

# 复杂场景中动态简化层次的构造

陶志良 潘志庚 石教英

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要** 多细节层次描述(简称 LoD)是实时绘制复杂几何场景的一种有效工具。基于层次结构的动态简化方法能够根据视点的变化,实时连续地转换场景细节模型。本文提出了一种改进的动态网格简化框架,它利用顶点映射机制支持不同细节层次之间的快速连续转换,同时还给出了建立和维护复杂场景动态简化层次结构的方法。

**关键词** 多细节层次, 网格简化, 视点相关绘制, 虚拟现实

## 1 简介

为了满足日益增长的计算机图形真实感需要,几何模型变得越来越高度细节化。然而,通过传统的建模方式或者三维距离扫描系统得到的模型网格都十分复杂,不利于存储、传输和绘制。为了解决这个矛盾,人们直接利用简化后的近似网格代替原始网格进行绘制;或者先定义一组不同细节层次的网格模型,再根据不同场景和视点绘制不同的网格模型。多细节层次模型(Level of Detail, 简称 LoD)方法进一步提高了模型绘制系统的性能。国内外研究人员已提出了多种不同的网格简化方法<sup>[2~5]</sup>,并取得了不少满意的结果。

然而,在复杂的几何场景中,一般的网格简化算法难以保证简化性能和时间效率之间的平衡。随着视点的动态转变,如何实时得到合适的场景细节模型是实现复杂场景实时绘制的一个重要前提。Xia<sup>[6]</sup>和 Hoppe<sup>[7]</sup>分别提出了一种基于层次结构的动态网格简化方法,它们具有通用,全自动和自适应等特点。这种层次结构能够无缝地结合各种不同的网格简化算法,在复杂几何场景中随着视点的动态转变实时构造不同模型的细节层次。

基于这种层次结构,本文提出了一种改进的动

态网格简化方式。它不仅具有通用性和自适应性等特点,还可以通过网格顶点映射机制实现不同场景细节模型之间的快速转换,达到实时的效果。另外,通过建立网格顶点映射机制还会拓展可操作的网格类型,结合更多基于不同简化操作的网格简化算法。

## 2 多细节模型的动态层次结构

### 2.1 网格简化

根据不同的网格简化元操作,可以把网格简化算法分成顶点移去、边折叠和三角形合并等不同类型。图1所示的就是基于边折叠简化元操作的网

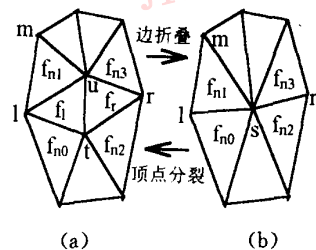


图1 边折叠和顶点分裂示意

态网格简化过程。整个网格简化过程经过元操作迭代产生一系列不同层次的简化网格。在场景绘制中,我们根据对象的远近选择高细节层次或者低细节层

• 本课题得到国家自然科学基金项目“虚拟现实动态连续细节层次技术”(No. 69633010)和国家自然科学基金重点项目“真实感图形实时生成技术”共同资助。

收稿日期:1997-12-08;收到修改稿日期:1998-03-23

次进行绘制。

这种思想已经应用于实际工作,如建筑漫游或飞行仿真器,并且取得了较好的效果。但是,对于真正复杂的 CAD 模型和场景,仅仅做到这一点还不够。我们不仅要发掘更多的可简化信息,还要做到随着视点的变化实现细节模型实时连续转换。

### 2.2 基于视点相关的网格简化

在场景绘制中,选择合适的细节模型不仅取决于对象的远近,还应当包括观察视区,可见性,以及其他众多视觉因素。文献[6, 7]分别列出了一组类似的判断标准,主要有以下3类。

#### 2.2.1 屏幕空间的投影误差

场景中某些网格元素虽然比较大,但是投影到屏幕后所占的空间可能非常小,如果它小于计算机或者视觉可以分辨的程度,那么就可以把这部分网格元素简化。我们也可以结合真实感图形绘制算法计算不同细节层次绘制效果之间的误差。

#### 2.2.2 模型可见性分析

图形绘制过程要花大量的时间进行可见性判断,消隐所有不可见的部分。基于同样的原因,我们可以简化网格中不可见的部分。例如模型背向视的部分最终将消隐掉,我们可以事先进行背部的网格简化,有效地减少消隐的计算量。

#### 2.2.3 模型边界效果

模型边界是衡量场景中细节模型绘制效果的一项重要因素。一般物体的边界部分总较其他部分更加引人注目。

通过充分应用视点相关因素,网格模型能进一步得到简化,而且对单个复杂的几何模型来说就可能同时存在多个不同的细节层次。因此,为了实现场景实时绘制,网格模型需要能够随着观察者视点的变化实时简化或者精化。然而一般的网格简化算法无法满足这些要求,因此有必要建立一种适用于任意三角形网格数据的动态简化算法框架。而基于普通网格简化算法的树状层次结构是其中一种有效的工具<sup>[6]</sup>。

## 3 树状动态层次的构造

### 3.1 基本结构

在普通网格简化算法生成的网格操作序列中,虽然某些网格操作之间存在约束关系,但是有许多网格操作是相互独立的。因此选择某个合适的细节

层次模型时,我们希望不按照网格简化算法确定的操作顺序进行网格操作,而是从中有目的地选择某些操作。

树状层次结构能够十分有效地发掘不同网格操作之间的独立性和维护它们的相关性。根据网格简化算法的不同类型可以构造不同的层次结构:二叉树、三叉树或者四叉树。以图1所示的基于边折叠为简化元操作的网格简化算法为例,场景网格二叉树以自低向上的方式构造。原始网格中的所有顶点都以叶节点的形式初始化。

### 3.2 网格操作的相关性

我们利用一条顶点链表示当前网格的顶点集合,连接所有叶节点的顶点链表示原始网格,而连接所有根节点的顶点链则代表了最简网格。实际上,我们可以通过改变顶点链在树集合中的位置来改变模型的细节层次。对于上述树状层次结构,可以进行一组对偶操作:边折叠和顶点分裂。当前顶点链上具有同一个父节点的两个子节点可以合并成父节点,顶点链也相应地移到父节点处;而顶点分裂操作恰好相反,处于当前顶点链上的父节点分裂成两个对应的子节点,同时改变顶点链的位置。

图2所示的树状结构能够清晰地表示网格简化过程中的相关区域。其中每棵树都代表了一个封闭的相关区域,也就是说,本棵树上进行的网格操作不受其他树中网格形状的影响,并且,那些具有严格先后顺序的网格操作都已经通过树的层次关系表示出来:只有存在于顶点链上且满足一定条件的节点允许进行网格操作。

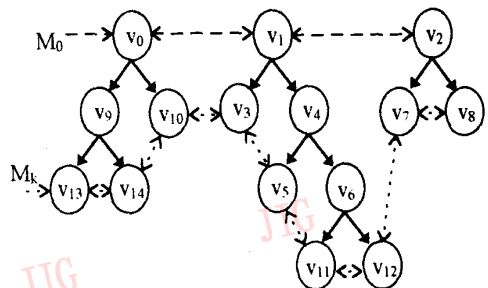


图2 LoD 网格模型的顶点层次结构示意,其中网格的顶点集合由顶点链表示。

但是,如果允许任意选择两个满足上述条件的子节点进行边折叠操作,经过一段迭代过程后,网格表面可能会出现不规则的畸变<sup>[6]</sup>,甚至网格最终不能恢复原始网格的结构。这主要因为树状层次结构

建立在一次已完成的网格简化基础上,算法仅按当时的简化顺序对每次简化操作都进行合法性判断,但是现在网格操作顺序已经被打乱,我们必须重新进行网格操作相关性检查.Hoppe<sup>[7]</sup>给出了如下关于相关性检查的经验判据。这组经验判据简单快速,能有效地进行相关性操作检查,避免出现不规则的局部网格。

如图1所示,如果基于树的顶点分裂操作有效,那么它必须满足以下条件:

- 分裂母点  $s$  位于当前顶点链中;
- 相邻三角形  $\{f_{n_0}, f_{n_1}, f_{n_2}, f_{n_3}\}$  均位于当前网格中。
- 如果基于树的边折叠操作有效,那么它必须满足以下条件:
  - 子节点  $u$  和  $t$  均位于顶点链中;
  - 当前网格中与三角形  $\{f_r, f_t\}$  相邻的三角形分别为  $\{f_{n_0}, f_{n_1}, f_{n_2}, f_{n_3}\}$ 。

## 4 基于顶点映射的快速操作

### 4.1 网格操作的实现和局限

顶点树中每个节点不仅要保存树结构和本顶点的信息,还要保存相关网格区域的信息,如相邻三角形集合和简化中被删除的三角形等信息<sup>[7]</sup>。这些信息能够帮助我们进行有效的相关性检查和网格操作。所有这些信息都在网格简化过程中产生。这就出现了一个问题,由于节点保存的被删除三角形信息只表示简化时该三角形的顶点信息,而随着网格操作的无序进行,原来的顶点邻接关系可能已经不复存在。在这种树结构下,每次顶点分裂产生的新三角形顶点是不确定的,我们不得不寻找正确的三角形顶点信息。

另外,由于结构的改变,无论是边折叠操作还是顶点分裂操作都需要修改相邻三角形的某些顶点,但这是一个相对复杂的搜索过程,并且只适用于具有一致表面法向量的三角形网格。对那些不具有双面性或者没有一致的法向量的网格,如莫比乌斯圈和通过 Marching-Cube 算法生成的网格,我们只能在节点中保存所有与该顶点相连的三角形,或者不得不搜索整个网格寻找所有邻接三角形。

### 4.2 顶点映射机制

为了提高网格操作的效率,我们在网格树中引入了顶点映射机制。首先需要建立一张顶点索引表  $VI$  和基于  $VI$  的映射关系  $g: V \rightarrow V$ , 其中  $V$  表示网

格顶点空间,定义映射  $g$  为如下的递归函数:

$$g(v) = \begin{cases} v, & VI[v] = -1 \\ g(VI[v]), & VI[v] \neq -1 \end{cases} \quad (1)$$

算法先把索引表  $VI$  中的表项初始化为  $-1$ , 其含义是最初每个顶点号对应各自的顶点坐标值。以后每进行一次网格操作就改变相应的顶点索引关系,而各相关三角形的顶点序号保持不变。如  $VI[t] = s$  表示顶点  $t$  被合并到顶点  $s$ 。也就是说,这样得到的最简网格  $M_0$  的拓扑构造是一种间接构造,每个三角形顶点由映射  $g$  相互联系。最简网格  $M_0$  中的任一三角形  $f_{i_0}$  与原始网格  $M_k$  中对应的三角形  $f_{i_k}$  有着相同的顶点序号,并且存在如下映射关系:

$$f_{i_0} = \{v_{g(a)}, v_{g(b)}, v_{g(c)}\} = g(\{v_a, v_b, v_c\}) = g(f_{i_k}) \quad (2)$$

因此,虽然  $M_0$  中的三角形之间是一种松耦合,它还是可以通过映射关系(2)方便地描绘出来。

一旦顶点树建立,索引表  $VI$  也同步完成。基于顶点映射  $g$  的网格操作不仅能快速地找到每个三角形在不同网格层次中的真正顶点关系,还支持其他对表面法向量没有限制的网格类型。

### 4.3 快速转换

我们可以看到,顶点索引表保存了顶点的合并信息,按折叠顺序连成一条链。由于网格中所有三角形都通过原始顶点表示,每个节点内保存的三角形也通过原始顶点表示。当该节点分裂时,无论相邻顶点进行了何种操作,顶点映射关系都会把它们与原始顶点牢牢联系起来。因此在网格结构的变化过程中,虽然新生成的三角形顶点保持不变,但它们只要通过顶点映射变换就能确定在任意网格中的新位置,如图3所示。同理,我们也不再需要在网格操作后修改相关三角形的顶点,仅仅改变顶点的映射关系就够了,可以避免大量的搜索计算工作。如图1(b)中:

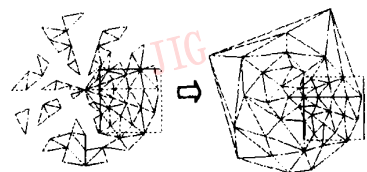


图3 基于顶点映射的网格转换

$$g(f_{n_1}) = \{g(l), g(m), g(u)\} = \{g(l), g(m), g(s)\} = \{l, m, s\} \quad (3)$$

一旦顶点  $s$  分裂完成后,由于顶点  $u$  的索引表

项被修改为-1,关于三角形  $f_{n1}$  的映射就变为:

$$g(f_{n1}) = \{g(l), g(m), g(u)\} = \{l, m, u\} \quad (4)$$

表1 随视区的变化而更新网格  
细节层次所需的时间(以毫秒计)

		视点 a	视点 b	视点 c
球冠模型 (180个面片)	原算法	13.96	46.73	28.65
	顶点映射	7.31	18.68	17.02
人头模型 (1355个面片)	原算法	305.95	257.44	449.73
	顶点映射	161.88	154.07	283.53

通过式(3)和(4)我们可以看出顶点分裂后,映射  $g$  能够准确地改变相应三角形地拓扑构造。在实际网格绘制过程中,我们并不直接处理网格中的三角形  $f_{n1}$ ,而是间接地利用映射  $g(f_{n1})$  来获得当前真正的三角形位置。这在场景模型的实时绘制,控制显

示帧频率的应用中十分有用。表1列出了应用顶点映射方法的动态层次网格简化算法测试两个网格模型得到的结果。

## 5 结 论

作为一种有效的连续细节层次模型的表现形式和多细节层次管理框架,网格动态层次结构能够有效的配合复杂场景的实时绘制。在实现和分析网格动态层次框架的基础上,我们应用一种顶点映射机制,通过三角形变换加速基于动态层次的网格操作,同时还因此扩展了适用的网格类型。在以后的研究中,我们将考虑更多的与视点相关的因素,同时结合其他有效的网格简化算法,拓展网格动态层次框架的适用范围。

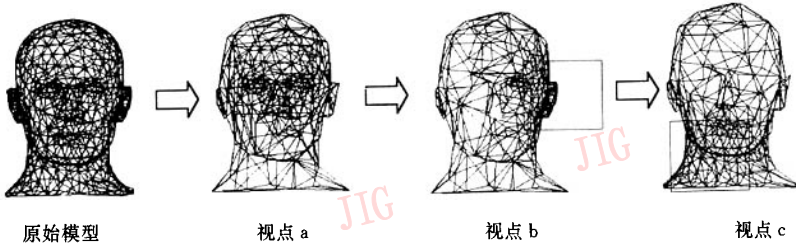


图4 人头模型的细节层次随着视区的移动而连续变换,图中方框表示视区。人头模型的原始面片数为1355。

## 参 考 文 献

- 1 潘志庚,马小虎,石教英. 多细节层次模型自动生成技术综述. 中国图象图形学报. 1998,3(9):754~759.
- 2 Cohen J, Varshney A, Manocha D, et al. Simplification Envelopes. Computer Graphics, SIGGRAPH'96 Proceedings, 317~345.
- 3 Hoppe H, DeRose T, Duchamp T, McDonald J, Stuetzle W. Mesh Optimization. Computer Graphics. SIGGRAPH'93 Proceedings, 19~26.
- 4 陶志良,潘志庚,石教英. 基于能量评估的网格简化算法及其应用. 软件学报,1997,8(12).
- 5 周晓云,刘慎权. 基于特征角准则的多面体模型简化算法. 计算机

- 学报(增刊),1996,212~223.
- 6 Xia J, Varshney A. Dynamic View-dependent Simplification for Polygonal Models. IEEE, Visualization'96 Proceedings, 327~334.
- 7 Hoppe H. View-Dependent Refinement of Progressive Meshes. Computer Graphics, SIGGRAPH'97 Proceedings



**潘志庚** 1990年毕业于南京大学计算机系,获硕士学位。1993年毕业于浙江大学计算机系,获博士学位。现为浙江大学CAD&CG国家重点实验室研究员,研究方向为分布式图形、虚拟现实和多媒体计算技术。



**陶志良** 1996年毕业于浙江大学计算机系,现为浙江大学计算机系硕士研究生,研究方向为计算机图形和虚拟现实技术。



**石教英** 教授,博士生导师,现任中国图象图形学会副理事长。研究方向为虚拟现实、多媒体和科学计算可视化。

## A Hierarchical Dynamic Simplification Implementation in Complex Environments

Tao Zhiliang, Pan Zhigeng, Shi Jiaoying

(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** Level-of-detail(LoD) representations perform an effective tool for real-time rendering of complex geometric environments. Of these representations, hierarchical dynamic simplification can continuously refine a LoD model at run-time according to changing view point. This paper improves original framework of hierarchical dynamic simplification. We apply a vertex mapping method to effectively support the rapid transformation between different LoD models. In addition, the method for constructing and maintaining the framework of hierarchical dynamic simplification is introduced.

**Keywords** Level of detail, Mesh simplification, View dependent rendering, Virtual reality

## 影雷者 II 获殊荣 影雷者大赛开场

记者近日从艾尔莎公司获悉,该公司前不久推出的最新多功能游戏加速卡影雷者 I (Erazor I) 荣获最近出版的德国 PC 杂志(PC Professionell)颁发的编辑选择奖。评测结果表明,影雷者 I 以99分的优异成绩击败其他多家竞争厂商选送的同类产品而荣膺榜首。

艾尔莎的影雷者 I 之所以能在该项评测中高居榜首,是因为它采用 NVIDIA RIVA TNT 显示芯片, 16MB SGRAM 及 AGP 二倍速(133MHz)总线,它不仅能为3D 游戏软件表现出绝佳的三维空间效果,更可在贴图软件、办公用软件以及影像处理软件方面有令人称道的表现。该卡采用的两个3D 32位材质贴图处理器可实现每秒1.8亿像素的处理速度。在3D 游戏中,其分辨率可达全彩的1600×1200dpi,给人以极其细腻的感受。影雷者 I 高速支持 Direct3D、DirectX6.0 及 OpenGL 硬件加速,其128位图形引擎可实现对 Windows 95、Windows 98和 Windows NT 的加速,是游戏迷的理想选择。

据悉,为配合艾尔莎影雷者代言人选拔大赛,该系列3D 游戏加速卡正在各地进行热卖。此次大赛的截止日期为12月15日。有兴趣者可在 [www.elsa.com](http://www.elsa.com) 查到具体参赛要求,作品则可以通过电子邮件发至 [Erazor-tp@elsa.com](mailto:Erazor-tp@elsa.com)。(赵凡)

## 欢迎订阅《系统仿真学报》双月刊

邮发代号:82—9

《系统仿真学报》是中国系统仿真学会会刊、国内一级刊物,是中科院论文统计用刊,并被中国学术期刊(光盘版)全文数据库、中国导弹与航天引文数据库、美国《工程索引》(EI)检索数据库等收录。

欢迎订阅,欢迎投稿,欢迎刊登广告、欢迎索取样刊

地址:北京市海淀区永定路50号,北京142-213分箱

邮编:100854 电话:68388709 联系人:马京莲