

三维地形生成及实时显示技术研究进展

齐敏 郝重阳 佟明安

(西北工业大学电子信息学院, 西安虚拟现实工程技术研究中心, 西安 710072)

摘要 三维地形是虚拟自然环境中不可缺少的因素,也是虚拟仿真领域中视景系统的重要组成部分.该文将地形生成技术概括为基于真实地形数据的地形生成技术、基于分形技术的地景仿真技术、基于数据拟合的地形仿真技术等三大类,并分别介绍了这三类方法的相关理论和生成技术,还分析了各自的发展趋势.其中在基于真实数据的地形生成方面,按照离散 LOD 模型、连续 LOD 模型、多分辨率模型的发展顺序,重点介绍了地形实时显示技术中数据简化方面的典型算法.

关键词 三维地形 虚拟环境 DTM LOD 实时显示 分形几何 数据拟合

中图分类号: P208 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2000)04-0269-07

The Research Development of 3D Terrain Generation and Real-Time Display Techniques

QI Min, HAO Chong-yang, TONG Ming-an

(*Electronics & Information College of Northwestern Polytechnical University,
Xian Tech. Rsch. Center of Virtual Reality, Xi'an 710072*)

Abstract Three dimensional terrain is one of important factors of the natural scenes in virtual environment. It is also a significant composition of view system in virtual simulation field. The paper presents terrain generation techniques based on real terrain datasets, and terrain simulation techniques that are based on fractal geometry as well as data fitting methods respectively. Among the terrain generation techniques based on real terrain datasets, emphasis is laid on the real-time display of terrain and some typical data simplification algorithms are introduced according to their appearing time: discrete LOD, continuous LOD, and multiresolution model. Related conceptions and features of those algorithms are also discussed. In terrain simulation techniques based on fractal geometry, the paper gives an overview of several fractal modeling methods, and then makes a further discussion on two kinds of typical recursive subdivision plans of midpoint displacement that is the most practical approach in some applications. In data fitting techniques, plane fitting, curved surface fitting, and real terrain simulation according to some given topographic parameters are introduced. Finally, the development tendencies of all these techniques are discussed.

Keywords Three dimensional terrain, Virtual environment, DTM, LOD, Real-time display, Fractal geometry, Data fitting

0 引言

随着未来仿真技术和虚拟现实应用需求的不断提高,具有真实自然视觉效果的虚拟环境(Virtual

Environment, VE)建模技术将变得越来越重要.其中,自然景物的建模比人造物体的仿真要复杂得多,目前的计算机图形技术在生成地形、植物^[1-3]、云火^[4,5]、海浪^[6,7]等方面已进行了卓有成效的工作.由于三维地形通常与虚拟环境中物体的运动直接有

关,更由于它的数据量庞大,因此在建模和实时显示两个方面都有较高的要求。

具体地讲,在实时显示方面,图形硬件加速器的发展无疑起着关键作用。但同时也应看到,实际应用中经常需要面对这样一个问题,即所需的图形数据量往往比硬件可以实时显示的数据量大一个或多个数量级,而且应用模型的复杂程度往往超过当前图形工作站的实际处理能力。考虑到场景的复杂度几乎是无限的,因此人们试图通过算法和软件技术,在所期望的硬件性能和现实硬件水平之间搭起一座桥梁,三维地形数据的简化技术就是其中的一个重要研究内容。

目前,地形生成与仿真技术大致可归纳为三类,下面分别予以介绍。

1 基于真实地形数据的地形生成及实时显示技术

1.1 简单的地形生成技术

根据真实地形数据进行地形生成是实际工作中使用最多的一类。目前大多采用数字地面模型(Digital Terrain Model, DTM)来生成,DTM数据由在规则网格地形图上采样所得的高程值构成,与飞机或卫星上所拍摄的遥感纹理图象数据相对应,渐些纹理图象在重构地形表面时被映射到相应的部位。

简单的地景渲染算法^[8],是将相邻的4个网格点定义的DTM单元变换成二个三维空间的三角形,然后将视景物内部区域的所有这样的三角形送入图形流水线进行绘制。这种算法还可将图象纹理数据以它的最高分辨率映射到对应的多边形上,这是一个效率很低的方法。因为在一般情况下,三角形和遥感图象纹理象素的数量非常大,而每一个独立的三角形投影到图象空间后则很小,并且许多纹理象素可能被压缩到一个图象象素中,以至于对图象的影响可以忽略不计。因此,如果用DTM直接生成地形,即使在高性能的图形硬件平台上,要进行实时渲染,几乎也是不可能的,通常要对DTM数据进行一定的简化。

最基本的简化方法就是裁剪掉视景物以外的多边形,但这还远远不够,因为当距离较远时,视景物也可以延伸覆盖一个非常大的场景。而其它的一些裁剪技术,如单元分割^[9,10]等,一般只对室内漫游有效,对于地景这样的室外场景则无能为力。真实地形

数据简化方法的研究发展,大致可以划分为三个阶段(如表1所示)。

表1 地形数据简化技术发展过程及其主要特点

发展阶段	主要特点
离散 LOD 模型	同一模型各处具有相同的细节层次水平,相邻 LOD 间切换时伴有视觉上的突跳感。
连续 LOD 模型	同一模型各处具有相同的细节层次水平,可以实现相邻 LOD 间的平滑过渡。
多分辨率模型	不同水平细节层次同时存在于模型的不同区域。

1.2 离散 LOD 模型

一直到90年代前半期,研究工作主要集中在离散 LOD(Levels of Detail, LOD)模型的生成及实时显示方面。早期生成 LOD 模型的基本方法有两种^[11~13]:

(1) 简化方法(simplification) 从包含整个地形数据的三角形网格开始,逐步删除那些符合一定判别准则的数据点,直至粗化到需要达到的细节水平为止。这类简化方法(如“decimation algorithm”一类的算法)一般用局部的几何距离或角度作为判别准则的阈值。

(2) 细化方法(refinement) 从一个由很小的地形数据集构成的简单三角形网格结构开始,逐步添加进一些通过某种准则的点,从而改善分辨率,直到获得所需的细节层次,这类细化方法(如“greedy insertion method”一类的算法)用作准则阈值的参数有最大误差值等。

简言之,这类方法就是离线生成多个离散的不同细节层次的模型,实时显示时,根据当时的条件进行选用。这些条件包括地景整体距视点的距离远近、投影后地形在图象空间所占象素面积的大小以及光照强弱等。交互过程中,对于每个特定的场景,只需选择一个合适的 LOD 模型进行渲染即可。

由于不同 LOD 模型之间在拓扑结构上互不相关,因此这种离散 LOD 技术有一个明显的缺点,即在实时显示中,不同 LOD 模型之间进行切换时,在视觉上会引起明显的突跳感。为了克服这一现象,出现了许多改进的方法,如减小相邻 LOD 模型的细节层次差别,或者在距离视点较远的地方进行两个 LOD 模型的切换等。由于存贮空间是有限的,生成的 LOD 模型的个数必然会受到限制,因此这些方法从根本上说没有质的飞跃。

1.3 连续 LOD 模型

为了从根本上改变离散 LOD 技术存在的上述问题, 90 年代中期出现了连续 LOD 模型^[14, 15]. 一些文章上也把这种模型称为多分辨率模型(multi-resolution models)^[13]或多精度模型. 所谓连续 LOD 模型是指一种紧凑的模型表示方法, 从这个表示中可以生成任意多个不同分辨率的模型, 从而实现模型的连续显示. 这种技术一般通过迭代运算进行各种操作, 其中包括删除点、折叠边或网格中的一个三角形等, 从而得到简化的三角形网格. 这就隐含地定义了一个被简化模型的不同细节水平的层次结构. 每个后继的 LOD 与前一个 LOD 相比, 只有在删除点、边、三角形附近的局部区域有差别. 这种方法的优点是两个前后相继 LOD 模型的差别相对较小, 进行模型切换时, 只会引起视觉上非常微小的变化, 不易察觉.

这类方法的典型的代表是 Hoppe 提出的累进网格(Progressive Meshes, PM)法^[17]. 这种算法通过一系列的边折迭(EdgeCollapse), 将原始数据网格简化为一个简单的基网格, 这样就可以根据其逆操作边分裂(EdgeSplit)将细节逐渐增加到基网格上. 它的优点是可以抽取多个连续的细节层次, 支持数据的压缩存储和累进传输, 以及几何数据的重建, 这对于需要通过网络传输的数据绘制来说是很重要的.

Hoppe 认为, 优化准则限制得太严格可能导致优化操作的失败, 因此提出了一个相对宽松的条件. 这样将不可避免地引入额外的三角形, 并且在这些三角形所形成的近似区域上, 尚没有一个误差指标被用来评测优化三角形网格与原始网格间的近似程度, 因而失去了对优化过程的某种控制能力, 这是 PM 算法存在的一个问题. 此外, 虽然该算法允许所有不同细节层次之间进行光滑几何变形, 并支持各 LOD 间的平滑过渡, 但它不支持同一模型上不同区域同时存在不同的细节层次.

对 PM 算法, 还有许多改进方法, 如将边折叠/分裂扩展到点分裂/合并^[18]等处理, 但这种方法仍是对三维物体进行基于快速局部简化的处理技术.

1.4 多分辨率模型

上述的离散/连续 LOD 技术, 是适用于多种模型的通用方法. 相对而言, 这种方法对那些与地景相比体积较小的物体, 简化效果更为满意, 如人造物体、动物等. 地形简化同样使用这些技术, 这时所产生的地景各处分辨率相同, 且各区域的细节层次水平与视点或地表局部具体特征无关.

由于地景一般场面宏大, 延绵不断, 只有那些距离视点近的或变化曲率大的区域才需要较高的细节层次, 以保证一定的形状精度和真实感. 因此, 为了进一步减少数据量, 考虑用不同的分辨率来表示地景的不同区域.

我们将不同区域具有不同细节层次的模型称为“多分辨率模型”(Multiresolution model)^[19~21]. 目前这一名称使用比较混乱, 有时还包含连续 LOD 的概念, 本文采用的是 IEEE 可视化学术机构提出的分类名称. 有些文献也将这种模型称为“可变分辨率模型”(variable resolution model)^[22, 13]、自适应 LOD(adaptive LOD)^[23]等.

它的基本思想是用不同 LOD 构造或近似表示地景, 其中对局部分辨率依赖视点变化的地景模型, 距视点不同距离区域的细节层次水平可以不同, 并且随着视点的移动作相应的变化; 而对于依据地表特征变化的模型, 在突变和缓变处采用不同的细节层次. 这样即可在没有视觉损失的前提下, 加快大面积地景的渲染速度, 并且满足所需的图象质量要求.

根据上述思想, 场景的不同部分必须从多个 LOD 模型中获取, 即前景或突变区域从高细节版本中获取, 背景或平坦区取自低细节版本. 这就要求算法必须将不同的模型块缝合到一起, 使其连续且接合处没有接缝, 这就存在一个所谓的“空间连续性”(Spatial continuity)和“时间连续性”(temporal continuity)的问题.

地景的“空间连续性”是指不同细节层次之间的连接应当是连续的、没有缝隙或空洞, 此外在所有层次的细节水平上, 应当使用 Delaunay 三角形^[25], 以避免存在尖锐的三角形条.“时间连续性”指的是, 当地景的绘制随着视点的移动而变化时, 不同细节层次之间的变化不应当引起明显的走样现象(aliasing effect), 即不应引起视觉上的突跳感(如图 1 所示).

图 1 是两个不同时刻地形的一维剖面图, 两个剖面图都包含了具有不同细节层次的两个区域. 虚线标

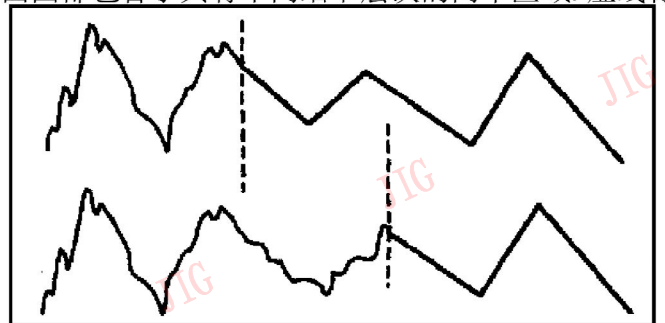


图 1 不同时刻地形的一维剖面图

明了从高细节层次向低细节层次变化的位置. 视觉上的突跳感出现在虚线间改变细节层次的部分.

在与视点有关的研究方面, Daniel Cohen-Dr 等人提出了一种方法^[24], 该算法首先离线建立两个相对应的不同细节层次的地形模型, 实时显示时, 两个模型可以在线融合, 从而, 地景可以从一种细节层次的表示逐渐演化为另一个表示. 这种方法同时满足用 Delaunay 三角形网格表示的地景空间连续性和时间连续性问题.

Mark Duchaineau 等人^[25]提出了“实时优化自适应网格”(Real-Time Optimally Adapting Meshes, ROAM) 算法. ROAM 算法的基础是三角形二叉树的动态网格表示法, 因此可通过定义三角形二叉树和分裂、合并操作, 来保证增加或删除顶点时网格的连续性, 其中分裂与合并操作用两个优先级队列来控制. 这种方法使用一个可以根据视点改变而灵活变化的误差矩阵, 然后通过对矩阵进行优化, 产生一个误差约束, 即可以直接获取指定的三角形数目, 并且运用帧与帧之间的相关性等其它一些优化措施来处理地景实时显示问题.

Cignoni 等人^[13]提出了一种利用门限函数来控制地景不同区域分辨率的可变分辨率(variable resolution) 模型, 其中门限函数由实际的应用问题确定. 这种方法可以实时地以任意分辨率恢复地形数据, 并可根据需要, 在整个地形区域采用同一分辨率或不同分辨率, 同时可以保证地形表面的连续性.

此外, 小波变换也被用于多分辨率模型, 它可分为两类.

一类如 Zhifan Zhu 等^[19]提出的与视点有关的算法, 该算法首先确定视点感兴趣的区域, 然后将地景划分为可变大小的块, 以确定信息所在的位置. 接着用小波变换对每个块进行编码, 再将这些块按其视觉信息量的大小分为不同的等级, 并将其中所含信息量最大的小波系数置入一个位流中, 进行累进传输和存取. 这个方法的主要研究目的是为了进行数据的压缩、存储和传输, 但也可用于地景的多分辨率实时绘制.

另一类算法, 如 Gross 等^[20]提出的由地形表面特征决定其局部的细节层次的算法. 该算法通过小波变换分解原始数据集, 然后分析变换所得的系数, 即首先定义一个小波空间滤波器, 然后通过对局部谱的估计, 来控制局部表面细节层次的近似程度. 这个局部的谱特性是由地形表面数据的小波表达式决定的,

且地景任何区域的细节层次可以自适应地实时优化. 在山脊、山谷等曲率高的区域用高细节层次表示; 在那些近似于平面的区域, 只需用较少的三角形就完全可以满足要求. 这种方法不仅对地景有效, 而且对其它定义在规则栅格上的数据集均很有效.

2 基于分形技术的地景仿真技术

2.1 概述

分形几何(fractal)^[27]是 Mandelbrot 于 1975 年造出的一个名词, 分形几何关注的是物体的随机性、奇异性和复杂性, 他试图透过混乱现象和不规则构型揭示隐藏在背后的局部与整体的本质联系和运动规律. 分形集合具有细节无限以及统计自相似性的典型特性, 它用递归算法使复杂的景物可用简单的规则来生成, 在现代的计算机图形学中, 分形几何在对自然现象的真实绘制和建模方面起着重要作用^[28-30].

地景建模是自然景物建模中很重要的一类, 许多分形地景建模都与分数维布朗运动(fractional Brownian motion, fBm) 这一数学模型有关. fBm 是现代非线性时序分析中的重要随机过程, 它能有效地表达自然界中许多非线性现象, 也是迄今为止能够描述真实地形的最好的随机过程^[31].

分形地景建模大致可归纳为泊松阶跃法(Poisson faulting)、傅里叶滤波法(Fourier filtering)、中点位移法(midpoint displacement)、逐次随机增加法(Successive random additions)和带限噪声累积法(Summing band limited noises)等 5 类^[32].

泊松阶跃法是最早由 Mandelbrot 研究的地景生成算法, 它是将泊松分布用于 fBm 的产物. 它在服从泊松分布的间隔上, 将高斯随机位移(或称步长函数)加到一个平面或球面上, 其结果具有 fBm 特征. 这种方法很适合于用球面生成类似星球的物体, 它的主要缺点是算法的时间复杂度达到了 $O(n^3)$.

傅里叶滤波法是将一个二维的高斯白噪声进行傅里叶变换, 在频域将变换结果同一适当的滤波器相乘, 然后再将所乘结果进行傅里叶反变换, 其结果就是 fBm, 从而形成很象自然地景的形态. 这种方法的优点是不仅可以精确地控制所有的频率分量, 还可以获得任意“lacunarity 效果”的地景. “lacuna”是表示“空隙”的拉丁语, Mandelbrot 引入“Lacunarity”一词, 作为量化分形地表纹理的一个

参数^[33], 其取值范围为 $\text{lacunarity} > 1$. 由于分形地表的纹理可以看成是由地表上微小扰动引起的凹凸起伏形成的, 且随着 lacunarity 的增大, 分形地表的凹凸起伏程度变缓, 峰与峰或谷与谷之间的间距变大, 因此产生不同的纹理图象效果. 傅里叶滤波法的缺点是最形成的地表结果具有周期性, 且算法的时间复杂度是 $O(n \log n)$, 此外, 还有缺少细节的局部控制以及难以改变采样的精细程度等缺点.

中点位移法是标准的分形几何法, 可用作快速地景生成. 它是利用细分过程中, 在两个点或多个点之间进行插值的方法来进行地景建模, 因此中点位移法产生了真正的分形地表. 但是不同细分阶段产生的点在相邻区域中有不同的统计特性, 这常会留下一道明显痕迹, 即所谓的“折痕问题”(creasing problem)^[34], 当添入更多细节时, 该轨迹也不消失. 虽然中点位移法有这样一个比较明显的缺陷, 但是它的高速度以及具有为已有形状增加细节的能力, 使它成为一个有用的面向应用的分形算法.

逐次随机增加法是一个灵活的细分方案, 如果需要利用上一级细分过程确定的点(不是所有的点都必须用), 则这些点需要首先增加一个服从某种分布的随机变量. 一般新的点可通过在上一级细分水平基础上进行线性或非线性插值得到. 这个算法的时间复杂度依赖于最终的分辨率和地表 lacunarity 化的程度.

带限噪声累积法是将频率范围受到严格限制的信号反复叠加, 其中每一个信号的幅度是随机变化的, 即噪声, 因此这种方法也称噪声合成法. 这是一种基于函数的建模方法, 每个点的确定独立于它的所有邻接点, 这是此法区别于一般的随机分形算法的独特之处.

2.2 中点位移法(MPD)

以上对分形地景建模算法进行了简单的概述. 总的来说, 由于现实自然景物的复杂性, 真实模拟自然景物的计算量还是很大的, 因此特别需探索出一些高效的算法, 尤其在虚拟仿真系统中, 通常希望产生实时动画的效果, 因此算法的效率更显重要. 由于中点位移法易于实现, 且运行速度快, 所以是一种常用的随机分形算法. 下面介绍两种常用的细分方案^[35]

2.2.1 三角形边线细分法

一种典型的三角形边线细分法如图2所示. 该细分法就是对三角形各边进行等分, 再将各中点连接起来, 这样一个三角形就变成了四个小三角形. 然

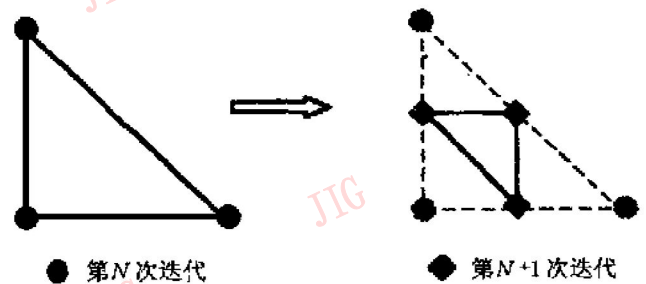


图2 三角形边线细分法

后在各中点上增加一个高斯随机变量, 其标准偏差由下式给出:

$$s = k2^{-iH}$$

其中, i 为迭代次数; k 是一个比例因子; H 是分形维数.

由于各相邻三角形间没有信息传递, 因此这是一种与细分操作前后无关的方法. 这一点很重要, 因为这导致了所谓的“折痕问题”. 即地景表面留有不自然的线型轨迹, 并且不能通过局部平滑去除. 与此方法类似的还有菱形-方形细分法等.

2.2.2 方形-方形细分法

此法如图3所示, 根据“新生正方形的面积是已存在正方形面积的一半”这一原则, 产生插值点的位置坐标, 其高程值由权重比 9: 3: 3: 1 决定, 距离最近点具有最大的权系数. 这种插值方法构成了一个双二次曲面的效果, 它的一个重要优点是地景表面的法线是连续的, 所以消除了三角形细分法中的折痕现象. 此外由于双二次曲面的效果影响, 因此, 用这个算法构造的地景轮廓比较柔和. 但是如果需要, 也可以通过减小 H , 使表面更粗糙, 另外, 还可通过放大 Y 值, 使山峰更突出, 从而可以得到陡峭的地景效果.

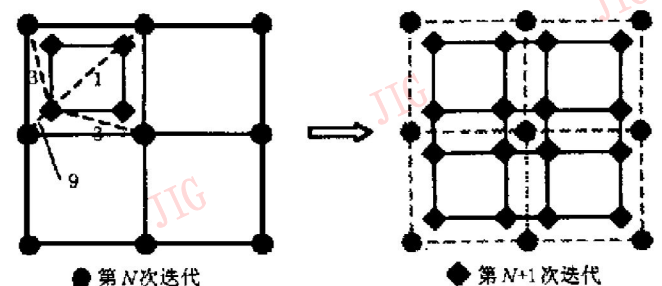


图3 方形-方形细分法

虽然中点位移法简单、快速, 但通常难以预测生成结果的大致形状. 针对这个问题, 出现了一些改进的算法, 如通过给定初始迭代次数和初始迭代数据来控制生成图形的基本形状和轮廓^[36]等. 自70年代中期“分形”概念提出到80年代, 由于分形几何迅速发展, 从而在地形生成方面成功地绘制出了相当逼真的

地景. 但此后, 对地形的生成与仿真的研究基本停留在“视觉上可以接受”这一标准上, 没有与实际所需的真实地形、地貌联系, 因此应用受到一定的限制.

3 基于数据拟合的地形仿真技术

最简单且常用的地形仿真方法是由稀疏分布点的高程值构成一些简单的三角形平面, 从而形成地形框架, 并贴以纹理图象的方法. 这种方法显示速度很快, 但基本框架过于简略, 且常有很强的卡通效果, 因此, 地景的真实感受到影响. 很多情况下, 地形仿真也用曲面(如二次、三次曲面等)进行拟合^[37, 38]. 曲面不需作分段线性近似, 仍可以保证相邻面的斜率连续性, 因此非常灵活. 但由于其数学计算的复杂性, 对于复杂场景来说, 计算量较大. 另外, 为了增加逼真效果, 也可以用分形技术直接对用上述方法生成的光滑平面或曲面进行噪声扰动, 从而形成真实感较强的地形表面^[39~41]. 目前, 又出现了用小波技术进行地形数据拟合^[42]的算法.

另一类方法, 则注重根据地学图形数据的精确描述^[43~45], 来进行真实地形的仿真, 如张继贤等提出的一种根据地形特征参数进行地形生成的方法, 这些特征参数包括平均高程、最大/最小高程及其位置、高程标准差、相关长度、地形粗糙度等. 在地形分析领域中, 地形则被看做是一种随机统计过程, 如平稳正态均方连续的马尔可夫过程. 该算法将这一观点与分形几何模型、随机点生成技术以及实用回归技术相结合, 首先利用给定的地形参数, 通过模拟符合地形统计特征的随机过程, 形成一定数量用来表示地形骨架的特征点, 再进行一定的处理, 统一为用规则网格分布形式表示的地形整体骨架. 然后利用分形技术中的中点位移法产生地形局部细节, 从而生成与某个真实地形非常相似的仿真地景. 并且, 该类方法还进一步地将小波技术引入到地形的多细节生成中, 即利用小波机制产生多尺度地形局部细节信号, 与已生成的表示地形骨架的特征点相综合, 再通过小波多尺度合成, 以获得符合要求的具有任意细节水平的真实三维仿真地形, 因而这是真实地景仿真中的一种连续 LOD 技术.

4 结束语

在将地形生成技术归纳为三类进行综述的基础

上, 现就各类技术的发展趋势进行一些讨论.

本文在基于真实数据的地形生成及实时显示方面, 着重介绍了典型的数据简化算法, 但数据简化仅是实时显示软件技术的一个重要方面, 通常一个能够实时显示大型数据集的完整系统, 还应包括几何数据和纹理数据的磁盘页管理、纹理的多细节层次选择、视景体的裁剪以及三角形串的优化等^[47, 48]几个方面的工作. 目前, 多分辨率模型是简化技术的一个重要发展趋势, 但已有的多分辨率模型所采用的简化准则是单一的, 即所采用的简化准则, 或者是依据视点变化, 或者是由地表特征来决定, 如果能将两者结合起来, 那么数据量将得到进一步减少.

在分形地景仿真方面, 目前的分形建模技术已和其它领域的技术相结合, 并已从单纯满足视觉感受的状况向实际地景仿真方向发展, 但如何生成不仅可视性好, 同时还满足一定几何精度的地形, 是分形地景仿真的重要发展方向. 因此, 若能将同一地区的航空或卫星遥感图象以纹理形式粘贴在三维地形表面, 那么生成的地形不仅具有三维几何信息, 而且拥有丰富的地物和人文信息, 这样的分形地景将具有更加广阔的应用前景.

在基于数据拟合的地形仿真方面, 其中根据地形特征参数生成地形的的方法, 是用少量数据仿真真实地形的一个有效方法, 也是将分形技术应用于真实地景生成的一个研究方向. 这种技术在保证一定精度的前提下, 并在尽量减少生成结果的数据量方面, 已研究出连续 LOD 模型, 但在多分辨率模型方面尚有待进一步发展, 以便能够对生成的数据量进行有效的控制. 这种技术将使其成为实时显示领域中具有较高实用价值的地形生成技术.

参 考 文 献

- 1 Xavier Gerard Viennot *et al.* Combinatorial analysis of ramified patterns and computer imagery of trees. *Computer Graphics*, 1989, 23(3): 31~40.
- 2 Jason Weber, Joseph Penn. Creation and rendering of realistic trees. In: *Proc. SIGGRAPH'95*, 1995, 199~128.
- 3 Radomir Mech, Przemyslaw Prusinkiewicz. Visual models of plants interacting with their environment. In: *Proc. SIGGRAPH'96*, 1996, 397~410.
- 4 Jos Stam, Eugene Fiume. Depicting fire and other gaseous phenomena using diffusion processes. In: *Proc. SIGGRAPH'95*, 1995, 129~136.
- 5 Tomoyuki Nishita *et al.* Display of clouds taking into account multiple anisotropic scattering and sky light. In: *Proc. SIGGRAPH'96*, 1996, 379~386.
- 6 Alain Fournier. A simple model of ocean waves. *Computer Graphics*, 1986, 20(4): 75~84.

- 7 Darwyn R Peachey, Modeling waves and surf. *Computer Graphics*, 1986, 20(4): 65~ 74.
- 8 Boris Rabnovich, Craig Gotsman. Visualization of large terrains in resource-limited computing environments. In: *Proc. Visualization'97*, 1997, 95~ 102.
- 9 曾芬芳主编. 虚拟现实技术. 上海: 上海交通大学出版社, 1997, 6.
- 10 Jonathan Shade *et al.* Hierarchical image caching for accelerated walkthroughs of complex environments. In: *Proc. SIGGRAPH'96*, 1996, 75~ 82.
- 11 Florian Schroder, Patrick Robb. Managing the complexity of digital terrain models. *Computer & Graphics*, 1994, 18(6): 775 ~ 783.
- 12 W J Schroeder *et al.* Decimation of triangle meshes. *Computer Graphics*, 1992, 26(2): 65~ 70.
- 13 P Cignoni *et al.* Representation and visualization of terrain surfaces at variable resolution. *The Visual Computer*, 1997, 13: 199 ~ 217.
- 14 Peter Lindstrom *et al.* REAL-Time continuous level of detail rendering of height fields. In: *Proc. Visualization'96*, 109~ 118.
- 15 潘志庚, 石教英. 多分辨率模型和三维几何压缩技术新进展. *计算机世界*, 1998-09-21.
- 16 唐泽圣. 三维复杂模型的实时动态显示. *计算机世界*, 1997-02-03.
- 17 Hugues Hoppe. Progressive Meshes. *Proc. SIGGRAPH'96*, 99 ~ 108.
- 18 William J Schroeder. A topology modifying progressive decimation algorithm. In: *Proc. Visualization'97*, 1997, 205~ 212.
- 19 Zhifan Zhu, Raghu Machiraju *et al.* Wavelet-Based multiresolution representation of computational field simulation datasets. In: *Proc. Visualization'97*, 1997, 151~ 158.
- 20 M H Gross, R Gatti *et al.* Fast multiresolution surface meshing. In: *Proc. Visualization'95*, 1995, 135~ 142.
- 21 Klein Reinhard. Multiresolution representations for surface meshes based on the vertex decimation method. *Computer & Graphics*, 1998, 22(1): 13~ 26.
- 22 Leila De Florian, Paola Magillo. Building and traversing a surface at variable resolution. In: *Proc. Visualization'97*, 103~ 110.
- 23 Julie C Xia, Amitabh Varshney. Dynamic view-dependent simplification for polygonal models. In: *Proc. Visualization'96*, 1996, 327~ 334.
- 24 Daniel Cohen-Or, Yishay Levanoni. Temporal continuity of levels of detail in delaunay triangulated terrain. In: *Proc. Visualization'96*, 1996, 37~ 42.
- 25 Tsung-Pao Fang, Les A Piegl. Algorithm for constrained delaunay triangulation. *The Visual Computer*, 1994, 10: 255~ 265.
- 26 Mark Duchaineau *et al.* ROAMing Terrain: Real-time optimally adapting meshes. In: *Proc. Visualization'97*, 1997, 81~ 88.
- 27 Falconer K J. *Fractal geometry*. New York: John Wiley & Sons, 1990.
- 28 Peter E Oppenheimer. Real time design and animation of fractal plants and trees. *Computer Graphics*, 1986, 20(4): 55~ 64.
- 29 John C Hart *et al.* Scientific and artistic investigation of multi-dimensional fractals on the At & T pixed machine. *The Visual Computer*, 1993, 9: 346~ 355.
- 30 Michael Gervautz, Christoph Traxler. Representation and realistic rendering of natural phenomena with cyclic CSG graphs. *The Visual Computer*, 1996, 12: 62~ 74.
- 31 陶闯, 林宗坚, 卢健. 分形地形模拟. *计算机辅助设计与图形学学报*, 1996, 8(3): 178~ 186.
- 32 F Kenton Musgrave *et al.* The synthesis and rendering of eroded fractal terrains. *Computer Graphics*, 1989, 23(3): 41~ 50.
- 33 M F Barnsley 等著, 和风译. *分形图形学*. 北京: 海洋出版社, 1995.
- 34 Alvy Ray Smith. *Plants, Fractal, and Formal languages*. *Computer Graphics*, 1984, 18(3): 1~ 10.
- 35 Gavin S P Miller. The definition and rendering of terrain maps. *Computer Graphics*, 1986, 20(4): 39~ 47.
- 36 曹晓光. 随机中点位移算法的改进. *中国图象图形学报*, 1997, 2(4): 234~ 238.
- 37 Geoffrey Y Gardner. Simulation of natural scenes using textured quadric surfaces. *Computer Graphics*, 1984, 18(3): 11~ 20.
- 38 Alok K Chaturvedi, Les A Piegl. Procedural method for terrain surface interpolation. *Computer & Graphics*, 1996, 20(4): 541~ 566.
- 39 Richard Szeliski, Demetri Terzopoulos. From splines to fractals. *Computer Graphics*, 1989, 23(3): 51~ 60.
- 40 M A Pumar. Zooming of terrain imagery using fractal-based interpolation. *Computer & Graphics*, 1996, 20(1): 171~ 176.
- 41 Craig M Wittenbrink. IFS fractal interpolation for 2D and 3D visualization. In: *Proc. Visualization'95*, 1995, 77~ 84.
- 42 Han Ju Yu, Jong Beom Ra. Fast triangular mesh approximation of surface data using wavelet coefficients. *The Visual Computer*, 1999, 15: 9~ 20.
- 43 张继贤, 柳健. 地形生成技术与方法的研究. *中国图象图形学报*, 1997, 2(8,9): 638~ 645.
- 44 王桥, 吴纪桃. 基于地学图形数据的地表分维计算方法研究. *中国图象图形学报*, 1997, 2(4): 220~ 224.
- 45 张继贤, 林宗坚等. 利用小波进行多尺度地形生成方法的研究. *中国图象图形学报*, 1998, 3(11): 931~ 935.
- 46 John S. Falby *et al.* NPSNET: Hierarchical data structures for real-time three-Dimensional visual simulation. *Computer & Graphics*, 1993, 17(1): 65~ 69.
- 47 Francine Evans. Steven skiena and amitabh varshney. Optimizing Triangle Strips for Fast Rendering. In: *Proc. Visualization'96*, 1996, 319~ 326.
- 48 Luiz Velho *et al.* Hierarchical generalized triangle strips. *The Visual Computer*, 1999, 15: 21~ 35.



齐敏 1968年生, 1997年在西北工业大学获信号与信息处理学科硕士学位, 现为该专业博士研究生. 曾发表“基于PC机的虚拟现实技术研究”等多篇论文. 感兴趣的研究领域为虚拟现实技术及应用、图形图象工程等.



郝重阳 西北工业大学教授, 博士生导师. 现任西工大电子与信息工程研究所所长兼中德联合信息技术实验室(筹)中方负责人、西安虚拟现实工程技术研究中心主任. 感兴趣的研究领域为信号与信息处理、图象图形工程与模式识别、虚拟现实技术等.



冯明安 西北工业大学电子信息学院教授, 博士生导师. 中国航空学会理事兼航空武器系统专业分会主任、部重点实验室主任. 研究领域为控制理论在航空火力控制系统中的应用、大系统理论与应用、飞机武器系统作战效能评估等.