

三维地层网格剖分方法与应用

周翠英^{1,2}, 刘祚秋^{1,2}, 董立国^{1,2}, 陈恒^{1,2}

1. 中山大学地下工程与信息技术研究中心, 广东广州 510275
2. 中山大学应用力学与工程系, 广东广州 510275

摘要: 针对三维地层表示中散乱点的三角化问题, 提出了一种新的剖分算法——环形三角剖分算法。该算法首先在散乱点中心构造初始三角形, 并将其3条边作为初始环形路径; 然后对环形路径上的每条线段, 都在其外围寻找与两端点所成夹角最大的点构造新三角形, 并将其纳入环形路径, 从而使环形路径不断向外围扩展; 重复此扩展过程直到所有散乱点都处于路径范围内。对上述剖分中遗漏的小块区域形成的“空洞”, 利用简单多边形的三角剖分方法实现三角化。此算法时间复杂性介于 $O(n)$ 与 $O(n^2)$ 之间, 其效率体现在: 只搜索外围散乱点, 减少了夹角计算过程; 只对已扩展点进行“空洞”判断, 节省了处理时间。将此环形三角剖分算法应用于广东省东深供水改造工程的三维地层构造与分析中, 取得了良好的剖分效果和执行效率, 对地层的任意剖切和开挖分析均具有良好的支持。

关键词: 三维地层; 网格剖分方法; 散乱点; 三角化; 工程应用。

中图分类号: TP301; P642

文章编号: 1000-2383(2005)03-0377-04

收稿日期: 2004-12-17

Grid Cutting Method of 3D Stratum and Its Application to Engineering

ZHOU Cui-ying^{1,2}, LIU Zuo-qiu^{1,2}, DONG Li-guo^{1,2}, CHEN Heng^{1,2}

1. Research Center of Underground Engineering and Information Technology, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China
2. Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: In order to form triangles with discrete points which distributed in a plane in the research of 3D stratum, this paper presents a new algorithm called automatic annular triangular cutting arithmetic (AATCA) which expands from the center to the periphery. It constructs a triangle by searching for reasonable points in the periphery place around a polygon path from the beginning of the central part of these discrete points, and updates the polygon with time. There will be hollows during the expanding, as some small areas may be skipped. But they can be divided into triangles by an existing method. Then the memory structure of data in the grid cutting process is discussed; The basic procedure and steps of AATCA are given; The time complexity of AATCA we concerning about, is between $O(n)$ and $O(n^2)$. Efficiency is embodied in two aspects: to reduce the steps of angle calculation by only considering some polygons distributed on the periphery or on the nearside of present side; and to save time by only giving an estimation of the hollows for the expanded points. The AATCA algorithm is then applied to the Water Supply Reconstruction Project from Dongjiang to Shenzhen, which is the largest water conservancy construction project in Guangdong Province at present. The results show that the algorithm not only gives a reasonable triangular division for the polygon points but also performs efficiently.

Key words: 3D stratum; grid cutting algorithm; discrete points; triangulation; application to engineering.

地层三维可视化和空间分析是地下空间开发利用的重要内容之一, 可为合理有效地利用地下空间

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 59809008); 广东省重大科技攻关“十五”专项 (No. 2001B30903); 广东省科技计划项目 (2004B10101002); 广东省计委东深供水改造工程建设总指挥部委托项目 (Nos. DSGZ-KJ-042, DSGZ-KJ-043).

作者简介: 周翠英 (1963-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程与环境地质的教学与研究工作. E-mail: eeszczy@zsu.edu.cn

提供良好的支持. 目前, 三维地层可视化的建模方法基本可分为 2 类: 基于面构模和基于体构模. 基于面构模包括多层 DEM 构模、表面构模、边界构模等; 基于体构模包括结构实体几何构模、四面体构模等(杨钦等, 1998). 在基于面构模的建模方法中, 地层的三角化剖分是一关键问题, 其剖分效率及生成三角形的质量将直接影响三维地层的显示效果(周晓云等, 1994; 卢朝阳等, 1997; 杨钦等, 1998; 孙国庆等, 2001).

地层的三角划分可通过平面散乱点的三角划分来进行(刘祚秋等, 2003): 首先, 将钻孔分布图上的钻孔和虚拟钻孔作为 XY 平面上的散乱点, 对它们进行三角划分; 然后, 将生成的三角网格沿 Z 方向向地层分界面投影, 从而将地层分界面三角化; 此时, 即可利用这些三角形面, 通过面构模方法构造三维地层.

目前, 根据平面散乱点进行三角剖分的算法主要包括 Delaunay 三角剖分、贪心法三角剖分等; 但是, 迄今为止, 关于平面散乱点的剖分问题尚未完全解决(杨钦等, 1998). 基于此, 本文提出了一种从中心向外围扩展的平面散乱点三角剖分算法, 称之为环形三角剖分算法. 此算法不仅可获得较理想的剖分结果, 并且能快速处理大量散乱点. 通过对环形三角剖分算法的时间复杂性分析, 证明了该算法具有较高的执行效率, 最后, 将其在广东省东深供水改造工程地下环境信息系统中进行了应用, 验证了该算法的正确性和实用性.

1 环形三角剖分算法

环形三角剖分算法是一种从中心向外围扩展的平面散乱点三角剖分算法, 它从散乱点的中心开始, 绕环形路径向外围搜寻合理散乱点, 构造三角形, 并将此三角形的边纳入环形路径, 从而不断对其更新和优化, 达到向原路径外围扩展的目的. 当环形路径扩展到散乱点的区域边界时, 剖分完成.

环形路径为一多边形, 由一系列散乱点首尾相连而成, 因此, 在环形路径外围搜寻扩展点, 即相当于在多边形每条边外围寻找扩展点. 在搜寻过程中, 为使生成三角形的三内角度数相差不大, 扩展点应为与多边形当前边的两端点所成角度最大的散乱点. 此外, 对剖分过程中可能出现的“空洞”——被已剖分区域包围的小面积未剖分区域, 需进行特殊三角剖分处理, 并将此剖分作为平面散乱点三角剖分

的组成部分.

2 环形三角剖分算法中数据存储结构

在基于平面散乱点的环形三角剖分算法中, 牵涉到多种数据的存储问题, 如输入数据、中间数据以及输出数据等. 为了操作和存储方便, 对其采用链表结构进行存储(周培德, 1996; 杨钦等, 1998; 李世森等, 2000): (1) 输入数据为平面上的 n 个散乱点坐标 $(X_i, Y_i) (i=1, 2, \dots, n)$. 它们以链表的形式进行存放, 每个节点存储散乱点的 X、Y 坐标和标识 mark_{*i*} ($i=1, 2, \dots, n$), 如图 1a 所示. 其中, 标识 mark_{*i*} ($i=1, 2, \dots, n$) 分为 -1、0 和 1 三种形式. -1 表示此散乱点在剖分过程中已经被使用, 且不能再次被使用; 0 表示此离散点在剖分过程中未被使用; 1 表示此离散点在平面三角形网格剖分中已经被使用, 且还可继续被使用. (2) 中间数据为多边形环形链表, 每个节点存储多边形顶点坐标和指向下一个顶点的指针, 如图 1b 所示. (3) 输出数据为三角形链表, 每个节点存储三角形 3 个顶点坐标和指向下一个节点的指针, 如图 1c 所示.

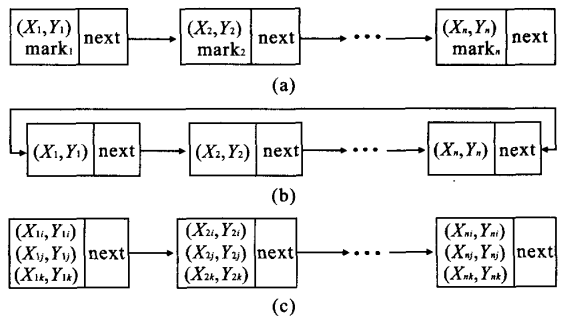


图 1 存储结构

Fig. 1 Storage structure

a. 输入数据; b. 多边形环形; c. 三角形

3 平面散乱点的环形三角剖分

3.1 环形三角剖分算法的基本过程

(1) 求所有离散点的形心; 找到距离形心最近的离散点作三角剖分的第一点 P_1 , 找到与 P_1 点距离最近的点 P_2 ; (2) 在点 P_1 、 P_2 连线 P_1P_2 的“左侧”搜索未使用离散点 (标识为 0) P_3 , 使 P_3P_1 与 P_3P_2 所成夹角最大; 将 P_1 、 P_2 、 P_3 的标识设置为 1 (即为

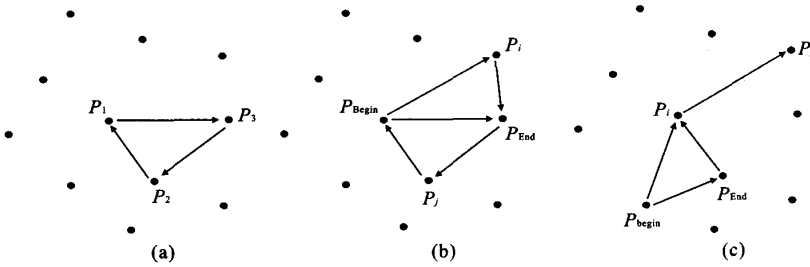


图 2 中心三角形与初始多边形(a)以及新三角形的形成(b)与多边形的扩展(c)
 Fig. 2 Initial triangle and polygon (a), new triangles (b) and expanded polygons (c)

多边形顶点);用 $P_1 \rightarrow P_3 \rightarrow P_2 \rightarrow P_1$ 组成初始多边形环形链表,如图 2a 所示;存储 P_1, P_2, P_3 所构成的三角形.若找不到 P_3 点,则说明离散点数目小于 3 或所有离散点都处于同一直线上;(3)对多边形顺时针循环,对链表节点构成的每条边 $P_{Begin} \rightarrow P_{End}$ 执行(4)和(5);(4)在 $P_{Begin} \rightarrow P_{End}$ “左侧”寻找标识为 0 或 1 的点,计算它们同 P_{Begin}, P_{End} 所成的夹角,记所成夹角最大者为 P_i ; (5)存储由 P_i, P_{Begin}, P_{End} 所构成的三角形.然后根据 P_i 的标识选择执行以下选项: ①若 P_i 的标识为 0,则将多边形链表中 $P_{Begin} \rightarrow P_{End}$ 更新为 $P_{Begin} \rightarrow P_i \rightarrow P_{End}$, P_i 点的标识置为 1(图 2b);②若 P_i 的标识为 1,将多边形链表中 $P_{Begin} \rightarrow P_{End}$ 更新为 $P_{Begin} \rightarrow P_i \rightarrow P_j$, P_{End} 点的标识置为 -1,即 P_{End} 变为多边形的内部点.判断是否形成“空洞”,若是,则调用“空洞”处理子程序(图 2c);(6)重复步骤(3),当多边形链表循环一周找到的 P_i 点的个数为 0 时,散乱点的三角剖分完毕.

3.2 “空洞”的形成和处理

如图 3 所示,在 $P_{Begin} \rightarrow P_{End}$ “左侧”搜索到的 P_i 点若为多边形链表上的点,且不是 P_{End} 的后续点,此时若按上述算法进行三角划分就会出现“空洞”:存储三角形 $P_{Begin} P_{End} P_i$;将多边形指针 $P_{Begin} \rightarrow P_{End}$ 改为 $P_{Begin} \rightarrow P_i \rightarrow P_j$;将点 P_{End} 的标识置为 -1.因此, P_{End} 到 P_i 之间的 3 条多边形的边将会被跳过,从而

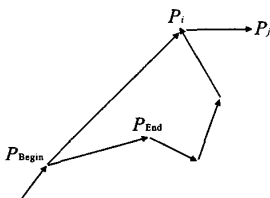


图 3 “空洞”构成
 Fig. 3 Formation of a hollow

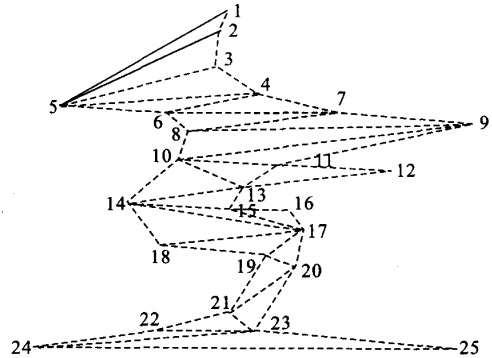


图 4 简单多边形三角剖分(周培德,1999)
 Fig. 4 An example of the division of simple polygon

形成“空洞”.

在对“空洞”进行三角剖分时,将其看作简单多边形,采用周培德(1999)的简单多边形三角剖分算法进行剖分.图 4 为一简单多边形的三角剖分示例.剖分完成后,将生成的三角形存储到作为输出数据的三角形链表中.

4 环形三角算法的时间复杂性及其效率分析

在寻找新散乱点构造三角形时,对每个散乱点都需判断其是否为扩展点;只对扩展点判断是否进行“空洞”处理.因此,该环形算法的时间复杂性将介于 $O(n)$ 与 $O(n^2)$ 之间.

该算法的效率体现在以下 2 方面:(1)只考虑处于多边形外围且在当前边“左侧”的散乱点,减少了计算夹角的过程;(2)只对扩展点进行“空洞”判断,节省了“空洞”处理时间.由于同夹角计算相比,判断点的位置所用的时间要明显短,并且处理“空洞”也需花费较多时间;因此,该算法具有较高的执行效

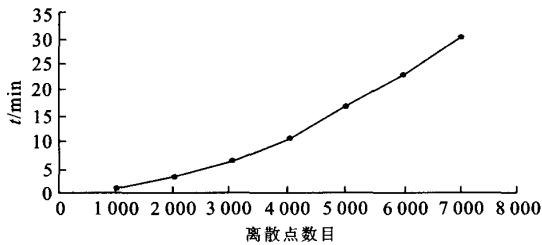


图 5 离散点数目与消耗时间的关系

Fig. 5 Relationship of point number and total time

率. 图 5 给出了对 1 000~7 000 个随机平面散乱点进行三角化时所用的时间 (Pentium IV 1.8 GHz, 256 M 内存).

5 环形三角剖分算法的工程应用

利用 Borland C++ Builder 和 Open GL 技术 (Wright and Sweet, 2000), 对上述环形三角剖分算法进行了实验分析和工程应用. 图 6 为 60 个平面散乱点时的三角剖分结果, 体现了该算法的合理性; 在实验分析的基础上, 笔者选择东深供水改造工程中莲湖泵站为代表性地段, 利用此环形算法划分网格,

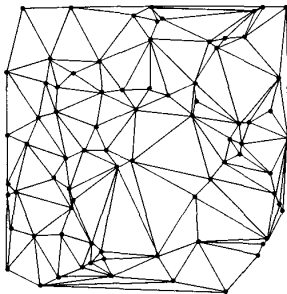


图 6 平面任意散乱点三角剖分示例

Fig. 6 Example for triangles formed with discrete points in a plane

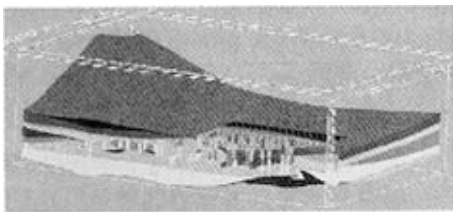


图 7 应用环形三角剖分算法形成的三维地层

Fig. 7 Stratum formed with AATCA

通过面构模的方式实现了三维地层 (图 7). 研究结果与工程实际地层对比表明, 该算法的剖分效果是比较理想的.

6 结论

(1) 针对平面散乱点的三角剖分问题提出了一种剖分新算法——环形三角剖分算法, 对该算法的基本过程与“空洞”形成与处理进行了研究, 并进行了复杂性分析, 表明其具有良好的执行效率; (2) 应用该环形算法对东深供水改造工程中的代表性地层进行三角网格剖分, 并构造其三维地层, 得到较理想的效果, 验证了该三角剖分算法的可靠性和可行性, 是一种值得推广的算法.

References

- Li, S. S., Zhu, Z. X., Qin, L., et al., 2000. Automatic triangulation of arbitrary planar domain. *Journal of Tianjin University*, 33(5): 592–598 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. Q., Zhou, C. Y., Zhao, X. S., et al., 2003. Research on three-dimensional stratum model and its visual technology. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 42(4): 21–23 (in Chinese With English abstract).
- Lu, Z. Y., Wu, C. K., Zhou, X. N., 1997. Overall Delaunay triangulation of 2D scattered data with characteristic constraints. *Chinese J. of Computers*, 20(2): 118–124 (in Chinese with English abstract).
- Sun, G. Q., Shi, M. J., Lei, Y. H., et al., 2001. Research on 3D engineering geological model and its visualization. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (5): 8–10 (in Chinese with English abstract).
- Wright, R. S., Sweet, Jr. M., 2000. Open GL superbible. 2nd Edition. Translated by Xiaoxiang Studio. People's Posts & Telecom Press, Beijing, 3–215 (in Chinese).
- Yang, Q., Xu, Y. A., Chen, Q. M., et al., 1998. Triangulation algorithm of scattered data on arbitrary planar domain. *Journal of Software*, 9(4): 241–245 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, P. D., 1999. Computational geometry—Analysis and design of algorithmic. Tsinghua University Press, Beijing, 53–54 (in Chinese).

(下转 386 页)

logical study on residual soils of granite in North China. In: Yu, P. H., Qu, Y. X., Tang, D. X., eds., Proceedings of the 2nd symposium on engineering geology of red soils in China. Guizhou Science and Technology Press, Guiyang (in Chinese).

Zhang, N. X., Fu, J. C., 1980. Experimental study on quantification of clay minerals via X-ray diffraction apparatus. *Oil Exploration and Development*, 6: 12-20 (in Chinese with English abstract).

Zhang, N. X., Li, Y. Q., Zhao, H. M., et al., 1990. Methods used for studying clay minerals. Science Press, Beijing (in Chinese).

附中文参考文献

黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿, 等, 1996. 中国南方红色风化壳. 北京: 海洋出版社, 312.

尚彦军, 吴宏伟, 曲永新, 2001. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比——以香港九龙地区为例. *地质科学*, 36(3): 279-294.

王清, 唐大雄, 陈剑平, 1992. 北方花岗岩残积土的工程地质研究. 见: 余培厚, 曲永新, 唐大雄编, 第二届全国红土工程地质研讨会论文集. 贵阳: 贵州科技出版社.

张乃娴, 付景春, 1980. 用 X 射线衍射仪定量分析粘土矿物的实验研究. *石油勘探与开发*, 6: 12-20.

张乃娴, 李幼琴, 赵慧敏, 等, 1990. 粘土矿物研究方法. 北京: 科学出版社.

(上接 380 页)

Zhou, P. D., 1996. The algorithm for triangulation of the point-set in the plane. *China J. CAD & CG*, 8(4): 259-264 (in Chinese with English abstract).

Zhou, X. Y., He, D. Z., Zhu, X. X., 1994. An algorithm of triangulation for scattered data in none-convex region. *China J. CAD & CG*, 6(4): 256-259 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

李世森, 朱志夏, 秦岭, 等, 2000. 任意平面区域的自动三角剖分. *天津大学学报*, 33(5): 597.

刘祚秋, 周翠英, 赵旭升, 等, 2003. 三维地层模型及可视化技术研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 42(4): 21-23.

卢朝阳, 吴成柯, 周幸妮, 1997. 满足全局 Delaunay 特性的带特征约束的散乱数据最优三角剖分. *计算机学报*, 20

(2): 118-124.

孙国庆, 施木俊, 雷永红, 等, 2001. 三维工程地质模型与可视化研究. *工程勘察*, (5): 8-10.

Wright, R. S., Sweet, Jr. M., 2000. Open GL 超级宝典 (第二版). 潇湘工作室译. 北京: 人民邮电出版社, 3-215.

杨钦, 徐永安, 陈其明, 等, 1998. 任意平面域上离散点集的三角化方法. *软件学报*, 9(4): 241-245.

周培德, 1999. 计算几何——算法分析与设计. 北京: 清华大学出版, 53-54.

周培德, 1996. 平面点集三角剖分的算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 8(4): 259-264.

周晓云, 何大曾, 朱心雄, 1994. 实现平面上散乱数据点三角剖分的算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 6(4): 256-259.