

基于自适应分块的 TIN 三角网建立算法

徐青 常歌 杨力

(郑州解放军测绘学院, 郑州 450052)

摘要 TIN 三角网在 GIS/VR 中具有重要用途. 在 TIN 生成算法中, 分割-归并法、三角网生长法各有其优缺点. 为兼顾空间和时间性能, 因而提出了一种基于自适应分块思想的 TIN 三角网建立算法, 它融合传统的分割-归并法、三角网生长法等 Delaunay 三角网主流生成算法于一体. 实验结果表明, 该算法建立的三角网无交叉和重复, 并具有 Delaunay 三角网的特性, 同时兼顾了空间和时间性能, 具有较高的执行效率, 算法的设计思想可进一步推广到三维空间.

关键词 TIN Delaunay 三角网 自适应分块

分类号 P209 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2000)06-0461-05

The Algorithm of TIN Generation Based on Self-adapt Clump Organization

XU Qing, CHANG Ge, YANG Li

(Institute of Surveying and Mapping, Zhengzhou 450052)

Abstract Triangular irregular networks (TIN) have important application in Geographic Information System and Virtual Reality. As for as the algorithms of triangular irregular networks (TIN) generation are regarded, divide-conquer algorithm and triangulation growth algorithm have each different virtue and defect. For using resources of time and space more reasonably, this article provides an new TIN construction algorithm based on self-adapt clump organization idea, which takes advantages of the traditional prevalent delaunay triangulation generation algorithms—divide-conquer and triangulation growth. The last experiment illustrates the created triangulation has not intersected, repeated and inclusion Delaunay properties, so the algorithm is more correct and efficient in the view of time and space. The main design ideas of generation algorithm can extend to the 3D space.

Keywords TIN, Delaunay triangulation, self-adapt clump organization

0 引言

数字地面模型 DTM (Digital Terrain Model), 特别是 TIN (不规则三角网) 的建立和优化是 GIS/VR (Geographic Information System/Virtual Reality) 中的一个基础研究问题. TIN 模型具有数据冗余小, 存储效率高, 且能较好地顾及地形特征和适合多层次表达等突出优点. 许多年来, 它一直是人们的研究热点^[1].

在 TIN 生成算法中, 分割-归并法、三角网生长

法是普遍采用的两种主流生成算法^[2-4]. 分割-归并法的基本思路是递归地分割点集至足够小, 使其易于生成三角网, 然后把子集中的三角网合并, 经优化生成最终的三角网. 该算法的优点是时间效率高, 但需要大量递归运算, 因此占用内存空间较多. 三角网生长法的思路是, 先找出点集中最近两点连接成一条边, 然后按 Delaunay 三角网的判别法则找出第三点, 再依次处理全部区域. 该算法的优点是占用内存空间较小, 但时间效率较低. 在此二者基础上, 结合自适应分块思想, 笔者提出一种新算法, 它兼顾了空间和时间性能.

1 源数据自适应分块处理

由于实际地形的复杂性,源数据点的分布往往很不均匀,对于山地、丘陵地其离散点的分布相对较密,而对平原或相对平坦地区则离散点分布相对较稀.若用同样大小的块来分析离散点的分布密度,则位于山区的块内点数会很大,而位于平坦地区的块内点数会很小.为此,必须把块的大小设置成一个动态变化的值,因而可根据实际的需要,灵活确定一个阈值(每块的最小点数)来控制每块内点数的下限.

对于给定点集 P ,首先用点集内总点数除以每块的平均点数,就可得到总分块个数,然后由横、纵坐标跨度,求出块宽度、块行数及块列数.

给定块行数、块列数后,根据块宽度(width)及起点坐标 (x_0, y_0) ,就可求出当前块的边界 (x_l, y_l, x_r, y_r) 和检索整个点集 P ,再根据索引关系选出坐标在此块边界范围内的点,存入与此块对应的子点集中,直到所有的块都生成完毕为止.

2 分块建立子三角网

2.1 确定起始三角形

从点集中任取一点 A ,然后从其它点中搜索出距其最近的点 B 作为起始三角形的第二个点,再从附近的点中寻找出三角形的第三个顶点 C_i ,选取规则是使角 C_i 为其中最大的角(图 1).其中角 C_i 用余弦定理计算

$$\cos \angle C_i = \frac{a_i^2 + b_i^2 - c^2}{2a_i b_i}$$

其中 $a_i = BC_i, b_i = AC_i, c = AB$.

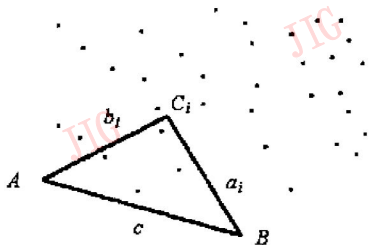


图 1 余弦值判别法

2.2 扩展起始三角形

由起始三角形的三边依次往外扩展,将点集内所有的离散点构成三角网,直到所有建立的三角形的边都扩展过为止.

用上节中的最大角选取规则,确保所建立的三

角形没有交叉,即都为 Delaunay 三角形;同时每建立一个三角形,在保存之前,要先判断其是否是已建立的三角形,从而确保在建立的三角网中无重复的三角形.具体分三步实施:

(1) 筛选备选扩展点

若以 $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2), P_3(x_3, y_3)$ 为顶点的三角形的 P_1P_2 边向外扩展,应取位于直线 P_1P_2 与 P_3 异侧的点(图 2).通过 P_1P_2 的直线方程为 $F(x, y) = (y_2 - y_1)(x - x_1) - (x_2 - x_1)(y - y_1) = 0$;若备选点为 $P(x, y)$,则当

$$F(x, y) \cdot F(x_3, y_3) < 0$$

时,且若点 P 与 P_3 分别在直线 P_1P_2 的异侧,则该点可作为备选扩展点.

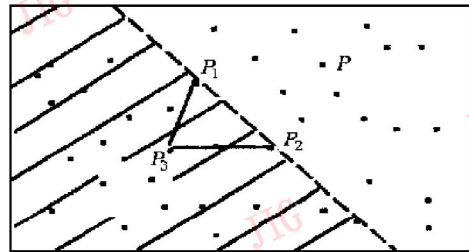


图 2 直线判别法(非阴影部分为备选扩展点)

(2) 选择最佳三角形顶点

对所有备选扩展点分别计算其构成三角形的余弦值,选择余弦值最大的点作为与 P_1P_2 边构成三角形的最佳顶点.

(3) 三角形重复检测

```

tri-times = 0;
for(int i = num-tri; i >= 1; i--)
{
    if(N1 == A[i] || N1 == B[i] || N1 == C[i])
        if(N2 == A[i] || N2 == B[i] || N2 == C[i])
            if(N3 == A[i] || N3 == B[i] || N3 == C[i])
                tri-times = 1;
}

```

其中 N_1, N_2, N_3 为刚建立三角形的三顶点的索引值,数组 $A[], B[], C[]$ 为已建立的 L 个三角形的三顶点的索引值.如果 $tri-times = 1$,则此三角形已存在;否则为新建的三角形.

2.3 扩展边扩展次数和三角形的重复检测

三角网中的任意一条边最多只能成为两个三角形的公共边(三角网的边界边只能成为一个三角形的边),因此对任意一条边扩展之前,应先判断其扩展次数,若 $tri-times > 1$ 就不必再执行扩展操作,避免后面三角形的重复检测,以提高建网的效率.

上述方法只排除边界边没有重复扩展,尚不知该

边在三角网中是否已建立了三角形, 故须再判断此三角形是否已存在于已建的三角网中. 如 $\text{tri-times} = 1$, 则说明此三角形已建立, 否则保留此三角形.

经上述两级检测, 可确保三角网中无重复的三角形, 从而确保了三角网质量, 并完成子块内建网任务.

3 块间 TIN 三角网的归并

3.1 各子块凸壳的生成

有关凸壳的生成已有非常成熟的算法, 关键是提高速度, 由于本文采用了基于分块的建网方案, 在凸壳的生成过程中, 只需查询相关区域, 从而大大提高了搜索效率. 具体做法是首先把具有 $x, y, x + y, x - y$ 的极大值和极小值的点相连, 作为初始凸壳, 然后找出位于其中相邻两点间的其余点即可.

3.2 寻找相邻子块两凸壳的底线和顶线^[2]

如图 3 所示, 设 H_L, H_R 为左右两个凸壳, 寻找连接 H_L, H_R 的底线和顶线过程可从连接 H_L 最右边的点 X 和 H_R 最左边的点 Y 的线段 XY 开始, 如果 H_R 上 Y 的逆时针方向相邻点 Z 位于 XY 的下侧, 则用 Z 替换 Y , 直至 H_R 上的所有点都在线段 XY 之上. 接着考察 H_L , 如果 H_L 上 X 的顺时针方向相邻点 Z' 位于 XY 的下侧, 则用 Z' 替换 X , 直至 H_L 上的所有点都在线段 XY 之上. 最终形成的线段 BM 就是连接 H_L, H_R 的底线. 用相似的方法可以找到连接 H_L, H_R 左右两个凸壳的顶线 TP .

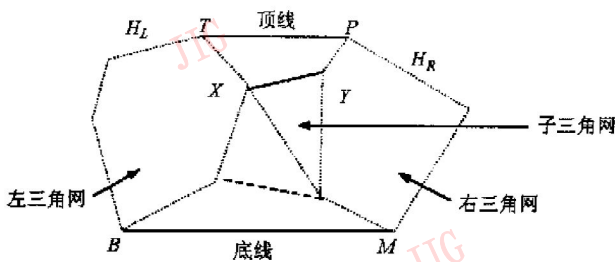


图 3 底线和顶线搜索

3.3 块间三角形的归并

从连接 H_L, H_R 左右两个凸壳的底线开始, 在两个子三角网中寻找与底线组成 D-三角形的第三点. 然后以新生成的连接左右子三角网的子三角形的边作为新的底线, 逐步上推直到顶线结束.

4 数据结构

在新算法的数据存储与处理过程中, 采用的数

据结构如下^[15- 7]:

(1) 数据点以双向链表形式存储, 链上每个节点记录了数据点的 X, Y 坐标值以及指向后一节点的指针. 具体结构如图 4 所示.

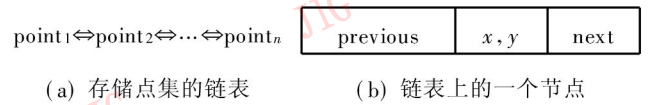


图 4 数据点链表及其节点

(2) 边界是相邻边的链表, 链上每个节点记录边的起始节点索引值、边的终止节点索引值、左面三角形索引值及右面三角形索引值. 具体结构如图 5 所示.

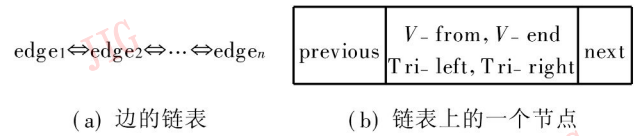


图 5 边界链表及其节点

(3) 三角形集 即三角形集的链表, 链上每个节点记录三角形顶点指针、三角形三边指针、相邻三角形指针以及下一个三角形的索引值. 具体结构如图 6 所示.

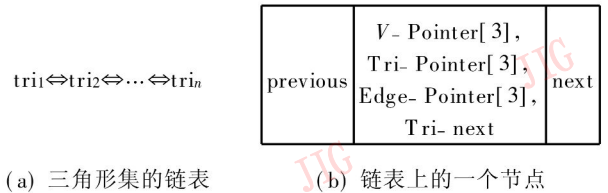


图 6 三角形集的链表及其节点

5 算法流程

综上所述, 本文提出新算法的流程如图 7 所示:

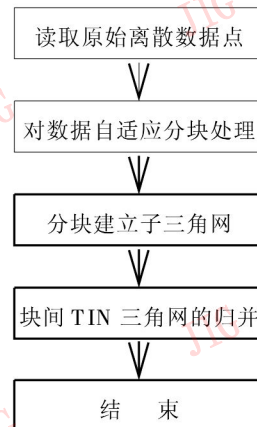


图 7 算法流程

6 实验情况

在 586/100 微机平台和 Visual C++ 6.0 环境下,先后利用本文提出的新算法完成了 8 幅地形图矢量化等高线矢量数据的处理,除在高精度要求的 DTM 分析中需要采用约束 D-三角网建立算法外,均取得了较好的效果.图 8 是北京某地区一幅 1:5 万地形图经扫描矢量化后获得的等高线矢量数据.实验数据的区域范围:7km×9km,文件:131.vec,895 条等高线,93 185 个离散点.不经分块处理,直接进行 TIN 建网需耗时 28min.采用新算法选择不

同阈值时的建网时间、速度如表 1 所示.

表 1 不同阈值时的建网时间、速度比较

阈值	建网时间(s)	建网速度(个/s)	TIN 三角形数量(个)
5	40.582	886	35 961
10	28.249	1 571	44 421
20	26.954	1 881	50 787
30	30.632	1 730	52 894
50	41.351	1 345	55 023
100	67.885	852	57 903

图 9~ 图 11 为生成的 TIN 三角网的部分实验结果.

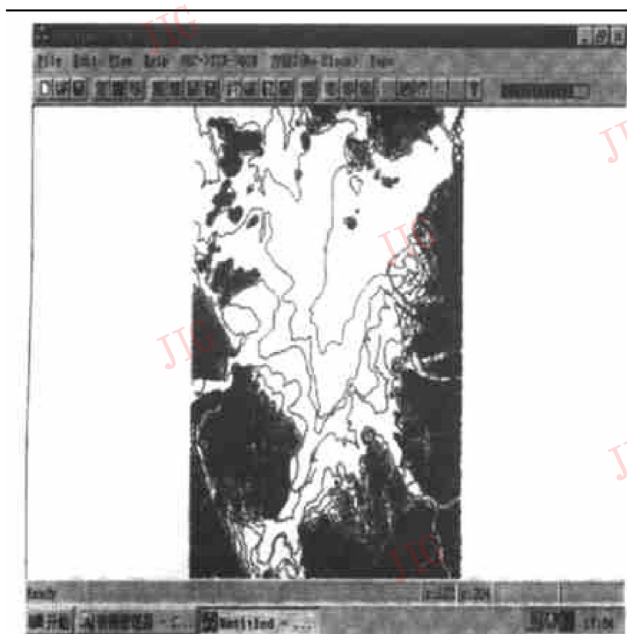


图 8 原始等高线数据(数据点数:93 185 个)

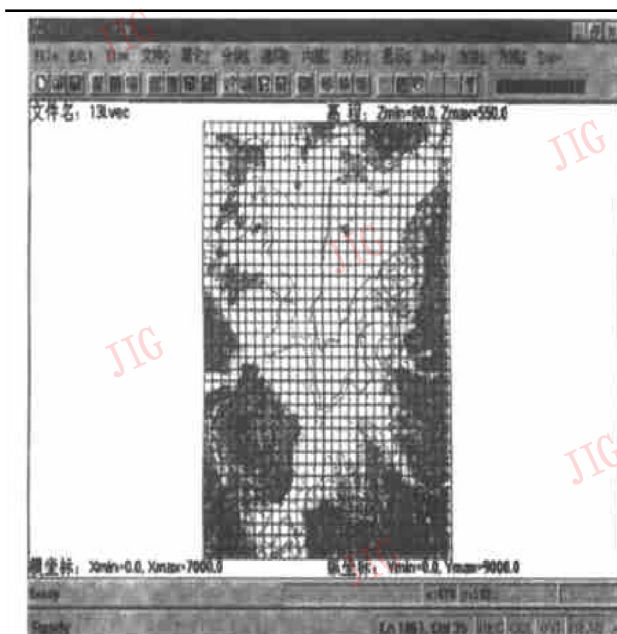


图 9 等高线数据分块示意图

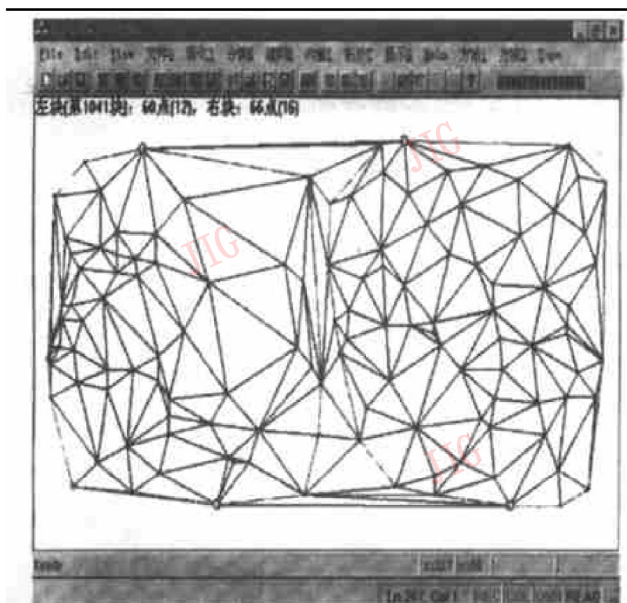


图 10 左右凸壳的生成与子块合并

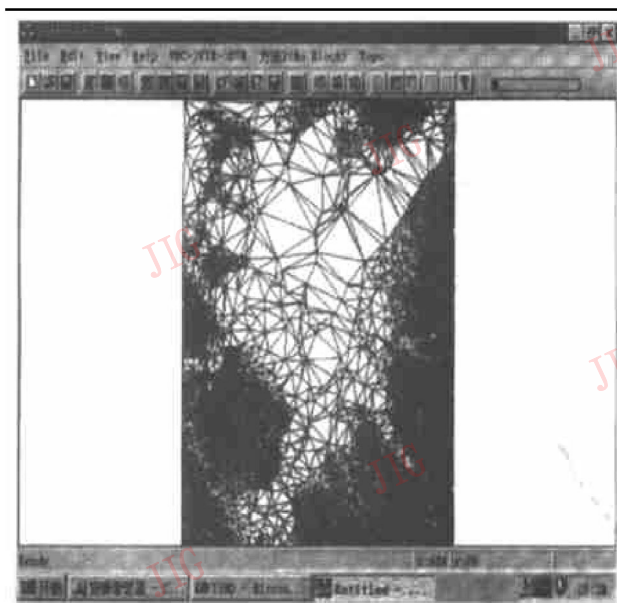


图 11 TIN 三角网全貌(共 59 673 个三角形)

新算法的效率取决于自适应分块阈值大小及其的子块合并过程, 不加任何策略, 最坏情形下算法时间复杂度为 $O(n^2)$. 实验表明, 当子块分块阈值过小时, 算法接近分割-归并法, 且由于子块过多, 存在大量子块合并处理问题, 并不有利于效率的提高; 当子块分块阈值超过数据总数时, 算法变为全局三角网生长法, 也不能充分发挥新算法的优越性. 实际建网时, 需视原始数据点分布情况, 阈值适中较好.

7 结 论

(1) 本文利用扩展边的三角形生长法建立的三角网无交叉和重复, 具有 Delaunay 三角网的特性, 因而 TIN 的建立算法是可靠的;

(2) 本文提出了一种基于自适应分块思想建立 TIN 三角网的新算法, 它融传统的分割-归并法、三角网生长法等 Delaunay 三角网主流生成算法于一体, 兼顾了空间和时间性能, 具有较高的执行效率.

(3) 本算法的设计思想可以进一步推广到三维空间.

致 谢 马旭东同志在在研究过程中完成了一定的实验工作, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- 1 柯正谊, 何建邦, 池天河. 数字地面模型. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- 2 武晓波等. Delaunay 三角网的生成算法研究. 测绘学报, 1999, 28(1): 28~ 35.
- 3 Lee D T, Schachter B J. Two algorithms for constructing a delaunay triangulation, Int. J. of Computer and Information Sciences, 1980, 9(3): 162~ 168.

- 4 MaCaullagh M T, Ross C G. Delaunay triangulation of a random data set for irarithmic mapping. The Cartographic Journal, 1980, (17): 93~ 99.
- 5 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构(C语言版). 北京: 清华大学出版社, 1996.
- 6 Cliffrod A • Shaffer. 数据结构与算法分析. 张铭, 刘晓丹译. 北京: 电子工业出版社, 1998. 8.
- 7 杨钦等. 任意平面域上离散点集的三角化方法. 软件学报, 1999, 10(4): 44~ 51.



徐 青 解放军信息工程大学测绘学院教授, 1995年获解放军测绘学院工学博士. 主要研究方向为地形三维可视化、计算机三维视觉、图象信息系统、遥感应用. 在国内外发表论文 40 余篇, 专著 3 本, 译著 1 本.



常 歌 1995年、1998年先后获解放军测绘学院摄影测量遥感系学士、硕士学位, 现在解放军信息工程大学测绘学院攻读博士学位. 主要从事地理信息系统、图形图象处理等方面的研究.



杨 力 1995年获解放军测绘学院大地测量系硕士学位, 现在解放军信息工程大学测绘学院攻读博士学位. 主要从事 GPS 导航定位、数字信号处理方面的研究.