

复杂采空区多次探测的点云数据 精简方法

罗周全¹, 张文芬¹, 许士民²

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083

摘要 针对复杂采空区激光探测中存在探测盲区需要进行多次重复探测的问题, 研究激光多点扫描的点云数据精简方法。通过多点探测避免了单次探测盲区, 加密了数据稀疏区。通过分析激光扫描轨迹线的拓扑关系, 归纳了点云数据的分布特点。在对比传统数据精简的基础上, 提出了保留采空区几何特征更为有效的点云数据精简方法——边长角度综合判据法, 将密集区域的点云数据进行稀释。验证结果表明, 通过对比精简前后求得三维模型的体积、精简率等指标, 认为该方法保证了边界三维信息的完整性, 而且该方法的数据精简率可达15%~25%。为矿山复杂采空区激光扫描三维空间信息精简获取提供了一种新思路, 可后续三维建模及应用奠定基础。

关键词 数据精简; 复杂采空区; 点云数据

中图分类号 TD76

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.008

Multiple Detection Data's Simplification in Complicated Goafs

LUO Zhouquan¹, ZHANG Wenfen¹, XU Shimin²

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. School of Resources & Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

Abstract This paper studies data reduction of laser scanning to solve the problems generated by repeating of laser detection for blind areas. Blind areas of single detection were avoided and data of sparse areas were densified by multi-point detection. Distribution characteristics of point cloud data were concluded by topological relation of laser scanning track analysis. A more efficient point cloud data reduction method, the side angle integrated method, retained the geometric characteristics of goafs proposed in contrast to conventional data reduction, and the point cloud data of intensive areas were diluted. Through comparison of the 3D model volume, reduction rate and other indicators before and after reduction, the verification results show that the method ensures the integrity of boundary 3D information and the data reduction rate reaches 15%–25%. This method provides a new idea for laser scanning 3D information reduction in complex goafs, laying a good foundation for the subsequent 3D modeling and application.

Keywords reduction; complex goaf; point cloud data

金属和非金属地下矿山开采形成的采空区是矿山重要灾源之一, 如何准确获取采空区的形态是矿山采空区充填及其灾变监控的重要基础性工作, 也是矿山实施采空区周边资源以及残矿安全回采的重要基础性依据之一^[1-3]。而采空区

的三维激光探测技术是有效获取金属和非金属地下矿山采空区形态的重要手段。常用的采空区激光探测设备有: CMS (3D laser cavity monitoring system) 和 CASLS (cavity auto scanning laser system), 探测获取的点云数据格式简单多样,

收稿日期: 2014-03-18; 修回日期: 2014-04-25

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK09B02-05)

作者简介: 罗周全, 教授, 研究方向为金属矿深井开采及灾害辨析监控理论与技术, 电子信箱: lzq505@csu.edu.cn; 张文芬(共同第一作者), 硕士研究生,

研究方向为采空区三维激光扫描空间信息建模及动态监测, 电子信箱: zwf-csu@qq.cn

引用格式: 罗周全, 张文芬, 许士民. 复杂采空区多次探测的点云数据精简方法[J]. 科技导报, 2014, 32(20): 54-58.

后续的建模方便快捷^[4,5]。

目前,关于点云数据的精简国内外学者做了相关研究。文献[6]~[9]提出了采用八叉树法对点云数据进行空间分割建立 k 邻域,对 k 邻域内的点进行曲面拟合求出平均曲率,将曲率较大的点进行删除,该方法对于表面比较平滑的模型较为实用,但对于复杂边界的采空区不适用;文献[10]和[11]提出了基于建立的三角网模型求出相邻三角形的法向夹角,当夹角大于设定的阈值时将该点删除,该方法适用于曲面的构建,对于具有复杂边界形态的采空区不适用;文献[12]和[13]提出了包围盒法对数据精简,但该方法运算速度较慢且不能保证采空区的边界特征。

为实现数据的快速精简,本文基于CMS设备多点探测获取的点云数据,研究复杂采空区探测的数据分布规律及精简方法。运用精简后的数据生成三角网模型求取采空区体积,通过体积、精简率的要求确定限定条件的阈值。

1 CMS 探测采空区的点云数据分布特征

由于采空区边界形态复杂以及探测精度的要求,需要对采空区进行多次探测。一方面由于爆破设计、采空区的垮塌等原因导致采空区形态复杂,造成一次探测结果不能探测到全部的边界,留有盲区,需要选择多个探测位置进行探测;另一方面,由于激光扫描仪的工作原理,扫描圈中空间数据点的分布不均匀,也需要多点探测,才能获得采空区边界的完整信息。

1.1 采空区探测原理

采空区监测系统CMS是直接 将探测杆深入到采空区内部的某一位置,通过可 360°回转并集成有激光测距仪的扫描头实现采空区数据的测量。CMS以扫描圈为单元,扫描头旋转 1 圈,记录下圆周上的坐标点形成 1 个轨迹圈,并将数据保存到 CMS 存储单元中。此后每完成 1 周的扫描,自动增加事先设定的角度,通常为 3°~5°,进入下一圈的扫描^[2-3],直到扫描过程全部结束,如图 1 所示。

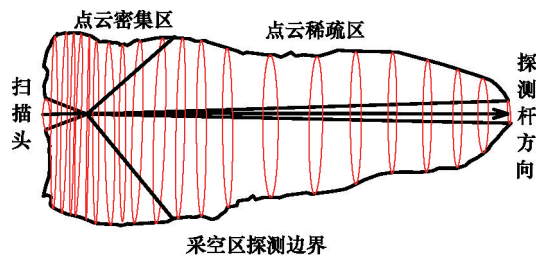


图 1 探测轨迹线分布

Fig. 1 Distribution of the scanning trajectory

由图 1 可知,CMS 激光探测仪探测到的数据有如下特点:

- 1) 起始扫描时,虽然空区边界离扫描头较远,但由于扫描圈的周长较小,导致点云数据较密集;
- 2) 当扫描头抬升到 20°~70°时,扫描到的空区边界变大,探测到的数据点逐渐增多,但由于扫描圈的周长变大,扫描

圈上两点之间的距离逐渐变小;

3) 当扫描头抬升到 100°~140°时,由于探测位置距离扫描头较近,扫描圈的周长较小,点云数据比较密集。

1.2 复杂采空区边界探测“盲区”

对于复杂边界形态的采空区,单次探测时光线会被突出的岩体遮挡,形成探测盲区,导致采空区的边界探测不完整,需要在不同的位置设置探测点进行探测,才能获取采空区的全部边界数据,探测位置及探测边界范围如图 2 所示(以横截面 A-A 说明探测盲区,A 表示出现探测盲区的位置)。

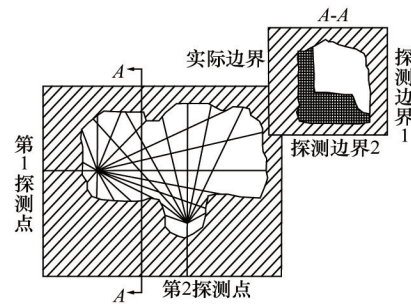


图 2 复杂采空区多点扫描

Fig. 2 Multi-point laser scan for complicated goaf

当对同一个采空区进行多次探测时,除第 1 次探测的盲区外,其他地方也都探测了两次。图 3 为两次探测的复杂采空区拼接在一起的情况,在重复探测的地方点云数据密集,需要进行精简,用少量的数据表示出采空区的边界特征。



图 3 复杂采空区的点云模型

Fig. 3 Point cloud model of the complicated goaf

2 点云数据的精简

需要精简的数据点与其他点相比,有以下明显几何特征:与前后两点的距离小于其他不需要精简点的距离;与前后两点形成的夹角远大于其他具有采空区边界信息点形成的夹角(即具有边界信息的点连成曲线时曲率变化较大)等。

衡量一个点云精简算法的成功度,并不是精简后数据点越少越好、速度越快越好,而是应该能够用最少的点保留原有信息并在此基础上追求更快的速度。基于点云扫描轨迹

线上点与点之间的拓扑关系,和二阶集合连续性的要求^[12],本文提出数据精简复合判据:最小距离法和最大张角法。最小距离法将密集区域的扫描点进行精简,最大张角法用于保护最小距离法精简过程中边界数据的保留。当数据点符合距离和夹角两判据时,确定为精简的数据点,将被删除。

2.1 最小距离法

距离精简算法的基本思维:扫描圈上的3个相邻的点 p_{i-1} , p_i 和 p_{i+1} ,从前后两点的连线形成的边 $p_{i-1}p_i$ 与 $p_i p_{i+1}$ 中寻找小于长度阈值 ε_1 的点,阈值根据空区的具体形态和工程精度要求确定,图4为轨迹线中紧邻3点之间的距离示意图,用式(1)求出 p_i 和 p_{i-1} 之间的距离

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (1)$$

式中, (x_1, y_1, z_1) 为 p_i 点坐标, (x_2, y_2, z_2) 为 p_{i-1} 点坐标;设 $p_{i-1}p_i$ 的距离为 d_1 , $p_i p_{i+1}$ 的距离为 d_2 ,若 d_1, d_2 都小于 ε_1 ,证明 p_i 点需要精简掉,且不会影响后续点的判断。

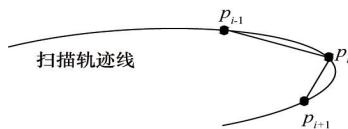


图4 轨迹线中紧邻3点之间的距离

Fig. 4 Distance between the three proximate points in the trajectory

2.2 最大张角法

扫描点与前后两点之间满足最小距离判据时,当与前后两点的夹角较小时,包含了采空区的边界特征需要将该点保留;当扫描点与前后两点之间的夹角较大时,包含的采空区边界信息较少,需要运用最大张角法将该点删除。

设扫描点 a 及前后两点 b 和 c ,计算边 ab 和 ac 形成的夹角 θ (图5),如果 $\theta \geq \varepsilon_2$ (ε_2 为角度阈值,根据采空区的具体形态和工程精度要求确定),则认为 a 点需要精简。

计算夹角 θ 的公式为

$$\cos \theta = \frac{AC}{|A||C|} = \frac{A_x C_x + A_y C_y + A_z C_z}{\sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2} \sqrt{C_x^2 + C_y^2 + C_z^2}} \quad (2)$$

其中, A_x, A_y, A_z 分别为向量 A 的坐标; C_x, C_y, C_z 分别为向量 C 的坐标。由式(2)可以得到每个扫描点与紧邻两点连线所成夹角,与阈值比较后确定是否满足精简条件。

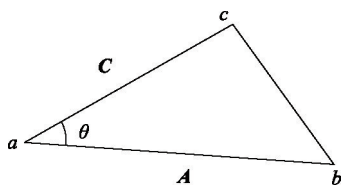


图5 轨迹线中紧邻3点之间的夹角

Fig. 5 Angle formed by the three proximate points in the trajectory

2.3 阈值选择

点云数据精简的难点在于阈值的确定,扫描点的精简要根据采空区的实际形状确定,边界形状不同的采空区,数据精简限定条件的阈值不同,点云数据的精简并不是越多越好,应根据采空区的实际形状结合获取的数据判断^[14-20],特别是在一些边界特征点的取舍上,应该尽可能保留采空区边界的真实特征。因此,点云数据的精简是一个探测—精简—实际体积比对—调整参数再精简的过程。扫描点的精简规则:点云数据的密集程度是人为确定的,因此需要综合爆破设计图、点云的几何拓扑关系、出矿情况等几方面的情况来确定,为了提高准确性,点云数据的精简是一个限定条件的阈值多次选择比较的过程,本文对待处理的采空区进行了多个阈值参数的实验测试,直到满足工程精度要求为止,流程如图6所示。

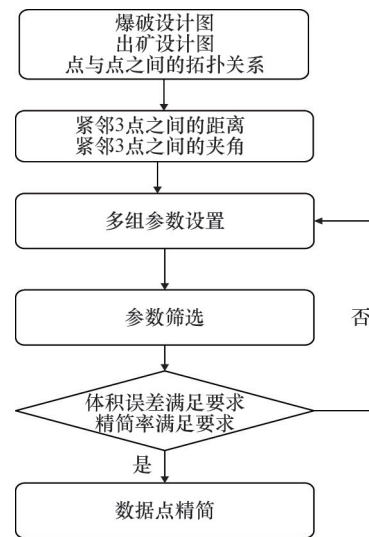


图6 参数选择流程

Fig. 6 Flowcharts of parameter's selection

2.4 精简算法

1) 根据CMS探测仪探测的数据读取XYZ数据文件,将点的空间信息存入到数据容器中,其空间信息包含采空区边界点的 x, y, z 坐标值以及该点所在的圈数的位置;

2) 定义初始圈(一般将扫描圈的第1圈作为初始圈);

3) 假设存在边 L_1 ,为第 i 圈 j 点和第 i 圈 $j-1$ 点的连线,假设存在边 L_2 ,为第 i 圈 j 点和第 i 圈 $j+1$ 点的连线, L_1 和 L_2 形成的夹角为 θ ;

4) 按照最小距离的原则,计算和比较扫描轨迹线上相邻两点之间连线的距离,距离越小说明数据点越密集。若 $L_1 > \varepsilon_1$ 且 $L_2 > \varepsilon_1$,确定第 i 圈 j 点符合距离判据;

5) 计算第 i 圈的 j 点与 $j-1$ 点、 $j+1$ 点连线的夹角 θ ,若 $\theta > \varepsilon_2$,确定第 i 圈 j 点符合角度判据;

6) 若第 i 圈的 j 点符合距离判据和角度判据的原则,则将第 i 圈的 j 点删除;

- 7) 完成每个圈上的每个点的判断;
- 8) 将精简后形成的新点云数据集存入数据容器中。

3 深部采空区群验证

某铜矿是国内大型深部多金属矿山,多年的生产形成了许多形状复杂的采空区,以某矿山360SE采场为例,采空区原始数据通过CMSPosProcess处理后将txt格式文件转化为后处理软件能够识别的XYZ格式文件,按照最小距离法和最大张角法对数据进行处理。在算法中根据空区形态和工程精度要求分别设定 ε_1 和 ε_2 ,得出不同的数据精简效果、体积的相对误差,实验统计结果如图7所示。

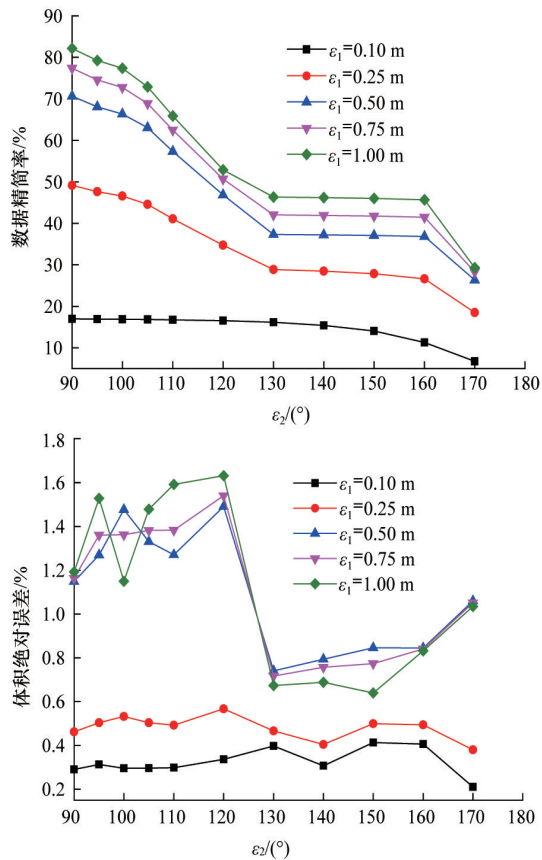


图7 不同的 ε_1 和 ε_2 数据精简率及体积绝对误差

Fig. 7 Data reduction rate and volumetric errors before and after reduction with different ε_1 and ε_2

根据实验可知,阈值的选取有以下特点:

- 1) ε_2 取值一定时,随着 ε_1 的增大,数据的精简率、体积的绝对误差都逐渐增大;
- 2) ε_1 取值一定时,随着 ε_2 的增大,数据的精简率、体积的绝对误差都逐渐降低;
- 3) ε_1 为0.10 m, ε_2 取不同的阈值时,数据的精简率、体积的绝对误差相差都较大;而 ε_1 为0.50、0.75或1.00 m时,无论角度 ε_2 如何取值,数据的精简率、体积的绝对误差相差都较小。

由图7可知, $\varepsilon_2=90^\circ$ 时,数据的精简率最大,且只有 $\varepsilon_1=0.10\text{ m}$ 、 $\varepsilon_1=0.25\text{ m}$ 时,体积的绝对误差控制在0.6%内,但 $\varepsilon_1=0.10\text{ m}$ 、 $\varepsilon_1=0.25\text{ m}$ 时数据的精简率相差较大,分别为0~15%和15%~25%。因此在实际应用中建议取 $\varepsilon_1=0.25\text{ m}$ 、 $\varepsilon_2=90^\circ$ 。图8为存在探测盲区的复杂采空区取 $\varepsilon_1=0.25\text{ m}$ 、 $\varepsilon_2=90^\circ$ 时,数据精简前后的点云模型对比。综合考虑精简率和体积误差,当 $\varepsilon_1=0.25\text{ m}$ 、 $\varepsilon_2=90^\circ$ 时,数据的精简率最高而且体积的绝对误差最小。

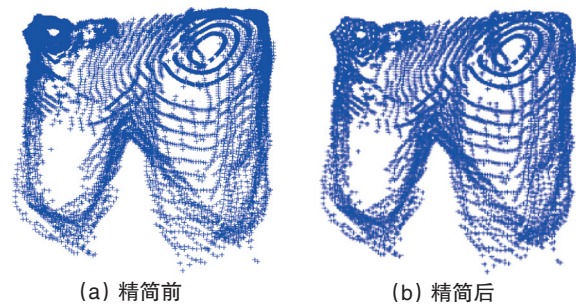


图8 点云精简效果对比

Fig. 8 Comparison of reduction effects for point cloud data

另外,对该矿山不同工作面的40个空区数据进行了检验,当 $\varepsilon_1=0.25\text{ m}$ 、 $\varepsilon_2=90^\circ$ 时,由图9可知,数据的精简率最小为15%,最大可达30%,大部分的数据精简率控制在15%~25%之间。

在数据精简率满足要求的前提下,对精简前后的体积绝对误差进行分析(图9),可知体积绝对误差控制在0.6%之内,在允许范围内,因此实际应用中建议 $\varepsilon_1=0.25\text{ m}$ 、 $\varepsilon_2=90^\circ$ 。

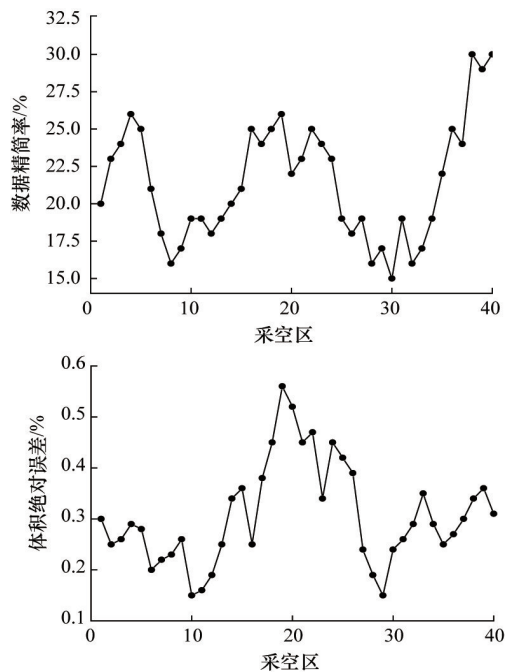


图9 20个空区数据验证情况

Fig. 9 Verification of data of the 20 goafs

4 结论

在分析现有的点云数据精简方法的基础上,提出了一种适用于具有任意复杂边界采空区的点云数据精简算法。算法运用最小距离判据对点云数据进行精简,同时使用最大角度判据对采空区的边界信息特征进行保护。

1) 以获取的XYZ格式数据为运算对象,基于二阶几何连续性提出了距离和角度的复合判据,研究了阈值选择方法,实现了采空区的精简算法。实用表明,算法具有良好的稳定性和精度,实现了复杂采空区的数据精简和精确建模,为矿山实施空区充填及残矿安全回采提供了依据。

2) 对矿山的深部采空群进行了算法验证。将点云数据精简算法在取得15%~25%的数据精简率的同时,为后续建模求得模型的体积误差控制在一定范围内。该算法逻辑简单,计算量小,且为后续建模节省了时间。成功克服了传统方法的缺陷,能很好地反映采空区边界的细节,具有实际工程应用价值,从而为矿山实施采空区灾害防治及空区周边资源安全开采提供重要的技术支持。

参考文献(References)

[1] 过江, 古德生, 罗周全, 等. 金属矿山采空区3D激光探测新技术[J]. 矿冶工程, 2006, 26(5): 16.
Guo Jiang, Gu Desheng, Luo Zhouquan, et al. A new technique of 3D laser survey of finished stopes in metal mines[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006, 26(5): 6.

[2] Luo Z Q, Liu X M, Su J H, et al. Deposit 3D modeling and application [J]. Journal of Central South University of Technology, 2007, 14(2): 225-229.

[3] 罗周全, 刘晓明, 张木毅, 等. 大规模采场三维探测及回采指标可视化计算[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2009, 40(6): 1732.
Luo Zhouquan, Liu Xiaoming, Zhang Muyi, et al. Stope 3D monitoring and its mining index visible calculation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(6): 1732.

[4] 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.
Luo Zhenyan. The research of goaf's 3D visual system based on CMS detection[D]. Changsha: Central South University, 2010.

[5] 王国焱, 罗周全, 鹿浩, 等. CMS在矿山开采安全中的应用[J]. 有色金属: 矿山部分, 2009, 61(5): 53-56, 65.
Wang Guotao, Luo Zhouquan, Lu Hao, et al. Application of CMS in mining safety[J]. Nonferrous Metals: Mine Section, 2009, 61(5): 53-56, 65.

[6] 周煜, 张万兵, 杜发荣, 等. 散乱点云数据的曲率精简算法[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(7): 785-789.
Zhou Yu, Zhang Wanbing, Du Farong, et al. Algorithm for reduction of scattered point cloud data based on curvature[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(7): 785-789.

[7] Zhang K, Yan J, Chen S C. Automation construction of building footprints from airborne LiDAR data[J]. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2523-2533.

[8] 周波, 陈银刚, 顾泽元, 等. 基于八叉树网格的点云数据精简方法研究[J]. 现代制造工程, 2008(3): 64-67.
Zhou Bo, Chen Yingang, Gu Zeyuan, et al. Data point reduction on octree cube algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(3): 64-67.

[9] 邵正伟, 席平. 基于八叉树编码的点云数据精简方法[J]. 工程图学学报, 2010, 31(4): 73-76.

Shao Zhengwei, Xi Ping. Data reduction for point cloud using octree coding[J]. Journal of Engineering Graphics, 2010, 31(4): 73-76.

[10] 亢晓琛, 刘纪平, 林祥国, 等. 多核处理器的机载激光雷达点云并行三角网渐进加密滤波方法[J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 331-336.
Kang Xiaochen, Liu Jiping, Lin Xiangguo, et al. Parallel filter of progressive TIN densification for airborne LiDAR point cloud using multi-core CPU[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013, 42(3): 331-336.

[11] 李凤霞, 饶永辉, 刘陈, 等. 基于法向夹角的点云数据精简算法[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(9): 1980-1983, 1987.
Li Fengxia, Rao Yonghui, Liu Chen, et al. Point cloud simplification based on angle between normal[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(9): 1980-1983, 1987.

[12] 张鸿飞, 程效军, 贾东峰, 等. 多视点散乱点云配准及压缩改进算法研究[J]. 测绘通报, 2012(2): 43-47.
Zhang Hongfei, Cheng Xiaojun, Jia Dongfeng, et al. A study of improved registration and compression algorithm of multi-vision disorder point clouds[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(2): 43-47.

[13] Reddy M B, Reddy L S S. Dimensionality reduction: An empirical study on the usability of IFE-CF (independent feature elimination by C-correlation and F-correlation) measures[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2010, 7(1): 74-81.

[14] 方源敏, 夏永华, 陈杰, 等. 基于改进的角度偏差法的采空区点云数据精简[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(2): 106-110.
Fang Yuanmin, Xia Yonghua, Chen Jie, et al. Study on point cloudy data simplification of goaf based on improved angular deviation method [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(2): 106-110.

[15] 隋连升, 蒋庄德. 栅格型点云数据的自由曲面建模技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15(10): 1293-1297.
Sui Liansheng, Jiang Zhuangde. Free form surface modeling with grid cloud data[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(10): 1293-1297.

[16] 陈慧群, 陈少克. 逆向工程中带孔洞的曲面对象三角剖分法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(11): 45-47.
Chen Huiqun, Chen Shaok. Research on triangulation method of object surface with holes in RE[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2006(11): 45-47.

[17] 柯映林, 单东日. 基于边特征的点云数据区域分割[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39(3): 377-380, 396.
Ke Yinglin, Shan Dongri. Edge-based segmentation of point cloud data [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(3): 377-380, 396.

[18] 王辅辅, 苏智剑, 张长禄, 等. 义齿三维模型构建中海量点云数据模型的精简方法[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2011, 15(4): 648-652.
Wang Fufu, Su Zhijian, Zhang Changlu, et al. A reduction method for mass point cloud data in the three-dimensional denture construction [J]. Journal of Clinical Rehabilitative Tissue Engineering Research, 2011, 15(4): 648-652.

[19] 刘磊, 张建霞, 郑作亚, 等. lidar点云数据的栅格化重心压缩方法[J]. 测绘科学, 2011, 36(1): 90-91.
Liu Lei, Zhang Jianxia, Zheng Zuoya, et al. Grid compression method in center of gravity for lidar cloud data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(1): 90-91.

[20] 倪小军, 姜晓峰, 葛亮, 等. 特征保留的点云数据自适应精简算法[J]. 计算机应用与软件, 2011, 28(8): 38-39, 75.
Ni Xiaojun, Jiang Xiaofeng, Ge Liang, et al. An adaptive simplification algorithm for points cloud data with feature reservation[J]. Computer Applications and Software, 2011, 28(8): 38-39, 75.

(责任编辑 王媛媛)