

基于点云的地铁盾构隧道环内管片错台量与接缝张开量检测方法^{*}

鲍艳^{**} KIM IL BOM 李文海 张东亮 高利业

(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//第一作者, 副教授)

摘要 目的:地铁盾构隧道施工作业不规范或运营期荷载的变化,会产生管片错台与接缝张开,严重时导致隧道渗水漏沙,需快速准确地检测环内管片错台量与接缝张开量,因此提出一种基于点云的快速全面的检测方法。方法:介绍了提取中轴线的旋转投影法及具体计算步骤;研究了基于点云的地铁盾构隧道环内管片错台量与接缝张开量检测方法;结合北京地铁某工程,采用该方法进行了环内管片错台量及张开量检测。结果与结论:所提检测方法为:采用旋转投影法获取高精度中轴线,根据中轴线展开管片三维点云,分析管片拼接处附近点云空间关系实现环内错台及接缝张开量的检测。实例验证结果表明:该方法实用性强,能满足检测要求;与常用的双向投影法相比,旋转投影法中轴线拟合精度更高,最合适的旋转投影次数为3次。

关键词 地铁;盾构隧道;管片错台量;张开量;点云;中轴线

中图分类号 U456.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.025

Detection Method for Metro Shield Tunnel Inner-ring Segment Staggering and Joint Opening Based on Point Cloud

BAO Yan, KIM IL BOM, LI Wenhai, ZHANG Dongliang, GAO Liye

Abstract Objective: Improper construction practices during metro shield tunneling or changes in operational load can cause segment staggering and joint opening, resulting in water seepage and sand leakage in the tunnel upon severity. It is necessary to detect the segment staggering and joint opening amounts within the tunnel ring rapidly and accurately. Therefore, a fast and comprehensive detection method based on point cloud is proposed. Method: The rotation projection method for extracting the central axis is introduced, and the specific calculation steps are outlined. The detection method for inner-ring segment

staggering and joint opening of metro shield tunnel based on point cloud is described. The method is applied to a project in Beijing Subway to detect the inner-ring segment staggering and joint opening amounts. Result & Conclusion: The proposed detection method involves obtaining high-precision central axis using the rotation projection method, and unfolding the three-dimensional point cloud of inner-ring segments based on the central axis. The detection of inner-ring staggering and joint opening is achieved by analyzing the spatial relationship of point cloud near the segment joints. The results of the practical application demonstrate that the method has strong practicability and can fulfill detection requirements. Compared to the commonly used bidirectional projection method, the rotation projection method achieves higher accuracy in central axis fitting, with the most suitable number of rotation projection times being three.

Key words metro; shield tunnel; segment staggering amount; joint opening amount; point cloud; central axis

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

0 引言

盾构法施工对地面交通和建筑物的影响小,施工速度快,安全性高,已成为地铁隧道施工的主要方法,在地铁建设中的使用占比已超过85%^[1-3]。管片是盾构隧道主要装配构件和主要承载结构。地铁盾构隧道施工及运营中管片错台与张开是常见的现象。

许多学者通过有限元数值模拟或现场试验进行了盾构隧道管片错台量与张开量发生原因、变化

^{*} 国家自然科学基金项目(51829801)

^{**} 通信作者

规律及防止措施等研究^[4-7],但针对现场检测方法的研究甚少。目前管片纵缝错台量与接缝张开量的检测手段主要是人工巡检,首先通过目测寻找错台和张开发生的位置,然后采用卡尺、塞尺等工具进行测量。由于隧道内光线条件差或发生位置在顶部,极易出现漏检,因而现有检测法存在检测精度和检测效率较低的问题。

三维激光扫描技术利用激光测距原理,快速获取密集点云的三维坐标和反射率等信息,在地形测量、建筑结构、道路、管道、滑坡、隧道检测等诸多领域中得到了广泛应用^[8]。盾构隧道环内管片错台量检测研究中,有学者基于轨道的移动三维激光扫描系统获取强度信息灰度图,确定管片拼装位置,进行管片错台量的检测^[9-10];有学者基于运营期移动三维激光扫描点云提取断面,在断面上进行错台量分析^[11]。但目前移动式扫描系统仅在有轨的环境下进行作业,不能检测施工或竣工隧道管片错台量及张开量。有学者通过架站式三维激光扫描仪获取铺轨前竣工盾构隧道点云,实现隧道断面连续提取,在断面上检测环内错台量及张开量^[12-13],但由于同一环内断面提取位置不同而错台量及张开量检测值也会不同,不能够全面反映管片拼装实际情况。

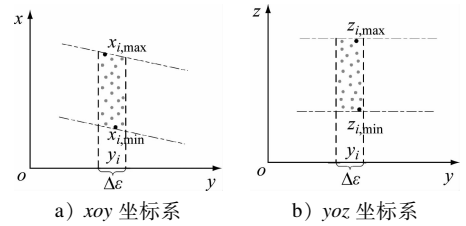
为了快速准确地实现任意盾构隧道环内管片错台量与张开量的检测,本文基于架站式扫描仪扫描盾构隧道获取点云,提出了提取中轴线的旋转投影法,根据精度较高的中轴线获取隧道管片三维展开点云与环内管片拼装接缝处点云,进而实现环内管片错台量与张开量的全面检测及拼装实际情况的分析。

1 提取中轴线旋转投影法

中轴线是表示隧道走向的空间曲线,目前提取中轴线方法较简单,大多采用的是双向投影法^[14-15]。但该方法由于只利用隧道上下左右4个位置的边界点云,易受噪点的影响,中轴线提取精度不高。因此本文提出了采用旋转投影法提取中轴线,该方法首先将隧道点云进行坐标旋转变换,提取不同旋转坐标系下的隧道上下左右位置的边界点云,通过旋转投影边界点计算中心点,采用最小二乘法和RANSAC算法拟合出高精度隧道中轴线。该方法具体步骤如下:

步骤1:隧道点云在原始坐标系下分别投影至

xoy 和 $yozy$ 平面上,将投影点云沿 y 轴方向(隧道前进方向)进行分割,每段点云的切割厚度为 $\Delta\epsilon$ 。对于每段分割点云,在 xoy 投影面上搜索 x 最大值和最小值的两个左右边界点,同样在 $yozy$ 投影面上搜索 z 最大值和最小值的两个上下边界点。边界点提取示意图如图1所示。



注: $x_{i,max}, x_{i,min}$ —每段分割点云中 x 轴坐标的最大值和最小值; y_i —每个分割段的 y 轴坐标的中心值; $z_{i,max}, z_{i,min}$ —每段分割点云中 z 轴坐标的最大值和最小值。

图1 边界点提取示意图

Fig. 1 Diagram of boundary point extraction

通过边界点坐标计算每段的中心点的坐标:

$$\begin{cases} x_{i,center} = \frac{x_{i,min} + x_{i,max}}{2} \\ z_{i,center} = \frac{z_{i,min} + z_{i,max}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$x_{i,center}$ ——每段分割点云中心点 x 轴坐标值;

$z_{i,center}$ ——每段分割点云中心点 z 轴坐标值。

步骤2:将点云以 y 轴为旋转中心轴进行旋转,旋转角度为 α ,转换后的隧道点云坐标 (x', y', z') 为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

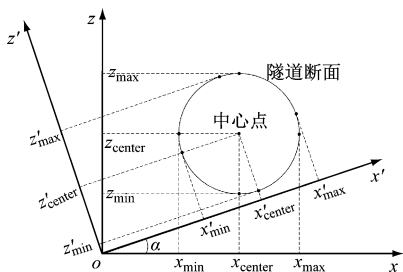
旋转坐标系下采用步骤1的方法获取边界点及中心点坐标,该边界点是断面上与双向投影边界点不同位置的点,如图2所示。

原始坐标系下的中心点的坐标为:

$$\begin{bmatrix} x_{center} \\ z_{center} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_{center} \\ z'_{center} \end{bmatrix} \quad (3)$$

步骤3:0 到 $\pi/2$ 之间选择不同旋转角度,以提取隧道表面不同位置边界点云,通过步骤2的原理进行几次坐标旋转并获取相应的边界点云及中心点坐标。

步骤4:将原始坐标系与多个旋转坐标系下获



注:下标 center 表示中心点;max 表示最大值;min 表示最小值。

图2 旋转投影边界点示意图

Fig.2 Diagram of rotation projection boundary points

取的中心点采用最小二乘法和 RANSAC 算法拟合出中轴线相应的方程:

$$x_k = \sum_{j=0}^2 a_{kj} y^j, \quad z_k = \sum_{j=0}^2 b_{kj} y^j \quad (4)$$

式中:

x_k, z_k ——通过 k 次坐标旋转投影 x 轴和 z 轴坐标值;

a_{kj}, b_{kj} ——通过 k 次坐标旋转投影中轴线 j 次项的参数。

通过多个旋转投影中轴线方程参数求得隧道

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_1 & \sin \alpha_1 \\ 0 & -\sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 & 0 \\ -\sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中:

α_1 —— xoy 投影面上中轴线与 y 轴的斜角;

α_2 —— $yozy$ 投影面上中轴线与 y 轴的斜角。

图3为隧道点云三维展开原理图。如图3所示, x 轴对应隧道的周长, y 轴对应管片宽度, z 轴对应隧道点云到中轴线距离与设计半径差值(径向偏差)。将隧道点云三维展开, 展开点云坐标为:

$$\begin{cases} x'' = \arcsin\left(\frac{x' - x'_0}{\sqrt{(x' - x'_0)^2 + (z' - z'_0)^2}}\right)R \\ y'' = y' \\ z'' = R - \sqrt{(x' - x'_0)^2 + (z' - z'_0)^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中:

x'_0, z'_0 ——转正后隧道中轴线的坐标;

R ——隧道设计半径值。

2.2 环内管片错台量及张开量检测

2.2.1 错台量检测原理

图4为管片错台量检测原理图。如图4所示, 将拼装接缝处附近两个管片展开点云投影至 $yozy$ 平面上, 在投影平面上沿 y 轴方向将拼装处点云进行

中轴线方程的参数:

$$a_j = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n a_{kj}, \quad b_j = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n b_{kj} \quad (5)$$

式中:

a_j, b_j ——中轴线方程的 j 次项参数;

n ——坐标旋转变换总数。

最终中轴线方程为:

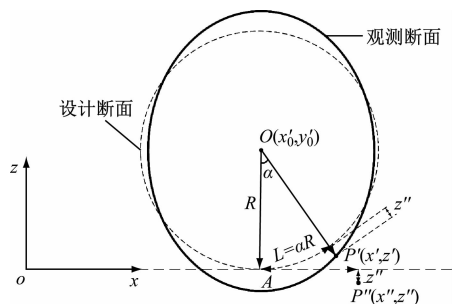
$$x = \sum_{j=0}^2 a_j y^j, \quad z = \sum_{j=0}^2 b_j y^j \quad (6)$$

2 环内管片错台量与张开量检测原理

2.1 点云三维展开

由于隧道衬砌表面与半径处垂直, 错台量是接缝处两个管片点云到中轴线距离差值, 张开量是接缝处的周长与设计值差。为了计算方便, 通过极坐标转换获取隧道三维展开点云。

根据隧道中轴线空间关系, 将隧道原始点云进行转正, 转正后隧道中轴线与 y 轴是平行关系, 转换后坐标为:



注: L 为弧长。

图3 隧道点云三维展开原理图

Fig.3 Diagram of tunnel point cloud 3D expansion principle

分割, 厚度为 δ , 在每段分割点云中搜索 z 最大值的边界点。利用最小二乘法和边界点云拟合出管片边界线, 拟合边界线之间 z 轴方向间距为错台量。

2.2.2 张开量检测原理

图5为管片张开量检测原理图。如图5所示, 将两个管片接缝处展开点云投影至 xoy 平面上, 在投影平面上沿 y 轴方向进行分割, 厚度为 δ , 在每段分割点云中搜索第一个管片 x 最大值的点和第二个管片 x 最小值的点。对于两个管片边界点云, 采用

最小二乘法拟合出相应的边界线,两边界线之间 x 轴方向间距 D 与管片嵌缝设计值 D_0 差值为管片张开量 Δ ,即 $\Delta = D - D_0$ 。

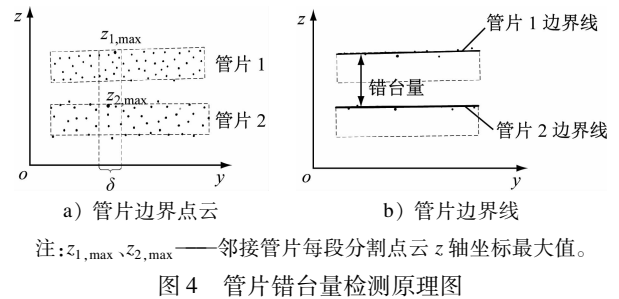


Fig. 4 Diagram of segment staggering amount detection principle

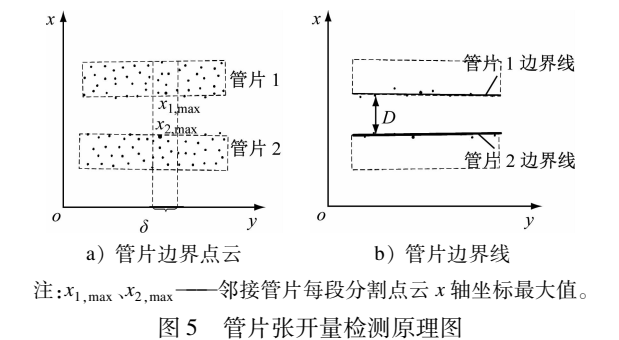


Fig. 5 Diagram of segment opening amount detection principle

3 工程应用

3.1 工程概况

依托北京地铁某工程盾构段,利用徕卡 P40 架站式扫描仪获取竣工盾构隧道某一段扫描点云。该盾构隧道拼装采用方法为错缝拼接,管片内径为 7.9 m,宽度为 1.6 m,每环 8 个管片。从楔形管片 F 块开始,其他 7 个管片逆时针依次记为 L1、B1、B2、B3、B4、B5、L2,其中 F 块对应的角度为 $16^{\circ}21'49''$,B1、B2、B3、B4、B5 五个标准块和 L1、L2 两个邻接块对应的角度为 $49^{\circ}5'27''$,如图 6 所示。

管片接缝宽度设计值为 23 mm,如图 7 所示。

3.2 隧道中轴线提取

按照本文旋转投影法提取中轴线。选择不同旋转角度,提取隧道表面不同位置边界点云,结果如表 1 所示。利用旋转投影边界点云拟合出中轴线,结果如图 8 所示。

为了验证不同旋转数投影法提取的中轴线和隧道点云的符合精度,先求得点云到各个旋转投影中轴线的距离 ρ ,然后计算平均值 $\bar{\rho}$ 与协方差 S :

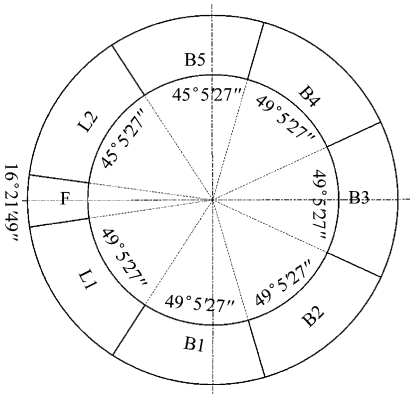


图 6 管片拼装示意图
Fig. 6 Diagram of segment assembly

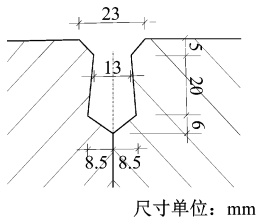


图 7 管片接缝宽度设计图
Fig. 7 Drawing of segment joint width design

表 1 坐标旋转次数、旋转角度及中轴线计算时间
Tab. 1 Coordinate rotation number, rotation angle and central axis calculation time

旋转 投影次数	旋转角	计算时间/s
0	0(双向投影)	172.069
1	$\pi/4$	181.382
2	$\pi/6, \pi/3$	185.816
3	$\pi/8, \pi/4, 3\pi/8$	195.134
4	$\pi/10, \pi/5, 3\pi/10, 2\pi/5$	199.903
5	$\pi/12, \pi/6, \pi/4, \pi/3, 5\pi/12$	208.124

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{m=1}^N \rho}{N}, \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^N (\rho - \bar{\rho})^2}{N - 1}} \quad (9)$$

式中:

N ——扫描点数。

表 2 为不同旋转投影次数的中轴线偏差对比表。如表 2 所示,采用双向投影法提取的中轴线与隧道点云之间距离偏差为 15.7 mm;随着旋转投影次数的增加中轴线拟合偏差变小,旋转投影次数达到 3 次时偏差最小,为 7.5 mm;旋转投影次数大于 3 次,该偏差变化不明显,为 8.0 mm 左右。说明旋转投影法与双向投影法相比其中轴线拟合精度更

高,旋转次数为3次时提取的中轴线与点云的拟合精度最高,该中轴线为隧道的最终中轴线。

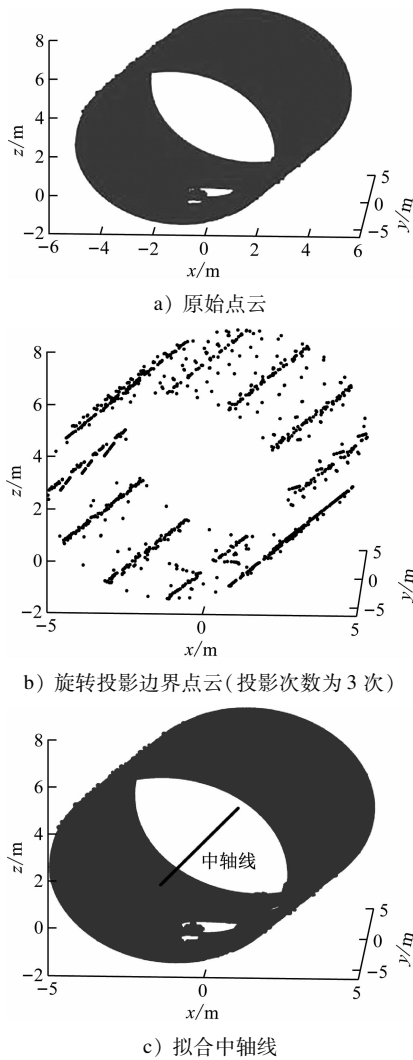


图8 旋转投影边界点云与拟合中轴线

Fig. 8 Rotation projection boundary point cloud and fitting central axis

表2 不同旋转投影次数的中轴线偏差对比

Tab. 2 Comparison of central axis deviation of different rotating projection times

旋转投影次数	中轴线偏差/m	
	平均值	协方差
0(双向投影法)	3.957 4	0.015 7
1	3.955 8	0.012 4
2	3.955 6	0.009 1
3	3.954 0	0.007 5
4	3.955 3	0.008 2
5	3.954 8	0.007 7

3.3 管片错台量和张开量分析

本文以北京地铁某工程盾构隧道衬砌一环管片点云为例进行错台量和张开量的分析。

按照前文方法,根据中轴线获取环内三维展开点云,如图9 a)所示。展开点云中提取y轴方向厚度为3 mm的展开点云,通过点云间距变化与管片拼装设计值寻找管片拼装接缝处位置,如图9 b)所示。根据拼装接缝位置,提取接缝处两个管片展开点云,每环隧道由8块管片拼装而成,环内存在8处拼装接缝。

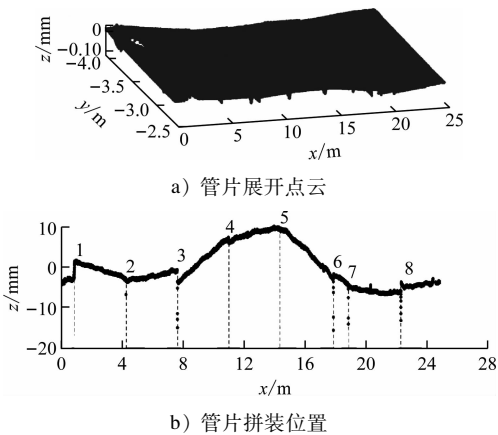


图9 管片三维展开点云及拼装位置

Fig. 9 Segment 3D expansion point cloud and assembly position

以B3-B4管片接缝处为例,进行环内管片接缝处错台量与张开量检测及分析。图10为B3-B4管片接缝处点云。徕卡P40扫描仪可扫描到接缝空隙处B3管片内侧,接缝处B3管片垂直方向点云厚度较厚。将B3-B4管片接缝处点云投影至xoy、yoz投影面上提取边界点云,通过两个管片边界线计算错台量与张开量。

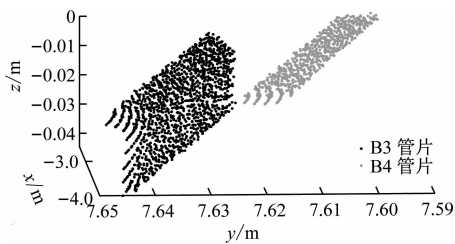


图10 B3-B4管片接缝处附近展开点云

Fig. 10 Expansion point cloud near B3-B4 segment joint

图11为B3-B4管片拼装处错台量与张开量分析图。从图11 a)可以看出,在yoz投影面上,B3管片对B4管片的相对错台量为-5.6~2.1 mm,接缝

始处 B3 管片比 B4 管片凹陷了 5.6 mm,但接缝尾处 B3 管片比 B4 管片突出了 2.1 mm,平均错台量为 -1.7 mm,这说明接缝处 B3 管片比 B4 管片平均凹陷 1.7 mm。

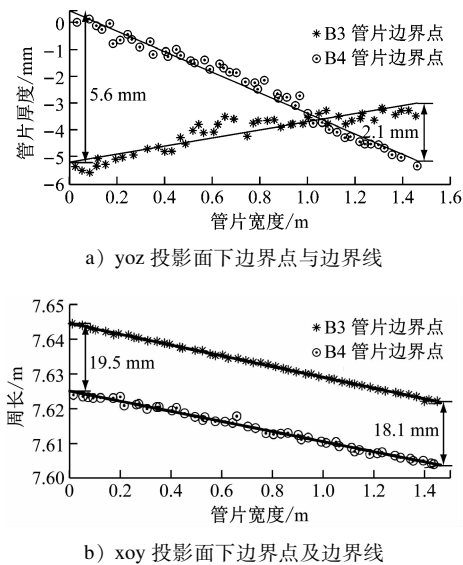


图 11 B3-B4 管片拼装处错台与张开量分析图
Fig. 11 Analysis diagram of staggering and opening amounts at B3-B4 segment joints

从图 11 b)可以看出,在 xoy 投影面上,B3 管片

与 B4 管片间距为 19.5 ~ 18.1 mm(管片接缝宽度设计值为 23.0 mm),张开量为 -4.9 ~ 3.5 mm,平均张开量为 -4.2 mm,沿着 y 轴(管片宽度)接缝张开量逐渐变小。

通过每个接缝处点云计算错台量与张开量范围及平均值,结果如表 3 所示。由表 3 可见:B1-B2、B2-B3、B4-B5、B5-L2、L2-F 五处接缝张开量均大于 0,说明这五处管片接缝有向外扩张的趋势;B3-B4、F-L1、L1-B1 三处接缝张开量小于 0,说明这三处管片接缝有向内压缩的趋势。错台量是接缝处两个管片之间的相对位移,错台量大于 0 表示接缝处第一个管片比第二个管片突出,错台量小于 0 表示第二个管片比第一个管个片凹陷。从表 3 中可以看出:L1-B1 接缝处错台量最大,为 4.5 mm,说明 L1 管片比 B1 管片平均突出了 4.5 mm;B5-L2 接缝处错台最小,为 -2.1 mm,说明 B5 管片比 L2 管片平均凹陷了 2.1 mm。8 个接缝处错台量都小于 8 mm,满足规范规定成型隧道验收的允许偏差。如表 3 所示,根据本文方法检测的错台量与张开量平均值与现场卡尺、塞尺检测值对比,错台量最大误差为 1.5 mm,平均误差为 0.75 mm,张开量最大误差为 1.4 mm,平均误差为 0.55 mm,满足检测要求。

表 3 环内管片错台量与张开量检测表
Tab.3 Checking table for segment staggering and joint opening amounts in tunnel ring

管片拼接 型号	错台量/mm				张开量/mm			
	错台变化范围	平均值	实测值	误差	张开变化范围	平均值	实测值	误差
B1-B2	0.2 ~ 0.6	0.4	1	0.6	1.0 ~ 4.4	2.7	2	0.7
B2-B3	0.7 ~ 2.5	1.6	3	1.4	1.4 ~ 3.6	2.5	3	0.5
B3-B4	-5.6 ~ 2.1	-1.7	2	0.3	-4.9 ~ -3.5	-4.2	5	0.8
B4-B5	0.4 ~ 3.2	1.8	2	0.2	1.5 ~ 2.6	2.1	2	0.1
B5-L2	-3.1 ~ -1.2	-2.1	3	0.9	0.7 ~ 2.8	1.7	2	0.3
L2-F	-1.6 ~ 2.2	-0.2	1	0.8	0.7 ~ 2.3	1.5	1	0.5
F-L1	-1.5 ~ 0.6	-0.5	2	1.5	-4.1 ~ -0.6	-2.4	1	1.4
L1-B1	1.9 ~ 7.1	4.5	5	0.5	-3.2 ~ -1.2	-2.1	2	0.1

4 结语

以北京某地铁盾构隧道为研究对象,基于三维激光扫描点云研究了检测隧道环内错台量及张开量的检测原理。首先采用本文所提出的旋转投影法提取中轴线,拟合出精度较高的中轴线,保证隧道检测后续数据处理精度;根据中轴线获取管片展开点云及拼装接缝处管片点云,通过接缝处两个管

片拟合边界线的空间关系,实现快速而准确的盾构隧道管片拼装错台量与张开量的检测,并以实际工程为案例进行了分析。

旋转投影法与双向投影法相比,中轴线拟合精度更高;随着旋转投影次数的增加,中轴线拟合精度也越高,计算时间也越长。投影次数 3 次以上后提取中轴线拟合精度变化不明显,点云与拟合中轴线的偏差为 7.5 mm,考虑计算时间建议最合适的

投影次数为3次。检测出环内管片错台量与接缝张开量的变化及平均值,进而分析管片拼装实际情况,为施工、竣工及运营隧道检测提供参考。

本文的检测方法在隧道中轴线提取、错台量与张开量检测上达到了较高精度,但管片拼装接缝处噪点较多时对检测精度的影响较大,需针对性改进算法。

致谢:北京市政建设集团有限责任公司在本文的数据上给予了大力支持,在此特别感谢!

参考文献

- [1] 现代城市轨道交通. 2021年中国内地城市轨道交通线路汇总分析[J]. 现代城市轨道交通, 2022(1):126.
Modern Urban Rail Transit. Summary and analysis of urban rail transit lines in China mainland in 2021[J]. Modern Urban Rail Transit, 2022(1): 126.
- [2] 赵方彬. 盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J]. 工程建设与设计, 2018(20):191.
ZHAO Fangbin. Present situation and prospect of shield tunneling technology for subway tunnel construction[J]. Construction & Design for Project, 2018(20)191.
- [3] 陈少秋. 浅谈城市地铁隧道盾构法施工技术[J]. 科学技术创新, 2019(1): 122.
CHEN Shaoqiu. Discussion on shield construction technology of urban subway tunnel[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2019(1): 122.
- [4] 周明军. 盾构隧道管片结构纵向错台研究[J]. 铁道建筑技术, 2008(5):80.
ZHOU Mingjun. Study on longitudinal dislocation of the shield tunnel segment [J]. Railway Construction Technology, 2008 (5):80.
- [5] 李宇杰, 何平, 秦东平. 盾构隧道管片纵缝错台的影响分析[J]. 工程力学, 2012, 29(11): 277.
LI Yujie, HE Ping, QIN Dongping. Influence analysis on longitudinal dislocation for shield tunnel segment[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(11): 277.
- [6] 杨春山, 莫海鸿, 陈俊生, 等. 盾构隧道先隧后井工法对管片张开量影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊1): 2870.
YANG Chunshan, MO Haiou, CHEN Junsheng, et al. Influence of shield tunneling with tunnels followed by well excavation on segment opening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

Engineering, 2014, 33(S1): 2870.

- [7] 李长俊, 陈卫忠, 杨建平, 等. 运营期水下盾构隧道管片接缝张开度变化规律[J]. 岩土力学, 2018, 39(10):3783.
LI Changjun, CHEN Weizhong, YANG Jianping, et al. Variation of segment joint opening of underwater shield tunnel in operation period[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10):3783.
- [8] 张宏伟, 赖百炼. 三维激光扫描技术特点及其应用前景[J]. 测绘通报, 2012(增刊1):320.
ZHANG Hongwei, LAI Bailian. Characteristics and application prospect of three-dimensional laser scanning technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(S1):320.
- [9] CUI H, REN X C, MAO Q Z, et al. Shield subway tunnel deformation detection based on mobile laser scanning[J]. Automation in Construction, 2019, 106: 102889.
- [10] 高洪, 李凯, 马全明, 等. 移动三维激光测量系统在地铁运营隧道病害监测中的应用研究[J]. 测绘通报, 2019(8):96.
GAO Hong, LI Kai, MA Quanming, et al. Research on application of mobile 3D laser measurement system in subway operation tunnel disease monitoring[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(8):96.
- [11] 赵亚波, 王智. 基于移动三维扫描技术的隧道管片错台分析及应用[J]. 测绘通报, 2020(8):160.
ZHAO Yabo, WANG Zhi. Analysis and application study of tunnel segment stagger based on mobile 3D scanning technology[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(8):160.
- [12] 陈明安. 地铁盾构隧道激光扫描海量数据处理及应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
CHEN Ming'an. Research on processing and application of mass data of laser scanning in metro shield tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [13] 艾中亮. 基于三维激光扫描技术的竣工盾构隧道管片拼装质量检验[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.
AI Zhongliang. Assembling quality inspection of completed shield tunnel segments based on 3D laser scanning technology[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [14] ZHANG Z X, YIN T, HUANG X, et al. Identification and visualization of the full-ring deformation characteristics of a large stormwater sewage and storage tunnel using terrestrial laser scanning technology[J]. Energies, 2019, 12(7): 1304.
- [15] CAO Z, CHEN D, SHI Y F, et al. A flexible architecture for extracting metro tunnel cross sections from terrestrial laser scanning point clouds[J]. Remote Sensing, 2019, 11(3): 297.

(收稿日期:2021-12-23)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821