

# 多细节层次模型自动生成技术综述\*

潘志庚 马小虎 石教英

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要** 细节层次模型是指对同一个场景或场景中的物体,使用具有不同细节的描述方法得到一组模型,供绘制时选择使用。本文结合国内外在这一领域的最新进展,特别是我们自己在这方面的研究工作,对细节层次模型自动生成技术进行介绍和分类,并对一些典型方法的优缺点进行了分析,最后对这一技术的发展进行了展望。

**关键词** 细节层次, 网格简化, 虚拟现实, 多分辨率模型

## 1 引言

细节层次(Level of Detail, 简称 LOD)模型是指对同一个场景或场景中的物体,使用具有不同细节的描述方法得到一组模型,供绘制时选择使用<sup>[1,2]</sup>。由于人们通常用多边形网格(特例为三角形网格)来描述场景中的图形物体,因而 LOD 模型自动生成模型就转化为三维多边形网格简化问题。为物体提供不同的 LOD 描述是控制场景复杂度和加速图形绘制速度的一个非常有效的方法,LOD 模型在复杂 3D 场景的快速绘制、飞行模拟器、3D 动画、交互式可视化和虚拟现实等领域得到广泛应用。

LOD 技术的产生可以追溯到 1976 年,Clark<sup>[3]</sup>认为当物体覆盖屏幕较小区域时,可以使用该物体描述较粗的模型,并给出了一个用于可见面判断算法的几何层次模型,以便对复杂场景进行快速绘制。在 1982 年,Rubin<sup>[4]</sup>结合光线跟踪算法,提出了复杂场景的层次表示算法及相关的绘制算法,从而使计算机能以较少的时间绘制复杂场景。Crow<sup>[5]</sup>用一个实例说明了同一物体采用不同的 LOD 模型所具有的优点。

90 年代初,图形学方向上派生出虚拟现实和科学计算可视化等新研究领域。虚拟现实和交互式可

视化等交互式图形应用系统要求图形生成速度达到实时,而计算机所提供的计算能力往往不能满足复杂三维场景的实时绘制需要,因而研究人员提出多种图形生成加速方法<sup>[6]</sup>,LOD 模型则是其中一种主要方法。这几年在全世界范围内形成了对多 LOD 自动生成技术的研究热潮,并且取得了很多有意义的研究成果。

1991 年,DeHaemer<sup>[7]</sup>利用自适应递归方法,提出了基于规则四边形网格表示物体的简化多边形网格的方法;在 1992 年,Schroeder<sup>[8]</sup>提出了基于顶点移去的网格简化算法。Greg<sup>[9]</sup>给出了基于网格重新划分的多边形网格模型简化方法。1993 年,Hoppe<sup>[10]</sup>提出了一种整体网格优化方法,它包括网格匹配过程和网格简化过程。Rossignec<sup>[11]</sup>使用多分辨率近似法自动生成物体的简化模型,该方法并不保持原有模型的拓扑结构;1994 年,Hamann<sup>[12]</sup>给出了一种基于三角形移去的模型简化方法。

1995 年,He<sup>[13]</sup>使用信号处理方法来消除模型的高频细节,从而得到简化模型。Eck<sup>[14]</sup>利用小波变换把多面体模型表示为多分辨率形式,由此可生成一系列连续的多 LOD 模型。1996 年,Cohen<sup>[15]</sup>使用内外两个包络网格来控制简化过程,该方法可保持模型的拓扑结构。Kalvin<sup>[16]</sup>利用面片合并方法来自动生成物体的简化模型。Hoppe<sup>[17]</sup>基于网格优化方法,

\* 本研究工作受国家自然科学基金和浙江大学曹光彪高科技基金资助  
收稿日期:1997-10-09;收到修改稿日期:1998-01-04

提出了累进网格的概念以及生成方法,该方法搜索平面区域和特征边,使用边折叠操作来完成简化功能。Lindstrom<sup>[18]</sup>对规则网格表示的地形模型提出了一种实时连续 LOD 绘制方法,在三维地形仿真中得到成功应用。Ronfard<sup>[19]</sup>针对非常复杂的场景,使用区域合并操作来进行模型简化,该方法根据与原始形状的几何偏差度量进行边合并。Guezic<sup>[20]</sup>提出了一种误差可控的模型简化方法,边折叠操作与 Ronfard 所用的边折叠方法类似,而误差控制方法则与 Cohen 所用的方法类似。Xia<sup>[21]</sup>提出了一种动态的、与视点相关的多边形网格模型简化方法。Algnri<sup>[22]</sup>使用一聚类过程来确保简化操作仅在某些区域进行,聚类是通过查找特征边和平面区域来完成的。

在 1997 年,Hoppe<sup>[23]</sup>对累进网格进行扩展,形成对任何网格都适用的且与视点有关的累进网格。Garland<sup>[24]</sup>使用二次误差度量来控制表面网格的简化,该方法可快速产生高质量的近似模型。

以上是国外的一些研究工作介绍,国内近几年也开展了一些卓有成效的研究工作<sup>[1,2,26,27]</sup>。例如,文献[25]提出了一种基于特征角准则的多面体简化方法,算法适用于对网格进行少量的删减。文献[26]提出一种基于快速形成近平面的简化算法,算法具有保细节、保真和快速等优点;文献[1]提出了一种基于三角形移去准则的多面体模型简化方法,与 Hamann<sup>[12]</sup>的方法比较,该方法具有删减程度高并且计算量少两个优点;文献[27]对基于重新划分的网格简化算法进行改进,简化了分布点的操作。

## 2 算法分类

根据上面的介绍可知,近几年提出了多种多边形网格简化算法,本节对这些算法进行分类。网格简化的目的是把一个用多边形网格表示的模型用一个近似模型表示,近似模型基本保持了原模型的可视特征,但顶点数目少于原始网格的顶点数目。通常的做法是把一些“不重要的”图元(顶点、边或三角形)从多边形网格中移去。下面在对算法进行分类前先介绍常用的重要性度量方法。

### 2.1 重要性度量

#### (1) 局部误差度量

局部误差度量是一种简单的误差度量方法,在高度场数据中,一个顶点 $(x, y)$ 的重要性可定义为 $|H(x, y) - (\tau S)(x, y)|$ ,其中 $H(x, y)$ 为原有模

型中 $(x, y)$ 点处的高度值,而 $(\tau S)(x, y)$ 为近似模型中 $(x, y)$ 点处的高度值。很显然,这种局部误差越小越好。例如在 Schroeder<sup>[8]</sup>的算法中,使用点到平均平面的距离作为局部误差度量方法。

#### (2) 曲率度量

在用三角形网格描述物体的表面时,根据曲率可以很好地区分表面的一些特征(如地形数据中的峰、谷、脊)。在进行简化时,可在高曲率处保留尽量多的点,而在低曲率处删除尽量多的点。对于由函数 $H(x, y)$ 给定的表面,通常使用 $\zeta^2 H / \zeta x^2 + \zeta^2 H / \zeta y^2$ 作为曲率度量。Turk<sup>[9]</sup>通过计算顶点和三角形的曲率,把新顶点分布在曲率较大的三角形上。

#### (3) 全局误差度量

全局误差度量是指所有点上近似误差的总和。控制全局误差通常可以得到较好的近似效果,但也会增加计算量和算法的复杂性。在网格精化过程中,所增加的顶点必须有尽量小的全局误差。例如可以把全局误差精确地定义为两个多边形网格表示的曲面之间的 Hausdorff 距离。

#### (4) 特征角度量

多边形网格中顶点的重要性也可以用特征角来衡量,特征角可以定义为顶点处任意两个相邻三角形的法向量之间的夹角中的最大者。

## 2.2 分类方法概述

多边形网格简化算法进行分类的标准有多种。

#### (1) 拓扑结构保持型/拓扑结构非保持型算法

在拓扑结构保持型简化算法中,必须保持模型的拓扑结构。大多数算法对输入的数据模型有要求,如果模型包含退化情形(如多边形重叠或边由两个以上的面片共享),那么则不能进行处理。绝大多数简化算法<sup>[1,7,8,10,12,14,16]</sup>都属于这种类型。拓扑结构非保持型简化算法并不保持模型的局部或全局拓扑结构。由于这类算法<sup>[11,13,19,24]</sup>的约束条件较少,因而模型的简化程度较高。在要保持较高帧速率且图形的视觉效果可以一定程度下降时,可以使用这类算法,但是有时所生成的简化模型效果可能会很差。

#### (2) 自适应细分型/采样型/几何元素删除型

##### • 自适应细分型

这种方法要求首先建立原始模型的最简化形式,然后根据一定的规则通过细分把细节信息增加到简化模型中,从而得到较细的 LOD 表示<sup>[7,30]</sup>。这种方法不太常用,原因是在一般情况下构造最初网格的最简模型相当困难,它主要适用于均匀的网格

(如高度场)。

#### • 采样

这种方法类似于图象处理中的滤波方法,有时不能保持拓扑结构不变。它对原始模型的几何表示进行采样,一种方法是从它的表面选择一组点<sup>[9,29]</sup>,另外一种方法是把一个三维网格覆盖到模型上并对每个3D网格单元进行采样<sup>[11]</sup>。在第一种方法的选择一组点时,又可分为随机选点或根据一定的规则选择特征点,显然选择特征点的方法的近似程序高,但计算量大。

#### • 几何元素删除型

几何元素删除型算法通过重复地把几何元素(点、边、面)从三角形中“移去”来得到简化模型(见图1)。这里的“移去”分3种情形:一种是直接删除,另一种是指通过合并2个或多个面来删除边或面,第3种是指对边或三角形进行折叠。移去或删除操作一直进行,直到模型不能被简化或达到用户指定的近似误差为止。绝大多数算法要求在进行几何元素删除时,不要破坏模型的拓扑结构,大多数的模型简化算法都属于这一类型<sup>[15~17,19~24,28,29]</sup>。

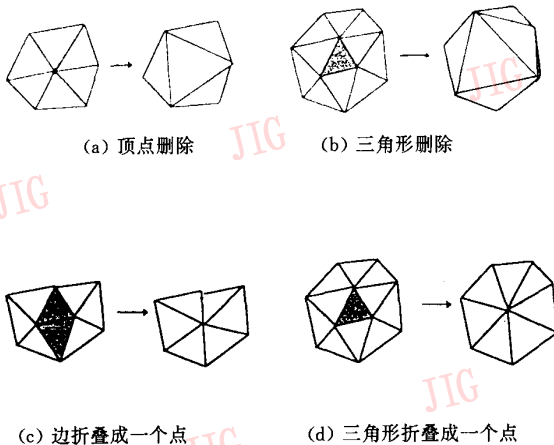


图1 典型的几何元素删除操作

#### (3) 局部算法/全局算法

全局算法是指对整个物体模型或场景模型的简化过程进行优化,而不仅仅根据局部的特征来确定删除不重要的图形元素。有些全局算法中也使用到一些局部算法的特征。全局算法的例子有Turk<sup>[9]</sup>提出的在表面上重新分布顶点;Hoppe<sup>[10]</sup>使用的全局能量最小化方法;Cohen<sup>[15]</sup>提出的包络网格以及Eck<sup>[14]</sup>的小波表示方法。

局部算法是指应用一组局部规则,仅考虑物体的某个局部区域的特征对物体进行简化,这些算法

的例子有Schreorder<sup>[8]</sup>的顶点删除,Rossignac<sup>[11]</sup>的顶点折叠,Hoppe<sup>[17,23]</sup>和Gnezic<sup>[20]</sup>的边折叠,Hamann<sup>[12]</sup>的三角形删除。

#### (4) 其它分类方法

除了上面三种主要的分类方法外,我们还可以有其它一些分类方法,如视点相关性、误差可控性、实时性、连续过渡性等特征。

## 3 典型算法

### 3.1 自适应细分型算法

DeHaemer<sup>[7]</sup>提出的算法(算法1)是自适应细分算法的典型代表,该算法假定输入模型来自于三维扫描仪的输出。它利用了输入数据的规整性。根据用户指定的误差容限(用欧拉距离定义),算法通过多次细分,来自动生成一个简化模型。该算法具有拓扑结构保持特征,它的缺点在于仅适用于正规网格(如高度场),另外,计算初始供细分用的简化模型比较困难。

### 3.2 采样型算法

Rossignac<sup>[11]</sup>提出的多分辨率3D近似算法(算法2)是一种采样算法,该算法分为4个主要步骤:①赋予各顶点以权值,给物体特征变化较大处的点(特征点)以较大的权值;②根据物体的复杂程度,相对大小等因素把物体所占空间划分为多个立方体单元;③计算位于立方体单元中各顶点的代表点;④把位于同一个立方体单元中的点用其代表点代替,把产生的退化多边形移去。该算法的优点在于它适用于任意类型的输入模型,甚至可以是一些不构成网格的多边形集合。另外它也是一种非常有效的快速简化方法。其缺点在于不保持原模型的拓扑结构,因而而产生模型的视觉效果不佳。另外,近似误差也不可控制。

### 3.3 几何元素删除型算法

#### (1) 几何元素直接删除型

几何元素直接删除型算法包括:顶点删除<sup>[8,15]</sup>和三角形删除<sup>[27]</sup>,这类算法的基本思想是通过评价顶点或三角形的重要性,如果这顶点或三角形不重要,那么就删除它,并对得到的空洞进行三角化。

Schroeder<sup>[8]</sup>提出的三角形网格简化算法(算法

3)是最经典的网格简化算法,该算法分为以下几个主要步骤:① 计算三角形网格中每个给定顶点的局部几何和拓扑特征,并对顶点分类;② 如果点到平均平面的距离小于给定的近似误差值,那么就删除这个顶点;③ 对删除顶点后留下的空洞进行局部三角化;④ 重复上述操作,直到三角形网格中无满足上述条件的点为止。

这个算法的计算量小,时间复杂度为线性,有很好的保细节特性,能保持拓扑结构,简化模型的顶点为原始模型顶点的子集。由于算法采用局部近似误差质量,在多次迭代后误差会积累,从而影响简化模型的质量,另外这个算法仅适用于流形物体。

为了有效地约束近似误差,Cohen<sup>[15]</sup>提出了一种基于包络网格的模型简化算法(算法4),该方法的主要特点在于并不使用误差度量,而是通过几何结构(内外两层包络网格)来控制简化过程。该算法的基本步骤为:① 构造内外两层包络网格(通过偏移顶点来完成);② 对于初始网格中的每个顶点,完成以下步骤:移去该顶点以及相邻的面片,如果可行,对形成的空洞进行三角化,并保证形成的面片不与内外包络网格相交,否则放弃删除。

该算法的优点在于能够保拓扑结构,有效地保持基本特征,对棱角也能很好地保持,它能有效地约束全局误差,支持自适应的近似。该算法的最大缺点在于仅适用于二维流形,不适用于任意多边形网格模型(如面片有自交情况),另外包络网格难于构造。为了克服这个缺陷,我们对包络网格的概念进行推广<sup>[31]</sup>,提出超包络概念,并且简化了包络的构造操作。

### (2) 近平面合并型

近平面合并算法<sup>[16,26,32]</sup>的基本思想是把近似位于同一个平面上的相邻三角形进行合并,形成一个大多边形,再用数目较少的三角形网格来表示这个多边形。近平面合并算法的一个典型例子是Kalvin<sup>[16]</sup>在1996年提出的基于区域生长的贪婪式简化算法(算法5),该算法分为以下3个步骤:① 超面(指相邻三角形合并后得到的面)生长,将原始模型表面分解为多个超面;② 边界拉直,即对相邻超面共享的边界进行简化;③ 超面的重新三角化。

该方法不仅适用于任意用三角面片表示的复杂模型,而且还可以适用于其它多边形网格表示的模型,简化速度明显快于其它算法。另外它提供了一个较理想的手段来保证简化模型与原模型的误差(全

局误差),并且简化模型的顶点为原始模型顶点集的子集。

### (3) 边折叠型

使用边折叠进行模型简化的算法很多<sup>[10,17,20~24,28]</sup>,边折叠操作容易构成连续过渡的多个LOD表示模型,便于多分辨率模型的管理。

Hoppe<sup>[10]</sup>在1993年提出的网格优化算法是最早引进边折叠简化元操作的算法,它源于一个表面重构算法,它通过使一个全局能量函数最小化来简化模型。该算法由于要建立和求解复杂的全局能量优化方程,因而计算复杂性高,很难达到实时。在这个算法的基础上,Hoppe在1996年提出了累进网格<sup>[17]</sup>(算法6),从而支持多分辨率表示。它首先搜索平面区域和特征边,然后通过使用边折叠操作来进行模型简化。当边折叠产生一个新顶点时,移去两个面和一个顶点,结果将产生一个简化的基网格和一系列的顶点分裂操作(边折叠的逆),可用于把细节增加到基网格上,使用这种累进网格,可抽取多个连续的细节层次。

算法分为以下几个步骤:

① 使用基于能量方程表示的最小简化代价对边进行排序,并放入一个表中;

② 对表中前面的边进行边折叠操作,记录下对应的顶点分裂操作;

③ 新顶点可选在边的两个端点或边的中点;

④ 重新计算那些受简化元操作影响的边的代价函数;

⑤ 重复②~④,直到表为空,或者简化代价超过给定值。

这个算法的优点在于可以生成连续细节层次,支持模型的累进传送和有选择精化,并且还考虑到面片上彩色和纹理信息的处理,多个细节层次所占用的存储空间很小。算法的局限性在于仅能处理二维流形。1997年,Hoppe<sup>[23]</sup>又一次对算法进行改进,使得算法能完成与视点有关的精化。

Garland<sup>[24]</sup>提出的网格简化算法(算法7)可以对原始模型产生高质量的近似结果。算法使用重复的边对(edge-pair)折叠操作来简化模型,并用二次误差度量方法来计算近似误差。该算法可分为以下几步:

① 计算原始模型中每个顶点的误差矩阵 $Q$ ;

② 选有效的可进行折叠的顶点对;

③ 为每个顶点对 $(v_1, v_2)$ ,计算最优的用于代替 $v_1, v_2$ 的新点 $v'$ ;

④ 把所有顶点按折叠代价顺序放在堆中 ( $v^i(Q_1+Q_2)v^i$  为折叠代价), 最小代价放在顶部;

⑤ 重复地把顶点对  $(v_1, v_2)$  从堆中输出, 进行折叠, 并修改受影响的顶点对的代价。

该算法既可作用于流形物体, 也可作用于非流形物体, 可以把一些模型中不相连的区域进行合并, 且能保持相对高的质量。

需要指出的是, 有些算法很难归入具体那一类, 例如: Eck<sup>[14]</sup>提出的任意网格多分辨率分析方法。该

方法的最大特点在于引入了小波变换且能生成多分辨率模型, 表示紧凑, 在两个细节层次之间插值仅需要增加或减去小波系数, 支持多分辨率模型编辑。该方法的缺点在于计算量大, 且实现相当复杂。

基于边折叠的模型简化方法的另一个例子是 Xia<sup>[21]</sup>提出的动态的、与视点相关的多边形网格简化算法。简化依赖于视点方向、光照和可见性, 并且算法充分利用图象空间、对象空间以及帧与帧之间的相关性, 可以产生实时连续的 LOD 表示。

表1 典型简化算法特征对比

| 比较项目      | 算法 1 <sup>[7]</sup> | 算法 2 <sup>[11]</sup> | 算法 3 <sup>[1,8]</sup> | 算法 4 <sup>[15]</sup> | 算法 5 <sup>[16,32]</sup> | 算法 6 <sup>[23]</sup> | 算法 7 <sup>[24]</sup> |
|-----------|---------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|----------------------|
| 类型        | 自适应细分               | 采样                   | 点删除                   | 点删除                  | 近平面合并                   | 边折叠                  | 边折叠                  |
| 全局/局部误差度量 | 全局                  | 其它 <sup>2</sup>      | 局部                    | 全局                   | 全局                      | 其它                   | 全局                   |
| 拓扑特征      | 保持                  | 保持                   | 保持                    | 保持                   | 保持                      | 保持                   | 不保持                  |
| 紧凑多分辨率    | 不支持                 | 不支持                  | 不支持                   | 不支持                  | 不支持                     | 支持                   | 支持                   |
| 适用模型类型    | 四边形正规网格             | 任意网格模型               | 流形面                   | 流形面                  | 任意网格模型                  | 二维流形                 | 任意网格模型               |
| 保持特征边     | 保持                  | 不保持                  | 保持                    | 保持                   | 保持                      | 保持                   | 不保持                  |
| 细节层次过渡    | 连续                  | 不连续                  | 不连续                   | 不连续                  | 不连续                     | 连续                   | 连续                   |
| 误差有界      | 有                   | 无                    | 无                     | 有                    | 有                       | 无                    | 无                    |

注: 其它误差衡量标准可归为全局误差控制

## 4 结束语

本文结合我们自己的研究工作, 对国内外 LOD 生成技术和多边形网格简化技术进行了综述, 我们除了对已有算法进行改进和提出新的简化算法外, 还在 LOD 模型插值和累进网格方面取得了多项研究结果, 受篇幅所限不一列出。

以后需要进一步研究的内容包括: 表面属性(如彩色, 纹理等)的统一处理、多分辨率模型的管理、视点和视区有关的 LOD 生成和绘制算法、LOD 层次之间的平滑过渡和实时连续 LOD 绘制、基于 LOD 的限时图形绘制、模型近似误差度量标准。

## 参考文献

- 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).
- 马小虎. 虚拟现实多细节层次模型的研究[博士论文]. 浙江: 浙江大学, 1997.
- Clark J H. Hierarchical geometric models for visible surface algorithms, Communications. of the ACM, 1976, 19: 547~554.
- Rubin S M. The representation and display of scenes with a wide range of detail. The Graphics and Image Processing, 1982, 19:

- 291~299.
- 5 Crow F C. A more flexible image generation environment. Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings), 1982, 16(9): 9~18.
- 6 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, 2(4): 205~212.
- 7 DeHaemer Jr, Michael J, Michael J. Zyda. Simplification of Objects Rendered by Polygonal Approximations. Computer & Graphics, 1991, 15(2): 175~184.
- 8 Schroeder, William J, Jonathan A. Zarge, and William E. Lorensen. Decimation of Triangle Meshes. Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings) 1992, 26(2): 65~70.
- 9 Turk Greg. Re-Tiling Polygonal Surfaces. Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings), 1992, 26(2): 55~64.
- 10 Hoppe, Hugues, Tony DeRose, Tom Duchamp, et. al. Mesh Optimization. Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings), 1992, 27: 19~26.
- 11 Rossignac, Jarek R, Paul Borrel. Multi-resolution 3D Approximations for Rendering Complex Scenes. Technical Report RC 17697, IBM Research Division, T J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY 10958, 1993.
- 12 Hamann, Bernd. A Data Reduction Scheme for Triangulated Surfaces. Computer Aided Geometric Design, 1994, 11(2): 197~214.
- 13 He Taosong, Lichan Hong, Arie Kaufman, Amitabh Varshney, Sidney Wang. Voxel Based Object Simplification. IEEE Proceedings 1995: Visualization'95: 296~303.
- 14 Matthias Eck, DeRose Tony, Duchamp Tom et al. Multiresolu-

- tion Analysis of Arbitrary Meshes. Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings), 1995, 29: 173~182.
- 15 Cohern J, Varshney A, et al. Simplification envelopes, Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings), 1996, 30(119~128).
- 16 Alan D Kalvin, H Taylor. Russell. Superfaces: Polygonal Mesh Simplification with Bounded Error. IEEE Computer Graphics and Application, 1996, 15(3).
- 17 Hopper H. Progressive meshes, Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings), 1996, 30(99~108).
- 18 Lindstrom P, Koller, D et al. Real-time continuous level of detail rendering of height fields, Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings), 1996, 30.
- 19 Ronfard R, Rossignac J R. Full-range approximation of triangulated polyhedral. Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics), 1996, 15(3): 67~76
- 20 Guezeic A. Surface simplification inside a tolerance. Technical Report, IBM Division, T. J. Watson Research Center, 1996.
- 21 Xia J C, Varshney A. Dynamic view-dependent simplification for polygonal models. IEEE Visualization'96, 1996, 323~339.
- 22 Algnri M E Mesh simplification. Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics), 1996, 15: 77~86.
- 23 Hoppe H. View-dependent refinement of progressive meshes. Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings) 1997, 31.
- 24 Garland M, Heckbert P. Surface simplification using quadric error metrics. Computer Graphics (SIGGRAPH Proceedings), 1997, 31.
- 25 周晓云, 刘慎权. 基于特征角准则的多面体简化方法. 计算机学报, 增刊, 1996, 212~223.
- 26 陈礼民, 秦爱红. 三维图形简化新算法. 中国图象图形学报, 1997, 2(2,3): 157~160.
- 27 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).

**潘志庚** 男, 33岁, 博士, 研究员。研究方向集中在分布式图形、汉字信息处理、虚拟现实及多媒体等, 近年来在国际著名期刊和国内一级期刊上发表论文 20 余篇。参加编写著作 3 部。现任中国图象图形学学会多媒体技术专委会委员。



**马小虎** 男, 35岁, 博士, 副教授。研究兴趣为汉字信息处理、虚拟现实等, 发表论文 20 余篇。



**石教英** 男, 60岁, 教授, 博士生导师。研究领域为分布式图形、科学计算可视化、虚拟现实及多媒体等, 共发表论文 100 余篇。现任中国图象图形学学会副理事长, 国际著名图形学 Computers&Graphics 期刊编委。



## Overview of Multiple Level of Detail Creation

Pan Zhigeng, Ma Xiaohu, Shi Jiaoying

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

**Abstract** Models at multiple level of detail are widely used in real time rendering of complex 3D scene, flight simulator, 3D animation, interactive visualization, and virtual reality. Mesh simplification may be used to create models at level of detail. In this paper, we present a summary on the mesh simplification techniques including latest achievements in this field. And we compare the typical methods and give the prospect of this technique.

**Keywords** Level of detail, Mesh simplification, Virtual reality, Multiple resolution modeling