

# 地形特征约束的等高线群渐进式简化方法

杨族桥<sup>1</sup> 李洪省<sup>2</sup> 张 青<sup>1</sup>

(1 黄冈师范学院,黄冈市新港二路 146 号, 438000)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所,北京市大屯路甲 11 号, 100101)

**摘要:**为保留等高线群简化过程中的地形特征信息,研究了一种等高线群渐进式简化方法。首先,从等高线数据中提取地形特征点及地形特征线;将提取的地形特征点和特征线作为约束条件予以量化,并作为控制变量;再依据渐进式图形简化的思想,利用控制变量对等高线上的非特征点、特征点、特征线及其关联的弯曲进行渐进式取舍,从而实现等高线群的动态简化。实验结果表明,该方法能够有效地保持地貌形态特征,同时提高了简化过程的智能化程度。

**关键词:**等高线;地形特征线;渐进式简化;约束

**中图分类号:**P208; P283.1

成组的等高线数据量大、密集且多弯曲,其中蕴涵着大量的山峰、洼地、鞍部、谷地线、山脊线等地形特征信息,在简化过程中必须考虑其整体的特殊性,一般不能简单地应用线状要素简化方法和模型<sup>[1-2]</sup>一次性完成等高线的简化。

等高线群的简化必须充分考虑等高线本身的形态特征和地理特征,从空间认知的角度分析等高线(群)本身蕴含的空间信息,简化的结果既要保持等高线的弯曲形状与图廓的基本特征,又要保持化简前后基本地理特征的一致性<sup>[3]</sup>。本文研究了地形特征约束的渐进式等高线群简化方法。

## 1 等高线群地形特征约束及其量化

等高线图形的渐进式综合是利用等高线的渐变来完成等高线的简化<sup>[4]</sup>。随着地图比例尺的变小,利用约束条件减少等高线的细节信息,当减少到一定程度时就可以满足某一抽象程度等高线图形的简化要求。

### 1.1 等高线基本综合约束

在地图综合过程中要遵循一些制图标准和综合规则,这些标准和规则可以认为是一系列的约束条件。通常有几何约束、拓扑约束、结构约束、

格式塔约束和过程约束等<sup>[5]</sup>。

等高线群简化也需有侧重考虑这几种约束。几何约束主要讨论的是可分辨的图形最小单位、最小尺寸、最小宽度和等高线要素之间的最小距离等。例如纸质图上等高线之间的最小距离要超过 0.3 mm、弯曲的内径应达到 0.4 mm 以上等,这是从纸质地图的清晰度和可读性等方面来考虑的。拓扑约束确保等高线的连续性、结构化以及等高线之间相邻、包含等拓扑关系在综合前后要保持一致,避免等高线自相交和相交异常情况的发生。结构约束定义了描述空间结构和语义结构的标准,对于单根等高线来说,“U”型弯曲一般情况下不能综合为“V”型弯曲。语义约束要求语义模拟前后保持不变。格式塔约束与美学和视觉平衡联系在一起,它要求保持原始线的形态特征、保留等高线群的分布特征,以及特征线与等高线之间保持结构上的平衡,如地形特征线尽量不与等高线重合。过程约束主要考虑综合过程中算子的选取以及合乎等高线综合原则的操作顺序。

通常,约束是定性的,在综合过程对约束量化,才可能保证几何特征、拓扑关系、地貌形态等约束的可实施性,以有效地完成等高线的渐进式简化过程。

收稿日期:2013-03-07。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41001314);国家 863 计划资助项目(2012AA12A408);湖北省科技厅自然科学基金资助项目(2011CDC028);湖北省教育厅重点资助项目(D20102901,D20122701)。

### 1.2 特征点约束及量化

在特征点的简化过程中,首先计算顶点对保持地形特征的“重要性”,舍去不重要的顶点或重要程度低的特征点。同时,还要控制相应的误差,使得每一步的误差尽可能小,这主要是从几何度量约束方面来考虑的。为度量顶点的重要性,本文采用顶点的转角值、顶点的曲率和顶点的形状指数等作为约束控制变量。

从等高线中提取地形特征信息的常用算法<sup>[6-8]</sup>较多。通常情况下,等高线弯曲中曲率较大的点贡献的信息量较大,在地形特征提取中起着重要作用<sup>[8]</sup>。本文计算曲率  $C$  的公式为:

$$C = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{P_{k-1}P_k} \cdot \overrightarrow{P_kP_{k+1}}}{|\overrightarrow{P_{k-1}P_k}| \times |\overrightarrow{P_kP_{k+1}}|}\right) / L \quad (1)$$

式中,  $L$  表示  $\overline{P_{k-1}P_kP_{k+1}}$  的长度。

多数情况下用顶点的形状指数来度量顶点对等高线形状特征的贡献大小,计算公式为:

$$J_i(l_{i-1}, l_i) = \frac{\alpha \cdot L_{i-1} \cdot L_i}{L_{i-1} + L_i} \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  表示与顶点  $V_i$  相邻线段  $l_{i-1}$  和  $l_i$  的夹角的弧度;  $L_{i-1}$ 、 $L_i$  分别表示线段  $l_{i-1}$  和  $l_i$  的长度。

因为转角变化越大意味着主要地形的变化越大,所以也将顶点的转角作为一个选取指标。为了获取连贯详细的地形特征线,需要在等高线的每个弯曲上都至少选择一个地形特征点。因此,本文设计了特征点选择函数:将顶点的转角、曲率、形状指数按大小依次排序,若转角、曲率或形状指数满足三项指标至少有两项都比其他顶点大则选择函数为真,该点就选为地形特征点;若弯曲中的所有顶点均使选择函数为假,则利用其他方法,如改进的 D-P 算法,来确定等高线弯曲中某一顶点,使该顶点的选择函数为真,并选取该点作为地形特征点。

### 1.3 地形特征线约束及量化

#### 1.3.1 基于 Delaunay 三角网的特征线提取

在构造 Delaunay 三角网的基础上,将等高线上的次级概略性中轴线上的点也作为特征点考虑,使得满足条件的地形特征点的信息更详实。在提取地形特征线的过程中对于探测到的弯曲,除考虑顶点的转角值、曲率值和形状指数等重要指标外,同时也要考虑特征点间的距离及位置关系等因素。文献<sup>[8]</sup>详细讨论了地形特征线连接时要遵循的原则,以确保提取的地形特征线具备连贯、真实的效果。在文献<sup>[7]</sup>的基础上利用建立谷地树的方法来建立地形特征线树(森林),并对其各个分支按照 Horton 编码来确定其等级。具

体步骤为:① 确定局部特征线分支;② 连接局部特征分支形成局部特征线树;③ 利用相应规则连接局部特征线树为整体地形特征线树或森林;④ 反复遍历局部特征线树,从叶节点到根节点,确定最长路径为主要特征线,反复这一过程,直至所有局部特征线树遍历完成;⑤ 遍历整体地形特征线树,确定其每一条特征线的等级;⑥ 利用关联矩阵记录各特征线之间的相关关系。

#### 1.3.2 特征线约束量化

对地形特征线而言,要考虑的因素有特征点所在的弯曲及与特征点相关联的特征线。本文分两种情况讨论:若该特征点无关联的特征线,此时考虑删除特征点及所在的弯曲即可;若该特征点存在与之相关的特征线,就要讨论与特征点相关联的特征线的重要程度。

在处理有特征点但无地形特征线关联的弯曲时,通常这种地区是相对平坦的地区,或地形特征不明显,此时按特征点的重要性依次取舍,同时考虑特征点所在弯曲的大小。根据综合规则,在删除小于阈值的弯曲时,如果最小的谷地弯曲和山脊弯曲大小差别不大,对正向为主的地貌,以删除小谷地为主;对于负向为主的地貌,以删除小山脊为主。

结合讨论的各种约束,地形特征线的重要性可从以下几个方面来考虑。

1) 地形特征线的长度。地形特征线越长,说明特征线重要程度越高,计算公式为:

$$l = \sum_{i=1} l_i = \sum_{i=1} |A_i A_{i+1}| = \sum_{i=1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (3)$$

其中,  $l$  为特征线上各相邻线段  $|A_i A_{i+1}|$  之和。

2) 地形特征线关联弯曲的面积。若地形特征线关联弯曲的面积越大说明该特征线越重要,计算公式为:

$$S = \sum_{k=1} S_i = \sum_{k=1} S_{\Delta A_{i-1} A_i A_{i+1}} \quad (4)$$

式中,  $S_{\Delta A_{i-1} A_i A_{i+1}}$  可以通过三角形面积公式  $S_i = \sqrt{p_i(p_i - a_i)(p_i - b_i)(p_i - c_i)}$  求得,其中,  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别为  $\Delta A_{i-1} A_i A_{i+1}$  的三条边的长度。

3) 与特征线相交的等高线的条数。若与特征线相交的等高线条数越多,表明该特征线首尾点间高程差越大,此处的地表形态变化越剧烈。其值为直接统计与特征线相交的等高线的条数。

4) 格式塔约束中的视觉平衡问题。主要是考虑特征线和等高线的夹角应该大于某个阈值

(本文设为  $0.26 \text{ rad}$ , 避免等高线简化过程中出现特征线和等高线平行或重合的情况), 同时要求特征线应该具有一定的光滑性等。

5) 地形特征线的协调性。大多数情况下, 山脊线与山谷线应该相间出现。

6) 同类型特征线间的平均距离。特殊情况下要考虑的是两条或多条性质相同(如都是山脊线)的特征线之间的平均距离。平均距离越小, 说明特征线数据之间的冗余越大。

文献[7]以长度作为地形特征线的评价指标。实际上, 评价指标还应包括地形特征线关联弯曲的面积等。在建立地形特征线树的主次分支关系后, 地形特征线树中每一个分支的重要性也就确定下来了。通常规定等级高的分支其重要性也高, 它对地形特征的描述更准确, 对地形表达的约束力就大些; 相对而言, 等级低的细小分支的重要

性相对较低, 对地形的约束力就小。渐进式删除的过程就是针对重要性低的次分支进行, 逐步删除这样的次分支特征线、与之相关联的特征点以及次分支特征线所关联的弯曲, 来实现等高线群的简化。

## 2 结果与分析

本文在等高线简化过程中结合渐进式地图综合的思想, 充分考虑了多种约束并将其量化为综合过程的控制变量, 给出了等高线的渐进式简化方法和过程。实验表明, 该方法可以合理保持地形地貌的特征与等高线的空间分布特征, 保证等高线简化过程中的可控性, 从而提高等高线综合的质量和智能化程度。限于篇幅, 以提取的山谷线数据为例进行说明(见图 1~4)。

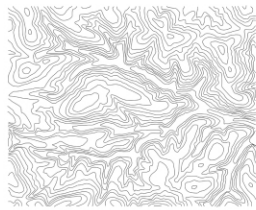


图 1 原始的等高线群数据

Fig. 1 Original Contour Line Group

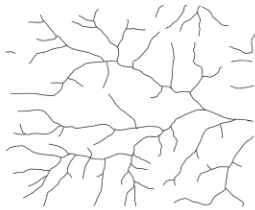


图 2 从等高线提取的山谷线树

Fig. 2 Tree of Valley Lines Extracted from Contour Data

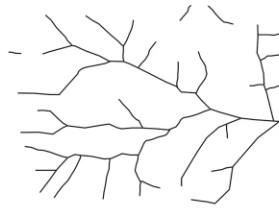


图 3 综合后的山谷线树

Fig. 3 Generalized Tree of Valley Lines

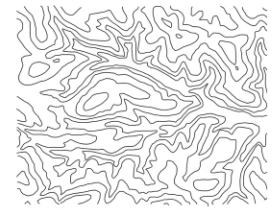


图 4 等高线群渐进式简化的结果

Fig. 4 Progressive Simplification Results of Contour Line Group

实验结果表明, 结合山谷线的等高线群简化, 地形特征线位置确定, 尽量减少了简化后地形失真的情况, 次级地形特征线的删除使得等高线得到较大程度的化简, 并且避免了相邻等高线间出现相交或同一根等高线出现自交的情况。在合理保留地形地貌原有特征分布形态的条件下, 有效避免了等高线群与目标在语义和空间上可能存在的冲突。从图 1~4 中可以看出, 采用本文方法简化的等高线群光滑性效果保持较好。图 4 中等高线群的数据量为原始数据量的  $15.72\%$ , 说明该方法具有较高的简化效率。因为本方法是以地形特征为约束的, 特征点保持率超过  $93\%$ , 而且等高线群满足的基本约束在综合前后得到较大程度的保持。

## 3 结语

由于本文方法在等高线的简化过程中尽可能保留的特征点是原等高线上的点, 所以简化后特

征点的位置误差小。而且, 弯曲的删除是由地形特征线控制, 局部等高线不会产生自交和相交的情况, 同时也避免了等高线与地形特征线之间产生冲突的可能。但随着等高线上顶点数的减少, 特别是综合的尺度跨度较大时, 简化后等高线的光滑程度会受到一定的影响, 这是本文方法有待进一步完善和改进的地方。同时, 等高线群数据密集、数据量大, 在简化过程中涉及特征点、特征线的探测以及地形特征线约束的量化, 计算量较大。如何有效提高等高线简化过程中的处理效率也需要进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] 张胜, 朱才连, 钟世明. Douglas-Peucker 算法的改进及应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(5): 671-674
- [2] 翟仁健, 武芳, 朱丽, 等. 利用地理特征约束进行曲线化简[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(9): 1 021-1 025
- [3] 应申, 李霖. 基于约束点的曲线一致性化简[J]. 武汉

- 大学学报·信息科学版, 2003, 28(4): 488-491
- [4] 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
- [5] Weibel R, Dutton H. Constraint-Based Automated Map Generalization[C]. The 8th Spatial Data Handling Symposium, Vancouver, 1998
- [6] 艾廷华, 祝国瑞, 张根寿, 等. 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] 吴凡, 粟卫民, 杨英伟, 等. 基于联合 Delaunay 三角网的等高线地形特征提取研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(2): 172-176
- [8] 郭庆胜, 杨族桥, 冯科. 基于等高线提取地形特征线的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(3): 253-257
- 第一作者简介: 杨族桥, 副教授, 博士。研究方向为空间数据多尺度表达、空间数据挖掘。  
E-mail: jsjyzq@hgnu.edu.cn

## Progressive Simplification Methods of Contour Line Group Constrained by Topographic Feature

YANG Zuqiao<sup>1</sup> LI Hongsheng<sup>2</sup> ZHANG Qing<sup>1</sup>

(1 Huanggang Normal University, 146 Xingang'er Road, Huanggang 438000, China)

(2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS,  
11A Datun Road, Beijing 100101, China)

**Abstract:** To preserve topographic feature during simplifying of contour line groups, a progressive simplification method is proposed. Firstly, topographic feature points and lines are extracted from contour lines according to expert rules. Secondly, both the extracted topographic feature points and lines as constraints are quantified as control variables. Based on the progressive graphics simplification approach, the non-feature points, feature points, feature lines and its associated bends on the contour lines are selected or deleted progressively according to the value of control variables so as to realize simplification of contour line groups with intelligence. Experimental results show that the proposed methods can effectively preserve topographic structural feature and improve the intelligence during contour line simplification.

**Key words:** contour lines; topographic feature line; progressive simplification; constraints

**About the first author:** YANG Zuqiao, associate professor, Ph.D. majors in spatial data multi-scale representation and spatial data mining.  
E-mail: jsjyzq@hgnu.edu.cn