

文章编号:1671-251X(2022)S2-0098-05

高逼真数字孪生技术在露天矿山 无人驾驶中的应用

钮景付

(国能准能集团有限责任公司 黑岱沟露天煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 010399)

摘要:目前智能矿山项目中矿卡监控和管理系统大多采用调取固定地点视频监控、2D平面图概览、类似2.5D的立体监控系统方式,存在监控盲区、场景不真实、用户体验感差等问题。提出了一种面向露天矿山的高逼真数字孪生系统构建方案,融合3D场景实时渲染、虚拟矿卡渲染制作、车载传感器、4G/5G通信、Matlab矿卡开发技术,可逼真地呈现无人驾驶矿卡运行状态,提高了用户体验感。该系统已在黑岱沟露天智能矿山项目中成功实施和部署,可很好地嵌入其他子系统,生动形象地呈现无人矿卡数字孪生效果。

关键词:智能矿山;露天矿山;无人驾驶矿卡;数字孪生

中图分类号:TD57 文献标志码:A

Application of high realistic digital twin technology in open-pit mine

NIU Jingfu

(Heidaigou Open-pit Mine, CHN Energy Zhunneng Group Co., Ltd., Ordos 010399, China)

0 引言

智能化与数字化是矿山企业发展的必由之路,是提高矿山企业核心竞争力、实现可持续发展的必然选择^[1-2]。智能化矿山建设已经被列入国家能源发展战略。国家发改委等八部委联合印发的《关于推进煤矿智能化发展的指导意见》明确提出了推进煤炭产业智能化、数字化发展要求。当前,数字化浪潮已经波及世界的每一个角落,在这种技术大发展的背景下,数字孪生技术应运而生。从本质上看,数字孪生是在数字虚拟世界里建立一个与真实世界系统或者实体的运行状态完全一致,并且可以实现实时仿真的仿真模型。利用安装在真实系统或者物体上的传感器实时采集的数据映射该仿真模型,实现真实世界的物体与数字虚拟世界的物体同步运行。

目前,数字孪生技术已经广泛应用于智慧城市^[3]、智能工业制造4.0等领域^[4],为这些行业带来源源不断的技术发展动力。但是在煤炭开采这类相对传统而又十分重要的行业,数字孪生技术的应用推广还处于起步阶段,技术研究和拓展有待进一步开展。

目前我国一些大型煤矿企业正加快智能化建

设,极大地促进了煤炭行业的产业升级改革。在一些大型智能矿山建设项目中,往往需要对几十、几百台无人驾驶卡车进行管理,管理者需要对矿山中运行的全部无人卡车进行实时监控。目前智能矿山项目中全部工作矿卡的监控和管理系统大多采用以下方式。

(1) 调取固定地点视频监控。该方式受限于监控摄像头的数量和位置,可监控范围内盲区较多,画质不清晰,在扬尘或天气恶劣时基本失效。

(2) 2D平面图概览。该方式虽然可以总体把握全矿车辆设备状态,但缺乏第三空间维度,管理者无法直观监控矿卡运行状态,存在监控盲区,人的体验感很差。

(3) 类似2.5D的立体监控系统。该方式虽然具有3D视觉感受,但CAD图形仿真矿卡不逼真,2D场景不够真实,且监控矿卡存在跳变不连续现象,代入感不强。

数字孪生技术基于智能矿山中的智能化、数字化技术,数字孪生系统的建立和应用是智能矿山建设中不可缺少的一环。本文提出一种面向露天矿山无人驾驶的高逼真数字孪生系统构建方式,其能够很好地解决目前智能矿山车辆监控和管理系统存在

收稿日期:2022-08-25;责任编辑:李明。

作者简介:钮景付(1976—),男,辽宁阜新人,高级工程师,长期从事露天矿开采、矿山工程等技术研究与管理工作,E-mail:10578305@chenenergy.cn.cn。

的问题和不足。

1 高逼真矿山场景构建技术

矿山数字孪生技术作为面向露天矿山无人驾驶的高逼真数字孪生系统重要组成部分,具体表现在虚拟矿山场景模型对真实矿山的还原,这种还原不单表现在模型精度上,还体现在矿区的光影渲染效果。但是露天矿山面积大,范围广,地形结构较复杂,以往人工矿山建模方式不仅工作量大^[5],还要考虑建模软件的可编辑承载容量及实时渲染带来的计算机性能成本开支。矿区渲染的光影效果是评价能否实现数字孪生视觉效果的重要标准。因此,要呈现一个高逼真的数字孪生矿山视觉效果,高精度、多细节的矿区场景构建必不可少。

随着数字媒体技术发展日益强大,高精度的虚拟场所呈现的逼真光影和细节几乎可以达到真假难辨的效果。这都得益于强大的游戏引擎所使用的3D图形实时渲染技术。目前,软件定义的多边形渲染器使用的 shader 算法越来越成熟且高效,最新 NVIDIA RTX GPU 显卡的图形渲染算力得到了极大提升。这些软硬件技术的发展,为渲染具有数千万乃至数以亿计顶点与多边形表面的大规模、高复杂度3D场景提供了可行性。

本文提出的数字孪生系统使用的虚拟矿山场景基于大型露天煤矿企业采用无人机航拍测绘、激光雷达3D扫描等手段获取的矿山高精度3D模型数据资源。这些3D模型的数据量庞大,场景规模数以亿计。利用上述3D场景渲染技术渲染数字孪生系统中的虚拟矿山流程:提取测绘模型资源中的8K高清纹理素材,对扫描的等比例3D模型进行拓扑、多边形表面法线烘焙、程序化地表材质设计、光照效果处理等,即可在虚拟世界中实现矿山场景还原。效果如图1所示,可看出与真实矿山几乎一样。



图1 虚拟矿山渲染效果

数字化高精度建模技术可使虚拟场景无限接近真实场景的比例特征,同时呈现与真实场景几乎相同的视觉效果,使矿卡类似于行驶在真实矿山中,便于同步互动。这种面向露天矿山的高逼真矿山场景建模方式,是数字孪生系统的关键环节之一。

2 数字孪生矿卡模型构建技术

矿卡模型构建也是数字孪生系统的关键环节,模型质量决定了虚拟模型能否对物理世界中的真实矿卡进行精确的数字描述。但绝对一模一样的虚拟矿卡建模在技术上是不可能实现的。本文中数字孪生系统着眼于对矿卡的一些关键元素进行重点建模,具体体现在:① 真实矿卡的几何尺寸、尺寸精度方面,所建模型与真实矿卡在尺寸数据精度上一致。② 物理特征及人类视觉感官效果方面,所建模型在外观上与真实矿卡保持一致,与真实矿卡视觉感官完全相同。③ 矿卡运动、矿卡各部件的相对机械运动、轮胎动力学特性、货箱油缸举升动作等方面保持一致。④ 矿卡信息方面,矿卡模型的实时数据与真实矿卡数据完全同步,数据包括矿卡位置、姿态、车速、载重、运载物料、油量、里程、故障信息等。

对于上述关键技术元素,采用以下方法来实现。

(1) 虚拟矿卡建模时使用生产厂家的原始设计资料,包括有精确尺寸数据的数模、CAD图纸等,使矿卡3D建模与矿卡设计保持相同精度。

(2) 对于虚拟矿卡的视觉效果、真实感等,使用PBR(Physically-Based Rendering,基于物理渲染)制作流程。它能够更精确地描绘光照和物体表面之间的作用,主要有材质和光照2个属性^[6]。在游戏引擎中,基于PBR技术的虚拟矿卡制作的建模及材质、光照渲染都遵循物理规律和材质特性。使用更贴近自然规律甚至是直接描述自然规律的算法来渲染矿卡材质,可以获得近乎真实的矿卡视觉体验效果。

(3) 虚拟矿卡运行控制是虚拟矿卡开发中必不可少的环节。矿卡运动主要是机械相对运动,使用游戏中人物运动的实现手段进行制作。人物运动需要动画序列来实现,而动画序列的控制是通过绑定骨骼、添加控制、插入关键帧来实现的。虚拟矿卡运动可以使用骨骼刚性绑定,对虚拟矿卡车架、轮胎、方向盘、货箱等可进行机械运动的部件进行树状层级的骨骼绑定,设定运动关节控制关系,限制运动区间。通过控制器驱动其与真实矿卡以同样的方式运动,即可实现虚拟矿卡与真实矿卡同步运动。

(4) 在真实矿卡上设置多种车载传感器,使用5G通信技术高速传输数据,即可实时获取真实矿卡的位置、姿态等数据。矿卡模型与真实矿卡实时同步这些数据。

通过上述手段可以实现物理世界中真实矿卡在虚拟世界的精确数字化映射,效果如图2所示。



图 2 高质量数字孪生矿卡效果

3 车载传感器

数字孪生矿卡的实时运行依赖于真实数据的驱动,而数据来源于真实运行的矿卡。在真实无人驾驶矿卡上搭载各种传感器,利用传感器实时获取矿卡的各部件数据,然后通过车载网络传输至车载VCU(Vehicle-Control-Unit,整车控制器)。VCU将接收的数据进行统一整合处理,通过通信网络实时回传至数字孪生系统,使虚拟世界中的数字孪生矿卡同步具有这些信息属性。本文中数字孪生系统采集的主要数据(包括但不限于)如下。

(1) 定位数据(北斗、GPS等)。通过定位传感器获取矿卡的实时位姿数据,包括位置、姿态、速度、加速度等,利用CAN总线传输给VCU。

(2) 转向数据。通过直线位移传感器获取车轮的实时转向数据,包括角度、角速度等,利用CAN总线传输给VCU。

(3) 举升数据。通过角度传感器获取货箱的实时举升角度信息,利用CAN总线传输给VCU。

(4) 载重数据。通过载重传感器实时获取厢斗及货物的位移信息,并经过转换得到实际装载货物质量信息,利用CAN总线传输给VCU。

(5) 胎压数据。通过胎压传感器实时获取各轮胎压力,利用CAN总线传输给VCU。

(6) 里程数据。通过车载里程计或惯导系统获取矿卡行驶的动态里程数据,利用CAN总线传输给VCU。

(7) 灯光数据。通过车载线控CCU(Cell-Control-Unit)实时获取矿卡的灯光状态信息,利用CAN总线传输给VCU。

(8) 故障数据。通过车载健康管理系统及线控CCU实时监控故障信息,利用CAN总线传输给VCU。

4 4G/5G 通信技术

数字孪生系统数据传输依赖于网络通信技术。通过在矿山现场部署基站设施,搭建专用的4G/5G通信网络(图3),实现作业区内矿卡与地面控制系

统设备及数字孪生系统的实时通信。通信系统传输端主要应用于3个部分:V2N(Vehicle-to-Network,车到网络)、V2V(Vehicle-to-Vehicle,车到车)和V2I(Vehicle-to-Infrastructure,车到基础设施)。数字孪生系统主要通过传输端接收所有现场作业矿卡及系统数据,实时驱动虚拟世界中矿卡运行。为保证系统的稳定性和同步性,通信系统需具备高速率、低延时、全天候的特点^[7]。

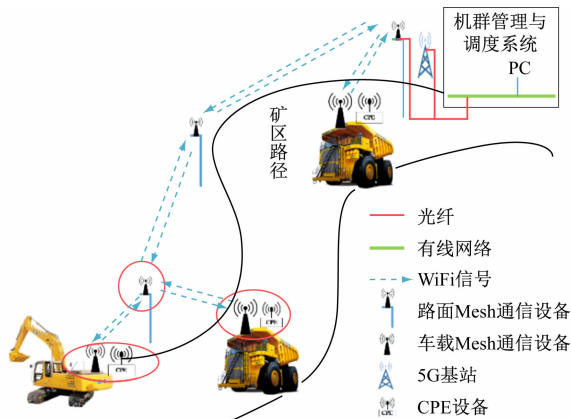


图 3 露天矿山 4/5G 通信网络

5 基于 Matlab 的矿卡计算

Matlab 具有非常强大的矩阵数值计算能力,已成为国际上最流行的科学计算与工程计算软件工具之一。因其具有丰富的汽车开发工具箱和系统模块^[8-9],世界上大多数汽车制造商和供应商都使用Matlab开发矿卡系统,对系统进行建模和仿真,建立矿卡概念的快速原型,并将其应用到产品中。

本文中数字孪生系统需要对物理矿卡进行虚拟化仿真,可利用Matlab强大的矿卡系统建模和仿真能力来处理 and 计算矿卡数据,如对传感器采集的真实矿卡状态数据进行评价和错误校正,使用虚拟矿卡模型来评价真实矿卡数据的正确性。

另外,搭载于真实矿卡上的传感器所采集的原始数据难免夹杂电气信号干扰、机械震荡、白色噪声等,可利用Matlab强大的信号滤波能力进行信号处理,如使用一阶低通滤波器、高通滤波器等平滑处理原始数据中的低频、高频震荡噪声,对离散型采样信号进行连续化处理,使虚拟矿卡的运动状态连续而平滑。

6 数字孪生系统架构

面向露天矿山无人驾驶的高逼真数字孪生系统架构如图4所示。构建流程如下。

(1) 针对智能矿山,搭建与真实矿山1:1的3D场景模型。使用游戏影视3D场景渲染技术对该

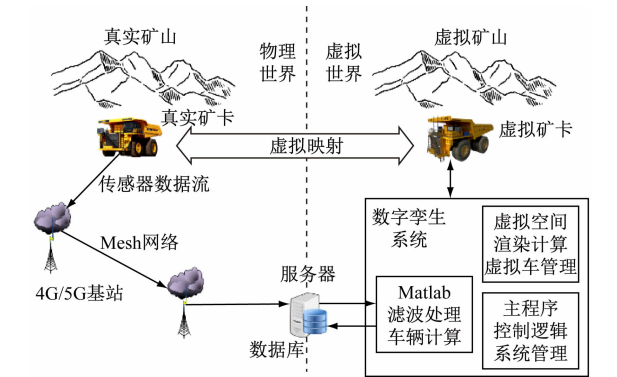


图 4 面向露天矿山无人驾驶的高逼真数字孪生系统架构

3D 场景模型进行实时渲染处理,保证场景中的矿卡可以获得全局动态光照效果。基于 CAD 设计模型对数字孪生矿卡进行材质渲染,使其具有与真实矿卡相同的机械结构,兼具丰富的贴图材质效果。通过骨骼绑定技术使矿卡模型符合真实矿卡的运行响应。

(2) 物理矿山中运行的矿卡通过搭载多种传感器实时采集矿卡状态数据,包括矿卡 GPS、车身姿态、厢斗举升、载重等。这些真实矿卡实时数据通过在矿山部署的 4G/5G 通信基站,高速且低延时(低于 20 ms)地传输至矿山控制中心服务器。

(3) 控制中心服务器综合处理通信数据,通过对数据分类、解析,提取出数字孪生程序所需的实时原始数据,Matlab 矿卡计算单元对原始数据进行滤波和平滑处理,再输入对应矿卡型号的矿卡动力学与运动学模块,对传感器采集的矿卡状态数据中存在的误差进行修正。

(4) 数字孪生系统程序获得正确的矿卡状态数据后,准确匹配到与真实矿卡对应的数字孪生矿卡,使数字孪生矿卡与真实矿卡的运动状态保持完全一致,真实矿卡和虚拟矿卡同步运行。最终使数字孪生系统在一个高度逼真的虚拟矿山中,同步地显示矿卡在真实矿山环境中的运行状态。

本文中数字孪生系统具有以下特点:① 系统结合游戏、影视业界的实时 3D 场景渲染技术和方法,使虚拟场景和矿卡高度逼真,非常接近真实世界,管路人员在监控和管理(无人)矿卡时,可以直观明了地掌握矿卡运行状态和信息。② 系统直接使用擅长汽车开发的 Matlab 工具完成矿卡数据的计算和处理,使虚拟空间的数字孪生矿卡运行更加准确、逼真。③ 基于 4G/5G 高速通信技术,使得传感器信号传输更快,虚拟矿卡与真实矿卡相互映射时具有更低的延时,虚实矿卡可与真实矿卡保持高度的同步性。④ 系统面向露天矿山场景设计,与智能矿山建设具有良好的兼容性,可以很好地服务于智能矿山项目,功能扩展能力强。

7 应用案例

国能准能集团有限责任公司(以下称准能集团)实施“准航智星”智能矿山项目以来,针对下属黑岱沟露天矿搭建的高逼真数字孪生系统快速应用于现场,与智能调度管理系统、卡车无人驾驶系统、5G 网络通信系统、电铲及工程辅助设备协同作业系统形成了一个有机生态整体。截至 2022 年 3 月,黑岱沟露天矿数字孪生系统已稳定运行 8 个月,基于现场的 5G 通信技术对实际运行矿卡数据进行高速回传,使得数字孪生系统中虚拟矿卡和真实矿卡保持同步运行,实现了真正意义上的数字孪生效果。通过现场数字孪生系统,操作人员可以实时监控所有真实矿卡的运行状态及位置,有效指导现场生产作业,推进了智能化建设。该系统架构如图 5 所示,运行效果如图 6—图 8 所示。

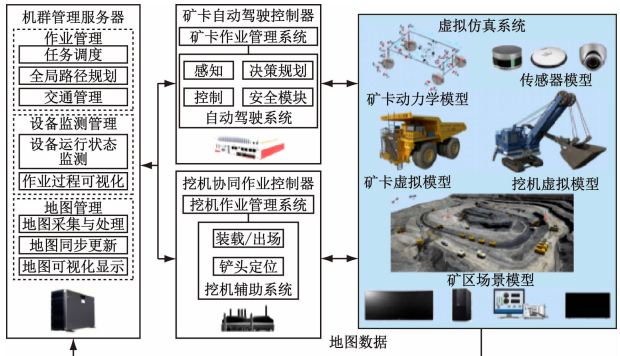


图 5 准能集团数字孪生系统架构



图 6 装载作业



图 7 运输作业



图 8 卸载作业

8 结论

(1) 提出了一种面向露天矿山的高逼真数字孪生

(下转第 111 页)

策略将调整运煤量曲线,确保运煤量曲线略高于上煤量曲线。

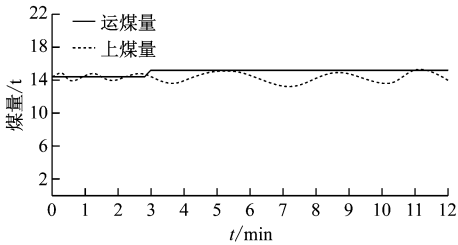


图 5 上煤量、运煤量叠加出现连续小突变情况

若煤量发生变化,出现上煤量曲线高于运煤量曲线且维持时间大于参考值的情况(图 6),仓前调速策略将调整运煤量曲线,确保运煤量曲线略高于上煤量曲线。

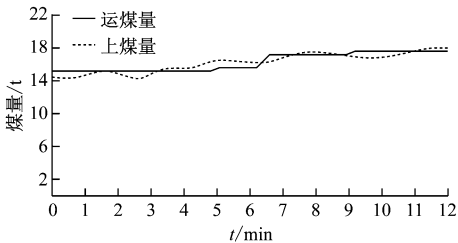


图 6 上煤量、运煤量叠加出现连续变化情况

(上接第 101 页)

生系统构建方案,总体上融合了游戏、影视业界的 3D 场景实时渲染技术,虚拟矿卡渲染制作技术,车载传感器,4G/5G 通信技术,Matlab 矿卡开发技术等,可以非常逼真地实现智能矿山项目中对全部无人驾驶矿卡运行状态的跟踪和监控,有效地解决了现有监控系统展示效果不够逼真、不够形象的问题,提高了人的体验感。

(2) 系统在黑岱沟露天智能矿山项目中成功实施和部署,与其他子系统相辅相成,很好地嵌入并拓展了系统功能。在项目验收和演示过程中,生动形象地呈现了无人矿卡数字孪生效果。

(3) 未来该系统可结合大数据平台,构建一个功能更加全面的露天矿山数字孪生系统,更好地指导矿山生产,也可以融合 VR/AR 等技术进行更加深入的研究和拓展。

参考文献:

[1] 马建威. 数字化转型对露天矿智能化发展的重要性

3 结语

主要结合利民煤矿的应用实例展开对煤矿智能煤流调速策略进行研究,研究的核心内容有 2 点:第 1 点是研究改变煤量调速控制中仅采用反馈环进行调节的现状,在调控速制中加入前馈环,使被动调节变成主动调节;第 2 点是研究图谱叠加算法在多源头煤流调速中的应用。该煤流智能调速的研究主要依托于煤矿智能化平台基础,也是在尝试通过平台实现跨系统的应用探索。

参考文献:

[1] 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.
[2] 郗存根. 煤矿运输自适应控制系统的设计和应用[J]. 煤矿机械,2019,40(1):4-6.
[3] 王兴友,吴中伟,范胜祥,等. 煤矿供电系统无人化建设技术研究与实践[J]. 煤炭科学技术,2018,46(增刊 2):153-156.
[4] 李纪栋,蒲绍宁,翟超,等. 基于视频识别的带式输送机煤量检测与自动调速系统[J]. 煤炭科学技术,2017,45(8):212-216.

[J]. 露天采矿技术,2022,37(3):96-99.

[2] 刘峰,曹文君,张建明. 持续推进煤矿智能化促进我国煤炭工业高质量发展[J]. 中国煤炭,2019,45(12):32-36.
[3] 陈若飞,李江川,马燕,等. 基于数字孪生技术的明珠湾智慧城市信息平台建设实践[J]. 自然资源信息化,2022(2):63-68.
[4] 德勤. 制造业如虎添翼:工业 4.0 与数字孪生[J]. 软件和集成电路,2018(9):42-49.
[5] 张璐. 矿山测量数据处理与三维巷道建模方法研究[J]. 山东工业技术,2015(8):145.
[6] 丁炜. PBR 流程下的影视模型优化渲染分析[J]. 现代商贸工业,2020,41(21):205-206.
[7] 孟峰,徐煦,薛国庆,等. 5G+无人驾驶技术在国能宝日希勒露天煤矿智能化建设中的应用研究[J]. 中国煤炭,2021,47(增刊 1):172-182.
[8] 王丹钰. 基于 MATLAB 软件的数字图像处理技术的应用研究[J]. 数字化用户,2019,25(39):155-156.
[9] 王晨. 基于 MATLAB 四轮转向车辆 PID 控制的建模与仿真[J]. 成都大学学报(自然科学版),2015,34(4):404-407.