

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.05.060

架站式三维激光扫描技术在金华轨道交通的应用

查小君¹, 臧建波², 胡雷鸣³, 马健³

[1.金华市轨道交通集团有限公司, 浙江 金华 321017; 2.杭州地铁运营有限公司, 浙江 杭州 310020;
3.上海勘察设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200032]

摘要: 金华—义乌—东阳城际轨道交通工程是浙中地区第一条轨道交通线路,全长达 107 km,对浙中地区交通发展具有重大意义。该线路盾构法隧道基本已施工完成,考虑到盾构法隧道自身结构特点及金华地区地质情况,有必要在线路运营前对成型管片结构进行现状调查,为隧道运营条件提供依据。现主要介绍基于 FARO X 系列三维激光扫描仪的架站式扫描技术,无需使用靶球进行测站间的衔接,应用于金华—义乌—东阳首条城际轨道交通线路的隧道初始状态调查工作中,探讨了三维扫描技术计算盾构隧道管片水平收敛的精度与可靠性。从实际效果来看,采用架站式扫描技术的外业工作量较小,较传统调查方法效率大幅提升,用于隧道管片的水平收敛测量精度较为可靠,对于成型隧道的现状调查具有良好的适用性。

关键词: 城际轨道交通,三维激光扫描;架站式扫描;FARO;水平收敛

中图分类号: U491

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)05-0236-04

0 引言

金华—义乌—东阳城际铁路是衔接金华、义乌中心与东阳、横店之间的一条重要骨架线路,建设意义十分重大。其中:地下线长达 20.311 km,采用盾构法隧道掘进、预制管片拼装。在盾构法隧道施工过程中,受外界应力影响以及拼装质量的不同,易发生一定缺陷,如管片的破损、收敛变形、渗漏水等,影响后续的铺轨运营。因此,有必要对成型管片进行细致的调查,以对后续线路运营提供参考依据。

三维激光扫描技术是一种较为高效、信息量丰富的检测手段,自上世纪末开始就逐步得到广泛的研究与应用^[1-4]。经过二十余年的发展,国内已经在地形测量、滑坡体测量、大坝变形、隧道检测等诸多行业开展了三维激光扫描研究,涵盖移动三维扫描设备的研制、三维点云数据的处理方法、人工智能研究等领域,取得了大量的研究成果^[5-20]。采用先进的三维激光扫描技术,应用于地铁隧道的调查,可提供信息丰富的隧道影像资料,且效率大幅提高。现基于架站式的三维激光扫描技术,应用于金华地区条件下的成型隧道现状调查,为后续市域铁路开通运营提供有益的参考数据。

收稿日期: 2022-06-15

作者简介: 查小君(1985—),男,本科,工程师,研究方向为轨道交通测量、监测等。

1 三维激光扫描技术

1.1 三维激光扫描的基本原理

三维激光扫描测量系统主要包括三维激光扫描仪、系统软件、电源,以及附属设备,通过对目标的三维扫描,可测得目标点的空间坐标,如图 1 所示。

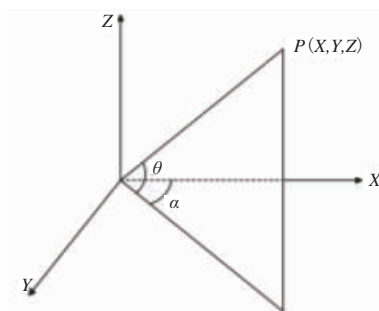


图1 三维激光扫描坐标系示意图

由几何计算可知,被测目标点 $P(X, Y, Z)$ 在仪器坐标系中的坐标为:

$$\begin{cases} X = S \cos \theta \cos \alpha \\ Y = S \cos \theta \sin \alpha \\ Z = S \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为激光束的水平方向角; θ 为竖直方向角; S 为仪器中心到扫描点的斜距。在扫描测得目标表面各点的空间坐标后,这些点数据的集合即为点云,基于点云,数据可完成对被测物体的三维建模。

1.2 点云数据处理

点云数据的处理可分为配准、压缩、去噪、断面提

取等步骤,将多站数据拼接至隧道工程坐标系、压缩不必要的高密度冗余点云、去除影响隧道测量的无效点云,以及提取隧道环片切片等。

(1)点云配准拼接。将各个测站所获得的点云数据统一到一个坐标系中的过程称为拼接,现采用特征点匹配的方式进行点云数据拼接,无需使用标靶球,外业工作量大幅减少。多个测站扫描时,利用重叠的点云数据将扫描数据统一到同一坐标系下,选择易于区分的点(如边角点、转折点或具有其他突出特征的点)进行配准,具体方案为:先将相邻两个测站的点云进行配准,再将下一组相邻两个测站点云进行配准,然后将已经过一轮配准的两组点云数据进行配准,有效减少坐标配准误差。

(2)点云的裁剪、采样、去噪、修补等。扫描隧道内壁时容易受到设备的遮挡,存在多余的扫描点和扫不到的盲区,需要进行删除和补洞等方面的处理,并对其整体滤波,得到了接近地铁隧道内部真实的表面点信息。主要内容包括处理着色点,使得点云显示更清楚;处理体外孤点、非连接项、冗余点等,选择和删除距离较远的点,删除体外孤点;处理因扫描误差引起的点云噪声;点云重采样,使其排列更规律,并压缩点云数据;处理扫描不到的盲区,进行孔洞填充;点云封装,自动生成网格。

(3)断面提取的算法采用自行编制的 C++ 程序执行,批量输出为 AutoCAD 的 dwg 断面属性图或 Excel 全断面报表。

(4)管片水平直径的解算采用我公司自行研发的分段圆弧拟合法,将断面按管片分为多个弧段单独按圆弧拟合,然后利用圆心,半径,起始终止角度来对拟合后的各个圆弧的空间位置和相互关系进行描述,如图 2 所示。

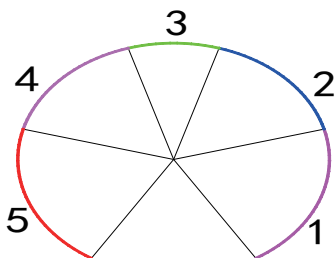


图2 分段圆弧拟合示意图

1.3 隧道正射影像生成

通过提取各衬砌环的点云数据,绕各衬砌环轴线中心位置平移旋转后至标准圆柱体,再按里程进行顺序排列,将衬砌环内壁点云数据通过等角正切投影的方式展开至平面,即得到隧道的正射投影

图。基于本文的架站式扫描,影像分辨率最高可优于 $\pm 5 \text{ mm}$,并可直接在影像图上量取几何尺寸。

2 架站式三维激光扫描应用案例 1

2.1 项目概况

木雕城站~歌山路站隧道是金华-义乌-东阳城际铁路首个贯通的区间,单线长度约 690 m,采用内径 6.0 m、厚度 0.35 m、环宽 1.2 m 的预制管片拼装而成。隧道穿越地层包括填土、粉质黏土、圆砾、中风化粉砂岩等。

2.2 三维扫描应用情况

采用 FARO X330 激光扫描仪对该工程区间上行线、下行线各 570 环隧道进行架站式扫描,相邻两次架站之间的距离设定为 20 环,首站均架设在距洞口 10 环位置,两条隧道各架设 29 个扫描测站。通过前述点云数据处理方法,生成高分辨率的隧道正射影像,如图 3 所示(节选部分影像图)。

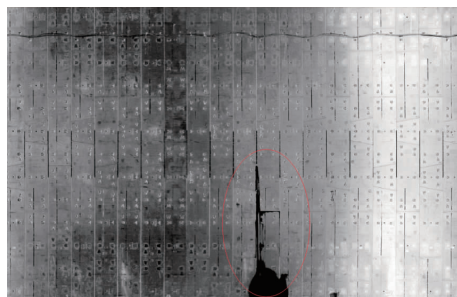


图3 木雕城站—歌山路站隧道正射影像图(节选)

由图 3 可以看出,高精度的正射影像可以分辨出隧道内的设备设施,如电箱、电缆线等,以及较为明显的隧道缺陷,如渗漏水、管片缺块等。

2.3 隧道水平直径的获取

按照前述分段圆弧拟合算法,应用三维激光扫描技术对每环管片进行水平直径提取,统计成果如表 1 所列。

表1 三维激光扫描管片水平直径成果统计表

序号	统计项目	直径 / m	与标准圆 6.0 m 直径比较
上行线	最大直径	6.067 7	+67.7 mm
	最小直径	5.996 0	-4 mm
下行线	最大直径	6.043 6	+43.6 mm
	最小直径	5.979 0	-21 mm

由表 1 可以看出,该隧道上行线、下行线管片成型质量总体较好,与标准圆直径偏差均在 $\pm 10 \text{ cm}$ 以内。

2.4 三维激光扫描精度分析

成型隧道的水平收敛情况对判断隧道的安全现

状十分重要,因此,为了分析基于三维激光扫描的管片水平直径精度情况,采用博世 GLM80 电子测距仪(测距精度 $\pm 1.5\text{ mm}$)进行相应的检核分析。对该工程上行线、下行线隧道各选取 120 环管片,比较三维激光扫描计算得到的数据与测距仪直接测得的水平直径,两者最大较差在 $\pm 10\text{ mm}$ 左右。统计所有较差数据的分布情况,如表 2 所列。

表2 三维激光扫描与测距仪测得的水平直径比较表

位置	较差情况	个数	百分比
上行线	$\leq \pm 3\text{ mm}$	108	90.0%
	$\pm 3 \sim \pm 5\text{ mm}$	9	7.5%
	$> \pm 5\text{ mm}$	3	2.5%
下行线	$\leq \pm 3\text{ mm}$	105	86.1%
	$\pm 3 \sim \pm 5\text{ mm}$	12	9.8%
	$> \pm 5\text{ mm}$	4	3.3%

由表 2 可以看出,三维激光扫描与测距仪测得的水平直径比较总体偏差基本在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内。使用三维激光扫描成果,可快速获得可靠的管片收敛数据。

3 架站式三维激光扫描应用案例 2

3.1 项目概况

某地铁保护区施工项目,与既有地铁隧道外边线最近约 27 m,对应产业园区二期基坑宽度约 141 m,开挖深度约 9.1 m,基坑底板位于淤泥质粉质黏土,隧道位于粉质黏土层。既有地铁隧道采用内径 5.5 m、厚度 0.35 m、环宽 1.2 m 的管片拼装而成。紧邻地铁基坑项目施工前对既有隧道进行三维激光扫描,以获取隧道的现状情况。项目平面情况如图 4 所示。

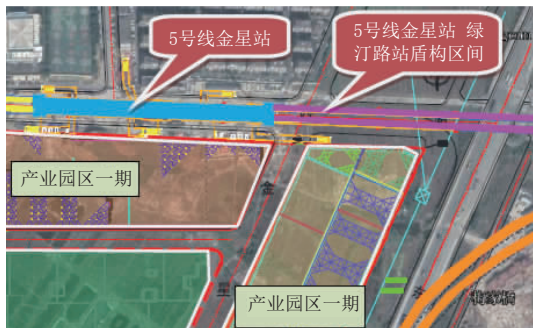


图4 金星站—绿汀路站区间地铁保护区施工平面图

3.2 三维扫描应用情况

采用 FARO X330 激光扫描仪对该项目紧邻基坑的上行线隧道共计 235 环管片道进行架站式扫描,相邻两次架站之间的距离设定为 20 环,隧道内共计设置 13 个扫描测站。采用前述的数据处理方法,生成高分辨率的隧道正射影像如图 5 所示(节选部分影像图)。

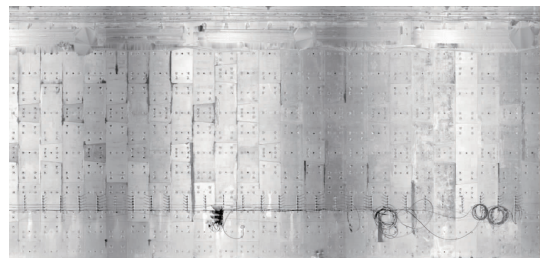


图5 金星站—绿汀路站隧道正射影像图(节选)

由图 5 可以看出,采用架站式扫描的方式获取的隧道正射影像分辨率较高,对管片的湿渍情况、电缆支架等附作物情况、明显的管片缺陷情况均可以进行有效的判别。

为进一步获取隧道管片的三维形态,根据前述的分段圆弧拟合算法,对每环管片进行水平直径提取,统计成果如表 3 所列。

表3 三维激光扫描管片水平直径成果统计表

序号	统计项目	直径 /m	与标准圆 5.5 m 直径比较
上行线	最大直径	5.531 7	+31.7 mm
	最小直径	5.500 4	+0.4 mm

由表 3 可以看出,通过三维扫描成果可以看出,该工程既有隧道管片成型质量较好,与标准圆直径偏差均在 $\pm 5\text{ cm}$ 以内。

4 结论

本文介绍了基于 FARO X 系列扫描仪的架站式扫描技术,可实现 600 m/h 的扫描速度,用于暂未铺轨的地下隧道,较传统的人工隧道调查方法,效率大幅提高。基于本文的特征点云匹配算法,无需标靶球,可快速、可靠地进行不同测站间的点云数据拼接,获取高精度的正射影像图。同时,采用基于本文的分段圆弧拟合算法,可快速获得每环隧道管片的水平直径。

结合本文给出的两个工程实例(隧道内径分别为 6.0 m 和 5.5 m),不同的隧道直径情况下得到的正射影像一致性较好,清晰度较高,可方便地解译判读隧道相关病害、附属设施情况。同时,基于分段圆弧拟合算法得到的水平直径能够较好地反映出隧道的几何形态,用于隧道的病害调查、结构变形监测等,可大幅提高工作效率,为业主、设计单位提供较为丰富的监测成果。

参考文献:

[1] Dinesh M, Ryosuke S. Auto extraction of Urban Features from Vehicle Borne Laser Data. Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa,2002.

- [2] Zhao H J, Shibasaki R. Reconstruction of Textured Urban 3D Model by Ground based Laser Range and CCDImages. IEICE Trans.Inf.& Syst.,E83- D,2001(7):1429-1440.
- [3] Zhao H J, Shibasaki R. Automated Registration of Ground based Laser Range Image for Reconstructing Urban 3D_object.IAPRS,1997 (32):27-34.
- [4] Huising E J,Gomes L M.Errors and Accuracy Estimates of Laser Data Acquired by Various Laser Scanning Systems for Topographic Applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,1998 (53):245-261.
- [5] 陈静,李清泉,李必军. 激光扫描测量系统的应用研究[J].测绘工程,2001,10(1):49-52.
- [6] 李必军,方志祥,任娟. 从激光扫描数据中进行建筑物特征提取研究[J]. 武汉大学学报,2002(28):65-70.
- [7] 徐进军,王海城,罗喻真,王尚庆,严学清. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J]. 武汉大学学报,2002,28(28):65-70.
- [8] 梅文胜,周燕芳,周俊.基于地面三维激光扫描的精细地形测绘[J]. 测绘通报,2010(1):53-56.
- [9] 胡琦佳. 三维激光扫描技术在隧道工程监测中的应用研究[D].西南交通大学,2010.
- [10] 陈驰,麦晓明,宋爽等.机载激光点云数据中电力线自动提取方法[J].武汉大学学报,2015(40):1600-1605.
- [11] 陈良良,隋立春,蒋涛等.地面三维激光扫描数据配准方法[J].测绘通报,2014(5):80-82.
- [12] 黎蕾蕾,孙红星,李德仁.车载移动测量中定位定姿系统误差校正与补偿研究[J].武汉大学学报,2016(41):1245-1252.
- [13] 杨必胜,梁福逊,黄荣刚.三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J].测绘学报,2017(46):1509-1516.
- [14] 李宗平,张永涛,杨钊等. 三维激光扫描技术在隧道变形与断面检测中的应用研究[J].隧道建设,2017(37): 336-341.
- [15] 魏楚文.地铁隧道激光起描检测小车的研究与开发[D].武汉大学,2017.
- [16] 刘晓曼. 基于激光扫描的地铁隧道变形测量与分析研究[D]. 西南交通大学,2018.
- [17] 张良培,张云,陈震中等. 基于分裂合并的多模型拟合方法在点云分割中的应用[J].测绘学报,2018(47):833-843
- [18] 李涛,仇文革,程云建,李斌.基于全息变形监测的隧道支护评估体系研究[J].地下空间与工程学报,2020(16):583-590.
- [19] 张丽,丛晓明,赵生良.移动三维激光扫描技术在隧道结构监测中应用[J].测绘通报,2020: 153-156.
- [20] 梅文胜,吕世望,于安斌,张鹏,王涛.一种地铁轨道相对变形检测与定位方法[J].武汉大学学报,2020.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com