

# 一种新的兼具自动性和可控性的地形生成方法<sup>\*</sup>

李广鑫 丁振国 周利华

(西安电子科技大学多媒体研究所 西安710071)

**摘要** 文章给出了一种面向虚拟环境的地形自动生成新方法。首先引入 Perlin 噪声作为地形高度生成器的基本模型,通过控制噪声的幅度和频率,生成形态各异的地形特征模板,然后从分形理论中的 fBM 数学模型出发,使用中点位移法对特征模板进行迭代处理,进一步生成丰富的地形细节。该方法的主要优点是自动性和可控性的结合,一方面根据设定的参数可以自动生成特征模板,以少量的数据来表征地形大致外貌,另一方面通过控制分形迭代参数,可以生成任意层次的地形细节。实践证明,用该方法在普通 PC 平台上能够生成真实感较强的地形,是一种在虚拟环境中自动产生地形的实用方法。

**关键词** 地形生成,地形特征模板,Perlin 噪声,中点位移法,虚拟环境

## A New Method with Automaticity and Controllability for Terrain Generation

LI Guang-Xin DING Zhen-Guo ZHOU Li-Hua

(Institute of Multimedia Technology, Xidian University, Xi'an 710071)

**Abstract** The paper presents a new method to generate terrain automatically in virtual environment. Perlin noise is introduced as the generator of feature height of terrain. By controlling the frequency and amplitude of Perlin noise, we can get diversified terrain feature height field, which is called TFT (Terrain Feature Template). Then, MPD (Middle Point Displacement) method, which is based on mathematical model of fBM, is used to treat Feature Template, which results in more terrain detail. The main advantage of the method is the combination of automaticity and controllability. On one hand, diversified Terrain Feature Templates can be automatically generated with various Perlin control parameters' value, to describe the main appearance of terrain. On the other, arbitrary level detail can be produced with various Fractal iteration parameters' value. Our results show that our method is practical in virtual environment and realistic terrain can be generated on general PC platform.

**Keywords** Terrain generation, Terrain feature template, Perlin noise, fBM, MPD, Virtual environment

## 1 前言

自然景观的模拟一直是图形学中富有挑战性的研究领域。作为自然景观中最为常见的形式之一的地形,其生成方法的研究有着重要的意义。近些年来关于3D地形模拟的主要方法,按照是否基于真实数据可以大致分为2类。第一类是基于真实地形数据的地形生成及实时显示技术: Boris 等<sup>[1]</sup>使用DTM数据直接生成地形; Florian 等<sup>[2]</sup>使用了LOD模型来简化地形数据并提高显示速度; Hoppe<sup>[3]</sup>提出PM(累进网格)法用于地形网格的压缩与累进传输。这类方法的特点是处理数据量大,需要使用较为复杂的压缩算法和LOD算法来提高显示速度。第二类是基于数据拟合和分形理论的地形仿真技术: Gardner<sup>[4]</sup>和 Alok 等人<sup>[5]</sup>分别使用曲面来拟合地形; Mandelbrot<sup>[6]</sup>、Fournier<sup>[7]</sup>、Miller<sup>[8]</sup>和 Musgrave 等<sup>[9]</sup>在生成地形时都使用了分形技术。这类方法的特点是不使用真实的地形数据,而是通过曲面插值或分形插值来生成地形高度场。

在虚拟战场、三维游戏等一些虚拟环境中,存在着大量的地形,由于地形的随机性和复杂性,如何构造这些地形是一个至关重要的问题。如果采用传统的方式,以人工几何造型的方式进行构造,那么面对动辄数万顶点的地形网格,一方面编辑工作量过于繁重,另一方面很难控制千变万化的地形形态。如果从实测地形数据中抽取数据直接构造地形,虽然地形不失真实性,但地形数据获取渠道有限,代价昂贵,并且可控性差,特别是对于大多对地学精度要求不高的虚拟环境而言,并

不是一种廉价而灵活的方法。如果单纯使用分形生成方法,却又不能对地形的大体轮廓进行有效的控制。

针对该问题,文章对地形的自动生成技术进行了研究,给出了一种兼具自动性和可控性的地形生成方法。将地形的生成过程分为两个阶段:在第一阶段自动生成地形模板,用来刻画地形的特征轮廓,在该阶段引入 Perlin 噪声来构造高度场;在第二阶段使用分形技术对地形模板进行处理,增加多层次的地形细节,最终生成真实感较强的地形。该方法的优点在于:

(1)通过控制 Perlin 噪声的频率和幅度,可以构造出形态多样的地形模板,从而以少量的数据从宏观上描述地形的特征轮廓,并且其生成过程是自动的。

(2)通过控制分形维数、迭代次数、幅度系数,使用分形技术可以给地形模板增加任意层次的地形细节,大大增加了地形的真实感。

(3)两个阶段的结合,使得地形的产生成为一个自动、灵活而可控的过程,通过对几个参数的控制,就可以得到形态各异细节丰富的地形数据,并能方便地应用到虚拟环境中去。

## 2 地形模板的生成

### 2.1 Perlin 噪声函数的构造

Perlin 噪声<sup>[10,11]</sup>是一种平滑伪噪声,可用于产生过程纹理、人物自然动作等。这里我们构造2维 Perlin 噪声函数。首先要构造一个梯度。如图1所示,噪声控制点阵列中有  $m \times n$  个

<sup>\*</sup> 本课题得到十五国防科技(电子)预研项目资助(413160501)。李广鑫 博士研究生,主要研究领域为计算机图形、虚拟现实、多媒体技术、数控。丁振国 教授,主要研究领域为网络安全,网络多媒体技术,远程教育技术。周利华 教授,博士生导师,主要研究领域为多媒体技术、网络安全、数控、高精度大幅面扫描仪。

控制点,每一个控制点  $C$  都有一个梯度  $G$ ,其方向和长度随机生成,一般情况下将长度的最大值设定为单位长度。尽管梯度是随机的,但其生成过程是一次性的,噪声函数对于相同的输入总是返回相同的噪声值。

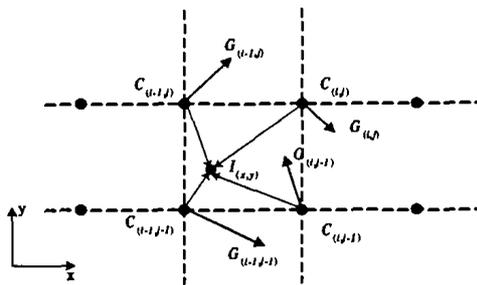


图1 Perlin 噪声

设噪声函数为  $PerlinN(x,y)$ ,其输入参数为点  $I(x,y)$  的坐标值。假设  $I(x,y)$  落在四个相邻噪声控制点  $C_{(i-1,j-1)}, C_{(i,j-1)}, C_{(i-1,j)}$  和  $C_{(i,j)}$  所围成的区域内,其中  $i,j$  为整数,并且  $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ 。首先计算从每个相邻控制点到  $I(x,y)$  的向量与该控制点的梯度的点积:

$$d_1 = \overrightarrow{C_{(i-1,j-1)}I_{x,y}} \cdot G_{(i-1,j-1)}, d_2 = \overrightarrow{C_{(i,j-1)}I_{x,y}} \cdot G_{(i,j-1)},$$

$$d_3 = \overrightarrow{C_{(i-1,j)}I_{x,y}} \cdot G_{(i-1,j)}, d_4 = \overrightarrow{C_{(i,j)}I_{x,y}} \cdot G_{(i,j)} \quad (1)$$

设  $u$  和  $w$  分别为  $x$  和  $y$  的小数部分,在  $x$  方向上对  $d_1$  和  $d_2, d_3$  和  $d_4$  分别进行三次调和插值:

$$s_1 = d_1 - (3u^2 - 2u^3) \times (d_1 - d_2),$$

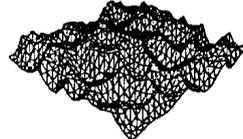
$$s_2 = d_3 - (3u^2 - 2u^3) \times (d_3 - d_4) \quad (2)$$



a 比较平坦的地形



b 起伏较大的地形



c 山峰丛生的地形

图2 梯度场映射和形态各异的地形线框图

最后在  $y$  方向上对  $s_1$  和  $s_2$  进行三次调和插值,就得到了二维 Perlin 噪声函数的表达式:

$$PerlinN(x,y) = s_1 - (3w^2 - 2w^3) \times (s_1 - s_2) \quad (3)$$

### 2.2 用 Perlin 噪声构造地形模板

地形的构造一般基于一个矩形的地形区域。这里我们使用一个五元组  $Area(Base, Width, Col, Long, Row)$  来描述一个矩形地形区域。其中  $Base$  为基准点,  $Width$  和  $Col$  分别为  $x$  方向上的宽度和离散网格数,  $Long$  和  $Row$  分别为在  $y$  方向上的长度和离散网格数。根据五元组中给出的参数,这里对地形区域进行均匀网格划分,每个网格点  $I_{i,j}$  的  $x$  和  $y$  坐标值都可以确切地计算出来,而  $z$  坐标值用于反映地形的高度场。

设梯度场的长宽都为整数  $GradLen$ ,在使用 Perlin 噪声计算地形区域的高度场时,首先要将地形区域向梯度场进行映射。设  $mod$  为取余函数,则网格点  $I_{i,j}$  的映射结果为:

$$I'_{i,j} = (x', y') = mod(I_{i,j}, GradLen) = (mod(x, GradLen), mod(y, GradLen)) \quad (4)$$

为了丰富生成的地形模板的形态,这里给 Perlin 噪声加上一个频率系数  $Freq$  和幅度  $Ampl$ ,结合式(4),则高度场计算公式为:

$$Terrain(I_{i,j}) = Base \cdot Z + (Ampl \cdot PerlinN(mod(2^{Freq} \cdot I_{i,j}, GradLen))) \quad (5)$$

$Freq$  实际上控制了地形区域向同一梯度场映射的重复频率,  $Ampl$  用于缩放地形高度,这些控制参数使得产生的地形能够呈现出丰富多样的形态,图2. a~2. c 给出了在同一地形区域上用不同频率和幅度得到的地形模板高度场。

## 3 增加地形细节

通过控制参数,用 Perlin 噪声可以产生不同形态的地形模板,用以大致描述地形轮廓特征,比如地形的幅度,起伏频率等。在一些虚拟环境中,比如虚拟飞行,大多情况下视点离地形有较远的距离,对地形细节没有过多要求,这种情况下可以将地形模板数据直接应用到虚拟环境中去,使用纹理映射技术增加地形的视觉真实感,也可以使用凹凸映射技术增加地形视觉细节,从而得到比较满意的效果。但对于一些对地形细节要求较高的虚拟系统,比如地形漫游,虚拟战场等,使用地形模板得到的模型就显得较为简单。这里我们从分形技术出发,使用中点位移迭代法给地形模板增加地形细节,并使用分形维数、幅度系数和迭代次数来控制地形细节的特征。

### 3.1 分形技术

在传统的几何造型技术中认为,物体都是由一些可以用确定性的数学函数描述的光滑曲面组成,其中最常用的是可用线性函数描述的多边形面,另外,使用由 Bezier 或 B-样条曲面定义的曲面片还可以使得造型过程变得灵活方便。这种造型技术广泛地应用在 CAD, CAM 等领域。但是,对于自然界中一些复杂而极不规则的自然景观,如地形、树木、流水等,单纯地使用传统的几何造型技术则显得困难重重。Mandelbrot 于1975年提出了 Fractal(分形)的概念,其主要特征是统

计意义上的自相似性和分形维数,其中分形维数可用于度量复杂图形的不规则程度和填充空间的能力,一般情况下一个复杂研究对象的分形维数大于其拓扑维数。分形的出现为研究一些不连续并难以用传统特征长度度量的图形(如海岸线, Koch 曲线等)提供了有力的理论基础,同时也为自然景观的模拟提供了新的思路。Mandelbrot 在文[6]中提出了基于一维高斯随机过程的 fBM(分形布朗运动)模型,可以用于生成多种复杂而自相似的图形。Fournier 等[7]对 fBM 模型进行了简化,提出了中点位移法,给出了 Triangle 子分和 Square 子分两种迭代方法,将计算复杂度从  $O(N \log N)$  降为线性。Miller[8]中发展了 Diamond-Square 子分迭代法,提出了 Square-Square 法。这些方法都可以用于地形模拟。

### 3.2 中点位移法

中点位移法的特点是计算简单,容易实现,数据存储灵活。对于前面生成的地形模板来说,反映地形起伏分布等特征的数据已经存在,需要增加的是地形细节部分。这里使用 Diamond-Square 子分迭代法,图3简单示意了迭代过程。

在图3. a 中,四个顶点 ABCD 围成一个方形,四个顶点的高度值( $z$  值)为已知。在每一次迭代过程中都要进行两个阶段的处理: Diamond 阶段和 Square 阶段。

在 Diamond 阶段,首先求方形 ABCD 的中点的高度值:

$$M = (A + B + C + D) / 4 + disp(\epsilon) \quad (6)$$

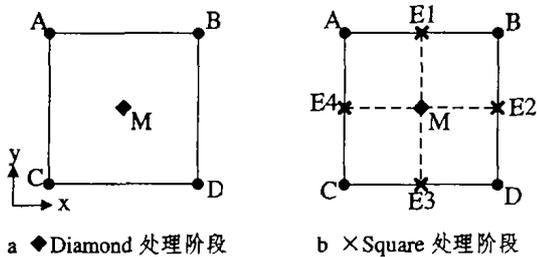


图3 Diamond-Square 迭代过程

式中,中点的高度值为 ABCD 四个顶点高度值的均值加上一个扰动量,该扰动量为符合高斯分布的随机数。Fournier<sup>[7]</sup>将高斯随机数的数学期望取为0,标准差取为1,这里设高斯随机数产生函数为 Gauss(),则对应的扰动量为:

$$disp() = Gauss() \times k \times 2^{-i} \quad (7)$$

其中  $i$  为当前的迭代次数; $k$  为幅度系数; $h$  被 Fournier 称为“决定‘分形维数’的参数”。而 Miller<sup>[8]</sup>认为,扰动量是一个符合高斯分布的随机变量,其标准差为:

$$S = k \times 2^{-i} \quad (8)$$

其中的  $i$  和  $k$  与式(7)中的意义相同; $h$  被 Miller 直接称为“分形维数”。Musgrave<sup>[9]</sup>认为,式(7)和式(8)中的  $h$  与分形维数  $D$  之间的关系为  $h = 3 - D$ 。这里,我们结合 Fournier 和 Musgrave 的思想,使用下面的公式来计算扰动量:

$$disp() = Gauss() \times k \times 2^{-i(3-D)} \quad (9)$$

一般情况下, $h$  在  $[0, 1]$  之间取值,对应地分形维数  $D$  的取值区间为  $[2.0, 3.0]$ 。当分形维数越接近3.0时,产生的地形越粗糙,当分形维数越接近2.0,产生的地形越平坦。

在接下来的 Square 阶段,求方形四条边各自中点的高度值:

$$\begin{aligned} E1 &= (A+B)/2 + disp() \\ E2 &= (B+D)/2 + disp() \\ E3 &= (C+D)/2 + disp() \\ E4 &= (A+C)/2 + disp() \end{aligned} \quad (10)$$

公式中的随机扰动量的产生方法与式(6)中的相同。

完成 Diamond 和 Square 处理,就完成了迭代过程,也就为地形模板增加了一个层次的细节。理论上可以进行任意次的迭代,从而生成任意层次的地形细节。

#### 4 模拟结果与分析

在生成地形的试验中,我们使用的地形区域的长宽尺寸为  $128 \times 128$ ,长宽方向上的原始离散点数为  $32 \times 32$ ,在分形迭代过程中离散点数会随着迭代次数增加。为了简要而较清楚地展示生成的地形的形态,在渲染过程中使用了简单的 Phong 光照模型,光源中只设定环境光和漫反射光成分,而没有镜面光。光照模型使用 Vertex Shader 程序实现,该 Shader 程序执行于 GPU 而非 CPU 中,所以渲染速度较快。

在使用 Perlin 噪声生成地形模板时,使用的梯度场的噪声控制点数为  $256 \times 256$ 。通过取不同的频率和幅度,可以得到不同形态的地形高度场模板。图4给出了不同频率和幅度所得到的地形模板的光照渲染图,其中图4. a 中频率  $Freq = 4$ ,幅度  $Ampl = 0.3$ ,图4. b 中频率  $Freq = 8$ ,幅度  $Ampl = 0.1$ 。频率和幅度根据应用的具体情况进行选取。如果地形区域的面积较大,或者希望地形的起伏密度较大,或者地形区域的网格划分密度大,可以选取较大的频率值,反之取较小值。如果希望地形高度差较大,或者地形区域的面积较大,可以选取较大的幅度,反之取较小值。

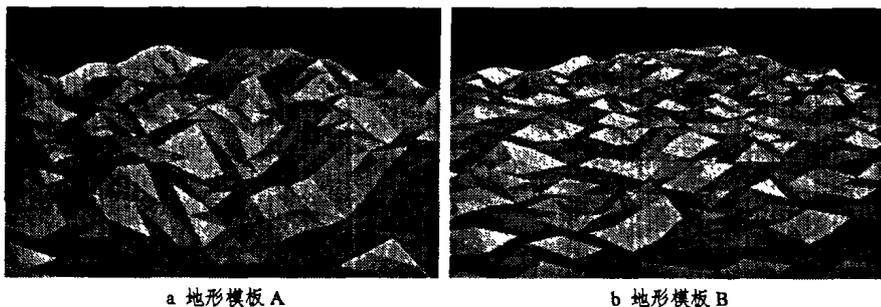


图4 Perlin 噪声产生的地形模板

从图4中可以看出,使用 Perlin 噪声产生的地形模板已经可以描述地形的大致轮廓,并且  $32 \times 32$  的离散网格所对应的存储数据量也很小。接下来使用中点位移法对地形模板进行分形迭代处理,增加地形的多层次细节,从而使得地形从一个简单而粗糙的状态,转变为一个宏观轮廓与地形模板相同而细节又十分丰富的真实感很强的状态。

图5给出了对模板迭代处理后得到的地形,从图中可以看出,对比现实世界的地形,本文给出的方法所得到的地形比较真实。

在迭代过程中,使用分形维数  $D$ 、幅度系数  $k$  和迭代次数  $i$  来控制地形的细节。图5. a 和图5. b 分别为对图4中的地形模板 A 和 B 迭代处理后得到的结果,其中  $k = 1.5, i = 4, D = 2.3$ 。图5. c 和图5. d 分别为  $D = 2.1$  和  $D = 2.6$  时迭代模板 A 得到的地形,从图中可以看出,分形维数越大,细节越丰富,地形显得越粗糙。在生成较大面积地形,或者地形的高度差较大

时,可以取较大的分形维数值。

迭代次数可根据地形模板的长宽尺寸、长宽方向上的网格点数目来确定。长宽尺寸越大,相邻网格点的间距越大,需要较多层次的地形细节来填充,可以增多迭代次数;长宽方向上的网格点数目越多,相邻网格点的间距越小,需要较少的地形细节来填充,可以取较少的迭代次数。另外,计算时间和内存占用空间也是取定迭代次数的考虑因素之一。依据试验和经验,一般情况下迭代2~8次较为合适。图5. e 给出了迭代2次得到的结果,相对于迭代4次的图5. d 明显缺少层次细节。

幅度系数  $k$  对生成的地形也有较大的影响。如图5. f 所示,将  $k$  值增大一倍,地形相对于图5. d 明显变得粗糙。所以,在使用分形技术产生地形的过程中,地形的粗糙程度由分形维数、迭代次数和幅度系数共同决定,迭代次数决定细节的层次,分形维数决定两个层次间细节的变化程度,而幅度系数描述了地形细节相对于地形模板高度的比例关系。

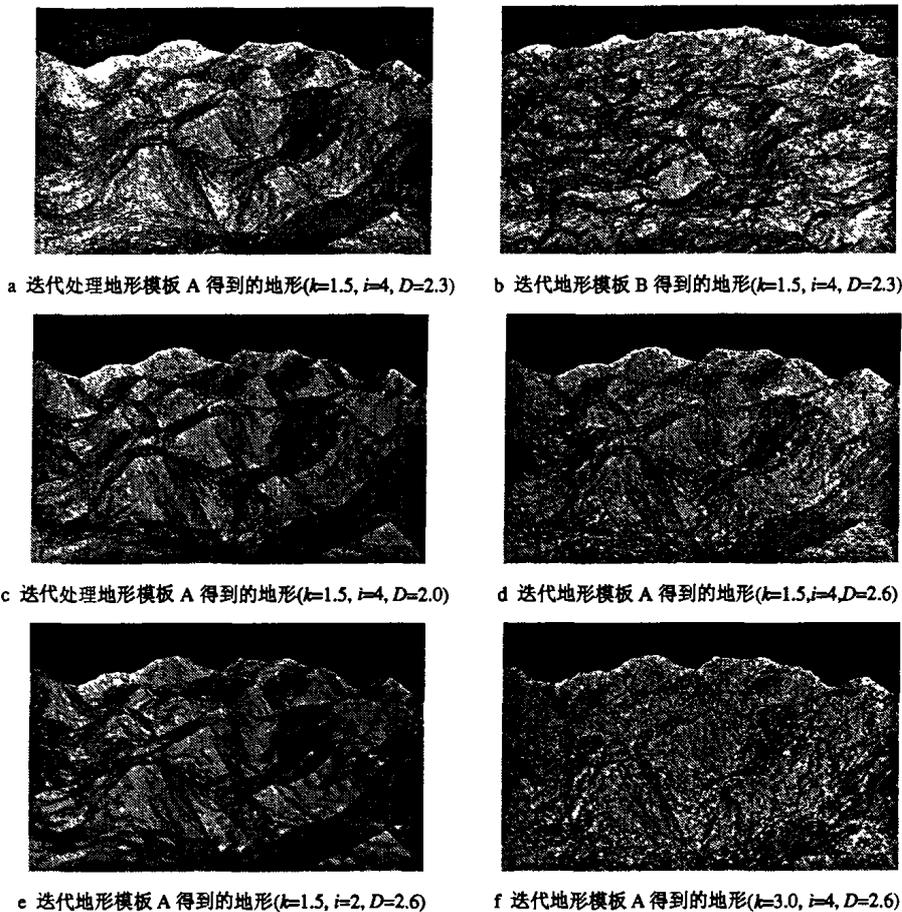


图5 对地形模板进行分形迭代得到的地形

表1 地形生成的相关数据

地形模板网格 32×32	地形模板 生成时间	迭代时间	顶点数/ 三角形数	渲染速度
迭代1次	0.0003(秒)	0.002(秒)	3,969/7,688	168.5 (帧/秒)
迭代2次	0.0003(秒)	0.024(秒)	15,625/ 3,0752	89.3 (帧/每秒)
迭代4次	0.0003(秒)	0.422(秒)	247,009/ 492,032	11.9 (帧/每秒)

(注:程序运行环境为 CPU P N-1.8G,内存256M DDR-333,显卡 NVIDIA NV31-64M(4ns DDR) AGP 4×)

表1给出了使用本文方法生成地形的时间效率。地形模板网格划分方案为32×32,由于网格顶点的数量少,因此模板的生成速度很快。在迭代过程中,分形维数和幅度系数的不同取值对计算时间的影响可以忽略不计,而迭代次数是影响计算时间的重要因素。由于地形生成阶段位于渲染阶段之前,因此生成时间毋需满足实时性要求,可以先将生成的地形数据以文件的方式保存,然后导入到虚拟环境中去,表1也给出了地形渲染的速度,当迭代次数为2时,地形的三角形为3,0752个,渲染帧速达到每秒89.3帧;当迭代次数为4时,地形的三角形数为492,032,渲染速度仍能达到每秒11.9帧。这里需要说明的是,渲染速度一方面取决于组成地形的元素的数量,另一方面还取决于图形硬件和系统平台。这里的模拟试验基于 PC 平台,CPU 为 P N-1.8G,图形显卡选用当前流行配置的 NVIDIA 中档显卡 GeForce Fx5600版。如果使用专业显卡或图形工作站,渲染速度将会大幅提高。

**结论** 文章给出了一种兼具自动性和可控性的地形生成方法。在地形生成的第一阶段,使用 Perlin 噪声来构造特征地形模板,通过控制噪声的幅度和频率,可以自动得到形态各异的地形的特征轮廓。在第二阶段,使用中点位移法对第一阶段

得到的地形模板进行迭代处理,通过设定不同的控制参数可以生成任意层次的地形细节,最终生成真实感较强的地形。实践证明,这种将 Perlin 噪声和分形技术相结合的方法所得到的地形比较真实,产生过程易于控制,可以作为一种自动生成方法应用到虚拟环境中去。今后的研究包括:(1)基于散列特征点的地形生成技术。(2)满足地质精度要求的地形自动生成技术。

### 参考文献

- 1 Rabnovich B, Gotsman C. Visualization of large terrains in resource-limited computing environments [J]. In: Proc. Visualization'97, 1997. 95~102
- 2 Schroder F, Robbath P. Managing the complexity of digital terrain modes[J]. Computer & Graphics, 1994, 18(6): 775~783
- 3 Hoppe H. Progressive Meshes[J]. In: Proc. SIGGRAPH'96, 99~108
- 4 Gardner G Y. Simulation of natural scenes using textured quadric surfaces[J]. Computer Graphics, 1984, 18(3): 11~20
- 5 Chaturvedi A K, Piegl L A. Procedural method for terrain surface interpolation. Computer & Graphics[J], 1996, 20(4): 541~566
- 6 Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature. Freeman and Company, 1977
- 7 Fournier A, Fussell D, Carpenter L. Computer Rendering of Stochastic Models. Comm. ACM, 1982, 25(6)
- 8 Miller G S P. The definition and rendering of terrain maps[J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 39~47
- 9 Musgrave F K, et al. The synthesis and rendering of eroded fractal terrains[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1989, 23(3): 41~50
- 10 Perlin K. An image synthesizer[J]. Computer Graphics, 1985, 19(3): 287~296
- 11 Perlin K, Hoffert E M. Hypertexture[J]. Computer Graphics. In: Proc. SIGGRAPH 1989, 1989. 253~262
- 12 Lengyel E 著. 詹海生, 李广鑫, 王鸿利译. 3D 游戏与计算机图形学中的数学方法. 北京: 清华大学出版社, 2004
- 13 齐东旭. 分形及其计算机生成. 北京: 科学出版社, 1994
- 14 彭群生, 鲍虎军, 金小刚. 计算机真实感图形的算法基础. 北京: 科学出版社, 1999