

采空区体积三角网模型四面体算法改进及应用

罗周全, 秦亚光, 张文芬, 黄俊杰, 路凡

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 准确获取采空区体积是矿山实施空区周边资源安全开采的重要基础性依据,也是矿山实施空区处理及其灾变监控的重要基础性工作。针对传统采空区三角网模型四面体算法易出现重叠计算的问题,本文以采空区三维激光探测系统(CMS)获取的原始数据为依据,在自主研发的采空区三维探测建模软件生成的采空区三角网模型的基础上,改进了传统采空区三角网模型四面体算法,提出了以激光探头为中心点连接所有三角网的四面体累积求和算法,实现对采空区体积的精确求解。算法首先确定了四面体求解的中心点,通过中心点与三角网模型中的所有三角片连接形成四面体,然后运用四面体的有向体积相加实现对采空区体积的求取。实际应用表明,改进后的采空区体积四面体算法具有精度高、适用性好等优点。

关键词 采空区体积;中心点;四面体算法

中图分类号 TD76

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.07.004

An improved tetrahedral algorithm and application of goaf volume triangle meshes model profile

LUO Zhouquan, QIN Yaguang, ZHANG Wenfen, HUANG Junjie, LU Fan

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract To obtain an accurate size of mine goaf is an important criterion of resource exploitation surrounding mine goaf region. What is more, it is also important groundwork of mine goaf treatment and disaster monitoring. In view of the traditional goaf triangulation model tetrahedron algorithm which is prone to cause the overlap computation problem, this paper takes the original data of three-dimensional laser system CMS acquisition as the standard criterion, and puts forward a tetrahedron cumulative sum algorithm that takes laser probe as the center point to connect all the triangulation. Thus, the accurate solution of the goaf's volumes is determined. On the basis of the goaf triangulation network model generated by self-developed products-3D modeling software of goaf detection, the traditional tetrahedron algorithm of mining goaf triangulation model is improved. First of all, the center point of tetrahedral solution is determined by the algorithm, then a tetrahedron is formed through the connection of the center point and triptychs of the triangle network model. Finally, the mining goaf's volume is calculated by summing up the tetrahedral directed volumes. Actual application shows that the improved tetrahedron algorithm of mining goaf tetrahedral volume has the advantages of high precision and wide application range.

Keywords goaf volume; center point; tetrahedron algorithm

非金属和金属地下矿山开采形成的采空区是威胁矿山安全的主要灾害之一,如何准确获取采空区空间体积大小是矿山实施空区周边资源安全开采的重要基础性依据,也是矿

山实施空区处理及其灾变监控的重要基础性工作^[1-3]。

运用三维激光扫描仪的非接触扫描,可直接获取空区表面形状的点云数据,通过点云数据建立相应的空区三维模

收稿日期:2014-12-01;修回日期:2015-02-10

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAK09B02-05);国家自然科学基金项目(51274250)

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@hotmail.com

引用格式:罗周全,秦亚光,张文芬,等.采空区体积三角网模型四面体算法改进及应用[J].科技导报,2015,33(7):30-33.

型,进而可实现对不规则空区的体积计算。针对不规则体三维点云数据的体积计算方法,徐伟恒等^[4]以三维激光扫描获取的树木点云数据为数据源,运用平面散乱点集凸包算法——Graham扫描算法和不规则体切片分割累加算法实现对树冠投影面积和树冠体积的计算。但这种方法在处理一个剖面中有两个或多个不连续封闭面时会出现较大误差。张小青等^[5]提出了以三角网模型几何中心为原点与所有的三角形连接构成四面体,求出所有四面体带符号体积的代数和即为三角网模型的体积。该方法对于相对规整的模型体积计算时是可行的,但是对于局部突出较大的模型体积计算时会重复计算突出部分的四面体的体积,而且可能会误计算模型外一部分体积;王泉德^[6]提出了一种仅根据三角网模型的三角面片集合计算模型体积的方法。该方法通过指定投影平面,计算每个三角面片及其在投影平面上的投影所围成的凸五面体的带符号体积(必要时对三角面片进行细分),整个模型的体积为所有凸五面体带符号体积的代数和。但是该方法需要判断三角形拓扑关系,计算过程复杂,投影平面难以确定。徐志等^[7]提出一种快速求取点云模型体积的方法,使用增量式算法计算点云的凸包用来近似物体,将凸包分解成上下2个三角网面,使用正投影法分别求取它们的投影体积,两者之差即是所求模型体积。但该方法误差较大,有一定的局限性。

为实现采空区三角网模型体积的精确快速计算,本文利用三维激光扫描探测系统(3D laser cavity monitoring system, CMS)对采空区进行扫描获取其表面的点云数据,并将得到的点云数据,通过本研究组自主研发的采空区激光扫描空间信息三维建模及计算集成系统,建立与矿山实际坐标完全一致的采空区三维模型。针对采空区三角网模型体积计算的问题,对以几何中心作为原点坐标的四面体算法进行改进,提出一种以激光探头为中心点连接所有三角网的四面体累积求和算法,改进后的算法形成的所有四面体不会出现重叠或者缺失,从而实现对采空区体积的精确计算。

1 采空区三角网模型构建

1.1 采空区点云数据获取

采空区三维激光探测系统能够实现对井下巷道、硐室、采空区的精密探测。CMS通过可360°旋转并集成有激光测距仪的扫描头实现对空区的探测,具体工作步骤为:安装扫描头并对其进行位置初始化;扫描头水平调零;扫描参数设

置;扫描头实施扫描,同时把扫描数据传送到控制箱内^[8-10]。CMS扫描时每个倾角连续旋转360°,探测倾角范围为0°~140°。CMS激光探测原理如图1所示。

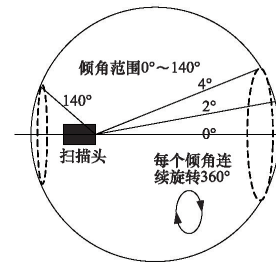


图1 CMS激光探测原理

Fig. 1 CMS laser detection principle

1.2 采空区三维模型构建

采空区三维网格模型构建思路:利用CMS探测采空区获取点云数据;对点云数据进行预处理;导出包含所有点云的三维空间信息文件;根据点的空间拓扑关系,对采空区点云进行三角剖分,实现采空区三角网的构建^[11-13],三角剖分如图2所示。

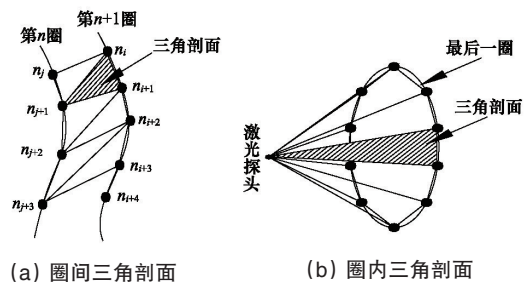


图2 三角剖分说明

Fig. 2 Triangulation description

由于算法的要求,在计算之前应确保网格模型的每个面均为三角形,并规定三角形的法向量与三角形的3个顶点编号顺序为右手法则,即所有三角形面的法向一致。在构建三角网格模型时还需满足以下条件:1) 网格中所有三角形均为平面凸三角形;2) 网格中每条边有且只有2个三角形共有,并且网格中任一顶点的各三角形在该顶点处形成的曲面与单位圆拓扑同构^[9]。本研究组综合运用Visual C++编程工具、OpenGL三维图形显示和数据库技术,自主研发了采空区激光探测三维建模可视化集成系统,生成的采空区三维模型如图3所示。

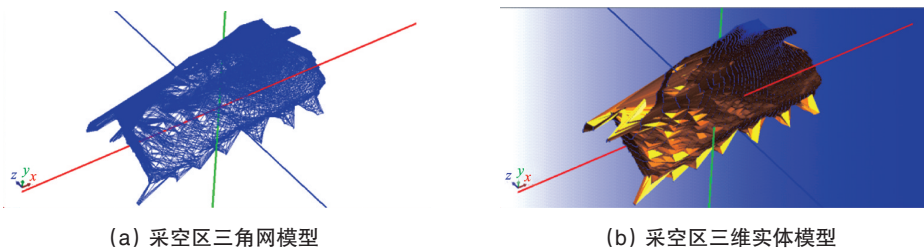


图3 采空区三维模型

Fig. 3 Goaf three-dimensional model

2 采空区三角网模型四面体算法改进

2.1 构建四面体中心点的选取

对于不规则物体来说,运用四面体算法求体积具有方法简单、容易理解、计算量小等优点,能够满足工程精度的要求。四面体算法要求构建的所有四面体之间不能有重叠或者遗漏,而且不能包含对象之外的体积。在以往的四面体算法中,都是通过寻找对象的几何中心构建四面体,从而实现对其体积的计算。但是,这种方法对相对规则的物体来说是可行的,但对于局部有突出的物体来说,该算法容易出现四面体之间重叠,甚至把物体以外的一部分体积计算进去,如图4所示(为了说明问题,对图中四面体进行了适当放大),其中 V_3 为 V_1 和 V_2 重叠部分, V_2 有一部分体积在模型之外。为了避免出现以上错误,构建四面体时中心点的选取至关重要。根据CMS探测原理可知,激光探头能够探测到的地方都是没有遮挡的,有遮挡的地方激光探头也探测不到。从激光探头出发,与每个三角片顶点的连线不会出现重叠,也不会出现在空区之外。因此,选取激光探头所指位置作为中心点构建四面体,克服了以几何中心为中心点构建四面体时出现的不足,从而实现对空区体积的精确计算。

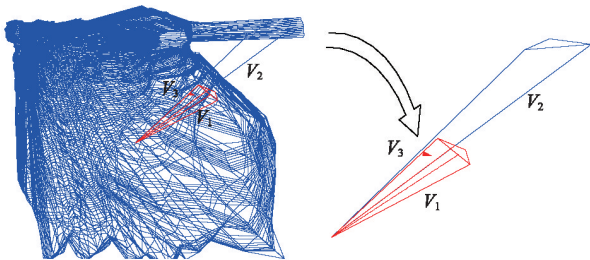


图4 四面体重叠及模型之外体积

Fig. 4 Volume of overlapping and beyond tetrahedral model

2.2 三角网模型体积的求取

对于构建完三角网模型的采空区,从中心点出发与所有三角片面的3个顶点连接,形成大量的小四面体,所有小四面体一起构成采空区实体模型。每个小四面体的体积加起来就是采空区三角网模型的体积,基于三角网模型的四面体算法为:设激光探头即中心点坐标为 $O(x_0, y_0, z_0)$,网格模型中任一三角形的3个顶点为 $A(x_1, y_1, z_1)$, $B(x_2, y_2, z_2)$, $C(x_3, y_3, z_3)$,则以中心点 O 为顶点, $\triangle ABC$ 为底的四面体体积为

$$V_{OABC} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{vmatrix}$$

设与 OA 同向的单位向量为 i , $\triangle ABC$ 所在平面单位法向量为 j ,规定内积 $(i, j) > 0$ 即 $\triangle ABC$ 与向量 j 服从右手法则时,四面体体积 V_{OABC} 为正(图5)。

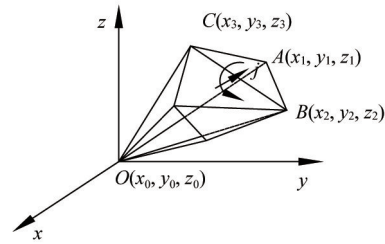


图5 四面体体积计算

Fig. 5 Tetrahedron volume calculations

在实际运用中,只需作如下运算:

$$V = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^m V_k \quad (k=1, 2, 3, \dots, m)$$

式中, m 为采空区三角网模型中有 m 个三角片面, k 为第 k 个四面体体积或者第 k 个三角片面, V_k 的正负号同样根据中心点 O 和三角网中任一顶点构成的向量与三角形的法向量的内积的正负值确定^[14,15]。

3 算法应用

为了验证改进后的三角网模型四面体算法求取采空区体积的有效性,以某地下大型金属矿山多个采空区为例,并与成熟并广泛应用的Surpac软件计算的采空区体积对比。Surpac软件对于采空区体积的计算具有精度高、适用范围广等优点,但是对于其求取采空区体积的算法相对复杂,计算量大。选取15组探测数据,两者计算所得的体积对比结果见表1。

表1 Surpac和改进后的四面体算法求取的采空区体积对比
Table 1 Comparison of goaf volumes calculated by Surpac and the improved tetrahedral algorithm

采场 编号	Surpac求取的 体积/m ³	改进后的四面体算 法求取的体积/m ³	相对误差/%
1	6689	6696	0.105
2	9700	9693	0.072
3	6197	6197	0.000
4	11391	11401	0.017
5	7530	7528	0.027
6	14775	14773	0.014
7	5875	5879	0.068
8	15638	15634	0.026
9	79050	79055	0.006
10	28210	28215	0.018
11	62929	62927	0.005
12	34380	34369	0.032
13	37304	37297	0.019
14	45307	45316	0.020
15	120440	120448	0.007

由表1可以看出,以激光探头为中心点的四面体算法与Surpac求取的采空区体积相对误差仅为0~0.11%,两者基本吻合。当然,点云数据处理时,对坏点过滤不彻底、精简删除的对象有所不同或删除的个数不同都会影响到三角网模型的建立;三角网模型建立的方法不同也会造成2个软件所建模型有所出入,这些都会对模型体积的求取造成一定影响。

运用过去以几何中心作为原点的采空区体积四面体算法求取上面15个采空区的体积,其结果与改进的采空区四面体算法、以及用Surpac求取的体积进行对比,结果见图6。

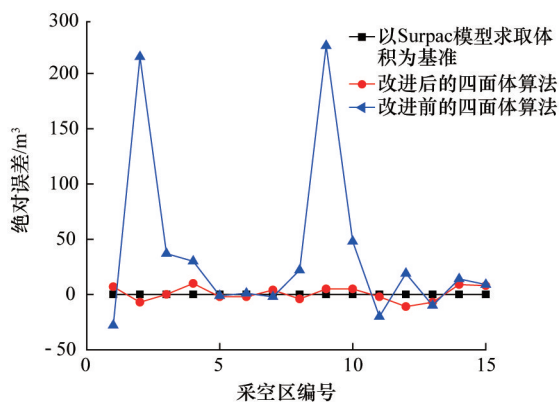


图6 两种算法与Surpac求取的体积绝对误差比较

Fig. 6 Comparison of volume absolute error between two algorithms and Surpac model

由图6可看出,以Surpac求取的采空区体积为基准,改进后的四面体算法求取的采空区体积绝对误差非常小,而传统的以几何中心为原点的算法求取的采空区体积误差明显偏大,且结构离散性也很明显,表现出很不稳定。

4 结论

1) 提出了以激光探头为中心点的采空区体积四面体算法。生成的四面体既保证完整地获取采空区体积,又不会出现重叠甚至把模型外的体积计入总体积中,从而实现以往算法的有效改进。实际应用表明,改进后的算法具有更好的精度且算法简单、计算量小。

2) 传统的算法主要适用于相对规则的采空区体积求取,而改进后的算法不仅适用规则的采空区体积求取,而且能够实现复杂采空区体积求取,具有更高的实用性。

参考文献 (References)

- [1] 王国焘, 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.
- [2] 罗周全, 鹿浩, 袁节平, 等. CMS辅助金属矿山采空区回采技术研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2008, 60(6): 1-4.
Luo Zhouquan, Lu Hao, Yuan Jieping, et al. Surveys of excavation mining

technology of metal mine with 3D cavity monitoring system[J]. Nonferrous Metals (Mine Section), 2008, 60(6): 1-4.

- [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, 2008, 27(2): 323-330.
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 Edition, 2008, 27(2): 323-330.
- [4] 徐伟恒, 冯仲科, 苏志芳, 等. 一种基于三维激光点云数据的单木树冠投影面积和树冠体积自动提取算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 465-471.
Xu Weiheng, Feng Zhongke, Su Zhifang, et al. An automatic extraction algorithm for individual tree crown projection area and volume based on 3D point cloud data[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(2): 465-471.
- [5] 张小青, 朱光, 侯妙乐, 等. 基于四面体的不规则表面文物体积计算[J]. 测绘通报, 2011(10): 50-52.
Zhang Xiaoqing, Zhu Guang, Hou Miaole, et al. Volume calculation of surface irregular cultural relic based on tetrahedron[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(10): 50-52.
- [6] 王泉德. 任意三角网格模型体积的快速精确计算方法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(18): 32-34, 58.
Wang Quande. Fast and accurate volume calculation method for arbitrary triangular meshes[J]. Computer Engineering and Application, 2009, 45(18): 32-34, 58.
- [7] 徐志, 许宏丽. 一种基于凸包近似的快速体积计算方法[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(21): 177-179, 185.
Xu Zhi, Xu Hongli. Fast algorithm of computing volume based on convexhull[J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(21): 177-179, 185.
- [8] Ratnikova N, Huang C H, Sanchez-Hernandez A, et al. CMS space monitoring[J]. Journal of Physics, 2014, 513(4): 36-42.
- [9] Sakuma T, McCauley T. Detector and event visualization with sketch up at the CMS experiment[J]. Journal of Physics, 2014, 513(2): 22-32.
- [10] 罗周全, 刘晓明, 杨彪, 等. 采空区精密探测技术应用研究[J]. 矿业研究与开发, 2006, 26(增2): 87-90.
Luo Zhouquan, Liu Xiaoming, Yang Biao, et al. Research on precision detection of mined area[J]. Mining Research and Development, 2006, 26(Suppl 2): 87-90.
- [11] 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 MS detection[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [12] Liu H. An Improved refinement algorithm of triangular mesh subdivision based on minimum weight theory[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(2): 2552-2555.
- [13] Sun D, Sun Y, Tian Z, et al. Rapidly getting intersection algorithm for triangular mesh surface models[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(8): 1121-1124, 1135.
- [14] Dai C, Liu H, Dong L. A comparison of objective functions of optimization-based smoothing algorithm for tetrahedral mesh improvement[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2014, 52(1): 151-163.
- [15] Bronson J, Levine J A, Whitaker R. A multimaterial tetrahedral meshing algorithm with guarantees[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2014, 20(2): 223-237.

(责任编辑 吴晓丽)