

引文格式: 朱海雄, 隋立春, 鲁凯翔. 三维激光扫描技术在危岩体变形监测中的应用[J]. 测绘通报, 2017(11): 68-71. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2017.0350.

# 三维激光扫描技术在危岩体变形监测中的应用

朱海雄<sup>1</sup>, 隋立春<sup>1</sup>, 鲁凯翔<sup>2</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 地理国情监测国家测绘地理信息局工程技术研究中心, 陕西 西安 710054)

**摘要:**提出了一种基于三维激光扫描技术的高危岩体表面变形监测方法。该方法首先计算第一期点云数据参考点的法向量,并基于此点的法向量构建圆柱体;然后在圆柱体内计算第二期点云数据的区域重心,以此作为危岩体表面两期或多期变形比较的依据。将该方法应用于重庆武隆-南川地区鸡冠岭危岩体的变形监测与分析,获得了初步满意的结果。

**关键词:** 三维激光扫描;点云;变形监测;圆柱体;区域重心

中图分类号: P258

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2017)11-0068-04

## Application of Terrestrial 3D Laser Scanning Technology in Deformation Monitoring of Dangerous Rock Mass

ZHU Haixiong<sup>1</sup>, SUI Lichun<sup>1</sup>, LU Kaixiang<sup>2</sup>

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Changan University, Xi'an 710054, China; 2. National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation Engineering Research Center of Geographic National Conditions Monitoring, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In this paper, a method of surface deformation monitoring of high risk rock mass based on 3D laser scanning is proposed. Firstly, the normal vector of the reference point of cloud data is calculated and the cylinder is constructed based on the normal vector of this point. And then calculating the regional center of gravity of the second-stage cloud data in the cylinder as the basis for comparing the two or more stages of the surface of the dangerous rock. We apply this method to Chongqing wulong-nanchuan district Jiguanling dangerous rock mass deformation monitoring, which gets a preliminary satisfying result.

**Key words:** 3D laser scanning; point cloud; deformation monitoring; cylinder; region gravity center

三维激光扫描技术具有快速、高精度、非接触获取研究物体表面空间信息的特点<sup>[1]</sup>。它的发展与应用标志着测绘技术的又一重大突破。目前,该技术已广泛应用于各个领域<sup>[2-4]</sup>。

近年来,伴随着频发的滑坡、崩塌等各类自然灾害,变形监测逐渐成为学者们研究的热点方向,因此应用三维激光扫描技术进行变形监测工作也应运而生,并取得了丰富的研究成果。罗德安等<sup>[5]</sup>探讨了三维激光扫描技术在变形监测领域的可行性、存在问题和优势,认为应用三维激光扫描技术进行整体变形监测是可行的;朱磊等<sup>[6]</sup>总结了三维激光扫描技术在变形监测中常用的方法;丁延辉等<sup>[7]</sup>提出了一种基于三维激光扫描技术的建筑物变形监测方法,该方法可以对建筑物进行沉降监测、倾斜分析、整体变形监测;徐进军等<sup>[8]</sup>将三维激光扫描技术引入滑坡的变形监测与分析;董秀军等<sup>[9]</sup>将三维激光

扫描技术应用于高陡边坡地质调查中,完成了地质结构面产状测量等工作。

目前,根据国内外学者对三维激光扫描技术在危岩体变形监测领域的应用研究,主要有以下3种方法:DEM作差法、点-模型法、点-点法。

DEM作差法首先建立两期点云数据的DEM模型,然后对格网进行逐单元地差分即可获取各格网单元的偏移值。其优点在于除高程方向形变量外,还能获取滑坡体积等其他信息,适用于大区域平坦范围内的变形监测。由于危岩体表面与地面接近垂直、表面粗糙度较大,存在以下问题:首先,应用该方法生成的危岩体DEM精度不高;其次,对两期DEM模型的差分仅能获取沿高程方向的变形量,并不能反映岩体表面真实的三维变形情况;最后,大区域点云数据生成DEM的过程较为复杂,会降低点云数据的后处理效率。

收稿日期: 2017-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(41372330)

作者简介: 朱海雄(1993—),男,硕士生,研究方向为点云数据处理。E-mail: 951755015@qq.com

针对 DEM 作差法处理效率低的缺点,点-模型方法则只需建立参考点云的表面模型,通过点-面之间的距离来反映变形量,在一定程度上提高了计算效率。但是,受危岩体表面粗糙度、DEM 精度的影响,该方法计算得到的形变量并不是两个点云之间的实际距离,存在较大的误差,通常只当作参考值。

点-点方法是建立在点云的八叉树索引基础上的直接比较算法,如图 1 所示。

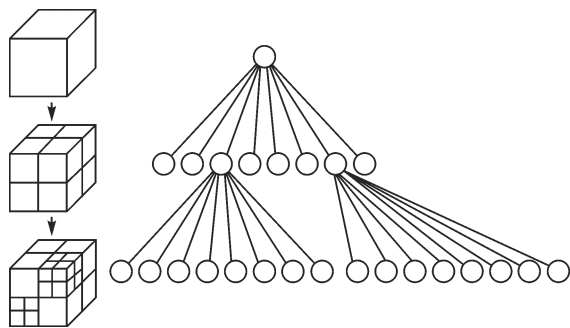


图 1 八叉树递归划分原理

该方法认为位于两期点云结构相似的八叉树单元内的点是可比较的,依据最小距离准则可以提取出相应的点对作为后期变形比较的依据。D. Girardeau-Montaut 应用这种方法完成了对野外边坡的变形监测<sup>[10]</sup>,试验结果表明该方法受点云表面粗糙度影响大,并且在第二期点云中总能找到与第一期点云相对应的点,因此该距离不一定代表表面发生的真实变形。

针对上述 3 种常用方法在高危岩体变形监测中的不足,本文提出一种基于点云法向量的比较算法。该算法以参考点云的法向量为轴构建圆柱体,在圆柱体内通过计算区域重心方法确定第二期点云的位置,能够提取出高危岩体表面出沿法线方向的三维变形信息。

## 1 基于点云法向量的比较算法基本原理

### 1.1 点云法向量的估计原理

法向量是点云数据的一个重要几何性质。点云作为一个离散点集,直接获取该点处的法向量是不实际的。根据 Hoppe 等<sup>[11]</sup>基于有向距离函数的表面重建中采用了局部切平面拟合的方法来估计某点处的法向量,其原理如图 2 所示。

对一个点  $i$  进行  $k$  邻域搜索,依据距离最小二乘准则计算出该点处的切平面,平面方程可以表示为

$$P(\mathbf{n}, d) = \operatorname{argmin}_{(\mathbf{n}, d)} \sum_{i=1}^k (\mathbf{n} \cdot \mathbf{p}_i - d)^2 \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{n}$  为平面  $P$  的法向量;  $d$  为  $P$  到坐标原点的距离;  $\operatorname{argmin}$  表示目标函数取最小值时的变量值。通过计算可得,  $N$  个点的质心在平面  $P$  上,且法向量满足  $\|\mathbf{n}\|^2 = 1$ , 因此估计点云法线的问题转化为分析一个协方差矩阵的特征向量或特征值的问题,该协方差矩阵由搜索的  $k$  邻近元素构建,其最小特征对应的特征向量即为该点处的法向量。

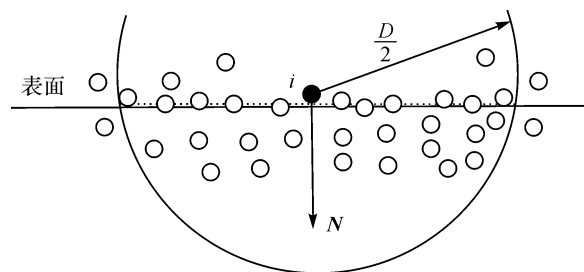


图 2 法线估计原理

$$C = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}}) \cdot (\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})^T \quad (2)$$

$$C \cdot \mathbf{v}_j = \lambda_j \cdot \mathbf{v}_j, \quad j \in \{0, 1, 2\} \quad (3)$$

式中,  $k$  是邻近点  $\mathbf{p}_i$  的数目;  $\bar{\mathbf{p}}$  表示三维质心;  $\lambda_j$  是协方差矩阵的第  $j$  个特征值;  $\mathbf{v}_j$  是第  $j$  个特征向量。

### 1.2 变形监测原理

传统的变形监测工作需要布设固定的监测点,通过对监测点连续观测获取的多期三维坐标数据进行处理与分析,提取研究对象的变形信息。应用三维激光扫描技术进行变形监测时,只需在监测周期内对危岩体进行多次扫描,就可以获取危岩体表面高精度的三维点云数据;通常将第一次扫描的点云数据定义为参考点云,第二期点云数据定义为比较点云;参考点云中的每个点称为参考点,与参考点对应的比较点云中的点称为比较点。其主要思想是通过点云数据处理确定比较点相对于参考点的空间位置来计算变形量。实际上,由三维激光扫描仪获取的参考点云和比较点云之间往往不存在同名点,因此对于某一参考点  $i$ ,点-点方法通过最小距离准则确定比较点  $i$  的空间位置,然而受点云表面粗糙度的影响,据此计算出的变形量并不能反映该点处的真实变形情况。因此,本文算法通过参考点的法向量构建圆柱体,然后在圆柱体内计算比较点云的重心来确定比较点的位置,其原理如图 3 所示。

对于任一参考点  $i(X, Y, Z)$ , 根据以该参考点为球心、半径为  $R$  的球体范围内的邻域点,构建邻域点集的协方差矩阵,求得其最小特征值对应的特征向量即为该参考点的法向量  $\mathbf{N}$ ; 然后以该法向量

$N$  为轴,底面半径为  $d/2$ 、高为  $H$  构建圆柱体,该圆柱体内包含参考点集和比较点集两部点集,此时参考点  $i$  位于参考点集内,比较点的位置通过计算比较点集投影重心的方法来确定。首先将圆柱体内的比较点集投影到圆柱体的轴即法向量  $N$  上,然后计算这些投影点的重心坐标,将该重心点认为是与参考点  $i$  相对应的近似同名点;最后计算该近似同名点对之间的距离即为该参考点处的变形量。显然,参考点云中的每个参考点都存在一个变形量,且其变形方向与参考点处的法向量方向保持一致。

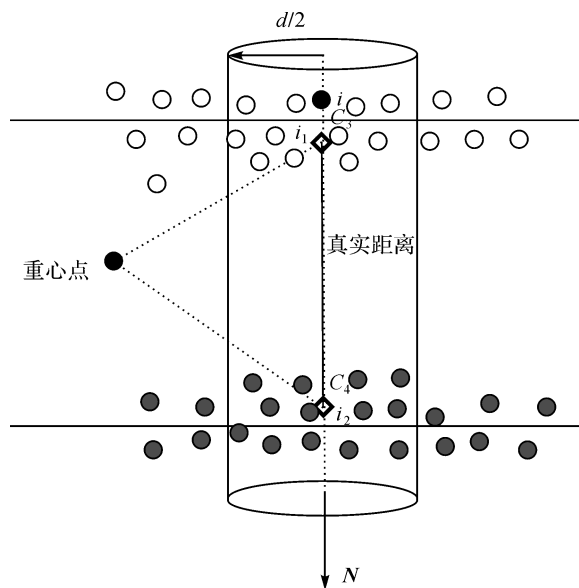


图3 形变量计算原理

## 2 试验与分析

### 2.1 研究区概况

鸡冠岭位于重庆市武隆兴顺乡乌江流域,地形陡峭,地下煤炭资源丰富,具有上硬下软的地质结构<sup>[12]</sup>,在地质构造上处于背斜,节理裂隙发育丰富。1994年4月30日,武隆县乌江左岸发生鸡冠岭崩塌,体积400余万  $m^3$ ;2001年5月1日,武隆县城江北西段发生高切坡崩塌,体积1.6万  $m^3$ ;2009年6月5日,重庆武隆鸡尾山发生大型滑坡-碎屑流,滑坡-碎屑流长2150 m,体积72 800  $m^3$ 。大规模地质灾害的频繁发生,对重庆的社会经济可持续发展产生了深远影响。

### 2.2 试验分析

在2012年5月—2013年11月期间,使用徕卡HDS8800三维激光扫描仪对鸡冠岭危岩体进行两次扫描,通过扫描数据展开变形监测的具体工作。首先,对原始点云数据进行滤波、配准等预处理操

作;然后通过 Cyclone 软件在两期点云数据上截取同一区域的两部分点云;最后,以2012年5月危岩体数据为参考点云,2013年11月危岩体数据为比较点云,应用本文方法选取合适的参数进行试验,分析监测周期内比较点云相对于参考点云的变形情况。若计算的形变量均值大于0,说明该危岩体有向外扩张的趋势;反之,则说明其存在向内收缩的趋势。参数选取:法线估计半径  $R=0.5$  m,圆柱体半径  $r=0.3$  m,圆柱体高  $H=0.15$  m,降采样间隔  $s=0.2$  m。其中形变误差采用的公式为标准偏差

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2}{N}} \quad (4)$$

均方根误差

$$S' = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - \bar{D})^2}{N-1}} \quad (5)$$

#### 2.2.1 危岩体整体变形分析

如图4所示,在监测周期内,危岩体处于持续变化的过程,其运动方向也因分布区域表现出差异性。整个危岩体左侧呈冠状的岩体表面颜色分布以黄色为主,在2012年5月—2013年11月期间向外发生约2 cm的位移;该冠状岩体受自身内部重力和风化侵蚀作用的影响,处于不稳定状态,随时有崩落的可能。逐渐向右侧过渡,颜色由黄色变为浅蓝色,形变量也从正值逐渐过渡为负值,岩体表现出向内运动的趋势,位移为-1.3 cm。由此可知该危岩体沿  $Z$  轴正方向存在逆时针方向微小的扭曲变形,符合岩土力学中刚体变形的规律。

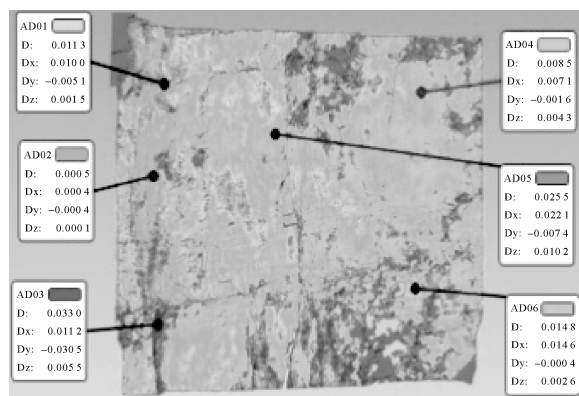


图4 危岩体形变分布

#### 2.2.2 危岩体表面特征点变形分析

在危岩体整体变形分析的基础上引入特征点上



的变形分析可以发现局部岩体的变形规律,对今后从地质学角度分析岩体变形内因具有实际指导意义。表 1 是选取 6 个特征点的三维变形信息。

表 1 特征点三维形变					m
点名	$D_x$	$D_y$	$D_z$	$D$	
A001	0.010 0	-0.005 1	0.001 5	0.011 3	
A002	0.000 4	-0.000 4	0.000 1	0.000 5	
A003	-0.011 2	0.030 5	-0.005 5	-0.033 0	
A004	-0.007 1	-0.001 6	-0.004 3	-0.008 5	
A005	0.022 1	-0.007 4	0.010 2	0.025 5	
A006	0.014 6	0.000 4	0.002 6	0.014 8	

通过对特征点在 3 个方向的形变位移的分析可知:选取的 6 个特征点在 3 个方向均存在变化,且变形分布不均匀,但存在一定规律。在同一特征点的三维变形中,沿  $X$  轴方向的平均形变量约为 1.09 cm,其中 A005 号特征点在  $X$  轴方向的变形最大约为 2.21 cm;沿  $Z$  轴方向的平均形变量最小约为 0.4 cm。在所有特征点的三维变形中,A005 特征点的变形量最大为 2.55 cm,且变形方向是向内的;A002 特征点的变形量最小,只有 0.5 mm。通过对特征点在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向及总的形变量的分析可以得出如下结论:监测周期内危岩体表面发生了毫米级的变形,特征点在  $X$  轴方向的变形量远大于在其他两个方向,符合刚体变形的规律。

3 结 语

本文提出了一种基于点云法向量的直接比较算法,试验分析表明:该算法用于高危岩体的变形监测是可行的。在技术方面突破了传统测量手段必须要直接接触的限制;在算法上避免建立表面模型,一定程度上提高了点云数据的处理效率,进一步优化了点-点方法提取近似同名点的判定准则,使得监测结果更加可靠。深入探索危岩体产生变形的内在原因,还需结合相关地质学理论进行深入分析。

在应用三维激光扫描技术进行高危岩体的变形监测时,多期点云数据之间近似同名点的确定是整个变形监测工作的关键。近似同名点的相似度越高,最终形变量的精度也越接近真实值,而影响同名

点相似度的因素是多方面的,点云的滤波、多期点云数据的配准误差及参数的选取都会对近似同名点的确定产生影响。因此,今后的工作将继续优化该算法中近似同名点的判定准则,探讨不同因素对确定多期点云数据之间近似同名点的影响,进一步分析各种因素对最终形变量精度的影响,提高变形结果的可靠性。

参考文献:

[1] 董建军.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,2007,15(3):428-432.

[2] 赵俊兰,吴依琴,尹文广,等.三维激光扫描技术在汶川什邡地震遗址虚拟重建中的应用研究[J].测绘通报,2012(7):53-56.

[3] 刘昌军,高立东,丁留谦,等.应用激光扫描技术进行岩体结构面的半自动统计研究[J].水文地质工程地质,2011,38(2):52-57.

[4] 罗旭,冯仲科,邓向瑞,等.三维激光扫描成像系统在森林计测中的应用[J].北京林业大学学报,2007,29(S2):82-87.

[5] 罗德安,朱光,陆立.基于三维激光扫描影像扫描技术的整体变形监测[J].测绘通报,2005(7):40-42.

[6] 朱磊,王建,毕京学.三维激光扫描技术在变形监测中的应用[J].北京测绘,2014(5):78-82.

[7] 丁延辉,汤羽扬,周克勤,等.基于地面三维激光技术的建筑物变形监测研究[J].北京测绘,2011(2):4-6.

[8] 徐进军,王海城,罗喻真,等.基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J].岩土力学,2010,31(7):21-25.

[9] 董秀军,黄润秋.三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J].岩石力学与工程学报,2006,25(S2):3629-3635.

[10] GIRARDEAU-MONTAUT D, ROUX M, MARC R, et al. Change Detection on Point Cloud Data Acquired with a Ground Laser Scanner [J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, 2005, 36(3):30-35.

[11] HOPPE H, DEROSE T, DUCHAMP T, et al.Surface Reconstruction from Unorganized Points [J]. Acm Siggraph Computer Graphics, 1999, 26(2):71-78.

[12] 李玉生,谭开鸥,王显华.武隆县鸡冠岭岩崩特征[J].中国地质灾害与防治学报,1994,2(2):92-94.