

基于三维激光扫描的岩体结构面信息提取

荆洪迪¹, 李元辉¹, 张忠辉^{1,2}, 刘召胜³

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 山东黄金集团有限公司, 山东 济南 250014;

3. 中冶北方工程技术有限公司, 辽宁 大连 116600)

摘 要: 以地下矿山工程中的岩体结构面信息为研究对象,应用三维激光扫描技术与地质构造分析相结合的研究手段,将岩体结构面信息提取和三维激光扫描技术进行系统集成.利用 Z + Flasercontrol 点云数据处理程序和 Geomagic Studio 逆向工程软件对围岩点云信息进行预处理.基于 Java 语言开发了由点云数据获取结构面信息的点云数据处理系统,并应用 Dips 地质构造分析软件分析结果,结合人工测量数据验证此系统的准确性与可行性.研究表明,和传统方法相比,该方法具有快速、自动、高精度和远距离测量的优点.

关 键 词: 三维激光扫描;点云数据;信息提取;结构面;人工测量;地下矿山

中图分类号: TD 178

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)02-0280-04

Extraction of Joint Information of Rock Masses Based on 3D Laser Scanning Technology

JING Hong-di¹, LI Yuan-hui¹, ZHANG Zhong-hui^{1,2}, LIU Zhao-sheng³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Shandong Gold Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 3. Northern Engineering & Technology Corporation, MCC, Dalian 116600, China. Corresponding author: LI Yuan-hui, professor, E-mail: neulyh@163.com)

Abstract: Based on 3D laser scanning technology and geological analysis, an experiment was conducted to study the information extracted from structural plane in underground mining engineering. Z + Flasercontrol and Geomagic Studio were used to preprocess the cloud information of surround rock point. A point cloud data processing system was developed by Java language, and the Dips software is used to analyze the information of structural planes. The accuracy and feasibility of this system were validated against the manual measurements. It is shown that this method provides advantages in terms of fast, automatic and distant measurement, compared with the traditional method.

Key words: 3D laser scanning; point cloud data; information extraction; structural plane; manual measurement; underground mine

结构面是岩体内发育的具有不同方向、规模和形态的片状地质界面.在矿山工程、边坡工程等岩体工程中,结构面对岩体的强度、变形、渗流和稳定性等都会起到关键的作用,因此在岩体工程中结构面的几何参数统计是一项重要的地质调查工作.目前已有的岩体结构面信息采集方法都受到各种各样的现场或自身条件的制约,而利用三

维激光扫描技术调查岩体结构面信息较传统的人工测量方法有着巨大的优势,使得在恶劣的试验条件下快速、准确、安全地采集岩体结构信息成为可能^[1].

1999年D. M. Kocak和F. M. Caimi尝试了利用三维激光扫描技术观测海底岩层出露面.Q. Feng等于2001年提出了利用三维激光扫描仪测

收稿日期: 2013-11-23

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAB02B01, 2013BAB02B03); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N120801002); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130042110010); 中国中冶“三五”重大科技专项(0012012009).

作者简介: 荆洪迪(1988-),男,内蒙古赤峰人,东北大学博士研究生;李元辉(1968-),男,山东莱州人,东北大学教授,博士生导师.

量岩体出露面的理论方法,并于2003年成功应用并测得岩体出露面粗糙度与迹线,为将三维激光扫描技术应用于结构面信息提取提供了依据^[2-3]。

国内学者为了将三维激光扫描技术应用于岩体结构面测量也进行了大量探索。丁留谦等深入研究了应用三维激光扫描技术进行结构面产状测量的方法,应用三角剖分法对点云数据进行了处理并统计出结构面法向量。但是对数量巨大的点云数据进行统计、计算和剖分都要耗费大量的人工与时间,所以暂时还不能应用于实际工程当中^[4-5]。

1 现场测量及数据预处理

1.1 三维激光扫描技术简介

实验选用的德国 Z+F5010 型三维激光扫描仪集成各种相关元件,可以单人独立操作,是一台高度集成、便携、容易操作的三维激光扫描设备,可用于工业、航空、文物修复、机械、事故鉴定、测量等领域^[6]。隔离于外部环境的扫描镜能够在多种复杂环境下使用,不受光线影响。扫描镜转速可达 50 r/s,扫描率高达 10^6 点/s。三维激光扫描仪无需接触目标就可快速获取目标的三维信息,有着传统测量方式难以达到的技术优势;测程远、精度高:最大扫描距离可达 187.3 m,50 m 处误差小于或等于 0.1 mm。

1.2 现场数据采集

实验场所位于辽宁省抚顺市红透山铜矿,该矿是以生产粗铜、铜精矿为主的有色金属独立工矿企业,是东北地区最大的铜矿山企业。实验地点在红透山铜锌矿-467 中段的一段巷道。

为了尽量保证点云数据的测量精度以减小后续点云去噪、拼接等工作的难度,在现场操作过程中需注意以下问题:

- 1) 扫描仪应置于机械扰动较小的位置,防止扫描仪晃动对点云数据精度的影响;
- 2) 为了保证大地坐标转换与点云数据拼接的精度,需要合理选择标靶点,标靶点应选在两个相邻测点的公共交叉区域并且不能设在同一直线上;
- 3) 避免在浮尘多、雾气大的区域进行测量,防止因悬浮颗粒反射激光造成测量误差。

1.3 点云数据预处理

现场得到的大量离散点云数据并不能直接用于结构面信息的提取;提取前需要对点云数据进行去噪、拼接、坐标系转换等操作,以便在其他绘图、建模软件中进行数据处理。

采用三维激光扫描法获取的对象点云数据,噪声点不可避免。产生噪声的因素主要有测量设备的精度、CCD 摄像机的分辨率、振动等。实验应用 Geomagic Studio 逆向工程软件对原始点云数据进行去噪光顺处理,处理结果如图 1 所示。

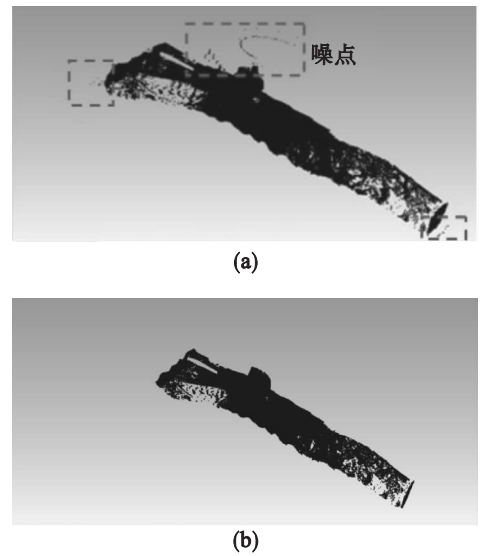


图 1 去噪前后的点云数据
Fig. 1 Point cloud data before and after denoising
(a)一去噪前点云数据;(b)一去噪后点云数据。

激光沿直线传播,为了得到一个实验目标完整的三维表面数据,操作人员必须在不同的位置和角度对目标进行扫描,由此获得的完整目标点云即多视点云。地下矿山环境复杂,扫描仪视角更容易受到遮挡。基于 Z+F 扫描仪(Z+F)点云数据处理程序通过拼接算法将各个相邻测站的点云数据拼接在一起,有效降低了视角遮挡的影响,减少了后期数据处理的工作量。通过平移矩阵 T 和旋转矩阵 R 把目标点云转换到原始点云中,完成拼接^[7-8]。三维齐次坐标变换矩阵的形式是

$$T_{3D} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

由于多视点云拼接不涉及点云的投影和缩放,所以多视点云拼接到原始点云的转换公式如下:

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

相邻测站经扫描得到的点云数据必须存在公

共区域才能有效拼接,即待拼接点云必须有数量足够的有标志性的公共点,这就相当于已知式(2)中的 $[x\ y\ z\ 1]$ 和相应的 $[x'\ y'\ z'\ 1]$,只需求解线形方程组就能确定转换矩阵中的各参数.现场实测数据拼接结果如图 2 所示.

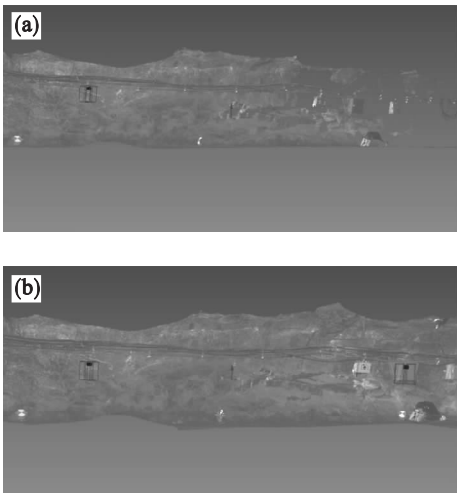


图 2 拼接前后点云模型

Fig. 2 Point cloud model before and after stitching

- (a)一拼接前左侧点云模型;
(b)一相邻测点拼接后点云模型.

三维激光扫描仪的坐标系为相对坐标系,与扫描仪的空间位置密不可分,坐标系的零点为扫描仪的中心点.为了使扫描得到的点云数据具有真实的现场三维空间属性,必须将点云数据导入到大地坐标系中,以使得到的点云数据具备测量目标的真实属性.点云具有实体坐标后便可编制程序对结构面信息进行快速提取、统计.

为了给点云数据赋予真实属性,需进行大地坐标转换.首先使用全站仪对预设 in 相邻测点公共区域的 4 个标靶点进行测量,然后通过 Z + F 点云数据处理程序将扫描仪相对坐标系下的三维点云模型转换为大地坐标下的模型.由于之前进行过点云拼接,所以只需要将一个基准点的大地坐标导入便可得到整个具备真实属性的巷道实体模型^[9].

2 数据处理与分析

2.1 结构面信息处理

三维激光扫描技术在矿山的应用处于起步阶段,现有的配套软件多用于机械制造、建筑设计等行业.为了快速提取现场三维信息并计算出倾向、倾角等结构面信息,减少后期数据处理工作量并保证精度,作者设计开发了应用于结构面信息提

取的三维激光扫描数据处理程序.根据三维激光扫描仪得到的数据类型,在 Java 平台上设计了由点云数据得到结构面信息的自动处理程序(Points_CAL),实现了由点云数据到结构面信息的转换,降低了后期数据处理工作量.程序工作界面如图 3 所示.

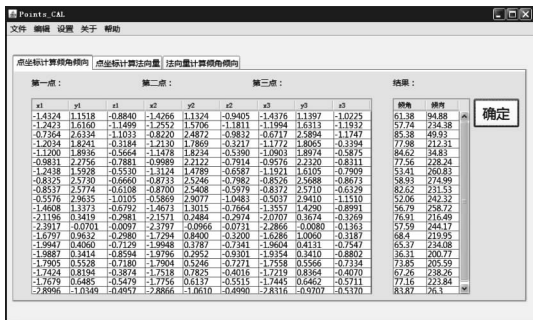


图 3 用 Points_CAL 计算倾向、倾角

Fig. 3 Inclination and dip angles calculated with Points_CAL

结构面信息处理过程如下:

- 1) 从 Z + F 点云数据处理程序的二维全景视图中连续拾取各个结构面上的特征点以确定结构面;
- 2) 将二维全景视图上的特征点链接到后台三维工作区中的三维实体点云上以获取特征点的真实三维坐标信息;
- 3) 通过编制的接口程序将特征点三维坐标信息导入 Points_CAL 结构面信息自动处理程序;
- 4) 应用 Points_CAL 将结构面特征点三维坐标信息转换为倾向、倾角等岩体结构面信息.

2.2 人工与三维激光测量结果比较分析

应用 Z + F 三维激光扫描仪测得大量的数据,这些数据的准确性必须予以验证.在红透山铜矿 - 467 中段选取一条测试巷道,划分为 11 个测点,每个测点长 5 m,高度即巷道壁高.表 1 对常规人工测量与三维激光测量结果进行了比较.

表 1 常规人工测量与 Z + F 测量的比较

Table 1 Comparison between traditional artificial measurement and Z + F measurement

比较内容	常规人工测量	Z + F 三维激光扫描
测量区域面积	55 × 2.5 m ²	55 × 2.5 m ²
测量时间	5 h	22 min
数据量	120 条节理	218 条节理(10 ⁹ 个点)
地势影响	受地势影响严重	不受地势影响,全方位
采样间隔	间隔大且不均匀	间隔小且均匀
能否获取影像	否	能
操作方法	不间断人工测量	自动扫描

通过 Dips 地质构造分析软件可以将大量的人工测量与三维激光扫描仪测量获得的节理倾

向、倾角值进行进一步的统计处理,得到节理倾向、倾角等值线图,如图 4 所示.图中标出了主要节理所集中的倾向、倾角值区域,并由等值线图统计出了主要节理面的平均倾向、倾角(见表 2).

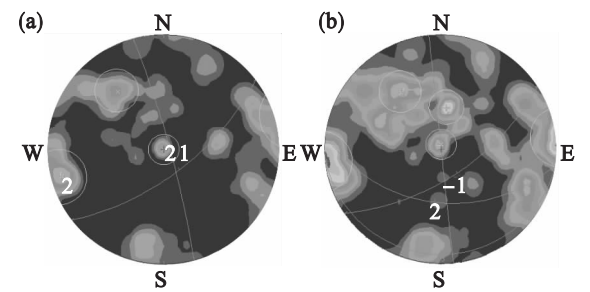


图 4 人工测量与 Z + F 测量得到的节理信息等值线图
Fig. 4 Contour map of joint information retrieved by artificial measurement and Z + F measurement
(a)—人工测量; (b)—Z + F 测量.

表 2 Z + F 和人工测量的巷道主节理面的倾向和倾角
Table 2 Inclination and dip angles of the main joint retrieved by artificial measurement and Z + F measurement

主节理面	Z + F 测量	人工测量
第 1 组	264° ∠ 89°	255° ∠ 84°
第 2 组	328° ∠ 63°	322° ∠ 65°
第 3 组	325° ∠ 3°	330° ∠ 0°
第 4 组	7° ∠ 40°	

通过对该巷道岩体结构面的分析,发现其优势产状有如下分布规律:①产状围绕倾向 264°、倾角 89° (264° ∠ 89°) 的结构面最多;②围绕 328° ∠ 63°和 325° ∠ 3°的结构面次之;③岩体体积节理数为 7.7 ~ 11.4 条/m³.由图 4 看出,应用 Z + F 三维激光扫描仪扫描得到的岩体节理的倾向、倾角与传统人工测量的结果相差很小,但却能够获得人工测量无法比拟的数据量.在进一步完善数据处理程序后,应用三维激光扫描技术测量就显得更加精确和便捷.更重要的是,三维激光扫描仪能够获得更全面的现场信息,使分组更容易,从而有利于准确地确定岩体主控结构面.

红透山铜矿的现场测量、处理软件的开发和后期数据的处理充分验证了这种结构面信息采集新方案的可行性、先进性与精确性,为在地下矿山应用三维激光扫描技术又提供了一个可靠的验证.

3 结 论

1) 应用 Z + F 三维激光扫描仪获取了结构面点云信息,并实现了去噪、拼接、曲面重构、大地坐

标转换等点云数据预处理过程.
2) 开发了点云数据自动处理程序,实现了结构面信息采集的初步自动化,应用该程序成功获取实验巷道结构面倾向、倾角等主要产状要素.
3) 与传统人工测量法的比较分析证明,该系统具有更高的精度、效率 and 安全性,在采集结构面信息时完整存储了现场信息,使快速、自动、非接触地采集条件恶劣区域岩体结构面信息成为可能.

参考文献:

[1] Fletcher F K, Kershaw D J. Performance analysis of unbiased and classical measurement conversion techniques [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38 (4): 1441 – 1444.

[2] Feng Q, Fradin N, Jing L, et al. A new method for in situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surfaces [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2003, 36 (1): 3-25.

[3] Fardin N, Feng Q, Stephansson O. Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41 (2): 329 – 335.

[4] 刘昌军, 丁留谦, 孙东亚. 基于激光数据的岩体结构面全自动模糊聚类分析及几何信息获取 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30 (2): 358 – 365.
(Liu Chang-jun, Ding Liu-qian, Sun Dong-ya. Automatic fuzzy clustering analysis and geometric information acquisition of rock mass discontinuity based on laser point cloud data [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30 (2): 358 – 365.)

[5] 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.
(Liu Chang-jun, Gao Li-dong, Ding Liu-qian, et al. Research of semiautomatic statistics of rock mass discontinuity applying laser scanning technology [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2011, 38 (2): 52 – 57.)

[6] Reina A, Gonzales J. Characterization of a radial laser scanner for mobile robot navigation [C]// *Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems*. Grenoble, 1997, 2: 579 – 585.

[7] Hancock J, Langer D, Hebert M, et al. Active laser radar for high-performance measurements [C]// *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Leuven, 1998, 2: 1465 – 1470.

[8] Abellán A, Martínez J, Vilaplana J M. Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain) [J]. *Engineering Geology*, 2006, 88 (3): 136 – 148.

[9] Soler T, Han J Y, Weston N D. Alternative transformation from Cartesian to geodetic coordinates by least squares for GPS georeferencing applications [J]. *Computer & Geosciences*, 2012, 42: 100 – 109.