

城市景观三维重建中的三角剖分算法

殷勇^①, 俞连芳^②, 马照亭^①, 李成名^①

(^①中国测绘科学研究院, 北京 100039; ^②湖州市测绘院, 浙江 湖州 313000)

【摘要】在构建城市景观时, 为了快速精确地重建建筑物、绿地、河流等三维模型, 提高自动化程度, 缩短建设周期, 需对用户采集的矢量地物数据进行三角剖分, 再以 OpenGL 重绘三维模型。本文提出了一种对多边形进行三角剖分的递归分割算法, 并以 VisualC++ 实现, 以实际的 4 万多个建筑物进行三角剖分实验, 充分证明其是有效的。

【关键词】数字城市; 三角剖分; 三维 GIS; OpenGL

【中图分类号】P208

【文献标识码】A

【文章编号】1009-2307(2008)04-0039-03

DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2008.04.012

1 引言

在城市景观三维重建中, 对于二维地理信息系统中的面状对象, 如道路、河流、绿地、建筑物等的构建绝大多数仍停留在手工阶段, 已经成为城市景观三维重建中的数据瓶颈。为了快速、准确地构建这些模型, 必须开发一套自动化强、效率高的三维建模工具。二维地理信息中的面是三维模型的重要组成部分, 如何对其快速剖分是三维模型构建的关键技术之一。

ChengSiuwing^[1]从建立最优三角形条件的角度提出了简单多边形三角剖分的算法; 杨杰^[2-5]等提出了根据顶点凹凸性进行简单多边形三角剖分的算法, 然而, 这些算法都是基于平面的, 在三维 GIS 的许多应用中, 需要考虑高程起伏和带洞多边形等复杂情况, 典型的如河流、道路、绿地等; 刘强、李德仁^[6]等提出基于二叉树思想的任意多边形三角剖分递归算法, 考虑了高程起伏和简单带洞多边形, 但数据结构和算法实现复杂。本文直接基于城市景观三维应用需要, 提高自动化程度, 缩短建设周期, 充分考虑高程起伏和带洞多边形等复杂情况, 提出解决三维模型快速重建中的三角剖分问题。本算法实现简单, 实用性强, 利用现有的二维分图层面数据, 可快速重建城市景观。

2 多边形剖分原理

一般来说, 多边形可以分为五类: 简单多边形、退化多边形、自重叠多边形、自相交多边形和多连通多边形, 其中后四类多边形均可以转化为简单多边形。因此在多边形三角剖分处理中, 简单多边形三角剖分就是基础。而简单多边形有凸和凹之分, 由于凸多边形任意三顶点生成的三角形不会与多边形相交, 因此三角剖分算法十分简单, 而凹多边形任意三顶点生成的三角形不但可能与多边形相交, 而且可能位于多边形外, 因此任意多边形三角剖分关键就是凹多边形三角剖分。为了下文算法叙述和理解的需要, 首先引入一些定义:

定义 1: 过 Q 点作任一射线与多边形 P 求交, 如果距离 Q 点最近的交点不是多边形 P 的顶点, 则该交点所在边称为 Q 点的可见边。

定义 2: 设 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n, P_n = P_1$ 表示一个简单多边形, 由边 $P_{i-1}P_i, P_iP_{i+1}$ 所形成的内角 (即位于多边形所围成的有界区域内部的角) 记为 θ , 若多边形某顶点 P_i 的内角 $\theta \in (0, \pi)$ 则该顶点是凸顶点; 若 $\theta \in (\pi, 2\pi)$, 则该顶点是凹顶点。

定义 3: 对于一个凹多边形, 去掉它的一个任意顶点产生一个新多边形并同时分割出一个三角形, 如果生成的新多边形和同时分割出的三角形互不重叠并且二者的并集为原始凹多边形, 则把生成的新多边形和三角形称为原凹多边形的一个划分。把这样的操作称为对原凹多边形的划分。把这样的顶点称为凹多边形的一个可剖分顶点。

同时由定义可以很容易导出, 一个凹多边形至少有一个可剖分顶点, 凸顶点不一定是可剖分顶点, 但可剖分顶点一定是凸顶点, 本文所叙述的多边形三角剖分关键也就在可剖分顶点的自动快速搜寻。

三角剖分的基本思想:

首先不管多边形的凹凸性, 从原始多边形中寻找一个可剖分顶点, 对原始的多边形进行划分, 从而分割出一个三角形同时产生一个新多边形, 然后对新生成的多边形判断其凹凸性, 若为凸多边形, 则顺序连接多边形各点生成三角形网, 算法结束; 否则对新生成的凹多边形进行递归操作直到原始的多边形划分成一系列三角形和一个凸多边形。

3 三角剖分的算法描述

依据前述多边形三角剖分的基本思想, 可以得到三角剖分算法基本步骤:

步骤 1. 首先找到多边形的一个凸顶点, 然后再判断凸顶点是否为可剖分顶点, 若是则转到步骤 2; 否则继续执行步骤 1, 直至找到的凸顶点为可剖分顶点。

步骤 2. 以步骤 1 所找到的可剖分顶点对多边形进行划分操作, 分割出一个三角形和一个新多边形, 同时记录下该三角形和新的多边形。

步骤 3. 对新生成的多边形进行凹凸性判断, 若为凸多边形则算法结束, 否则对新生成的多边形再递归调用上述步骤 1、2 算法, 直至生成的新多边形为凸多边形。

步骤 4. 为可选步骤, 若想得到 Delaunay 三角剖分, 则按最大-最小内角准则, 进行局部变换。

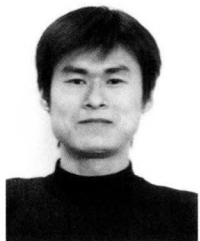
上述三角剖分算法涉及四个基本算法: 凹、凸顶点的判断, 点在三角形内外的判断, 寻找可剖分顶点以及 Delaunay 优化算法。现对这四个基本算法做一简要介绍:

算法 1: 顶点凹凸性的判定方法为: 由简单多边形的性

作者简介: 殷勇 (1982-), 男, 湖北黄冈人, 硕士生, 2005 年毕业于武汉大学, 研究方向: 三维 GIS 系统及应用。
E-mail: yinyong.985@gmail.com

收稿日期: 2007-03-01

基金项目: 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室经费资助项目 (编号 200603)



质可知,多边形的极值点必为凸顶点,问题就转化为选择多边形的极值点。设 T 是多边形顶点链表中 X 值最大的点(若有 X 值相等的点则取 Y 值较大的点),则点 T 称为标志点。取 T 的前后两点分别为 T_i, T_j , 令 $\vec{U} = \vec{T_iT} \times \vec{TT_j}$, 若向量 $\vec{U}$ 的 z 分量等于 0, 此时多边形退化为线状物体;若向量 $\vec{U}$ 的 z 分量不等于 0, 则对于顶点链表中的每一点 P_i , 令 $\vec{W} = \vec{P_{i-1}P_i} \times \vec{P_iP_{i+1}}$, 如果 $\vec{W} \cdot \vec{U} > 0$, 则 P_i 为凸点;若 $\vec{W} \cdot \vec{U} < 0$, P_i 为凹点;若 $\vec{W} \cdot \vec{U} = 0$, 该点为平角点(点 P_i 在所在 $\vec{P_{i-1}P_{i+1}}$ 线段上或在其延长线上)。

算法 2: 点在三角形内外的判断: 判定顶点 P 是否在三角形 $P_iP_{i+1}P_{i+2}$ 内, 是对多边形顶点序列中的所有凹顶点 $P_j(P_iP_{i+1}P_{i+2}$ 非顶点), 若 $(\vec{P_iP_j} \times \vec{P_jP_{i+1}}) \cdot \vec{n} \leq 0$, $(\vec{P_{i+1}P_j} \times \vec{P_jP_{i+2}}) \cdot \vec{n} \leq 0$, $(\vec{P_{i+2}P_j} \times \vec{P_jP_i}) \cdot \vec{n} \leq 0$ 同时成立, 则 P_j 在三角形 $P_iP_{i+1}P_{i+2}$ 内或其边缘上, 否则, P_j 在三角形 $P_iP_{i+1}P_{i+2}$ 外。其中, $\vec{n}$ 为多边形所在平面的法向量。

算法 3: 可剖分顶点的判定方法为:

步骤 1. 首先由算法 1 得到多边形的凸顶点, 若有凸顶点则转到步骤 2, 否则算法结束。

步骤 2. 将原始多边形去掉该凸顶点, 产生一个新的多边形同时分割出一个三角形。

步骤 3. 判断新生成多边形的各个顶点是否在步骤 2 中得到的划分三角形内或者上面, 若是, 则转到步骤 1; 若否成功完成多边形一次划分, 记录步骤 2 得到的三角形和新生成的多边形。

图 1、2 列举了凸点不是可划分点的情况, 包括相交及包含两种情况: 图 1 中的顶点 8 为凸顶点, 但三角形 871 将新生成的多边形包裹, 所以该点不是可剖分顶点; 对于图 2 中的凸顶点 1, 因三角形 126 与新生成的多边形 23456 相交, 也不是原始多边形的划分。

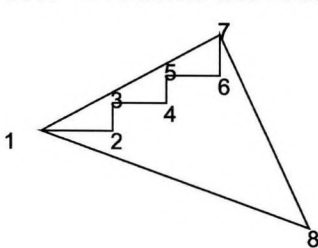


图 1 新多边形被新三角形包裹

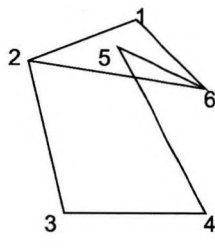


图 2 新多边形与新三角形相交

算法 4 Delaunay 优化算法:

步骤 1. 从剖分结果三角形表形成边表;

步骤 2. 对边表中的每一条非边界边, 做步骤 3;

步骤 3. 取出以次边为邻接条件的 2 个相邻三角形, 构成一个四边形。如果这个四边形是凹的, 则不做任何处理。如果这个四边形是凸的, 则计算 2 个三角形的最小内角 A , 交换对角线, 计算出 2 个新的三角形的最小内角 B 。如果 $B > A$, 则以交换对角线所得到的 2 个新三角形替换原来的两个三角形, 并按新的三角形修改剖分结果三角形表和边表。

4 带岛屿多边形的三角剖分

对于带岛屿的多边形(如绿地、河流、道路), 其三角形剖分仍可采用上述递归分割算法。其基本思路是将带岛屿多边形转化为退化多边形, 然后调用递归分割算法进行三角剖分。如图 3 所示, 带岛屿多边形转化的基本方法是^[7]: 引入“桥边”, 把带岛屿多边形的外轮廓线与岛连接起来, 当然该桥的两边是相互重叠的。这样借助于“桥边”就可将带岛屿多边形转化成退化多边形, 这种桥在多边形中称之为对角线。在图 3a 中洞之间连线表示桥; 图 3b 中显示

了结果多边形, 也即为退化多边形(为了显示得更清楚, 把桥两边拉开了一定的距离)。

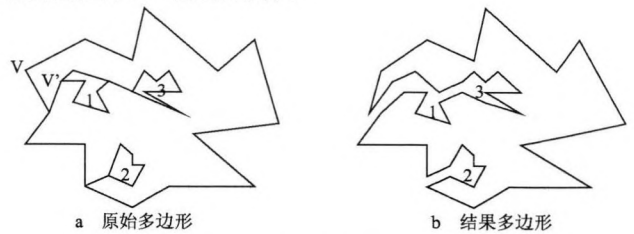


图 3 带岛屿多边形的转化

算法 4 带岛屿多边形的简化:

步骤 1. 对多边形的各顶点坐标在数组中进行排序, 按照先 x 后 y 由小到大的顺序排列。利用排序可以去掉重复点以及 0 长度的边。在排序的结果数组中, 每个顶点将唯一对应一个索引号。下文中凡提到顶点的索引号时, 均指该顶点在排序数组中的索引号。

步骤 2. 把每个轮廓线视为一个简单多边形, 分别计算它们的面积, 并比较大小。指定面积最大的为多连通多边形的外轮廓线, 其他均为内岛。

步骤 3. 对每个内岛来说, 找出它最左边的顶点。这可以通过比较该内岛每个顶点的索引号的大小来获取最左边的顶点(图 3a 中用 V 表示了每个最左边的顶点)。

步骤 4. 根据每个内岛最左边顶点索引号的大小, 对内岛进行排序(图 3a 显示了每个内岛的序号)。

步骤 5. 从最左边的内岛(也就是第 1 个内岛)开始加桥, 直到多连通多边形转化为退化多边形。

5 非平面多边形三角剖分

在三维应用中, 道路、河流等面状地物并不是一个平面多边形, 而是一非平面多边形。其水平投影结果为平面多边形, 且投影结点与原结点之间为一映射关系。如果这些简单曲面的三角剖分完全按照以上算法, 将导致失真, 即地形起伏与实际相差太大。因此, 为避免地形起伏失真, 应在前述平面多边形剖分算法的基础上, 增加高程约束条件。即可以先找出原始多边形的所有可剖分顶点(凸多边形时所有顶点都是可剖分顶点), 如果仅有一个, 务须考虑高程约束, 直接返回正确划分; 假如有 $m(m \geq 2)$ 个, 这样原始多边形就有 m 个可能划分, 对于平面而言都正确, 而对应三维中我们视为有 m 个可选方案, 且 m 个可剖分点可对应得到 m 个三角形, 加上高程约束后, 我们只选取三角形顶点高程值最为接近的那个可剖分点。这样得到的三角形网适应高程起伏, 形状自然、真实。

6 实验与结论

笔者利用城市中实际的 4 万多个建筑物二维底座数据, 以及其他上万多个绿地, 几十条道路和河流等城市景观进行实验, 经仔细检查, 结果完全满足多边形三角剖分的条件, 充分证明该算法的正确性。见图 4 和图 5, 图 4 中 a、b、c 分别为部分绿地、道路、河流三角剖分结果图; 图 5 为 4 万多建筑物利用前述三角剖分算法三角化后, 部分在 OpenGL 中的显示效果。



图 4 部分绿地、道路、河流三角剖分结果图

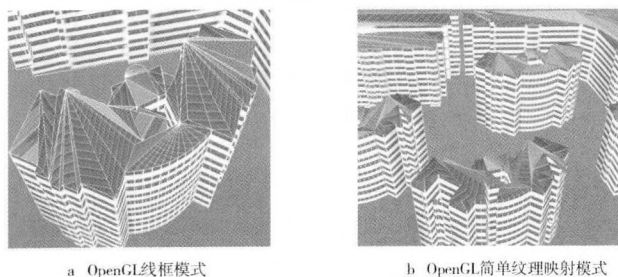


图5 4万多建筑物部分显示效果图

多边形三角剖分是数字城市研究许多工作的前提, 本文的递归分割算法剖分结果比较理想, 而且程序容易实现, 在 Visual C++ 下实现了该算法, 能满足实际的视景仿真应用需要, 且可以顾及带洞和高程因素, 确保了算法的通用性。利用该基础算法可以实现三维模型的快速重建, 同时统一的几何剖分结果更利于后续的三维分析。基于该算法, 我们已经实现了二维面状数据的快速三维重建, 同时基于点、线二维数据, 通过变换和模型匹配, 我们已经自主开发了一套二维到三维的完整的快速重建软件, 并在生产实践中得到应用。

Triangulation algorithm for the reconstruction of 3D city view

Abstract: While setting up city view, triangulation and OpenGL-based 3D model redrawing should be performed for the vector data collected by user, which can reconstruct 3D models, such as building, greenbelt, river etc., quickly and accurately, improve automation degree, and shorten the construction period. So a triangulation recursion algorithm is proposed in this paper. The algorithm is designed with Visual C++ programming, and experimented with triangulating physically more than 40, 000 buildings. It proves that the algorithm is effective.

Key words: digital city; triangulation; 3D GIS; openGL

YIN Yong^①, YU Lian-fang^②, MA Zhao-ting^①, LI Cheng-ming^① (①Chinese academy of surveying and mapping, Beijing 100039, China; ②Lianfang Huzhou Institute of Surveying and Mapping, HU zhou 313000, China)

(上接第25页)

- [9] Früh C, Jain S, Zakhor A. Data Processing Algorithms for Generating Textured 3D Building Facade Meshes from Laser Scans and Camera Images [J]. Computer Vision, 2005, 61(2): 159-184.
- [10] Zhao H, Shibasaki R. Reconstructing a Textured CAD Model of an Urban Environment using Vehicle-borne Laser Range Scanners and Line Cameras [J]. Machine Vision and Applications, 2003; 35-41.
- [11] 王健, 靳奉祥, 吕海彦, 林照明. 基于车载激光测距的建筑物立面信息提取 [J]. 山东科技大学学报 (自然科学版), 2004, 23(4): 8-11.
- [12] 李必军, 方志祥, 任娟. 从激光扫描数据中进行建筑物特征提取研究 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2003, 28(1): 65-70.
- [13] Grinstead B, Koschan A, Abidi M. Developing detailed a priori 3D models of large environments to aid in robotic navigation tasks [C]//Unmanned Ground Vehicle Technology. Orlando, FL, USA, 2004(5422): 561-568.

igation tasks [C]//Unmanned Ground Vehicle Technology. Orlando, FL, USA, 2004(5422): 561-568.

- [14] 王冬, 等. 车载式三维信息采集系统中多坐标系系统转换实现 [J]. 测绘科学, 2007, 32(4).
- [15] Manandhar D, Shibasaki R. Vehicle-borne Laser Mapping System (VLMS) for 3-D Urban GIS Database [C]//7th Int. Conf. on Computers in Urban Planning and Urban Management Conf [CD-ROM], University of Hawaii at Manoa, USA, 2001.
- [16] Abuhadrous I, Ammoun S, Nashashibi F, et al. Digitizing and 3D Modeling of Urban Environments and Roads using Vehicle-Borne Scanner System [R]. International Conference on Intelligent robots and Systems, Sendai, Japan, 2004.
- [17] 史文中, 李必军, 李清泉. 基于投影点密度的车载激光扫描距离图像分割方法 [J]. 测绘学报, 2005, 34(2): 95-100.

3D road information extraction based on vehicle-borne laser scanning

Abstract: In order to solve the confliction among cost, precision, and efficiency of data production in building road information systems, the author provides a new method called vehicle-borne laser scanning to acquire road information. With this method, the information of road boundary, road surface and engineering slope is extracted. Test result shows that this method is accurate and robust, and it provides a new way for the confliction solving in data production.

Key words: vehicle-borne laser scanning; 3D information extraction; point cloud image

LI Yong-qiang^①, SHENG Ye-hua^①, LIU Hui-yun^{①②}, ZHANG-ka^①, DAI Hua-yang^② (①Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, MOE, Nanjing Normal University, Nanjing 210046; ②Institute of RS/GPS/GIS and Subsidence Engineering, China Uni. Min. Tech., Beijing 100083)