

AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控关键技术研究与试验

王学文^{1,2,3}, 刘曙光^{1,2}, 王雪松^{2,3,4}, 谢嘉成^{1,2,4}, 王彬彬^{1,2}, 王振威^{1,2}

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 煤矿综采装备山西省重点实验室, 山西 太原 030024; 3. 矿山采掘装备及智能制造国家重点实验室, 山西 太原 030024; 4. 太重煤机有限公司博士后科研工作站, 山西 太原 030024)

摘 要: 为突破综采工作面数据驱动实时监控技术瓶颈, 进一步满足对综采工作面协同运行状态的深度感知, 以虚拟现实(Virtual Reality, VR)监控技术及成果为基础, 以 HoloLens2 增强现实(Augmented Reality, AR)头显为主要开发设备, 结合工业互联网、云技术、数字孪生(Digital Twin, DT)等先进手段, 进行 AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控关键技术研究与实践, 充分利用 AR 技术的特性弥补 VR 监控与真实场景有割裂感、监测数据来源较为单一的缺陷, 使综采工作面智能监控体系得到完善与扩充。提出 3 种关键技术, 并对各关键技术的具体解决方案进行剖析, 具体包括: ① 构建了通用高效可扩展端云协同异步网络框架, 基于该框架研究了多终端协同工作关键技术, 实现了空间虚实融合全息辅助标注功能。该技术可为综采工作面智能监控全过程中的多人协作提供便利; ② 将基于稀疏匹配的识别跟踪方法与基于 AR 标识的识别跟踪方法相结合, 实现了对综采工作面全综采装备的识别跟踪, 为综采工作面的 AR 监测与控制提供了先决条件; ③ 在由物理综采工作面、云服务器、数字综采工作面 3 者构成的数字孪生闭环上, 进行多传感器与视觉融合的综采装备位姿监测与运行状态识别, 并通过 AR 交互手段完成了对物理综采工作面的反向控制。在实验室环境下展开测试验证, 试验表明, 系统数据传输压力小, 延迟低, 操作流畅无卡顿, 在保留 VR 监控已有优势的基础上进一步提升了沉浸感、便捷性与虚实融合程度, 具备单人或多人协作监测综采工作面运行状态并进行反向控制的能力。

关键词: 综采工作面; 增强现实; 虚拟现实; 数字孪生; 端云协同; 智能监控

中图分类号: TD67; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2022)02-0969-17

Research and test on key technologies of intelligent monitoring and control driven by AR/VR for fully mechanized coal-mining face

WANG Xuwen^{1,2,3}, LIU Shuguang^{1,2}, WANG Xuesong^{2,3,4}, XIE Jiacheng^{1,2,4},
WANG Binbin^{1,2}, WANG Zhenwei^{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 University of Technology, Taiyuan 030024, China; 3. State Key Laboratory of Mining Equipment and Intelligent Manufacturing, Taiyuan 030024, China; 4. Postdoctoral Science Research Workstation, Taiyuan Mining Machinery Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

收稿日期: 2021-07-13 修回日期: 2021-09-17 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2021.1113

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004174); 山西省重点研发计划资助项目(201903D121141); 山西省“1331 工程”资助项目

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. 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[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 969-985.

WANG Xuwen, 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.



移动阅读

Abstract: In order to break through the bottleneck of data-driven real-time monitoring and control technology and satisfy the in-depth perception of the collaborative operation for a fully mechanized coal-mining face, a Virtual Reality (VR) monitoring and control technology and its research achievements are taken as the technical foundation. Also, the HoloLens2 Augmented Reality (AR) headset is taken as a main development device. Advanced methods such as industrial Internet, cloud technology, and Digital Twin (DT) are combined to carry out the research and practice of intelligent monitoring and control technology for a fully mechanized coal-mining face driven by AR/VR. The characteristics of AR technology are fully utilized to make up for the sense of separation between VR monitoring and control and real scenes, and to compensate for the shortcomings of a relatively single source of monitoring data, so that the intelligent monitoring and control system for fully mechanized coal-mining faces can be improved and expanded. Three key technologies are proposed and the specific solutions of each technology are analyzed. The details are as follows: ① A universal, efficient, scalable, and asynchronous network framework for client-cloud collaboration is constructed. Based on this framework, the key technologies of multi-terminal collaborative work are studied, and the function of spatial holographic mark of the fusion of virtual and reality is realized. This technology can provide convenience for multi-person collaboration in the whole process of intelligent monitoring and control of fully mechanized coal-mining face. ② The recognition and tracking method based on sparse matching is combined with the recognition and tracking method based on AR identification, so that the recognition and tracking of fully mechanized coal-mining equipment in fully mechanized coal-mining face is realized, which provides a prerequisite for the AR monitoring and control of fully mechanized coal-mining face. ③ In the DT closed-loop composed of physical fully mechanized coal-mining face, cloud server and digital fully mechanized coal-mining face, the position and posture monitoring and the operating status recognition of fully mechanized coal-mining equipment are carried out by means of multi-sensor and vision fusion. The reverse control of physical fully mechanized coal-mining face is completed by means of AR interaction. Test verification is carried out in a laboratory environment. The test shows that the system has low data transmission pressure, low delay, smooth operation and no jamming. On the basis of retaining the existing advantages of VR monitoring and control, the degree of immersion, convenience and the integration of virtual and reality are further improved. It has the ability to monitor the operating status of fully mechanized coal-mining equipment by one or more persons and control it in reverse.

Key words: fully mechanized coal-mining face; Augmented Reality; Virtual Reality; Digital Twin; client-cloud collaboration; intelligent monitoring and control

国家八部委联合发布《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》^[1], 标志着智能化已成为煤炭工业高质量发展的核心技术支持^[2]。2021 年初, 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, 明确指出需重点攻关透明地质、煤矿 5G 无线通信、井下视频高效处理及 AR/VR、井下精确定位与设备导航、矿井机电设备在线监测与诊断维护等核心技术^[3]。

VR 技术逐步在智能化建设中占据重要地位, 特别是为透明综采监控^[4]提供了三维可视化解决方案^[5-6], 与传统视频监控和二维组态监控相比, 抗干扰能力与直观性均有提升, 具有对工作面装备运行状态实时监测和反向控制能力^[7]。但 VR 环境是一个由计算机生成的完全沉浸式的环境, 其依赖于外部多源输入信息的融合算法精度, 不具备自主获取信息的能力, 对真实场景的感知存在局限。

受限于技术特点, VR 监控有待进一步完善, 而 AR 技术为综采工作面虚拟监控进一步突破技术瓶颈提供了可能。AR 技术可以利用摄像头、传感器、实时计算和匹配技术, 将交互式虚拟信息与物理世界巧妙地实时“无缝”集成于同一三维尺度空间, 在特征上与数字孪生的概念有着先天的吻合性, 有助于数字孪生技术推动智能化采矿进入新时代^[8]。基于此, 黄曾华等提出将 AR 技术引入综采工作面可视化远程干预监控^[9], 并给出了系统架构; ANDHAN 等开发了一种基于 AR 的指挥控制系统仪表盘, 以保证煤矿工人的人身安全^[10]; 成董浩等采用 AR 技术实现通风巷道数据的可视化, 为矿井通风系统智能化提供了一种新的技术手段^[11]; 张旭辉等提出一种数字孪生+MR 的机电设备辅助维修指导方法, 可实现对现场维修人员的实时指导^[12]。

目前在煤炭领域, AR 技术的应用还处于较为初

级的阶段,与该技术在数字化工厂^[13]、医学、建筑学等其他领域的应用相比,深度上和广度上都存在较大差距。AR 具有三大特征,即虚实融合、实时交互、三维注册^[14],其虚实融合的特征可有效弥补 VR 监控与真实场景有割裂感的缺陷,且实时交互手段与 VR 相比也有所扩充,而视觉信息作为除传感器外的另一种数据源能够提供更多信息反馈。将 AR 技术引入煤矿智能化建设并与现有 VR 技术相结合,发挥各自优势,可形成 AR/VR 技术深度融合的透明化综采工作面智能监控体系。

笔者以 VR 监控技术及科研成果为基础,以 AR 技术在综采工作面智能监控中的应用为研究重心,以 HoloLens2 为主要开发平台,从实际需求出发,构

建 AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控技术架构,提出综采工作面多监控终端协同工作、基于计算机视觉的全综采装备识别跟踪、综采工作面 AR/VR 融合闭环监控 3 种关键技术,并对这些关键技术的解决方案进行探讨、剖析与试验,以期为 AR/VR 技术在煤炭领域的应用提供新思路,为综采工作面的智能虚拟监控提供更为完善的方法。

1 总体架构

1.1 综采工作面 AR/VR 监控技术融合原理框架

在 AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控中,AR 与 VR 技术的融合主要体现在以下 3 个层面,详细融合原理如图 1 所示。

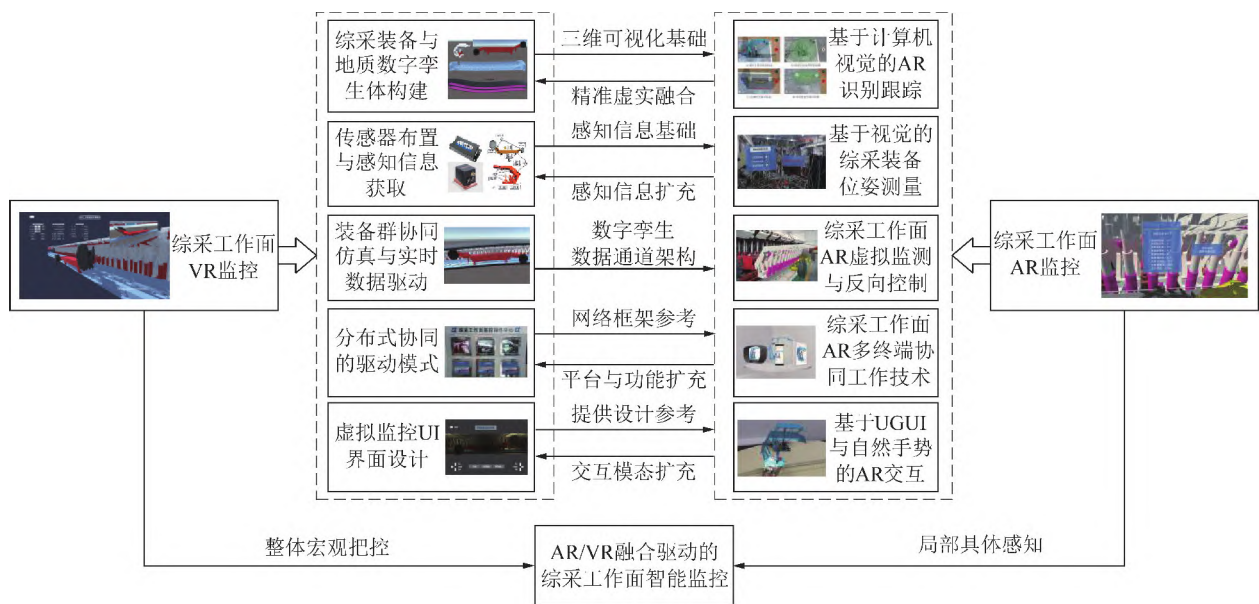


图1 综采工作面 AR/VR 监控技术融合原理框架

Fig.1 Principle framework of AR/VR monitoring technology fusion in fully mechanized coal-mining face

(1)VR 技术对 AR 技术的支撑。VR 与 AR 技术在应用于综采工作面虚拟监控时,两者在实现路径、开发方式等方面均存在类似性。综采装备与地质数字孪生体构建、传感器布置与感知信息获取、装备群协同仿真与实时数据驱动、分布式系统的驱动模式、虚拟监控 UI 界面设计等 VR 监控关键技术可以为 AR 监控研究奠定基础。

(2)AR 技术对 VR 技术的补充。VR 环境与现实呈隔绝状态,而 AR 技术更强调虚实融合。基于计算机视觉的 AR 识别跟踪、基于视觉的综采装备位姿测量、综采工作面多终端 AR 协同工作技术、基于 UGUI 与自然手势的 AR 交互等 AR 监控关键技术可以扩充 VR 监控的维度。

(3)AR 与 VR 技术的巧妙集成。VR 在计算机强大运算能力的加持下,可对综采工作面的整体运行

情况进行宏观把控。而 AR 设备虽性能有限,但可利用其虚实融合的优势,更深入、细致地获取工作面的局部运行情况。集成 AR 与 VR 技术的优势,发挥两者所长,可形成兼顾综采工作面局部与整体、虚实融合的全时空综合监控技术架构。

1.2 AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控技术架构

在 AR/VR 监控技术融合下构建 AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控技术架构,分为 4 个层级:云服务器层、设备层、应用层与辅助技术层,具体架构如图 2 所示。

(1)云服务器层包含云处理器模块、网络处理模块及数据库。其中云处理器模块负责对系统运行过程中产生的数据进行储存、分析与处理;网络处理模块负责与设备层各设备间的网络通信,网络通信在辅

助层中的通用高效可扩展网络框架下进行;数据库中
包含综采装备特征点与描述符数据库、AR 标识库、
综采工作面运行状态数据库以及数字孪生综采工作
面模型数据库。

(2)设备层包含真实物理综采装备与 AR 移动/
头戴终端。其中真实物理综采装备主要包括综采工
作面三机即采煤机、刮板输送机、液压支架及其控制
系统与传感器;AR 移动/头戴终端主要包括 Holo-
Lens2、手机及平板电脑。

(3)应用层为 AR/VR 融合驱动的综采工作面智
能监控应用程序,集成了综采工作面多监控终端协同
工作、基于计算机视觉的全综采装备识别跟踪、综采
工作面 AR/VR 融合闭环监控 3 种关键技术。

(4)在辅助层技术中,通用高效可扩展网络框架

突破了网络瓶颈,保障了系统的可靠性;跨终端空间
虚实融合全息辅助标注、多终端 AR 同地无缝协作以
及多终端远程 AR 视频会议 3 个功能为系统提供了
更丰富的技术支持。

层级的联系主要集中在云服务器层与设备层之
间以及设备层内部。隶属于设备层的 AR 终端为了
完成全综采装备的识别跟踪,需将其捕获的视觉信息
与云服务器层中的数据库数据进行匹配;基于多传感
器的综采装备位姿测量以及对综采工作面的 AR 远
程反向控制依赖于 AR 终端、云服务器层中云处理模
块、物理综采装备 3 者间的交互。

系统可在 4 个层级的作用下实现 AR 移动/头戴
终端对全综采装备的识别跟踪,在此基础上完成
AR/VR 技术融合下的综采工作面监测与控制。

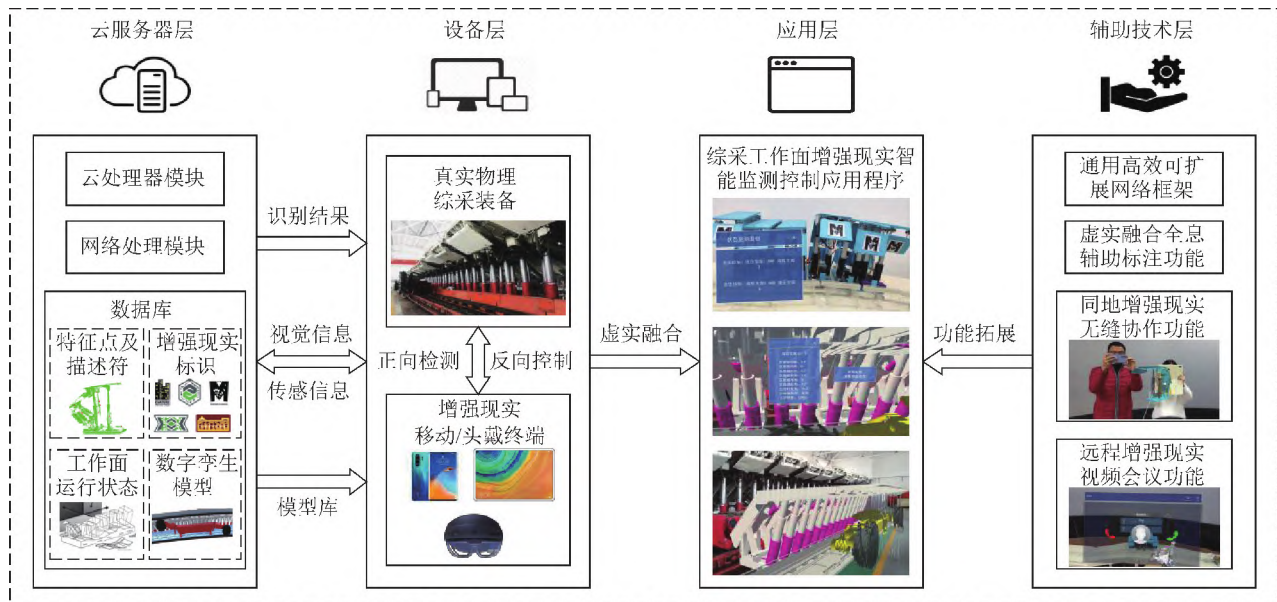


图 2 AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控技术架构

Fig.2 Technology architecture of AR/VR fusion-driven intelligent monitoring for fully mechanized coal-mining face

2 综采工作面多监控终端协同工作技术

2.1 通用高效可扩展端云协同异步网络框架

传统的 C/S(服务器/客户端)网络架构不支持
UWP 平台开发,无法在 HoloLens2 设备上使用。为
满足潜在的多终端并发处理需求,减少线程阻塞,并
兼顾 UWP 平台的适用性,搭建了 1 种基于完成端
口(IOCP)机制的通用 TCP/IP 客户端及云服务器网
络框架,IOCP 是一种基于事件的异步模型。采用
SAEA(Socket Async Event Args)Socket 类进行框
架搭建,该类封装了 IOCP 的使用。云服务器与客
户端的连接逻辑如图 3 所示。

在该框架的基础上定义了数据模型,模型分为 3

个层级:类型层、请求层与消息层,采用 Encode()
与 Decode()方法对数据进行编解码。在消息层中,
消息分为两类:一类是需要服务器处理的消息,如用
户信息的获取与更新、空间锚点的上传与下载等;另
一类是需要云服务器转发的消息,如 AR 场景中综采
装备的位置、姿态、动作等。定义不同的消息类型并
采用 Serialize()与 Deserialize()方法进行消息的序
列化与反序列化。通过 Heart Thread.IsAlive 语句
为云服务器添加心跳监测功能,定时向服务器发送心
跳包,以对客户端的异常断开进行监测。

2.2 跨终端空间虚实融合全息辅助标注

在通用高效可扩展网络框架下捕捉并传输包含
AR 设备空间矩阵信息的视频数据,经过 2 次转换,

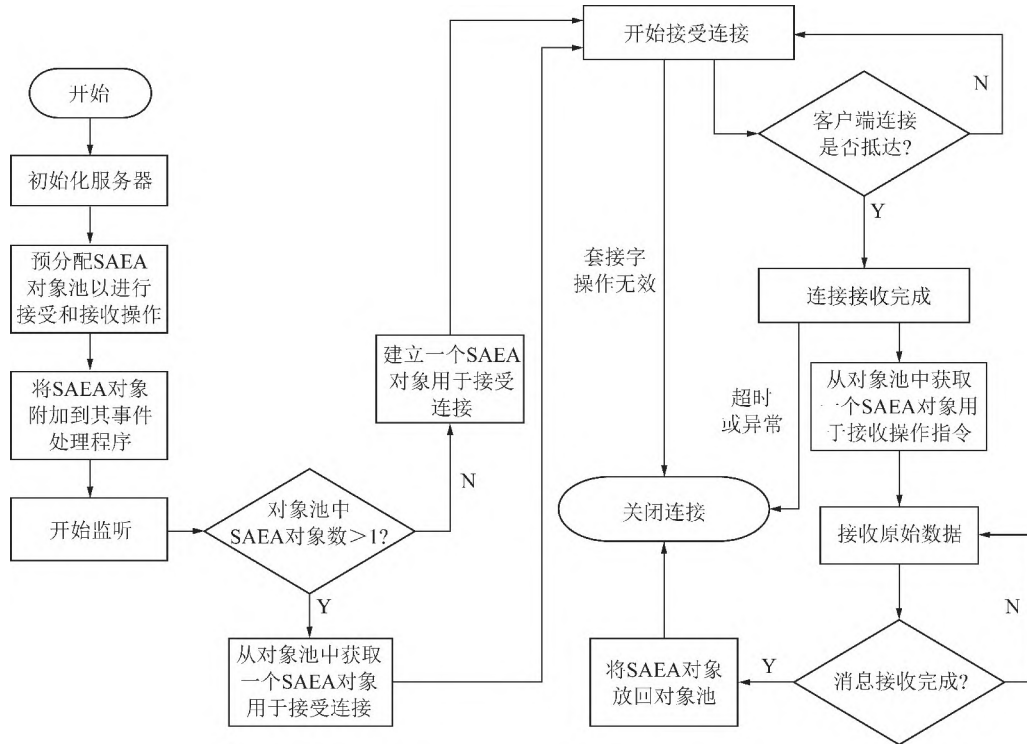


图3 SAEA云服务器、客户端连接逻辑

Fig.3 Server and client connection logic of SAEA

即AR设备与Unity3D空间矩阵转换、二维标注到三维空间的转换实现远程空间全息标注。

2.2.1 AR设备摄像头空间矩阵数据处理

AR设备通常包含一个面向世界的摄像头,其捕获的图像帧包含一个坐标系以及2个变换:储存捕获帧的坐标系、摄像头外部视图变换以及摄像头投影变换。视图变换代表摄像头在世界中的位置信息,投影变换代表摄像头映射到图像中的像素信息。

欲将包含AR设备空间矩阵信息的图像数据传输至发送端,需获取AR设备的摄像头空间矩阵,并将其转换为Unity3D空间矩阵。转换过程可以简化为如下模型:从AR设备摄像头2D投影空间到其相对的3D视图空间,然后再到AR摄像头空间,最后到Unity3D应用程序坐标系,矩阵转换原理如图4所示。

该模型可简化为一系列矩阵运算:摄像头投影变换矩阵 P 经转置运算得到 P' ,摄像头外部视图变换矩阵 V 经转置运算与求逆运算得到 V' ,储存捕获帧的坐标系矩阵 C 经转置运算得到 C' ,以匹配预期的Unity3D格式;上述矩阵混合运算并将右手坐标系转化为UnityEngine左手坐标系后最终得到AR设备摄像头空间矩阵到Unity3D空间矩阵的变换矩阵 T ,具体转换过程如下:

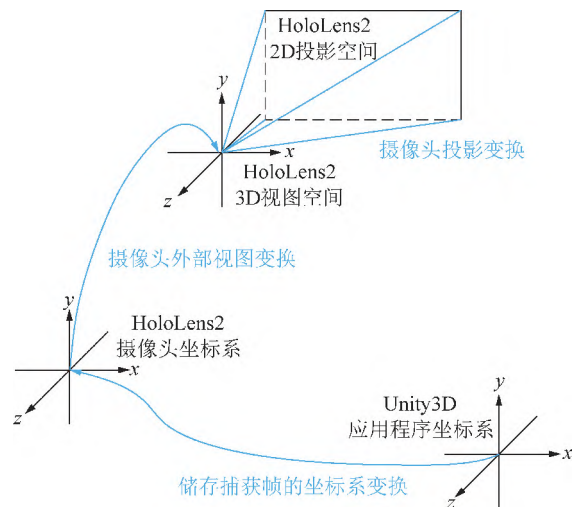


图4 AR摄像头空间矩阵转换原理

Fig.4 Space matrix conversion principle of AR device

$$\begin{cases} P' = P^T \\ V' = (V^T)^{-1} \\ C' = C^T \end{cases} \quad (1)$$

$$T = P' \cdot [E_3(-1) \cdot (V' \cdot C')] \quad (2)$$

$$E_3(-1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $E_3(-1)$ 为初等矩阵。

2.2.2 二维标注到三维空间位置转换

发送端做出的标注为二维图像,而接收端中显示的标注包含三维信息,故在发送标注信息时需将二维标注向三维空间转换。

AR设备摄像头空间投射原理如图5所示。以矩形标注为例,利用几何相似关系可以按比例计算出投射面对应形心投射点位置 C_2 及长宽 L_2, W_2 。空间中任何三维物体都可看作是若干三角形 Mesh 组合而成。HoloLens2 等 AR 设备可自动识别三维物体表面,生成三角形 Mesh 网格并添加 Mesh Collider 碰撞体,如图6所示。

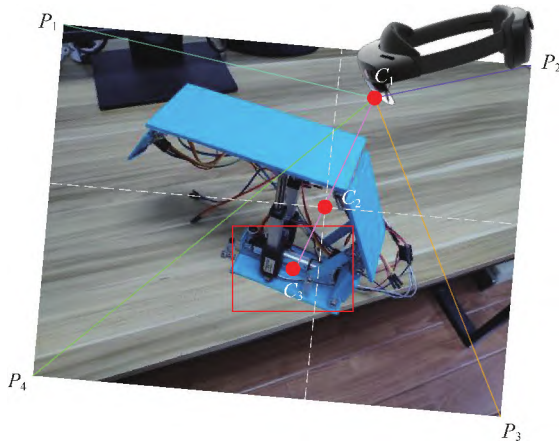


图5 AR摄像头空间投射原理

Fig.5 AR camera spatial projection principle

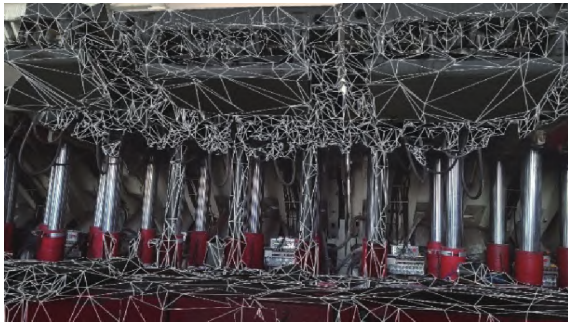


图6 HoloLens2 三角形 Mesh 网格效果

Fig.6 Triangular mesh effect of HoloLens2

当接收端收到二维标注数据时,摄像头从位置 C_1 发出检测射线,经过形心投射点位置 C_2 ,到达实际形心位置 C_3 并与 Mesh Collider 发生碰撞。在 C# 程序中通过 RaycastHit.triangleIndex 语句进行三角形索引,利用 Möller-Trumbore 相交算法确定射线与三角网格的碰撞点,算法原理如图7所示。

射线 $R(t)$ 可用参数方程来定义:

$$R(t) = P_0 + t(P_1 - P_0) \quad (4)$$

式中, t 为射线方程中的参数。

三角形参数方程可用其在重心坐标系中的3个

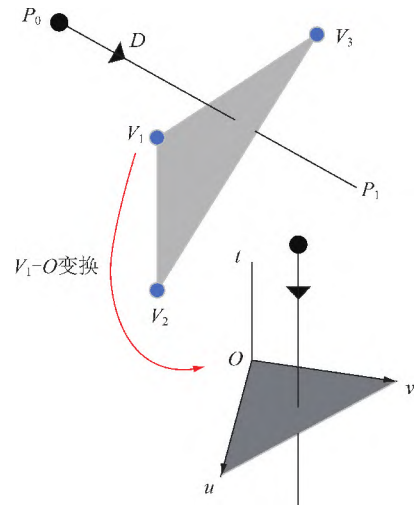


图7 Möller-Trumbore 算法原理

Fig.7 Principle of Möller-Trumbore algorithm

顶点 V_1, V_2, V_3 表示:

$$T(u, v) = (1 - u - v)V_1 + uV_2 + vV_3 \quad (5)$$

其中, $1-u-v, u, v$ 分别为 V_1, V_2, V_3 在重心坐标系中的权重,且满足 $u \geq 0, v \geq 0, u+v \leq 1$ 。将射线与三角形参数方程联立求解:

$$P_0 + t(P_1 - P_0) = (1 - u - v)V_1 + uV_2 + vV_3 \quad (6)$$

展开并移项得:

$$P_0 - V_1 = tP_0 - tP_1 + uV_2 - uV_1 + vV_3 - vV_1 \quad (7)$$

提取未知数 t, u, v ,将方程写成线性方程组的形式:

$$\begin{bmatrix} P_0 - P_1 & V_2 - V_1 & V_3 - V_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = P_0 - V_1 \quad (8)$$

其中, $P_0 - P_1 = -D$,又令 $V_2 - V_1 = M_1, V_3 - V_1 = M_2, P_0 - V_1 = T$,则该线性方程组可写为

$$\begin{bmatrix} -D & M_1 & M_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = T \quad (9)$$

由 Cramer 法则解得:

$$\begin{cases} t = \frac{1}{\begin{vmatrix} -D & M_1 & M_2 \end{vmatrix}} \begin{vmatrix} T & M_1 & M_2 \end{vmatrix} \\ u = \frac{1}{\begin{vmatrix} -D & M_1 & M_2 \end{vmatrix}} \begin{vmatrix} -D & T & M_2 \end{vmatrix} \\ v = \frac{1}{\begin{vmatrix} -D & M_1 & M_2 \end{vmatrix}} \begin{vmatrix} -D & M_1 & T \end{vmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

使用向量混合积公式对解进行改写:

$$\begin{bmatrix} t \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{(D \times M_2) \cdot M_1} \cdot \begin{bmatrix} (T \times M_1) \cdot M_2 \\ (D \times M_2) \cdot T \\ (T \times M_1) \cdot D \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过 RaycastHit.Distance 语句检测摄像头到碰撞点的距离,依据几何相似关系计算出矩形标注在实际空间中的尺寸 L_3, W_3 ,从而生成三维空间中的矩形标注 S_1 。

2.3 多终端 AR 同地无缝协作

在综采工作面生产全过程中,存在诸多需要面对面交流协作的场景。如作业方案规划、工作面运行情况探讨与分析、采后总结等。

开发完成的多终端 AR 同地无缝协作功能最大特征为:多个用户能够同时看到同一工作空间中的真实与虚拟物体,在相同的绝对位置感知到它们,并通过多种方式实现对虚拟物体的交互,即具备多终端间“无缝衔接”的性质,可实现空间共享。

功能的实现依托于2个前提:第三视角技术^[15]与空间状态同步。第三视角技术可使用户在自己的 AR 终端中看到其他终端中的影像。而多个终端各自拥有不同的 AR 坐标系,空间状态同步可确保各个终端中的影像在世界坐标系中拥有相同的位置和状态,如图7所示。第三视角技术与多设备空间状态同步均通过空间坐标校准实现。

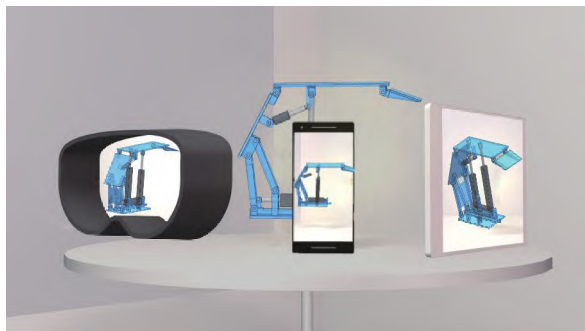


图8 空间状态同步示意

Fig.8 Schematic diagram of space state synchronization

分别使用2种方案来完成不同设备间的空间坐标校准:①通过ARFoundation中的图像识别定位功能进行非HoloLens2设备间的空间坐标校准;②通过空间锚点进行HoloLens2之间或HoloLens2与其他设备间的空间坐标校准。

在ARFoundation平台中调用AR Tracked Image Manager脚本,多个设备同时扫描基准图片即可完成多设备的坐标系统一,如图9所示。

ARFoundation不支持HoloLens2开发,故将空间锚点作为HoloLens2的空间坐标校准解决方案。在Unity3D中编写C#程序,调用UnityEngine中的WorldAnchorTransferBatch API在场景中挂载空间锚点,HoloLens2读取锚点数据即可完成同步。

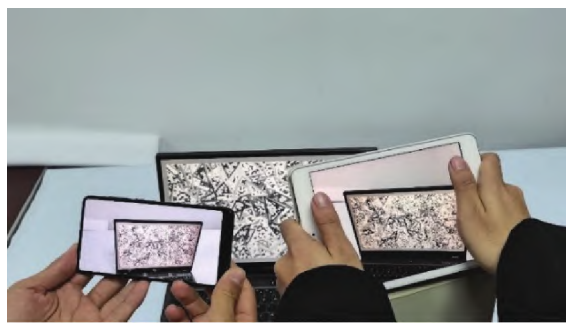


图9 多设备坐标系统一方法

Fig.9 Unification method of Multi-device coordinate system

2.4 多终端远程 AR 视频会议

综采工作面往往长达数百米,开采过程中如需分享自己当前所在位置工况,或需要专家进行远程协助以解决专业问题时,为了提高生产效率,异地间远程协作也十分必要。

AR技术可利用其虚实融合的特性提升传达的信息量,提高远程交流效率。Vorraber等将HoloLens作为远程维护过程中的辅助工具,这种口头与视觉同步交流的远程指导方式可以更快地解决问题^[16]。

通过构建可用于远程监控、远程指示等协同工作的多终端远程AR视频会议功能,任一与会者只需一台AR设备即可在系统中观看其余与会者所持设备拍摄的实时视频画面,把握远程异地工作人员的周边工况,并可在视频画面中进行2.2节中所述全息标注,实现远程协作与指导。该系统发挥了直播视频的即时性与AR全息影像的可视化指导作用,使得远程异地间的交流更加有效。

其中,多终端间的视频通话是通过以下方法实现的:在Unity3D中使用WebRTC完成音视频通讯服务器原型搭建。利用Instance.GetAudio()与Instance.GetVideo()语句捕获声音与视频画面,利用GetPbAudioPacket()与GetPbVideoPacket()语句提取数据。Serialize()与SendDataByYourNetwork()语句将音视频数据序列化并上传至云服务器;GetDataByYourNetwork()与Deserialize()语句从云服务器读取音视频数据并反序列化。最后将数据解码还原为音视频讯息。

3 基于计算机视觉的综采工作面 AR 识别跟踪技术

目标识别跟踪是AR的核心技术之一,也是联系虚拟与真实世界的基础环节。综采工作面区域广、装备多,实现对综采装备的监控必须以准确区分目标对象为前提。针对综采工作面的特点,采取了基于AR标识与稀疏匹配融合的目标识别跟踪方法,实现对综

采装备的识别跟踪。

3.1 基于稀疏匹配的综合采装备识别跟踪

基于自然特征的目标识别跟踪是利用预先从对象的外观中提取的自然特征数据与对象的特征数据进行匹配,从而确定对象的识别跟踪方法。而稀疏匹配是基于自然特征的目标识别中的一种基于特征点的方法,它无需找到图像中每个像素的对应关系,只需寻找为数不多但足以表征目标物体的显著特征点。

采煤机、刮板输送机、液压支架等综采装备形态各异,彼此之间外观差异显著,自然特征较为明显,特征点丢失的概率极低,故采用稀疏匹配的方式对其进行区分。

基于稀疏匹配的目标识别跟踪流程如图 10 所示,包括预处理和识别处理两部分。在预处理阶段中,首先从拍摄目标物体所得二维图像或三维点云中提取特征点,计算用于特征点匹配的特征点描述符,再计算特征点三维坐标,建立世界坐标系中包含特征量与三维坐标信息的特征点数据库。在识别处理阶段中,同样需要经过特征点提取与描述符计算,之后将计算得到的描述符与数据库中的预处理描述符进行比对,完成匹配,并且能够计算出世界坐标系中摄像头的位姿。

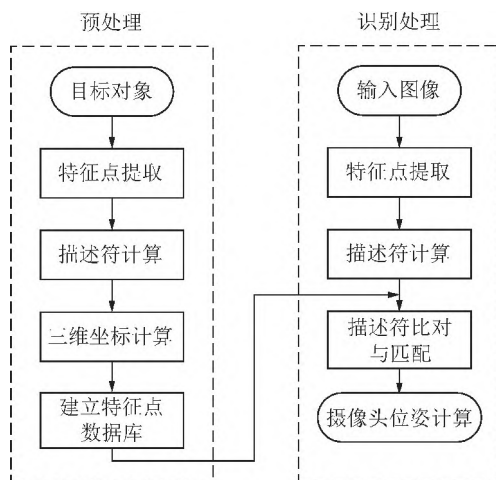


图 10 稀疏匹配识别跟踪流程

Fig.10 Sparse matching recognition and tracking process

3.1.1 基于 HoloLens2 与 Azure Kinect DK 的综采装备三维点云获取

综采装备三维点云的获取分为 3 个步骤:定位扫描、修补扫描及点云注册融合,具体步骤如下,流程如图 11 所示。

(1) 定位扫描阶段,在 Unity3D 中利用 C#脚本和 MRTK 工具编写三维重建程序。使用 HoloLens2 运行程序,利用 SpatialAwareness 功能对综采装备进行扫描与重建。重建完成后,经 pcl 处理将三维模型转化为三维点云。

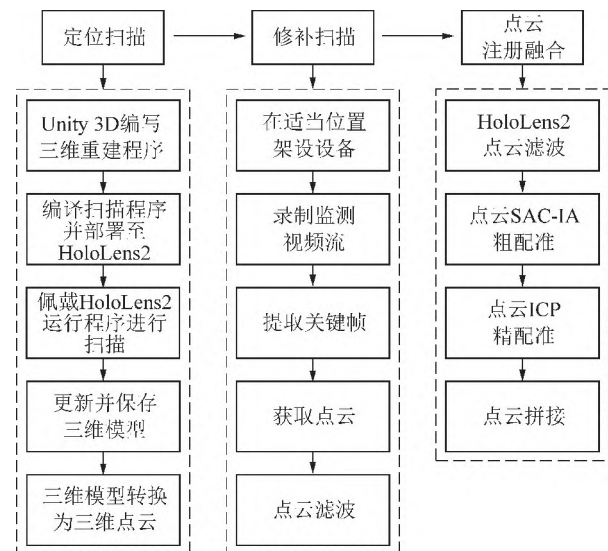


图 11 综采装备三维点云获取流程

Fig.11 3D point cloud acquisition process of fully mechanized coal-mining machine

(2) 修补扫描阶段,在液压支架群中第 $5k$ ($k=1, 2, 3, \dots$) 台支架顶梁下架设多台 Azure Kinect DK 设备,在控制台中利用 k4ARecorder 工具进行 RGB-D 视频流录制。提取视频中关键帧,得到 RGB 图像和深度图像组,并转化为点云坐标。

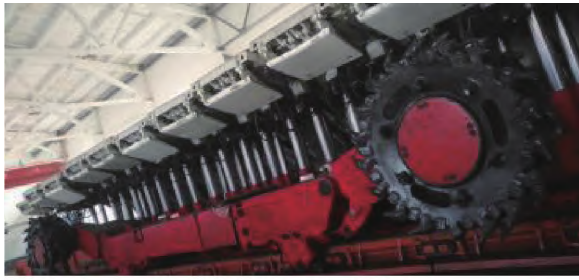
(3) 点云注册融合,采用直通滤波算法对两阶段获取的点云进行处理,去除多余点,得到综采装备初步三维点云模型。将两阶段点云进行配准,先采用 SAC-IA 算法进行粗配准,再用 ICP 算法进行精配准^[17],逐步拼接完善综采装备点云模型。

HoloLens2 重建范围广,覆盖区域大,可精确反映单台综采装备在装备群中的位置;而 Azure Kinect DK 得到的 RGB 图像+深度图像组转换为三维点云后密度较高,可较真实地反映形状特征;以定位扫描阶段点云为基准,修补扫描阶段点云为补充,可得到定位较准确、精细度较高且外观较真实的综采装备点云,图 12 为用本方法获取的实验室成套综采装备点云。

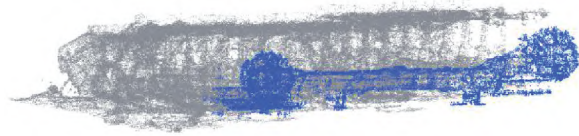
3.1.2 综采装备三维点云特征点提取

综采装备三维点云是一个包含无数综采装备表面点的稠密点集,想要提高识别跟踪的准确性,就要提取三维点云中的特征点。选取综采装备点云中的角点作为特征点,所谓角点,是指同时具有如下特征的点:① 物体轮廓过渡处的交点;② 对于同一物体,即使观看视角变化,仍然具备稳定不变的特征;③ 该点附近区域的点在梯度方向与梯度幅值上均存在较大变化。

采取 Harris 算法对综采装备点云中的角点进行提取。Harris 算法对物体姿态变化鲁棒性好,对旋转



(a) 煤矿综采成套试验系统



(b) 煤矿综采成套试验系统三维点云

图12 综采装备三维点云

Fig.12 3D point cloud of fully mechanized coal-mining machine

不敏感,检测精度较高。其主要原理为点云的局部自相关性:以点云中每一点为中心,取一个窗口,描述每点周围的环境。如果把某点的窗口向任意一方向移动都会产生较大的窗口变化,则该点会被提取为角点。描述局部本征值变化程度的函数为

$$E(a,b) = \sum_{x,y} w(x,y) [I(x+a,y+b) - I(x,y)]^2 \quad (12)$$

式中, a 和 b 分别为 x 和 y 方向平移量; I 为本征值强度,范围为 $0 \sim 255$; $w(x,y)$ 为高斯窗口函数。

根据泰勒级数计算 $1 \sim n$ 阶的偏导数,最终得到 Harris 矩阵公式:

$$\mathbf{M} = \sum_{x,y} w(x,y) \begin{bmatrix} I_x^2 & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y^2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, I_x 与 I_y 为 I 在 x 和 y 方向上的偏导数。

根据 Harris 矩阵计算矩阵特征值 λ_1 与 λ_2 ,然后计算 Harris 角点响应值:

$$\begin{cases} R = \det \mathbf{M} - k (\text{trace} \mathbf{M})^2 \\ \det \mathbf{M} = \lambda_1 \lambda_2 \\ \text{trace} \mathbf{M} = \lambda_1 + \lambda_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中, k 为系数,通常取 $0.04 \sim 0.06$; trace 为矩阵的迹; \det 为矩阵的行列式。

当 R 为局部最大时,该点即为角点,以液压支架单机为示意,提取到的角点如图13所示。

3.1.3 特征点描述符创建与匹配

描述符是将特征点与目标对象进行匹配的一种数据结构,理想状态下,目标对象的每一点都应具有独一无二的描述符。选定综采装备三维点云特征点后,需要计算特征点描述符。

采用尺度不变特征变换(SIFT)算法计算 SIFT 特

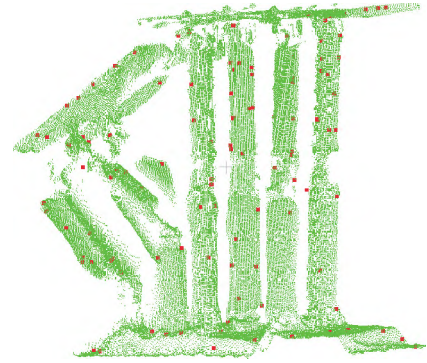
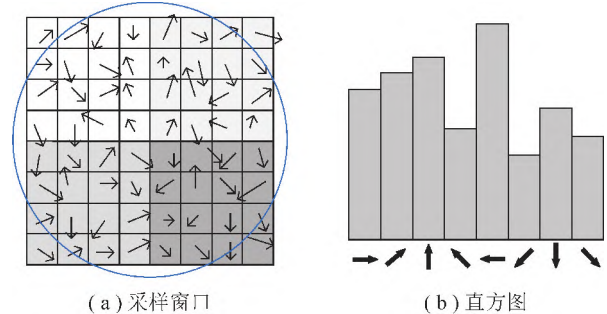


图13 Harris 算法获取的液压支架角点

Fig.13 Corner points of hydraulic support obtained by Harris algorithm

征向量算子作为综采装备特征点描述符,该算法生成描述符的步骤如下,生成过程如图14所示。



(a) 采样窗口

(b) 直方图

图14 SIFT 算法生成描述符过程

Fig.14 Process of SIFT algorithm generating descriptor

(1)以 Harris 算法提取的特征点为圆心,以 $1.5\sigma_p$ 为领域半径,取 8×8 图像块为采样窗口,其中 σ_p 为 DOG 检测算子中得到的尺度因子。

(2)将 8×8 采样窗口划分为4个 4×4 区域,每个区域内有8个像素点,建立带有像素点梯度向量幅度与梯度朝向的直方图。

(3)上述步骤得到一个 $2 \times 2 \times 8 = 32$ 维的特征向量,这一特征向量便是标准 SIFT 特征向量算子。

描述符匹配本质上是最近邻搜索问题。综采装备结构复杂,包含描述符数量较多,若以穷举搜索的方式进行检索会带来较大的时间延迟,故采用启发式搜索算法 K-D Tree 对综采装备描述符进行检索,该算法可在对数时间上检索,大大提升效率,但算法本身缺陷可能导致部分匹配特征丢失。故在其基础上引入 Spill Tree 算法^[18],使多个 K-D Tree 重叠,降低特征丢失概率。

根据描述符匹配结果,将识别处理阶段中提取的特征点的描述符与数据库中描述符实现配对,即可完成对综采装备的识别跟踪。

3.2 基于 AR 标识的液压支架群识别跟踪

综采装备的外观差异使得基于自然特征的识别

跟踪方法对其有出色的适用性,然而对于液压支架群,其中每一台液压支架都具有相似甚至相同的外观,即自然特征类似,难以通过自然特征被区别。针对这一问题,采用基于 AR 标识的识别跟踪方法,以区分支架群中不同液压支架。

采用 Vuforia 的 Vumark 作为 AR 标识。一个完整的 Vumark 由轮廓线、边线、图像编码、空白区域与背景 5 部分构成,如图 15 所示。

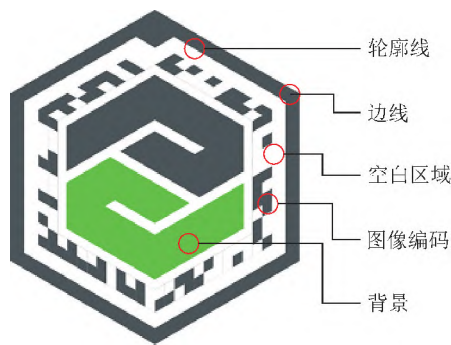


图 15 Vumark 标识组成部分

Fig.15 Components of Vumark

其中轮廓线是算法最先识别的部分,存在轮廓线时才能继续识别图像编码。图像编码是储存 Vumark 信息的区域,通过不同的图形组合储存不同的信息。通过 Vumark 实现对液压支架群识别跟踪的步骤如下:

(1)制作与液压支架群中液压支架数目相同的 Vumark,其中每一个 Vumark 的图像编码对应液压支架群中一台液压支架的 ID。

(2)将制作完毕的 Vumark 上传至云服务器的 AR 标识数据库中。

(3)将制作完毕的 Vumark 打印并粘贴到每台液压支架易于观察的位置。

(4)在 AR 设备检测到 Vumark 时,则会将其与数据库中的 Vumark 进行匹配,从而获取对应的液压支架 ID。

通过基于稀疏匹配的识别跟踪方法区分综采三机,通过基于 AR 标识的识别跟踪方法区分液压支架群中不同支架,2 种方法相结合,可实现对综采装备的完全识别跟踪。

4 数字孪生综采工作面 AR/VR 融合闭环监控技术

近年来,数字孪生技术日趋成为智能制造的源动力之一。相关学者提出一种基于数字孪生的综采工作面生产系统设计与运行模式^[19],并提出一种基于数字孪生理论的液压支架虚拟监测方法^[20]。ZHU

等将 AR 技术与数字孪生结合,开发了一种可视化数控铣床数字孪生 AR 应用程序^[21]。

基于配置有多传感器的物理综采装备+云服务器+AR 数字综采装备的数据传输链,搭建了虚实融合数字孪生数据通道,架构如图 16 所示,AR/VR 融合闭环监控即在该通道下实现。

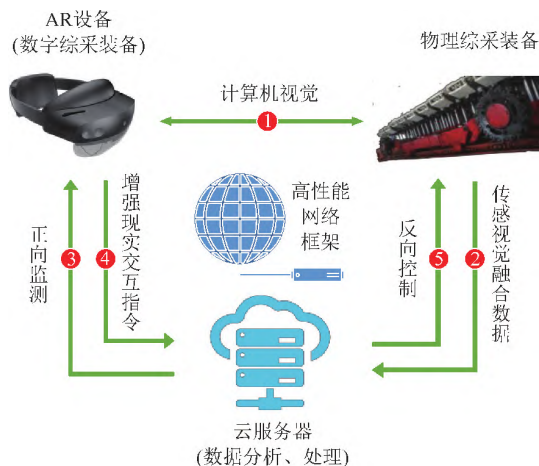


图 16 “虚实融合”数字孪生数据通道架构

Fig.16 “Virtual reality fusion” digital twin data channel architecture

4.1 视觉与多传感器融合的数字孪生综采工作面虚拟监测

笔者探索了一种计算机视觉与多传感器融合的综采装备位姿测量方法,从视觉与传感器 2 个渠道获取综采装备实时位姿数据,增加了数据来源。

监测逻辑与图 16 中①、②、③路径对应。物理综采装备可将其上布置的多传感器实时参数上传至云服务器,AR 设备可从云服务器中读取数据并与其获取的视觉数据融合,驱动数字综采工作面同步运行,实现“物理→数字”的可视化正向监测。

4.1.1 多传感器综采装备位姿测量

为满足监测需求,在采煤机与液压支架关键部位安装了相应的传感器以获得综采装备位姿信息,如图 17 所示。

(1)采煤机摇臂安装倾角传感器,牵引部安装轴编码器,机身安装惯导系统。将惯导系统与轴编码器进行采煤机复合定位^[22]。采煤机机身工作姿态可由惯导系统获得,摇臂倾角可由倾角传感器获得。

(2)需实时测量的液压支架参数包括底座姿态、支架高度、顶梁倾角和护帮板倾角。倾角传感器可以获得相应倾角。将倾角与液压支架结构件长度结合,可计算出支架高度。

(3)由于布置较为困难,且可靠性较低,故刮板输送机上一般不布置传感器,而是根据采煤机与刮板输送机的连接运行关系解算刮板输送机的实时三维

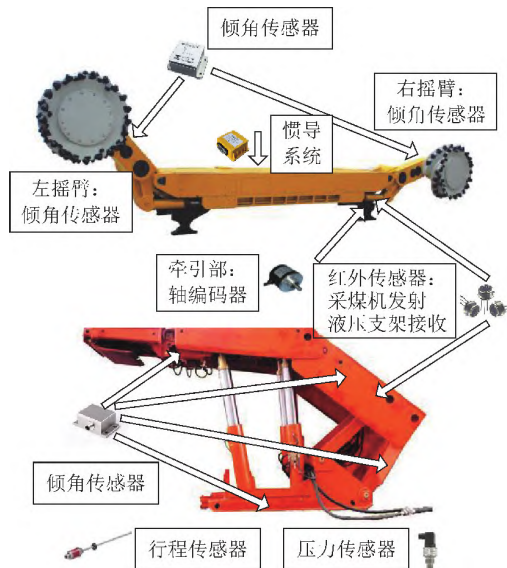


图 17 综采装备多传感器配置

Fig.17 Multi sensor configuration of fully mechanized coal-mining equipment

形态^[23]。

(4)采煤机与液压支架群通过通信线与 PLC 控制箱相连,PLC 控制箱通过无线通信模块将多传感器获取的综采装备位姿数据上传至云处理器模块以供后续分析处理。

理论上,传感器数目越多,对综采工作面状态感知越精确。然而在实际井下,盲目增加传感器会极大增加运行和维护成本,降低系统可靠性。因此,传感器的数目往往十分有限。此外,传感器存在自身基本测量误差,外界干扰、测量方法等也会带来一定的系统误差。如在使用传感器对刮板输送机轨迹进行三维形态反演时,测量结果与实际轨迹存在一定偏差^[24]。

4.1.2 计算机视觉综采装备位姿测量

针对传感器的局限性,以 AR 设备为工具从视觉的角度对综采装备绝对与相对位姿进行无接触测量,不会对综采工作面的运行造成影响。

(1)基于空间锚点坐标的综采装备位姿测量。

如 2.2.2 节中所述,AR 设备可在三维物体表面生成三角网格并添加碰撞体。这可确保锚点放置于物体表面,避免视觉偏差引起的测量误差。

通过手势交互在物体表面放置锚点,通过 `gameObject.transform.position` 语句获取锚点三维坐标。通过计算两锚点间距离或坐标差值获取液压支架支护高度、采煤机采高等与长度相关的参数;通过向量运算可获取与角度相关的位姿参数,如液压支架护帮板倾角、立柱与顶梁和底座的夹角等。

以液压支架支护高度为例对基于空间锚点坐标

的位姿测量方法进行验证,如图 18 所示。

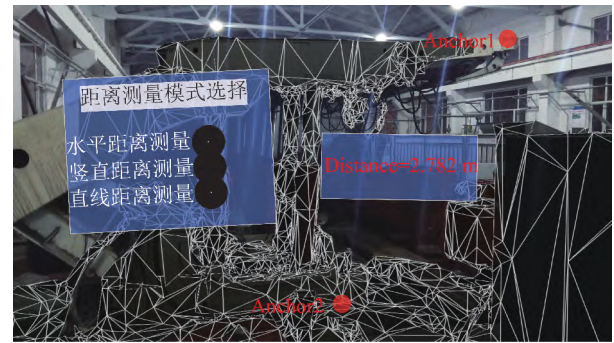


图 18 空间锚点测量液压支架支护高度

Fig.18 Measuring support height of hydraulic support by spatial anchor

在液压支架群中任选一台支架,使用卷尺手动测量支护高度。保持其他条件不变测量 5 次,平均测量值为 2.84 m。使用 HoloLens2 分别在支架最高点与地面放置两锚点,对支护高度进行测量。保持锚点放置位置不变,改变测量者站立位置,在 5 个不同位置各测 1 次,平均测量值为 2.791 m。测量结果见表 1,根据两方法的平均测量值,基于空间锚点坐标的综采装备位姿测量方法相对于手动测量方法相对误差为 1.74%,精度较可观。

表 1 手动测量与空间锚点测量结果对比

Table 1 Comparison of monitoring results of two monitoring methods

测量方式	位置一/m	位置二/m	位置三/m	位置四/m	位置五/m	平均值/m	相对误差/%
手动测量	2.840	2.850	2.840	2.840	2.830	2.840	1.74
空间锚点	2.815	2.807	2.729	2.768	2.836	2.791	

(2)基于特征点匹配的综采装备位姿测量。

空间锚点测量原理简单,操作便捷,但存在一个缺陷:测量时需手动选取锚点,若装备处于运动中,该方法获取的是锚点选取时刻而非计算时刻的位姿信息,在时间上产生了一定的迟滞,适合对在一定时间内不发生变化的位姿特征进行监测。

为提高监测的实时性,引入基于特征点匹配的测量方法。该方法是在 3.1 节中基于稀疏匹配的综采装备识别跟踪的基础上实现的。云服务器数据库中存有综采装备初始状态的完整特征点与描述符,AR 设备可提取特征点、计算描述符,与数据库中描述符进行匹配,计算该描述符与初始描述符的相对位姿,并与初始状态下的绝对位姿叠加,即为该时刻描述符的位姿,也即描述符所在装备的位姿。

以液压支架护帮板倾角为例对该方法进行检验。选取实验室 6 台液压支架,利用倾角传感器将其护帮板调整到不同的角度。将倾角传感器测量值与基于特征点匹配方法的测量值进行对比,结果如表 2 与图 19 所示。试验数据表明,6 组平均误差为 1.551%,能满足精度要求。

表 2 传感器与特征点匹配监测结果对比

Table 2 Comparison of monitoring results of sensors and feature point matching

液压支架 ID	传感器测量值/(°)	特征点匹配测量值/(°)	差值/(°)	相对误差/%
1	23.9	23.471	0.429	1.795
2	30.3	31.168	-0.868	2.865
3	57.5	57.029	0.471	0.829
4	45.1	44.679	0.421	0.933
5	78.1	78.902	-0.902	1.027
6	16.3	15.997	0.303	1.859

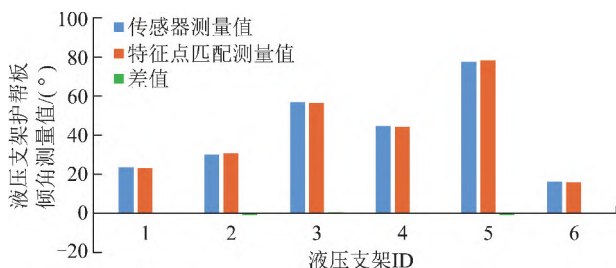


图 19 传感器与特征点匹配监测结果对比

Fig.19 Comparison of monitoring results of sensors and feature point matching

同理,综采装备间相对位姿关系也可通过当前两描述符相对位姿与数据库中初始两描述符相对位姿相对比计算而来。得益于特征点匹配的实时性,该方法可实时不间断地对综采工作面进行监测。

4.1.3 视觉与多传感器融合的综采装备位姿确定

“视觉与多传感器融合”在此是广义的,即并非通过某种单一固定的方式对视觉与多传感器数据进行组合运算,而是针对不同综采装备的不同位姿参数具体分析,采取不同的融合方式。以下对各综采装备及其之间的位姿确定方式分别展开叙述。

(1) 采煤机位姿确定。

将惯导系统+轴编码器复合定位结果与视觉测量结果采用支持向量机(SVM)进行多源数据融合,得到误差较低的位置测量结果;将惯导系统、倾角传感器测量数据分别与视觉测量数据进行多源数据融合,生成最终的机身工作姿态以及摇臂姿态倾角测量结果。

(2) 刮板输送机位姿确定。

将基于采煤机运行轨迹的刮板输送机形态解算

结果与视觉测量结果进行 SVM 多源数据融合生成最终的工作姿态测量结果;由于无法通过传感器获取刮板输送机各中部槽位置。

(3) 液压支架位姿确定。

将视觉测量数据作为液压支架实时位置测量结果;将倾角传感器测量数据与视觉测量数据进行 SVM 多源数据融合生成最终的支架各部件姿态测量结果。其中护帮板一般不布置倾角传感器,故以视觉测量数据为最终结果。

(4) 综采装备间相对位姿确定。

传感器通常只能反映单台综采装备的位姿信息,难以获取多台综采装备间的相对位姿关系,限制了对综采工作面运行状态的整体把握,故单独采用视觉测量结果确定综采装备间相对位姿。

4.1.4 综采工作面虚拟监测结果可视化

上文所述视觉与多传感器融合的综采装备位姿测量方法可获取大量绝对与相对位姿数据。但获取位姿数据的根本目的是将原始数据通过一定的模型转化为易于理解与接受的信息,达成对综采工作面运行状态的直观把握。

完成了监测数据的分析与处理,最终将监测结果可视化,包含 2 个部分:位姿与状态信息可视化、数字孪生工作面三维可视化。

(1) 位姿与状态信息可视化。① 对于综采装备绝对位姿,使用 AR 设备识别综采装备,设定 On Target Found() 语句对应的事件为从云服务器接收该综采装备的状态数据,通过 UGUI 选择想要监测的综采装备,即可在 AR 设备中进行显示;② 对于综采装备间相对位姿,不在 AR 设备中直接显示数据,而是与云服务器中的数据库比对,进行模式识别。以液压支架群为例,数据库中储存了理想支护状态及异常支护状态的数据集,系统会将当前监测到的相对位姿数据与数据集进行匹配,确定支架的支护状态并显示。

(2) 数字孪生工作面三维可视化。数字孪生工作面是基于综采装备以及煤层地质 VR 虚拟数字模型构建技术完成的。① 利用 CAD 三维精细化建模技术建立综采三机以及煤层地质数字孪生体^[25-26],并上传至云服务器中。可从云服务器中对数字孪生体进行调用,将其部署至 AR 设备;② AR 设备可从云服务器中读取视觉与多传感器融合的位姿信息,将其接入数字孪生综采工作面,驱动其与物理综采工作面同步运行,完成对工作面的 AR 可视化监测;③ 同时使用 AR 与 VR 两种技术,发挥各自所长,可兼顾综采工作面的局部与整体,使监测体系得到扩充。

4.2 数字孪生综采工作面 AR 反向控制

反向控制是数字孪生的高级阶段,只有实现反向控制,才能形成完整的数字孪生闭环^[27]。AR 反向控制从数据流向看与虚拟监测互逆,对应图 16 中④⑤两路径。数字工作面的数据变化可由物理工作面控制系统接收并驱动工作面产生动作。数据的分析与处理在云服务器中完成。具体实现原理如下:

(1)可在 AR 设备中通过 UGUI、自然手势、语音、凝视等 AR 交互手段对数字综采装备进行操控^[28],并将操控过程中数字综采装备的位姿状态实时上传至云服务器。

(2)物理综采装备从云端读取 AR 设备上传的位姿数据,并发送至采煤机控制系统与液压支架电液控系统,驱动物理综采装备与数字综采装备同步动作,实现“数字→物理”远程反向控制。

其中基于 UGUI 的交互与在集控中心进行控制类似,通过按下 AR 设备中的 UGUI 按钮可远程实现采煤机牵引启停、左右牵引、牵引加减速、左右摇臂升降、急停、截割启动,液压支架升降柱、推溜、移架等操作。

基于自然手势的交互是 AR 特有的交互手段,例如在数字工作面中握持液压支架立柱进行升降柱、抓取采煤机摇臂进行调高等。对采煤机进行运动学分析求解并运用 D-H 建模方法对液压支架进行逆运动学解析^[29],将解析结果以脚本的形式编入数字综采装备,使得在应用自然手势交互时,综采装备的运动符合其运动学规律。

5 试验验证

在实验室环境下搭建了煤矿综采成套试验系统

与综采工作面比例试验台,煤矿综采成套试验系统如图 11(a)所示,综采工作面比例试验台如图 20 所示。2 套试验系统均按照 4.1.1 节所述方式布置了传感器,且分别连接具有 Wifi 通信模块的 PLC 控制箱和 Arduino 单片机,用于收发数据。依据本文提出的关键技术,使用 Unity3D 引擎开发了 AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控应用程序,并集成了同地 AR 无缝协作与远程 AR 视频会议功能。将应用程序部署至各平台,并以 HoloLens2 为主要终端,在通用高效可扩展云协同异步网络框架下进行测试。

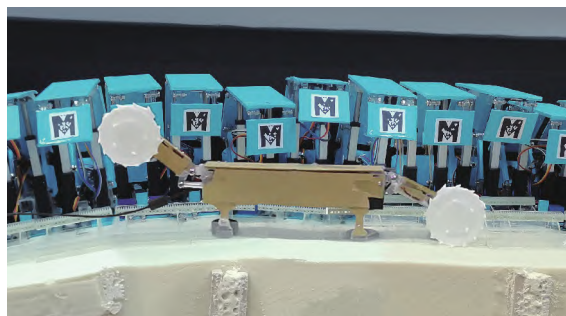


图 20 综采工作面比例试验台

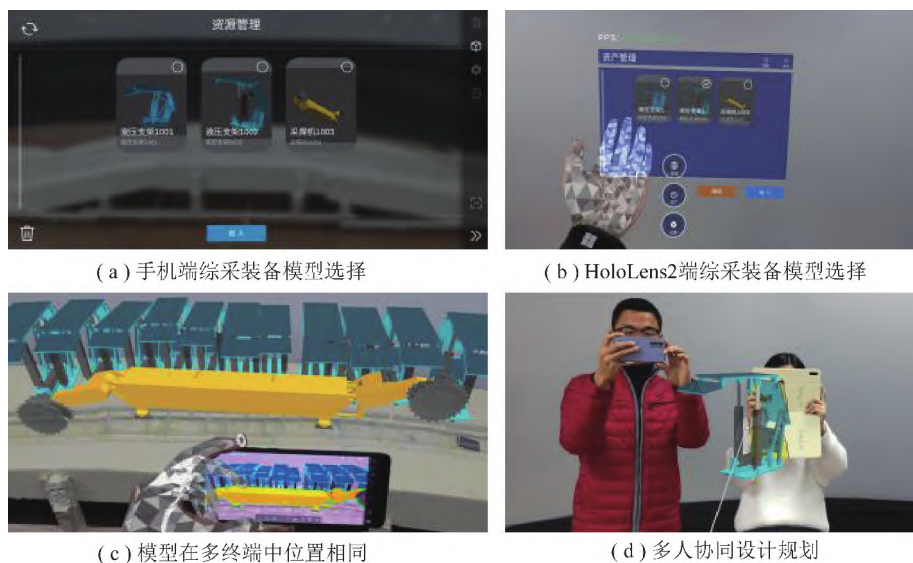
Fig.20 Proportion experimental platform of fully mechanized coal-mining face

5.1 同地 AR 无缝协作与远程 AR 视频会议功能测试

5.1.1 同地 AR 无缝协作功能测试

采用一台 HoloLens2 头显、一台平板电脑及一部手机作为同地 AR 无缝协作的 3 个终端,输入云服务器 IP 地址接入网络,完成终端连接。

在完成空间坐标校准后,任一终端可在模型选择界面中选择所需的数字综采装备应用到场景中,其余终端可在真实世界中同一位置观察到数字综采装备,且任一终端均可对数字综采装备进行交互,如图 21 所示。



(c) 模型在多终端中位置相同

(d) 多人协同设计规划

图 21 同地 AR 无缝协作功能测试

Fig.21 Test of co-location AR seamless collaboration

经试验验证,该功能易于操作,交互性强,空间中同一 AR 影像在不同终端中定位误差在 2 cm 内,可用于智能监测控制过程中的同地交流协作。

5.1.2 远程 AR 视频会议功能测试

在煤矿综采成套试验系统中测试远程视频通话效果,并将平板电脑作为发送端,HoloLens2 作为接收端对全息辅助标注进行测试。

两终端连接到服务器后,任一方点击对方用户名即可进行视频通话呼叫。通话过程中,接收端 HoloLens2 朝向液压支架,发送端在接收到的视频画面中对支架立柱进行标注并辅以语音讲解,接收端 HoloLens2 中可看到发送端做出的全息标注。测试过程如图 22 所示。

经测试,视频通话过程中画面全程流畅,帧率较



图 22 空间全息标注远程专家实时辅助指导系统测试

Fig.22 Test of real-time spatial holographic mark auxiliary guidance system for remote experts

高,延迟较低且标注误差较小,可用于智能监测控制过程中的远程交流协作。

5.2 综采工作面 AR 识别跟踪与虚实映射智能监控测试

由于基于计算机视觉的综采工作面 AR 识别跟踪是后续监控的前提,若无法完成识别跟踪就无法完成监控,故只需对监测控制功能进行测试,便可同时证明识别跟踪的有效性。

5.2.1 综采工作面智能虚拟监测测试

(1)在综采工作面比例试验台对状态监测信息的可视化进行测试。佩戴 HoloLens2 对试验台进行观察,应用程序可综合传感器与视觉信息将综采装备运行状态直观显示在用户界面,如图 23 所示。

经测试,应用程序能够完成对综采装备的状态识别,对液压支架群的咬架、挤架 2 种异常支护状态做出了判断。

(2)在煤矿综采成套试验系统、云服务器、数字工作面 3 者的数字孪生闭环中对监测效果进行测试。为使测试效果更直观,将数字工作面部署在物理工作面附近,可通过 HoloLens2 同时观察到两者,如图 24(a)所示。

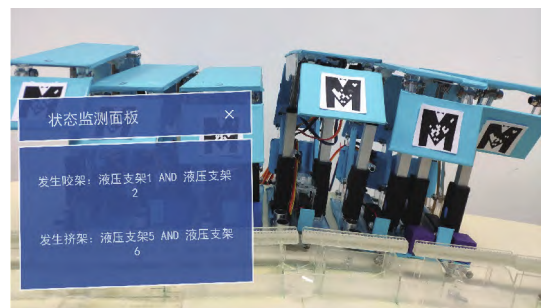


图 23 液压支架异常支护状态监测

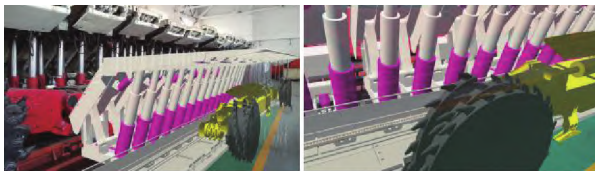
Fig.23 Abnormal support condition monitoring of hydraulic support

在煤矿综采成套试验系统运行过程中用户可对数字工作面运行情况进行观察,并在监测界面上获取位姿信息,如图 24(b)所示。

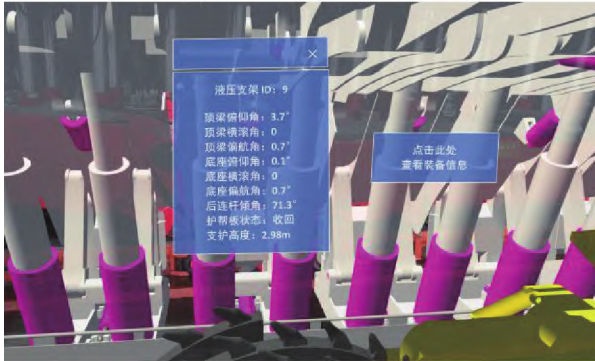
测试结果表明,监测过程体现了虚实融合的特性,具有高度的真实性与沉浸感,且数字工作面的动作与真实物理工作面同步,无明显延迟。

5.2.2 综采工作面 AR 智能控制测试

(1)在实验室环境下,使用 AR 全息 UGUI 对煤矿综采成套试验系统进行反向控制,顺利完成了液压支架升降柱、推溜、移架以及采煤机摇臂调高等操作。



(a) 数字孪生增强现实监测画面



(b) 监测系统显示的位姿信息

图24 AR 监测效果验证

Fig.24 Effect verification of AR monitoring

试验表明,AR 全息 UGUI 界面直观,操作逻辑简单,操控效果与集控中心相同,且在灵活性上远胜于集控中心,可实现随时随地远程反向控制。

(2)使用自然手势对综采工作面比例试验台进行反向控制,将液压支架数字孪生体叠加至试验台,抓取数字液压支架立柱并移动,成功驱动液压支架完成升降柱,如图 25 所示。



图25 通过自然手势控制液压支架单机

Fig.25 Single hydraulic support controlled by natural gesture

经试验验证,该控制方式能够遵循运动约束控制综采装备单机,交互方式自然,学习成本低,是一种更符合用户心理的控制方式。

6 应用分析

6.1 应用现状

在 5G 技术全面研发应用的大背景下,煤矿企业对于利用 VR 技术构建数字孪生综采工作面需求旺盛。目前,本课题组 VR 虚拟监控技术已在神东矿区某煤矿等取得实际应用,在生产调度中心完成综采工作面三维可视化监控(图 26),应用效果获得煤矿企业的充分认可,显著提升了煤矿安全高效生产水平。

而 AR 监控井下应用的主要问题为:市面上还没



图26 综采工作面 VR 监控井下实际应用

Fig.26 Practical application of VR monitoring in fully mechanized coal-mining face

有符合井下防爆安全标准的 AR 设备,无法达到井下要求。因此在实际综采工作面环境下完成对 AR/VR 融合监控验证试验的条件尚不成熟。未来希望通过产学研合作与协同攻关方式,设计可为 AR 设备提供防爆功能的装置及结构,力求尽快使 AR 设备达到安全要求并实现井下应用。

6.2 应用展望

5G 技术能够很好地满足云端实时渲染和虚实融合操控等需求,有助于 AR 技术走上发展的快车道^[30]。5G 网络大带宽、高速率、低时延、广连接的特点为 AR/VR 技术重新定义煤矿生产的协同交互创造了天然条件。结合煤矿井下综采工作面实际需求,提出以下几种典型应用场景:

(1)井上井下协同巡检运维。综采装备的智能化程度越来越高,系统也愈加复杂,综采过程中的巡检运维往往需要多人协作或由远程专家协助完成。AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控集成了 PC 端 VR 与移动端便携式 Web AR/VR,具有完成井上井下协同互动式巡检运维的能力,为综采工作面安全高效开采提供了有力支撑。

(2)综采远程可视化实时监控。实时性监控是智能化综采的卡脖子难题,而在 5G 技术高速率、低时延特性的加持下,AR/VR 融合驱动的综采工作面远程检测与控制可兼顾控制的可视化与实时性,从综采工作面整体与局部实现与井下工况的无缝对接,为远程实时可视化操控提供指导,进一步完善综采工作面智能监控体系。

(3)透明化工作面智能开采。AR 设备可将扫描、视频数据充分融入综采工作面智能开采过程中,加强环境感知与信息集成。AI+AR/VR 深度融合的发展趋势助力了复杂生产环境下的智能分析与决策。随着多种异构物联网设备的不断接入,AR/VR 融合驱动的综采工作面智能监控能够和巡检机器人、采矿机器人等形成一个协同运行的智能开采大系统,为实现透明化综采工作面开采奠定坚实基础。

7 结 论

(1) 通用高效可扩展端云协同异步网络框架下的综采工作面多监控终端协同工作技术, 可以创造一个可供多人、多终端协作共享的基础环境, 在此环境下可有效提高综采工作面智能监控效率。

(2) 计算机视觉的引入可以实现对全综采装备的高效稳定识别, 为综采工作面虚拟监测增加了另一重要数据来源, 提高了监测的准确性、有效性与稳定性。

(3) AR 技术以其虚实融合、环境感知能力强的特点, 巧妙弥补了 VR 监控的不足。集成 AR 与 VR 技术的优势, 发挥两者所长, 可形成兼顾综采工作面局部与整体、虚实融合的全时空综合监控技术架构, 完善了综采工作面智能监控体系。

(4) 使用 AR 人机交互方式对综采工作面进行反向控制, 在实现传统控制功能的基础上可提高控制系统的集成性, 降低学习成本与操作难度, 是一种契合人机工程学基本思想的控制方式。

(5) 在合理设计具备防爆功能的矿井用 AR/VR 穿戴设备前提下, AR/VR 技术有望在 5G 技术加持下实现井上井下协同巡检运维、综采远程可视化实时监控、透明化工作面智能开采等井下实际应用, 敦促煤炭行业生产模式的变革。

参考文献 (References):

- [1] 发展改革委, 能源局, 应急部, 等. 关于加快煤矿智能化发展的指导意见 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/05/content_5487081.htm, 2020-02-25.
Development and Reform Commission, Energy Bureau, emergency department, et al. Guiding opinions on accelerating intelligent development of coal mine [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengce-ku/2020-03/05/content_5487081.htm, 2020-02-25.
- [2] 王国法, 刘峰, 孟祥军, 等. 煤矿智能化 (初级阶段) 研究与实践 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 1-36.
WANG Guofa, LIU Feng, MENG Xiangjun, et al. Research and practice on intelligent coal mine construction (primary stage) [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 1-36.
- [3] 刘峰, 曹文君, 张建国, 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.
- [4] 毛善君, 崔建军, 令狐建设, 等. 透明化矿管平台的设计与关键技术 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3539-3548.
MAO Shanjun, CUI Jianjun, LINGHU Jianshe, et al. System design and key technology of transparent mine management and control platform [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3539-3548.
- [5] 谢嘉成, 王学文, 李祥, 等. 虚拟现实技术在煤矿领域的研究现状及展望 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 53-59.
XIE Jiacheng, WANG Xuewen, LI Xiang, et al. Research status and prospect of virtual reality technology in field of coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 53-59.
- [6] 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.
- [7] 任怀伟, 赵国瑞, 周杰, 等. 智能开采装备全位姿测量及虚拟仿真控制技术 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 956-971.
REN Huaiwei, ZHAO Guorui, ZHOU Jie, et al. Key technologies of all position and orientation monitoring and virtual simulation and control for smart mining equipment [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 956-971.
- [8] 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 Shibao, et al. Digital twin for smart coal mining workplace: Technological frame and construction [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 1925-1936.
- [9] 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.
- [10] ANDHAN Rahul Buddhhan, SUBHA P Eswaran, EZHIL Buddhhan D M, et al. Even driven multimodal augmented reality based command and control systems for mining industry [J]. Procedia Computer Science, 2019, 151: 965-970.
- [11] 成董浩, 浑宝炬, 靳凯. 增强现实技术在矿井通风系统中的应用前景分析 [J]. 工矿自动化, 2018, 44(8): 10-14.
CHENG Donghao, HUN Baoju, JIN Kai. Application prospect analysis of augmented reality technology in mine ventilation system [J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(8): 10-14.
- [12] 张旭辉, 张雨萌, 王岩, 等. 数字孪生驱动的设备维修 MR 辅助指导技术 [J/OL]. 计算机集成制造系统: 1-13 [2021-07-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200312.1004.002.html>.
ZHANG Xuhui, ZHANG Yumeng, WANG Yan, et al. DT-driven aided guidance of equipment maintenance using MR [J/OL]. Computer Integrated Manufacturing Systems: 1-13 [2021-03-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20200312.1004.002.html>.
- [13] EGGER J, MASOOD T. Augmented reality in support of intelligent manufacturing-A systematic literature review [J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 140: 106195.
- [14] AZUMA R T. A survey of augmented reality [J]. Teleoperators and Virtual Environments, 1997, 6(4): 355-385.

- [15] GALATI R, SIMONE M, BARILE G, et al. Experimental setup employed in the operating room based on virtual and mixed reality: analysis of pros and cons in open abdomen surgery [J]. *Journal of Healthcare Engineering*, 2020, 2020.
- [16] VORRABER W, GASSER J, WEBB H, et al. Assessing augmented reality in production: Remote-assisted maintenance with HoloLens [J]. *Procedia CIRP*, 2020, 88: 139–144.
- [17] WANG Binbin, XIE Jiacheng, WANG Xuwen, et al. A new method for measuring the attitude and straightness of hydraulic support groups based on point clouds [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2021, 46(12): 1–19.
- [18] WAGNER D, REITMAYR G, MULLONI A, et al. Pose tracking from natural features on mobile phones [A]. 2008 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality [C]. IEEE, 2008: 125–134.
- [19] 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 with 运行模式 [J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1381–1391.
- XIE Jiacheng, WANG Xuwen, YANG Zhaojian. 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.
- [20] XIE Jiacheng, WANG Xuwen, YANG Zhaojian, et al. Virtual monitoring method for hydraulic supports based on digital twin theory [J]. *Mining Technology*, 2019, 128(2): 77–87.
- [21] ZHU Zexuan, LIU Chao, XU Xun. Visualisation of the digital twin data in manufacturing by using augmented reality [J]. *Procedia Cirp*, 2019, 81: 898–903.
- [22] 李昂, 郝尚清, 王世博, 等. 基于 SINS/轴编码器组合的采煤机定位方法与试验研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2016(4): 95–100.
- LI Ang, HAO Shangqing, WANG Shibo, et al. Experimental study on shearer positioning method based on SINS and Encoder [J]. *Coal Science and Technology*, 2016(4): 95–100.
- [23] 乔春光. 采煤机与刮板输送机协同位姿监测理论与方法研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- QIAO Chunguang. Research on theory and method of coordinate position monitoring for shearer and scraper conveyer [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [24] SHI Hengbo, XIE Jiacheng, WANG Xuwen, et al. An operation optimization method of a fully mechanized coal mining face based on semi-physical virtual simulation [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2019, 7(1): 147–163.
- [25] 谢嘉成, 王学文, 杨兆建, 等. 综采工作面煤层装备联合虚拟仿真技术构想与实践 [J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(5): 162–168.
- XIE Jiacheng, WANG Xuwen, YANG Zhaojian, et al. Technical conception and practice of joint virtual simulation for coal seam and equipment in fully-mechanized coal mining face [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(5): 162–168.
- [26] 王学文, 葛星, 谢嘉成, 等. 基于真实煤层环境的液压支架运动虚拟仿真方法 [J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(2): 158–163.
- WANG Xuwen, GE Xing, XIE Jiacheng, et al. Virtual simulation method of hydraulic support movement based on real coal seam environment [J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(2): 158–163.
- [27] TAO Fei, QI Qinglin, LIU Ang, et al. Data-driven smart manufacturing [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2018, 48: 157–169.
- [28] ROSEN E, WHITNEY D, PHILLIPS E, et al. Communicating and controlling robot arm motion intent through mixed-reality head-mounted displays [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2019, 38(12–13): 1513–1526.
- [29] GE Xing, XIE Jiacheng, WANG Xuwen, et al. A virtual adjustment method and experimental study of the support attitude of hydraulic support groups in propulsion state [J]. *Measurement*, 2020, 158: 107743.
- [30] 王国法, 赵国瑞, 胡亚辉. 5G 技术在煤矿智能化中的应用展望 [J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 16–23.
- WANG Guofa, ZHAO Guorui, HU Yahui. Application prospect of 5G technology in coal mine intelligence [J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 16–23.