

煤矿机电与智能化

面向多人-多机复杂协作任务的煤矿 XR 智能运维系统

王学文^{1,2,3}, 刘曙光^{1,2}, 王雪松^{2,3}, 谢嘉成^{1,2,3}, 刘京铨^{1,2}, 王禧龙^{1,2}

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024; 2. 煤矿综采装备山西省重点实验室, 山西 太原 030024; 3. 智能采矿装备技术全国重点实验室, 山西 太原 030032)

摘要:随着煤矿智能化的发展与煤矿机器人的研发应用, 煤矿操作员与煤矿机器人之间的高效协作对于井下复杂任务起到至关重要的作用。为优化多工种煤矿操作员与多机器人协作的复杂运行关系, 基于数字孪生理念与在 XR 领域的长期实践, 开展面向多人-多机复杂协作任务的煤矿 XR 智能运维系统设计与关键技术研究。首先, 针对复杂任务中 2 类煤矿操作员 (包括集控操作员与就地操作员) 与 2 类煤矿机器人 (包括探测机器人与作业机器人) 协作的典型场景, 设计了系统总体架构, 将系统划分为物理子系统、VR 运维子系统与 AR 运维子系统 3 部分, 并对各部分的内容、功能以及 3 部分之间的协同运行关系进行介绍; 然后, 对系统涉及的 VR 运维子系统构建、AR 运维子系统构建以及通讯网络构建等关键技术进行剖析, 对各关键技术对应的解决方案进行了探讨, 并实现了 2 类煤矿操作员、2 类煤矿机器人与 VR/AR 运维子系统的集成运行; 最后, 在实验室环境下模拟井下复杂环境搭建了试验场地, 在试验场地中设定了任务点与具体任务, 对系统的可行性与有效性进行测试验证。试验结果表明, 煤矿 XR 智能运维系统能够在不同复杂任务对应的多人-多机协作情形中发挥作用。通过 VR 运维子系统与 AR 运维子系统的协同运行, 可实现虚拟空间和物理空间的协同感知、决策与控制, 能够在虚拟空间中对物理空间的复杂任务进行迭代、优化和验算, 形成了人-人、人-机、机-机交互协作的智能运行模式。

关键词:煤矿智能化; 煤矿机器人; 煤矿操作员; 人机协作; XR 智能运维; 数字孪生

中图分类号: TD67; TP242 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)04-2124-17

Research on coal mine XR intelligent operation and maintenance system for complex collaborative tasks involving multiple humans and multiple robots

WANG Xuwen^{1,2,3}, LIU Shuguang^{1,2}, WANG Xuesong^{2,3}, XIE Jiacheng^{1,2,3}, LIU Jingquan^{1,2}, WANG Xilong^{1,2}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Fully-Mechanized Coal Mining Equipment, Taiyuan 030024, China; 3. National Key Laboratory of Intelligent Mining Equipment Technology, Taiyuan 030032, China)

Abstract: With the development of coal mine intelligence and the application of coal mine robots, an efficient collaboration between coal mine operators and coal mine robots plays a crucial role in the execution of complex underground tasks. To optimize the complex operational relationship of multiple coal mine operators and multiple robots, based on the

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2024-03-04 责任编辑: 王凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1548

基金项目: 中央引导地方科技发展资金资助项目 (YDZJSX2022A014); 山西省留学人员科技活动择优重点资助项目 (20230008); 山西省回国留学人员科研资助项目 (2023-71)

作者简介: 王学文 (1979—), 男, 山西长治人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: wxuew@163.com

通讯作者: 谢嘉成 (1989—), 男, 山西晋城人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: xiejiacheng@tyut.edu.cn

引用格式: 王学文, 刘曙光, 王雪松, 等. 面向多人-多机复杂协作任务的煤矿 XR 智能运维系统[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 2124-2140.

WANG Xuwen, LIU Shuguang, WANG Xuesong, et al. Research on coal mine XR intelligent operation and maintenance system for complex collaborative tasks involving multiple humans and multiple robots[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 2124-2140.



移动阅读

concept of digital twin and extensive experience in the XR field, the research is conducted on the design and key technologies of XR intelligent operation and maintenance system for complex collaborative tasks involving multiple humans and multiple robots in coal mines. Firstly, for a typical scenario of collaboration between two types of coal mine operators (i.e. central control operators and field control operators) and two types of coal mine robots (i.e. detection robots and operating robots) in complex tasks, the overall system architecture is designed. The system is divided into three parts: the physical subsystem, VR operation and maintenance subsystem, and AR operation and maintenance subsystem. The content, functions, and collaborative operation relationships among these three parts are introduced. Then, an analysis of key technologies related to the VR operation and maintenance subsystem, AR operation and maintenance subsystem, and communication networking is carried out. The solutions corresponding to each key technology are discussed, and the integration and operation of the two types of coal mine operators, two types of coal mine robots, and VR/AR operation and maintenance subsystem are implemented. Finally, a laboratory environment simulating complex underground conditions is set up to create a test site, where the task points and specific tasks are defined. The feasibility and effectiveness of the system are tested and verified. The experimental results show that the coal mine XR intelligent operation and maintenance system is able to function in collaborative situations between multiple humans and multiple robots corresponding to different complex tasks. Through the collaborative operation of the VR operation and maintenance subsystem and the AR operation and maintenance subsystem, the collaborative perception, decision-making, and control between virtual space and physical space can be achieved. This allows for the iterative optimization and verification of complex tasks in a physical space from a virtual space, forming an intelligent operational mode of human-human, human-robot, and robot-robot interactive collaboration.

Key words: coal mine intelligence; coal mine robots; coal mine operators; human-robot collaboration; XR intelligent operation and maintenance; digital twin

煤炭是我国能源体系的基石^[1],而煤矿智能化是煤炭工业高质量发展的核心技术支撑^[2]。煤矿机器人作为煤炭开采技术革命的重要标志,在煤矿智能化建设中发挥着重要作用。2019年,国家煤矿安监局发布《煤矿机器人重点研发目录》^[3]。2021年,中国煤炭学会将“煤矿智能化机器人”列为“十四五”期间煤炭十大重点领域之一^[4]。2023年,工信部等十七部门联合印发《“机器人+”应用行动实施方案》^[5],指出应深化煤炭领域“机器人+”应用。随着需求迁移与政策推动,煤矿机器人已成为实现煤矿智能化愿景的重要基础,正推动煤矿智能化建设迈向高水平^[6]。

随着研发与应用的深入,煤矿机器人已能够提供精准服务,代替煤矿操作员完成部分工作^[7],这使煤矿操作员的劳动强度得到了有效降低。但由于煤矿井下设备众多且关联性强、作业任务复杂,因此即使在煤矿井下减人增效的大背景下,人仍然在煤矿生产系统中扮演重要角色^[8-9]。在面对设备安装、拆除、维护、现场清理、钻孔、封孔等程序冗杂、随机性强的辅助作业任务时,需要人机协作乃至多人-多机协作完成。煤矿机器人可执行一些重复性、危险性或高强度的任务,而煤矿操作员则可专注于更复杂、需要人类智慧和判断的工作。2者协同作业,通过可靠及时的信息共享与意图捕捉,能够将人的智能判断能力与机器人的高效执行能力相结合,实现互补,在提高生产效率

的同时降低工作风险。

当前,人机协作主要集中在物理空间,即人与机器人直接协作。然而,人类和机器人在工作方式、沟通方式、感知水平等方面均存在差异。机器人对人的理解能力尚处在较低水平,而人仅凭借自身的经验与主观判断也很难实现对机器人状态的精确感知。因此,人类和机器人之间直接进行全面的通讯、决策和控制等工作具有相当大的挑战性。而通过数字孪生、虚拟现实(VR)、增强现实(AR)等新一代信息技术,将人机协作扩展到虚拟空间,是1种可行的优化方案。虚拟空间能够提供更直观的全局信息呈现,借助其强大的计算能力为协作过程提供更为精确的规划决策,且虚拟空间提供了更灵活的人机协同和沟通机制,能够有效提升协作效率。

当前,在煤矿领域,虚实融合的运行模式已成为生产过程提质增效的重要手段。在综采环节,葛世荣院士团队^[10-11]建立了数字孪生智采工作面技术架构,并给出了矿山数字孪生构建方法与演化机理;笔者团队^[12-14]提出了基于数字孪生的综采工作面生产系统设计及运行模式,给出了智能化综采工作面实时虚拟监测方法与关键技术,进行了AR/VR融合驱动的综采工作面智能监控关键技术研究及试验。在掘进环节,吴森等^[15]构建了数字孪生理论指导下的综掘巷道并行施工技术流程与工艺体系,建立了远程可视化智

能调控系统;张旭辉等^[16-17]提出了数字孪生驱动的悬臂式掘进机智能操控系统,对掘进工作面平行智能控制、虚拟示教记忆截割方法等进行了研究。除此之外,虚拟化技术在地质保障^[18]、辅助运输^[19]、通风^[20]、安全管控^[21]等环节也均取得了应用。但总体而言,将虚实融合模式应用于煤矿领域人机协作的研究还鲜有涉足。

而在智能制造领域,虚拟空间的人机协作取得了初步进展。杨赓等^[22]提出了数字孪生驱动的智能人机协作的基本概念,建立了数字孪生驱动的智能人机协作框架体系。鲍劲松等^[23]提出面向人-机-环境共融的数字孪生协同技术,以装配任务为案例证明了所提方法的可行性。刘鑫等^[24]建立了基于公理化设计理论的人机协作模型构建框架,提出了人机协作数字孪生模型的建模步骤。MALIK等^[25]建立了人-机器人协作装配过程的数字孪生系统,以满足人-机器人协作系统中的适应性和动态性需求。MA等^[26]提出了包括机器人模型、人类模型、协作环境模型和协作关系模型在内的四元数字孪生模型。KHATIB等^[27]提出了1种基于多个传感器的控制系统,在AR界面中集成了人与机器人的直接通信。上述工作可为煤矿领域的人机协作提供一定的借鉴,但其研究背景均为单人与单机器人的协作。煤矿生产井下、井上协同的形式与特征决定了多工种煤矿操作员与多煤矿机器人彼此之间均存在复杂协作关系,这带来了额外的个性化挑战。

智能运维系统是实现煤矿生产系统常态化运行的基础保障和重要支撑^[28-29],是智慧矿山综合管控中的重要功能^[30-31],但当前面向煤矿多人-多机复杂协作任务的运维系统尚处空缺。而与智能制造领域相比,煤矿井下的环境与任务具有随机性,多人-多机的协作具有复杂性,部分技术具有不适用性,这使得智能制造领域中现有的协作运维系统无法直接应用与煤矿井下。笔者基于数字孪生理念^[32]与在XR领域的长期实践,针对煤矿生产中的人机协作需求与特点,以Unity3d为核心引擎,设计了面向多人-多机复杂协作任务的煤矿XR智能运维系统,介绍了系统的组成成分与协同运行关系。对系统涉及的VR运维子系统构建、AR运维子系统构建以及通讯网络构建等关键技术及解决方案进行了剖析,并实现了物理子系统、VR运维子系统和AR运维子系统的集成运行与测试。所提出的煤矿XR运维系统能够实现虚拟空间和物理空间的协同感知、决策与控制,优化多工种煤矿操作员人与多煤矿机器人之间的人-人、人-机、机-机协作关系,提供更高效、灵活和安全的协作环境。

1 系统总体架构

面向多人-多机复杂协作任务的煤矿XR智能运维系统由物理空间和虚拟空间组成。更具体地可分为3部分:物理子系统、VR运维子系统以及AR运维子系统(图1)。

1.1 物理子系统

物理子系统是参与煤矿复杂协作任务的人、机器人、真实物理环境等实体元素的集合。根据煤矿复杂协作任务的典型特征,将物理子系统抽象为4部分:①2类煤矿操作员,分别为就地操作员与集控操作员。就地操作员指在煤矿井下现场直接参与煤矿生产的操作员,集控操作员指在集控中心远程参与煤矿生产调度的操作员。②2类煤矿机器人。为降低机器人运算压力、提升作业效率、降低单点故障的风险,将煤矿机器人分为2类,分别为探测机器人与作业机器人。2类机器人通常具备履带式/轮式/足式等机身主体结构,能够在井下灵活移动,同时搭载用于实时数据处理与机器人控制的上位机。探测机器人搭载感知元件,主要承担环境探测与运输任务,作业机器人搭载机械臂,可通过更换不同的末端执行器实现具体作业任务。③煤矿井下环境。煤矿井下环境涵盖矿井巷道、采掘工作面、水泵房、变电所等多元化空间,包含复杂的地质构造与多样的机械设备。对于煤矿复杂协作任务而言,煤矿井下环境包含了潜在任务点,是协作任务的第一现场。④感知元件与网络设施。感知元件包含用于煤矿操作员生理状态感知、煤矿机器人状态感知与环境感知的原件以及用于气体、温湿度等井下客观环境监测的元件;网络设施包含用于煤矿井下基础通信的有线网络与无线网络。

总之,物理子系统是一个人-机-环境-任务耦合的复杂系统,2类煤矿操作员与2种井下机器人相互协作,共同在井下环境中完成多种任务。

1.2 VR运维子系统

VR运维子系统集成于集控中心调度平台中,供集控操作员使用,可被视为集控操作员与煤矿机器人远程协作的媒介。VR运维子系统依照功能可分为人机状态监测、场景虚拟重构、任务规划决策与远程交互控制4个模块:①人机状态监测模块通过感知元件采集就地操作员的生理信息与煤矿机器人的运行参数,实时监测和分析煤矿操作员以及煤矿机器人的状态,以便于集控操作员及时干预,确保物理系统的安全高效运行。②场景虚拟重构模块通过机器人SLAM点云实时重构任务环境,通过传感器数据驱动重构煤矿机器人位姿,最终生成三维可视化实时虚拟

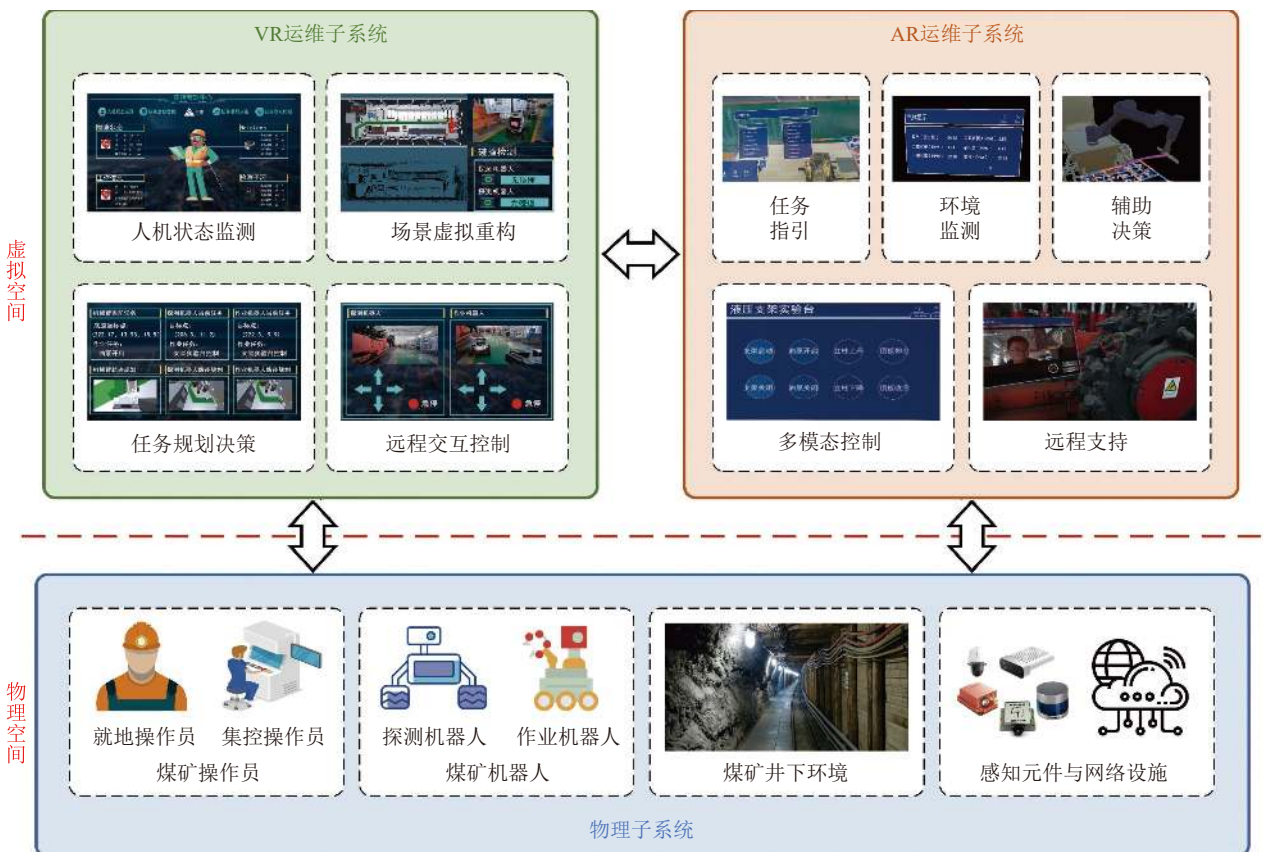


图 1 系统构成

Fig.1 System components

镜像,为集控操作员提供整体任务场景态势的全面感知。③ 任务规划决策模块能够根据任务目标进行人机任务分配,也可通过时空推演算法对煤矿机器人与机械臂路径进行规划,获取最优运行策略,反向指导物理过程,使煤矿操作员体验煤矿机器人以合理的方式完成协作任务。④ 远程交互控制模块提供了多种在虚拟环境中实现机器人交互控制的方式。集控操作员可以通过虚拟控制面板对煤矿机器人进行实时控制,也可佩戴 VR 头盔,获得煤矿机器人的第一视角,通过手柄等设备进行沉浸式交互。

4 个模块在 VR 运维子系统中耦合运行,其关系如图 2 所示。煤矿机器人可以在任务规划决策模块的支撑下自主进行探测与作业任务,集控操作员在通过人机状态监测模块与场景虚拟重构模块进行监测的同时也可通过远程交互控制模块人为干预物理系统的运行。

1.3 AR 运维子系统

AR 运维子系统集成于 HoloLens2 AR 头显,供就地操作员使用,可被视为就地操作员与煤矿机器人同地协作的媒介。AR 运维子系统依照功能可分为任务指引、环境监测、辅助决策、多模态控制与远程支持 5 个模块:① 任务指引模块可接收 VR 运维子系统中任务规划决策模块的任务分配结果,在就地操作员的

视野中呈现任务点位置、任务执行路径、操作指引等相关信息,辅助就地操作员直观、高效地完成特定操作。② 环境监测模块用于实时监测任务现场的设备运行状态、物理环境等数据,并对数据进行分析,在就地操作员视野中的适当位置显示关键信息,为就地操作员的辅助决策提供信息支撑。③ 辅助决策模块可以接收 VR 运维子系统的任务规划决策信息,并以可视化的形式呈现给就地操作员。就地操作员可根据现场情况结合自身经验对规划结果进行调整干预。④ 多模态控制模块提供了手势、语音和凝视等多种输入模态,就地操作员可以根据实际需要,灵活使用不同的输入模态,实现对机器人的精准控制和协同操作。⑤ 远程支持模块可以通过 AR 运维子系统与 VR 运维子系统的远程音视频通讯建立 2 类煤矿操作员的连接,以便于集控操作员以第一视角观察任务现场情景并为就地操作员提供指导。

AR 运维子系统能够利用解放双手的信息呈现形式扩展就地操作员的感知能力,为其提供人眼无法看到与人脑无法处理的复杂信息,大幅提升信息获取与转化率,进而提高任务效率。

1.4 系统协同运行关系

系统 3 个组成部分之间的协同运行关系如图 3 所示。

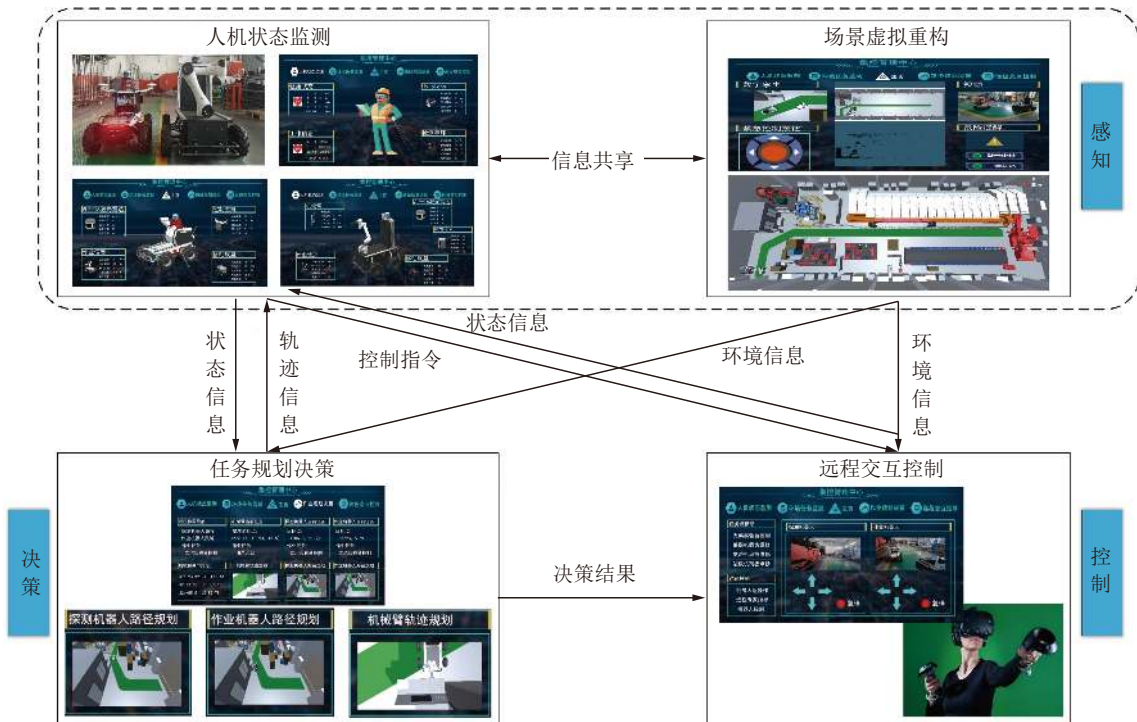


图 2 VR 运维子系统各模块耦合运行关系

Fig.2 Coupled operational relationships of VR O&M subsystem modules

物理子系统与 VR 运维子系统的协同运行关系主要包括正向感知与反向决策控制。物理子系统将实时数据传输至 VR 运维子系统, 建立全局感知; VR 运维子系统的任务规划决策模块为物理子系统提供全局性的预规划, 具有更高的优先级。物理系统中的集控操作员可在预规划基础上通过远程交互控制模

块对物理系统进行远程干预。

物理子系统与 AR 运维子系统的协同运行关系同样包括正向感知与反向决策控制。物理系统中的就地操作员可在预规划基础上通过 AR 运维子系统的辅助决策模块与多模态控制模块对物理系统进行现场干预。

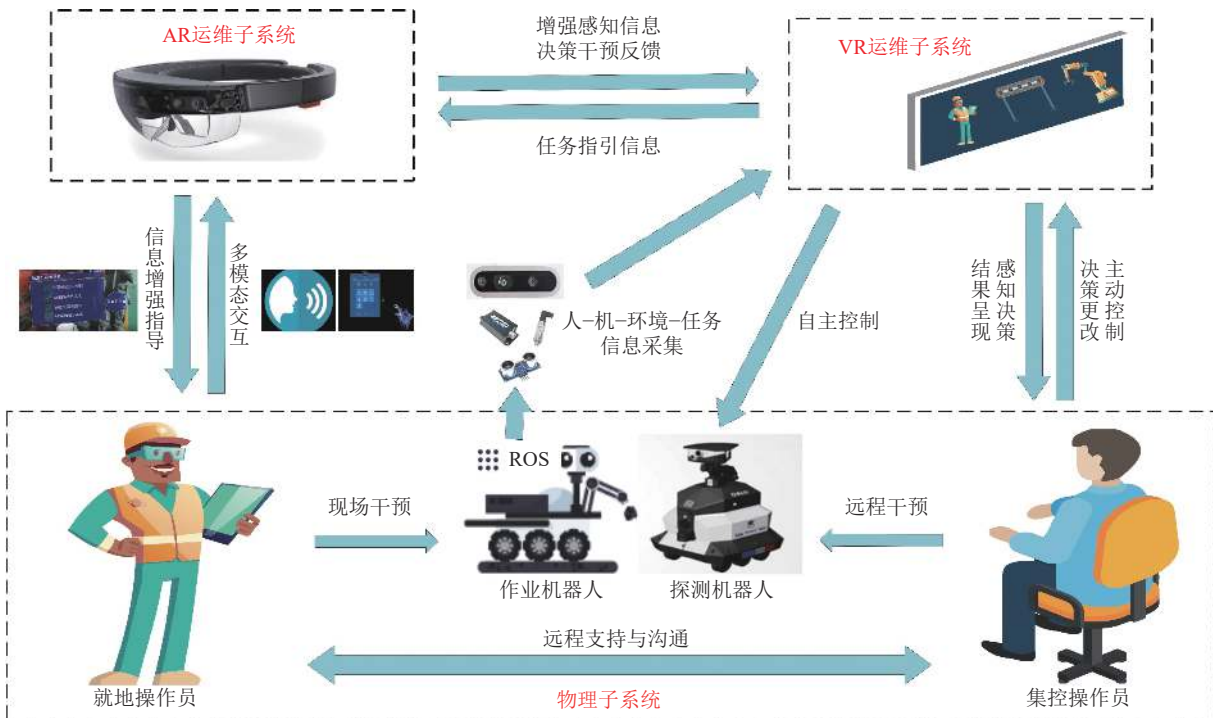


图 3 系统协同运行关系

Fig.3 System synergistic operational relationship

VR 运维子系统与 AR 运维子系统的协同运行关系主要包括任务信息流的连接和远程支持的实现。VR 运维子系统通过任务规划决策模块生成的任务信息能够传递给 AR 运维子系统的任务指引模块,AR 运维子系统能够向 VR 运维子系统同步增强感知信息与决策干预反馈;两子系统还可通过远程支持模块相连接,实现集控操作员与就地操作员之间的远程支持与沟通。

综合而言,3 个子系统之间形成了紧密的协同运行网络,实现了全局与局部、远程与现场之间的高效互动。

2 系统关键技术

在系统开发过程中,涉及 VR 运维子系统构建、AR 运维子系统构建以及通讯网络构建等环节,对这些环节中的关键技术进行了研究,并给出了相应的解决方案。

2.1 VR 运维子系统构建关键技术

VR 运维子系统各模块的构建需要多种关键技术的支撑。其中,人机状态监测模块的构建依赖于关键信息的监测,场景虚拟重构模块的构建依赖于 SLAM 点云的逆向重建,任务规划决策模块则依赖人机任务分配、机器人移动路径规划与机械臂运动轨迹规划。

2.1.1 关键信息监测

(1) 就地操作员生理状态监测。就地操作员生理状态监测主要通过其佩戴的可实时提取心率、血压、体温等数据的监测手环实现。在 C#脚本中调用监测手环的二次开发 API,通过 WiFi 通讯将数据包传输至 Unity3d 中,对数据进行提取与解析,并实时更新到人机状态监测模块的 UI 界面中,显示结果如图 4(a) 所示。

(2) 煤矿机器人运行状态监测。可通过煤矿机器人搭载的轴编码器及 IMU 等传感设备获取机器人姿态信息;通过机器人上位机获取各部件电量、温度、电压电流等数据。通过机器人操作系统 (ROS) 与 Unity3d 的通讯将机器人运行状态数据传输到人机状态监测模块的 UI 界面中,显示结果如图 4(b) 所示。

2.1.2 SLAM 点云逆向重建

首先,完成 SLAM 点云地图的构建。在任务执行过程中通过 SLAM 算法与点云融合算法对各机器人通过三维激光雷达、深度相机等感知元件采集的点云进行点云融合,并将任务环境的实时点云映射在虚拟场景中。

然后,进行基于点云特征的场景逆向重建。在 C#脚本中调用 PCL(Point Cloud Library) 的函数进行点云滤波与特征提取。场景虚拟重构模块后台构建了参数化模型库,当在特征提取过程中获取到井下设备的特征信息时,根据点云位置信息在虚拟场景中生成



(a) 就地操作员状态监测



(b) 煤矿机器人状态监测

图 4 人机状态监测界面

Fig.4 Status monitoring interface for humans and robots
与之相匹配的设备模型,并结合井下施工信息以及地质信息等先验信息实时对虚拟场景进行修正。整体任务场景的构建过程如图 5 所示。

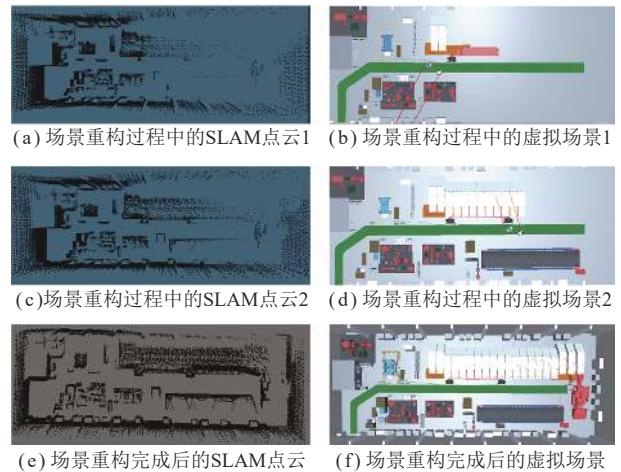


图 5 整体任务场景的构建过程

Fig.5 Process of building the overall mission scenario

2.1.3 基于 5W2H 模型的人机任务分配

任务规划决策模块包含对人机任务、机器人移动路径以及机械臂运动轨迹的规划。

其中,人机任务分配通过 5W2H 模型^[33]实现,其运行框架如图 6 所示。5W2H 模型通过问题的是什么 (What)、为什么 (Why)、在哪里 (Where)、何时 (When)、谁 (Who)、如何 (How)、多少 (How much) 等核心要素全面理解问题。人机任务分配包含理论规

划与仿真评估 2 个阶段。理论规划方案中包含任务定义、任务位置、任务路径、任务分配和任务时序。

仿真评估即在虚拟环境中参考作业效率和质量等评价指标进行迭代优化,最终得到最优方案。

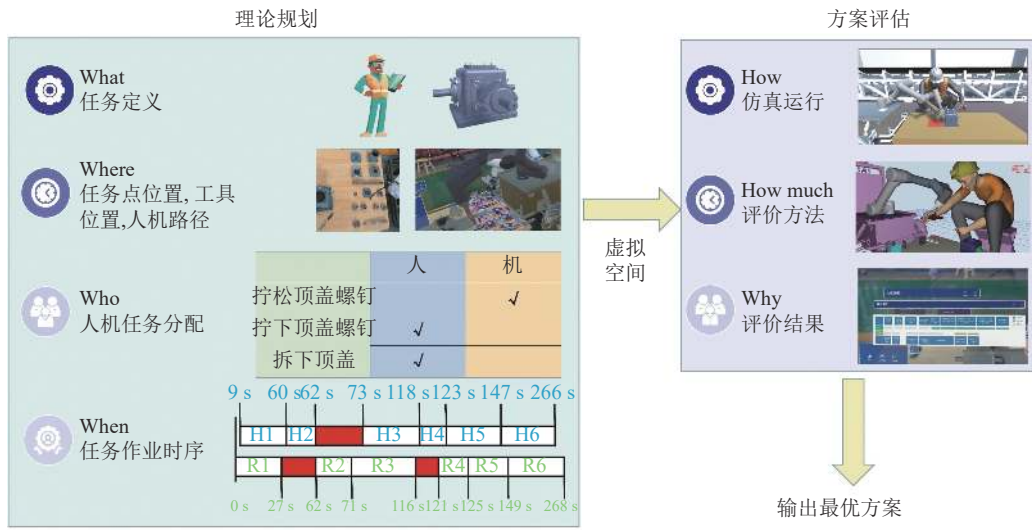


图 6 基于 5W2H 的人机任务分配

Fig.6 Human-robot task allocation based on 5W2H

2.1.4 机器人移动路径规划

Unity3d 提供了 Navigation 系统,可以为基于 SLAM 点云构建的任务场景生成导航网格 (NavMesh), 并使用 NavMeshAgent 组件实现路径规划, 具体步骤为: ① 创建导航网格。将任务场景光栅化为体素, 提取可行走表面并为可行走表面生成导航网格。② 添加导航代理。为每个机器人对象添加 NavMeshAgent 组件, 并将其设定为运动状态。③ 障碍物创建。为每个障碍物对象添加 NavMeshObstacle 组件, 并使障碍物的大小、形状和高度适应场景中的实际障碍物。④ 路径规划脚本优化。Navigation 系统中预设了基于传统 A*算法的路径规划脚本, 对其进行启发函数加权优化^[34], 以提高对复杂场景的处理效率。见表 1, 在同

表 1 优化前后 A*算法规划时间对比

Table 1 Comparison of A* algorithm planning time before and after optimization

组别	优化前规划时间/ms	优化后规划时间/ms	时间缩短/%
1	25.73	5.12	80.10
2	21.18	4.28	79.79
3	27.34	5.50	79.88
4	25.42	5.11	79.90
5	19.11	3.98	79.17
6	23.87	4.83	79.77
7	21.46	4.39	79.54
8	25.38	5.09	79.94
平均			79.76

一场景中选取 8 组不同的起点与终点进行, 对比发现, 经优化后, 单次路径规划的时间平均缩短了 79.76%。
⑤ 机器人互让脚本编写。使用 Raycast 射线检测机器人之间的碰撞或接近, 以触发对其他机器人的避障行为。

由此建立了全局导航与局部导航结合的导航模式, 如图 7 所示。全局导航用于规划总体路径, 局部导航用于导航过程中的局部调整。

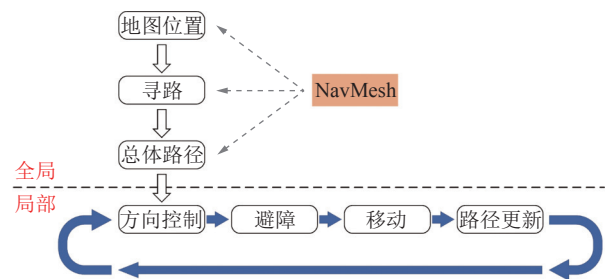


图 7 全局与局部导航

Fig.7 Global and local navigation

2.1.5 机械臂运动轨迹规划

(1) 逆运动学求解。末端执行器的位姿由位置 (x, y, z) 和姿态 (roll, pitch, yaw) 表示, 则机械臂的逆运动学求解框架如下:

① 用 4 × 4 变换矩阵 T 表示机械臂末端执行器位姿为

$$T = \begin{bmatrix} R & P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, R 为 3 × 3 姿态矩阵; P 为 3 × 1 位置向量。

② 根据末端执行器的姿态计算姿态矩阵 R 为

$$R = R_{z,yaw} \cdot R_{y,pitch} \cdot R_{x,roll} \quad (2)$$

式中, $R_{z,yaw}$ 、 $R_{y,pitch}$ 、 $R_{x,roll}$ 分别为绕 z 、 y 、 x 轴的旋转矩阵。

③ 使用解析或迭代的方法, 将末端执行器的位置矢量和姿态矩阵映射到各关节角度。在应用中, 需要根据实际机械臂关节参数、D-H 参数和运动学模型进一步推导具体表达式。

(2) 基于 3 次样条插值的轨迹生成。

① 确定关键帧: 集控操作员在场景中选取机械臂轨迹上的关键帧, 作为样条曲线的基础。

② 构建 3 次样条曲线: 对于每个维度 (x, y, z), 使用 3 次样条插值构建曲线为

$$S_i^d(t) = a_i^d + b_i^d(t-t_i) + c_i^d(t-t_i)^2 + d_i^d(t-t_i)^3 \quad (3)$$

其中, $S_i^d(t)$ 为第 i 段样条曲线的第 d 维度; a_i^d 、 b_i^d 、 c_i^d 、 d_i^d 为与该段曲线第 d 维度相关的系数; t_i 为关键帧参数; t 为样条曲线的参数。三维样条插值在 3 个维度上同时进行, 形成三维曲线。

③ 为每个关键帧分配参数, 通常是时间或路径长度。

④ 将所有样条段写成全局方程的形式为

$$MX = B \quad (4)$$

式中, M 为整个曲线的矩阵; X 为包含所有样条段的系数; B 为包含所有关键帧的位置信息。

使用高斯消元法求解全局方程, 得到系数 X 。

⑤ 使用解得的系数, 代入 3 次样条插值公式, 生成机械臂末端执行器的轨迹。

2.2 AR 运维子系统构建关键技术

AR 运维子系统构建过程中同样涉及诸多关

键技术。其中, AR 对象在场景中的显示依赖于 AR 对象的虚实映射, 多模态控制模块依赖于多模态交互模型的建立, 远程支持模块依赖于远程音视频通话的搭建。

2.2.1 AR 对象虚实映射

在就地操作员使用 AR 运维子系统时涉及多种信息的显示, 包括任务指引、环境监测信息、虚拟模型、虚拟控制面板等。这些信息旨在提升就地操作员对任务态势的感知, 但就地操作员的注意力有限, 若无法适当地将 AR 对象映射在现实空间中, 可能会适得其反。因此, 针对不同 AR 对象的作用和特征, 采用不同的映射方案。

(1) 基于 RadialView 的任务面板映射。基于 MRTK 提供的 RadialView 解算器使任务面板始终保持在就地操作员身体周围 30~60 cm 的位置, 以便就地操随时关注所需完成的任务及其进展情况, 如图 8(a) 所示。

(2) 基于空间锚点的环境监测信息映射。空间锚点是 1 种基于自然特征检测跟踪原理的 AR 空间持久化存储技术。如图 8(b) 所示, HoloLens2 的摄像头可以采集周围环境的图像特征点信息, 并在适当地位置创建锚点, 将环境监测信息与锚点绑定, 为环境监测带来便利。

(3) 基于人工标识的虚拟模型映射。人工标识是 1 种通过可识别视觉标记实现配准的解决方案。如图 8(c) 所示, 使用 2 个人工标识可实现机器人虚拟模型与机器人实体的对齐, 以便可视化机器人运行轨迹。其中 1 个人工标识充当标定目标, 另 1 个用于监测和定位。

(4) 基于手部追踪的虚拟控制面板映射。通过 HoloLens2 内置的传感系统追踪就地操作员的手势,

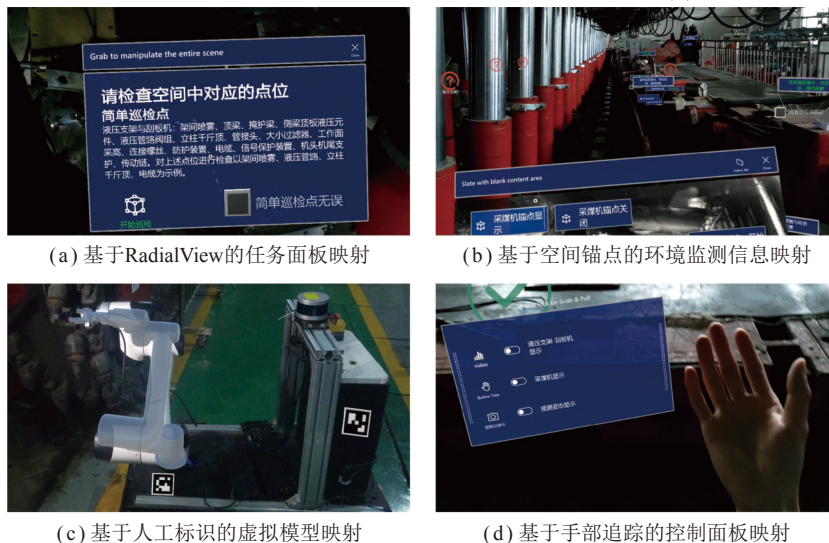


图 8 AR 对象虚实映射

Fig.8 AR object virtual-reality mapping

当检测到手部张开时,触发虚拟控制面板的显示,如图 8(d)所示。完成控制任务后,就地操作员可将虚拟控制面板关闭,避免其继续占据视野。

2.2.2 多模态交互模型

HoloLens2 提供了多种交互方式,其中手势交互最为常用^[35]。然而,单一的输入模式难以满足复杂多变的任务需求。

多模态交互能够将各种交互模态有机融合,相较于单一模态,其准确性更高^[36]。构建了如图 9 所示的多模态交互模型。

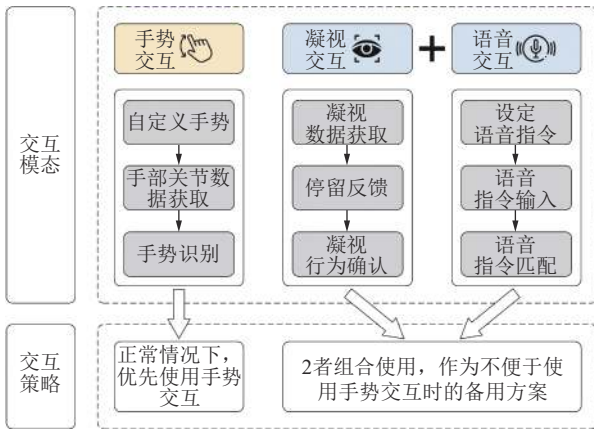


图 9 多模态交互模型

Fig.9 Multimodal interaction model

手势控制能够实现较高容错率和更为自然的交互状态,因此在通常情况下,首选手势交互。而虽然凝视和语音都适用于环境和行动受限的情形,但由于语音表达的无限性和凝视视线的不规则性,单独采用

语音或凝视的可控性均较差。因此,在不便使用手势交互的情况下,采用凝视和语音相结合的方式作为备用方案。通过凝视射线选择操作对象,然后使用语音指令确认操作,有效地减少误操作的概率。

2.2.3 基于 WebRTC 的远程音视频通话

通过远程支持模块,集控操作员能够以第一视角掌握现场情况,并给予就地操作员及时的业务指导,同时还可以发送空间标注,提高沟通效率。而远程音视频通话正是这一过程的基础。

WebRTC(Web Real-Time Communication),是 1 项支持实时语音或视频对话的技术。如图 10 所示,WebRTC 由应用层、WebAPI 层和 WebRTC 核心库层 3 个层级构成,提供了视频的采集、编解码、网络传输、渲染等多种功能^[37],可作为远程音视频通话的解决方案。

在 VR/AR 运维子系统之间建立音视频通话的过程如图 11 所示。首先,使用 Node.js 和 socket.io 搭建信令服务器;然后,通讯双方通过 WebSocket 与信令服务器建立连接;接下来,通信双方通过 RTCPeerConnection API 向信令服务器发送信号,以 Offer/Answer 的方式交换 SDP (Session Description Protocol) 信息;VR 运维子系统与 AR 运维子系统分别创建用于 Offer 和 Answer 的 SDP 对象,通过信令服务器将 SDP 信息发送给对方,从而建立对等连接。最后,通信双方通过 MediaStream API 采集音视频流媒体或其他数据,使用 RTP/SRTP 协议进行传输。

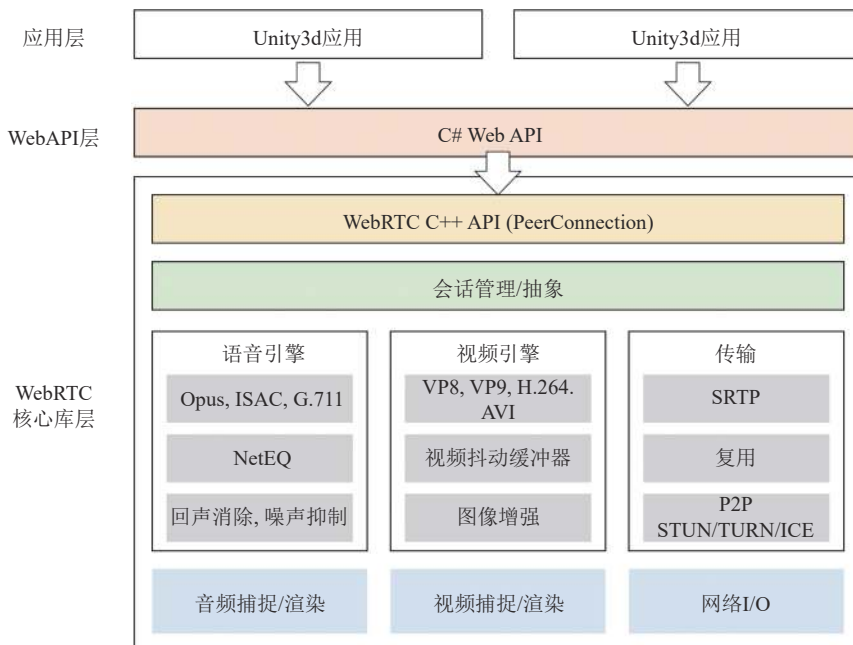


图 10 WebRTC 架构

Fig.10 Architecture of WebRTC

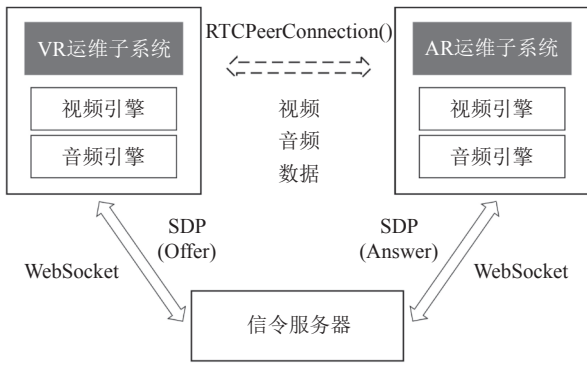


图 11 WebRTC 连接建立过程

Fig.11 WebRTC connection establishment process

2.3 通讯网络构建

通讯网络是支撑系统各部分之间信息交互的桥梁, 主要包括煤矿机器人与 VR 运维子系统的通讯、煤矿机器人与 AR 运维子系统的通讯、VR 运维子系统与 AR 运维子系统的通讯以及 2 类煤矿机器人之间的通讯。其中, 煤矿机器人与 VR/AR 运维子系统的通讯实质为 ROS 与 Unity3d 之间的通讯; VR 运维子系统与 AR 运维子系统的通讯实质为 Unity3d 跨平台通讯; 而 2 类机器人之间的通讯则可通过 ROS 所提供的通信机制实现。

2.3.1 基于 ROS#的 ROS 与 Unity3d 双向通讯

ROS 与 Unity3d 的双向通讯基于 ROS#建立。ROS#是 1 个开源的 C#库, 用于 .NET 应用程序与 ROS 进行通信。在 ROS#中, RosBridgeClient 是实现双向通讯的核心 API, 它允许在 C#中创建 ROS 节点, 并通过 rosbridge 与 ROS 进行通信。

Unity3d 提供了 ROS-TCP-Connector 与 ROS-TCP-Endpoint 2 个基于 ROS#的接口。其中, ROS-TCP-Connector 用于 Unity3d, 以在 C#脚本中订阅来自 ROS 节点的机器人实时数据; ROS-TCP-Endpoint 用于在 ROS 中创建节点, 以接受来自 Unity3d 的控制指令。通过 ROS-TCP-Connector 与 ROS-TCP-Endpoint 接口、ROS 节点、C#脚本的连接, 实现 ROS 与 Unity3d 的双向通讯, 如图 12 所示。

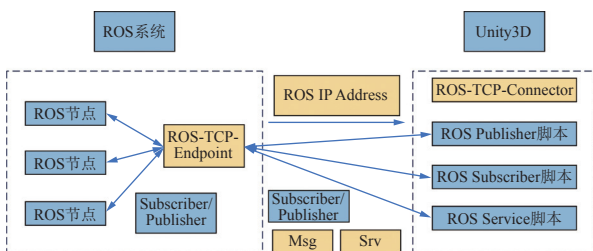


图 12 ROS 与 Unity3d 双向通讯

Fig.12 ROS and Unity3d bi-directional communication

2.3.2 基于 PUN 的 Unity3d 跨平台通讯

VR 运维子系统与 AR 运维子系统的通讯牵涉到 PC 与 UWP 平台 Unity3d 间的通讯。一些传统的网络通信模型不兼容 UWP 平台开发, 因此需要搭建通用高效易扩展的 Unity3d 跨平台通讯框架。

PUN(Photon Unity Networking) 是 1 个状态同步网络库, 支持多种网络架构与传输层协议, 与大多数平台兼容, 为 Unity3d 跨平台提供了可能。PUN 是以房间的形式建立网络连接的, 当多个客户端处在同一个房间时, 即建立了网络连接。具体过程如下 (图 13): ① 将 VR 运维子系统与 AR 运维子系统连接到主服务器, 主服务器将负责 VR 运维子系统与 AR 运维子系统到服务器的传输; ② VR 运维子系统作为主客户端, 在主服务器中创建房间, 设置房间名称, 并等待 AR 运维子系统的连接; ③ AR 运维子系统通过索引房间名称访问并加入与 VR 运维子系统相同的房间; ④ 当 VR 运维子系统与 AR 运维子系统位于同一房间时, 便建立了直接连接。可使用事件系统在 2 个子系统之间分发数据, 同步内容。

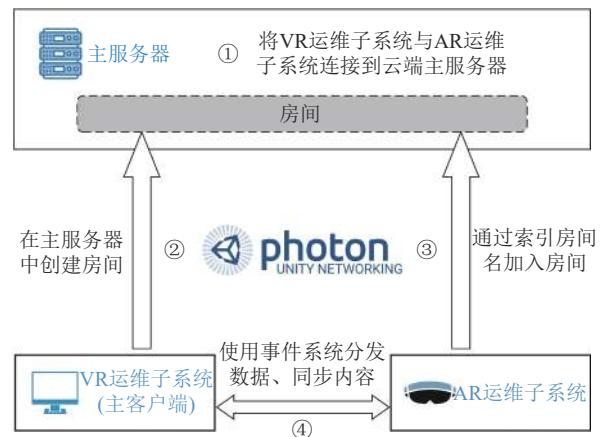


图 13 基于 PUN 的 Unity3d 跨平台通讯过程

Fig.13 PUN-based Unity3d cross-platform communication process

2.3.3 多机器人之间的通讯

ROS 提供了多种通信机制, 主要包括主题、服务、动作、参数服务器等, 各通信机制的优缺点见表 2。

多机器人之间的通讯涉及位姿信息、传感器数据、地图信息、任务状态、目标与轨迹规划信息、协同控制指令等不同类型的信息, 通过单一的通信机制难以实现多种内容的高效稳定传递。因此, 使用多种通信机制组合的方式实现不同内容的传递。

其中, 主题适用于实时数据流的传递, 将其作为位姿信息、传感器数据的通信机制; 服务适用于 1 次性请求和响应的通信, 将其作为协同控制指令的通信机制; 动作适用于需要长时间运行并提供反馈的任务,

表2 ROS各通信机制的优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of each ROS communication mechanism

通信机制	优点	缺点
主题	广播/订阅机制, 异步传输, 延迟低	如果主题发布频率高, 可能会导致消息堆积, 从而影响稳定性
服务	请求/响应模式, 同步传输, 稳定性高	等待响应可能会引入一些延迟
动作	提供长时间任务支撑, 允许节点发送目标并接收状态反馈	不适用于对实时性要求较高的任务
参数服务器	分布式参数存储系统, 通信延迟较低, 稳定性也很高	参数通常为静态, 不适合频繁变化的实时数据

将其作为任务状态以及目标与轨迹规划信息的通信机制; 参数服务器适用于在运行时不经常变化的参数, 将其作为地图信息的通信机制。

3 系统集成

依据系统架构, 结合笔者提出的关键技术, 使用 Unity3d 引擎开发了 VR 运维子系统与 AR 运维子系统, 通过通讯网络实现了面向多人-多机复杂协作任务的煤矿 XR 智能运维系统集成。通过 3 个子系统的协同运行, 实现了 2 类煤矿操作员与 2 类煤矿机器人的人-人、人-机、机-机协作关系的优化, 形成了虚实融合的感知、决策、控制一体化架构。

3.1 多人-多机协作关系

在 VR 运维子系统与 AR 运维子系统的加持下, 将煤矿复杂协作任务扩展至虚拟空间, 从而突破了物理子系统中各要素只能在物理空间进行协作的局限, 形成了新的人-人、机-机、人-机协作关系。

(1) 人-人协作。在传统协作模式中, 2 类煤矿操作员采用井下用固话或无线对讲机等手段进行交流, 沟通效率存在不足。在 XR 智能运维系统中, 集控操作员可通过 VR 运维子系统人机状态监测模块监测就地操作员状态, 对就地操作员的异常状态进行提醒并采取相应措施; VR 运维子系统与 AR 运维子系统能够在 2 类煤矿操作员之间共享监测信息, 形成远程全局感知与局部细节把控相结合的监测模式; 2 类煤矿操作员也可通过 AR 运维子系统远程支持模块进行远程音视频通话, 进行实时的协调和沟通, 实现对机器人控制权限的合理让渡, 提高作业效率和准确性。

(2) 机-机协作。由于机器人仅具备局部的感知能力与受限的运算能力, 因此在传统协作模式中, 探测机器人与作业机器人仅能实现简单的信息共享, 难以自主进行进一步协作。在煤矿 XR 运维系统中, 机-

机协作是以 VR 运维子系统中规划决策模块为桥梁的间接的协作。探测机器人凭借其感知能力对任务场景进行探测, 而 VR 运维子系统中的规划决策模块会根据探测信息重构整体任务场景, 进而为作业机器人分配作业任务, 并对移动路径与机械臂运动轨迹进行规划决策。即使在就地操作员无法进入的井下空间中, 2 类煤矿机器人也能各司其职, 在缺少现场人为干预的情况下完成基础的协作任务。

(3) 人-机协作。人与机器人之间的相互感知是制约协作效率的重要瓶颈。机器人需要准确感知和理解人类的行为、意图和动作, 且人与机器人在共享的物理空间中需要相互协调和避免碰撞, 而这仅靠人的经验与机器人的感知能力难以实现。

而 XR 运维系统为多人-多机协作提供了全面的技术支持, 随着具体任务的不同, 多人-多机协作的参与方数量与协作形式也可能不同, 但均能够得到良好适配。VR 运维子系统任务规划决策模块能够将就地操作员与煤矿机器人之间的互感知、互操作问题简化为系统整体规划问题。协作任务经过虚拟空间中的仿真测试、训练优化后被合理分配。在 VR 运维子系统的宏观调控下, 人机之间充分信任, 自然交互, 协作共进。

3.2 虚实融合的“感-决-控”一体化架构

3 个子系统之间相互作用, 形成了虚实融合的感知-决策-控制一体化架构, 如图 14 所示。

感知层面, VR 运维子系统通过各类感知元件对全局场景监控以及场景重构, 为集控操作员呈现全局视角; AR 运维子系统为就地操作员呈现局部感知信息; VR/AR 运维子系统之间可进行信息共享, 实现全局细节兼可得协同感知。

决策层面, VR 运维子系统可基于任务规划决策模块解算人机任务、机器人移动路径与机械臂运动轨迹; AR 运维子系统可为就地操作员呈现 VR 运维子系统的预规划结果; 就地操作员可结合自身经验进行辅助决策, 对决策结果进行调整。

控制层面, 2 类煤矿操作员均具备对煤矿机器人行为进行干预的权限, 可分别通过远程交互控制模块与多模态控制模块在机器人自主控制的基础上进行辅助控制, 极大提升了控制的便捷性与灵活性。

4 系统测试验证

4.1 试验环境介绍与任务设定

在实验室试验大厅内对面向多人-多机复杂协作任务的煤矿 XR 智能运维系统进行测试验证。实验大厅中集成了综采成套试验系统、矿井提升机系统、液压支架试验台系统和其他环境, 如图 15(a)、(b) 所示。



图 14 感知-决策-控制一体化架构

Fig.14 Sense-decide-control integrated architecture

其中综采成套试验系统由 20 台 ZZ4000/18/38 液压支架、1 台 MG250/600-1.1D 型采煤机、1 台 30 mSGZ764/630 刮板输送机、1 台 SZZ764/164 转载机、1 台 PCM110 破碎机和 1 台 DSJ65/10/40 皮带机组成, 如图 15(c) 所示。试验大厅在有限的空间内集成了多种密集布局的设备, 为测试系统在处理多种不同的人机协作任务时的性能提供了绝佳的条件。

选取 2 名能够熟练使用 XR 智能运维系统的人员, 对 2 类煤矿操作员进行模拟。其中 1 人佩戴 HoloLens2 与监测手环, 在实验大厅中模拟就地操作员的角色,

如图 16(a)。另 1 人在会议室中运行 VR 运维子系统, 模拟集控操作员的角色, 如图 16(b) 所示。



图 16 2 类煤矿操作员与 2 类煤矿机器人

Fig.16 Two types of coal mine operators and two types of coal mine robots

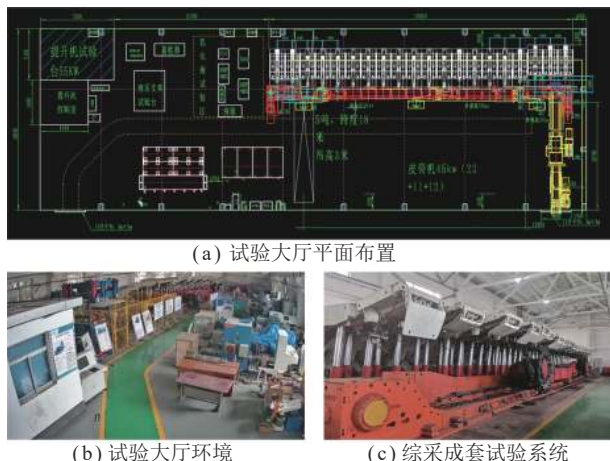


图 15 试验环境

Fig.15 Test environment

探测机器人与作业机器人如图 16(c)、(d) 所示。2 机器人均采用配置有 IMU 与轴编码器的 ARC-L04-1 型号麦克纳姆轮驱动机身, 并搭载了以 Ubuntu18.04 为操作系统的上位机。此外, 探测机器人搭载 Velodyne VLP-16 激光雷达与 Intel Realsense D435i 深度相机作为感知元件, 作业机器人搭载有集成视觉传感

器、力传感器的 DOBOT CR5 机械臂。

在试验大厅中设定了 4 个任务点, 如图 17 所示。就地操作员、探测机器人与作业机器人从起始位置出

发前往 4 个任务点, 分别完成液压支架试验台控制、采煤机截齿维修、皮带机滚筒更换和刮板输送机刮板更换 4 项任务。

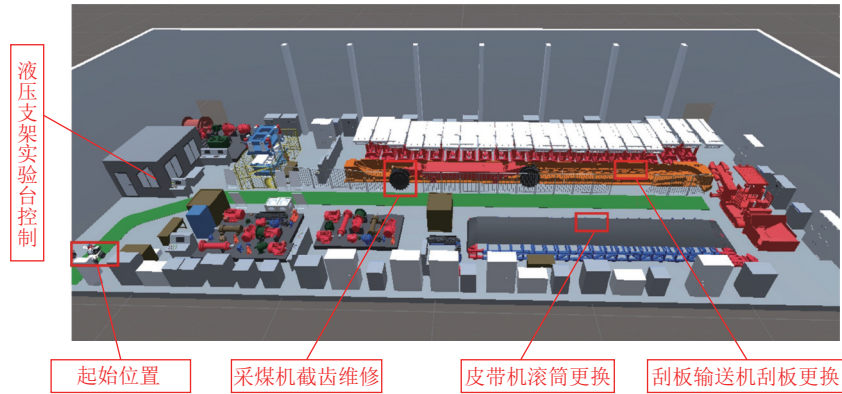


图 17 任务点布置

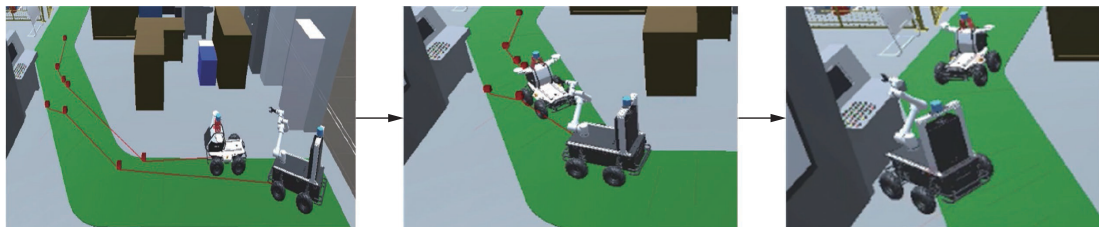
Fig.17 Task point layout

4.2 试验案例与分析

按照预先设定的任务对系统进行了测试, 并选取测试过程中的液压支架试验台控制、采煤机截齿维修以及随机路障清除为例, 展示系统的运行情况, 并对系统的可行性与有效性进行分析。

(1) 液压支架试验台控制任务。探测机器人与作业机器人先后从起点出发, VR 运维子系统基于探测

机器人的探测信息通过任务规划决策模块分别对探测机器人与作业机器人进行路径规划, 2 类煤矿机器人能够执行规划决策模块的决策结果, 前往液压支架试验台控制任务点, 如图 18 所示。集控操作员通过场景虚拟重构模块监视作业机器人与控制台位置, 通过远程交互控制模块向机械臂发送控制指令, 使其点按控制台按钮完成对液压支架试验台的控制。



(a) VR 运维子系统通过任务规划决策模块对两机器人进行路径规划



(b) 机器人执行规划决策模块的决策结果前往液压支架试验台



(c) 完成液压支架试验台控制

图 18 液压支架试验台控制任务

Fig.18 Control tasks for hydraulic support test rigs

液压支架试验台控制任务涉及两机器人的协作以及集控操作员与作业机器人的远程协作,证明了VR运维子系统能够有效地监测任务环境并对任务做出规划,同时允许集控操作员对任务过程进行人工控制。此外,所提出的VR运维子系统构建涉及的各项关键技术解决方案与基于ROS#的ROS与Unity3d双向通讯方案的可行性也得到了验证。

(2) 随机路障清除。在两机器人从液压支架试验台控制任务点前往下一任务点的过程中,前进路径上出现了可搬运的障碍物。探测机器人通过感知元件感知障碍物的位置与大小,将感知结果传递至VR运维

子系统。VR运维子系统通过任务规划决策模块进行作业机器人的移动路径与机械臂运动轨迹进行规划,如图19所示。作业机器人能够执行任务规划决策模块的规划结果,将障碍物移走。路障清除后,作业机器人接收探测机器人传来的位置信息并进行跟随,2者保持队列行进。任务整体规划与执行过程如图19所示。

路障清除任务主要体现了2类煤矿机器人之间的协作,证明了探测机器人与作业机器人能够在VR运维子系统的支撑下脱离煤矿操作员独立完成协作任务,同时验证了ROS与Unity3d的双向通讯以及多机器人之间通讯的可行性。

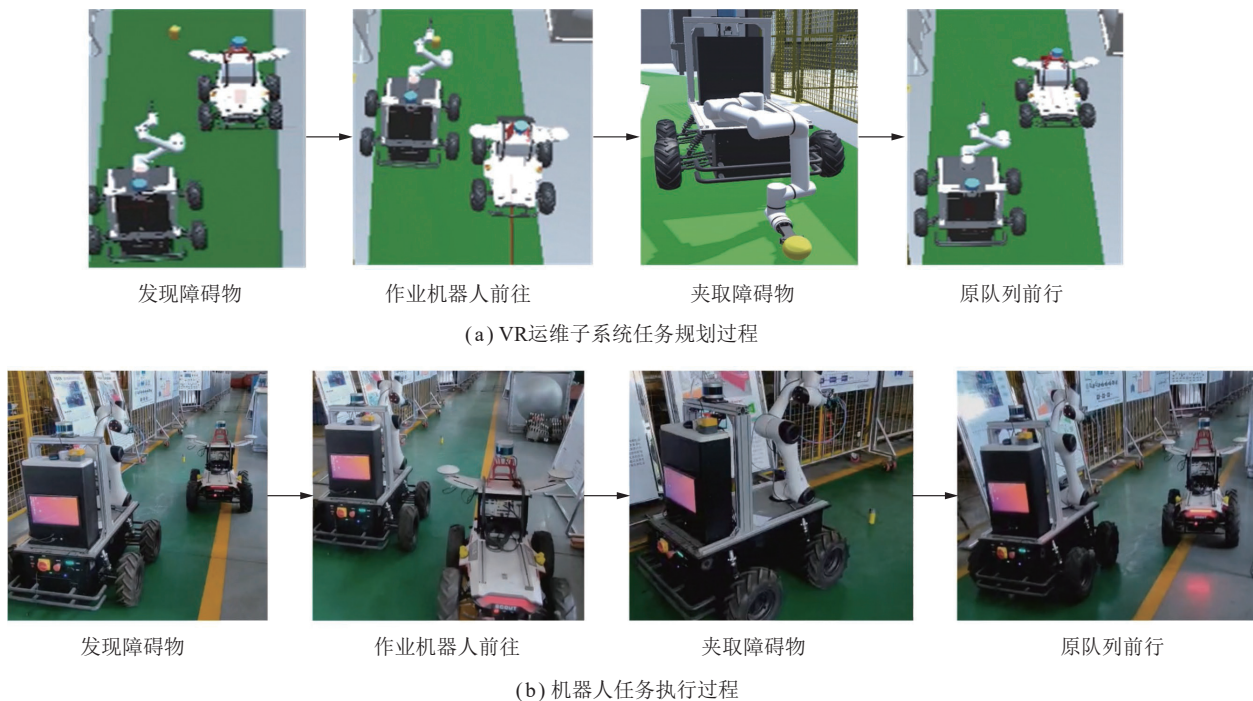


图19 路障清除任务规划与执行过程

Fig.19 Roadblock clearance mission planning and execution process

(3) 采煤机截齿维修任务。就地操作员到达采煤机截齿维修任务点后,检查截齿是否有损坏部位。当发现采煤机滚筒存在损坏截齿时,通过HoloLens2提取采煤机截齿的轮廓特征信息,并发送至VR运维子系统,如图20(a)所示。VR运维子系统根据轮廓特征信息对维修任务进行规划,如图20(b)所示。

探测机器人携带焊枪,并将其感知到的焊枪位置信息传递至VR运维子系统的任务规划决策模块,规划决策模块将夹取焊枪以及进行维修操作的一系列路径规划与机械臂轨迹规划结果下发至作业机器人,作业机器人可通过机械臂夹取焊枪进行维修操作,并在完成焊接后将焊枪放回探测机器人机身,如图20(c)所示。由于就地操作员对现场的感知更为精确,因此

在此过程中,就地操作员能够对维修过程进行干预。当就地操作员认为VR运维子系统任务规划决策模块所做出的规划不合理,或有更佳解决方案时,可以通过AR运维子系统的辅助决策模块与多模态控制模块对规划结果进行变更,并控制煤矿机器人完成执行。就地操作员还可通过远程支持模块向集控操作员分享任务现场实况,两人时刻保持沟通,对任务进行情况进行探讨,如图20(d)所示。

在采煤机截齿维修任务中,两类煤矿操作员之间的协作、2类煤矿机器人之间的协作以及就地操作员与煤矿机器人的协作均得到了体现。与前2个任务相比,该任务过程额外证明了所提出的AR运维子系统构建涉及的各项关键技术解决方案与基于PUN的

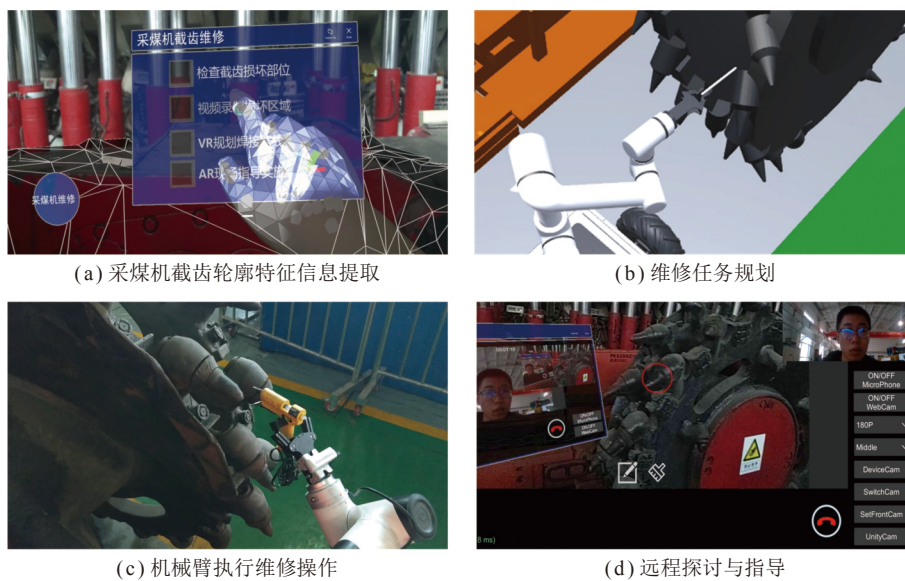


图 20 采煤机截齿维修任务

Fig.20 Maintenance tasks for shearer cut-off teeth

Unity3d 跨平台通讯方案的可行性。

5 结 论

(1) 面向多人-多机复杂协作任务的煤矿 XR 智能运维系统架构的提出摆脱了传统人机协作模式的时空限制,将人机协作扩展到虚拟空间,能够在强大计算能力的支撑下通过数据采集与信息分析提供更精准的任务规划和决策支持,同时为煤矿操作员与煤矿机器人的协作提供了更灵活多样的交互手段。

(2) 针对性地研究了 VR 运维子系统构建、AR 运维子系统构建以及通讯网络构建等环节中的关键技术,并对解决方案进行了探讨。在此基础上基于 Unity3d 引擎开发了 VR 运维子系统与 AR 运维子系统,通过通讯网络实现了系统集成,并进行了案例实践。系统能够良好地适配不同复杂任务对应的协作情形,其可行性得到了充分的验证。

(3) 煤矿 XR 智能运维系统为煤矿多人-多机复杂协作任务提供了通用性架构与运行模式。通过系统各部分的协同运行,可实现虚拟空间和物理空间的协同感知、决策与控制,能够在虚拟空间中对物理空间的复杂任务进行迭代、优化和验算,为人-人、人-机、机-机的交互协作提供全新的解决方案,为煤矿运维带来更灵活、高效、智能的工作模式。

在未来的工作中,拟融合云-边-端协同的网络架构,对现有的网络通讯结构进行完善,同时进一步优化规划决策算法,从而提升系统规划决策速度、降低通讯网络延迟。此外,针对煤矿 XR 智能运维系统在煤矿井下实际环境中测试验证的条件尚不成熟的现

状,拟在 AR 设备、煤矿机器人等相关设备的可靠性提升方面进一步深入研究;同时持续推进煤矿人机共融领域的研究,提升相关理论与技术在煤矿生产企业中的认可度与影响力,积极寻求合作,力求尽快完成煤矿井下测试验证,以推动 XR 智能运维系统在煤炭生产中的进一步发展与应用。

参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国煤炭主体能源安全高质量发展的理论技术思考[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 11-22.
YUAN Liang. Theory and technology considerations on high-quality development of coal main energy security in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 11-22.
- [2] 王国法, 刘峰, 庞义辉, 等. 煤矿智能化——煤炭工业高质量发展的核心技术支撑[J]. 煤炭学报, 2019, 44(2): 349-357.
WANG Guofa, LIU Feng, PANG Yihui, et al. Coal mine intellectualization: The core technology of high quality development[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 349-357.
- [3] 国家煤矿安全监察局. 煤矿机器人重点研发目录[EB/OL]. https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxgk/fdzdgnr/tzgg/201901/t20190109_349156.shtml, 2019-01-09.
- [4] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1-15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.
- [5] 工业和信息化部. 工业和信息化部等十七部门关于印发“机器人+”应用行动实施方案的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2023-01/19/content_5738112.htm, 2023-01-18.
- [6] 葛世荣, 胡而已, 李允旺. 煤矿机器人技术新进展及新方向[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 54-73.

- GE Shirong, HU Eryi, LI Yunwang. New progress and direction of robot technology in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 54–73.
- [7] 王国法, 杜毅博. 智慧煤矿与智能化开采技术的发展方向[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 1–10.
- WANG Guofa, DU Yibo. Development direction of intelligent coal mine and intelligent mining technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(1): 1–10.
- [8] 王柏村, 薛源, 延建林, 等. 以人为本的智能制造: 理念、技术与应用[J]. *中国工程科学*, 2020, 22(4): 139–146.
- WANG Baicun, XUE Yuan, YAN Jianlin, et al. Human-centered intelligent manufacturing: Overview and perspectives[J]. *Strategic Study of CAE*, 2020, 22(4): 139–146.
- [9] 谢嘉成, 房舒凯, 王学文, 等. “人本智造与XR+”驱动的综合采工作面人机协同智能化运行模式探索与实践[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 1099–1114.
- XIE Jiacheng, FANG Shukai, WANG Xuewen, et al. Exploration and practice of the human-machine collaborative intelligent operation mode of fully mechanized coal mining face driven by humanistic intelligent manufacturing and XR+technology[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 1099–1114.
- [10] 葛世荣, 张帆, 王世博, 等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 1925–1936.
- GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibo, et al. Digital twin for smart coal mining workplace: Technological frame and construction[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1925–1936.
- [11] 张帆, 葛世荣. 矿山数字孪生构建方法与演化机理[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 510–522.
- ZHANG Fan, GE Shirong. Construction method and evolution mechanism of mine digital twins[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(1): 510–522.
- [12] 谢嘉成, 王学文, 杨兆建. 基于数字孪生的综采工作面生产系统设计与运行模式[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1381–1391.
- XIE Jiacheng, WANG Xuewen, YANG Zhaojian, et al. Design and operation mode of production system of fully mechanized coal mining face based on digital twin theory[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6): 1381–1391.
- [13] 王学文, 谢嘉成, 郝尚清, 等. 智能化综采工作面实时虚拟监测方法与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 1984–1996.
- WANG Xuewen, XIE Jiacheng, HAO Shangqing, et al. Key technologies of real-time virtual monitoring method for an intelligent fully mechanized coal-mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1984–1996.
- [14] 王学文, 刘曙光, 王雪松, 等. AR/VR融合驱动的综合采工作面智能监控关键技术研究及试验[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(2): 969–985.
- WANG Xuewen, LIU Shuguang, WANG Xuesong, et al. Research and test on key technologies of intelligent monitoring and control driven by AR/VR for fully mechanized coal-mining face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 969–985.
- [15] 吴森, 李瑞, 王鹏江, 等. 基于数字孪生的综掘巷道并行工艺技术初步研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S1): 506–513.
- WU Miao, LI Rui, WANG Pengjiang, et al. Preliminary study on the parallel technology of fully mechanized roadway based on digital twin[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 506–513.
- [16] 张旭辉, 张超, 王妙云, 等. 数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟操控技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(6): 1617–1628.
- ZHANG Xuhui, ZHANG Chao, WANG Miaoyun, et al. Digital twin-driven virtual control technology of cantilever roadheader[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(6): 1617–1628.
- [17] 张旭辉, 王甜, 张超, 等. 数字孪生驱动的悬臂式掘进机虚拟示教记忆截割方法研究[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(11): 4247–4260.
- ZHANG Xuhui, WANG Tian, ZHANG Chao, et al. DT-driven memory cutting control method using vr instruction of boom-type roadheader[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(11): 4247–4260.
- [18] 毛善君, 崔建军, 王世斌, 等. 煤矿智能开采信息共享管理平台构建研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 1937–1948.
- MAO Shanjun, CUI Jianjun, WANG Shibin, et al. Construction of information sharing platform of mine safe production for intelligent mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 1937–1948.
- [19] 鲍久圣, 章全利, 葛世荣, 等. 煤矿井下无人化辅助运输系统关键基础研究及应用实践[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(2): 1085–1098.
- BAO Jiusheng, ZHANG Quanli, GE Shirong, et al. Basic research and application practice of unmanned auxiliary transportation system in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 1085–1098.
- [20] 龚晓燕, 雷可凡, 吴群英, 等. 数字孪生驱动的掘进工作面出风口风流智能调控系统[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(4): 1331–1340.
- GONG Xiaoyan, LEI Kefan, WU Qunying, et al. Digital twin driven airflow intelligent control system for the air outlet of heading face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(4): 1331–1340.
- [21] 李爽, 贺超, 鹿乘, 等. 煤矿智能双重预防机制与智能安全管控平台研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(1): 464–473.
- LI Shuang, HE Chao, LU Cheng, et al. Research on intelligent dual prevention mechanism and intelligent security control platform of coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(1): 464–473.
- [22] 杨赓, 周慧颖, 王柏村. 数字孪生驱动的智能人机协作: 理论与应用[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(18): 279–291.
- YANG Geng, ZHOU Huiying, WANG Baicun. Digital twin-driven smart human-machine collaboration: Theory, enabling technologies and applications[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(18): 279–291.
- [23] 鲍劲松, 张荣, 李婕, 等. 面向人-机-环境共融的数字孪生协同技术[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(18): 103–115.
- BAO Jinsong, ZHANG Rong, LI Jie, et al. Digital-twin collaborative technology for human-robot-environment integration[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(18): 103–115.
- [24] 刘鑫, 李公法, 向峰, 等. 基于公理设计的人机协作数字孪生建模技术[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(11): 3547–3559.
- LIU Xin, LI Gongfa, XIANG Feng, et al. Human-robot collaboration digital twin modeling technology based on axiom design[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2023, 29(11): 3547–3559.
- [25] MALIK A A, BREM A. Digital twins for collaborative robots: A case study in human-robot interaction[J]. *Robotics and Computer-*

- [Integrated Manufacturing](#), 2021, 68: 102092.
- [26] MA X, QI Q, CHENG J, et al. A consistency method for digital twin model of human-robot collaboration[J]. [Journal of Manufacturing Systems](#), 2022, 65: 550–563.
- [27] KHATIB M, AL KHUDIR K, DE LUCA A. Human-robot contactless collaboration with mixed reality interface[J]. [Robotics and Computer-Integrated Manufacturing](#), 2021, 67: 102030.
- [28] 王国法, 庞义辉, 任怀伟, 等. 智慧矿山系统工程及关键技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 181–202.
WANG Guofa, PANG Yihui, REN Huaiwei, et al. System engineering and key technologies research and practice of smart mine[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2024, 49(1): 181–202.
- [29] 黄曾华, 王峰, 张守祥. 智能化采煤系统架构及关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 1959–1972.
HUANG Zenghua, WANG Feng, ZHANG Shouxiang. Research on the architecture and key technologies of intelligent coal mining system[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2020, 45(6): 1959–1972.
- [30] 韩安, 陈晓晶, 贺耀宜, 等. 智能矿山综合管控平台建设构思[J]. 工矿自动化, 2021, 47(8): 7–14.
HAN An, CHEN Xiaojing, HE Yaoyi, et al. Construction conception of intelligent mine integrated management and control platform[J]. [Journal of Mine Automation](#), 2021, 47(8): 7–14.
- [31] 刘海锋. 煤矿智能化升级平台建设及运维保障研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(S1): 32–35.
LIU Haifeng. Research on the platform construction and operation and maintenance of coal mine intelligent upgrade[J]. [Journal of Mine Automation](#), 2021, 47(S1): 32–35.
- [32] 丁恩杰, 俞啸, 夏冰, 等. 矿山信息化发展及以数字孪生为核心的智慧矿山关键技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 564–578.
DING Enjie, YU Xiao, XIA Bing, et al. Development of mine informatization and key technologies of intelligent mines[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2022, 47(1): 564–578.
- [33] NEVES P, SILVA F J G, FERREIRA L P, et al. Implementing lean tools in the manufacturing process of trimmings products[J]. [Procedia Manufacturing](#), 2018, 17: 696–704.
- [34] 鲍久圣, 张牧野, 葛世荣, 等. 基于改进 A*和人工势场算法的无轨胶轮车井下无人驾驶路径规划[J]. 煤炭学报, 2022, 47(3): 1347–1360.
BAO Jiusheng, ZHANG Muye, GE Shirong, et al. Underground driverless path planning of trackless rubber tyred vehicle based on improved A*and artificial potential field algorithm[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2022, 47(3): 1347–1360.
- [35] BENEDICT J D, GULIUZO J D, CHAPARRO B S. The intuitiveness of gesture control with a mixed reality device[J]. [Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting](#), 2019, 63(1): 1435–1439.
- [36] MUHAMMAD NIZAM S, ZAINAL ABIDIN R, CHE HASHIM N, et al. A review of multimodal interaction technique in augmented reality environment[J]. [International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology](#), 2018, 8: 1460.
- [37] ASCHAUER A, REISNER KOLLMANN I, WOLFARTSBERGER J. Creating an open-source augmented reality remote support tool for industry: Challenges and learnings[J]. [Procedia Computer Science](#), 2021, 180: 269–279.