



移动扫码阅读

李梅,姜展,姜龙飞,等.三维可视化技术在智慧矿山领域的研究进展[J].煤炭科学技术,2020,48(8):153-162. doi:10.13199/j.cnki.est.2021.02.019
 LI Mei, JIANG Zhan, JIANG Longfei, et al. Research progress on 3D visualization technology for intelligent mine [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 153-162. doi:10.13199/j.cnki.est.2021.02.019

三维可视化技术在智慧矿山领域的研究进展

李梅¹,姜展¹,姜龙飞¹,孙振明²

(1.北京大学遥感与地理信息系统研究所,北京 100871;2.中国矿业大学(北京)能源与矿业学院,北京 100083)

摘要:三维可视化系统是智慧矿山建设的空间信息基础支撑平台(4DGIS)的有机组成部分。首先介绍了三维可视化发展历程;其次,结合当前三维可视化技术发展趋势,从三维数据获取与建模、三维软硬件技术、三维专业应用3个层次开展全方位的技术归纳与总结。重点阐述了透明工作面勘探技术及三维建模方法,介绍了三维巷道数据获取的激光LiDAR、全景图像和全景视频、立体视觉和深度相机等新技术,以及WebGL、云渲染等前沿网络可视化开发技术,探讨了虚拟现实、增强现实硬件技术进展。在应用方面,剖析了三维可视化系统在矿山领域应用的难点问题,指出一个通用的三维可视化或者三维地理信息系统是远远不够的,三维可视化系统应该从可视化展示局限性,逐渐深入到透明化勘探、智能化采矿设计、智慧通风、安全生产综合管理、工业智能管控、地表环境监测、灾害事故反演、虚拟仿真培训等领域形成各具特色的专题应用。此外,还介绍了最新的CityGML、Geo3DML、三维瓦片等国际三维数据标准。

关键词:智慧矿山;三维可视化;地质建模;巷道数据获取;三维标准;BIM;虚拟现实

中图分类号:TD67 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2021)02-0153-10

Research progress on 3D visualization technology for intelligent mine

LI Mei¹, JIANG Zhan¹, JIANG Longfei¹, SUN Zhenming²

(1. Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Three-dimensional visualization system is a part of spatial information infrastructure platform (4D GIS) of intelligent mine. Firstly, this paper introduces the history of 3D visualization technology for mining industry. Secondly, the paper summarizes the latest research progress of 3D data capture and modeling, 3D visualization software and hardware, 3D visualization application, 3D data standard with the current cutting-edge 3D visualization technology. In this part, this paper mainly introduces the technology of geology exploration and 3D modeling for transparent longwall face, the several new surveying technology including LiDAR, panorama and stereoscopic and depth camera of 3D roadway data capture, the advance technology of WebGL, cloud rendering, virtual reality and augment reality. Thirdly, the paper analyses the current shortcomings of 3D visualization applications, points that a general 3D visualization system or GIS system is far from enough, the system needs to support the various professional domains, such as transparent exploration, mine design, ventilation, work safety and management, industrial intelligent management and control, environment monitoring, disaster simulation, virtual simulation and training and so on. Finally, the paper introduces the international 3D data standards such as CityGML, Geo3DML, 3D Tiles.

Key words: intelligent mines; 3D visualization; geologic modeling; roadway data acquisition; 3D standard; BIM; virtual reality

0 引言

煤矿的信息化建设已经从数字矿山建设逐渐转向了智慧矿山,现在普遍认为是智慧矿山初级阶

段^[1-2]。伴随着煤矿信息化的进程,地理信息系统的研究和应用一直都受到煤矿行业的重视。随着近2年来智慧矿山的建设,专家学者对三维可视化技术从各自的角度加以解读,提出了玻璃地球^[3-4]、透

收稿日期:2020-09-01;责任编辑:赵瑞

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774281);内蒙古自治区科技厅重大专项资助项目(2015-2019)

作者简介:李梅(1978—),女,陕西岐山人,副教授,博士。E-mail:mli@pku.edu.cn

明矿山^[5]、透明工作面^[6]、AR/VR^[7]、三维^[8]/四维地理信息^[9]、虚拟地理环境^[10]等新的学术名词,也涌现出现了大量的专业化三维可视化系统^[11-15]。

煤矿信息属于空间信息的范畴,煤矿生产过程与三维空间有密切关系。相比其他行业,煤矿行业的三维可视化信息系统建设历史更早,内容也更加丰富。回顾整个三维可视化技术的发展,早在 20 世纪 80 年代,就出现了许多三维地质建模和可视化的系统,具备了一定的三维空间数据处理功能,为地质、矿山领域的地质数据处理、分析及显示提供一定的功能^[16-20]。在采矿领域出现了 GOCAD、Surpac、MicroMine、DataMine、Whittle 等三维矿山信息系统。在 20 世纪 90 年代后期,随着测绘地理信息技术发展,三维可视化技术在城市领域蓬勃发展,出现了地学三维技术与城市三维技术各自发展的局面^[21]。

相对于国外三维可视化技术应用,在我国矿山领域的三维可视化研究可以分为 3 个阶段。第 1 阶段(20 世纪 80 年代到 2006 年左右),国内开始了三维地质建模方面的研究,这类系统是服务于地质勘探,具有三维地质建模和储量计算等功能。第 2 阶段(2006—2016 年),随着数字矿山建设的过程,出现了三维数字矿山管理平台等,这些系统在三维地质测量数据的基础上,实现井上下三维可视化浏览,同时集成了煤矿安全和生产相关的各类动态数据,能够在桌面端和调度大屏上展示整个矿井的安全生产运行状态,为煤矿的生产过程和设备运行提供可视化的监控及管理服务。第 3 阶段(2016 年至今),随着技术的不断进步,三维可视化系统从可视化层面逐渐转向应用层面。传统的三维可视化系统主要依赖于地质、测量数据自动建模及人工手动建模,而且以宏观信息展示为主。智能矿山建设中,三维可视化平台除了作为矿井数据集成与展示的平台,还逐渐深入到各个细分领域,如透明化勘探、采矿设计、通风模拟、综合自动化集成、三维智能管控、地表环境监测、灾害事故反演、虚拟仿真培训等,三维可视化技术已经成为智慧矿山建设必不可少的支撑技术。

当前,矿山领域的三维数据获取、三维数据建模、三维数据标准、三维可视化平台等核心技术正在处于攻坚阶段,三维可视化应用还无法满足现场实际需求。针对这些问题,笔者结合当前技术发展趋势,对三维可视化技术在智慧矿山中研究与应用加以总结,并提出了下一步研究和应用的方向,以供读者借鉴参考。

1 三维可视化技术在智慧矿山领域的研究及应用方向

智慧矿山是将云计算、物联网、大数据、虚拟现实、数据挖掘等新技术结合起来,实现矿山生产流程的智能化决策和管理的过程^[22]。地理信息系统为智慧矿山建设提供了基础的空间信息服务。在智慧矿山建设中,在精准探测与透明地质、工业机器人与 AI、少人/无人开采、精确地图与地下导航、智能调度控制、智能物流、设备故障智能诊断、环境监测与生态修复等领域都要利用地理信息作为空间位置参考。

在本文中,三维可视化技术不是指传统意义上的科学计算可视化^[23],而是指智慧矿山建设中三维空间信息数据获取、三维空间数据建模、三维软硬件建设、三维矿山专题应用等系列技术方法。三维可视化技术是地理信息技术中的一个重要组成部分。

目前三维地理信息系统或者三维可视化技术大多是停留在“查一查、看一看”的层次。最近的各类智慧矿山发展实施方案中,一般将三维可视化或者三维地理信息系统项目作为具体的建设内容。而实际上,由于三维可视化技术属于底层服务平台,涉及的应用领域各有不同,一个完全通用的三维地理信息系统平台无法满足各个智慧矿山建设的空间信息需求。针对这一问题,笔者提出了智慧矿山中的三维可视化技术和应用方向,如图 1 所示。

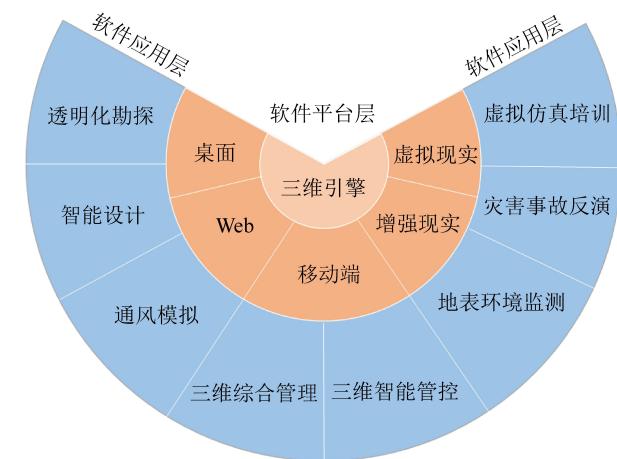


图 1 智慧矿山三维可视化研究和应用方向

Fig.1 Research and application of 3D visualization for smart mine

从图 1 可以看出,整个三维可视化技术从技术架构上可以分为 2 个层次:

1) 底层为软件平台层,以三维可视化系统为核心开展研究。通过三维引擎,构建桌面、Web、移动

端等可视化系统,同时支持虚拟现实和增强现实硬件设备,以达到良好的可视化效果。

2)上层为软件应用层,在三维可视化平台上,开展透明化勘探、智能设计、通风模拟、综合自动化集成、三维智能管控、地表环境监测、事故灾害模拟和虚拟仿真培训等。这些应用各有特点,又息息相关,需要针对性地开展数据获取、数据建模和应用功能开发。

2 三维数据获取与建模技术

三维数据获取与数据动态建模能力是制约矿山可视化技术深入应用的关键性问题。下文重点对三维地质模型数据获取和三维巷道模型数据获取技术进行综述。

2.1 三维地质模型的数据获取与建模技术

煤矿地质工作是由灰色到白色的一个透明化过程^[24]。三维地质模型是矿山三维可视化系统的重要组成部分,通过钻探、物探等技术获得地下煤层及其顶底板岩层、含水层、断层、冲刷带、煤层露头等地质信息,开展三维地质建模与可视化,建立煤层、标志层、断层、陷落柱、采空区、积水区、高瓦斯聚集区等三维模型,为用户提供了直观可视的矿山地质环境。

地面钻探、井下钻探、现场揭露数据、定向钻进等是三维地质建模中的最准确、最有效的三维数据。然而缺点是数据量少、空间分布不均。因此仅依靠这些已知控制点开展三维地质建模与可视化,不能满足当前透明地质的需求。

当前的物探手段多种多样,包括三维地震、高密度电法、瞬变电磁、槽波探测、地质雷达、微震监测等,是围绕安全开采,以“构造解释”为目标,圈定煤系地层中的各类构造。这些方法能够获得精细化的解释数据,并建立高精度的三维地质模型。在透明工作面地质建模方面,需要得到高精度的地层界线、构造的空间位置以及煤厚信息,在此主要选择与透明工作面三维地质建模相关的三维地震、槽波探测、探地雷达等技术进行介绍。

地面三维地震勘探是物探中最常见的手段,其原理为根据人工激发地震波在地下岩层中的传播路线和时间,探测地下岩层界面的埋藏深度和形状。以三维地震为基础,结合各种钻孔、测井、地质素描、地质揭露等,三维地震动态解释技术能够较为精确地解释出断层、陷落柱、采空区等。三维地震技术具有覆盖面广、探测深度大、横向分辨率高的特点,是目前应用最为广泛的地球物理勘探技术。

与地面三维地震勘探不同,槽波地震探测^[25]是一种精细化的工作面物探技术。其原理为在工作面设置分布式地震仪,通过采集槽波信号,能够探测到采煤工作面开采推进前方的断层、陷落柱、冲刷及变薄带等地质异常。槽波探测对于工作面中的构造探测有效,对于工作面煤厚解释精度能够达到米级。

探地雷达是一种精细化工作面物探技术。主要工作原理是利用宽带高频时域电磁脉冲波的反射探测目标。通过对雷达图像的判读,判断出地下目标物的实际结构情况,能够有效识别工作面推进前方小断层、冲刷破碎带等^[26]。地质雷达具有高精度、高效率、高便捷性等特点,目前也正在尝试应用于煤岩层界线等方面研究。

上述物探手段的数据,通过人工解释后,生成带地理坐标的地质点数据、线数据、面数据和体数据模型,结合钻孔、地质素描等已知控制点数据,开展三维地质建模和可视化表达。在矿山领域三维地质建模多选用不规则三棱柱模型(TPN)作为建立地质模型的基本体元,也可以采用平行轮廓线或者交叉剖面等表达地层界线或构造的不规则表面。在地质建模数据更新方面将已知点加入模型后,采用平面-剖面对应算法、膨胀搜索算法、样条曲面算法、平滑过渡算法等关键技术,对原地层模型进行局部或整体细分后重构地层模型^[27]。

2.2 三维巷道数据采集与建模技术

除了三维地质模型数据,矿山三维可视化系统另一个重要的数据来源是巷道三维模型。传统的测绘技术以电子经纬仪、测距仪和全站仪为主,将导线成果点展绘到采掘工程平面图、地表工业广场图、地质地形图等之上。在三维可视化系统中,巷道三维模型多采用巷道中心线加巷道断面方法拉伸建模,自动处理巷道交叉点。这种方法优点在于数据源简单,自动化建模程度高;缺点在于缺乏三维模型的细节,只能用于宏观展示。井上工业广场、井下巷道重点场所都是矿山生产活动的主要场所,如何快速、高效、低成本获取井上下重点场所三维数据,并在此基础上快速建模是三维可视化系统的难点问题。针对这一问题,笔者重点介绍几种新型三维数据获取和建模方法,如激光扫描仪、全景技术、深度相机等技术。

2.2.1 激光 LiDAR 数据获取与建模技术

三维激光 LiDAR 技术是一种非接触式主动测量方法。三维激光扫描仪原理是通过激光雷达脉冲信号扫描,快速获得目标的三维坐标和反射光强,利用三维建模软件进行建模,生成扫描物体的三维图

像和可量测点阵数据，并转化为多种输出格式的图形产品。目前我国矿山测量领域中使用的三维激光扫描设备及软件主要来源于德国 Callidus 公司、奥地利 Rigel 公司、美国 Leica 公司和 Trimble 公司、澳大利亚 Maptek Pty 公司、加拿大 Optech 公司、英国 MDL 公司等，这些公司也专门开发了面向矿山应用的全站仪和数码相机一体化设备^[28-29]。德国 Callidus 公司 GmbH 型距离精度为 5 mm/hm，美国 Leica 公司 ScanStationP30/P40 型距离精度为 $1.2 \text{ mm} \pm 10 \times 10^{-6}$ 。激光扫描仪具有非接触、高精度、高时效、信息量大等优势，主要应用于矿区边坡监测、露天矿储量管理、地表沉陷监测等地表测量和监测^[29]。

激光扫描仪在井下测量中应用比较少，主要原因在于很多商业化的三维激光扫描设备不具备防爆功能，井下高温、潮湿、多粉尘也会影响激光的测量精度^[30]。近 2 年来，智能工作面提出了高精度设备定位的需求，利用激光 LiDAR 结合惯导设备、测量机器人对开采环境的设备进行空间绝对定位，实现工作面地质模型与开采装备的空间耦合，是智能工作面研究的难点问题。已经引用澳洲技术 LASC (Longwall Automation System) 技术开展应用并取得了一定的进展，但是激光点云在智能工作面的应用还需要深入研究^[6]。

2.2.2 全景图像和全景视频数据获取与建模技术

全景图像获取的 2 种方式：一是以图像绘制为基础的全景图像拼接技术，利用鱼眼相机只需很少几幅照片拼接即可生成全景图像；另一种是全景相机，根据预先标定的相机参数，全自动获取全景图像。全景视频则是通过 3D 摄像机进行全方位 360° 进行拍摄的视频。目前主流全景数据采集是将全景相机搭载在全景采集车、无人机、定制背包之上，国内外大型的互联网公司，如谷歌、腾讯等均定制了不同的全景相机进行全景影像的采集，实现了重点城市和区域的全景数据获取。德国 Panono 公司开发出一种抛向空中、在最高点拍摄全景照片的球形相机 Panono 分辨率达到 1 亿 800 万像素。全景相机 Insta360Pro2 可以安装在手机上，形成 $12\ 000 \times 1\ 200$ 十连拍合成 12K 超高分辨率全景图像，也支持可以全方位 360° 拍摄视频，用户在观看视频，通过鼠标拖拽可以随意调节视频上下左右进行观看。同时，全景影像与激光点云、深度相机等结合，例如多传感器城市实景移动测量系统，集成了激光扫描仪和 Ladybug3 全景相机，实现可量测和空间分析的全景浏览方式。

全景影像和全景视频是一种新型的三维数据获取方法，可代替复杂的三维场景几何建模和绘制，具有全视角、虚拟真实和高现势性等特点，同时具有高分辨率和三维立体效果等优势，与虚拟现实结合，能够快速展示场景的沉浸感效果，给人们带来一种真实感的体验。全景技术可以有效解决巷道建模数据单调的问题，搭建动态交互的虚拟空间，为煤矿安全管理和生产提供保证。全景技术的缺点在于，后台没有三维点云模型的支撑，只能以浏览和图像识别为主。全景技术在煤矿井下应用还不多见，主要原因在于井下环境单一、光线差，没有专门的矿井全景数据采集设备，全景图像拼接融合难度较大，在数据处理上还不能实现全自动化^[31]。

2.2.3 双目立体视觉/深度相机三维数据获取与建模技术

1) 基于双目立体视觉多视几何技术。立体视觉技术通过采集序列化影像，利用三角测量原理从多幅图像中检测特征点并进行匹配计算，得到相机参数，恢复所拍摄景物的深度信息或者在空间中的三维信息，即从二维成像影像中恢复三维信息^[32]。多视几何技术不需要专业的测量相机或者摄影经纬仪就可以自动解算出目标的相对空间位置信息，最终得到可量测的 3D 模型。多视几何三维建模算法主要有 SIFT、SURF、GHT 等^[33]，在国外成熟软件有 PhotoModeler、Photosynth、Arc3D 等。尤其是 PhotoModeler 将“近景测绘”和“三维建模”2 个独立的工作环节集成在一起，提升了高精度三维建模的效率。

基于双目立体视觉多视几何技术已成熟应用于医学、建筑、浮雕等模型的自动建模，对于煤矿井下环境来说，巷道内部多为光线不足、内壁纹理稀疏的封闭或部分封闭空间，稀疏的纹理和较弱的光线会增加图像数据特征点识别的难度，因此需要增加人工编码点和灯光照明^[31]。此外，多视几何技术的建模精度只与相机内部参数和建模算法有关，且需要较大的人工辅助测绘，容易导致累计误差，从而影响模型精度。

2) 基于 TOF 和结构光的深度相机技术。针对多视几何重建方法精度不高、深度信息丢失、处理速度慢和实时性差的问题，深度相机技术逐步成为继多视几何技术后又一个三维数据获取热门技术。常见的深度相机技术有 2 种：TOF 飞行时间法和三维结构光法。其中，TOF 飞行时间法是通过计算发射和接收光信号的飞行时间来得到被测目标的深度信息，厂商有 PMD、Basler、Optima、微软等，产品有 Kinect 二代 (Kinect v2) 等；结构光法是通过光编码技

术研究激光散斑在不同深度位置的不同形状,从而获取散斑和摄像头之间的距离信息,厂商有apple(primesense)和奥比中光等。二者均是通过主动感知技术,抗干扰性强、精度高、受环境影响小,不受物体表面颜色信息和特征纹理影响,能够实时快速计算出深度信息。深度相机在三维建模、无人驾驶、机器人导航、人脸解锁、体感游戏等领域都有很好的应用。

2.2.4 巷道三维数据获取的优缺点分析

笔者通过模拟井下黑暗环境,采用上述设备开展研究后,试验对比发现:

1)多视几何建模,简单高效、成本低,具有光谱特性,对地物边线提取精度相对较高,但图片特征点提取的过程,受环境光照纹理影响大,需投入较大的人力成本,应用前景有限^[34]。

2)深度相机,采用主动感知技术,多采用红外光源,受井下环境光线条件影响小,但目前常见的TOF相机和结构光相机,测量范围有限,如Kinect第3代测量范围0.5~4.5 m,Basler工业相机测量范围0~13 m。深度相机只获取点云数据,离不开后期点云配准和拼接算法的实现和优化,数据精度比激光LiDAR低,无法实现精准的测量。

3)利用激光LiDAR进行巷道三维重建,采用主动感知方式,点云精度高,受环境影响小,通过惯导技术和SLAM技术,可有效实现井下三维环境实时感知与重建,行业应用前景广泛。但是激光点云数据没有图像的纹理信息,加上点云数据本身存在的海量性、离散性、冗余性等特点,很难直接加载处理并应用于三维建模,因此如何有效精简点云、提取特征点和特征线,服务于煤岩层界面识别、支架碰撞监测、综采工作面定位和露天矿坑边坡监测等领域,将是未来井下激光点云应用的研究热点。

笔者认为,在快速获取巷道数据进行三维可视化应用时,可考虑集成TOF相机、全景相机、惯导等技术于一体的三维数据采集设备,也可考虑设计全景相机结合防爆手持激光扫描仪等设备,对不方便进入的硐室、变电站、泵房、掘进工作面等进行数据采集。

3 三维可视化软硬件技术

3.1 三维可视化软件

三维可视化软硬件平台也是三维技术的重要内容。2006年NASA的World Wind程序开源,2014年,Unreal,CryEngine等游戏引擎三维引擎代码开放,大幅度降低了三维软件研发的门槛,基于这些开

源代码的三维软件大量涌现。

三维可视化软件分为2个层次。底层是三维引擎层,三维引擎有上百种,比较著名的包括Unreal、Unity3D、OSG等。Unity3D、Unreal都是游戏类三维引擎,主要以3DMax、MAYA等精细化三维建模数据为数据源,擅长展现局部真实感渲染及复杂场景细节。而OSGEarth偏向于数据可视化的三维引擎,其中OSGEarth支持显示海量三维模型数据、影像数据、地形高程数据、矢量数据等,擅长数字地球、智慧城市等城市级三维应用。

总体来说,三维引擎是三维应用的基础和核心,决定着整个三维虚拟环境的渲染速度、真实感、沉浸感,以及整个三维应用程序开发的便捷性和高效性。一个完整的三维引擎包括了图形渲染子系统、人工智能模块、物理引擎模块、脚本语言模块、空间几何模块、地理地形模块、输入输出子系统、声音子系统、时间子系统、数据库引擎模块。其中图形渲染子系统为三维引擎的核心,包括渲染系统、场景组织、资源管理和对象模型等4个部分。在应用开发时,应该综合考虑开发的方向,选择合适的三维引擎,构建桌面三维系统、网络三维系统、移动端三维系统。常见的ArcGIS Global3D、Skyline、SuperMap等通用三维地理信息系统软件,只将功能集中在测绘、国土和城市等地表领域,无法满足矿山领域对三维可视化的需求。因此矿山领域纷纷从底层开发各类三维可视化应用系统。

随着计算机技术发展,矿山领域的三维可视化系统从传统的桌面系统逐渐转向网络三维(Web3D)和移动端。WebGL技术无需插件就能通过浏览器显示三维场景,大幅提升了用户的体验,成为研究和应用的热点。WebGL通过引入一个与OpenGL ES 2.0紧密相符合的API,可以在HTML5元素中使用,从而实现了利用底层的图形硬件加速功能进行图形渲染。三维引擎Unreal或者Unity3D均支持将三维场景通过WebGL进行发布。WebGL开源开发包,如Three.js、OSG.js、Cesium.js等是一种轻量级三维开发架构,基于这些轻量级开发网络三维可视化系统,能够为煤矿井下人员定位、安全监测、设备管理等提供具有宏观和中观尺度的井下三维场景。

随着场景资源增大,WebGL对客户端硬件的要求也随之提高,在真实感渲染与桌面系统还存在一定的差距。对于大规模的三维可视化应用,需要不断地在效率性能和资源占用上做平衡。针对这一问题,为了获得更逼真的三维可视化效果,云渲染三维

可视化系统也成为研究和应用的方向。三维场景的云端渲染,是指将载有三维场景的程序运行在云服务器上,通过云服务器强大的计算能力对三维程序画面进行渲染、捕获和压缩后以视频流的形式发送给低计算能力的客户端,用户可以在客户端通过网络与三维程序交互。客户端是轻量级的,只负责解码和显示三维场景画面,可以移植到资源受限的平台,如移动设备等。云渲染技术与目前流行的 HTML5 和 WebGL 技术相比,优势主要在于对与客户端没有特殊要求,而且无论哪种设备都可以保证三维精细化场景的真实感和质量。中国矿业大学(北京)等高等院校都采用云渲染技术实现的矿井三维虚拟仿真实验室项目^[35-36]。

云渲染技术的缺点是受到网络带宽限制,画面的流畅性会受到影响,交互性较差。随着 5G 通信技术发展,用户终端与服务器的网络接入性能大幅度提升,云渲染具有比 WebGL 更好的应用前景。

3.2 虚拟现实与增强现实硬件

虚拟现实硬件搭配三维软件,能够提供具有沉浸感(Immersion)、可移植性与实时交互(Interaction)、想象性(Imagination)的三维场景。虚拟现实硬件设备主要分为输入和输出设备 2 大类。其中,输入设备分为三维跟踪定位装置、运动捕捉系统和交互式设备。三维跟踪定位装置主要有数据头盔、数据手套、位置跟踪器等;运动捕捉系统代表性产品有 Kinect、Leap Motion、RealSense、美国魔神公司的 Motion Analysis 系统和诺亦腾开发的 Perception Neuron^[37];交互式设备主要有数据手套、数据衣、VR 手柄、触觉反馈装置等。输出设备主要为多通道投影、电子屏、三维打印机等。根据虚拟现实硬件规模大小来划分,可分为:头戴式显示设备、桌面式虚拟现实设备、小型虚拟现实设备、多通道(120°或者 180°)沉浸式虚拟现实系统、360°环幕、球幕等。虚拟现实技术广泛应用于矿山行业的应急救援培训、设备教学、培训教学等领域,但也存在交互性不强、眩晕感等问题^[38]。

增强现实与虚拟现实不同,采用三维注册技术对现实图像进行信息增强。硬件设备分为头戴显示式、手持显示式以及投影显示式等。头戴显示式分为视频透视式和光学透视式 2 种,主要为数字眼镜和头盔,例如微软公司的 HoloLens、Meta 公司的 Meta2 和谷歌公司的 Google Glass 增强现实眼镜;手持显示式一般指手机、平板电脑等移动终端的显示器;投影显示式分为手持、全息和屏幕投影仪等。增强现实软件主要有 Vuforia、Realmax、Metaio、

Wikitude、Catchoom、D'Fusion、ARToolKit、LayAR、Kudan 等。

随着井下通信网络建设,防爆手机在井下普及,基于移动端的矿山增强现实技术将会迎来更多的发展机遇。例如对井下巷道进行信息增强显示,矿工佩戴的数字眼镜具有导航定位,可以显示当前温度、湿度、风速、CO 浓度和含尘浓度信息,并进行危险提示等功能,发现异常情况能够及时处理,引导井下人员自主逃生。

4 三维可视化系统应用

在煤矿信息化发展背景下,智慧矿山正向安全、高效、绿色的新型矿山发展,矿井数字化工作从单一向综合、从二维向三维转变,建设三维可视化系统成为智慧矿山建设中不可缺少的重要工作。然而当前三维系统的应用还集中在可视化展示和查询分析层次。由于矿山生产变化快,时效性强,空间位置信息不断变化,矿山信息化建设尚未形成标准化的空间数据和业务数据服务体系,常导致数据更新不及时,三维系统的使用体验感不佳。笔者认为,通用的三维可视化或者三维地理信息系统是不能够满足智慧矿山建设需求。在充分的数据获取和数据建模基础上,从可视化展示转向三维空间分析与专题应用,才是三维可视化系统最大化价值的体现。

4.1 透明化勘探可视化分析

透明化勘探是指通过各种勘探手段,尽量探明矿区地层、断层、陷落柱、积水区、采空区等地质对象的空间形态和属性特征,了解瓦斯、水文、冲击地压等灾害及岩石力学特征的分布状态,以满足地质大数据分析和智能开采、智能掘进等智慧矿山建设的需求。

三维可视化系统能够管理和显示研究区域的工程地质、水文地质、钻探资料、测井资料、电法勘探数据、地震数据等,提供三维地震动态解释方法以及多源数据预处理、分析、融合算法,并提供三维地质模型显示,地质剖面、栅栏图、等值线、等值面、等值体生成,空间量测,开挖分析,推进分析等三维地质空间分析工具,服务于储量估算、矿体预测、地质分析等。

随着智慧矿山建设的推进,透明工作面成为透明化勘探的热点问题。透明工作面三维可视化平台,通过采集多源工作面地质勘探数据,建立工作面高精度三维动态地质模型,并与采煤成套装备实现空间位置耦合和数据集成联动,不但可以向采煤装备控制平台推送三维截割曲线,同时采集采煤装备

实时位置信息，并对三维地质模型进行实时修正。透明工作面的难点问题主要是由于勘探手段没有突破，三维工作面地质模型无法满足开采控制系统对基础地质信息精度的需求。

4.2 智能化协同设计与全生命周期管理

智能化采矿设计是智慧矿山建设内容的重要组成部分，采矿设计紧密围绕透明地质、多人协同、计算机辅助制图、人工智能等开展工作。智能化设计就是采用BIM、人工智能、大数据分析等技术对传统的矿井设计、采区设计、工作面二维设计进行技术提升；建立统一的三维协同设计平台，各设计人员在相同的标准下，采用相同或者兼容的数据格式一起工作，提高设计的效率；将多方的BIM设计数据、三维地质模型数据进行空间碰撞检测，避免设计在三维空间上冲突；结合三维设计方案开展自动、半自动辅助决策，输出采矿设计图纸、计算结果和报表报告，减轻设计人员工作量，从而达到智能化、自动化的目标。

BIM设计数据为三维可视化系统提供丰富的数据源。面向智能化设计的三维可视化系统能够用于矿山工程建设项目全生命周期管理。将不同阶段的建造信息、维护信息和经济信息等集中在一个三维可视化系统中，实现对工程项目的设计、建造及运维管理，尤其是矿山建设工程具有建设工序多、工期长、工程量大、牵涉面广等特点，全生命周期管理能有效减少矿山的建设成本、提高效率。

在实际应用中，由于还存在三维地质建模不通用、煤矿设计人员未改善当前的二维设计习惯等问题，导致BIM技术在煤矿中的应用还不够深入。BIM和GIS未来将深度融合，需要研究两者转换的语义映射规则、数据标准等问题，才能确保转换过程中信息无损^[39]。

4.3 通风模拟时空分析与模拟

矿井通风系统是矿山系统非常重要的部分，三维通风模拟和可视化是智能通风的重要组成部分。传统的通风模拟是在经验和大量手工计算基础上进行的，其精确度和结果难以达到预期。三维可视化系统将通风监测、通风网络解算与三维巷道进行耦合，不仅可以进行三维通风设计、风网解算、通风机选型和通风过程动态模拟，还可以实现火灾模拟、污染物扩散模拟，提供通风经济性分析工具，在三维场景中对通风方法的合理性和经济性进行模拟，在保证通风安全的前提下节约通风成本，从而实现风流状态的真实动态模拟效果，对设计矿山通风系统具有参考和指导意义。

4.4 三维综合管理可视化

三维综合管理可视化系统是以三维可视化平台为基础，提供面向地测、通风、采煤设计、生产、机电、安全监测、人员定位、通信、井下工业自动化等专业应用的、高度集成的应用系统，并实现与矿区安全监测、人员定位、综合自动化和工业视频等数据的链接和查询。三维可视化综合管理系统可以看作是矿井安全生产信息的可视化决策支持平台，涵盖了从地上到地下，从地层到井巷工程，从地质专业到设备管理所有类型的数据源，可以被看作是“系统中的系统”，也是信息化建设的一个亮点工程。

4.5 三维智能管控

除了三维综合管理系统，三维智能管控平台也是智慧矿山建设的重要工作内容。三维系统不仅能够开展实时数据接入、监测与可视化，而且与工业组态控制结合，利用可视化脚本编程功能实现对真实设备的远程控制。例如，在智能综采工作面建设中，三维智能管控平台，提供了真实还原的开采场景，而且能够对综采工作面采煤机、液压支架、输送机、破碎机、组合开关等设备的远程可视化控制；在智能掘进工作面，三维管控平台不仅将智能化掘进装备与三维地质、巷道空间信息叠加展示，实现掘进工作面全息感知与场景真实再现，还能够提供巷道成形质量、装备状态、环境多系统融合监测和快掘装备多机协同控制等功能；此外，三维智能管控平台也可以整合全矿综合自动化系统（通风、供电、提升、运输系统、水泵系统等）所有生产相关子系统的数据，可直接在真三维场景中进行实时显示、报警和远程控制，实现对全矿安全生产工况的实时掌握。

4.6 地表环境监测三维可视化

矿区地表环境监测三维可视化系统能将地表地理信息、沉陷区、开采信息等集成到可视化平台中，提供查询分析功能，服务于矿区地表塌陷区环境治理、生态环境修复等。其中，以无人机为飞行平台的倾斜摄影技术广泛应用在地表三维数据获取和环境监测。利用无人机倾斜摄影技术获取矿区高分辨率影像数据，制作高精度的三维模型，生成的数字高程模型（DEM）、数字正射影像（DOM）和数字线划图（DLG）不仅能够满足测绘生产的精度需求，可以对矿区进行环境监测，能较准确反应下沉趋势，全面掌握沉陷区变形信息。目前存在的问题为倾斜摄影的数据在垂直方向上精度不够，地表沉陷监测还需要配合微波遥感、地表岩移观测开展综合分析。

4.7 灾害事故反演三维仿真

灾害事故反演一般使用Fluent、Flag3D等数值

模拟软件开展数值计算,使用 Unity3D、Unreal 等三维引擎对井下水、火、瓦斯、煤尘、顶板等危险源征兆场景进行三维可视化建模,导入数值模拟结果进行时空过程模拟,重现各种灾害事故场景,将危险征兆出现到事故的发展过程及最终导致的后果进行完整的模拟展示,能够最大程度地再现事故处理现场的真实情况,通过人机互动方式增强煤矿相关人员对各种事故的了解和认识,在事故反演中暴露出存在的问题,比如忽略细节、操作不规范等,真正提升人员技能水平。当前数值模拟结果与三维可视化系统没有深度耦合,这方面的研究还不多见,三维程序需要从底层开展技术研究。

4.8 虚拟仿真培训

面向矿山行业的大规模虚拟教学实践、应急救援仿真演练、采煤和掘进过程模拟、灾害模拟与事故推演、机械操作教学等成为智慧矿山建设的重要内容。通过三维可视化系统对复杂井下灾害进行时空过程模拟,在分析每种事故的特征的基础上,通过音效、粒子特效、光影特效、动画特效、AI 行为等尽可能逼真还原现场效果,对逃生路线进行场景设计,设定虚拟摄像机的移动以及目标运动路径及其参数,可真实还原矿山开采过程中的突发情况,让培训人员对逃生过程中遇到的各种情况做出交互操作。虚拟仿真培训系统,能够以逼真的渲染画面和听觉效果强化人员安全意识,有效提高煤矿职工的技术水平,减少事故发生。

而随着 5G 通信、AI 技术的发展,虚拟仿真培训系统逐渐转向游戏化、智能化、多样化。虚拟仿真系统不仅支持大型 VR 设备,也逐渐支持手机、平板电脑、个人电脑以及交互式屏等多个终端。一些在线虚拟仿真应用具备多人协同和趣味性等基本功能。例如,山东科技大学、中国矿业大学(北京)、河南理工大学、安徽理工大学、黑龙江科技大学等高校都建立了省部级乃至国家级虚拟仿真教学试验中心,为教学提供多层次、多方法的虚拟仿真实验教学平台和综合性强、创新性强、复杂度高的典型试验项目。

5 三维数据交换标准

尽管近几年三维数字空间信息获取和重建的各项技术取得了长足的进展,然而,由于实际应用的高度复杂性,目前还缺乏统一的三维模型数据标准来满足各种三维仿真应用系统共享和应用集成要求。与三维数据相关的主流交换标准有 CityGML、Geo3DML、DWG/DXF 和 glTF 等。

CityGML 规范是 OGC 推出的一种通用典型的

三维城市对象表示模型,用于虚拟三维城市模型数据交换与存储的格式,它基于 XML 来实现虚拟三维城市模型的数据存储与交换,可扩展性强。

三维地质模型数据交换格式标准(Geo3DML)是基于 XML 将模型的几何、拓扑信息与模型的可视化信息分开,并分别称为地质模型与三维地质图,这两者组合起来构成被交换数据的整体,称为三维数据包。我国地质调查局发展中心根据 Geo3DML 也提出了 Geo3DMD 标准,用于各类三维地质模型的空间及非空间信息数据集的描述、数据集信息的发布以及网络交换^[40]。

对于煤矿行业来说,目前大多数数字矿山软件,如龙软(Longruan GIS)、三地曼(3DMine)、迪迈(Dimine)等软件大都采用 AutoDesk 公司的 AutoCAD 的 DWG/DXF 文件作为三维模型交换格式。未来应该考虑煤矿空间数据与 Geo3DML、3D DWG/3DDXF 的转换问题,使地质勘探的三维地质模型数据直接成为数字矿山的数据源,以减少到数字矿山的转换时间和效率^[41]。

IFC(Industry Foundation Class)是用于定义建筑信息可扩展的统一数据格式,以便在建筑、工程和施工软件应用程序之间进行交互。IFC 是国际通用的 BIM 标准,现在很多 BIM 软件都采用其作为数据交换的标准。目前常见的 BIM 模型软件,如 Autodesk Revit、Bentley、TEKLA、CATIA、MagiCAD、BIM5D 都支持将各自的数据格式转换为 IFC 标准模型,即通过软件自带的导出功能或者第三方转换插件进行,GRAPHSOFT ArchiCAD 甚至直接以 IFC 作为数据单元格式,所有档案都以 IFC 方式进行储存。因此,通过 IFC 文件格式使用 BIM 模型可以不限定前一阶段使用的建模软件类型,只要支持 IFC 输出格式的数据,都可以协同完成任务。在矿山行业中尚未有 BIM 数据交换标准,假若使用 BIM 模型通用的 IFC 标准,能够解决多个软件协同过程中的数据交换问题,有利于项目整体的标准化。

三维网络标准是在三维空间中将大量三维模型按照一定规则划分成若干片状单元,用于网络三维发布的数据规范,也称之为三维瓦片技术。目前常见的三维瓦片数据标准有 I3S(ESRI 公司)、S3M(超图公司)、3D Tiles(Cesium 公司)等。开放地理空间联盟(OGC)宣布 Esri 发起的 I3S 标准规范将作为 OGC 新的国际三维标准。Spatial 3D Model(S3M)是超图公司提出的一种适用于海量三维模型数据的传输格式。3D Tiles 是 Cesium 平台用来实现大范围的模型场景数据的加载应用的数据标准,三

维倾斜模型、人工建模、BIM 模型等,都可以转换成 3D Tiles。

6 结语

当前,国内各大煤矿企业纷纷开展智慧矿山建设,三维可视化技术作为矿山空间信息服务(4DGIS)的重要组成部分,面临着巨大的机遇与挑战。笔者在深入剖析当前存在问题的基础上,系统全面地介绍了矿山三维系统的技术组成,剖析了三维数据获取与建模、三维可视化软硬件、三维数据标准等技术发展趋势,并对未来三维可视化系统应用提出了若干思路。三维可视化系统不仅局限于“查一查、看一看”的可视化系统,而是应该逐渐深入到各个安全生产细分领域,形成特色鲜明的专业化系统服务于透明化勘探、采矿设计、通风模拟、安全生产综合管理、地表环境监测、灾害事故反演、虚拟仿真培训等。

参考文献(References):

- [1] 王国法,王 虹,任怀伟,等.智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J].煤炭学报,2018,43(2):295–305.
WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(2): 295–305.
- [2] 李 梅,杨帅伟,孙振明,等.智慧矿山框架与发展前景研究[J].煤炭科学技术,2017,45(1):121–128,134.
LI Mei, YANG Shuaiwei, SUN Zhenming, et al. Study on framework and development prospects of intelligent mine [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1): 121–128, 134.
- [3] CARR G R, ANDREW A S, DENTON G, et al. The “Glass Earth”—Geochemical frontiers in exploration through cover [J]. AIG Bulletin, 1999, 28:33–40.
- [4] 吴冲龙,刘 刚.“玻璃地球”建设的现状、问题、趋势与对策[J].地质通报,2015,34(7):1280–1287.
WU Chonglong, LIU Gang. Current situation, existent problems, trend and strategy of the construction of “Glass Earth” [J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(7): 1280–1287.
- [5] 毛善君,崔建军,令狐建设,等.透明化矿山管控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.
- [6] 王存飞,荣 耀.透明工作面的概念、架构与关键技术[J].煤炭科学技术,2019,47(7):156–163.
WANG Cunfei, RONG Yao. Concept, architecture and key technologies for transparent longwall face [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(7): 156–163.
- [7] 朱瑞军,李少辉,王 磊.VR 和 AR 及 MR 技术在矿山工程中的应用研究[J].中国矿山工程,2018,47(5):4–7.
- ZHU Ruijun, LI Shaohui, WANG Lei. Study on the application of VR, AR and MR technology in mine engineering [J]. China Mine Engineering, 2018, 47(5): 4–7.
- [8] 周 丹.三维地理信息系统在矿山中的技术研究与应用[J].世界有色金属,2018(22):149–150.
ZHOU Dan. Research and application of three-dimensional geographic information system in mines [J]. World Nonferrous Metals, 2018(22): 149–150.
- [9] 郭达志,杨维平,韩国建.矿山地理信息系统中的空间和时间四维数据模型[J].测绘学报,1993(1):33–40.
GUO Dazhi, YANG Weiping, HAN Guojian. A spatial and temporal 4-D data model for mine GIS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1993(1): 33–40.
- [10] 林 琦,胡明远,陈 曼,等.从地理信息系统到虚拟地理环境的认知转变[J].地球信息科学学报,2020,22(4):662–672.
LIN Hui, HU Mingyuan, CHEN Min, et al. Cognitive transformation from geographic information system to virtual geographic environments [J]. Journal of Geo-information Science, 2020, 22(4): 662–672.
- [11] 张 健,武 强,丁航航,等.基于三维地质建模的突水事故场景模拟[J].能源与环保,2018,40(11):11–15.
ZHANG Jian, WU Qiang, DING Hanghang, et al. Mine water-inrush scene simulation based on 3D geological modeling [J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(11): 11–15.
- [12] 王 鹏,宿国瑞,贾宝山,等.基于 VR 技术的虚拟矿井仿真平台建设[J].煤矿安全,2020,51(1):122–125.
WANG Peng, SU Guorui, JIA Baoshan, et al. Construction of virtual mine simulation platform based on VR technology [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(1): 122–125.
- [13] 洪玉玲,王洋洋.基于 NeoAxis 引擎的三维虚拟矿井仿真系统平台[J].煤矿安全,2020,51(3):100–103.
HONG Yuling, WANG Yangyang. 3D virtual mine simulation system platform based on NeoAxis engine [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(3): 100–103.
- [14] 刘 刚,吴冲龙,何珍文,等.面向地质时空大数据表达与存储管理的数据模型研究[J].地质科技通报,2020,39(1):164–174.
LIU Gang, WU Chonglong, HE Zhenwen, et al. Data model for geological spatiotemporal big data expression and storage management [J]. Geological Science and Technology Information, 2020, 39(1): 164–174.
- [15] 车德福,刘中华,陈 凯.基于二三维可视化的煤矿储量管理系统[J].矿山测量,2019(5):23–26.
CHE Defu, LIU Zhonghua, CHEN Kai. Coal mine reserve management system based on two and three dimensional visualization [J]. Mine Surveying, 2019(5): 23–26.
- [16] PARESCHI M . Earth imaging and data processing for mapping and analysis [J]. Digital Signal Processing, 1987, 87:916–921.
- [17] PARESCHI M T , BERNSTEIN R . Modeling and image processing for visualization of volcanic mapping [J]. Ibm Journal of Research & Development, 1989, 33(4):406–416.
- [18] GRIBBLE P D. The application of computer software to orebody modelling and evaluation at South Crofty tin mine, Cornwall [J]. Geological Society London Special Publications, 1992, 63(1):

155-168.

- [19] 林振民,陈少强.三维可视化技术在固体矿产中的应用[J].物探化探计算技术,1994(4):338-344.

LIN Zhenmin, CHEN Shaoqiang. Application of 3D visualization technic to solid mineral resources [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1994 (4):338-344.

- [20] 毛善君.煤矿地理信息系统数据模型的研究[J].测绘学报,1998(4):52-58.

MAO Shanjun. Research in data model of coalmine GIS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1998(4):52-58.

- [21] 孙敏,赵学胜,赵仁亮.Global GIS 及其关键技术[J].武汉大学学报:信息科学版,2008(1):41-45,71.

SUN Min, ZHAO Xuesheng, ZHAO Renliang. Global GIS and it's key technologies [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008(1):41-45,71.

- [22] 吴群英,李梅,孙振明.我国智慧矿山高质量发展实现路径研究[J].煤炭经济研究,2020,40(2):52-56.

WU Qunying, LI Mei, SUN Zhenming. Research on the realization path of high-quality development of smart mines in China [J]. Coal Economic Research, 2020,40 (2):52-56.

- [23] DEFANT T A, BROWN M D, McCormick B H. Visualization: expanding scientific and engineering research opportunities [J]. IEEE Computer, 1989,22(8):12-16.

- [24] 毛善君.灰色地理信息系统—动态修正地质空间数据的理论和技术[J].北京大学学报(自然科学版),2002,38(4):556-562.

MAO Shanjun. Gray geographical information system—the theory and technology of correct geological spatial data dynamically [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2002, 38 (4):556-562.

- [25] 程建远,聂爱兰,张鹏.煤炭物探技术的主要进展及发展趋势[J].煤田地质与勘探,2016,44(6):136-141.

CHENG Jianyuan, NIE Ailan, ZHANG Peng. Outstanding progress and development trend of coal geophysics [J]. Coal Geology & Exploration, 2016,44 (6):136-141.

- [26] 崔凡,耿晓航,俞慧婷,等.基于探地雷达的煤层小构造超前探测[J].煤矿安全,2019,50(5):153-157.

CUI Fan, GENG Xiaohang, YU Huiting, et al. Application research of GPR advanced detection in small structure of coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2019,50 (5):153-157.

- [27] 孙振明,毛善君,祁和刚,等.煤矿三维地质模型动态修正关键技术[J].煤炭学报,2014,39(5):918-924.

SUN Zhenming, MAO Shanjun, QI Hegang, et al. Dynamic correction of coal mine three-dimensional geological model [J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(5):918-924.

- [28] 马彬,陈慧相.VS-150三维激光扫描仪在采空区测量的应用[J].冶金管理,2018(14):29-31.

MA Bin, CHEN Huixiang. Application of VS - 150 3D laser scanner in goaf measurement [J]. Metallurgical management, 2018 (14):29-31.

- [29] 廉旭刚,蔡音飞,胡海峰.我国矿山测量领域三维激光扫描技术的应用现状及存在问题[J].金属矿山,2019(3):35-40.

LIAN Xugang, CAI Yinfei, HU Haifeng. Application status and existing problems of 3D laser scanning technique in mine surveying

in China [J]. Metal Mine, 2019(3):35-40.

- [30] 余乐文,张达,陆得盛,等.矿用三维激光扫描仪关键技术研究[J].矿业研究与开发,2015,35(4):71-74.

YU Lewen, ZHANG Da, LU Desheng, et al. Study on the key technologies of 3D laser scanner for mining [J]. Mining Research and Development, 2015, 35(4):71-74.

- [31] 吴金兵,毛善君,李梅.大型矿区应急救援“一张图”关键技术研究[J].煤矿安全,2016,47(11):83-86.

WU Jinbing, MAO Shanjun, LI Mei. Key technology research on emergency rescue “One-map” for large mining area [J]. Safety in Coal Mines, 2016,47 (11):83-86.

- [32] DELLAERT F, SEITZ S M, THORPE C E, et al. Structure from motion without correspondence [C]. IEEE Conference on Computer Vision & Pattern Recognition. IEEE, 2000.

- [33] 严俊,叶南,李廷成,等.无编码点的工业摄影测量技术的研究及实现[J].光学学报,2019,39(10):227-236.

YAN Jun, YE Nan, LI Tingcheng, et al. Research and implementation of industrial photogrammetry without coded points [J]. Acta Optica Sinica, 2019,39(10):227-236.

- [34] 刘磊.面向散乱零件机器人抓取作业的立体图像处理与匹配技术[D].上海:东华大学,2019.

LIU Lei. Stereo image processing and matching technology for robotic grabbing operations for scattered parts [D]. Shanghai: Donghua University, 2019.

- [35] 渠雁晓.基于 WebGL 的煤矿机械装备数字模型平台设计[D].太原:太原理工大学,2016.

- [36] 侯运炳,姜喜迪,权伟隆.采矿与安全虚拟仿真实验教学系统的搭建[J].教育现代化,2019,46(6):40-43.

HOU Yunbing, JIANG Xidi, QUAN Weilong. Construction of virtual simulation experiment teaching system for mining and safety [J]. Education Modernization, 2019,46(6):40-43.

- [37] 周韬.动作捕捉系统在虚拟现实中的应用[D].西安:西安电子科技大学, 2013.

- [38] 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.

- [39] 黄崧,王海洋,余俊挺,等.基于 BIM 和 GIS 的智慧矿山信息系统构建[J].价值工程,2019,38(11):184-186.

HUANG Song, WANG Haiyang, YU Junting, et al. Construction of Intelligent Mine Information System Based on BIM and GIS [J]. Value Engineering, 2019,38(11):184-186.

- [40] 刘晖.基于时态 GIS 的矿井通风数值计算模型研究与应用[D].北京:北京大学,2020.

- [41] 屈红刚,吴自兴,王想红,等.三维地质模型数据交换共享技术[M].北京:地质出版社,2017.

- [42] 李青元,陈强,马梓翔,等.从“三维地质模型数据交换格式”标准到“数字矿山”三维数据源[J].采矿技术,2014,14(6):99-102.

LI Qingyuan, CHEN Qiang, MA Zixiang, et al. From the “3D geological model data exchange format” standard to the “digital mine” 3D data source [J]. Mining Technology, 2014,14(6):99-102.