

暗态势计算：概念、方法与应用

李超超^{1,2,3)}, 程兰惠¹⁾, 杨赛赛¹⁾, 吕培^{1,2,3)}, 葛昭阳^{1,2,3)}, 王华^{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：态势感知指对环境元素的感知、理解和预测，为高层决策提供支撑。态势信息的全面获取能够有效地提高态势感知的准确性。针对态势信息不直观、态势获取不全面的问题，提出“暗态势计算”概念，辅助人类挖掘、感知全面态势信息。首先，介绍暗态势计算的内涵和优势，并给出理论支撑；然后，充分地利用增强现实技术，以生动直观的呈现方式、沉浸式智能交互、虚实叠加等诸多优势，设计基于增强现实的人机物虚实融合暗态势计算框架，基于增强现实技术将机器的计算能力和人的认知能力结合，通过“虚实融合观察—沉浸式交互—全面分析预测”循环迭代过程实现暗态势计算；最后，以基于航母航空保障作业的半实物电子沙盘推演系统为例，阐述暗态势计算的应用。实验结果表明，所提方法的决策结果优于基于传统态势感知的决策结果，验证了该方法的合理性及优势。

关键词：暗态势；态势感知；增强现实；态势预测；人机协同

中图分类号：TP391.41 **DOI:** 10.3724/SP.J.1089.2023-00341

Dark Situation Evaluating: Concepts, Methods, and Applications

Li Chaochao^{1,2,3)}, Cheng Lanhui¹⁾, Yang Saisai¹⁾, Lyu Pei^{1,2,3)}, Ge Zhaoyang^{1,2,3)}, Wang Hua^{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: Situation awareness refers to the perception, understanding, and prediction of environmental elements, providing support for high-level decision-making. The comprehensive acquisition of situational information can effectively improve the accuracy of situation awareness. To address the problems of unintuitive situational information and incomplete situation acquisition, we propose the concept of “Dark Situation Evaluating” to help humans mine and perceive comprehensive situational information. Firstly, we introduce the connotation and advantages of dark situation evaluating and provide theoretical support. Secondly, we design a dark situation evaluating framework based on augmented reality technology that makes use of the vivid and intuitive presentation mode, immersive intelligent interaction, virtual and real superposition, and many other advantages. Based on the augmented reality technology, the computing power of the machine and the cognitive ability of the human are com-

收稿日期：2023-06-17；修回日期：2023-12-12。基金项目：国家自然科学基金重点项目(62036010)；国家重点研发计划(2021YFB3301500)；国家自然科学基金(62102371)；装备预研教育部联合基金(8091B032257)。李超超(1989—)，男，博士，助理研究员，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；杨赛赛(1998—)，男，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，副教授，博士生导师，CCF 会员，主要研究方向为计算机图形学、人工智能、虚拟现实；葛昭阳(1991—)，男，博士，助理研究员，主要研究方向为人工智能、智慧医疗、生理信号分析；王华(1982—)，女，博士，副教授，博士生导师，CCF 会员，主要研究方向为虚拟场景建模、集群运动行为仿真、异质集群交互式管控；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、科学可视化。

bined, and the dark situation evaluating is realized through the cyclic iterative process of “virtual-real fusion observation—immersive interaction—comprehensive analysis and prediction”. Finally, we illustrate the application of dark situation evaluating by taking the semi-physical electronic sand table deduction system based on aircraft carrier aviation support operations as an example. Experiments have shown that decision-making results based on the dark situation evaluating method are better than those based on traditional situational awareness, verifying the rationality and advantages of our method.

Key words: dark situation; situation awareness; augmented reality; situation prediction; human-machine collaboration

态势感知逐步成熟发展,其在多个领域的应用研究越来越受到关注^[1].在智能驾驶领域,驾驶员基于周围环境的感知和理解作出合理的驾驶决策,需要高水平的态势感知^[2].一项关于驾驶模拟器的研究发现,增强现实(augmented reality, AR)提示增强了驾驶员的感知能力^[3-4],在复杂场景中可以更好地进行驾驶路线决策.基于AR技术将态势信息叠加在车辆的挡风玻璃,系统可以自动识别危险并发出警告^[5].此外,AR技术还可以用于行人碰撞警告系统^[6].这些研究将态势感知与AR技术相结合,提升了态势感知的效率.在军事方面,对战场态势的感知直接影响指挥员的决策.全域作战态势感知的战场全息地图^[7]提升了战场态势感知服务的能力和水平;战场实时综合态势信息分发系统^[8]能够较好地解决战场态势信息数据种类多、数据实时性要求高的问题.在网络安全领域,网络态势感知用于评估网络安全的态势.SSARE (security situation assessment and response evaluation)网络安全检测工具^[9]用于实时监测广域网中计算机受到的网络攻击.态势感知控制系统^[10]集成多种网络安全工具,用于检测和评估网络安全态势.还有一类基于网络安全态势感知的一般功能模型,强调了网络安全态势投射对网络安全态势感知的重要性^[11].态势信息质量及其评估指标体系^[12]和态势认知与态势智能认知概念模型^[13]的研究,为感知全面态势信息提供支持.上述态势感知工作重点关注可直观感知到的显式信息,但未涉及隐式信息,即潜在的、隐藏的、更深层次的态势信息.然而,隐式的态势信息虽难以被察觉易被忽视,但其关键作用不容忽视,客观、全面的态势信息对于作出正确、合理的决策非常重要.

当前,态势感知相关研究依然存在挑战.首先,人主观的认知和心理因素可能会导致态势感知的偏差和缺失.Jones等^[14]分析真实的航空安全

事故数据发现,76%的事故是由与态势感知相关的错误造成的.通常,系统态势演变迅速,态势要素具有不确定性、模糊性和随机性^[15],如果不能对其进行全面且准确的感知与理解,将会对未来态势的预测和相关事件的处置与决策带来巨大偏差^[2].其次,态势信息的全面感知离不开人和机器的共同参与,但是人和机器在认知方面的不一致性会影响态势信息的全面获取.人对信息、知识和数据的处理具有关联性,且对事物的认知具有主观性.机器的认知更客观,一般表现为解决特定任务而设定的算法,且机器智能计算的结果可能与人预期的结果不一致.人和机器在认知过程具有较大的差异性^[16],导致人机融合协同感知全面态势信息十分困难.最后,当前多数态势感知系统通过显示器进行二维态势信息的展示不直观,容易造成认知困难,很难将二维态势信息和三维真实场景进行高效匹配,且两者之间的频繁转换耗费大量时间和精力,造成人认知的偏差^[17],不利于态势信息更深层次的挖掘.

为了解决上述问题,本文提出“暗态势计算”的概念.暗态势计算指人在回路的人机物虚实融合态势感知的增强,它通过对事物内部潜在的更深层次的态势要素进行挖掘,利用AR技术全面、精准地获取和提炼场景中的态势信息,并进行直观的呈现与可靠的预测,进一步激发人获取新的认知与知识.本文提出基于AR技术的人机物虚实融合暗态势计算框架,暗态势计算借助AR与人机融合技术实现态势的增强感知,充分地应用其虚实叠加信息、可视化、人机交互等方面具有的天然优势.基于AR技术,用户可以接收覆盖在真实环境上的实时暗态势信息,从而更全面、直观地掌握环境的态势信息;同时,释放人的双手,实现更自然的人机交互,更利于暗态势信息的提炼、挖掘与评价.基于AR的沉浸式暗态势计算融合机器智能

与人的经验认知,将直觉与理性结合,挖掘事物内在隐藏的、更深层次的暗态势信息,实现人机物虚实融合的全面感知.最后以基于航母航空保障作业的半实物电子沙盘推演系统为实例,证明了本文提出的基于暗态势计算的人机物虚实融合态势感知增强决策的结果优于基于传统态势感知的决策结果,验证了暗态势计算的合理性、有效性.

1 暗态势计算

1.1 暗态势的概念

与基于传统态势感知过程中的直观态势要素信息相比,暗态势是一种隐藏的、难以察觉的、更深层次的、具有深远影响的态势信息,象征各实物之间存在的潜在关联或隐含趋势,通常表现为不易察觉或难以发觉的现象;其由多种内在和外在因素相互作用形成,对态势预测结果影响重大.暗态势是在其计算过程中获取的感知信息,为人类进行多维度分析预测、执行决策等提供更全面的态势信息支持.基于暗态势的全面分析,本文归纳出暗态势具有以下特性:抽象性、不可测性和多变性.抽象性表示暗态势的隐式特性,难以直接感知或具体表述,可借助 AR 技术与主观推测发掘,利用多模态^[18]上下文信息帮助人类推测得到新的认知;不可测性表示获取到的暗态势信息的深度、数量和价值意义无法具体衡量;多变性指态势信息易受到所处环境中多种态势因素的影响或扰动.

1.2 暗态势计算的概念

暗态势计算的概念由态势感知引申而来. Endsley^[19]提出态势感知三级模型,即态势要素感知、态势理解和态势预测,并将态势感知应用到工程学领域;刘伟^[16]提出深度态势感知的概念,其表示对态势感知的感知,并将人的智慧和机器的智能进行融合,分析事物之间的关联性以及事物背后的深层次内涵;Wickens 等^[20]提出基于注意力机制的态势感知模型;Hooey 等^[21]对态势感知进行了定性和定量的分析;王秉等^[22]综合运用多种技术手段,如模型建构与评价等,评估并动态地预测系统的整体态势及安全威胁.当前,大多数态势感知的相关研究工作中,态势信息全面获取是研究的重点.暗态势计算的目的是辅助人类挖掘、感知全面态势信息.

暗态势计算对态势要素时空演化预测、态势要素之间的隐形关联规律,以及各类对象潜在的多模态行为和决策意图等关键要素进行智能抽取、语

义化以及态势的增强,进一步激发人的直觉、顿悟、联想,从而获取新的认知.

在传统态势感知过程的基础上,暗态势计算过程借助 AR 叠加态势信息呈现方式,融入人类智慧经验与启发式的灵感信息,提炼高价值的关键要素信息,发掘目标内在的隐性知识关联,挖掘事物内部潜在的相关性,研究预测事物未来动态发展趋势和隐含规律等.暗态势计算流程如图 1 所示.

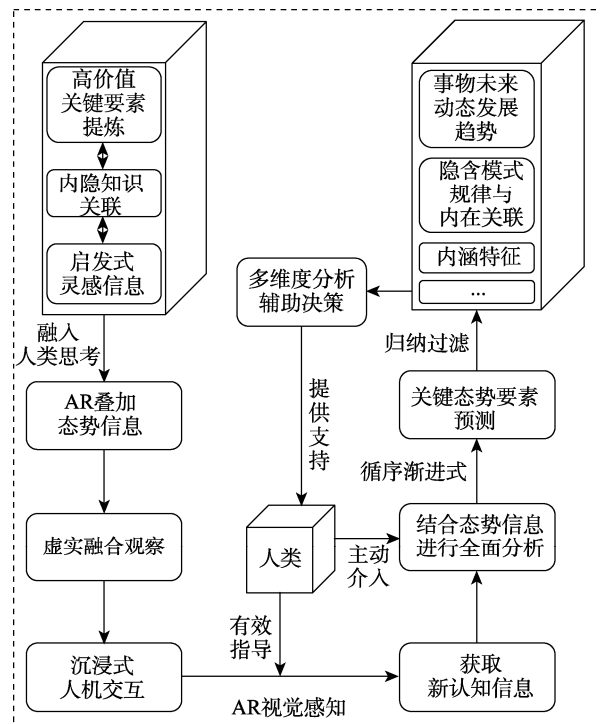


图 1 暗态势计算流程

本文将感知过程中的态势信息分为显式与隐式 2 类.显式态势信息是借助传统态势感知方法可直观地获取到的信息;隐式态势信息指暗态势,这类信息往往易被忽略,但又是态势预测过程中的关键影响因素.机器的自主学习^[23]可基于传统视觉感知在无人监督的某些突发情况下作出迅速反馈,提供辅助决策的行为信息等,传统视觉感知方法虽然能获取丰富的信息,但也导致信息冗余和信息处理负担等问题^[24].在暗态势信息挖掘过程中,本文借助 AR 技术呈现虚实叠加的信息,提升机器自主感知能力,减少冗余信息与处理信息的负担;将机器良好的自主学习能力与 AR 沉浸式交互感知到的信息相结合,融入人类的智慧与思考,共同为发掘隐藏的、深层次暗态势信息提供强有力支持.

暗态势计算的研究对象是直观要素背后潜在的、客观存在的、深层次内在关联规律,以及基于这种规律对关键态势要素时空演化的预测信息,

包括主观可能发生的各类行为或具有随机性、偶发性的决策意图. 针对隐藏的关键态势信息与主客观要素等进行提炼、建模、关联、呈现的过程即为暗态势计算. 本文将暗态势计算形式化表示如下: 假设 V 表示虚拟世界, R 表示真实世界, P 表示人, C 表示机器(包括计算机、人机交互设备等), O 表示物(各种实物对象). 其中, 人机物属于真实世界, $(P, C, O) \in R$. 构造函数 T 定义为

$$T: (P, C) \rightarrow V,$$

表示人机结合通过数学建模、智能算法, 以及 Unreal Engine, Unity 等工具构建虚拟世界. 人类通过人机交互设备建立真实世界与虚拟世界的沟通, N 表示该过程中人类对计算机、AR 头显等交互设备的控制, 定义控制 N 函数为

$$N: P \rightarrow (C, O),$$

表示人对机和物的控制. D 函数定义为

$$D: (V, R) \xrightarrow{I} U,$$

其中, U 表示各事物之间存在关联规则、内在规律等, I 表示通过预测或采取一系列有效措施获取新认知的过程. 通过 AR 及其他可视化手段将态势信息虚实融合进行可视化呈现, E 函数定义为

$$E: (A, U) \xrightarrow{AR} M.$$

最后, 暗态势计算定义为

$$\langle P, C, O, M, A, V, R, U, T, N, D, I, E \rangle.$$

其中, A 表示属性集合, 包括 P, C, O 这 3 类对象的有效属性信息; M 表示视觉感知到的态势信息.

1.3 暗态势计算与相似概念对比

1.3.1 传统态势感知与暗态势计算

传统的态势感知不只是对一定时间和空间内的环境元素进行感知, 并对这些元素的含义进行理解, 最终预测这些元素未来的发展状态, 更重要的是利用已知的显式态势信息去预测、感知获取未知知识或者新认知, 更加注重显式的态势信息. 与传统态势感知相比, 暗态势计算将已知的显式信息与潜在的隐式信息结合, 充分地应用 AR 技术加强视觉感知, 能够为真实场景中的目标物叠加虚拟的态势信息, 有利于发掘出全面的感知信息, 为基于视觉感知的人机协同决策提供信息支撑.

1.3.2 深度态势感知与暗态势计算

暗态势计算是深度态势感知的具体化, 深度态势感知的具体任务就是挖掘暗态势, 两者相互依存、互相支撑. 深度态势感知是对态势感知的深层感知, 将人的智慧与机器智能融合, 属于一种人机智慧, 既涉及事物的属性又相互关联, 在理解事

物原本之意的基础上又能发现“弦外之音”^[2]. 暗态势计算能够更加深入到对事物直观关系外弦外之音的探索和挖掘. 深度态势感知强调分析整合数据源, 利用先进算法为最终决策而服务; 在此基础上, 暗态势计算进行了具体化分析, 是整个深度态势感知的流程中, 人类能够在无主观意识中自然感知并运用深层次信息的过程. 暗态势利用 AR 技术的巨大优势, 促使人类在基于沉浸式实时智能交互中获取多维度信息, 借助其三维感知能力展示虚实结合信息; 通过人机交互设备将抽象的信息具象化展示, 实现虚实信息一致性融合, 加强人类对场景态势的全面理解.

1.3.3 数据挖掘与暗态势计算

暗态势计算具有无目标性, 数据挖掘有一定目的性. 数据挖掘指从大量数据中挖掘出有用的信息和知识^[25]; 暗态势计算对事物内部之间关联信息进行挖掘, 从而发现其中的潜在规律和发展趋势. 鉴于态势感知是对周围环境及要素在一定时间和空间范围内的感知和理解, 以及对未来状态的预测^[26-27], 在此基础上, 采用 AR 技术融入人类智慧所发掘的暗态势信息, 对所处环境的态势要素内部关联及决策行为进行分析, 预测潜在的可能会发生的行为或关联规律. 相较而言, 暗态势计算注重对关键高价值态势要素信息的提炼, 结合多种人机自然交互方式将视觉感知到的态势信息与真实场景叠加融合, 实现动态多元化态势信息融合显示, 且它关注在行为演变过程中产生的实时随机的新认知, 人类的智慧也被充分地融入暗态势挖掘人机协同决策过程中, 更加强调实时感知、全面分析和辅助决策. 数据挖掘技术可以应用于暗态势计算中, 通过对海量信息的处理和分析, 进一步提升暗态势计算感知和预测的准确性与可靠性.

1.4 暗态势计算的理论支撑

暗态势计算具有心理学、生物学、信息技术等多学科理论的强有力支撑. 深度理解暗态势计算的内涵及其存在的合理性是本文研究的重点.

1.4.1 心理学支撑

心理学中的认知能力是人类行为活动最重要的心理条件. 其中, 认知理论^[28]的实质是使观念和概念相互联系以及问题解决的心理理论, 是关于有机体学习的内部加工过程, 如信息、知识及经验的获得和记忆, 并达到顿悟. 学习是通过顿悟实现的, 经验的积累是顿悟的基础, 活跃的思维有利于顿悟的形成^[29]. 人类可通过灵光乍现获得新的认知, 暗态势的挖掘和提炼可以理解为顿悟学

习、灵光一现的过程,是挖掘关键态势要素内在联系的过程.暗态势信息的挖掘过程是在某个瞬间突然产生的深刻理解和领悟,这种领悟往往是由大量的信息、经验和思考积累所引发的一种突破,是属于一种“灵光一现”的状态.相较于此,机器虽然可以凭借之前积累的学习经验获取部分潜在的态势信息,但是没有这种灵光乍现的能力表现,所以需要借助人類的智慧与知识融入暗态势计算中.

心理学及认知科学文献认为,记忆尤其是存储在长期记忆中的信息对创造性问题起着重要的作用^[30].人类记忆可由长期积累经验逐步形成,记忆中存取的知识帮助人类作出高效判断并获得有效认知,经验对于暗态势计算的影响如同记忆对于人类的影响,且挖掘事物内部潜在的关联信息也需要机器学习累积经验.记忆中相关信息可以被某些特定的线索激活,特定线索信息对人类的思维走向具有一定的引导性,使人类可获取到相关问题的直觉^[31].先前经验与知识将会对挖掘暗态势信息给予一定感知支持.人类经验和机器学习所获经验结合优势互补,为暗态势信息的挖掘分析提供更准确、可靠的帮助,人类的智慧经验既有助于发掘可能被忽略的隐式信息或者线索,又可以辅助机器学习模型的优化校正与数据质量改善;而机器经验既能凭借大量学习自动、高效地发掘出更深层次的暗态势信息,也能够减少人类由于主观历史经验积累作出预测判断的误差.

1.4.2 生物学支撑

生物学中,内隐学习^[30,32]指独立于学习的过程和产物而进行的学习,是经验、意识层直觉的认知基础.暗态势信息的挖掘过程同样可独立于其学习过程,可以在无意识或者无目的的情况下被感知.Lieberman^[33]综合前人对基底神经节的研究发现,内隐学习与基底神经节的功能具有相似性,所对应的时间序列模式与大脑意识无关^[30].暗态势信息可因人类的启发式灵感被获知,也可以在人类大脑无意识的情况下基于内隐学习被发掘,融合机器学习获取的新认知,为态势理解、态势预测提供有效信息.

人类具有在复杂紧张、高强度的对抗中作出超越人类反应极限的判断与决策的能力,这种直觉能力往往是无意识的或难以具体描述的,但是可以使人类在仅接受少量信息后迅速作出决策^[30,34],通过直觉可以感知到隐藏的、深层次的信息.借助人类的直觉发掘出的难以被机器感知的、隐藏的深

层次信息属于暗态势的范畴.直觉思维指不受某种固定的逻辑规则约束而直接领悟事物本质的一种思维形式^[30,35].基于 AR 的人机融合可实现多人、多机态势信息共享,在利用 AR 技术叠加态势信息过程中可以更加关注视觉方面的表达,使其更贴切于信息内容的语义,达到态势感知增强的目的.

1.4.3 信息技术支撑

暗态势计算的实现需要信息技术的支撑.在新型的感知和显示技术更新迭代下,人机交互方式逐步发展为非接触式语音和手势交互等智能操作,智能穿戴设备的研发随着人类的需求不断创新而改进,暗态势计算基于 AR 技术进行人机物虚实融合实现态势感知的增强,通过手势交互、眼动追踪、凝视输入等方式与目标物进行沉浸式交互.人机物共融的自然交互增强了态势信息传递的流畅度,辅助人类更加自然、便捷、准确、智能地获取所需态势信息.陶建华等^[36]关注多模态人机交互的发展现状和新兴方向,深入梳理混合现实实物交互、可穿戴交互和人机对话交互等相关技术知识,发现未来可在已有人机交互的研究基础上,结合人脑与机器智能的优势,研究人机智能协同、学习和交互式智能生长的理论与方法.王涌天等^[37]研究自由曲面棱镜 AR 头显,提出并实现了一种三片式自由曲面 AR 光学系统方案,有效地降低透视畸变,提高了成像质量.人机交互设备作为人类与虚拟世界沟通的媒介,有助于在暗态势感知过程中提供更全面获取信息的方式,如 HoloLens2 头显、数字手套等不同硬件设备,能够辅助态势信息以多元化、多维度方式呈现.

人工智能在生物医学、脑科学、大数据等多方向已具有成熟应用,为人类生产生活方式的改进做出巨大贡献,将其同类脑感知与计算相结合,可使目标物与所叠加的态势信息实现同步,进一步提高态势信息叠加中真实场景实时的视觉定位的精确度.伍朝辉等^[38]对交通场景数字孪生的应用与研究现状进行综述,在虚拟场景构建过程中,通过数字化模型在虚拟世界中进行模拟推演、构建还原高逼真度的真实场景,能够为暗态势信息的挖掘提供高度逼真的交互环境,提高感知环境态势信息的准确性.

2 本文方法框架

人类具有较强的灵活性和创造性,在环境信息不足的情况下能够通过不同事物之间的联系,

对当前态势作出合理的预测;机器虽然在不同事物之间的联想方面表现较弱,但它具有较强的计算能力和推理能力^[16]。在暗态势信息的挖掘过程中,利用两者优势互补可弥补单方感知信息不全面的劣势。此外,回顾之前的研究表明,AR技术可以减少态势感知系统的错误^[39],获得更高的系统准确率^[40],有效地降低人类感知和认知的负

荷^[41]以及系统完成时间^[42]。已有系统的研发主要集中于AR的适用性,易忽略信息的设计,而信息的呈现与设计有利于进一步提升用户的态势感知能力^[27]。所以,本文提出基于AR的人机物虚实融合暗态势计算框架,基于AR技术将机器的计算能力和人的认知能力结合,完成复杂的人机物虚实融合的暗态势计算,本文方法框架如图2所示。

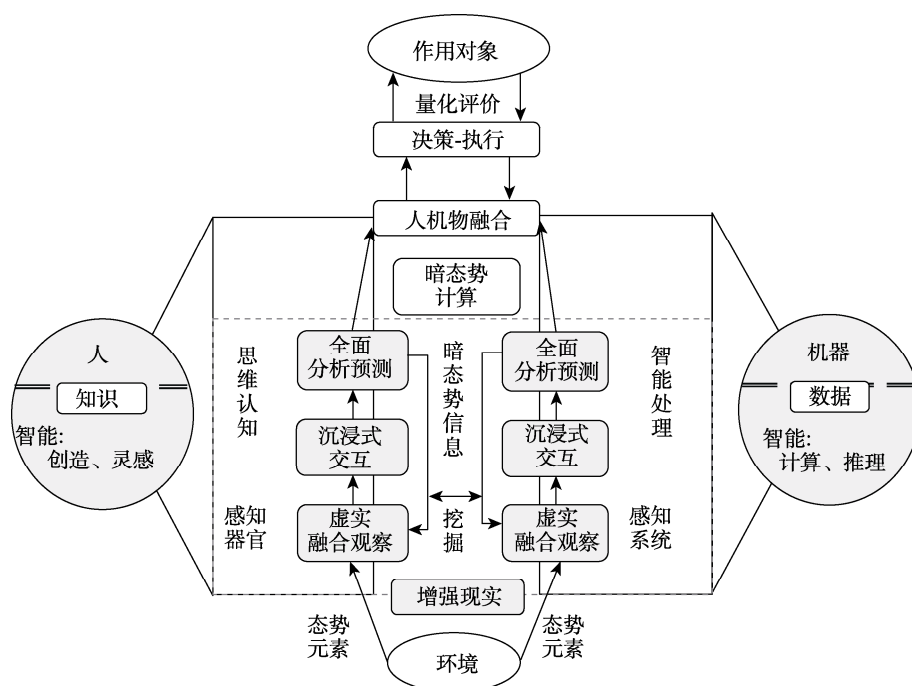


图2 本文方法框架

在人机协同决策过程中,机器不断学习,实现知识和数据的动态更新,使人类智慧、知识与经验逐步渗入机器智能。机器学习不同态势下人类的多样化决策,可避免人完全束缚在人机交互系统中,确保人行为的有效介入;对于其中蕴含的暗态势,无论是心理学或生理学方面都能够提供有效的信息支撑,人类的介入也能够提供给机器更加明确的感知与判断。

基于人类的智慧、创造力及灵感,大量的信息、经验的积累能够帮助人们快速辨识和理解新出现的态势信息。人类通过启发式灵感获知暗态势信息,同时,这些信息在人类大脑无意识的情况下基于内隐学习^[30,32]被发掘;而且,人类记忆^[30]及累积的经验中蕴含的特定线索信息对人类的思维走向和未来行为决策产生引导作用,通过对这些线索信息的分析和利用形成新的思维认知,并将其应用于暗态势信息的挖掘过程中。暗态势计算的思考方式由本能意识感知、直接被领悟到而不受固定规约逻辑约束^[31],通过人直觉获取到的

有效信息填补机器学习单方面获取信息的空缺。因此,其中潜在的隐式信息被发掘出,同时,利用记忆中存取的知识,帮助人类在协同决策中作出高效判断并获得有效认知。

通过“虚实融合观察—沉浸式交互—全面分析预测”循环迭代过程实现暗态势的挖掘,直至通过量化评价获取满足要求的暗态势,结束该过程。人类不断地接收环境中的态势元素,机器通过感知系统察觉周围环境的变化,并整合场景中的态势信息。在此过程中,利用AR虚实叠加的特性,将虚拟的暗态势关键信息叠加到空间一致的真实环境中,更全面、直观地了解场景的态势信息。使用AR技术将实时态势信息更直观地叠加在真实场景中的方式,降低了人的认知成本,增加了获取多维度多元化态势信息的概率,更有利于人类发挥“关联”和“联想”的优势,有助于挖掘场景中暗态势信息。基于AR的人机交互方式对暗态势的动态演化过程进行有效推演。AR设备通过人机交互的方式使人类更加直观地观察态势信息,易于人类形成

新认知, 辅助人把抽象的暗态势信息与真实场景建立关联。

机器根据大量已有的规则和数据进行建模, 充分地发挥机器的理性智能。人类智能是一种包含了心理状态的感性智能形态, 在突发状况下, 人的心理状态(如勇敢特性)起到重要作用, 将直接影响突发事件的处置结果^[16]。所以, 在行为决策过程中, 人的思维认知能力与机器智能处理能力相结合, 人类智能与机器智能的交互自然融合^[43], 借助人工智能与可视化结合^[44]的方式实现人与机器之间的高效交互沟通。基于 AR 设备将机器的决策结果进行直观显示, 并作为人工决策的依据, 也能避免完全依靠人工决策带来的高成本和高风险。在机器智能不断提升的过程中, 机器算法的复杂度也不断增加, 这会使得整个系统越来越脆弱, 面临着崩溃的风险, 故障率也大幅度提升。通过 AR 设备, 人机自然交互融合人与机器的态势感知以及行为决策过程, 两者相互依赖, 可减少由于决策失误带来的风险, 突破各自的局限性, 实现对复杂、多变环境的掌控^[44]。

在暗态势计算系统中, 机器负责数据计算和部分推理工作, 人主要负责具有灵活性和创造性的工作, 如决策、评价、监督等, 两者以 AR 设备为媒介进行协同计算。在暗态势信息挖掘过程中, 人与机器最大的差异在于如何把看似不相关的事物建立联系。人具有大量相关领域知识、经验累积, 能够在短时间作出有效反馈或者决策判断, 还可以据此发掘或者感知出场景中潜在的暗态势。在发掘暗态势过程中, 基于“人在回路”的思想使得人起到监督保护的作用, 尽可能地降低故障造成的损失^[45]。人与机器之间的任务分配原则是: 既要人完成的工作量少, 又要使得总体暗态势计算量化评价最优, 即

$$\min \sum_{j=1}^k T_j^m = T - \max \sum_{i=1}^n T_i^c,$$

$$\max(f(T)) = f\left(\sum_{i=1}^n T_i^c\right) + f\left(\sum_{j=1}^k T_j^m\right).$$

其中, $f(x)$ 表示暗态势计算量化评估结果; T_j^m 表示人承担的任务; T_i^c 表示机器承担的任务; T 表示总的任务量。

根据本文归纳出暗态势的抽象性、不可测性和多变性特性, 通过间接的方式对暗态势信息进行评价。基于暗态势计算作出的决策, 进而产生的行动与目标的“距离”作为暗态势计算的评价方法,

如图 3 所示。其中, W 表示人机协同决策过程中对任务目标所期望获取的结果; G 表示融入暗态势信息、人类智慧等一系列行动后产生的决策结果; S 指通过融入暗态势后产生的结果与目标期望结果之间的差值。通过对比融入暗态势信息前后预测产生的不同结果与目标期望结果的差距, 展现出暗态势计算对全面感知态势信息的有效性与优越性, 公式为 $F_{\text{evaluation}} = S(W, G)$ 。

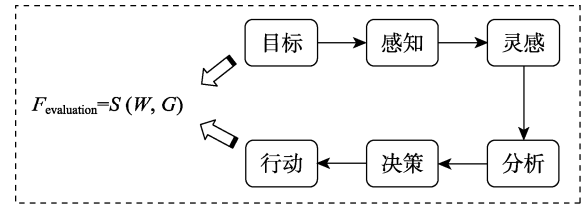


图 3 量化评价

3 应用实例

航母是一个国家综合实力的象征, 舰载机的出动回收架次率是衡量航母作战效能的核心指标。航母甲板面上舰载机集群运动的推演对提升舰载机的出动架次率具有重要意义。当前, 已有大量关于舰载机集群运动的相关研究, 如舰载机转运调度^[46]、舰载机集群运动模拟^[47]、舰船舱室布局优化^[48]、甲板运动预估^[49]、舰载机避障算法^[50-51]等。航母甲板面上, 针对舰载机出动回收的各项保障作业具有高度动态性且极其复杂, 需要获取更加精准、全面的态势信息, 才能完成舰载机集群运动的有效推演。如何在复杂的航空保障作业场景中进行精准的态势感知和高效的智能体行为决策, 是制约众多智能系统的瓶颈。应用暗态势计算相关理论, 基于 AR 的人机物虚实融合的暗态势计算框架, 把人的认知能力与机器的强大算力进行融合, 结合隐藏的、更深层次的暗态势信息进行人机协同推演仿真, 以应对动态变化的航空保障作业环境。

针对航空保障作业过程中态势精确感知和智能决策的迫切需求, 进一步增强指挥员对态势的感知和作业指挥决策能力。本文基于航母航空保障作业的半实物电子沙盘, 将虚拟的态势信息与机器智能辅助决策信息发送至指挥员佩戴的 AR 设备, 与指挥员所看到的实体模型的空间定位信息进行一致性计算; 将这些虚拟的态势信息叠加至真实场景中进行基于手势的自然人机交互, 通过 AR 眼镜观察叠加至实体模型上方的态势信息, 提升指挥员对全面态势的认知效率。基于直观的

实时态势信息、可发掘的潜在暗态势以及机器智能的辅助决策信息,将更有利于指挥员快速、准确地作出合理的舰载机运动预测。

3.1 半实物电子沙盘推演系统设计

以航母航空保障作业过程中舰载机集群运动推演的需求为出发点,使用AR技术建立面向航空保障流程的半实物电子沙盘推演系统。该系统由数据通信模块、实体运动获取模块、虚拟信息计算模块和虚实交互模块构成,整体架构如图4所示。其中,数据通信模块完成各个模块之间的数据传输;实体运动获取模块基于高精度摄像头识别和跟踪保障实体模型,获取其运动轨迹;虚拟信息计算模块实时计算飞机的状态信息,智能算法计算飞机的运动轨迹;虚实交互模块通过AR设备,在舰载机实体模型周围显示保障态势信息以及实体飞机模型的运动轨迹信息,并与用户进行自然的人机交互。

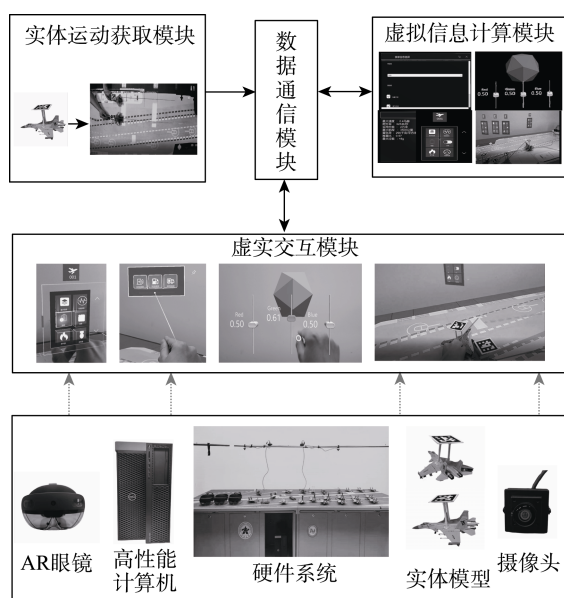


图4 半实物电子沙盘推演系统架构

(1) 数据通信模块。负责半实物电子沙盘推演系统的各个模块之间的数据通信。虚拟信息计算模块向虚实交互模块提供舰载机的态势信息、预设轨迹(路径规划算法计算得到的运动轨迹)等,虚实交互模块向虚拟信息计算模块传输由指挥员根据预设轨迹操控的实体模型的运动轨迹;实体运动获取模块将舰载机实体模型的运动轨迹通过数据通信模块传输至虚实交互模块,完成虚实信息一致性的计算。

(2) 实体运动获取模块。半实物电子沙盘系统的推演平台上布置了舰载机实体模型,如图5所示。在实体模型上方添加二维码,采用高清摄像头

扫描二维码的方式实现对实体模型的识别和运动轨迹的跟踪。

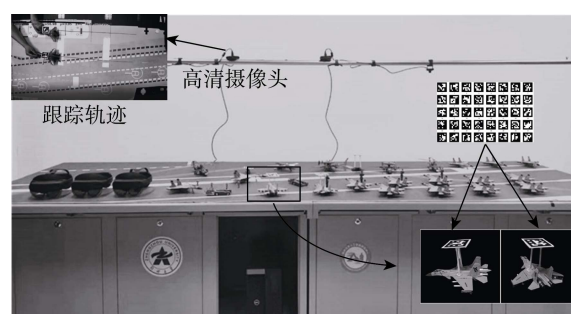


图5 半实物沙盘推演平台上的实体模型

(3) 虚拟信息计算模块。获取并计算复杂保障作业环境下飞机的实时状态信息以及指定作业的路径规划结果,通过数据通信模块将这些信息传输至虚实交互模块。该模块是系统的机器智能部分,并给出了机器智能计算的路径规划结果。

(4) 虚实交互模块。本文基于HoloLens2实现人机交互界面的设计和开发,如图6所示。基于HoloLens2的虚实信息一致性计算,实现叠加保障态势信息及用户交互的功能。虚拟信息计算模块发送虚实交互模块所需的保障态势信息,通过AR眼镜叠加在航空保障实体周围并生成预设轨迹,显示在指挥员的视野中。

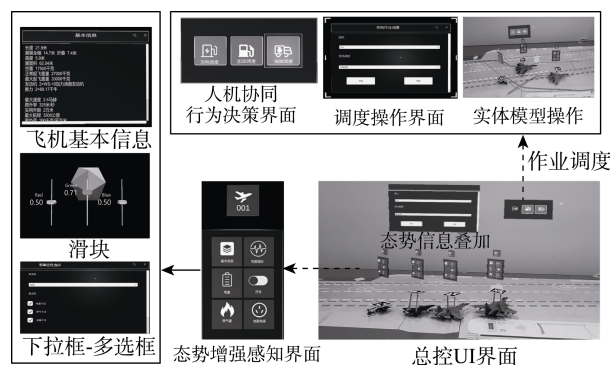


图6 人机交互界面

人机交互界面根据展示数据的不同分为态势增强感知界面和人机协同行为决策界面2类。态势增强感知界面负责接收虚拟信息计算模块传输来的飞机状态信息的信息,并进行动态实时展示。人机协同行为决策界面负责将操作员选择的作业调度指令发送至虚拟信息计算模块,然后获取预设轨迹数据,完成预设轨迹的显示功能。预设轨迹是智能算法计算出的实体模型在保障作业过程中的运动轨迹,也是指挥员操控实体模型运动的参考轨迹。最终,由操作员操控的实体模型的运动轨迹传输至虚

拟信息计算模块, 丰富智能算法的学习案例。

HoloLens2 通过深度摄像头和传感器捕捉并识别用户的手势, 实现自然的人机交互, 交互形式

包括手势、手指进行点选、勾选、按动、删除等诸多操作。图 7a~图 7c 所示为通过手势控制射线的操作, 图 7d~图 7i 所示为可触碰指尖交互的操作。

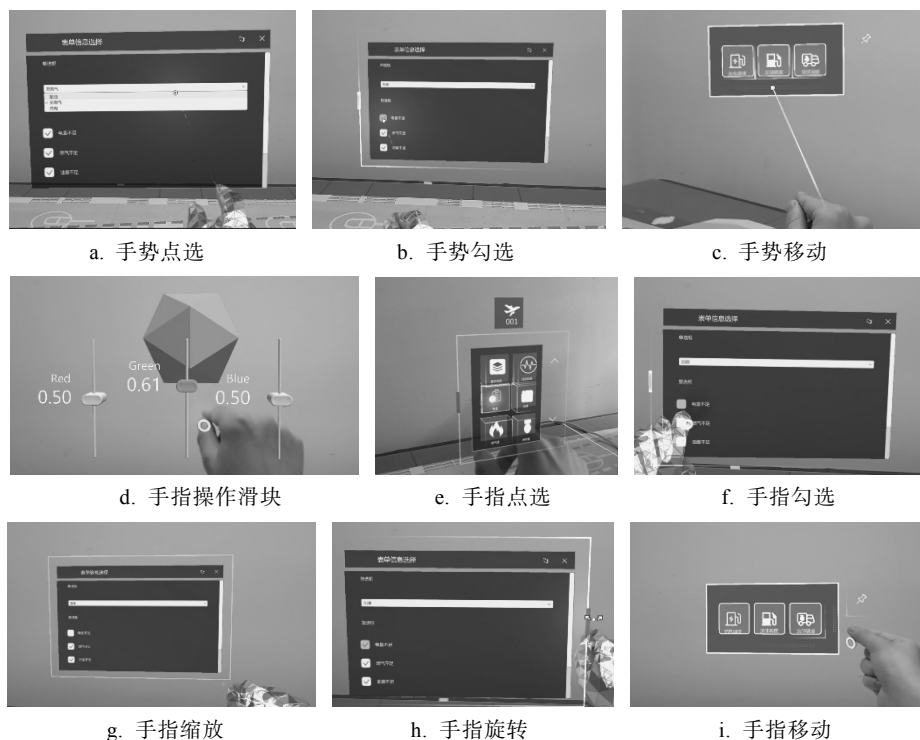


图 7 人机交互方式示意图

3.2 基于半实物电子沙盘的暗态势计算应用

当前, 多数路径规划任务从机器智能的角度对不同场景的智能体的行为进行决策, 较少融入人的智能和经验, 导致可利用的有效态势信息不全面。若仅依靠机器智能很难准确地刻画航空保障作业中舰载机集群的复杂运动, 航空保障作业路径规划需要依靠人机协同决策, 采用“人的经验+路径规划智能算法”的方式, 结合人机交互过程中可感知到的全面态势信息, 完成复杂人机协同的航空保障作业中舰载机集群行为的决策。

指挥员戴上 AR 眼镜后, 可以查看实体对应的态势信息, 如舰载机的油量信息、电量信息, 以及基于智能算法的智能体行为的时空演化预测等, 在实体模型运动推演过程中融入人类的智慧、经验与灵感。该半实物电子沙盘系统包括 2 类实体模型的轨迹: 一类是智能算法计算出的预设轨迹; 另一类是人通过佩戴 HoloLens2 AR 眼镜操作实体模型得到的跟踪轨迹, 其中融入了态势要素的时空演化预测和内部隐性关联规律信息, 这类信息属于暗态势的研究范畴, 已被自然融入人机物融合决策的过程中。佩戴 AR 眼镜使人类可高效感知到

更加直观的态势要素信息, 在融入暗态势信息的同时, 借助 AR 技术叠加态势信息的可视化呈现方式将会激发人的灵感并给人启发式的思考。在指挥员操作实体模型生成跟踪轨迹过程中, 目标场景中各类对象潜在的行为和指向性意图也被感知, 并融入人机融合决策中, 实现目标实物到达指定地点的更优轨迹规划。人根据这些信息操作实体模型, 进行运动时已经自然地融入了隐含的态势信息, 即暗态势, 这种信息往往非常重要却隐藏在事物内部。

人和机器基于暗态势增强感知进行人机融合决策, 如图 8 所示。(1) 指挥员结合当前场景的直观态势信息和个人的经验与认知, 触发一项保障作业, 系统采用路径规划智能算法获取舰载机的运动轨迹, 作为系统生成的预设轨迹, 通过 AR 眼镜反馈至指挥员, 指挥员结合暗态势信息对预设轨迹进行修正, 操控移动飞机模型, 生成最终的舰载机运动路径, 即实体模型的跟踪轨迹。(2) 指挥员通过 AR 设备操控实体模型所获取的运动路径, 在机器智能的基础上融入人的智慧以及暗态势信息, 作为最终的路径规划结果, 传输至虚拟信息计

算模块,不断丰富机器学习所依赖的数据。(3)在简单作业场景中,智能算法能够计算出合理的作业路径推演方案,但在复杂状况下,指挥员基于智能系统给出的预设方案结合个人经验与认知,可综合衡量场景中各物体的内在关联并给出进一步行为预测,推演出更理想的结果。智能算法可以辅助指挥员进行决策,并形成人机协同控制的关系。

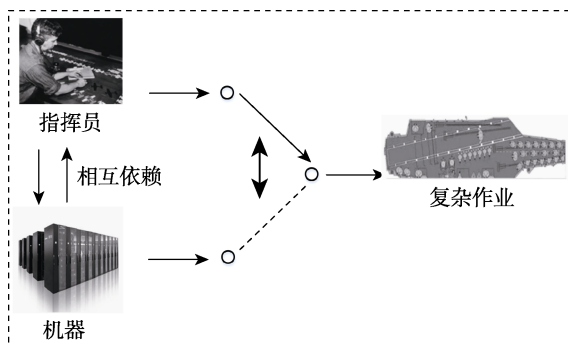


图8 人机协同控制关系图

图9所示为在2个场景中预设轨迹(即由智能算法计算出的轨迹)与跟踪轨迹(即由指挥员操作实体模型的运动轨迹)的对比。其中,绿色曲线表示预设轨迹,红色和灰色曲线表示2种不同的跟踪轨迹。可以看出,跟踪轨迹和预设轨迹整体趋势较为接近,在2个场景中,融入暗态势信息后跟踪轨迹都对预设轨迹进行了修正,保证了运动的安全性,避免了不必要的绕行。



a. 场景1



b. 场景2

图9 预设轨迹和跟踪轨迹的对比

3.3 系统仿真与实验

基于半实物电子沙盘推演系统验证暗态势计算思路的合理性。半实物电子沙盘推演的目标是:沙盘上舰载机模型的运动轨迹的路径长度较短,减少资源的消耗;运动轨迹的拐点较少、运动轨迹转弯角度较小,保证运动的安全性;规划的舰载机运动过程中不发生碰撞。为了验证本文方法的合理性与优越性,选择基于传统态势感知的当前流行路径规划算法计算的运动轨迹与本文方法得到的运动轨迹,在满足半实物电子沙盘推演目标方面进行对比。本文选取路径长度、拐点个数、平均拐弯角度和成功率4个评价指标,验证本文方法的合理性与优越性。

(1) 评价指标

路径长度。路径从起始点到目的地的长度总和,通常,路径长度越短越好,公式为

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

其中, x_i 和 y_i 分别表示第 i 时间步轨迹点,该路径包含 n 个时间步的数据。假设所有路径的权重相同,由于本文的实验场景是甲板模型的平面,因此测地距离将转化为欧几里得距离,实验中仅考虑欧几里得距离作为衡量标准之一,能够较好地衡量评估算法的优劣。

拐点个数。路径中相邻2个非光滑的路径片段之间的连接点为拐点。为了避免产生测量的误差,取2个相邻的路径片段的夹角大于 5° 称为非光滑连接,即 $r_i - r_{i+1} > 5^\circ$, r_i 表示第 i 时间步的转向角;然后计算每条规划路径中拐点数量的总和,通常,拐点个数越少越好。

平均拐弯角度。所有非光滑连接点的拐弯角度的平均值 $R_{\text{avg}} = \sum_{i=1}^m |r_i - r_{i+1}| / m$, 即所有拐弯角度的总和除以总拐点数,单位为度($^\circ$)。其中, m 表示拐点的总数。

成功率。从起始点到目的地规划的路径不与静态和动态障碍物碰撞即为成功的路径规划结果。0%表示智能体与动/静态障碍物发生碰撞,100%表示没有发生碰撞。

(2) 对比算法

针对虚拟信息计算模块,选择当前流行的路径规划算法计算预设轨迹,与对应的人机协同暗态势计算方法获取的轨迹进行对比。对比算法包括 GAMMA^[52], ORCA^[53]和 Heter-Sim^[54]。

(3) 对比实验

基于半实物电子沙盘推演平台, 将本文方法推演出的轨迹(红色线)与路径规划算法计算的轨迹(绿色线)进行比较, 结果如图 10 所示. 可以看出: a. 绿色轨迹存在较大突兀的转角, 不符合真实舰载机的运动规律; 红色轨迹较为平滑. b. 图

10a、图 10d 和图 10e, ORCA 算法和 GAMMA 算法计算出的运动轨迹发生碰撞, 本文方法通过人的参与, 融入人的智慧与深层次的态势信息对轨迹进行优化, 避免了碰撞的发生.

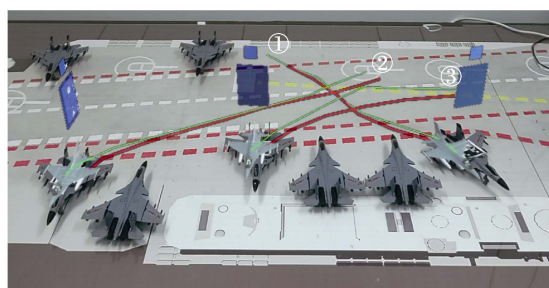
在 4 个场景中, 将本文方法与对比算法进行量化评价, 结果如表 1~表 7 所示. 从表 1~表 6 可以



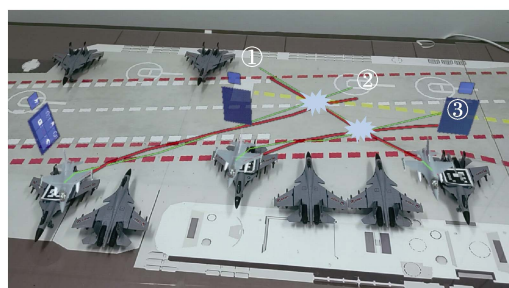
a. 场景1中与ORCA^[53]对比



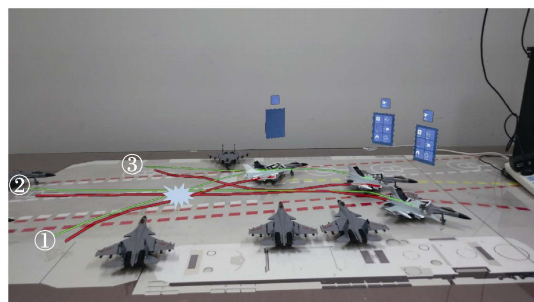
b. 场景1中与GAMMA^[52]对比



c. 场景2中与ORCA^[53]对比



d. 场景2中与GAMMA^[52]对比



e. 场景3中与ORCA^[53]对比



f. 场景3中与GAMMA^[52]对比



g. 场景4中与Heter-Sim^[54]对比

图 10 不同场景中本文方法与 3 种算法对比

表 1 场景 1 中本文方法与 ORCA^[53]算法量化评价对比

轨迹编号	算法	路径长度/cm	拐点数	$R_{avg}/(^{\circ})$	安全率/%
1	ORCA	129.27	2.00	58.05	0
	本文	124.75	2.00	7.90	100
2	ORCA	93.22	2.00	51.00	0
	本文	95.15	2.00	7.67	100
3	ORCA	114.00	4.00	39.85	100
	本文	115.66	7.00	6.84	100
AVG	ORCA	112.16	2.67	48.63	0
	本文	111.85	3.67	7.47	100

注: 粗体表示较优的结果。

表 2 场景 1 中本文方法与 GAMMA^[52]算法量化评价对比

轨迹编号	算法	路径长度/cm	拐点数	$R_{avg}/(^{\circ})$	安全率/%
1	GAMMA	127.85	9.00	27.97	100
	本文	126.90	5.00	7.52	100
2	GAMMA	86.38	1.00	22.03	100
	本文	88.15	2.00	5.96	100
3	GAMMA	113.21	1.00	66.30	100
	本文	115.86	10.00	7.65	100
AVG	GAMMA	109.15	3.67	38.77	100
	本文	110.30	5.67	7.04	100

注: 粗体表示较优的结果。

表 3 场景 2 中本文方法与 ORCA^[53]算法量化评价对比

轨迹编号	算法	路径长度/cm	拐点数	$R_{avg}/(^{\circ})$	安全率/%
1	ORCA	67.81	4.00	49.32	100
	本文	68.62	8.00	8.75	100
2	ORCA	85.60	4.00	41.45	100
	本文	89.52	3.00	6.54	100
3	ORCA	70.88	4.00	102.85	100
	本文	70.38	5.00	8.25	100
AVG	ORCA	74.76	4.00	64.54	100
	本文	76.17	5.33	7.85	100

注: 粗体表示较优的结果。

表 4 场景 2 中本文方法与 GAMMA^[52]算法量化评价对比

轨迹编号	算法	路径长度/cm	拐点数	$R_{avg}/(^{\circ})$	安全率/%
1	GAMMA	63.78	1.00	42.99	0
	本文	69.53	0.00	0.00	100
2	GAMMA	84.91	6.00	145.00	0
	本文	86.93	1.00	5.52	100
3	GAMMA	66.23	4.00	325.50	0
	本文	70.92	7.00	8.64	100
AVG	GAMMA	71.64	3.66	171.16	0
	本文	113.69	2.67	4.72	100

注: 粗体表示较优的结果。

表 5 场景 3 中本文方法与 ORCA^[53]算法量化评价对比

轨迹编号	算法	路径长度/cm	拐点数	$R_{avg}/(^{\circ})$	安全率/%
1	ORCA	71.58	3.00	57.36	0
	本文	73.40	8.00	11.18	100
2	ORCA	117.85	3.00	35.61	0
	本文	120.08	0.00	0.00	100
3	ORCA	85.49	7.00	52.36	100
	本文	85.47	8.00	7.49	100
AVG	ORCA	91.64	4.33	48.44	0
	本文	92.98	5.33	6.22	100

注: 粗体表示较优的结果。

表 6 场景 3 中本文方法与 GAMMA^[52]算法量化评价对比

轨迹编号	算法	路径长度/cm	拐点数	$R_{avg}/(^{\circ})$	安全率/%
1	GAMMA	68.81	1.00	46.00	100
	本文	71.80	6.00	13.49	100
2	GAMMA	118.66	2.00	54.85	100
	本文	120.02	4.00	4.15	100
3	GAMMA	78.53	4.00	40.25	100
	本文	81.27	2.00	20.00	100
AVG	GAMMA	88.67	2.33	47.03	100
	本文	91.03	4.00	12.55	100

注: 粗体表示较优的结果。

表 7 场景 4 中本文方法与 Heter-Sim^[54]算法量化评价对比

轨迹编号	算法	路径长度/cm	拐点数	$R_{avg}/(^{\circ})$	安全率/%
1	Heter-Sim	86.23	1.00	7.99	100
	本文	82.47	0.00	2.23	100
2	Heter-Sim	109.44	6.00	7.34	100
	本文	112.17	0.00	2.69	100
3	Heter-Sim	126.41	14.00	14.00	0
	本文	122.35	3.00	8.33	100
AVG	Heter-Sim	107.36	7.00	9.78	0
	本文	105.66	1.00	4.42	100

注: 粗体表示较优的结果。

看出, 路径规划算法计算的路径长度短、拐点少, 但是 R_{avg} 大, 意味着飞机在行驶过程中会出现较大突兀的转弯, 与推演的目标以及实际情况不符。从表 7 可以看出, 虽然 Heter-Sim 算法计算的路径长度短, 但是其拐点相对较多, 在避障过程中的 R_{avg} 较大。实验结果表明, 本文方法的 R_{avg} 远远低于其他路径规划算法, 符合推演的目标; 本文方法通过多次少量的方式减少大幅度的转弯, 提升了舰载机运动的安全性, 虽然不可避免地增加了拐点数和路径长度, 但是整体上性能优于当前流行

的路径规划算法。

4 结 语

暗态势计算作为态势感知引申出的新型概念,比传统的态势感知模式具有抽象、不可测等特性,代表隐藏的、更深层次的、具有深远影响意义的态势信息可被发掘。在基于人机物虚实融合态势增强感知系统决策和大规模分布式决策系统方面,暗态势计算有着巨大的发展潜力。本文贡献总结如下:

(1) 提出暗态势计算的概念,指人在回路的人机物虚实融合态势感知的增强,基于 AR 技术融合人和机器的智慧,虚实融合动态直观地呈现实时态势信息,提炼隐藏的深层次的暗态势信息;

(2) 提出一种基于 AR 技术的人机物虚实融合的暗态势计算框架,提升态势信息获取的效率和准确度,在人机协同决策过程中实现全面、直观、精准的态势感知;

(3) 设计基于航母航空保障作业的半实物电子沙盘推演系统,并以此为实例,验证暗态势计算存在的合理性,证明暗态势计算可以有效地辅助人类感知全面态势信息、作出正确合理决策。

本文尚有一些不足之处,将在后续工作中逐步完善,重点是量化评价暗态势计算,尤其是评估标准与评估模型算法等方向。未来,将扩展暗态势计算应用场景,进一步验证优化暗态势计算理论。例如,外骨骼系统中的手眼协同操控、动作预测以及结合人的意识和直觉进行信息叠加;交通场景中运动对象趋势信息的叠加、人车相互竞争与协作的潜在关系挖掘以及资源的抢占等;在机场环境下实现监控视频中叠加人际关系、实时动态整合态势信息、密度热力图监测人群流动趋势等。在暗态势计算的应用中,既要保证算法的效率,又要保证暗态势信息的准确性,这也是暗态势计算应用方面急需攻关的重要课题。

参考文献(References):

- [1] Liu Wei. Ask artificial intelligence[M]. Beijing: Science Press, 2019: 19-39(in Chinese)
(刘伟. 追问人工智能: 从剑桥到北京[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 19-39)
- [2] Liu Wei, She Xingguo, Wang Fei. Reflection on deep situation awareness in human-machine intelligence[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Social Science), 2017, 19(6): 10-17(in Chinese)
- (刘伟, 匡兴国, 王飞. 关于人机融合智能中深度态势感知问题的思考[J]. 山东科技大学学报(社会科学版), 2017, 19(6): 10-17)
- [3] Lorenz L, Kerschbaum P, Schumann J. Designing take over scenarios for automated driving: how does augmented reality support the driver to get back into the loop?[J]. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2014, 58(1): 1681-1685
- [4] Langlois S, Soualmi B. Augmented reality versus classical HUD to take over from automated driving: an aid to smooth reactions and to anticipate maneuvers[C] //Proceedings of the IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2016: 1571-1578
- [5] Park B J, Yoon C, Lee J W, et al. Augmented reality based on driving situation awareness in vehicle[C] //Proceedings of the 17th International Conference on Advanced Communication Technology. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2015: 593-595
- [6] Phan M T, Thouvenin I, Frémont V. Enhancing the driver awareness of pedestrian using augmented reality cues[C] //Proceedings of the IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2016: 1298-1304
- [7] Jia Fenli, Wang Guangxia, Tian Jiangpeng, et al. Pan-information map of battlespace for all-domain operation situational awareness[J]. Journal of Command and Control, 2022, 8(1): 30-36(in Chinese)
(贾奋励, 王光霞, 田江鹏, 等. 面向全域作战态势感知的战场全息地图[J]. 指挥与控制学报, 2022, 8(1): 30-36)
- [8] Xu Yinlong, Du Anping. Reserch on distributing technology of real-time comprehensive situatuinon information in battlefiel[d]. Journal of CAEIT, 2022, 17(2): 193-198+206(in Chinese)
(许银龙, 都安平. 战场实时综合态势信息分发技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17(2): 193-198+206)
- [9] D'Ambrosio B, Takikawa M, Fitzgerald J, et al. Security situation assessment and response evaluation (SSARE)[C] //Proceedings of Darpa Information Survivability Conference and Exposition II. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2001: 387-394
- [10] Smith S E. Tightening the net: examining and demon strating commonly available network security tools[D]. Texas: Faculty of the Department of Computing and Mathematical Sciences Texas A&M University, 2012
- [11] Gong Jian, Zang Xiaodong, Su Qi, et al. Survey of network security situation awareness[J]. Journal of Software, 2016, 28(4): 1010-1026(in Chinese)
(龚俭, 臧小东, 苏琪, 等. 网络安全态势感知综述[J]. 软件学报, 2017, 28(4): 1010-1026)
- [12] Liu Xi, Chen Juan, Peng Laixian, et al. Track processing and situation information quality evaluation of tactical data link[J]. Journal of Command and Control, 2020, 6(1): 13-20(in Chinese)
(刘熹, 陈娟, 彭来献, 等. 战术数据链航迹处理与态势信息质量评估[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(1): 13-20)
- [13] Zhu Feng, Hu Xiaofeng, Wu Lin, et al. From situation cogni-

- tion stepped into situation intelligent cognition[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(3): 761-771(in Chinese)
(朱丰, 胡晓峰, 吴琳, 等. 从态势认知走向态势智能认知[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(3): 761-771)
- [14] Jones D G, Endsley M R. Sources of situation awareness errors in aviation[J]. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1996, 67(6): 507-512
- [15] Zhao Zonggui, Li Junling, Wang Ke. The concept, structure and efficiency of battlefield situation assessment[J]. *Journal of CAEIT*, 2010, 5(3): 226-230(in Chinese)
(赵宗贵, 李君灵, 王珂. 战场态势估计概念、结构与效能[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2010, 5(3): 226-230)
- [16] Liu Wei. Rethinking of human-machine fusion intelligence[J]. *AI-View*, 2019, 11(4): 112-120(in Chinese)
(刘伟. 人机融合智能的再思考[J]. *人工智能*, 2019, 11(4): 112-120)
- [17] Niu Wenlong, Fan Mingrui, Li Yun, *et al.* Remote situational intelligent sensing system for human-machine integration[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2021, 43(6): 85-94(in Chinese)
(牛文龙, 樊铭瑞, 李运, 等. 人机共融的远程态势智能感知系统[J]. *国防科技大学学报*, 2021, 43(6): 85-94)
- [18] Li Xia, Lu Guanming, Yan Jingjie, *et al.* A survey of dimensional emotion prediction by multimodal cues[J]. *Acta Journal of Automatica Sinica*, 2018, 44(12): 2142-2159(in Chinese)
(李霞, 卢官明, 闫静杰, 等. 多模态维度情感预测综述[J]. *自动化学报*, 2018, 44(12): 2142-2159)
- [19] Endsley M R. Measurement of situation awareness in dynamic systems[J]. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 1995, 37(1): 65-84
- [20] Wickens C, McCarley J, Thomas L. Attention-situation awareness (A-SA) model[C] // *Proceedings of the Conference on Human Performance Modeling of Approach and Landing with Augmented Displays*. California: National Aeronautics and Space Administration, 2003: 189-225
- [21] Hooey B L, Gore B F, Wickens C D, *et al.* Modeling pilot situation awareness[M] // *Cacciabue P C, Hjalmdahl M, Luedtke A, et al. Human Modelling in Assisted Transportation: Models, Tools and Risk Methods*. Heidelberg: Springer, 2011: 207-213
- [22] Wang Bing, Shi Zhiyong. Research on the theory of safety & security situation awareness from a perspective of safety & security intelligence: a theoretical framework[J]. *Information Studies: Theory & Application*, 2022, 45(9): 15-21+5(in Chinese)
(王秉, 史志勇. 安全情报视域下的安全态势感知研究: 一个理论框架[J]. *情报理论与实践*, 2022, 45(9): 15-21+5)
- [23] Zeng Yi, Liu Chenglin, Tan Tieniu. Retrospect and outlook of brain-inspired intelligence research[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(1): 212-222(in Chinese)
(曾毅, 刘成林, 谭铁牛. 类脑智能研究的回顾与展望[J]. *计算机学报*, 2016, 39(1): 212-222)
- [24] Zhang Peijiang. Research on bionic perception based on human visual mechanism[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2018(in Chinese)
(张培江. 基于人眼视觉认知机制的仿生感知方法研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018)
- [25] Zhang Jian. Research on the application of data mining to modern warfare[J]. *Computer & Digital Engineering*, 2012, 40(6): 51-53+160(in Chinese)
(张剑. 数据挖掘在现代作战中的应用研究[J]. *计算机与数字工程*, 2012, 40(6): 51-53+160)
- [26] Duan Yuxian, Liu Changyun, Wei Wenfeng. Review of key technologies for battlefield situational awareness[J]. *Fire Control & Command Control*, 2021, 46(11): 1-11+19(in Chinese)
(段玉先, 刘昌云, 魏文凤. 战场态势感知关键技术研究[J]. *火力与指挥控制*, 2021, 46(11): 1-11+19)
- [27] Woodward J, Ruiz J. Analytic review of using augmented reality for situational awareness[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2023, 29(4): 2166-2183
- [28] Zimbardo P G, Johnson R L, McCann V. *Psychology: core concepts*[M]. 7th ed. USA: Pearson, 2011
- [29] Russon A E, Bard K A, Parker S T. *Reaching into thought: the minds of the great apes*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998
- [30] Zhai Peng, Zhang Lihua, Dong Zhiyan, *et al.* Machine intuition[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2020, 50(10): 1475-1500(in Chinese)
(翟鹏, 张立华, 董志岩, 等. 机器直觉[J]. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(10): 1475-1500)
- [31] Bowers K S, Regehr G, Balthazard C, *et al.* Intuition in the context of discovery[J]. *Cognitive Psychology*, 1990, 22(1): 72-110
- [32] Kihlstrom J F. Cognition unawares: implicit learning and Tacit knowledge. An essay on the cognitive unconscious[J]. *Science*, 1994, 264(5161): 1013
- [33] Lieberman M D. Intuition: a social cognitive neuroscience approach[J]. *Psychological Bulletin*, 2000, 126(1): 109-137
- [34] Hodgkinson G P, Langan-Fox J, Sadler-Smith E. Intuition: a fundamental bridging construct in the behavioural sciences[J]. *British Journal of Psychology*, 2008, 99(1): 1-27
- [35] Zhang Xiaoling. A review of intuition research[J]. *Philosophical Trends*, 1986(2): 15-18(in Chinese)
(张晓玲. 直觉研究综述[J]. *国内哲学动态*, 1986(2): 15-18)
- [36] Tao Jianhua, Wu Yingcai, Yu Chun, *et al.* A survey on multi-modal human-computer interaction[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2022, 27(6): 1956-1987(in Chinese)
(陶建华, 巫英才, 喻纯, 等. 多模态人机交互综述[J]. *中国图象图形学报*, 2022, 27(6): 1956-1987)
- [37] Wang Yongtian, Zheng Zhengrong, Cheng Dewen, *et al.* Introduction for feature issue on VR/AR display technology and applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(20): Article No. 2011000(in Chinese)
(王涌天, 郑臻荣, 程德文, 等. “VR/AR 显示技术及应用”专题前言[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(20): Article No. 2011000)
- [38] Wu Zhaohui, Liu Zhenzheng, Shi Ke, *et al.* Review on the construction and application of digital twins in transportation scenes[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(2): 295-305(in Chinese)
(伍朝辉, 刘振正, 石可, 等. 交通场景数字孪生构建与虚实融合应用研究[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(2): 295-305)
- [39] Velamkayala E R, Zambrano M V, Li H Y. Effects of hololens in collaboration: a case in navigation tasks[J]. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*,

- 2017, 61(1): 2110-2114
- [40] Condino S, Turini G, Parchi P D, *et al.* How to build a patient-specific hybrid simulator for orthopaedic open surgery: benefits and limits of mixed-reality using the Microsoft HoloLens[J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2018, 2018: Article No.5435097
- [41] Baumeister J, Ssin S Y, ElSayed N A, *et al.* Cognitive cost of using augmented reality displays[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2017, 23(11): 2378-2388
- [42] Hořejší P. Augmented reality system for virtual training of parts assembly[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 100: 699-706
- [43] Chen Baoquan, Qin Xueying. 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)
- [44] Xia Jiazhi, Li Jie, Chen Siming, *et al.* A survey on interdisciplinary research of visualization and artificial intelligence[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2021, 51(11): 1777-1801(in Chinese)
(夏佳志, 李杰, 陈思明, 等. 可视化与人工智能交叉研究综述[J]. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51(11): 1777-1801)
- [45] Sun Ji, Li Guoliang. Human-in-the-loop data integration system[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2022, 45(3): 654-668(in Chinese)
(孙佶, 李国良. 人在回路的数据融合系统[J]. *计算机学报*, 2022, 45(3): 654-668)
- [46] 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)
- [47] Wang Hua, Han Lu, Chu Shili, *et al.* Shipboard aircraft swarm modeling using a 3D cellular automata model under the Frenet frame[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2018, 30(9): 1719-1727(in Chinese)
(王华, 韩璐, 楚世理, 等. 基于 Frenet 标架下三维元胞自动机的航母舰载机集群运动建模[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2018, 30(9): 1719-1727)
- [48] 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)
- [49] Wang Ke, Xu Mingliang, Li Yafei, *et al.* A robust learning model for deck motion prediction of aircraft carrier[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2024, 50(9): 1785-1793(in Chinese)
(王可, 徐明亮, 李亚飞, 等. 一种面向航空母舰甲板运动状态预估的鲁棒学习模型[J]. *自动化学报*, 2024, 50(9): 1785-1793)
- [50] Xue Junxiao, Kong Xiangyan, Dong Bowei, *et al.* Obstacle avoidance and simulation of carrier-based aircraft on the deck of aircraft carrier[J]. *Journal of System Simulation*, 2023, 35(3): 592-603(in Chinese)
(薛均晓, 孔祥燕, 董博威, 等. 航母甲板上舰载机的混合避障和仿真[J]. *系统仿真学报*, 2023, 35(3): 592-603)
- [51] Xue Junxiao, Kong Xiangyan, Guo Yibo, *et al.* Dynamic obstacle avoidance method for carrier aircraft based on deep reinforcement learning[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2021, 33(7): 1102-1112(in Chinese)
(薛均晓, 孔祥燕, 郭毅博, 等. 基于深度强化学习的舰载机动态避障方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33(7): 1102-1112)
- [52] Luo Y F, Cai P P, Lee Y, *et al.* GAMMA: a general agent motion model for autonomous driving[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 3499-3506
- [53] van den Berg J, Guy S J, Lin M, *et al.* Reciprocal n -body collision avoidance[M] //Pradaliar C, Siegwart R, Hirzinger G. *Robotics Research*. Heidelberg: Springer, 2011: 3-19
- [54] Ren J P, Xiang W, Xiao Y X, *et al.* Heter-Sim: heterogeneous multi-agent systems simulation by interactive data-driven optimization[J]. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 2021, 27(3): 1953-1966