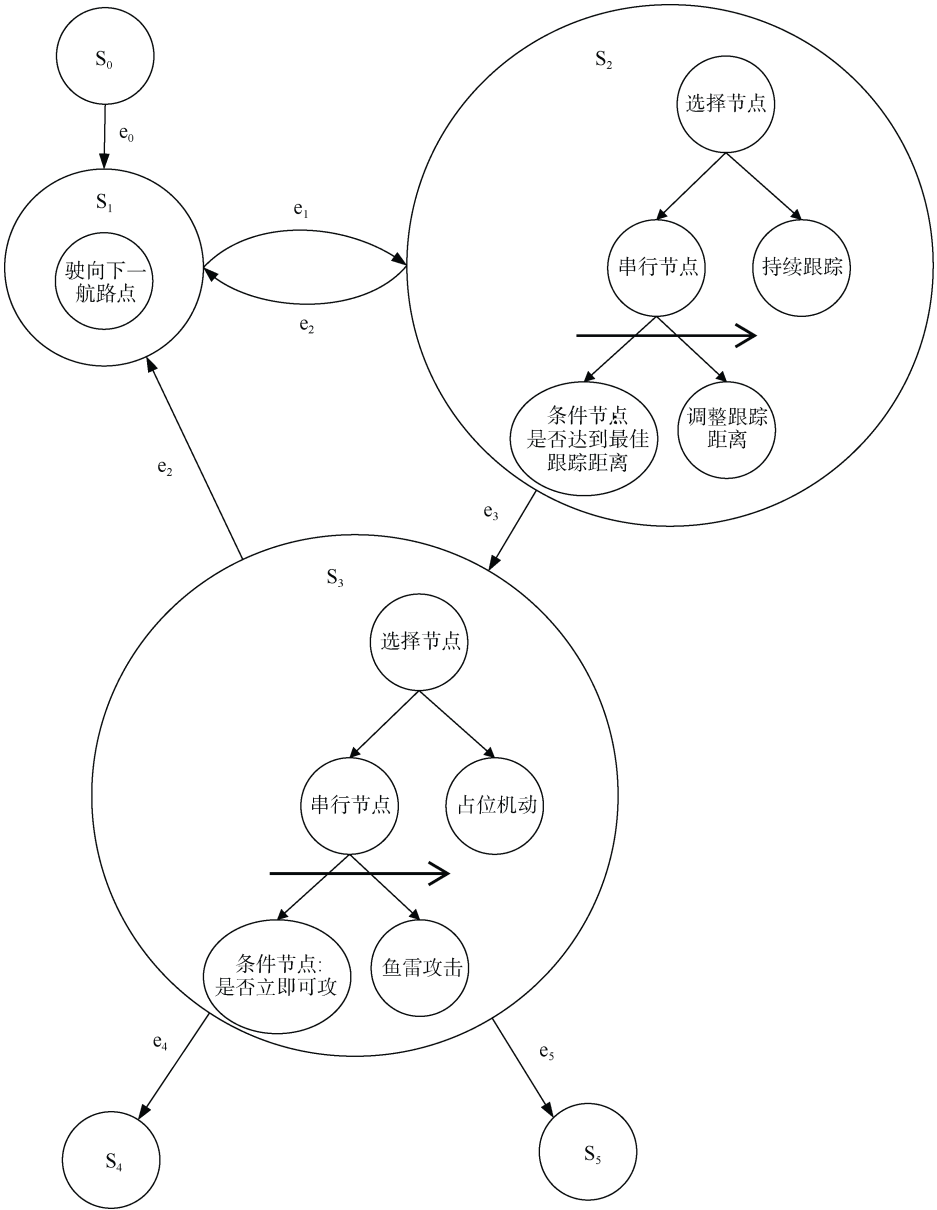


图 7 结合有限状态机和行为树的行为规则
Fig. 7 Behavior model based on finite state machine and behavior tree

足触发条件的情况下，需执行相应后续行为。

3) 推演过程。

推演过程中的关键事件如表 3 所示, 关键事件

发生时刻已标注于态势图中，如图 8 所示。由图 8 及表 3 可见，无人潜航器完整地执行了“搜索-跟踪-打击”任务流程。

表 2 无人潜航器行为规则
Table 2 Combat action rules of UUV

序号	约束名称	规则类型	触发条件	满足条件后执行行为
1	航速约束	条令式规则	始终执行	实时航速不大于最大航速
2	射程约束	条令式规则	始终执行	武器发射距离小于最大射程
3	武器数量约束	条令式规则	始终执行	使用武器数量不大于武器携带数量
4	开始跟踪约束	触发式规则	无人潜航器发现目标	转移至“跟踪”状态
5	跟踪距离约束	触发式规则	跟踪状态下，距离大于 5 km	采用最大航速跟踪目标
6	丢失目标约束	触发式规则	跟踪、攻击状态下，失去目标接触	转移至“搜索”状态
7	开始攻击约束	触发式规则	连续以 5 km 以内距离跟踪目标达到 10 min	转移至“攻击”状态
8	可攻性约束	触发式规则	敌舷角绝对值小于 90°	武器攻击

表 3 推演关键事件
Table 3 Key events of simulation

时间序号	事件名称	事件描述
T ₀	推演开始	红方开始沿航路搜索，蓝方匀速直线航行
T ₁	红方发现蓝方	红方进入跟踪状态，距离大于 3 km，采用 8 kn 航速接敌机动
T ₂	蓝方发现红方	蓝方采用 12 kn 航速脱离
T ₃	红方进入攻击状态	红方连续跟踪蓝方 10 min，且满足射程约束和可攻性约束，发射鱼雷
T ₄	攻击命中	红方鱼雷成功命中蓝方目标

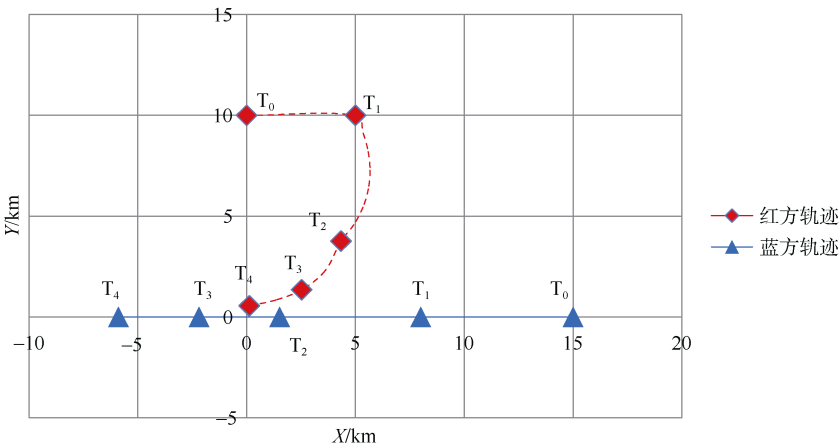


图 8 推演态势
Fig. 8 Simulation situation

5 结束语

本文提出一种基于有限状态机和行为树的无人潜航器交战行为分层建模方法，结合 2 种方法的

优势，构建高解耦性、结构精简、易于修改与复用的行为模型。行为树耦合性低、能够控制复杂行为逻辑，而有限状态机易于表达状态转移条件，根据两者的优点设计结合有限状态机与行为树的行为

模型框架,构建状态与行为子树的对应关系,通过状态的转移控制行为子树的转换。面向无人潜航器打击目标任务,设计其有限状态机,形式化定义了状态机状态转移规则;分析无人潜航器打击任务流程,对关键环节构建相应行为子树。将状态机与行为子树结合,构建基于行为树和有限状态机的混合行为模型,实现行为子树的简化和状态间转移条件的定义。该模型具有高解耦性、结构精简、易于修改与复用的特点,能够支撑无人航行器交战行为的定制化开发,并进一步根据任务剖面形成任务清单,支持无人航行器智能化作战。

参考文献

- [1] 钱东,赵江,杨芸. 军用 UUV 发展方向与趋势(上)——美军用无人系统发展规划分析解读[J]. 水下无人系统学报,2017,25(1): 1-30.
- [2] 李强,王飞跃. 马赛克战概念分析和未来陆战场网信体系及其智能对抗研究[J]. 指挥与控制学报,2020,6(2): 87-93.
- [3] 杨伟龙. CGF 战术任务规划行为建模关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2019.
- [4] 陶伟. 基于马赛克战的水下有人-无人集群控制结构[J]. 指挥与控制学报,2020,6(3): 264-270.
- [5] 包莺迁. 基于组合行为状态图的 CGF 行为建模技术研究[M]. 长沙:国防科技大学,2020.
- [6] 冷志成,隋钟石,刘瑞峰,等. 基于行为树的 CGF 模型构建方法研究[J]. 信息系统工程,2021(8): 113-116.
- [7] 王佳胤,张宏军,程恺,等. 基于有限状态机的作战仿真实体状态转移规则建模[J]. 信息系统工程,2019(9): 121-123.
- [8] 董倩. 基于行为树的空中作战行动分层智能规划方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2018.
- [9] BIRK A, PASCOAL A, ANTONELLI G, et al. Cooperative cognitive control for autonomous underwater vehicles (CO3 AUVs): overview and progresses in the 3rd project year[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2012, 45(5): 361-366.
- [10] COLLEDANCHISE M, ÖGREN P. How behavior trees modularize hybrid control systems and generalize sequential behavior compositions, the subsumption architecture, and decision trees[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(2): 372-389.
- [11] 张琪. 学习驱动的 CGF 决策行为建模方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2018.

(责任编辑: 曹晓霖)