

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.03.015

基于激光扫描的盾构管片错台移动高精度测量方法

鞠丽艳¹, 庞高兆^{2,3}, 刘洪波¹, 刘学增^{4,5}, 刘新根^{2,3}

(1. 上海申通地铁集团有限公司, 上海 201103; 2. 上海同岩土工程科技股份有限公司, 上海 200092; 3. 上海地下基础设施安全检测与养护装备工程技术研究中心, 上海 200092; 4. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 5. 同济大学土木信息技术教育部工程研究中心, 上海 200092)

摘要: 针对盾构隧道管片错台量测量效率低、覆盖性差、精度不足的问题, 提出一种融合激光点云灰度化与深度学习的自动测量算法。该方法可精准测量管片错台, 有效降低因错台引发的渗漏风险, 保障隧道结构服役性能。首先将采集的三维激光点云转换为灰度图像, 并增强其边缘特征; 然后利用轻量化 EfficientNet 网络高效识别管片环间、环内接缝的边界框, 将边界框坐标映射至点云三维空间, 实现管片接缝两侧点云精准分割与提取; 最后分别计算接缝两侧点云至隧道管片结构拟合椭圆圆心的平均径向距离, 其差值为管片错台量, 可实现盾构隧道管片错台非接触、高精度测量。研制搭载三维激光扫描仪的隧道结构检测车, 集成上述算法, 开发配套的数据采集与数据处理软件。在杭州地铁1号线盾构区间隧道进行工程试点应用, 结果表明, 检测车测量结果与人工测量结果接近, 绝对最大偏差 1.6 mm。本方法可确保在高速移动条件下, 仍然具有较高的测量精度, 满足盾构隧道管片错台量快速、覆盖式检测行业需求。

关键词: 城市轨道交通; 盾构隧道; 管片错台; 激光点云; 移动测量; 深度学习

中图分类号: U231.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)03-0117-09

High-Precision Measurement Method for Shield Segment Misalignment Movement Based on Laser Scanning

JU Liyan¹, PANG Gaozhao^{2,3}, LIU Hongbo¹, LIU Xuezheng^{4,5}, LIU Xingen^{2,3}

(1. Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai 201103; 2. Shanghai Tongyan Civil Engineering Technology Co., Ltd., Shanghai 200092; 3. Shanghai Engineering Research Center of Detecting Equipment for Underground Infrastructure, Shanghai 200092; 4. Civil Engineering College, Tongji University, Shanghai 200092; 5. Civil Engineering Research Center for Information Technology of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract: Targeting the problems of low efficiency, poor coverage, and insufficient accuracy in shield tunnel segment misalignment measurement, an automatic measurement algorithm integrating laser point cloud grayscale conversion with deep learning is proposed. This method can accurately measure segment misalignment, effectively reduce the risk of water leakage caused by misalignment, and maintain the service performance of tunnel structures. First, the collected three-dimensional laser point cloud is converted into grayscale images with enhanced edge features. Then, the lightweight EfficientNet network is utilized to efficiently identify the bounding boxes of inter-ring and intra-ring joints of segments. The bounding box coordinates are mapped to the three-dimensional point-cloud space to achieve precise segmentation and extraction of point clouds on both

收稿日期: 2025-08-27 修回日期: 2025-12-05

第一作者: 鞠丽艳, 女, 博士, 高级工程师, 从事轨道交通土建结构技术研究及管理工作, angel5666@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF0507904); 上海申通地铁集团有限公司科研计划项目(JS-KY23R012S-1)

引用格式: 鞠丽艳, 庞高兆, 刘洪波, 等. 基于激光扫描的盾构管片错台移动高精度测量方法[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(3): 117-125.

Ju Liyan, Pang Gaozhao, Liu Hongbo, et al. High-precision measurement method for shield segment misalignment movement based on laser scanning[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(3): 117-125.

sides of segment joints. Finally, the average radial distances from the point clouds on both sides of joints to the center of the fitted ellipse of the tunnel segment structure are calculated respectively, with their difference representing the segment misalignment, enabling non-contact, high-precision measurement of shield tunnel segment misalignment. A tunnel structure inspection vehicle equipped with a three-dimensional laser scanner was developed, with the above algorithm integrated and supporting data acquisition and processing software developed. An engineering pilot application was conducted in a shield tunnel section of Hangzhou Metro Line 1, with laser scanning at a moving speed of 20 km/h. Comparative analysis between the inspection vehicle measurement results and manual measurement results shows that the two measurement results are close, with a maximum absolute deviation of 1.6 mm. This method can maintain high measurement accuracy even under high-speed movement conditions, meeting the industry demand for rapid, comprehensive detection of shield tunnel segment misalignment.

Keywords: urban rail transit; shield tunnel; segment misalignment; laser point cloud; mobile measurement; deep learning

当前轨道交通隧道普遍采用盾构法施工,管片为盾构隧道主体结构,受外部地质条件、车辆振动荷载、施工质量等因素影响,盾构管片易产生错台变形,若不及时检测,易形成渗水通道,进而影响隧道服役性能。

盾构隧道采用管片拼接而成,管片错台包括环间错台和环内错台两种。错台量是指缝两侧混凝土表面法向的错位距离,环间错台是指相邻环在垂直于隧道轴线的平面内发生相对位移,环内错台是指同一环内相邻管片沿径向产生相对位移。错台量超过合理范围会导致隧道衬砌结构受力不均,增加局部应力集中,加速管片损坏,进而降低隧道防水效果,引起渗漏,影响隧道服役性能^[1-2]。

错台人工检测主要采用直尺、塞尺、游标卡尺、全站仪等直接测量,效率低、数据离散。采用激光扫描或机器视觉进行非接触快速测量是当前研究热点。

Cui等^[3]基于移动激光扫描(MLS)点云语义分割与螺栓孔定位方法对盾构隧道错台量进行检测。Zhang等^[4]通过基于点云数据管片重构和切片拟合方法测量错台。Yu等^[5]提出一种融合深度神经网络和柱面投影平面拟合的盾构管片接缝张开量检测方法。关振长等^[6]采用深度学习立体匹配算法,通过双目相机内外参数标定和姿态修正等方法对盾构隧道管片错台进行测量,算法相对复杂,测量精度与标定、匹配、修正算法密切相关,且受光照环境干扰大。鲍艳等^[7]基于架站式扫描仪扫描盾构隧道获取点云,采用旋转投影法获取隧道中轴线,进而利用点云空间关系实现环内错台检测,检测精度毫米级,但旋转投影计算耗时较长。周斌等^[8]基于激光点云数据,通过图像处理和霍夫变换自动识别环缝,采用最小二乘法断面拟合方式计算错台量,整体检测精度5 mm,精度较低。谢嘉伟等^[9]基于移动三维激光扫描系统,利用激光点云技术对盾构隧道管片环面错台进行现场检测。赵亚波等^[10]基于轨道的隧道移动三维激光扫描系统对隧道错台进

行检测。刘新根等^[11]前期基于斜射式激光三角法原理和成像原理推导出错台量理论计算公式,实现错台量定向快速检测。Yu等^[12-13]采用随机抽样一致性算法对局部激光点云数据进行平面拟合,计算错台量。莫伟樑等^[14]通过室内模型试验,探究一种新型光频域分布式光纤传感对盾构隧道管片错台变形进行测量。周鸣亮等^[15]结合点云去噪、椭圆拟合等算法对隧道环间错台进行检测。武宁奇等^[16]利用斜率分割算法对接缝位置点云进行分割聚类,依据相邻管片的平均距离差实现错台测量。

综上,基于激光扫描的盾构管片错台移动测量业界已取得不少成果,但相比行业需求,其检测精度还有待进一步提升。本文提出一种融合点云与深度学习的移动测量方法,以实现盾构管片错台量非接触、高精度检测。

1 数据采集

1.1 隧道结构检测车

图1所示,隧道结构检测车(TDV-S)集成三维激光扫描仪、线阵相机阵列、高精度里程定位系统等系统,设计检测时速20 km,可对隧道轮廓表观图像、点云数据进行高效采集。TDV-S搭载Z+F PROFILER 9012



图1 移动采集系统

Figure 1 Mobile data acquisition system

三维激光扫描仪,最高扫描速率 200 转/s,每秒可采集点云数据 101.6 万个,单点距离测量精度 0.1 mm。

采用 C++与 C#开发配套的数据采集软件,软件主要功能包括:任务管理、设备操控、状态诊断、数据存储、数据展示、数据有效性检查等功能。

1.2 错台数据采集

利用 TDV-S 对地铁隧道断面轮廓进行连续、移动数据采集,可获取隧道高精度点云数据,为隧道管片错台量测量提供基础数据。同时,现场选取部分错台进行人工测量,如图 2 所示,选取无附属设施遮挡的管片环,在其侧壁环间错台接缝处选定 3 个点测量环间错台,同时在环内错台接缝的左、中、右 3 个位置测量环内错台,取 3 个点的平均值与移动测量值进行比较。

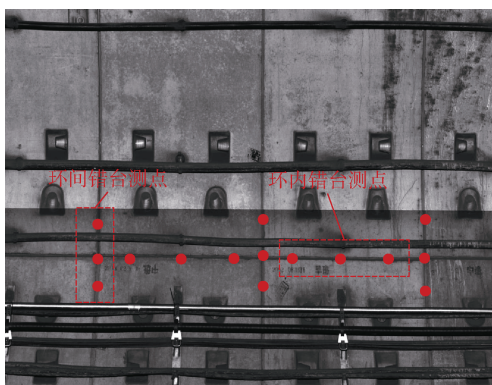


图 2 错台现场人工测量方法

Figure 2 On-site manual measurement method for misalignment

2 数据处理

基于激光点云数据的盾构隧道管片错台量计算方法主要包括图像预处理、接缝定位、点云分割和错台量计算,计算流程如图 3 所示。

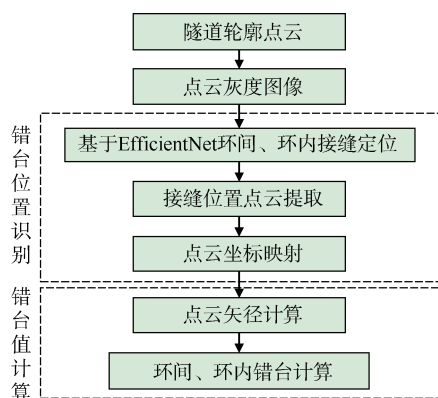


图 3 盾构管片错台量计算流程

Figure 3 Calculation procedure for shield tunnel segment misalignment

1) 接缝定位。利用预训练的 EfficientNet 深度卷积神经网络模型对点云展布图进行智能识别,精准定位环间与环内接缝区域,并输出其对应的二维边界框坐标数值。

2) 点云分割。基于扫描设备局部坐标,通过三维空间投影与角度反算,将二维图像中的接缝点云位置映射至隧道原始三维点云空间,以精确分割提取出包含环间与环内接缝的局部区域点云子集。

3) 错台量计算。针对提取的每条接缝,分别计算其两侧点云子集中各点到盾构隧道拟合椭圆圆心的欧氏距离(即矢径),并求取其平均值,其两侧平均矢径差值绝对值为该接缝处的管片错台量。

2.1 管片环间、环内接缝定位

EfficientNet 的核心创新在于复合缩放方法,其基础模块结合 MBConv 和 SE 注意力机制,通过固定比例同时优化网络深度、宽度和分辨率,可显著降低模型复杂度和计算成本,同时保持高精度。

该模型适用于隧道管片环间、环内接缝定位:① 其注意力机制能有效聚焦关键特征,适应暗环境下的亮度不均和噪声干扰;② 复合优化特性使其能在处理大量点云图像时,兼顾精度与效率。

将点云灰度图像 I_0 输入 EfficientNet 深度识别网络,以识别管片环间、环内接缝的图像特征,并输出相应的图像位置坐标。如图 4 所示,基于 7 层 MBConv 的 EfficientNet 网络高效提取隧道灰度图像中的环间、环内接缝特征。模型头部采用分类-回归双分支设计:

$$P_c = \frac{\exp(w_c^T f_g + b_c)}{\sum_{a=1}^2 \exp(w_a^T f_g + b_a)} \quad C \in \begin{cases} 0: \text{环间接缝} \\ 1: \text{环内接缝} \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_c 为接缝 c 的预测概率; w 为权重向量; f_g 为全局平均池化后的特征向量; b 为偏置向量; C 为接缝类别; a 为类别索引。

回归分支输出经 Sigmoid 归一化的环间、环内接缝边界框坐标:

$$\begin{cases} x_{\min}^b = \delta(\omega_{x_{\min}}^T f_g + b_{x_{\min}}) \\ y_{\min}^b = \delta(\omega_{y_{\min}}^T f_g + b_{y_{\min}}) \\ x_{\max}^b = \delta(\omega_{x_{\max}}^T f_g + b_{x_{\max}}) \\ y_{\max}^b = \delta(\omega_{y_{\max}}^T f_g + b_{y_{\max}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $x_{\min}^b, y_{\min}^b, x_{\max}^b, y_{\max}^b$ 为归一化的边界角点坐标; δ 为 Sigmoid 激活函数; ω 为回归权重向量; b 为偏置向量。

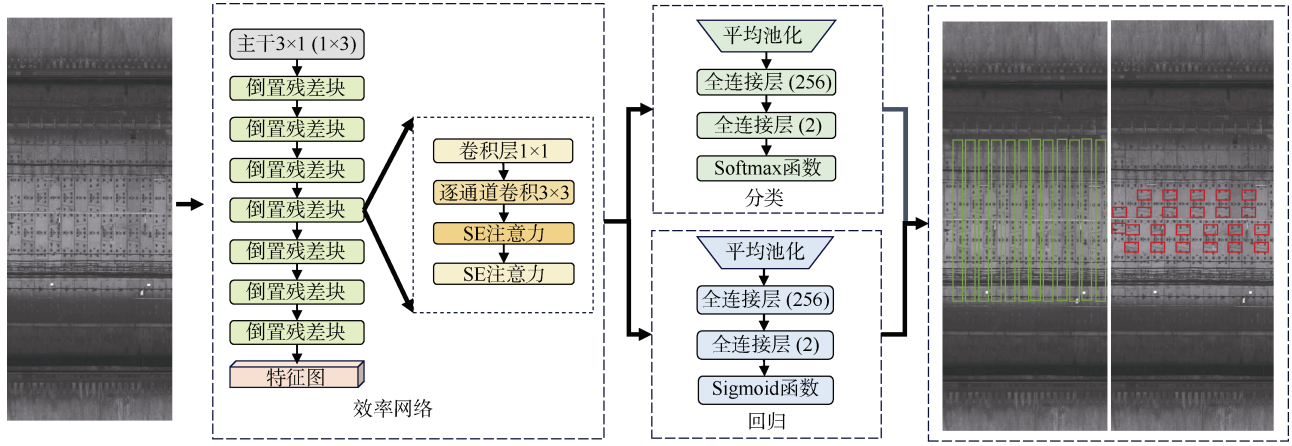


图 4 基于效率网络的管片环间、环内接缝定位模型

Figure 4 EfficientNet-based positioning model for inter-ring and intra-ring joint detection of shield tunnel segments

模型总体损失函数 L_{total} 为分类交叉熵损失与回归平滑损失的加权和:

$$L_{\text{total}} = \lambda_{\text{cls}} \sum y_c \lg P_c + \lambda_{\text{reg}} \sum_{j \in \{x, y, w, h\}} \text{Smooth}_{L1}(t_j - \hat{t}_j) \quad (3)$$

式中, λ_{cls} 为分类损失系数; λ_{reg} 为回归损失系数; y_c 为环间接缝或环内接缝真值概率; t_j 为真实偏移量; $\hat{t}_j$ 为预测框偏移量; Smooth 为边框回归的损失函数。

方法融合 EfficientNet 的高效特征提取能力, 针对环间、环内接缝的方向性, 分别采用 1×3 和 3×1 卷积核捕捉纹理特征, 实现环间、环内接缝的像素级定位。

2.2 环间、环内接缝点云位置反算

归一化的边界框坐标 $x_{\min}^b, y_{\min}^b, x_{\max}^b, y_{\max}^b$ 乘以灰度图像尺寸 (W, H), 转换为图像像素坐标:

$$\begin{cases} x_{\min}^I = x_{\min}^b W \\ y_{\min}^I = y_{\min}^b H \\ x_{\max}^I = x_{\max}^b W \\ y_{\max}^I = y_{\max}^b H \end{cases} \quad (4)$$

式中, $x_{\min}^I, y_{\min}^I, x_{\max}^I, y_{\max}^I$ 为识别边界框在图像上的坐标。

环间接缝呈竖直分布特征, 其精确位置通过边界框左右边界的平均值确定。环内接缝呈水平或斜向分布, 其位置由边界框的 x 、 y 坐标范围共同确定, 其中水平分布可由边界框上下边界的平均值确定, 斜向分布则为边界框的角点位置。由于环内接缝必然与环间接缝相交, 通过计算环内接缝的延伸线与环间接缝竖直位置线的交点, 可精确获得每个管片接缝的交点坐标, 该交点即为后续环内错台计算的关键特征点。

灰度图像由一定范围内扫描环数据分割排列得出, 利用图像列索引可反算出对应的原始扫描环索引。

在确定的扫描环内, 依据点云角度信息与灰度图像位置的映射关系, 计算该环内点云索引:

$$\begin{cases} \theta_{\text{img}} = 2\pi \frac{y^I}{H} \\ ID_{\text{pt}} = \min \left\{ \left| \theta_{\text{img}} - \varphi^p \right| \right\} \quad j \in [1, H] \end{cases} \quad (5)$$

式中, θ_{img} 为图像点角度; y^I 为像素点 y 轴坐标; H 为灰度图像高度; ID_{pt} 为环内点索引; φ^p 为 p 点相对于坐标轴原点的角度。

在图像识别的基础上, 依据盾构施工拼装方式(如通缝拼装、错缝拼装等), 确定隧道各管片块拼装角度(点位); 通过自动识别的关键块位置, 可确定其余管片块间的接缝位置区域, 在这小范围区域内, 依据图像特征算法识别, 可补充因遮挡影响导致的漏检位置, 并去除不符合预设角度的误检结果, 从而获得完整可靠的环内接缝分布, 如图 5 所示。

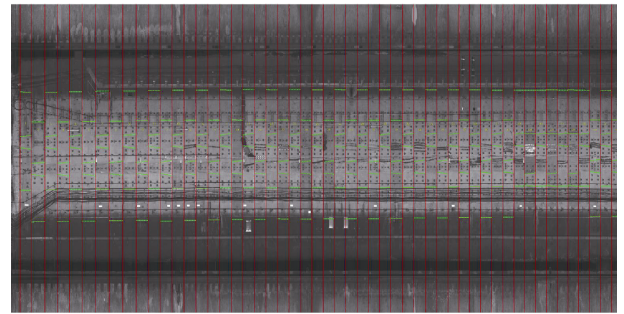


图 5 管片环间、环内接缝位置识别结果

Figure 5 Inter-ring and intra-ring joint detection results for segments

通过上述坐标转换和索引映射,最终获得环间、环内接缝在原始点云数据中的环号及精确位置点索引值,供后续错台计算使用。

2.3 隧道点云噪声剔除

错台计算需确定隧道中心点位置,该中心通过过去噪后的隧道扫描点云进行椭圆拟合获得。

隧道内线缆、照明、平台、人员等因素使扫描不可避免地产生与管片结构无关的噪点(见图6)。噪点会直接影响断面轮廓拟合的效率和精度。

为实现隧道点云的高效处理,提出去噪方法的自动化流程:算法通过点云数据的空间分布特征自动识别隧道中心点近似位置,随后迭代优化并完成噪点剔除,无需人工干预即可实现隧道断面的批量处理。

如图7所示,扫描点到隧道中心点的径向距离分

布模式与椭圆相似。基于此特性,可通过检测该距离值的统计离群值(红色框选范围),实现噪声点的高效精准剔除。

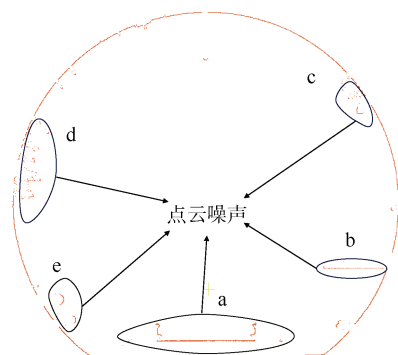


图6 隧道激光扫描噪点

Figure 6 Tunnel laser scanning noise points

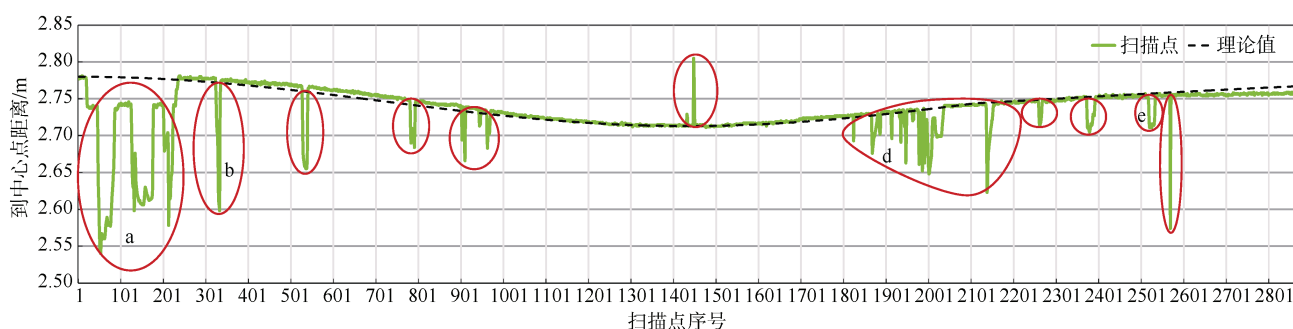


图7 激光扫描点到隧道中心点距离

Figure 7 Distance from laser scanning points to the tunnel center

隧道轮廓点云去噪主要结合中心距离判别与低通滤波原理,利用隧道横截面近似椭圆形的特性,对隧道横断面进行椭圆拟合获取隧道近似中心点(拟合椭圆圆心),通过计算点到隧道中心点距离识别并剔除异常点。计算每个激光扫描点 $p(x, y)$ 至盾构隧道拟合椭圆圆心的欧氏距离,并进行距离判断,见式(6)。

$$\begin{cases} R \in (Rk(1-h), Rk(1+h)), & \text{有效点} \\ R \notin (Rk(1-h), Rk(1+h)), & \text{噪点} \end{cases} \quad (6)$$

式中, R 为隧道半径; k 为缩放系数; h 为容差系数。

依据距离阈值噪点剔除后,进一步引入低通滤波处理。对于距离序列 $\{D_i\}$,应用一阶低通滤波计算平滑后的距离:

$$F_i = \alpha D_i + (1-\alpha) F_{i-1} \quad (7)$$

式中, α 为滤波系数,用于调节当前距离值 D_i 与估计距离值 F_{i-1} 的权重。

设定滤波偏差阈值 T , 若 $\left| D_i - \frac{F_{i-1} + D_{i+1}}{2} \right| > T$ 或

D_i 超出预期半径范围,则认为点云为噪声点。

对上述过程进行多次迭代,直至椭圆圆心位置变化小于收敛阈值(如 0.1)或达到最大迭代次数(一般 ≤ 4 次)时终止,完成噪点剔除。

2.4 环间错台计算

如图8、图9所示,基于区间矢径聚类的环间错台量计算过程如下。

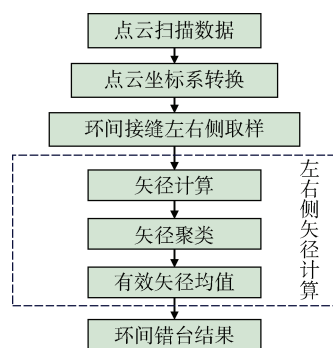


图8 环间错台计算流程

Figure 8 Calculation procedure for inter-ring misalignment

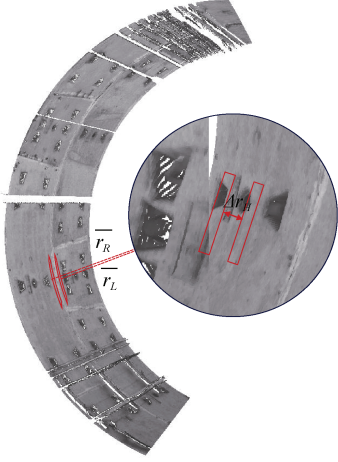


图 9 环向错台计算示意

Figure 9 Schematic diagram of circumferential misalignment calculation

基于拟合椭圆中心建立坐标系,按设计角度将环间接缝两侧管片点云划分为扇形区间,并计算各区间点云至中心轴线的矢径。

对各区间矢径进行聚类分析,剔除异常值后取聚类中心均值作为该角度位置的代表矢径。

计算环间接缝两侧对应角度位置的矢径差值,其绝对值即为该位置的环向错台量。

针对待分析的环间接缝(编号 s),在其左右两侧各截取 n 个相邻扫描环数据(一般可取值 20),与当前环共同组成 $2n+1$ 环的待处理数据集,扫描环截取规律为 $s-n \leq S \leq s+n$ 。

将扫描环按照 $S_L \in [s-n, s]$, $S_R \in [s, s+n]$ 划分为左右扫描区域,如图 10 所示,根据左右扫描区域计算其平均矢径,具体计算步骤如下。

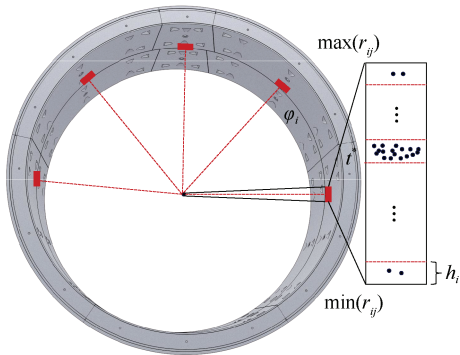


图 10 平均矢径计算

Figure 10 Calculation of average radial distance

1) 以椭圆拟合中心为基准,将管片环顶部 180° 区域等分为 m 个区间(通常 $m=4$),每个角范围的跨度

为 $\Delta\theta$ 。

在每个角度范围内选取邻域区间 φ_i ,作为错台计算区域,具体的邻域区间选值为:

$$\varphi_i = i\Delta\theta \pm \delta \quad (8)$$

式中, $i \in [1, m]$; δ 为周围邻域范围,一般设为 5° 。

2) 在每个区间内,通过公式(9)逐点计算矢径值:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_{ij} - x_{o1})^2 + (y_{ij} - y_{o1})^2} \quad (9)$$

式中, (x_{o1}, y_{o1}) 为椭圆拟合圆心点 o_1 坐标; (x_{ij}, y_{ij}) 为 i 区间轮廓点 j 的坐标。

3) 将区间 φ_i 内的矢径范围划分为 k_i 个等宽箱体(箱宽 h_i):

$$h_i = \frac{r_i^{\max} - r_i^{\min}}{k_i}, k_i = \lceil \sqrt{m_i} \rceil \quad (10)$$

式中, $r_i^{\max}$ 、 $r_i^{\min}$ 为区间 φ_i 的最大和最小矢径值; m_i 为区间 φ_i 内点的个数; k_i 按照经验公式为 $\sqrt{m_i}$ 取整。

统计每个箱 B_{it} 的频率值 f_{it} :

$$f_{it} = \sum_{j=1}^{m_i} 1_{\{r_{ij} \in [r_i^{\min} + (t-1)h_i, r_i^{\min} + th_i]\}}, t = 1 \cdots T \quad (11)$$

式中, T 为划分箱体个数; 1 为指示函数,当 r_{ij} 属于箱 B_{it} 时取 1, 否则为 0。

4) 根据统计的箱体频率值,选择的箱体频率值最大的区域作为有效数据域 ∂_i ,提取有效数据域内的所有矢径值,计算算术平均值:

$$\bar{r}_i = \frac{1}{f_{it^*}} \sum_{j \in \partial_i} r_{ij} \quad (12)$$

$$\partial_i = [r_i^{\min} + (t^* - 1)h_i, r_i^{\min} + t^*h_i] \quad (13)$$

式中, t^* 为箱体频率值最大的箱体号。

根据上述步骤得出左右侧区域的平均矢径二者的差值即为管片环向错台:

$$\Delta r_H = \bar{r}_L - \bar{r}_R \quad (14)$$

式中, Δr_H 为环向错台值, $\bar{r}_L$ 和 $\bar{r}_R$ 分别为环间接缝左右侧区域的平均矢径。

2.5 环内错台计算

基于高斯加权矢径的环内错台计算流程如下。

1) 计算各分区点云相对于管片中心轴线的矢径值,并应用高斯加权求取均值(同时抑制局部噪点),得到各分区代表性矢径。

2) 环内接缝两侧代表性矢径的差值即为环内错台量。

选取管片环内所有的扫描环数据, 环内错台通过计算环内接缝邻域的点云矢径高度差得出。

如图 11 所示, 以单个扫描环为例, 扫描环经过点云噪点剔除并根据最小二乘拟合为椭圆, 以椭圆拟合中心 O_1 为基准, 在原始点云环内接缝位置 θ_i 上下侧 ε 角度范围内选取环内错台计算区域 γ_i , 计算如式(15)~(17)

$$D_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} \quad (15)$$

$$\theta_i = \arctan\left(\frac{D_i \sin \varphi_i - \Delta y}{D_i \cos \varphi_i + \Delta x}\right) \quad (16)$$

$$\gamma_i = \theta_i \pm \varepsilon \quad (17)$$

式中, (x_i, y_i) 为点 i 的坐标; D_i 为点 i 到扫描仪中心点的距离; φ_i 为 i 点与扫描仪坐标系 X 轴的夹角; Δx 、 Δy 为设备坐标系 O_2 与椭圆拟合中心 O_1 在 x 轴和 y 轴方向的距离; θ_i 为 i 点与椭圆坐标系 X 轴的夹角。

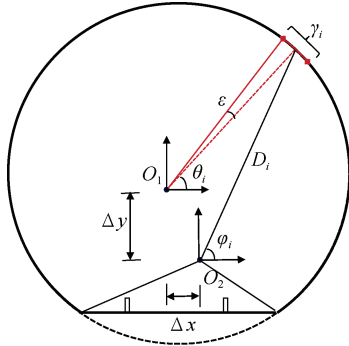


图 11 环内错台计算区域

Figure 11 Calculation area for intra-ring misalignment

在环内错台计算区域 γ_i 分别选取点云数据集, 记为上侧点云集合 P_U 和下侧点云集合 P_D 。对上下两侧点云分别计算矢径值 r_{ij} (即点到拟合椭圆圆心的径向距离), 生成矢径集合 R_U 、 R_D 。

对上下两侧矢径集合 R_U 和 R_D 分别进行高斯滤波, 消除局部噪点, 选择一维高斯核函数 $G(k)$, 计算如式(18)

$$G(k) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{k^2}{2\delta^2}} \quad (18)$$

式中, δ 为标准差, k 为邻域窗口半径。

对矢径集合 R_U 、 R_D 中每个矢径 r_{ij} , 计算其邻域窗口内的加权平均值, 见式(9)

$$r'_{ij} = \frac{\sum_{m=-k}^k G(m) r_{ij+m}}{\sum_{m=-k}^k G(m)} \quad (19)$$

式中, r'_{ij} 为高斯加权平均后的矢径值; $G(m)$ 为 j 点邻域 m 的高斯权重; r_{ij+m} 为 j 点邻域 m 的原始矢径。

输出平滑后的矢径集合 R'_U 和 R'_D , 对滤波后的上下矢径集合分别求均值 $\bar{r}_U$ 、 $\bar{r}_D$ 。上下平均矢径之差即为环内错台量 Δr_z , 见式(20)

$$\Delta r_z = \bar{r}_U - \bar{r}_D \quad (20)$$

3 工程验证

3.1 处理软件

集成上述核心算法, 开发配套的数据处理软件。软件主要功能为: 点云数据解析、点云展布图生成、噪点剔除、管片拼接缝识别、错台量计算、收敛变形计算、计算报告输出等。

3.2 数据采集

如图 12 所示, 利用隧道结构检测车(TDV-S)对杭州市地铁 1 号线盾构区间隧道进行三维激光移动扫描, 作业时速 20 km, 共采集隧道管片环 1 272 环, 该隧道内直径 5.5 m, 管片环宽 1.2 m, 拼装方式为错缝拼装。同时, 现场使用游标卡尺人工测量环间、环内错台各 10 组数据。



图 12 现场作业照片

Figure 12 Field operation photos

3.3 数据分析

利用数据处理软件对点云数据进行处理, 可获得各管片错台量, 并与人工测量结果进行对比, 见表 1, 表 2。

如图 13、图 14 所示, 检测车与人工测量的环间错台偏差绝对值最大 1.6 mm、最小为 0.1 mm, 环内错台偏差绝对值最大 0.9 mm、最小为 0.0 mm, 二者总体结果接近。

检测车与人工测量环间、环内错台偏差区间见图 15。

当前, 《城市轨道交通盾构隧道结构病害检测技术

规程》(T/CECS 788—2020)规定采用三维激光扫描仪动态扫描检测时错台测量精度不宜低于 $\pm 2\text{ mm}$ 。本案例中,检测车测的错台量精度小于 2 mm ,满足规范测量精度要求。

表 1 环间错台量偏差
Table 1 Inter-ring misalignment measurement deviation mm

序号	错台量		偏差
	TDV-SD	人工测量	
1.	1.4	1.1	0.3
2.	2.4	3.3	-0.9
3.	5.0	4.1	0.9
4.	5.6	5.7	-0.1
5.	4.7	5.2	-0.5
6.	2.0	1.7	0.3
7.	6.5	5.2	1.3
8.	2.7	4.2	-1.5
9.	2.5	0.9	1.6
10.	-3.0	-3.1	0.1

表 2 环内错台量偏差
Table 2 Intra-ring misalignment measurement deviation mm

序号	错台量		偏差
	TDV-S	人工测量	
1.	0.5	1.4	-0.9
2.	1.2	1.3	-0.1
3.	0.7	1.5	-0.8
4.	0.6	0.2	0.4
5.	0.2	-0.2	0.4
6.	1.0	0.2	0.8
7.	0.7	0.1	0.6
8.	0.2	0.2	0.0
9.	1.4	2.2	-0.8
10.	1.5	2.2	-0.7

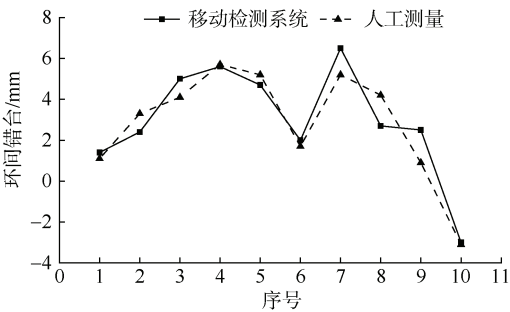


图 13 环间错台对比结果
Figure 13 Inter-ring misalignment comparison results

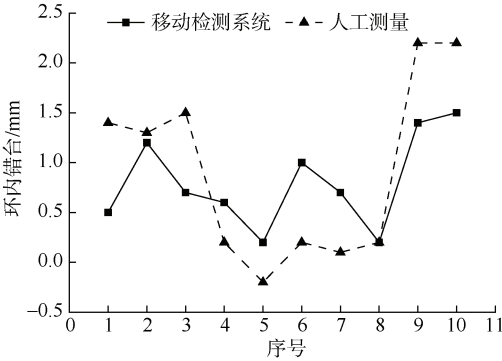


图 14 环内错台对比结果
Figure 14 Intra-ring misalignment comparison results

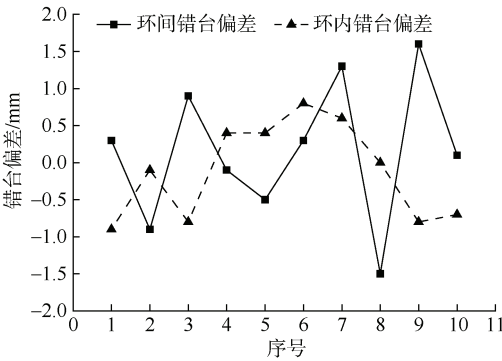


图 15 环间、环内错台偏差
Figure 15 Inter-ring and Intra-ring misalignment deviation

4 结论与展望

围绕盾构隧道管片错台快速移动精准测量需求,开展算法设计、系统研制、工程试点应用等研究工作。主要研究结论如下。

1) 针对管片错台微小、接缝处难定位的问题,利用轻量级网络 EfficientNet 构建融合点云灰度化与深度学习的盾构隧道管片错台量自动测量算法,该算法将点云转化为高对比度灰度图并增强边缘,可高效识别管片环间、环内接缝位置。

2) 基于管片环间、环内接缝识别结果,精准提取接缝两侧三维点云,通过计算其至隧道管片结构拟合椭圆圆心的平均矢径差异,实现盾构管片错台非接触、高精度测量。

3) 工程试点应用表明,20 km/h 速度下,检测车与人工测量结果偏差最大为 1.6 mm,在保证精度的同时显著提升检测效率,对隧道错台普查具有较好的工程应用价值。

检测车运行时,速度与扫描仪分辨率的耦合变化会显著改变点云特性(如密度、完整性),进而影响错

台识别的精度,未来需深入研究其影响规律并探索优化方法。

参考文献

- [1] 包小华,李浚弘,陈湘生,等.水下盾构隧道管片拼装质量控制方法研究现状与展望[J].隧道建设(中英文),2024,44(4):643-662.
Bao Xiaohua, Li Junhong, Chen Xiangsheng, et al. Research status and prospects of quality control methods for segment assembly in underwater shield tunnels[J]. Tunnel construction, 2024, 44(4): 643-662.
- [2] Sharghi M, Afshin H, Dias D, et al. 3D numerical study of the joint dislocation and spacing impacts on the damage of tunnel segmental linings[J]. Structures, 2023, 56: 104878.
- [3] Cui Hao, Mao Qingzhou, Li Jian, et al. Shield tunnel dislocation detection method based on semantic segmentation and bolt hole positioning of MLS point cloud[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2024, 62: 5702815.
- [4] Zhang Yuxian, Ren Xuhua, Zhang Jixun, et al. A method for deformation detection and reconstruction of shield tunnel based on point cloud[J]. Journal of construction engineering and management, 2024, 150(3): 04024006.
- [5] Yu Anbin, Mei Wensheng. Deep-learning-based longitudinal joint opening detection method for metro shield tunnel[J]. Tunnelling and underground space technology, 2024, 154: 106108.
- [6] 关振长,陈东,徐铭泽,等.基于双目视觉的管片错台精确测量方法[J].清华大学学报(自然科学版),2025,65(7):1359-1367.
Guan Zhenchang, Chen Dong, Xu Mingze, et al. Accurate measurement method for segment dislocation using binocular vision[J]. Journal of Tsinghua University (Science And Technology), 2025, 65(7): 1359-1367.
- [7] 鲍艳, KIM IL BOM, 李文海, 等. 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[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 143-149.
Bao Yan, Bom K, Li Wenhai, et al. Detection method for metro shield tunnel inner-ring segment staggering and joint opening based on point cloud[J]. Urban mass transit, 2023, 26(9): 143-149.
- [8] 周斌, 奉建军, 温晓凯, 等. 基于点云数据的盾构隧道错台量自动检测技术研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(1): 83-91.
Zhou Bin, Feng Jianjun, Wen Xiaokai, et al. Research on automatic detection technology for shield tunnel segment misalignment based on point cloud data[J]. Modern tunnelling technology, 2025, 62(1): 83-91.
- [9] 谢嘉伟, 魏志恒, 姚霄汉, 等. 基于激光点云技术的地铁盾构隧道错台智能检测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(10): 122-128.
- [10] 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): 160-163.
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): 160-163.
- [11] 刘新根, 陈莹莹, 李明东. 基于斜射式线结构光的隧道错台快速检测技术[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(10): 108-115.
Liu Xingen, Chen Yingying, Li Mingdong. Fast detection technology for tunnel slab staggering based on oblique line structured light[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(10): 108-115.
- [12] Yu Anbin, Mei Wensheng, Han Mulin. Deep learning based method of longitudinal dislocation detection for metro shield tunnel segment[J]. Tunnelling and underground space technology, 2021, 113: 103949.
- [13] Du Liming, Zhong Ruofei, Sun Haili, et al. Dislocation detection of shield tunnel based on dense cross-sectional point clouds[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2022, 23(11): 22227-22243.
- [14] 莫伟樑, 杨雨冰, 林越翔, 等. 基于OFDR技术的盾构隧道管片错台变形测量与计算方法[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(5): 179-187.
Mo Weiliang, Yang Yubing, Lin Yuexiang, et al. Measurement and calculation method for shield tunnel segment dislocation deformation based on OFDR technology[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(5): 179-187.
- [15] 周鸣亮, 程文, 张东明, 等. 运营期盾构隧道结构病害的自动化检测与三维可视化[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(5): 1265-1279.
Zhou Mingliang, Cheng Wen, Zhang Dongming, et al. Automated 3D inspection and visualization of structural defects in shield tunnel linings[J]. Journal of basic science and engineering, 2021, 29(5): 1265-1279.
- [16] 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]. 都市快轨交通, 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.

(编辑:傅依萱)