

一种基于形态学编码的地形骨架特征提取方法

张慧杰 刘亚鑫 马志强 何欣婷 鲍 宁
(东北师范大学计算机科学与技术学院 长春 130117)
(智能信息处理吉林省高校重点实验室(东北师范大学) 长春 130117)
(zhanghj167@nenu.edu.cn)

A Terrain Skeleton Feature Extraction Method Based on Morphological Encoding

Zhang Huijie, Liu Yaxin, Ma Zhiqiang, He Xinting, and Bao Ning
(School of Computer Science and Information Technology, Northeast Normal University, Changchun 130117)
(Key Laboratory of Intelligent Information Processing of Jilin Universities (Northeast Normal University), Changchun 130117)

Abstract Since the current profile recognition methods are not able to extract the precise skeleton and the special terrain feature, a new profile recognition method combined with morphology is proposed to solve these problems. In this method, the candidate points are extracted by the profile recognition, and then are connected into polygon stripe according to direction coefficients. Furthermore, the fulfill algorithms building the scale feature areas are put forward based on the polygon stripe by taking advantage of morphological strategy. In addition, multiple morphological codes are proposed to simplify the scale feature areas according to the concept of morphological erosion algorithm, and to obtain the scale feature lines. In order to satisfy the requirements about vector skeleton features in the various fields, the algorithms including restoration, detection and optimization are proposed to implement the transformation from the scale model to the vector model. Finally, a series of strategies about keeping the out-branches and recognizing the ring process are presented in this paper, which solve the problems about missing the long trunk lines and ring features in the result feature lines. These methods have been tested on the benchmark data and the real elevation data. As a result, the skeleton feature lines produced by our method outweigh the traditional method as a whole.

Key words feature candidate point; scale feature area; morphology; pruning; target point recognition

摘 要 鉴于剖面识别骨架特征提取方法(profile recognition and polygon breaking algorithm, PPA)准确性差、不能提取特殊地形等问题,提出了一种结合形态学的剖面识别骨架特征提取方法(profile recognition and polygon breaking algorithm based on morphology erosion, MEPPA).通过剖面识别提取原始的骨架特征候选点,根据方向系数连接成多边形条带,在此基础上提出了生成标量特征域的填充算法;引入形态学区域细化思想,提出了形态编码和骨架特征形态简化算法,将特征域简化为骨架特征线;为了满足各领域对矢量骨架特征的需求,提出了标量特征线复原、检测与优化剔除等策略,准确地复原了矢量骨架特征模型;提出了保留外分支和环路特征的解决方案,解决了传统骨架特征提取方法不能保留较长的主干线以及不能提取环路地形特征的问题.在真实数据上进行了实验研究,结果表明提取的骨架特征形态的整体效果优于传统方法.

关键词 特征候选点;标量特征域;形态学;剪枝;目标点识别

中图法分类号 TP391.40

地形模型是三维地理信息系统的重要组成部分,是空间信息可视化的地面载体,在战场环境仿真、飞行模拟训练、地质灾害预测等领域有着广泛的应用。然而,由于地表特征的复杂性,高分辨率地表细节的渲染需要海量数据集的支持,给地形模型的建模工作带来了极大的挑战。

近年来,很多学者在提取地形的骨架特征基础上展开相关的研究工作,一方面可以根据地势特征简化地形可视化模型^[1-3],达到保证模型精度的同时减小数据规模的目的;另一方面实现基于真实特征的虚拟地形建模与合成工作^[4-6],提高地形模型的可视化质量。

目前经典的地形骨架特征提取方法已经能够较好地提取连续的地形特征线。然而,这些经典算法不能兼顾特征提取的精度和特征线的全局形态。其中代表性的是 Chang 等人^[7]提出的剖面识别与多边形拆解算法(profile recognition and polygon breaking algorithm, PPA),该算法的主要原理是根据地形的局部几何特征确定目标点,在此基础上连接所有目标点形成多边形特征区域,最终通过多边形拆解和修剪小分支完成地形骨架特征提取。该算法的优势在于提取的特征线精度较好,同时保证了特征线的连续性。

然而,该算法仍存在以下 4 个问题:1)对特殊地形提取效果并不理想,比如火山口等具有环路特征的地形;2)不能根据具体要求自适应提取主干特征,使得在很多领域的应用受到限制;3)由于 PPA 在目标点集上进行全连接操作形成多边形特征区域,当目标点中包含噪音点时,将产生较多、不真实的冗余特征区域;4)多边形拆解方法复杂、效率较低,同时不允许特征线是封闭的,与实际的地形特征不符。

本文针对已有方法存在的问题,提出了一种新的基于形态学和几何剖面识别的骨架特征提取方法(profile recognition and polygon breaking algorithm based on morphology erosion, MEPPA)。引入形态学中膨胀、腐蚀的思想,在利用剖面识别方法提取骨架特征点的基础上,提出了满足形态学要求的特征域提取方法,通过对特征域的简化操作,提取了地形的骨架特征线,最后通过矢量定位及检测优化算法精确地复原了地形的骨架特征。

1 相关工作

目前主流的地形骨架特征提取方法主要分为 2

大类:地表水文分析算法和地表几何形态分析算法。前者主要模拟地表水流过程,建立水流方向矩阵和水流累积矩阵,将汇水量大于阈值的特征点连接形成汇水线,即山谷线。根据汇水线再计算出汇水区域,从而提取其边界线得到分水线,即山脊线。早期 Garbrecht 等人^[8]通过叠加梯度值模拟出水流自高向低流动的自然现象,并在地势平坦区域提出 2 种梯度方向确定排水口,解决平行流问题。文献^[9-10]对 Garbrecht 的方法进行改进,通过应用先验知识,简化了迭代算法。Barnes 等人^[10]认为确认平原的先决条件为存在排水口,因而采用一次性全局扫描代替复杂的迭代算法寻找排水口。该算法的时间复杂度 $O(N)$ 比传统方法的时间复杂度 $O(N^{2/3})$ 在效率上有很大的提高。

由于面积较大的平原地势梯度差变化不明显,会对识别低洼处内河网的排水口造成困扰。因此,预先对洼地进行填充以及对平原区域提取排水口是常规的解决方案。文献^[11]提出基于物理的数字高程模型(digital elevation model, DEM)修正模型,观测河网的拓扑性质,确定排水口方向。针对 DEM 数据中零梯度的平原区域,可采用优先搜索加权图法^[12]、可变高程增量法^[13]、径向基函数插值法^[14]等方法处理特殊地形问题。此类方法的缺点是在数据预处理阶段进行排水网洼地填充,导致 DEM 中平面区域的尺寸和数量被无条件扩大,因此对精确识别水流方向造成一定困扰。近年来,文献^[15]受到水文分析法的启发,提出一种快速生成地形框架,以河流作为模型基本元素,生成不同类型、轨迹的层次排水网,最终将层次细节结构的地形模型与河流面片互相混合,生成带有河流的地形结构。利用地表水文分析法提取地形特征线的研究还包括计算水流累积量^[16]、提取汇水区沉积物的排沙渠道^[17-19]、预测湿地融雪量^[20-21]等。

地表水文分析算法在大部分情况下能够较好地根据水流模拟自然规律提取地形骨架特征。然而,该类算法对很多特殊情况无法处理,存在 3 主要问题:1)该类算法的前提条件是要求地形在理想状态下没有洼地,对于自然状态下地形中的洼地需要进行填充处理;同时平坦处水流方向的设定比较困难,存在误差。2)该类方法所计算的汇水量与高程有关,高程值与汇水量成反比,即高程值大的汇水量小,高程值小的汇水量大。虽然这种方法符合流水自高而下的自然特性,但从全局来看高程值大、汇水量小的高程点很可能也是山谷线上的特征点,因此该方法

在特殊情况下不能准确提取特征线。3) 该类算法在提取山谷线的基础上,通过计算汇水区域的公共边界来确定山脊线,计算方法繁琐,计算量较大;同时提取的山脊线大部分为闭合曲线,与真实的山脊线相比误差明显。

另一类主要的方法是地形表面几何形态分析算法,该类算法通过比较邻近的高程值,获得局部断面极值作为候选点,在此基础上连接特征点集,从而提取地形特征线。经典的地形表面几何形态分析算法为 Peucker 等人^[22]提出的滑动窗口法,通过 2×2 窗口对 DEM 数据进行扫描,分别标记窗口中的最高点和最低点,通过连接特征点确定分水线与汇水线。O'Callaghan 等人^[23]提出 D8 (deterministic eight node) 算法,简化了水流流动方向的多元性,预先设定水流的 8 个流动方向,计算中心点与其 8 邻域之间的权值差,利用最陡坡度法将权值差最大者视为有效的水流方向。对于 D8 算法的扩展还有随机八方向算法^[24]、流向演算法^[25]、骨架化排水网算法^[26]等。文献^[27]结合曲率变化研究地貌特点,利用二阶导数极值点来判断候选点是否为山脊点或山谷点。

近年来,黄培之等人^[28-29]提出一种提取山脊线和山谷线的新方法,将 DEM 的纵横 2 个断面上的极值点作为地形特征线的候选点,通过等高线几何分析法连接满足条件的特征点。由于该算法仅通过 2 种断面来确定其高程变化的极值点,导致提取的特征线带有一定近似性,丢失了重要地形特征。为了改良这一缺陷,文献^[29]提出基于地形梯度方向的山脊线和山谷线方法,在 DEM 数据上增加一组对角线方向上的断面。在我们的前期工作中提出了一种直接在矢量模型上进行骨架特征提取的方法^[30],该方法的优势在于利用简化方法筛选其候选特征点,进而连接最优特征点子集。相对 PPA,该方法在提取效率和消除噪音点方面取得了较好的进展。

此外,文献^[4]提出了基于 DEM 数据的地形合成方法,结合用户草图和真实高程场,通过匹配二者之间的地形特征,交互式地合成了具有真实特征的虚拟地形。文献^[5-6]生成了基于用户示意图的可控地形,利用扩散方程生成可设置曲线参数的地形,用户可以直观地利用矢量特征的方向来控制地形。文献^[31]利用文献^[4-5]中基于补丁块与用户草图合成地形的思想,提出基于 GPU 的地形合成方法,提高程序运行效率的同时增加了地表细节信息。

2 候选特征点识别与特征多边形连接

剖面识别方法广泛应用在几何特征识别领域,本文采用了与 PPA 相似的剖面识别方法提取地形的局部几何特征,即选取在局部区域内非高程最低点为候选特征点^[7]。该约束条件较为宽松,目标在于提取较为全面的特征域,避免由于特征点遗漏造成主干特征线不连续的现象。

2.1 剖面识别

为了更好地覆盖特征域,我们在 8 个方向上形成 4 个断面进行极值判断。其优势在于避免了全方位判断导致计算量较大的问题,同时减少了冗余噪音点的产生。

对于每个剖面 $p_n, n=1,2,3,4$,以当前高程点 $v(i,j)$ 作为中心,从 p_n 上 $v(i,j)$ 的 2 侧选取邻近点,构成集合 V_1 和 V_2 ,如果同时存在 $v_1 \in V_1$ 和 $v_2 \in V_2$ 高程值低于 $v(i,j)$ 的高程值,那么我们认为 $v(i,j)$ 是骨架特征候选点,其中 i,j 表示高程点的空间位置。如图 1 所示, l_p 是剖面 p_n 的长度,当前点 $v(i,j)$ 在 4 个剖面中的任意一个剖面 p_2 上存在 2 侧高程值 $h(i-1,j) < h(i,j)$ 和 $h(i+1,j) < h(i,j)$, $v(i,j)$ 是骨架特征候选点。

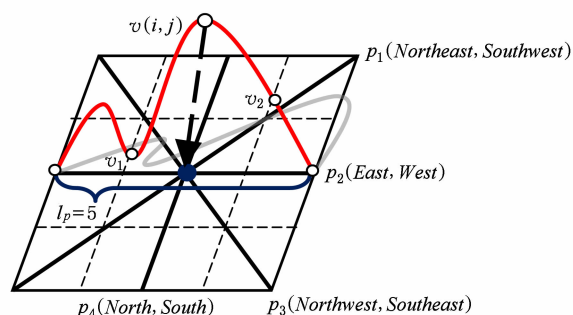


Fig. 1 Profile recognition diagram.

图 1 剖面识别示意图

当 l_p 较大时,在 8 个方向的 4 个剖面上计算骨架特征候选点,会造成候选点遗漏的情况。如图 1 所示, $l_p=5$ 时,在覆盖区域里存在 8 个点没有参与骨架特征点的评价,可能出现误判当前点为非骨架特征候选点的情况。鉴于此,进一步引入地形起伏度的概念,提高判断骨架特征候选点的准确度。利用当前点与邻域内点集的高程差可以粗略判定该区域地形的起伏程度。起伏度的计算方法如式(1)所示:

$$R(N_v) = \sum_{v_i \in N_v} |h_{v_i} - h_v|, \quad (1)$$

其中, v 是当前高程点, N_v 是 v 的邻域点集合, v_i 是 N_v 中任意高程点, h_{v_i} 和 h_v 分别是 v 和 v_i 的高程值。

在计算起伏度的同时,对邻域内高程值低于和高于当前点的高程点的个数进行统计,分别记作 n_l 和 n_h . 对于标记为非骨架特征点的高程点做如下处理:当 $R(N_v)$ 超过阈值,表明地势的起伏特征较明显. 这种情况下,如果 $n_l=0$,表明该点地势最低,则忽略该点;如果 $n_l < n_h$,表明当前点处于局部地形中地势较高的区域,则重新标记该点为骨架特征候选点.

该方法克服了 PPA 在 8 个方向邻域剖面识别过程中可能造成遗漏目标点的问题;同时通过统计当前点与邻域高程点的高程关系,更有效地提高了候选点计算的准确性.

2.2 特征多边形连接

我们采用了与 PPA 相似的目标点连接方法,在骨架特征候选点集合上进行最近邻全连接操作,形成多边形条带. 然而,与 PPA 相比,我们的方法在剖面识别过程中扩大了有效邻域范围,同时严格限制了候选点的评价标准,从而在整体上提高了候选点的可信度. 因此,通过该候选点集合的全连接操作形成的多边形特征条带更准确. 对于每个当前点,我们只需设定 4 个方向系数 d_1, d_2, d_3, d_4 (分别代表右、右下、下、左下),其他 4 个方向由当前点的左上角点处理. 判定当前点在 4 个方向上是否存在邻接的骨架特征候选点,如果存在则连接该邻接点,形成特征多边形. 然而多个骨架特征候选点共用同一个邻接点时将产生非简单多边形的交叉现象,形式化定义如下:

定义 1. 设 $v_{i,j}$ 和 $v_{i,j+1}$ 是相邻的 2 个骨架特征候选点,如果 $v_{i-1,j}$ 是骨架特征候选点,那么 $v_{i-1,j}$ 将成为 $v_{i,j}$ 的 d_3 方向上与 $v_{i,j+1}$ 的 d_4 方向上的共用候选点,则称 $e(v_{i,j}^3)$ 和 $e(v_{i,j+1}^4)$ 是交叉的,其中 $e(v_{i,j}^3)$ 和 $e(v_{i,j+1}^4)$ 分别表示 $v_{i,j}$ 和 $v_{i,j+1}$ 在 d_3 和 d_4 方向上的边, i, j 为顶点位置.

如果特征多边形区域内存在定义 1 所述的交叉线段,则保留线段高程值较大的、剔除高程值较小的. 线段高程值由 2 个端点的高程值的平均值表示. 如图 2 描述了局部地形骨架特征候选点连接后的效果图. 详细步骤如算法 1 所示:

算法 1. 特征多边形连接算法.
输入:骨架特征候选点集合 S_v ;
输出:特征多边形条带顶点集合 Seg_v .
Step1. 初始化:清空 Seg_v ;
Step2. 如果 S_v 中存在未标记的骨架特征候选点,则转 Step6,否则执行 Step3;
Step3. 从 S_v 取出当前骨架特征候选点 $v_{i,j}$;

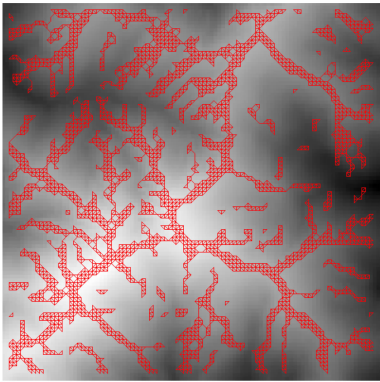


Fig. 2 Polygon strips of skeleton feature.

图 2 骨架特征多边形条带

Step4. 如果 $v_{i,j}$ 没有线段标记(未处理过),则作如下处理:

Step4. 1. 设方向系数 d_1, d_2, d_3, d_4 分别代表 $v_{i,j}$ 的邻接点方向:右、右下、下、左下,分布在 4 个剖面上;

Step4. 2. 如果 $v_{i,j}$ 在 d_1, d_2, d_3, d_4 所代表的方向上存在骨架特征候选点,则设置对应方向系数为 1,否则为 0;

Step4. 3. 取候选点 $v_{i,j+1}$,根据定义 1 判定 $e(v_{i,j}^3)$ 和 $e(v_{i,j+1}^4)$ 是否交叉,如果交叉则选择 $e(v_{i,j}^3)$ 和 $e(v_{i,j+1}^4)$ 中高程较大者,去掉高程较小的边,同时修改对应方向系数为 0;

Step4. 4. 将带有方向系数的 $v_{i,j}$ 加入 Seg_v ;

Step5. 返回 Step2;

Step6. 算法结束.

3 形态学特征选择算法

3.1 特征域填充

PPA 通过拆解特征多边形条带实现山脊线的特征提取,其结束条件是不存在环路,因此实际的环路特征也被 PPA 拆解成未闭合特征线. 由于全连接操作形成了很多冗余三角形,基于矢量的拆解算法比较复杂,个别特征线需要深度递归,因此我们引入了基于标量的特征提取思想解决骨架特征提取问题. 由于特征多边形所在区域基本覆盖了全部骨架特征,我们将填充特征多边形所在区域,形成标量的骨架特征域.

由于特征多边形区域的边缘存在锯齿状三角形等特殊形态,干扰后续算法的实现,我们将对 2 类特殊形态按照指定规则进行多边形填充处理. 目标是平滑特征域边缘,满足凸包特性,便于引入膨胀、腐蚀算法实现标量骨架特征提取.

定义 2. 设 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 是首尾相连的邻接三角形, 且位于特征多边形的边缘, 如果其斜边平行, 则称该三角形组 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 构成的区域是锯齿形态.

定义 3. 设 t_1, t_2 是位于特征多边形边缘的 2 个相邻三角形, 如果 t_1, t_2 相邻, 共享斜边的 1 个端点且 2 个斜边呈 90° 角, 则称 t_1, t_2 构成的区域是桥状形态.

由于锯齿形态和桥状形态在标量特征域细化阶段容易被错误理解为带分叉的区域, 从而在最终的骨架特征线上形成错误的分支. 如图 3 所示, 图 3(a)(c) 是 2 种特殊形态的示意图. 对于锯齿形态, 我们将补充锯齿间空白区域形成更规则的联通域, 如图 3(b) 所示; 对于桥状形态, 我们将取空白区域的一半作为填充区域即可解决上述问题, 如图 3(d) 所示.

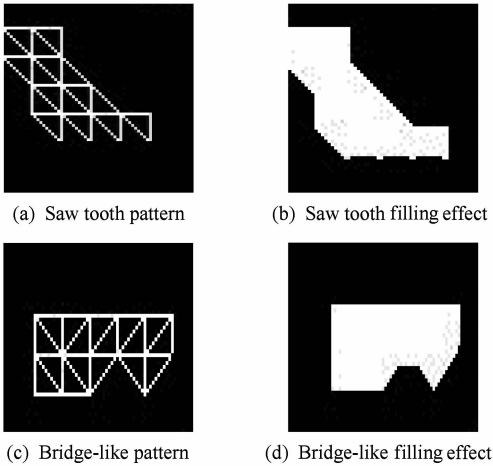


Fig. 3 Diagram of special patterns.
图 3 特殊形态示意图

除了特殊形态, 特征多边形内所有的小三角形均进行基于像素的填充处理, 最终形成二值图像, 如图 4 所示. 其原则是将单位长度的目标线段转换成



Fig. 4 Feature area filling effect.
图 4 特征域填充效果

N_p 个二值像素点, 在我们的实验中 N_p 取值为 10 时效果较好.

3.2 特征域细化

为了避免 PPA 多边形拆解算法的复杂性以及由于算法规则本身的限制导致不能识别环路等特殊地形的问 题, 我们引入形态学思想, 从整体上进行多边形条带的细化, 达到识别骨架特征的目的. 通过上述特征多边形的标量化处理, 我们已经识别了满足形态学要求的骨架特征域, 在此基础上采用形态学的方法腐蚀该特征域, 直到满足线段宽度为 1 且空间连续的终止条件, 从而在标量上实现了骨架特征线的提取, 最后再复原到我们的矢量模型上. 因此, 我们的方法避免了复杂的递归拆解运算, 同时既兼顾了地形的几何特征, 又考虑了地形的形态特征, 并且能够识别特殊地形.

主要原理是对于当前像素点, 取其 8 个方向上的邻接像素值, 判断形态关系, 确定该像素是否保留, 反复执行该过程直到满足细化要求. 由于我们的标量特征域已经被二值化, 每个像素的取值为 0 或者 1, 因此我们利用当前点和 8 邻域点构成了 9 个二进制位. 将 9 个二进制位空间位置固定, 其分布如图 5 所示, 根据不同的取值, 我们最多可以表示 512 种不同的空间形态, 其编码为 0~511. 每种形态的编码则以模版形式通过求和得到:

$$TCode(p) = \sum_{j=0}^2 \sum_{i=0}^2 2^{j \times 3 + i} \times p_{i,j}, \tag{2}$$

其中, p 是当前像素点, $p_{i,j}$ 是当前像素的邻域点.

1	8	64
2	16	128
4	32	256

Fig. 5 Distribution of binary spatial position in column-major order.
图 5 二进制位空间位置列主序分布

我们将空间形态划分为 8 类, 如图 6~13 所示. 每类形态中包含多种编码形态, 可以有效去除指定形态的多余像素. 以图 6(a) 编码形式为例, 利用式 (2), 结合图 5 的空间分布, 我们可以计算得到其编码 $TCode(p) = 89$. 图 6(a) 中空点对应的是值为 1 的像素点, 则编码 $TCode(p) = 1 + 8 + 16 + 64$. 如果当前点满足了该编码所表示的形态, 则去掉中心点,

设置值为 0. 从形态上看, 图 6(b)~(d) 同样表现了中心点是当前特征域的下边缘的形态, 计算方法同图 6(a). 因此, 图 6 所表示编码形态的作用是去除

下方多余像素; 同理, 图 7~13 分别是去除上方、左方、右方、左下方、右下方、左上方、右上方多余的像素.

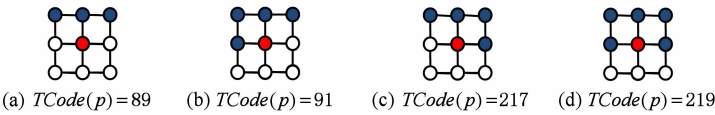


Fig. 6 Remove the bottom pixels.

图 6 去除下方像素

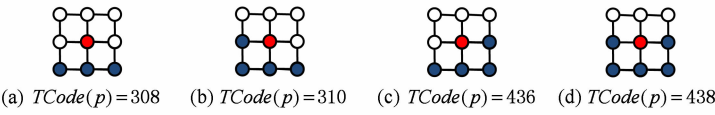


Fig. 7 Remove the top pixels.

图 7 去除上方像素

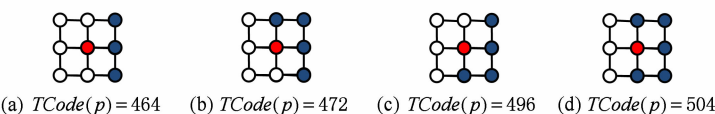


Fig. 8 Remove the left pixels.

图 8 去除左方像素

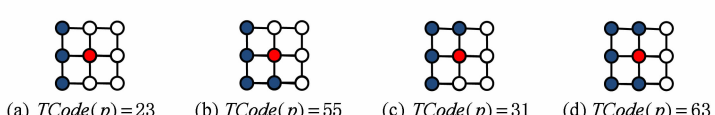


Fig. 9 Remove the right pixels.

图 9 去除右方像素

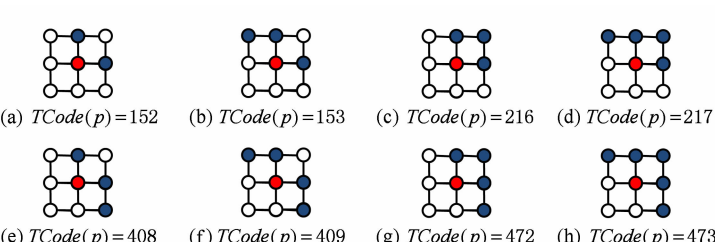


Fig. 10 Remove the bottom left pixels.

图 10 去除左下方像素

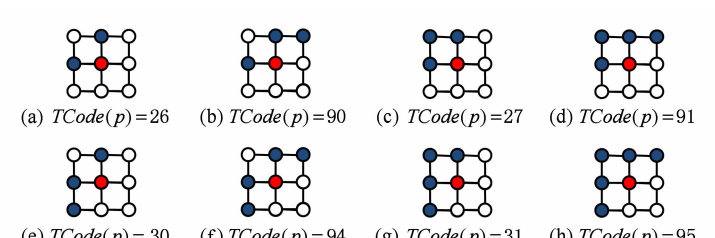


Fig. 11 Remove the bottom right pixels.

图 11 去除右下方像素

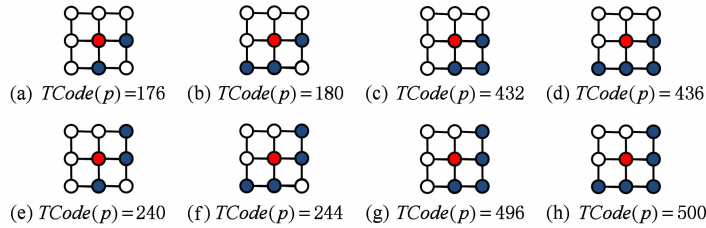


Fig. 12 Remove the top left pixels.
图 12 去除左上方像素

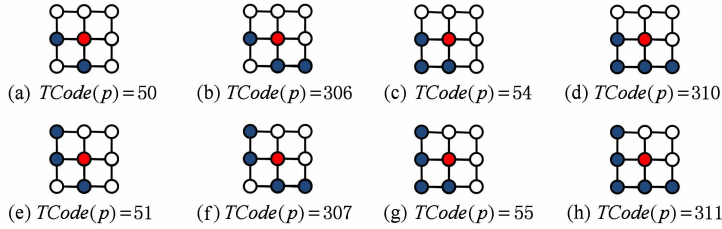


Fig. 13 Remove the top right pixels.
图 13 去除右上方像素

根据以上 8 类形态编码,将与该形态匹配的像素设置为 0,即从标量特征域中剔除.循环遍历标量特征域中所有特征值为 1 的像素,直到没有可去掉的像素为止.具体过程如算法 2 所示:

算法 2. 特征域细化算法.

输入:标量特征域 $ScaleArea$;

输出:细化后的标量特征线 $ScaleLines$.

Step1. 初始化:形态编码数组 M_b ,包含 512 个元素,其中图 6~13 表现的编码形态对应的 M_b 元素值为 1,其他为 0;

Step2. 复制 $ScaleArea$ 为 $ScaleLines$;

Step3. 遍历 $ScaleArea$ 中每个特征像素 $ScaleArea[i,j]$, i,j 是空间位置索引;

Step4. 计算当前特征像素 $ScaleArea[i,j]$ 的形态编码 $TCode(ScaleArea[i,j])$:

Step4. 1. 计算式(2);

Step4. 2. $TCode(ScaleArea[i,j]) = ScaleArea[i-1,j-1] + 8 \times ScaleArea[i-1,j] + 64 \times ScaleArea[i-1,j+1] + 2 \times ScaleArea[i,j-1] + 16 \times ScaleArea[i,j] + 128 \times ScaleArea[i,j+1] + 4 \times ScaleArea[i+1,j-1] + 32 \times ScaleArea[i+1,j] + 256 \times ScaleArea[i+1,j+1]$;

Step5. 如果 $M_b[TCode(ScaleArea[i,j])]$ 为 1,表明该形态匹配了应去除像素形态要求,则设置标量特征线 $ScaleLines[i,j]$ 对应像素为 0,即剔除该像素;

Step6. 如果 $ScaleArea$ 与 $ScaleLines$ 不同,表

明可以进一步剔除特征域像素点,转 Step2,否则转 Step7;

Step7. 算法结束.

根据算法 2,我们可以将标量特征域简化为标量特征线,如图 14 所示.不难看出,除了有细小的干扰线之外较好地保留了主干线并且空间连续,与实际山脊的骨架特征相符.因此,我们只需在此基础上复原矢量化模型同时去除细小分支,这样既避免了大量多边形拆解工作,又保持了地形原有的形态特征.

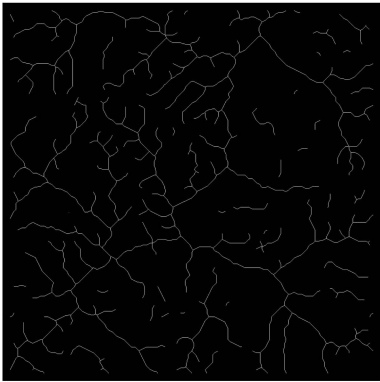


Fig. 14 Feature area simplification.
图 14 特征域细化

4 矢量化特征模型

4.1 矢量坐标定位及矢量线段生成

通过特征域细化,可以在标量特征线中清晰地看到山脊线.在此基础上,我们需要将标量的特征线

复原到矢量模型中,从而为矢量合成、地形形变、地质灾害预测等科学研究提供矢量骨架特征. 对于每个标量特征线上的像素点 $ScaleLines[i,j]$,由于形成标量特征域时,每个矢量高程点放大为 N_p 倍个像素,因此复原矢量坐标时,需要缩小为标量坐标的 $1/N_p$,即 $i'=i/N_p, j'=j/N_p$,将 $ScaleLines[i,j]$ 映射为矢量特征模型的矢量点 $VectorRidge(i',j')$. 然而, (i',j') 与矢量模型的规则网格的高程坐标不一定重合,因此我们将进一步进行坐标配准与定位. 设 d_{π} 表示在二维平面上 (i',j') 与网格高程点坐标 (r,c) 的距离,其中 $r=\lfloor i' \rfloor \pm 1, c=\lfloor j' \rfloor \pm 1$,选取使得 d_{π} 最小的 (r,c) 作为矢量高程点坐标,更新 $VectorRidge(i',j')$ 为 $VectorRidge(r,c)$,作为矢量模型的骨架特征点. 图 15 表示了矢量坐标定位后确定的矢量特征点的效果图.

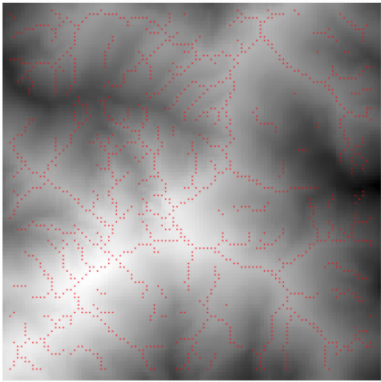


Fig. 15 Skeleton feature points.
图 15 骨架特征点

在骨架特征点集合的基础上,利用与算法 2 相似的方式连接最邻近的骨架特征点,形成矢量骨架特征线段 $VectorLines$. 从图 16 可以看出,已经完整地提取了矢量骨架特征线;然而,在局部地区仍然能

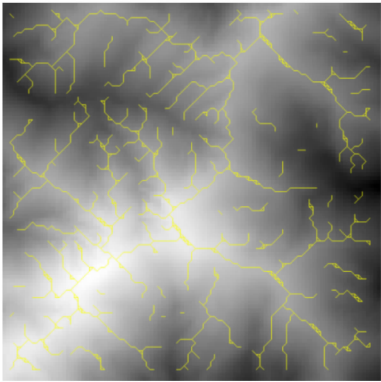


Fig. 16 Skeleton feature lines.
图 16 骨架特征线

够发现少量的三角形链,主要原因在于局部骨架特征点过密,直接连接后形成了单位大小的链状三角形条带,因此需要进一步的优化处理.

4.2 矢量检测优化

对于 4.1 节所述的冗余小三角形,最简单的解决方案是拆除三角形任意边或者高程值最低的边,从而满足骨架特征线的提取要求. 然而当存在 2 个三角形共享同一条公共边的情况,如图 17 所示,如果拆除了该公共边,则形成更大的多边形链,因此我们在对三角形进行拆除处理时保留这样的公共边,图 17 中的虚线表示公共边.

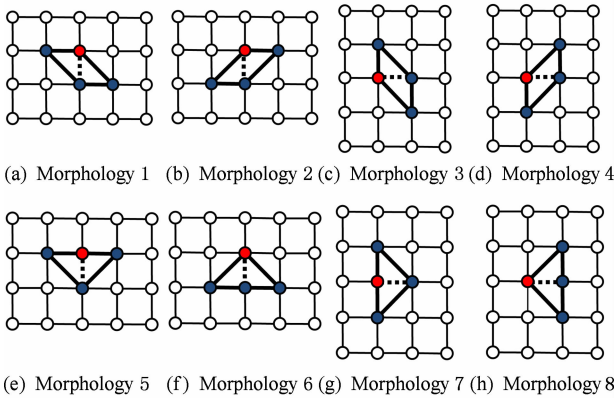


Fig. 17 Remove the common edge of triangles.
图 17 拆除三角形公共边示意图

我们对矢量骨架特征线段集合进行遍历,找出所有三角形链中的三角形,并统计每条边被使用的次数. 如果超过 1 次,则认为存在如图 17 所示的公共边的情况,保留该边不进行拆除;否则去除高程值较低的边,达到拆除三角形链的目的. 详细步骤如算法 3 所示:

算法 3. 拆除三角形链算法.

- 输入: 矢量骨架特征线 $VectorLines$;
- 输出: 优化后的矢量骨架特征线 $VectorLines$.
- Step1. 初始化 $VectorLines$ 中所有特征线标记为 -1, 表明线段未被处理;
- Step2. 如果不存在标记为 -1 的线段, 则转 Step4, 否则执行 Step3;
- Step3. 取当前线段 $fl \in VectorLines$;
- Step3. 1. 从任意端点出发, 遍历和它相连的顶点;
- Step3. 2. 如果存在三角形回路并且标记 $Sig(fl)$ 等于 -1, 则修改标记 $Sig(fl)$ 为 1;
- Step3. 3. 如果不存在三角形回路并且标记 $Sig(fl)$ 等于 -1, 则修改标记为 $Sig(fl)$ 为 0;

Step3.4. 如果存在三角形回路并且标记 $Sig(fl)$ 不等于 -1 , 则修改标记为 $Sig(fl) = Sig(fl) + 1$;

Step3.5. 转 Step2;

Step4. 对所有 $Sig(fl)$ 为 1 的线段, 按高程值由低到高的顺序进行排序(线段的高程值为 2 个端点高程的均值);

Step5. 设 s 是当前标记为 1 的线段, 找出与它构成三角形的其他 2 条边, 比较高程值大小:

Step5.1. 如果 s 的高程值最小, 则从 *VectorLines* 中移除 s , 修改 s 和其他 2 条线段的标记为 0;

Step5.2. 如果存在标记为 1 的线段, 则更新标记为 1 的线段作为当前线段 s , 转 Step5, 否则执行 Step6;

Step6. 算法结束.

根据算法 3, 原始矢量骨架特征线段中的三角形链已经被全部剔除, 图 18 描述了优化后的矢量骨架特征线. 不难看出, 该矢量特征线已经涵盖了较长的山脊主干线, 这是在提取地形骨架特征方面较好的特性. 然而, 图 8 中仍存在细小分支, 将成为骨架特征线的噪音, 因此应剔除步长小于指定阈值的特征线.

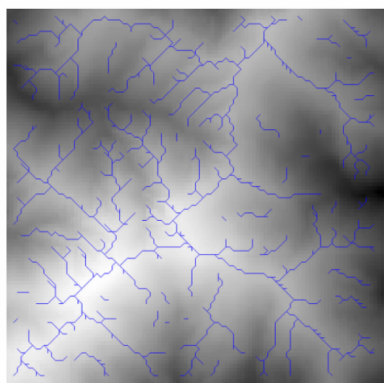


Fig. 18 Optimization of vector skeleton feature line.

图 18 矢量骨架特征线优化

4.3 剪枝与环路处理

结合算法 2 和算法 3, 不难发现我们的骨架特征线 *VectorLines* 的结构是带有方向系数的特征点的集合. 因此, 对于细小分支很容易解决, 我们的方案是遍历 *VectorLines* 中的特征点, 对于每个特征点到末端节点的线段的长度小于指定阈值的线段, 从 *VectorLines* 中移除, 当前特征点成为新的末端节点.

传统的 PPA 的剪枝处理与我们的细小分支剔除方法相似, 将指定步长的分支去掉, 那么主干线也会随着削减. 鉴于此, 我们提出了外分支的概念, 在剪枝过程中保留主干线上的外分支, 因此主干线不

受剪枝的影响. 即使多次剪枝, 我们称循环剪枝, 仍然能够保留较长的骨架特征主干线, 能够满足可定制山脊线提取的个性化需求.

定义 4. 设 v 是当前的骨架特征点, d_n 是 v 的方向系数的个数, 如果 $d_n > 2$, 则 v 是分支点, 否则 v 是路径节点.

定义 5. 设 v 是分支点, 如果 v 有且只有一个与它相连的分支点, 则 v 是外分支点.

定义 6. 设 v 是外分支点, b 是与 v 相连的分支中最长的分支, 则 b 是外分支.

根据定义 4~6, 可以判定主干线末端一定存在一条外分支, 主要思路是遍历骨架特征线集合 *VectorLines* 中的每个节点, 对于符合定义 5 的外分支节点进行标记, 最后计算每个外分支节点相连的最长的分支, 即外分支. 我们采用预存储策略, 保留被标记的外分支, 剪枝处理后复原外分支, 因此主干线长度可根据需求自适应调整, 可以不受循环剪枝的影响. 图 19 中深黑色分支是被识别的主干线上的外分支.

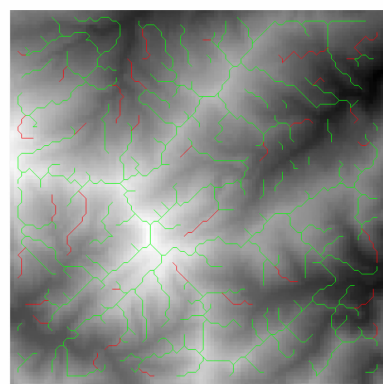


Fig. 19 Out-branch diagram.

图 19 外分支示意图

除此以外, 传统 PPA 不能识别环路的山脊线, 而这种地形山脊特征实际上在自然界中广泛存在. PPA 不能识别环路山脊线的主要原因在于多边形拆解的结束条件是没有环路为止. 我们的基于形态学拆解方法不存在这方面的问题, 但是为了更接近地形的真实情况, 我们拆除不稳定的环路, 保留稳定的环路.

定义 7. 设 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 是骨架特征线集合 *VectorLines* 中线段的端点, 并且 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 根据方向系数首尾相接形成环路, *Ring* 是由 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 构成的集合, 则称 *Ring* 是不稳定的环, 如果满足以下 2 条约束条件之一:

- 1) 环路填充区域小于阈值;
- 2) 环路的特征线 2 侧不存在原始骨架特征候选点.

根据定义 7, 约束条件 1) 的原则是如果环路内区域足够小, 表明不是自然世界中的山脊特征而是识别过程中的不精确结果造成的; 约束条件 2) 表明该环路存在单边特征线, 我们称单边回路, 这种情况通常由于剖面识别的噪音点引起, 因此都认为是不稳定的环路, 应该被拆除. 对于满足约束条件 1) 的环路, 拆除高程值最低的特征线段; 对于满足约束条件 2) 的环路, 直接拆除产生单边回路的线段本身.

5 实验结果与分析

为了验证算法的有效性, 我们对多个基准数据 (benchmark) 进行了实验对比和分析. 实验的硬件平台为 AMD Athlon II X4 651 3.00 GHz CPU、内存 DDR3 1600 MHz 4 GB、显卡 Nvidia GeForce GTX 560(1GB) 的微型计算机; 采用 VS2008 作为语言开发工具. 为了不失一般性, 我们分别采用了经典算法 PPA 的实验数据 ex100, ex200 以及 GTOPO30, 在性能和效果上对 PPA 与我们的方法 MEPPA 进行了实验对比和分析.

5.1 骨架特征线形态对比分析

为了更好地评价骨架特征线的形态, 我们采用了相邻线段夹角来度量形态的评价方法. 为了客观对比 PPA 与 MEPPA 提取的骨架特征线的平滑程度, 我们对骨架特征结果中所有独立线段统计大角个数 B_n 、直角个数 R_n 和独立线段偏转率. 大角即为相邻线段按骨架特征走势方向的夹角超过 135° 的情况, 显然大角和直角个数表示独立线段经历大幅度方向变化的次数, 其中独立线段是在 2 个分支点或者末端节点之间的单分支, 包含 1 条以上线段的路径. 独立线段偏转率 D_{rate} 反映独立线段每次变换方向时新方向的偏转角度变化情况, 假设 v 是骨架特征结果中的当前点, 如式 (3) 所示:

$$D_{rate} = \sum_{i=2}^n \phi(s_{i-1}, s_i) / 360, \tag{3}$$

其中, s_{i-1}, s_i 是独立线段中相邻的 2 个单位长度线段; ϕ 是 s_{i-1}, s_i 所在方向的向量夹角.

虽然通过每个独立线段的大角个数及直角个数可以评价该独立线段的平滑程度, 但是没有考虑到独立线段的整体变化情况. 为此我们还需要根据式 (3), 对比独立线段偏转率, 其描述了由独立线段一

端到达另一端经过的线段的弯曲程度, 数值越大代表线段的整体弯曲程度越大、越崎岖, 因此独立线段偏转率是对独立线段整体偏转程度的描述.

以图 20 为例, 图 20 (a) (b) 分别为 PPA 和 MEPPA 在相同条件下的实验对比, 采用的数据均为数据源 ex100B0 中的一块独立山脉. 不难发现, 图 20 中的 $[c_1, c_2], [m, b], [m, a]$ 均为独立线段, 可以看出由 PPA 提取的山脊方向变化极大, 以 $[c_1, c_2]$ 为例, 方向变化次数为 9 次, 其中 $B_n = 2$. 然而, 由 MEPPA 提取出的独立线段 $[c_1, c_2]$, 方向变化次数为 5 次, 其中最大方向变化角度为 $90^\circ, B_n = 0$. 另一方面, PPA 的独立线段偏转率为 1.75; MEPPA 的独立线段偏转率为 0.75. 显然, 从数值指标上看, MEPPA 在形态的平滑程度上优于 PPA; 从骨架特征线的效果图上看, 也可以观察出同样的结论.

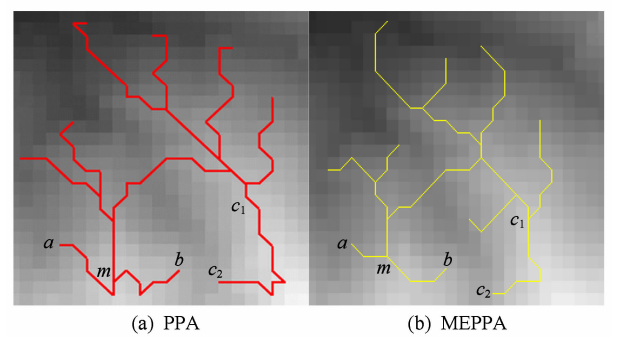


Fig. 20 Morphology comparison of local skeleton features.

图 20 局部骨架特征形态对比

以上分析了地形骨架特征的局部形态, 为了更好地描述全局的形态特征, 我们对图 20 中所有独立线段进行了统计分析. 针对 ex100B0 地形块, 表 1 分别统计了 PPA 与 MEPPA 的大角个数 B_n 、直角个数 R_n ; 同时, 给出提升率 In_{rate} 作为评价标准, 令 $In_{rate} = (f(PPA) - f(MEPPA)) / f(PPA)$, 其中 f 是 B_n, R_n, D_{rate} 中的取值. 不难发现, 提升率反映了 MEPPA 相对于 PPA 在平滑程度上的变化, 从实验结果看, 直角个数提升率达到 70%.

Table 1 Comparison of Smoothness for PPA and MEPPA
表 1 PPA 与 MEPPA 平滑程度对比

Method	B_n	R_n	D_{rate}
PPA	5	10	9.625
MEPPA	0	3	5.000
$In_{rate} / \%$	100	70	48.05

从图 20 和表 1 可以看出, 在骨架特征线的平滑

程度上,MEPPA 优于 PPA. 主要原因在于 PPA 在 多边形拆解过程中,仅从高程值的角度考虑了最优 解,即连接所有目标点后优先拆除每个环路中高程值 最低的线段,没有考虑到特征线的整体走势,所以造 成了特征线中存在很多不合理的局部弯曲. 而 MEPPA 则从骨架特征整体形态上进行考虑,并通 过形态填充等方式进一步提升了特征线的平滑程度 和连续性. 为了不失一般性,我们分别在 ex100B3, ex100B1,ex200B2B0 这 3 块数据上进行了同样的分 析和验证,如表 2 所示:

Table 2 Comparison of Other Data of Smoothness

表 2 平滑程度其他数据对比

Method	ex100B3			ex100B1			ex200B2B0		
	B_n	R_n	D_{rate}	B_n	R_n	D_{rate}	B_n	R_n	D_{rate}
PPA	0	11	5.500	6	19	19.125	6	23	23.000
MEPPA	0	1	3.375	0	12	13.625	0	19	20.625
$In_{rate}/\%$	∞	90.91	38.64	100	36.84	28.03	100	17.39	10.33

图 21~23 是特征线效果图对比. 从整体形态来 看,MEPPA 的骨架特征线平滑程度更好.

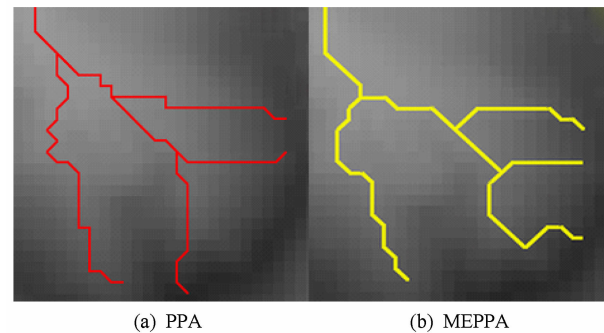


Fig. 21 Comparison of feature line(ex100B3).
图 21 特征线效果图对比(ex100B3)

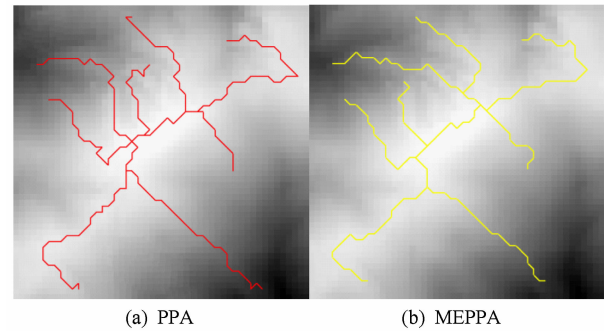


Fig. 22 Comparison of feature lines(ex100B1).
图 22 特征线效果图对比(ex100B1)

从图 20~23 及表 1~2 均可以看出,MEPPA 所提取的山脊线平滑程度要优于 PPA. 同时,我们

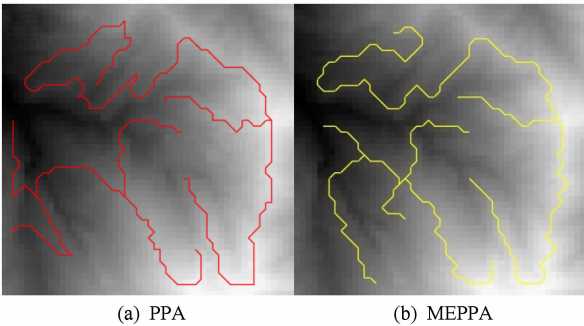


Fig. 23 Comparison of feature lines(ex200B2B0).
图 23 特征线效果图对比(ex200B2B0)

注意到在数据 ex100B0,ex100B3 中 MEPPA 相对 于 PPA 的提升率要高于数据 ex100B1,ex200B2B0 的实验结果,主要原因在于 ex100B0,ex100B3 的数 据范围小于 ex100B1,ex200B2B0. 结果表明 MEPPA 和 PPA 在山脉的整体走势上趋于一致,而在局域 细节上 MEPPA 提取的效果优于 PPA,也验证了 MEPPA 的有效性.

5.2 骨架特征线提取效果

为了更好地验证本文提出的算法,我们选取了 GTOPO30 的局部数据块提取了骨架特征线,标记为 $G_1\sim G_6$,每块的数据规模是 50×50 ,其经纬度分别是 G_1 ($127.328077^{\circ}\text{N},111.869963^{\circ}\text{E}$), G_2 ($149.210531^{\circ}\text{N},129.369253^{\circ}\text{E}$), G_3 ($88.128044^{\circ}\text{N},112.494934^{\circ}\text{E}$), G_4 ($143.752417^{\circ}\text{N},74.994434^{\circ}\text{E}$), G_5 ($137.502670^{\circ}\text{N},69.994637^{\circ}\text{E}$), G_6 ($60.004166^{\circ}\text{N},39.995834^{\circ}\text{E}$). 其 骨架特征结果如图 24~29 所示. 图 24(a)~29(a)为 原始 DEM 灰度图,图 24(b)~29(b)是经过 MEPPA 特征提取后的效果图,图 24(c)~29(c)中深黑色线 段为 MEPPA 提取的最长骨架特征主干线. 不难看出,在数据规模是 50×50 的原始高程图中,可以提取 最长主干线步长为 118,表明我们的方法在剪枝过程 中有效地保留了主干特征,结合以上分析,MEPPA 从形态和提取精度上都表现了良好的特性.

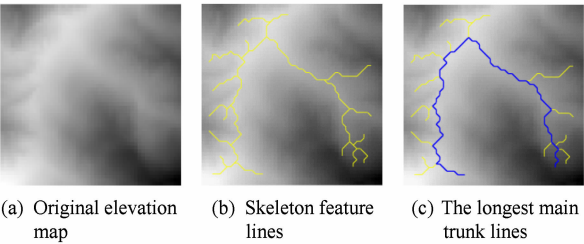


Fig. 24 Skeleton feature lines and the longest main trunk lines(G_1 , step length is 87).
图 24 骨架特征线及最长主干线效果图(G_1 ,步长为 87)

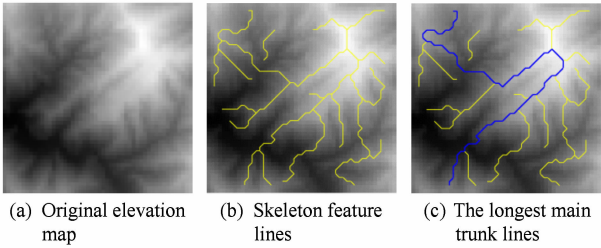


Fig. 25 Skeleton feature lines and the longest main trunk lines(G_2 , step length is 94).
图 25 骨架特征线及最长主干线效果图(G_2 , 步长为 94)

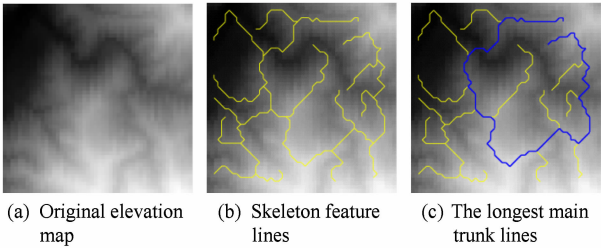


Fig. 26 Skeleton feature lines and the longest main trunk lines(G_3 , step length is 118).
图 26 骨架特征线及最长主干线效果图(G_3 , 步长为 118)

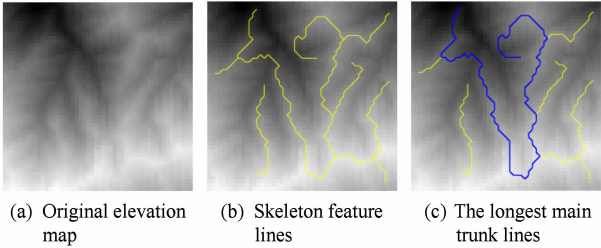


Fig. 27 Skeleton feature lines and the longest main trunk lines(G_4 , step length is 118).
图 27 骨架特征线及最长主干线效果图(G_4 , 步长为 118)

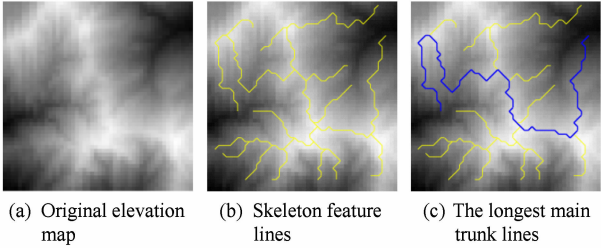


Fig. 28 Skeleton feature lines and the longest main trunk lines(G_5 , step length is 106).
图 28 骨架特征线及最长主干线效果图(G_5 , 步长为 106)

5.3 实验结果对比分析

我们利用美国亚基马地区的真实地形数据进一步验证本文方法的准确性,如图 30 所示. 不难发现,

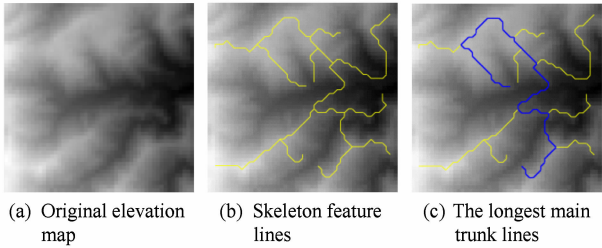


Fig. 29 Skeleton feature lines and the longest main trunk lines(G_6 , step length is 83).
图 29 骨架特征线及最长主干线效果图(G_6 , 步长为 83)

从地形的三维效果,明显可以看出 MEPPA 提取的山脊线与真实地形完全匹配,并且山脊线连续,几乎不包含噪声干扰的细小分支,同时保留了较长的主干线.

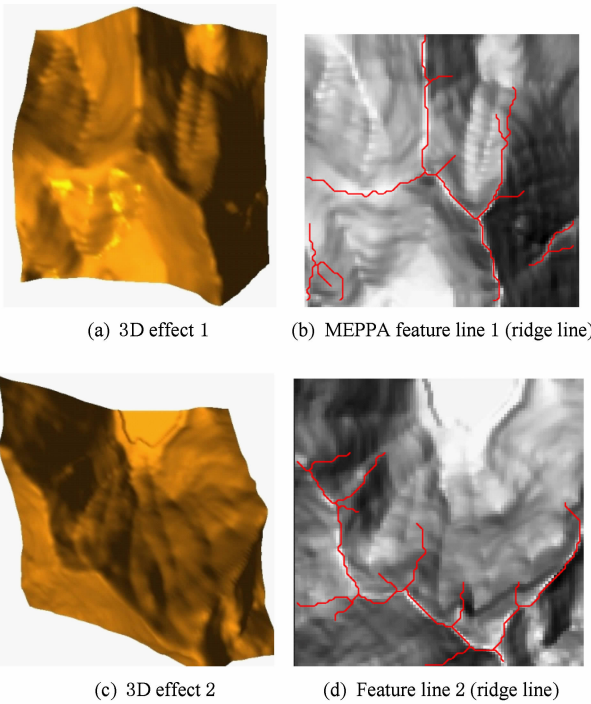


Fig. 30 Comparison between feature lines and real 3D terrain(Portion of Yakima).
图 30 真实地形三维效果与特征线对比(亚基马部分地区)

目前,主流的商业软件 ArcGIS 也通常用于解决地形特征提取问题,我们利用美国亚基马局部地区的真实地形数据,对我们的 MEPPA 与利用 ArcGIS9.3 软件结合平面曲率和坡形组合方法进行了实验对比,如图 31~33 所示,描述了 3 组不同数据的 2 种方法的效果图对比情况,其中 c_{plane} 表示平面曲率.

不难看出,ArcGIS 提取的山脊线没有顾虑到山体的整体形态,因此特征线不连续,尤其在平面曲率

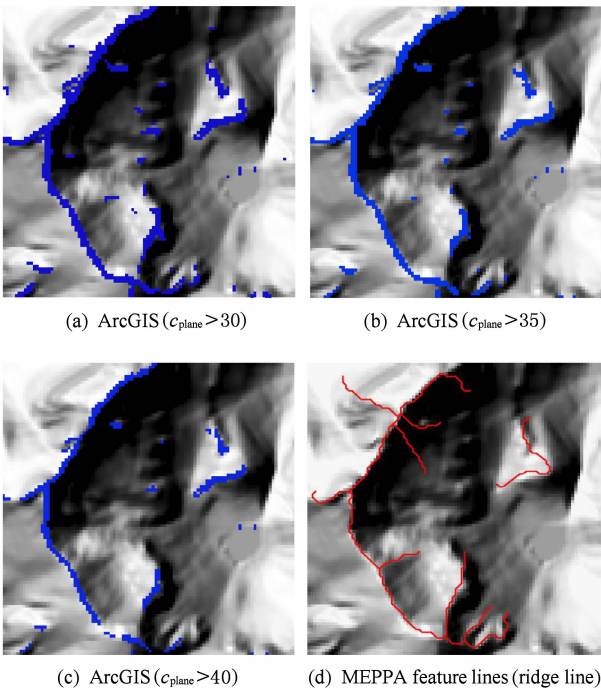


Fig. 31 Comparison between ArcGIS and MEPPA(Portion of Yakima1).
图 31 ArcGIS 与 MEPPA 对比(亚基马部分地区 1)

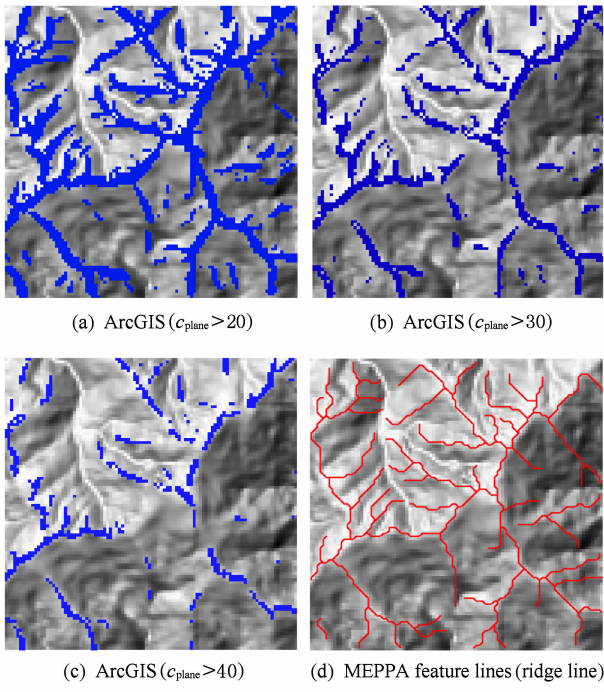


Fig. 33 Comparison between ArcGIS and MEPPA(ex100).
图 33 ArcGIS 与 MEPPA 对比(ex100)

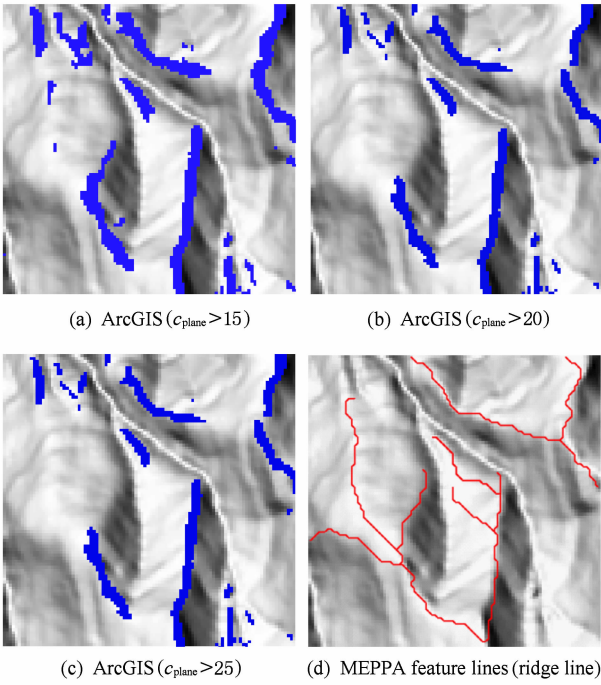


Fig. 32 Comparison between ArcGIS and MEPPA(Portion of Yakima2).
图 32 ArcGIS 与 MEPPA 对比(亚基马部分地区 2)

较低的地方不连续现象更加明显. 在图 31(a)(b)(c)~33(a)(b)(c)中,当平面曲率变大,山脊特征线的提取效果变好,然而引起了其他噪音点. 而 MEPPA

基本能够很好地提取主要的山脊线,并且形态连续、噪音点较少.

6 结 论

为了满足不同领域对地形骨架特征的需求,本文在 PPA 基础上提出了结合形态学和剖面识别的骨架特征提取方法 MEPPA. 其核心思想是利用剖面识别方法提取原始特征目标点,在此基础上提出了标量特征域的概念,主要目的是利用基于标量的形态学简化方法,提出了多种形态编码方案,生成准确的特征线,避免了传统 PPA 多边形拆解效率低的问题;同时能够从整体上考虑骨架特征线的形态,特征线的平滑程度较好. 为了将标量特征线准确地复原到矢量模型上,我们提出了矢量坐标定位、三角形链优化检测及剔除算法,准确地复原了骨架特征的矢量模型.

由于传统的剪枝方法对所有的特征线做统一步长的剪枝处理,因此,剪枝的同时主干线也随之变小,不能满足科学计算可视化等领域的实际需求. 我们提出了识别并预存储外分支的方法,实现了保留主干线的个性化特征提取效果. 由于 PPA 的多边形拆解的终止条件是没有环路,因此对于火山口等特

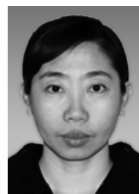
殊地形无法提取环路特征. 区别于传统的 PPA, 我们的 MEPPA 能够识别并提取环路特征.

为了验证本文方法的有效性, 我们在多个基准数据上进行了实验验证, 包括 PPA 的实验数据以及 GTOPO30 的真实数据集. 提出了多种评价骨架特征线平滑程度的方法, 并完成了 PPA 与 MEPPA 的对比实验. 从数值结果和效果图上看, 我们的 MEPPA 整体上优于 PPA. 在今后的工作中, 我们将在 MEPPA 基础上进一步研究地形合成与形变, 从而实现地质灾害等物理仿真, 为解决科学计算可视化问题提供思路和解决方案.

参 考 文 献

- [1] Zhang Huijie, Sun Jigui, Lü Yinghua, et al. A new simplification method for terrain model based on divergence function [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(5): 962-973 (in Chinese)
(张慧杰, 孙吉贵, 吕英华, 等. 一种新的基于发散度函数的地形模型简化方法[J]. 计算机学报, 2009, 32(5): 962-973)
- [2] Zhang Huijie, Qi Feng, Wang Yuanzhi, et al. Adaptive terrain model simplification method based on features [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(5): 1049-1054 (in Chinese)
(张慧杰, 齐峰, 王远志, 等. 一种基于特征的自适应地形模型简化方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(5): 1049-1054)
- [3] Zhang Huijie, Lü Yinghua, Liu Shuhua. A terrain model simplification method based on adaptive areas division [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(1): 53-61 (in Chinese)
(张慧杰, 吕英华, 刘淑华. 一种基于自适应区域分割的地形模型简化方法[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(1): 53-61)
- [4] Zhou H, Sun J, Turk G, et al. Terrain synthesis from digital elevation models [J]. IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics, 2007, 13(4): 834-848
- [5] Gain J, Marais P, Straßer W. Terrain sketching [C] //Proc of the 2009 SIGGRAPH Symp on Interactive 3D Graphics and Games. New York: ACM, 2009: 31-38
- [6] Hnaidi H, Guérin E, Akkouché S, et al. Feature based terrain generation using diffusion equation [J]. Computer Graphics Forum, 2010, 29(7): 2179-2186
- [7] Chang Y C, Song G S, Hsu S K. Automatic extraction of ridge and valley axes using the profile recognition and polygon-breaking algorithm [J]. Computers and Geosciences, 1998, 24(1): 83-93
- [8] Garbrecht J, Martz L W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models [J]. Journal of Hydrology, 1997, 193(1/2/3/4): 204-213
- [9] Soille P, Vogt J, Colombo R. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models [J]. Water Resources Research, 2003, 39(12): 1-13
- [10] Barnes R, Lehman C, Mulla D. An efficient assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models [J]. Computers and Geosciences, 2014, 62: 128-135
- [11] Nardi F, Grimaldi S, Santini M, et al. Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using digital elevation models: The flat area issue [J]. Hydrological Sciences Journal, 2008, 53(6): 1176-1193
- [12] Jones R. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples [J]. Computers and Geosciences, 2002, 28(9): 1051-1060
- [13] Jana R, Reshmidevi T V, Arun P S, et al. An enhanced technique in construction of the discrete drainage network from low-resolution spatial database [J]. Computers and Geosciences, 2007, 33(6): 717-727
- [14] Zhang H, Huang G. Building channel networks for flat regions in digital elevation models [J]. Hydrological Processes, 2009, 23(20): 2879-2887
- [15] Gênevaux J D, Galin E, Guérin E, et al. Terrain generation using procedural models based on hydrology [J]. ACM Trans on Graphics(TOG), 2013, 32(4): 1-10
- [16] Bavera D, De Michele C, Pepe M, et al. Melted snow volume control in the snowmelt runoff model using a snow water equivalent statistically based model [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(22): 3405-3415
- [17] Coe J A, Kinner D A, Godt J W. Initiation conditions for debris flows generated by runoff at Chalk Cliffs, central Colorado [J]. Geomorphology, 2008, 96(3): 270-297
- [18] Grohmann C H, Smith M J, Riccomini C. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(4): 1200-1213
- [19] Brardinoni F, Hassan M A. Glacial erosion, evolution of river long profiles, and the organization of process domains in mountain drainage basins of coastal British Columbia [J/OL]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2006 [2007-02-03]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005JF000358/pdf>
- [20] Fang X, Pomeroy J W, Westbrook C J, et al. Prediction of snowmelt derived stream flow in a wetland dominated prairie basin [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(6): 991-1006
- [21] Cavalli M, Trevisani S, Comiti F, et al. Geomorphometric assessment of spatial sediment connectivity in small Alpine catchments [J]. Geomorphology, 2013, 188: 31-41
- [22] Peucker T K, Douglas D H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data [J]. Computer Graphics and Image Processing, 1975, 4(4): 375-387

- [23] O'Callaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28(3): 323-344
- [24] Fairfield J, Leymarie P. Drainage networks from grid digital elevation models [J]. Water Resources Research, 1991, 27(5): 709-717
- [25] Costa-Cabral M C, Burges S J. Digital elevation model networks(DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas [J]. Water Resources Research, 1994, 30(6): 1681-1692
- [26] Meisels A, Raizman S, Karnieli A. Skeletonizing a DEM into a drainage network [J]. Computers and Geosciences, 1995, 21(1): 187-196
- [27] Wood J. The geomorphological characterization of digital elevation models [D]. Leicester, UK: University of Leicester, 1996
- [28] Huang Peizhi. A new method for ridge and valley axes extraction [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(3): 247-252 (in Chinese)
(黄培之. 提取山脊线和山谷线的一种新方法[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2001, 26(3): 247-252)
- [29] Huang Peizhi, Liu Zehui. Extraction of ridge and valley axes based on the terrain gradient direction [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(5): 396-399 (in Chinese)
(黄培之, 刘泽慧. 基于地形梯度方向的山脊线和山谷线的提取[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(5): 396-399)
- [30] Zhang H, Ma Z, Liu Y, et al. A new skeleton feature extraction method for terrain model using profile recognition and morphological simplification [J/OL]. Mathematical Problems in Engineering, 2013[2013-8-20]. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/523729>
- [31] Tasse F P, Gain J, Marais P. Enhanced texture-based terrain synthesis on graphics hardware [J]. Computer Graphics Forum, 2012, 31(6): 1959-1972



research interests include computer graphics, scientific visualization, 3D model simplification, and multi-resolution modeling for terrain.



Liu Yaxin, born in 1987. MSc in the School of Computer Science and Information Technology, Northeast Normal University. His current research interests include computer graphics and scientific visualization (nortonlike4@gmail.com).



Ma Zhiqiang, born in 1963. Professor in the School of Computer Science and Information Technology, Northeast Normal University. His main research interests include computer graphics, scientific visualization and intelligence computing(mazq@nenu.edu.cn).



He Xinting, born in 1989. Master candidate in the School of Computer Science and Information Technology, Northeast Normal University. Her current research interests include computer graphics and scientific visualization(hext798@nenu.edu.cn).



Bao Ning, born in 1991. Master candidate in the School of Computer Science and Information Technology, Northeast Normal University. Her current research interests include computer graphics and scientific visualization(baon348@nenu.edu.cn).