

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.20

采空区三角形投影体积算法及其应用

王婷玉, 罗周全, 黄俊杰, 秦亚光

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 采空区体积的获取是采空区充填以及灾难监测的重要基础。由于采空区形状的特殊性及复杂性, 过于复杂的算法不利于其体积的求取。本文首先利用三维激光扫描仪探测采空区获取点云数据, 确定点的空间拓扑关系, 对采空区点云进行三角剖分, 实现采空区三角网模型的构建。然后运用三角形投影体积算法, 利用模型三角面与其在投影面上对应顶点构建出五面体, 把五面体分割为三个四面体, 通过四面体体积累加实现对采空区体积的精确求取。通过与 Surpac 求取的采空区体积对比, 三角形投影体积算法相比传统的采空区三角网模型四面体算法求取的采空区体积精度更高。

关键词: 采空区体积; 三角剖分; 投影体积算法

中图分类号: TD76

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0127-05

Application of triangle projection volume algorithm in goaf

WANG Tingyu, LUO Zhouquan, HUANG Junjie, QIN Yaguang

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

Abstract: Acquisition of goaf volume is the important basis of goaf filling and disaster monitoring. As the particularity and complexity of the shape, too complex algorithm is not helpful to achieve the size of goaf. In this paper, 3D laser scanner was used to obtain the point cloud data, the topological relationship of the points was determined according to the laser scanning principle, then the triangulation of goaf point cloud is carried out, the construct of the triangle net model was realized. The model triangular facet and corresponding vertex of projection plane was used to construct the pentahedron, which was divided into three tetrahedral, the accurate calculation of goaf volume was realized through the sum of tetrahedral volume. Finally, compared with the mined goaf by Surpac, triangle projection volume algorithm is more accurate than the conventional tetrahedral algorithm of goaf triangulation mesh model.

Keywords: goaf volume; triangulation; algorithm of projection volume

0 前言

矿山开采形成的采空区是矿山的主要危险源之一, 采空区体积的获取是采空区充填以及灾难监测的重要基础。不同的爆破方法以及矿山稳定性的不同都会造成采空区体积的变化, 采用三维激光扫描技术, 获取采空区空间点云信息, 并对其进行三角剖分, 在建立三维模型的基础上获取采空区体积具有很大的实际意义。

目前, 已经有相当多的国内外学者对三角网模型体积进行了深入研究, 文献[1]首先将原始三角网模型进行仿射变换, 平移模型中心使其与坐标原点重合, 在重构三维模型拓扑关系的基础上求出模型体积。文献[2]通过对投影平面和三角网格模型进行三维旋转变换, 通过投影体的有向体积求和得到三角网格模型体积。文献[3]利用微积分算法, 通过三角形面积矢量的叠加, 在剖面面积与间距的基础上, 计算出三角网格模型的体积。文献[4]通过通量重构步骤, 在不需

收稿日期: 2015-09-21; 修订日期: 2015-10-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51274250)

第一作者: 王婷玉(1991-), 女, 硕士研究生, 从事金属矿深井开采及灾害辨析监控理论与技术研究。E-mail: 1462146993@qq.com.

要迭代的情况下实现了体积求取过程中空间系数变化大的问题。文献[5]通过最大强度投影的方法实现了立体数据可视化,通过绘制体积模型来求取体积。然而由于采空区形状的特殊性及复杂性,通过三维激光扫描仪获取的空间点云数据分布不均匀,会出现局部点云过于密集或者稀疏,过于复杂的算法不利于其体积的求取。

本文在采空区三维空间点云数据获取的基础上,根据三维激光仪探测原理,确定点的空间拓扑关系,从而实现对采空区模型的构建。在采空区三角网模型构建基础上,根据三角形投影体积算法,首先利用模型三角面与其在投影面上对应顶点构建出五面体,然后把五面体分割为三个四面体,最后通过四面体体积累加实现对采空区体积的精确求取。

1 采空区三维空间点云获取及三角剖分

1.1 采空区三维点云获取

三维激光扫描技术又被称为实景复制技术,它突破了传统的单点测量方法,具有高效率、高精度的独特优势。三维激光扫描技术能够提供扫描物体表面的三维点云数据,可以用于获取高精度高分辨率的数字地形模型^[6]。它通过高速激光扫描测量的方法,大面积高分辨率地快速获取被测对象表面的三维坐标数据,可以快速、大量的获取空间点三维坐标信息,为快速建立物体的三维影像模型提供了一种全新的技术手段。目前国内外主流的一些非接触式三维激光扫描仪比如 VS150, CMS, CALS 等^[7-9],都能快速准确地获取采空区三维空间点云数据信息,为快速准确获取采空区模型提供了方便。

1.2 采空区三角网模型构建

在采空区三维空间点云数据获取的基础上,根据三维激光仪探测原理,确定点的空间拓扑关系,从而实现对采空区模型的构建^[10-13]。点云空间拓扑关系:圈与圈之间点云拓扑关系见图 1(a),第 n 圈点云的第 j 个点 n_j 与第 $n+1$ 圈点云中距离 n_j 最近的第 i 个点 n_{i+1} 相连,然后点 n_{i+1} 与点 n_{j+1} 相连,依此类推直到遍历每圈所有点云为止;第一圈或最后一圈点云与中心点的拓扑关系见图 1(b),中心点与第一圈或最后一圈点云数据中每一个点相连即可。根据以上点云拓扑准则,即可实现采空区三维模型的精确构建。

根据点云的空间拓扑关系,综合运用 Visual C++ 编程工具、OpenGL 三维图形显示和数据库技术^[14-15],在自主研发的采空区三维可视化集成系统(CVIS)中

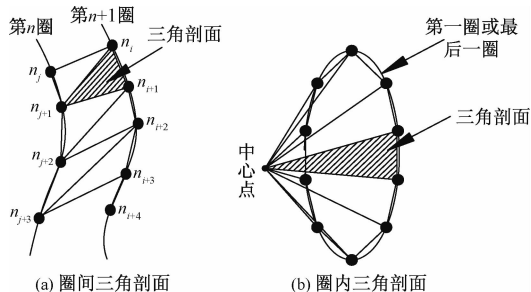


图 1 三角剖分说明

Fig. 1 Triangulation description

生成的采空区三维三角网模型见图 2。

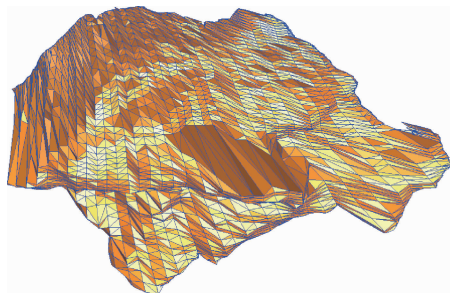


图 2 采空区三维模型

Fig. 2 Goaf Three-dimensional model

2 采空区三角形投影体积算法

三角形投影体积算法前提是建立的采空区三角网模型封闭且所有三角形的法向量指向外。为了便于计算和坐标投影,算法设定的投影平面为高程平面。算法流程图见图 3。

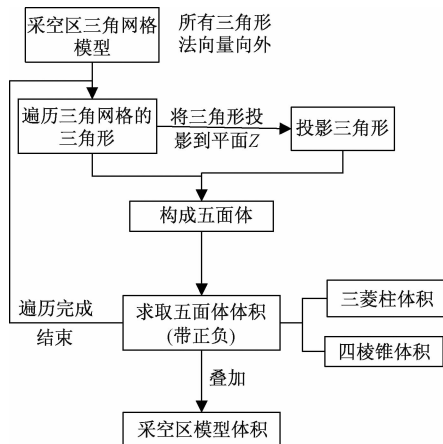


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flow chart

为了说明算法,取法向量指向上的三角网中一个三角形 $\triangle ABC$,该三角形多数情况位于采空区模型顶部。三角形 $\triangle ABC$ 投影到高程平面 Π ,得到投影三角

形 $\triangle A_1B_1C_1$ 、 $\triangle ABC$ 和 $\triangle A_1B_1C_1$ 组成一个三棱柱五面体,对于五面体体积计算可将其根据面对角线划分为 3 个四面体,以 A_1 作为四面体顶点为例说明,3 个四面体分别为 $A_1B_1BC_1$ 、 A_1C_1BA 、 A_1ABC ,将 3 个四面体体积相加即为五面体的体积(图 4)。五面体的体积是带方向的,体积计算完毕后对体积的正负进行判定。可以借助三角形法向量和投影平面法向量夹角大小来判断体积的正负,当三角形法向量 N 与平面法向量 n 夹角小于 90° 时,夹角余弦大于 0 时,判定体积方向为正。当三角形法向量 N 与平面法向量 n 夹角大于或等于 90° 时,夹角余弦小于或等于 0 时,判定体积方向为负(图 5)。也就是说,体积方向与夹角余弦值正负方向是一致的。

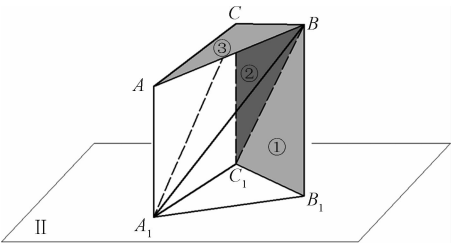


图 4 五面体划分示意图
Fig. 4 Pentahedron division diagram

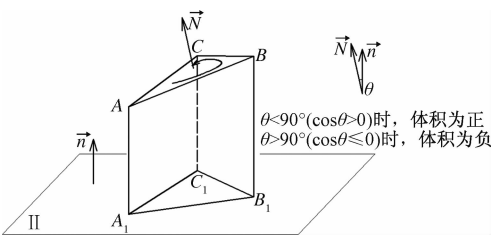


图 5 法向量夹角示意图
Fig. 5 Normal vector angle diagram

通过将三角网中所有三角形投影的五面体体积叠加,即求出采空区三角网模型的体积。四面体体积可通过体积的行列式公式求出,式中四面体由顶点 a 和底面三角形为 $\triangle bcd$ 组成:

$$V(T) = \frac{1}{6} \times \begin{vmatrix} a_0 & a_1 & a_2 & 1 \\ b_0 & b_1 & b_2 & 1 \\ c_0 & c_1 & c_2 & 1 \\ d_0 & d_1 & d_2 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{6} \times [- (a_2 - d_2) (b_1 - d_1) (c_0 - d_0) + (a_1 - d_1) (b_2 - d_2) (c_0 - d_0) + (a_2 - d_2) (b_0 - d_0) (c_1 - d_1) - (a_0 - d_0) (b_2 - d_2) (c_1 - d_1) - (a_1 - d_1) (b_0 - d_0) (c_2 - d_2) + (a_0 - d_0) (b_1 - d_1) (c_2 - d_2)]$$

通过五面体体积有向和计算即可得到采空区三角形投影体积 V ,式中 m 代表采空区三角网模型中有 m 个三角片面, k 代表第 k 个四面体体积或者第 k 个三角片面。

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

3 算法应用

某地下大型铅锌矿范围内断层发育,其中规模较大的有 NNE 走向的 F3,倾向东;NE 走向的 F102,倾向西,倾角均在 $70^\circ \sim 80^\circ$ 之间,为平行右移逆断层。断层两侧均具明显的牵引挠曲,破碎带范围在 0.5 ~ 1.5 m 左右。破碎带出现构造角砾,主要成分为灰岩,胶结物为泥质或泥灰质,较为松散,揉皱现象明显,次级小构造也较为发育,多具剪切性,常造成矿岩内部结构的破碎。矿体主要为 sh6a 矿体和 sh7a 矿体。sh6a 矿体依附在 F102 断层上盘,矿体形态较为规整。sh7a 矿体依附在 F3 断层上盘,规模相对较小,矿体形态单一,但连续性较差。矿石的主要组成为块状致密状黄铁铅锌矿,松散黄铁铅锌矿在断层的破碎带中存在。矿岩松散系数 1.5 ~ 1.6。凿岩性等级为 V-VI 级,爆破性等级为 IV-VII 级。矿石为高硫矿石,易发热和结块,温度可高达 $40 \sim 45^\circ\text{C}$ 。

该矿多年的开采积累了大量采空区。有效地对采空区进行了管理对于矿山安全生产至关重要,实现采空区体积的准确求取对于空区监控、充填以及治理等至关重要。图 6 为某采场地质剖面图,该采场矿岩边界复杂,空区形状极不规整,导致其体积求取难度较大。采空区三角形投影体积算法很好实现了复杂采空区体积的精确求取。为了验证采空区三角形投影体积算法计算采空区体积的有效性,以某地下大型金属矿

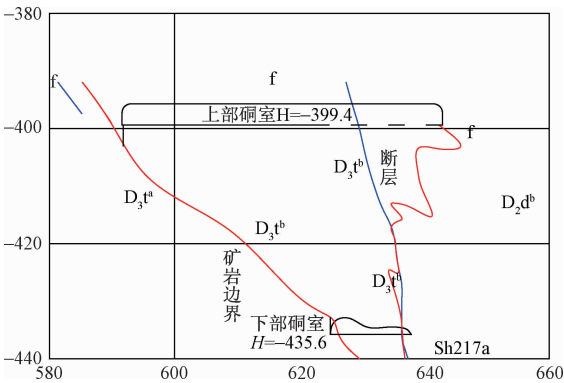


图 6 某采场地质剖面图
Fig. 6 Geological section map of one stope

山多个采空区为例,并和成熟且广泛应用的大型采空区后处理软件 Surpac 求取的采空区体积作对比。选取 20 组采空区探测点云数据,两者计算所得的体积对比结果见表 1。

表 1 三角形投影体积算法和 Surpac 求取的采空区体积对比

Table 1 Comparison of goaf volume calculated by Surpac and algorithm of triangle projection volume

采空区编号	三角形投影体积算法求取的体积/m ³	Surpac 求取的体积/m ³	相对误差/%
1	11963	11980	0.142
2	9434	9464	0.317
3	6961	6941	0.288
4	6728	6770	0.620
5	11378	11392	0.123
6	14950	14967	0.114
7	8454	8482	0.330
8	7469	7530	0.810
9	14650	14689	0.266
10	15637	15638	0.006
11	10968	11035	0.607
12	7068	7107	0.549
13	15543	15565	0.141
14	5196	5164	0.620
15	11230	11269	0.346
16	27280	27296	0.059
17	5930	5921	0.152
18	5874	5867	0.119
19	7433	7415	0.243
20	6187	6197	0.161

由表 1 可以得出:运用三角形投影体积法求得的采空区体积与 Surpac 求取的体积之间相对误差仅为 0.114%~0.810%之间,两者基本吻合。误差分析:由于自主研发的采空区三维可视化集成系统与 Surpac 建模方法不同,构造出来的三角网格模型有所差别,所以导致最终两款软件之间计算得出的采空区体积存在一定误差。

三角形投影体积法的实质是把投影四面体分为三个四面体,通过对四面体体积求和计算进而得到整个采空区体积。而传统的采空区三角网模型四面体算法直接把采空区分成大量的四面体,也是通过对单个四面体体积求和计算进而得到整个采空区体积。三角形投影体积法和传统的采空区三角网模型四面体算法求得的采空区体积与 Surpac 求取的采空区体积的绝对误差对比如图 7 所示。由图 7 可以看出,三角形投影体积法求得的采空区体积整体上更接近 Surpac 求取的采空区体积,相比传统的采空区三角网模型四面体算法计算的精度有所提高。

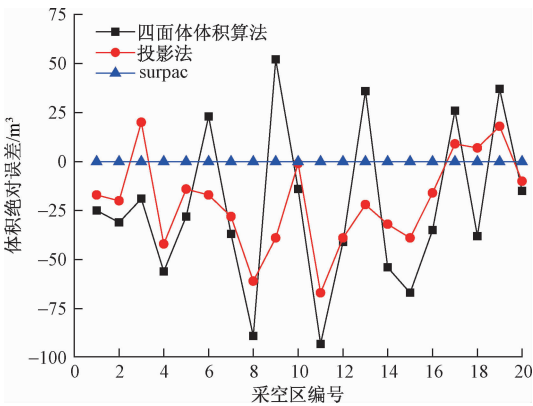


图 7 两种算法与 Surpac 求取的体积绝对误差比较

Fig.7 Comparison of volume absolute error between two algorithms and Surpac model

4 结论

(1)利用三维激光扫描仪探测采空区获取点云数据,根据激光扫描原理,确定点的空间拓扑关系,对采空区点云进行三角剖分,实现了采空区三角网的构建。

(2)运用三角形投影体积算法,首先利用模型三角面与其在投影面上对应顶点构建出五面体,然后把五面体分割为三个四面体,最后通过四面体体积累加实现对采空区体积的精确求取。

(3)通过与 Surpac 求取的采空区体积比较,三角形投影体积算法相比传统的采空区三角网模型四面体算法求取的采空区体积精度更高。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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(18):32-34, 58.
WANG Quande. Fast and accurate volume calculation method for arbitrary triangular meshes[J]. Computer Engineering and Application, 2009(18):32-34, 58.

[3] 罗周全,张文芬,鹿浩,等. 采空区体积三角网模型剖面的微积分算法[J]. 北京科技大学学报, 2014(9):1143-1148.

- LUO Zhouquan, ZHANG Wenfen, LU Hao, et al. Calculus algorithm of triangular mesh model profiles for cavity volume[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014(9):1143-1148.
- [4] 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(8):125-130.
CHEN Kai, ZHANG Da, ZHANG Yuansheng. Point cloud data processing method of cavity 3DLaser scanner[J]. Acta Optica Sinica, 2013(8):125-130.
- [5] 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(20):54-58.
LUO Zhouquan, ZHANG Wenfen, XU Shimin. Multiple detection data's simplification in complicated goafs[J]. Science & Technology Review, 2014(20):54-58.
- [6] 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(9):1136-1142.
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(9):1136-1142.
- [7] 罗贞焱. 基于CMS探测的采空区三维可视化系统研究[D]. 中南大学, 2010.
LUO Zhenyan. The research of goaf's 3D visual system based on CMS detection[D]. Central South University, 2010.
- [8] 张朝雷,宋卫东,付建新,等. CMS及三维可视化技术在采空区探测中的应用研究[J]. 现代矿业, 2011(4):95-97.
ZHANG Chaolei, SONG Weidong, FU Jianxin, et al. Research on the application of CMS and 3D visualization technology in the exploration of cavity[J]. Modern Mining, 2011(4):95-97.
- [9] 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]. 中南大学学报(自然科学版), 2014(11):3930-3935.
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(11):3930-3935.
- [10] 韦争亮,钟约先,袁朝龙,等. 散乱三维测量数据构建三角形网格模型的研究[J]. 机械设计与研究, 2008(1):61-63, 71.
WEI Zhengliang, ZHONG Yuexian, YUAN Chaolong, et al. Research on reconstruction of triangular mesh model from scattered 3D measured data[J]. Machine Design and Research, 2008(1):61-63, 71.
- [11] 马锦华. 逆向工程中三角网格模型细分技术研究[D]. 江苏大学, 2007.
MA Jinghua. Research on subdivision algorithm for triangular meshes in reverse engineering[D]. Jiangsu University, 2007.
- [12] WANG Chao, Cho Yong K. Smart scanning and near real-time 3D surface modeling of dynamic construction equipment from a pointcloud[J]. Automation in Construction, 2015(49):239-249.
- [13] 张小青. 基于三角网格模型的文物几何信息计算[D]. 北京建筑工程学院, 2012.
ZHANG Xiaoqin. Cultural relics geometry information calculation based on triangular mesh model[D]. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2012.
- [14] LUO Chuanwen, ZHU Qingjie, PANG Bo, et al. Research of the 3d GIS based on OpenGL_ES for earthquake engineering[J]. Systems Engineering Procedia, 2011(1):93-98.
- [15] KairongLi, JuanniWang, KuiZuo, JianYun. Research on dam simulation system based on OpenGL[J]. Physics Procedia, 2012(24):1801-1806.