

煤矿综采工作面多角色虚拟演练平台关键技术研究

李梅¹, 孙振明², 吕平洋¹, 陈金川³, 毛善君¹

(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) 资源与安全学院, 北京 100083;

3. 北京龙软科技股份有限公司, 北京 100190)

摘要:针对国内煤矿虚拟演练平台操作单一、沉浸感和趣味性不强、硬件造价昂贵等问题,设计并实现了一个低成本、游戏化的多角色虚拟演练平台,重点研究了三维场景可视化技术、多用户网络传输技术、协同行为决策模型 3 个关键技术。研究成果不仅能够真实再现煤矿综采工作面复杂的作业环境,而且支持多用户登录和协同工作、设备虚拟操控、采煤仿真模拟、演练评分等功能,为矿山人员培训和事故演练提供全新的技术手段,研究成果对提升我国矿山安全生产数字化水平具有重要意义。

关键词:综采工作面;多人协同;虚拟现实;采煤工艺;知识规则

中图分类号:TD67;TP311.5 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2018)01-0156-06

Study on key technology of multiplayer virtual reality training platform for fully-mechanized coal mining face

LI Mei¹, SUN Zhenming², LYU Pingyang¹, CHEN Jinchuan³, MAO Shanjun¹

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

2. College of Resources and Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Beijing Longruan Technologies Company Limited, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to solve the problems of the current VR platform of single-user, lack of immersive experience and interesting, and expensive hardware, a low-cost, multiplayer serious-game VR simulation platform are designed and developed. Three key techniques are studies, which are VR visualization, multiplayer collaboration network design and mining process rule design. The system can simulate a realistic and complex underground fully-mechanized mining coal face environment, and provide the function of multiplayer login, equipment virtual operation, mining virtual simulation, operation evaluation. The research will provide a brand new tool for miner training and disaster drilling, and has a signification meaning of the work safety information.

Key words: fully-mechanized coal mining face; multiplayer; virtual reality; coal-mining technique; knowledge rule

0 引 言

煤矿井下生产系统复杂、庞大,其作业环境恶劣、危险源分布广泛,对安全生产和事故救援等领域的虚拟培训演练有十分强烈的需求。鉴于煤矿井下工作的特殊复杂性,将虚拟现实技术应用于煤矿安全生产、事故调查和教育培训等领域中,具有重要的科学意义和应用价值^[1]。自 2016 年以来,虚拟现实技术(简称 VR 技术)重新崛起,多角色协同功能成

为 VR 技术应用的热点问题^[2]。面向矿山行业的大规模教学实践、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、机械操作教学等多角色虚拟演练平台的需求越来越强烈。然而面向煤矿安全生产的、低成本的、多角色在线仿真演练平台还比较少见。针对这一问题,笔者在充分调研的基础上提出以煤矿综采工作面作业过程为研究对象,搭建一个低成本、游戏化的多角色虚拟演练平台,将采煤专业知识与直观的虚拟环境相结合,在虚拟环境

收稿日期:2017-10-19;责任编辑:赵 瑞 DOI:10.13199/j.cnki.est.2018.01.022

基金项目:“十三五”国家重大科技专项资助项目(2017YFC0804303)

作者简介:李 梅(1978—),女,陕西岐山人,副教授,博士。Tel:010-62755420,E-mail:mli@pku.edu.cn

引用格式:李 梅,孙振明,吕平洋,等.煤矿综采工作面多角色虚拟演练平台关键技术研究[J].煤炭科学技术,2018,46(1):156-161,223.

LI Mei, SUN Zhenming, CHEN Jinchuan, et al. Study on key technology of multiplayer virtual reality training platform for fully-mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(1): 156-161, 223.

中实现综采工作面班组不同工种的协同工作和评价。笔者首先介绍了国内外该领域研究现状,然后提出了系统的架构设计和功能设计,重点阐述了三维场景可视化技术、多用户网络传输技术、协同行为决策模型3个关键技术,并给出了初步的应用实例。

1 国内外研究现状

美国、加拿大、澳大利亚等国家十分重视安全培训,很早就将VR技术应用于煤矿安全生产、事故调查和教育培训等方面^[3-8]。澳大利亚联邦科学与工业研究组织(CSIRO)开发了一个交互式煤矿设备操作训练工具。从井下长壁工作面中实时提供数据,模拟了开采设备的真实情况,并对操作设备的工人进行培训,以便他们能够理解各自的工作内容。英国诺丁汉大学长期致力于虚拟现实在煤矿安全培训中的技术开发与应用,已经开发出SafeVR、VRoom等系列虚拟现实培训系统。美国国家职业安全与健康研究所(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)开发出一套游戏系统,采用游戏引擎并对部分井下矿山进行三维建模,通过真实的游戏来有效进行煤矿安全培训。马歇尔大学(Marshall University)的研究人员采用Unity3D开发出了一套多用户协同在线井下虚拟平台(Interactive Virtual Underground Mine Platform, IVUMP),该平台能够记录救护队员之间的交流、信息和动作,同时采用VFIRE通风模拟系统来强化演练交互的效果,为应急响应提供事前的安全演练培训。澳大利亚新南威尔士大学开发了一套360°环幕的虚拟现实系统,这套系统被称为AVIE(Advanced Visualization and Interactive Environment)。新南威尔士大学根据iCinema虚拟现实平台进行了专业应用开发,目前已经开发出18个不同的训练教育模块,将井下全场景模拟现实,实现了现场操作过程、工作标准、风险点管控模拟的培训。

在国内,北京大学、中国矿业大学、煤炭科学研究总院、北京龙软科技股份有限公司等单位一直致力于虚拟现实关键技术与矿山专业的结合研究,主要采用了OpenGL、Multigen、Converse3D、Virtools等三维开发工具,解决了一些虚拟仿真平台的关键技术问题^[9-15]。此外,很多大型矿业集团在数字化矿山中建立了基于三维可视化技术的矿井安全生产管理系统。一些国家级矿山应急救援基地建设了灾区仿真模拟与演练评价系统及多媒体教学系统,安装

了360°环幕并配备虚拟现实专业高端图形工作站、答题器、液压震动仿真系统、中控系统等系列硬件,为应急救援培训提供了全新的工作模式^[16]。然而现有国内矿山虚拟仿真系统存在如下缺陷:

1)在环幕、CAVE、多通道投影等硬件支持下,能够实现虚拟救援和技术培训等,但硬件价格高昂,动辄上千万,且无法多人协同操作,难以满足全行业对虚拟现实系统规模化需求。

2)VR硬件较强而软件功能较弱,多为单机、单任务、单人操作。大部分系统是对逐个场景的受训人员提出问题,进行人机对话答题,尚未充分发挥虚拟现实沉浸感、交互性和构想性的优势。

2 虚拟演练平台架构

针对现有存在的问题,提出构建煤矿综采工作面多角色虚拟演练平台的思路,以实现多工种在工作面采煤过程中的协作过程作为目标。在此基础上,从采煤协同工作拓展到掘进工艺、瓦斯抽放工艺、事故推演或者全矿井应急救援预案推演和人员疏散等其他应用。

煤矿综采工作面多角色虚拟演练平台是一个典型的客户端/服务器(C/S)架构结构的系统。选用集中式框架进行服务端和客户端的部署。集中式框架是一种中央控制型体系,将应用程序和数据都放在服务器上,这样能够简化并发冲突,并且保持数据的一致性^[17-18]。服务器端具有监听客户端的连接、监听用户操作信息、系统更新资源及培训地图服务等多项任务,客户端负责接收数据,并向服务器发送各种状态数据。整体架构如图1所示。

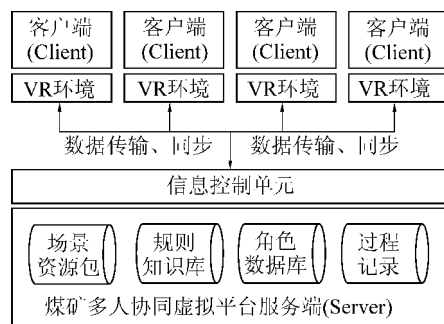


图1 虚拟演练平台架构

Fig. 1 Virtual reality training platform architecture

从图1可知,服务端和客户端2个部分通过信息控制单元进行数据传输和同步。三维场景资源、规则知识库、角色数据库和过程记录等数据统一放在服务器上集中管理。通过信息控制单元,将数据

和程序输出到每一个客户端。客户端负责创建一个虚拟仿真环境,并将服务器传输过来的同步数据展示出来。多个客户端登录不同的用户角色,可以进行文字通信,相互合作完成一个任务。

网络通信原理如图2所示。客户端发送登录请求,将登录请求或者命令和参数同步到服务器端;服

务器判断后选择相关场景。服务器的数据库会保存设备、角色、工具等状态,当客户端命令和参数同步的请求发过来后,根据规则知识库判断客户端的操作是否正确,通过内存数据库判断状态是否锁定,并处理并发问题。最后服务器返回最新的状态到客户端。

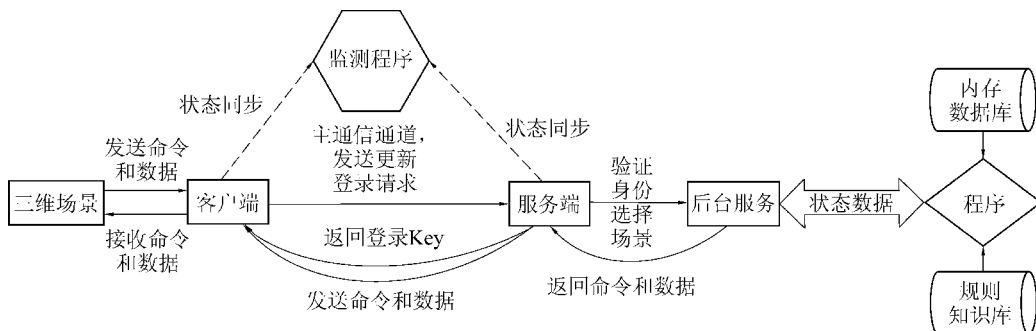


图2 网络通信原理示意

Fig. 2 Network communication principle diagram

整个系统的功能设计如图3所示。客户端的虚拟现实场景模块包括地质模型建模、场景资源包导入、外部实时数据接入等功能,多角色仿真演练模块包括用户登录、设备操控、文字通信、操作评判等功能^[13]。地质模型构建功能利用地质数据自动构建煤层、采空区、积水区等地质要素;场景资源包导入功能允许用户导入3DS Max等工具创建的设备、建筑等精细模型;外部实时数据接入功能,预留了接入设备工况数据、瓦斯等监测监控数据的接口。

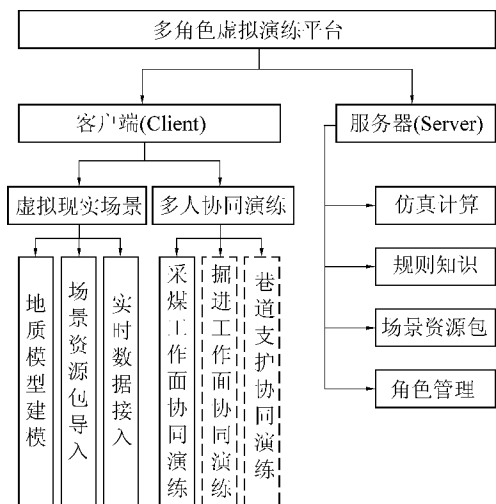


图3 虚拟演练平台功能示意

Fig. 3 Function diagram of virtual reality training

在服务器端,提供了仿真计算、规则知识决策模型、场景资源包和角色管理4个功能。仿真计算是针对综采工作面仿真过程中所需要的一系列物理模

型,如通风网络解算模型、割煤量计算模型等。规则知识决策模型是指多用户协同工作时的专业知识规则整理成一系列计算机可理解的决策算法。场景资源包是在服务器上统一管理的三维模型资源。角色管理是指用户登录信息等的管理功能。

3 系统关键技术

煤矿综采工作面多角色虚拟演练平台涉及到多项VR核心技术,如三维建模技术、渲染引擎技术、网络架构、角色设计、界面设计、业务规则生成、虚拟现实特效等。笔者重点介绍三维场景可视化技术、多用户网络传输技术、协同行为决策模型3个核心技术。

3.1 三维场景可视化技术

三维场景可视化主要介绍如何将制作好的三维模型在虚拟现实编辑器中进行场景整合,并发布成资源^[19]。制作三维场景并实现资源打包的过程如图4所示。首先在3DMax、Maya等第三方建模软件中制作综采工作面中的设备模型,包括高模和低模,划分材质,计算纹理坐标,绘制或者烘焙法线贴图、漫反射贴图、金属性贴图、粗糙度贴图和高光贴图等一系列材质。另外,通过二维系统的基础数据,自动生成地表地形、巷道、复杂地质模型等三维模型。然后,将所有三维模型导入虚拟现实平台的三维编辑器进行场景整合,利用脚本编辑器来制作模型的光照、材质、动画等特效,将场景打包并发布成场景资源。

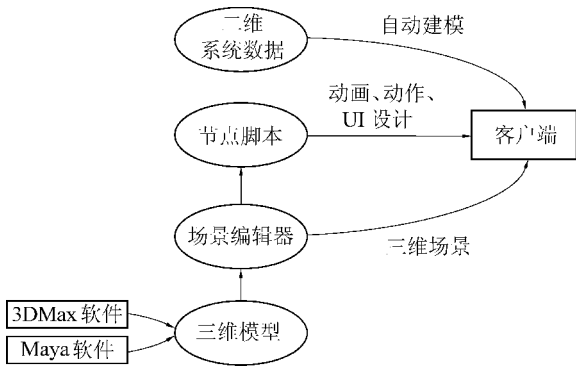


图4 可视化建模流程示意

Fig. 4 Visual modeling process

三维图形引擎和虚拟现实编辑器是三维场景可视化的基础。三维图形引擎是虚拟仿真演练平台的核心技术。引擎是支持上层三维应用的底层函数库,主要解决的是场景构造、场景渲染、事件处理、光照材质、碰撞检测等基础性的问题。编辑器则是与引擎相配的、用于进行特效制作和场景整合的平台性软件。目前常见的三维引擎有虚幻 Unreal、Unity 和 CryEngine 等。通过编辑器强大的功能,能够真实地模拟矿井综采工作面中的采煤机割煤、落煤、运煤的工作场景,以及发生火灾、瓦斯爆炸、顶板坍塌等灾害时的矿井环境变化。

3.2 多用户网络传输技术

煤矿综采工作面多角色虚拟演练平台在系统架构上采用了客户端/服务器模式。这一模式的缺点是网络负载较重,服务器容易成为瓶颈。这是因为,在多人协同工作中,客户端和服务器端的各个设备运行参数时刻要保持一致。假设没有网络延迟的情况下,任何一个客户端的状态均能够通过网络上传到服务器,由服务器同步到其他客户端上。然而由于网络带宽、速度和网络拥堵等情况,在实际中这种状态同步会存在一定的困难,大量的数据交换使得服务器在协同工作时会产生结果、因果和意图不一致的情况^[20-21]。

随着网络技术的进步,一种广义客户端—服务器联网模式(generalized client-server model)被提出^[22],网络延时等问题得到了一定程度的解决。在该模式中,服务器控制着当前工作流程,服务器状态才是一个整个场景中的三维实体的真正状态,而客户端总是近似于服务器状态的模拟,但得需要服务器对其进行督导和同步。在这种模式下,客户端可以预判服务器的行为。重要的决策都由服务器来处

理,如物体的创建与销毁、设备的开启和停止都是由服务器控制和广播的。然而,人员和设备移动都是在每台客户机上独立完成的,因此客户端和服务器端有微小的差异,但是不会产生任何网络流量。此外,这种模式下任意一台客户端都可以担当服务器,也可以运行客户端的三维程序,而其他用户直接通过服务端进入三维场景中。对于服务器端,则采用广播传输数据的方式,一旦发生状态变化,会将数据以广播的形式发送给所有客户端。

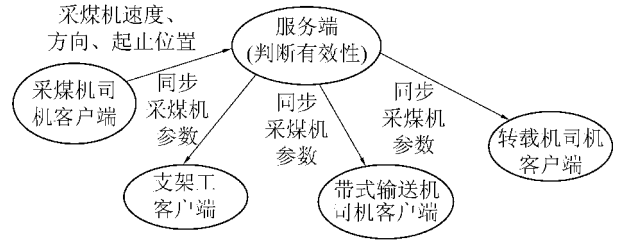


图5 客户端和服务器状态同步原理

Fig. 5 Client and server state synchronization schematic

综采工作面多人协同工作时客户端和服务器状态同步的原理如图5所示。下面以采煤流程中开启采煤机的左牵引并割煤为例,说明服务器端和客户端进行状态同步的具体步骤。

1)第1个用户以服务器模式登录,该用户既是服务器也是一个客户端,其他用户加入到该服务器,都是客户端。

2)假设客户端1为采煤机司机,在场景中操作采煤机左牵引进行割煤操作。客户端1将自己的角色信息及采煤机左牵引相关的参数(采煤机的牵引速度、牵引方向、左牵引的目标位置)发送到服务端。

3)服务端接收到采煤机左牵引操作请求后,首先依据采煤业务规则形成协同行为决策模型,判断该角色是否有权限进行该项操作。①如无权限进行该项操作,则返回给客户端1,请求失败,无权限进行该项操作;然后,判断服务器上采煤机的当前位置是否与左牵引位置相同,如相同则返回给客户端1,请求失败,左牵引位置与当前位置相同。②当有权限进行该项操作,服务端将客户端1的采煤机左牵引请求确认完毕后,则将采煤机命令(采煤机的牵引速度、牵引方向、左牵引的目标位置)发送到所有的客户端,包括客户端1。③各个客户端接收到服务端发送的采煤机左牵引命令后,开始解析命令参数,并利用本地的仿真算法对

采煤机进行左牵引的模拟。④由于各客户端配置不同,仿真算法计算的快慢及渲染效率都不同,各客户端采煤机位置是有差异的。⑤所有客户端在采煤机左牵引割煤的命令执行完毕后,采煤机状态是保持一致的。

在网络协议方面,常见的局域网协议有 MICROSOFT 的 NETBEUI、NOVELL 的 IPX/SPX 和交叉平台 TCP/IP。选择了 TCP/IP 协议中的 UDP (User Datagram Protocol, 用户数据包协议) 作为网络通信协议。UDP 是用户数据报协议,是一个简单的面向数据报的运输层协议。优点就是适合传输较短的文件。因此服务端采用基于 UDP 的高时效性数据交互,如用户所处场景位置、采煤机运行过程状态等。服务器端利用 UDP 机制与客户端连接,监听和响应客户请求。选择基于 TCP 的大数据传输,如软件版本的更新、启动场景的下载等。

3.3 采煤业务知识与协同行为决策模型

为了实现对多人协同操作的准确判断,需要将采煤过程中的业务知识转化成一系类决策模型。这种从业务知识到决策模型的转化是知识工程的研究领域^[23]。知识工程是一种建模活动,即使用知识模型对知识进行抽象,是知识的形式化和符号化的过程。知识工程的核心就是如何使用计算机可以存储和处理的模型表示知识,即知识表示 (Knowledge representation, KR)。目前知识表示的方法主要有规则表示法、语义网络表示法、框架表示法、谓词逻辑表示法等。

本研究选用规则表示法建立规则知识库。使用规则表示知识一般采用的是 IF...THEN...型的规则,这种结构从逻辑上连接 IF 部分中一个或多个前提(也称条件)到 THEN 部分的一个或多个后部(也称结论)。

服务器端的协同行为决策模型保证了协同过程中程序逻辑的严密性和决策的正确性。不同角色之间有非常复杂的协同工作关系。根据多人虚拟角色的行为,将上述专业采矿知识转换成一系列运算逻辑算法,并成为仿真演练中虚拟角色的决策模型。当多个虚拟角色进行操作时,服务器能够对这一组虚拟角色的行为进行判断,将结果返回到客户端。综采工作面协同行为决策的逻辑存储结构见表 1,包括交接班、开启采煤机、收起护帮板等动作的行为决策模型。不同角色的操作动作会上传到服务器的规则知识库决

策模型中进行判断,一旦工序错误,则状态提示错误。实际上,要针对应用情况和专业知识来设计大量的决策模型,具体情况比表 1 给出的判断规则更为复杂。

表 1 协同行为决策的逻辑存储结构

Table 1 Logical storage structure for collaborative behavior decision

| 规则 ID | 规则前项 | 规则后项 | 置信度/% |
|-------|------------------|------------|-------|
| 1 | IF 向班长汇报交接班 | 协同工作 = 开始 | 100 |
| | AND 采煤机司机交接班 | | |
| | AND 支架工交接班 | | |
| | AND 输送带工交接班 | | |
| 2 | IF 采煤机发出报警声音 | 采煤机工作 = 开始 | 100 |
| | AND 带式输送机开机 | | |
| | AND 转载机开机 | | |
| | AND 刮板输送机开机 | | |
| 3 | IF 采煤机开启左牵引 | 收起护帮板 = 正确 | 100 |
| | AND 离滚筒最近的护帮板未开启 | | |

4 应用效果

在充分调研实际业务的基础上,采集了井下真实生产环境三维数据,建立了综采工作面中的运输巷、回风巷、煤层等地质体,液压支架、采煤机、工作面刮板输送机、端头架、超前支护液压支架、转载机、破碎机、输送带、列车站、甲烷传感器等设备的三维模型,所有设备依据机械图纸进行 1:1 建模,并依据设备的物理属性设定响应的物理参数,如质量、摩擦因数、阻尼系数等,尽可能真实地还原设备状态和运动结果。

系统初步具备了多用户登录和协同工作、设备虚拟操控、采煤仿真模拟、演练评分等功能。角色设定有带班班长、带式输送机司机、支架工、转载机司机、刮板输送机司机、采煤机司机、瓦检员等。角色能和场景中设备进行交互操作。以采煤机司机的身份登录,通过文字与小组其他成员进行沟通后,开启左牵引的操作,如图 6 所示。以支架工的身份登录后,在采煤机割煤之前,通过扳动设备手柄收起护帮板的操作,如图 7 所示。每个类型角色依据采煤作业规程有不同的操作权限,系统能对角色操作进行判断,并对超越权限的操作进行提示和评分。系统目前能够支持 30 个用户同时登录工作。



图6 采煤机司机操作采煤机

Fig.6 Shearer's driver operating shearer

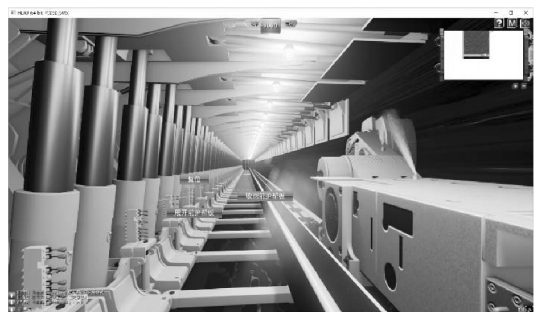


图7 支架工操作液压支架

Fig.7 Stents workers operating hydraulic support

5 结 语

近2年来,三维引擎源码逐渐开源,VR硬件价格也逐渐降低,虚拟现实在矿山行业的发展面临着前所未有的机遇和挑战。笔者以综采工作面多人协同虚拟演练为目标,采用新一代虚拟现实引擎开发出一个低成本、游戏化的多角色虚拟演练平台,真实模拟井下综采工作面采煤班组不同角色的协同工作流程,结合专家知识库决策模型对多人协同操作流程进行评判。该项研究成果将为煤矿安全生产和培训提供全新手段,避免了井下高危和极端的环境,为参与者提供了可靠、安全和廉价的软件操作平台,不仅满足了国家和企业对矿山安全培训的迫切需求,也很好地促进了煤矿安全信息化的发展。

参考文献(References):

- [1] 兰泽全,李其中,徐景德.虚拟现实技术在煤矿安全中应用的现状及分析[J].煤炭科学技术,2006,34(11):56-59.
LAN Zequan, LI Qizhong, XU Jingde. Present status and analysis on virtual reality technology applied to mine safety [J]. Coal Science and Technology, 2006, 34 (11): 56-59.
- [2] VILLIERS R D, VILLIERS R D. Virtual reality training applications for the mining industry [C]. International Conference on Computer Graphics, 2009.

- [3] PENICHERET V M R, MARIN I, GALLUD J A, *et al.* A classification method For CSCW systems [J]. Electronic Notes in Theoretical Computer Science, 2007, 168: 237-247.
- [4] BEDNARZ T P, CARIS C, THOMPSON J, *et al.* Human-computer interaction experiments immersive virtual reality applications for the mining industry [C]. IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2010.
- [5] MALLET L, UNGER R. Virtual reality in mine training [C]. SME Annual Meeting and Exhibition, 2007.
- [6] SQUELCH A. P. Virtual reality for mine safety training in South Africa [J]. Journal-South African Institute of Mining and Metallurgy, 2001, 101 (4): 209-216.
- [7] PHD Jennifer Tichon, BURGESS LIMERICK Robin, CPE Phd, *et al.* A review of virtual reality as a medium for safety related training in the minerals industry [J]. Journal of Health & Safety Research & Practice, 2011 (3): 33-40.
- [8] PEDRAM Sh, PEREZ P, PALMISANO S, *et al.* The application of simulation (virtual reality) for safety training in the context of mining industry [C]. 22nd International Congress on Modelling and Simulation, Hobart, Tasmania, Australia, 2017.
- [9] 李其中,时光,兰泽全.虚拟现实技术在煤矿安全领域的应用与主要实现方法[J].煤矿安全,2007,38(10):58-60.
LI Qizhong, SHI Guang, LAN Zequan. The application and main realization method of virtual reality technology in the field of coal mine safety [J]. Safety in Coal Mines, 2007, 38 (10): 58-60.
- [10] 毛善君,熊伟.煤矿虚拟环境系统的总体设计及初步实现[J].煤炭学报,2005,30(5):29-33.
MAO Shanjun, XIONG Wei. Design and primary implementation of coal mine virtual environment system [J]. Journal of China Coal Science, 2005, 30 (5): 29-33.
- [11] 蔡林沁,罗志勇,王颀,等.基于Multi-agent的煤矿虚拟环境体系建模[J].煤炭学报,2010,35(1):61-65.
CAI Linqi, LUO Zhiyong, WANG Ting, *et al.* Modeling coalmine virtual environment architecture based on Multi-agent [J]. Journal of China Coal Science, 2010, 35 (1): 61-65.
- [12] 李大锦,白成杰,姜华.矿山井下场景的实时渲染算法[J].系统仿真学报,2013,25(10):2460-2463.
LI Dajin, BAI Chengjie, JIANG Hua. Real-time rendering method for underground mine scenes [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25 (10): 2460-2463.
- [13] 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.
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.
- [14] 熊书敏.地下矿生产可视化管控系统关键技术研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [15] 李杨,杨天鸿,刘洪磊,等.大安山煤矿三维可视化系统的建立及安全监测分析[J].采矿与安全工程学报,2014,31(2):277-283.

- 39(1):55-58.
- [11] 吕贵春.水力割缝在石门揭煤预抽煤层瓦斯区域防突措施中的应用[J].矿业安全与环保,2013,40(4):79-82.
LYU Guichun. Application of hydraulic cutting in gas pre-drainage in driving through coal seams in crosscut [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013, 40(4): 79-82.
- [12] 陶云奇,冯丹,马耕,等.水力冲孔物理模拟试验及其卸压增透效果研究[J].煤炭科学技术,2017,45(6):55-60.
TAO Yunqi, FENG Dan, MA Geng, et al. Study on physical simulation experiment of hydraulic borehole flushing and pressure released and permeability improve effect [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(6): 55-60.
- [13] 王峰,陶云奇,刘东.水力冲孔泄压范围及瓦斯抽采规律研究[J].煤炭科学技术,2017,45(10):96-100.
WANG Feng, TAO Yunqi, LIU Dong. Study on pressure released scope of hydraulic flushing and gas drainage law [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(10): 96-100.
- [14] 蒋顺洲,罗文柯,周军,等.煤层注水与瓦斯抽采在石门揭煤技术中的应用研究[J].煤炭工程,2013,45(7):28-31.
JIANG Shunzhou, LUO Wenke, ZHOU Jun, et al. Study on seam water injection and gas drainage applied to cross-cut seam opening technology [J]. Coal Engineering, 2013, 45(7): 28-31.
- [15] 冯涛,谢雄刚,刘辉,等.注液冻结法在石门揭煤中防突作用的可行性研究[J].煤炭学报,2010,35(6):937-941.
FENG Tao, XIE Xiongqiang, LIU Hui, et al. Research on feasibility in preventing the coal and gas outburst by infecting liquid and freezing in uncovering coal seam in cross-cut [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 937-941.
- [16] 李绍泉.近距离煤层群煤与瓦斯突出机理及预警研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
- [17] 胡杰,隆清明,李建功,等.顺煤层钻孔瓦斯抽采时空演化规律研究[J].煤炭科学技术,2017,45(2):83-88.
HU Jie, LONG Qingming, LI Jianguo, et al. Study on time-space evolution law of gas drainage with drilling along coal seam [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(2): 83-88.
- [18] 周勇,赵康.单一厚煤层水力冲孔技术参数确定及效果考察[J].煤炭技术,2017,40(2):179-180.
ZHOU Yong, ZHAO Kang. Determination of technical parameters of hydraulic punching in single thick coal seam and its effect investigation [J]. Coal Technology, 2017, 40(2): 179-180.
- [19] 王殿录.低透气性煤层水力冲孔增透技术试验研究[J].煤炭与化工,2017,40(10):149-152.
WANG Dianlu. Study on low permeability outburst coal seam watering hole anti-reflection technology [J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(10): 149-152.
- [20] 刘海波,尚政杰."三软"煤层水力冲孔与压裂耦合致裂增透技术[J].煤矿安全,2017,48(11):71-75.
LIU Haibo, SHANG Zhengjie. Hydraulic punching and hydraulic fracturing coupling permeability improving technique in "three soft" coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(11): 71-75.
- (上接第161页)
- LI Yang, YANG Tianhong, LIU Honglei, et al. Construction and safety monitoring analysis of 3D visualization system for Da'an Coal Mine [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(2): 277-283.
- [16] 刘永立,杨虎.煤矿火灾应急救援演练虚拟现实系统研究[J].矿业安全与环保,2013,40(6):22-25.
LIU Yongli, YANG Hu. Study on virtual reality system for mine fire emergency rescue training [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013, 40(6): 22-25.
- [17] 曲斌.基于Vega的协同设计虚拟可视化平台构建[D].济南:山东大学,2009.
- [18] 苏铁明.计算机支持的协同设计框架及若干关键技术研究[D].大连:大连理工大学,2003.
- [19] 孙振明,李梅.基于虚拟现实和协同工作的煤矿安全培训系统[J].科技导报,2016(9):102-107.
SUN Zhenming, LI Mei. Coal mine safety training system based on virtual reality and collaborative work technology [J]. Science & Technology Review, 2016(9): 102-107.
- [20] 许爱军.多用户协同虚拟现实的技能训练系统[J].计算机系统与应用,2016,25(2):65-70.
XU Aijun. System of multi-user collaborative virtual Reality assist in skills training [J]. Computer Systems & Applications, 2016, 25(2): 65-70.
- [21] 周峰,王兆其,刘金刚.多人实时协同设计在虚拟家装系统中的研究与实现[J].微计算机信息,2011(1):271-273.
ZHOU Feng, WANG Zhaoqi, LIU Jingang. Research and implementation of multi-user real-time collaboration in virtual house decoration system [J]. Microcomputer Information, 2011(1): 271-273.
- [22] 杨兆春.网络游戏数据包的抓取与识别[D].北京:北京交通大学,2007.
- [23] 袁磊,张浩,陈静,等.基于本体化知识模型的知识库构建模式研究[J].计算机工程与应用,2006(30):65-68.
YUAN Lei, ZHANG Hao, CHEN Jing, et al. Design pattern of knowledge base based on ontology knowledge model [J]. Computer Engineering and Applications, 2006(30): 65-68.