

# 基于轨道移动式激光扫描多期点云的 隧道断面变形提取方法

王永锋<sup>1</sup>, 郑德华<sup>2</sup>

(1. 杭州市勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

(2. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

[摘要] 针对轨道移动式激光扫描技术监测地铁隧道变形的点云数据特征和隧道断面变形信息提取与分析的问题, 本文提出了一种基于轨道移动式激光扫描点云的隧道断面变形提取方法和处理流程. 首先采用 RANSAC 圆柱检测法提取地铁结构特征部位点云, 利用提取的隧道结构点云进行点云的粗配准. 然后设计了一种基于权重的 ICP 算法的精配准方法, 精配准后的隧道点云通过切片点云降维处理得到二维断面数据, 利用断面的  $k$  近邻点拟合曲线提取隧道断面变形值, 并采用弧线投影的方法对断面变形表达. 实验验证表明, 提出的基于曲线拟合隧道断面变形分析的方法和过程, 能够准确高效地提取到 0.7 mm 以上的地铁隧道断面变形信息.

[关键词] 轨道移动式激光扫描, 隧道点云, 基于权重的精配准, 断面变形提取, 曲线拟合

[中图分类号] P258 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2023)02-0025-09

## Extraction Method of Tunnel-section Deformation Based on Orbital Mobile Laser Scanning Multi-phase Point Cloud

Wang Yongfeng<sup>1</sup>, Zheng Dehua<sup>2</sup>

(1. Hangzhou Survey Design Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310012, China)

(2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of point cloud data characteristics for monitoring subway tunnel deformation with orbital mobile laser scanning technology and the extraction and analysis of tunnel section deformation information, a deformation extraction method and processing flow of tunnel section based on orbital mobile laser scanning point cloud are proposed in this paper. Firstly, the RANSAC cylinder detection method is used to extract the point cloud of the characteristic parts of the subway structure, and the extracted tunnel structure point cloud is used for rough registration of the point cloud. Afterwards, a fine registration method based on the weight-based ICP algorithm is designed, the finely registered tunnel point cloud is processed by slice point cloud dimension reduction to obtain two-dimensional cross-section data, the deformation value of the tunnel section is extracted by fitting the curve of the  $k$ -nearest neighbor points of the section, and the section deformation is expressed by the method of arc projection. The experimental verification shows that the proposed method and process of tunnel section deformation analysis based on curve fitting can accurately and efficiently extract the deformation information more than 0.7 mm of subway tunnel section.

**Key words:** orbital mobile laser scanning, tunnel point cloud, weight-based fine registration, section deformation extraction, curve fitting

隧道横断面测量是地铁隧道等地下工程监测不可缺少的关键技术, 隧道竣工后通过定期测量隧道横断面以及分析隧道变形情况以确保隧道安全. 我国隧道种类繁多, 工程地质复杂, 施工环境恶劣, 对隧道勘测的要求也很高<sup>[1]</sup>. 传统的隧道断面变形监测方法主要采用测量机器人、断面仪和收敛计<sup>[2]</sup>等获取隧道多期数据. 虽然该类单点数据精度较高, 但获取的表面信息离散且只能监测指定部位的断面信息, 特别

收稿日期: 2022-09-25.

基金项目: 钱投科创项目 (QT202208A001)、江苏省自然科学基金项目 (BK20201257).

通讯作者: 郑德华, 博士, 副教授, 研究方向: 三维激光扫描数据处理方面的研究. E-mail: zheng\_dehua@163.com

是面对大型细长隧道,测量精度易受外界影响,存在很大的局限性<sup>[3]</sup>. 近年来,城市地铁隧道引入轨道移动式激光扫描技术监测隧道变形来弥补传统方法的不足,该技术能够获取到反映隧道表面微小变化的高精度、全方位的密集点云数据,但是点云难以直接比较或表示隧道变形量. 其中,点云配准和变形分析是提取地铁隧道变形量的关键步骤,多期点云的配准精度直接影响获取的地铁隧道变形精度和可靠性. 由于激光扫描技术不能直接测量同名点,无法直接提取地铁隧道变形量,因此,寻求新的隧道点云的配准方法与变形分析成为当前亟待解决的问题<sup>[4]</sup>. 国内外研究学者在隧道点云配准和变形分析方面做了大量的研究工作. Wang 等<sup>[5]</sup>提出了一种基于小波分析的网格处理点云滤波方法,并证明了将三维激光扫描仪获取的点云应用于隧道变形监测的可行性. Han 等<sup>[6]</sup>利用最小距离投影法(MDP)直接估计三维离散点云,提出采用协方差传播方法对所得到的数据提供明确的质量指标解决方案. 随着三维激光扫描技术应用的深入和相关算法的快速发展,根据隧道点云数据提取横断面相关信息成为变形分析的研究热点. Zhua 等<sup>[7]</sup>通过双向投影法提取隧道三维中轴线,并根据中轴线批量提取隧道横断面,采用椭圆圆柱模型拟合横断面进行隧道变形分析. 李志远等<sup>[8]</sup>提出了一种三次 B 样条曲线的隧道断面拟合分析方法,实现了根据拟合曲线提取断面特定点和断面形变分析. 徐飞等<sup>[9]</sup>采用滑动窗口稳健拟合方法提取水平中线,以此为基准提取隧道断面并拟合中轴点,拟合精度保持在 2 mm 内. 实验结果表明隧道各部位的径向位移量受距离和弯曲弧度影响较小,降噪后的标准差为 17 mm,可较好地反映隧道变形情况. 林景峰等<sup>[10]</sup>通过对截取的横断面点云进行迭代空间圆拟合获取隧道三维中轴线,以此为基准与半径设计值对比,计算横断面点云的径向插值和分析隧道变形情况,降噪后的点云偏差为 5 mm,中误差为 1 cm. 潘东峰等<sup>[11]</sup>提出了一种基于最小二乘法曲面拟合的隧道断面提取及变形监测分析方法,根据隧道中轴线提取隧道连续断面,通过截取断面的拟合曲面,获取曲面水平及垂直方向的变化量. 王龙飞等<sup>[12]</sup>采用随机采样一致算法对基于高程差异获的隧道拱顶轴线,以此为基准提取隧道断面,根据两期点云计算隧道变形,扫描点精度可达到 4 mm. 部分学者也提出了对隧道点云先建模后变形的分析思路,如 Xie 等<sup>[13]</sup>采用圆柱拟合方法提取隧道中轴线,联合椭圆拟合进行点云建模,以此分析隧道变形情况,大幅提高算法处理效率.

综上所述,设站式三维激光扫描技术在变形提取、拟合隧道横断面与隧道的径向位移分析研究方面较为成熟,而针对轨道移动式激光扫描的地铁隧道点云呈现螺旋形状、点云沿螺旋线方向与螺旋线间距方向的点间距差异显著、各期扫描点云之间存在明显的错位等特点,以及引起的点云配准不准确、隧道拟合模型难以提取客观变形、变形处理过程不严密等问题,需要结合轨道移动式激光扫描点云基本特征,研究多期点云的配准和地铁隧道点云的特征提取方法,快速准确的提取出地铁隧道的变形信息,用以提高地铁隧道的安全性.

# 1 隧道变形提取过程

## 1.1 基本思路

考虑到地铁隧道形状和表面结构特征的影响以及沿隧道轴线方向约束能力弱的特点,首先引入 RANSAC 的圆柱检测方法提取隧道点云中轨道、电力架、注浆口等局外特征点,并根据提取的注浆口部位点云进行隧道点云的粗配准. 为了避免地铁隧道产生的变形对点云重心匹配的影响,采用基于权重的 ICP 算法完成隧道内点的精配准;针对地铁隧道点云沿螺旋线方向与螺旋线间距方向的点间距差异显著、各期扫描点云之间存在明显错位的问题,根据扫描隧道的点云分辨率,设计不同厚度阈值批量提取横断面,并通过分析切片厚度对横断面变形分析精度的影响优化提取点云切片厚度;最后通过在各组同名横断面中选取多处点位,通过横断面点云拟合进行隧道变形提取与分析. 根据上述设计的点云处理方法和变形提取过程,得到隧道点云的断面变形分析流程,如图 1 所示.

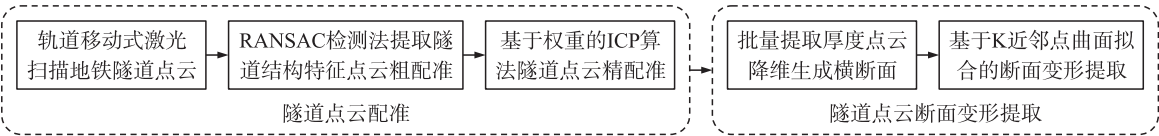


图 1 隧道横断面变形分析流程

Fig. 1 Deformation analysis process of tunnel cross section

## 1.2 地铁隧道点云配准方法

### 1.2.1 基于注浆口点云的粗配准方法

针对隧道内点特征单一且直接精配准易陷入局部最优的问题,提出一种基于隧道注浆口点云的粗配准方法为隧道点云精配准提供良好的初始方位.该方法首先基于 RANSAC 算法对隧道点云进行圆柱检测将隧道点云整体分为局内点与局外点,然后裁剪剔除轨道、电力架等噪点得到注浆口和隧道环壁拼接处点云,见图 2.

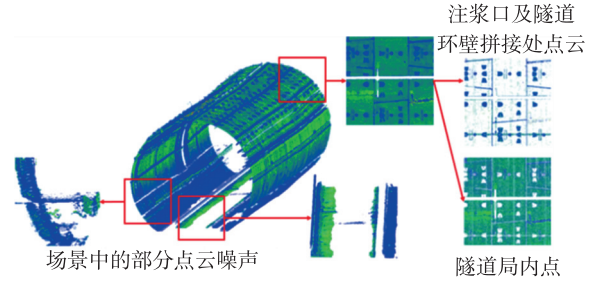


图 2 隧道局部点云

Fig. 2 Tunnel local point cloud

### 1.2.2 基于权重的 ICP 精配准方法

隧道点云精确配准以 Besl 等<sup>[14]</sup>提出的迭代最近点算法(iterative closest point, ICP)为基本方法.该方法没有利用点云权重信息,导致当隧道发生的变形差异作为扫描误差处理无法提取隧道变形量且可能无法得到全局最优结果.利用迭代计算的配准残差建立点云配准的权函数,建立基于权重的 ICP 精确配准模型.通过对配准残差分布统计,按下式确定配准的定权函数:

$$P(v)=f(v)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{\frac{-v^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

上式所得权重值  $P(v)$  满足范围为 0~1 的定权原则,且残差绝对值与权重值呈反相关.以采用 ICP 算法在配准迭代过程中所得对应点对  $(p_i, q_i)$  为例,配准后残差  $v_i$  为  $(v_{xi}, v_{yi}, v_{zi})$ ,由式(1)可分别计算得到点对残差在 X、Y、Z 轴方向上的权重值分量:

$$\begin{cases} P_{xi}=P(v_{xi})=e^{\frac{-v_{xi}^2}{2\sigma_x^2}} \\ P_{yi}=P(v_{yi})=e^{\frac{-v_{yi}^2}{2\sigma_y^2}} \\ P_{zi}=P(v_{zi})=e^{\frac{-v_{zi}^2}{2\sigma_z^2}} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为 X、Y、Z 轴 3 个方向的中误差,  $\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$  即为对应方向的残差方差,根据残差值  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  计算出:

$$\begin{cases} \sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{xi} - \bar{v}_x)^2 \\ \sigma_y^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{yi} - \bar{v}_y)^2 \\ \sigma_z^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_{zi} - \bar{v}_z)^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $n$  为配准点对的残差个数,  $\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z$  分别为 X、Y、Z 轴 3 个方向的残差均值,由于:

$$v_i = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2} \quad (4)$$

可由下式计算得到各点对的残差权重值  $P_{xi}$ :

$$P_{xi} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} (\sigma_x e^{\frac{-v_{xi}^2}{2\sigma_x^2}} + \sigma_y e^{\frac{-v_{yi}^2}{2\sigma_y^2}} + \sigma_z e^{\frac{-v_{zi}^2}{2\sigma_z^2}}) \quad (5)$$

式(5)即为基于配准残差分布概率密度函数的配准点对权重值计算公式.由此可得,基于权重的 ICP 算法详细处理步骤如下:

(1) 给定 2 组初配准后,具备较优初始方位的待精配准点云  $P$  和  $Q$ ;

(2) 对于点云  $P$  中各点,在点云  $Q$  中循环查找其最近点,构成各组对应点对,并基于最小二乘原理,计算初始平移参数  $t$ 、初始旋转参数  $R$  以及初始点对配准残差  $V(V_x, V_y, V_z)$ ,使得  $\sum_{i=1}^n q_i - R p_i - t$  趋于最小值;

(3) 根据对应点对的残差值  $V(V_x, V_y, V_z)$  和权重值公式, 将权重值  $P_i$  赋予各点对  $i$ ;

(4) 基于权重值  $P_i$  对各组点对重新迭代搜索最近点, 计算新的配准转换参数  $R, t$ , 以及点对配准残差  $V$ , 使  $\sum_{i=1}^n P_i(Rp_i + t - q_i)$  趋于最小值;

(5) 重复步骤(3)~(4), 利用连续 2 次加权迭代得到的配准残差  $V_k, V_{k+1}$  判定加权迭代是否结束, 直至差值满足预设条件  $|V_k - V_{k+1}| < \tau$ , 此轮加权迭代停止;

(6) 重复步骤(2)~(5), 利用连续 2 次 ICP 算法所得残差平方和  $e_k, e_{k+1}$  判定此轮 ICP 迭代是否结束, 直至差值满足预设条件  $|V_k - V_{k+1}| < \sigma$ , 算法迭代完成, 得到转换参数。

### 1.3 隧道变形提取方法

首先根据隧道点云获得隧道横断面切片点云, 然后进行横断面降维处理得到二维横断面点云。对于隧道断面一侧  $[b-\delta, b]$  范围内的任一点  $N_i(x_i, y_i, z_i)$ , 查找其在另一侧  $[b, b+\delta]$  中的最近点  $N_j(x_j, y_j, z_j)$ , 见图 3。此时横断面上对应点  $N_k$  的三维坐标  $(x_k, y_k, z_k)$

为向量  $\overrightarrow{N_i N_j}$  与空间平面  $X=b$  的交点, 见下式:

$$\begin{cases} x_k = b \\ y_k = \frac{y_i(x_j - b) - y_j(x_i - b)}{x_j - x_i} \\ z_k = \frac{z_i(x_j - b) - z_j(x_i - b)}{x_j - x_i} \end{cases} \quad (6)$$

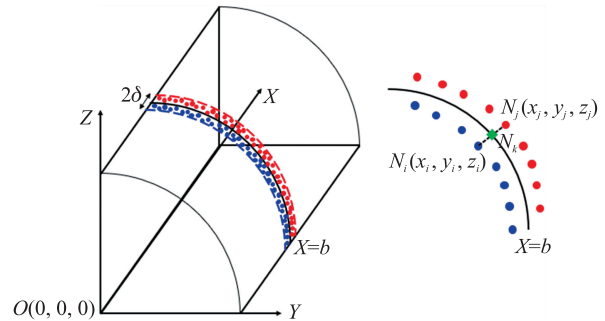


图 3 横断面降维

Fig. 3 Cross-section dimensionality reduction

采用式(6)对第一部分切片范围  $[b-\delta, b]$  内的

所有点  $N_i(x_i, y_i, z_i)$  进行计算, 即得到位于二维横断面  $X=b$  上所有的对应点  $N_k(x_k, y_k, z_k)$ 。

虽然同名横断面表示不同扫描期的相同位置同一宽度的横断面点云, 但得到的 2 期同名横断面之间并无一一对应点, 因而无法直接提取每个点的变形量。为了得到各参考断面点与变形断面点之间的变形关系, 同时顾及隧道的起伏形状, 提出采用局部区域二次曲线拟合方法分析横断面变形。依据参考点云中  $k$  邻近点拟合出的二次曲线, 以克服单点误差。基于局部区域二次曲线拟合的断面变形点检测原理见图 4。

由此, 得到断面变形检测步骤如下:

(1) 在隧道二维断面数据中选择任一点  $P(0, y_p, z_p)$ , 采用  $k$  邻近搜索, 查找  $P$  点的  $k$  邻近点:  $k'_1, \dots, k'_k$ ;

(2) 对该  $k$  邻近点采用最小二乘法拟合得到二次曲线  $\Gamma$ ;

(3) 求取点  $P$  在曲线  $\Gamma$  上的最近点  $M$ , 作为隧道二维断面中  $P$  点变形后的对应点;

(4) 重复上述步骤, 遍历隧道二维断面所有点, 得到各点变形量。

其中, 二次曲线拟合过程按下式建立二次曲线方程:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (7)$$

则曲线上一点  $M(m, am^2 + bm + c)$  处的切线斜率  $y'_M$  为  $2am + b$ , 已知曲线外任意一点  $P(p, q)$ ,  $P$  点到曲线最近点  $M$  的连线垂直于曲线  $\Gamma$  在  $M$  处的切线。直线  $PM$  斜率为:

$$k_{PM} = \frac{am^2 + bm + c - q}{m - p} \quad (8)$$

由两正交直线斜率之积为  $-1$ , 可得:

$$\frac{am^2 + bm + c - q}{m - p} (2am + b) = -1 \quad (9)$$

经整理, 得到关于  $m$  的一元三次方程:

$$2a^2m^3 + 3abm^2 + (b^2 + 2ac + 1 - 2aq)m + (bc - bq - p) = 0 \quad (10)$$

对上式方程求解其唯一实数解, 可求得变形数据二维断面点云中各点  $P_i(0, y_{p_i}, z_{p_i})$  至参考断面数据

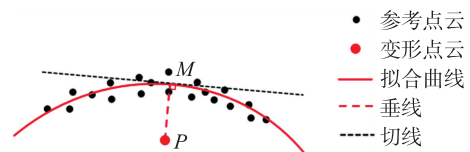


图 4 断面变形检测原理

Fig. 4 Principle of cross-section deformation monitoring



的对应变形点  $M_i(0, y_{M_i}, z_{M_i})$ , 则投影距离  $|P_i M_i|$  见下式:

$$|P_i M_i| = \sqrt{(y_{P_i} - y_{M_i})^2 + (z_{P_i} - z_{M_i})^2} \quad (11)$$

求取变形数据二维断面点云中各点至参考断面数据的对应变形点的投影距离, 可得到各个横断面部位的变形量  $d_i$ . 采用断面上相邻点位变形量差值表示的标准差  $\sigma$  表征断面上各点变形值连续变化的波动状态, 反映计算断面变形量的准确性. 断面相邻点变形量差值的标准差  $\sigma$  统计计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1} (d_{i+1} - d_i)^2}{n - 1}} \quad (12)$$

## 2 数据采集与预处理

### 2.1 采集设备与对象

实验采用 GRP IMS 5000 隧道扫描系统采集杭州市某线路段地铁隧道, 扫描系统能够分辨隧道表面宽度超过 0.3 mm 以上的裂缝, 以及对隧道进行 mm 级高精度变形监测. 该系统集成轨检小车与高速三维激光扫描仪. 作业过程中, 高速旋转的激光扫描仪以螺旋线的形式对隧道表面进行全断面扫描, 可以获得隧道衬砌内表面、相邻轨道线路、接触网等的三维坐标和强度信息. 扫描实验设置扫描分辨率为 1 mm, 由于轨检小车匀速移动时存在微小的速度变动, 引起各竖直扫描螺旋线间距在 5 ~ 10 mm 之间变化. 轨检小车、扫描模型及其扫描作业场景如图 5 所示.

采用上述隧道扫描系统于 2021 年 4 月与 2022 年 4 月分别扫描杭州市某线路段地铁隧道, 采集得到两期隧道点云, 该段隧道两期公共部位约 28 m, 见图 6.

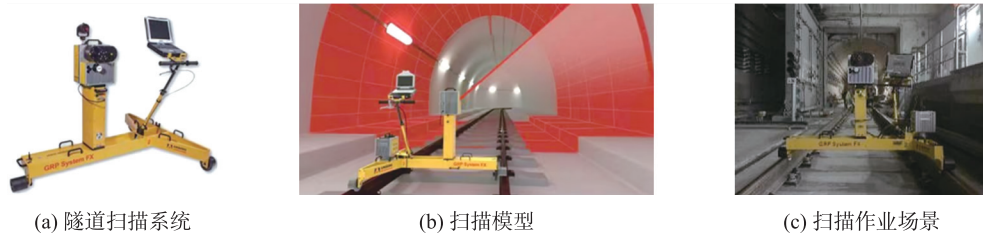


图 5 GRP IMS 5000 隧道扫描系统

Fig. 5 GRP IMS 5000 tunnel scanning system

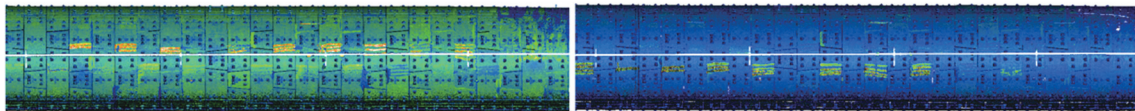


图 6 两期隧道点云

Fig. 6 Two phases of tunnel point clouds

### 2.2 地铁隧道点云预处理

#### 2.2.1 点云去噪

采用 RANSAC 圆柱检测算法对地铁隧道点云进行处理, 选取待检测数学模型为圆柱体, 并通过调试地铁隧道点云检测参数优化处理结果. 优化后的实验参数设置为: 最少模型点数取 4 000, 局内点至模型最大距离为 0.10 m, 采样点分辨率为 0.05 m, 最大正向偏差值为 15°. 基于 RANSAC 圆柱检测方法对隧道点云进行滤波后, 提取出注浆口及隧道环壁拼接处点云, 第 1 期为 4 478 291 点, 第 2 期为 4 727 407 点, 见图 7; 保留的隧道局内点, 第 1 期为 26 541 634 点, 第 2 期为 36 565 841, 见图 8. 由图 7、8 可知, 原始点云中大部分的注浆口及隧道环壁拼接处点云均被提取, 且圆柱形地铁隧道局内点保留完整.

#### 2.2.2 点云粗配准

以第 1 期隧道点云为坐标基准, 对提取出的两期注浆口及隧道环壁拼接处点云进行粗配准, 配准误差为 3.8 mm, 计算得到的粗配准参数见表 1. 根据以上配准参数对第二期隧道点云进行坐标旋转和平移转换, 得到转换至第 1 期扫描坐标系的第 2 期隧道粗配准点云, 如图 9 所示.

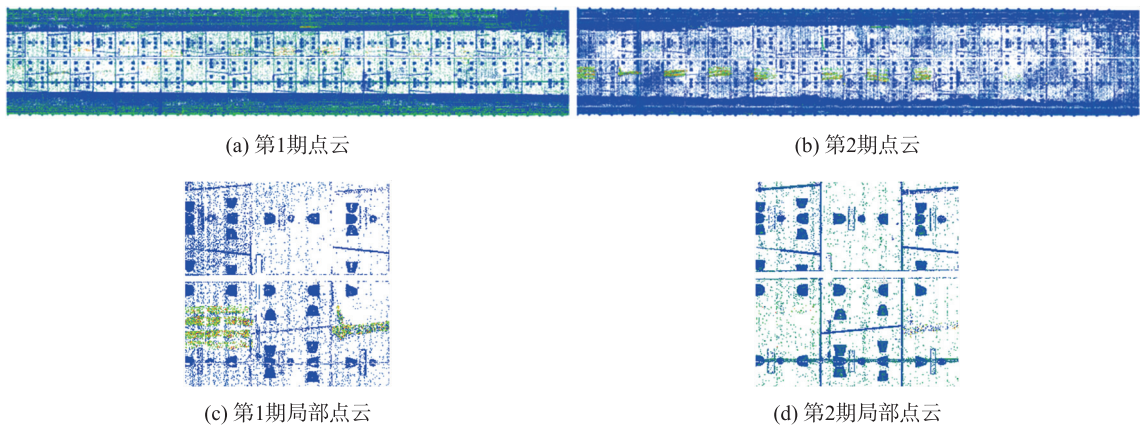


图 7 注浆口及隧道环壁拼接处点云

Fig. 7 Point cloud at the junction of grouting port and ring wall

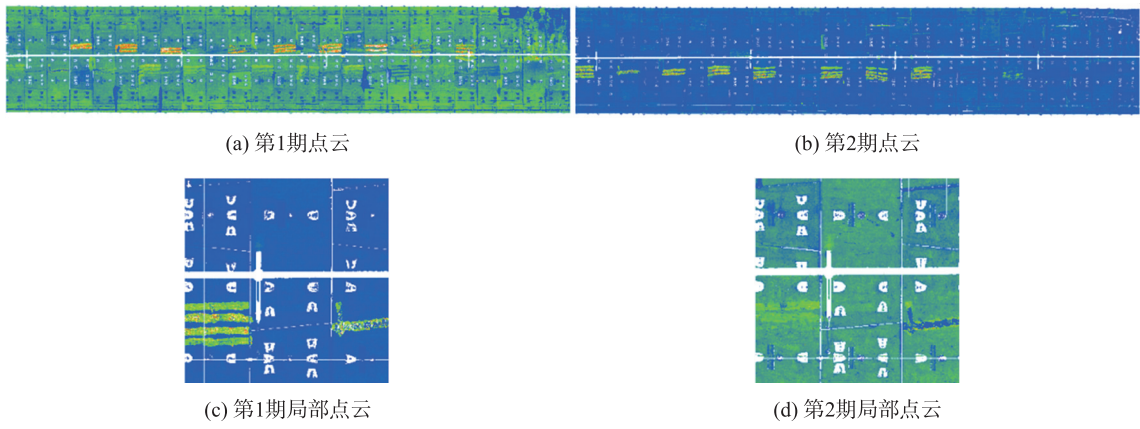


图 8 隧道局内点

Fig. 8 Inner point of tunnel

表 1 粗配准参数

Table 1 Rough registration parameters

旋转参数			平移参数/m
0.999 999 94	-0.000 323 54	0.000 126 70	0.008 185 50
0.000 323 41	0.999 999 34	0.001 079 34	-0.001 912 78
-0.000 127 05	-0.001 079 30	0.999 999 40	0.001 808 84

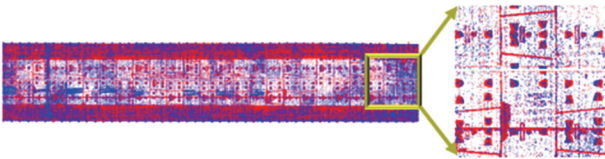


图 9 粗配准结果

Fig. 9 Rough registration result

2.2.3 点云精配准

以第 1 期隧道点云坐标系为基准坐标系,针对上文初配准后的第 2 期隧道点云,采用基于权重的 ICP 算法进行精配准,完成两期隧道局内点云坐标系统的精确转换. 精配准误差为 1.42 mm,能够满足《城市轨道交通工程测量规范》中变形监测测量中误差为 6 mm 的精度要求. 两期隧道点云精确配准参数见表 2. 精确转换至第 1 期坐标系统的两期隧道局内点云见图 10. 其中,红色点云为第 1 期隧道点云,蓝色点云为第 2 期隧道点云.

表 2 精配准参数

Table 2 Fine registration parameters

旋转参数			平移参数/m
0.999 999 57	0.000 001 04	-0.000 010 36	-0.000 010 41
0.000 000 23	0.999 999 60	-0.000 019 98	0.000 860 43
0.000 010 26	0.000 021 07	0.999 999 73	0.000 049 78

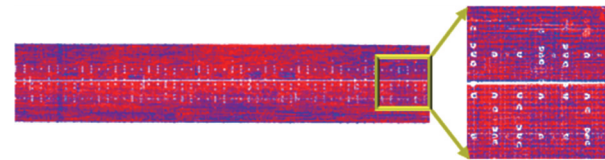


图 10 隧道局内点

Fig. 10 Inner point of tunnel

### 3 数据处理与变形分析

为保证各横断面包含充足的隧道表面三维信息,同时减小变形分析中的两期扫描线错位误差,隧道横断面厚度最小值应为螺旋线间距的2倍。由于轨检小车所载扫描仪获得各竖直扫描螺旋线间距约为5~10 mm不等,则横断面厚度最小值应为2 cm。针对该段28 m长度隧道,实验每隔1 m截取一条2 cm厚度的隧道切片,分别记为L14#、...0#...、R14#横断面,两期点云共得到29组同名横断面,见图11。

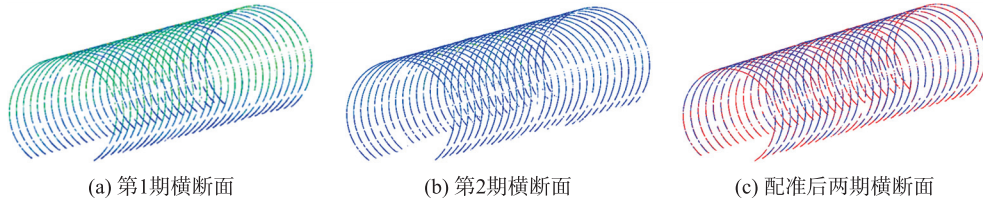


图11 2 cm 厚度横断面

Fig. 11 2 cm thick cross section

根据式(6)对各组同名横断面进行降维,得到29组同名二维横断面。采用基于曲线拟合的分析方法得到各组横断面的变形提取结果。为清晰高效地体现横断面的变形与收敛情况,实验设计了一种基于弧线投影的变形表达方法(图12)。首先对第1期各横断面点云进行最小二乘圆拟合,以圆心位置竖直向下方向为初始边;然后在每隔10°的方向上,根据第1期和第2期点云计算的夹角分别搜索与该方向角度偏差 $\pm 0.5^\circ$ 以内的点组成一对点云簇,隧道各个横断面点云在 $60^\circ \sim 300^\circ$ 范围内共25个部位都能组成点云簇。针对横断面的各簇点云,采用上述基于曲线拟合的断面变形检测方法计算各部位点位变形值,并对各簇 $1^\circ$ 范围内点云变形值取均值。变形方向由各点云簇重心至拟合圆心距离 $d_i$ 与拟合半径 $r_j$ 确定,若 $d_i > r_j$ ,变形值为正;若 $d_i < r_j$ ,变形值为负。

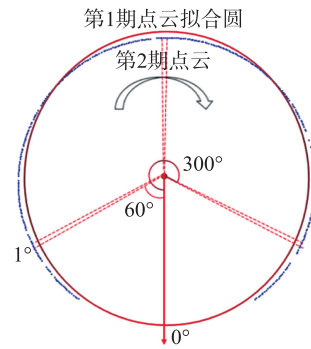


图12 基于弧线投影的变形表达

Fig. 12 Deformation expression based on arc projections

采用基于弧线投影方法提取计算地铁隧道29组二维横断面内 $60^\circ \sim 300^\circ$ 范围内25个部位变形值。因扫描遮挡引起部分部位点云缺失,共计得到638个隧道断面点变形值,得到的最大变形值为+8.6 mm,最小变形值为+0.7 mm。按式(12)计算得到断面相邻点变形量差值的标准差 $\sigma$ 为3.82 mm。采用本文方法自动处理29组二维横断面变形结果耗时34.8 s。得到的地铁隧道29组同名二维横断面中,均匀选取L14#、L10#、L5#、0#、R5#、R10#、R14#共7组横断面,根据计算的变形值得到隧道断面变形折线图,见图13。为了对比本文方法处理效果,采用MDP算法提取计算地铁隧道29组横断面相同部位的变形值,共计得到654个隧道断面点变形值,得到的最大变形值为+9.0 mm,最小变形值为+0.9 mm,断面相邻点变形量差值的标准差 $\sigma$ 为4.57 mm。采用MDP算法自动处理29组二维横断面变形结果耗时252.3 s。选取相同7组横断面

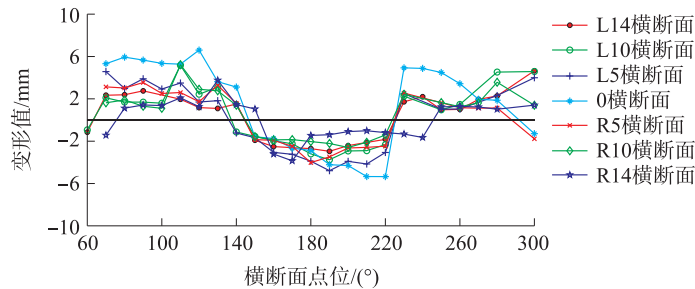


图13 本文方法提取的变形结果

Fig. 13 Deformation results extracted by this method



绘制变形折线图,见图 14.

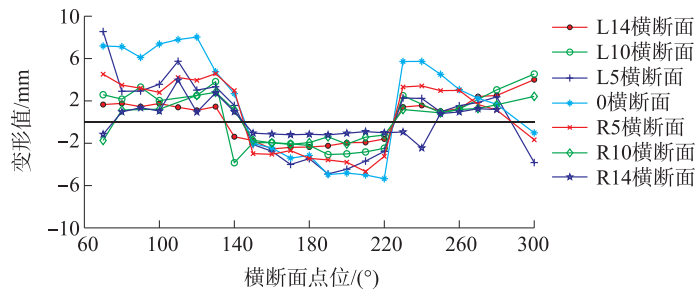


图 14 MDP 算法提取的变形结果  
Fig. 14 Deformation results extracted by MDP algorithm

由图 13 和图 14 可知,本文提出的方法能够得到地铁隧道任意断面变形情况,能准确地反映杭州市地铁隧道某线路段在 2021 年 4 月至 2022 年 4 月期间发生的 mm 级变形量以及变形特征. 本文方法与 MDP 算法提取的结果相比,断面相邻点变形量差值的标准差  $\sigma$  由 4.57 mm 降低至 3.82 mm,计算处理时间由 252.3 s 降低至 34.8 s. 表明本文基于弧线投影的变形表达方法所得断面连续点变形的数值波动性小、平顺性高,得到的地铁隧道变形监测结果更为高效准确.

#### 4 结论

本文针对地铁隧道横断面各方向变形无规律以及基于点与点的变形检测方法难以准确表达各部分变形的的问题,设计了一种基于轨道移动式激光扫描点云的隧道断面变形提取方法,通过实验验证得到以下结论:

(1) 针对隧道点云的特征不明显且配准易陷入局部最优解的问题,引入 RANSAC 的圆柱检测方法提取隧道点云中轨道、电力架、注浆口等特征点,设计了一种基于隧道注浆口点云的粗配准方法,能够更加快速、客观准确地获取地铁隧道点云的初始方位.

(2) 通过对隧道断面点云降维获得隧道二维断面信息,使用 k 近邻法获取断面点云并根据最小二乘法对其进行二次曲线拟合,通过遍历各点至曲线最近点的距离并采用基于弧线投影的变形表达方法反映地铁隧道的断面变形. 实验结果表明,该方法提取的变形值波动性小、平顺性高,具有良好的适用性及稳定性.

(3) 分别使用本文方法和 MDP 算法从地铁隧道点云提取 29 组二维断面变形量. 与 MDP 算法分析隧道断面变形方法相比,基于曲线拟合方法提取断面变形的准确性和效率更高. 在分析地铁隧道的不同方向变形时,本文方法具有更好的适用性.

#### [参考文献]

- [1] LI Z Y, WANG J, ZHU F Q, et al. Analysis of point cloud data of tunnel cross-section using cubic B-spline curve[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2021, 643(1): 012064.
- [2] 韩春梅, 鲍艳, 王风杰. 基于 MDP 算法的隧道断面变形监测[J]. 市政技术, 2019, 37(2): 28-32.
- [3] QIAN J, ZHOU Y. Study on quality and safety monitoring scheme of tunnel construction based on 3D laser scanning[J]. IOP conference series: earth and environmental science, 2021, 804(2): 022073.
- [4] 马明刚, 郑德华, 潘月梁, 等. 基于曲率频数统计的支护锚杆点云自适应提取方法研究[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2022, 45(3): 27-34.
- [5] WANG T, TIAN L, HOU J, et al. Method of the point clouds filtering by grid handling and its application in the deformation monitoring of tunnel[J]. Journal of Hohai university(natural sciences), 2018, 46(5): 451-457.
- [6] HAN J Y, GUO J, JIANG Y S. Monitoring tunnel deformations by means of multi-epoch dispersed 3D LiDAR point clouds: an improved approach[J]. Tunnelling and underground space technology, 2013, 38: 385-389.
- [7] ZHUA N N, JIAA Y H, LUO L. Tunnel point cloud filtering method based on elliptic cylindrical model[C]//Congress ISPRS, 2016, 41(B1): 735-740.



- [8] 李志远,王健,于德亮,等. 基于点云的地铁隧道断面精确拟合与形变分析[J]. 测绘通报,2020(8):157-159.
- [9] 徐飞,田茂义,俞家勇,等. 基于隧道水平中线的全局断面提取及形变分析[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(11):2296-2307.
- [10] 林景峰,俞家勇,田茂义,等. 利用隧道激光点云提取中轴线及进行整体变形分析[J]. 遥感信息,2021,36(1):94-101.
- [11] 潘东峰,杨超,吴一同,等. 利用 TLS 技术进行地铁隧道断面提取及变形监测分析[J]. 测绘通报,2022(4):130-133.
- [12] 王龙飞,胡海峰,廉旭刚. 全站扫描点云支持下的铁路隧道横断面快速提取及变形分析[J]. 测绘通报,2019(5):55-59.
- [13] XIE X Y, LU X Z. Development of a 3D modeling algorithm for tunnel deformation monitoring based on terrestrial laser scanning[J]. Underground space,2017,2(1):16-29.
- [14] BESL P J, MCKAY H D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence,1992,14(2):239-256.

[责任编辑:杜忆忱]