

① 基于自适应分形内插的数字地面重建

159-164

朱庆 张庆珩

P217

(北方交通大学土木建筑系,北京 100044)

A 摘要:模拟在测绘过程中被忽略的地形细节对逼真地形重建来说是十分重要的.本文提出了一种基于从原始观测数据提取的分形特征的快速自适应分形内插方法.所介绍的内插模型是对fBm的一个局部稳态的近似,由此产生的几何纹理细节不论在视觉上还是在精度上都更接近真实地形.

关键词:数字地面重建,分形,随机中点位移,自适应内插

分类号:P283.4,TP751.1

地形测绘

0 引言

传统地形测绘的成果主要是二维线划等高线图,往往只有通过理解等高线图形来判释自然地貌形态.对实际地形的这种感知过程是间接的不直观的.三维地面显示对于直观地理解地形数据的空间结构,提高分析数据的计算水平是十分重要的.尽管地形测绘被要求尽可能翔实地反应实际地形特征,但由于数据量和测绘费用的限制,在实际工作中总有大量小于一定尺度的细节(微起伏)被忽略.测绘比例尺越小,这种忽略的程度越严重.所以,根据实测的数据重建的三维地形模型往往因缺乏细节而显得不真实.因此逼真再现自然地形的主要困难在于恢复大量被忽略的纹理细节.一种简便的方法是利用航空摄影测量数据通过纹理映射再现实地形的动人画面^[1].但由于航摄影像主要反映的是自然地面各种地物的颜色纹理,而记录的有关地形微起伏(几何纹理)的信息因摄影距离太远显得十分微弱.由于地形从整体特征到特定的肉眼可见的特征通常具有很强的随机特性,并可由统计分形模型如fBm予以描述^[2,3].所以通过分形内插可以近似的重建地形细节.

Mandelbrot最初采用的地形产生技术是通过将Gaussian随机位移按Poisson分布间距施加到一个平面或者球面上而产生一个fBm表面.通过一个二维Gaussian白噪声的Fourier变换也可产生fBm表面.这两种方法虽然均可产生真正的fBm,但由于其 $O(N^3)$ 和 $O(N \lg N)$ 的算法复杂度,加之也缺乏对细节的局部控制,所以其在地形模拟中的应用受到了限制.为此,Fourier等人提出了一种快速产生近似fBm的方法——中点位移技术,该法的时间复杂度为 $O(N)$.根据相关的局部性中点位移技术又分为以下两类:

(1)线框中点位移.该法仅用于著名的三角形细分,即将地形表面用三角形网络予以描述,而在每一步细分过程中只涉及在一条边的两个端点间内插.由于这个内插过程没有使用周围环境信息(称为context independent),缺乏fBm的要求的自相关信息,因而产生的近似fBm由于出现可见的皱折(creasing)现象而不太令人满意^[4,5].对实际地形观测数据,由于数据呈随机分布,三角形的分布和大小均无规律,若直接采用这种递归细分需增加大量额外开销,也不

利于局部细节的自适应控制。

(2) 面片中点位移. 该法将地面视为若干面片(tile)的聚集, 每步细分包括 3 个以上非共线点的内插, 如 Fourier 和 Miller 等的四邻域方法以及 Mandelbrot 等的正六边形细分均属此类. 由于该法利用了局部邻域点间的相关信息, 从而可避免出现皱折现象; 加之算法简单、易于实现, 因而成为地形细节模拟广泛采用的方法。

与其他计算机图形不同, 工程用真实感图形应是可准确量测的. 这不仅需要创建视觉可接受的逼真效果的处理, 而且还需要科学的精确处理. 为此, 我们提出了一种可充分保持原有数据固有特性的自适应动态内插模型——局部稳态的四邻域中点位移技术。

1 局部稳态的四邻域中点位移方法

这是一种快速递归细分技术. 如图 1 所示, $0_1, 0_2, \dots, 0_n$ 为初始栅格数据点(\circ), 格网间距为 d_n . 每一级细分包括两步内插过程, 首先由最邻近的四个格网点高程 h_{n_i} ($i=1, 4$) 内插其中心点(x)的高程 h_{11} . h_{11} 等于四个格网点高程的平均值加上一个 Gaussian 随机位移 $\Delta \sim N(0, V_{\Delta}^2)$:

$$h_{11} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 h_{n_i} + \Delta_1. \quad (1)$$

经过这一步内插, 初级正方形格网变为如图 2 所示旋转了 45° 的次级正方形格网(棱形格网), 格网间距为 d_1 . 可见,

$$d_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} d_n. \quad (2)$$

第二步内插将由最邻近的四个棱形格网点高程内插其中心点(\cdot)的高程. 同上可得

$$h_{12} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 h_{1_i} + \Delta_2. \quad (3)$$

经这一步内插, 棱形格网又变换为图 3 所示的正方形格网, 格网间距现在是

$$d_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} d_1. \quad (4)$$

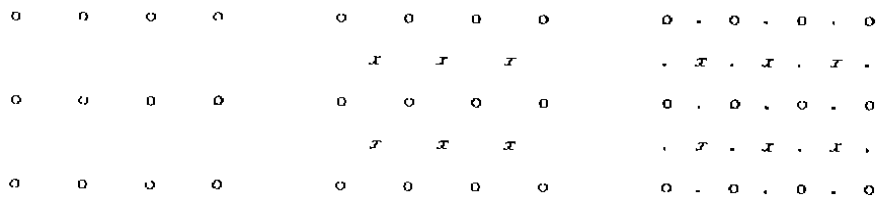


图 1 初级格网

图 2 第 1 级格网

图 3 第 2 级格网

这种随机内插的一个约束是在细分的后续阶段不改变先前计算出的点, 在每一步内插过程中, 格网点的高程均为已知值, 唯一的问题在于确定随机位移值 Δ . 在已有的文献中, 绝大部分中点位移技术均是用于模拟非真实世界中的地形, 所以评判其图形学应用的唯一标准便是视觉上的接受能力^[4]. 因此, 对 Δ 的选择只是考虑使内插点的高程增量满足 fBm 所需要的幂指数规律: 令格网间距的变化尺度为 γ^n (n 为迭代水平), 那么随机位移的方差为

$$V_{\Delta}^2 \propto \gamma^{2H}. \quad (5)$$

由(2)和(4)两式可知, $\gamma = 2^{-n/2}$. 所以, 文献[3, 6~9]等均直接采用了如下形式的随机位移模

型:

$$\Delta = \text{scale} \times 2^{-2H/2} \times \text{gauss}, \quad (6)$$

其中, scale 为位移大小调整因子, $\text{gauss} \sim N(0,1)$.

对于虚拟地形的生成, 参数 scale 和 H 的选择均是通过反复试验或凭已有的经验, 根据想要产生的地形形态人为给定. 而对于现实世界中的数据随机内插则必须继承真实采样自身对应的随机特性, 即由分形内插模拟的地形细节应接近实际情况, 至少模拟的微起伏不能超出可观测的尺度. 所以, 参数 scale 和 H 的选择应与原有数据的分形特征 H 和 σ 相吻合, 即应通过对实际地形数据的分析产生.

关于实际数据的保持特征分形内插, Yokoya 采用的如下模型^[9]:

$$\Delta_i = d_i^H \times \sigma \times \sqrt{1 - 2^{2H-2}} \times \text{gauss} \quad (7)$$

其中 i 为迭代水平. 该模型实际上是 Voss 推导的一维情况下对 fBm 的近似^[6]. 由式(1)可知, 如果仅由 h_{n1} 和 h_{n2} 两点内插其中点的高程 h_c , 那么有关系

$$h_c = \frac{1}{2}(h_{n1} + h_{n2}) + \Delta_c \quad (8)$$

根据 fBm 的要求, 中点与任一端点的高差应满足式(5). 由式(8)有

$$h_c - h_{n1} = \frac{1}{2}(h_{n2} + h_{n1}) + \Delta_c, \text{ 则 } V^2(h_c - h_{n1}) = \frac{1}{4}V^2(h_{n2} + h_{n1}) + V^2\Delta_c.$$

由式(5)可得

$$\begin{aligned} \left(\frac{d_0}{2}\right)^{2H} \times \sigma^2 &= \frac{1}{4}d_0^{2H} \times \sigma^2 + V^2\Delta_c, \\ \therefore V^2\Delta_c &= \left(\frac{d_0}{2}\right)^{2H} \times \sigma^2 - \frac{1}{4}d_0^{2H} \times \sigma^2 = d_0^{2H} \times \sigma^2 \times (1 - 2^{2H}) \end{aligned} \quad (9)$$

由此即可得式(7). 显然, 采用这一模型对二维以上的中点位移来说, 对 fBm 的近似不是局部稳态的. 将式(9)与式(1)相对应即可得出这一结论. 而由一个局部稳态的四邻域中点位移模型内插的点与任一相邻的格网点间的高差均应满足式(5). 由式(1)有

$$h_{n1} - h_{n1} = \frac{1}{4} \sum_{i=2}^4 (h_{n_i} - h_{n1}) + \Delta_1, \text{ 则 } V_{h_{n1}-h_{n1}}^2 = \frac{1}{16} \sum_{i=2}^4 V_{h_{n_i}-h_{n1}}^2 + V_{\Delta_1}^2,$$

$$\text{即} \quad \left(\frac{d_0}{\sqrt{2}}\right)^{2H} \times \sigma^2 = \frac{1}{16} [2d_0^{2H} \times \sigma^2 + (\sqrt{2}d_0)^{2H} \times \sigma^2] + V_{\Delta_1}^2,$$

$$\text{所以} \quad V_{\Delta_1}^2 = d_0^{2H} \times \sigma^2 \times (1 - 2^{H-3} - 2^{2H-4}). \quad (10)$$

同理, 可由式(3)和式(4)推出式(10)类似的结论:

$$V_{\Delta_2}^2 = d_0^{2H} \times \sigma^2 \times (1 - 2^{H-3} - 2^{2H-4}). \quad (11)$$

显然, 保持特征的局部稳态的四邻域中点位移模型应为

$$\Delta_i = d_i^H \times \sigma \times \sqrt{1 - 2^{H-3} - 2^{2H-4}} \times \text{gauss}, \quad (12)$$

比较式(7)和式(12), 有关系 $\sqrt{1 - 2^{2H-2}} < \sqrt{1 - 2^{H-3} - 2^{2H-4}}$.

可见, Yokoya 模型有平滑实际地形起伏程度的趋势. 显然, 用 Yokoya 模型来模拟地形细节将给人以对实际地面复杂情况错误的认识. 而局部稳态的内插模型则可以真正充分表达实际地形的复杂情况.

实际应用上述方法还应注意以下几点:

(1) 自适应动态内插机制 关于用 fBm 模拟自然地形的优点如表达的紧凑性和可以产生

任意详细程度的细节等已是人所共知^[3,4]。但同时,人们也注意到了 fBm 由于只有两个可调整的参数(H, σ)对于模拟不同类型地貌的灵活性很小。Yokoya 的研究表明,实际地形表面各个地方甚至一个区域的各个局部均具有不同的分形特征,而这种分形特征的变化从一个地方到另一个地方则是平滑的^[9],所以,Lai-Liang,Zhao 为了能同时显示不同类型的地貌如山地和平原,进行分形内插时便人为指定各个局部区域不同的分形特征值(H),从而达到对细节的有效控制^[6]。Yokoya 也利用从实际数据提取的各个局部区域的分形特征参与内插。这种基于对原始数据进行分形分析的内插方法,充分考虑了地形的局部特征而具备自适应性(adaptive)。同时,因内插的随机过程分形模型不是唯一的,其随局部地形起伏的不同而变化,所以,称这种内插为动态(dynamic)内插。

要进行自适应分形内插,首要的问题是提取局部分形特征值,困难在于确定局部区域(或称窗口)的大小。窗口太小,其分形性质可能很弱,使得 H 和 σ 不准确;而窗口过大,不利于充分反映实际地形各个局部区域的地形差别。笔者经反复试验认为窗口大小一般取最大有效尺度的两倍左右比较适宜。本文提取局部分形特征的窗口大小为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 。

(2)整体形状控制 对于虚拟地形造型,由于采用的初始数据点很有限,一般将这些点作为参数曲面(如 B-样条表面)的控制点,以便得到可调的形状控制。而对于实际地面重建来说,DTM 已经为地面的整体形状描述提供了足够的信息,可以直接对 TIN 进行三角形细分,也可以从 TIN 线性内插比较粗糙的栅格数据(栅格间距接近于数据采样的密度)作为四邻域中点细分的初始数据。作者的实验表明,直接进行三角形细分不可取。原因主要是:①TIN 的三角形分布和大小均无规律,不利于局部细节的自适应控制;②为了进行浓淡描绘计算每个三角形顶点的平均法线方向,要记录每一个细分三角形的顶点信息,将增加大量额外存储空间和处理时间。

(3)细节水平的自适应控制 由于面片中点位移方法的递归细分一般是在物空间进行,尽管难于将递归深度与最后的屏幕坐标联系起来,却可以和世界坐标系中的间距相联系。因此,只要开始确定好与计算机显示分辨率相匹配的物空间的细分数据间隔 d_i (或递归深度 i_0)和格网大小 N ,那么放大任何一个局部区域(窗口大小为 W),也可以很方便地计算出需要的细分数据间隔 d_i (或递归深度 i):

$$d_i = \frac{N \times d_0}{W} \times d_0 \quad \text{或} \quad i = \frac{N \times d_0}{W} \times i_0$$

d_i 与 i 之间存在关系: $d_i = d_{\text{int}} \times 2^{i-1}$, 其中, d_{int} 为原始 DTM 的格网间隔。

(4)其他应用 一方面,递归细分将粗糙的原始 DTM 加密并恢复了地形的微起伏细节,这好比对实际地形重新进行了更详细的测量。随机内插的 DTM 可以用于逼真显示的目的,也可以取代原有的 DTM 作为各种工程应用的基础。另外,前面的考虑都是针对地形表面这样一种高度场 $[x, y, H(x, y)]$ 。我们同样可以将云彩的分布或者水面的波纹用这一模型进行描述。比如,用 $H(x, y)$ 表示云层的厚度和颜色的亮度,便可产生动人的蓝天白云景象。将其作为地面仿真的背景则可改善计算机图象的视觉效果。

3 实验分析

我们的研究是为铁道部勘测设计院有关单位客观评价地形测绘成果的质量,为工程规划与设计提供形象直观的三维地形模型。实验选择一个山区地形,区域大小为 $700\text{m} \times 700\text{m}$ 。原



图 4 等高线地形图

度浓淡显示。

图 4 是实验地区的等高线地图,图 5 为直接由原始数据重建的三维图象,可见地形表面十分光滑。图 6(a)和(b)分别是用文献[9]的模型、式(7)和笔者提出的模型式(12)根据不同的局部分形特征值经细分后合成的图象。可见,用 Yokoya 模型内插的结果比较平滑;而用笔者提出的模型则重建了比较好的地形细节,准确反应了实际地形特征。而图 7 是整个区域都用唯一的分形特征值基于式(12)经细分后产生的图象。显然,平坦地区重建的几何纹理显得过分粗糙而与实际地形不符。



图 5 直接用原始数据产生的图象

始数据是按 1:2000 比例尺,间距一般为 10m 采集的离散点数模。通过建立随机三角形数字地面模型(TIN-DTM),进而由双线性内插间距为 20m 的正方形格网,格网大小为 32×32 (point)。通过将栅格点连成三角网并采用简单的 Phong 光照模型和 Z-Buffer 消隐以及 Gouraud 着色算法^[10]产生三维地面模型的灰



(a) 用 yokoya 模型合成的图象 (b) 由本文的模型合成的图象

图 6 自适应分形内插的结果

图 7 整个地形使用一个分形特征值的结果

4 结论

经上述分析和试验证实,可得出以下三点结论:

(1) 由于对实际数据进行分形内插需要保持与真实地形相一致,分形特征值必须从实际数据中提取,并应顾及不同区域之间分形特征的变化。所以,自适应分形内插对真实地形重建是十分必要的。

(2) 对实际地形重建,二维中点位移不宜简单采用一维中点位移模型。而我们提出的局部稳态的四邻中点位移模型可重建视觉上和精度上均可接受的地形细节。

(3) 文中介绍的重建图象均是在 Compaq 386/33+VGA 上产生的,没有利用任何图形图象支持软件。从分形细分到描绘成灰度图象,一般只需 2~3min,可见其速度是令人满意的。

参 考 文 献

- 1 朱庆,张庆瑜. 基于摄影测量的逼真地形显示. 铁道学报,1995.(待发表)
- 2 朱庆,张庆瑜. 基于分形的数字地形分析. 地理学报,1995.(待发表)
- 3 Fourier a, et al. Computer Rendering of Stochastic Models. CACM, 1982,25(6):37~384
- 4 Fourier A. Random Processes in Computer Graphics, State of the Art in Computer Graphics. New York; Springer-Verlag, 1991.
- 5 Lewis J P. Generalized Stochastic Subdivision. ACM Trans. On Graphics, 1987,6(3):167~190
- 6 Voss R F. Random Fractal Forgeries. [s.l.];Fundamental Algorithms for Computer Graphics. Springer-Verlag, 1985. 805~836
- 7 Saupe D. Algorithms for random fractals [s.l.]; The Science of Fractal Images, Springer-Verlag, 1988. 71~136
- 8 Zhao Nai-Liang, et al. Natural Phenomena Simulation Based on Stochastic Spline Approximation. [s.l.]; Proceedings of the Third International Conference on CAD/Computer Graphics, Beijing 1993. 41~44
- 9 Yokoya, et al. Fractal-Based Analysis and Interpolation of 3D Natural Surface Shapes and Their Application to Terrain Modeling. CVGIP, 1989,46:284~302
- 10 Dennis A R. An Overview of Rendering Techniques. Computer & Graphics, 1990, 14(1): 101~115

The Digital Terrain Reconstruction Based on Adaptive Fractal Interpolation

Zhu Qing Zhang Qinghang

(Department of Civil Engineering, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: To model the lost small terrain details during surveying and mapping is very important to realistic terrain reconstruction. This paper describes a fast adaptive fractal interpolation technique based on the fractal features extracted from the raw DTM. Since the stochastic midpoint displacement model introduced by the authors is a locally stationary approximation to fBm, it can produce more visual acceptable and more accurate geometric texture details.

Key words: digital terrain reconstruction, fractal, stochastic midpoint displacement, adaptive interpolation

(责任编辑 王凤翔)