

基于分形超纹理模型的数字 全息图像生成方法*

曹汉强 朱光喜 朱耀庭

(华中理工大学 电信系 武汉 430074)

提要 提出了一种基于分形超纹理模型的自然景物模拟方法, 并采用改进的光线跟踪绘制算法生成自然景物图像, 实验证明这种基于分形超纹理模型的自然景物模拟方法既能有效地生成具有真实感的自然景物图像, 还能生成数字全息图像, 这种数字全息图在激光防伪领域有着良好的应用前景。

关键词 分形, 分形超纹理, 图像生成, 数字全息图

1 引 言

进入 90 年代以来, 我国的激光全息产业迅速发展, 全息防伪标识的应用正在不断扩大。全息制品的质量除受原材料品质和后道加工过程的影响外, 主要取决于全息原版技术的高低, 因此开发相应的全息高水准原版就显得尤为重要。

分形几何学是关于自然形态的几何学^[1], 它为自然界许多复杂景物的模拟提供了十分卓越的工具。相对于欧式几何而言, 分形几何具有的最重要特性就是在任何放大比例下的近似不变性, 这种统计意义上的自相似性正是许多自然景物所具有的根本特征, A. Pentland 证明了多数自然景物具有分形特点^[2], 因此, 分形造型技术, 尤其是随机分形几何已被广泛地用来模拟各种自然景物。

自然界的自相似性, 主要表现为同一规则在不同层次间的连续实现和反复重演, 即局部结构上显示为整体结构的缩影, 或者是发展中的某一阶段显示为整个过程的缩影, 前者可称为“结构全息”, 后者可称为“时间全息”, 我们将通过控制分形参数生成的一系列具有内在联系而又有区别的图像称为分形数字全息图。通过计算机系统控制光学系统中的浮雕光刻, 可以实现数字全息图像到合成全息图的转换, 制成全息图片, 应用于激光全息防伪。

本文提出了分形超纹理模型, 将具有分形特性的函数作为密度调制函数来构造物体的密度分布, 成功地模拟了云彩、气流和大理石等自然景物图像; 并在此基础上研究了分形数字全息图像的生成方法。由于这种数字全息图像生成具有较好的参数可控制性, 在全息防伪领域有着良好的应用前景。

* 国家自然科学基金资助项目(69672014)。

2 分形超纹理模型

2.1 分形超纹理模型

分形几何学能为自然界中存在的各种景物提供逼真的描述,这些景物形态复杂、不规则,而且显得十分粗糙,使得采用传统的几何工具进行描述遇到了极大的困难,我们将分形理论与超纹理模型结合起来,提出了分形超纹理模型,能有效地生成具有真实感的自然景物图像和数字全息图。

定义分形超纹理模型如下

$$FH(D(x), x) = D(f_n(\cdots(f_2(f_1(f_0(x))))\cdots)), \quad x \in R^3 \quad (1)$$

其中 f_i 为具有分形特性的密度调制函数。该式表明物体密度分布受 f_i 控制,当我们以多个不同的密度调制函数对形体连续进行调制时,按分形的意义而言,即在不同尺度下按同一规则迭加时,产生的形体将具有分形特性。

在具体应用中,采用下面几种密度调制函数:

1) 带限噪声函数。对于 R^3 中的任一点 x , 求出其 8 个相邻点的伪随机梯度值,并加权相加,就可得到该点的带限噪声函数值 $\text{noise}(x)$, $\text{noise}(x)$ 具有可控特性。

2) 扰动函数。扰动函数是以带限噪声函数为基础,通过迭代产生的具有分形特性的函数,它在构造更高层次的密度调制函数方面有很大的实际效用。扰动函数定义为

$$\sum_i \text{abs} \left[\frac{1}{2^i f} \text{noise}(2^i \times f \times x) \right] \quad (2)$$

此处的 f 为基频,在积分的每一步,加权幅值与频率成反比,因而扰动函数具有 $1/f^\beta$ 的分形特性,利用该扰动函数来控制空间中各点的密度,实现分形超纹理图像的生成。

3) 异向纹理函数。马尔可夫随机场对各向异性纹理的描述比较直观方便,我们考虑这样一种条件概率分布函数(马尔可夫链)

$$P(G(i,j)) = n/N(i,j) = \frac{1 - \exp(-T)}{1 - \exp(-MT)} \exp(-nT) \quad n = 0, 1, M - 1 \quad (3)$$

其中 $G(i,j)$ 表示点 (i,j) 的灰度值, $G(i,j) = 0, 1, \cdots, M - 1$, M 为图像的灰度级总数; $N(i,j)$ 表示点 (i,j) 的邻域分布; T 为依赖于邻域分布的参数,当考虑 8 邻域分布的情况时,

$$T = a + a_{11}(G_{i,j-1} + G_{i,j+1}) + a_{12}(G_{i-1,j} + G_{i+1,j}) + a_{21}(G_{i-1,j-1} + G_{i+1,j+1}) + a_{22}(G_{i-1,j+1} + G_{i+1,j-1}) \quad (4)$$

式中 $a, a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 为控制纹理方向的参数,调制这些参数会得到不同的纹理,特别是 $a_{i1} \neq a_{i2}$ ($i = 1, 2$) 时,将产生各向异性的纹理。

2.2 分形超纹理的渲染

跟任何几何形体的图像生成一样,分形超纹理图像的生成同样涉及造型和绘制两大步骤。就分形几何形体的绘制而言,光线跟踪渲染算法仍然是目前广泛使用的绘制算法。

光线跟踪法的基本过程如下:对成像平面的每个像素点投射一条射线,该射线在三维空间内向前行进,若射线始终没有遇到任何物体,则此像素为背景颜色;否则以碰到物体表面的颜色为此像素的基色,再进行润色处理得到此像素的颜色明暗度,当存在反射光和透射光时,这些射线也采用上述方法继续跟踪,直到达到跟踪深度才停止。

由上所述可以得知光线跟踪法的射线会随跟踪深度呈几何级数的增长,计算时间较长,为此我们根据分形超纹理模型的特点,按如下的改进算法进行绘制:设进入物体空间和从物体空

间出来的两个交点对应的射线参数为 μ_0 和 μ_1 , 从射线上的 μ_0 出发, 由前至后按 $\Delta\mu$ 步进叠加, 直至光线到达 μ_1 。具体过程是, 对于射线上的每个点 x , 首先计算其密度调制函数 $f(x)$, 如果 $0 < f(x) < 1$, 则计算其邻域梯度值, 并把它作为漫反射和镜面反射的法向矢量, 进行新的细分和反射计算; 其次根据视觉特性校正不透明度, 为使渲染与分辨率无关, 令不透明度是密度和步进值的函数, 一旦步进过程中不透明度达到预定值, 则即使射线尚未到达穿出点, 我们也停止这条射线上的后续计算, 这样可以节省大量的计算时间。对一幅 $n \times n$ 图像, 约需 $O(n^3)$ 次操作, 因此当图像分辨率提高时, 计算时间将大大增加。可见分形超纹理的渲染是非常费时的, 由于 $f(x)$ 的求解在每个样点上独立的, 可采用并行或分布式技术来提高绘制速度。

2.3 自然景物模拟实验

采用分形超纹理模型, 成功地模拟了云彩、气流和大理石等自然景物。云彩的形状是用基于扰动函数的密度调制函数来构造的, 它主要是通过视觉上模拟扰动的方式来实现, 实验结果如图 1(a) 所示; 气流的模拟则不同, 为了直观地再现气流翻滚、对流现象, 我们在扰动函数中增加了一个扰动变量来控制空气翻滚的旋转程度, 实验结果如图 1(b) 所示; 令密度调制函数为对三角函数扰动时, 能够产生出大理石的纹理, 实验结果如图 1(c) 所示。

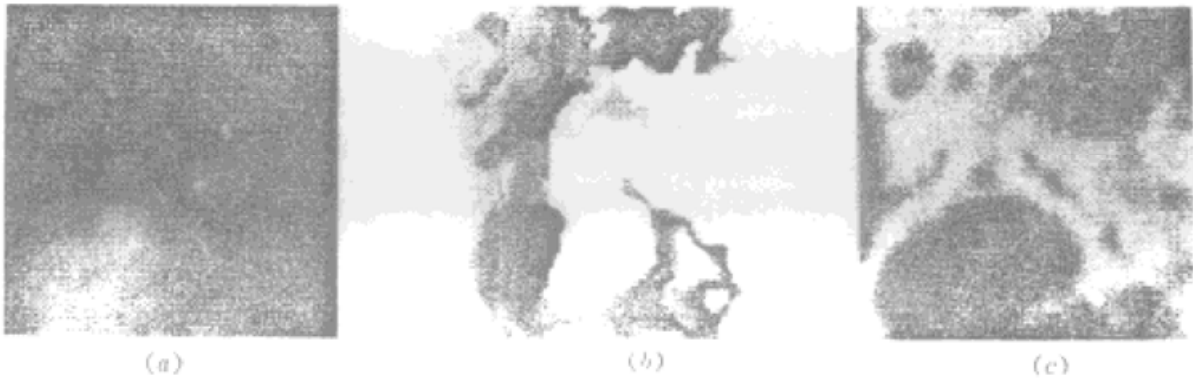


图 1 云彩(a)、气流(b)和大理石(c)的模拟图像

Fig. 1 Simulation of natural scenes based on the fractal-hypertexture model

3 数字全息图的生成方法

数字全息图是由计算机生成的一种序列图像, 这种数字全息图无需象计算光学全息那样计算整个全息图的光场分布, 而是将计算工作集中于图像构造和渲染绘制, 从而可以根据人的需要制作全息图像序列。数字全息图不依赖物体的实际存在, 而是把物体的数学描述输入计算机处理后制成全息图像序列, 它比一般的光全息有很多独特的优点: 抗外界干扰能力强、便于修改、不易仿制等。通过计算机系统直接控制光学系统中的浮雕光刻可以实现全息图像序列到合成全息图的转换, 制成全息图片, 形成全息防伪商标, 应用于激光全息防伪。

主要采用下面两种方法生成数字全息图:

(1) 随时间变化按一定的路径移动渲染点

将物体空间中的点随时间变化进行运动后, 再计算其扰动值, 并由此扰动值映射至该点的密度值。

(2) 随时间变化改变扰动的程度

通过控制物体空间中一点的扰动程度, 并根据扰动的结果校正该点的坐标, 再由坐标映射至该点的密度值或颜色值。

以云彩的变化为例。设云体中的点随时间推移逐渐远离观测者, 如 $x_{n+1}(t) = 2x_n(t)$, ($t = 0, 1, \dots, N$) 为时间序列, 当对云体中的点进行扰动后, 返回的扰动值确定了该点的密度值, 此时每点的密度值随时间的变化而有规律地变化, 实验结果如图 2, 这个全息图序列模拟了自然界中云彩由聚到散, 发生漂移的变幻过程。图 3 的全息图序列则模拟了大理石形成过程中的受热融化、变形到冷却成形的过程。

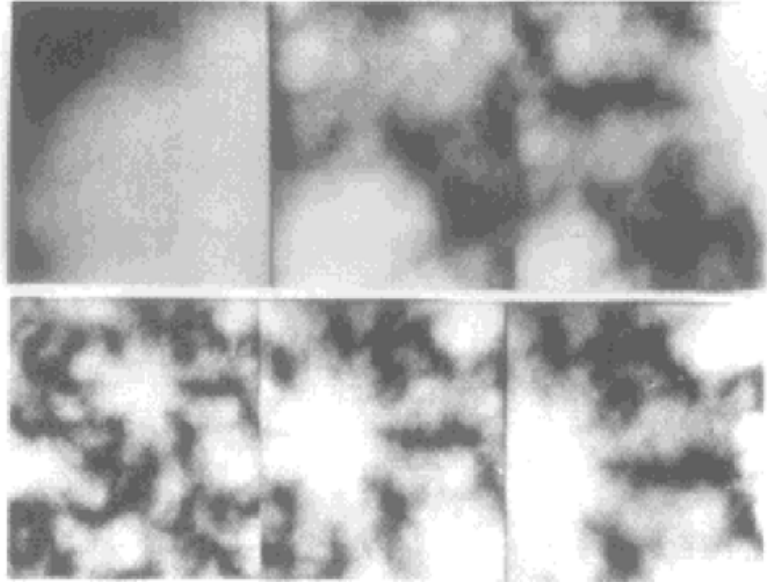


图 2 云彩的飘散过程

Fig. 2 Simulation of cloud waving process

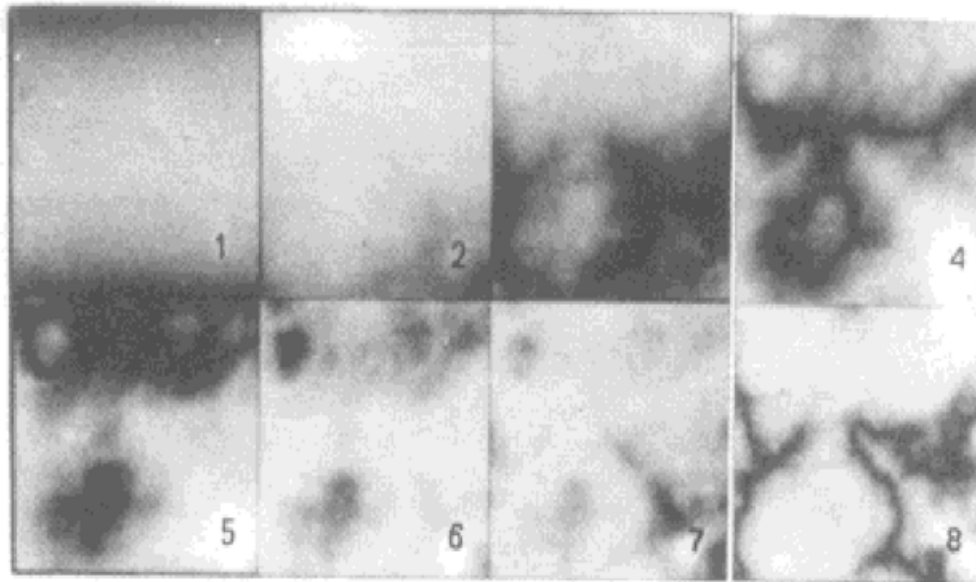


图 3 大理石的融化形成过程

Fig. 3 Simulation of marble forming process

计算机分形数字全息图的生成系统是采用 visual C 5.0 在 Pentium 586 微机上完成的, 分形数字全息图像到防伪标识的制作是采用 IBM Aptive 计算机控制的光束刻制多重衍射光栅 (MDG 及像素全息术) 系统实现的, 这类全息防伪标识比普通模压全息图有着更强的防伪功能。由于分形数字全息图为激光全息防伪提供了高水准的全息原版, 已应用于许多重要的防伪领域。

参 考 文 献

- 1 B. B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*, San Francisco. CA:Freeman 1982
- 2 B. B. Mandelbrot. Fractional brownian motions, fractional noise and application. *SIMA Review*, 1968, **10**(4): 422~ 437
- 3 A. P. Pentland. Fractal-based description of natural scenes. *IEEE Tran. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 1984, **PAMI-6**(6): 661~ 674
- 4 A. Fournier, D. Fussel. Computer rendering of stochastic models. *Comm. of the ACM*, 1982, **25**(6): 371 ~ 384
- 5 H. O. Peitgen, D. Saupe. *The Science of Fractal Image*. Springer Verlag, 1988
- 6 Zhu Fang, Zhu Guangxi, Zhu Yaoting. Hypertexture pattern generation based on band-limited noise and disturbing functions. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.* (华中理工大学学报), 1996, **24**(8): 24~ 27

A Method Based On a Fractal-Hypertexture Model for Digital Hologram Synthesis

Cao Hanqiang Zhu Guangxi Zhu Yaoting

(*Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

Abstract In this paper a fractal-hypertexture model combining the thought of hypertexture with fractal theory is presented. The synthesis method of natural scene images using noise and turbulence functions with fractal apperance is given. Rendering is accomplished by ray tracing. Then, we are allowed to render the ditigal holograms by controlling some parameters. The results indicate that this method is quite efficient for simulation of natural scenes.

Key words fractal, fractal-hypertexture, image synthesis, digital holograms