

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2023.05.016

基于数字化图像的引水隧洞超欠挖检测 及其应用技术研究

詹双桥¹, 杜兴武¹, 夏裕栋², 陈运财¹, 罗钰博², 阳军生², 张聪³

(1. 湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南长沙 410007;

2. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075;

3. 中南林业科技大学土木工程学院, 湖南长沙 410004)

摘要: 为有效减少小断面引水隧洞围岩开挖超欠挖量, 依托犬木塘水库大山岭隧洞工程, 采用一种基于图像处理技术的超欠挖检测方法, 使用数码相机采集隧洞图像数据, 并进行点云数据处理、三维曲面重建、图像拼接展开等步骤来实现隧洞超欠挖检测, 并对所提方法应用于引水隧洞工程的有效性进行验证。应用结果表明: 通过三维曲面重建的实际轮廓与设计开挖轮廓对比分析可计算引水隧洞超欠挖值、超欠挖面积及超欠挖体积量等参数, 通过图像拼接矫正构建隧洞地质展开图, 能直观展示节理素描等围岩信息。该研究实现了对小断面引水隧洞超欠挖的精准快速检测, 具有广泛的应用前景, 可为后续施工设计提供依据。

关键词: 引水隧洞; 超欠挖; 图像处理; 节理素描

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2023)05-0105-06

Over-under-excavation Detection Based on Digital Image of Water Diversion Tunnels and Its Application

ZHAN Shuangqiao¹, DU Xingwu¹, XIA Yudong², CHEN Yuncai¹, LUO Yubo²,
YANG Junsheng², ZHANG Cong³

(1. Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha, Hunan 410007, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;

3. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: In order to effectively reduce the amount of over-under-excavation in the perimeter rock excavation of small cross-section diversion tunnels, an over-under-excavation detection method based on image processing technology is adopted based on the Dashanling Tunnel Project of Quanmutang Reservoir. A digital camera is used to collect image data of tunnels, and point cloud data processing, three-dimensional surface reconstruction, and image splicing and unfolding are performed to realize the detection of over-under-excavation of the tunnels and verify the validity of the proposed method when it is applied to diversion tunnel projects. The effectiveness of the proposed method in the water diversion tunnel project is verified. The application results show that: by comparing and analyzing the actual contour of the 3D surface reconstruction and the designed excavation contour, we can calculate the value of over-under-excavation, the area of over-under-excavation and the volume of over-under-excavation of the diversion tunnel, and construct the geological unfolding map of the tunnel through the image splicing and rectification, which can visualize the peripheral information of the rock such as nodal sketches, and provide a basis for the subsequent adjustments in the design and construction of the tunnel.

Keywords: water diversion tunnel; over-under-excavation; image processing; nodal sketch

收稿日期: 2023-05-30

修稿日期: 2023-06-24

基金项目: 犬木塘水库工程科技创新项目(W-2022-72)

作者简介: 詹双桥(1981—), 男, 正高级工程师, 主要从事水利工程设计工作。E-mail: 21558127@qq.com

通讯作者: 夏裕栋(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为隧道与地下工程。E-mail: 214812318@csu.edu.cn

引水隧洞是自水源地引水的水工隧洞,是水工建筑物中十分重要的组成部分,其开挖施工质量对后续工程运营起到关键性作用。目前,工程上引水隧洞开挖普遍采用钻爆法,但该工法常因断面限制和地质条件的影响,致使开挖过程中不可避免地出现超欠挖现象。隧洞超挖将增加施工成本、破坏围岩的稳定,而欠挖则会增加再次开挖的工序时间及施工成本并造成围岩二次扰动,延缓施工进度。因此,如何实现小断面引水隧洞爆破开挖引起的超欠挖高效检测,是后续爆破开挖优化设计的前提与关键。

近年来,随着计算机技术和智能化测量设备的发展,数字化图像技术在超欠挖检测中得到了阶段性的应用^[1]。许磊等^[2]将三维激光点云技术应用多种隧道类型的超欠挖评价和测量中。韦征等^[3]针对三维激光扫描的隧道超欠挖检测,提出一种基于点云拟合曲面并结合设计面法线的分析方法。葛超等^[4]利用激光点云和图像处理技术对京张铁路某段进行超欠挖实时监测。李徐然等^[5]基于统计的滤波法建立了一种简便易行的隧道超欠挖方量计算模型。李海波等^[6]采用三维激光扫描技术建立了开挖围岩的三维表面模型,精确测量了洞室开挖围岩的超欠挖量。Fekete S 等^[7]将三维激光扫描仪应用于围岩结构面的识别和超欠挖检测中。王令文等^[8]将三维激光扫描技术应用杭州某地铁隧道的变形监测。

目前,数字化图像技术在交通工程领域超欠挖检测中已有较多应用,但在小断面引水隧洞的应用较罕见。为此,本文依托犬木塘水库大山岭引水隧洞工程,提出一种基于图像处理技术的超欠挖检测方法。利用数码相机进行快速数据采集,再通过点云重建、曲面重建获取隧洞实测轮廓模型,将其与设计轮廓进行对比,从而计算隧洞超欠挖结果。研究成果优化了小断面引水隧洞超欠挖的检测方法,以为类似工程提供实例参考。

1 工程概况

1.1 工程简介

犬木塘水库工程是解决“衡邵干旱走廊”水资源短缺问题的骨干水利工程,为Ⅱ等大型水利水电工程。工程包含灌区工程与枢纽工程两部分,其灌区位于“衡邵干旱走廊”湘资分水岭区域,涉及6处提水泵站、1条总干渠、5条分干渠和11条骨干支

渠。干支渠全长223.4 km,灌区渠首设计流量40.0 m³/s,提水泵站总装机4.96万kW。设计灌溉面积约7.54万hm²,年均引水量3.2亿m³。

大山岭引水隧洞为犬木塘水库工程灌区的一部分,位于总干渠工程段桩号ZG3+476.1—ZG8+765.1。隧洞为城门形无压隧洞,设计流量36.5 m³/s,建筑物级别为3级。隧洞全长5289 m,净断面尺寸为洞宽5.4 m,洞高5.66 m,顶拱角度为120°,纵坡*i*=1/3000。掘进开挖断面:洞宽6.7 m~6.9 m,直墙高4.6 m~4.7 m,拱高2.209 m~2.309 m。根据围岩分类结果,除进口至设计开口线外,围岩可分为Ⅲ~Ⅴ类,支护设计为复合式衬砌,初期支护为喷锚支护,初喷C20混凝土厚0.1 m~0.2 m,二次衬砌为C25钢筋混凝土衬砌,衬砌厚0.2 m~0.55 m。大山岭隧洞出口航拍图见图1,Ⅳ类围岩断面支护设计图见图2。



图1 大山岭出口航拍图

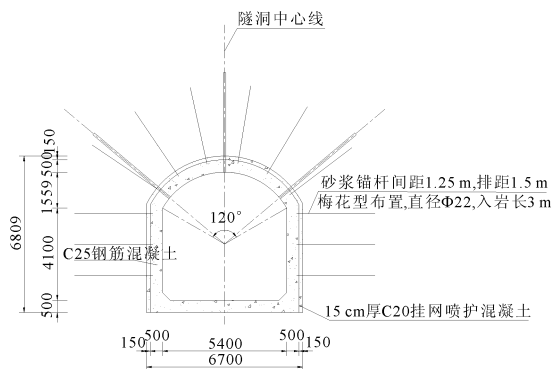


图2 Ⅳ类围岩支护断面图

1.2 工程地质情况

根据工程地质勘探,隧洞沿线地层岩性以泥盆系(D)和石炭系(C)的灰岩、泥灰岩为主,部分段夹薄层的砂页岩。隧洞沿线工程地质条件较复杂,为总干渠隧洞中的重点地段。洞室岩性主要为C₁d¹灰岩、泥灰岩,中厚~厚层状,围岩微风化,岩层产状N22°E·NW∠20°,洞轴线与岩层走向大角度斜交,

倾角平缓,岩溶较发育,地表水系发育,成洞条件较差。隧洞所经地段,地下水位埋藏较浅,多位于洞顶以上。地下水类型可分为第四系松散岩类孔隙水、碳酸盐岩裂隙溶洞水、基岩裂隙水三种类型。除隧洞进出口附近,其他洞段基本都处于地下水位以下,水温为常温水,未发现温泉等。隧洞所过地段大部分为中等~弱透水带,局部地段受岩溶、构造、节理裂隙及风化等影响,为强透水带。

1.3 隧洞开挖方法

大山岭隧洞穿越多种地层,各地层之间差异较大,施工中主要采用的开挖施工方法为爆破法开挖,爆破施工过程中严格控制装药量,减少炮轰波对围岩的扰动,达到保护围岩的目的。大山岭隧洞围岩采用全断面开挖,全断面光面爆破,采用毫秒延时导爆管雷管和电雷管引爆,光爆炸药采用2号岩石乳化炸药,药卷规格为 $\Phi 32-300\text{g}$ ^[9]。

开挖钻爆按照“短进尺、弱爆破、少扰动、强支护”的原则施工,Ⅱ~Ⅲ类围岩每循环进尺按2.5 m,Ⅳ类围岩每循环进尺2.0 m,Ⅴ类围岩及不良地质地段每循环进尺按1.5 m控制。掏槽孔采用菱形掏槽,光爆孔采用导爆索起爆,其它孔采用非电毫秒雷管起爆,炸药类型为乳化炸药或铵油炸药,在有地下水时采用乳化炸药;为便于下一循环周边钻孔,周边孔设计外偏角为 3° 。周边孔沿开挖轮廓线布置,

孔口位置在设计轮廓线上,钻孔方向沿纵向向外偏移,孔底位置在设计轮廓线外侧距离15 cm以内。Ⅳ类围岩现场标准爆破孔位图见图3,具体爆破参数见表1。

由于大山岭隧洞沿线软弱围岩广布,岩体强度较低,并且断面较小,整体可利用场地少,导致洞室开挖成型困难,超欠挖量较大。开挖过程虽不断优化每循环进尺、孔间距等爆破参数,但爆破质量依然不佳,隧洞超欠挖现象仍未得到有效控制。

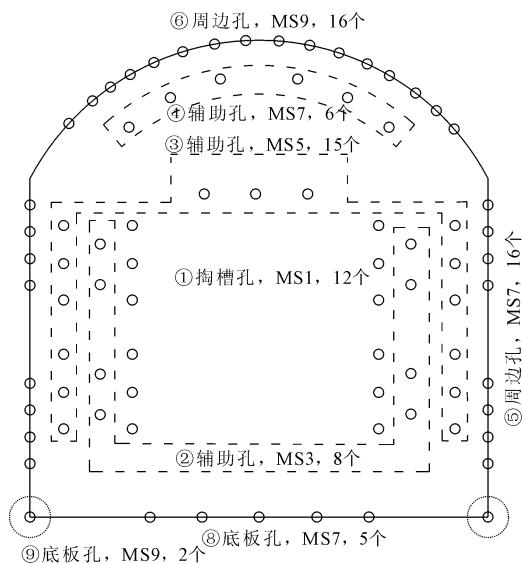


图3 大山岭Ⅳ类围岩爆破孔位图

表1 现场爆破参数表

序号	孔名	雷管分段	钻孔参数				装药参数	
			孔径/mm	孔深/m	孔距/cm	孔数/个	单孔药量/kg	总装药量/kg
1	掏槽孔	MS1	40	3.5	60	12	1.8	21.6
2		MS3	40	3.2	60	8	1.5	12.0
3	辅助孔	MS5	40	3.0	60	15	0.9	13.5
4		MS7	40	3.0	60	6	1.2	7.2
5	周边孔	MS7	40	3.0	60	16	0.6	8.4
6		MS9	40	3.0	50	16	0.6	9.6
7		MS5	—	—	—	—	—	—
8	底板孔	MS7	40	2.9	60	5	1.5	7.5
9		MS9	40	2.9	60	2	1.5	3.0
	合计	—	—	—	—	7	—	82.8

2 超欠挖检测技术

图像三维重建是基于二维图像恢复场景和目标三维信息的方法,是计算机视觉研究的一个核心且非常热门的领域,主要分为单目视觉、双目视觉和多目视觉^[10]。本研究采用了一种单目视觉三维重建

方法—运动恢复结构(Structure from Motion, SfM)^[11],可以从运动相机拍摄的多幅重叠的二维照片中估计相机的运动情况并重建出场景的三维空间信息。基于图像三维重建的引水隧洞超欠挖检测方法主要包括照片采集、点云重建、曲面重建、图像拼接四大步骤,其技术原理见图4,具体作业流程见图5。

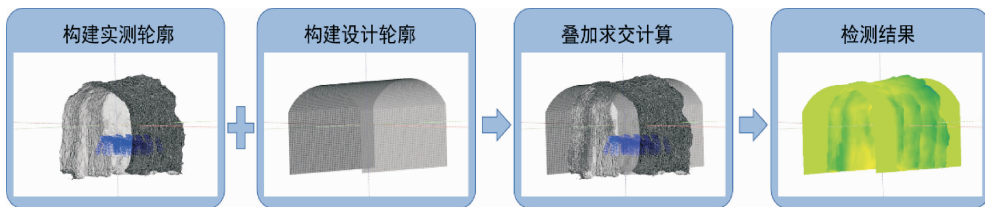


图 4 基于图像三维重建的隧洞超欠挖检测技术原理

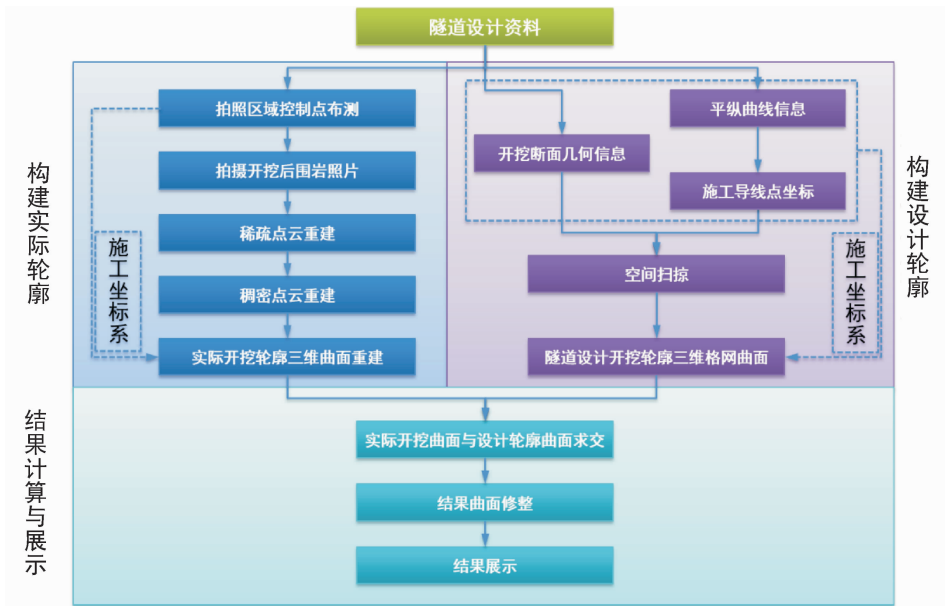


图 5 基于图像三维重建的超欠挖检测方法作业流程

2.1 图像数据采集

隧洞图像采集质量是后期数据处理的关键,也是获得良好三维图像点云效果的基础。本超欠挖检测应用方法使用现场手持相机拍摄的照片对实际开挖轮廓进行三维重建。

为获得足够精度和密度的空间点云数据,保证三维重建的完整性,相邻照片之间的重叠度应不低于 50%。使用相机采集图像数据时,可手持相机站立于隧洞中心线附近,然后按照“先环向后纵向再特写”步骤采集照片,具体拍摄流程如下:环向拍摄时,以隧洞拱脚起,正对拍摄区域,每拍摄结束一张照片,向隧洞环向方向旋转相机一定角度,保证与上一张照片重叠度不低于 50%,通常可将相机取景中心线旋转转移至上一张照片拍摄时闪光灯最边缘处即可满足要求。在相机旋转至正对隧洞顶部时,从另一侧拱脚起,同样拍摄至隧洞顶部;纵向拍摄时,每结束一环照片拍摄,纵向移动半幅图像采集宽度(一般为 0.5 m~1.0 m),然后进行下一环照片拍摄。

2.2 点云三维重建

本方法基于 SFM 算法实现隧洞实际开挖轮廓三维点云重建。SFM 算法首先由尺度不变特征变换 SIFT 算法提取图像特征点,再通过迭代光束平差过程(Iterative Bundle Adjustment Procedure)自动求解场景几何形态和相机方位等信息,实现隧洞图像稀疏点云重建^[12]。其本质是基于有一定重叠度的图像之间的同名点构建几何约束,进而求解相机的内外方位元素,最终将点云恢复到三维空间坐标系中。稀疏点云是图像数据中的特征点,检测和匹配极为简单,具有非常明显的特征,其成功与否影响着整个三维重建结果。在图像稀疏点云重建时,利用图像处理软件 metashape 求解出图像数据中的重叠图像的相同点,以此作为匹配点,进行图像配准,估计相机位置,图 6 为大山岭隧洞 ZG8+612.5—ZG8+609.6 段稀疏点云重建结果图。然后在已建立的稀疏点云的基础上进行密集点云重建,通过插值算法,在点云之间增加点,更加细致地重现出拍摄区域。

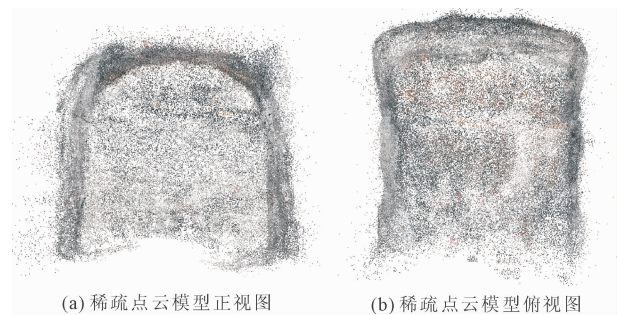


图6 ZG8 + 612.5—ZG8 + 609.6段稀疏点云重建结果图

2.3 三维曲面重建

三维点云展示了物体大致轮廓,而三维曲面在三维点云的基础上以大量的三角面片连接点云,更加真实地反映物体的形状、轮廓等信息,三角面片越多物体的形状轮廓信息越趋于真实。轮廓真实度影响着地质展开图及模型信息的获取,三维曲面重建是图像数据处理的一个重要环节。本方法基于Delaunay三角剖分算法对隧洞毛洞进行三维曲面重建^[13-14],根据经验,在曲面重建时以每米十万个网格(三角面)为宜,过多的网格容易引起模型及保存文件过大,过少的网格则隧道轮廓缺失明显。具体操作为在图像处理软件metashape中,选择工作流程—生成网格,然后导出曲面模型(实际曲面模型),图7为大山岭隧洞ZG8 + 612.5—ZG8 + 609.6段三维曲面重建结果图。

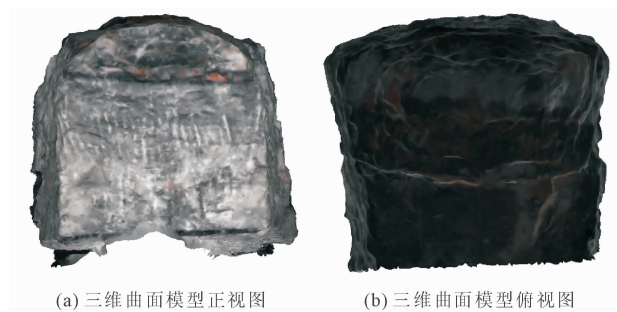


图7 ZG8 + 612.5—ZG8 + 609.6段三维曲面重建结果图

2.4 图像拼接展开

为更便于浏览和展示引水隧洞工程上的围岩表面情况,有必要将三维重建实景展开成二维图像,将隧道表面图像矫正拼接制作成全景展开图。展开全景图的制作主要涉及到图像的矫正和拼接,不同的是展开全景图成图后需要保证表面图像的几何特征的不变形,如面积与真实面积相同,表面平行或垂直线条在拼接后仍能保持平行和垂直。三维重建能恢复出实际场景的空间点云以及相片拍摄时相机的内

参以及外参。利用重建出的三维点云确定一个合适的投影面,对相片进行几何矫正,就能将多视点的图像拼接问题简化为非常成熟的平面拼接问题^[10]。

具体操作步骤为:在图像展开拼接软件Bamboo中先构建隧洞设计曲面,构建时使用隧道设计断面作为流线,让其沿隧道设计平纵线进行扫掠,进而可得到隧道设计曲面。其原理如图8所示。然后将三维重建曲面模型和照片数据导入Bamboo软件中,以设计曲面模型为矫正模型,对图像矫正和拼接生成隧洞全景展开图。

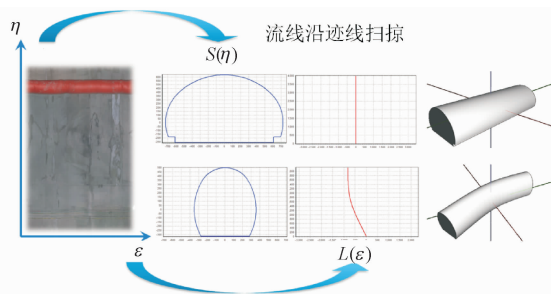


图8 设计轮廓构建方法原理

3 现场应用

为验证基于图像三维重建的超欠挖检测方法应用于引水隧洞的可行性,选取犬木塘水库大山岭隧洞作为试验对象,试验有效段选取大山岭隧洞控制段里程为ZG8 + 617.6—ZG8 + 571.1,实测段洞身围岩为IV类围岩,支护类型为C型,岩体为灰岩夹砂岩。采用数码相机对试验段循环开挖后毛洞连续拍摄,进行图像数据采集,见图9。



图9 使用单反相机环拍

将各循环段拍摄照片分别导入metashape,进行三维重建以获得图像空间信息。利用metashape软件构建实测轮廓,再通过图像展开拼接软件Bamboo构建设计轮廓,通过网格射线法对实测轮廓与设计轮廓进行空间比较分析,从而得到隧道开挖后全面

的净空检测结果。该技术可直接获得拍摄段各进尺段各部位的整体超欠挖情况、超欠挖值、超欠挖面积及超欠挖体积量等信息,并经过工程试验段现场验证,其超欠挖检测结果与真实数据误差为 -1.16% 左右^[15]。应用该方法对犬木塘水库大山岭隧洞 IV 类围岩 ZG8 + 614.6—ZG8 + 580.0 段经曲面比较后超欠挖云图见图 10, ZG8 + 611.2 断面超欠挖示意图见图 11。

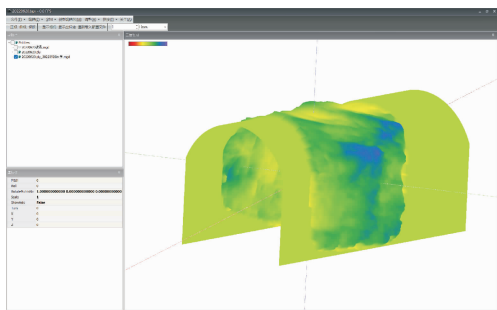


图 10 ZG8 + 614.6—ZG8 + 580.0 段曲面比较结果

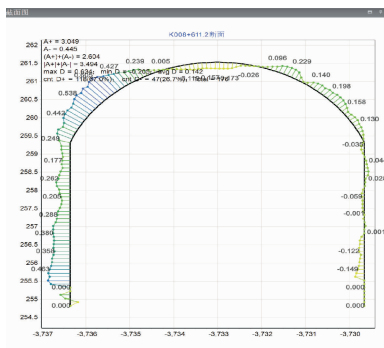


图 11 ZG8 + 611.2 断面超欠挖示意图

应用图像拼接技术对大山岭隧洞 ZG8 + 614.6—ZG8 + 609.6 段拍摄的洞壁和掌子面的照片进行矫正拼接,得到掌子面地质展示图和区间洞壁展开图分别见图 12(a) 和图 13,并可通过图形处理软件基于掌子面地质展开图进行节理素描(见图 12(b)),显然可见该方法比现有的隧道地质摄影编录方法的现场拍摄灵活性更大、效率更高,展示效果更好,能为隧道施工设计提供更加直观的参考。

4 结 论

(1) 本研究利用计算机视觉技术中的三维重建、三维曲面估计和图像拼接技术,应用了一种快速、灵活的引水隧洞围岩超欠挖检测和地质展开图构建的方法,阐述了通过数据采集、点云三维重建、曲面重建等措施建立隧洞开挖轮廓模型的流程。



(a) 地质展开图 (b) 节理素描

图 12 大山岭隧洞 ZG8 + 609.6 掌子面地质展开图及节理素描



图 13 大山岭隧洞 ZG8 + 614.6—ZG8 + 609.6 段洞壁展开图

(2) 基于对隧洞开挖轮廓模型的三维重建,与设计曲面模型比对,可实现对洞室围岩开挖超欠挖量的精确测量。在此基础上提出了利用特定图像拼接软件进行图像矫正拼接实现地质全景展开图的构建方法。

(3) 对在建的犬木塘水库大山岭隧洞工程试验段进行连续的超欠挖检测应用,应用结果表明:该方法可在不干扰施工条件下实现隧洞超欠挖的精确测量,克服了传统方法效率低、造价高、操作复杂等问题,利用自动化图像拼接技术得到的地质展开图提高了展示图的效果和效率,证明了其在小断面引水隧洞工程的可行性。

本研究基于图像三维重建技术实现了对小断面引水隧洞超欠挖的精准快速检测,具有广阔的应用前景,但该技术目前仍然存在一定的局限性,一方面本技术的图像采集方法仍偏重于人工手段,另一方面对于海量影像数据的后处理手段较单一且自动化水平一般,仍需进一步开展相关研究。

参考文献:

[1] 魏继红,吴继敏,孙少锐. 图像处理技术在隧洞超欠挖评价中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(1): 105-108.

- 响研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(S1):225-230,285.
- [8] Muhammad Usman Azhar,周辉,杨凡杰,等. 软弱泥质砂岩地层中输水隧洞稳定性研究(英文)[J]. 岩土力学,2022,43(S2):626-639.
- [9] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册[M]. 第5版. 北京:中国建筑工业出版社,2018:174-179,182-189.
- [10] 邓祥辉,刘锦涛,王睿. 浅埋卵石土层隧道超前支护措施研究[J]. 公路交通科技,2023,40(1):136-143.
- [11] 水工隧洞设计规范:SL279—2016[S]. 北京:中国水利水电出版社,2016:107-111.
- [12] 高峰,唐星,李星,等. 基于 UDEC 离散元法的隧道塌方特征分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(1):24-28,34.
- [13] 李同录,罗世毅,何剑,等. 节理岩体力学参数的选取与应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(13):2182-2186.
- [14] 苏岩,刘彪,王正中,等. 引汉济渭二期工程输水隧洞盾构开挖过程参数化数值模拟方法研究[J]. 水利与建筑工程学报,2022,20(4):14-19,71.
- [15] 栗东平,李军,孙荣荣. 基于 UDEC 岩体抗压强度尺寸效应的数值研究[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(4):1098-1105.

(上接第 110 页)

- [2] 许磊,王长进. 基于激光点云的隧道超欠挖检测方法研究[J]. 铁道工程学报,2016,33(12):77-81.
- [3] 韦征,周臻,俞旻韬,等. 基于三维激光扫描点云整体分析的铁路隧道超欠挖检测方法[J]. 铁道学报,2023,45(1):135-140.
- [4] 葛超,郑顺义,桂力,等. 激光点云和图像处理技术在隧道超欠挖检测中的应用研究[J]. 测绘地理信息,2020,45(1):101-106.
- [5] 李徐然,施富强,廖学燕. 基于激光点云的隧道超欠挖自动计算方法研究[J]. 工程爆破,2017,23(6):17-21.
- [6] 李海波,杨兴国,赵伟,等. 基于三维激光扫描的隧洞开挖衬砌质量检测技术及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S1):3456-3463.
- [7] Fekete S, Diederichs M, Lato M. Geotechnical and operational applications for three-dimensional laser scanning in drill and blast tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2010,25(5):614-628.
- [8] 王令文,程效军,万程辉. 基于三维激光扫描技术的隧道检测技术研究[J]. 工程勘察,2013,41(7):53-57.
- [9] 曹光辉. 小断面长距离引水隧洞施工与技术分析[J]. 低碳世界,2021,11(6):127-128.
- [10] 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.
- [11] 曾文宪,陶本藻. 三维坐标转换的非线性模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2003,28(5):566-568.
- [12] 魏占玉, Ramon A, 何宏林,等. 基于 SfM 方法的高密度点云数据生成及精度分析[J]. 地震地质,2015,37(2):636-648.
- [13] Fischler M A, Bolles R C. Random Sample Consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981,24(6):381-395.
- [14] 李凤霞,刘咏梅,王晓哲,等. 一种基于映射法的散乱点云 Delaunay 三角剖分算法[J]. 计算机应用研究,2015,32(3):950-953.
- [15] 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.