

铁路隧道点云数据特征提取及侵限检测

韩 军^{1,2,3}

¹兰州交通大学, 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州

²地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州

³甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州

Email: 1668744290@qq.com

收稿日期: 2021年4月1日; 录用日期: 2021年4月20日; 发布日期: 2021年4月27日

摘 要

本文利用三维激光扫描仪对内蒙古某铁路隧道段进行隧道点云测量, 首先对三维激光扫描仪的测距精度进行实验分析, 随后基于隧道点云数据, 实现了对铁路钢轨、隧道横断面等隧道点云特征的快速提取。再基于钢轨轨面点云建立限界检测坐标系, 实现了隧道的限界检测, 对铁路设施维护与铁路运营安全有较为重要的实际意义。

关键词

点云, 特征提取, 限界

Feature Extraction and Limit Intrusion Detection of Railway Tunnel Point Cloud Data

Jun Han^{1,2,3}

¹Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou Gansu

³Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou Gansu

Email: 1668744290@qq.com

Received: Apr. 1st, 2021; accepted: Apr. 20th, 2021; published: Apr. 27th, 2021

Abstract

This paper uses a three-dimensional laser scanner to measure the tunnel point cloud of a railway tunnel section in Inner Mongolia. First, the distance measurement accuracy of the three-dimensional

文章引用: 韩军. 铁路隧道点云数据特征提取及侵限检测[J]. 土木工程, 2021, 10(4): 329-339.

DOI: 10.12677/hjce.2021.104037

laser scanner is analyzed experimentally. Then, based on the point cloud data, this paper realizes the rapid extraction of the point cloud features of railway rails and tunnel cross-sections. Based on the point cloud of the rail surface, the boundary detection coordinate system is established to realize the boundary detection of the tunnel, which has relatively important practical significance for the maintenance of railway facilities and the safety of railway operations.

Keywords

Point Cloud, Feature Extraction, Boundary

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前铁路限界检测领域仍存在利用传统检测工具实现数据采集的情况,随着三维激光技术与摄像技术的发展,利用三维激光扫描仪与铁路摄像系统对铁路进行安全检测不仅可以检测出铁路及铁路隧道的形变信息,还可以判断是否有侵限物侵入铁路限界内[1] [2] [3] [4]。为实现铁路隧道的快速侵限检测,许多学者对铁路点云数据特征提取进行了研究。杜黎明等[5]利用平面投影法对隧道进行中轴线提取,构建断面缓冲区,最后对隧道断面拟合隧道轮廓线,并参考全站仪数据进行误差分析,实现了隧道断面提取。卢小平[6]提出了一种利用点云数据进行隧道形变检测的方法。首先通过投影获取隧道中线,其次将不同时期的隧道断面通过叠加分析来进行隧道形变检测,最后对该方法结果进行分析,证明该方法的合理性。通过对同一隧道断面的不同时间测量结果进行对比分析,得出隧道是否变形。李双[7]提出了一种根据三维不变矩进行隧道中轴线提取的方法。该方法将分割后的隧道段旋转,使隧道垂直与隧道 X 轴,并利用隧道与 X 轴夹角计算得出隧道中轴线,该隧道中轴线提取方法的优点是不受隧道姿态影响。托雷等[8]提出一种基于点云数据进行隧道断面提取的方法,首先对局部点云进行坐标转换,进而利用曲面拟合实现隧道断面的获取。最后采用随机采样一致性算法进行隧道中轴线拟合。王华[9]提出一种基于两钢轨点内插提取铁路中线的办法,利用两钢轨的钢轨距离去除噪点,再利用最小二乘法拟合钢轨内侧点云,最后通过对两钢轨内侧点云内插来实现铁路中线的提取,该方法提取隧道中线效果较好。孙森振[10]提出了一种基于地物形状特征实现点云特征约束提取的方法。首先设置一定网格尺寸,然后根据被测地物的形状特征来进行网格算子计算,最后结合被测物的强度信息实现铁路地物提取。

综上所述,相关学者利用投影法实现隧道中轴线的拟合提取,并基于隧道中轴线进一步实现点云特征提取。本文基于三维激光扫描仪进行隧道点云采集,对点云数据利用高程值与反射强度等条件实现钢轨点云特征提取,对不同厚度的隧道横截面进行对比分析。并根据隧道钢轨轨面点云建立限界检测坐标系,实现铁路隧道的限检检测,为快速实现铁路限界检测提供了思路。

2. 点云数据采集及预处理

2.1. 测距精度分析

本实验采用 Z + F IMAGER 5010C 三维激光扫描仪和全站仪实现铁路隧道数据采集,数据采集时将三维激光扫描仪沿铁轨中心线进行线性设站,实现隧道点云测量,该方案不仅可以实现数据快速扫描获取,而且保证了各测站坐标相对接近,便于后续进行各测站配准拼接处理。如图 1 设置不同的测站间距

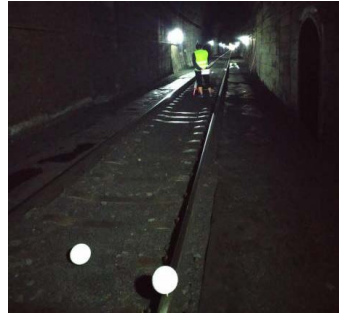


Figure 1. Tunnel data collection
图 1. 隧道数据采集

进行隧道空间数据采集。

在同等检测条件下进行数据采集，测站间距是影响检测精度的主要因素。在进行数据采集步骤前，首先基于三维激光扫描仪两种不同扫描模式 ultra high 与 super high 进行测距精度实验。即设置测距分别为 5 m、10 m、15 m、20 m、25 m、30 m、35 m、40 m、45 m、50 m、55 m、60 m 十二组不同距离进行试验，以便得出合理的测站间距。具体实验方法为：在铁轨外侧设一初始点，在铁轨内按初始点与十二组不同测距距离处进行棱镜安置，在初始点处固定全站仪并进行观测，记录各不同测距点棱镜到全站仪的距离。然后将各测点的棱镜替换为激光扫描仪配套的靶球，在原初始点位置架设三维激光扫描仪，利用三维激光扫描仪两种不同分辨率模式进行扫描，对扫描结果进行软件处理后获取靶球中心点坐标，计算得到靶球中心点到三维激光扫描仪的距离。对比三维激光扫描仪到靶球的距离与棱镜到全站仪的距离，按照中误差公式进行计算得到不同分辨率模式下各测量距离的中误差大小。中误差也叫均方根差，是衡量观测精度的一种数据标准，中误差计算公式如下。

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 / n} \quad (1)$$

其中， $RMSD$ 为中误差， Δy_i 为残差值， n 为次数。

计算在不同分辨率模式下不同测距时的精度，结果如图 2。由图 2 可知，在扫描仪使用 ultra high 模式时，扫描时间相对 super high 稍长，但测距精度较高，因此进行扫描时宜采用 ultra high 分辨率进行扫描测量。而在同一分辨率下，在测距为 20 m 以内时，三维激光扫描仪的测距精度较高，中误差小于 3 mm，该误差范围符合铁路点云数据处理的精度要求，因此可以利用 Z + F IMAGER 5010C 地面三维激光扫描仪实施隧道点云采集。

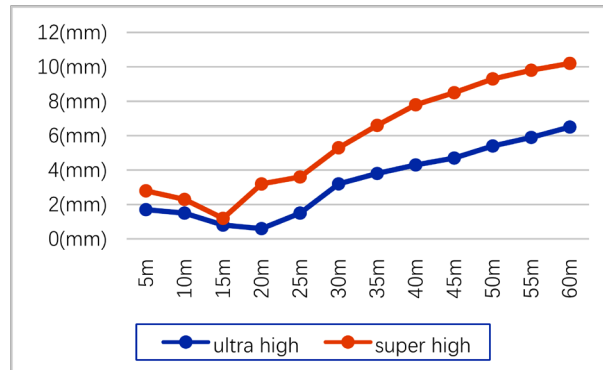


Figure 2. Ranging accuracy distribution under two resolutions
图 2. 两种分辨率下的测距精度分布

2.2. 点云数据拼接

由于三维激光扫描仪输出的点云数据,各测站点云存在不完整与错位,需要将各局部点云进行配准。拼接的目的是将所有局部点云都转换统一到同一坐标系下,方便对点云进行后续可视化操作。本文利用配套点云软件 HD Scene,对相邻测站的同名靶球作为控制点进行测站拼接,图 3、图 4、图 5 为配准前不同测站点云,图 6 为配准后点云。

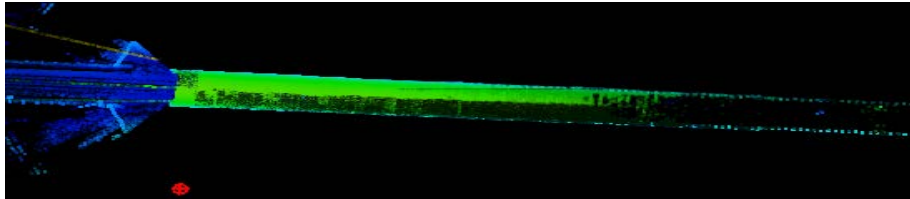


Figure 3. The first test site cloud

图 3. 第一测站点云

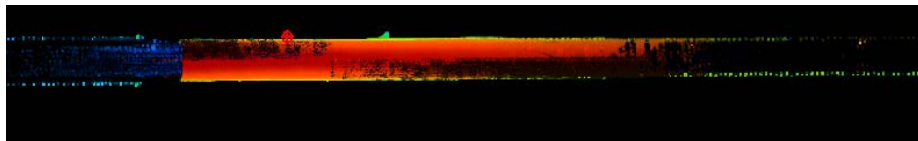


Figure 4. The second test site cloud

图 4. 第二测站点云

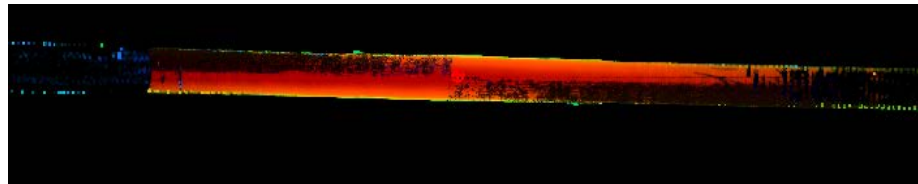


Figure 5. The third test site cloud

图 5. 第三测站点云

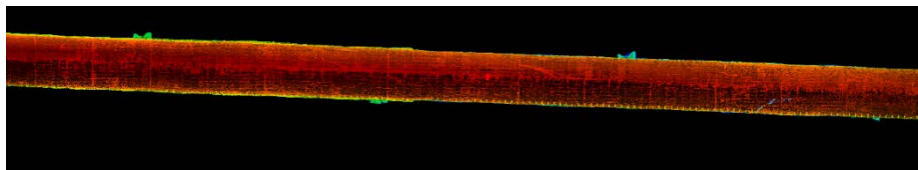


Figure 6. Point cloud after stitching

图 6. 拼接后点云

3. 点云特征提取

3.1. 钢轨轨面点云提取

点云数据包含被测物的反射强度信息,反射强度是指物体表面反射的能量,反射强度的大小不仅与物体材质、物体温度、表面颜色和表面粗糙程度有关,发射激光的波长与入射角度对反射强度也有影响。根据高程差提取后的轨道点云包含道砟及轨枕点云,而钢轨、道砟及轨枕对激光的反射强度不同,钢轨属于金属材料,且颜色较深,对激光的吸收能力较强,因此钢轨点云反射强度较低,道砟、轨枕等对激光反射能力较强。因此根据钢轨与轨道内其余物体的反射强度不同实现钢轨点云提取,提取结果如图 7、

图 8。由图 9 点云强度示意图可知，点云反射强度大小由色彩表示，颜色由蓝到绿，表示反射强度由低到高，钢轨点云反射强度低，呈深蓝色，在轨道点云数据中较为突出，便于进行钢轨点云提取。

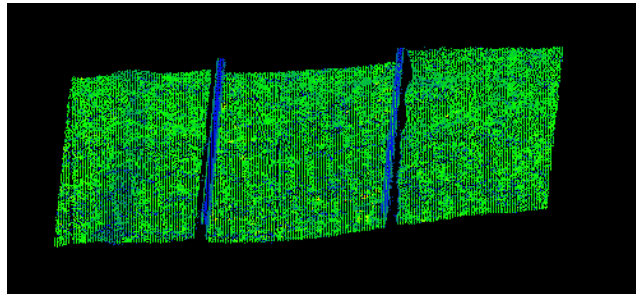


Figure 7. Rail point cloud
图 7. 钢轨点云

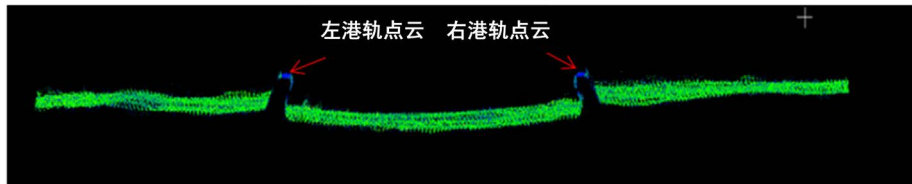


Figure 8. Front view of rail point cloud
图 8. 钢轨点云正视图

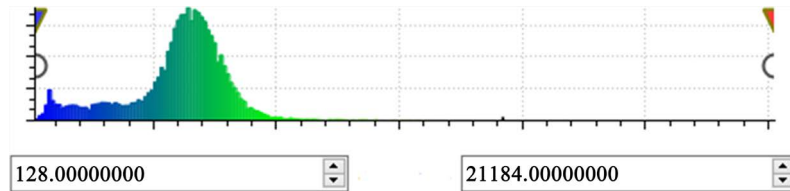


Figure 9. Point cloud intensity diagram
图 9. 点云强度示意图

由于隧道内各物体紧密嵌合，基于强度信息提取后的钢轨点云可能包含有零星的轨枕与碎石点云。钢轨数据也不单单是钢轨轨面数据，如图 10，以 60 kg/的钢轨为例，钢轨主要由轨头、轨腰、轨底三部分组成，因此钢轨点云不仅包含轨面顶点点云，还包含钢轨轨腰和轨底点云，需要基于钢轨尺寸设置约束条件，分离出轨面顶点点云。

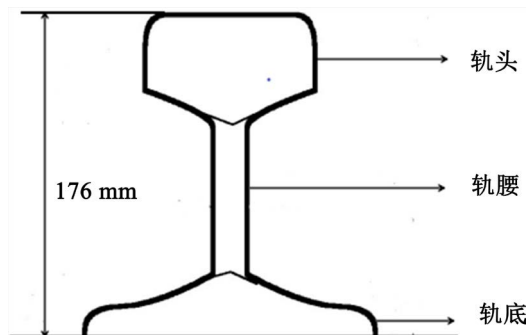


Figure 10. Rail section size
图 10. 钢轨剖面尺寸

根据钢轨的结构特点进行隧道点云约束，轨面顶点应满足以下几个条件：

- 1) 轨面点云反射强度值小于 1500。
- 2) 轨面点云下方 0.014 到 0.036 米之间必须有钢轨点云。
- 3) 钢轨结构特征明显且点云密集，任一轨面点 0.1 m 范围内必有点云。
- 4) 轨面点云上方 0.020 m 内不能有连续点云。

基于以上约束条件对隧道点云进行轨面点云提取，提取结果如图 11、图 12。

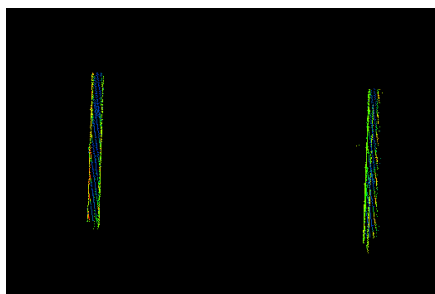


Figure 11. Top view of rail surface point
图 11. 钢轨轨面点俯视图

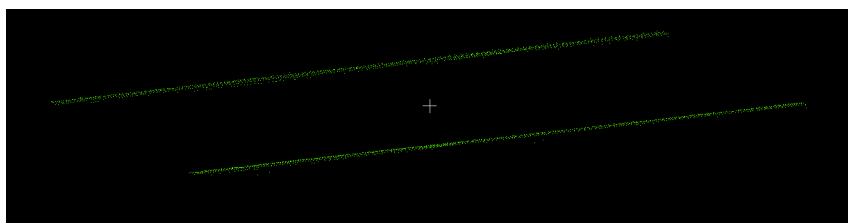


Figure 12. Side view of rail surface point
图 12. 钢轨轨面点侧视图

3.2. 隧道断面提取

对于任意的一个横断面，横断面内都是离散的点，这个时候设置断面切片的厚度 d ，则隧道 X 轴该点位置前后 $d/2$ 的范围内的点云都在该断面内，即断面截取厚度 d ，则该断面的点云的点集 $\Phi(x_i, y_i, z_i)$ 满足以下方程，点 (x_p, y_p, z_p) 为过隧道中轴线一点。

$$\frac{|y_i - y_p + x'(x_i - x_p) + z'(z_i - z_p)|}{\sqrt{1 + x'^2 + z'^2}} \leq \frac{d}{2} \quad (2)$$

因此，断面切片厚度 d 极大程度影响断面提取结果。如果断面切片厚度 d 取值过小，造成断面内包含的点云较少，断面的信息就会有遗失；而断面切片厚度 d 过大，则断面周边的无用特征信息也会被采集；而且隧道断面内的噪声点也会对信息的提取结果造成影响，因此，确定好合适的断面切片厚度十分重要。对比当厚度值 d 定义为不同厚度 3 cm、2 cm、1 cm 及 1 mm 平面时得到的隧道断面图，如图 13，由此可见 d 值越小，截面所包含的点云数据越少，当 d 为 1 mm 时，断面点云缺失较为严重，特征点较少，不足以满足侵限实验要求。当断面切片厚度为 1 cm 时，断面特征信息明显且数据量合理便于后续处理。

因此设置切片厚度 d 为 0.1 m 进行隧道断面截取，得到的隧道横截面如图 14。

由于拱形隧道断面曲线拟合困难且不易表达，为了确保拟合精度和效率，因此采用后期处理软件对

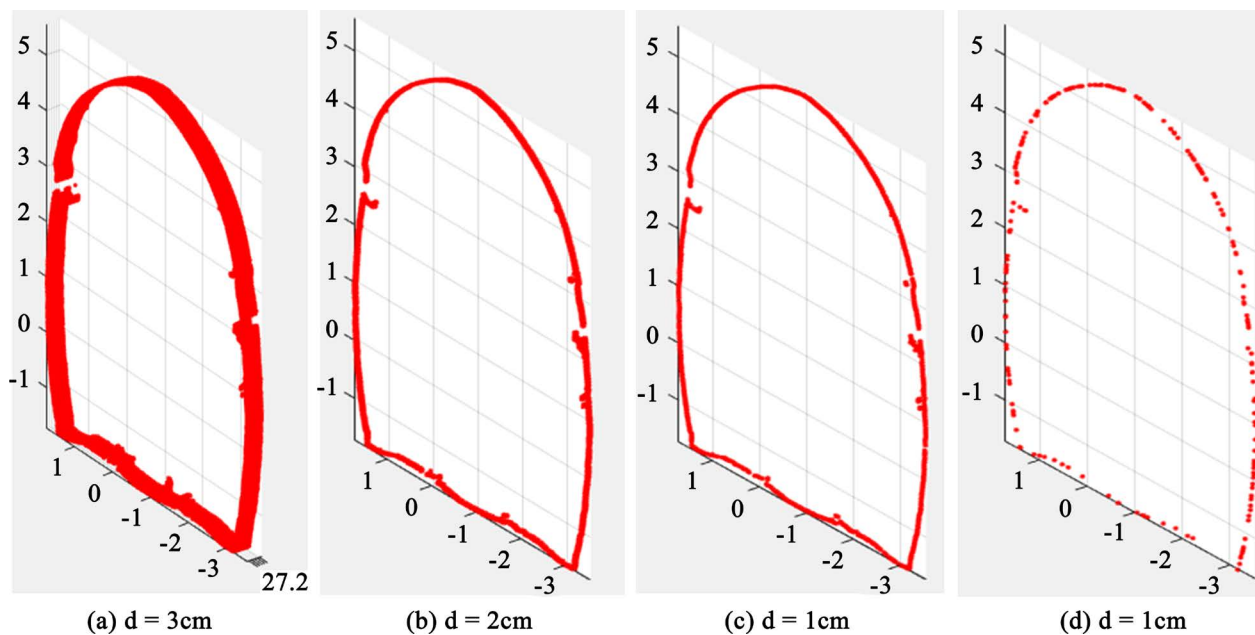


Figure 13. Sections of tunnels with different thicknesses
图 13. 不同厚度隧道断面图

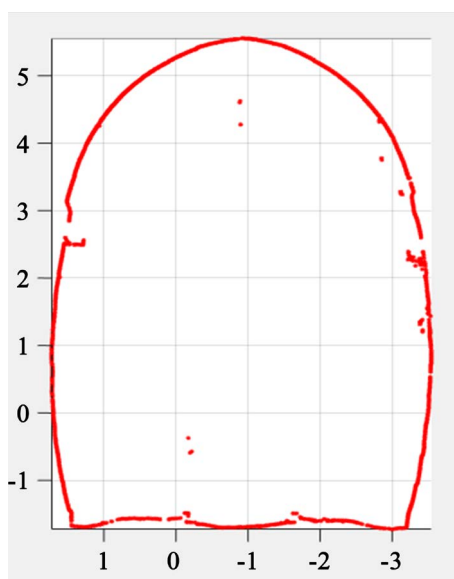


Figure 14. Tunnel cross section point cloud
图 14. 隧道横截面点云

提取厚度为 1 cm 的隧道断面进行精细化去噪，排除多余散乱点。本文采用 geomagic studio 2013 软件将隧道断面点云进行精细化人工去噪，去噪前后的断面如图 15、如图 16。

4. 限界检测

图 17 为 $v \leq 160$ km/h 客货共线铁路隧道基本建筑限界，图 18 为 $v \leq 160$ km/h 客货共线铁路隧道隧道建筑限界图(电力牵引区段)。

如图 18 所示， $v \leq 160$ km/h 客货共线铁路隧道建筑限界尺寸可视为 10 个点坐标由左下角顺时针连

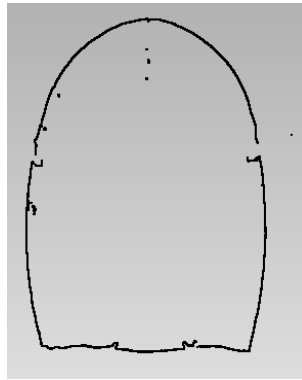


Figure 15. Section point set before fine denoising
图 15. 断面点集精细去噪前

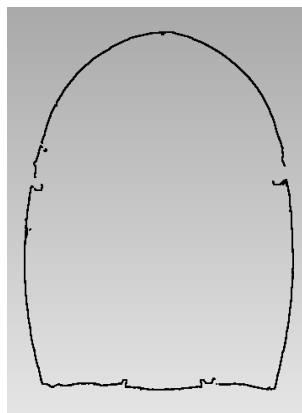


Figure 16. After fine denoising of section point set
图 16. 断面点集精细去噪后

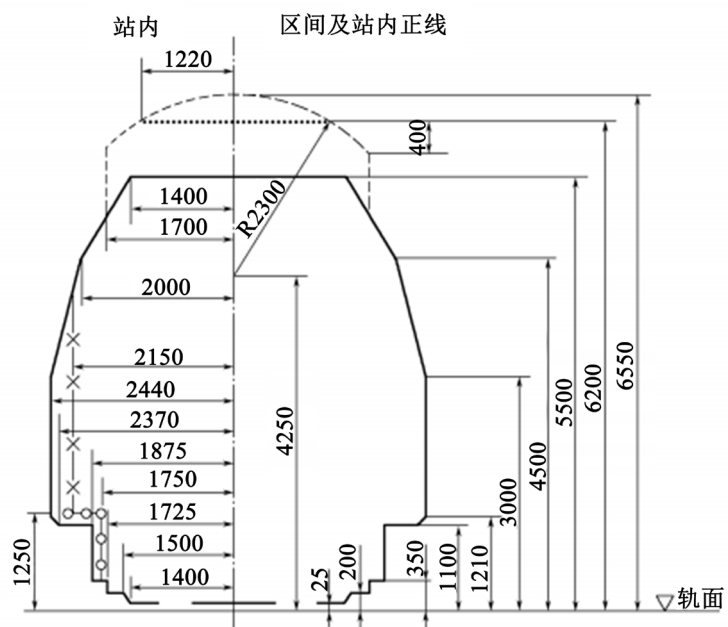


Figure 17. Basic building boundary map
图 17. 基本建筑限界图

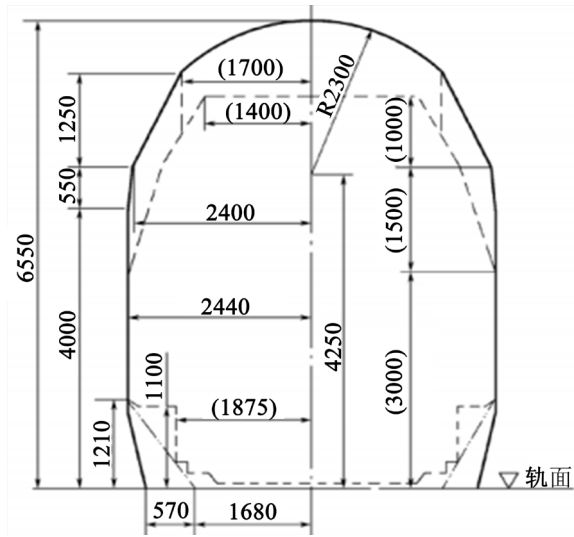


Figure 18. Tunnel building boundary map
图 18. 隧道建筑限界图

Table 1. Coordinate of building clearance point
表 1. 建筑限界点坐标

序号	水平/mm	垂直/mm	序号	水平/mm	垂直/mm
1	2250	0	6	-1700	5800
2	2440	1210	7	-2400	4550
3	2440	4000	8	-2440	4000
4	2400	4550	9	-2440	1210
5	1700	5800	10	-2250	0

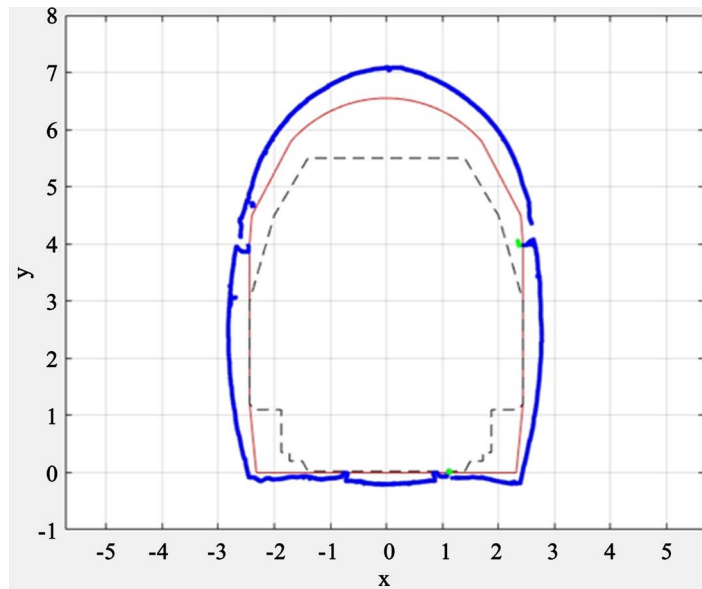


Figure 19. Invasion limit detection map
图 19. 侵限检测图

线和一圆弧构成的多边形。圆弧是圆心为(0, 4250), 半径为 2300 mm 的圆与连线多边形有交点的短圆弧, 其余 10 个坐标点的值如下表 1 所示。

本文基于提取的铁路钢轨轨面点建立限界检测坐标系, 将隧道横截面与铁路建筑限界尺寸引入坐标系中, 利用水平射线算法判断待测点是否在限界内部实现侵限检测, 侵限检测结果如图 19, 灰色虚线为铁路建筑基本限界, 红色实线为 $v \leq 160$ km/h 客货共线铁路建筑限界, 蓝色与绿色线段均为隧道点云, 绿色部分为侵限部分点云。从侵限图中可以看出, 隧道右侧壁与隧道底部有侵限情况, 侵限部分放大后如图 20、图 21 所示。

遍历限界多边形各边, 对各边距隧道侵限点最近距离值进行计算, 得出侵限值分布图。如图 22 所示。

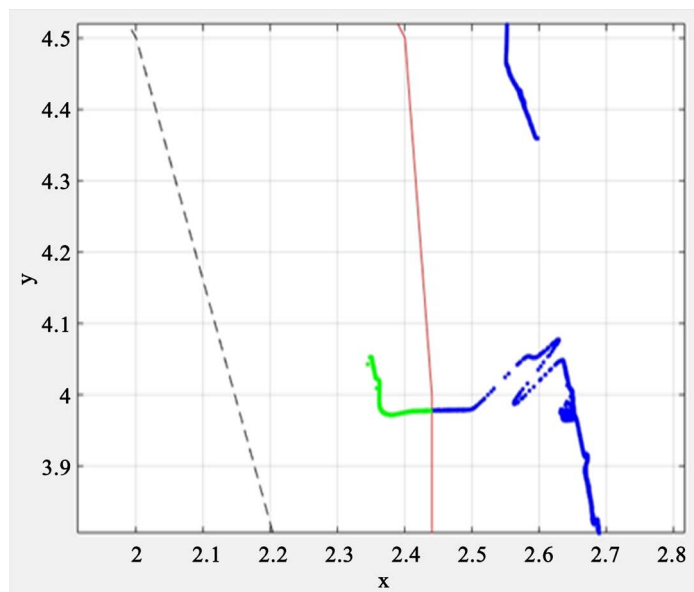


Figure 20. Invasion limit of the right side of the tunnel
图 20. 隧道右侧壁侵限部位

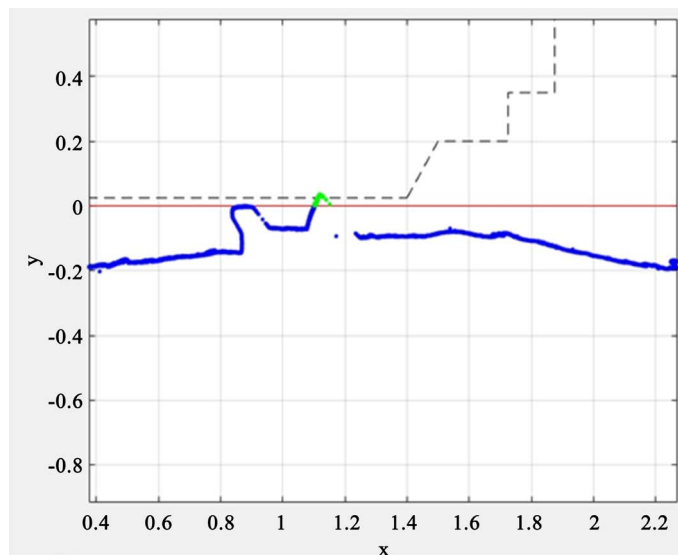


Figure 21. Intrusion limit at the bottom of the tunnel
图 21. 隧道底部侵限部位

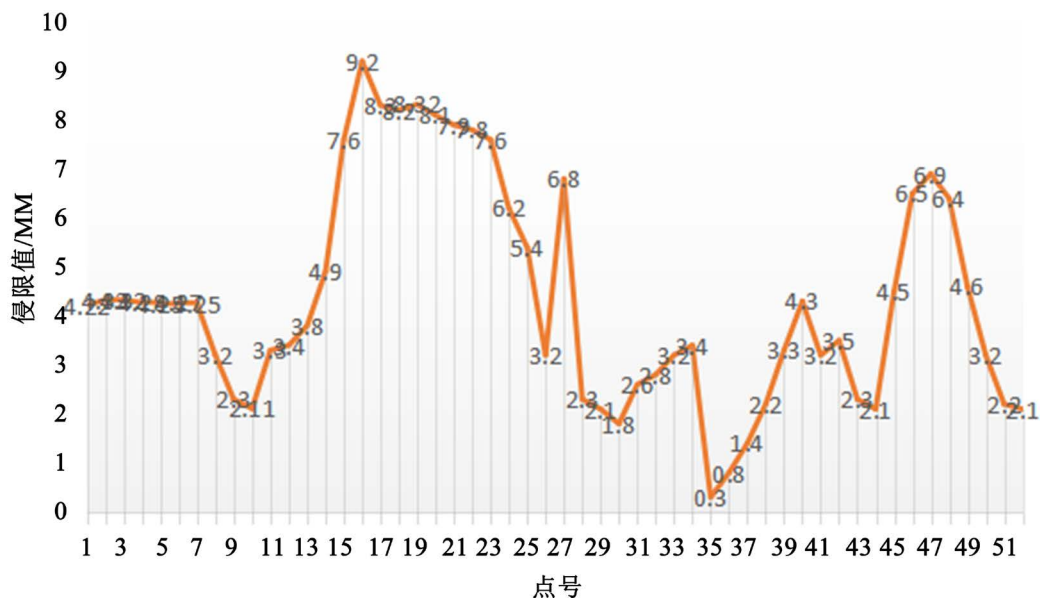


Figure 22. Distribution of invasion limit

图 22. 侵限值分布

5. 结论

本文根据内蒙古某铁路隧道，首先对三维激光扫描仪的测距精度进行分析，随后利用高程差、强度信息与钢轨形状尺寸等多约束条件对铁路钢轨轨面点云进行提取，钢轨点云特征提取效果较好。最后基于钢轨轨面点云建立限界检测坐标系，将提取的隧道断面置于限界检测坐标系内进行隧道的限界检测。经限界检测得出，该隧道的侵限主要是隧道右侧壁的线缆及钢轨边的仰拱，该处理方法不仅可以得出侵限值的具体部位，而且计算出了具体的侵限值大小，因此，在隧道维修与管理过程中，应重点对隧道壁与轨底部位进行检测与维护。

参考文献

- [1] 张浩然, 王超. 高站台限界测量车在合肥南站限界管理中的应用[J]. 安徽建筑, 2020, 27(12): 167+177.
- [2] 张琰, 孔祥思. 移动激光扫描技术在地铁隧道限界检测中的应用[J]. 北京测绘, 2020, 34(6): 868-871.
- [3] 高晶. 基于激光测距的隧道结构限界检测系统[J]. 山西电子技术, 2020(3): 55-57.
- [4] 陈锴迪. 隧道线路异物检测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [5] 杜黎明, 钟若飞, 孙海丽, 等. 移动激光扫描技术下的隧道横断面提取及变形分析[J]. 测绘通报, 2018(6): 61-67.
- [6] 卢小平, 王宇飞, 杜耀刚, 等. 利用点云构建隧道断面的形变监测方法[J]. 测绘通报, 2016(1): 80-83.
- [7] 李双. 基于三维激光扫描技术的隧道连续断面提取及变形分析[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2015.
- [8] 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+185.
- [9] 王华, 韩祖杰, 王志敏. 一种高分辨率影像上铁路中心线提取的方法[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(5): 761-765.
- [10] 孙森震, 卢小平, 杨尚波, 等. 一种基于空间网格的地物要素点云提取方法[J]. 测绘工程, 2015(7): 53-57.