

Journal of Image
and Graphics

中国图象图形学报



ISSN1006-8961
CN11-3758/TB

2013 **6**
Vol.1 No.

中国科学院遥感应用研究所
中国图象图形学学会主办
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

Zhongguo Tuxiang Tuxing Xuebao

2013 年 6 月 第 18 卷 第 6 期(总第 206 期)

目 次

综述

利用块效应特征的 JPEG 图像盲取证研究进展 赵洁, 郭继昌, 张艳(613)

图像处理和编码

可信度双三次插值的 PMD 距离信息和 RGB 图像数据融合 ... 胡良梅, 王竹萌, 高隼, 张旭东, 吴国松(621)

分数阶微分的 CIE $L^*a^*b^*$ 颜色空间边缘检测 汤慧梅, 赵跃进(628)

图像分析和识别

频谱预处理模糊运动方向鉴别的改进算法 孔勇奇, 卢敏, 潘志庚(637)

基于视频动态纹理的火灾检测 邵婧, 王冠香, 郭蔚(647)

医学图像处理

旋转不变的 X 线图像相关度拼接 赵宏, 赵凯, 江春花, 康雁(654)

心肌灌注核磁共振图像的非刚性配准 王建, 潘静薇, 杨新(661)

遥感图像处理

空间约束的无人机影像 SURF 特征点匹配 韩天庆, 赵银娣, 刘善磊, 白杨(669)

支持向量机和水平集的高分辨率遥感图像河流检测 于晓升, 吴成东, 陈东岳, 田子恒(677)

地理信息技术

影响域渐进扩展的居民地增量综合 许俊奎, 武芳(685)

“第 16 届全国图象图形学学术会议”专栏

场景切换视频自适应帧间码率控制 方志军, 高永彬, 舒雷, 袁非牛, 杨勇(692)

适用于 PACS 系统的医学图像近无损压缩 李萍, 蒋慧琴, 杨晓鹏, 刘玉敏(699)

用于视觉词语生成的概率预测器 史淼晶, 徐蕊鑫, 许超(706)

多特征融合的人体目标再识别 范彩霞, 朱虹, 蔺广逢, 罗磊(711)

G^2 连续的低次避障代数样条曲线 陈军(718)

自适应多特征融合的真实感地形快速绘制 曾艳阳, 康凤举, 杨惠珍(724)

第九届和谐人机环境联合学术会议(HHME2013)征稿通知 (730)

Journal of Image and Graphics

(Monthly, Started in 1996)

Vol. 18 No. 6 June 2013

Contents

Review

Survey: blind forensic of JPEG forgeries based on blocking artifacts Zhao Jie, Guo Jichang, Zhang Yan(613)

Image Processing and Coding

PMD distance information and high resolution RGB image data fusion based on bicubic interpolation with credibility
..... Hu Liangmei, Wang Zhumeng, Gao Jun, Zhang Xudong, Wu Guosong(621)

Edge detection in CIE L*a*b* based on fractional differential Tang Huimei, Zhao Yuejin(628)

Image Analysis and Recognition

Motion blur direction detection based on pre-processing of spectrum image Kong Yongqi, Lu Min, Pan Zhigeng(637)

Fire detection based on video dynamic texture Shao Jing, Wang Guanxiang, Guo Wei(647)

Medical Image Processing

X-ray image mosaic based on rotation invariant correlation Zhao Hong, Zhao Kai, Jiang Chunhua, Kang Yan(654)

Non-rigid registration for myocardial perfusion MR image Wang Jian, Pan Jingwei, Yang Xin(661)

Remote Sensing Image Processing

Spatially constrained SURF feature point matching for UAV images Han Tianqing, Zhao Yindi, Liu Shanlei, Bai Yang(669)

Using support vector machine and level set for river detection in high resolution remote sensing image
..... Yu Xiaosheng, Wu Chengdong, Chen Dongyue, Tian Ziheng(677)

Geoinformatics

Expanding the influencing domain gradually for incremental generalization of settlement Xu Junkui, Wu Fang(685)

Issum of the 16th National Conference on Image and Graphics

Adaptive frame-layer rate control in scene change video Fang Zhijun, Gao Yongbin, Shu Lei, Yuan Feiniu, Yang Yong(692)

Near-lossless compression for medical image in PACS Li Ping, Jiang Huiqin, Yang Xiaopeng, Liu Yumin(699)

Probabilistic predictor for fast visual word generation Shi Miaojing, Xu Ruixin, Xu Chao(706)

Person re-identification based on multi-features Fan Caixia, Zhu Hong, Lin Guangfeng, Luo Lei(711)

Construction of low degree algebraic spline curve with G^2 continuity to avoid obstacles Chen Jun(718)

Fast rendering of realistic terrain based on adaptive multiple features fusion Zeng Yanyang, Kang Fengju, Yang Huizhen(724)

中图法分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)06-0724-06

论文引用格式: 曾艳阳, 康凤举, 杨惠珍. 自适应多特征融合的真实感地形快速绘制[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(6): 724-729.

自适应多特征融合的真实感地形快速绘制

曾艳阳^{1,2}, 康凤举^{1,2}, 杨惠珍^{1,2}

1. 西北工业大学航海学院, 西安 710072; 2. 水下信息处理与控制国家重点实验室, 西安 710072

摘要: 针对真实地形可视化中数字高程模型(DEM)数据结构复杂且绘制速度不佳的问题, 提出一种基于自适应多特征融合的真实感地形快速绘制方法。引入地形高程熵, 对真实的DEM高程数据进行特征提取以生成地形总体框架; 利用随机中点位移分形算法并根据地形特征优化分形参数来增加地形高频细节; 计算视点与地形之间的距离阈值, 并对应于层次细节(LOD)等级, 以实现地形自适应的调度, 再根据不确定性判定因子对地形特征进行更新。最后对本文算法进行并行处理, 充分利用图形处理单元(GPU)技术对地形进行加速绘制。实验结果表明, 该方法生成的地形具有较高逼真度和较好实时性。

关键词: 自适应; 多特征融合; 真实感地形; 快速绘制; 层次细节(LOD)

Fast rendering of realistic terrain based on adaptive multiple features fusion

Zeng Yanyang^{1,2}, Kang Fengju^{1,2}, Yang Huizhen^{1,2}

1. School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. National Key Laboratory of Underwater Information Process and Control, Xi'an 710072, China

Abstract: Focusing on the complex data structure of digital elevation model (DEM) and the poor rendering speed in real terrain visualization, we propose a fast rendering method based on adaptive multi-feature fusion for realistic terrains. To introduce the entropy of terrain elevation, real DEM elevation data can be extracted for generating an overall framework. According to the random midpoint displacement fractal algorithm and optimized fractal parameters, the high frequency detail can be increased. To calculate the distance threshold between the viewpoint and the terrain, this corresponds to the level of details (LOD), so that it can achieve adaptive scheduling. Additionally, by using the uncertainty determinant factor, the characteristics of the terrain profile can be updated. Finally, the algorithm is carried out using parallel processing, taking full advantage of the graphic processing unit (GPU) for accelerating the terrain rendering. The experimental results show that the generated terrain has higher fidelity and better real-time capability.

Key words: adaptive; multiple features fusion; fractal terrain; fast rendering; level of details (LOD)

0 引言

随着计算机3维可视化技术的不断发展, 具有真实感的3维自然景物的模拟越来越重要, 其中3

维地形就是其中之一。现今对地形的建模和绘制方法日趋成熟, 主要有2类方法: 一类是采用实际地形的高程数据及影像纹理数据来呈现真实地形, 这样获取的地形真实感和精度较高, 但由于其数据结构复杂且地形数据呈几何级数增长, 绘制效率不佳; 另

收稿日期: 2012-11-23; 修回日期: 2012-12-18

基金项目: 水下信息处理与控制国家重点实验室基金项目(9140C2305041001)

第一作者简介: 曾艳阳(1987—), 男, 现为西北工业大学航海学院兵器科学与技术专业博士研究生, 主要研究方向为计算机仿真和3维可视化。E-mail: zyyhost@126.com

一类是利用现今计算机图形学算法对地形模拟,这样的地形只能满足感观上的要求,具有较强的随机性,无法预测和控制地形的形状。为满足自然环境、军事作战环境等仿真可视化中大规模地形计算的需求,有必要研究地形生成算法的 CPU 并行处理及图形处理单元(GPU)加速绘制。

地形的模拟算法中快速绘制方法较多,且取得了一定的成果。文献[1]利用基于数据分块、部分数据常驻内存以及与视点相关的静态层次细节(LOD)模型实现了对任意格网大小海量地形数据的快速漫游,并利用一些算法进行处理,提高了地形漫游的效率与可视化效果;文献[2]提出了逐点插入法进行地形生成,其实现简单,占用内存小,但效率低;文献[3]在隐式四叉树结构基础上,结合粒子群优化算法建立地形的简化模型,其算法效率和进度都有显著提高。还有一些其他地形生成算法^[4]在效率上作了一定的改进,但仍不能完全满足大区域真实感细粒度的建模需求。因此提出一种自适应的多特征融合地形生成算法,该算法利用地形高程熵对高程数据总体特征进行提取,并根据不同的 LOD 进行改进,形成自适应的对不同分辨率的地形高程框架;在地形的细节表现过程中提取地形块的局部分形特征,消除分形地形面片的折痕;并引入不确定性度量特征的准确度计算多特征加权的权重,增强算法的鲁棒性。

1 真实感地形生成方法

1.1 分形细节特征的提取

分形地形的生成是利用随机分形的统计自相似特征来模拟的,在多数情况下,分形以非常简单的规则迭代,最终得到丰富且逼真的地形。在大规模地形的生成算法中,Diamond-Square 算法应用更广,速度更快^[5],本文采用这种算法进行地形细节的生成。Diamond-Square 算法是由一个种子点组成的正方形开始,结合随机中点位移法求出正方形对角线交点的高度值,经过若干次迭代,种子正方形被不断细分,最后获得逼真的 3 维地形网格。该方法原理如图 1 所示。

对于由任一网格初始高度值构成的网格元来说,假设 $H_{i,j}$ 、 $H_{i,j+1}$ 、 $H_{i+1,j}$ 、 $H_{i+1,j+1}$ 为其 4 个顶点的高程值,随机中点位移法的分形过程为

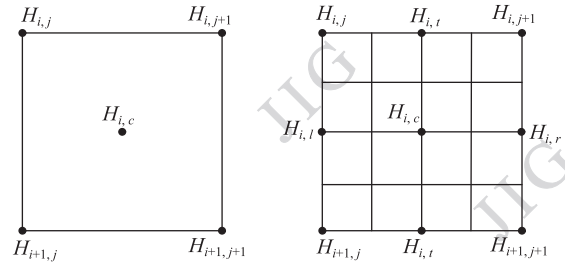


图 1 Diamond-Square 算法

Fig. 1 Diamond-Square algorithm

1) 对网格元中心点进行插值,则其中心点高度值为

$$H_i^c = (H_{i,j} + H_{i,j+1} + H_{i+1,j} + H_{i+1,j+1})/4 + R_i^c \quad (1)$$

2) 进行第 2 次细分,这里采用与以往不同的方法即利用局部网格元的邻域点联合求得网格元各边的中点高度值

$$\begin{cases} H_i^t = (H_{i,j} + H_{i,j+1} + H_{i,j}^c + H_{i,j-1}^c)/4 + R_i^t \\ H_i^r = (H_{i,j+1} + H_{i+1,j+1} + H_{i,j}^c + H_{i+1,j}^c)/4 + R_i^r \\ H_i^b = (H_{i+1,j} + H_{i+1,j+1} + H_{i,j}^c + H_{i,j+1}^c)/4 + R_i^b \\ H_i^l = (H_{i,j} + H_{i+1,j} + H_{i,j}^c + H_{i-1,j}^c)/4 + R_i^l \end{cases} \quad (2)$$

式中, H_i^t 、 H_i^r 、 H_i^b 、 H_i^l 是与 H_i^c 相邻的网格元中点高度值, R_i^t 、 R_i^r 、 R_i^b 、 R_i^l 是随机的扰动量。按以上两个步骤对网格进行细分递归,随着递归深入的增加,地形的细节也越来越粗糙,这样递归细分过程中迭代次数应根据视点的位置等因素来确定。

在利用随机中点位移法快速细分高程网格时,这里设高程网格的间距为 l_0 ,经过一次细分后可得网格间距为 $l_1 = \sqrt{2}/2 l_0$ 。这样可以求得第 $i+1$ 次细分网格间距与第 i 次网格间距的关系,即

$$l_{i+1} = \sqrt{2}/2 l_i = (\sqrt{2}/2)^i l_0 \quad (3)$$

式中,经随机中点位移法完成细分后,网格数量变为原来的 2^{2i} 倍。

为保证高程特征分形时的局部稳态,需设计一个适合的随机扰动量。随机位移法满足分形布朗运动(fBm)的幂指数分布规律^[6]

$$D(X) = E(H(i + \Delta L) - H(i))^2 \propto \Delta L^{2H} \quad (4)$$

则细分点与任一邻近的网格点满足式(4),则式(2)可表示为

$$D(H_i^c - h_{i,j}) = \frac{1}{16} D \left(\sum_{i=1}^2 (h_{i,j} - h_{i,j-1}) + R_i^c \right) \quad (5)$$

将式(5)展开,可得

$$(\sqrt{2}/2l_0)^{2H} \times \sigma^2 = \frac{1}{16}(2l_0^{2H} + (\sqrt{2}l_0)^{2H}) \times \sigma^2 + DR_{ic} \quad (6)$$

式中, H, σ 是分形特征参数, H 为 Hurst 指数, $H \in (0, 1)$, 由式(6)可以求得扰动量的约束形式

$$R_i^c = \sqrt{l_0^{2H} \times \sigma^2 \times (1 - 2^{H-2}(1 + 2^H))} \quad (7)$$

为消除生成地形的分形曲面的折痕, 保证变量取值的合理性, 定义分形扰动量为

$$R_i^c = \mu l_0^H \sigma \sqrt{1 - 2^{H-2}(1 + 2^H)} \times G() \quad (8)$$

式中, μ 为调节函数, 控制变量的随机性, $G()$ 函数为服从 $N(0, 1)$ 的高斯分布。

1.2 地形高程熵总体特征的提取

引入地形高程熵^[7]来描述总体地形高程之间的差异程度, 以反映该地形总体信息量的大小。根据 DEM 所提供的信息确定地形高程熵: 设 $H(i)$ 为地形块中第 i 点的高程数据值, 其中必须满足 $H(i) > 0$, N 为地块所包含数据高程点的总量。由此定义地形熵为

$$\begin{cases} Hf = - \sum_{i=1}^N p_i \lg p_i \\ \Downarrow \\ Hf' = - \sum_{i=1}^N p_i (p_i - 1) \\ p_i = \frac{H(i)}{\sum_{i=1}^N H(i)} \end{cases} \quad (9)$$

式中, Hf' 为 Hf 根据泰勒级数展开所得。

利用地形高程熵提取真实感地形的总体特征具有科学性, 当地形各点的高程绝对不均衡时, 即 $H(i)$ 中有一个为零而其余不为零, 地形高程熵为零, 说明地形各点高程悬殊最大, 地形包含的信息量越丰富;

当地形高程相对相等时, 即 $H(i)$ 的值相对相等, 地形高程熵取最大值。地形高程熵的值域为 $[0, 1]$ 。

1.3 基于距离阈的自适应地形调度

分层次细节技术将 3 维模型用精确模型和简单模型等多种不同精度来表示, 以便绘制时选择使用, 且可以在不影响观察者视觉效果的情况下, 对 3 维模型表面细节逐次简化以达到减少模型的几何复杂度、提高绘制效率的效果^[8]。

在地形场景的动态绘制时, 可以根据距离判断, 即根据观察点与模型之间的距离来选取模型的精度。这里引入距离阈值来实现地形的自适应调度。基于上述特点可将层次细节技术应用到真实感地形生成算法中。根据视点 to 每个方块中心面片的距离, 判断是否需要进一步细分地形, 以达到自适应调度的目标。

距离阈值首先要确定视点的透视投影区域。图 2(a) 为透视投影区域的示意图。其中, E 为观察点, 视线与地形平面的交点为 M , 则视域 $E-ABCD$ 与 XOY 平面交点形成的透视投影区域为 $A'B'C'D'$, 这一区域即为地形的可见区域。为了便于计算视点 E 到视域中某块地形区域的距离, 这里假设视线总是平行于 XOZ 平面。图 2(b) 描述了在上述观察条件下, 地形的视点转换原理。其中, 视点 E 的投影平面的边长为 l , 张角为 θ , 视点的投影线段长度为 h , 视点与投影线段中心的距离为 d , 则 l 的投影长度为

$$\delta = \frac{lL}{2 \tan(\theta/2) d} \quad (10)$$

由式(10)可知, 对于一条特定的边来说, 距离 d 越大, 则 δ 越小, 这样视点所见的视域中地形也就越模糊。在给定的误差阈值 φ 的条件下, 当视点到视点的投影线段的距离 d 充分大时, 可使它的投影误

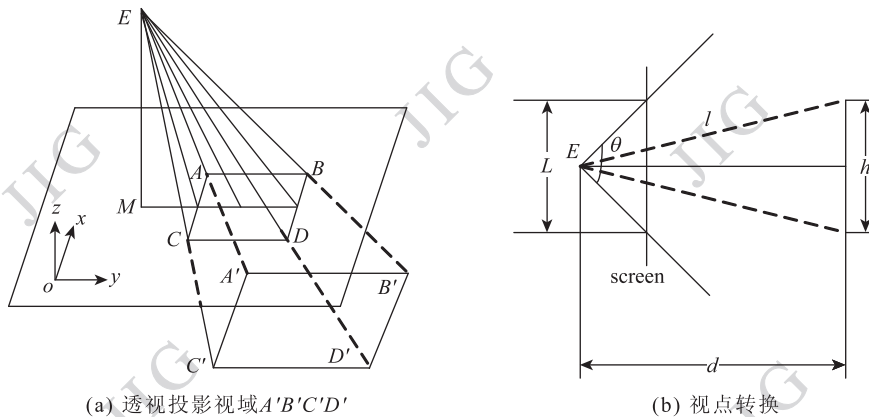


图 2 距离阈的求解过程

Fig. 2 The solution process of distance threshold

差长度小于 φ , 则可定义距离阈值为

$$d_T = \frac{khL\lambda}{2\tan(\theta/2)\varphi} \quad (11)$$

式中, k 为一可变系数, 可以调整地形整体的 LOD 显示级数, λ 为物体空间中的单位长度在投影平面上的像素数。

确定距离阈值 d_T 后, 需根据视觉效果将视距与地形高程网格的插值个数进行结合, 这样能显示出分级的 LOD。一般的 LOD 细分法按每层 $2n-1$ 个插值点进行高程网格的划分, 这样插值的跳变幅度较大, 按照自然顺序在第 n 级的 LOD 层上插值 n 个子点, 即分形的迭代次数的关联模型。表 1 列出了多层次 LOD 插值关联的模型。

表 1 多层次 LOD 插值关联模型
Table 1 Association model of multi-level LOD interpolation

超宏观视距	宏观视距	微观视距	超微观视距
10 000	1 000	60	3
5 000	500	20	1
4 000	200	10	0.5
2 000	100	5	0.3
1~4 级 LOD	5~8 级 LOD	9~12 级 LOD	0.1

1.4 基于距离阈值的自适应地形调度

在多个地形特征融合过程中, 如果直接将地形的多个特征简单地组合在一起, 那么随着特征空间维数的增加, 运算量会不断增加且不合理。在信息论、决策论等领域中, 熵是不确定性的度量^[9]。在 1.3 节中研究了多层次 LOD 插值的关联模型, 其中人眼对于同一个地形场景中不同层次细节的辨认程度一般为 4~8 级, 当地形场景中的层次细节数超过一定级别时, 人眼并不能完全分辨。为了在地形实时漫游场景时能保持画面流畅与一定帧率, 应对地形的分形迭代次数最大值进行限制, 当所需数据量到达最大值时, 将不再进行 LOD 层级上的数据更新。

综合以上层次细节模型的相关影响因素, 在真实感地形生成算法中提出了层次细节模型不确定性判定因子

$$u = k_1 \frac{L\lambda}{2\tan\frac{\alpha}{2} \times d_T \times Hf' \times \max(S, k_2\beta)} \quad (12)$$

式中, S 为当前地形四叉树中所包含的正方形个数,

k_1, k_2 为可变系数, β 为地形绘制时设定 LOD 的最大层次数。

在实际地形场景绘制中, 由于 d_T 很大, 使得 θ 相对很小, 这样式(12)可进一步简化为

$$u = \frac{k_1}{\alpha \times d_T \times Hf' \times \max(S, k_2\beta)} \quad (13)$$

当 $u > 1$ 时, 则需进一步细分生成更高一级的 LOD, 当 $u < 1$ 时, 此时分形迭代产生的数据量已满足地形所需的层次细节, 不需再分。

2 算法实现与比较

2.1 算法步骤

根据上述真实感地形的自适应特征提取及融合方法, 算法步骤设计如下:

1) 导入初始的数字高程模型(DEM)信息, 并对得到的高程数据进行预处理。

2) 根据当前视点, 求得距离阈值, 确定 LOD 等级, 利用处理后的 DEM 数据集进行地形总体特征的提取, 从而构建整体框架。

3) 根据当前 LOD 等级遍历地形面片与可见性判断。

4) 确定每个四叉树节点在分形细节迭代时 Hurst 指数值 H 和方差值 σ , 再对每个节点进行分形迭代计算, 得到面片数据并存储。

5) 利用层次细节模型不确定性判定因子, 判断当前的 LOD 是否需要进一步细分: 如 $u > 1$, 则 LOD 等级加 1, 返回步骤 2); 否则执行步骤 6)。

6) 遍历相应的地形数据面片, 最终得到多特征融合后的四叉树高程数据。

7) 根据高程数据地形进行纹理映射, 得到渲染后的真实感地形。

2.2 结果分析

为检验算法的可靠性与实用性, 实验所用的 DEM 数据文件来源为美国加利福尼亚州和内华州界上内华山脉北部断层形成的塔霍湖的一部分高程数据。原始地形的大小为 792×792 个高程数据点。依据本文算法生成的地形效果, 如图 3 所示。

表 2 为不同地形生成算法的属性应用对比。通过和其他 3 种算法比较可以发现, 在计算实时性方面由于计算了地形高程熵特征和分形细节特征等, 相对于其他地形生成算法来说耗时较大, 但同时获得了更好的逼真度。

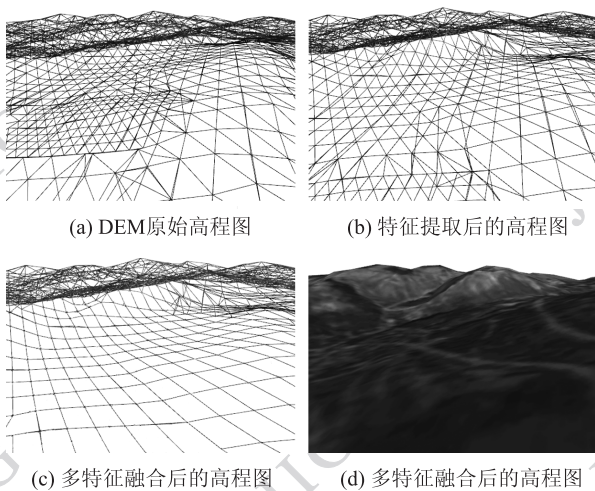


图 3 真实感地形的生成过程

Fig. 3 The generation of realistic terrain

表 2 不同地形生成算法的应用属性对比

Table 2 The comparison of application attribute

算法	应用属性对比			
	网格数	计算耗时	LOD 层数	视觉效果
分形算法	792 × 792	18.988	3	跳变严重
内插算法	792 × 792	11.302	7	跳变缓和
外推算法	792 × 792	15.891	7	跳变缓和
本文算法	792 × 792	25.412	7	跳变缓和

3 地形快速绘制

3.1 地形生成的并行处理

在图 1 中,原正方形高程块被分割为 4 个小正方形高程块。假设一个正方形高程块被分割时处理时间为 t ,则第 2 次迭代分割时所使用的处理时间就为 $4t$,以此类推,执行第 i 次迭代算法时所需时间为 $4^{i-1}t$ 。当地形的规模较大时,迭代次数就会成指数级增长,所需时间也会相应增加较快。

在 Diamond-Square 分形算法中,计算正方形中心点高度值和计算各边中点的高度值之间并没有相互关联,计算时可以并行处理,这样需要 $4t$ 的工作量可以在时间 t 内完成,其处理过程如图 4 所示。设细分次数为 $0 \sim N$,四叉树的每一个节点代表细分后的正方形。并行处理过程与四叉树每一层节点数量无关,只与树的深数有关;串行处理从树的根节点开始,从左往右,从上往下,对每一个节点执行算法,则每个节点处消耗的时间为 t 。如 CPU 中由 m 各几何处理单元,每一层需处理的节点数目为 $4N$,用 m 个处理器对 $4N$ 个节点执行算法,消耗时间仅为 $4N/m$,节省很多时间,加速效果明显。

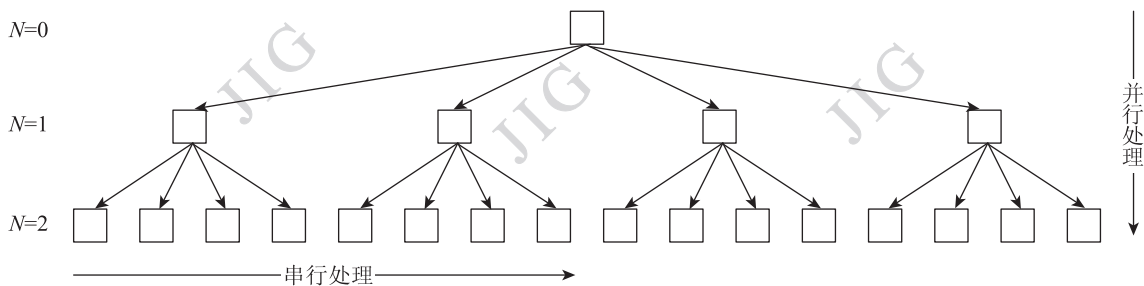


图 4 串、并行 Diamond-Square 分形算法比较示意图

Fig. 4 The comparison of serial and parallel Diamond-Square fractal algorithm

3.2 地形生成的 GPU 实现

随着现今 GPU 的功能越来越强,与图形有关的可视化处理自然地会由 CPU 转向 GPU,为了生成更加逼真的地形,且不影响整体的实时性,基于 GPU 的地形生成的应用越来越多^[10]。对原始高程并行处理过后,得到高度场数据,并把结果渲染到纹理^[11]。这里通过预先创建的纹理与某个位置上的纹理映射来实现 GPU 的快速渲染。

实验的硬件平台配置为 Intel(R)Core(TM)i7CPU/

870@2.93 GHz 处理器,DRRII800/4 GB 内存,NVIDA GeForce GTX 260/1 024 MB 显卡,500 G/7 200 16 M 硬盘;软件配置为 Window 7,OpenGL 2.0,Visual studio 2005,CG 语言。表 3 列出了不同 LOD 层数下在不同分形特征值 H 控制下的模拟效率。相同条件下,增加 LOD 层数会增加系统计算量,算法的特征提取等也会影响绘制速度。由表 3 可以看出,在高程网格小于 256×256 的情况下,该方法可以得到高真实感的地形效率,且具有较好的绘制效率。

表3 不同 LOD 层数的绘制效率

Table 3 Rendering efficiency of different LOD layers

地形 网格数	LOD × 4		LOD × 5	
	0.3	0.5	0.3	0.5
64 × 64	68	60	63	60
128 × 128	60	59	55	52
256 × 256	52	49	51	48
512 × 512	44	38	38	35

4 结 论

算法用真实数据高程来构建地形的整体框架,适合某些特定地形的模拟,可以较好地实现真实感地形的实时生成和显示,并且降低了数据存储量。但高真实感的地形生成需要更精确的数据地形,这样数据的存储量大,数据结构更加复杂,在一定程度上会影响到地形的绘制效率,需要根据需求平衡地形生成的逼真度和效率的关系。对于本文算法耗时较大的问题,利用 GPU 和并行计算等方法来加速实现。

参考文献 (References)

- [1] Ma Z T, Pan M, Hu J X. A fast walkthrough method for massive terrain based on data block partition [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2004, 40(4): 619-625. [马照亭,潘懋,胡金星.一种基于数据分块的海量地形快速漫游方法[J].北京大学学报:自然科学版,2004,40(4):619-625.]
- [2] Kolingerova I, Zal B. Improvements to randomized incremental delaunay insertion [J]. Computers & Graphics, 2002, 26(3): 477-490.
- [3] Zhang H J, Sun J G, Lu Y H. A new simplification method for terrain model based on divergence function [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(5): 962-973. [张慧杰,孙吉贵,吕英华.一种新的基于发散度函数的地形模型简化方法[J].计算机学报.2009,32(5):962-973.]
- [4] Yu C Y, Zhao H, Wang H. Study on block modeling algorithm of extra large terrain [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2011, 32(6): 798-801. [喻春阳,赵海,王宏.超大地形分块建模算法的研究[J].东北大学学报:自然科学版,2011,32(6):798-801.]
- [5] Nicoletta S, Silvia M, Massimo S. Applications of mathematics in the real world: territory and landscape [C]// Proceedings of the International Conference on the Humanistic Renaissance in Mathematics Education. Terrasini, Palermo, Italy: Pergamon Press, 2002: 326-333.
- [6] Losasso F, Hoppe H. Geometry clipmaps: terrain rendering using nested regular grids [J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 769-776.
- [7] Tan B, Xu Q, Ma D Y. Real-time multi-resolution terrain rendering using restricted quadtree [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(3): 270-276. [谭兵,徐青,马东洋.用约束四叉树实现地形的实时多分辨率绘制[J].计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(3):270-276.]
- [8] Yin G S, Wang H L, Zhang J, et al. Fractal reconciliation for ocean wave simulation [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(11): 1495-500. [印桂生,王海玲,张菁,等.分形算法调和的海浪模拟方法[J].哈尔滨工程大学学报,2011,32(11):1495-1500.]
- [9] Gu X, Wang H T, Wang L F, et al. Fusing multiple features for object tracking based on uncertainty measurement [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(5): 550-559. [顾鑫,王海涛,汪凌峰,等.基于不确定性度量的多特征融合跟踪[J].自动化学报,2011,37(5):550-559.]
- [10] Kruger J, Westermann R. Acceleration techniques for GPU based volume rendering [C]// Proceedings of IEEE Visualization 2003. Seattle, WA, USA: IEEE Press, 2003: 287-292.
- [11] Liu W P. Texturing techniques for large scale terrain visualization [J]. J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech: Natural Science Edition, 2009, 37(10): 64-67. [刘文平.大规模地形可视化中的纹理技术[J].华中科技大学学报:自然科学版,2009,37(10):64-67.]