

无平三角形处理的等高线数据三角化方法

解愉嘉^{1 2 3}, 刘学军^{1 2 3}, 胡加佩^{1 2 3}

(1. 南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)
(2. 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)
(3. 地理信息科学江苏省重点实验室, 江苏 南京 210023)

[摘要] 本文提出一种不需处理平三角形即可构建等高线约束三角网(CDT)的方法. 该方法针对等高线地形图中等高线弯曲较大处易产生平三角的问题, 利用等高线邻接关系, 在提取出等高线空洞区的前提下, 对地形图中的剩余部分划分出可独立生成非平三角形的子区域, 并对每一块子区域进行约束构网, 这些子网所组成的集合就是整个张等高线地形图的约束三角网. 最后, 以云南某区实测等高线为实验数据, 分别利用本文方法和 ArcGIS 软件构建约束三角网, 通过对比分析实验结果, 验证了本文方法的有效性.

[关键词] 平三角形, 等高线, 邻接关系, 约束三角网(CDT)

[中图分类号] TP311 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2012)04-0106-06

Triangulating the Contour Data Without Flat Triangle Treatment

Xie Yujia^{1 2 3}, Liu Xuejun^{1 2 3}, Hu Jiapei^{1 2 3}

(1. School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)
(2. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing 210023, China)
(3. Key Laboratory of Geographic Information Science of Jiangsu Province, Nanjing 210023, China)

Abstract: In this paper, we put forward a new method which could build a CDT without treating the flat triangle. Against the problem that some area in the topographic map where the contour lines is bending too much, this method, by making use of the adjacency relationships between the contour lines in the topographic map, under the premise of extracting the contour empty areas, carves out the promoter regions, which could have the non-flat triangle generated from the rest of the topographic map independently, then builds structure networks in every promoter region. The set of these networks is the CDT of the entire topographic map. At last, on handling a group of contour experimental data measured from a region in the Yunnan province, we use the method presented in our paper and the method comes from the ArcGIS software respectively. By comparing the results produced by different experimental methods, the effectiveness of the method presented in this paper is proved.

Key words: flat triangle, contour line, adjacency relationship, constrained delaunay triangulation(CDT)

基于等高线数据实现数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)的构建,是目前生产 DEM 的主要手段之一,其核心过程是不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN)的构建^[1-2]. 而由三角形几何特性和等高线数据所产生的限制,使得将等高线作为约束条件所构建的约束 TIN(Constrained Delaunay Triangulation, CDT)中存在平三角形的问题难以避免^[3]. 平三角形的存在会导致 TIN、DEM 对地形表达失真,因此如何有效处理平三角形就成为高质量 DEM 生产的核心问题之一.

目前基于等高线数据的 TIN 中,对平三角形的修正算法主要分为 3 大类,即数据概化修正法、特征修正法和平坦区域搜索修正法^[4-7]. 数据概化修正法通过减少等高线上的采样点数量并增加采样点之间的距离,从而最大限度地减少平三角形的出现,此方法损失了采样数据信息量,同时也不能完全消除平三角形;特征修正法主要是通过插入特征点、特征线实现平三角形的消除,但等高线特征的自动提取却是一个

收稿日期: 2012-03-20.

基金项目: 国家自然科学基金(40971230)、博士点基金(20093207110009).

通讯联系人: 刘学军, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: DEM 不确定性分析、影视 GIS 等. E-mail: liuxuejun@njnu.edu.cn

难题;平坦区域搜索修正法首先搜索等高线间存在的平坦区域,并通过三角形边的交换实现平坦区域的处理,此类算法忽视了地形特征,且不适用于复杂地形区域。

本文首先对 TIN 中平三角形进行归类,然后给出了一种基于等高线空间关系^[8-11]的改进型 CDT 构建算法,最后通过实验对本文算法进行了验证。

1 等高线 TIN 的平三角形成因与类型

平三角形,是指 TIN 中三个顶点的高程值相等的三角形。在基于等高线数据所构建的 TIN 中,存在平三角形的根本原因在于不合理的采样点分布和三角形几何特性的约束。通常,在数字化地形图、数字摄影测量过程中,数据采样一般是沿等高线进行,数据分布一般比较密集,导致采样点之间的平均距离远小于等高线之间的平均距离,而 TIN 中对三角形形状一般要求尽量接近正三角形(如 DT 剖分准则),使得同一等高线上相距较近的采样点一般容易满足上述条件,大大增加了平三角形产生几率。

针对等高线数据,平三角一般会在 4 类区域产生(如图 1 所示):(1)鞍部(如图 1(a)所示),鞍部具有同高程但不同类的等高线族,在相邻两条高程值相等的等高线之间容易产生平三角形;(2)等高线弯曲较大处(如图 1(b)所示);(3)山顶或洼地处(如图 1(c)所示),其地形特征是封闭区域;(4)图幅边界处(如图 1(d)所示),等高线与图幅边界形成的封闭区域。

不同区域的平三角形修正需要采用不同的处理方案。鞍部一般需要增加鞍部点和地形结构线(山谷线、山脊线)进行约束;山顶或洼地等封闭区域的平三角形处理,需要增加地形特征点(如山顶点、洼地点等)。本文所述方法主要是针对等高线弯曲较大处的平三角形进行修正。

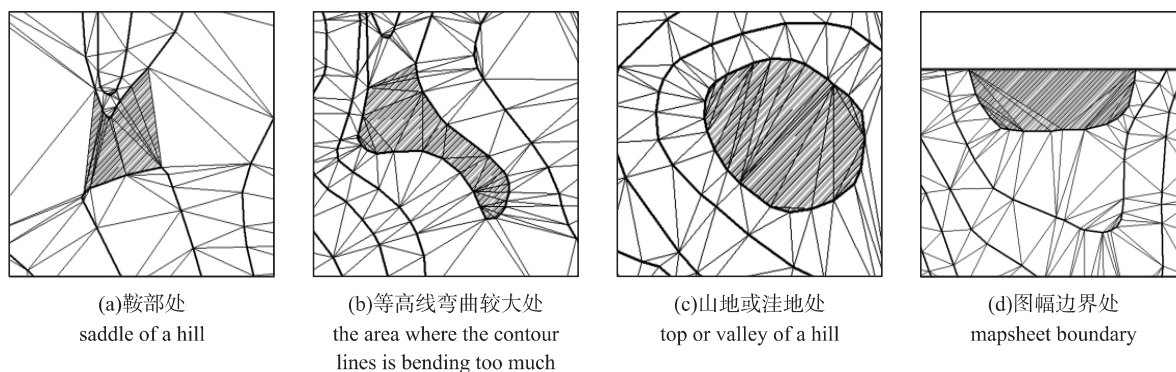


图 1 等高线图中平三角产生区域示意图(平坦区域已用阴影标注)

Fig.1 Instruction of the areas that have the flat triangles generated in the contour map
(Plane area has been labeled by the shadow)

2 等高线约束三角网构建方法

本文所介绍的等高线约束三角网构建方法主要步骤如下:首先,基于已有的等高线数据集,在等高线之间建立邻接关系,以构造等高线邻接关系集。然后,结合等高线数据集以及等高线邻接关系集,对整张等高线地形图进行平面剖分,以构造能独立生成非平三角形的子区域集。最后,对每块子区域约束构网,这些子三角网所组成的集合即是整张等高线地形图的约束三角网。(如图 2 所示)

2.1 等高线邻接关系构建

等高线邻接关系是本文所述的等高线数据三角化方法的基础,按照等高线是否闭合的特征,将等高线邻接关系分为 3 类,即非闭合等高线与非闭合等高线邻接关系、非闭合等高线与闭合等高线邻接关系、闭合等高线与闭合等高线邻接关系。

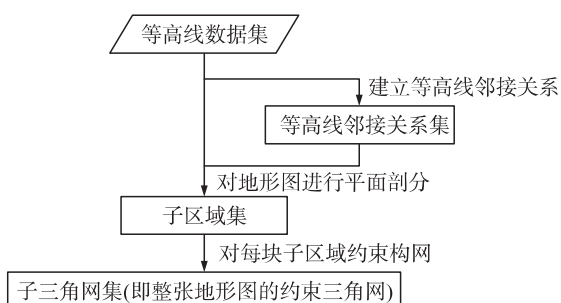


图 2 等高线约束三角网构建方法过程示意图

Fig.2 Instruction of the process of building a contour constrained triangulation network

2.1.1 非闭合等高线与非闭合等高线邻接关系

从图廓左下角点起,沿图廓逆时针方向,对所有非闭合等高线与图幅边界交点构造顺序结构点集^[8],然后对点集中的每一对相邻点依据下列条件,构造非闭合等高线邻接关系集:

- ①若相邻两点不属于同一条等高线,则对此两点分别所属的两条非闭合等高线建立邻接关系;
- ②若相邻两点属于同一条等高线,则表明当前两点所属的非闭合等高线在其的一侧与图幅边界构成无法由非平三角形覆盖的等高线空洞区。

2.1.2 非闭合等高线与闭合等高线邻接关系

从每条闭合等高线出发,依据以下条件,构造闭合等高线与非闭合等高线邻接关系集:

- ①若当前闭合等高线位于两条有邻接关系的非闭合等高线之间,则分别建立当前闭合等高线与这两条非闭合等高线之间的邻接关系;
- ②若当前闭合等高线位于一条非闭合等高线与图幅边界线之间,则建立当前闭合等高线与该非闭合等高线之间的邻接关系。

2.1.3 闭合等高线与闭合等高线邻接关系

从每条非闭合等高线和每条闭合等高线出发,依据以下条件,构造闭合等高线与闭合等高线邻接关系集:

- ①若当前非闭合等高线某一侧邻接的闭合等高线数目大于1,则对当前非闭合等高线该侧所有的邻接闭合等高线之间两两建立邻接关系;
- ②若当前闭合等高线内含闭合等高线,且内侧的闭合等高线不再被外侧等高线其他的内含等高线所包含,则对内外侧的两条闭合等高线建立邻接关系。

2.2 等高线图子区域构建

基于之前所构建的等高线邻接关系集,按照如下原理,从每条等高线出发,进行等高线图子区域构建:

第一步:选定一条等高线(记为 l_0),其一侧为 a_0 ,将符合以下条件的点加入点集 V_0 (如图3所示,符合条件的点已用圆环标注)。若 $V_0 \neq \emptyset$,执行第二步,否则终止对 l_0 中 a_0 侧点的考察:

- ①该点位于等高线 l_0 中 a_0 侧的邻接等高线上;
- ②该点高程值与等高线 l_0 的高程值相异。

第二步:设一指向子区域的空指针 ps ,然后依次从头至尾,对 l_0 上所有的邻接点对,依照其在等高线数据中的顺序构造向量(如图2中的向量 h_0h_{0-1}),并进行如下循环处理,以完成等高线子区域的生成:

(1)记当前所处理的向量为 p ,将 V_0 中所有在 p 的 a_0 侧且 p 的两端点与之连线均不与 l_0 相交的点加入点集 V_p 。若 $V_p \neq \emptyset$,则以 p 所确定的线段为基线,在 V_p 中寻找与 p 两端点连线形成最大角的点,作为向量 p 在 a_0 侧的最近邻点 v_0 ,并记 v_0 所在的等高线为 l'_0 ;若 $V_p = \emptyset$,则 v_0 不存在。

(2)依照 v_0 、 ps 的存在情况与 l'_0 的处理情况,依据以下条件分类处理,构造子区域:

- ①若存在 v_0 , l'_0 未处理,且 ps 为空,则新生成一个子区域,并将 ps 指向该子区域;
- ②若存在 v_0 , l'_0 已处理,且 ps 为空,则寻找之前生成的并且同时包含 l_0 与 l'_0 当前段落的子区域,并将 ps 指向该子区域;
- ③若存在 v_0 ,且 ps 不为空,则将 p 的两端点及 v_0 加入 ps 所指向的子区域;
- ④若不存在 v_0 ,则将 ps 置为空。

2.3 子三角网构建

完成了对整张地形图的子区域集构建之后,对其中的每一块子区域使用以下方法(如图4所示),在该子区域内独立地进行约束构网:

第一步:以当前子区域中两条等高线的段落端点连线作为基线,并从这两条等高线在当前子区域内与它们的段落端点分别相邻接的两点中取出形成较大角的点,构造三角形。(如图4(a)所示,从 h_{1-1} 、 h_{2-1} 中选出 h_{2-1} 与基线 h_1h_2 构成 $\Delta(h_1h_2h_{2-1})$)。

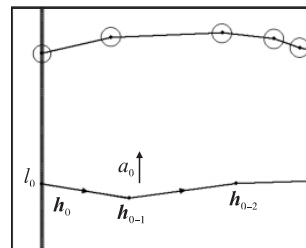


图3 等高线图子区域构建过程示意图

Fig.3 Instruction of the process of building promoter regions in the contour map

第二步: 重复(1)所述方法,直至当前子区域中两条等高线其中一条的段落端点被连入基线. 此时将另一条等高线中未被加入三角网的点依次作为三角形的顶点加入当前子区域的约束三角网中,构造三角形. (如图4(b)所示 t_{2-3} t_{2-2} t_{2-1} t_2 被依次作为三角形的端点构成 $\Delta(t_{2-4} \ t_{2-3} \ t_1)$ $\Delta(t_{2-3} \ t_{2-2} \ t_1)$ $\Delta(t_{2-2} \ t_{2-1} \ t_1)$ $\Delta(t_{2-1} \ t_2 \ t_1)$).

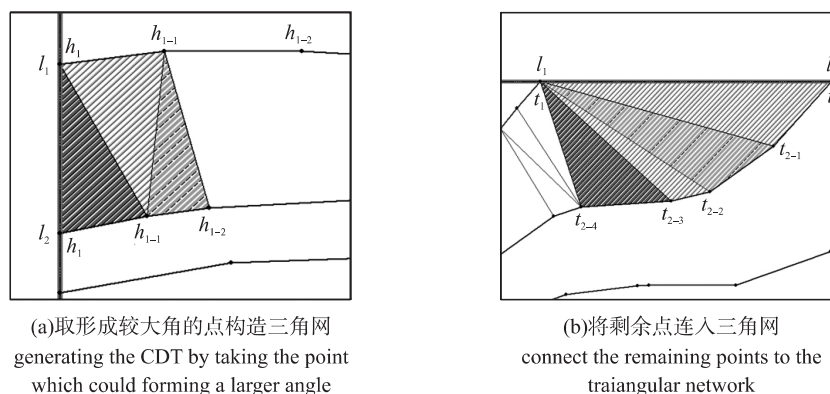


图4 在子区域中生成 CDT 示意图

Fig. 4 Instruction of the process of generating the CDT in a promoter region

3 实验与分析

3.1 实验环境与实验数据

本文算法实验的硬件参数如下: CPU: Intel(R) Core(TM) i5 - 2400 CPU @ 3.10 Hz; 内存: 2.99 GB; 操作系统: Windows XP; 编程环境: Visual Studio 2010; 编程语言: C++.

为验证本文所述的等高线约束三角网构建方法,采用云南某区由摄影测量所得的等高线数据作为测试数据进行实验. 该测试数据中含有鞍部、山顶或洼地、等高线弯曲过大处等易产生平三角形的区域. 在该数据中,每条等高线被以一组首尾顺次连接散点的形式进行表达. 数据的所有内容被以.txt 的格式进行记录. 实验结果在 ArcGIS 9.3 中显示.

3.2 主要数据结构

3.2.1 link 结构

由等高线数据生成的 CDT 中,非平三角形会在邻接等高线之间产生,但邻接等高线之间未必都会生成非平三角形. 针对这一情况,本文所述方法使用了 link 结构体(如图5所示),以表达可独立生成约束三角网的子区域. 图5中,link 结构由两条邻接等高线 L_1 、 L_2 在图中所示的段落(即阴影区的两条曲线边界)加上 $(h_1 \ t_1)$ 、 $(h_2 \ t_2)$ 两条连接线段作为基本构件组成. $h_1 \ t_1$ 、 $h_2 \ t_2$ 分别代表等高线 L_1 、 L_2 隶属于当前 link 结构的暂定头尾节点. s_1 与 s_2 分别代表阴影区相对于等高线 L_1 、 L_2 向量流所在的(左/右)侧.

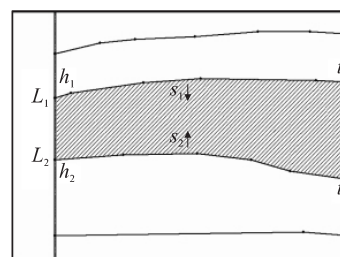


图5 link 结构的一般形式

Fig. 5 Normal style about the link structure

link 结构

```
typedef struct tagLINK
{
    int l1_id; int l2_id; //等高线 L1 L2 的编号
    int h1; int h2; //等高线 L1 隶属于当前 link 结构的暂定头尾节点
    int t1; int t2; //等高线 L2 隶属于当前 link 结构的暂定头尾节点
    CString s1; CString s2; //当前子区域相对于等高线 L1 L2 向量流所在的(左/右)侧
}
LINK;
```


3.2.2 其他数据结构

Vertex 结构用于记录每一个数据点 ,line 结构用于记每一条闭合等高线 ,cline 结构用于记每一条非闭合等高线.

vertex 结构
<pre>typedef struct tagVERTEX { float x; //x 坐标 float y; //y 坐标 int z; //z 坐标 int id; //该点所在等高线的编号 ,与其所在等高线编号一致 } VERTEX;</pre>
line 结构
<pre>typedef struct tagLINE//定义结构 LINE 表达一条非闭合等高线 { vector < VERTEX > vex; //包含于该等高线中的点(顺次排列) int height; //该等高线高程 int vex_num; //该等高线的点数 int id; //该等高线的编号 vector < int > left_next_id; //该等高线(向量) 左侧邻接等高线 vector < int > right_next_id; //该等高线(向量) 右侧邻接等高线 } LINE;</pre>
cline 结构
<pre>cline 结构 typedef struct tagCLINE//定义结构 CLINE 表达一条闭合等高线 { vector < VERTEX > vex; //包含于该等高线中的点(顺次排列) int height; //该等高线高程 int vex_num; //该等高线的点数 int id; //该等高线的编号 vector < int > ins_next_id; //该等高线圈内侧邻接等高线 vector < int > outs_next_id; //该等高线圈外侧邻接等高线 } CLINE;</pre>

3.3 实验结果比较

使用本文所述方法以及 ArcGIS 软件分别构建生成约束三角网 ,并将生成结果进行对比(如图 6 所示) . 由实验结果对比可以发现 ,对已有等高线数据(如图 6(a) 所示) ,使用 ArcGIS 软件生成的约束三角网中 ,存在大量由平三角形组成的平坦区域(如图 6(b) 所示 ,平三角区域已被填充) ;而在由本文所述方法

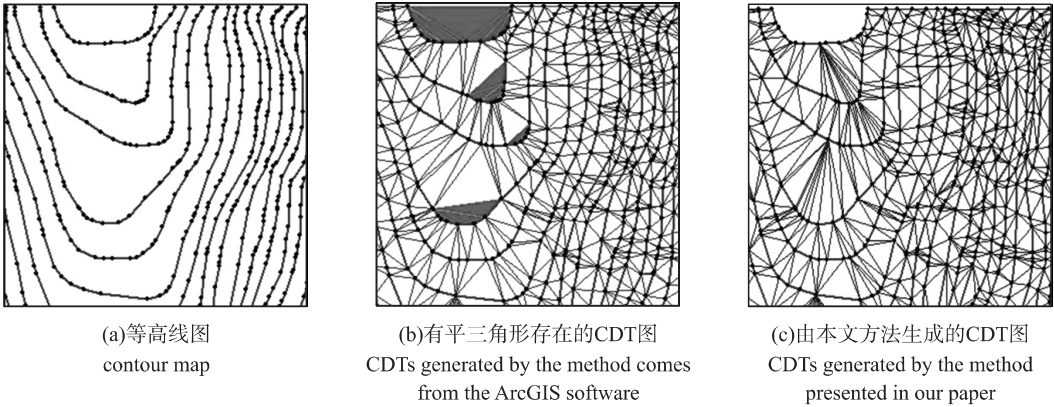


图 6 实验结果比较
Fig. 6 Comparison of experimental results

构造生成的约束三角网中,所有生成的三角形均为非平三角形(如图6(c)所示),而原先的平坦区域所在位置或由非平三角形覆盖,或由于缺少相应的地形特征点而暂时不加入构网。实验结果表明本文方法能正确地构建约束三角网,并能够有效地避免 ArcGIS 等软件构造约束三角网时易产生平三角形的问题。

4 总结

针对传统的构建等高线约束三角网方法需要对平三角形进行处理的问题,本文提出了一种改进型 CDT 生成方法,该方法通过利用等高线地形图中的等高线的邻接关系,对整幅等高线图进行子区域划分,达成了通过利用所划子区域集,不经平三角处理即生成等高线约束三角网的目的。

本方法的特点主要体现在如下几个方面:

(1) 本文方法有效地利用了等高线对于整张等高线地形图的剖分作用,提高了 TIN 的生成效率。

(2) 本文方法在 TIN 的初始构造过程中便已将等高线对于构造三角网的约束作用引入考虑,达成了直接由等高线数据生成 CDT 的目的,在方法中免去了由 DT 转化为 CDT 的处理步骤,并且不产生平三角形。

(3) 本文方法在处理过程中不进行插值,有利于数据真实性的保留。

(4) 本文方法能提取暂时无法生成非平三角形的等高线空洞区,有利于在后续处理中,将地形特征点加入构网。

进一步,将考虑把地形特征点引入本文所述方法的数据源中,并将尝试在每个子区域独立构造约束三角网的过程中加入对于这些地形特征点的处理,从而实现整幅区域等高线数据在不产生平三角的前提下被三角化。

[参考文献]

- [1] Gold C M, Snoeyink J. A one-step crust and skeleton extraction algorithm[J]. Algorithmica, 2001, 30(2): 144-163.
- [2] Yan H, Weibel R. An algorithm for point cluster generalization based on the Voronoi diagram[J]. Computer & Geosciences, 2008, 34(8): 939-954.
- [3] Mark W. A procedure for automatically correcting invalid flat triangles occurring in triangulated contour data[J]. Computers & Geosciences, 1998, 24(2): 141-150.
- [4] 陈仁喜, 龙毅. 顾及三角形处理的 TIN 建立算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2003, 28(5): 619-622.
- [5] 张立朝, 郑海鹰, 陈引川, 等. 基于等高线构建 TIN 模型的平三角形修正算法[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(6): 432-435.
- [6] 陈学工, 黄晶晶. 基于等高线建立的 TIN 中平坦区域的修正算法[J]. 计算机应用, 2007, 27(7): 1644-1646.
- [7] 江帆, 王志伟, 朱长青. 基于地性线的不规则三角网优化构建算法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2007, 32(2): 124-126.
- [8] 张琳琳, 武芳, 王辉连. 等高线空间关系的确定及应用[J]. 测绘通报, 2005(8): 19-22.
- [9] 吴凡, 栗卫民. 顾及地形特征的等高线拓扑空间关系表达[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2006, 39(3): 140-144.
- [10] 张尧, 樊红, 黄旺. 基于 Delaunay 三角网的等高线树生成方法[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 461-467.
- [11] 朱强, 武芳, 钱海忠, 等. 基于空间认知的等高线树的构建[J]. 信息工程大学学报, 2011, 12(4): 458-462.

[责任编辑: 丁 蓉]