

9-15-2024

An Intelligent Adversaries Behavior Simulation Technology Based on Improved Behavior Trees

Fang Zhou

Information System Engineering National Important Laboratory, the 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China

Bo Fan

National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Science, Beijing 100071, China

Xiaoyi Liu

Information System Engineering National Important Laboratory, the 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China

Yishan Ding

National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Science, Beijing 100071, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Special Column: Military Intelligent Simulation Test and Test Evaluation is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

An Intelligent Adversaries Behavior Simulation Technology Based on Improved Behavior Trees

Abstract

Abstract: Intelligent algorithm/intelligent platform/intelligent system intelligence capability testing and evaluation need to solve high-level intelligent opponent simulation problems, an intelligent opponent behavior simulation technology based on improved behavior tree is proposed. Four types of behavior tree nodes are designed, including behavior control, combat tasks, behavior actions, and execution condition node. Five atomic behavior actions and parameters are established, including maneuver, reconnaissance and early warning, command and decision-making, firepower strike, and electronic interference node. Five atomic condition nodes are provided, including target selection, weapon launch, and incoming weapon judgment node. The intelligent adversarial behavior simulation system is designed, including a behavior rule editor and a behavior rule engine. The adversaries behavior simulation execution process is established. Considering the typical application scenarios of air ground collaborative confrontation in border areas, the simulation results indicate that the simulated intelligent opponent behavior can support the evaluation of intelligent capabilities.

Keywords

intelligent adversarial, behavior tree, adversaries behavior simulation, rule engine, intelligence experiment

Authors

Fang Zhou, Bo Fan, Xiaoyi Liu, Yishan Ding, Ningxin Zhang, Yachao Shao, and Xiaoyu Zhai

Recommended Citation

Zhou Fang, Fan Bo, Liu Xiaoyi, et al. An Intelligent Adversaries Behavior Simulation Technology Based on Improved Behavior Trees[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 1995-2003.

一种基于改进行为树的智能对手行为模拟技术

周芳¹, 范波², 刘小毅¹, 丁一珊^{2*}, 张宁馨¹, 邵亚超², 翟小玉²

(1. 中国电子科技集团公司第二十八研究所 信息系统工程全国重点实验室, 江苏 南京 210007;

2. 军科科学院 国防科技创新研究院, 北京 100071)

摘要: 为解决智能算法/智能平台/智能系统智能化能力测试评估需高水平的智能对手模拟问题, 提出了基于改进行为树的智能对手行为模拟技术。设计了行为控制、作战任务、行为动作、执行为 4 类行为树节点, 建立了机动、侦察预警、指挥决策、火力打击和电子干扰 5 类原子行为动作和参数, 给出了打击目标选择、武器发射、来袭武器判断等 5 类原子条件; 提出了智能对手行为模拟系统组成, 包括行为规则编辑器与行为规则引擎, 建立了对手行为模拟运行流程。结合边境区域空地协同对抗典型应用场景, 仿真结果表明模拟的智能对手行为能够支持智能化能力评估。

关键词: 智能对抗; 行为树; 对手行为模拟; 规则引擎; 智能试验

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)09-1995-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0364

引用格式: 周芳, 范波, 刘小毅, 等. 一种基于改进行为树的智能对手行为模拟技术[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(9): 1995-2003.

Reference format: Zhou Fang, Fan Bo, Liu Xiaoyi, et al. An Intelligent Adversaries Behavior Simulation Technology Based on Improved Behavior Trees[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(9): 1995-2003.

An Intelligent Adversaries Behavior Simulation Technology Based on Improved Behavior Trees

Zhou Fang¹, Fan Bo², Liu Xiaoyi¹, Ding Yishan^{2*}, Zhang Ningxin¹, Shao Yachao², Zhai Xiaoyu²

(1. Information System Engineering National Important Laboratory, the 28th Research Institute of China

Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China; 2. National Innovation Institute of

Defense Technology, Academy of Military Science, Beijing 100071, China)

Abstract: Intelligent algorithm/intelligent platform/intelligent system intelligence capability testing and evaluation need to solve high-level intelligent opponent simulation problems, an intelligent opponent behavior simulation technology based on improved behavior tree is proposed. Four types of behavior tree nodes are designed, including behavior control, combat tasks, behavior actions, and execution condition node. Five atomic behavior actions and parameters are established, including maneuver, reconnaissance and early warning, command and decision-making, firepower strike, and electronic interference node. Five atomic condition nodes are provided, including target selection, weapon launch, and incoming weapon judgment node. The intelligent adversarial behavior simulation system is designed, including a behavior rule editor and a behavior rule engine. The adversaries behavior simulation execution process is established. Considering the typical application scenarios of air ground collaborative

收稿日期: 2024-04-09 修回日期: 2024-06-03

第一作者: 周芳(1982-), 男, 研究员, 博士, 研究方向为系统仿真试验与评估。

通讯作者: 丁一珊(1990-), 女, 助理研究员, 博士, 研究方向为智能测试评估技术。

confrontation in border areas, the simulation results indicate that the simulated intelligent opponent behavior can support the evaluation of intelligent capabilities.

Keywords: intelligent adversarial; behavior tree; adversaries behavior simulation; rule engine; intelligence experiment

0 引言

智能化技术的快速发展极大推动了智能仿真与试验评估领域方向的发展,加速单装/系统仿真试验向智能试验、体系仿真试验方向转变。智能试验测试评估首先需要解决的问题是构建高逼真、博弈强对抗的仿真试验环境,为被试智能体的试训与评估提供高水平智能对手与对抗目标,在强对抗环境下开展智能试验,确保被试智能体测试评估结果的真实性和可信度。目前,智能对手行为模拟主要有 2 种方法:①基于物理模型的自主行为模拟方法,采用“硬编码”方式,将对抗目标的自主行为规则固化在物理模型内部,基于战场态势的理解,生成决策指令;②基于模型外部的自主行为模拟方法,通过人工录入作战人员的决策知识,将“人的知识”赋予对抗目标,构建对抗目标的自主决策行为模型。该类典型的自主行为模拟方法包括有限状态机、分层状态机、基于规则决策等方法。有限状态机本质上是图,实现起来相对简单,适用于规模较小的对抗场景,不足之处在于模块化程度不高、状态行为重用性低、难以适应复杂大规模对抗场景。

针对上述问题,本文提出一种基于改进行为树的智能对手行为模拟技术,充分利用行为树的模块化可组合、可扩展、可解释性等优势,在原始行为树节点基础上,设计了 4 类行为树节点,包括作战任务节点、行为动作节点、执行条件节点、行为控制节点,用于编辑智能对抗行为规则。同时,提出了智能对抗行为模拟系统组成,包括自主行为规则编辑、自主行为规则引擎两部分,建立了智能对抗行为模拟运行机制和执行流程。

1 自主行为模拟相关研究

智能对抗行为仿真建模技术研究主要包括 Agent 建模^[1]、有限状态机法^[2]、行为树^[3-6]、数据驱动^[7]等方法,诸如联合仿真环境、MAXSIM 仿真平台、VBS3 仿真平台等研究成果,广泛应用于无人集群作战仿真等领域。

针对“敌方战术的建设性机器学习作战”(constructive machine learning battle for enemy tactics, COMBAT)项目^[7],其目标是为作战推演开发虚拟 AI 对手,利用博弈论与强化学习等方法,在仿真环境中生成针对敌方旅级部队自主作战行为模型,形成行动和响应的战术战法。

文献[8]先后研究了基于动态脚本的空战个体对抗战术自适应问题,以及分布式协调编队对抗问题。文献[9]研究了基于遗传编程进行行为树表示的计算机生成兵力战术机动模型的生成。文献[10]开发了一种数据驱动的计算机生成兵力行为建模原型,并在 VBS3 仿真平台中对步兵常见的 Bounding Overwatch 问题进行了观察学习研究。

在军事领域,智能对手行为模拟研究已初步形成了相关智能行为模型和 AI 决策系统,已嵌入集成到仿真推演平台,如空中战术决策系统等。针对空中作战决策研究,文献[11]提出了空中作战决策行为树建模与仿真方法,梳理了空中作战的模型外部自主决策规则,构建了基于模型外部自主决策的空中作战行为树模型,并基于 Lua 脚本语言实现空中作战行为树模型。文献[12]提出一种基于 Q-Learning 和行为树的 CGF 空战行为决策方法,构建 CGF 行为树,使其具有空中巡逻、攻击、防御、逃逸等智能对抗行为,通过 Q-Learning 提高 CGF 自主空战能力。文献[13]提出了基于规则推理动态构建行为树战术策略的方法,采

用行为树对CGF的产生式规则、战术行为规则等进行表征建模,进一步提出了基于强化学习的CGF行为树优化方法,针对行为树中可选择的行动方案,通过试错选择从环境中获得反馈经验进行在线学习,在满足作战条令和专家知识一致的基础上优化行为选择方案,提高行为的适应性和多样性。

文献[14]采用行为树方法,构建了以空中和地面防空预警兵力为主的行为树模型,综合作战场景、作战形式、作战兵力等多要素,探索了基于行为树模型的人机对抗方式。文献[15]提出基于势力图和行为树的作战决策建模方法,用以提高AI指挥员决策的合理性和准确性。文献[16-18]采用智能博弈技术,构建面向数字孪生战场的智能体建模框架,为智能决策模型训练提供智能体支撑。文献[18]针对无人蜂群电磁作战行动难以建模问题,分析了大规模无人蜂群电磁作战行为特征,提出了基于RRA(rule, respond, algorithm)的无人蜂群电磁作战行为模型建模方法,采用“触发判断-状态检验-控制响应”的流程机制描述行为规则。触发是无人蜂群个体与群体作战行为发生条件;状态是当前个体与群体自身以及外部环境所处的状态;响应是个体与群体根据自身状态或外部环境变化而产生的相应行为事件。

2 智能对手行为树节点构建

本文基于行为树的基本原理,针对智能对抗行为模拟的可灵活扩展、模块化程度高、可重复使用等能力需求,在行为树原始节点构成的基础上,新增作战任务节点,自定义设计了行为动作节点和执行条件节点,提出了4类行为树节点:行为控制节点、作战任务节点、行为动作节点、执行条件节点。

2.1 行为控制节点

行为控制节点主要采用行为树原始节点,包括选择节点、序列节点、并行节点、装饰节点,其中,选择节点、序列节点、并行节点为组合节

点,可以作为父节点并且允许拥有多个子节点,该类节点用于控制行为树的执行逻辑。

2.2 作战任务节点

本文设计了6类作战任务节点。

(1) 机动任务

机动任务包含智能对抗目标的航路机动、起飞降落、空中集结、海上集结、自主逃逸、撤退机动等任务。

(2) 侦察预警任务

侦察预警任务按照侦察对象、侦察区域的不同,进一步分解为区域自主侦察、目标自主侦察、航线自主侦察等任务。

(3) 指挥决策任务

指挥决策任务按照指挥决策流程的角度,进一步分解为打击目标自主选择、武器分配、兵力编成、传感器控制决策、电子对抗决策、通信对抗决策等任务。

(4) 火力打击任务

火力打击任务按照海空作战对象、作战样式的角度,进一步分解为对空护航、对舰护航、空中拦截、空对地攻击、空舰攻击、海上防空、水面拦截围捕、地面防空、对舰攻击、反潜攻击等任务。

(5) 电磁对抗任务

电磁对抗任务按照电磁攻击与防御角度,进一步分解为电磁干扰与电磁反干扰任务。

(6) 通信对抗任务

通信对抗任务按照通信链路攻击与防御角度,进一步分解为通信干扰与通信反干扰任务。

2.3 行为动作节点

行为动作是指按照作战业务处理流程,对作战任务进行分解,形成可保障作战任务完成的原子行为动作,共设计了5类行为动作节点,针对每类行为动作,将进一步分解为原子行为动作。例如,针对空中拦截作战任务,分解成“引导指令生成、航路机动、雷达开机、发射导弹”等序

列原子行为动作。

(1) 机动类行为动作

机动类行为动作进一步分解为航路机动、起飞降落、空中集结、海上集结、返航等原子行为动作。以航路机动原子行为动作为例，动作参数包括平台标识、航路点数量、航路点经度数组、航路点纬度数组、航路点高度数组。

(2) 侦察预警类行为动作

侦察预警类行为动作根据侦察对象和侦察方式的不同，进一步分解为目标自主侦察、区域自主侦察、航线自主侦察等原子行为动作。以区域自主侦察原子行为动作为例，动作参数包括任务标识、侦察平台类型、标识、区域点数、区域点经度、区域点纬度与区域点高度。

(3) 指挥决策类行为动作

指挥决策类行为动作按照作战指挥行动过程的角度，设计了目标自主选择、武器分配、兵力编成、传感器控制决策等原子行为动作。以武器分配原子行为动作为例，动作参数包括分配的武器类型、分配的武器数量、武器-目标配对。

(4) 火力打击行为动作

火力打击行为动作进一步分解为空中突击、对地打击、对舰打击、对空护航、对舰护航等原子行为动作。以空中突击原子行为动作为例，动作参数包括平台标识、名称、攻击区域、航线、发射导弹类型、数量、方位、速度、发射仰角等。

(5) 电子干扰行为动作

电子干扰行为动作进一步分解为激活电磁干扰、激活通信干扰、关闭电磁干扰、关闭通信干扰原子行为动作。以激活电磁干扰原子行为动作为例，动作参数包括平台标识、干扰目标标识、干扰强度、干扰方位、干扰频率、开始干扰时机、干扰持续时间。

2.4 执行条件节点

执行条件节点作为行为树的判断条件，决定着行为树节点执行过程，具体通过原子条件逻辑

“与、或”操作组合描述智能对手行为。共设计了5类执行条件节点，如图1所示。

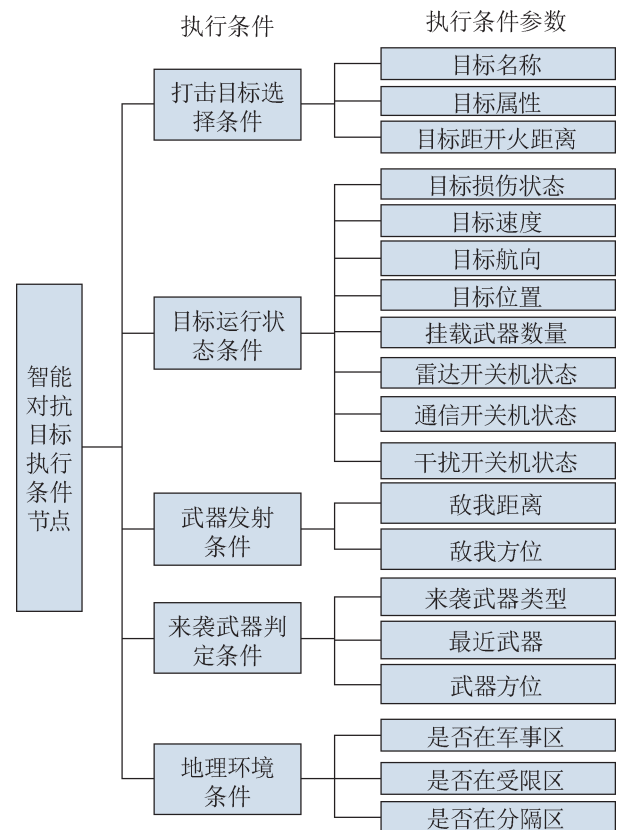


图1 执行条件节点设计

Fig. 1 Design of execution condition nodes

3 智能对手行为模拟系统

智能对手行为模拟本质是基于模型外部的自主决策行为模拟，是一个动态的条件判断、行为规则和调整的过程，需从仿真推演系统中获取实时仿真数据，判定执行条件节点，确定需执行的行为动作，生成行为动作指令，下达给仿真系统中实体仿真模型，触发实体仿真模型按照动作指令执行。智能对手行为模拟系统如图2所示。

3.1 行为规则编辑器

行为规则编辑器提供图形可视化拖拽方式，辅助试验人员编辑智能对抗目标的行为树，生成智能对抗目标战术战法，形成行为规则脚本文件。行为规则编辑流程如图3所示。

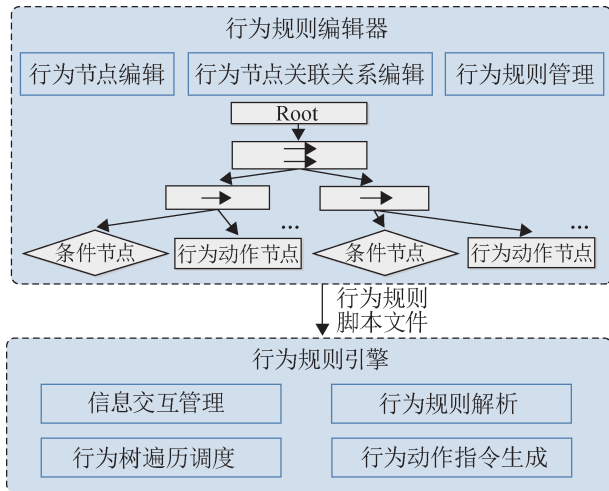


图2 智能对手行为模拟系统组成
Fig. 2 Composition of intelligent adversaries behavior simulation system

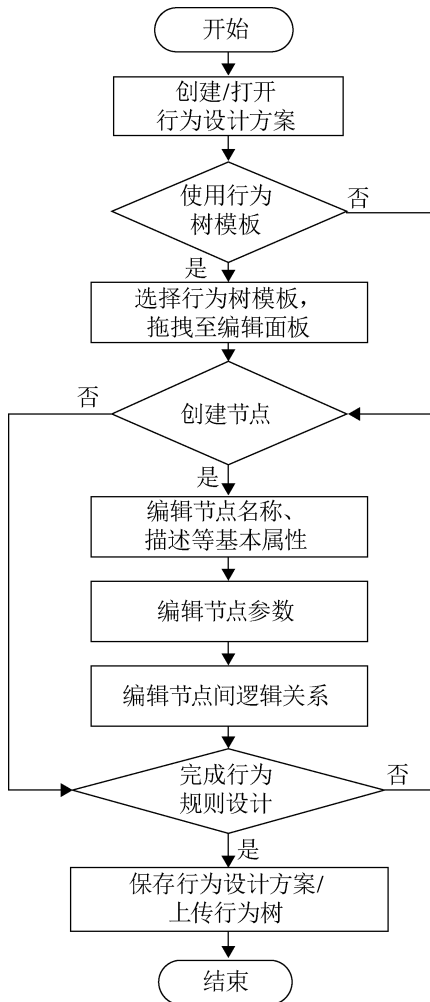


图3 行为规则编辑流程
Fig. 3 Editing process of behavior rule

执行步骤描述如下。

step 1: 创建空白行为设计方案或打开已有的行为设计方案。

step 2: 判断是否使用行为树模板, 如果使用则选择规定类别下的行为树模板, 拖拽到面板进行编辑。否则直接转入 step 3。

step 3: 添加行为树节点, 支持添加选择、顺序、并行、装饰、条件、动作等标准行为树节点或任务节点, 并设置节点名称、节点动作等属性, 编辑。

step 4: 连接节点编排行为规则执行时序。

step 5: 判断行为规则设计是否完成, 未完成则跳转至 step 3, 否则结束编辑, 保存行为设计方案或上传行为树至行为树库。

3.2 行为规则引擎

行为规则引擎主要完成行为树对象的创建和运行调度管理, 负责加载与解析自主行为规则脚本文件, 接收仿真推演系统模拟产生的仿真数据。系统每一帧从树的根部开始遍历, 按照从上至下, 从左至右的顺序检测每个节点是否被激活, 直至到达当前激活节点刷新行为树。

该部分由信息交互管理、行为规则解析、行为树遍历调度、行为动作指令生成功能模块组成, 各部分之间的信息交互关系如图4所示。

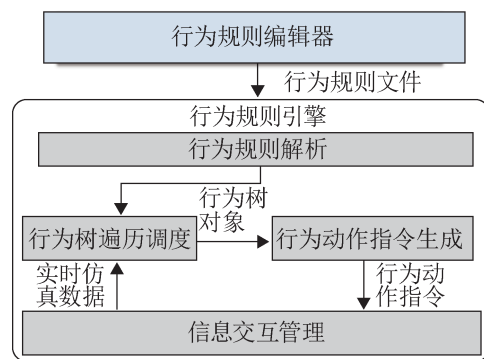


图4 行为规则引擎信息交互关系
Fig. 4 Information exchange relationship of autonomous behavior rule engine

信息交互管理提供仿真推演实体运行状态、交战环境信息、自动生成的行为动作指令等数据的接收、分类、筛选、发送、更新等管理。

行为规则解析负责提供行为规则文件中行为树节点类型、名称、执行时序、工作参数等信息，为行为树调度管理提供输入支撑。

行为树遍历调度负责在每一次仿真时钟推进时对行为树进行扫描，对行为树进行检查和处理，根据行为树定制的逻辑处理行为树节点，执行节点中定义的逻辑或动作。

行为动作指令生成提供智能对手的火力打击、电磁干扰、撤退等指令生成功能，生成的行动动作指令通过信息交互管理模块发送至智能对手仿真模型，实现智能对手行为模拟。

行为规则引擎处理流程如图5所示。

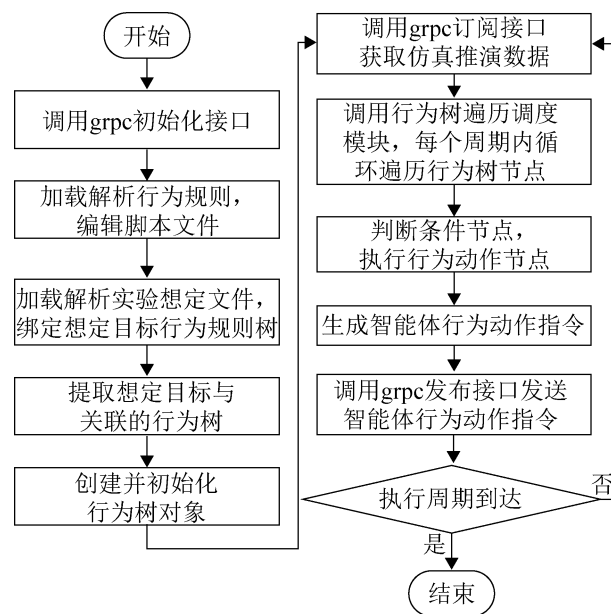


图5 行为规则引擎处理流程
Fig. 5 Behavior rule engine processing flow

3.3 行为规则引擎与仿真系统交互设计

行为规则引擎与仿真系统之间的交互，采用 gRPC 协议，由信息交互管理模块负责完成。一方面，规则引擎通过 gRPC 的数据订阅接口实时获取仿真推演数据，具体包括3类数据：①目标仿真状态数据，包括目标的名称、类型、标识、敌我属性、经纬度、高度、速度、航向、加速度、挂载导弹类型、导弹数量，以及目标

存活状态；②目标探测类数据，包括探测到的目标名称、类型、经纬度、高度、航向、航速、加速度、存活状态；③武器状态类数据，包括武器标识、航行速度、经纬高、航向、加速度等。另一方面，行为规则引擎通过 gRPC 的发布数据接口，将引擎生成的智能体行动指令发送给仿真系统，控制智能体作战行动。智能体行动指令包括指令类型、指令名称、指令执行者标识、指令作用目标标识、指令工作参数、指令执行时机。

行为规则引擎与仿真系统之间的交互关系如图6所示。

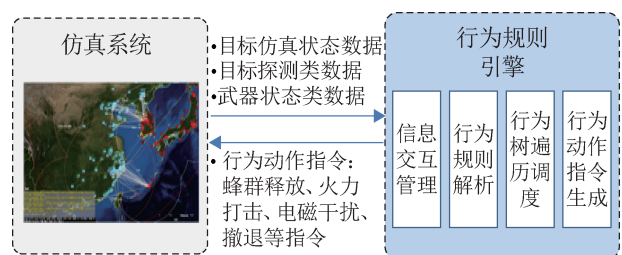


图6 行为规则引擎与仿真系统间交互
Fig. 6 Interaction between autonomous behavior rule engine and simulation system

4 仿真实验

(1) 行为规则编辑工具

行为规则编辑工具包括行为管理、行为编辑、行为模板管理模块，如图7所示。行为管理模块提供智能对手行为规则多级列表清单，支持试验人员新建、删除与保存行为规则；行为编辑模块提供作战任务节点、行为控制节点、执行条件节点和行为动作节点图形控件，支持试验人员手动拖拽至编辑主界面中，选中执行条件、行为动作节点后，可在右侧编辑节点工作参数，辅助试验人员灵活快速编辑目标行为规则；行为模板管理模块提供目标行为树的加载、编辑、更新与保存功能，支持试验人员在已有行为树的基础上进行二次编辑。

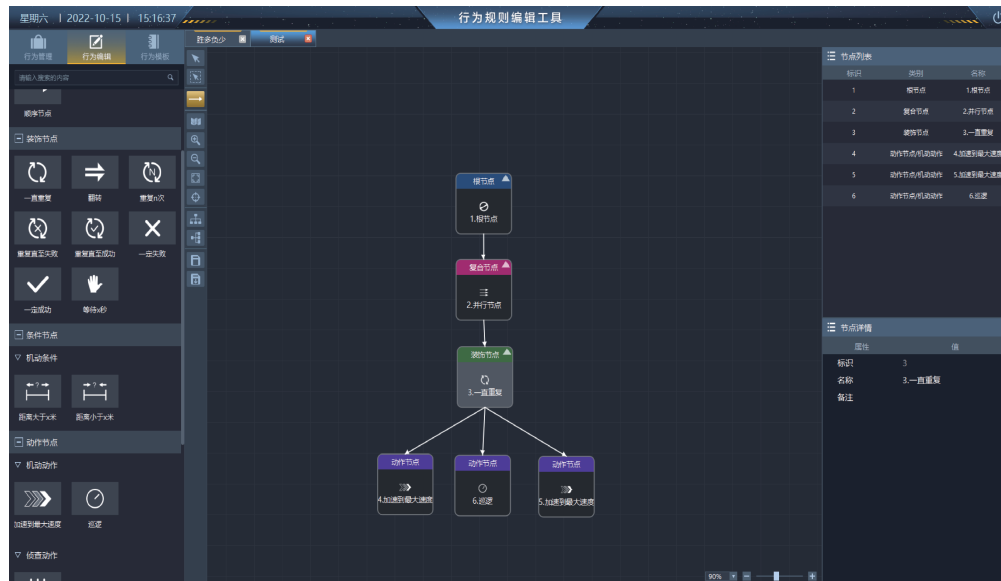


图 7 自主行为规则编辑工具
Fig. 7 Autonomous behavior rule editing tool

(2) 仿真实验设计

1) 应用场景设计

以某区域空地协同拔点作战为典型应用场景, 红方综合运用天基、空地力量, 对蓝方入侵部队位置进行侦察, 获取蓝方兵力部署、兵力规模等情况。指挥控制节点对空中/地面无人平台发送侦察任务、火力协同打击任务的指令, 空中/地面无人平台按照指令进行机动部署, 并释放无人侦察机对蓝方重点目标进行侦察, 传送到地面指挥所。

蓝方力量涵盖地面指挥所、地导、无人打击平台等, 对地面的机场、桥梁、指挥所等固定设施进行侦察监视, 并对红方无人机集群实施火力打击。

2) 典型行为规则设计

针对上述应用场景, 目的旨在检验红方智能体的智能决策算法智能化水平, 为此需要提供高质量的虚拟智能对手, 通过行为树技术和行为模拟工具, 模拟蓝方地导、火炮等智能对手行为。以地导为例, 基于改进行为树的智能对手行为模型, 行为树组成描述如下: ①行为动作节点, 包括目标侦察动作、传感器控制动作、机动动作、打击目标选择动作、武器分配动作、导弹发射动作等节点; ②执行条件节点, 包括目标是否进入攻击范围判断条件、目标存活判断条件、雷达开

关机条件、挂载导弹数量判断条件、是否接收撤退指令条件等节点; ③行为控制节点, 包括串行节点、并行节点、选择节点、重复执行成功节点、重复执行失败节点。

3) 实验环境设计

设计的仿真实验环境组成如图 8 所示。

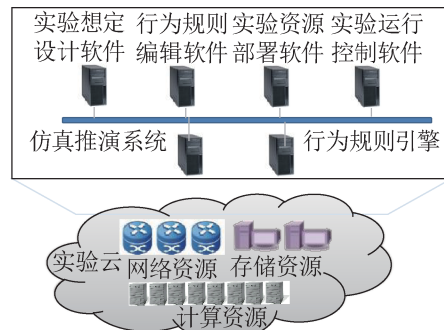


图 8 实验环境组成
Fig. 8 Composition of experimental environment

(3) 仿真实验结果

针对上述场景中设计的行为动作节点、执行条件节点、行为规则的描述, 利用行为规则编辑器, 采用图形化编辑方式, 生成地导等典型蓝方目标行为规则。通过自定义的行为动作节点、行为条件节点、行为控制节点的组合编排, 编辑空中拦截行为规则树, 如图 9 所示。

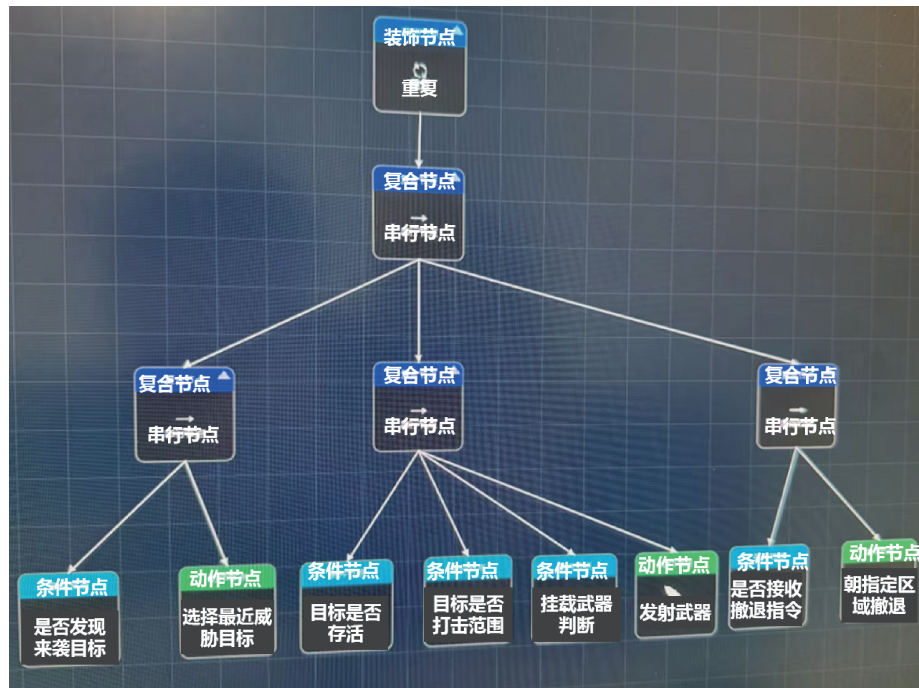


图9 地导行为规则树

Fig. 9 Behavior rule tree of ground to air missile positions

在本次实验中，蓝方智能体行为树模型将作为被试红方智能体的虚拟AI对手，开展红蓝智能对抗仿真实验，选择战果战损指标，记录多组实验下红蓝方损失的空中、地面智能体的数量，计算战果比、战损比，验证基于行为树的智能对手建模方法的有效性和可行性。图10为蓝方智能体战果率结果，表1为红蓝双方智能体毁伤数量统计结果。

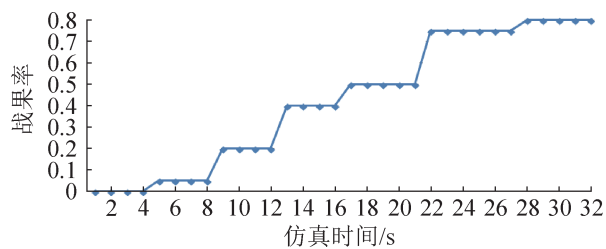


图10 蓝方智能体的战果率

Fig. 10 Victory rate of blue agent

表1 智能体毁伤数量统计

参数	红方	蓝方
空中兵力总数	1 606	8
空中毁伤兵力数	179	0
地面兵力总数	45	130
地面毁伤兵力数	0	105
战损率	0.117	0.807

5 结论

针对智能对抗目标作战任务的特点，对现有行为树方法进行扩充，提出了基于改进行为树的智能对手行为模拟技术，具有可灵活扩展、模块化程度高，行为树单个行为节点可重复使用，复用率高；作战行为规则编辑与软件代码相互解耦，避免了现有作战行为规则的“硬编码”模式，可通过可视化方式灵活录入作战人员的经验知识；作战行为规则执行与仿真推演平台相互解耦，作战行为规则的调度处理通过行为树的执行引擎来完成，不受仿真推演平台版本的约束。该方法旨在逼真模拟智能对手行为，为被试智能体能力水平测试提供强对抗虚拟对手，改变现有硬编码的对抗行为模拟的模式。

参考文献:

- [1] Toubman A, Poppinga G, Roessingh J J, et al. Modeling CGF Behavior with Machine Learning Techniques: Requirements and Future Directions[C]//2015 Interservice/Industry Training, Simulation, and Education Conference. Orlando: I/ITSEC, 2015: 2637-2647.

- [2] Li Ni, Hou Yancheng, Gong Guanghong. A Study on the Behavior Modeling Method of Helicopter Force[C]// Modeling, Design and Simulation of Systems. Singapore: Springer Singapore, 2017: 405-416.
- [3] Zhang Qi, Sun Lin, Jiao Peng, et al. Combining Behavior Trees with MAXQ Learning to Facilitate CGFs Behavior Modeling[C]//2017 4th International Conference on Systems and Informatics (ICSAI). Piscataway: IEEE, 2017: 525-531.
- [4] Fang Jun, Yan Wenjun, Fang Wei. Air Combat Strategies of CGF Based on Q-learning and Behavior Tree[C]//2017 International Conference on Electrical Engineering and Automation Control (ICEEAC 2017). Lancaster: DEStech Publications, Inc., 2017: 187-192.
- [5] Matteo Iovino, Edvards Scukins, Jonathan Styruud, et al. A Survey of Behavior Trees in Robotics and AI[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2022, 154: 104096.
- [6] Zhu Xianwen. Behavior Tree Design of Intelligent Behavior of Non-player Character (NPC) Based on Unity3D[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2019, 37(5): 6071-6079.
- [7] Farzad Kamrani, Linus J Luotsinen, Rikke Amilde Løvlid. Learning Objective Agent Behavior Using a Data-driven Modeling Approach[C]//2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Piscataway: IEEE, 2016: 2175-2181.
- [8] Anon. Constructive Machine-learning Battles with Adversary Tactics(COMBAT) [EB/OL]. (2021-12-14) [2022-09-01]. <https://www.darpa.mil/program/constructive-machine-learning-battles-with-adversary-tactics>.
- [9] Toubman A. Calculated Moves: Generating Air Combat Behaviour[D]. Leiden: Leiden University, 2020.
- [10] Gabriel Berthling-Hansen, Eivind Morch, Rikke Amilde Løvlid, et al. Automating Behaviour Tree Generation for Simulating Troop Movements (Poster) [C]//2018 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA). Piscataway: IEEE, 2018: 147-153.
- [11] 董倩, 纪梦琪, 朱一凡, 等. 空中作战决策行为树建模与仿真[J]. 指挥控制与仿真, 2019, 41(1): 12-19.
Dong Qian, Ji Mengqi, Zhu Yifan, et al. Behavioral Tree Modeling and Simulation for Air Operations Decision[J]. Command Control & Simulation, 2019, 41(1): 12-19.
- [12] 方君, 闫文君, 邓向阳, 等. 基于Q-学习和行为树的CGF空战行为决策[J]. 计算机与现代化, 2017(5): 37-39, 44.
Fang Jun, Yan Wenjun, Deng Xiangyang, et al. Air Battle Strategies of CGF Based on Q-learning and Behavior Tree[J]. Computer and Modernization, 2017(5): 37-39, 44.
- [13] 付延昌. 基于行为树的CGF行为建模研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
Fu Yanchang. Research on CGF Behavior Model Based on Behavior Tree[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [14] 王成飞, 董亚卓, 苏千叶, 等. 海战仿真中的智能对抗行为建模方法研究[J]. 指挥控制与仿真, 2022, 44(1): 79-85.
Wang Chengfei, Dong Yazhuo, Su Qianye, et al. Research on Modeling Method of Intelligent Confrontation Behavior in Naval Battle Simulation[J]. Command Control & Simulation, 2022, 44(1): 79-85.
- [15] 张俊峰, 薛青, 张扬, 等. 融合行为树和势力图的作战决策建模方法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(10): 5-8, 77.
Zhang Junfeng, Xue Qing, Zhang Yang, et al. Combat Decision-making Modeling Method Based on Behavior Tree and Influence Map[J]. Computer Simulation, 2021, 38(10): 5-8, 77.
- [16] 吴云超, 傅琛, 张宁馨. 面向数字孪生战场的智能体建模框架构建[J]. 指挥信息系统与技术, 2022, 13(4): 19-25, 31.
Wu Yunchao, Fu Chen, Zhang Ningxin. Construction of Agent Modeling Framework for Digital Twin Battlefield [J]. Command Information System and Technology, 2022, 13(4): 19-25, 31.
- [17] 陈希亮, 李清伟, 孙彧. 基于博弈对抗的空战智能决策关键技术[J]. 指挥信息系统与技术, 2021, 12(2): 1-6.
Chen Xiliang, Li Qingwei, Sun Yu. Key Technologies for Air Combat Intelligent Decision Based on Game Confrontation[J]. Command Information System and Technology, 2021, 12(2): 1-6.
- [18] 张阳, 司光亚, 王艳正, 等. 无人蜂群电磁作战行动建模与仿真[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(7): 2121-2130.
Zhang Yang, Si Guangya, Wang Yanzheng, et al. Modeling and Simulation of UAVs Swarm Electromagnetic Operation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(7): 2121-2130.