

基于三维激光扫描技术的地铁盾构隧道 中轴线高程提取方法*

艾中亮¹ 鲍艳¹ 郭飞² 孔恒² 鲍逸玮² 卢建军³

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 100124, 北京; 2. 北京市政建设集团有限责任公司, 100124, 北京; 3. 浙江华东测绘与工程安全技术有限公司, 310014, 杭州//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 针对目前三维激光扫描技术检测盾构隧道横断面方法效率低、不能充分利用高密度点云数据的问题,从精度、效率及充分利用高密度横断面点云数据三方面进行隧道中轴线高程分析。提出利用空间几何关系快速提取隧道原始点云数据横断面的方法,继而利用 K 近邻计算方法提取隧道中轴线高程。试验结果表明,该隧道中轴线高程提取方法与水准仪实测获得的隧道中轴线高程间最大差值为 3 mm。与水准仪实测方法相比,该隧道中轴线高程提取方法的检测精度与检测效率均有较大改善,且其不需要进行横断面点云数据的抽稀,充分利用了海量原始点云数据,可推广应用至盾构隧道竣工验收工作。

关键词 地铁; 盾构隧道; 三维激光扫描技术; 中轴线高程提取

中图分类号 U452.1⁺4; U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.013

Central Axis Elevation Extraction Method of Metro Shield Tunnel Based on 3D Laser Scanning Technology

AI Zhonglinag, BAO Yan, GUO Fei, KONG Heng, BAO Yiwei, LU Jianju

Abstract Due to the low efficiency of current three-dimensional laser scanning technology in detecting shield tunnel cross-sections, and the inability to fully use the high-density point cloud data, the tunnel central axis elevation is analyzed from high accuracy, high efficiency and full utilization of high-density point cloud data three aspects. The method of fast extracting tunnel original cloud data cross-sections by using spatial geometric relations is proposed. Then, the tunnel axis elevation is extracted by using the K -nearest neighbor calculation method. Test results show that the maximum difference of tunnel axis elevation obtained by this method and the leveling instrument measurement is 3 mm. Compared with leveling in-

strument, both the detection accuracy and the efficiency of the tunnel central axis elevation extraction method are greatly improved. Besides, it can make full use of all collected point cloud data without subsampling, and can be promoted for application throughout tunnel construction until final inspection.

Key words metro; shield tunnel; three-dimensional laser scanning technology; central axis elevation extraction

First-author's address Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, 100124, Beijing, China

传统的地铁隧道横断面检测大多采用全站仪和水准仪对盾构隧道横断面进行有限点测量,一般取 8 个点进行横断面拟合,横断面的精度受到拟合误差、观测条件和作业人员专业水平高低的影响。随着三维激光扫描技术的发展,众多学者对其在盾构隧道中的应用进行了大量研究。文献[1]基于点云在水平面上的投影,搜索上下边缘点分别进行二次曲线拟合并求均值来获得隧道中轴线。文献[2]在所得隧道中轴线的正交方向截取横断面,对其进行曲面拟合及精度分析,但该方法的空间点云数据需经过多次投影及线性拟合,点云数据处理过程较为繁琐,耗时较长。文献[3]提出了一种基于弦高偏移算法、分段拟合中轴线的方法,文献[4]提出一种基于 Ran SAC 算法、分区段拟合中轴线的方法,但通过这两种方法提取的隧道中轴线均没有完全利用所有的点云数据,仅利用了隧道点云水平面投影边界点的信息,导致其拟合精度方面有所不足。文献[5]改进了空间法向量算法提取横断面的过程,但计算过程较为复杂、计算时间较长,且对计算机的配置要求很高。

* 国家自然科学基金项目(51829801);国家重点研发计划项目(2017YFC0805403);浙江省交通运输厅科技计划项目(2019036)

本文针对目前常用的隧道横断面点云数据提取方法存在的问题,提出一种基于三维激光扫描技术的高效、高精度的横断面检测方法。该方法基于圆柱体与平面相交的空间关系,利用 Dandelin 双球定理确定椭圆焦点并用切线长定理的空间推广提取横断面。所提方法可以充分利用海量点云数据,不需要对隧道点云数据进行抽稀,具有简单、高效及对计算机配置无任何要求等优点。本文研究可为今后指导隧道现场横断面验收提供理论与实践基础。

1 盾构隧道横断面提取原理

隧道的整体点云数据处于绝对坐标系下,通过研究隧道横断面点云的几何特征与隧道的空间位置关系发现,由于成型竣工期的盾构隧道变形较小,隧道点云数据接近圆柱体,点云数据的中轴线方向与坐标轴存在固定的几何关系。

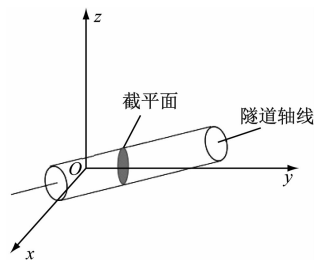
任意一个里程坐标系下,通过平面法向量截取盾构隧道的平面,并提取任意里程、不同环数的横断面,通过圆柱体与平面相交的空间关系可以发现:①若该平面与圆柱体截交线的点云数据为圆形,则该平面与隧道点云垂直,直接合理设置点到平面的距离并截取任意里程下的隧道点云横断面即可提取隧道横断面;②若该平面与圆柱体截交线的点云数据为非圆形,由 Dandelin 双球定理与切线长定理可判断该截交线的点云数据为椭圆形,通过椭圆定理可反推出平面法向量与坐标轴夹角,平移、旋转横断面点云数据即可提取隧道横断面。

2 盾构隧道横断面提取过程

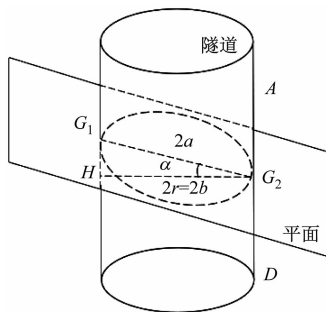
若圆柱体与平面相交处截交线的点云数据为非圆形,说明平面的法向量与隧道的中轴线方向向量存在夹角,即隧道点云数据与预设平面不正交,因此需要将隧道点云进行旋转后才能对其进行横断面提取。本文重点针对隧道点云数据与预设平面不正交的情况进行详细论述。

隧道空间位置及隧道点云旋转夹角示意图如图 1 所示。取法向量 $\mathbf{n} = [0 \ 1 \ 0]^T$ 的平面,设圆柱体的中轴线方向向量与截平面的法向量夹角为 α ,隧道半径为 r 。设隧道一侧任意一点为 G_2 ,作 $G_2H \perp AD$ (H 为垂足; AD 为 G_2 所在椭圆边线的对侧边线),则有: $G_2H = 2r$ 。设以 G_2 为一端长轴的另一端点为 G_1 ,则隧道截平面椭圆的长轴长为 $2a = G_1G_2$ (a 为椭圆半长轴),短轴长为 $2b = G_2H$ (b 为椭圆半

短轴), α 与二者的关系式为 $\cos \alpha = b/a$ 。再取法向量 $\mathbf{m} = [0 \ 0 \ 1]^T$ 的平面,求出圆柱体中轴线的方向向量与截平面法向量的夹角 β 。



a) 隧道空间位置



b) 隧道点云旋转夹角

图 1 隧道空间位置及隧道点云旋转夹角示意图

Fig. 1 Diagram of tunnel space position and rotation angle of tunnel point cloud

为了提取隧道点云数据的二维横断面,需要将空间中的隧道点云数据进行旋转和平移,使盾构隧道点云数据的中轴线平行于 y 轴。点云数据的旋转过程如图 2 所示,其旋转过程的表达式为:

$$\begin{bmatrix} x_{i1} \\ y_{i1} \\ z_{i1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:

$[x_i \ y_i \ z_i]^T$ ——第 i 个点云数据旋转前的坐标;

$[x_{i1} \ y_{i1} \ z_{i1}]^T$ ——第 i 个点云数据旋转后的坐标。

根据隧道设计文件可以得到不同里程(环数)横断面的设计坐标 (X, Y, Z) ,通过 xoz 平面的法向量 $\mathbf{n} = [0 \ 1 \ 0]^T$ 和设计坐标获得该平面方程,可以表示为:

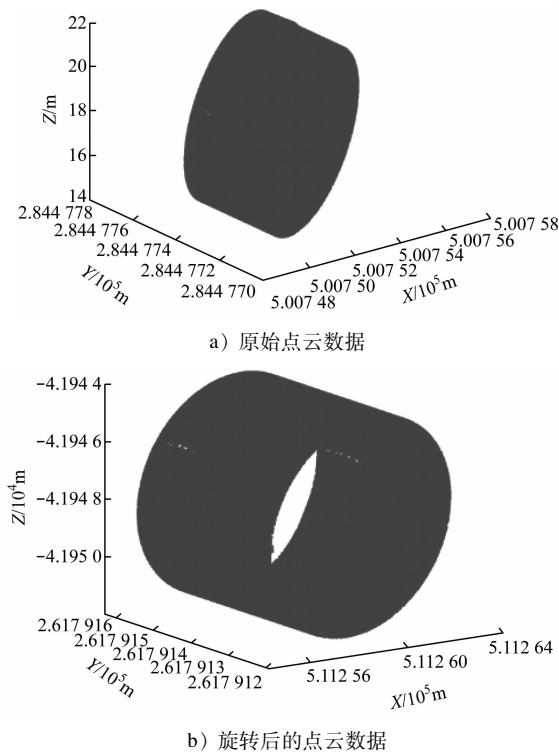


图 2 点云数据的旋转过程

Fig. 2 Point cloud data rotation process

$a(x - X) + b(y - Y) + c(z - Z) = 0$ (2)

式中:

c ——椭圆焦距。

利用经过旋转、平移后的点云数据至该平面的距离截取隧道横断面,合理设置旋转后盾构隧道表面的点至该平面的距离 δ ,可以表示为:

$$|y - Y| < \delta \tag{3}$$

经过上述计算,最终获得截取后的隧道横断面点云数据,如图 3 所示。

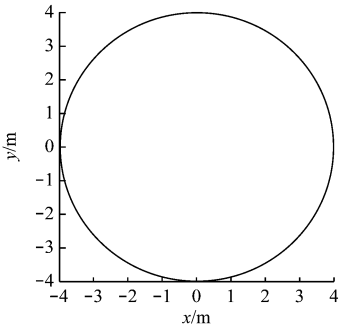


图 3 截取后的横断面点云数据

Fig. 3 Cross-section point cloud data after extraction

3 工程应用

以北京新机场线某盾构区间工程为例,两隧道

间的水平净距为 4.766 ~ 10.575 m,覆土厚度为 8.7 ~ 19.0 m,竖曲线半径为 15 000 m,最大坡度为 21.0‰,最小坡度为 3.5‰。本研究选取一段试验段(试验段里程标为 108.0 ~ 204.1 m),扫描测量期间正值该工程竣工期。盾构隧道竣工验收时需要测量隧道横断面中轴线平面位置和高程,以检验成型隧道的空间位置及横断面尺寸。GB 50446—2017《盾构法隧道施工及验收规范》中规定的成型隧道验收时的隧道中轴线平面位置和高程允许偏差如表 1 所示,其中隧道中轴线平面位置使用全站仪进行检验,隧道中轴线高程使用水准仪进行检验,检验数量均为 10 环。

表 1 隧道中轴线平面位置和高程允许偏差
Tab. 1 Allowable deviation of tunnel axis plane position and elevation

隧道类别	隧道中轴线平面位置/mm	隧道中轴线高程/mm
地铁隧道	± 100	± 100
公路隧道	± 150	± 150
铁路隧道	± 120	± 120
水工隧道	± 150	± 150
市政隧道	± 150	± 150
油气隧道	± 150	± 150

中轴线高程测量通常采用水准仪,以隧道底点高程作为起算点,但其实施起来费时费力且盾构隧道底面常有积水或淤泥等不利因素,对测量结果精度有较大的影响。针对圆形盾构隧道,采用空间定向 K 近邻计算方法对每个节点进行平面拟合,将点云法向量定义为计算点与搜索邻近 7 个点所拟合平面的法向量,通过计算获得隧道顶点的点云法向量和平面方程后,利用最小二乘法求出隧道顶点平面位置和高程点云数据。考虑盾构隧道底面有积水或淤泥等不利因素,建议选取横断面厚度为 4 mm,横断面点云至该平面的距离选为 2 mm,中轴线高程提取过程示意图如图 4 所示。

根据中轴线高程提取方法,计算 10 个采用相对坐标系的横断面点云数据,并将其与水准仪实测值进行对比分析。隧道顶点高程实测值、隧道底点高程实测值和隧道中轴线高程实测值如表 2—表 4 所示。

由表 2 可知,水准仪实测隧道顶点高程与三维激光扫描仪实测隧道顶点高程的最大差值为 13 mm。由表 3 可知,水准仪实测隧道底点高程与三维

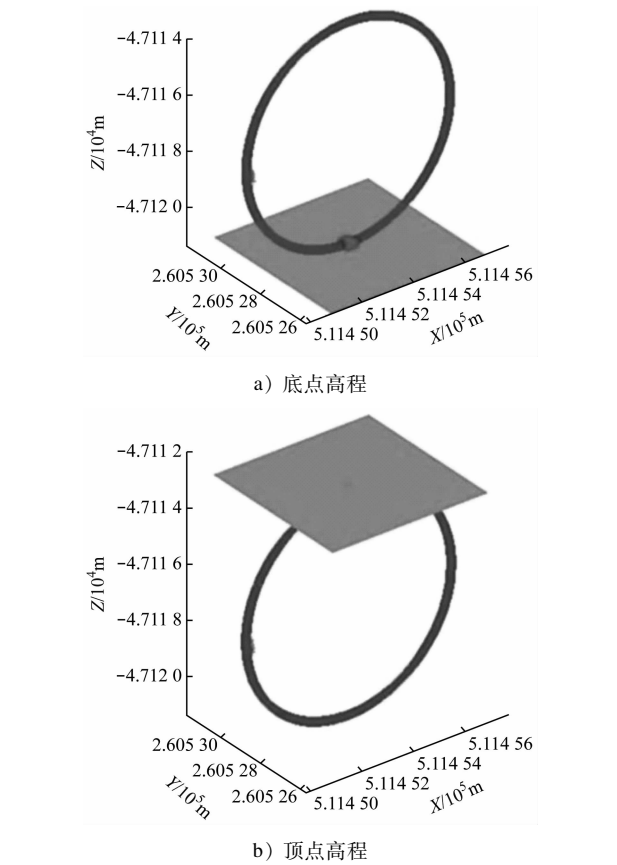


图4 中轴线高程提取过程示意图

Fig.4 Diagram of axis elevation extraction process

表2 不同隧道里程标下的隧道顶点高程实测值

Tab.2 Measured value of tunnel vertex elevation at various tunnel mileage marks

隧道里程标/m	水准仪实测值/m	扫描仪实测值/m	水准仪与全站仪实测值差值/m	水准仪与扫描仪实测值差值/m
108.0	21.493	21.481	4.835	0.012
117.6	21.564	21.555	5.864	0.009
127.2	21.613	21.602	4.293	0.011
136.8	21.680	21.673	5.236	0.007
146.4	21.745	21.734	5.110	0.011
156.0	21.803	21.792	4.650	0.011
175.2	21.912	21.903	3.200	0.009
184.9	21.992	21.985	5.200	0.007
194.5	22.045	22.032	3.733	0.013
204.1	22.103	22.091	3.400	0.012

激光扫描仪实测隧道底点高程的最大差值为15 mm。由表4可知,水准仪实测隧道中轴线高程与三维激光扫描仪实测隧道中轴线高程的最大差值为3 mm。综上所述,当进行一次隧道点云数据扫描后,

表3 不同隧道里程标下的隧道底点高程实测值

Tab.3 Measured value of tunnel bottom elevation at various tunnel mileage marks

隧道里程标/m	水准仪实测值/m	扫描仪实测值/m	水准仪与全站仪实测值差值/m	水准仪与扫描仪实测值差值/m
108.0	13.593	13.608	75.340	-0.015
117.6	13.664	13.677	80.833	-0.013
127.2	13.713	13.727	67.700	-0.014
136.8	13.781	13.793	72.300	-0.012
146.4	13.845	13.860	77.200	-0.015
156.0	13.903	13.912	67.020	-0.009
175.2	14.012	14.024	53.220	-0.012
184.9	14.092	14.100	67.200	-0.008
194.5	14.145	14.154	58.813	-0.009
204.1	14.203	14.217	60.200	-0.014

表4 不同隧道里程标下的隧道中轴线高程实测值

Tab.4 Measured value of tunnel central axis elevation at various tunnel mileage marks

隧道里程标/m	水准仪实测值/m	扫描仪实测值/m	水准仪与全站仪实测值差值/m	水准仪与扫描仪实测值差值/m
108.0	17.545	17.543	61.845	0.002
117.6	17.616	17.614	69.735	0.002
127.2	17.664	17.663	55.313	0.001
136.8	17.733	17.730	62.331	0.003
146.4	17.797	17.795	64.150	0.002
156.0	17.852	17.853	56.760	-0.001
175.2	17.964	17.962	42.610	0.002
184.9	18.043	18.042	59.600	0.001
194.5	18.093	18.095	48.073	-0.002
204.1	18.154	18.153	47.100	0.001

应用本文提出的中轴线高程提取方法,能够智能、高效地进行盾构隧道中轴线平面位置和高程验收工作,在满足工程精度要求的同时,大大节省了人力和物力。

4 结语

本文提出了一种基于空间切割理论的原始点云数据隧道横断面提取方法,并将其与水准仪实测隧道中轴线高程进行了对比分析。在检测隧道中轴线高程的工作中,其检测精度和效率均有较大的改善。该方法不需要进行横断面点云数据的抽稀, (下转第77页)