

采空区三维激光扫描空间分辨率增强方法

余乐文^{1,2}, 张 达¹

(1. 北京矿冶研究总院, 北京 102628; 2. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

摘 要: 地下金属矿山开采形成的采空区已成为危及矿山安全生产的主要灾源之一, 对矿产资源安全开采和矿区周边环境构成威胁, 三维激光扫描技术能精确地获取采空区三维空间形态, 已成为采空区高精度探测的主要手段。采空区传统等步距角扫描方法具有空间分辨率不均匀、效率低等缺点。结合采空区空间形态不规则等特点, 提出采空区三维激光扫描空间分辨率的增强方法, 推导了调节螺旋线间距和扫描轨迹上激光点间距的计算公式。矿山采空区扫描试验结果验证了方法的有效性, 提高了三维激光扫描的空间分辨率, 为采空区三维形态高精度获取提供了解决方案。

关键词: 采空区; 三维激光扫描; 空间分辨率; 螺旋轨迹规划; 双轴协同插补

中图分类号: TD178 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1006002

Spatial resolution enhancement method of cavity 3D laser scanning

Yu Lewen^{1,2}, Zhang Da¹

(1. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 102628, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Underground metal mines cavities were serious threats to mineral resources exploitation and the surrounding environment of mines. Useful points' spatial information about cavity shape could be gotten from 3D laser scanning detection precisely, which had become the main method of cavity accuracy detection. Traditional 3D laser equiangular scanning has its disadvantages of uneven spatial resolution and low efficiency. With the analysis of the irregular characteristics of mined-area, a 3D laser spatial resolution enhancement method was proposed. The formula of calculating the distance between the spiral line and the scanning trajectory was derived. The experimental result of points cloud verifies the efficiency of the new method, which improves the spatial resolution of the 3D laser scanning, and provides a solution for the high accuracy acquisition of 3D shape in the mined-area.

Key words: cavity; 3D laser scanning; spatial resolution; spiral trajectory planning; biaxial collaborative interpolation

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-04-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2011AA060405); 国家自然科学基金(41301436)

作者简介: 余乐文(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事矿山智能仪器仪表开发方面的研究。Email: yulewen@bgrimm.com

0 引言

国内矿产资源经过长期开采,形成了大量未处理的采空区。采空区是矿山安全生产最主要的灾源之一,严重影响到矿产资源安全开采和矿区周边环境安全。大量采空区的存在致使矿山开采条件恶化和隐患资源量增加,经常引发井下大面积冒落、片帮、地表塌陷等重大灾害。因此,准确获取采空区位置、形状和体积是我国矿山安全生产面临亟待解决的重要问题^[1-3]。

近年来,三维激光扫描技术因非接触测量、高效、高精度等优点被广泛应用于采空区探测、数字城市、工程建设等^[4-7]。目前常用的三维激光扫描方法为等步距角扫描,即扫描仪径向电机和轴向电机均等角度旋转,该方法存在扫描空间分辨率不均匀问题,当扫描仪与被测目标表面距离越远、表面的法线夹角越大、距离反差越大,则该区域对应的空间分辨率越低,反之,距离被测目标表面距离越近、表面的法线夹角越小、距离反差越小,则该测量点对应的分辨率越高,存在过采样问题,降低了测量效率,导致测量结果不准确,张达等^[8]提出了一种自适应分辨率扫描算法,主要是通过分析三维激光扫描仪与被测目标当前测量点之间的距离、相邻两次距离的变化量、被测目标当前测量点附近区域内的多个测量点的距离的统计特征,动态调整三维激光扫描步距角,可提高采空区空间测量精度,但是该方法需要实时计算与动态调整步距角,大大降低了扫描效率,并缩短了电机的使用寿命。因此,亟待开发出一种采空区空间分辨率增强方法。

针对上述问题,文中提出了一种基于螺旋轨迹规划扫描的空间分辨率增强算法,通过调节轴向伺服电机和径向伺服电机进行双轴协同插补,实现了空间分辨率增强,试验验证了该方法的有效性。

1 扫描仪组成

目前适用于地下采空区测量的三维激光扫描仪产品包括加拿大 Optech 公司生产的采空区监测系统(Cavity Monitoring System, CMS)^[9-10]、英国 MDL 公司的采空区激光自动扫描系统 (Cavity Automatic Laser Scanning, C-ALS)^[11-12] 以及北京矿冶研究总

院自主研制的 BLSS-PE 矿用三维激光扫描测量系统系统^[13-15]。BLSS-PE 矿用三维激光扫描测量系统由扫描主机、电源箱、PDA 和软件系统组成,详细结构如图 1 所示,底座连接处电机为轴向电机,带动激光测距传感器旋转的电机为径向电机。常用的扫描方式分两种:一种是轴向优先,即以轴向电机为主动轴持续旋转,径向电机为从动轴,当轴向电机旋转 360°后变换一个小角度,扫描轨迹为螺旋状;另一种是径向优先,即以径向电机为主动轴持续旋转,轴向电机为从动轴,当径向电机旋转 360°后变换一个小角度,扫描轨迹为切片状。

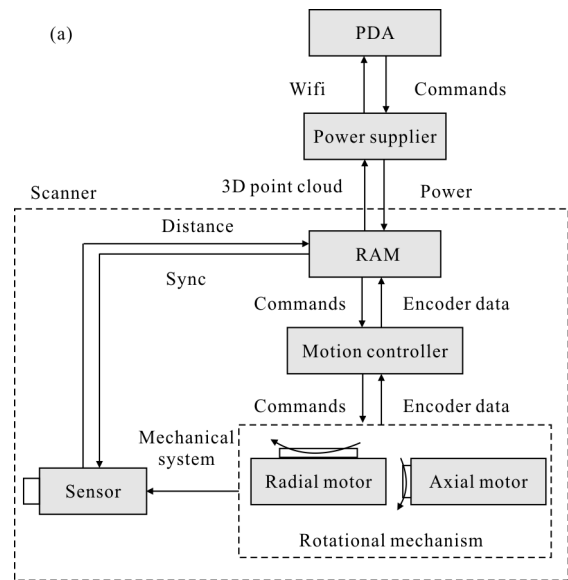


图 1 BLSS-PE 的组成

Fig.1 Components of BLSS-PE

2 空间分辨率增强算法

在传统等步距角轴向优先扫描模式下,轴向电机和径向电机同时做匀速运动,将扫描轨迹向垂直于扫描主机轴向电机方向投影,可得到螺旋线形状,如图 2 所示,随着扫描范围的加大,螺旋线的间距将

会越来越大,若想使螺旋线的间距保持均匀不变,需要对径向电机的速度进行调节。

如图 3 所示,其中 O 为三维激光扫描仪的原点, E 、 F 、 G 是 O 向 G 方向做的平面与螺旋线的交点。图 3 是图 2 的侧视图,黑色箭头是下一圈螺旋线出现的方向。在传统等步距角轴向优先扫描模式下,底座电机每转 360° 所需的时间都是固定值(假设为 t),从 E 点~ F 点的运行时间与从 F 点~ G 点的运行时间都是 t ,因此 $\angle EOF = \angle FOG$ 。 $OG > OF > OE$,所以 $FG > EF$ 。

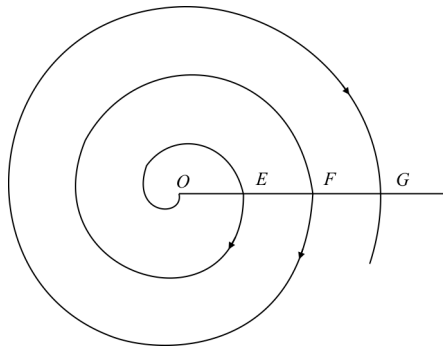


图 2 螺旋线间距示意图

Fig.2 Schematic of spiral spacing

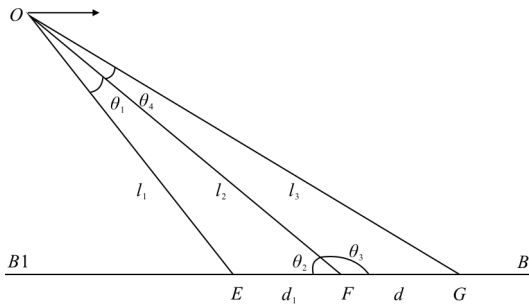


图 3 螺旋线间距侧视图

Fig.3 Side view of spiral spacing

如果将径向电机的运动模式由匀速变为变速模式,在扫描轨迹由 F 螺旋运动到 G 螺旋期间降低径向电机的速度,就可以实现 $FG = EF$ 。

OE 、 OF 、 $\angle EOF$ 为已知量, $\angle FOG$ 为待求量。另外 EF 为扫描轨迹间隔, G 点为规划轨迹上的点,根据规划目的, FG 为目标值。设 $OE = l_1$, $OF = l_2$, $OG = l_3$, $EF = d_1$, $FG = d$, $\angle EOF = \theta_1$, $\angle EFO = \theta_2$, $\angle GFO = \theta_3$, $\angle FOG = \theta_4$ 。

$$d_1 = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 - 2l_1 l_2 \cos \theta_1} \quad (1)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{l_2^2 + d_1^2 - l_1^2}{2l_2 d_1} \quad (2)$$

$$\cos \theta_3 = -\cos \theta_2 = \frac{l_2^2 + d^2 - l_3^2}{2l_2 d} \quad (3)$$

$$l_3 = \sqrt{l_2^2 + d^2 - \frac{d}{d_1}(l_1^2 - d_1^2 - l_2^2)} \quad (4)$$

综合以上公式,可以算出 $\cos \theta_4$:

$$\cos \theta_4 = \frac{l_3^2 + l_2^2 - d^2}{2l_2 l_3} \quad (5)$$

$$\theta_4 = \arccos \frac{l_3^2 + l_2^2 - d^2}{2l_2 l_3} \quad (6)$$

由上述计算可得,当通过调节径向电机使 $\theta_4 = \arccos \frac{l_3^2 + l_2^2 - d^2}{2l_2 l_3}$ 时, $EF = FG$ 。

以上计算建立在 E 、 F 、 G 在同一直线的基础上,若 E 、 F 、 G 不在同一直线时,实际值 FG 与计算值 FG' 存在偏差,若 FG 段凸起时, $EF > FG$,螺旋线间距会减小,如图 4 所示;若 FG 段凹陷时, $EF < FG$,螺旋线间距会增大,如图 5 所示。

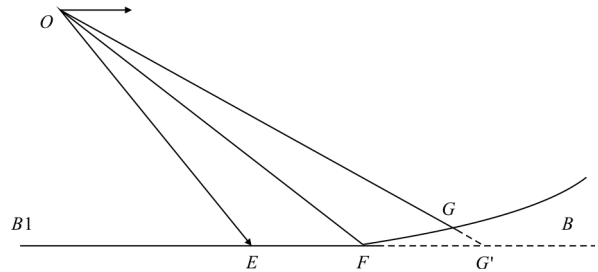


图 4 前方凸起时的示意图

Fig.4 Schematic of convex in front

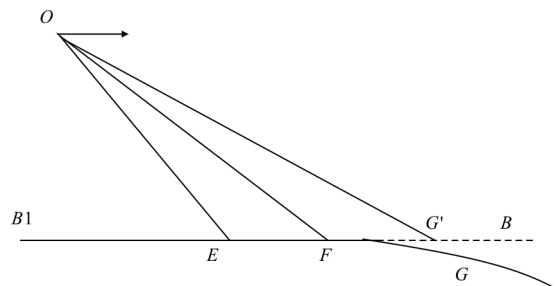


图 5 前方凹陷时的示意图

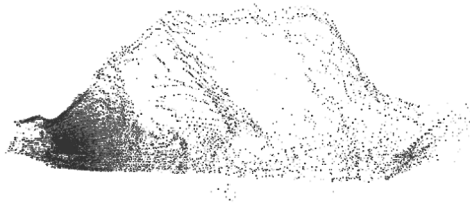
Fig.5 Schematic of concave in front

FG 误差来源于已知线段 EF 与未知线段 FG 的角度偏差。当螺旋线实际运动到 G 点时,未知线段

FG 变为了已知线段,当 $E、F、G$ 共线,未知线段没有误差,因此,该算法的螺旋线间距误差不会影响到下面的计算,即螺旋线间距误差不会累积。

3 试验测试

选择河北某金矿采空区进行扫描算法测试,图 6(a)和(b)分别是采用传统径向优先和轴向优先模式扫描得到的点云效果图,步距角均为 2° ,扫描时间约为 5 min;图 6(c)是采用螺旋轨迹规划扫描结果,扫描时间为 4 min。



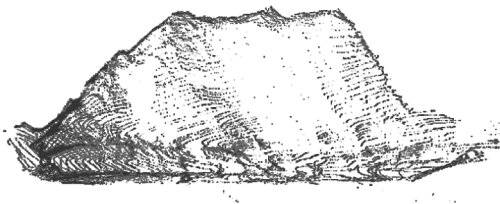
(a) 传统径向优先方法扫描结果

(a) Scanning results of traditional radial priority method



(b) 传统轴向优先方法扫描结果

(b) Scanning results of traditional axial priority method



(c) 空间分辨率增强方法扫描结果

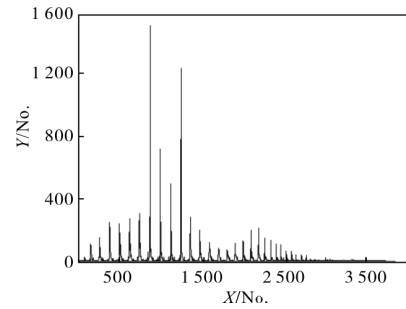
(c) Scanning results of spatial resolution enhancement method

图 6 不同扫描方法结果

Fig.6 Results of different scanning methods

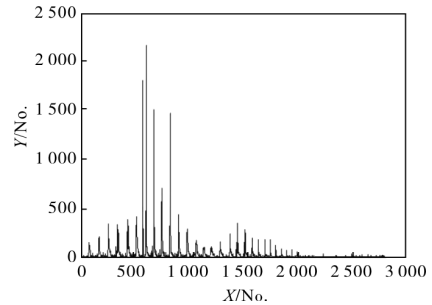
为了客观评价各扫描方法的扫描效果,将三维点云投影在 XZ 二维平面上,将二维点云网格化,划分为 $200\text{ mm}\times 200\text{ mm}$ 网格,统计网格内的点的个数。若网格内部有点的网格越多,点云分布范围越广泛;网格内点的数量的标准差越小,则点云分布得越均匀。

以 XZ 平面为例,图 7(a)~(c)分别是等角径向优先模式、等角轴向优先模式与空间分辨率增强模式下扫描的点云图在 XZ 平面上投影的分布图, X 轴是网格的序号,以左下角的网格为起始点,由左到右依次增加,当一行网格编号完毕后选取上方一行继续由左到右依次编号, Y 轴为对应网格内点的数量。表 1 为 3 种方法扫描结果具体分析。



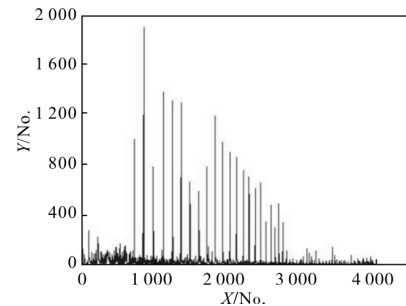
(a) 传统径向优先方法 XZ 平面点云分布

(a) Point cloud distribution of XZ plane in radial priority method



(b) 传统轴向优先方法 XZ 平面点云分布

(b) Point cloud distribution of XZ plane in axial priority method



(c) 空间分辨率增强方法 XZ 平面点云分布

(c) Point cloud distribution of XZ plane in spatial resolution enhancement method

图 7 不同扫描方法在 XZ 平面点云分布

Fig.7 Point cloud distribution results of XZ plane with different scanning methods

表 1 等角扫描与分辨率增强方法扫描对比分析

Tab.1 Comparative analysis of equiangular scanning and resolution enhancement method

Method	Data	Time/ min	Grid	Standard deviation
Radial priority	116 540	5	4 093	215.87
Axial priority	105 909	5	3 685	178.49
Spatial resolution enhancement	145 463	4	5 839	93.88

空间分辨率增强算法扫描点云数比等角径向优先模式增加 24.82%，比轴向优先模式增加 37.35%，试验结果表明空间分辨率增强算法可有效提高采空区点数数据，提高空间分辨率。

4 结 论

(1) 针对传统三维激光扫描测量方法存在的空间分辨率低的问题，提出了采空区三维激光扫描空间分辨率增强方法，分析了算法实现过程，推导了相应的计算公式；

(2) 通过分析实际矿山测量的点云数据分布情况，验证了空间分辨率增强算法的有效性，扫描点云数量比传统等角测量方法的径向优先模式增加 24.82%，比轴向优先模式增加 37.35%，提高了采空区空间分辨率，克服了距离、目标表面倾斜度等影响，为采空区三维形态高精度获取提供了解决方案。

参考文献：

[1] Liu Xiaoming, Luo Zhouquan, Xu Jicheng, et al. Resources extraction planning model of large-scale mine and its application[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(8): 2812-2816. (in Chinese)
刘晓明, 罗周全, 徐纪成, 等. 大型矿区资源开采规划模型的建立及其应用[J]. 中南大学(自然科学版), 2014, 45(8): 2812-2816.

[2] Xiong Lixin, Luo Zhouquan, Luo Zhenyan, et al. Data amendment of abnormal point cloud of goaf by laser scan in deep complex environment[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2014, 35(3): 438-446. (in Chinese)
熊立新, 罗周全, 罗贞焱, 等. 深部复杂环境下采空区激光

扫描异常点云数据修正[J]. 东北大学(自然科学版), 2014, 35(3): 438-446.

[3] Liu Xiaoming, Luo Zhouquan, Xu Jicheng. Simulation technology of dynamical destabilization of disaster cavities in metal mines [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(9): 3793-3799. (in Chinese)
刘晓明, 罗周全, 徐纪成. 金属矿隐患空区动力失稳过程仿真技术[J]. 中南大学(自然科学版), 2013, 44(9): 3793-3799.

[4] Xiong Lixin, Luo Zhouquan, Luo Zhenyan, et al. Point cloud merging and compression of complicated goaf using multi-point laser-scan [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(9): 1136-1142. (in Chinese)
熊立新, 罗周全, 罗贞焱, 等. 复杂采空区激光多点探测及点云拼接与精简 [J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(9): 1136-1142.

[5] Chen Xin, Wang Liguan, Bi Lin, et al. 3D modeling algorithm for goaf based on point cloud data [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(8): 3047-3053. (in Chinese)
陈鑫, 王李管, 毕林, 等. 基于点云数据的采空区三维建模算法[J]. 中南大学(自然科学版), 2015, 46(8): 3047-3053.

[6] Wang Li, Li Guangyun, Yang Xinyong, et al. One-site calibration of mounted parameter method for 3D mobile laser scanning[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1106005. (in Chinese)
王力, 李广云, 杨新永, 等. 车载三维激光扫描系统安置参数一站式标定[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1106005.

[7] Cao Ting, Wang Weixing, Yang Nan, et al. Detection method for the depth of pavement broken block in cement concrete based on 3D laser scanning technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206006. (in Chinese)
曹霆, 王卫星, 杨楠, 等. 基于三维激光扫描技术的路面断板深度检测[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0206006.

[8] Zhang Da, Yu Lewen, Yu Bin, et al. Adaptive resolution measurement method of 3D laser scanning [J]. *Mining & Metallurgy*, 2013, 22(4): 1-4. (in Chinese)
张达, 余乐文, 余斌, 等. 一种自适应分辨率的三维激光扫描测量方法[J]. 矿冶, 2013, 22(4): 1-4.

[9] Luo Zhouquan, Luo Zhenyan, Xu Hai, et al. Key technologies of 3D visualized integrated system for cavity's laser-scan information [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(11): 3930-3935. (in Chinese)

- 罗周全, 罗贞焱, 徐海, 等. 采空区激光扫描信息三维可视化集成系统开发关键技术 [J]. 中南大学 (自然科学版), 2014, 45(11): 3930-3935.
- [10] Luo Zhenyan. The research of goaf's 3D visual system based on CMS detection [D]. Changsha: Central South University, 2010. (in Chinese)
- 罗贞焱. 基于 CMS 探测的采空区三维可视化系统研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [11] Zhang Yaoping, Peng Lin, Liu Yuan. 3D modeling technology of cavity based on C-ALS detection and its engineering application [J]. *Mining Research and Development*, 2012, 32(1): 91-94. (in Chinese)
- 张耀平, 彭林, 刘圆. 基于 C-ALS 实测的采空区三维建模技术及工程应用研究 [J]. 矿业研究与开发, 2012, 32(1): 91-94.
- [12] Zhou You, Zhao Ruhui, Ding Xinpin. Research and application on three-dimensional visualization for goafs in open-pit coal mine[J]. *Mining Research and Development*, 2014, 34(5): 87-88, 94. (in Chinese)
- 周游, 赵汝辉, 丁鑫品. 东露天矿采空区三维可视化研究与应用[J]. 矿业研究与开发, 2014, 34(5): 87-88, 94.
- [13] Yu Lewen, Zhang Da, Yu Bin, et al. Research of 3D laser scanning measurement system for mining [J]. *Metal Mine*, 2012(10): 101-103, 107. (in Chinese)
- 余乐文, 张达, 余斌, 等. 矿用三维激光扫描测量系统的研制[J]. 金属矿山, 2012(10): 101-103, 107.
- [14] Yu Lewen, Zhang Da, Lu Desheng, et al. Study on the technologies of 3D laser scanner for mining [J]. *Mining Research and Development*, 2015, 35(4): 71-74. (in Chinese)
- 余乐文, 张达, 陆得盛, 等. 矿用三维激光扫描仪关键技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(4): 71-74.
- [15] Chen Kai, Zhang Da, Zhang Yuansheng. Point cloud data processing method of cavity 3D laser scanning [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812003. (in Chinese)
- 陈凯, 张达, 张元生. 采空区三维激光扫描点云数据处理方法[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0812003.