

# 一种层次化模型构造方法\*

周晓云<sup>1</sup> 何大曾<sup>2</sup> 刘慎权<sup>1</sup>

(1. 中国科学院计算技术研究所 CAD 开放实验室, 北京 100080)

(2. 四通集团公司系统工程部, 北京 100081)

**摘要** 通过分析现有的层次化模型构造方法, 提出了一种新的基于特征角准则的多面体模型简化方法, 它是构造层次化模型的关键技术。通过给定不同的特征角阈值, 利用该方法可以生成层次化模型, 文末给出了具体实例。

**关键词** 模型简化, 层次化模型, 三角剖分

## 1 引言

在客观世界中, 物体的形状千奇百怪、丰富多彩, 要用计算机模拟这些实体, 需要建立复杂的模型, 由于借助三维扫描仪(3D range scanner)和CT扫描仪等高精度设备, 可以快速获取被测对象的三维信息, 所以它们为快速三维模型重建提供了一种新的高效手段, 同时也为复杂形体的三维建模提供了一种有效的解决方法。由于测量设备精度高, 测量的数据分布十分密集, 由此建立的三维模型通常由上万个甚至几十万个三角形面片组成。面对如此庞大的模型, 在虚拟现实等交互式计算机图形学领域, 要达到实时绘制并能进行交互编辑的目的, 构造层次化模型是一个有效的解决方法。

层次化模型也称多分辨率模型, 由一组对原模型进行不同精度逼近的模型组成。早在70年代Clark<sup>[1]</sup>就提出了层次化模型思想, 他指出一个在场景中占有较小区域的物体用简化的模型表示可以大大提高绘制速度, 同时不影响图象效果, 这正是构造层次化模型最基本的优点之一。实际上层次化模型中隐含的逐步求精的思想已有广泛的应用, 我们要研究的则是它的逆过程, 即如何由一个庞大的复杂模型构造层次化模型。显而易见, 模型简化方法是此

间的关键技术, 有了快速、可靠的模型简化算法, 只要给出不同的逼近精度要求, 即可构造出层次化模型。遵循这一思想的方法主要有3个: Schroeder方法<sup>[2]</sup>、Turk方法<sup>[3]</sup>、Hoppe方法<sup>[4]</sup>。

### 1.1 Schroeder 方法(顶点删除法)

指定一个最小的距离阈值, 如果模型中某顶点到由此点定义的平均平面的距离小于该指定的阈值, 则删除该顶点, 并采用递归循环分割法对删除顶点后遗留的空洞进行三角剖分, 通过调整距离阈值大小可生成层次化模型。

### 1.2 Turk 方法(重新布点法)

指定一个新模型所包含的顶点数, 首先将这些点布置在曲面上, 原则是面积大的多边形内多布一些点, 曲率变化大的多边形内多布一些点, 新点集中可以包含原模型中的点; 第2步生成由新旧顶点共存的网格, 即将新点插入到原模型中, 修改原模型网格; 最后删除模型中不在新点集中的顶点, 得到由新布点集中的顶点组成的简化模型。通过调整新模型中的顶点数, 可以生成层次化模型。

### 1.3 Hoppe 方法(能量函数法)

Hoppe 定义的能量函数由距离能量、表示能量

\* 国家自然科学基金重点资助项目(项目编号: 69333012)

收稿日期: 1996-09-05; 收到修改稿日期: 1996-12-23

及弹簧能量组成。其中表示能量定义为表示因子  $Crep$  与模型顶点数  $m$  的乘积,  $Crep$  值越大, 表明模型表示的简洁性越重要,  $Crep$  值越小, 表明对原模型的逼近精度要求越高, 因此通过指定不同的  $Crep$  值, 可以控制模型的复杂度, 构造层次化模型。

上述 3 种方法各有优缺点, Schroeder 方法执行效率最高, 但它在做删点判断时, 总是相对上一级模型而不是原始模型, 因此缺乏总体逼近精度分析; Turk 方法比较适用于光滑曲面; Hoppe 方法得到的模型简化结果最好, 但执行速度太慢。

另一类较新的思想是将小波技术用于构造层次化模型, 即多分辨率分析。小波变换是 80 年代后期发展起来的应用数学分支, 具有广阔的应用前景。文献[5]全面介绍了小波技术在计算机图形学领域的应用情况, 其中多分辨率分析是一个重要方面。

Lounsbery<sup>[6]</sup>提出了一种任意拓扑网格的多分辨率表示方法, 它由一个简单的基础网格附以一系列局部修正项, 即小波系数, 用于捕捉物体在不同分辨率下的细节特征, 但 Lounsbery 方法有一个严重的缺陷, 它对网格的拓扑有严格的限制, 它只适用于由简单的网格经多次 4 对 1 子分割后构造的网格, 如图 1 所示, 而实际应用中, 满足这种子分割连接约束的网格几乎是不存在的, Matthias Eck<sup>[7]</sup>等人提出了一种解决方法, 他们首先构造一个符合子分割连接约束的网格  $M'$ , 保证  $M'$  对原始网格  $M$  的逼近误差在给定范围内, 然后再用 Lounsbery 方法构造多分辨率模型。

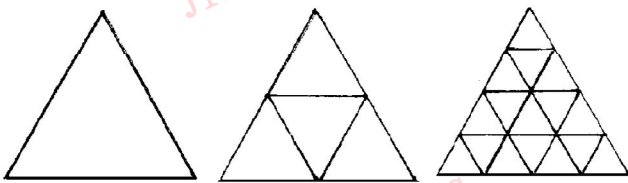


图 1  
Fig. 1

本文提出的基于特征角准则的多面体模型简化方法属于第一类中的删除顶点法, 该方法与 Schroeder 方法的主要区别是: (1) 判断特征顶点的准则不同: 一个使用的是特征角准则, 一个使用的是距离准则。特征角准则比距离准则更能准确地识别特征点, 因为顶点距平均平面的距离和与该顶点相邻三角形的边长长短有关, 若边长较长, 则该顶点被保留的可能性较大; 若边长较短, 则该顶点被删除的

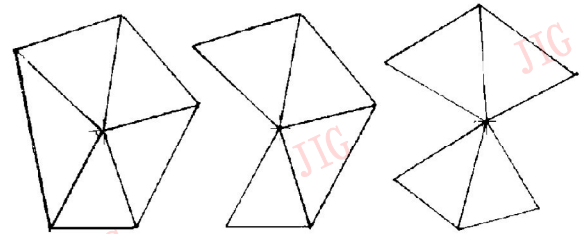
可能性较大。但是可以利用距离准则对原始数据作预处理, 消除原始数据中的噪声, 即原始数据中虽然特征角较小但不是特征点的顶点。(2) 删除顶点后的局部区域剖分方法不同。

本方法主要由 3 部分组成: (1) 预处理: 包括建模及进行一些基本计算; (2) 针对给定的特征角阈值, 根据特征角准则判断顶点是否应被删除; (3) 用改进的局部贪婪剖分方法填充删除顶点后遗留的空洞, 并修改模型拓扑。

## 2 基本概念

### 2.1 顶点分类

顶点分成 3 种类型: 内点、边界点、奇异点。(如图 2)



内点                      边界点                      奇异点

图 2  
Fig. 2

内点: 指被一组连续三角形完全包围在其中的顶点。

边界点: 该顶点的邻接三角形是连续的, 但没有完全封闭。

奇异点: 该顶点的邻接三角形不连续或其它不满足内点及边界点定义的顶点类型。

### 2.2 特征角定义

#### 2.2.1 内点的特征角定义

内点的特征角定义为该顶点法向量与该顶点相邻的各个三角形所夹的锐角的平均值的 2 倍。

如图 3 所示, 设内点  $P$  的坐标为  $(P_x, P_y, P_z)$ , 点  $P$  的单位法向量为  $\overline{VN}$ ,  $P$  点与  $N$  个三角形相邻, 设其中第  $i$  个三角形的顶点为  $P, S_i, S_{i+1}$ ,  $\Delta PS_i S_{i+1}$  的单位法向量为  $\overline{TN}$ ,  $fa[i]$  为点  $P$  的法向量  $\overline{VN}$  与  $\Delta PS_i S_{i+1}$  所夹的锐角,  $\theta$  为  $\overline{VN}$  与  $\overline{TN}$  间夹角。点  $Q$  的坐标:  $\overline{Q} = \overline{P} + \overline{VN}$ , 点  $R$  的坐标:  $\overline{R} = \overline{P}$

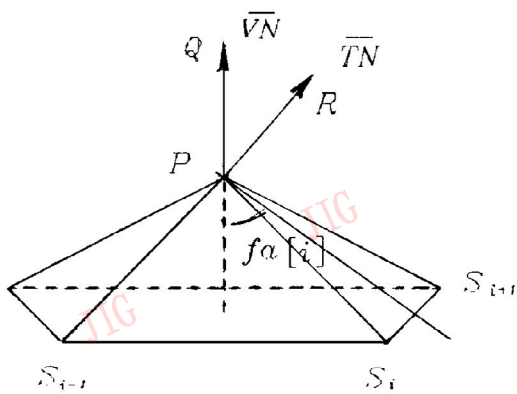


图 3

Fig. 3

+ $T\bar{N}$ , 则  $|\overline{PQ}|=1, |\overline{PR}|=1, |\overline{QR}|=|\overline{R}-\overline{Q}|=|\overline{T\bar{N}}-\overline{V\bar{N}}|$ , 设  $|\overline{QR}|=a$ , 由余弦定理:

$$\cos\theta = 1 - a^2/2 \quad (1)$$

$$fa[i] = \pi/2 - \arccos(1 - a^2/2)$$

设内点 P 的特征角记作  $in\_fangle$ , 则:

$$in\_fangle = \left( \sum_{i=1}^N fa[i] \right) \times 2/N \times 180/\pi \quad (2)$$

### 2.2.2 边界点的特征角定义与计算

边界点的特征角定义为该边界点与其相邻的两个边界点相连接成两条边, 此两条边所夹的角为小于  $180^\circ$  的角为该边界点的特征角。如图 4 所示。

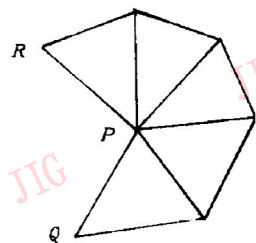


图 4

Fig. 4

设边界点 P 的特征角记作  $bnd\_fangle$ , 则:

$$bnd\_fangle = \frac{180}{\pi} \times \arccos\left(\frac{|\overline{PR}|^2 + |\overline{PQ}|^2 - |\overline{RQ}|^2}{2 \times |\overline{PR}| \times |\overline{PQ}|}\right) \quad (3)$$

### 2.2.3 奇异点的特征角定义与计算

因奇异点不能被删除, 故将其特征角定义为  $0^\circ$ 。

## 2.3 特征角准则

当某顶点的特征角大于给定的特征角时, 则该顶点应删除, 否则保留。

设  $IN\_FA$  与  $BND\_FA$  是用户给定的特征角阈值(以度表示)。对于内点, 如果按式(2)计算出的该点的特征角值  $in\_fangle > IN\_FA$ , 则删除该点; 对于边界点, 如果按式(3)计算出的该点的特征

角  $bnd\_fangle > BND\_FA$ , 则删除该点。

为避免反余弦计算, 提高算法的速度, 可对上述判断方法作以下近似简化:

(1) 令  $fa1 = \sin(IN\_FA \times \pi/180/2)$ ,

$$fa2 = \cos(BND\_FA \times \pi/180)$$

即对给定的内点的特征角取其一半的正弦值做为比较基准。对给定的边界点的特征角取其正弦值做为比较基准。

(2) 对内点, 按式(1)计算每个  $\cos\theta_i$ , 令

$$\cos fa = \left( \sum_{i=1}^N \cos\theta_i \right) / N;$$

对边界点, 计算  $\cos(bnd\_fangle)$ , 令

$$\cos fa = \cos(bnd\_fangle)$$

(3) 对内点, 若  $\cos fa > fa1$ , 则该顶点应被删除, 否则保留。

对边界点, 若  $\cos fa < fa2$ , 则该顶点应被删除, 否则保留。

## 3 数据结构

模型简化算法适用于用三角网格表示的多面体模型, 这类模型通常由两个数据结构即可表示:

(1) 存放顶点位置坐标的结构数组:

```
struct{
    double    x,y,z;
}point
```

(2) 存放组成三角形 3 个顶点号的数组:

```
int trimesh[MAX_TRIS][3]
```

三角形的顶点号与顶点位置坐标数组的下标一一对应, 通过这两个结构可以很容易地确定某个三角形的任意一个顶点坐标。

对模型简化算法来说, 仅有以上两个结构还不够, 还需增加两个结构:

(3) 存放各顶点的拓扑信息的结构:

```
struct{
    short tri_no[MAX_NEIGHBOUR_TRIS],
    node_no[MAX_NEIGHBOUR_TRIS];
}ITH_NODE
```

该结构存储顶点的邻接三角形号(按逆时针排列)及此顶点在邻接三角形中的位置。设顶点 P 的顶点号为  $vn$ , 点 P 的第  $i$  个邻接三角形号为  $tn$ , 如果  $vn$  与  $trimesh[tn][0]$  相同, 则点 P 在该三角形中的位置为 0, 同理, 如果  $vn$  与  $trimesh[tn][1]$  或  $trimesh[tn][2]$  相同, 则点 P 在该三角形中的位置

为 1 或 2。

(4) 存放顶点属性的结构:

```
struct {
    short    vtype, vdel;
} VATTRIB
```

$vtype=0$ : 表示该顶点为内点;  $vtype=1$ : 表示该顶点为边界点;  $vtype=2$ : 表示该顶点为奇异点;  $vdel=0$ : 表示该顶点未被删除;  $vdel=1$ : 表示该顶点已被删除。

## 4 主要算法

### 4.1 预处理

预处理模块包括建模及进行一些基本计算。

一般原始数据文件只包含顶点位置信息和组成各三角形的 3 个顶点信息。建模就是要从原始数据中提取实现模型简化算法所必须的其它拓扑信息即各顶点的邻接三角形信息, 以及根据顶点分类方法对顶点进行分类, 建立顶点属性结构。

基本计算指各顶点法向量的计算、各三角形面片法向量的计算等。

### 4.2 判断顶点是否应被删除

针对指定的特征角阈值, 根据特征角准则判断一个顶点是否应被删除, 如果根据特征角准则判断一个点应被删除, 并不意味着此点就必须被删除, 还应判断如果删除该点后, 遗留的空洞的边界边是否自交, 如果不自交, 则该顶点可被删除, 否则不能被删除。

设根据特征角准则, 点  $P$  应被删除, 可按下述步骤判断边界边是否自交:

(1) 获取点  $P$  的所有邻接点的位置坐标;

(2) 将点  $P$  的所有邻接点投影到点  $P$  的切平面上, 组成一个封闭的多边形;

(3) 根据该切平面与  $XY$  平面、 $YZ$  平面、 $ZX$  平面夹角大小, 选择在哪个平面上对多边形进行剖分;

选择方法比较简单, 设点  $P$  的单位法向量为  $\overline{VN}$ , 其  $x, y, z$  坐标为  $VN[x], VN[y], VN[z]$ , 它们分别为单位法向量与  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴夹角的余弦。

设  $\theta_x = \arccos VN[x], \theta_y = \arccos VN[y], \theta_z = \arccos VN[z]$ , 取  $\theta_x, \theta_y, \theta_z$  三者中最小的角度, 若  $\theta_x$  最小, 则将多边形投影到  $YZ$  平面上, 在  $YZ$  平面上

进行剖分, 若  $\theta_y$  最小, 则在  $XZ$  平面上剖分, 以此类推。

原始的做法是将投影平面旋转成与  $XY$  平面平行, 在  $XY$  平面上剖分, 应用本方法简化了计算, 同时也最大限度地保证剖分平面上的多边形与切平面上的多边形有最小的变形;

(4) 判断剖分平面上的多边形的边界边是否自交。

### 4.3 用改进的局部贪婪剖分算法填充删除顶点后遗留的空洞

删除顶点后对遗留空洞的填充问题可以抽象为对平面上复杂多边形的剖分问题。依据局部贪婪剖分的思想, 针对任意多边形剖分的特点, 构造了一个新的剖分算法。具体步骤如下:

(1) 建立任意多边形边界链表, 链表的每个节点存放多边形顶点的位置坐标;

(2) 建立初始边集  $ES1$

$ES1$  中的边由一对边界顶点相连组成, 需满足以下 3 个条件: 不能是多边形边界边; 不能与多边形边界边相交; 不能在多边形区域外。

(3) 建立有序边集  $ES2$

对  $ES1$  中的边按边的长度由小到大排序, 生成  $ES2$ 。

虽然是在剖分平面上对多边形进行剖分, 但这里计算边长时用顶点在三维空间中的坐标。

(4) 建立剖分边集  $ES3$

顺序取出有序边集  $ES2$  中的边, 如果该边与剖分边集  $ES3$  中已有的边除在端点外不相交, 则将该条边加入到剖分边集  $ES3$  中, 否则继续从  $ES2$  中取出下一条边, 重复同样操作, 直至  $ES2$  中的边全部取出。

(5) 从剖分边集  $ES3$  中提取拓扑信息。

拓扑信息指已有剖分结果中包含的三角形信息, 现提出一种新的从剖分边集  $ES3$  中提取三角形信息的方法:

① 建立初始活化边界链表(以下简称活化边表), 链表的每一个节点由每一条边界边的 2 个顶点号组成。

② 从活化边表中顺序取出 2 条边, 记作  $e_1, e_2$  如果活化边表仅由 3 条边组成, 则构成最后一个三角形, 算法结束。

③ 从剖分边集  $ES3$  中顺序取出一条边, 记作  $e_3$ , 如果  $ES3$  为空, 转至②。

④ 如果  $e_1, e_2, e_3$  组成一个三角形,则存储该三角形,同时修改活化边表,原活化边表中的  $e_1, e_2$  被  $e_3$  取代,否则转至③。

⑤ 转至②。

(6) 在删除某一顶点后,修改由此引起的拓扑关系的变化,原来与点  $P$  相邻的三角形被对多边形剖分所得的新的三角形取代;修改与点  $P$  相邻的顶点的拓扑信息。

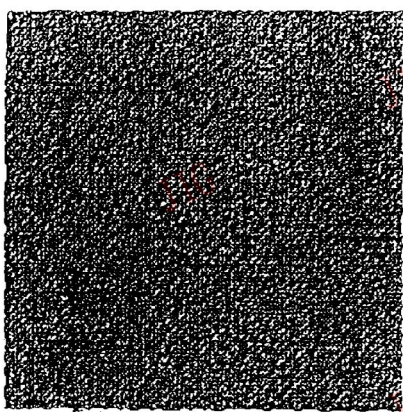
## 5 结论与实例

本文提出了一种新的基于特征角准则的多面体模型简化方法。通过指定不同的特征角阈值,应用本算法可生成层次化模型。图 5~9 即是应用本算法生成的层次化模型。图 5 是原始模型的轴侧图和 XY

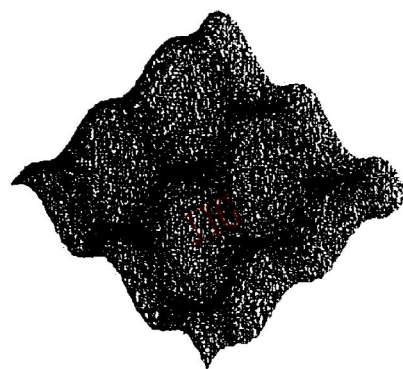
平面的投影图,其顶点数为 1 万个,三角形数为 19 602 个,所占硬盘空间为 610k,我们将边界点的特征角阈值均设为  $175^\circ$ ,内点的特征角阈值分别设为  $175^\circ, 170^\circ, 160^\circ$  和  $150^\circ$ ,得到的简化后的模型分别见图 6~9,从图中可以清晰地看出曲率变化平坦的区域内的顶点被删除,曲率变化较大的区域内的顶点被保留,因此即使简化率(删除的顶点数除以原始顶点数)达到 80.87%,模型的主要特征仍然存在,效果非常理想。整个模型是在 P586/90 微机上计算生成的,内存为 32M,工作平台为 SCOUNIX ODT3.0。表 1 是简化后模型的一些数据统计。

今后的工作有以下两方面:

- (1) 用更复杂的模型来测试算法,发现并解决奇异情况
- (2) 研究体简化方法 (*Volume Decimation*)

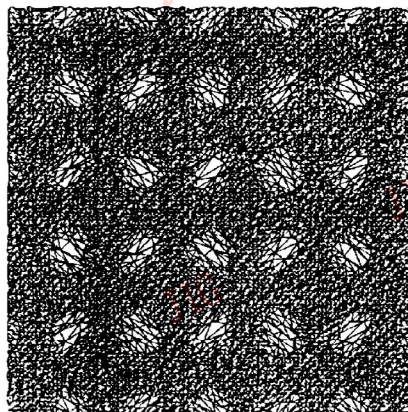


(a)

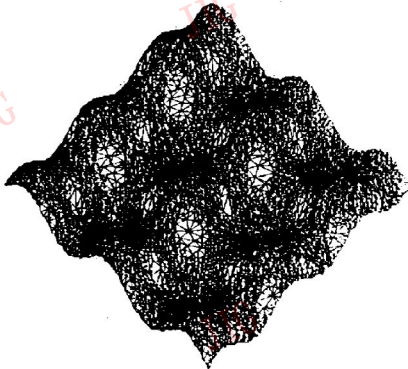


(b)

图 5  
Fig. 5

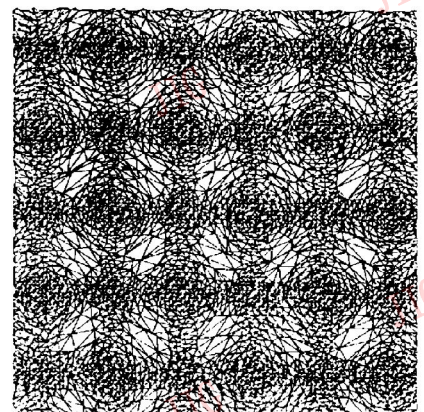


(a)

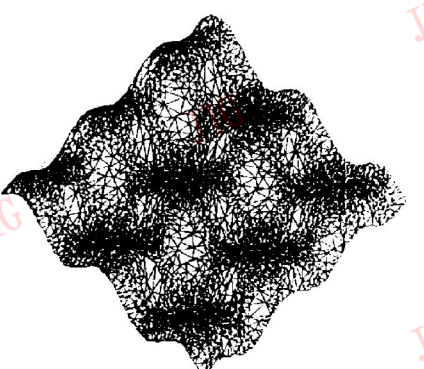


(b)

图 6  
Fig. 6

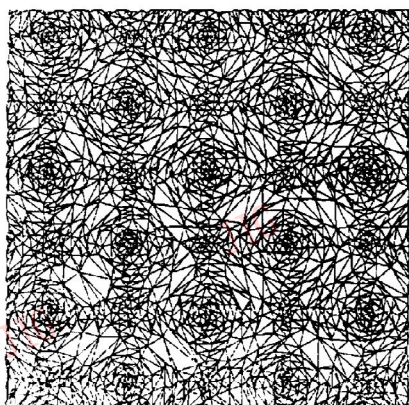


(a)

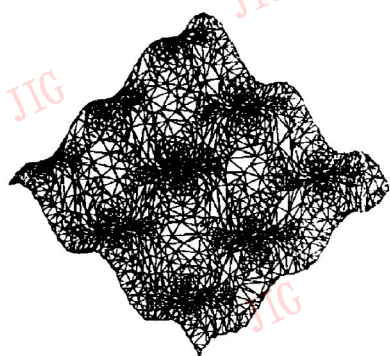


(b)

图 7  
Fig. 7

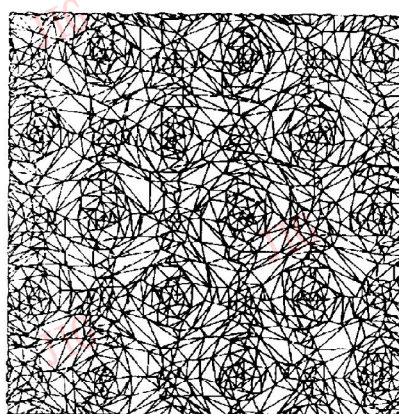


(a)

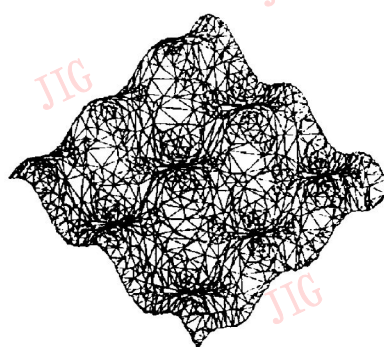


(b)

图 8  
Fig. 8



(a)



(b)

图 9  
Fig. 9

表 1 4 个简化模型的主要参数

Table 1 Parameters of four simplified model

内点特征角阈值	简化后的顶点数	三角形数	硬盘空间(K)	简化时间(s)	简化率(%)
175°	8 418	16 438	581	25	15.82
170°	5 468	10 540	373	36	45.32
160°	2 706	5 018	179	42	72.94
150°	1 913	3 432	123	55	80.87

参考文献

- 1 Clark James H. . Hierarchical geometric models for visible surface algorithms. Communications of the ACM, 1976, 19(10): 547~554.
- 2 Schroeder William J, et al. Decimation of triangle meshes . In: SIGGRAPH'92. Chicago, 1992, 65~70.
- 3 Turk Greg. Re-tiling polygonal surface . In: SIGGRAPH'92 , Chicago, 1992, 55~64.

- 4 Hoppe Hugues, et al. Mesh optimization . In: SIGGRAPH'93 , Anaheim, California, 1993, 19~26.
- 5 Alain Fournier. Wavelets And Their Applications in Computer Graphics . SIGGRAPH'94 , Course Notes 11.
- 6 Lounsbery J M. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type. PhD thesis. Department of Computer Science and Engineering, University of Washington, 1994.
- 7 Ect Matthias, et al. Multiresolution anlysis of arbitrary meshes. In: SIGGRAPH'95. Los Angeles, California. 1995, 173~182.



周晓云,助研。1990年毕业于清华大学精仪系,1993年在北京航空航天大学制造工程系获工学硕士学位,1993年至今在中科院计算所CAD室工作,自1994年9月起开始攻读在职博士。主要研究领域为计算机图形学、CAD、计算几何等。

## An Approach for Hierarchical Modelling

Zhou Xiaoyun<sup>1</sup>, He Dazeng<sup>2</sup>, Liu Shenquan<sup>1</sup>

(1:CAD Laboratory, Institute of Computing Technology, Academia Sinica, Beijing 100080)

(2: System Integration Dept., Stone Group Corp., Beijing 100081)

**Abstract** After analyzing existing methods of constructing hierarchical model, this paper presents a new simplification method for polyhedral model based on feature angle criterion. It is one of the important techniques for constructing hierarchical model. It consists of three parts: 1. preprocessing data including creating topological structure and some basic computation; 2. deciding whether a vertex should be deleted according to feature angle criterion; 3. filling hole using a modified local greedy triangulation algorithm and updating topological structure of model. At the end of the paper, is given a sample of hierarchical model through defining different feature angle threshold.

**Keywords** Model simplification, Hierarchical model, Greedy triangulation