

三维陡崖符号的自动建模研究

杨 乃^{1,2} 郭庆胜^{1,2} 沈大勇^{1,2}

(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)

摘 要:针对三维地形图中某些地貌符号难以建模的问题,以陡崖符号为例,提出了一种基于不规则三角网自动提取陡崖边缘线的方法,根据不同光照条件下的视觉感受规律,建立了陡崖符号的光照模型,并对其数学表达进行了研究,介绍了陡崖符号的自动建模流程,有助于其他类似地貌符号模型的自动建立。
关键词:陡崖;自动建模;三维地形图;三维地图符号;TIN;数字地形模型
中图法分类号:P208; P283.1

陡崖是坡度在 70°以上、难以攀登的陡峭崖壁,包括土质陡崖和石质陡崖两类^[1]。与石质陡崖相比,土质陡崖结构相对简单,符号表示相对容易,因此,本文只针对石质陡崖的符号建模问题进行探讨,文中简称“陡崖”。在二维地形图中,陡崖的表示方法多种多样,Dahinden 对此进行了归纳与分类^[2,3],其中,Hurni 提出了一种利用陡崖边缘线、山脊线和填充晕滂线来构建陡崖符号的半自动绘制方法,成功应用于 Macromedia Freehand 中^[4-6]。本文改进了 Hurni 提出的方法,对三维地形图中陡崖符号的自动建模问题进行了深入研究。

1 陡崖边缘线的自动提取

陡崖由边缘线(上边缘线和下边缘线)、棱线(坡向变换线)、坡折线(坡度变换线)以及陡崖面组成,前三者构成了陡崖的骨架线。由于三维地形图利用数字地形模型替代等高线来表达地形,陡崖处形成了一个断裂带,如图 1 所示,TIN 作为数字地形模型时,陡崖断裂带表现为一连串带状分布的三角形。通过对数字地形模型的感知,人脑很容易形成陡崖面的空间结构印象,因此,三维地形图中陡崖符号的自动建模主要是对陡崖骨架线的建模。

Hurni 提出的陡崖符号建模方法中,陡崖的

上、下边缘线必须事先通过手工绘制出来,并且绘制出来的上、下边缘线节点数必须相同^[6]。在实际的生产作业中,采集的陡崖数据往往很难满足这些要求,因此,有必要寻求一个陡崖边缘线的自动提取方法。

分析陡崖范围内数字地形模型的特征表现,从图 1 中可以看出,该断裂带的上、下边缘可以作为陡崖的上、下边缘,因此,可以基于 TIN 来提取陡崖的上、下边缘线。具体方法如下:

1) 从 TIN 中获取高程信息,将采集的原始 2 维陡崖线数据重新生成 3 维陡崖线数据。如图 3 所示,中间较细的黑线即为重新生成的 3 维陡崖线。

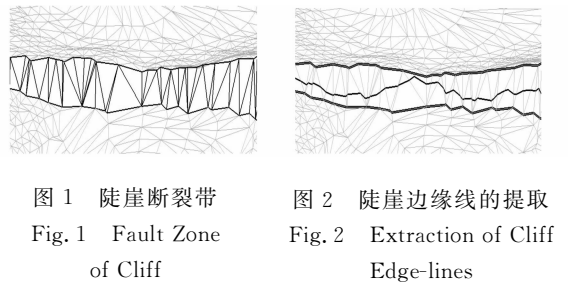
2) 从 TIN 中提取与 3 维陡崖线相交的三角形,三角形的每一个节点都对应一个三维坐标 (x,y,z) 。

3) 从以上三角形中提取与 3 维陡崖线相交的边,来判断每条相交边的两个端点所处的位置:

$$\Delta z = z_0 - z_1 \tag{1}$$

式中, z_0 、 z_1 分别为相交边两个端点的坐标 z 值,若 $\Delta z > 0$,则相交边中 z_0 对应的端点位于陡崖上边缘线上, z_1 对应的端点位于陡崖下边缘线上;若 $\Delta z < 0$,则相交边中 z_0 对应的端点位于陡崖下边缘线上, z_1 对应的端点位于陡崖上边缘线上。位于上边缘线上的端点连接后形成陡崖上边缘线,

位于下边缘线上的端点连接后形成陡崖下边缘线,如图 2 所示,上下两条较粗的黑线为提取出来的陡崖边缘线。



陡崖由很多小的子坡面组成,建模时,陡崖上边缘线上相邻两个节点与下边缘线上对应的两个节点之间形成一个子坡面,因此,为了保证子坡面的完整性,陡崖上、下边缘线的节点数必须相同。为了避免各子坡面的宽度过大或者过小以至于影响陡崖符号模型的视觉效果,设定一个基准宽度 ω ,根据人们从上到下的读图习惯,陡崖上边缘线的建模优先级高于下边缘线,式(2)通过陡崖上边缘线的长度 E_u 及基准宽度 ω 来控制子坡面的数量 n ,式(3)可以确定边缘线节点的数量 m ,式(4)控制各子坡面的上边缘线长度 L_u 在 $[\omega, 2\omega)$ 之内,式(5)通过陡崖下边缘线长度 E_d 来控制各子坡面的下边缘线 L_d 长度在 $[E_d/n, 2E_d/n)$ 内。

$$n = \lceil E_u / \omega \rceil \tag{2}$$
$$m = n + 1 \tag{3}$$
$$L_u = \omega + (\text{Rnd}() - 0.5) \times 2 \times \omega / k \tag{4}$$
$$L_d = E_d / n + (\text{Rnd}() - 0.5) \times 2 \times E_d / n \times k \tag{5}$$

式中,随机函数 $\text{Rnd}()$ 的取值范围为 $[0, 1)$ (下文出现的 $\text{Rnd}()$ 函数均与此相同), k 为大于 1 的整数。

2 陡崖符号光照模型的建立

Dahinden 和 Hurni 对现有的 60 多种不同的山体表示法进行分析评估之后指出,构成这些山体符号的各种元素中,使用山脊线、各种晕滃线的表达效果最优^[2,3],Hurni 教授提出的陡崖自动绘制方法也使用了这两种元素^[6]。本文建立的陡崖符号模型延续了这种风格,由三部分组成:陡崖边缘线、脊线和结构线;其中,脊线用于表示陡崖坡面上的棱线,结构线用于表示陡崖坡面上的坡折线。为了清晰地展现陡崖符号模型在不同光照强度下的视觉效果,Hurni 教授设计了一个简单的光照模型^[6],本文在此基础上进行了改进,建立了适用于三维环境下的陡崖符号自动建模光照数学模型。

2.1 陡崖坡面的分级

手工地貌晕渲采用的光源一般有三种:直照光源、斜照光源、综合照光源^[7]。在三维地形图中计算机自动地貌晕渲时,一般采用斜照光源,这样地形的立体视觉效果比采用直照光源时的要好,而且计算比混合光源简单^[8];一般不采用正南方向的光源,因为会产生反向地貌的感觉^[9,10]。当斜照光源位于西北方向、高度角为 45° 时,晕渲效果达到最佳^[13],因此,在陡崖符号光照模型中,假定光源位于西北方向,根据坡向和光源方向的关系,以东北-西南方向线为界,划分为阴、阳坡面;根据坡向的不同,划分 8 个坡面;根据各坡面的受光量不同,以西北-东南方向线为界,界线两边的坡面各划分为 5 个等级(图 3(a)),其中,等级相同的坡面受光量相同,等级为 1 的坡面受光量最多,等级为 5 的坡面受光量最少,依此类推。假定光源的方位角为 S ,陡崖某个坡面的方向角为 A ,则可以通过 $S-A$ 的绝对值大小来判断该坡面是阳坡还是阴坡($[0, \frac{\pi}{2})$ 为阳坡, $[\frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2})$ 为阴坡, $[\frac{3\pi}{2}, 2\pi)$ 为阳坡),并可以此计算陡崖坡面的光照等级(表 1)。

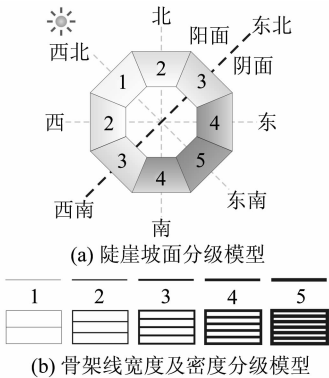


图 3 陡崖坡面分级模型

Fig. 3 Classification Model of Cliff-slope

表 1 陡崖坡面的光照等级计算规则

Tab. 1 Calculation Rules of Illumination

Rank of Cliff Slope

光照等级	$ S-A $
1	$[0, \frac{\pi}{8}) \cup [\frac{15\pi}{8}, 2\pi)$
2	$[\frac{\pi}{8}, \frac{3\pi}{8}) \cup [\frac{13\pi}{8}, \frac{15\pi}{8})$
3	$[\frac{3\pi}{8}, \frac{5\pi}{8}) \cup [\frac{11\pi}{8}, \frac{13\pi}{8})$
4	$[\frac{5\pi}{8}, \frac{7\pi}{8}) \cup [\frac{9\pi}{8}, \frac{11\pi}{8})$
5	$[\frac{7\pi}{8}, \frac{9\pi}{8})$

2.2 陡崖骨架线的最粗宽度设置

不同光照强度下陡崖骨架线的明暗程度主要

通过其宽度体现出来,人眼对同一灰度值下粗细不同的线的视觉感受规律为:越粗的线明度越暗,越细的线明度越亮。因此,位于不同光照等级坡面上的骨架线,可以利用不同粗细的线进行表达(如图 3(b)所示,数字表示光照等级)。设定一个基本线宽权值 w_l ,光照等级为 r 的坡面上的骨架线最粗宽度(W)设置公式如下:

$$W = r \times w_l \quad (6)$$

2.3 陡崖结构线的密度设置

当线的排列与聚集程度较高时,线的意义被削弱,就构成了虚面。对于单色的虚面来说,密度较大的线段组合形成的虚面其明度在视觉上给人的感觉要低于密度较小的线段组合形成的虚面,因此,在陡崖符号自动建模时,可以通过不同数目分布的结构线组合表现陡崖不同坡向的受光量变化(如图 4(b)所示)。设定一个线条数目阈值 l ,光照等级为 r 的坡面上的线条数目(N)设置公式如下:

$$N = r \times l \quad (7)$$

2.4 陡崖骨架线的宽度及其变化方向设置

地貌晕渲中人眼的视觉感受规律为:阳坡面越陡越亮,阴坡面越陡越暗;阳坡面越高越亮,阴坡面越高越暗^[7]。再结合人眼对同一灰度值下粗细不同的线的视觉感受规律,位于陡崖坡面上不同高度、不同坡度的骨架线均可以利用楔形线表示(如图 4 所示,左右两个模型分开单独考虑,位于东北、西南方向的坡面根据坡面中心的受光情况来确定适用阳面模型还是阴面模型)。

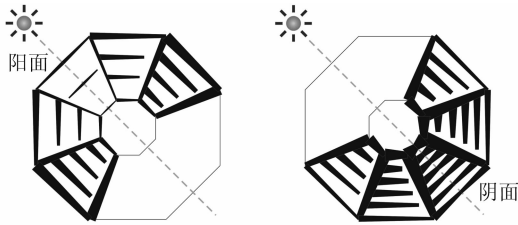


图 4 陡崖骨架线设置模型

Fig. 4 Setting Model of Cliff Skeleton-lines

2.4.1 单条骨架线的宽度变化方向设置

以西北-东南方向线为界,界线两边的边缘线、结构线沿阴影方向由粗到细;脊线在阳面从上到下由细到粗,在阴面从上到下由粗到细。

对于边缘线,假定三维地形图中的光源点为 S ,边缘线起点为 F_e ,终点为 T_e ,则边缘线粗细走向的判断公式如下:

$$\Delta d = \text{dis}(SF_e) - \text{dis}(ST_e) \quad (8)$$

式中, $\text{dis}(SF_e)$ 表示 S 与 F_e 之间的距离; $\text{dis}(ST_e)$

表示 S 与 T_e 之间的距离。对于光照等级为 1~4 的坡面,若 $\Delta d < 0$,则从 F_e 到 T_e 由粗到细,若 $\Delta d > 0$,则从 F_e 到 T_e 由细到粗,当陡崖坡面的光照等级为 5 时,判断方法与以上方法相反。

对于脊线,假定脊线起点为 F_r ,终点为 T_r ,它们对应坐标的 Z 值分别为 z_f 和 z_t ,结合式(1),则脊线粗细走向的判断公式如下:

$$\Delta z = z_f - z_t \quad (9)$$

在阳坡面,若 $\Delta z > 0$,则从 F_r 到 T_r 由细到粗,若 $\Delta z < 0$,则从 F_r 到 T_r 由粗到细;在阴坡面,若 $\Delta z > 0$,则脊线从 F_r 到 T_r 由粗到细,若 $\Delta < 0$,则脊线从 F_r 到 T_r 由细到粗。

对于结构线,其判断方法与边缘线一样。

2.4.2 每条骨架线的宽度变化设置

楔形骨架线的最粗宽度(W)由式(6)确定,为了构造出骨架线楔形的外表,每条骨架线被划分为 s 条由粗到细、紧密排列的子线段组成,式(10)可以用来设置骨架线各子线段的宽度(W_s):

$$W_r = W \times (s - i) / s \quad (10)$$

式中, i 为子线段在骨架线上排列的顺序索引值。

2.4.3 同坡面结构线之间的宽度变化设置

同一坡面不同高度的受光量不同,根据以上视觉感受规律,利用结构线表示坡折线时,坡面内结构线之间最粗宽度的变化趋势与坡面脊线的粗细走向一致,式(11)可以确定各条结构线的最粗宽度(W_r):

$$W_r = W \times (N - j) / N \quad (11)$$

其中, W 为该坡面内骨架线的最粗宽度,通过式(6)可以获得; N 为坡面内结构线的数量,通过式(7)可以确定; j 为结构线在坡面所有结构线根据最粗宽度由粗到细排列时的顺序索引值。

2.4.4 陡崖骨架线子线段的旋转角度设置

在真实的客观世界中,陡崖骨架线不可能是规则的直线,因此,为了使得陡崖符号模型更加真实自然,需要通过各子线段方向上的随机改变来构造出不规则的骨架线,式(12)可以控制子线段的旋转角度 ΔA 在 $-A_e \sim A_e$ 之间随机变化 ($A_e > 0$):

$$\Delta A = (\text{Rnd}() - 0.5) \times 2 \times A_e \times \pi / 180 \quad (12)$$

3 实验结果及分析

本文以《中国典型地貌集》中某山地地区的地形图作为实验对象,在 VB.net 环境下基于 ArcEngine 实现了陡崖符号的自动建模,具体流程为:基于 TIN 提取陡崖边缘线、边缘线处理、确定

坡面受光量、骨架线建模、地形匹配。其中坡面受光量以 TIN 中包含坡面中心点的三角形的受光情况来确定;在骨架线建模时若重点表示下边缘线,最终产生的陡崖符号模型将给人一种倒立的视觉心理错觉,因此需要重点表示出陡崖的上边缘线,下边缘线可以通过陡崖脊线的末节点结合数字地形模型隐式地表现出来;为了使得最终生成的陡崖符号模型与数字地形模型相互匹配,有必要利用它去修正 TIN,或者基于 TIN 将该模型进一步转换为紧贴地表的曲面模型。实验显示,前者最终产生的视觉效果要好于后者。另一方面,陡崖作为一种地貌类型,其符号模型与数字地形模型在用色上必须一致,但可以增加灰度值以便突出表示。

为了验证本文提出的方法及光照模型的可行性,对同一区域内的陡崖,通过改变光源的位置,使其处于阳面和阴面两种完全不同的光照条件下,分别对其进行实验,最终自动建立的三维陡崖符号模型如图 5 所示。



(a) 位于阴坡面的陡崖符号模型 (b) 位于阳坡面的陡崖符号模型

图 5 不同光照条件下的三维陡崖符号模型

Fig. 5 Model of 3D Cliff Symbol Under Different Illumination Conditions

本文提出的陡崖符号模型的自动建模法则、建模公式及建模方法,大大简化了陡崖数据的采集过程,有助于其他类似地貌符号模型的自动建立。

参 考 文 献

[1] 国家测绘局测绘标准化研究所. 测绘标准汇编(地

图制图及印刷卷)[M]. 北京:中国标准出版社, 2003:260-263

[2] Dahinden T. Existing Rock Representation in Topographic Maps and Their Suitability for Digital Generation[C]. The 2002 ICA Mountain Cartography Workshop, Mt. Hood, Oregon, USA, 2002

[3] Dahinden T, Hurni L. Development and Quality Assessment of Analytical Rock Drawings[C]. The 8th meeting of the ICA Commission on Mountain Cartography, Moscow, Russia, 2007

[4] Hurni L, Neumann A, Hutzler E. Digital Cliff Drawing for Topographic Maps[C]. The 19th International Cartographic Congress, Ottawa, Canada, 1999

[5] Hurni L, Jenny B, Dahinden T, et al. Interactive Analytical Shading and Cliff Drawing: Advances in Digital Relief Presentation for Topographic Mountain Maps[C]. The 20th International Cartographic Conference, Beijing, 2001

[6] Hurni L, Dahinden T, Hutzler E. Digital Cliff Drawing for Topographic Maps: Traditional Representations by Means of New Technologies[J]. Cartographica, 2001, 38: 55-65

[7] 施祖辉. 地貌晕渲法[M]. 北京:测绘出版社,1983

[8] 孙家广. 计算机图形学[M]. 北京:清华大学出版社, 1995

[9] Guo Qingsheng, Wang Xiaoyan. The Technique of Relief Shading with Multi-Direction Lights[C]. The 21st International Cartographic Conference, Durban, South Africa, 2003

[10] 郭庆胜,王晓延. 地貌晕渲中光源使用方法与用色规则的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004,29(1):20-23

[11] 曹纯贫. 数字地貌晕渲中若干参数的设置[J]. 测绘通报,2003(5):17-37

第一作者简介:杨乃,博士生。主要研究方向为三维地图可视化等。
E-mail:naigeer@163.com

Automatic Modeling of 3D Cliff Symbol

YANG Nai^{1,2} GUO Qingsheng^{1,2} SHEN Dayong^{1,2}

(1 School of Resource and Environment Science, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Key Laboratory of Geography Information System, Ministry of Education, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: In view of some relief symbols are difficult to build the modeling in 3D topographic map, we take cliff symbol as the example to propose a method to exact the edge lines of cliff