

# 顾及三角形处理的 TIN 建立算法

陈仁喜<sup>1</sup> 龙毅<sup>1</sup>

(1 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 提出了一种基于相邻等高线的 TIN 建立算法——区域分割构网算法, 并阐述了其基本思想。通过对山顶、鞍部和山谷(山脊)不同地貌区域的试验, 证实了该方法的有效性。

**关键词:** DEM; TIN; 相邻等高线; 区域分割; 中轴线

**中图法分类号:** P231.5; P208

目前建立 DEM 的方法很多<sup>[1]</sup>, 但常用的方法是利用数字化等高线建立 DEM。该方法的难点在于内插模型的建立, 内插模型要顾及地性线、断裂线及特征点, 否则难以生产出高质量的 DEM。由于不规则三角网具有保持地形特征的优点, 所以由等高线建立 TIN 是一个优选方案, 也是目前用得最多的方法。

## 1 数据预处理

由于数据采集的不规范化等原因, 等高线数据可能不满足算法的要求, 为了保障算法的稳定, 必须先对等高线数据进行预处理。对整个区域内的等高线集合  $\{C_i\} (i=1, 2, \dots, n)$  预处理的主要工作如下。

1) 等高线连续, 确保被图幅边分割的同根等高线具有相同的 ID 值。

2) 给定一个较小的阈值, 消除等高线上的冗余点、过密点, 包括重复点。

3) 等高线关系树  $R$  的建立, 其目的在于可以建立根等高线、父子等高线及叶子等高线关系, 从而快速确定参与运算的等高线对象。在地貌鞍部区, 一条等高线同时和若干子等高线参与运算。相邻的两条具有包含关系的等高线中, 被包含的等高线作为子等高线<sup>[2~4]</sup>。

等高线树从整体上建立了宏地貌形态与其表示手段——等高线之间的联系, 是一种极重要的结构信息, 在 DEM 的建立中有着重要的应

用<sup>[5~7]</sup>。

## 2 区域分割构网基本算法思想

### 2.1 相邻等高线构网

对整个区域内的等高线建立了关系树的基础上, 对于任意两条相邻且高程相距一个等高距的等高线, 它们构成父子关系。记父等高线为  $C_p, p \in (1, n)$ , 子等高线为  $C_c, c \in (1, n)$  ( $n$  为等高线总数)。在  $C_p$  和  $C_c$  之间按 Delaunay 三角形构网法则进行构网, 并且加上约束条件——同条等高线上不能生成三角形, 如图 1。

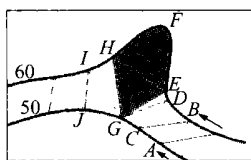


图 1 相邻等高线间约束构网

Fig. 1 Constrained Triangles



图 2 平三角区

Fig. 2 Horizontal Triangle Regions

通过这种约束条件构网, 可以达到两个目的: ① 完成部分合理三角网的建立, 这一部分三角形将作为最后要保留的三角形, 记为  $T_1$ ; ② 将两相邻等高线间的平三角区分离出来, 从而实现平三角区和其他部分的分割(如图 2), 以后的工作只需在平三角区内讨论, 简化了问题。为了处理的需要, 把与平三角区相邻的非平三角形搜索出来, 加入到平三角区。一个平三角区有且仅有一个这

样的邻接三角形,如图 1。 $EFH$  围成的多边形为实际的平三角区,与它相邻的非平三角形为  $\triangle EHG$ , 把它们合成一个整体( $EFHG$  围成一个多边形)考虑,以后提到的平三角区都是指这样的区域。在图 1 的平三角区中, $G$  点的高程与( $E, F, H$ )高程不同,为了区别,约定把这样的点称为高低点,其他的点都称为平点。

### 2.2 平三角区地性线树的建立

通过约束条件的构网,分割出了平三角区。从地形、地貌上来说,这些平三角区也是地性线存在的区域。产生平三角形的原因就在于这些区域缺少应有的地形特征点(或者地性线),因而解决这个问题着手点就在于,如何通过已知的等高线信息重建地性线。基于此,消除平三角形的基本思想就是,通过建立平三角区的地性线树来增加特征点,然后重新构网或者更新局部三角网,消除平三角形。

对于分割出来的每个平三角区,先按一般三角形构网方法在平三角区内部进行构网,同时保存三角形的邻接关系。在此步构网过程形成的三角形集合中,除含有高低点的三角形外,其他的三角形都是真正的平三角形。

考察每个三角形元与相邻三角形的关系,对此三角形集进行分类:有 1 个邻近三角形的为 I 类,有 2 个邻近三角形的为 II 类,有 3 个邻近三角形的为 III 类。很明显, I 类三角形出现在中轴线的端点, III 类三角形出现在中轴线的分叉处,其他的均为 II 类三角形。按下面的原则对 3 类三角形中的中轴线进行连接,这里称两三角形共有的边为公共边,即 I 类三角形连接惟一的公共边与其相对的顶点, II 类三角形连接两条公共边的中点, III 类三角形连接其重心和三边的中点<sup>[8]</sup>(图 3)。

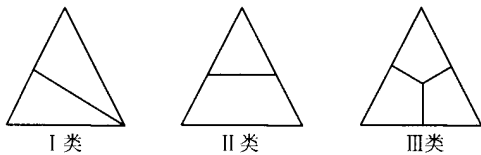


图 3 各类三角形的中轴线连接

Fig. 3 Medial Axes Connection of Different Triangles

按上面的连接方法,最后可以得到整个平三角区的中轴线(图 4),中轴线可以看作是平三角区的地性线。实际上,提取出的中轴线可以看作是一棵二叉树,把高低点当作根结点,中轴线上的所有平点当作叶结点,其他相邻的结点具有父子关系。对于二叉树中的各个结点给定一个权值

$Q$ ,将此结点与其父结点间的距离作为权值的大小。根结点没有父结点,权值  $Q=0$ 。

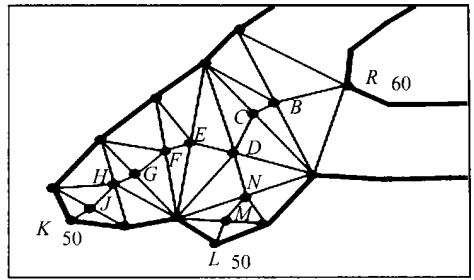


图 4 平三角区的中轴线

Fig. 4 Medial Axes of Horizontal Triangle Regions

### 2.3 三角网的重建与更新

要消除平三角形,需要增加一定数量的地形特征点参加构网,每个特征点应具有  $(X, Y, Z)$  三维坐标。然而地性线上的结点并不具有高程值,地性线树的建立正好可以用来解决高程分配问题。可以看出,从地性线树的根结点到各个叶结点都存在一条路径  $L_i (i=0, \dots, M, M$  为路径条数)。将路径上各个结点的权值  $Q$  累加,得到该路径的总长度  $L_i = \sum Q$ ,从中选择路径最长的一条  $\max(L_1, L_2, \dots, L_M)$  作为地性线的主线,主线两端的高程值是已知的。然后,按距离大小进行线性内插得到各个结点的高程。主线上的各结点都具有了高程值后,按同样的方法内插出所有分枝地性线上各个结点的高程(内插计算见表 1)。

表 1 地性线高程内插/m

Tab. 1 Elevation Interpolation of Terrain Morphologic Lines

点号	X 坐标	Y 坐标	与 R 点的距离	内插高程
R	208.400	3.700	0.000	60.000
B	201.400	1.560	7.320	57.768
C	199.600	0.380	9.472	57.111
D	197.800	-4.200	14.398	55.611
E	193.800	-3.000	18.569	54.337
F	191.800	-4.000	20.805	53.655
G	189.000	-6.600	24.626	52.490
H	187.000	-8.000	27.068	51.746
J	184.800	-10.800	30.629	50.660
K	183.000	-12.000	32.792	50.000
主地性线长度 $L=32.792$				
			与 D 点的距离	
D	197.800	-4.200	0.000	55.611
N	199.000	-9.600	5.532	52.856
M	197.400	-12.200	8.585	51.336
L	196.200	-14.600	11.268	50.000
支地性线长度 $L=11.268$				

地形特征点提取出来后,加入到平三角区,重新进行三角形构网或者用插入构网法对原平三角区的三角网进行优化更新,消除平三角形,得到合

理的三角网(图 5)。

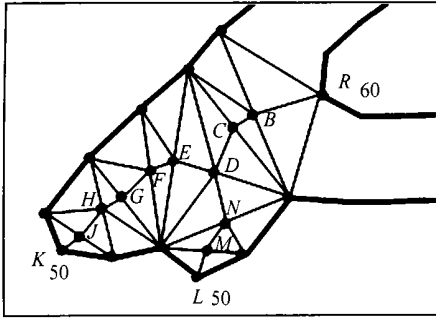


图 5 更新后的三角网  
Fig. 5 Updated Triangles

### 3 特殊地形的处理

在实际的地形图中, 等高线异常复杂, 还有许多需要特殊处理的地方。只有完成对这些特殊地形的处理, 才能算是真正完全地解决从数字等高线构建 TIN 的问题。

#### 3.1 山头的处理

山头如果缺少高程点, 山顶等高线在自己内

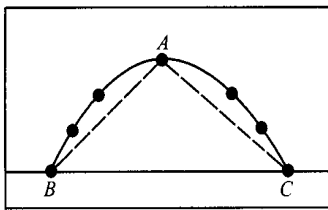
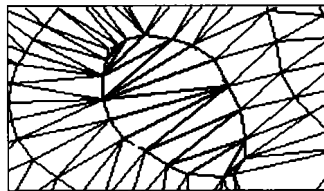
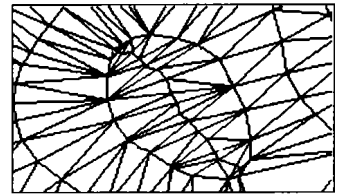


图 7 抛物曲线内插  
Fig. 7 Parabolic Interpolation



(a) 山顶平三角形



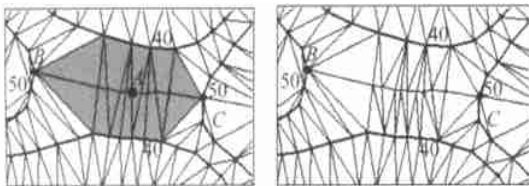
(b) 消除后的结果

图 8 山顶的平三角形及其消除

图 8 Horizontal Triangles at Mountaintop and Their Elimination

#### 3.2 鞍部的处理

在鞍部有两条或两条以上等高线参加构网, 图 9(a) 为一个典型的鞍部构网形成的平三角区, 其中  $BAC$  为平三角区的中轴线,  $A$  为中轴线的中点。此处也不存在高低点, 因为  $B$ 、 $C$  两点高程值相同, 无法进行高程分配, 需要给  $A$  点指定一个高程值。  $A$  点的高程值取鞍部的父等高线和子等



(a) 鞍部的“平三角区” (b) 消除后的结果

图 9 鞍部的平三角区及其消除

图 9 Horizontal Triangles of Saddle and Their Elimination

部构网形成平三角区, 所以山顶需要通过增加高程点信息来消除平三角形。同样, 先得到中轴线, 然后为中轴线上的各个结点赋高程值。然而, 此处不存在所谓的高低点, 因而无法直接进行高程值的分配, 需要另外指定中轴线上中间位置点  $A$  的高程(图 6), 其大小为  $H = H_T + (2/3)dH$  ( $H_T$  为山头等高线高程,  $dH$  为等高距)。这种方法简单易行, 但不能很好地顾及不同坡度的山头, 缺乏灵活性。所以, 可以参考文献[5]中用剖面法拟合中间点的待选高程的方法。

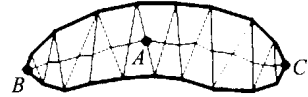


图 6 中轴线的中点

图 6 Midpoint of Medial Axes

另外, 为了使处理后的山顶比较圆滑, 给各个中轴线结点赋高程值时, 可以采用抛物曲线内插, 不采用线性内插(图 7)。否则, 会出现锥状山顶, 很不自然, 也不符合实际地貌形状。图 8 为用此法处理一个山头的试验结果。

等高线高程值的均值, 即二分等高距处的高程。与山顶处的处理方法相同, 中轴线上其他结点高程值的分配按抛物曲线内插。

对于有两个山头的鞍部, 可能形成两种形态的平三角区, 都是对鞍部真实形态的歪曲: 第一种将鞍部削平成低平原, 第二种将鞍部填高成高平原(图 10)。对于两种形态的处理方法相同, 利用提取出的结构线信息恢复原来的真实地形, 试验结果如图 9(b)。



图 10 鞍部平三角区的两种形态

图 10 Two Types of Horizontal Triangles of Saddle

### 3.3 图边谷地或山脊的处理

靠近图幅边的单条山谷(或山脊)等高线,由于缺少父等高线(或子等高线),无法实现相邻等高线的构网。在等高线内部构网,得到中轴线  $AB$  (图 8),其中  $B$  点的高程已知(记为  $H_b$ ),  $A$  点作为条件高程点,高程值为  $H_b \pm dH/2$  ( $dH$  为等高距,山脊处取正号,山谷处取负号)<sup>[3]</sup>。 $AB$  之间的其他结点按线性插值分配高程,最后更新三角网,试验结果如图 11。

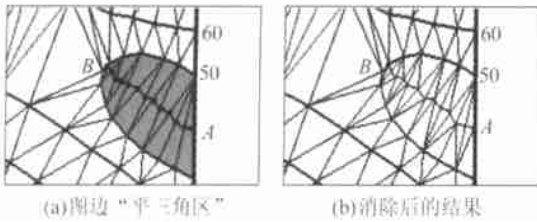


图 11 图边谷地(山脊)平三角形及其消除

Fig. 11 Horizontal Triangles at Valley (Ridge) Adjacent to Frame

#### 参 考 文 献

1 李志林,朱 庆. 数字高程模型. 武汉: 武汉大学出版

社, 2000

- 2 邱 元. 基于等高线建立 DTM 中平坦区域的一种处理方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000(8): 566~570
- 3 毋河海. 等高线树的自动建立及其应用. 测绘科技动态, 1996, 1: 2~7
- 4 张登荣, 刘绍华. 等值线自动建立拓扑关系算法与快速填充应用. 中国图像图形学报, 2001(3): 264~269
- 5 毋河海, 龚健雅. 地理信息系统(GIS)空间数据结构与处理. 北京: 测绘出版社, 1997
- 6 眭海刚, 朱 庆. 一种从 DLG 生成高质量 DEM 的混合方法. 测绘通报, 2001(4): 16~18
- 7 刘学军, 龚健雅. 约束数据域的 Delaunay 三角剖分与修改算法. 测绘学报, 2001(2): 82~87
- 8 艾廷华, 郭仁忠. 基于约束 Delaunay 结构的街道中轴线提取及网络模型建立. 测绘学报, 2000(11): 348~354
- 9 陈述彭, 鲁学军, 周成虎. 地理信息系统导论. 北京: 科学出版社, 2000

第一作者简介: 陈仁喜, 硕士. 主要研究方向为高质量 DEM 的建立及应用.

E-mail: sunrx@163.com

## An Algorithm for TIN Generation Considering Triangle Disposing

CHEN Renxi<sup>1</sup> LONG Yi<sup>1</sup>

(1 School of Resource and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

**Abstract:** A new method for TIN generation based on adjacent contours is brought forward, called algorithm of region segmentation. The fundamental thinking is introduced in details. Finally, experiments about mountaintop, saddle and valley (or ridge) are carried out, which manifests the validity of the method.

**Key words:** DEM ; TIN ; adjacent contours ; region segmentation; medial axes

About the first author: CHEN Renxi, master. His major research is high-quality DEM construction and application.

E-mail: sunrx@163.com

(责任编辑: 平子)