

基于 BIM 与点云结合的隧道施工空间几何偏差分析方法^{*}

杨世杰^{1,2}, 冯晓^{1,2}, 党升^{1,2}, 陈茂霖¹

(1.重庆交通大学 测绘与国土信息工程系, 重庆 400074; 2.重庆交通大学 工程信息与 3S 研究所, 重庆 400074)

摘要: 为改善基于三维激光扫描技术的隧道施工几何偏差检测的效率和精度,通过研究狭长施工期隧道内扫描测站间距,应用改进的 ICP 法对三维点云进行拼接,基于参数化建模建立隧道 BIM(建筑信息模型)设计模型,生成质量更高的 BIM 建筑设计模型和三维激光点云模型的套合模型,提取隧道二次衬砌段的侵限空间分布,从而建立隧道三维空间几何偏差的可观察、可量测的空间分布模型,实现隧道施工空间几何偏差分析。

关键词: 隧道; BIM(建筑信息模型); 三维激光; 施工空间几何偏差

中图分类号: U456.3

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)04-0160-06

随着 BIM(建筑信息模型)技术、三维激光扫描技术和点云处理技术的发展,实现对隧道各阶段实际表面和设计表面符合程度及空间几何偏差分布的全面检测成为可能。三维激光扫描技术应用于隧道扫描的研究较多,但多聚焦于点云拼接、去噪、曲面拟合和断面提取等数据处理,多用于隧道变形监测。如托雷等在测站前、中、后布设控制点进行全局控制,以减少数据的拼接误差,在地铁隧道变形监测中取得了很好的效果;简骁等通过对点云数据进行三次多项式插值曲面拟合,对多个拟合曲面进行高差比较获得隧道变形量。采用三维激光对隧道进行质量检测,多应用于通过点云数据拟合隧道中线,基于隧道中线按照一定步距提取隧道断面,与二维设计模型结合进行隧道二维断面检测。如方成龙将点云断面实测点围成图形与设计断面进行比较,通过 CAD 二次开发计算隧道超欠挖;许磊等采用 Vatti Clipping Algorithm 算法,通过断面结构与断面比较进行超欠挖面积统计;王令文等对断面实测点云进行断面切片拟合,并求取断面的圆形和半径,通过比较拟合断面和设计断面确定施工质量。既有研究主要通过提取隧道断面与设计断面进行比较确定施工质量,断面的提取存在随机性,不能反映整体的区域特性,同时缺少点云数据整体研究,不能充分利用海量的点云数据和二维设计图,而且对欠超挖部位的检测无法反映隧道的整体施工质量。针对这些问题,该文将三维激光扫描技术用于施工期隧道

内快速扫描,基于参数化建模快速建立隧道设计 BIM 模型,通过扫描点云数据与设计 BIM 模型进行同基准空间几何偏差对比,实现隧道各部分几何偏差及侵限程度分级提取。

1 点云数据采集和处理

在点云数据采集和处理中,针对隧道内光线暗、噪声强、扬尘大、人员机械移动等不确定因素,通过研究扫描测站间距提高点云采集精度。点云数据为多测站采集得到,数据中包含大量无用噪声点,且点云数据为独立坐标,需对点云进行拼接、去噪、坐标转换等处理,从而得到可利用的洁净点云。

1.1 扫描前处理

洞内扫描条件与地面差异较大,表现为点云模型纵向延伸较大,而三维激光在数据采集时对于距离较远的点云存在精度低、密度稀等缺点。根据文献[9],当三维激光扫描仪的入射角大于 65°时误差迅速上升,导致点云数据失真。当测站扫描范围为最大入射角 65°时,若测站间距取 2.14 倍隧道内径,隧道采用 ICP 法配准,点云至少有 20%~30%的重叠度,且仪器无法保证架设在隧道中轴线上。综合考虑,所有测站间距取 1.4 倍隧道内径。

1.2 点云拼接

施工期隧道进行三维激光扫描时,人员和机械会经常进出隧道,为加快扫描速度,每站采用独立测站坐标进行数据采集,需进行点云拼接,把处于局部

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41801394)

坐标系下的点云通过坐标转化连接为一个三维整体。基于扫描区段3个已知点的点云配准法在隧道中应用存在弊端,数据采集过程中经常出现点云缺失的情况,标靶边界的点云缺失会导致拟合中心点存在较大偏差,影响拼接精度。施工期隧道采用基于3个已知点的配准方法,由于隧道中大量机械进出隧道及隧道中光线很差,不利于采用全站仪采集较多靶标的实际坐标。因此,采用基于重叠扫描区同名点三维信息的ICP配准法。

IPC配准法通过计算两片点云的偏差,并将该偏差予以消除,从而实现点云拼接。在一个三维扫描点云集内选取一部分点,在另外一个三维扫描点云集内选取对应同名点,基于最小二乘原理通过点云旋转和平移求得两片点云上同名的最小值,从而得到最佳变换矩阵。设相邻两站点云分别为 $\{X_i | X_i \in R^3; i=1, 2, \dots, M\}$ 和 $\{Y_i | Y_i \in R^3; i=1, 2, \dots, N\}$,点集 X 、 Y 的重叠区域为 P ,在重叠区域点集 P 中找出对应点对计算旋转矩阵 R 和平移矩阵 T ,每次迭代完成后再次寻找对应点集进行矩阵 R 和 T 计算,得到满足函数 $\omega(R, T) = \sum_{i=1}^P \|(RY_i + T) - X_i\|$ 取最小值的解。

ICP算法的匹配精度高,但耗时较长,还会陷入局部最优解,即配准不正确时也会存在目标函数最小的情况,可通过人工指定重叠区域3个及以上同名点,由同名点计算曲面法向量并使其方向一致,基于法向量计算各点的曲率,用曲率匹配来识别拼接的点对,找到最多法向量一致点对的变换矩阵。以该变换矩阵作为初值进行迭代,可减少迭代次数,缩短耗时,加快收敛速度。

1.3 点云去噪

对施工期隧道进行扫描时,隧道内扬尘、掌子面上的机械振动等会使扫描点云产生噪声,扬尘产生的噪声在镜头前方范围内,可直接删除,机械振动产生的孤点用3D Reshaper自带的算法删除。通过三维激光扫描仪进行数据采集时,点云中包含机械、人员、台车、风管等噪声,通过保留最低点算法把人员、机械、台车等处于地面点的噪声删除。处于洞壁的噪声点,如电缆、风管、水管等,通过隧道壁轮廓点云建立洞壁三维表面轮廓,设置阈值,对距离三维表面超出该范围的点云予以删除。

1.4 坐标转换

实现点云与设计模型的几何偏差提取,2个模

型在同一基准坐标系下是关键,需对点云模型进行坐标转换。可利用点云中大于3个的靶标点,该靶标点经过全站仪测量后具有施工坐标,将2个坐标系下各对应点之间的距离、竖直角、方位角作为空间坐标转换的依据,通过附有条件的最小二乘平差计算坐标系的转换参数。

胡琦佳等的研究表明,基于多个控制点转换的结果比基于3个控制点的转换结果更准确,转换参数更可靠。基于多个控制点的坐标转换,即根据控制点的点云坐标和施工坐标计算7个转化参数,视控制点扫描点云坐标为原坐标 $O_M - X_M, Y_M, Z_M$,控制点旋转后的坐标为 $O_N - X_N, Y_N, Z_N$,坐标转换模型为:

$$\begin{bmatrix} X_N \\ Y_N \\ Z_N \end{bmatrix} = (1+m) \begin{bmatrix} 0 & \epsilon_3 & -\epsilon_2 \\ -\epsilon_3 & 0 & \epsilon_1 \\ \epsilon_2 & -\epsilon_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

也可写为:

$$\begin{bmatrix} X_N \\ Y_N \\ Z_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} + A \partial X \quad (2)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -Z_M & Y_M & X_M \\ 0 & 1 & 0 & Z_M & 0 & -X_M & Y_M \\ 0 & 0 & 1 & -Y_M & X_M & 0 & Z_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

令 $B = [X_{MN1}, Y_{MN1}, Z_{MN1}, \dots, X_{MNn}, Y_{MNn}, Z_{MNn}]$,式(3)可写成 $A \times \partial X = B$,通过最小二乘原理可得旋转参数矩阵为:

$$\partial X = [A^T A]^{-1} A^T B \quad (4)$$

读取拼接好的点云数据,依据计算所得7个坐标转换参数对点云数据进行旋转,得到具有施工坐标系的点云数据,方便与设计模型进行偏差分析。

2 隧道BIM模型构建

重庆市北碚区水土镇海天堡隧道为分离式小间距双洞单向四车道隧道,右线进口桩号YK3+773、出口桩号YK4+125,左线进口桩号ZK3+773、出口桩号ZK4+150,右线全长352 m,左线全长377 m。隧道标准段建筑限界净宽16.75 m、净高5 m,纵断面采用0.5%接-0.8%小纵坡人字坡,为小纵坡直线型隧道。

隧道设计模型构建实为基于二维设计图纸进行

三维逆向建模,是对二维设计图纸的三维化显示。先由隧道设计中线参数和起点、变坡点、终点的里程和设计路面高程进行隧道中线高程点加密,在 Civil 3D 中将隧道中线生成三维曲线,隧道三维中线曲线导出为可被建模软件 Revit 识别的 dwg 格式。

采用施工标准进行建模,即按照几米一段进行创建,该方法可能会出现误差累积,且分节创建会使模型数据量过大,影响计算速度甚至无法正常运转,在数据处理时间和偏差分析结果精度上都不利于后期隧道质量分析。因此,通过导入隧道中线,以隧道中线为路径、设计断面为轮廓(隧道设计断面见图

1)放样建立隧道模型。不同构件创建时使用同一路径,通过修改轮廓进行不同构件创建。轮廓创建使用相同的点位作为原点,只有原点相同才可通过同一路径创建不同构件。该隧道右线 YK4+012—K3+911 段围岩为Ⅳ级,其余标段为Ⅴ级,而不同围岩等级隧道的支护方式不同,故对放样隧道实体进行剪切,调整支护参数再进行项目合并,最终得到隧道实体模型,实现隧道实体模型与点云数据同基准显示。该模型高程为施工实际高程,只需进行平面方向旋转,通过不少于 2 个控制点进行参数转换,使模型所有三维坐标和施工坐标精确对应(见图 2)。

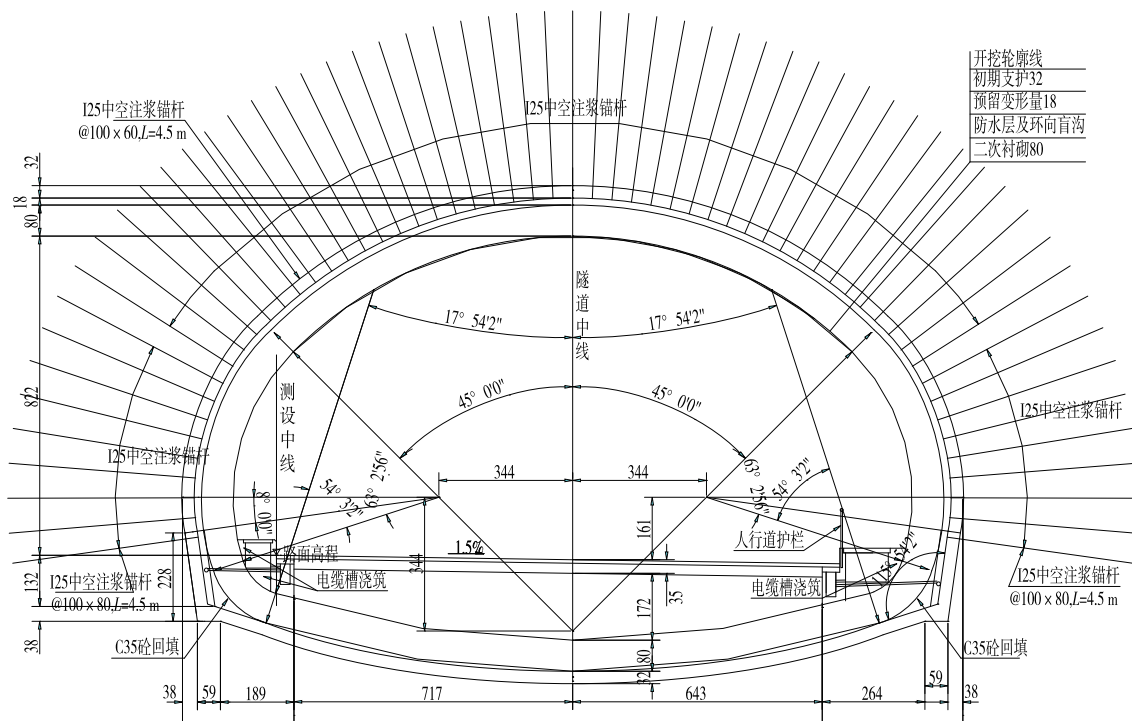


图1 隧道设计二维断面图(单位:cm)

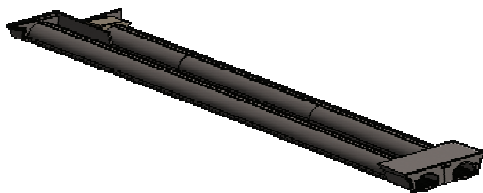


图2 隧道设计 BIM 模型

通过查询该隧道位置坐标,利用 Map TileDownloader 软件下载现存施工场地地形图,并利用 3D MAX 让地形图与 BIM 设计模型结合。由于该隧道处于施工期,需对隧道进出口的地形进行修改,并对隧道进行装饰,如灯光、指示牌等,最后得到基于地形的隧道模型(见图 3)。



图3 添加地形的隧道 BIM 模型

3 隧道施工偏差的空间分布

在设计模型和点云模型的偏差分析层面,建立可视化和可量测的空间几何偏差模型,在三维空间

整体、二维里程断面进行整体和细部的隧道几何偏差检测。

3.1 数据对比准备

通过参数化建模建立的隧道 BIM 模型是一个整体,而点云数据是基于点属性的文件,不能直接与 BIM 模型进行偏差分析,需将 BIM 模型转换成可以与点云数据一起识别的格网文件,即通过 Micro-Station 和 Geomagic Wrap 等软件将 Revit 模型转换成图 4 所示网格文件。

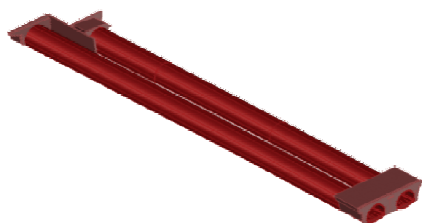


图 4 隧道设计 BIM 格网模型

3.2 三维对比检测

对隧道进行扫描,点云模型见图 5。通过 Na-

visworks Manage 进行 BIM 模型和点云模型联合显示,检查 2 个模型的位置偏差。如果 2 个位置存在偏差,则进行点云模型和 BIM 模型的坐标检查,消除由于坐标转换误差带来的位置偏差。最后在 3D Resheper 软件中加载点云数据和 BIM 模型进行三维空间几何偏差分析,以 BIM 模型为基准模型、点云数据为被检测曲面,点云数据中每个点都在基准模型上有与之对应的点,计算两点间距离即为该点所在区域的偏差值。逐一计算所有点云数据,得到该扫描区段的三维偏差云图(见图 6、图 7)。

由图 6、图 7 可知:扫描区段 5.58%区域衬砌外扩 7.5~10 cm,该区段在近隧道出口的矮边墙区域,可能存在二次衬砌厚度不足,应对该区段的二次

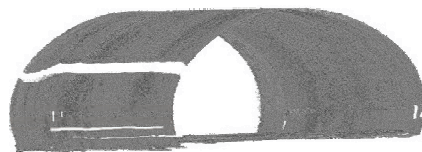


图 5 隧道点云模型

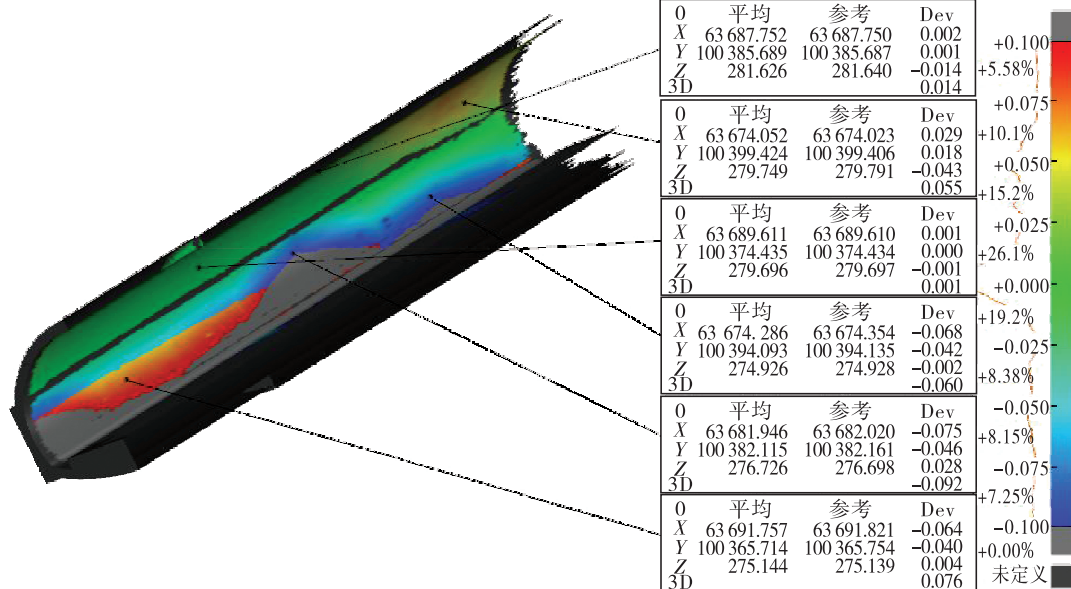


图 6 点云和三维模型对比纵剖面图(左线,单位:m)

衬砌厚度进行检测;10.1%区域衬砌外扩 5~7.5 cm;15.2%区域衬砌外扩 2.5~5 cm;26.1%区域衬砌外扩 0~2.5 cm;19.2%区域衬砌侵限 0~2.5 cm;8.38%区域衬砌侵限 2.5~5 cm;8.15%区域衬砌侵限 5~7.5 cm;检测偏差为-0.75~0.75 cm 的区域在隧道拱顶,7.25%区域衬砌侵限 7.5~10 cm。隧道矮边墙区段有隧道外扩和侵限明显分界线,这是由隧道二次衬砌台车在不同模浇筑中台车大小调整引起的。隧道矮边墙区段存在严重质量问题,应检

测该区段是否存在二次衬砌厚度和隧道净空不足的现象。

提取不同里程衬砌断面进行统计分析,断面布距为 5 m,共获得 10 个断面,对每个断面分析 6 个点的点位偏差。横断面见图 8,分析结果见表 1。

通过对 10 个断面切片几何偏差的统计分析,得到二次衬砌的平均侵限为 0.5 cm。但隧道拱脚位置的几何偏差较大,外扩和侵限值大多为 6~9 cm,在 YK4+120、YK4+115 的 1[#]、6[#] 点位置隧道存

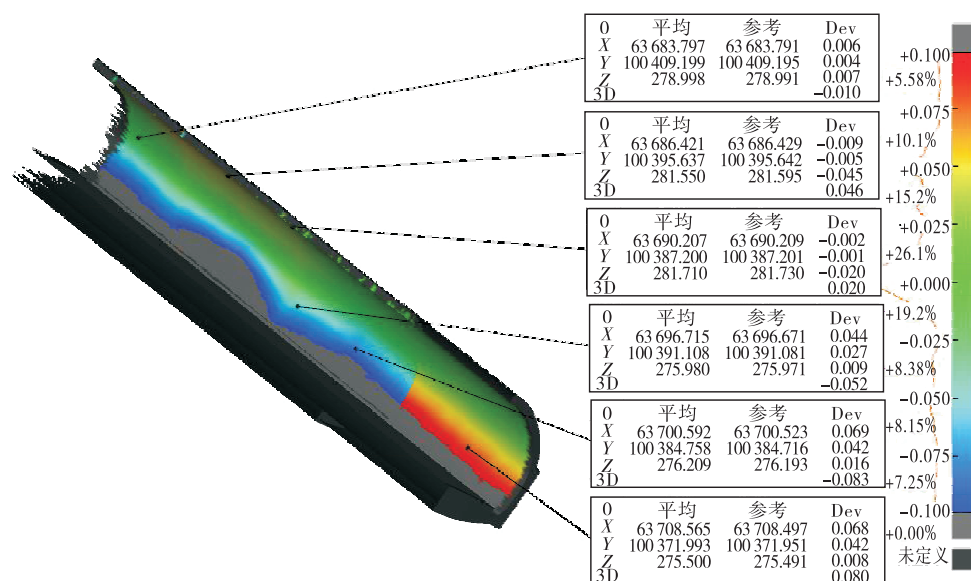


图7 点云和三维模型对比纵剖面图(右线,单位:m)

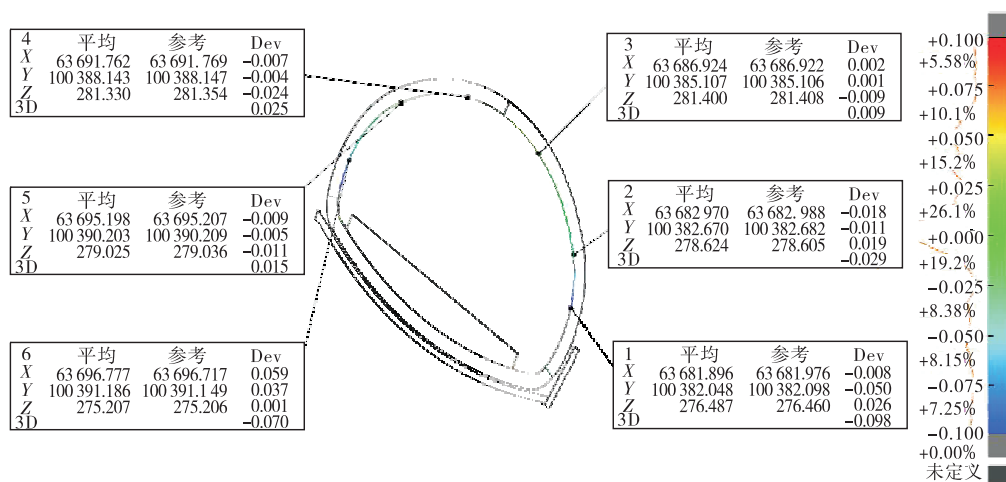


图8 YK4+095 点云和三维模型对比横断面图(单位:m)

表1 不同里程断面二次衬砌超欠厚度

里程	各位置的超欠厚度/m						平均偏差/mm
	1# 位置	2# 位置	3# 位置	4# 位置	5# 位置	6# 位置	
YK4+120	0.098	0.060	0.019	0.002	0.007	0.067	0.042
YK4+115	0.081	0.047	0.012	0.002	-0.003	0.046	0.031
YK4+110	-0.076	0.032	-0.020	-0.008	-0.012	-0.047	-0.022
YK4+105	-0.087	-0.036	0.002	0.002	-0.013	-0.052	-0.031
YK4+100	-0.087	-0.043	0.019	0.002	0.007	-0.039	-0.024
YK4+095	-0.098	-0.029	0.009	0.025	0.015	-0.070	-0.025
YK4+090	-0.085	-0.047	0.027	0.013	-0.002	-0.082	-0.029
YK4+085	-0.081	0.022	0.047	0.042	0.019	-0.034	0.036
YK4+080	-0.077	0.024	0.049	0.030	-0.024	-0.074	-0.012
YK4+075	-0.092	-0.032	0.008	0.006	0.057	-0.069	-0.020
平均偏差	-0.050	0.020	0.017	0.012	0.005	-0.035	0.005

在外扩,在YK4+110的1#和6#点位置隧道存在侵限,从图7可看出YK4+112位置明显存在外扩和侵限分界线。二次衬砌台车的长度为6.5 m,隧道出口里程为YK4+125,隧道开挖方向为从大里程到小里程的逆向开挖,该位置正好位于二次衬砌台车不同模的位置,外扩和侵限分界线由不同模间移动二次衬砌台车后调整尺寸所引起。在YK4+085断面,二次衬砌平均外扩3.6 cm,且在其前后5 m范围内2个里程断面切片都存在一定程度二次衬砌侵限,应检查该位置是否存在二次衬砌不足。通过10个断面切片可得拱顶位置的施工质量优于拱脚,隧道后期施工中应严格控制台车拱腰到拱脚位置的尺寸,提高施工质量。

4 结论

(1) 针对隧道光线较差、粉尘大的条件,在施工隧道点云获取方法上采取多分段扫描,有效改善点云质量。为提高拼接精度,采取改进的ICP算法对点云进行拼接,通过合理确定初次迭代的变换矩阵加快迭代速度。

(2) 在具有平纵曲线的隧道设计BIM模型创建中,采用Civil 3D进行隧道中线创建,采用整体式放样建模可减少模型误差的累积和数据冗余,且采取参数化建模,通过轮廓更新修改模型较方便。

(3) 采用同基准三维模型几何偏差提取方法,不仅对隧道的二维设计图纸有更充分的利用,同时能更加全面地检测隧道施工质量,且对施工偏差可进行三维分级化显示,对不同里程断面切片进行二维提取显示,指定偏差区域任意位置进行偏差值定量显示,并据此调整二次衬砌的台车位置,从而提高施工质量。

(4) 基于同基准模型的超欠挖土方量计算、对几何偏差进行空间分布提取建模等问题有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 朱生涛.地面三维激光扫描技术在地形形变监测中的应用研究[D].西安:长安大学,2013.
- [2] JAVIER Roca-Pardinas, RAMON Arguelles-Fraga, FRANCISCO De Asis Lopez, et al. Analysis of the influence of range and angle of incidence of terrestrial laser scanning measurements on tunnel inspection[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43:133-139.
- [3] 高志国.地面三维激光扫描数据处理及建模研究[D].西安:长安大学,2010.
- [4] 李广云,李明磊,王力,等.地面激光扫描点云数据预处理综述[J].测绘通报,2015(11):1-3.
- [5] 托雷,康志忠,谢远成,等.利用三维点云数据的地铁隧道断面连续截取方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2013,38(2):171-175+185.
- [6] 托雷.基于三维激光扫描数据的地铁隧道变形监测[D].北京:中国地质大学,2012.
- [7] 简晓,童鹏.基于地面激光雷达技术的隧道变形监测方法研究[J].铁道勘察,2011,37(6):19-22.
- [8] 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].成都:西南交通大学,2013.
- [9] 谢雄耀,卢晓智,田海洋,等.基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J].岩石力学与工程学报,2013,32(11):2214-2224.
- [10] 方成龙.利用CAD二次开发程序计算超欠挖的研究[J].测绘地理信息,2014,39(1):67-68.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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(3):336-341.

收稿日期:2020-09-26

(上接第100页)

- 坑信息化施工监测分析[J].岩土工程学报,2008,30(10):1550-1554.
- [7] 丁智,王达,虞兴福,等.杭州地铁新塘路、景芳路交叉口工程深基坑监测分析[J].岩土工程学报,2013,35(增刊2):445-451.
- [8] 深圳市勘察研究院有限公司.公常路中山大学深圳校区段下穿改造工程岩土工程详细勘察报告[R].深圳:

深圳市勘察研究院有限公司,2018.

- [9] 莫冬华,张耀文,蒋田勇.基于预应力锚索支护的综合管廊深基坑施工监测研究[J].公路与汽运,2019(5):121-124+127.
- [10] 钟玉明,傅鹤林,黄震,等.深基坑工程施工风险评价方法及应用[J].公路与汽运,2019(5):159-165.

收稿日期:2020-09-01