

文章编号: 1672-8785(2025)08-0038-11

基于移动激光扫描的隧道轮廓 变化识别与提取

徐建国¹ 张开坤² 段 伟² 何 江³ 姚连璧^{3*}

(1. 南京市地铁交通设施保护办公室, 江苏 南京 210000;

2. 南京市测绘勘察研究院股份有限公司, 江苏 南京 210019;

3. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘 要: 实现复杂形状隧道轮廓变化分界点的精准定位与各分段轮廓提取, 可为隧道形变监测、点云正射影像图生成以及既有隧道模型重建提供有力的支持。基于通过移动激光扫描采集的高精度隧道点云数据, 先对原始断面点云进行提取与预处理, 再凭借轮廓特征点邻域密度特征识别轮廓变化, 最后结合里程定位法和边界提取算法, 完成隧道分段及其轮廓提取。使用某地铁隧道与公路隧道实测数据开展实验, 验证了该方法的可行性。与现有研究相比, 本文方法摆脱了对隧道中轴线的高度依赖, 能自主精准识别轮廓变化, 有效提升了处理效率, 为复杂形状隧道分段与轮廓提取的相关工程应用提供了高效创新的解决方案, 对高性能激光扫描技术的应用优化具有一定的参考价值。

关键词: 移动激光扫描; 激光点云; 变化识别; 轮廓提取

中图分类号: U45 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.08.006

Identification and Extraction of Tunnel Contour Changes Based on Mobile Laser Scanning

XU Jian-guo¹, ZHANG Kai-kun², DUAN Wei², HE Jiang³, YAO Lian-bi^{3*}

(1. Nanjing Metro Traffic Facilities Protection Department, Nanjing 210000, China;

2. Nanjing Institute of Surveying, Mapping & Geotechnical Investigation, Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

3. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Accurately locating the boundary points of complex-shaped tunnel contour changes and extracting the contours of each segment can provide strong support for tunnel deformation monitoring, point cloud orthophoto generation, and reconstruction of existing tunnel models. Based on high-precision tunnel point cloud data collected by mobile laser scanning, the original cross-section point cloud is first extracted and preprocessed, and then contour changes are identified by using the neighborhood density features of contour feature points. Finally, the mileage positioning method and boundary extraction algorithm are combined to complete the tunnel segmentation and contour extraction. Experiments using measured data from a subway tunnel and a

收稿日期: 2025-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(42474053)

作者简介: 徐建国(1971-), 男, 江苏宿迁人, 高级工程师, 主要研究领域为轨道交通智能安全检测方法。

*通讯作者: E-mail: lianbi@tongji.edu.cn

highway tunnel verify the feasibility of this method. Compared with existing research, this method breaks away from the high dependence on the tunnel's central axis, can independently and accurately identify contour changes, and effectively improves processing efficiency. It provides an efficient and innovative solution for engineering applications related to complex-shaped tunnel segmentation and contour extraction, and has a certain reference value for the application optimization of high-performance laser scanning technology.

Key words: mobile laser scanning; laser point cloud; change recognition; contour extraction

0 引言

随着我国交通行业的高速发展,隧道领域面临快速增长的安全检测与数字化改造等需求^[1]。针对几何形状复杂的隧道,其同一区段可能涵盖多种断面类型,然而部分老旧线路设计数据缺失。对隧道进行准确分段并提取其断面轮廓,不仅可以作为量化隧道结构变形的关键参照,还可以作为数据源,生成无拉伸变形的点云正射影像,从而提高隧道内壁病害检测与附属设施调查的效率。此外,精确分段获得的断面轮廓有助于推动既有隧道模型精细化重建等工作。

传统的隧道断面测量方法主要采用测量机器人或近景摄影测量方式^[2-5]。测量机器人技术具有较高的精度,但获取的数据仅代表局部区域,其效率较低。摄影测量技术结合图像处理方法可判别隧道轮廓的变化,但其对光照条件要求较高,且图像数据缺乏深度信息,难以准确获取空间几何参数,不利于隧道轮廓提取。

激光扫描技术的发展与应用为隧道断面测量提供了全新的手段。托雷等^[6]利用三维激光点云提出一种基于邻域局部曲面拟合的隧道断面截取方法。王子豪^[7]通过点云法向信息获取隧道中轴线,进而建立隧道表面三角网来截取断面轮廓。贺小琼等^[8]使用车载激光雷达实时扫描隧道轮廓,并采用最小二乘算法对点云数据进行拟合,获取隧道轮廓。李理等^[9]提出以点云平面投影获取的隧道中轴线为基础,连续截取任意间隔隧道横断面的方法。

以上研究均有效提高了隧道断面轮廓提取的效率,但对于隧道中轴线的依赖性较高,且

隧道轮廓变化的自动识别方法仍值得进一步研究。本文利用移动激光扫描系统获取的隧道点云数据,通过对断面点云数据进行处理与分析,提出一种隧道轮廓变化识别与提取方法,以解决复杂形状隧道的轮廓变化自动识别与提取问题。

1 断面点云提取与预处理

本文基于移动激光扫描获取的点云数据对隧道断面轮廓展开分析,前提是获取各个断面的隧道内壁点云。因此,首要任务是对断面点云进行提取,并开展滤波去噪、道床与隧道内壁点云分割等预处理工作。

1.1 断面点云提取

移动激光扫描系统中使用的激光扫描仪采用二维断面扫描模式工作,直接获取的点云数据是二维螺旋扫描线数据,如图 1 所示。当平台移动速度较慢、激光扫描频率较高时,单个圆周的螺旋扫描线数据可简化为独立二维断面。

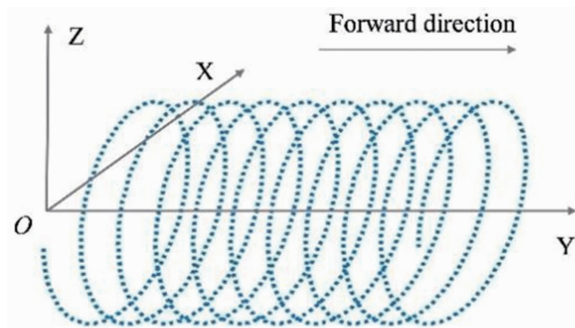


图 1 螺旋扫描线数据示意图

根据测量设备搭载平台的不同,常见的隧道移动激光扫描系统有轨道式移动激光扫描系统与车载式移动激光扫描系统,两者的适用场景及其断面点云提取方法均有所不同。

针对高铁与地铁隧道等具备轨道条件的场景,通常采用轨道式移动激光扫描系统,如图2所示。对于轨道式移动激光扫描系统,扫描仪安装标定后其扫描断面垂直于隧道中线,因此可以基于扫描线数据直接获取断面点云,即每一个完整圆周的螺旋扫描线数据即为当前断面点云。



图2 轨道式移动激光扫描系统

针对公路隧道场景,通常以移动车辆为载体,搭建定制化车载式移动激光扫描系统,如图3所示。为避免载体遮挡、实现360°全视野扫描,通常将扫描仪倾斜安装于车顶,对隧道进行倾斜扫描,故直接获得的扫描线数据并非真实断面点云。



图3 车载式移动激光扫描系统

针对公路隧道场景数据采集过程中因倾斜扫描导致断面点云难以直接提取的问题,本文提出一种基于里程切片的断面点云提取方法,结合扫描仪安装标定参数与位置姿态系统(Position and Orientation System, POS)数据给

点云赋予里程信息,进而基于里程值进行切片来获取隧道断面点云。该方法的实现流程如图4所示。

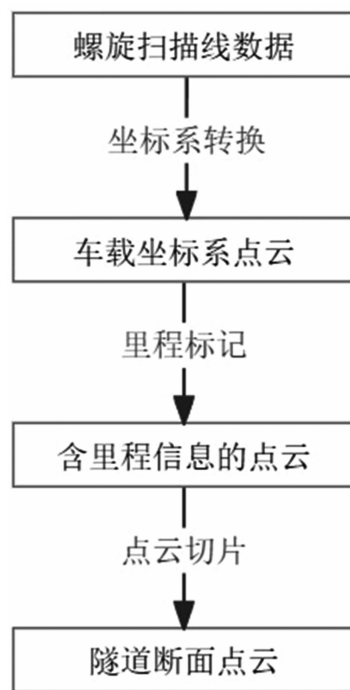


图4 基于里程切片的断面点云提取流程图

首先,结合车载式移动激光扫描系统的空间标定参数,将螺旋扫描线数据从扫描仪坐标系转换至车体坐标系。其中系统的坐标转换参数需通过空间标定获取。空间标定首先需要明确各个空间坐标系的定义,然后采用靶球、反射片、棱镜等建立公共点。通常可借助全站仪测量坐标系,建立激光扫描仪与车体之间的相对位置关系^[10]。

其次,利用组合导航系统解算获取的轨迹数据,给当前断面邻域内的扫描点云标记里程信息。车载式移动激光扫描系统作业时可搭载组合导航系统同步运行,从而获取车辆在数据采集过程中的轨迹信息。轨迹数据与扫描仪数据经时间同步后,即可对点云赋予里程信息。为保证轨迹的准确性,实际应用时通常需结合局部控制点进行纠正与拟合^[11]。

最后,基于带有里程信息的点云数据,以一定切片厚度在指定断面邻域内进行点云切片,接着对其平面投影,得到当前断面点云。

其中切片厚度需综合考虑行车速度与扫描仪采样分辨率来加以确定。

1.2 断面点云预处理

在激光扫描作业过程中, 由于扫描仪自身、载体平台振动、外界环境等综合因素的影响, 点云数据成果难以避免包含噪声点与离群点等干扰数据。因此需借助相应的点云滤波方法进行数据预处理, 为后续断面点云数据分析与应用提供符合质量要求的数据源。

本文进行点云滤波处理时以断面点云为基本单位, 主要采用直通滤波与空间统计滤波去除噪声。直通滤波的作用是过滤在指定维度上取值不在给定值域范围内的点。其实现原理如下: 首先指定断面坐标系内各个维度的值域范围, 然后遍历点云, 判断点在各个维度上的取值是否在值域内, 并剔除值域外的点^[12]。直通滤波算法简单高效, 本文主要将其应用于滤除隧道外部的离群点, 其值域范围需结合扫描位置、角度以及隧道轮廓的大致尺寸确定。空间统计滤波用于去除隧道内部的离散噪声点, 其基本原理如下: 首先对每个点进行 K 邻域统计分析, 计算点到它的 K 个邻近点的平均距离, 然后计算所有点平均距离的平均值和标准差, 将平均距离在阈值范围外的点视为噪声点并剔除^[13]。

本文结合直通滤波与空间统计滤波, 实现对隧道断面点云滤波去噪处理的流程如下: (1) 输入需去噪的断面点云数据。(2) 设定断面坐标系中两个坐标轴方向的直通滤波阈值, 采用直通滤波算法剔除阈值外的点云。(3) 计算剩余点云中各点到其 K 个邻近点的平均距离, 并统计整体的均值和标准差。(4) 以 1 倍标准差为空间统计滤波阈值, 剔除邻近点平均距离大于阈值的点, 输出去噪后的点云。若去噪效果较差, 可调整相应的 K 值与阈值。

对于圆形盾构隧道, 在受外力作用变形后其断面形状近似为椭圆。对此, 可采用随机采样一致性 (Random Sampling Consistency, RANSAC) 椭圆拟合方法进行点云滤波去噪,

从而有效剔除接触网等隧道内壁附属设施。该方法实现的具体流程如下: 首先对含有噪声的隧道断面点云进行椭圆拟合, 计算出椭圆方程的初始参数, 然后计算各个断面点到椭圆的最短距离 d_i , 进而组成距离点集 $d\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$; 根据式(1)和式(2)分别计算点集 d 的均值 d_{mean} 和标准差 σ :

$$d_{mean} = \frac{\sum d}{n} \quad (1)$$

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

当 $|d_i - d_{mean}| > 2\sigma$ 时, 判定该点为噪声点, 需剔除或降低权值。经稳健估计迭代, 剔除非隧道内壁点以得到断面拟合结果。

为避免道床点云对隧道轮廓识别造成干扰, 同时减小数据量以加快数据处理进程, 本文采用高度分割法和角度分割法来实现隧道内壁与道床点云分割。高度分割法参考道床面的高度设定高度过滤阈值, 将高于此阈值的点作为隧道内壁点云, 低于此阈值的点作为道床点云。其中高度阈值需根据现场实际情况进行确定。通常不同形状的隧道区段需要设置不同的高度过滤阈值。角度分割法主要用于圆形隧道, 该方法主要依据道床和隧道内壁的数据点位分布情况。对于每个隧道断面, 以圆心 (x_0, y_0) 为坐标原点建立隧道断面直角坐标系, 通过式(3)计算出每个点在该坐标系中的角度 A , 然后结合角度过滤阈值即可对断面内的各个点进行分类。其中角度过滤阈值需根据现场实际情况或隧道设计数据进行确定。如图 5 所示, 某隧道道床分布的角度区间为 $240^\circ \sim 300^\circ$ 。

$$A = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y-y_0}{x-x_0}\right) & (x > x_0, y > y_0) \\ \arctan\left(\frac{y-y_0}{x-x_0}\right) + 2\pi & (x > x_0, y < y_0) \\ \arctan\left(\frac{y-y_0}{x-x_0}\right) + \pi & (x < x_0) \end{cases} \quad (3)$$

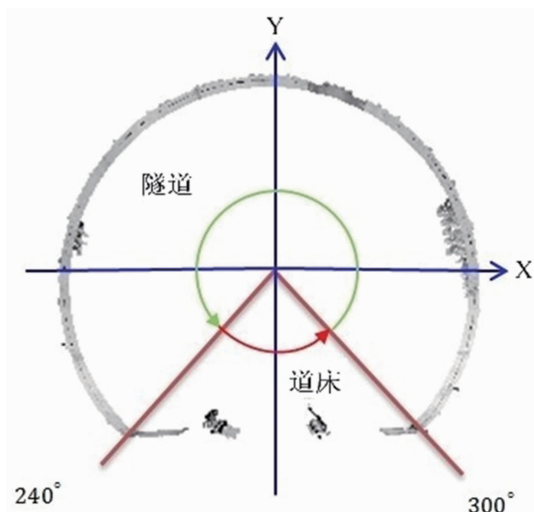


图 5 隧道与道床角度分布的示意图

在完成隧道内壁点云与道床(或路面)点云分割的基础上,采用直通滤波与空间统计滤波或 RANSAC 椭圆拟合方法对断面点云进行滤波处理,可有效去除噪声点并较好地保留隧道轮廓点。断面点云预处理示例效果如图 6 所示。

2 隧道轮廓变化识别与提取方法

2.1 基于特征点邻域密度特征的轮廓变化识别方法

为提高复杂形状隧道轮廓变化的识别效率,本文提出一种基于断面特征点邻域密度特征的隧道轮廓变化识别方法。该方法的实现流程如图 7 所示。具体步骤如下:

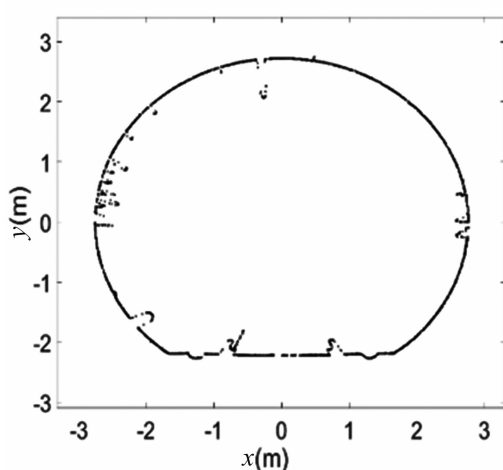
(1)设置首断面特征点。对于起始断面点云,在断面点云预处理的基础上选取轮廓特征点,要求选取的特征点连接而成的多义线能够表示当前隧道断面轮廓的基本形状。

(2)遍历后续断面,计算特征点邻域密度。本文提到的特征点邻域密度具体是指在当前断面中,与特征点距离小于设定阈值的激光点数量。该步骤具体是指对于后续各断面点云,根据首断面特征点坐标统计各个特征点邻域半径阈值内的点个数 n 。其中邻域半径阈值需结合隧道内管线线缆与隧道内壁的一般距离确定,以避免管线线缆遮挡可能造成隧道轮廓变化的误判。

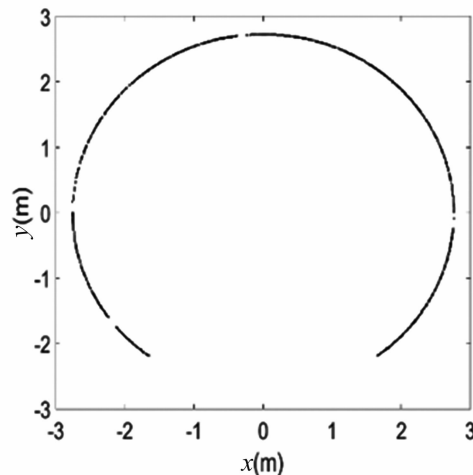
(3)判断当前断面隧道轮廓的变化情况。若判断发生变化,则输出当前位置,退出遍历循环;若未变化,则重复步骤(2)与步骤(3),直至遍历终止。其中判断当前轮廓发生变化需满足以下两个条件:

(a)存在特征点邻域内的点个数小于 N_0 ,即若 n 小于 N_0 ,则判定当前断面在该特征点处存在变化,将当前断面作为潜在分界点。其中,阈值 N_0 的取值取决于激光扫描仪所采集的点云密度,根据扫描仪角度分辨率与扫描仪至隧道内壁的距离确定,具体设置公式为

$$N_0 = \frac{R}{D} = \frac{R}{L \cdot \alpha} \quad (4)$$



(a) 原始点云



(b) 预处理后点云

图 6 断面点云预处理示例图

式中, N_0 为预配置的阈值; R 为邻域半径阈值; D 为隧道内壁上相邻两个扫描点的最大间隔距离; L 为扫描仪激光发射点至隧道内壁的最大距离; α 为所使用激光扫描仪的角度分辨率。

(b) 在满足条件(a)的前提下, 后续连续实际长度 L 对应的断面均满足条件(a)。该条件的目的是判断当前断面至潜在分界点的长度是否超过预配置的阈值长度 L 。若为是, 则将潜在分界点作为实际分界点。本文设定预配置的阈值长度 L 的取值时主要取决于隧道内壁安装的设备沿隧道纵向的最大长度, 一般可设为 1 m, 以避免安装设备遮挡造成隧道轮廓变化的误判。

2.2 里程定位与校正

基于隧道轮廓变化分界点可将隧道分割为多个分段隧道。为获取各分段隧道的里程范围, 需要基于隧道中的里程标对扫描点云进行

定位。在实际扫描作业过程中, 通常使用里程计记录移动激光扫描系统的行进里程, 再结合隧道中的里程标志进行校正。里程校正原理如下: 在较短距离内可以认为里程的测量误差与行驶距离成正比, 即

$$S = \tilde{S} + kS \quad (5)$$

式中, S 为测量距离; $\tilde{S}$ 为实际距离; k 为比例误差系数。校正时, 根据一段已知的参考距离值 $\tilde{S}_0$ 与其测量值 S_0 , 结合式(6)可求解误差系数 k 。

$$k = (S_0 - \tilde{S}_0) / \tilde{S}_0 \quad (6)$$

则任意实测距离 S 校正后的值 $\tilde{S}$ 可通过式(7)计算求解。

$$\tilde{S} = S - kS \quad (7)$$

对于盾构隧道, 还可以利用盾构管片拼接具有高精度、管片宽度固定的特点, 通过识别环缝确定管片数量, 结合管片宽度计算出不同

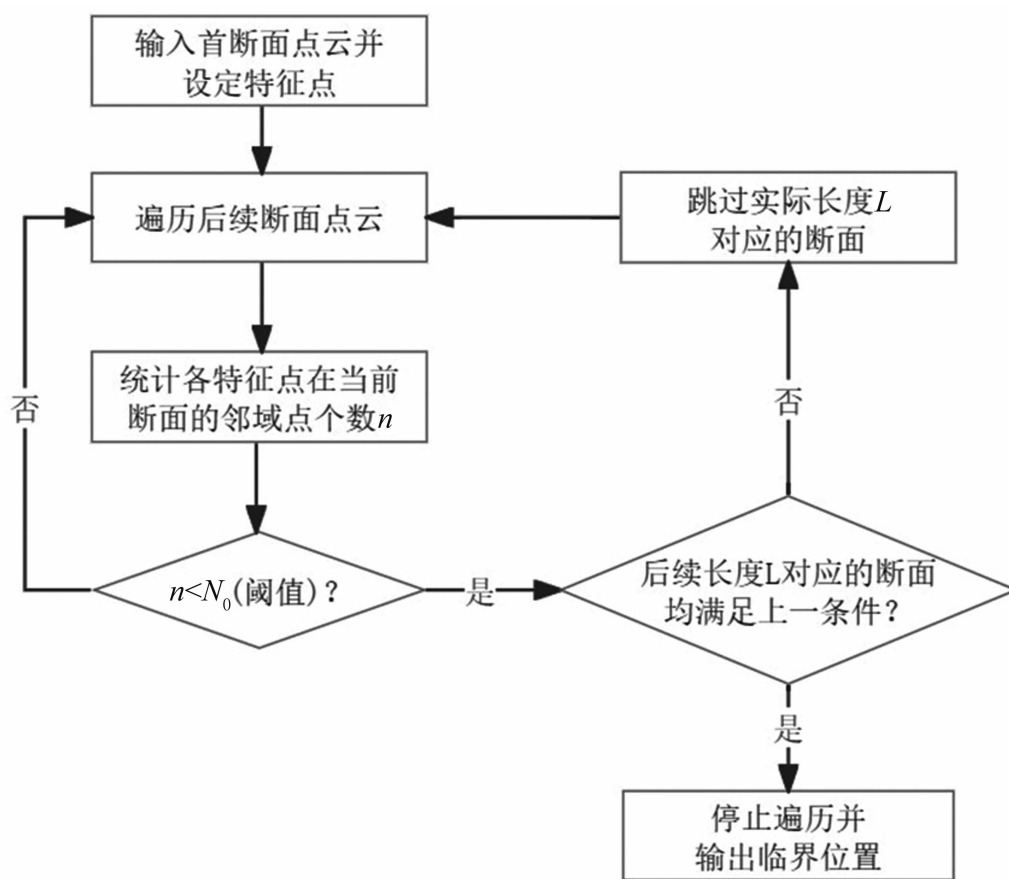


图 7 隧道轮廓变化识别流程

环缝之间的实际距离,进而依据首尾环缝的实际里程进行里程校正^[14]。

2.3 隧道分段轮廓提取

在隧道分段的基础上,等距选取各个分段隧道区间中一定数量的断面点云,将其平面投影至统一的断面坐标系,然后利用 Alpha Shapes 算法提取断面点云的边界,即当前隧道分段的轮廓。Alpha Shapes 算法实现边界提取的步骤如下:(1)设置判别半径 α 。(2)过任意两点 P_1 、 P_2 绘制半径为 α 的圆,如图 8 所示。若任意一个圆不包含其他数据点,则认为点 P_1 、 P_2 是边界点,其连线 P_1P_2 即为边界线段。(3) n 个数据点两两相连,可形成 $[n(n-1)]/2$ 条线段。逐条进行判断即可求解。

判断完成后,按照顺时针或逆时针方向,依次连接各边界点即可得到分段隧道的轮廓。若提取效果不佳,则可适当调整判别半径 α 。

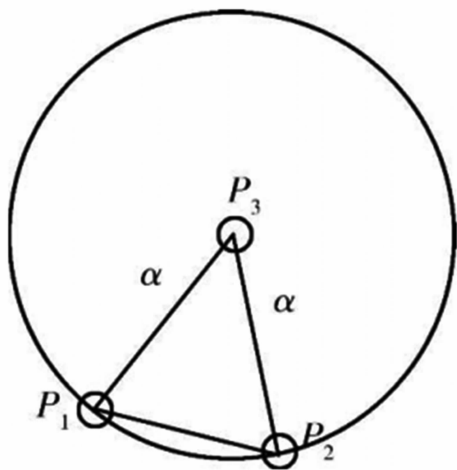


图 8 边界点判断示意图

3 实验与应用

3.1 地铁隧道实验

使用 Tlsd 移动激光扫描系统^[15]在某地铁隧道区间采集的点云数据,对本文方法进行验证。该隧道区间采用矿山法施工建造,其轮廓呈现出多样化的特点,包含多种复杂形状,实际长度为 2331.6 m。设定其起止里程范围为 $K0+0.00 \sim K2+331.60$ 。

首先按照 1.1 节所述方法从采集到的点云

数据中提取隧道断面点云,然后对其进行滤波去噪、隧道与道床分割等预处理,进而基于断面点云采用本文方法识别该隧道轮廓变化并提取断面轮廓。某隧道分段的轮廓提取结果如图 9 所示。其中,图 9(a)所示为隧道原始断面点云,图 9(b)所示为该分段隧道的轮廓提取结果。

对整个隧道区间的轮廓进行识别与提取,依次共得到 16 个不同轮廓。各分段隧道提取的轮廓如图 10 所示,对应的起止里程记录于表 1。

表 1 某地铁隧道轮廓变化分段表

轮廓编号	起始里程	终止里程
S1	K0+0.00	K0+48.73
S2	K0+48.73	K0+69.02
S3	K0+69.02	K0+74.90
S4	K0+74.90	K0+83.90
S5	K0+83.90	K0+85.50
S6	K0+85.50	K0+88.98
S7	K0+88.98	K0+483.15
S8	K0+483.15	K0+506.40
S9	K0+506.40	K0+629.00
S10	K0+629.00	K0+714.35
S11	K0+714.35	K0+716.72
S12	K0+716.72	K1+242.57
S13	K1+242.57	K1+244.87
S14	K1+244.87	K1+845.00
S15	K1+845.00	K1+847.35
S16	K1+847.35	K2+331.60

3.2 公路隧道实验

在某公路隧道区间,采用同步搭载了激光断面扫描仪与组合导航系统的车载式移动激光扫描系统进行扫描作业,利用采集的数据验证本文方法在公路隧道场景的适用性。在作业过程中,激光断面扫描仪获取隧道内壁及道路点云,组合导航系统获取移动平台的轨迹数据。根据轨迹距离,设定该隧道的起止里程范围为 $K0+0.00 \sim K0+722.40$ 。

根据 1.1 节所述方法,首先结合车载式移动激光扫描系统的标定参数,将螺旋扫描线数据从扫描仪坐标系转换至车体坐标系;然后利

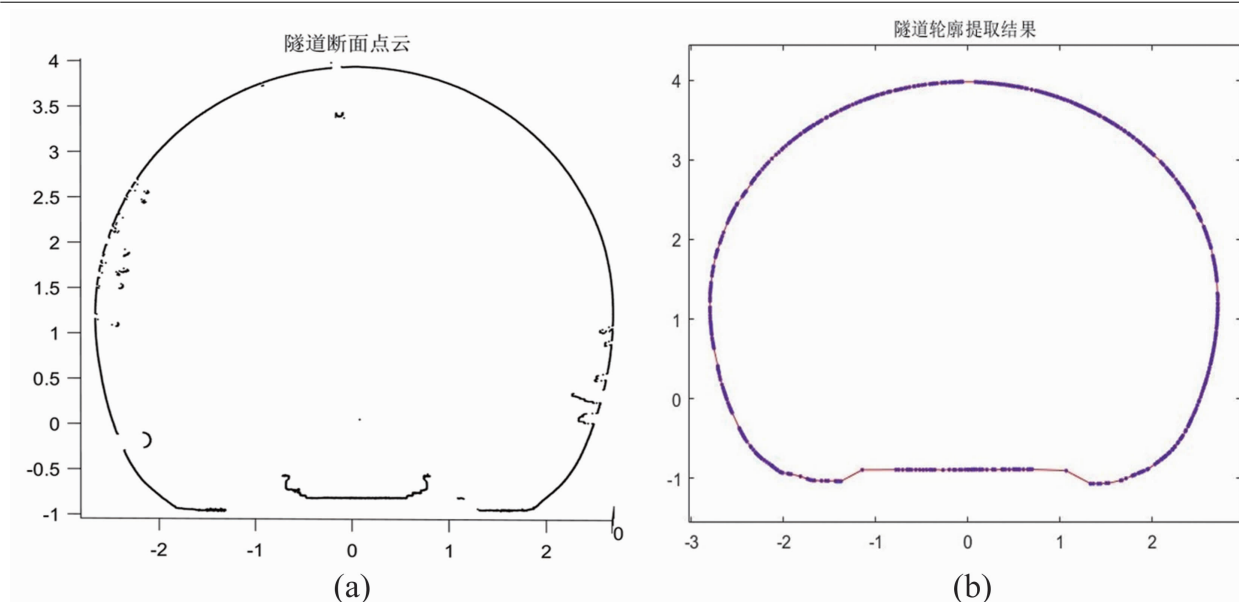


图 9 隧道轮廓提取示例图

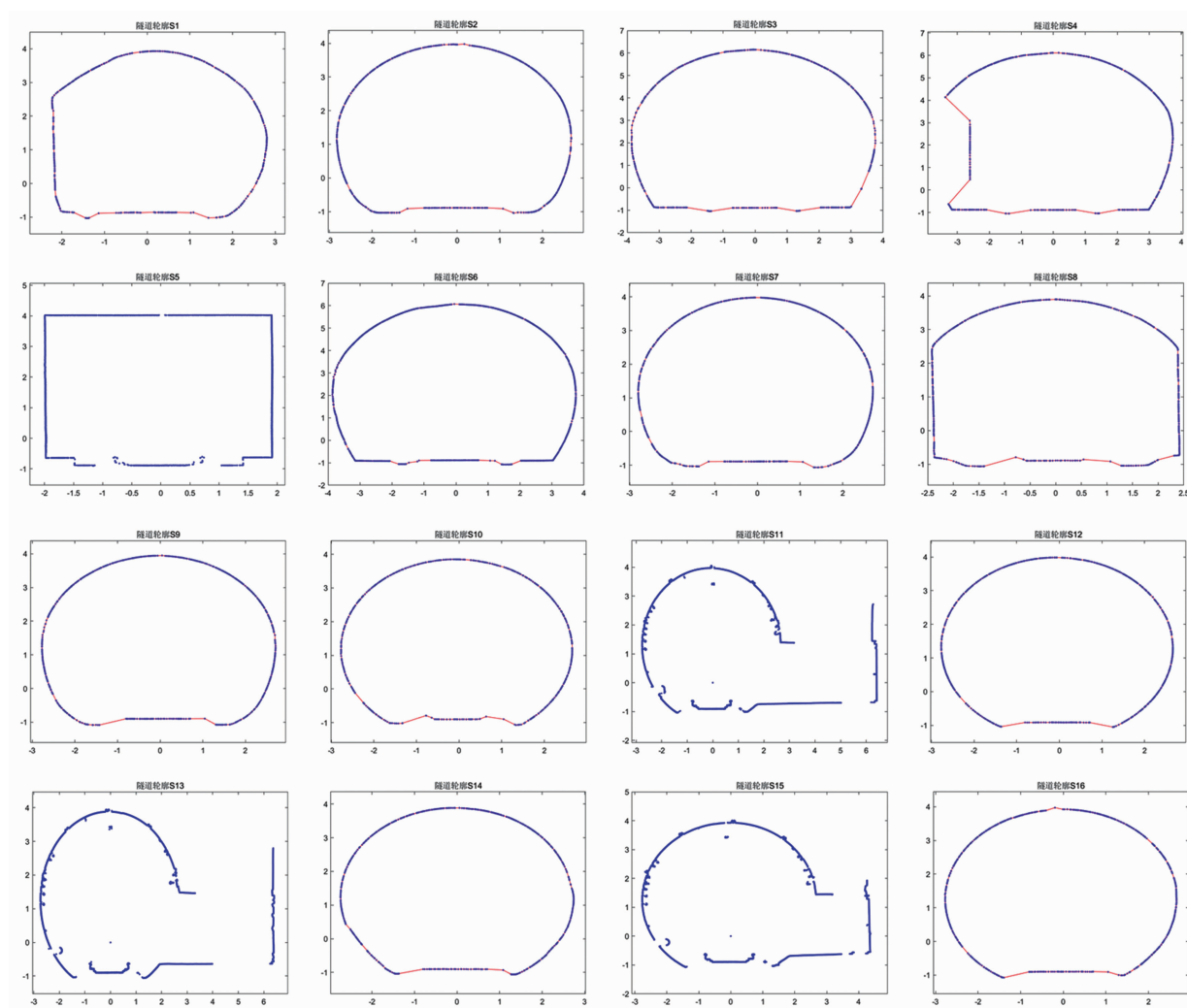


图 10 某地铁隧道轮廓

用组合导航系统解算获取的轨迹数据, 经过时间同步后, 给当前断面邻域内的点云标记里程信息; 最后基于里程信息对点云进行切片, 获得当前隧道断面点云, 如图 11 所示。

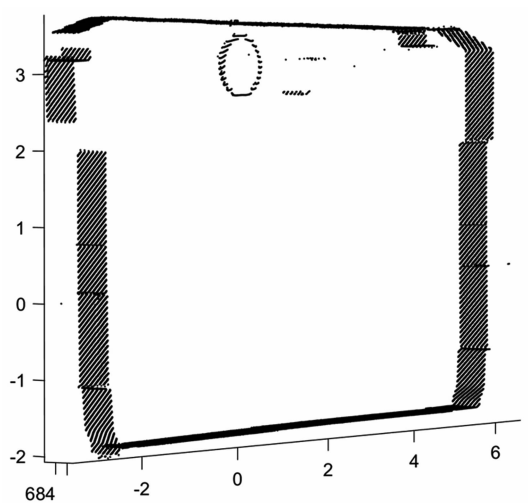


图 11 基于车载扫描的隧道断面点云

将断面点云投影至断面坐标系, 并对其进行滤波去噪等处理。然后使用本文方法进行轮廓变化识别与提取, 共得到 2 种轮廓。轮廓边界点如图 12 所示, 对应的起止里程记录于表 2。

表 2 某公路隧道轮廓变化分段表

轮廓编号	起始里程	终止里程
S1	K0+0.0	K0+150.6
S2	K0+158.0	K0+196.2
S1	K0+202.8	K0+400.4
S2	K0+406.6	K0+450.8
S1	K0+460.8	K0+722.4

3.3 结果分析与应用

本文实验围绕地铁隧道与公路隧道开展, 分别使用轨道式移动激光扫描系统与车载式移动激光扫描系统开展数据采集工作, 旨在验证本文方法在隧道轮廓变化识别与提取领域的可行性。

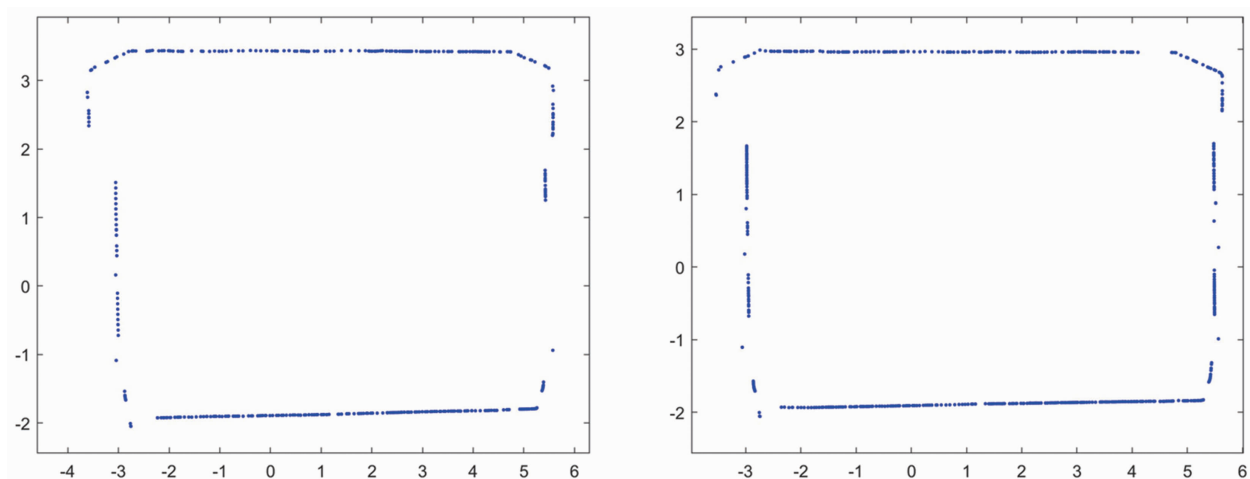


图 12 某公路隧道断面轮廓边界点

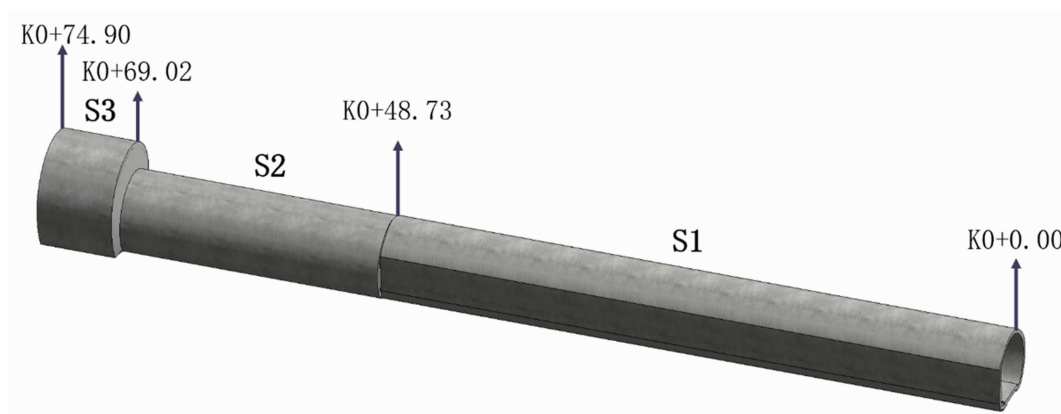


图 13 某地铁隧道局部衬砌模型

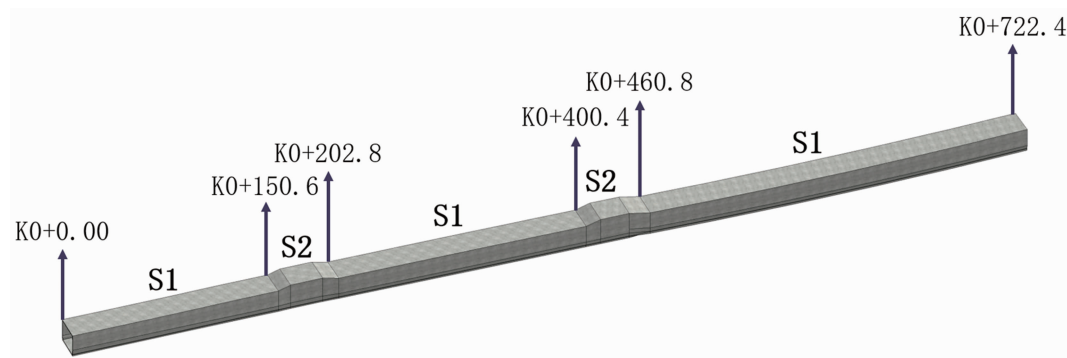


图 14 某公路隧道衬砌模型

在地铁隧道实验中, 针对长度为 2331.6 m 且轮廓复杂的区间, 经断面点云提取与预处理后, 成功识别并提取出 16 种不同形状的轮廓, 涵盖马蹄形、矩形、直墙拱顶形以及洞室等, 与实际情况高度吻合。在公路隧道实验中, 经坐标转换、里程标记以及点云切片等操作获取断面点云后, 运用本文方法识别出 2 种主要轮廓, 不同轮廓的边界与里程分布清晰, 体现出了公路隧道的结构特点。综上所述, 本文方法在不同隧道场景下均展现出良好的可行性与适用性。

此外, 利用本文方法获得的隧道轮廓变化识别与提取成果, 也可直接应用于既有隧道模型重建工作。基于提取到的隧道实际轮廓, 使用 Revit 软件进行模型重建, 得到上述地铁隧道与公路隧道的衬砌模型, 如图 13 与图 14 所示。该模型直观展示了隧道的衬砌结构形态, 进一步验证了本文方法的实用价值。

4 结束语

针对复杂形状隧道在轮廓变化识别与提取方面的需求, 本文提出了一种基于移动激光扫描的隧道轮廓变化识别与提取方法。该方法深度挖掘点云数据特征, 将首断面特征点邻域密度特征引入轮廓变化识别流程, 揭示了实现高效精准隧道轮廓分析的原理与操作流程。与现有方法相比, 本文方法实现了无需计算隧道中轴线即可完成隧道分段与断面轮廓提取, 极大简化了传统复杂的作业流程, 为复杂形状隧道分段与轮廓提取相关工程应用提供了高效创新

的解决方案, 对高性能激光扫描技术的应用优化具有一定的参考价值。然而, 此方法在应对断面轮廓长距离持续变化的复杂隧道场景时, 由于需持续设置首断面特征点, 实际工作量增大, 且需人工介入检核以确保准确性, 自动化程度与鲁棒性均有待提高。未来的进一步研究可考虑引入多源数据融合技术, 为点云数据提供更丰富的补充信息, 增强对复杂场景的综合感知与分析能力。同时需研发更智能的自适应点云数据处理算法, 提升应对复杂场景的适应性与处理效率。

参考文献

- [1] 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, 57(S2): 200–206.
- [2] 许正文, 林永钢. 盾构隧道断面检测技术研究 [J]. 大坝与安全, 2009, 23(S1): 66–69.
- [3] 许小松. 全站仪配编程计算器进行隧道断面测量 [J]. 数字技术与应用, 2010, 28(11): 36.
- [4] 臧欢欢. 基于摄影与目标自动识别的隧道断面测量技术研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [5] 王石磊, 高岩, 齐法琳, 等. 铁路运营隧道检测技术综述 [J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 41–57.
- [6] 托雷, 康志忠, 谢远成, 等. 利用三维点云数据的地铁隧道断面连续截取方法研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2013, 38(2): 171–175.
- [7] 汪子豪. 从隧道三维点云中自动截取断面轮廓的方法 [J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13

- (2): 47–52.
- [8] 贺小琼, 肖世德, 赖焕杰, 等. 基于激光雷达的隧道轮廓拟合方法研究 [J]. *现代雷达*, 2023, **45**(7): 70–74.
- [9] 李琨, 卢小平, 朱宁宁, 等. 基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法 [J]. *测绘学报*, 2015, **44**(9): 1056–1062.
- [10] 陈长军. 车载移动测量系统集成关键技术研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [11] 姚连璧, 钱瑾斐. 基于移动最小二乘法的轨迹拟合切线方位角计算 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, **46**(11): 1589–1593.
- [12] 周旭廷, 刘剑琴. 3D 点云测量中的点云滤波 [J]. *计算机时代*, 2022, **40**(12): 70–72.
- [13] 赵德鹏, 刘永生, 赵涵. 基于统计滤波与双边滤波的点云降噪算法 [J]. *现代机械*, 2024, **51**(2): 35–39.
- [14] 姚连璧, 陈启超, 吴杭彬, 等. 一种利用隧道环缝的移动激光测量系统里程校正方法: CN201810054838.7 [P]. 2021–09–03.
- [15] 袁琴, 许正文, 姚连璧. Tlsd 移动激光扫描系统与应用 [J]. *测绘技术装备*, 2021, **23**(4): 1–6.

(上接第 6 页)

- [5] Fulk C, Radford W, Buell D, et al. State-of-the-Art HgCdTe at Raytheon Vision Systems [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(9): 2977–2980.
- [6] 田震, 宋淑芳, 邢艳蕾, 等. 甚长波碲镉汞红外探测器制备研究 [J]. *激光与红外*, 2022, **52**(10): 1527–1531.
- [7] 郝斐, 折伟林, 杨海燕, 等. 高质量碲镉汞双层异质结材料制备 [J]. *激光与红外*, 2024, **54**(8): 1258–1262.