

基于等高线提取地形特征线的研究

郭庆胜^{1,2,3} 杨族桥^{1,2,4} 冯 科¹

(1 武汉大学资源与环境科学学院,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(2 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(3 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路 129 号,430079)
(4 黄冈师范学院计算机科学与技术学院,黄冈市新港 2 路 146 号,438000)

摘 要:借助约束 Delaunay 三角网,研究了两种从等高线数据提取地形特征线的方法。给出了两种方法的实现过程,讨论了实验结果的异同,并分析了存在差异的原因。
关键词:等高线;Delaunay 三角网;曲率;形状指数;地形特征线
中图法分类号:P283.7;P208

利用等高线数据提取地形空间结构的主要方法有:利用溯源跟踪法提取山脊线和谷底线^[1,2];基于数学形态学的方法从等高线数据中提取地形特征线^[3];利用地图代数方法提取地形特征线^[4,5];利用 Delaunay 三角网通过对等高线数据特征分析,提取谷地树^[6];根据地性线的长度对短小地性线取舍并处理与之相关联的等高线弯曲^[7];利用 Split 算法查找特征点并生成山脊(谷)线^[8]。

本文在构造等高线的约束 Delaunay 三角网的基础上,提出了提取地形特征线的两种方法。

1 等高线上特征点的提取

在平面上,每条等高线均由一簇相互连接的线段组成,其顶点的特征主要由等高线上相邻顶点间的距离、顶点的转角和顶点的形状指数等因素决定。为此,这里选择顶点的转角大小、曲率和形状指数作为特征点的选取指标,以便更科学地判断某一个顶点是否为地形特征点。

1.1 等高线顶点的分类与应用

对于一条走向已知的等高线(等高线的高程左边高、右边低),在划分了其弯曲后就可以知道局部范围中哪里是谷地,哪里是山脊。这里用“+”表示山脊,“-”表示谷地,如图 1(a)所示。当两条等高线为邻接关系,并包含在高程比它小的等高线内时,就可以判断出鞍部;同理,山头(或

洼地)也可以通过封闭的等高线及其走向来确定。如图 1(b)所示,从等高线之间的拓扑关系和走向就可以判断出 1 个鞍部和两个山头^[9,10]。

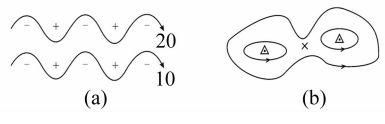


图 1 谷地和山脊
Fig. 1 Valley and Ridge

1.2 指标的计算方法

等高线上某一顶点的转角 C 计算比较容易。等高线上点的曲率的近似计算方法有多种,但从数学定义来看,曲线上点的曲率值应为 $W = dC/dL$,其中, dC 表示该点处切线与其邻近点切线之间的夹角, dL 表示该点与其邻近点之间的弧段长度。将等高线上点 P_k 的转角 C 和曲率 W 分别定义为:

$$C = \arccos \frac{\overrightarrow{P_{k-1}P_k} \cdot \overrightarrow{P_kP_{k+1}}}{|\overrightarrow{P_{k-1}P_k}| \times |\overrightarrow{P_kP_{k+1}}|}$$
$$W = C/L$$

其中, C 的值即为顶点 P_k 的转角,如图 2(a)所示; L 表示弧段 $P_{k-1}P_kP_{k+1}$ 的长度。用于计算点 P_k 的曲率的邻域可大可小,如图 2(b)所示,在点 P_k 的前后分别取 3 个点,即取不同的臂长($P_{k-j}P_kP_{k+j}$, $j=1,2,3$)来计算点 P_k 的曲率。

顶点的形状指数定义如下:

$$J_i(l_{i-1}, l_i) = \frac{\beta \times L_{i-1} \times L_i}{L_{i-1} + L_i}$$

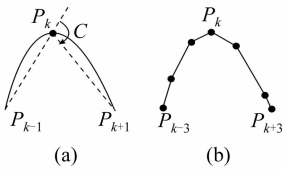


图 2 曲率的计算
Fig. 2 The Calculation of Curvature

其中, β 表示顶点 V_i 相邻直线段 l_{i-1} 的转角; l_{i-1} 和 l_i 分别表示线段 l_{i-1} 和 l_i 的长度。当顶点的转角一定时, 顶点的臂长 l_{i-1} 、 l_i 的长度越长, 则顶点的形状指数越大, 表明该顶点对曲线的贡献率越大, 该顶点选为特征点的可能性就越大。

1.3 特征点的选取

转角越大, 地形的变化越明显, 这里将顶点的转角作为特征点的首选指标。本实验中规定其阈值为 0.8 rad。图 3 中的实心圆和空心圆就是选定的特征点, 其中, 实心圆表示山脊线上的特征点, 空心圆表示谷底线上的特征点。

为了获取更详细的地形特征线, 需要在等高线的每个弯曲上都至少选择一个地形特征点。在选取过程中, 若某一个弯曲上所有顶点的转角都小于阈值, 就要同时考察该弯曲上顶点的曲率值和形状指数值, 可以选择转角值、曲率值和形状指数值三项指标至少有两项都比其他顶点大的点作为地形特征点。图 4 显示了所有特征点。图 3、图 4 中, ——表示等高线; ·····表示 Delaunay 三角形的边; - - -表示概略性中轴线; - - -表示山脊线; — · — · 表示谷底线。

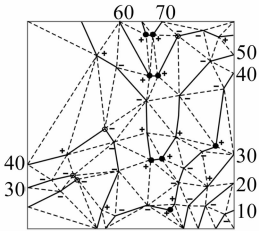


图 3 按转角阈值选取的特征点
Fig. 3 Selected Characteristic Points by Threshold Value of Turn Angle

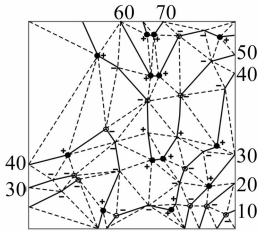


图 4 增加后的所有特征点
Fig. 4 Characteristic Points with Added Points

2 基于特征点连接地形特征线的原则

Kweon 和 Kanade 在提取特征线的方法中提出了 4 类指标^[2]: 特征点的曲率相似性, 两个特征点的距离, 两个特征点的法线方向分别与两个特

征点的连线方向之间的差别, 两个特征点的法线方向之间的差别。这些指标都有对应的阈值, 用 1 个启发式函数来决定两个相邻的地形特征点 (分别在相邻的等高线上) 是否连接。若某一个点的一个指标小于对应的阈值, 就不能连接。若多个点的指标满足条件, 则取启发式函数值最大的点连接。

本文在构造 Delaunay 三角网的基础上, 将中轴线上的分叉点也作为特征点考虑, 使得满足条件的地形特征点集更充分。在连线过程中除考虑顶点的转角值、曲率值和形状指数等指标外, 同时也要考虑特征点间的距离。这就要求在构成山脊线或谷底线时要遵循以下原则。

- 1) 高程不等的空间相邻的两根等高线上的地形特征点才能连接。
- 2) 类型不同的地形特征点不能连接。
- 3) 相邻两个地形特征点的连线不能与其他等高线相交。
- 4) 若在两根高程不等的空间相邻等高线上存在同类型的两个地形特征点, 并在 TIN 三角形的一条边上, 则连线就是该条边。若空间相邻的两个三角形的顶点都是同类型的地形特征点, 只选择连接两个高程不等且是空间相接的三角形的非公共边作为特征线, 如图 5(a) 所示的边 P_1P_3 和边 P_2P_4 。
- 5) 若空间相邻的两根等高线之间存在分叉的概略性中轴线, 则分叉点就是地形特征点, 如图 5(b) 所示的 P_5 。分叉点的类型与该点所在三角形的高程最高的顶点的类型特征相同。两个类型相同的邻近的地形特征点可以和一个中轴线分叉点连接, 如图 5(b) 所示的连线 P_3P_5 和 P_4P_5 。

6) 若空间相邻的两根等高线之间存在分叉的概略性中轴线, 则分叉的中轴线就自然是所求的地形特征线。该线是山脊线还是谷底线由分叉的中轴线与等高线交点的地形特征决定, 或者由与分叉点连接的地形特征点决定。如图 5(c) 中的点 A 是山脊点, 故连线 AB 就是山脊线。

7) 若一弯曲上存在两个类型相同的地形特征点, 并且以它们为顶点的三角形区域中有多个分叉点, 则将地形特征点与邻近的分叉点分别连接。连线的原则是: 若连线是 Delaunay 三角形的边则优先选择该条边; 连线的长度尽量短; 两条连线之间、连线与等高线之间都不能相交; 连线与连线也不能在分叉点处相交。如图 5(c) 中的点 A、B、C、D 和连线 AB、CD。

- 8) 当高程不等的空间相邻的两条等高线上

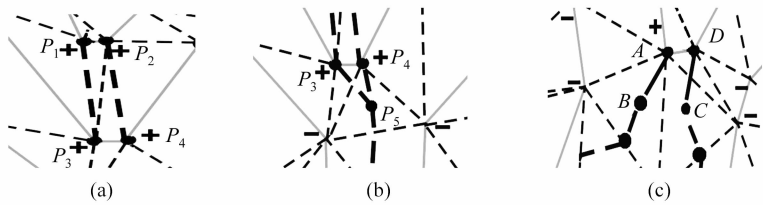


图 5 连接过程

Fig. 5 Connection Process

的同类型地形特征点在两个相邻 Delaunay 三角形上时,若它们的距离小于给定的阈值,可以考虑连接,这是对 Delaunay 三角网模拟地形不足的补充,如图 6 所示的点 A 和点 B、点 C 和点 D。

9) 当一个地形特征点与高程不等的空间相邻等高线上的同类型顶点(非特征点)是 TIN 中三角形的一条边的两个顶点时,也可以连接,且连线就是三角形的该条边,如图 6 所示的点 E 和点 C。这有利于微地形的描述,而微地形的提取在等高线的成组综合中有着比较重要的意义。

因为图廓边有二义性,为提取比较完整的地形特征线,将邻近图廓边的特征线按照其延展趋势直接延长到边,如图 7 所示的点 A、B 和 C 处的地形特征线。

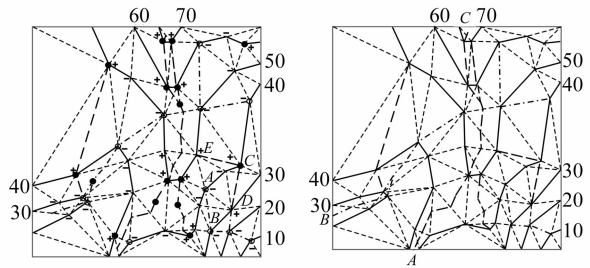


图 6 提取的地形特征线
Fig. 6 Topographic Characteristic Lines

图 7 地形特征线的调整
Fig. 7 Modified Topographic Characteristic Lines

3 基于流向组合关系的地形特征线提取

3.1 流向计算及其组合关系

Delaunay 三角形中每个三角形可以被看成是空间中的小平面,定义这种三角形的流向向量为三角形所在平面的法向量到 XOY 平面上的垂直投影平面与该平面相交线的方向向量。该向量的方位就是三角形的流向。

与平面 XOY 平行的三角形的流向是不确定的,如图 8(a)所示。对于非 XOY 平面上的三角形,边与流向的关系最终都可归纳为 4 种情况:流向线

进入一条边,表示为“+1”,简称进入边;流向线离开一条边,表示为“-1”,简称进出边;流向线与一条边平行,表示为“0”,简称流向边;流向不确定。

三角形内流向的分布也可以归纳为 4 种情况:无流向,图 8(a)(或无法确定流向,例如图廓边的三角形);流向线只指向一条边,见图 8(b);流向线与一条边平行,见图 8(c);流向线指向两条边,见图 8(d)。

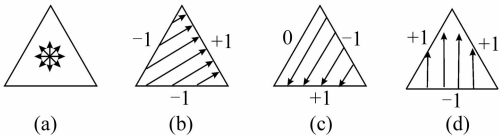


图 8 三角形的流向

Fig. 8 A Flow Direction on a Triangle

在具体运算过程中,判断流向是否与一条边平行需要一个阈值。当流向与一条边的夹角小于该阈值时,就认为是平行的。

1) 山脊线。公共边在两个三角形中都属于“-1”类;或者一条边属于“0”类(或无流向),另一条边属于“-1”类,见图 9(a)。

2) 谷底线。公共边在两个三角形中都属于“+1”类;或者一条边属于“0”类(或无流向),另一条边属于“+1”类,见图 9(b)。

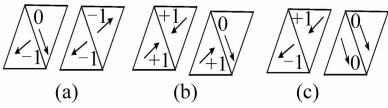


图 9 流向组合关系

Fig. 9 Combination Relationship of Flow Directions

3) 流向过渡边。公共边在两个三角形中一条边属于“-1”类,另一条边属于“+1”类,见图 9(c)。

4) 流向边。公共边在两个三角形中都属于“0”类,见图 9(d)。

5) 无意义边,公共边的两三角形无流向。

只依据流向有时无法确定山脊线或谷底线的信息。图 10 所示的三角形组合情况,常出现在 U

型谷中或宽山脊中,例如图 10(a)的线段 AB 和 AC 都是过渡边,图 10(b)的线段 AB 和 AC 也都是过渡边;图 10(c)的 $\triangle ABC$ 是高平顶部分;图 10(d)的三角形 $\triangle ABC$ 是低洼平地部分。

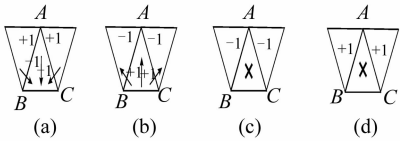


图 10 特殊的流向组合关系

Fig. 10 Special Combination Relationship of Flow Directions

3.2 地形特征线的提取

在地形特征线提取过程中,先根据 Delaunay 三角形中 3 个顶点计算出每个三角形的流向向量,判断三角形的流向。再根据相邻三角形公共边的流向组合关系就可以提取地形特征线。图 11 是提取特征线实验的局部示意图。

边 AB 和 HF 为提取的山脊线,EF 为提取的谷底线。边 HF 是山脊线,与实际情况不相符,根本原因是 $\triangle HFI$ 的顶点 I 在图廓边上,对计算结果有影响。

图 11 中的 $\triangle CDF$ 和 $\triangle DFG$ 恰好是图 10(a)和 10(b)中所示的特殊情况,说明这里存在一个 U 型山谷或一个宽山脊。当出现图 10(c)或 10(d)所示情况时,若平三角形三边都在等高线上,则是平山脊或平山谷,此时可不处理;否则可以利用分叉中轴线的特点用线性插值方法算出分叉中轴线与三角形边的交点的高程,然后重构 Delaunay 三角网,再求算每个三角形的流向,最后利用三角形流向组合关系得出结果。

图 12 的地形特征线是利用上述算法提取的

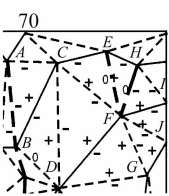


图 11 局部提取实验图
Fig. 11 A Part of Experimental Map of Extraction

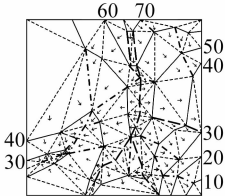


图 12 地形特征线
Fig. 12 Topographic Characteristic Lines

最终结果,其中图廓边作为边的三角形未处理, \rightarrow 表示三角形的流向。若分支中轴线是山脊,重构三角形后,山脊线两边的流水方向相反,这与自然规律完全吻合。

参 考 文 献

[1] 费立凡. 地形图等高线成组综合的试验[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1993, 18(增刊): 6-22

[2] Kweon I, Kanade T. Extracting Topographic Terrain Features from Elevation Maps[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing(CVGIP), 1994, 59(2): 171-182

[3] 陈晓勇. 数学形态学理论和模型的若干扩展及在 CCD 扫描等高线图的 DEM 自动建立中的应用[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1990

[4] 胡鹏, 游旌, 杨传勇, 等. 地图代数[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002

[5] 吴艳兰, 胡鹏, 王乐辉. 基于地图代数的山脊线和山谷线提取方法[J]. 测绘信息与工程, 2006, 31(2): 15-17

[6] 艾廷华, 祝国瑞, 张根寿. 基于 Delaunay 三角网模型的等高线地形特征提取及谷地树结构化组织[J]. 遥感学报, 2003, 7(4): 292-298

[7] 毋河海. 自动综合的结构化实现[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1996(3): 277-295

[8] 靳海亮, 康建荣, 高井祥. 利用等高线数据提取山脊(谷)线算法研究[J]. 武汉大学学报 · 信息科学版, 2005, 30(9): 809-812

[9] 郭庆胜, 毋河海, 李沛川. 等高线的空间关系规则和渐进式图形简化方法[J]. 武汉测绘科技大学学报, 2000, 25(1): 31-35

[10] 郭庆胜. 建立等高线层次结构的智能化途径[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(增刊): 69-75

[11] Barkowsky T, Latecki L J, Richter K F. Schematizing Maps: Simplification of Geographic Shape by Discrete Curve Evolution. Spatial Cognition II-Integrating Abstract Theories, Empirical Studies, Formal Models, and Practical Applications [M]. Berlin: Springer, 2000

第一作者简介: 郭庆胜, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事地图制图综合、地理信息智能化处理与可视化研究。
E-mail: guoqingsheng@126.com