

# 地形生成技术与方法的研究

张继贤 柳 健

(华中理工大学图像所, 武汉 430074)

李德仁

(武汉测绘科技大学信息工程学院, 武汉 430070)

**摘 要** 三维地形生成与仿真有助于更好地理解地形结构和提高地理数据分析的水平,但由于实际地形起伏千差万别,非常不规则,因此按给定条件进行地形的生成与仿真是非常困难的。本文把地形看成随机统计过程,将分形几何模型与随机点生成技术及实用回归技术相结合,提出了一套切实可行的地形生成技术与方法,在给定地形特征或地形参数(如平均高程、最大高程及其位置、最小高程及其位置、高程标准差、相关长度等)条件,通过模拟符合地形统计特征的随机过程,即可通过计算机自动产生符合要求的“真实”的三维地形。模拟与仿真的结果证明了本方法的可行性。

**关键词** 地形生成,地形骨架,分形,地形模型,地形特征

## 1 引言

随着计算机生成技术和计算机图形学的发展,目前已能生成并仿真出各种各样栩栩如生的三维造型,从而可以帮助人们更好地认识和理解现实数据的本质,改进决策,提高数据的分析与计算水平。然而由于实际地形起伏千差万别,因此通常用经典方法难于描述、定义和存贮;同时,从迄今为止的大多数地形生成与仿真的应用来看都不是对应于某一特定的现实世界,评价的唯一标准为视觉上的接受能力,这对于以三维量测为主要目的之一的地形分析来说是不能接受的。分形模型作为自然的语言,具有表达的紧凑性和不规则性,可以产生任意水平的细节,为我们提供了一个有可能很好地描述一般地面形状的数学模型,因而日益受到人们的关注。然而至今的分形模拟绝大多数仅限于产生山脉的明显特征,对于山脉大小、起伏位置等度量特征的模拟却不多见。

在地形分析领域,将地形看做一种随机统计过程(例如平稳正态均方连续的马尔可夫过程)<sup>[1,2]</sup>已

被人们所公认。至今,几乎所有的地形模型的研究以及地形分析(例如地形内插、地形特征分析、地形统计特征提取、地形合成等),都是在将地形作为服从一定随机统计过程的条件下进行的。最近,随着分形几何的出现,将地形看做一种扩展的布朗运动(即分数维布朗运动)的观点已在地形分析领域得到广泛应用<sup>[3,4]</sup>。为了满足三维测量的需要,本文基于已有的研究成果,把地形看成层次性随机统计过程,将分形几何模型与随机点生成技术及实用回归技术相结合,提出了一套切实可行的地形生成技术与方法。在给定一定的地形特征或地形参数条件下,通过模拟符合地形的统计特征的随机过程,即可用计算机自动产生符合要求的“真实”的三维地形。

## 2 地形生成方法

图1为本文提出的地形生成方法的框图。在这一方法中,地形生成由三个过程来实现:初始条件的确定、地形整体骨架的形成和地形局部细节的逐层产生。

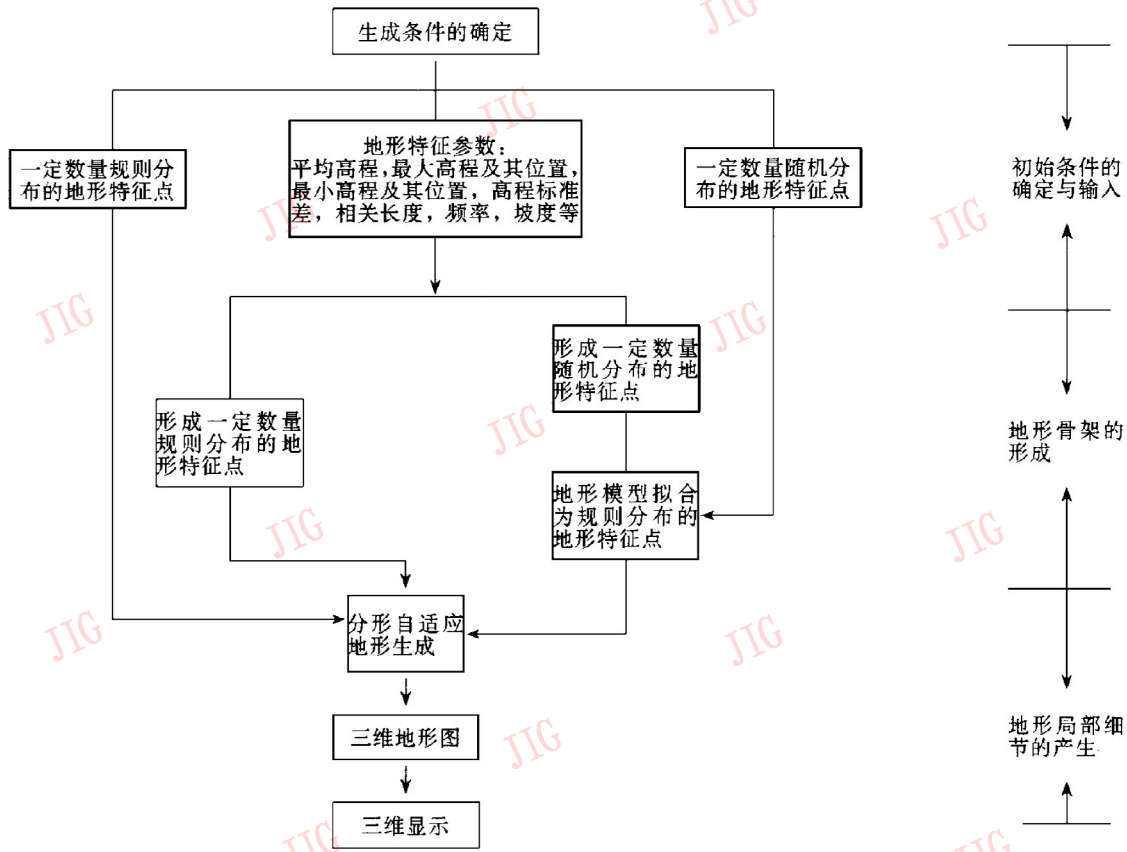


图 1 三维地形生成方法框图

Fig. 1 The procedure for 3D terrain generation

初始条件的确定是生成满足给定条件三维地形的先决条件。按照可能的已知条件,初始条件可分为三种情况:一定数量的地形特征参数;一定数量的随机分布的地形特征点;一定数量的按规则格网分布的地形特征点。在上述三种况下,给定一定数量的地形特征参数应是地形生成中较常用的,也是最为灵活的一种情况,因为对应一种地形特征参数,有可能生成多幅在统计分布上满足给定特征参数的数字地形。这一生成过程首先需要按给定的地形参数获得一定数量的地形特征点,形成地形的整体控制骨架表示,然后通过分形自适应地形生成方法在地形骨架的基础上获得地形的局部细节和地形特征。地形参数有很多个,本文选取一组能够被大家广泛接受的、最能表示地形一般概况的参数作为地形产生条件,内容有:平均高程、最大高程及其位置、最小高程及其位置、地形高程的标准差(描述地形起伏程度与地形类型)、地形的平均坡度、地形相关长度、地形频率等。众所周知,地图或地形的自相关系数是近似指数型的,而且是可分离的,我们把地形高程数据自相关系数下降到  $\frac{1}{e} = 0.368$  时的位移增量的大小定义

为地形相关长度,并认为相关数据中凡是相隔长度为  $L_x$ (横向)或  $L_y$ (纵向)的两个象元(其相关系数等于 0.368)已经是不相关了。另外,我们把在某一个方向上一个单位长度内地形结构(或模式)重复出现的次数叫做地形频率。

给定一定数量的地形特征点是较为严格的情况,按照实际情况,地形特征点既可以是随机分布的、也可能是规则的按格网分布的。对于随机分布的地形特征点,需要经过地形模型进一步拟合为按规则分布的地形特征点。一定数量的地形特征点已决定了地形的整体骨架,控制了地形的整体结构,由此产生的地形形状具有唯一性。有了一定数量的按规则格网分布的地形特征点,即可进一步通过分形自适应地形生成方法获得地形的局部结构和特征,形成符合给定条件的三维地形。

地形骨架的形成决定了地形的整体结构和特征,是地形生成过程中的控制性环节所在,是在满足给定地形参数的条件下,自动形成一定数量的用以表示整体结构的地形特征点。主要通过两种方法来实现:其一,按给定参数和假定分布自动形成一定数量的规则分布的地形特征点;其二,首先形成一定数

量的不规则分布的地形特征点,再通过地形模型拟合出规则格网上的地形特征点。提供两种途径的原因在于地形特征点并不总是分布在规则格网上。

地形局部细节的形成决定地形的局部结构和形状,它是在地形骨架的基础上逐层产生的。由于分形理论恰恰为我们提供了可以很好地描述一般自然地面形状的数学模型,并可用随机过程和几个可选参数产生需要的几何纹理细节,具有表达的紧凑性并可以产生任意水平的细节,因此,本文发展了分形自适应地形生成方法,实现了地形局部细节的产生。

### 3 关键技术与解决途径

#### 3.1 一定数量规则分布地形特征点的产生

假设地形为平稳正态均方连续的马尔可夫过程,令  $M, N$  为欲产生的数字地形的行、列数,给定地形平均高程  $\bar{H}$ , 最大高程  $\max H$  及其位置, 最小高程  $\min H$  及其位置, 地形高程标准偏差  $\sigma_H$ , 地形相关长度  $L$  (为  $x, y$  方向相关长度  $L_x, L_y$  的均值)。如图 2 所示,

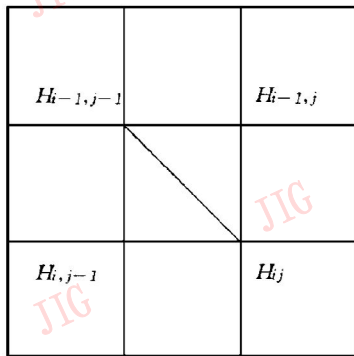


图 2 一定数量规则分布二维数字矩阵的产生

Fig. 2 Generation of regular distributed terrain points

当  $H_{i,j}$  与  $H_{i-1,j}, H_{i,j-1}$  满足

$$H_{i,j} = A_1 H_{i-1,j} + A_2 H_{i,j-1} + A_3 R_{ij} \quad (1)$$

线性关系时,可按下式获得均值为  $\bar{H}$ 、相关长度为  $L$  的高程序列  $\{H_{i,j}\}$ 。

$$H_{i,j} = \frac{\rho}{\rho_1 + 1} H_{i,j-1} + \frac{\rho}{\rho_1 + 1} H_{i-1,j} + \sqrt{1 - \frac{2\rho^2}{\rho_1 + 1}} R_{ij} + \bar{H} \quad (2)$$

式中:  $\rho = e^{-\frac{L}{L}}$  为高程序列在水平、垂直方向的相关系数,  $\rho_1 = e^{-\frac{\sqrt{2}}{L}}$  为对角线方向的相关系数,  $R_{ij}$  为均值为零、方差为  $\sigma_H^2$  的高斯随机变量,并可通过下述方法产生<sup>[5]</sup>

设  $\eta_{n_1}, \eta_{n_2}$  为  $(0, 1)$  区间内均匀分布的随机数, 则

$$\zeta_n = (-2\ln(\eta_{n_1}))^{1/2} \cos(2\pi\eta_{n_2}) \quad (3)$$

为  $(0, 1)$  区间内的随机数, 而  $R_{i,j} = \sigma\zeta_n$  即为均值为零、方差为  $\sigma^2$  的高斯分布随机变量。

利用式(2), (3), 我们获得了一定数量规则分布的地形点, 但这些点并不一定能完全符合给定的条件, 形成满意的地形骨架, 因此加入反映给定条件的能够真正反映地形重要特征的约束条件是非常重要的, 这些条件包括: 最大、最小高程及其位置约束, 在通过式(2)获得的  $\{H_{i,j}\}$  序列中, 以最大或最小高程所在位置点  $(i_0, j_0)$  为中心,  $R$  为半径的范围内, 进行如下变换

$$h_{ij} = \begin{cases} e^{-\frac{-(i-i_0)^2 + (j-j_0)^2}{R^2}} (\text{Lim}H - H_{i,j}) + H_{i,j} & (i-i_0)^2 + (j-j_0)^2 \leq R^2 \\ H_{(i,j)} & (i-i_0)^2 + (j-j_0)^2 > R^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中  $\text{Lim}H$  为  $\text{Max}H$  或  $\text{Min}H$ 。

平均高程约束: 设已生成序列  $\{H_{i,j}\}$  的平均值为  $\bar{H}'$ , 则通过下式可将  $H_{i,j}$  变换成均值为  $\bar{H}'$  的高程序列。

$$h_{i,j} = H_{i,j} + (\bar{H} - \bar{H}') \quad (5)$$

#### 3.2 一定数量随机分布地形点的产生

令  $M, N$  为欲产生的数字地形的行、列数,  $\text{Max}H$  为最大高程,  $\text{Min}H$  为最小高程,  $\bar{H}$  为平均高程,  $\sigma_H$  为地形高程标准差, 通过式(6), (7) 和(8) 可获得一组随机分布的离散点  $\{x, y, z\}$ , 并且  $0 \leq x \leq M, 0 \leq y \leq N, \bar{H} - \sigma \leq z \leq \bar{H} + \sigma$ :

$$x = \text{rand}(M) \quad (6)$$

$$y = \text{rand}(N) \quad (7)$$

$$z = 2 \times \left( \frac{\text{rand}(\text{Max}H)}{\text{Max}H-1} - 0.5 \right) \times \sigma_H + \bar{H} \quad (8)$$

其中  $\text{rand}(x)$  为一伪随机产生函数, 每调用一次可产生一个 0 到  $M$  之间的数值。

为了保持地形最大值点、最小值点附近的地形特征, 在以最大值点  $(x_0, y_0, \text{Max}H)$  为中心,  $R$  为半径的范围内, 先按式(6), (7) 和(8) 产生一定数量的服从均匀分布的地形点  $(x, y, z)$ , 再利用下式将高程值  $z$  变为服从正态分布的点  $z'$ :

$$z' = \frac{z - E(Z)}{\sqrt{\text{Var}(z)}} * \sigma_H + \bar{H} \quad (9)$$

或利用式(10)将  $z$  变为满足给定条件的点:

$$z' = \exp\left(-\frac{x - x_0)^2 + (x + y_0)^2}{R^2}\right) *$$

$$(\text{Lim}H - z) + z \quad (10)$$

式中  $(x - \text{Lim}x)^2 + (y - \text{Lim}y)^2 \leq R$ ,

$$\text{Lim}H = \text{Max}H \text{ 或 } \text{Min}H,$$

$$\text{Lim}x = x_0 \text{ 或 } x'_0, \text{Lim}y = y_0 \text{ 或 } y'_0$$

为了保证在以最大高程点或最小高程点为中心,半径  $R$  以外产生的点能够分布在整个欲产生的数字地形范围内,就要求点与点之间的平面距离不小于阈值  $r$ ,即  $(x_i, y_i, z_i)$  与  $(x_j, y_j, z_j)$  间应满足:

$$(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \geq r^2 \quad (11)$$

### 3.3 地形模型拟合随机分布的地形点为规则分布的地形点

本步骤在于将上一步骤产生的一定数量随机分

$$z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^2y + a_7x^3y + a_8xy^2 + c_a e^{-\frac{|x|}{L_x}} (c_0 + c_1 \cos \frac{2\pi f_x |x|}{M}) + C_2 \sin \frac{2\pi f_y |y|}{N} e^{-\frac{|y|}{L_y}} \quad (12)$$

式中:  $x = m - \frac{M-1}{2}, y = n - \frac{N-1}{2}$ 。

令  $z(x, y)$  在  $x, y$  方向的偏导数为  $z_x(x, y), z_y(x, y)$ , 那么可得平均坡度约束:

$$\text{coss} = 1 / \sqrt{1 + z_x^2(0, 0) + z_y^2(0, 0)} \quad (13)$$

式(12)、(13)构成二元方程组,在已知一定数量随机分布地形特征点的情况下,利用最小二乘回归法可求得各系数值  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_8, c_a, c_0, c_1, c_2$ , 然后通过式(12)求取相应规则格网上的地形特征点。

### 3.4 分形自适应地形生成

自然地形表面作为随机分形,用分形 Brownian 函数(Fractal Brownian Function—FBF)可以较好地予以描述<sup>[6]</sup>。本文基于 FBF 的分形自适应地形生成方法采用中点位移内插法,这是一种快速递归细分的四邻域中点位移技术<sup>[3]</sup>,能够产生任意水平的局部地形细节,其递推公式按如下方式进行:

对点  $(i, j)$ , 假定当  $i, j$  均为奇数时高程值  $H_{i,j}$  已经确定;则对  $i, j$  均为偶数时:

$$H_{i,j} = \frac{1}{4} \{H_{i-1,j-1} + H_{i+1,j-1} + H_{i+1,j+1} + H_{i-1,j+1}\} \Delta_k$$

而当  $i, j$  中有且仅有一个为偶数时,

$$H_{i,j} = \frac{1}{4} \{H_{i,j-1} + H_{i-1,j} + H_{i+1,j} + H_{i,j+1}\} \Delta_k$$

布的地形特征点通过地形模型表示,进一步拟合出相应规则格网上的地形特征点,形成以规则格网分布形式表示的地形整体骨架。地形模型代表地形的总体结构,应能充分反映出随机分布的地形特征点信息和随机分布的地形特征点生成过程中未能顾及的地形特征参数(例如地形相关长度、地形平均坡度、地形频率等)。本文提出如下的地形模型。

令  $M, N$  为欲生成的用以表示地形骨架的数字地形行、列数,  $m, n$  为行列号,  $L_x, L_y$  为横向、纵向相关长度,  $f_x, f_y$  为纵向、横向频率,  $s$  为地形平均坡度, 则任意一点  $(x, y)$  处的高程值  $z(x, y)$  可表示为:

在这一过程中,随机位移模型  $\Delta_k$  取为:

$$\Delta_k = d_k^H \times \sigma \times \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \times \text{gauss} \quad (14)$$

式中:  $k$  为迭代水平,  $d_k = \left(\frac{d_0}{\sqrt{2}}\right)^k$ ,  $d_0$  为初始高程数格网间距,  $\text{gauss}$  为服从于  $N(0, 1)$  的随机变量,  $\sigma, H$  的值由给定的初始数据值按最小二乘法回归求得。为了顾及地形的局部特征,在每一点的领域范围内计算局部  $\sigma$  和  $H$  值并与整个初始格网算出的值相比较,超过某一阈值时按局部  $\sigma$  和  $H$  自适应调整。

### 3.5 生成地形的三维显示

生成地形的三维显示,在于将已产生的三维数字地形通过投影方法在二维平面上逼真地显示出来,是对生成地形结果的可视化输出。三维显示技术可包括有线框透视图法、基于光照模型的逼真显示技术等。由于自然地形一般都非常不规则且十分复杂,因此,本文提出并发展了基于平行投影技术的框线透视图法来实现对生成地形的三维显示,其实现过程包括观察方向的确定、三维平面向二维平面的投影、显示和消隐。

## 4 实验与分析

利用本文发展的地形生成算法可以产生各种各样满足给定要求的三维地形。图 3~图 5 给出了部分实验结果,其中图 3 是在给定一定数量规则分布

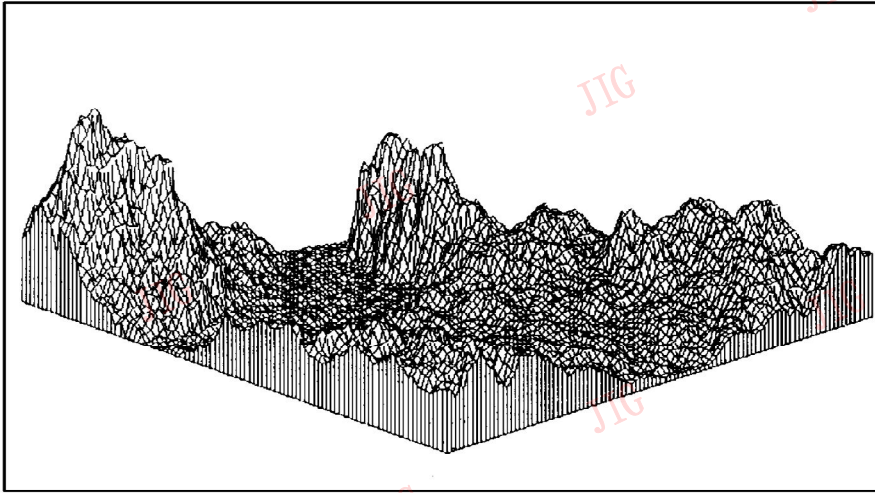


图 3  
Fig. 3

的数据点的情况下,利用分形自适应地形生成产生的三维地形;图 4 是在给定一定地形参数情况下,利用规则分布网格点生成法直接产生一定数量规则分布地形点,然后利用分形自适应地形生成产生的结果;图 5 是在给定一定地形参数的情况下,首先产生一定数量随机分布的地形点,然后利用地形模型拟合出规则格网分布的地形点,再利用分形自适应地形生成产生的三维地形。

表 1 列出了图 3~图 5 各地形生成的实验条件,表 2 给出了生成过程中的某些参数值,表 3 列出了对生成的三维地形进行统计分析得出的统计参数。通过表 1 同表 3 比较可知,各生成地形的统计参数与给定参数在一定范围内基本吻合。由于地形生成在给定条件下(例如给定参)总是存在一定程度的调整,因此本文提出的方法是合理可行的。

为了将本文的方法通过实际地形数据加以验证,图 6 给出了一幅真实的地形数据,其大小为  $130 \times 40$  个像素,地形分辨率为 300m,利用我们发展的地形分析软件对其进行分析,得出的特征参数见表 4。图 7~图 9 为利用表 4 统计出的真实参数、采用本文发展的生成算法进行地形生成所得出的结果。其中图 7 是利用从原始数据提取的  $32 \times 10$  个数据直接采用分形自适应地形生成产生的结果;图 8 是利用表 4 中的均值、标准差、最大值、最小值、相关长度等参数值,先利用规则分布格网点生成法产生一定数量( $16 \times 5$ )规则分布地形点,然后利用分形自适应地形生成产生的结果;图 9 是利用表 4 中的所有统计参数值,先产生一定数量随机分布的地形点,然后利用地形模型拟合出规则格网分布的地形点,

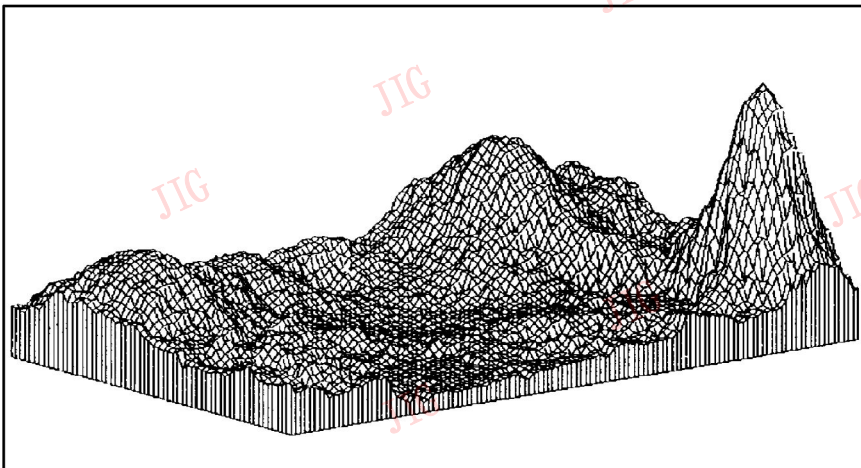


图 4  
Fig. 4

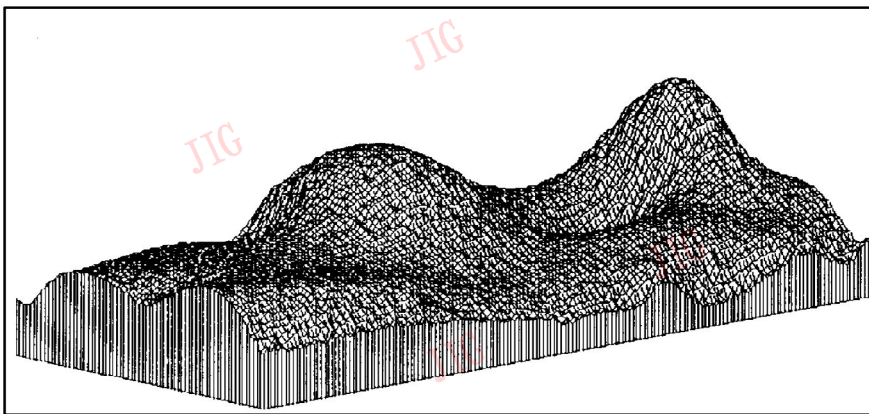


图 5  
Fig. 5

再利用分形自适应地形生成产生的三维地形。

表 5 为对图 7~图 9 各生成地形进行统计分析得出的统计参数值表。通过表 4 与表 5 比较可知,各生成地形的统计参数与真实地形的统计参数基本吻

合,其误差小于 10%,而且对比图 6 与图 7~图 9 也可见,各生成地形与真实地形非常相似,说明本文的方法能够基本反映地形的真实过程。

表 1 地形生成试验的初始条件

Table 1 Original given parameters in generating experiments

图号	均值 (m)	标准差 (m)	最大值		最小值		平均斜率	相关长度 (格网)	频率 (1/km)
			行号	列号	行号	列号			
图 4	250.00	70.00	6	8	400.00	30	13	25.00	
			40	6	450.00				
			55	24	550				
图 5	390.00	120.00	78	14	989.00	40	22	1.23	$L_x=2.00$ $f_x=2.00$
			40	10	880.00			$L_y=30.0$ $f_y=1.00$	

表 2 地形生成过程中的有关参数

Table 2 Some Parameters in the procedure of generation

图号	生成条件	产生的随机分布 地形特征点数量	产生或拟合的规则 分布地形特征点数	H (m)	$\sigma$ (m)
图 3	给定 50×50 个地形特征点		100 * 100	0.45	2.32
图 4	见表 1	4	60 * 30	0.56	1.06
图 5	见表 1	15	80 * 35	0.62	1.42

表 3 生成的三维地形统计分析得出的参数值

Table 3 Statistical values in generated 3D terrains

图号	均值 (m)	标准差 (m)	最大值		最小值		平均斜率	相关长度 (格网)		
			行号	列号	行号	列号				
图 3	377.41	55.08	9	8	695.60	96	5	295.05	1.34	40.22
图 4	266.98	57.70	110	48	549.26	60	25	196.92	1.29	31.75
图 5	549.47	140.62	156	28	989	140	0	178.7	1.41	40.71

表 4 试验数据的地形特征参数

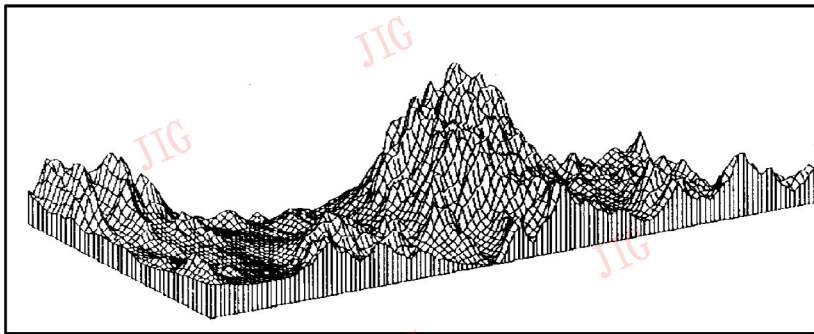
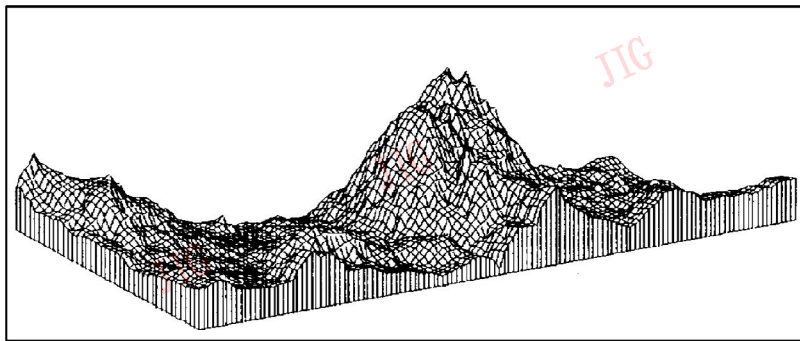
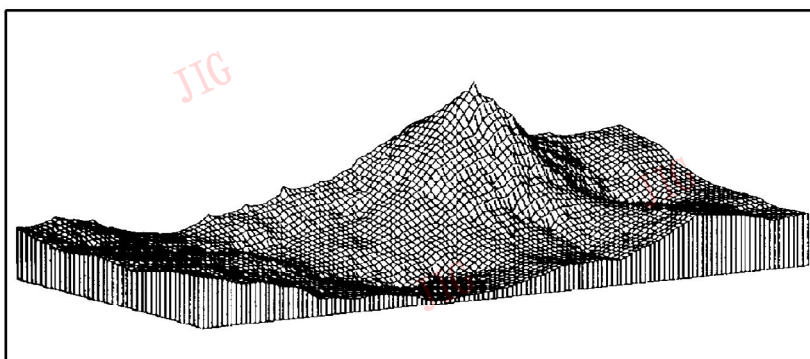
Table 4 Characteristic parameters in our experimental terrains

平均高程(m)	536.0	偏态系数	1.02	最大高程 (m)及位置	1038.0 $x=91$ $y=1$	X 方向相关长度 (格网)	20.68
地形方差(m <sup>2</sup> )	17321.0	峰态系数	0.94	最小高程 (m)及位置	276.0 $x=129$ $y=26$	Y 方向相关长度 (格网)	39.74
标准差(m)	131.6	地形 粗糙度	20.64	坡度	1.499	分数维	2.39

表5 生成的三维地形统计分析得出的参数值(仅对生成中使用的参数统计)

Table 5 Statistical parameters in simulated 3D terrains

	图7	图8	图9		图7	图8	图9
平均高程(m)	545.0	520.7	575.6	位置及最大高程(m)	92.4 1076.0	90.5 1038.0	89.3 1038.0
地形方差(m <sup>2</sup> )	15998.6	17758.6	12979.0	位置及最小高程(m)	127.22 291.0	124.20 276.0	124.26 279.8
标准差(m)	126.5	133.2	113.9	X方向相关长度(格网)	21.6		20.8
分数维	2.37	2.34	2.32	Y方向相关长度(格网)	39.4		38.6
坡度	1.45	1.42	1.29	坡度	1.45	1.42	1.29

图6  
Fig. 6图7  
Fig. 7图8  
Fig. 8

## 5 结论与建议

针对实际地形起伏的千差万别,自然地面通常非常不规则,用经典方法难于描述、定义和存贮的高度不规则性和复杂性,本文把地形看成随机统计过程和层次性结构体系,通过将分形几何模型、随机点生成技术、基于地形模型的回归技术相结合,提出并发展了适应地形特殊情况的三维地形生成技术和方法。利用本方法能够按照给定的地形特征点或地形参数生成各种各样符合要求的逼真三维地形。实验结果表明:本方法切实可行,流程合理,具有良好的通用性和实际应用价值。

本文提出的方法也可与小波多尺度表示理论相结合,形成对三维地形的多尺度或多分辨率生成技术和方法;还可针对地形特征点有可能存在的不规则性,发展直接基于不规则三角网骨架控制的地形生成方法,并进一步把本文方法扩展为对自然景观的仿真。

## 参考文献

- 1 彭嘉雄,张天序.地形的统计模型研究.宇航学报,1984,(3).
- 2 彭嘉雄,李德华等.地形匹配技术原理研究总报告.HUST Tercom No-029,1983.
- 3 Yokoya N. et al. Fractal Based Analysis and Interpolation of 3D Natural Surface Shapes and Their Application to Terrain Modeling. CVGIP

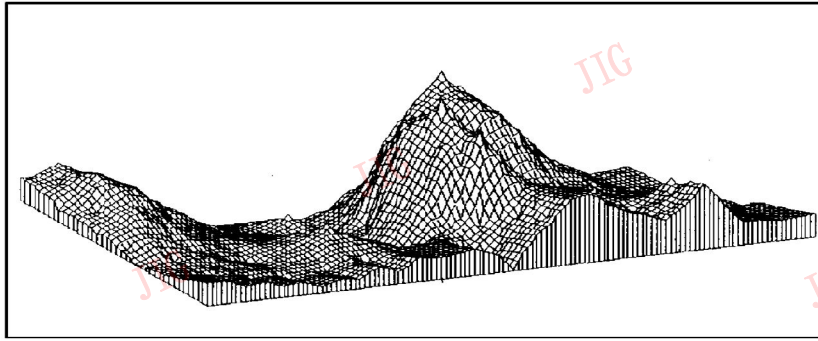


图 9

Fig. 9

(46), 1989, 284-302.

- 4 Barnsleg M. et al. The Science of Fractal Images. H. Peitgen et al Eds, Springer-Verlag, 1990.
- 5 王梓坤. 概率论基础及其应用. 北京: 科学出版社, 1976.
- 6 Feder J. Fractals. Plenum Press, New York, 1988.



张继贤, 毕业于武汉测绘科技大学摄影测量与遥感系, 并分别于 1988, 1991 和 1994 年获得学士、硕士和博士学位。1995~1996 年在华中理工大学从事博士后研究工作。现为华中理工大学图象识别与人工智能研究所、图象信息处理与智能控制国家教委开放研究实验室副教授。主要从事遥感与图象信息处理、GIS、精确制导、数字摄影测量等方面的研究工作。

# Technical Approach to Realistic Terrain Generation

Zhang Jixian

(Institute for Image Recognition & AI, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Liu Jian

School of Geoinformatics, Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, Wuhan 430070)

**Abstract** Since its extreme irregularity and complexity of real topography, 3D realistic terrain generation is one of the most challenging problems under some given condition. In this paper, real terrain is regarded as a hierarchical and stochastic process, through the integration of fractal geometry, random number generation and our established terrain model for description of terrain structure, a realistic and feasible hierarchical method for 3D terrain generation is proposed and established. The method we propose is formed by three stages: determination of initial simulation condition, formation of controlling terrain sketch; and addition of localized terrain details by fractal interpolation. Any kind of wonderful terrains can be simulated according to some given condition such as required topographic parameters (average height, standard deviation, average slope, terrain frequency, terrain relative length etc.) or some known characteristic points by the use of our method. Experimental results show its effectivity and reliability of this method.

**Keywords** Terrain generation, Terrain sketch, Fractal, Terrain model, Terrain feature