

地铁安全监测中基于三维激光扫描技术的 隧道形变分析方法

葛山运

(重庆工程职业技术学院, 402260, 重庆//工程师)

摘 要 基于三维激光扫描技术所获地铁形变监测数据的海量点云特性,提出隧道形变分析新方法。详细阐述了建立参考系、点云分割、格网化、差值计算、形变分析等步骤,并以正在监测的地铁隧道为例进行试验分析。试验分析结果发现:隧道形变分析新方法能确定隧道形变位置和形变大小,并将结果直观显示出来,能有效地衡量隧道形变。

关键词 地铁;安全监测;三维激光扫描技术;隧道形变

中图分类号 U456.3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.05.016

Analysis Method of Tunnel Deformation Based on 3D Laser Scanning Technology in Metro Safety Monitoring

GE Shanyun

Abstract According to the features of massive point clouds by applying 3D laser scanning technology to subway deformation monitoring, a new method to analyze the tunnel deformation is proposed. Different steps including establishment of reference system, point cloud segmentation, gridding, difference calculation and deformation analysis are elaborated in detail, a subway tunnel being observed is tested and analyzed. The results show that the new tunnel deformation analysis method proposed in this paper can determine the location and size of the tunnel deformation, directly show the detection result and effectively measure the tunnel deformation.

Key words metro; safety monitoring; 3D laser scanning technology; tunnel deformation

Author's address Chongqing Vocational Institute of Engineering, 402260, Chongqing, China

为了保障地铁的安全,需要对地铁进行全方位的安全监测^[1-3],以保障人民生命财产安全。三维激光扫描技术的出现改变了数据采集方式^[4]。该技术能获得整个测区高密度、高精度的点云数据,具有扫描速度快、精度高、不接触被测物体及获得

点云数量多等特点^[5],让人们能够快捷地获取物体的三维数据。将三维激光扫描技术应用于地铁隧道监测成为国内外研究的热点^[6-9],为了确定隧道的形变,需要在较短的时间内采集大量的隧道表面点。三维激光扫描技术的特点完全能够满足这一要求,可为了解隧道整体形变和隧道内部物体的分布提供丰富的信息。

近年来,国内学者对三维激光扫描技术及其在隧道形变监测中的应用进行了较深入的研究。文献[10-12]采用传统单点采集监测点时提取的断面信息、收敛信息等作为评价指标。三维激光扫描仪能够获得密度高、数据量大的海量隧道表面点云,对于采用新的理论和方法衡量隧道形变具有重要的意义。为了提高三维激光扫描技术应用于地铁隧道监测的实用性和精度,弥补现有方法的不足,本文提出了一种基于点云特性的隧道形变分析方法。

1 衡量隧道形变分析方法

本文提出一种适合隧道点云的形变分析方法:先通过建立参考系、分割点云及对点云进行格网化来获得隧道三维状态,再通过多期监测数据处理获得隧道的形变。

1) 建立参考系。采用三维激光扫描仪监测隧道时,无固定监测点位,每次扫描到点云的数量和位置存在差异,使得多期监测数据对比分析存在很大问题。解决三维激光扫描技术应用于形变分析的关键就是建立一个参考面,使所有点云能够参照该参考面确定其相对位置。

2) 分割点云。参考面建立以后,将隧道点云依据参考面进行分割,为隧道点云格网化做准备。格网化插值只能对面域内的点计算,需要将隧道点云切开为至少上下两个面域。实际应用中要根据数

据量合理确定切片。

3) 点云格网化内插。格网化内插作为一种数据转换方法,在建立等高线、建立数字高程模型、数据滤波等方面发挥了重要的作用^[13]。格网化的好处就是能利用所有点云,能采用统一的格网固定数据位置,能直接对比计算,可以明确形变位置。点云由于其自身特点,一般使用分块插值,分块插值中常用的插值方法有加权反距离插值法,克里格插值法、最小曲率插值法、最邻近点插值法、三角形剖分插值法、多项式回归插值法等。格网化方法众多,不同方法的数学模型不同,遍历点云的方式也不同,得到的格网化结果也存在差异,实际应用中要根据不同的数据类型选择合适的格网化方法。试验发现克里格插值更适合隧道点云。

4) 隧道形变分析。采用相同的方法对不同监测时期的数据分别进行上述处理,保证参考系相同,点云分割位置相同,格网化方法相同,格网的边界点相同。当隧道发生形变时,就体现在格网化的结果上,将多次格网化结果差值计算,本次格网化结果与首次作差得到隧道的总形变量,本次格网化结果与上次比较得到本次形变量。

2 实例分析

2.1 数据采集

本文选择了正在实施监测的某新建地铁区间项目进行数据采集。按照地铁保护条例,应对该区段进行地铁保护监测。采用 Trimble GX 3D 三维激光扫描仪对监测区段的隧道进行了两期的数据采集,并采用基于大地控制点的配准方法,以减小数据采集误差。经扫描后获得的首次扫描隧道部分原始点云如图 1 所示,其中点云数据量为 119 571 个。

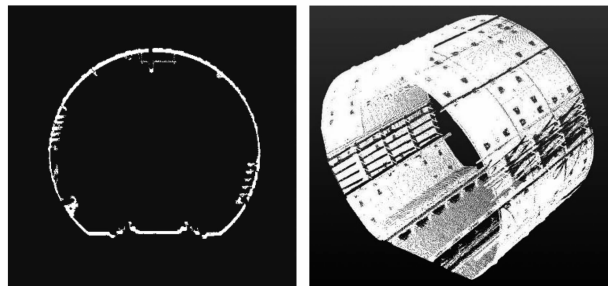


图 1 原始点云

从图 1 可以看出,地铁隧道内布设了供电电

线、水管、地铁轨道等配套设备,以及隧道内衬拼接产生的凹凸等。可见,点云表现了丰富的隧道表面信息。试验采集了两期监测数据,间隔时间为一个月。在这段时间内,还采用传统监测方法监测了 15 期。监测结果如下:隧道底部相对沉降量为 $-0.3 \sim 0$ mm,隧道收敛相对形变量为 $+4.0 \sim -1.0$ mm,水平位移最大点的位移量为 $(+0.3$ mm, -0.2 mm),各断面形变量值最大的监测点形变量范围为 $+3.0 \sim -1.0$ mm。

由于扫描得到的点云是不完整的,故需要优化处理。点云阶段的预处理包括点云的裁剪、采样、去噪及修补等内容。扫描隧道内壁时容易受到设备的遮挡,存在多余的扫描点和扫不到的盲区,需要进行删除和补洞等处理,并且需要对其整体滤波。

点云预处理的各过程及作用为:

- 1) 着色点:使得点云能够更清楚地显示。
- 2) 删除点(包括体外孤点、非连接项、冗余点):删除冗余点,评估点的邻近性,选择和删除距离较远的点;通过计算点与模型的距离,判断并删除体外孤点。
- 3) 减少噪声:减少因扫描误差引起的点云噪声。
- 4) 采样:使点云排列更规律,并压缩点云数据。
- 5) 补洞:选择孔洞边缘点云,进行孔洞填充,并通过参考平面和参考曲面添加点。
- 6) 封装:由点云自动生成网格。

预处理后得到的点云数据较好,能够满足三维建模和形变分析等后处理要求。

2.2 隧道形变分析

2.2.1 建立参考系

隧道形变分析要先建立参考系。隧道点云参考面的建立要根据隧道特征确定。隧道在建造时会受不同开挖方式影响,在运营期还会受复杂外界因素的影响,因而隧道结构一般为非规则的椭圆形结构,扫描得到点云也相应为非规则椭圆形。

试验数据的隧道点云已经转换到监测系统内的隧道坐标系。以隧道前进方向为 X 轴,铅垂方向为 Z 轴,建立右手系坐标,并依据该坐标系建立参考系。

2.2.2 分割点云

由于格网化插值适用于面域内的点,所以需要将隧道点云切开为至少上下两个面域。试验时,从隧道平行于 $X-Y$ 平面的直径方向将其切为图 2 所示

两个面域的点云,其中点云一数据量为 73 810 个,点云二数据量为 45 761 个。

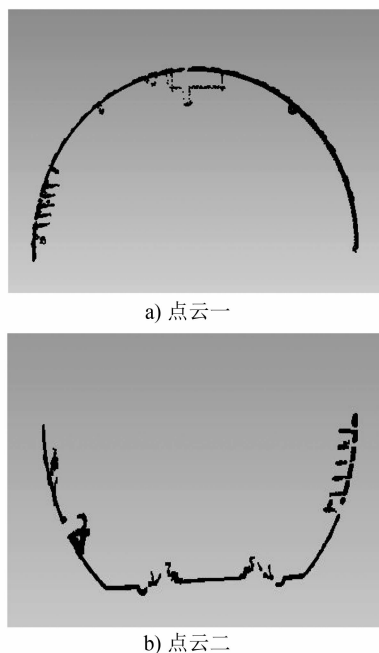


图2 隧道点云分割

2.2.3 格网化插值处理

点云分割以后就可以对点云进行格网化插值处理。格网化的关键是确定网格大小,网格太大和太小都不利于表现隧道,需试算分析。将点云一格网设置为 69×100 个,该格网范围为 $X(-2.728\ 0 \sim +2.872\ 5)$, $Y(10.541\ 0 \sim 18.648\ 6)$,网格大小为

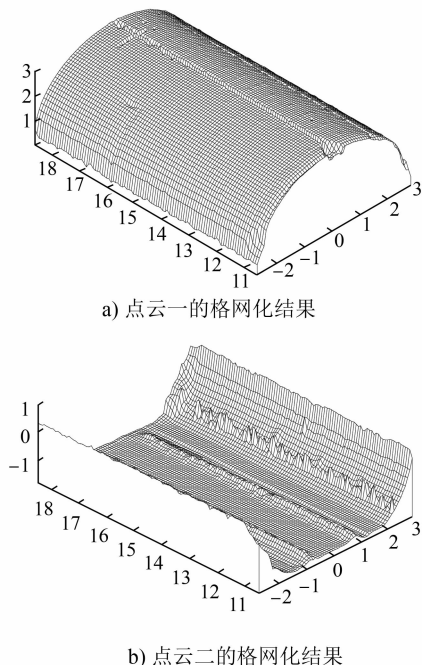


图3 第一次监测数据的格网化结果

$0.082\ 4\ \text{m} \times 0.081\ 9\ \text{m}$,采用克里格插值法进行格网化,结果如图 3 a) 所示;将点云二格网设置为 69×100 个,该格网范围为 $X(-2.723\ 0 \sim +2.852\ 0)$, $Y(10.478\ 0 \sim 18.554\ 0)$,网格大小为 $0.082\ 0\ \text{m} \times 0.081\ 6\ \text{m}$,采用克里格插值法进行格网化,结果如图 3 b) 所示。

2.2.4 隧道形变分析

为了确定隧道形变,需要定期对隧道进行扫描,并将一个月后的第二次扫描数据与首次的扫描数据进行对比分析。第二次扫描数据处理方法与首次相同,控制其他变量不变,仅改变观测数据。第二次监测数据的格网化结果如图 4 所示。

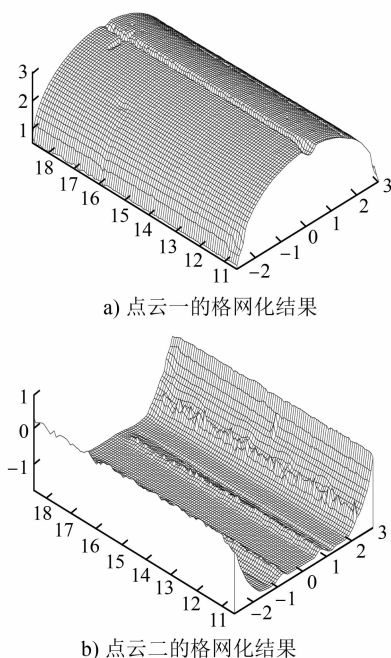


图4 第二次监测数据的格网化结果

两次格网化采用的格网化方法相同,格网大小相同,隧道点云数据范围相同,但点云数量不同。若隧道存在形变,在进行格网化时就可以发现。

对比图 1 及图 2 可以发现,两期监测数据的格网结果存在差异,但不明显。这是因为隧道形变量不大。现在将两期格网的数据进一步作差计算,得到格网化后两期监测数据格网点的差值,即隧道在数值方面的形变量,如图 5 所示。图 5 中,格网一和格网二的形变量均主要在 0 值附近震荡,符合隧道的实际变化情况。

基于格网的形变量建模,即可获得隧道形变的三维显示如图 6 所示。图 6 可以直观反映隧道的形

变大小和变化位置,其结果清晰明显,验证了基于隧道参考面格网化插值方法的有效性和优势。

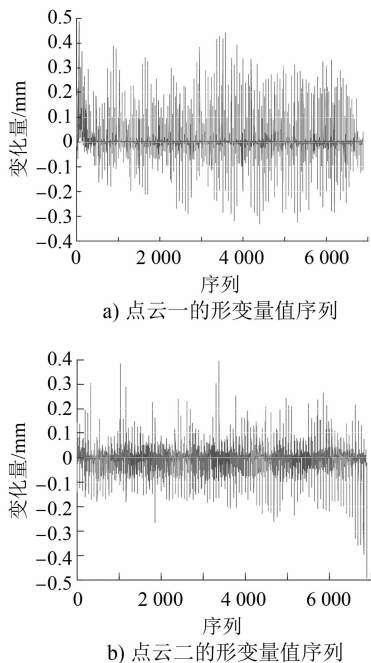


图5 点云的形变量值

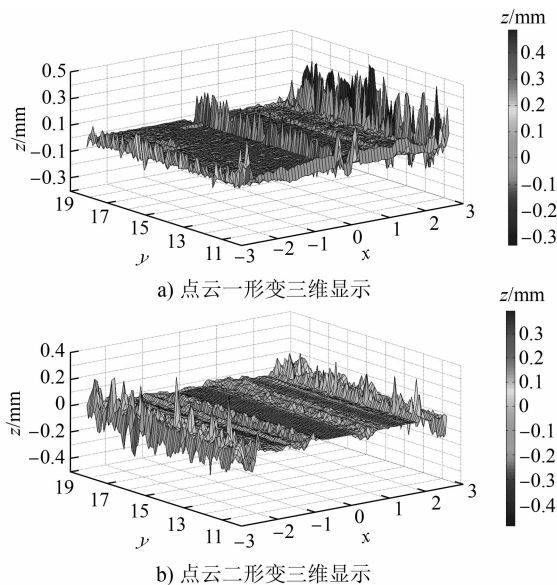


图6 隧道点云形变显示

3 结语

将三维激光扫描技术应用于隧道监测,具有成本低、可重复性高、监测周期短、精度高、可获得三维立体实景等优点,可以避免传统方法所处的恶

劣工作条件,可以避免地铁监测与运营的冲突,能够提高隧道形变监测的速度和效率,能够在时空上进行整体监测与分析,弥补传统监测方法的不足。本文的研究成果和结论可为隧道形变监测和形变分析提供新的思路,也为应用三维激光扫描技术进行其它类似工程的形变监测与形变分析提供参考。

参考文献

- [1] 邹积亭,江恒彪.北京地铁沉降监测方法及数据处理[J].工程勘察,2006(1): 43.
- [2] 段伟,赵兵帅,陆晓勇,等.地铁隧道全断面监测数据的建模及断面拟合算法的研究[J].勘察科学技术,2016(2): 16.
- [3] 李宗平,张永涛,杨钊,等.三维激光扫描技术在隧道形变与断面检测中的应用研究[J].隧道建设,2017(3): 331.
- [4] 张宏伟,赖百炼.三维激光扫描技术特点及其应用前景[J].测绘通报,2012(增刊1): 320.
- [5] 董秀军.三维激光扫描技术获取高精度DTM的应用研究[J].工程地质学报,2007(3): 428.
- [6] KIM J R, YOO H S, KWON S W, et al. Integrated Tunnel Monitoring System Using Wireless Automated Data Collection Technology [C]//EDMUNDAS K Z, ARTURAS K, MIROSLAW J S. Proceedings of the 25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Vilnius, Lithuania: Technika Publisher, 2008.
- [7] GORDON S J, LICHTI D D, STEWART M P, et al. Modeling Point Clouds for Precise Structural Deformation Measurement [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, 35 (7): 954.
- [8] 潘国荣,张超.三维激光扫描在地铁隧道形变监测中的开发应用[J].东华理工大学学报(自然科学版),2016(增刊1): 1.
- [9] SOUDARISSANANE S, LINDENBERGH R, MENENTI M, et al. Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points [C]//ISPRS. Proceedings of ISPRS Workshop Lasers Scanning 2009. Paris: ISPRS, 2009.
- [10] 谢雄耀,卢晓智,田海洋,等.基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面形变测量方法[J].岩石力学与工程学报,2013(11): 2214.
- [11] 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(2): 171.
- [12] 程效军,李杰.具有最小截断二乘稳健初值的点云平面拟合算法[J].同济大学学报(自然科学版),2015(9): 1419.
- [13] 王涛,田林亚,侯建梅,等.点云格网化滤波方法及其在隧道形变监测中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2018, 46(5): 451.

(收稿日期:2018-11-07)