

## 基于图象空间判据的地表模型加速绘制技术\*

刘学慧 吴恩华

(中国科学院软件研究所计算机科学实验室 北京 100080)

E-mail: lxh@ox.ios.ac.cn

**摘要** 在利用图形绘制实现虚拟现实的研究工作中,为了加速图形生成以保证实时的图形绘制,物体层次细节模型 LoD(level of detail)的选择是其最主要的解决办法,其主要原理是根据物体对于观察者的重要性选择该物体绘制的细节。地表模型作为多边形网格模型的一种特殊几何模型,在各种虚拟现实系统中有着重要而广泛的应用。该文通过对地表模型实时生成特殊性要求的分析,提出具有焦点加权因子的基于图象空间误差的、适用于地表模型特殊性的、有效的加速简化方法。以焦点和显示面积的有效结合作为物体重要性评价尺度,有效地简化了地表模型的绘制。同时,算法结合均匀网格模型的多分辨率细节层次模型,以“块”作为地表模型大面积简化的空间单位,加速地表模型的简化操作,以实现较为复杂的地表模型的实时绘制。

**关键词** 虚拟现实,地表模型,层次细节,实时绘制。

**中图法分类号** TP391

虚拟现实技术是近几年计算机图形学领域中发展起来的一种高度逼真地模拟人在自然环境中视、听、动等行为的  
人机交互技术。<sup>[1]</sup>它在实时仿真领域,如飞机汽车驾驶训练、战场作战模拟等具有重要的应用,这些系统皆涉及大规模  
复杂虚拟地表模型的动态生成,因而,地表模型的数据结构及其实时绘制技术是其研究工作的重点之一。

今天,高精度的扫描测绘手段为复杂物体基于多边形网格表示的三维几何建模提供了新的高效手段。但由于采样  
精度高,由此建立起的三维模型的复杂程度远远超过了当前计算机图形工作站的实时处理能力。如何降低这些模型的  
复杂度,减少图形系统需处理的多边形数目,实现复杂虚拟环境的实时生成成为虚拟现实技术的一个重大课题。<sup>[2]</sup>为  
此,人们提出了各种方法,细节层次 LoD(level of detail)便是其中一种非常有效的控制场景复杂度的方法。所谓 LoD  
技术,即在实时显示系统中采用的细节省略(Detail Elision)技术,它首先由 Clark<sup>[3]</sup>于 1976 年提出。其基本思想是,如  
果用具有多层次结构的物体集合描述一个场景,即场景中的物体具有多个模型,其模型间的区别在于细节的描述程  
度,那么,实时显示时,细节较简单的物体模型就可以用来提高显示速度。实时显示时,模型的选择取决于物体的重要  
程度,而物体的重要程度由物体在图象空间所占面积等多种因素确定。

在基于网格表示物体的具有多种细节的层次模型的自动生成方面,人们已取得了一些初步成果。这其中包括各种  
基于模型简化的层次细节模型生成方法,如基于顶点删除的多边形消减法<sup>[4~6]</sup>、基于面片合并的多边形消减法<sup>[7]</sup>、基  
于边操作的多边形消减法<sup>[8]</sup>以及基于网格重新布点的网格重新划分法<sup>[9]</sup>等。这些算法利用原模型的局部几何拓扑特  
性,建立基于物理空间的几何误差估计,以决定简化操作是否实施,而不考虑该简化操作所引起的视觉效果。同时,由  
于这些算法的工作对象皆为非均匀网格,算法不仅在对简化后遗留的空洞进行复杂三角化上耗费巨大,而且在模型拓  
扑信息的查询、修改上耗费亦相当大,因而算法无法达到实时。我们注意到,在这些简化模型中,最重要却也是最不  
足的一点是,其算法大多只能根据给定的误差为模型建立单一误差范围的细节模型,而不能为物体不同区域建立不同  
误差范围的多分辨率的细节模型。因而,不仅模型存储耗费相当大,而且,显示时只能根据整个物体在屏幕上所占面积、  
人眼对整个物体的注意程度等<sup>[10,11]</sup>来决定整个物体单一的细节。

虽然基于小波的多分辨率模型方法可以弥补这一缺陷,但小波计算的复杂性使得这些算法<sup>[12,13]</sup>难以实时进行。  
因而,以上种种模型对于地表模型的实时生成都是不适宜的。

\* 本文研究得到国家自然科学基金和国家 863 高科技项目基金资助。作者刘学慧,女,1968 年生,博士,主要研究领域为计算机图  
形学。吴恩华,1947 年生,研究员,博士导师,主要研究领域为计算机图形学,CAD,虚拟现实。

本文通讯联系人:刘学慧,北京 100080,中国科学院软件研究所计算机科学实验室

本文 1997-05-28 收到原稿,1997-06-23 收到修改稿

地表模型是一个有着一般多边形网格模型特点而又具有其自身鲜明特征的复杂几何模型。首先,由于飞机或汽车驾驶员必须依据所观察到的地表特征来判定所在位置等,这就要求虚拟环境系统在满足实时显示的同时,所生成的地形画面在一定的视觉误差范围内。因而,地表模型的简化应考虑视觉的“真实性”。同时,地表模型是一个有着大规模数据的几何模型,人眼所看到的仅仅是虚拟地表模型的一部分。因而地表模型的生成应根据用户对地表模型不同区域的注意程度,赋予不同区域以不同的分辨率细节。此外,在一般战场作战模型系统中,由于武器的摧毁作用,地表模型数据随时可能变化,因而其数据的存储不仅应便于查询,而且对数据的修改不应影响系统的效率。所有这些,在地表模型的实时生成中都应充分考虑。

## 1 地表模型的造型及其细节层次模型

在地表模型的层次细节模型的自动生成的研究工作中,人们提出了一些算法。这些算法采用非规则三角网格或均匀网格作为地表模型的面模型,利用顶点删除技术<sup>[14]</sup>和层次划分技术生成地表模型的层次细节模型。其中层次划分技术由于可以生成地表模型具有多分辨率的层次细节模型而受到广泛的注意。<sup>[15]</sup>

所谓层次划分技术,即利用曲面几何作图法的自适应分割技术,递归地建立地表模型具有多分辨率的层次细节模型。根据所采用分割方法的不同,又分为基于非规则三角网格和基于均匀网格的两种层次细节模型生成方法。前者如二叉树三角化(Ternary Triangulation)方法<sup>[16]</sup>、Delaunay三角划分方法<sup>[15]</sup>等;后者如四叉树三角化(Quaternary Triangulation)方法<sup>[17]</sup>、四叉树(Quadtree)方法<sup>[18]</sup>等。

非规则网格(Triangular-Irregular-Net)是由一组无规则散落在空间的点,各自与其邻近点相连所生成的几何模型的三角面描述。其特点是,可根据几何模型不同区域的平缓陡峭变化,形成大小各异、疏密不同的三角网格描述。由于其描述效率高,用非规则三角网格实现造型长期以来受到人们的普遍关注。这其中包括前面提到的各种基于层次划分技术、具有多分辨率的层次细节模型的自动生成方法。虽然非规则网格描述效率高,但由于三角化过程本身的复杂性以及非规则网格拓扑关系的繁杂性,使得各种基于非规则网格模型的细节层次模型的自动生成算法难以达到实时。

均匀网格是地形等数字化高度模型 DEM(digital-elevation-model)的一种常用面模型。其数据由一系列等间隔的地形高程值表示,代表一块方形网格地形。格网交叉点处的高度就是对应地面某点的高程值。均匀网格由于其数据存储位置能够反映实际数据的空间位置,因而这种数据格式非常方便对数据的操作。其最大优点还在于可以非常便利地生成具有多分辨率的层次细节模型。因为对子空间实施固定模式的分割就可得到较高分辨率的细节模型。因而,均匀网格非常方便实现地表特征物与地形间的自适应匹配。文献[19]中的系统即采用其作为地表模型的具多分辨率细节模型的表示方式,但均匀网格局部区域的取样精度往往影响其周围区域的分辨率,因而其简化程度受到一定限制。

鉴于以上模型表示的特点及地表模型生成的要求,Linstorm等人<sup>[20]</sup>结合非规则网格描述的高效性及均匀网格表示的规律性,以面片合并法作为地表模型简化的基本方法,并以面片合并后简化模型所引起的视觉空间的误差作为面片合并简化操作的评判标准,生成了描述效率高,且具有一定“真实性”的简化地表模型。该算法利用均匀网格良好的网格模式,以均匀网格作为地表模型的存储表示方式,从而不仅免去了一般简化操作中对模型拓扑关系的查询修改工作,而且避免了简化操作后必须对该简化区域实施三角化的过程。

但该算法仅以视点位置与所考虑数据的距离作为视觉空间误差的估计值,并以此决定模型细节的省略,算法仅仅考虑到LoD模型选择重要性因素的面积尺度因素。我们认为,为了提高动态模型的生成速度,应充分利用人的视觉特点,减少绘制模型的复杂性,对于视觉不同区域的模型赋予不同的显示效果。为此,我们提出具有聚焦因子的基于图象空间误差的地表模型消减算法,以焦点和显示面积的有效结合作为物体重要性评价尺度,以具有聚焦因子的透视投影变换较精确地计算视觉对由于细节简化所引起的误差的分辨能力,有效地简化了地表模型的绘制。同时,算法结合均匀网格模型的多分辨率细节层次模型,以“块”作为地表模型大面积简化的空间单位,加速地表模型的简化操作,以实现较为复杂的地表模型的实时绘制。

## 2 具有聚焦因子的基于图象空间误差的地表模型消减算法

### 2.1 地表模型的均匀三角网格化

要实现地表模型的实时简化,就应设计好整个地表网格模型的点、线、面关系,避免复杂的三角化过程。下面,我们首先给出地形高度数据场的三角化网格模型,并给出其后消减算法中用到的“三角对”的定义。

将一平面正方形区域内间隔相同的点集的三角划分,看作是经由该正方形顶点及中心点组成的4个直角三角形经过相同层次( $l \geq 0$ 且为奇数)的分割得到的,如图1所示。将直角顶点与其对边中点相连,即将此三角形分割为一对

三角形,得到该区域更精细的三角网格。我们称这一对三角形互为“三角形对”。而由其分割的那个三角形叫作此三角形对的“父亲”,反过来,它们又叫作其“父亲”的“孩子”。

由相应的 DEM 数据按上面三角网格相连,即得到该区域地形高度数据场的三角化网格模型。模型中的三角形面具有上述相同的关系。可以看出,此 DEM 数据由  $2^l+1$  行  $2^l+1$  列等平面间隔数据组成。从三角化过程可以看出,三角网格模型的生成可以看作一棵完全二叉树。其底层即为该正方形区域最精细的三角面模型,中间层的三角面相应于较粗分辨率的三角面模型,它们通过各自三角空间中的一点,即相应于平面直角对边中点的点“引入”各自的一对“孩子”;而此三角形对又以同样的方式“引入”各自的“孩子”。

算法首先从最精细的三角面模型考虑。如果一对三角形合并后,在图象空间所产生的误差小于用户定义的范围,则该对三角形在视觉分辨能力范围内可合并为一个三角形;此三角形又可与其相邻的三角形组成的三角形对对进一步进行合并,直至其三角形对不再满足合并条件。以上算法在结构上是从二叉树底层开始,不断合并三角形对,直至三角形对合并条件不再满足,或者其对应的三角形不能从最低层三角形对合并生成。

## 2.2 基于图象空间的具有聚焦因子的误差估计

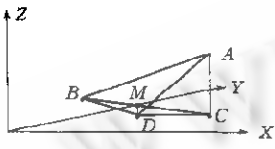


图2

当一对三角形  $\triangle ABD$  和  $\triangle ACD$  合并为其“父亲”三角形  $\triangle ABC$  时,所产生的物理空间的误差应为  $\triangle ABC$  到  $\triangle ACD$  的最大距离,即为图 2 中  $D$  点到  $BC$  中点  $M$  的垂直距离  $\sigma_D$ 。我们记为  $\sigma_D$ 。我们将世界坐标系的  $Z$  轴视为垂直向上,则  $\sigma_D = |Z_D - (Z_B + Z_C)/2|$ 。同时,我们把  $DM$  这条有向线段叫作数据点  $D$  的误差段。在地表模型的简化过程中,如果此对三角形在数据点  $D$  的误差段在投影平面上的投影长度小于给定值,那么,我们认为此对三角形可合并,即可由其“父亲”代替。

由前面叙述我们知道,Focus 是 LoD 选择重要性的关键尺度之一,因而对应于不同视区范围的地表模型应具有不同的显示效果。为此,我们引入基于图象空间的具有 Focus 因子的误差估计。为说明起见,首先,我们有如下设定。

(1) 设世界坐标系以地平面为  $XY$  轴平面,垂直向上为  $Z$  轴。

(2) 设视点  $V$  在世界坐标系下的坐标为  $V(x_v, y_v, z_v)$ 。视点坐标系各坐标轴单位向量在世界坐标系下的表示为  $\vec{x}(x_1, y_1, z_1)$ ,  $\vec{y}(x_2, y_2, z_2)$ ,  $\vec{z}(x_3, y_3, z_3)$ 。

(3) 设视点与投影平面距离为  $d$ 。投影平面坐标以  $xy$  坐标衡量,以下推导过程中各字母的下标 view 和 proj 分别代表在视点坐标系和投影平面坐标系下;否则为世界坐标系下。

利用两向量之间的点积公式,我们知道世界坐标系下任一点  $P(x_P, y_P, z_P)$  在视点坐标系下的坐标  $P_{\text{view}}(x_{\text{view}P}, y_{\text{view}P}, z_{\text{view}P})$  为

$$\begin{cases} x_{\text{view}P} = (P-V) \cdot \vec{x} = (x_P, y_P, z_P) \cdot (x_1, y_1, z_1) - (x_v, y_v, z_v) \cdot (x_1, y_1, z_1) \\ y_{\text{view}P} = (P-V) \cdot \vec{y} = (x_P, y_P, z_P) \cdot (x_2, y_2, z_2) - (x_v, y_v, z_v) \cdot (x_2, y_2, z_2) \\ z_{\text{view}P} = (P-V) \cdot \vec{z} = (x_P, y_P, z_P) \cdot (x_3, y_3, z_3) - (x_v, y_v, z_v) \cdot (x_3, y_3, z_3) \end{cases} \quad (1)$$

按透视投影,点  $P$  在投影平面上的坐标为  $P_{\text{proj}}(d * x_{\text{view}P}/z_{\text{view}P}, d * y_{\text{view}P}/z_{\text{view}P})$ 。所以,点  $D$  的误差段  $DM$  在投影平面上的投影长度为  $\sigma_{\text{screen}D} = d * \sqrt{(x_{\text{view}D}/z_{\text{view}D} - x_{\text{view}M}/z_{\text{view}M})^2 + (y_{\text{view}D}/z_{\text{view}D} - y_{\text{view}M}/z_{\text{view}M})^2}$ 。

我们假定图 2 中点  $D$  在世界坐标系下的坐标为  $(x_D, y_D, z_D)$ ,  $D$  点误差段长度为  $\sigma_D$ ,那么可知,点  $M$  的世界坐标系坐标为  $(x_M, y_M, z_M)$ ,由式(1)知

$$M_{\text{view}} - D_{\text{view}} = (x_{\text{view}M}, y_{\text{view}M}, z_{\text{view}M}) - (x_{\text{view}D}, y_{\text{view}D}, z_{\text{view}D}) = \sigma_D * (x_1, z_2, z_3) \quad (2)$$

而  $\|M_{\text{view}} - D_{\text{view}}\| = \sigma_D$ , 所以有

$$x_1^2 + z_2^2 + z_3^2 = 1 \quad (3)$$

为了提高实时显示的效率,我们可以利用人的视觉特点,以减少绘制模型的复杂性。眼睛焦点区域应比其他区域有更好的显示效果,周围视觉区域可以以较粗分辨率的模型表示。而依据一般透视投影变换公式计算,处于不同视觉区域、与视点距离相同的误差段的投影相差很小,因而不足以使算法得到较大的区别。为此,我们以视线方向与点  $D$  到视点连线的夹角  $\alpha$  的余弦  $\cos\alpha$  作为权值,计算  $D$  点的误差段的投影长度。我们知道  $\cos\alpha = \frac{(D-V) \cdot \vec{z}}{\|D-V\|} = \frac{z_{\text{view}D}}{\|D-V\|}$ 。同时,我们注意到式(2)中  $z_{\text{view}M}$  与  $z_{\text{view}D}$  之间的差值仅为  $\sigma_D * z_3$  值,其中  $|z_3| \leq 1, \sigma_D \ll z_{\text{view}D}$ , 所以,我们可以假设  $z_{\text{view}M} \approx z_{\text{view}D}$ 。

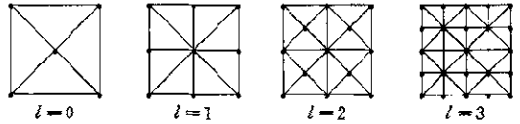


图1

由以上推导,我们可以得到 D 点误差段在图象空间的投影长度

$$\sigma_{screenD} = \frac{d * \sqrt{(x_{viewD} - x_{viewM})^2 + (y_{viewD} - y_{viewM})^2}}{|x_{viewD}|} = \frac{d * \sigma_D * \sqrt{z_1^2 + z_2^2}}{|x_{viewD}|}$$

加上 Focus 因子, 这时有  $\sigma_{scrnD} = \sigma_{screenD} * \cos\alpha = \pm \frac{d * \sigma_D * \sqrt{1 - z_3^2}}{\sqrt{(x_D - x_V)^2 + (y_D - y_V)^2 + (z_D - z_V)^2}}$ .

如果  $\sigma_{scrnD}$  小于用户定义的误差范围  $\epsilon$ , 即

$$\left| \frac{d * \sigma_D * \sqrt{1 - z_3^2}}{\sqrt{(x_D - x_V)^2 + (y_D - y_V)^2 + (z_D - z_V)^2}} \right| \leq \epsilon, \tag{4}$$

则认为 D 点引入的一对“孩子”可以合并, 即为其“父亲”所取代.

### 2.3 网格递归消减的数据结构

从以上叙述, 我们知道, 三角面对的合并过程实质上就是引入此三角面对的数据点的删除过程, 也就是父面片取代子面片对的过程. 因此, 引入此三角面对的数据点的可删除状态实质上决定了此三角面对的父面片的“存在”. 为此, 我们又把此数据点叫作此父面片的“控制点”. 地表网格模型简化过程, 即二叉树三角面对从下向上的合并过程, 就是决定各数据点所“控制”的父面片的“存在”过程, 也是各“控制点”的“删除”过程. 所以, 子面片的“控制点”可删除状态将是其父面片的“控制点”可删除状态的决定因素之一. 下面我们把子面片的“控制点”叫作父面片“控制点”的“子数据点”; 反过来, 父面片的“控制点”叫作子面片的“控制点”的“父数据点”.

从图 1 可以看出, 除正方形区域的边界数据点及中心点外, 正方形区域内每个数据点都引入两对三角形对, 共 4 个三角面片. 而这 4 个三角面片的“存在”又取决于各自的“控制点”的可删除状态. 故每个数据点的可删除状态除了将由其自身误差段在图象空间的投影决定外, 还将由其 4 个子数据点的可删除状态决定. 为此, 每个数据点除设置高度值和值位外, 还设置 5 个状态位: attribute 位——值在图象空间的判断位; child<sub>1-4</sub>——4 个子数据点的可删除状态位. 根据以上数据设置, 当对正方形区域内所有数据点的误差段进行了投影判断, 并递归地设置各相应父数据点的状态位之后, 就得到整个区域的简化模型.

### 3 基于物体空间区域分块的模型简化加速方法

DEM 数据往往由上万甚至上百万个数据组成, 如果仅凭前一节描述的简化算法, 在正常条件下是很难实现地表模型的实时简化的. 为此, 我们首先将 DEM 数据划分成“块”. 在施行简化算法时, 首先对块进行判断, 以加速简化算法的实施过程. 我们把间隔相同的固定行列数目的一个正方形区域内的数据定义为一个“块”, 并把此块内引入最低层三角面对的数据点叫作此“块”的最精细顶点. 从相邻 4 个这样的“块”删除它们的最精细顶点, 便又得到一个“块”, 它相应于原来 4 个“块”空间区域的粗分辨率网格模型. 如此, 整个数据场便组成了以“块”为空间划分单位的具有多分辨率的层次细节模型.

在加速简化过程中, 如果通过对一个“块”的估计可以大致知道此“块”的哪些顶点可以删除, 那么, 我们可以很快地得到此“块”的简化模型; 进一步地, 如果此“块”及其周围 3“块”的最精细顶点都可删除, 那么, 我们可以立即以此 4 “块”空间区域的较粗分辨率“块”模型拟合该 4 块区域. 为此, 我们分别计算出一个“块”内误差段投影长度不超过用户定义误差范围的最大长度值  $\sigma_1$  和最小长度值  $\sigma_2$ , 即此块内分别具有最大投影处和最小投影处的不超过用户定义范围内的误差段长度值. 因而, 对此“块”内所有误差段长度小于  $\sigma_2$  的数据点, 我们可立即断定其误差段的投影小于用户定义范围, 即其可能被“删除”; 对大于  $\sigma_1$  的数据点, 则知其误差段的投影必定大于用户定义范围, 不可“删除”; 对介于  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$  之间的数据点, 我们则需依公式(4)进一步作判定. 如果此“块”内所有最精细顶点的误差段长度值都小于  $\sigma_1$ , 且其周围 3 块也都如此, 那么可判定该 4 块区域可由该区域较粗分辨率“块”表示. 而此“块”又可重复上述操作, 加速地表网格模型的简化.

从以上可知, 整个地表模型的实时简化关键在于数据块的  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  的计算. 我们假定一数据块包围在点  $B_{min} = (x_{min}, y_{min}, z_{min})$  和  $B_{max} = (x_{max}, y_{max}, z_{max})$  形成的长方体中. 其中  $(x_{min}, y_{min}, z_{min})$ 、 $(x_{max}, y_{max}, z_{max})$  分别为此长方体包围盒的最小最大坐标. 令  $f(D) = \frac{\sqrt{z_1^2 + z_2^2}}{x_{viewD}}$ , 要求满足于式(4)的最短与最长的  $\sigma_1$  与  $\sigma_2$ , 即要求满足方程  $d * \sigma_D * f(D) * \cos\alpha = \epsilon$  的  $\sigma_D$  的最大最小值. 其中

$$x_D \in [x_{min}, x_{max}], y_D \in [y_{min}, y_{max}], z_D \in [z_{min}, z_{max}],$$

且

$$(x_D - x_V)^2 + (y_D - y_V)^2 + (z_D - z_V)^2 \geq d^2.$$

为方便求解,我们作如下假设,以快速求得 $\sigma$ 大致的上下界.假设 $D$ 点总处于视觉中心,即视点坐标系 $\vec{z}$ 轴方向.故 $\vec{z}=(V-D)/\|V-D\|$ ,即视点坐标系 $\vec{z}$ 轴坐标为 $((x_v-x_D)/\|V-D\|, (y_v-y_D)/\|V-D\|, (z_v-z_D)/\|V-D\|)$ ,有 $z_{viewD}=-\|D-V\|$ .根据式(3),我们有 $f(D)=\frac{\sqrt{(x_D-x_v)^2+(y_D-y_v)^2}}{(x_D-x_v)^2+(y_D-y_v)^2+(z_D-z_v)^2}$ .因而求解 $\sigma_l$ 与 $\sigma_s$ ,即求解满足上述条件的 $f(D)$ 和 $\cos\alpha$ 的最大最小值,然后根据 $\sigma_D=\epsilon/(d*\sigma_D*f(D))*\cos\alpha$ 求取相应的 $\sigma_l$ 与 $\sigma_s$ .

#### 4 具有时间连续性的地表模型的实时简化

为充分利用前后帧画面的相关性加速地表模型的实时简化,我们为上一帧画面设立一个活动块指针队列,记录上一帧画面以块为单位的地表简化模型,作为当前帧以块为单位的地表模型简化的初始值.在当前帧,根据当前视觉参数决定初始块的分辨率是否满足视觉要求,否则,以更精细或更粗的块模型代替,避免了以块为单位的地表模型的简化必须从最精细的模型开始.同时,我们为前一帧每个活动块记录当时所计算的 $\sigma_l$ 与 $\sigma_s$ 值,记为 $\sigma_{li}$ 与 $\sigma_{si}$ .那么,根据当前帧所得的此数据块(如果此数据块在当前帧仍为活动块)的 $\sigma_s$ ,我们立即知道,误差段长度值小于 $\sigma_{li}$ 且小于 $\sigma_{si}$ 的数据点即为当前帧与前一帧画面共有的共同点;而大于 $\sigma_{li}$ 小于 $\sigma_{si}$ 的数据点则是当前帧需对前一帧的修改处.对 $\sigma_{li}$ 与 $\sigma_{si}$ 也一样.

#### 5 实验结果

我们通过一个由 $1\ 025*1\ 025$ 个数据点组成的地形高度数据场实验模型验证本文算法的效率,并给出了实验结果.以下列表数据分别为相应于不同 $\epsilon$ 值,具有聚焦因子(见表1)和无聚焦因子(见表2)的算法在连续帧简化后,三角面片的数目.图3、4分别为 $\epsilon=1$ 和 $\epsilon=2$ 时生成的相应地表模型画面,图5为 $\epsilon=2$ 时与图2相隔两帧的同一数据场的不同地表画面.

表 1

$\epsilon$ 的取值	$\epsilon=0.5$	$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=4$
第1帧	129 146	51 983	17 581	6 143
第2帧	131 829	53 729	18 288	6 399
第3帧	134 653	55 253	19 026	6 492
第4帧	137 150	56 612	19 661	6 784
第5帧	141 592	57 896	19 959	6 843

表 2

$\epsilon$ 的取值	$\epsilon=0.5$	$\epsilon=1$	$\epsilon=2$	$\epsilon=4$
第1帧	150 558	62 023	20 876	7 286
第2帧	152 582	62 686	21 122	7 264
第3帧	154 655	63 480	21 365	7 291
第4帧	156 753	64 150	21 414	7 327
第5帧	158 629	64 871	21 315	7 295

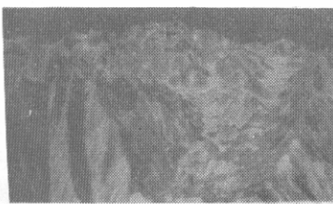


图 3

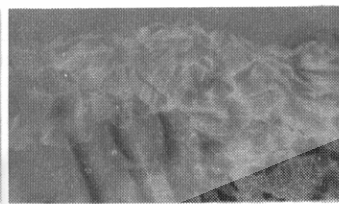


图 4

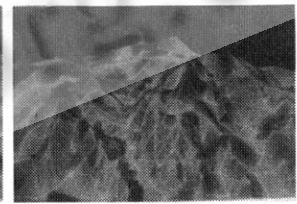


图 5

从以上列表数据可以看出,基于图象的误差判据并以“块”为单位的层次数据结构的使用能非常有效地控制场景的细节.当屏幕投影的高差值限制放宽时,所需绘制的场景复杂度有可能以数量级的级别递减.

#### 6 结 论

本文以焦点和显示面积二者的有效结合作为物体重要性评价尺度,有效地简化了地表模型的绘制.同时,算法结合均匀网格模型的多分辨率细节层次模型,以“块”作为地表模型大面积简化的空间单位,利用前后帧画面的相关性加速地表模型的简化操作,以实现较为复杂的地表模型的实时绘制.

#### 参考文献

- 1 Carolina Cruz-Neira. Virtual reality overview, overview of virtual reality. In: Course Notes 23 of SIGGRAPH'93, the 20th International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. Los Angeles, California: ACM SIGGRAPH, Aug.

1993. 1-1~1-18
- 2 刘学慧, 吴恩华. 虚拟现实的图形生成技术. 中国图象图形学报, 1997, 4(1): 205~212  
(Liu Xue-hui, Wu En-hua. Image synthesis in virtual reality. Chinese Journal of Image and Graphics, 1997, 2(4): 205~212)
  - 3 James H Clark. Hierarchical geometric models for visible surface algorithms. Communication of ACM, 1976, 19(10): 517~554
  - 4 William J Schroeder, Jonathan A Zarge, William E Lorensen. Decimation of triangle mesh. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH'92), 1992, 26(2): 217~226
  - 5 周晓云, 刘慎权. 基于特征角准则的多面体模型简化方法. 计算机学报, 1996, 18(增刊): 212~223  
(Zhou Xiao-yun, Liu Shen-quan. Polygonal model simplification method based on feature angle criterion. Chinese Journal of Computers, 1996, 18(supplement), 212~223)
  - 6 潘志庚, 马小虎, 石教英. 虚拟环境中多细节层次模型自动生成算法. 软件学报, 1996, 7(9): 532~536  
(Pan Zhi-geng, Ma Xiao-hu, Shi Jiao-ying. The automatic generation algorithm for models at multiple levels of detail in virtual reality. Journal of Software, 1996, 7(9): 532~536)
  - 7 Alan D Kalvin, Ressel H Taylor. Superfaces: polygonal mesh simplification with bounded error. IEEE Computer Graphics and Application, May 1996, 16(3): 64~77
  - 8 Hugues Hoppe. Progressive Mesh. In: Proceedings of SIGGRAPH'96 (Computer Graphics Proceedings). New Orleans, LA, Aug. 1996. ACM SIGGRAPH, 97~108
  - 9 Greg Turk. Re-tiling polygonal surfaces. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH'92), 1992, 26(2): 55~64
  - 10 Funkhouser T A, Sequin C H. Adaptive display algorithm for interactive frame rates during visualization of complex virtual environments. In: Proceedings of SIGGRAPH'93 (Computer Graphics Proceedings). Anaheim, California, Aug. 1993. ACM SIGGRAPH, 1993. 231~238
  - 11 Liu Wen-wei, Li jin-tao. Image-space based criteria for level of detail selection. Chinese Journal of Advanced Software Research, 1997, 4(2): 119~127
  - 12 Mathias Eck, Tony DeRose Tom Duchamp, Hugues Hoppe *et al.* Multiresolution analysis of arbitrary meshes. In: Proceedings of SIGGRAPH'95 (Computer Graphics Proceedings). Los Angeles, CA, Aug. 1995. ACM SIGGRAPH, 1995. 173~182
  - 13 Markus H Gross, Roger Gatti. Efficient triangular surface approximations using wavelets and quadtree data structure. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Jun. 1995, 2(2): 130~143
  - 14 Florian Schröder, Patrick RoBsch. Managing the complexity of digital terrain models. Computers and Graphics, 1994, 18(6): 775~883
  - 15 De Floriani L, Puppo E. Hierarchical triangulation for multiresolution surface description. ACM Transactions on Graphics, October 1995, 14(4): 362~410
  - 16 De Floriani L, Felcidièno B, Pienovi C *et al.* A hierarchical data structure for surface approximation. Computers and Graphics, 1984, 8(2): 475~484
  - 17 Pottmann H, Eck M. Modified multiquadric methods for scattered data interpolation over a sphere. Computer Aided Geometric Design, 1990, 7(1-4): 313~321
  - 18 Chen Z T, Tobler W R. Quadtree representation of digital terrain. In: Proceedings of Autocarto, London, 1986. 475~484
  - 19 John S Falby, Michael J Zyda, Daud R Pratt *et al.* NPSNET: hierarchical data structures for real-time three-dimensional visual simulation. Computers and Graphics, 1993, 17(1): 65~69
  - 20 Lindstrom Peter, Koller David, Ribarsky William *et al.* Real-time, continuous level of detail rendering of height fields. In: Proceedings of SIGGRAPH'96 (Computer Graphics Proceedings). New Orleans, LA, Aug. 1996. ACM SIGGRAPH, 1996. 109~118

## Accelerating Techniques in Rendering Terrain Surface Based on Image-Space Error

LIU Xue-hui WU En-hua

(Laboratory of Computer Science Institute of Software The Chinese Academy of Sciences Beijing 100080)

**Abstract** LoD (level of detail) is one of the most important techniques in creating real-time rendering of virtual environment. As a special mesh model, terrain surface model has important and wide-ranged application background in virtual reality. In this paper, the authors present an algorithm for real-time LoD reduction and display of high-complexity terrain surface data. The algorithm allows the generation and computation of appropriate level of detail dynamically by using the compact and efficient regular grid representation. Through analysis of the special requirement for rendering virtual terrain surface, they combine size and focus criteria to estimate the importance of detail of terrain surface and provide a screen-space threshold to bound the maximum error of the projected image. Besides, the whole dataset is constructed into a hierarchy of block-based representations with their error bound precalculated. As a result, a coarse level of simplification could be firstly performed to choose discrete level of detail for the surface mesh, and further simplification is operated on individual mesh vertices within a block. The algorithm has been implemented for approximating and rendering digital terrain models and the experimental results show its high efficiency.

**Key words** Virtual reality, terrain model, level-of-detail, real-time rendering.