

多人机协同的虚实融合舰载机航保作业电子沙盘决策系统

李超超^{1,2,3)}, 程兰惠¹⁾, 李金雨¹⁾, 吕培^{1,2,3)}, 杨晓瑾¹⁾, 崔丽莎^{1,2,3)}, 王冲^{1,2,3)}, 张玉珍^{1,2,3)},
徐明亮^{1,2,3)*}

¹⁾ (郑州大学计算机与人工智能学院 郑州 450001)

²⁾ (智能集群系统教育部工程研究中心 郑州 450001)

³⁾ (国家超级计算郑州中心 郑州 450001)

(iexumingliang@zzu.edu.cn)

摘 要: 航母航空保障作业环境具有高度动态特性, 作业态势信息来源多样且复杂。现有的沙盘系统在态势信息的完整呈现和作业方案推演效率方面存在明显局限性, 限制了指挥员对作业方案的直观理解和实时修正能力。针对上述问题, 设计并实现了一套多人机协同的虚实融合舰载机航保作业电子沙盘决策系统。首先搭建一个面向跨设备协同交互分析的多源态势信息融合环境, 通过融合多通道获取的态势感知数据实现动态、完整的态势呈现; 然后提出一种基于混合现实环境的多人机协同交互可视化推演修正方法, 通过多人机协作方式优化机器推荐的舰载机作业方案, 利用虚实映射技术展现甲板全局的态势演变过程以辅助推演修正; 最后结合指挥员的直觉推理能力, 依托群体协作机制融合多名指挥员的经验, 减少信息不对称性, 计算出更加合理的推演方案。以大型舰船舰面航空保障作业过程的多人机协同仿真为应用场景进行实验, 证明了所提系统的有效性和先进性; 与当前流行的机器智能方法相比, 所规划的作业路径长度平均减少 2.77%, 途经站位总数平均减少 76.25%, 路径平稳程度平均提升 58.18%, 为航空保障任务的现场决策提供了科学可靠的参考支持。

关键词: 多人机协同交互; 虚实融合; 修正方案; 混合现实; 态势增强

中图分类号: TP391.41

DOI: 10.3724/SP.J.1089.2025-00242

Multi-Human-Machine Collaborative Virtual-Real Fusion Carrier-Based Aircraft Aviation Support Operations Electronic Sand Table Decision System

Li Chaochao^{1,2,3)}, Cheng Lanhui¹⁾, Li Jinyu¹⁾, Lyu Pei^{1,2,3)}, Yang Xiaojin¹⁾, Cui Lisha^{1,2,3)}, Wang Chong^{1,2,3)},
Zhang Yuzhen^{1,2,3)}, and Xu Mingliang^{1,2,3)*}

¹⁾ (School of Computer and Artificial Intelligence, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

²⁾ (Engineering Research Center of Intelligent Swarm Systems, Ministry of Education, Zhengzhou 450001)

³⁾ (National Supercomputing Center in Zhengzhou, Zhengzhou 450001)

Abstract: The aviation support operational environment of aircraft carriers is characterized by high dynamism, with diverse and complex sources of operational situation information. Existing sand table systems have significant limitations in terms of the comprehensiveness of situational information display and the efficiency of opera-

收稿日期: 2025-07-03; 修回日期: 2025-08-19。基金项目: 国家自然科学基金国家杰出青年科学基金(62325602); 国家自然科学基金重点项目(62036010); 装备预研教育部联合基金(8091B032257); 国家自然科学基金(62372415, 62102371, 62106232); 中国博士后科学基金特别资助项目(2021TQ0301)。李超超(1989—), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为计算机图形学、群体行为计算; 程兰惠(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为可视分析与态势认知计算; 李金雨(2002—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为可视分析与态势认知计算; 吕培(1986—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 主要研究方向为计算机图形学、虚拟现实; 杨晓瑾(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为多智能体路径规划、人机交互; 崔丽莎(1988—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为机器学习、计算机视觉; 王冲(1994—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为脑机接口、虚拟现实; 张玉珍(1990—), 女, 博士, 主要研究方向为时序数据分析、人工智能; 徐明亮(1981—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 会员, 论文通信作者, 主要研究方向为计算机图形学、人工智能、虚拟现实。

tional plan simulations. This constrains commanders' ability to intuitively understand and make real-time adjustments to aviation support operational plans. In response to these issues, this study designs and implements a multi-human and machine collaborative virtual-real fusion carrier-based aircraft aviation support operations electronic sand table decision system. First, we establish a multi-source situational information fusion environment oriented toward cross-device collaborative interaction analysis, through fusing situation awareness data obtained from multiple channels to achieve dynamic and complete situational presentation. Then, we propose a mixed reality based multi-human-machine collaborative interactive visualization method for operational plan simulation and correction. This method optimizes the machine-recommended carrier-based aircraft operational plan through multi-human-machine collaboration while utilizing virtual-real mapping technology to provide global visualized situational evolution process of the deck to assist in deduction and adjustments. Finally, by leveraging commanders' intuitive reasoning capabilities, it relies on group collaboration mechanisms to integrate the experiences of multiple commanders, mitigates information asymmetry, and ultimately computes more optimized simulation plans. The experiment is carried out by multi-human-machine collaborative simulation of aviation support operations on the deck of a large naval vessel as an application scenario, which demonstrate the system's validity and advantages. Compared with the current mainstream machine intelligent algorithms, the planned operational paths achieved an average 2.77% reduction in length, a 76.25% decrease in total station traversals, and a 58.18% improvement in path smoothness. This provides scientific and reliable reference support for on-site decision-making in aviation support tasks.

Key words: multi-human-machine collaborative interaction; virtual-real fusion; modified decision; mixed reality; situation enhancement

航母航空保障作业对舰载机的出动能力至关重要,直接影响航母的作战性能^[1]。航空保障作业环境具有高度动态特性,涉及多变性和不确定性,并包含众多态势要素。在有限的时空条件和资源约束下,安全合理地规划舰载机运动并提升甲板运行效率和出动能力,具有重要的现实意义。为了实现甲板作业推演流程的自主化与智能化,制定复杂集群动态作业规划更优方案,探索多人机协作仿真推演模式至关重要,可以达成作战保障效能的最大化。然而,仿真推演平台在直观地呈现推演方案方面存在不足,推演方案的生成受多种因素制约,目前,针对航保作业方案的动态优化与仿真验证方法及相关科学决策工具的研究尚未得到深入展开。

近年来,船舶领域仿真系统的研究受到了学术界的广泛关注^[2]。研究领域包括舰船舱室空间布局优化^[3]、虚实交互的船舶原型系统设计^[4]、航空母舰多阶段弹药转运序列可视分析^[5]、舰载机弹药保障作业调度的形式化建模与验证^[6]、航空母舰舰载机引导路径规划^[7]等,此类研究为航母上的各项作业提供仿真支持,构建了舰载机保障调度仿真实例,并优化舰载机的动态调度策略。此外,基于差

异化保障需求驱动的舰载机多机协同决策方法^[8]深入分析保障流程的网络结构关系,实现了跨规模、多机种集群保障资源的高效调度。基于深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)的舰载机保障作业实时调度方法^[9]通过全局与长期收益优化保障作业调度过程,实现了指导人员在高动态作战场景下能够规范、协同、高效地开展保障作业。同时,基于舰载机保障作业自适应批量匹配决策方法^[10]能够有效地应对保障环境的动态变化,快速地生成高质量的保障作业阵位分配方案。上述研究集中在仿真系统构建和机器智能方法的开发方面,为战场态势推演的迭代优化提供了新的思路和方法。然而,这些研究仍然存在一些局限性,表现在人机智能融合程度不足,任务推演过程缺乏透明度,指挥员经验无法实时、有效地介入并对推演方案进行动态矫正等方面。

航母甲板实际作业中,制定并执行一套既安全又高效的舰载机集群作业运动方案面临诸多挑战。在满足相关约束条件下,对舰载机作业方案进行多人机协同交互真实性微观推演,能够最大限度地确保舰面保障作业任务的安全规划与高效执行。特别是在面对复杂多变且约束性极强的航母航空保障

作业环境时,指挥员需要在短时间内做出合理、准确的判断,这对方案推演与优化提出了更高要求,主要表现在以下方面:

(1) 航母甲板作业环境复杂多变,态势信息来源广泛且多样^[11]。人机智能融合交互是获取并理解态势信息、辅助指挥员做出正确判断与决策的主要途径。然而,人机智能交互的不足直接导致态势信息的获取不全面,影响了作业环境的准确把握和决策的科学性。

(2) 当前,舰载机保障作业的模拟推演系统存在效能不足和可视化程度低的问题,指挥员无法有效地介入动态推演过程进行方案调校,限制了基于指挥经验优化保障作业路径规划的可行性^[1]。

(3) 现代联合作战筹划需要融合多域战场态势认知与智能化决策支持。现有战术设计的分析与过程重现方面存在明显局限性,无法对联合作战方案的实时评估与优化,严重制约了联合作战方案的快速响应能力。

为了解决上述问题,本文设计并实现了一套多人机协同的虚实融合舰载机航保作业电子沙盘决策系统。该系统以“多人-多机-环境”三维交互机制为核心。其中,“多人”指多名指挥员基于电子沙盘系统在同一作业环境中联合交互,作业的决策推演过程中充分地利用人的直觉、联想和经验等特质;“多机”包括但不限于虚实智能体、智能终端设备、机器智能算法应用程序和多个混合现实(mixed reality, MR)交互设备等,它们协同工作且信息互通;“环境”则表示虚实融合的混合空间。通过多人机在三维空间的实时交互并融合人类指挥官的经验知识,将人类感知认知能力与机器计算能力相结合,实现人机智能虚实融合交互的推演方案修正优化。首先提出一套面向复杂场景的跨设备协同交互子系统。以多设备协同交互分析为核心架构,采用数据分发服务(data distribution service, DDS)中间件方式实现异步通信,支持同一环境空间内多机间的数据交互,综合运用MR人机交互设备实现场景共享与协同操作。其次提出多人机联合交互可视化推演迭代修正方法。基于多方协作共享信息,多名指挥员基于虚实混合环境,并充分地利用直觉、联想和经验等特质进行态势作业推演,结合机器智能计算提供的优化方案与全局态势可视化地图实现虚实态势的映射,完成多人机协同推演的实时指导与矫正规划。基于NASA-TLX认知负荷量表,通过实验完成了认知负荷测评,验证了指控人员的总体认知负荷水平维持在相对较低水平。

以大型舰船舰面航空保障作业的推演方案优化为应用场景,对本文提出的系统设计进行原型实现与验证。

1 相关工作

1.1 基于MR的多领域应用

MR技术通过融合虚拟数字世界与客观物理世界构建虚实相互交融的空间。毛志杰等^[12]采用MR技术,结合虚拟环境与穿戴设备构建未来战争实验室。作为MR的最重要应用领域之一,军事仿真演练已与军事训练、装备维修及战场指挥控制等军事要素紧密结合^[13],带动了军事演练观念与方式的变革,并推动军事演练形式的进步^[14]。Ullo等^[15]探讨军事系统中MR技术在维护与培训流程标准化的初步应用,旨在提升意大利空军命令控制、计算机通信和情报军事系统(command control communications computers and intelligence, C4I)的整体效能,相关成果对其他领域亦有借鉴意义;Hughes等^[16]设计一种基于MR士兵辅助训练系统,显著地提升了高维度数据可视化效果和战术演练水平。基于MR的沉浸式交互界面可为数据提供立体视觉展现效果^[17]。Jenkins等^[13]提出一种基于MR的地面作战信息可视化方法,有效地增强了分布式训练空间的态势感知能力。

MR技术旨在将虚拟世界与现实世界无缝融合^[18],其广泛应用已深入到多个研究领域^[19]。蔡林沁等^[20]提出一种脑胶质瘤定位与分割算法,基于MR技术实现多设备实时共享,为脑胶质瘤的辅助诊断和治疗提供了有效支撑;Ostanin等^[21]设计一种多机器人交互控制框架,通过HoloLens等人机交互设备实现直观控制,支持多类型机器人交互;El Ammari等^[22]基于MR开发一种建筑信息模型协作系统,整合多源设施信息支持现场任务实施和有效决策;Choi等^[23]开发一种安全感知人机协作的MR系统,能够实时测量工作环境的最小安全距离并提供MR任务辅助功能。MR技术在远程辅助、人机交互协同作业等多种场景下都发挥着重要作用^[24]。周建峰^[25]开发一套基于MR的多人点云远程交互系统,使参与者及其三维重建的化身能够在同一MR空间中进行交互;Kennel-Maushart等^[26]开发一款适用于HoloLens2头显的交互界面,支持用户与多个移动机器人进行交互;Mahroo等^[27]利用MR技术设计一种智能家居应用系统,为人类提供了便捷的交互控制方式,并实现对智能家居的有

效辅助操作; Zhang 等^[28]基于 MR 技术开发一种情境感知远程协作系统,通过虚实交互自动生成增强现实 (augmented reality, AR) 指令,支持工业装配等复杂任务的实施,优化人机协作的效率。

随着数据分析任务日益复杂,充分地利用 MR 技术的优势以支持多人机数据共享与协同可视化,从而显著地提高协作效率,已经成为一个重要的研究课题^[19]。

1.2 基于电子沙盘的推演交互

沙盘推演是一种通过多方协同配合实现复杂作业仿真推演的工具,能够提升指挥员的风险感知能力和指挥决策能力,为决策者提供对事态演进过程的预见性,并在关键时刻支持科学、有效的决策。李超超等^[29]基于半实物电子沙盘推演系统提出暗态势计算概念,通过 AR 技术实现了人机物虚实融合的态势感知与决策支持;王明辉等^[30]设计一种新型舰船电子沙盘交互系统,实现了全局态势信息的充分共享;Zhou 等^[31]提出一种基于深度增强算法的电子沙盘交互系统,保证了电子沙盘的可视化显示效果;Sun 等^[32]设计了系统仿真电子沙盘软件,支持场景生成与外部信息接入;Li 等^[33]提出大型电网安全稳定沙盘推演技术,强化了电网仿真数据分析与展示;Li 等^[34]提出面向 AR 电子沙盘的手势交互方法,实现了虚拟目标的多元化交互控制;Dong 等^[35]开发混合云控制测试实验沙盘平台,基于 MR 技术将虚拟模型与物理实体集成到同一混合空间,实现了虚实共存与相互作用,并支持“车-路-云”系统的同步运行与跨平台互动。

态势可视化在评估和理解复杂场景态势、制定科学决策方面发挥着重要作用。Li 等^[36]设计一种集成二维与三维的电子沙盘态势可视化系统,并开发了具有 3 层结构的电子推演沙盘系统,通过将态势可视化的软硬件平台应用于多位指挥员的协同决策任务中,提升了决策的科学性。

当前,市场上缺乏一个有效的交互式平台,以支持决策方案的迭代优化和模拟推演。传统数字沙盘的全息投影在可视角度和投影效果上存在显著局限性,不仅限制了其应用场景,而且在人机智能交互方面也表现不足,在视角转换过程中可能出现图像失真或模糊等问题,视觉效果不佳,难以灵活地应对多样化的场景变化。MR 技术具有新颖的人机交互方式^[24],结合上述研究优势,本文设计并实现了多人机协同的虚实融合舰载机航保作业电子沙盘决策系统。该系统实现了多人机虚实融合的协同交互功能,支持多场景应用接入与实时数据交

互,并提供逼真的三维视觉效果。

1.3 基于人机协同的融合智能

近年来,众多学者致力于人机协同的融合智能研究。Zheng 等^[37]提出“混合增强智能-协同与认知”概念,并深入探究人机智能融合问题。“人在回路 (human-in-the-loop, HITL)”的混合增强智能、人机交互的共融形态,以及驱动脑机协同与群组协同的关键理论和技术已经逐步形成^[38]。研究人员的研究重点已逐步从“拟人智能”转向“人机融合”方向^[39]。

为了提升人机智能融合过程中人对环境的认知能力,并增强机器的自主避让和自适应能力, Li 等^[40]提出一种基于 AR 技术和数字孪生技术的 HITL 控制的新型多机器人协同工业制造系统,该系统集成强化学习算法,以降低操作人员的学习成本;袁庆曙等^[41]通过空间 AR 系统的实验发现,用户在与虚拟内容交互过程中表现出良好的环境感知、空间感知和协同感知能力,研究表明,任务执行过程中用户的认知负荷维持在较低水平,并对空间 AR 中的人机交互技术进行了系统的分类;Wang 等^[42]构建一个面向人机协同制造的系统框架,提升了人机协作过程中的人员效率,同时优化人机混合制造生产线的运行效率;Wang 等^[43]基于“互信人机知识自动化”理论设计混合增强智能机制,提升了复杂人机协作系统的认知增强能力。

元宇宙背景下,人机深度融合引发了诸多重要议题,包括道德伦理、隐私安全,以及使用者过度沉浸等^[44]。Chu 等^[45]针对自动驾驶安全性展开研究,系统性地探讨了高风险交通情境中人机协作机制及人工智能研发中的伦理议题。

为了构建虚实融合的沉浸式混合增强智能仿真推演平台,实现人机交互演化与认知能力的协同增强。本文在上述研究成果的基础上,构建虚实混合空间的串联互通框架,充分地挖掘人机混合增强智能的潜力,通过整合并融入人类的知识与经验,基于多人机协作的虚实融合交互模式,采用 MR 智能推演沙盘,提升指挥员的态势感知能力。本文的研究目标是实现对舰面航空保障作业复杂集群的仿真推演,并结合人机智慧实现对作业推演方案的修正与优化。

2 本文系统架构

本文设计并实现了一套多人机协同的虚实融合舰载机航保作业电子沙盘决策系统,实现了构建

跨设备协同交互的多源态势信息融合共享环境, 并提出多人机联合交互式可视化推演的迭代修正方法。最后, 在航空保障作业场景下进行了应用实例验证。本文系统的整体框架如图1所示。

本文系统在高沉浸感的虚实融合环境下进行多人机协同仿真推演, 在舰面航空保障作业推演任务中, 虚拟信息与实物场景实时地叠加呈现。一方面, 指挥员通过跨设备协同交互分析, 实现多机通信与信息共享, 辅助支持实际作业方案的调整。基于多渠道感知方式, 全面、直观地掌控甲板面全局态势状况, 提升对舰面航空保障作业推演交互流程的感知能力。另一方面, 依托实时仿真的态势数据与智能算法推荐的备选方案, 多人机协作修正并对推演方案迭代优化。人类智慧与机器智能实现有机融合, 构成一个由“指挥员-人机交互设备-目标物-环境”组成的复杂动态系统。多名指挥员的经验、认知、直觉和联想等特质被融入交互过程, 基于信息共享机制与群体协作智慧, 通过多人机联合的方

式对机器算法推荐的路径规划方案进行交互式可视化推演修正, 支持多视角(第一人称、第三人称等)协同推演, 最终实现“所改即所见”的多人机协同目标。

本文系统的硬件结构如图2所示, 包括推演台、智能小车等核心组件。推演台支持多场景仿真环境的接入; 智能小车作为航保作业的仿真推演的研究对象, 是本文系统的研究重点; 指挥员通过多类型MR眼镜交互设备进行虚实交互操作。该系统的核心交互控制中枢为综合仿真可视分析平台, 整合了多维度交互数据的实时收集与处理。

指挥员与智能系统共同参与舰载机集群运动方案的生成, 并对机器计算的方案结果进行分布式优化, 推演过程直观、易于理解, 降低了认知负荷。同时, 从路径长度、路径平稳程度、途径站位个数和认知负荷评分4个维度的指标 Φ , 对舰载机作业方案质量的优劣进行评估。决策方案制定与推演修正过程形式化表示如下:

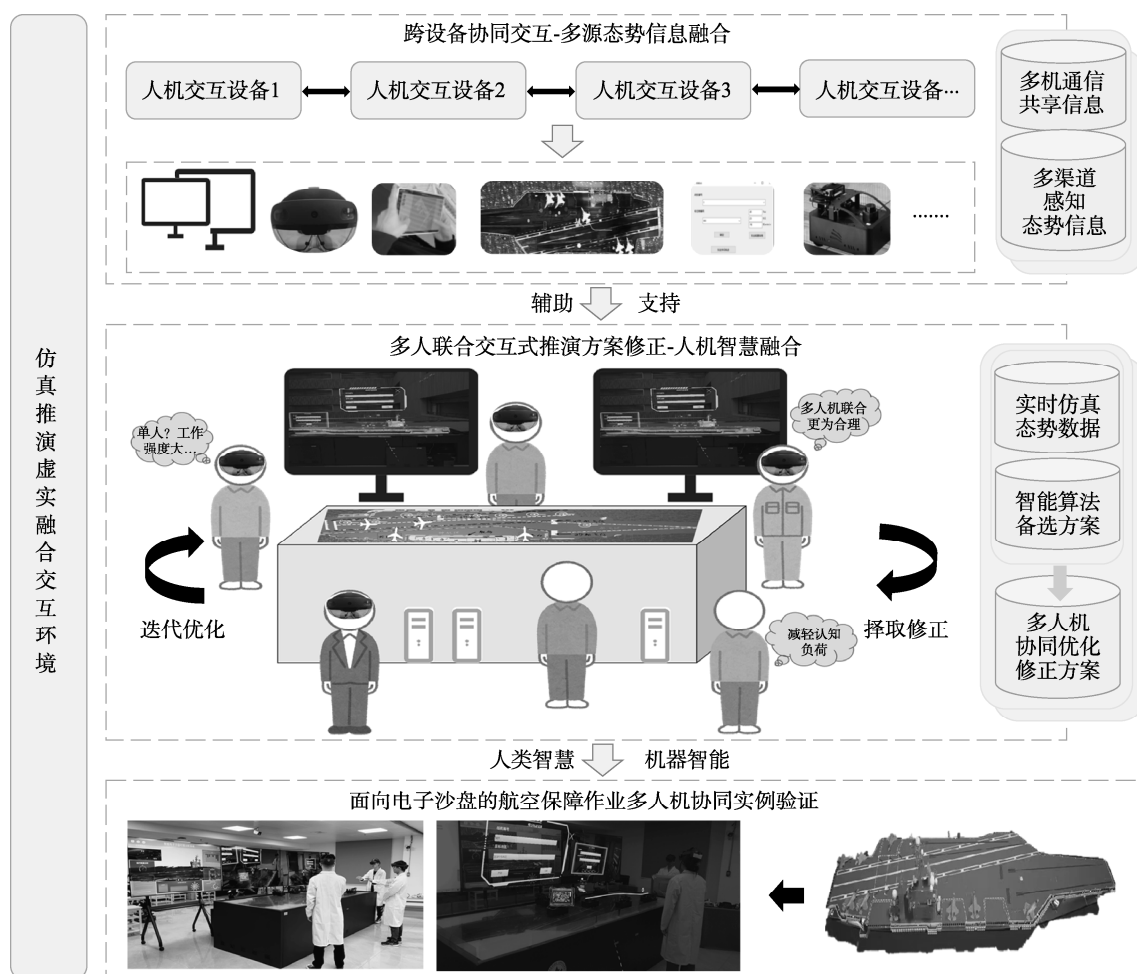


图1 本文系统框架



图2 本文系统的硬件结构

首先,本文系统的初始备选推演方案 E_d^0 由机器计算;然后,人类介入对初始方案迭代修正的优化方案记为 E_d^k , $k=1,2,\dots$;经多人机协同配合优化 $E_d^0 \xrightarrow{\phi} E_d^{\text{final}}$ 后,获取最终的方案定义为 E_d^{final} 。指挥员在接收到感知信息后,经过认知处理,理解并分析当前的态势信息。指挥员基于实时态势认知 $W(t)$,持续调整并优化修正后的决策方案 $E_d(t)$,该过程为

$$E_d^{\text{final}}(t) = E_d^0 + \Delta E_d(W(t))。$$

其中, $\Delta E_d(W(t))$ 表示对初始决策 E_d^0 的修正量,是基于指挥员对实时态势信息的理解得到的决策结果;修正函数 ΔE_d 采用指挥员的修正行为策略实现。

此外,基于跨设备的多源态势聚合与可视化呈现,可拓展信息获取渠道,以提高态势信息获取速度,通过群体智慧的协同挖掘与快速转化,提高信息利用和转化的效率,多设备信息融合与多人并行交互共同实现人机混合智能的闭环决策优化,提升对场景态势认知和决策判断的速率。同时,通过可视化推演交互行为降低人类对态势信息的理解难度,使任务完成过程中人类认知负荷较小。本文将指挥员的认知负荷划分为4类来源:(1)人机交互中操作设备引发的认知负荷 C_1 ; (2) 协作交流过程中的认知负荷 C_2 ; (3) 面对大量态势信息进行理解产生的认知负荷 C_3 ; (4) 其他多样化因素导致的认知负荷 C_4 。因此,将总认知负荷 C 表示为一个参数集 $C = \{C_1, C_2, C_3, C_4\}$,不同认知负荷的权重记为 η_i , $i=1,2,3,\dots$,即

$$\min(L) = \eta_1 C_1 + \eta_2 C_2 + \eta_3 C_3 + \eta_4 C_4。$$

3 本文系统实现

3.1 系统核心功能模块构成与实现

本文系统以舰载机集群运动推演优化的需求为出发点,面向航母航空保障作业流程建立演示验证平台,其核心功能模块有人机交互、态势信息叠加、数据通信、智能小车运动和可视分析,如图3所示。基于MR技术设计自然人机交互形式与可叠加的舰载机态势信息,使用DDS与航空保障综合仿真平台进行数据交互。

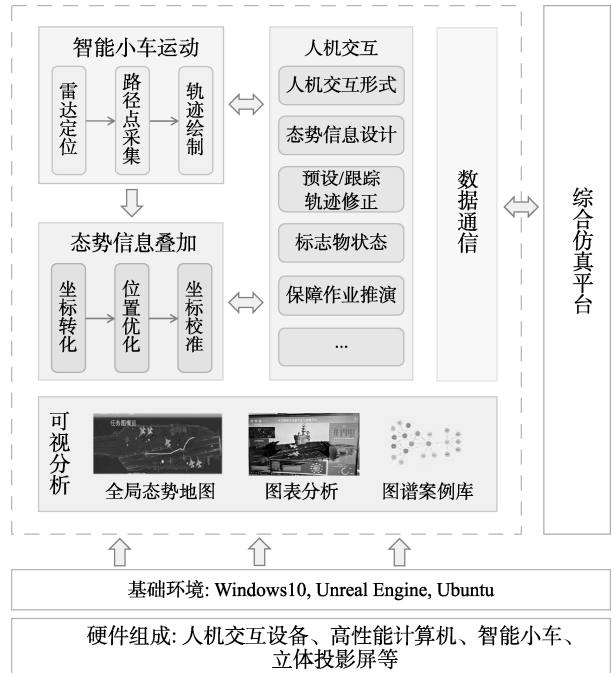


图3 电子沙盘决策系统核心功能模块构成

3.1.1 人机交互模块

利用 Hololens2 深度摄像头传感器获取手部深度信息和运动轨迹,实时识别和解析手部交互动作。系统的人机交互用户界面(user interface, UI)设计布局如图4所示,基于指挥作业需求分析设计总控调度菜单,指挥员通过手势选择、拖拽、缩放等操作与各类虚拟态势信息进行交互,并下发保障任务指令。

3.1.2 态势信息叠加模块

整体态势信息虚实融合叠加效果如图5所示。根据数据传输信息的不同,态势信息UI包括保障实体态势信息展示界面和作业操作界面2部分。前者负责接收消息并进行态势信息的动态展示,后者负责将指挥员选择的作业调度信息发送给综合仿



图4 人机交互 UI 设计布局示意图



图5 态势信息虚实融合叠加整体效果图

真平台。系统依据实时监测的智能体位置信息,根据其 ID 编号将虚拟态势信息叠加至对应保障实体的上方。

3.1.3 数据通信模块

为了满足系统中各个模块及综合仿真平台之间的数据交互需求,采用 DDS 通信方式支持不同应用进程在局域网内的通信。

3.1.4 智能小车运动模块

智能小车代表舰载机,它利用激光雷达扫描推演台周围环境,通过同步定位与地图构建(simultaneous localization and mapping, SLAM)可设定障碍物等环境信息;同时,小车的运动位置和姿态不断更新,并将系统采集到的运动轨迹路径点信息实时传输到虚拟场景中。

3.1.5 可视分析模块

基于虚幻引擎制作可视化图表,对相关态势数

据进行分析和存储,利用可视化图表进行展示。全局态势图虚实映射效果如图 6 所示,其可视化地呈现甲板面舰载机的整体运动状况,并绘制出其实际运动轨迹。

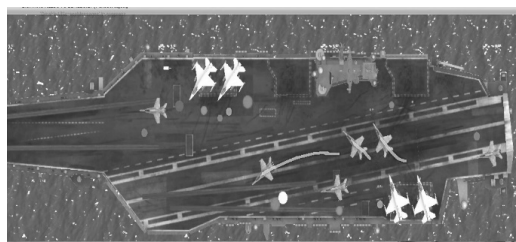


图6 多车运动虚实映射示意图

3.2 跨设备协同交互多源态势信息融合

基于多人机的场景共享环境,多源交互设备动态地感知并更新态势信息,拓展态势信息的获取渠道。然而,在多人机虚实融合协作进行态势推演的过程中,态势信息广泛多源且环境复杂多变,若仅依靠单一方式感知态势信息会导致信息不全面或片面化,无法实时地掌握态势的全貌。在信息处理能力恒定的条件下,态势感知效能与信息输入量呈正相关,因此需要扩大态势信息获取的渠道。态势信息量 $U = [Q_\alpha \ Q_\beta \ Q_\lambda \ Q_\omega \ \dots]$ 由多种方式获取;其中, Q_α , Q_β , Q_λ , Q_ω 等分别表示通过不同交互设备获取态势信息的方式。

跨设备协同交互多源态势信息融合模式采用如图 7 所示分层融合架构,其中,核心子模块为人机实

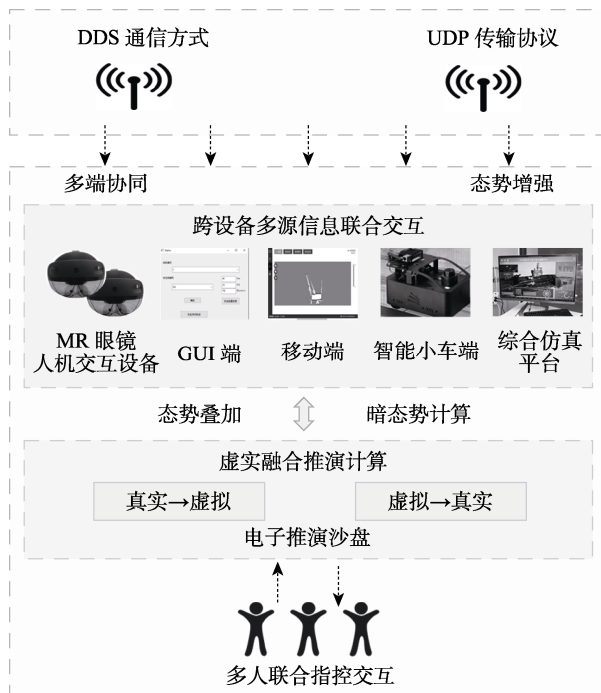


图7 跨设备协同交互多源态势信息融合模式

时通信、虚实融合推演计算、多人协同指挥交互和跨设备联合交互。不同推演情境下设置不同感知手段,指挥员可以选择协作分析的多类交互设备和感知方式,实现对态势信息的全面获取。

3.2.1 人机实时通信模块

为了实现系统内部网络数据的实时输送,通过组建局域网实现全局网络通信,基于 DDS 通信架构与用户数据报协议 (user datagram protocol, UDP) 跨设备多维度感知态势信息,完成虚实混合空间中人类与电子沙盘、不同设备之间交互数据的动态传输。

3.2.2 虚实融合推演计算模块

多人机跨维度交互采用真实→虚拟与虚拟→真实的双向映射架构,实现物理空间与数字空间的动态耦合。一方面,在现实物理空间中增强虚拟信息的呈现,即与真实环境信息交互可以控制虚拟环境状态变更;另一方面,将虚拟内容与现实世界融合,即与虚拟环境信息交互可以影响真实环境状态变更。基于虚实混合空间,从不同交互维度(多设备渠道及人类多通道知觉能力)实现对作业推演环境的全面感知;同时,依托虚实信息融合通道建立双向反馈的虚实映射关系,对多源数据进行置信度加权融合,解决单一传感器信息获取的不确定性问题。通过 MR 设备的空间映射,实现虚拟信息与现实场景的厘米级对齐,扩展态势信息采集与融合维度。将多源态势信息融合并集成至虚实混合空间中,经过虚实坐标转换后完成态势推演的可视化呈现。

3.2.3 多人协同指挥交互模块

推演过程支持实时数据共享,在同一个虚实结合的共享场景中多人协作,使用手势和肢体语言与虚实混合的环境交互。图 8 所示为多人协作任务分配机制流程图,系统将目标任务解析为可分配单元并确定执行人员数量,每人每次可认领一项任务;任务认领后,系统授权申请人对应控制操作权限,只有当前任务执行结束后才能继续认领下一个任务,避免多人协作过程中引起的冲突问题。

3.2.4 跨设备联合交互模块

沙盘借助 Hololens2、Meta Quest Pro 等人机交互设备,增大态势信息获取量 U , 通过其沉浸式虚拟显示、自然交互和实时数据共享特性,加强人类对作业环境的理解力,进一步获取认知信息。基于 MR 技术构建虚拟环境态势信息的三维空间;同时,仿真引擎中的高质量视觉渲染效果使得虚拟环境与真实空间的态势推演交互真实感增强^[46]。基于跨设备多端协同交互在一定程度上扩展了态势

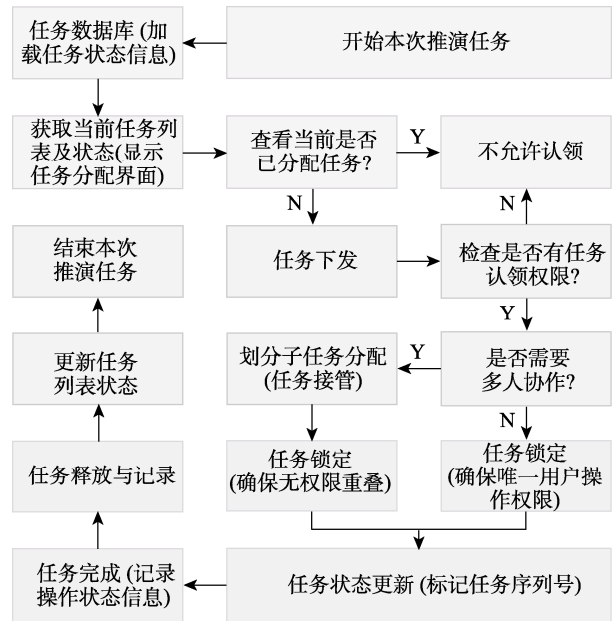


图 8 多人协作任务分配机制流程

信息获取来源的渠道,提高了获取态势信息的准确性与可信度。通过跨设备多渠道感知,从多个维度覆盖信息获取来源,实时监测并及时捕捉全局态势的动态变化。

跨设备协同交互模块集成了多设备之间的数据信息共享,包括触控大屏、MR 设备、智能终端辅助显示设备等。如图 9 所示,通过多设备协同交互渠道,为指挥员提供更直观且易于理解的推演环境。图 9a 中,通过 UI 显示前端进行的可视分析展示,基于全局态势图呈现整个任务作业的实时情况;图 9b 中,通过 GUI 控制或更改虚拟场景中的标志物状态,以及相应的态势信息;图 9c 中,通过 MR 眼镜端与叠加的虚拟态势信息进行交互,且系统支持多机协同操作信息共享;图 9d 中,通过移动端为智能小车下发任务命令,同时指挥员可以添加障碍物及起点终点位置信息,使智能体在规划的场景中运动;图 9e 中,手持终端控制和调整智能小车的运动方案,指挥员佩戴 Hololens2 等人机交互设备处于同一虚实结合的作业环境,可查看由机器智能算法推荐的预设轨迹,并以此为参考,实时融入个人智慧和经验修正备选方案。

3.3 多人机联合交互式可视化推演迭代修正

本文系统可视推演迭代修正过程如下。

为了构建统一的环境表征体系,对虚实融合状态空间建模^[47] $\Theta = V_0 :: \infty R_0 ::$; 其中, V_0 表示虚拟仿真场景状态集合, R_0 表示真实物理环境状态集合,两者通过 ∞ 符号建立连接。虚和实的映射函数状态转移过程定义为



a. 可视分析 UI 前端

b. GUI 控制后端



c. MR 眼镜人机交互端



d. 智能控制移动端



e. 遥控小车手持终端

图 9 跨设备协同交互模式

$$M: R_0 \xrightarrow{f_v f_R} V_0;$$

其中, f_v 表示触发虚拟空间状态转移变更的交互; f_R 表示触发真实空间状态转移变更的交互。

智能体的实际运动轨迹即跟踪轨迹, 同步呈现在 MR 设备与可视化的全局态势图中。实际运动轨迹 S_h 基于 MR 设备叠加呈现。通过 MR 人机交互设备呈现指挥员修正后的实际路线方案记为 $S'_h = \{S'_{h1}, S'_{h2}, S'_{h3}, \dots\}$; 在全局态势图同步映射的虚实融合轨迹方案为 $S''_h = \{S''_{h1}, S''_{h2}, S''_{h3}, \dots\}$ 。则智能体最终运动轨迹定义为 $S_h \xleftarrow{1.1} S'_h \xrightarrow{1.1} S''_h$, 其与上述 2 种呈现形式 S'_h 和 S''_h 保持同步, 实现了从操作者修正指令到智能体执行的全链路轨迹一致性表达。

依据舰载机集群运动方案评估标准 ϕ , 对机器智能生成的初始预设轨迹 S_m 与融合指挥员直觉经验修正优化后的轨迹 S_h 进行量化对比分析, 选择最优运动路线方案 S_G 。该评估过程定义为

$$\Theta: (S_m, S_h) \xrightarrow{\phi} S_G。$$

基于上述形式化表示, 多人机协同交互可视化推演修正包括 3 个方面: 基于机器智能的预设方案生成、基于全局态势图的虚实融合推演和基于多维人类特质的方案修正。多人机联合修正模块的结构如图 10 所示。

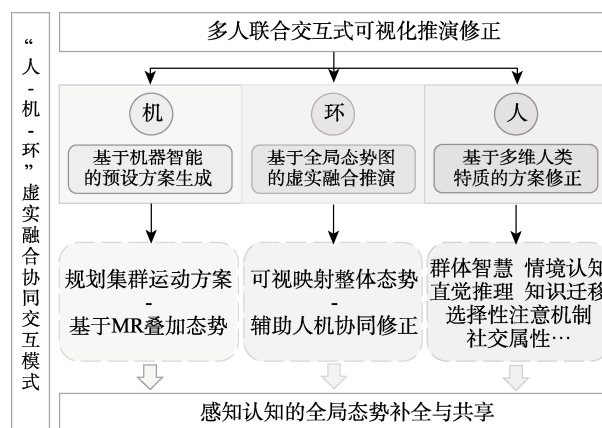


图 10 多人机联合修正模块结构图

3.3.1 基于机器智能的预设方案生成

人类基于多种交互方式的支持, 参照机器智能计算的备选方案进行修正优化。机器智能算法依据预设的作业任务对舰载机集群运动方案进行规划, 通过虚实一致性计算, 预设轨迹能够直观地叠加至真实场景中各智能小车位置的上方, 便于人类理解和参考。基于机器智能计算的方案在一定程度上提供了对舰载机作业运动的指导。

智能体运动融合了机器算力支持与人类优化修正优势。智能小车利用激光雷达获取环境信息, 并结合定位算法实现自身定位与导航, 虚拟态势信息通过多类 MR 眼镜交互设备可视叠加呈现。机器智能算法计算的路径为预设轨迹如图 11 中白色轨迹所示, 人类介入对实体运动进行干预后, 实际作业路线如图 11 中红色跟踪轨迹所示; 在下发保障任



图 11 预设轨迹与跟踪轨迹效果对比

务作业之后, 利用人机交互界面同步显示机器智能算法, 自动生成的预设轨迹与操作人员修正后的实际跟随轨迹。叠加舰载机的实时修正方案及相关虚拟态势信息, 实现对机器推荐方案的所改即所见。

多人机交互推演基于同一个共享的作业环境, 指挥员均佩戴 MR 眼镜, 在不同视角下, 态势推演

的动态演化阶段展示内容如图 12 所示。可以看出, 机器生成的预设方案及每位指挥员的动态操作同步至联合指挥人员的指挥视野中, 多人联合参考机器推荐方案对智能体实际运动轨迹进行修正, 最终跟踪轨迹的数据被实时地发送至综合仿真平台, 对后续运动方案的分析与计算提供数据支撑。

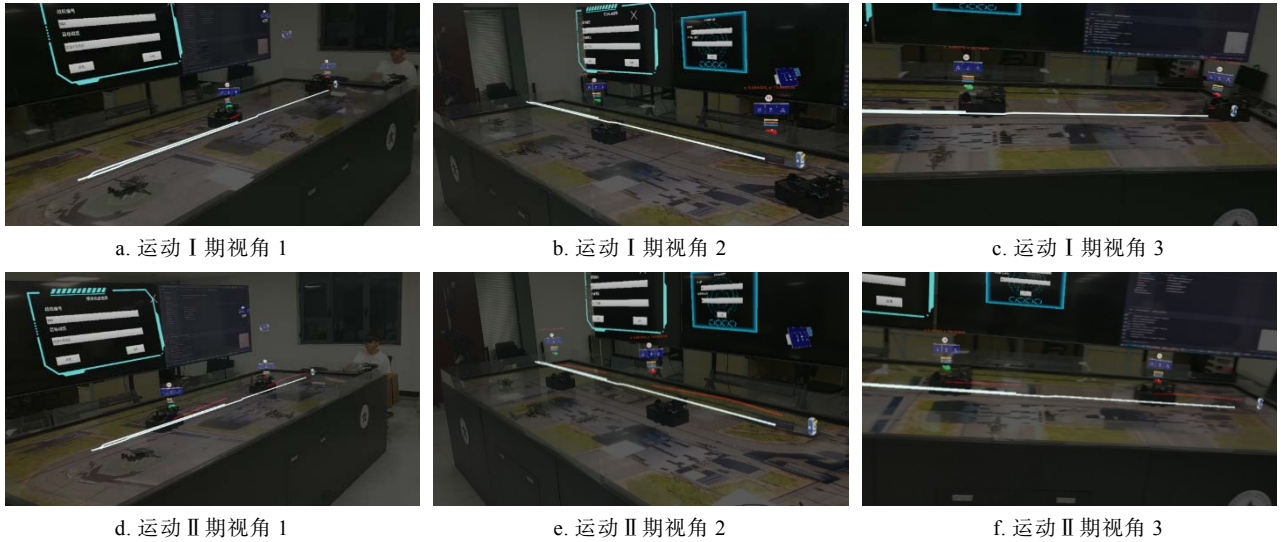


图 12 同一环境中的多操作员协同决策推演交互示意图

3.3.2 基于全局态势图的虚实融合推演

为了充分地发挥人脑联想与认知能力, 系统以虚实映射交互的方式在全局态势图中可视化呈现真实场景中智能体的运动。全局态势图能够直观地呈现整个甲板面的舰载机运动态势, 人类依据实时场景态势变化动态地优化舰载机运动规划方案, 加强人类对当前作业任务整体环境态势的掌控, 降低指控作业的认知负荷水平。

系统采用双模态状态空间表征方法对智能小车的虚拟对象和物理实体进行统一建模, 并用不同的集合表示。物理实体状态的智能小车在真实环境表示为 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$, 其在数字孪生环境中的虚拟对象表示为 $A^* = \{A_1^*, A_2^*, \dots, A_N^*\}$; 则 $A \xrightarrow{I1} A^*$, $\xleftarrow{I1}$ 表示在虚实混合空间中, 智能小车虚拟对象和物理实体一一对应。根据双向虚实映射关系, 实现虚实状态的严格同步, 表示为

$$A = M(A) = f_v f_R(A) = A^*。$$

其中, 全局态势图中虚实映射呈现的运动路线 S_n'' 与人类修正后的实际运动轨迹路线方案一一对应。

真实场景的智能小车运动如图 13a~图 13c 所示。可以看出, 真实空间与虚拟空间的融合打破了二维信息展示的局限性。全局态势图结合多元化沉

浸式虚实交互操作, 将真实环境中的运动规划方案实时转化为虚拟场景中的动态轨迹, 如图 13d~图 13f 所示。图 14 所示为全局态势图虚实融合推演实现流程, 通过实体小车实时定位数据发送、消息队列遥测传输 (message queuing telemetry transport, MQTT) 服务器对位置信息的接收、虚实坐标转换对应、基于 MR 眼镜的可视化推演等过程, 实现真实场景中智能小车运动至全局态势图的虚实同步映射, 为进一步方案修正判断提供可靠依据。

多人协同可视化交互推演实现态势信息动态共享, 降低了信息传递的误差, 促使群体深入理解决策的合理性与逻辑性, 支持形成群体共识, 为最终决策服务。基于全局态势图, 当个人判断出现偏差时, 在同一个虚实融合环境中, 参与协作任务的其他联合人员可实时介入交互操作, 并提供关键性意见, 以降低独立个体决策失误的风险, 提升复杂作业任务决策的鲁棒性与灵活性。

3.3.3 基于多维人类特质的方案修正

多人作为一个集体对机器智能算法提供的备选方案进行优化, 群体智慧与机器智能深入虚实融合协同作业中。群体协作中的每个独立个体都能为决策提供独特的解决方法, 群体协作智慧^[48]融合了人类多维度智慧要素, 如多人认知、直觉、联想

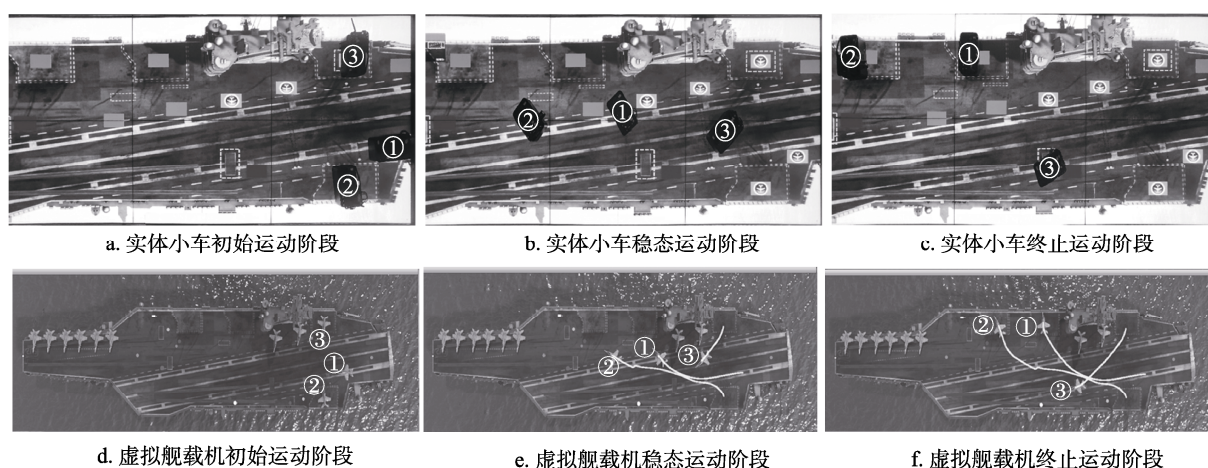


图 13 全局态势图中舰载机虚实映射态势推演示例

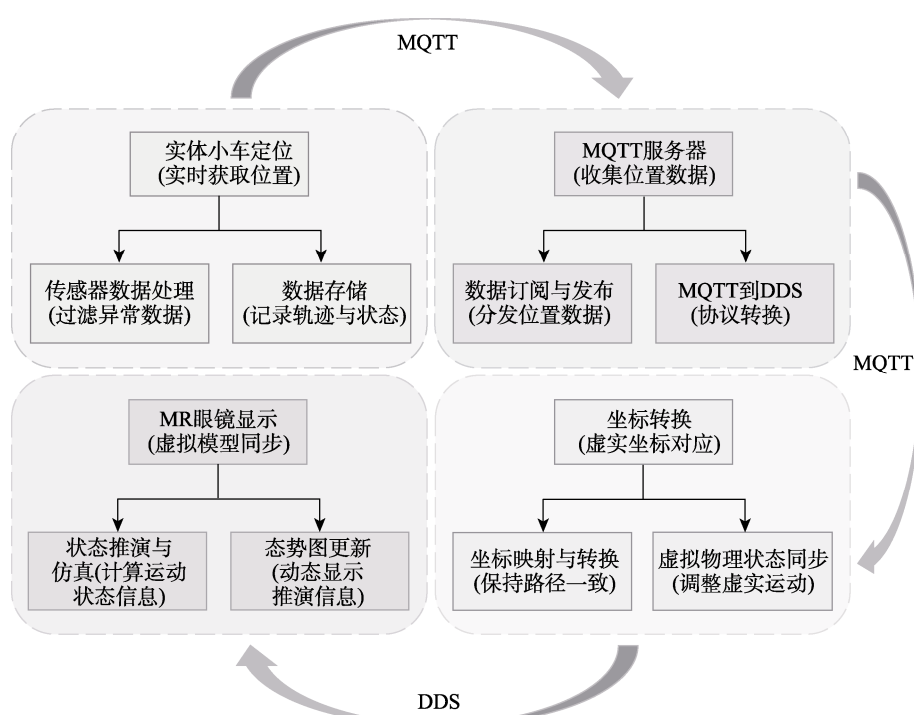


图 14 全局态势图虚实融合推演实现流程

想象与多源感知能力,且群体之间观点分享与有效沟通减少了信息的不对称性,为协作任务汇聚了不同视角和不同层次的指导经验。人类根据与他人的实时互动反馈、机器的算力支撑评估自己的干预修正行为,将会对整体态势产生的影响,进一步修正智能小车的路线规划方案。

通过多人机协同实现推演任务数据共享与协作分析,人类主动介入对推演方案的优化修正。机器智能算法规划的舰载机作业路线为预设轨迹 $S_m = \{S_{m1}, S_{m2}, S_{m3}, \dots\}$, 人类介入修正预设方案后的智能小车实际运动轨迹记为 $S_h = \{S_{h1}, S_{h2}, S_{h3}, \dots\}$ 。对多名相互协同参与修正的指挥

员的操作状态空间建模为 $H ::= H_{S,b} \circ H_{S,r}$; 其中, H 表示多人联合进行修正的操作状态空间, $H_{S,b}$ 表示指挥员的交互行为集合, $H_{S,r}$ 表示规则约束条件集合。由此,可将多人协同修正形式化表示为 $S_m \xrightarrow{H_{S,b} \circ H_{S,r}} S_h$ 。

多个参与者分布在不同的位置,通过异构交互终端(MR头显、触控终端等)在共享虚拟环境中实时协同作业,从不同的观察视角感知修正方案的过程,如图15所示。人机协同作业修正可视为一个情境推理过程,人类基于当前环境感知的理解在大脑中创建综合情境认知,根据对情境理解进行符合



图 15 同一场景多人协同修正不同视角观测示意图

实际情况的联想推理,调整在虚拟环境中的交互行为,并更新认知。下面从直觉推理、选择性注意机制和社交属性 3 种人类特质方面刻画该过程。

(1) 指挥员的直觉推理能力与智能系统的计算优势相结合,显著地提升了复杂环境下的决策效能。直觉的非线性信息处理特性可有效地提取关键特征要素并识别潜在关联模式。在动态复杂的推演环境中,若运用传统的理性思考和常规逻辑分析,难以应对复杂的态势信息和多层次的关联关系;但是,利用人类直觉认知独特的非线性信息处理优势,能够有效地挖掘多源信息中显性特征与隐性关联的深层规律。因此,当发掘新旧态势信息之间存在相似性时,人类进行知识迁移,灵活地将大脑存储的先验知识应用到新情境。人类通过对已有经验与知识的追溯和回忆,可减少对新态势信息的理解难度,并及时对可能出现的异常情况进行推理判断,可以在较短时间内做出相对正确的决策。

(2) 选择性注意机制是人类自然感知的一个重要特征^[49]。人类的心理过程是机器无法替代的,在多人机联合修正过程中,人类基于经验知识与任务需求分配注意力。基于经验直觉,人类做出选择并优先考虑某方面信息,而忽略其他方面信息,这种具有选择性和优先级处理任务的方式影响决策和任务执行的效率。在虚实融合的复杂作战环境中,人类决策存在认知约束,易造成主观性的认知偏差,如经验驱动的认知偏误导致方案评估偏差、大脑工作记忆容量限制影响态势理解完整性、持续高强度认知负荷会降低团队协作效率等。因此,在多人多机协同作业过程中需要加强沟通交流,利用多人在不同区域的合理化协同工作完成任务的推演。

(3) 人类的社交属性使多人协作交互形成相对一致的行为意图。多人联合交流表达个人的想法意图与经验分享,有助于各指挥员形成共同的态势认知,增强群体的态势认知能力,针对决策方案的修正达成一致意见。

4 实验验证

本文系统基于多人机联合交互式可视化推演修正,为保障作业提供客观合理的决策支持。通过“虚实融合多人机场景共享-跨设备协同交互分析-交互式可视化推演修正”迭代优化过程,实现对机器智能算法推荐舰载机集群运动方案的优化。

基于电子沙盘多人机协同对舰载机集群运动推演方案修正优化的目标为:路径长度较短、路径的平稳程度高、通过站位数量的个数少、规划的舰载机运动过程中不发生碰撞、安全到达目的地,且整个推演过程中指挥员产生的总体认知负荷较低。本文选取路径长度、路径平稳程度(曲率均值)、途径站位个数,以及基于 NASA-TLX 对认知负荷量化评分 4 个评价指标,验证本文系统的合理性与优越性。

基于设定的评估指标对具体路径方案需要修正情况进行分析。例如,作业环境变化:原有路径受阻、任务优先级或目标发生调整;性能优化需求:指挥员发现更优路径、系统资源分配需重新平衡;出于安全因素考量:实际执行数据与预测存在偏差、经操作员反馈不满意当前路径、多智能体协作出现冲突等。

4.1 场景搭建

以尼米兹号航母为原型,构建舰载机保障作业的仿真环境,如图 16 所示。其中,仿真环境包含 18 个保障站位和 3 个起飞站位;不同颜色矩形表示不同站位状态,蓝色矩形表示保障站位处于空闲状态,粉色矩形表示当前站位已有舰载机停靠占用,红色矩形表示起飞站位,同一个保障站位最多容纳一架舰载机停靠^[50]。

4.2 评估指标

路径长度通常被传统路径规划方法作为评估指标之一,规划的路径长度越短,路径的价值越高。然而,基于甲板面对舰载机集群运动进行路径规划时,必须综合考虑路径的可行性、经济性和各种约

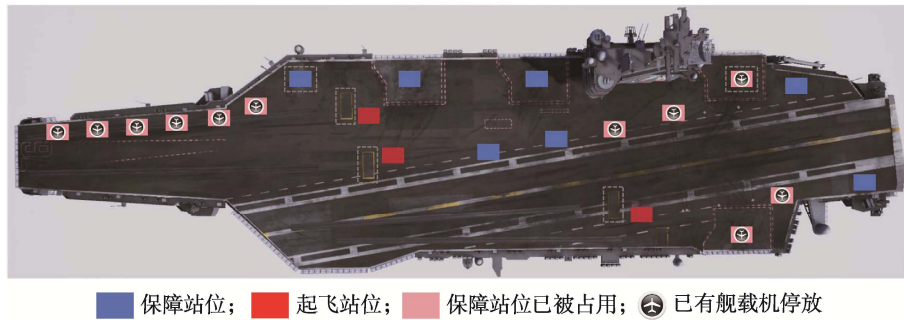


图 16 仿真场景环境搭建

束条件, 以全面评估路径价值。

(1) 路径长度。舰载机运动路径长短影响整个甲板面的运转效率, 移动距离越长, 意味着需消耗越多的资源和时间。因此, 选择路径长度作为评价规划方案的标准之一, 采用欧几里得距离计算舰载机的实际移动距离

$$D = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}。$$

其中, x_i 和 y_i 表示第 i 时间步轨迹点, 该路径包含 n 个时间步的数据。

(2) 路径平稳程度。即路径点的曲率值, 能够反映路径在各个点的运动稳定程度变化情况。曲率值大表示智能体在该点处转弯较急, 运动不稳定, 路径价值低; 曲率值小表示智能体在该点处转弯平缓, 运动平稳, 路径价值高。

基于已规划出的路径信息计算智能体在路径点 i 的曲率值 $|K_i|$, 设移动路径上的 3 个连续点为 $p_0 = (x_{i-1}, y_{i-1})$, $p_1 = (x_i, y_i)$ 和 $p_2 = (x_{i+1}, y_{i+1})$ 。其中, i 表示路径上的索引。将曲率值定义为单位弧长上的偏离程度, 其中, $v_1 = (x_i - x_{i-1}, y_i - y_{i-1})$, $v_2 = (x_{i+1} - x_i, y_{i+1} - y_i)$ 。通过路径点坐标计算邻接的连续 3 个点形成的三角形面积与分段距离乘积的比值, 量化路径的弯曲度。归一化处理后, 定义所计算的曲率值为

$$|K_i| = \frac{2|v_1 \times v_2|}{D(p_0, p_1) \cdot D(p_1, p_2) \cdot D(p_2, p_0)}。$$

(3) 途径站位个数。当某个保障站位没有被占用时, 允许待调运舰载机规划的路径与该站位空间区域产生有限重叠。但是, 在实际调运作业过程中, 规划的路径与已有站位发生重叠的情况越多, 则当前舰载机被停靠在其他站位上的舰载机挡住而停下的概率越大。因此, 规划出的路径“经过”的站位个数越多, 其路径价值越低, 须尽量减少舰载机通过保障站位的数量。

(4) 认知负荷评分。根据 NASA-TLX^[51]对推演过程中人类产生的总体认知负荷相关数据进行量化分析。

4.3 与其他方案对比

选择当前流行的机器学习路径规划方法计算预设轨迹, 并与对应的多人机协同修正优化方法获取的跟踪轨迹进行对比。对比方法包括 PPO^[52]、DDPG^[53]和 A3C^[54]。同时, 还探究了不同人数参与联合推演对方案规划的影响。

针对军事推演场景的实时性和多约束条件要求, 机器智能方法计算的路径(预设轨迹)采用虚实叠加的方式呈现在指挥员视野中, 为指挥员提供较为客观的参照指导。其中, 机器智能方法输入包括智能体的状态信息(当前位置、半径、速度、动力学约束、碰撞安全距离等), 以及环境信息(即栅格化地图, 静态障碍物标记为 1, 可达区域为 0), 并考虑各智能体的差异化运动参数(如最大/最小速度和加速度)。在方法训练阶段, 智能体基于奖励函数(路径引导点奖励、动态避障奖励、终点奖励及碰撞惩罚)优化策略, 在二维建模环境中与凸多边形障碍物交互学习。在方法测试阶段, 训练模型部署至 MR 环境, 智能体根据当前状态实时输出速度增量以实现动态路径规划, 并通过 MR 设备可视化预设轨迹。人类操作者可对规划路径进行实时修正(形成跟踪轨迹), 通过本文系统实现虚实融合协同决策, 确保路径的安全性(满足碰撞约束)、合理性(符合动力学限制)和高效性(优化任务完成时间)。最后, 三维可视化呈现虚拟叠加的机器推荐方案, 轨迹路线编号与设定的舰载机 ID 一一对应, 以保证相关态势信息叠加并适配至相应的舰载机上。

4.4 对比实验

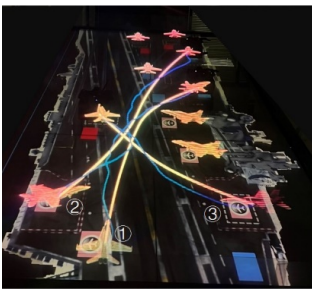
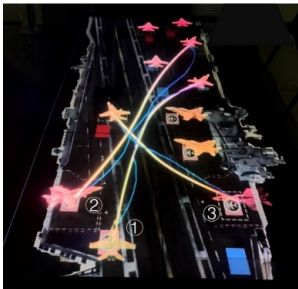
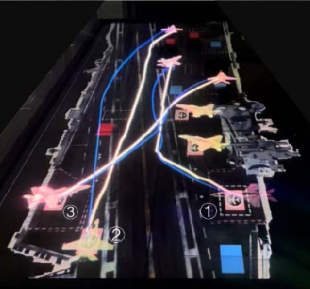
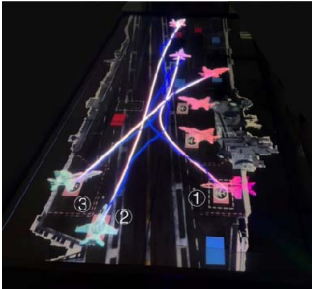
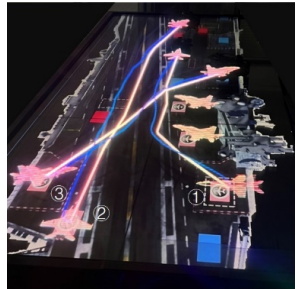
本文设计了 2 个不同的舰载机作业仿真场景, 验证本文系统的有效性。其中, 舰载机数量均为 3; 不同场景下, 同一编号舰载机作业所指定的起点与终点不同。虚拟环境的构建和机器智能方法的实现

使用 Python 3.9, C++和 Unreal Engine 4.27, 机器智能方法模型训练采用 PyTorch 1.13.1。对比方法运行的机器硬件配置为 Intel (R) Core (TM) i7-13700K CPU, 64 GB 运行内存, 单张 GPU (Ge-Force RTX 4080, 显存 16 GB), Windows 10 操作系统。

基于本文系统,对比分析多人机协同推演修正轨迹(白色线)与机器智能方法初始轨迹(蓝色线),以验证多人机协同决策的优化效果,如表 1 所示。可以看出,所规划的推演作业方案均避免了碰撞发

生,安全到达指定位置。本文系统通过多人机协同优化修正,减少了大幅度的转弯,实时融入指挥经验,整体规划效果优于机器智能路径规划方法计算的方案。通过本文系统多次迭代推演,可以积累大量人介入修正后的推演数据,这些数据可用于后续对机器智能方法的改进:一方面,可以将修正作为环境反馈信号调整奖励函数;另一方面,可以记录每次修正的原因和结果以建立修正案例库,实时整合修正数据,改进的目的是减少不必要的修正需求,实现更自主、可靠的路径规划方法。

表 1 在 2 个场景下本文方法与对比方法的运动规划效果对比

场景	本文与 PPO ^[52] 对比	本文与 DDPG ^[53] 对比	本文与 A3C ^[54] 对比
1			
2			

在 2 个场景下,采用 4 种方法进行实验,它们的性能指标对比结果如表 2 和表 3 所示。可以看出,本文方法的总体曲率均值较低,意味着所规划的路径平稳程度更高;通过多轮迭代,本文方法的舰载机途径站位数量减少,有效地降低其运转阻滞概率,并缩短了运动时间;多数情况下,机器智能方

法单独生成的路径长度比本文方案略长,通过融合指挥员的直觉经验并参考机器推荐方案进行推演,降低了多人机协同的工作负荷。实验结果表明,依托机器方案的计算优势,可确保本文方案规划的合理性与操作可行性,本文的多人机协同修正方法所获取的方案结果更为合理。

表 2 场景 1 下本文方法与对比方法评价指标对比

对比实验	方法	均值		途经站位数量/个
		路径长度/cm	$ K_i $	
本文与 PPO ^[52]	PPO ^[52]	184.38	0.024 6	2
	本文	184.71	0.013 9	0
本文与 DDPG ^[53]	DDPG ^[53]	190.36	0.036 8	2
	本文	185.24	0.014 2	1
本文与 A3C ^[54]	A3C ^[54]	185.63	0.035 1	2
	本文	185.16	0.014 2	1

注:粗体表示较优的结果。

表 3 场景 2 下本文方法与对比方法评价指标对比

对比实验	方法	均值		途经站位数量/个
		路径长度/cm	$ K_i $	
本文与 PPO ^[52]	PPO ^[52]	232.21	0.050 8	1
	本文	222.45	0.015 5	0
本文与 DDPG ^[53]	DDPG ^[53]	227.14	0.033 0	1
	本文	220.94	0.013 6	0
本文与 A3C ^[54]	A3C ^[54]	225.38	0.040 1	2
	本文	221.94	0.015 0	0

注:粗体表示较优的结果。

此外,在多人机协同联合参与修正过程,基于任务申请认领机制,每位指挥员每次可认领一项任务,认领后每次控制一辆小车,该任务结束后可以认领下一项任务。当一人拥有对一车的控制权时,则该车的实际运动方案主要由2个方面决定:一方面,该操作员基于个人指控经验,参照机器计算推荐方案修正实体小车的运动;另一方面,基于场景共享及叠加的虚拟态势信息,所有参与推演人员均处于同一推演任务环境中,因此,他人作为第三视角为其提供有效的修改意见或辅助支持。

场景1和场景2下均有3辆实体小车,一名指挥员可对一辆智能小车进行接管修正,在指挥员不介入修正时,智能小车按照机器推荐路线方案自主导航到达目的地。在航保作业场景下,本文方法基于电子沙盘决策系统进行多组实验,不同人数修正量化对比结果分别如表4和表5所示。可以看出,本文方法确定了最优指挥员编组配置,4人协同编组(3名操作员和1名监察员)的作业方案优于其他编组模式,即任务推演理想情况是3名指挥员分别负责单舰载机的精确控制,第4名指挥员通过监察全局态势图或操作GUI等工作,提供整体修正建议,基于角色分工的协同机制完成多视角交叉验证,即4名指挥员针对当前场景推演较为合适;同时,避免了人员冗余造成的沟通成本、认知负荷增加等问题。

表4 场景1下本文方法不同人数修正评价指标对比

人数	均值		途经站点数量/个
	路径长度/cm	$ K_i $	
1	184.85	0.019 7	2
2	185.48	0.016 9	1
3	185.66	0.014 9	0
4	184.71	0.013 9	0
5	184.71	0.013 9	0
6	184.71	0.013 9	0

注:粗体表示较优的结果。

表5 场景2下本文方法不同人数修正评价指标对比

人数	均值		途经站点数量/个
	路径长度/cm	$ K_i $	
1	223.73	0.022 2	1
2	222.74	0.017 2	0
3	221.02	0.014 8	0
4	220.94	0.013 6	0
5	220.94	0.013 6	0
6	220.94	0.013 6	0

注:粗体表示较优的结果。

通过多场景扩展实验,验证本文系统支持在更大规模集群或高干扰环境下的鲁棒性,结果如图17所示。可以看出,若机器推荐路线(绿色线)规划合理,舰载机可以按照机器计算路线运动。基于本文方法多人机实时推演,指挥员介入实时修正后的路线方案(红色线)与介入前方案的量化结果对比如表6所示。对发生突发情况(如着火点等)的仿真推演可视化结果如图18所示。

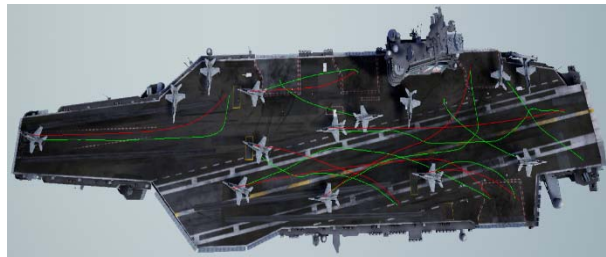


图17 场景3下多架次舰载机仿真推演可视化结果

表6 复杂场景下仿真推演量化指标对比

场景	方法	均值		途经站点数量/个
		路径长度/cm	$ K_i $	
3	机器	103.62	0.065 8	2
	本文	98.93	0.033 6	1
4	机器	101.48	0.089 7	5
	本文	95.35	0.034 8	2

注:粗体表示较优的结果。



图18 场景4下多架次舰载机仿真推演可视化结果

4.5 指控人员认知负荷量表调研

本文利用图19所示的NASA-TLX^[51],基于脑力需求、体力负荷、时间要求、绩效水平、努力程度和受挫程度6个因素^[55],对任务推演过程中联合参演人员的认知负荷程度进行评估^[56-57],以0~100的加权平均值进行计算。实验结果表明,在一定程度上,依托本文系统进行多人机联合指挥推演获取了更优推演方案,且指控人员总体认知负荷较低。

调研方案如下:选取15名经过专业培训的研究生作为实验对象(其中,女生5名,男生10名),所有参与者均通过电子沙盘决策系统的操作考核。基于上述实验场景,将实验分为6组对任务推演方

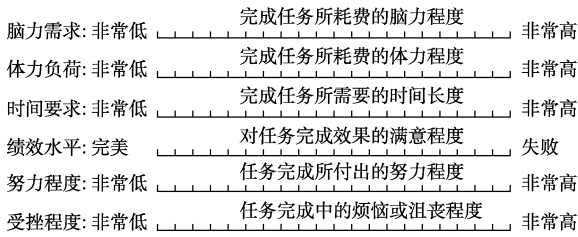


图 19 NASA-TLX 示例^[55]

案修正优化：A 组，15 名参演人员作为单独个体分别对任务作业方案进行推演；B 组，2 人一组；C 组，3 人一组；D 组，4 人一组；E 组，5 人一组；F 组，6 人一组。推演结束后，对不同编组规模实验对象的认知负荷量表的数据进行分析，验证本文方法的有效性。在指控人员认知负荷研究中，实验分组设计通过随机化组队和多轮次重复实验求平均值的方式，有效地控制了性别比例对实验结果的潜在影响。

采用临界比值法发现，高分组和低分组各条目得分的差异均有统计学意义 ($P < 0.01$)，表明 NASA-TLX 及各条目均具有较好的项目区分度^[58]，能够区分联合参与人员不同认知负荷水平。采用相关分析法发现，NASA-TLX 中各条目得分与总分相关系数为 0.30~0.89 ($P < 0.01$)，表明该量表各条目测定内容与量表整体测定内容具有较好的一致性。计算 NASA-TLX 中 6 个维度因素的内在一致性信度系数为 0.808，表明 NASA-TLX 作为一个认知负荷程度的评估量表，其信度指标良好。

认知负荷量表评分与参与人员的任务压力呈正相关，评分值越高，表明指挥员的工作认知负荷水平越高^[56-57,59]。通常，多人机协同模式能有效地降低工作负荷，多人协同推演方案修正的总体认知负荷低于单人介入推演，系统通过融入多人指挥经验获取更优推演方案。从表 7、表 8 和图 20 可以看出，基于本文系统参与方案修正的指挥员人数设置为 4 时，4 人协同组总体平均认知负荷评分较低，并且该情况下对应的任务绩效结果较优，即在此场景下，4 人联合参与推演最合理。同时，

表 7 场景 1 下 NASA-TLX 的主观评价结果

组别	任务作业水平	认知负荷评分
A	单人推演	82.45±6.05
B	双人推演	68.90±6.30
C	3 人推演	54.14±8.01
D	4 人推演	41.70±5.64
E	5 人推演	53.06±10.31
F	6 人推演	58.63±8.45

表 8 场景 2 下 NASA-TLX 的主观评价结果

组别	任务作业水平	认知负荷评分
A	单人推演	84.71±4.98
B	双人推演	69.98±4.40
C	3 人推演	54.20±7.64
D	4 人推演	42.13±4.59
E	5 人推演	54.15±6.58
F	6 人推演	59.42±5.33

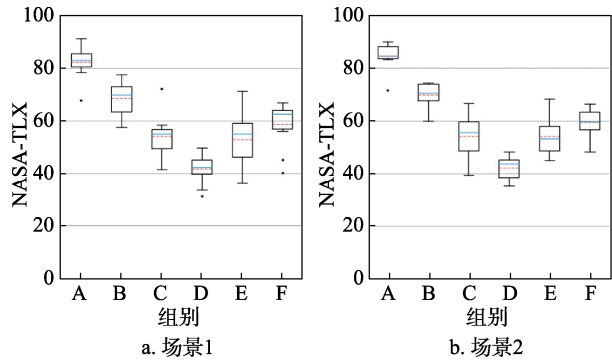


图 20 2 个场景下认知负荷评分量化结果对比

适度规模的团队协作能在维持决策质量的同时优化人因效能：（1）分布式信息处理减轻个体认知负担；（2）多视角交叉验证减少决策不确定性；（3）智能辅助系统承担重复性计算任务等。

4.6 系统部署性能表现测试

对本文系统的性能进行测试，结果如表 9 所示。

表 9 本文系统性能测试结果

测试项	测试参数
平均发送报文的时间间隔	33.53 ms
流畅度-平均叠加数据帧率	40~60 帧/s
MR 眼镜交互反馈平均延迟	145 ms
各保障实体叠加的数据项	>20 项
虚实态势叠加精度误差	≤2.5 cm

此外，通过 MR 眼镜 Hololens2 上的性能监控软件，可以实时查看 MR 仿真系统的相关性能参数，如基于 MR 眼镜交互推演反馈的平均延迟为 145 ms，如图 21 所示。在测试过程中，系统各项功能正常运行，在不同环境下，系统性能可维持稳定状态。

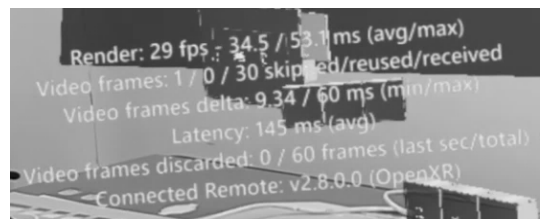


图 21 MR 眼镜性能监测结果

5 总结与展望

本文提出多人机协同的虚实融合舰载机航保作业电子沙盘决策系统,其基于MR技术实现人机物虚实融合交互的态势增强智能,对任务作业过程动态校正,完成对推演方案的多人机协同优化,并降低指控人员的总体认知负荷。本文深入研究航空保障作业过程中的舰载机集群运动,并提供作业方案设计与虚实融合的仿真验证平台,增强了航空保障态势感知并提高方案推演的效率,能够为航空保障作业的临场决策提供辅助支持。

未来,将深入推进电子沙盘的多领域应用。例如,在机场调度作业方面,指挥员能够实时监测掌控机场的动态运转情况,提升整个机组作业流程的安全系数;在智慧物流转运方面,通过对物流包裹分配、货运车辆调度过程中的态势情况分析,实现物流科学化管理,加强物流运转人机之间的协作效率。

本文尚有一些不足,将在后续工作中逐步完善,包括:

(1) 基于知识图谱构建历史案例库,将历史推演任务交互流程进行可视表达,帮助指挥员分析任务作业变化状况;

(2) 借助人机交互中的感知计算,使用情感分析大模型分析理解用户的认知状态;

(3) 基于脑电设备实时监测指挥员相关生理数据,设计具体方案衡量认知负荷,评估任务推演过程中的工作效率,使任务分配最优化;

(4) 利用类脑计算与脑机接口模拟人类思维与计算机交互,结合指挥员意图和思维习惯对态势要素关联推理,使人机物深度融合更具智能化。

参考文献 (References):

- [1] Xue Junxiao, Xu Mingliang, Li Yafei, *et al.* Research progress of multi-agent technology for aircraft carrier electronic display panel[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2021, 33(10): 1475-1485(in Chinese)
(薛均晓, 徐明亮, 李亚飞, 等. 面向航空母舰电子显灵板的多智能体建模技术研究进展[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33(10): 1475-1485)
- [2] Wang Chaofei, Wang Shenzhi, Song Shiji, *et al.* Multiple unmanned surface vehicles-based path planning method for sea patrol[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2023, 28(8): 2536-2548(in Chinese)
(王朝飞, 王慎执, 宋士吉, 等. 面向海域巡逻的多无人船路径规划方法及仿真[J]. *中国图象图形学报*, 2023, 28(8): 2536-2548)
- [3] Lyu Pei, Chen Weichao, Zhang Quan, *et al.* The design and optimization of ship cabin space layout based on crowd simulation[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2021, 33(9): 1337-1348(in Chinese)
(吕培, 陈伟超, 张权, 等. 群组运动驱动的舰船舱室空间布局设计与优化[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33(9): 1337-1348)
- [4] Wei P Y, Li C T, Jiang Z, *et al.* Real-time simulation of ship structure based on virtual-real fusion interaction[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 295: Article No.116815
- [5] Guo Xuan, Wang Ning, Yu Shutong, *et al.* Visual analysis for multi-stage ammunition transfer sequences on aircraft carrier[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2025, 37(9): 1515-1525(in Chinese)
(郭璇, 王宁, 于淑彤, 等. 航空母舰多阶段弹药转运序列可视分析[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2025, 37(9): 1515-1525)
- [6] Jin Zhao, Jin Lu, Zhang Bowen, *et al.* Formal modeling and verification of carrier-borne aircraft ammunition support operation scheduling[J]. *Journal of Software*, 2024, 35(9): 4100-4122(in Chinese)
(金钊, 金璐, 张博闻, 等. 舰载机弹药保障作业调度的形式化建模与验证[J]. *软件学报*, 2024, 35(9): 4100-4122)
- [7] Xue Junxiao, Chen Jinpu, Dong Bowei, *et al.* Path planning and simulation of carrier-based aircraft based on DDPG[J/OL]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 1-14[2025-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2925.tp.20250206.1638.038.html> (in Chinese)
(薛均晓, 陈金浦, 董博威, 等. 基于深度确定性策略梯度算法的航空母舰舰载机导引路径规划与仿真[J/OL]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 1-14[2025-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2925.tp.20250206.1638.038.html>)
- [8] Chen Wei, Li Lulu, Chen Dong, *et al.* Collaborative decision making methods for support optimization of diverse carrier-borne aircraft[J/OL]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1-15[2025-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20241223.1637.010.html> (in Chinese)
(陈伟, 李璐璐, 陈董, 等. 差异化保障需求驱动的舰载机多机协同决策方法[J/OL]. *航空学报*, 1-15[2025-07-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20241223.1637.010.html>)
- [9] Li Yafei, Wu Qingshun, Xu Mingliang, *et al.* Real-time scheduling for carrier-borne aircraft support operations: a reinforcement learning approach[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2021, 51(2): 247-262(in Chinese)
(李亚飞, 吴庆顺, 徐明亮, 等. 基于强化学习的舰载机保障作业实时调度方法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51(2): 247-262)
- [10] Liu Guang, Wang Hua, Lin Youfang, *et al.* Adaptive batch matching decision method for carrier-based aircraft support operations[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(1): Article No.330615(in Chinese)
(刘广, 王华, 林友芳, 等. 舰载机保障作业自适应批量匹配决策方法[J]. *航空学报*, 2025, 46(1): Article No.330615)
- [11] Tang Shuaiwen, Zhou Zhijie, Jiang Jiang, *et al.* Consensus evaluation of UAV swarm cooperative situation awareness con-

- sidering perturbation[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(S2): Article No.724233(in Chinese)
(唐帅文, 周志杰, 姜江, 等. 考虑扰动的无人机集群协同态势感知一致性评估[J]. *航空学报*, 2020, 41(S2): Article No.724233)
- [12] Mao Zhijie, Zhou Lin, Chen Yingmei, *et al.* On the multi-dimensional interactive distributed simulation system in military applications[C] //Proceedings of the China High-Level Forum on System Simulation and Virtual Reality Technology. Beijing: Expert Consultation Working Committee of China Automation Society, Working Committee on Computer System Simulation Application of China, Product Information Committee of China Instrument and Meter Society, Beijing Guoxin Fusion Information Technology Research Institute, 2019: 174-178(in Chinese)
(毛志杰, 周林, 陈英梅, 等. 多维交互分布式仿真系统在军事应用中的几点刍议[C] //2019 中国系统仿真与虚拟现实技术高层论坛论文集. 北京: 中国自动化学会专家咨询工作委员会, 中国计算机系统仿真应用工作委员会, 中国仪器仪表学会产品信息委员会, 北京国信融合信息技术研究院, 2019: 174-178)
- [13] Jenkins M, Wollock A, Negri A, *et al.* Augmented reality and mixed reality prototypes for enhanced mission command/battle management command and control (BMC2) execution[C] //Proceedings of the 10th International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality. Heidelberg: Springer, 2018: 272-288
- [14] Diao Xiaofeng, Huang Fang, Jin Lute. Intelligent military simulation technology driven by new productive forces and its application prospect[C] //Proceedings of the 36th China Simulation Conference. Yangzhou: Chinese Society for Simulation, 2024: 315-319(in Chinese)
(刁晓峰, 黄昉, 金路特. 新质生产力驱动下的智能化军事仿真技术及其应用前景[C] //第三十六届中国仿真大会论文集. 扬州: 中国仿真学会, 2024: 315-319)
- [15] Ullo S L, Piedimonte P, Leccese F, *et al.* A step toward the standardization of maintenance and training services in C4I military systems with Mixed Reality application[J]. *Measurement*, 2019, 138: 149-156
- [16] Hughes C E, Stapleton C B, Hughes D E, *et al.* Mixed reality in education, entertainment, and training[J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2005, 25(6): 24-30
- [17] Ye Shuainan, Chu Xiangtong, Wu Yingcai. A survey on immersive visualization[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2021, 33(4): 497-507(in Chinese)
(叶帅男, 储向童, 巫英才. 沉浸式可视化综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33(4): 497-507)
- [18] Chen Baoquan, Qin Xueming. Composition of virtual-real worlds and intelligence integration of human-computer in mixed reality[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2016, 46(12): 1737-1747(in Chinese)
(陈宝权, 秦学英. 混合现实中的虚实融合与人机智能交融[J]. *中国科学: 信息科学*, 2016, 46(12): 1737-1747)
- [19] Zhao Qingping. Ten scientific and technical problems in virtual reality[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2017, 47(6): 800-803(in Chinese)
(赵沁平. 虚拟现实中的 10 个科学技术问题[J]. *中国科学: 信息科学*, 2017, 47(6): 800-803)
- [20] Cai Linqin, Yi Wenyuan, Huang Yuting, *et al.* Mixed reality technology for medical imaging analysis of glioma[J]. *Journal of Software*, 2022, 33(9): 3347-3369(in Chinese)
(蔡林沁, 易文渊, 黄宇婷, 等. 面向脑胶质瘤影像分析的混合现实技术[J]. *软件学报*, 2022, 33(9): 3347-3369)
- [21] Ostanin M, Yagfarov R, Devitt D, *et al.* Multi robots interactive control using mixed reality[J]. *International Journal of Production Research*, 2021, 59(23): 7126-7138
- [22] El Ammari K, Hammad A. Remote interactive collaboration in facilities management using BIM-based mixed reality[J]. *Automation in Construction*, 2019, 107: Article No.102940
- [23] Choi S H, Park K B, Roh D H, *et al.* An integrated mixed reality system for safety-aware human-robot collaboration using deep learning and digital twin generation[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2022, 73: Article No.102258
- [24] Wen Zhen, Li Peng, Wang Xumeng, *et al.* Mixed reality based visual analytics[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2022, 34(6): 821-829(in Chinese)
(温圳, 李鹏, 王叙萌, 等. 基于混合现实的可视分析综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2022, 34(6): 821-829)
- [25] Zhou Jianfeng. Research on mixed reality 3D reconstruction technology and its application in remote interaction[D]. Xi'an: Xidian University, 2023(in Chinese)
(周建峰. 混合现实三维重建技术研究及在远程交互中的应用[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023)
- [26] Kennel-Maushart F, Poranne R, Coros S, *et al.* Interacting with multi-robot systems via mixed reality[C] //Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2023: 11633-11639
- [27] Mahroo A, Greci L, Mondellini M, *et al.* Assessment of a mixed reality smart home controller: HoloHome pilot study on healthy adults[J]. *Virtual Reality*, 2023, 27(3): 2673-2690
- [28] Zhang X Y, Bai X L, Zhang S S, *et al.* A novel mixed reality remote collaboration system with adaptive generation of instructions[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2024, 194: Article No.110353
- [29] Li Chaochao, Cheng Lanhui, Yang Saisai, *et al.* Dark situation evaluating: concepts, methods, and applications[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2025, 37(4): 568-582(in Chinese)
(李超超, 程兰惠, 杨赛赛, 等. 暗态势计算: 概念、方法与应用[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2025, 37(4): 568-582)
- [30] Wang Minghui, Shen Yu, Zhou Haiguang, *et al.* Design and implementation of a new warship electronic sand table interactive system based on AR/VR technology[C] //Proceedings of the 6th China Command and Control Congress. Beijing: Chinese Command and Control Society, 2018: 436-441(in Chinese)
(王明辉, 申宇, 周海光, 等. 基于 AR/VR 技术的新型舰船电子沙盘交互系统设计与实现[C] //第六届中国指挥控制大会论文集. 北京: 中国指挥与控制学会, 2018: 436-441)
- [31] Zhou C K, Lu H Y, Gong H X, *et al.* Design of electronic sand

- table interactive system based on depth enhancement algorithm[C] //Proceedings of the Global Reliability and Prognostics and Health Management. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2021: 1-7
- [32] Sun Y, Lu G Z, Wang X, *et al.* A design method of system simulation electronic sand table software[C] //Proceedings of the International Conference on Electronic Information Technology. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2022, 12254: Article No.122542Q
- [33] Li W C, Huang Y H, Chen X L, *et al.* Key technologies of large power grid security and stability intelligent sand table deduction[C] //Proceedings of the IEEE Sustainable Power and Energy Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2020: 2702-2707
- [34] Li H, Huang Z N, Guo C, *et al.* An interactive method with gestures oriented toward the augmented reality electronic sand table[C] //Proceedings of the International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Science. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2022, 12602: Article No.126020K
- [35] Dong J H, Xu Q, Wang J W, *et al.* Mixed cloud control testbed: validating vehicle-road-cloud integration via mixed digital twin[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(4): 2723-2736
- [36] Li Q, Liu H M, Wu Z Y, *et al.* A situation visualization system based on 2D&3D electronic sand table[C] //Proceedings of the 3rd IEEE Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2018: 2057-2060
- [37] Zheng N N, Liu Z Y, Ren P J, *et al.* Hybrid-augmented intelligence: collaboration and cognition[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2017, 18(2): 153-179
- [38] Fan Xiangmin, Fan Junjun, Tian Feng, *et al.* Human-computer interaction and artificial intelligence: from competition to integration[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2019, 49(3): 361-368 (in Chinese)
(范向民, 范俊君, 田丰, 等. 人机交互与人工智能: 从交替浮沉到协同共进[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(3): 361-368)
- [39] Wu D R, Jiang X, Peng R M. Transfer learning for motor imagery based brain-computer interfaces: a tutorial[J]. Neural Networks, 2022, 153: 235-253
- [40] Li C X, Zheng P, Li S F, *et al.* AR-assisted digital twin-enabled robot collaborative manufacturing system with human-in-the-loop[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 76: Article No.102321
- [41] Yuan Qingshu, Wang Ruonan, Pan Zhigeng, *et al.* A survey on human-computer interaction in spatial augmented reality[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2021, 33(3): 321-332(in Chinese)
(袁庆曙, 王若楠, 潘志庚, 等. 空间增强现实中的人机交互技术综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2021, 33(3): 321-332)
- [42] Wang T, Zhan W M. Design and control a hybrid human-machine collaborative manufacturing system in operational management technology to enhance human-machine collaboration[J/OL]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1-11[2025-07-03]. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14894-w>
- [43] Wang F Y, Guo J B, Bu G Q, *et al.* Mutually trustworthy human-machine knowledge automation and hybrid augmented intelligence: mechanisms and applications of cognition, management, and control for complex systems[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2022, 23(8): 1142-1157
- [44] Zhu H Y, Hieu N Q, Hoang D T, *et al.* A human-centric metaverse enabled by brain-computer interface: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, 26(3): 2120-2145
- [45] Chu M D, Zong K Y, Shu X, *et al.* Work with AI and work for AI: autonomous vehicle safety drivers' lived experiences[C] //Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems. New York: ACM Press, 2023: Article No.753
- [46] Dargan S, Bansal S, Kumar M, *et al.* Augmented reality: a comprehensive review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 30(2): 1057-1080
- [47] Kherbache M, Ahmed A, Maimour M, *et al.* Constructing a network digital twin through formal modeling: tackling the virtual-real mapping challenge in IIoT networks[J]. Internet of Things, 2023, 24: Article No.101000
- [48] Li Lulu, Zhu Ruijie, Sui Luyao, *et al.* The reinforcement learning approaches for intelligent collective system: a survey[J]. Chinese Journal of Computers, 2023, 46(12): 2573-2596(in Chinese)
(李璐璐, 朱睿杰, 隋璐瑶, 等. 智能集群系统的强化学习方法综述[J]. 计算机学报, 2023, 46(12): 2573-2596)
- [49] Li Deyi, Zhang Xinyu, Liu Yuchao, *et al.* Paper on intelligent driving in China[M]. Beijing: Chinese Society for Artificial Intelligence, 2015: 1-94(in Chinese)
(李德毅, 张新钰, 刘玉超, 等. 中国智能驾驶白皮书[M]. 北京: 中国人工智能学会, 2015: 1-94)
- [50] Li Yafei, Gao Lei, Hao Hongjie, *et al.* Human-machine collaborative decision-making for carrier aircraft support operations[J]. Scientia Sinica: Informationis, 2023, 53(12): 2493-2510(in Chinese)
(李亚飞, 高磊, 蒿宏杰, 等. 舰载机保障作业人机协同决策方法[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(12): 2493-2510)
- [51] Hart S G. NASA-task load index (NASA-TLX); 20 years later[C] //Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Los Angeles: HFES, 2006: 904-908
- [52] Yu C, Velu A, Vinitisky E, *et al.* The surprising effectiveness of PPO in cooperative multi-agent games[C] //Proceedings of the 36th International Conference on Neural Information Processing Systems. Red Hook: Curran Associates Inc, 2022: Article No.1787
- [53] Lowe R, Wu Y, Tamar A, *et al.* Multi-agent actor-critic for mixed cooperative-competitive environments[C] //Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Red Hook: Curran Associates Inc, 2017: 6382-6393
- [54] Mnih V, Badia A P, Mirza M, *et al.* Asynchronous methods for deep reinforcement learning[C] //Proceedings of the 33rd In-

- ternational Conference on Machine Learning. New York: JMLR.org, 2016: 1928-1937
- [55] Li X D, Zheng C, Pan Z H, *et al.* Comparative study on 2D and 3D user interface for eliminating cognitive loads in augmented reality repetitive tasks[J]. International Journal of Human-Computer Interaction, 2024, 40(23): 8008-8024
- [56] Grier R A. How high is high? A meta-analysis of NASA-TLX global workload scores[C] //Proceedings of the 59th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Los Angeles: HFES, 2015: 1727-1731
- [57] Li Q B, Ng K K H, Yu S C M, *et al.* Recognising situation awareness associated with different workloads using EEG and eye-tracking features in air traffic control tasks[J]. Knowledge-Based Systems, 2023, 260: Article No.110179
- [58] Ehrmann D E, Gallant S N, Nagaraj S, *et al.* Evaluating and reducing cognitive load should be a priority for machine learning in healthcare[J]. Nature Medicine, 2022, 28(7): 1331-1333
- [59] Zhang Jie, Pang Liping, Wanyan Xiaoru, *et al.* Method for operator mental workload assessment based on power spectral density of EEG[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(10): Article No.123618(in Chinese)
(张洁, 庞丽萍, 完颜笑如, 等. 基于脑电功率谱密度的作业人员脑力负荷评估方法[J]. 航空学报, 2020, 41(10): Article No.123618)