

等高线自动提取结构线方法与问题处理

郭明武, 吴凡

(武汉大学资源与环境科学学院地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079)

摘要:结构线是地貌形态的骨架线,是描述地貌形态时的控制线,它在地图制图综合、遥感数字图像处理和扩充GIS系统的应用功能上均有重要的意义。文中给出了从等高线数据中确定特征点的算法,并对整个图幅内全部特征点的确定方法进行了改进;以整体分析与局部分析相结合,根据局部地形特征的不同,使用不同的阈值分区确定特征点。然后通过建立数学模型匹配特征点生成结构线。为了提高结构线的应用潜力,在生成结构线时提取了结构线的分级信息,并将生成的结构线按树结构组织存储。实验结果表明该方法对任何特征的地形等高线数据均适用,而且最后生成的结构线具有较好的完整性和较高的精确性。

关键词:结构线;等高线;树结构;分级信息

中图分类号:P208

1 引言

结构线是地貌形态的骨架线,是描述地貌形态时的控制线,主要包括山脊线、山谷线。结构线在原始地图上是没有的,是通过数据处理得到的派生数据,可以说:不是原始数据,胜似原始数据。它在DEM内插中有重要的决定作用,只有考虑了地形特征信息,才能使内插得到的DEM和由DEM导出的其他产品能准确地描述地形表面,从而得到高逼真度的地形表示。此外,在制图综合和遥感数字图像处理以及解析地貌等其他方面的研究中,结构线也有着十分重要的作用。

从等高线数据中提取结构线通常分两步:确定特征点和连结特征点以生成结构线。第一步的结果对最后生成的结构线的质量有重要的决定作用。提取结构线的众多算法的不同之处都是在特征点的确定方法上,对于第二步几乎都是一致的。

从等高线数据中确定特征点的常见算法有:(1)曲线压缩法,分为垂距限差法(即Douglas-Peucker算法)和角度限差法。这两种方法对起点比较敏感,即因起始点的不同,所检测到的特征点可能不同或漏检某些特征点。(2)曲率分析法。由

于曲率是连续函数的概念,对于离散点集来说,只能通过曲线内插来得到近似曲率,而且受特征点周围点的位置影响非常大,求出的曲率不能真实地反映特征点的特征。(3)等高线垂线跟踪法。是间接分析来寻找地形特征线,有着计算量大和特征点的确定比较麻烦的缺点。(4)等高线骨架化法。该方法将地形特征线两侧的地形视为对称变化,这显然与大多数地形变化是不符合的,因此,用该方法提取的结构线通常与实际地形不一致。

地表形态的复杂多样性以及结构线的本质决定了结构线的提取必须结合地形的特征进行。在确定特征点时,常常是全区域采用一个相同的实际上只适合某一特定地形的阈值(如距离阈值、夹角阈值或者曲率阈值)作为判断地形特征点的条件,也就是说,即使全区域同时包含几种具有不同特征的地形时,常将它们视为具有同一种特征的地形看待。在这种情况下进行结构线的提取,明显忽视了地形特征的变化。因而最后生成的结构线不完整,发生断裂几乎是它们的“通病”。

本文在研究常见算法的基础上,给出了一种确定地形特征点的简单方法。在使用该方法确定特征点时,充分考虑局部地形的特征,以整体分析与局部分析相结合。在很大程度上避免了上述“通病”的

收稿日期:2004-06-11;修回日期:2005-04-21。

资助项目:国家基础测绘科技计划资助项目(项目编号:1469990324231)。

作者简介:郭明武(1980-),男,武汉大学资源与环境科学学院在读硕士研究生,主要从事地理信息系统的理论研究和应用开发。

已发表论文数篇。E-mail:g-m-w@sohu.com

产生。

2 地形特征点的确定

(1) 对等高线上的连结点 P, 计算以该点为顶点、相邻两等高线连结点与该点的连线构成的两边所形成的夹角 r (小于 180 度), 对于某一给定的夹角阈值 M , 若有 $r < M$, 则点 P 为一个特征点。否则, 该点就为普通点。通过对每一条等高线进行上述处理, 就可以把所有可能的山谷点、山脊点找出来。

在屏幕上显示所有的等高线后, 整体分析该图幅地区的地形特征, 然后根据局部地形特征的差异, 由用户决定是否对整个图幅进行分区, 以及如何分区, 最后根据区域地形的不同, 使用不同的阈值分片确定结构点。如果整个图幅表现出的地形变化同时有平缓的山地和急剧的山地, 对平缓的山地可以使用比地形变化急剧的山地较大的夹角阈值。这样不仅充分考虑了地形的变化, 减少了特征点检漏的可能性, 而且开发出的应用程序给用户提供了较大的自由度, 使用户可以根据自己的需要决定是否提取图幅中某一个区域内的结构线, 以及每个不同区域内结构线的不同详细程度。当要对整个图幅分区确定特征点时, 为了不检漏某些区域或者点, 要求对相邻区域的边缘有少许的重叠。

(2) 区分特征点建立等高线间的拓扑关系。由于山谷点处等高线所成的夹角是朝向比它们低的等高线的, 而山脊点处等高线所成的夹角是朝向比它们高的等高线的, 基于这一原理可以进行特征点的区分。

在区分特征点是山谷点还是山脊点的同时, 可以建立等高线之间的拓扑关系, 即记录每条等高线附近相邻的与它的高程值相差一个等高距的所有等高线的 ID 号, 这对后面特征点的匹配和连接特征线工作效率的提高起到了一个铺垫作用。

如图 1, 对于 ID 号为 i , 高程值为 H 的等高线上经过计算被确定为特征点的一点 A, 可以求其张角的角平分线 AG, 交 BC (B、C 为相邻两等高线连结点) 于点 D, 则由点 A 和点 D 确定了一条直线 L, 则直线 L 与无数条等高线相交。计算 L 与所有高程值为 $H + \Delta H$ (ΔH 为等高距) 的等高线的交点, 设交点的坐标集合为: $\text{InterH} = \{Ph_1, Ph_2, \dots, Ph_k, \dots, Ph_i\}$, 每个交点所在等高线的 ID 号对应为: $\text{IDH} = \{idh_1, idh_2, \dots$

$idh_k, \dots, idh_i\}$, 计算集合 InterH 中的每个点与点 A 的距离, 设每个点与点 A 的距离对应为: $\text{DistH} = \{\text{Dist}_j, j=1, \dots, i\}$, 然后从集合 DistH 中找出最小的距离值, 设 $\min(\text{Dist}_j) = \text{Dist}_k$ ($1 \leq k \leq i$), 对应的交点为 Ph_k , 则可知与直线 L 相交且与等高线 i 相邻而且高程值与等高线 i 的高程值大一个等高距的等高线的 ID 号为 $idhk$, 同样可以求出与直线 L 相交且与等高线 i 相邻而且高程值与等高线 i 的高程值小一个等高距的等高线 (即高程值为 $H - \Delta H$ 的等高线) 的 ID 号, 设为 $idlk$, 对应的交点为 Plk , 最后以点 A 为分界, 判断 Ph_k 和 Plk 这两点中哪点与点 D 位于同一侧。设与点 D 位于同一侧的点为点 E, 如果 $E = Ph_k$, 则特征点 A 就是山脊点, 如果 $E = Plk$, 则特征点 A 就是山谷点。对点 A 记录 E 点的坐标, 以免在特征点匹配时再次计算点 A 的角平分线。对等高线 i 记录与等高线 i 相邻而且高程值与 i 的高程值相差一个等高距的两条等高线的 ID 号, 这样就建立了等高线之间的拓扑关系。当等高线 i 位于图幅的边缘时, 就只能找到一条相邻的等高线。

3 地形结构线的生成

3.1 特征点的优化选择与匹配

把特征点区分开后, 会发现所找到的特征点有一些是多余的。在连接结构线前, 应该将这些多余的特征点删除。所以应该对每条等高线上的每个特征点进行判断, 若在同一等高线上有相邻两点为同类点 (同时为山谷点或者同时为山脊点) 而且距离小于一阈值, 就取夹角小的一个点, 而删除另一个点; 若相邻三点为同类点且相互间距离小于一阈值, 则取中间点。

在特征点被确定了而且经过了分类和优化选择后, 就应确定哪些点是属于同一条结构线上的点。如果某两点是同一条结构线上相邻的两点, 那么这两点的连线一定不与任何等高线相交。为了方便准确地进行特征点的匹配, 先对每个特征点运用这一规律进行初步匹配。

现以山谷点的匹配为例, 详细讨论特征点初步匹配的方法 (山脊点的初步匹配原理与之一样)。对每个山谷点, 其匹配的“下游点”, 需试图到比该点所在的等高线的高程值小一个等高距的等高线上去找。即对每条等高线 I (高程值 H_I), 由拓扑关系

可知与该等高线 I 相邻,且高程与该等高线小一个等高距的所有等高线,设它们对应的 ID 号集合为 $\text{NearLContID}=\{Id_i | i=1,2,\dots,n\}$ 。这样对于 I 上的某一个山谷点 T_i 和集合 NearLContID 中的任何一个元素 Id_k ($1 \leq k \leq n$),可以在上找到山谷点的集合 $P_k=\{p_i | i=1,\dots,m\}$,集合 P_k 中每个点与点 T_i 的连线既不与等高线 I 相交,又不与集合 NearLContID 中的每条等高线相交。按照这样计算出所有的与点 T_i 的连线不与等高线相交的所有山谷点的集合 $PL=P_1 \cup P_2 \cup \dots \cup P_k \dots \cup P_n$ 。如图 2 所示,对于 ID 号为 id_2 的等高线,与它相邻而且高程小一个等高距的等高线为 id_1 ,对于 id_2 上的山谷点 G ,可以在 id_1 上找到与 G 相连而不与 id_1 和 id_2 相交的“下游山谷点” A 、 B 和 C ,而山谷点 D 、 E 与山谷点 G 的连线与等高线 id_2 相交,故应该被淘汰。那么对于山谷点 G 而言, $PL=\{A,B,C\}$ 。

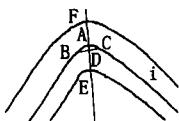


图 1 区分特征点的原理图

Fig.1 Illustrative diagram of distinguishing feature points

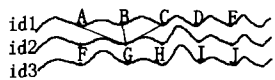


图 2 初步匹配特征点的图例

Fig.2 Graphic example of preparatory matching feature points

经过以上初步匹配后,对于每一个山谷点,都找到了与该点有可能位于同一条结构线上的“下游”山谷点集合 PL 。同样,对于每个山脊点,都找到了与该点有可能位于同一条结构线上的“上游”山脊点集合 PH 。然后将每个特征点与其经过以上初步匹配后找到的可能与它位于同一条结构线上的特征点集合中的每个点进行精确匹配。为了进行精确匹配,必须将决定参考点和待判点之间地理位置关系的几种因素综合考虑。然后使用建立的数学模型来综合评判参考点和待判点是否应该是同一条结构线上的两相邻点。决定参考点和待判点之间地理位置关系的几种因素:①参考点与待判断点间的距离 d ;②待判点与参考点的连线与参考点处张角的角平分线的夹角 α ;③参考点处张角的角平分线与待判点处张角的角平分线的夹角 β ;④结构线在

待判点处的转向角 γ 。

基于以上原则,可以建立两种数学模型:加权平均多因素模糊综合评判模型、加权平方和综合评判模型。然后可以根据需要从这两种数学模型中选用一种模型进行特征点的匹配。

(1) 加权平均多因素模糊综合评判模型:①参考点与待判断点间的距离 d 在一限值 d_0 内,即 $d < d_0$;②待判点与参考点的连线与参考点处张角的角平分线的夹角 $\alpha < 0.5r$ 。(r 为参考点处张角)即要求待判点与参考点的连线应处于等高线在参考点所张的夹角 r 内;③参考点处张角的角平分线与待判点处张角的角平分线的夹角 β 小于一限差 β_0 ,即要求参考点与待判点处张角方向基本相同;④结构线在待判点处的转向角 γ 在一限值 γ_0 内。

定义因素集: $U=\{u_1, u_2, u_3, u_4\}=\{d, \alpha, \beta, \gamma\}$; $R=\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ 。其中 f_i 表示 u_i 属于特征线上的点的隶属度, U 中每个因素的隶属度为:

$$f_1=(d_0-d)/d_0 \quad f_2=(0.5r-\alpha)/0.5r \\ f_3=(\beta_0-\beta)/\beta_0 \quad f_4=(\gamma_0-\gamma)/\gamma_0$$

则待判点与参考点是同一条结构线上相邻两点的隶属度为: $V=\omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_3 f_3 + \omega_4 f_4$; 其中 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为因素 d, α, β, γ 的权重。最后将评判值 V 最大的那一待判点作为特征线上的点。

该数学模型的最大缺点是使用了很多不确定的参数,如 d_0, β_0, γ_0 。

(2) 加权平方和综合评判模型: $V=\omega_1 d^2 + \omega_2 \alpha^2 + \omega_3 \beta^2 + \omega_4 \gamma^2$; 其中 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为因素 d, α, β, γ 的权重。

最后将 V 值最小的待判点作为特征线上的点。该模型比模型(1)简单,不含(1)中那些不确定的参数。(1)、(2)两种数学模型中均用到了权重 ω_i ,其大小反映了对应的因素 u_i 的重要程度。不同类型的地形对应的 ω_i 应该作相应的调整。

3.2 结构线的生成与编辑

山谷线的连接是逐条进行的,通常要求每个山谷点只有一个“下游点”,但是可能有一个以上的“上游点”^[9]。而且总是从高处向低处跟踪,所以每次开始一条新山谷线的跟踪时,都是从所有未跟踪的山谷点中找出高程值最大的山谷点作为新的山谷线的“起点”。当一个山谷点被跟踪了后,就将其高程改为-1,以标示该点被跟踪过了。在跟踪过程中,如果遇到了某一点有一个以上的“上游点”,就表示

该点是两条山谷线的交汇处。这时就应该结束当前山谷线的跟踪,转而开始一条新山谷线的跟踪。在跟踪过程中如果遇到某点没有“下游点”,那么也应该结束当前山谷线的跟踪,转而开始另一条新山谷线的跟踪。当山谷点对象集合中所有对象的高程值都变为-1时,表示所有的山谷线连接完毕。连接山谷点生成山谷线的流程见图3,4。

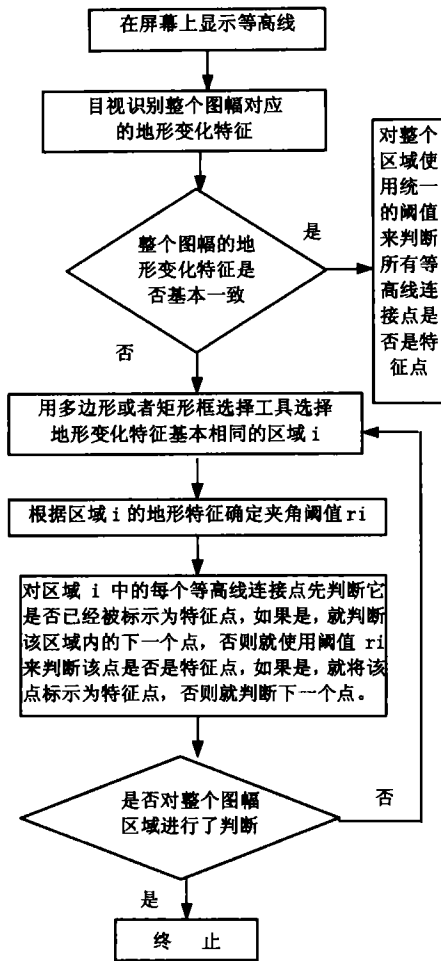


图3 对整个图幅确定地形特征点的流程图

Fig.3 Flow chart of confirming all feature points in the whole studied region

由于地形表面是复杂多样的,所以经过上述各步的处理后,最后生成的结构线仍有少许错误,所以开发的自动提取结构线的应用程序还应该提供进行人工辅助编辑的功能,包括删除不正确的、添加漏掉的、合并连接发生断裂的结构线和移动其节点的位置等。

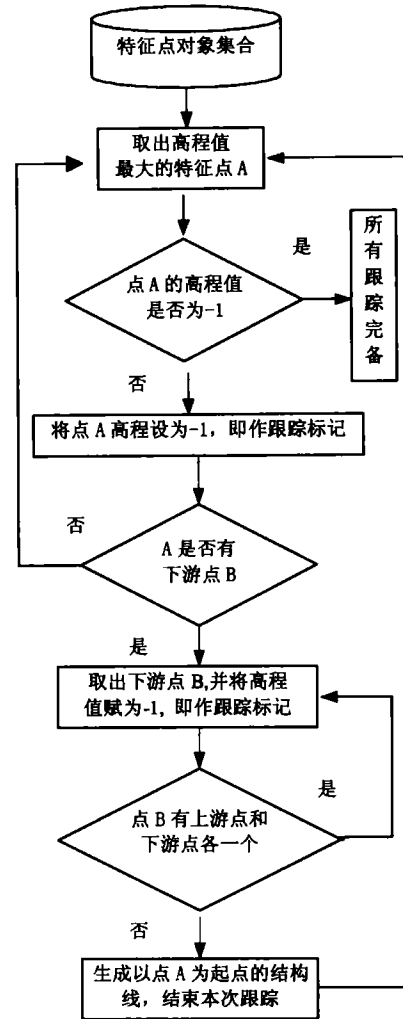


图4 连接山谷点生成山谷线流程图

Fig.4 Flow chart of linking valley points to create valley lines

如图5和图6就是笔者在实验中遇到的两种典型的结构线发生断裂的情况。对于如图5的情况,可以使用连接合并结构线工具顺着结构线的走势来连接合并两段结构线。尽管在确定结构点时充分考虑了地形变化的特征并分区使用不同的阈值来确定结构点。但是在同一个区域内,地形只能是大体上一致,在局部还是有差异。这样结构线可能在一些地形平缓的局部地方发生断裂,如图6所示。同样可以通过连线合并工具将两段连起来,然后在应用程序的后台进行对象合并与数据重组,将它们组合成一个新的结构线对象。经过少量的人工辅助编辑,可以极大地提高和改善所生成的结构线的精度。

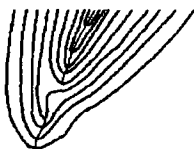


图 5 出现断点的
典型实例图

Fig.5 Representative graphic



图 6 出现断点的
另一典型实例图

Fig.6 Another representative graphic

example of breakpoint arising example of breakpoint arising

4 结构线的树结构存储组织与分支等级信息的提取

由于前面生成结构线时将每一段结构线组织为一个结构线对象,各对象之间在逻辑上毫无关系,尽管有些地方结构线呈现出如图 7 所示的树结构特征。为了便于查询检索和保存结构线之间的连接关系,进而从中进一步提取可用的信息,可以对如图 7 所示的树结构特征的结构线以如图 8 所示的结构表示,然后对如图 8 所示结构中的每个节点设计用如下所示的数据结构将生成的结构线以树状结构存储组织:

ID	PARENT	LINK1	LINK2	LINK3
----	--------	-------	-------	-------

其中 ID 为结构线的 ID 号, PARENT 为父节点的指针, Link1, Link2, Link3 分别为子节点的指针。

可以使用 Strahler 分级方法来提取山谷线的分支等级信息,以便于进行分级检索。Strahler 分级的思想为:设源头段的级为 1,若级为 A 和级为 B 的两河段汇合进入级为 C 的河段,若 $A=B$,则 $C=A+1$; 否则 $C=\max(A,B)$ 。图 7 所示的部分山谷线使用 Strahler 分级方法分级后的结果如图 9 所示。

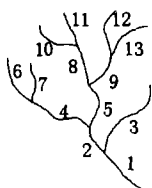


图 7 树结构的结构线实例图

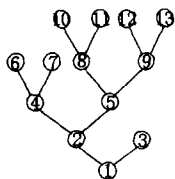


图 8 图 7 所示结构线的
另一种树结构表示

Fig.7 Graphic example of terrain structure lines of tree structure Fig.8 Another tree structure diagram of terrain structure lines in Fig.7

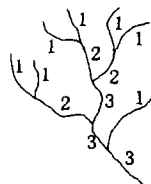


图 9 对图 7 所示的结构线提取分支等级信息的结果图

Fig.9 Result diagram of branch grade for terrain structure lines in Fig.7

5 实验结果分析

尽管实验时没有将生成的结构线与采用其他方法提取的结构线进行比较,但是通过将生成的结构线与等高线进行叠置显示,对于检验最后提取的结构线的准确性同样具有很强的说服力。图 10、图 11 和图 12 显示了使用部分实验数据所提取的结构线与其对应的等高线进行叠置显示的效果。图 10 和图 11 是同一个图幅上的两个不同的区域 Q1 和 Q2,其中 Q1 对应的山地地形变化急剧, Q2 对应的山地地形变化平缓。在确定特征点时,先对整个图幅区域使用同一夹角阈值 155° ,则这两个区域提取的山谷线分别如图 10 和图 11 所示。从图中可以发现,在地形变化平缓的区域 Q2 生成的结构线不完整,发生了许多断裂。第二次通过分区确定特征点而对区域 Q2 使用夹角阈值 165° ,生成的山谷线如图 12 所示,从图中可以发现生成的山谷线较完整。

结合实验结果图 10 和 12 以及使用其他大量的实验数据进行实验表明,使用基于文中提出的方法所开发的应用程序不仅对任何特征的地形等高线数据均适用,而且提取的结构线还具有较好的完整性和较高的精确性,同时还具有一定的应用潜力。

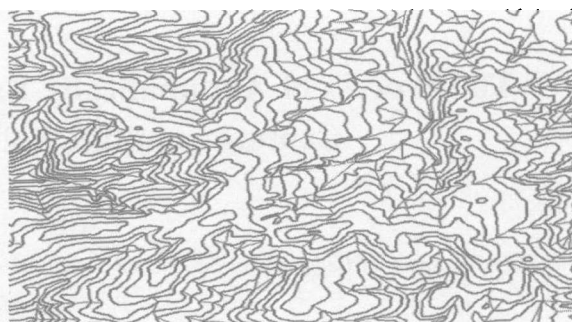


图 10 从部分实验区 Q1 中提取的山谷线

Fig.10 Valley lines extracted from experimental region Q1



图 11 使用 155° 的阈值从区域 Q2 中
提取的不连续的山谷线

Fig.11 Discontiguous valley lines extracted from region
Q2 with the threshold of 155 degrees

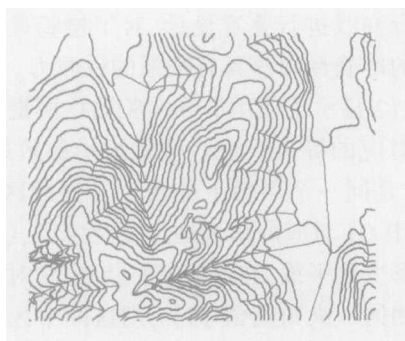


图 12 使用 165° 的阈值从区域 Q2 中
提取的连续的山谷线

Fig.12 Integrated valley lines extracted from region Q2
with the threshold of 165 degrees

6 结语

运用自行开发的应用程序提取结构线时,阈值和特征点匹配时所需权重的确定是很重要的,而这些值的确定与地形有关。为了让用户能根据不同的地貌特征来确定适合该地貌特征的阈值和权重,还必须以帮助文档或者对话框的形式给用户以提供用以确定适合各种地貌特征的阈值和权重的依据或者参考标准。这些依据或者参考标准的确定以及如何将已经提取结构线应用到地貌的综合和高质量 DEM 的生成中是下一步研究的主要方向。

参考文献

- [1] 毋河海. 地图综合基础理论与技术方法研究. 北京: 测绘出版社, 2004, 301~302.
- [2] 王耀革. 基于等高线数据的结构线追踪技术研究. 测绘工程, 2002, 11(3): 42~44.
- [3] 李志林, 朱庆. 数字高程模型. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 2000, 189~211.
- [4] 杨腾锋, 王国辉, 高北晨. 地形结构线的自动提取. 见: 王家耀, 数字制图技术与数字地图生产. 西安: 西安地图出版社, 1998, 270~271.
- [5] TRIBE A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. Journal of Hydrology, 1992, 139(3): 263~293.
- [6] 祝国瑞, 王建华, 江文萍. 数字地图分析. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1999, 27~33.
- [7] 朱庆, 赵杰, 钟正. 基于规则格网 DEM 的地形特征提取算法. 测绘学报, 2004, 33(1): 77~81.

The Process of Automatically Extracted Terrain Structure Lines from Contours and the Solutions to Several Problems

GUO Mingwu, WU Fan

(Key Laboratory of Geographical Information System, Ministry of Education, School of Resource and Environment Science,
Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Terrain structure lines are the skeleton lines of the physiognomy and they mainly include ridge lines and valley lines. Terrain structure lines do not directly exist in the original contour data, but they can be derived

from the original contour data. In a sense, they are more important than contours in Geographical Information System (GIS) because terrain structure lines can play an important role in the cartographic generalization, processing of terrain sensing digital image, construction of precise digital elevation model (DEM), hydrographic analysis, mineral deposition, land erosion and extension, the other functions of GIS etc. With the rapid development of GIS, terrain analysis has attracted more attention of the researchers in this field. And the automatic extraction of terrain structure line is a very important problem in terrain analysis. The automatic extraction of terrain structure line usually includes two steps, namely, confirming feature points and linking the feature points to create the terrain structure lines. The first step is decisive for the eventual result and the method is different when using different algorithms. But the second step is always the same. An algorithm for confirming feature points on contours is presented in this paper and the process to confirm all feature points in the whole studied region is improved; according to the difference of the local landscape feature, the feature points in each local region are confirmed using different thresholds which are only adaptive to the local region instead of confirming all the feature points in the whole region using the same threshold. This improvement is very rational because the variation of the landscape is taken into account. Then, based on the established mathematical model, the terrain structure lines are acquired by matching all the feature points confirmed in the whole studied region. In order to make the extracted terrain structure lines more useful, all the terrain structure lines are organized in the form of tree structure and the grade of each branch is available. Because of the complexity and multiplicity of the terrain, few errors are likely to exist in the automatically extracted terrain structure lines, so few manual editing is sometimes necessary to correct these errors. Many experiments proved that the presented method adapts to all the different landscapes, furthermore, the terrain structure lines extracted by this method are integrated and precise.

Key words: terrain structure line; contour; tree structure; branch grade