

基于三维点云的盾构管片拼装质量偏差评价方法

武宁奇¹, 汪卫军², 陈丽娟¹, 吴青琳¹, 谢 雄³

(1. 苏州大学轨道交通学院, 江苏苏州 215000; 2. 盐城市交通规划设计院有限公司, 江苏盐城 224001;
3. 常州市规划设计院, 江苏常州 213002)

摘 要: 盾构机在掘进过程中, 由于盾构姿态控制不当等因素, 管片拼装时常发生错台值、椭圆度失准等工程质量问题, 这些施工质量问题往往会对隧道的稳定性及安全性造成影响, 为保证盾构隧道的安全施工与健康服役, 在施工过程中对盾构管片拼装质量进行动态评估尤为重要。针对传统盾构管片拼装检测效率低, 精度有限及检测数据全面性差等问题, 应用三维激光扫描技术采集盾构管片拼装成型后的点云数据, 通过长短轴法和改进的按斜率分割法分别对盾构管片的椭圆度和错台值进行测算; 同时提出环段数据拟合提取隧道中轴线及中心点的方法, 实现盾构管片拼装质量高精度、高效率、自动化检测。结合实际盾构隧道工程案例, 验证基于三维点云的盾构管片拼装质量偏差检测方法的可行性。

关键词: 城市轨道交通; 盾构管片; 拼装质量; 三维点云; 偏差检测; 环间错台; 按斜率分割算法

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2024)01-0152-08

Quality Deviation Evaluation of Shield-segment Assembly Based on 3D Point-cloud

WU Ningqi¹, WANG Weijun², CHEN Lijuan¹, WU Qinglin¹, XIE Xiong³

(1. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215000; 2. Yancheng Traffic Planning and Design Institute Co., Ltd., Yancheng, Jiangsu 224001; 3. Changzhou City Planning and Design Institute, Changzhou, Jiangsu 213002)

Abstract: Quality defects in segment assembly, such as misalignment and ellipse deformation, often occur during shield-tunneling excavation. Construction quality defects threaten tunnel stability and safety. To ensure the safe construction and service of shield tunnels, a quality assessment of the shield segment assembly is necessary during construction. Limited by manual detection methods, traditional site-quality assessment is challenged by low efficiency, limited accuracy, and missing data. Three dimensional laser scanning was introduced to collect point-cloud data during the assembly of the shield-segment lining. The ellipticity and misalignment values of the shield segments were calculated by the long and short-axis algorithms and the improved slope segmentation algorithms. Based on the theory of center-point extraction of ring-seam data, a method for extracting the central axis and center point of a tunnel through ring-segment data fitting was proposed for high precision, efficiency, and automation to detect shield-segment assembly quality. A shield-tunnel project was conducted to demonstrate and

收稿日期: 2023-06-27 修回日期: 2023-10-15

第一作者: 武宁奇, 男, 硕士研究生, 研究方向为隧道与地下空间信息化管理, 20215246025@stu.suda.edu.cn

通信作者: 陈丽娟, 女, 博士, 讲师, 研究方向为施工质量安全信息化管理, chenlj@suda.edu.cn

基金项目: 中国高校产学研创新基金(2022BC040)

引用格式: 武宁奇, 汪卫军, 陈丽娟, 等. 基于三维点云的盾构管片拼装质量偏差评价方法[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(1): 152-159.

WU Ningqi, WANG Weijun, CHEN Lijuan, et al. Quality deviation evaluation of shield-segment assembly based on 3D point-cloud[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(1): 152-159.

validate the proposed method. The results show that the proposed method can efficiently and automatically assess the assembly quality of shield-construction segments.

Keywords: urban rail transit; shield segment; assembly quality; 3D point cloud; deviation detection; inter-ring misalignment

1 研究背景

盾构法具有安全性高、速度快、对环境及周边建筑扰动小等优点,在城市隧道工程中得到广泛应用。如上海地铁线路长度超过 75% 采用盾构施工,苏州地铁隧道施工大部分采用盾构。

盾构法作为一种应用广泛的施工技术,其施工质量问题备受关注。盾构隧道中主要受力控件为盾构管片,因此管片拼装成型质量是其施工质量管理重点。《盾构法隧道施工与验收规范》(GB50446—2017)^[1]明确指出盾构管片拼装以管片成型后的错台值、椭圆度及轴线偏差作为主要质量控制指标。目前,盾构法施工中对管片拼装质量检测主要是利用量尺和全站仪对隧道进行测量,该方法检测效率低、检测数据零散、精度有限及数据客观性差。为提升管片安装成型质量评估的效率与可靠性,本文利用三维激光扫描仪快速获取管片成型后的点云数据,并提出基于点云数据的处理算法,快速提取盾构管片的椭圆度、错台值及拟合隧道中轴线数据。

针对当前盾构管片拼装质量检测的不足,引入三维激光扫描与机器视觉等技术对检测方法进行改进以对施工过程质量进行严密控制。丁烈云等利用图像识别技术实现了盾构管片错台实时高精度检测^[2];高新闻等利用全局搜索算法识别图像中不同类型的错台线,并找到对应深度图像上的位置进行管片错台值计算^[3];HAN 等利用图像处理技术中的骨架提取算法提取隧道中轴线^[4];DUAN 等通过圆柱拟合法获取轴线方向,实现中轴线的识别并建立隧道建筑模型^[5];虞伟家利用点云断面提取算法实现了点云数据的逐环断面提取,并对椭圆度、环间错台及水平收敛进行了分析^[6];谢雄耀等采用点云双面投影提取隧道中轴线,并基于中轴线调整隧道姿态、切割中轴线获取隧道断面^[7];谢长岭等提出了椭圆拟合法,建立自动筛选长短轴异常值的方法^[8]。

上述研究中,机器视觉识别方法增加了在管片上贴标签的工序,影响了施工进度。目前,盾构管片拼装成型质量检测多侧重于错台、椭圆度及中心轴线等质量控制点中的一方面,缺少管片拼装成型质量方面的全面性研究。此外,常用的平均分割算法在处理数量庞大的盾构点云时,结果较为零散,且分割点难以

控制,人工处理点云效率低^[9]。因此,如何对点云数据进行准确、高效的分割,实现对数据高效的分析计算,是基于三维激光扫描技术对管片拼装成型质量高效检测的关键问题。

针对目前研究现状的不足,本文提出盾构管片成型后点云的采集、预处理以及测算方法,并结合实际工程对本文提出的算法进行验证。

2 数据采集及预处理

点云质量决定了管片质量控制点的计算精度。为保证点云数据质量满足后续算法的要求,需对获取的现场数据进行去噪、变换、分割等预处理。

2.1 点云数据采集

本文依托杭州市某隧道工程,该工程盾构穿越情况复杂,穿越建(构)筑物最近距离仅 0.78 m,穿越风险大,盾构管片外径 11.36 m,属于超大盾构直径施工,隧道掘进施工风险控制及管片拼装质量控制较普通盾构工程难度大,且隧道管片拼装成环后,盾构机会关闭一段时间进行调整,有一定的窗口期用于数据采集。综上,为及时发现施工偏差,本文采取边施工边检测的方式,对隧道管片拼装质量进行及时检测,快速反馈施工质量。

三维激光扫描仪的运行平台主要分为手持、机载和地面 3 类。手持式常用于小型物体扫描,不满足盾构隧道数据采集需要;机载式需要一定预留空间进行设备定向移动,而该工程情况复杂,施工人员、机械众多,不易满足设备移动条件;地面式激光扫描仪使用时,将扫描仪置于隧道内三角支架上并调整到合适高度即可对隧道进行扫描,通过灵活移动进行采集数据的拼接,对施工影响较小,符合该工程实际需要。由于隧道内光线差,应选择不受光线影响的脉冲式三维激光扫描仪。因此,本文采取地面式进行隧道点云数据的采集,设备选取徕卡 P40 三维激光扫描仪,扫描仪检测距离 50 m,检测误差 ± 3 mm,数据采集与处理范围为 51~59 段管片。

盾构隧道属于超长线性结构,单次扫描中三维激光获取点云数据的范围有限,并且在扫描过程中易受隧道内其他施工机具以及人员等因素遮挡干扰,因此想要获取整个隧道的点云数据,需在隧道内布设多个站点进行数据采集。不同站点的扫描数据并未在同一

坐标系下,通过在相邻站点布设标靶作为公共点将不同站点获取的点云数据进行拼接校准。在布设标靶时,需将其设置在两侧站点中点处,确保两侧均能扫描到标靶。

2.2 点云数据的去噪

三维激光扫描仪在采集数据过程中,由于扫描设备的精度限制、光线干扰、机具遮挡、目标物表面特征干扰等会产生明显的噪声点。常用的去噪方法有算法去噪和软件去噪。算法去噪一般采用滤波的方式去噪,常见的滤波有中值滤波、高斯滤波和双边滤波,但由于初始点云数据中包含多种类型的点云数据,单一算法去噪适用性不高。

为了降低噪声对数据的影响,采用 Cloud Compare 软件去噪。Cloud Compare 软件去噪有 2 种方式,一种是直接利用人工选取并剔除无关噪声,这一方法可以有效快速剔除明显的无关点;另一种是采用软件自带的中值、高斯滤波和双边滤波等常见的滤波去噪。本文首先通过人工框选取较为明显的无关噪声点,将其剔除,之后利用软件内置滤波算法去除其他多噪声点,处理效果如图 1 所示。



图 1 Cloud Compare 软件点云数据去噪示意

Figure 1 Denoising diagram using Cloud Compare software for point-cloud data

2.3 点云坐标变换

点云去噪后,为方便后续计算,需使隧道数据的中心轴线与坐标轴平行或重合,从而对点云数据进行坐标变换。

点云数据坐标调整实际上可看作数据矩阵的旋转变换,关键在于求解出旋转变换的旋转矩阵 R 。

$$RA=B \quad (1)$$

式中, R 为旋转矩阵, A 、 B 分别为点云数据的中心轴线向量与坐标单位向量。

坐标轴的单位向量为已知量,因此要求得 R ,需对盾构隧道数据中轴线向量进行求解。由图 1 可知,盾构点云数据呈圆柱形,其中轴线向量常用圆柱拟合进行求解,如图 2 所示。

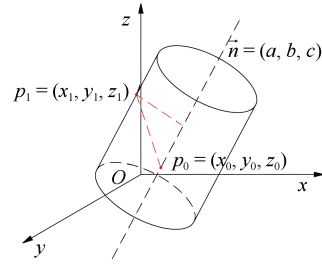


图 2 圆柱模型示意

Figure 2 Diagram of cylinder model

设点 $p_0=(x_0, y_0, z_0)$ 为圆柱中轴线 $\vec{n}=(a,b,c)$ 上的一点,点 $p_1=(x_1, y_1, z_1)$ 为圆柱表面上一点,圆柱半径为 r ,则圆柱方程为

$$\begin{aligned} & (x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2+(z_1-z_0)^2- \\ & [a(x_1-x_0)+b(y_1-y_0)+c(z_1-z_0)]^2=r^2 \end{aligned} \quad (2)$$

对点云数据中的每一个点邻近若干点共同进行平面拟合,得到该平面的拟合正法向量 $\vec{m}_i=(a_i,b_i,c_i)$,设圆柱中轴线初始向量为 $\vec{n}_0=(a_0,b_0,c_0)$,则

$$\vec{m}_i \cdot \vec{n}_i=0 \quad (3)$$

所求向量 $\vec{n}_0=(a_0,b_0,c_0)$ 为中轴线实际走向。

设点云数据经轴线旋转后与 Z 轴平行轴线向量为 $\vec{n}_0=(0,0,\sqrt{a_0^2+b_0^2+c_0^2})$,则可求得隧道中心轴旋转至与 Z 轴平行的旋转矩阵 R

$$R=\begin{bmatrix} \frac{b_0}{\sqrt{a_0^2+b_0^2}} & \frac{-a_0}{\sqrt{a_0^2+b_0^2}} & 0 \\ \frac{a_0 \times b_0}{\sqrt{a_0^2+b_0^2}} & \frac{c_0 \times b_0}{\sqrt{a_0^2+b_0^2}} & -\sqrt{a_0^2+b_0^2} \\ a_0 & b_0 & c_0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对点云坐标进行变换,变换调整后的点云数据可实现中心轴线与坐标轴的平行,便于后续点云分割与分析。

2.4 点云数据分割

点云分割作为点云处理中一项基础工作,目的是将点云中的不同机构物体分离开来,将整体转化为个体单元,从而实现分而治之。目前通用的方法有基于二维图像分割的 DeepPano^[10]、基于体素化方法 VoxelNet^[11]、基于非欧式的 Regularized Graph Cnn^[12]及直接对点云人工手动分割的方法。

点云分割的方法可按高度变化、平面平整度等特

征进行数据分割,本文隧道点云数据经过变换调整后,在 Z 轴会呈现线性变化。因此,可以按高度变化对隧道点云进行分割,最常用的方法是沿 Z 轴对点云数据进行平均分割,但平均分割后的数据较为零散,且管片间距非完全相等,数据的分割点难以控制,会导致分割点位于环缝处,造成错台数据的错误分割,无法满足后续错台检测需要。因此本文在基于平均分割算法的基础上进行改进,提出非平均分割算法,其主要原理如图3所示。

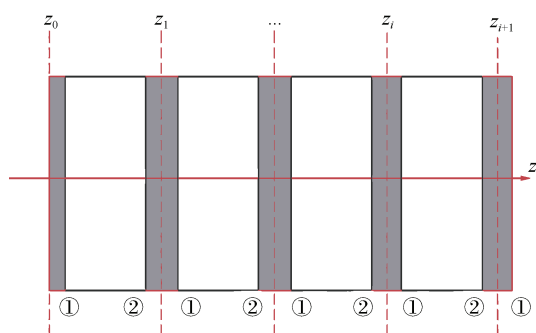


图3 点云数据非平均分割示意

Figure 3 Diagram of non-average segmentation of point-cloud data

设管片的宽度为 l_1 ,数据的起始位置 z 值为0,数据的起始位置第1环管片与第2环管片的第1环缝处,则第 i 处的接缝位置为

$$z_i = (i-1)l_1 \quad (5)$$

在管片环缝段左右两侧分别设置两类分割点。

第1类分割点

$$z_{i1} = (i-1)l_1 + s \quad (6)$$

第2类分割点

$$z_{i2} = il_1 - s \quad (7)$$

式中, s 为一个常量,是环缝处宽度的一半。

将以上两类分类点依次间隔并从小到大排列在数据的 Z 轴上组合成一个集合 K

$$K = \{(i-1)l_1 + s, il_1 - s\} \quad (8)$$

将 K 中数据依次两两组合并对点云数据进行分割,即可实现隧道点云数据进行非均匀分割。如图4所示,分割后的环段数据 Z 轴宽度远大于环缝段 Z 轴宽度,因此可通过设置 Z 轴的宽度阈值进行归类。

基于平均分割算法基础改进的非平均分割算法可以精准地分割区分环段与环缝段点云数据,且数据完整,满足后续需要。

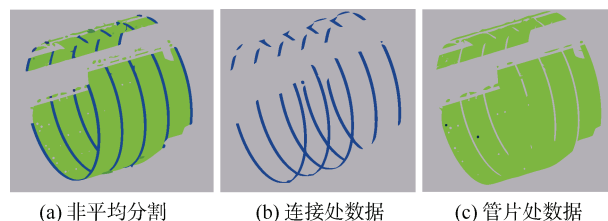


图4 点云数据非平均分割结果

Figure 4 Non-average segmentation of point-cloud data

3 盾构管片拼装成型偏差检测

3.1 椭圆度检测

椭圆度是指在盾构隧道横截面上的最大直径与最小直径之差与设计直径的千分比,《盾构法隧道施工与验收规范》(GB50446—2017)明确规定隧道椭圆度允许值为5‰。相关研究分析认为当管片椭圆度小于5‰时,隧道可以被认为处于完全健康的状态^[13]。

点云数据经预处理后为三维数据,而隧道椭圆度的运算因子均为二维数据,为简化椭圆度的计算,本文中点云数据投影到 XY 平面进行降维处理。投影后,点云数据呈现为一个近似圆环的不规则环状,包含环内接缝及部分连接构件的数据,需进一步对无效点云数据进行处理。

本文采用基于最小二乘法的平面圆拟合进行处理。设拟合圆心 O 的坐标 (X, Y) ,拟合圆边缘任意一点 $q_i(x_i, y_i)$,拟合圆半径为 R 。由此可得拟合圆方程

$$f(x, y) = (x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 = R^2 \quad (9)$$

$$i = 0, 1, \dots, n$$

对于任一点云代入式(9)均会与实际圆方程 $F(x, y)$ 存在一定误差 $g(x, y)$,即

$$f(x, y) = F(x, y) + g(x, y) \quad (10)$$

对上式所有点云 q_i 对应的误差 $g(x, y)$ 求和

$$\Delta = \sum_{i=1}^n g_i(x, y) = \sum_{i=1}^n [F_i(x, y) - f_i(x, y)] \quad (11)$$

将式(9)~(11)带入平面点云数据中的任意一点的真实坐标,当 Δ 取最小值时,可拟合出最优圆及圆心 $O(X, Y)$ 。

对比传统的隧道椭圆度检测中,多采用人工吊锤法进行测量,要求隧道长轴位于水平方向,短轴位于竖直方向,如图5(a)所示,但实际工程中经过360°遍历计算后实际算得的长轴与短轴会与重力方向呈现一定方向的旋转。

本文在吊锤法的基础上进行改进,提出长短轴法来求隧道的椭圆度,将吊锤法中水平、竖直状态检测

长轴与短轴改为寻找任意方向的长轴及短轴,如图 5(b)所示。

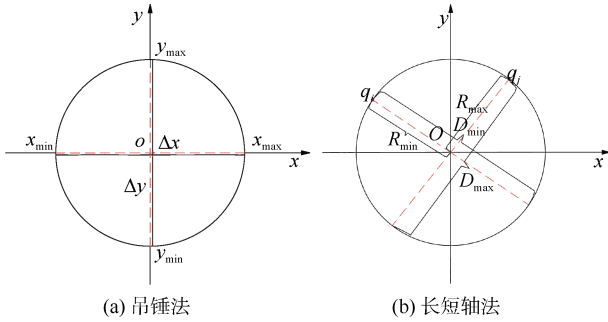


图 5 吊锤法及长短轴法示意

Figure 5 Diagram of lifting hammer and long- and short-axis method

设点 $q_i(x_i, y_i)$ 是点云数据的任意一点, 其与拟合圆心 $O(X, Y)$ 之间的距离 R_i 为

$$R_i = \sqrt{(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2} \quad (12)$$

其中, R 的最大值与最小值分别为 R_{\max} 、 R_{\min} , 则可知椭圆的长轴 D_{\max} 与短轴 D_{\min} 分别为

$$D_{\max} = 2R_{\max} \quad (13)$$

$$D_{\min} = 2R_{\min} \quad (14)$$

依据椭圆理论公式可求得隧道椭圆度 φ 为

$$\varphi = \frac{|D_{\max} - D_{\min}|}{D_0} \times 1000\% \quad (15)$$

式中, D_0 为设计直径。

3.2 错台值检测

传统的隧道管片错台值测量通常是人工尺量下部 4 个点, 检测部位集中, 实际工程中错台可能发生在环向的各个方向, 因此传统的方法难以精准及全面地检测出管片的实际最大错台值。为找到隧道的最大错台值, 需要检测环缝段各个方向的错台, 因此要将环缝段点云沿着环向进行数据平移分割。

按斜率分割算法是依据设定的平分角度对应的斜率直线方程进行环向分割的一类算法。在计算过程中, 90° 与 270° 的斜率趋近于无穷, 处理较为复杂繁琐。因此, 本文对斜率分割进行优化, 对点云数据依次进行区间归类处理。改进后的按斜率分割数据分割面如图 6(a)所示, 该数据可分为 3 部分, 数据 A、数据 B 及接缝处的峰值部分, 错台值主要为 A、B 两部分的差值, 因此测出錯台值需对 A、B 两部分数据进行提取并单独处理, 如图 6(b)所示。

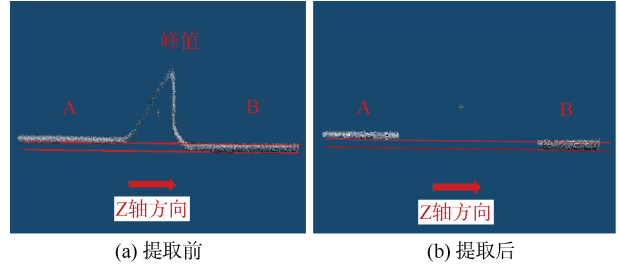


图 6 环向分割数据侧面

Figure 6 Side view of circumferential segmentation data

设分割后某处点云坐标为 p , 初始数据通过坐标变换等处理后, 此时隧道中心轴与 Z 轴重合, 因此对 p 中任意一点 p_i 到 XY 平面原点的距离 d_i 为

$$d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (16)$$

依据上式可求得最大距离即峰值对应数据, 并提取此时的 z 值

$$d_{\max} = \max \left\{ \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \right\} \quad (17)$$

$$z = z_i \quad (18)$$

式中, d_{\max} 为 p 到 XY 平面原点的最大距离, z 为对应的点云在 Z 轴上的坐标值。

提取点云 p 中的最大、最小 z 值, 即为 z_{\max} 、 z_{\min} , 其中必有 $z_{\max} > z > z_{\min}$, 并创建集合 O

$$O = \left\{ z_{\min}, \frac{z_{\min} + z}{2}, \frac{z_{\max} + z}{2}, z_{\max} \right\} \quad (19)$$

依次成对提取集合 O 中的数据对点云 p 进行 Z 轴分割, 最终数据被分割为 3 段, 前后两段即为 A、B 部分点云, 如图 6(b)所示, 则在 XY 平面, A、B 点的点云数据到原点的平均距离 d 分别为

$$d_A = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (20)$$

$$d_B = \frac{1}{m} \sum_{j=0}^{m-1} \sqrt{x_j^2 + y_j^2} \quad (21)$$

式中, d_A 、 d_B 分别为 A、B 部分在 XY 平面内与原点的平均距离, 错台值为 d_A 、 d_B 的差值

$$\Delta = |d_A - d_B| \quad (22)$$

式中, Δ 为计算的错台值。

3.3 管片中轴线拟合

在盾构隧道管片拼装质量中, 管片中心线反映了隧道成型的实际走向, 其偏差是关键质量控制点。目前, 对管片中心轴线提取通常采用双投影和单投影法, 但以上方法较为复杂, 为简化计算, 基于环缝数据拟

合提取隧道中轴线的方法被提出。

《盾构法隧道施工与验收规范》(GB50446—2017)中规定轴线偏差检测对象以管片为主,因此本文将在提取环缝数据中心点的理论基础上,提出环段数据拟合提取隧道中轴线及中心点方法。

从点云中提取环段数据在Z轴的坐标值 z ,其最大、最小值分别为 z_{\max} 、 z_{\min} ,计算中心数据 z 值设置距离阈值 δ 计算提取环中数据,即

$$z_{\text{mid}} = \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2} \quad (23)$$

$$|z_i - z_{\text{mid}}| \leq \delta \quad (24)$$

式中, z_{mid} 为管片 midpoint 数据 z 值, z_i 为任意点数据 z 值。

提取环中数据后,对数据进行最小二乘法圆柱拟合,即可得到环段数据的中心点。基于以上提取的多环段中心点,求解相邻管片中心点之间的距离差值,如图7所示。

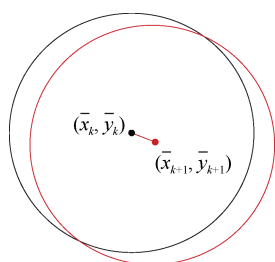


图7 中心点距离求解示意

Figure 7 Diagram of center-point distance

设某环通过圆拟合后点云中心点为 $p_k=(x_k, y_k)$,相邻环圆拟合点云中心点为 $p_{k+1}=(x_{k+1}, y_{k+1})$,任意相邻环段中心点偏差 d 为

$$d = \sqrt{(\bar{x}_k - \bar{x}_{k+1})^2 + (\bar{y}_k - \bar{y}_{k+1})^2} \quad (25)$$

式中, d 为相邻环段中心偏差。

通过以上算法得到相邻管片中心偏差值,并在此基础上拟合得到整段隧道点云的中心轴线。

4 盾构管片成型质量检测实例

本文依托工程施工空间布局复杂,隧道内施工器械及材料堆放占据一定空间位置,如隧道底部的排土车轨道会遮挡底部管片等,不可避免地影响了数据采集的完整性,也会导致收集的原始数据中含有较多的无关干扰点云数据,需在前处理中对无关点数据进行剔除。

无关数据剔除之后,对隧道点云进行圆柱拟合,将隧道轴线调整与Z轴平行。随后对整体数据进行环段的数据及环缝数据的分割处理,本文中非平均分割

算法的参数 s 设置为10 cm。分割后环缝段数据结果清晰,如图8所示,表明非平均分割算法能准确分割环缝与环段数据,且分割后的数据满足后续计算需要。

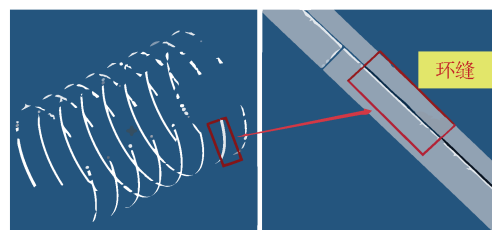


图8 数据分割环缝数据

Figure 8 Split data of loop seam

椭圆度的信息包含在环段数据内,将无关数据剔除并进行圆柱拟合后,分割出环段数据。对处理后的环段数据采用上文提出的长短轴法及理想状态下的吊锤法计算工程数据中的椭圆度,计算结果如表1所示。

表1 椭圆度计算结果

Table 1 Ellipticity calculation results %

环编号	φ_1	φ_2	误差允值
52	—	3.846 06	5
53	—	3.846 06	5
54	3.503 93	3.845 97	5
55	1.302 59	3.846 06	5
56	1.306 53	3.844 96	5
57	1.769 43	3.845 14	5
58	2.144 94	3.845 78	5
59	1.899 74	3.842 21	5

注: φ_1 、 φ_2 分别为理想状态与长短轴法的计算结果

从表1可知,理想状态下方程在52与53环处出现无法计算的情况,对上述两环点云数据进行检查发现在 $(0, y_{\min})$ 点处均出现数据缺失,最终导致结果无法输出。表1显示两种方法计算结果均小于5%,其中长短轴法结果较大,经分析得出该方法会放大长轴,缩短短轴,最终导致结果偏大。在盾构隧道工程中,施工要求严格,采用长短轴法放大计算椭圆度,增加了检测严格性。

依据改进后的按斜率环向分割算法对分割后每环峰数据进行环向平均分割,设置每一段环缝数据分为360份,即每一份角度为 1° ,将各环平分后的任意一份数据进行峰值剔除并计算最大错台值,并与现场实地人工测量值对比,结果如表2所示。

表 2 环间最大错台值计算结果
Table 2 Calculation of maximum misalignment value between rings mm

序号	计算值	实测值	误差	允许值
52-53	13.031 9	12.46	0.571 9	7
53-54	7.771 0	8.35	-0.579 0	7
54-55	9.941 1	9.45	0.491 1	7
55-56	12.030 5	11.46	0.580 5	7
56-57	14.998 4	13.84	1.158 4	7
57-58	12.794 3	11.53	1.264 3	7
58-59	12.337 6	11.84	0.497 6	7

分析表 2 可知,在正常情况下,不论是算法检测还是人工检测,其管片间的错台值均超过标准中对于盾构隧道错台值的规范允许值 7 mm,相似的结论在其他学者的研究中也得到了体现。孟庆年等^[14]对盾构隧道进行隧道错台检测时,发现管片环间错台平均值在 10 mm 左右;卢建军等^[15]进行隧道环缝错台率检测时,结果显示相邻管片环间错台值大于标准规定值的占比 58.24%。

综上可以推断出,盾构衬砌环与环之间是管片错台超标的频发区。此外,现行标准对于同类型不同直径范围盾构错台允许值并未有详细规定,对于超大盾构施工,施工质量控制难度远远大于常规直径盾构,因此拼装质量控制值超标的情况相对较多。

通过分割后的环段数据与环缝数据,分别对环中数据以及环缝数据进行提取,并在此基础上分别计算隧道中心点及相邻环中心点的偏差,计算结果如表 3 与表 4 所示。

表 3 基于环段数据中心点及偏差计算结果
Table 3 Calculation based on loop-data center point and deviation

序号	x/m	y/m	偏差编号	偏差值/mm
52	0.043 15	-0.006 50	51-52	—
53	0.056 70	0.016 28	52-53	26.5
54	0.045 96	0.003 18	53-54	16.9
55	0.044 30	0.003 94	54-55	1.8
56	0.034 30	-0.000 97	55-56	11.1
57	0.042 27	0.001 96	56-57	8.5
58	0.044 11	0.004 35	57-58	3.0
59	0.045 67	-0.010 48	58-59	14.9

由表 3 与表 4 数据可知,基于环段数据及基于环缝数据计算所得中心点坐标数值相近,但两者相邻

表 4 基于环缝数据中心点及偏差计算结果
Table 4 Calculation based on ring-seam data center point and deviation calculation

序号	x/m	y/m	偏差编号	偏差值/mm
51-52	0.043 52	0.005 68	51-52	—
52-53	0.061 31	-0.011 00	52-53	24.3
53-54	0.052 09	0.002 01	53-54	15.9
54-55	0.040 26	0.001 00	54-55	11.8
55-56	0.034 15	-0.075 88	55-56	77.1
56-57	0.040 40	0.003 94	56-57	80.6
57-58	0.047 91	0.006 56	57-58	8.0

中心点偏差值计算结果相差较大,尤其是基于环缝数据提取的中心点之间偏差达 77.1 mm 与 80.6 mm,结合 55-56、56-57 环缝处环间错台值均超过 10 mm,分析认为基于环缝数据的中心点偏差计算受环间错台情况影响较大,难以正确体现轴线真实走向。而环段数据不受环间错台偏差的叠加影响,计算中心点更能代表真实中心,拟合后的轴线也可较真实地反映实际中轴线走向,为后续盾构施工轴线控制提供参考依据。

综上,该检测方法能快速、高效地对盾构隧道管片拼装质量的相关指标进行检测,且采用激光扫描仪的方式获取数据,自动化程度高,适用于盾构隧道施工作业。

5 结论

本文以实现盾构隧道管片拼装质量的高效检测为目标,研究了基于三维点云技术的盾构管片错台值、椭圆度及中轴线等关键指标的高效检测方法。主要研究结论如下:

- 1) 在平均分割算法的基础上,提出点云的非平均分割方法,实现对隧道点云的高效分割。此外对斜率平分算法进行改进优化,解决了按斜率平分算法会出现点云数据分割不当的情况。
- 2) 提出基于环形数据分割的环间错台值计算方法,实现环间最大错台值高效测算;相较于传统测量方法,基于吊锤法优化后的长短轴法计算椭圆度结果偏大,但与实际工程要求相符,可用于椭圆度计算。在基于环缝数据提取中心点方法基础上,提出环段数据提取中心点方法,并拟合得到隧道中心线。
- 3) 通过实际工程案例验证,与传统的测量方式相比,本方法检测效率高、自动化程度高且适合盾构隧道施工过程中管片拼装成型质量检测。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 盾构法隧道施工及验收规范: GB 50446—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for construction and acceptance of shield tunnelling method: GB 50446—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [2] 丁烈云, 周迎, 骆汉宾, 等. 一种基于图像识别的管片拼装质量的智能检测系统及其检测方法: CN102589443A[P]. 2012-07-18.
DING Lieyun, ZHOU Ying, LUO Hanbin, et al. System and method for intelligently detecting duct piece splicing quality based on image identification: CN102589443A[P]. 2012-07-18.
- [3] 高新闻, 俞黎卿, 杨正哲, 等. 一种地铁隧道管片错台量检测方法: CN105387801A[P]. 2018-05-01.
GAO Xinwen, YU Liqing, YANG Zhengzhe, et al. Subway tunnel segment dislocation quantity detection method: CN105387801A[P]. 2018-05-01.
- [4] HAN S, CHO H, KIM S, et al. Automated and efficient method for extraction of tunnel cross sections using terrestrial laser scanned data[J]. Journal of computing in civil engineering, 2013, 27(3): 274-281.
- [5] DUAN Dongya, QIU Wenge, CHENG Yunjian, et al. Reconstruction of shield tunnel lining using point cloud[J]. Automation in construction, 2021, 130: 103860.
- [6] 虞伟家. 基于移动三维激光扫描的盾构隧道断面提取与应用[J]. 测绘通报, 2019(增刊 2): 200-206.
YU Weijia. Section extraction and application of shield tunnel based on moving 3D laser scanning[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2019(S2): 200-206.
- [7] 谢雄耀, 黄炎, 赵铭睿. 基于激光扫描的盾构隧道断面提取与变形研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(3): 873-881.
XIE Xiongyao, HUANG Yan, ZHAO Mingrui. Research on section extraction and deformation of shield tunnel based on laser scanning[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2020, 16(3): 873-881.
- [8] 谢长岭, 贺子瑜, 尤相骏, 等. 隧道三维激光扫描点云断面收敛参数相关性研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(5): 90-95.
XIE Changling, HE Ziyu, YOU Xiangjun, et al. Correlation study on convergence parameters of point cloud cross-section in three-dimensional laser scanning tunnel[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(5): 90-95.
- [9] 林卉, 王李娟, 康志忠, 等. 三维激光扫描建筑物立面数据的自动提取[J]. 测绘通报, 2016(10): 25-30.
LIN Hui, WANG Lijuan, KANG Zhizhong, et al. Automatic extraction of building facade segments from 3D laser scanning point clouds[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2016(10): 25-30.
- [10] SHI Baoguang, BAI Song, ZHOU Zhichao, et al. DeepPano: deep panoramic representation for 3-D shape recognition[J]. IEEE signal processing letters, 2015, 22(12): 2339-2343.
- [11] ZHOU Yin, TUZEL O. VoxelNet: end-to-end learning for point cloud based 3D object detection[C]//2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. June 18-23, 2018, Salt Lake City, UT, USA. IEEE, 2018: 4490-4499.
- [12] TE Gusi, HU Wei, ZHENG Amin, et al. RGCNN: regularized graph CNN for point cloud segmentation[C]//Proceedings of the 26th ACM international conference on Multimedia. Seoul Republic of Korea. New York, NY, USA: ACM, 2018.
- [13] LI Pan, ZHANG Yawei, JIANG Fuyu, et al. Comprehensive health assessment of shield tunnel structure based on prototype experiment[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(3): 681-689.
- [14] 孟庆年, 张洪德, 王智, 等. 移动三维激光扫描技术在地铁隧道病害检测中的应用[J]. 城市勘测, 2021(2): 143-148.
MENG Qingnian, ZHANG Hongde, WANG Zhi, et al. Application of mobile 3D laser scanning technology in subway tunnel disease detection[J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2021(2): 143-148.
- [15] 卢建军, 李文海, 燕樟林, 等. 螺栓孔特征点云支持下的地铁盾构隧道环缝识别与环间错台量分析[J]. 测绘通报, 2022(9): 6-11.
LU Jianjun, LI Wenhai, YAN Zhanglin, et al. Circumferential seam detection and analytics of segment misplacement between rings of subway shield tunnels based on featured point cloud of bolt holes[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2022(9): 6-11.

(编辑: 傅依萱)