

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.028

引用格式:王朝国,陈建伟,许志鹏,等.云庄隧道施工全过程多源信息集成平台开发[J].公路与汽运,2025,41(2):135-140.

Citation:WANG Chaoguo,CHEN Jianwei,XU Zhipeng, et al.Development of multi-source information integration platform for the whole construction process of Yunzhuang tunnel[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(2):135-140.

云庄隧道施工全过程多源信息集成平台开发*

王朝国¹,陈建伟²,许志鹏²,龙立敦¹,阳军生²

(1.贵州公路工程集团有限公司,贵州 贵阳 550008;2.中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:为有效解决山岭隧道施工全过程多源信息存储和检索问题,依托贵州六安(六枝—安龙)高速公路云庄隧道,开发隧道施工全过程多源信息集成平台。先通过图像三维重建技术构建隧道毛洞、初期支护及二次衬砌三维实景模型,基于该模型生成高质量二维全景展开图,并计算隧道断面的超欠挖值和初期支护厚度等,再利用 WebGL 技术搭建三维可视化在线交互平台,实现三维实景模型和二维平面展开图的加载,通过编写 Json 数据文件实现多源信息的存储、读取和可视化图表绘制;最后将多源信息集成于一体,形成云庄隧道施工全过程多源信息集成平台。工程应用结果表明,该平台能再现云庄隧道出口端施工全过程三维实景,三维实景能与隧道初期支护及二次衬砌厚度等数据信息实时交互展示,准确直观地反映隧道开挖与支护施工质量、围岩地质情况和支护结构受力状态,相比传统的 BIM(Building Information Modeling,建筑信息模型)平台,该平台在信息涵盖范围、精度和工作效率方面具有显著优势。

关键词: 工程管理;高速公路隧道;多源信息集成;WebGL 技术;全息化;信息平台

中图分类号:U415.2

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0135-06

高速公路隧道施工智能化、信息化进程带来数据量和模型信息量的显著增长,信息的存储、检索和共享变得日益复杂^[1]。合理存储和利用这些信息,能有效指导现场施工,为公路隧道的安全施工和人员安全提供重要保障^[2]。如何将隧道施工全过程中离散的三维实景模型与数据信息形成系统集成是亟待解决的技术难题。近年来,众多学者对此进行了研究,开发了多种信息化管理模型和应用方案。在隧道模型构建领域,祝志恒等通过改进图像三维重建技术,提出了基于 3DZI 技术的隧道三维实景模型构建方法^[3];李明博等利用 BIM(Building Information Modeling,建筑信息模型)技术,实现了公路隧道病害展示图的三维可视化^[4];高建新等通过 Revit 的二次开发,提出了一种基于 BIM 的参数化隧道标准建模方法^[5];田琼等结合 BIM 平台和 GIS(Geographic Information System,地理信息系统)技术,建立了槐树坪隧道信息化施工平台^[6];薛飞宇等基于 BIM 技术开发了隧道工程信息的 5D 管理系统^[7];李和元等基于灰色原理对已知数据进行

计算,建立隧道稳定性预测理论模型对隧道变形进行了预测^[8];吕颖钊采用序列影像三维信息模型构建技术建立模拟隧道结构真实空间的三维虚拟空间,利用影像拼贴技术完成隧道病害定位,确定损坏类型及其特征^[9]。在隧道多源信息集成技术研究方面,王金国等研究 BIM5D 技术与智能平台的应用,实现了基于 BIM 技术的隧道工程数字化施工控制^[10];祝志恒等利用空间分析和深度学习技术,实现了隧道施工过程多源数据的提取与集成^[11];傅金阳等基于计算机视觉和人工智能技术,提出了隧道超欠挖和支护结构厚度等数据信息的数字化采集方法^[12];李洪江运用模糊物元法和 Dempster-Shafer 证据理论对多源数据进行融合计算,提出了一种基于多源信息融合的隧道安全风险评估方法^[13];曹祎楠等结合 BIM 和 GIS 技术对复杂山区高速公路进行参数化设计,提出了基于开源三维地图引擎 Cesium 的高速公路数字化方法^[14]。目前大多数研究侧重于使用 BIM 技术构建隧道模型,不能充分展现隧道表面的真实特征,特别是在复杂地形和洞室

* 基金项目:贵州公路工程集团有限公司科技项目(2021-5)

群隧道施工中,难以满足隧道精细化施工控制的需求。此外,现有 BIM 平台在技术整合、适应性和实时更新方面存在局限,无法整合及实时更新隧道施工过程中的超欠挖、初期支护及二次衬砌等重要数据信息。为实时交互展示关键施工数据,本文针对贵州六安(六枝—安龙)高速公路云庄隧道工程的实际需求,开发云庄隧道出口端施工全过程多源信息集成平台,为隧道施工质量精细化控制及后期运营维护提供参考。

1 工程概况

云庄隧道的设计速度为 80 km/h。出口端坐落于峡谷地带,与目前在建世界第一高桥——花江峡谷大桥相接。出口端的主洞采用连拱和小净距结构形式,与花江峡谷大桥六枝岸隧道锚紧邻。出口端由直墙连拱和曲墙连拱逐渐过渡到分离式隧道,连拱隧道段总长度为 291 m,其中直中墙渐变段长度为 256 m,复合式曲中墙渐变段长度为 35 m,极小净距段长度为 72 m,小净距段长度为 30 m,其余为分离式隧道。

该隧道位于云贵高原向广西丘陵过渡的斜坡地带,场区属溶蚀低中山地貌单元,出口端为峡谷地形,洞身段地层岩性主要有中风化白云岩、白云岩夹角砾状白云岩、角砾状白云岩。图 1 为隧道出口端工程地质断面。

出口端将整体式直中墙连拱隧道优化为分层式直中墙连拱隧道,连拱段整体跨度较大,隧道局部围岩条件较差,同时将施工方法由传统中导洞法调整

为无中导洞法进行施工,且出口端主洞与隧道锚紧邻,相互影响大。鉴于该隧道出口端施工的特殊性,为保障隧道安全、快速施工,同时为后期隧道运营维护提供准确信息支持,构建一个整合施工全过程多源信息的集成平台尤为必要。

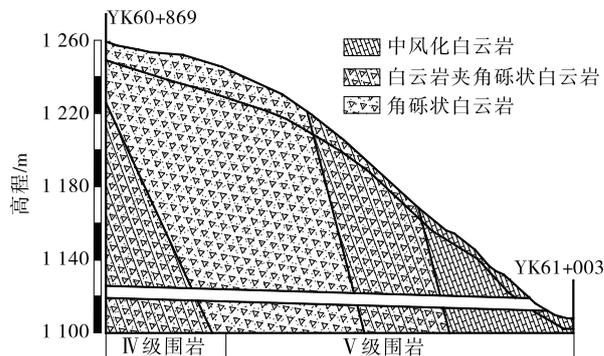


图 1 云庄隧道出口端工程地质断面(单位:m)

2 隧道三维实景模型重建及施工数据提取

2.1 三维实景模型重建

三维实景模型重建步骤主要为照片拍摄、稀疏点云重建、密集点云重建、曲面构型和图像拼接^[3],重建流程见图 2。先通过人工拍摄隧道洞壁,获得隧道施工全过程照片集,在此基础上利用运动恢复结构方法^[15]建立隧道稀疏点云,通过导入控制点坐标进行坐标变换,将稀疏点云移动至施工坐标系,确保稀疏点云的尺寸与真实尺寸一致;然后应用 PMVS(Patch-based Multi View Stereo)^[16]算法转化为密集点云,确保重建模型能准确反映隧道洞壁及支护结构的表面特征;最后利用泊松表面重建方

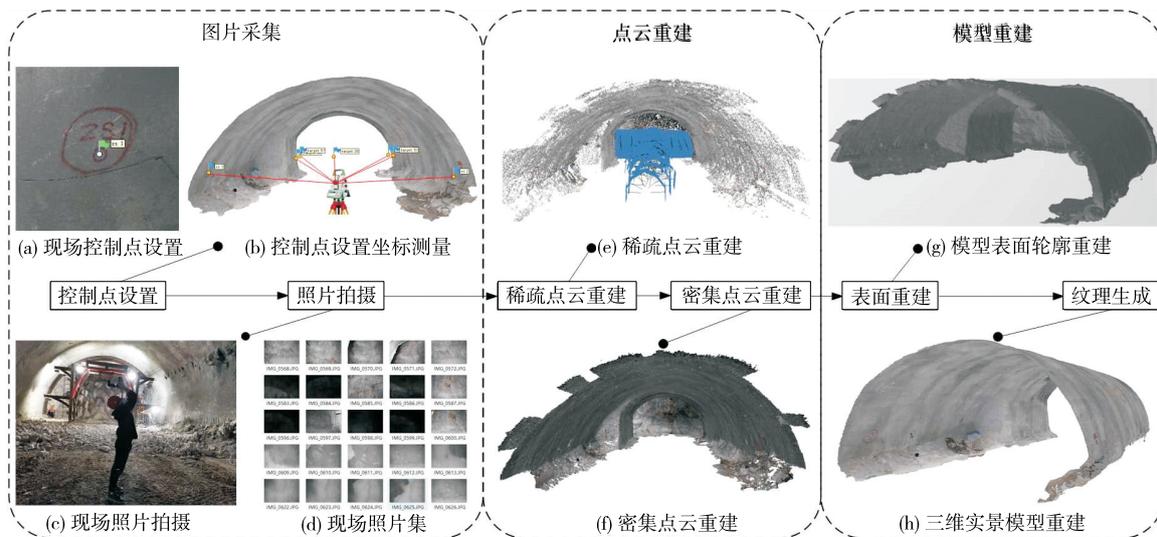


图 2 隧道三维实景模型重建流程

法^[17]获得模型表面重建轮廓并生成纹理,得到隧道三维实景模型。利用上述模型重建技术建立云庄隧道出口端施工全过程三维实景模型,其中先行洞各拍摄段毛洞、初期支护和二次衬砌三维实景模型见图 3~5。



图 3 云庄隧道先行洞各拍摄段毛洞三维实景模型



图 4 云庄隧道先行洞初期支护三维实景模型



图 5 云庄隧道先行洞二次衬砌三维实景模型

2.2 二维全景展开图构建

前文构建的三维实景模型虽然在视觉上具有良好的展示效果,但在工程实际应用中,二维平面展开图更便于对隧道的表面缺陷进行观察和标注。利用图像矫正拼接技术,通过构建隧道设计轮廓、设计轮廓与实际轮廓求交及图像拼接矫正等,获得云庄隧道先行洞施工全过程全景展开图(图 6~8)。



图 6 云庄隧道先行洞各拍摄段毛洞洞壁全景展开图



图 7 云庄隧道先行洞初期支护全景展开图



图 8 云庄隧道先行洞二次衬砌全景展开图

2.3 施工数据信息提取

基于上述云庄隧道先行洞毛洞开挖三维实景重建模型,采用文献[18]中基于图像三维重建的隧道超欠挖计算方法,计算各拍摄段隧道断面超欠挖值,计算流程见图 9。该方法也适用于计算隧道初期支护厚度、二次衬砌厚度及净空等施工过程中关键数据信息。云庄隧道先行洞 ZK060+962.8—965.7 拍摄段典型断面的超欠挖值及初期支护厚度计算结果见图 10。这些数据信息为构建多源信息集成平台提供了重要数据来源。

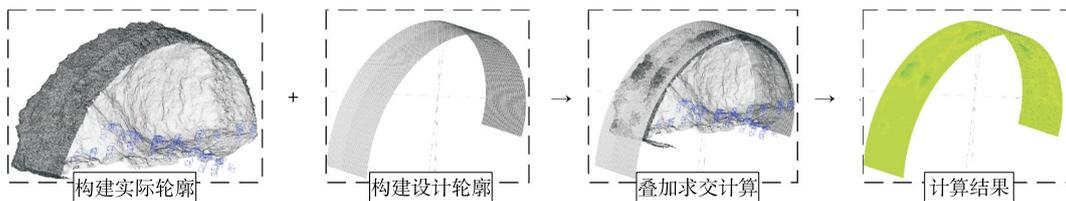


图 9 基于图像三维重建的隧道超欠挖值计算流程

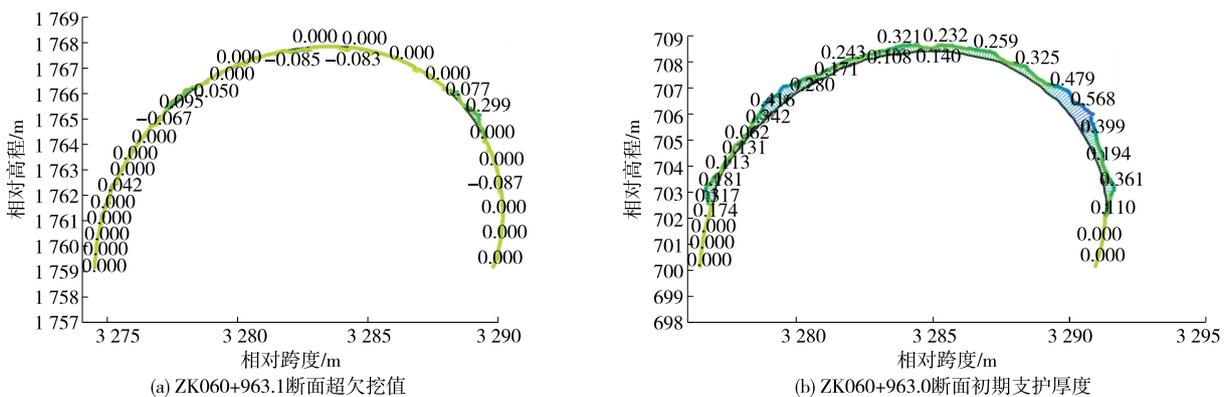


图 10 云庄隧道先行洞典型断面超欠挖值及初期支护厚度计算结果(单位:m)

3 隧道施工全过程多源数据集成信息平台开发

3.1 相关技术

(1) WebGL 技术。WebGL 技术可为浏览器端

的 3D 图形展示提供硬件加速渲染效果^[19]。本文基于 WebGL 技术和开源 3D 引擎库开发三维可视化交互平台,实现隧道毛洞洞壁、支护结构、地表等三维实景模型的读取和调用。

(2) JavaScript 语言。JavaScript 语言被广泛应用于 Web 浏览器的应用开发,为网页增加各种动态效果,将其直接嵌入 HTML(超文本标记语言)中通过浏览器编译和执行即可实现相应功能^[20]。本文使用 JavaScript 语言进行多源信息集成平台页面及动态交互功能开发。

(3) Json 数据格式。Json(JavaScript Object Notation)是一种轻量级的数据交换格式,具有简洁、清晰的逻辑结构,被广泛应用于网页开发^[21]。本文通过编写 Json 数据格式文件实现超欠挖值、初期支护厚度及支护结构内力监测值等多源数据信息的存储和读取功能。

3.2 多源信息集成平台搭建

(1) 环境搭建。AppServ 是一款成熟的开源集成开发软件,能为开发者提供 Apache HTTP Web 服务器、MySQL 数据库及 PHP 解释器等 Web 开发所需软件和环境^[22]。采用开源 AppServ Web 集成开发软件搭建三维可视化在线交互平台所需环境,实验环境搭建基于 Window10 操作系统;设备 CPU(Central Processing Unit,中央处理器)为 12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12500H(3 100 MHz),内存为 16 GB;设备显卡为 NVIDIA GeForce RTX 3050 Laptop GPU;服务器端软件为 AppServ 8.6;运行浏览器为 Microsoft Edge 2024。

(2) 三维可视化交互平台构建。Three.js 框架包含构建三维可视化交互平台的所有工具,能实现三维模型的调用、显示、渲染等功能^[23-26]。通过 Three.js 框架搭建包含轨迹球控件、飞行控件、翻滚控件、第一人称控件、轨道控件等主要交互控件,实现场景的平移和缩放、模拟飞行效果、三维实景模型沉浸式浏览、围绕选定对象的旋转和平移等功能,满足浏览者对场景的自定义浏览需求。

(3) 三维实景模型加载。三维实景模型的在线加载通过 Three.js 框架中的模型加载器实现。通过 Metashape 软件将三维实景模型导出为 obj 格式,同时保留对应 mtl 材质文件,使用 Three.js 框架中的 obj 模型加载器和 mtl 模型加载器实现隧道毛洞洞壁、支护结构、地表等三维实景模型的读取。

(4) 展开图加载。二维全景展开图文件由展开图 html 文件和 DZI 文件夹组成,其中展开图 html 格式文件可直接通过浏览器加载,DZI 文件夹中存储二维全景展开图切割后的金字塔图,通过编写相应调用代码实现展开图文件在 Web 端的读取和

展示。

(5) 数据信息存储与读取。使用 JavaScript 语言,将超欠挖值、初期支护厚度、初期支护钢拱架和二次衬砌内力等数据信息分别编译成对应 Json 文件,通过编写相应调用代码,实现数据的读取和可视化图表绘制。在数据存储层引入非关系型数据库和云存储技术,使平台能有效处理和存储隧道施工过程中的大量动态数据,这是传统 BIM 平台不具备的。

4 工程应用

在前述多源信息集成技术的基础上,开发云庄隧道出口端施工全过程多源信息集成平台,实现多源信息与三维实景模型的深度整合及三维实景模型与施工监测数据、地质数据、设计数据和施工日志等信息的无缝交互,指导现场施工,为云庄隧道出口端施工质量控制提供有力保障。图 11 所示平台界面中,3D 模型窗口支持在线展示云庄隧道先行洞的开挖毛洞、初期支护、二次衬砌等三维实景模型,并能同时呈现隧址区的地表三维模型;展开图窗口用于展示相应二维全景图;用户可通过图层控制窗口选择开启或关闭模型窗口中的特定对象;系统控制窗口提供预设视点、环境光照、雾效和相机参数等设置选项。

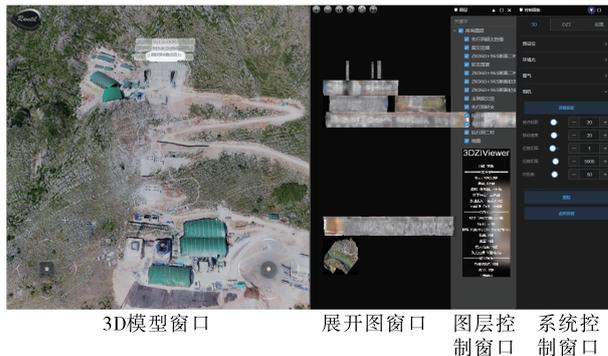


图 11 云庄隧道多源信息集成平台界面

4.1 云庄隧道平台多源信息的读取

多源监测数据的读取通过点击设置在初期支护三维实景模型表面的插件实现,通过点击图中不同标签能查阅相应数据,数据以曲线图形式呈现。点击模型表面的不同标签,系统中会弹出对应可视化图表(见图 12)。以隧道初期支护施工为例,这些图表不仅可展示隧道初期支护厚度和超欠挖值的最大值及平均值,还能展示同一位置不同时间点初期支

护钢拱架内力和应力监测值。通过设定预警阈值,一旦监测数据超出这些阈值,相关区域将用红色高亮显示,实现施工安全和后续运营维护的预警机制。该平台不仅集成了隧道的三维实景模型,还整合了

整个施工过程中的数据信息,用户可通过简单的操作访问多种数据,包括二次衬砌厚度、病害矢量数据、支护结构的位移和受力监测数据等,其数据信息覆盖范围超越了传统的 BIM 平台。

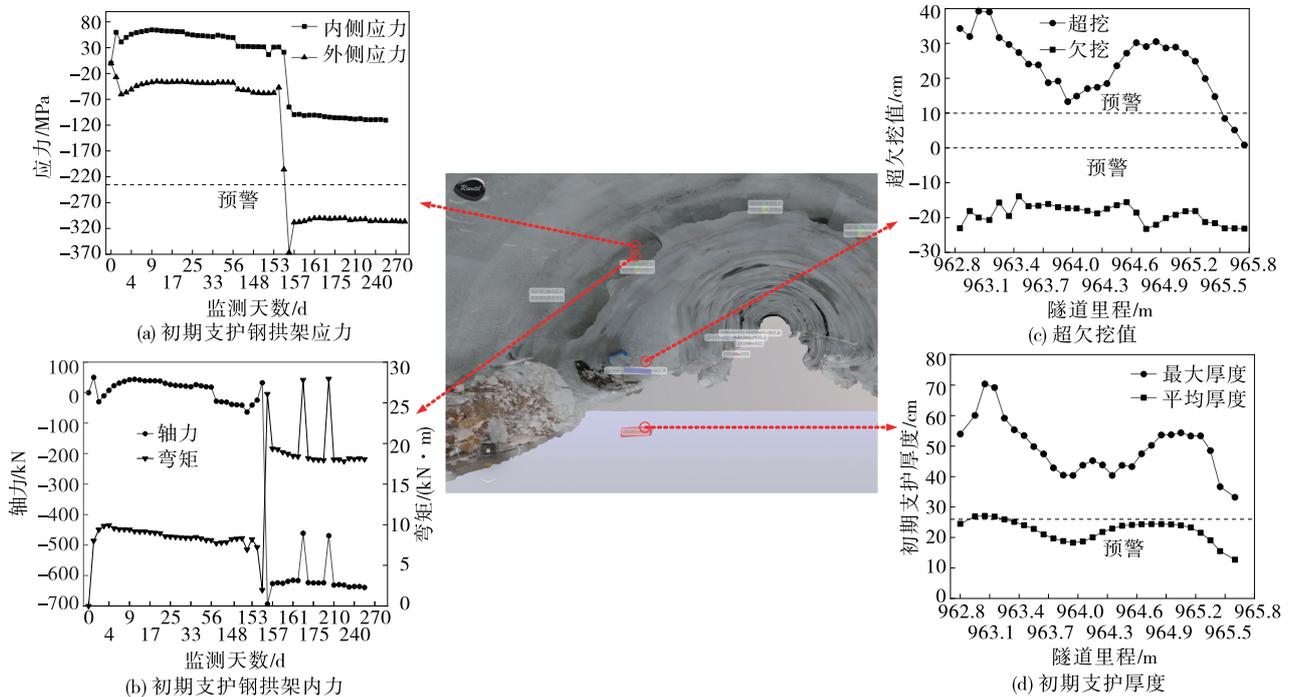


图 12 ZK060+965 断面初期支护施工多源数据读取

4.2 三维实景与全景展开图联动展示

如图 13 所示,通过三维实景模型与全景展开图的联动展示,用户在三维模型窗口内移动鼠标光标至隧道支护结构的任意表面,系统会在右侧展开图窗口中即时展示相应位置的支护结构表面细节。这种同步展示机制,使用户在三维模型浏览过程中能同时查看二维全景图,从而有效克服三维模型表面细节不清晰的问题,不仅提高了工程技术人员检查隧道支护结构表观缺陷的效率,还能通过平台集成的三维实景模型真实再现隧道施工全过程的空间信息。此外,二维全景展开图支持深度的缩放和平移操作,能精确呈现隧道表面的微小特征,为工程技术

人员提供更精确和详尽的数据信息支持。相较于 BIM 平台,该平台的模型精细度和工作流程效率都显著提升,极大增强了工程检查和质量控制的可靠性。

5 结论

(1) 基于图像三维重建技术和图像矫正拼接技术构建云庄隧道出口端毛洞、初期支护和二次衬砌三维实景模型,并生成高清晰度的二维全景展开图,能精确呈现云庄隧道开挖和支护的实际情况。

(2) 利用 WebGL 技术建立在线三维可视化交互平台,该平台支持三维实景模型和二维平面展开图的加载与展示,通过编写 JavaScript 语言的 Json 数据文件,能实现云庄隧道多源信息的存储、读取及可视化图表绘制。

(3) 云庄隧道施工全过程多源信息集成平台为云庄隧道出口端施工质量精细化检测控制提供了技术保障,还为隧道后期运营和养护积累了详尽的地质和施工过程资料,对确保隧道施工安全和质量及后期安全运营和科学养护具有重要作用。

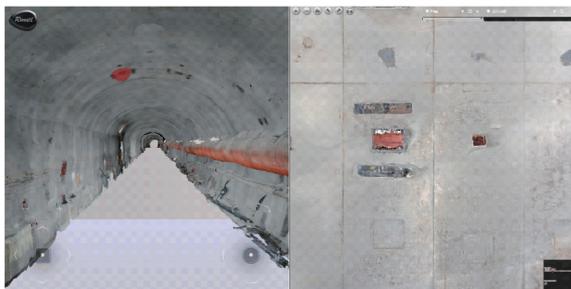


图 13 隧道三维实景模型与全景展开图联动展示

参考文献:

- [1] 林国庆, 闵世平. 基于 3D GIS 与大数据技术的隧道施工信息化管理平台研究[J]. 现代测绘, 2021, 44(4): 29-33.
- [2] 黄敏. 基于信息化施工和智能化管理的隧道工程监测与安全评价[J]. 公路, 2023, 68(1): 249-255.
- [3] 祝志恒, 傅金阳, 阳军生. 隧道开挖支护质量 3DZI 检测技术及应用研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 176-189.
- [4] 李明博, 蒋雅君, 刘小俊, 等. BIM 技术在运营隧道病害检测结果三维可视化中的应用[J]. 中外公路, 2017, 37(1): 297-301.
- [5] 高建新, 姜谔男, 郑帅, 等. 基于 BIM 的参数化隧道标准建模方法[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 236-241.
- [6] 田琼, 周基, 芮勇勤, 等. 基于 BIM+GIS 的槐树坪隧道信息化施工研究[J]. 中外公路, 2019, 39(6): 158-161.
- [7] 薛飞宇, 赵赛辉, 夏诗画. 基于 BIM 技术的公路运维管理系统设计研究[J]. 公路交通技术, 2018, 34(2): 132-138.
- [8] 李和元, 黄卫国, 胡凯. 不良地质隧道围岩稳定性预测模型构建与分析[J]. 公路与汽运, 2021(6): 158-161.
- [9] 吕颖钊. 序列影像三维信息模型技术在隧道巡检中的应用[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(4): 53-57.
- [10] 王金国, 罗朝华, 丛培, 等. 基于 BIM 的隧道工程数字化施工控制技术与应用[J]. 公路与汽运, 2019(5): 157-158+165.
- [11] 祝志恒, 阳军生, 傅金阳, 等. 隧道工程结构物计算机视觉检测技术[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2022.
- [12] 傅金阳, 阳军生, 祝志恒, 等. 基于计算机视觉的钻爆法隧道开挖与支护质量检测技术及应用[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2023.
- [13] 李洪江. 基于多源信息融合的隧道安全风险评估[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(7): 65-71.
- [14] 曹祎楠, 王佳, 顾大鹏. 面向多源数据集成的高速公路数字化方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(19): 214-221.
- [15] SCHONBERGER J L, FRAHM J M. Structure-from-motion revisited [C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA, IEEE, 2016: 4104-4113.
- [16] FURUKAWA Y, PONCE J. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(8): 1362-1376.
- [17] KAZHDAN M, BOLITHO M, HOPPE H, et al. Poisson surface reconstruction [C]//Proceedings of the Fourth Eurographics Symposium on Geometry Processing, Cagliari, Sardinia, Italy, ACM, 2006: 61-70.
- [18] 阳军生, 张宇, 祝志恒, 等. 基于图像三维重建的隧道超欠挖检测方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 714-723.
- [19] 帕里西. HTML5 与 WebGL 编程[M]. 潘征, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [20] 赵书田, 刘海姣. 基于 JavaScript 的动态 Web 应用系统设计[J]. 现代电子技术, 2017, 40(15): 44-46+51.
- [21] 黄秀丽, 陈志. 基于 JSON 的异构 Web 平台的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(3): 120-125.
- [22] AppServ. AppServ: Apache+PHP+MYSQL[EB/OL]. <https://www.appserv.org/en/>.
- [23] 林杰, 祝江林, 肖强, 等. 基于 Three.js 引擎模块的隧道三维可视化系统设计与实现[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2023, 45(5): 795-800.
- [24] 苏龙生, 邓斯尧, 周佳莹, 等. 基于 Three.js 的虚拟模型 3D 交互展示研究及实现[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(1): 43-46.
- [25] 鲁魏. 基于 Three.js 的矿区三维可视化应用平台开发与研究[D]. 成都: 西南科技大学, 2023.
- [26] 汪永吉, 李春苹, 雷霆. 基于 Three.js 技术的 3D 数字化动态展示的研究与应用[J]. 信息记录材料, 2023, 24(12): 158-160.

收稿日期: 2024-10-15