

# 基于小波的地形连续快速绘制技术

魏迎梅, 谷天阳, 杨冰, 吴玲达

(国防科技大学信息系统与管理学院, 长沙 410073)

**摘要:** 利用小波变换的多分辨率特性构建了地面高程数据的动态多分辨率模型, 通过小波渐进重构算法解决了多分辨率模型间的平滑过渡问题, 通过缝补解决了不同分辨率地形块间的裂缝问题, 实现了对大规模地形的视点相关的连续快速绘制, 通过实验进行了验证。

**关键词:** DEM 数据; 多分辨率模型; 小波变换; 连续绘制

## Rapid Continuous Rendering Technology of Terrain Based on Wavelet

WEI Ying-mei, GU Tian-yang, YANG Bing, WU Ling-da

(School of Information System and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

**【Abstract】** This paper explores how to construct dynamic multi-resolution models for terrain elevation data by using multi-resolution characteristic of wavelet transform and proposes a wavelet-progressive-reconstruction algorithm to solve the problem of smooth transition between multi-resolution models. It also solves crack problem between terrain blocks of different resolution through a simple “sewing” method. Experiment result illustrates that this method can realize view-dependent continuous rapid rendering of large-scale terrain.

**【Key words】** DEM data; multi-resolution model; wavelet transformation; continuous rendering

### 1 概述

遥感技术和卫星技术的发展使获取高分辨率的数字高程数据和影像纹理数据成为可能, 虚拟现实技术的发展使人们对周围环境认识从传统的二维思维方式转向更自然的、立体空间的思维方式, 解决海量地形数据的实时绘制问题是实现这种转变的关键, 也是建立国家级乃至全球性的空间信息可视化系统的基础。

从应用的角度来看, 特别是对于国家安全、国土资源管理、城市规划与信息化、农林应用、灾情监控等大型应用领域, 大范围虚拟地形环境的建立已成为基本要求。目前“数字地球(digital earth)”的战略思想受到各国的重视, 数字地球首先要求建立不同分辨率尺度下的地球三维可视化的浏览界面, 但是海量地形数据的实时绘制仍未完全解决, 从而限制了此类应用的发展和规模。

从技术的角度来看, 随着计算机技术的发展, 计算机硬件水平得到了迅猛的提高, 图形硬件的多边形处理能力已达每秒千万量级。但在各种应用中, 地形高程数据规模在不断扩大, 对场景显示的逼真、精细程度的要求也越来越高, 单纯依赖于硬件加速的绘制技术难以满足实际应用要求, 因此, 迫切需要设计出受场景规模影响的快速绘制算法。

就模型简化来说, 经过计算机图形学多年的研究, 已经形成了一系列成熟的技术<sup>[1-3]</sup>。但是对于海量地形数据, 在当前的硬件水平下, 单纯依赖传统的模型简化技术无法处理大规模地形模型。特别是地形和纹理的数据量都很大时, 除了建立视点相关的LOD(level of detail)模型外, 还必须有一种实时的架构来管理数据的调度以及地形数据与纹理数据的检索与匹配<sup>[4]</sup>。在绘制过程中, 随着视点的转变, 不得不经常访问速度较慢的硬盘, 在单机上要考虑数据从硬盘到内存的交换, 在客户服务器上要考虑网络的带宽、进行客户服务器的

数据调度、硬盘和内存之间的数据交换的限制, 这些成为基于外存(out-of-core)的海量数据实时绘制的瓶颈<sup>[5]</sup>。

本文研究将小波分析理论引入海量地形数据的实时绘制中。由于小波具有良好的时域和频域特性, 能随着信号不同频率成分、取样的密集程度在时空域上自动调节, 因此可以用多种尺度观察信号(图像、函数)分析任意细节。虽然地形数据表现为三维高程模型, 但是 DEM 数据却等价于一幅二维多灰度图像, 所以, 利用小波变换的多分辨率特性解决地面高程数据和纹理数据的动态多分辨率表示, 通过研究小波渐进重构算法解决多分辨率模型间的平滑过渡问题, 利用小波的快速压缩与解压缓解海量数据的存储压力, 同时减少从慢速外存向内存读数据的代价, 无论从应用还是技术角度, 该研究均具有重要意义。

### 2 基于小波的地形多分辨率模型

DEM 数据是按照一定间隔采集地面高程值而得到的空间点集, 规则地形网格 DEM 数据在计算机中通常表示为一个二维矩阵, 矩阵元素为高程值。从信号分析的角度来看, 矩阵中的高频信息对应于表现地形细节特征的数据, 而低频信息对应于反映地形概貌特征的数据, 因此可以通过对这个二维矩阵进行小波分解和重构来实现对 DEM 数据的多分辨率建模与表现。

假定  $S_{i,k}^0$  代表原始 DEM 数据, 对其进行小波分解(以二进进制小波为例), 经过了行和列 2 个方向上的低通滤波, 得到

**基金项目:** 国防预研基金资助项目

**作者简介:** 魏迎梅(1972-), 女, 副教授、博士后, 主研方向: 多媒体信息系统与虚拟现实; 谷天阳, 硕士; 杨冰, 讲师、博士研究生; 吴玲达, 教授、博士

**收稿日期:** 2007-01-25 **E-mail:** weiyingmei@nudt.edu.cn

在低一尺度上的概貌信息  $S_{m,n}^1$ ；经过了行方向上的高通、列方向上的低通，得到水平方向的细节信号在垂直方向上的概貌  $\alpha_{m,n}^1$ ；经过列方向上的高通滤波和行方向上的低通滤波，得到垂直方向的细节信号在水平方向上的概貌  $\beta_{m,n}^1$ ；经过行列 2 个方向上的高通滤波，得到沿对角线方向上的细节  $\gamma_{m,n}^1$ 。其中， $S_{m,n}^1$  可作为原始 DEM 数据在低一尺度的地形概貌；保留其他 3 种信息，可以从低分辨率的数据中重构出高分辨率的地形网格。由带限信号的采样定理可知，可以将采样率降低一半而不丢失任何信息，使总的输出序列长度与输入长度保持一致。

二维 DEM 数据小波多分辨率变换的系数分解如下：

$$\begin{aligned} S^{j+1}(m,n) &= \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} h_{l-2m} h_{k-2n} S^j(l,k) \\ \beta^{j+1}(m,n) &= \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} h_{l-2m} g_{k-2n} S^j(l,k) \\ \alpha^{j+1}(m,n) &= \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} g_{l-2m} h_{k-2n} S^j(l,k) \\ \gamma^{j+1}(m,n) &= \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} g_{l-2m} g_{k-2n} S^j(l,k) \end{aligned} \quad (1)$$

若输入地形矩阵信号大小为  $N \times N$ ，则 4 个输出矩阵大小均为  $N/2 \times N/2$ ，因此输出矩阵的总数据量保持不变，这表明用小波分析得到的多分辨率模型不会增加需要存储的数据量，只是按照频率信息的不同，对各分量重新进行了分组和排列。一般情况下，分解后，输出矩阵中各部分系数的位置如图 1 所示(图中以分解 2 次为例)。 $S^{j+1}$  和  $S^{j+2}$  可以作为  $S^j$  的低分辨率的地形概貌数据。

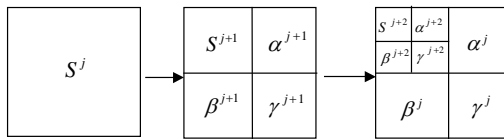


图 1 地形矩阵分解结构

经过小波多分辨率分析，新的空间数据集不仅可以从原始地形网格模型派生出较粗略的地形网格，而且可以通过逆变换，恢复高精细度的网格乃至原始网格，从而实现完全的重构。高分辨率的 DEM 数据经过小波变换后的低频成分可看作是简化后的低分辨率 DEM 数据。低分辨率的基网格(轮廓部分)对原网格有很好的近似，小波系数(细节部分)的大小反映出小波系数为 0 时所引入的误差，通过动态地向基网格中加入这些小波系数，达到连续细化的目的。

运用小波分析处理纹理影像块以生成多分辨率影像块，实现海量纹理影像的分层存储，同时将其表示成离散的四叉树。对纹理数据而言，小波变换良好的空间-频率局部化特性使得原始图像的大部分能量聚集到了低频子带，为了提高纹理图像压缩的效率和重建图像的质量，利用原始图像在小波分解中不同分辨率级能量分布不均匀的特点，对各分辨率级进行分级处理。对纹理数据可设计压缩比较高的有损压缩算法，以及与之对应的快速解压算法，以减小存储空间，减少实时绘制时从硬盘读数据和重构计算的时间，并结合数据分块方案和存储策略，建立地形多分辨率模型与纹理图像多分辨率层次模型之间的对应关系。

### 3 视点相关连续绘制方法

如何合理高效地应用所建立的地形多分辨率模型，是实现海量地形实时绘制的要点之一。为了尽可能降低绘制的复杂度，同时保证用户在地形环境自由漫游时视觉的真实感，

应该在视点比较远时，使用低分辨率的地形模型，当视点比较近时，使用高分辨率的地形模型。

假设原始地形模型为  $L_0$ ，通过小波变换一共进行了  $N$  次多分辨率分解。首先根据视点距离将当前视域范围中的地形划分为  $N$  个子带，使每个子带对应于不同级别分辨率的地形模型。选定最大距离  $d_{\max}$  和最小距离  $d_{\min}$ ，当视点距离  $d \geq d_{\max}$ ，选择最低分辨率模型；当  $d \leq d_{\min}$  时，选择最高分辨率(即原始地形模型)进行绘制。当视点距离  $d$  位于最大距离和最小距离之间时，取

$$\Delta d = (d_{\max} - d_{\min}) / N$$

若

$$d - d_{\min} \in [i\Delta d, (i+1)\Delta d), \quad i=0,1,2,\dots,N-1$$

则选择第  $i$  级模型进行绘制。

使用不同细节等级的模型可以有效降低绘制的复杂度。但当视点运动时，例如视点由远到近而从第  $i+1$  级模型变到第  $i$  级模型，会感觉到有一个明显跳变，因此，需要通过小波系数筛选，实现在各级分辨率内的逐步细化，保证视点变化时，不同分辨率的模型间切换实现平滑过渡，即需要建立小波系数关于观察距离的连续函数，从而进行连续多分辨率控制。

对于第  $i$  级分辨率，选择一个最大阈值  $\varepsilon_{\max}$  和一个最小阈值  $\varepsilon_{\min}$ 。根据小波系数的分布特点，定义了小波系数的筛选阈值关于视点距离的函数  $\varepsilon(d)$ ：

$$\varepsilon(d) = \ln(t \log(\varepsilon_{\min}) + (1-t) \log(\varepsilon_{\max})) \quad (2)$$

其中， $t = \frac{d - d_i}{\Delta d}$ 。

为了避免过于频繁的重构，可选择合适的值  $n$  (逐步细化的等级数)，取  $\Delta d' = \Delta d / n$ ，当

$$d - d_i \in [j\Delta d', (j+1)\Delta d'), \quad j=0,1,\dots,n-1$$

取阈值

$$\varepsilon'(d) = \varepsilon(d_i + j\Delta d')$$

进行小波系数筛选，通过小波逆变换重构地形网格。

DEM 数据小波重构可以表示为

$$\begin{aligned} S^j(l,k) &= \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} \tilde{h}_{l-2m} \tilde{h}_{k-2n} S^{j+1}(m,n) + \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} \tilde{h}_{l-2m} \tilde{g}_{k-2n} \alpha^{j+1}(m,n) \\ &+ \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} \tilde{g}_{l-2m} \tilde{h}_{k-2n} \beta^{j+1}(m,n) + \sum_{l \in Z} \sum_{k \in Z} \tilde{g}_{l-2m} \tilde{g}_{k-2n} \gamma^{j+1}(m,n) \end{aligned} \quad (3)$$

以视点距离为度量，重构得到一系列多级分辨率和同级分辨率下一系列不同精细程度的地形网格数据，在绘制地形时随着视点的变化进行调用。所以，可以利用这种方法，实现地形细节程度随视点变化的连续渐变绘制。

### 4 不同分辨率的地形块间裂缝的消除

在绘制地形时，同一视域范围内距离视点比较近的部分地形采用高分辨率模型，而距离视点比较远的部分地形采用低分辨率模型，不同分辨率地形模型的接合处会存在裂缝(如图 2 所示)，从而导致地形绘制的不连续性，因此需要通过算法进行缝合。

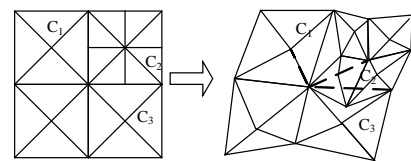


图 2 裂缝的产生

根据视点相关的连续绘制原则可知,任一地形块与它相邻地形块的分辨率最多只差1级,因此,它们之间的公共边上最多只有一个非公共顶点,比较简单的方法是删除该公共顶点,但这样会降低地形的表现精度和表现效果,因此采用适度缝合的方法,如图3所示,以地形块C为例,对C的西、北邻域块(分别用 $C_w$ 和 $C_N$ 表示)的分辨率(即地形二叉树中的结点尝试)进行测试:

```

if depth( $C_w$ ) > depth(C) then
    分裂 C 的西侧边
else 分裂  $C_w$  东侧边
if depth( $C_N$ ) > depth(C) then
    分裂 C 的北侧边
else 分裂  $C_N$  南侧边

```

此过程迭代进行,即可完成所有裂缝的探测和修补。

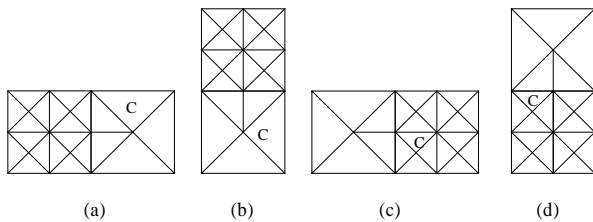


图3 裂缝的缝补

## 5 实验结果

下面以一块小地形块为例,展示实验结果。

原始 DEM 数据进行了3级小波多分辨率变换,生成了 $64 \times 64$ ,  $32 \times 32$ ,  $16 \times 16$ 的地形网格,如图4所示。

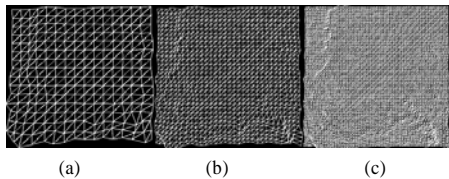


图4 多分辨率地形网格

图5显示的是当视距由远及近时,地形数据的连续多分辨率表现。

实验证明,利用本文的算法可以在具体的应用系统中实现几十万平方公里大规范虚拟战场环境的生成和自由漫游,数据量超过500GB,地形环境的漫游速度可以达到30fps以上,取得了较好的效果。

(上接第217页)

## 4 结束语

由在真实多媒体网络上所测数据可知,相比以1/2往返时延作为单向时延值,本文的方法测得值更加接近网络的真实值。限于篇幅,对比的测试数据没有列出。经过对大量数据的分析,可以肯定本方法是适合测试未知拓扑结构的网络,在实验条件有限,又要避免时间同步测试真实网络时,该方法就显出其优势了。网络性能的测试越来越受到网路运营商和网络相关研究人员的关注,并成为当前网络业务中的一个热点,希望本文提出的测试方法和测试数据能为有意从事网络测试的研究人员提供参考和借鉴。

### 参考文献

1 张宏莉,方滨兴. Internet 测量与分析综述[J]. 软件学报, 2003, 14(1).

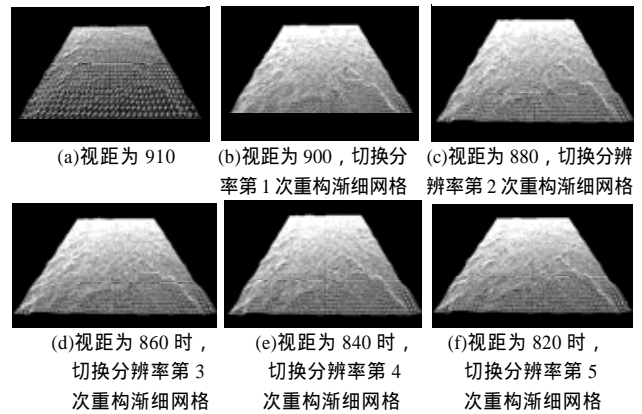


图5 地形数据的连续多分辨率表现

## 6 结束语

本文讨论了基于小波构造地形网格的动态多分辨率模型和连续快速绘制方法,因为小波变换所产生的计算量是在预处理阶段完成的,所以不会增加绘制负担,而小波完备的数据重建功能可以实现不同分辨率数据间的实时转换,从而减少了从慢速外存向内存读数据的时间开销,提高了绘制效率,这些都是其他算法很难比拟的,本文的视点相关连续绘制方法和地形块裂缝缝补策略有效地保证了地形漫游的连续性和完整性。具体应用表明,本方法为解决大规模地形的可视化与实时漫游问题提供了一条有效的途径。

### 参考文献

1 Lindstrom P, Koller D, Ribarsky W, et al. Real-time Continuous Level of Detail Rendering of Height Fields[C]//Proc. of SIGGRAPH'96. 1996.

2 Duchaineau M A, Wolinsky M, Weinstein M. Roaming Terrain: Real-time Optimally Adapting Meshes[C]//Proceedings of IEEE Visualization'97, Phoenix. 1997.

3 Rottger S, Heidrich W, Slussallek P, et al. Real-time Generation of Continuous Levels of Detail for Height Fields[C]//Proc. of the 6th International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization, Plzen-Bory. 1998.

4 Lindstrom P, Pascucci V. Terrain Simplification Simplified: A General Framework for View-dependent Out-of-core Visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2002, 8(3).

5 Correa W T. New Techniques for Out-of-core Visualization of Large Datasets[D]. U.S.: University of Princeton, 2004.

2 陈 韬,张占军,洪 君. 流媒体的 RTP 传输与 QoS 管理策略研究[J]. 装甲兵工程学院学报, 2005, 19(3).

3 冯建茹,刘瑞芳. 网络性能测量的研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2005, 8(2): 8-9.

4 林 啸. IP 网性能分析[J]. 邮电规划, 2004, 3(2).

5 赵 英,蔡 勇. 基于 UDP 协议的语音传输系统设计及实现[J]. 北京化工大学学报, 2003, 30(3).

6 Sukhov A, Calyam P, Daly W, et al. Network Requirements for High-speed Real-time Multimedia Data Streams[J]. Department of Computer Science and Engineering, 2004, 11(8).

7 Karam M J, Tobagi F A. Analysis of Delay and Delay Jitter of Voice Traffic in the Internet[J]. Computer Networks, 2002, 40(6).

8 蒋 涛,张 彬,王世普. 分布式网络性能测试系统的设计与实现[J]. 计算机应用, 2005, 25(1).

