

基于高斯球的近似共面合并层次细节模型*

曹卫群, 鲍虎军, 彭群生

(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

E-mail: {bao, peng}@cad.zju.edu.cn

摘要: 构造场景多层次细节模型是加速图形显示的有效途径, 给出一种基于共面合并自动生成场景多层次细节模型的算法. 此算法将一单位球定义为高斯球, 并按一定的规则对其进行层次分割, 然后根据各景物面片的法向在高斯球上的分布, 将具有近似一致法向的面片划分为面片族; 在面片族内对相邻面片进行合并, 生成近似共面区域; 然后移去其内部点, 对区域边界重新三角化. 算法还结合临近边界点合并等原则, 删除对表达场景几何特征重要度低的顶点. 算法利用平面九叉树进行合并操作, 生成具有多层次细节的场景模型. 实验结果表明, 算法能实现较理想的场景简化效果.

关键词: 多层次细节模型; 网格简化; 高斯球; 共面合并; 起面

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

在保持三维场景绘制质量的同时加快显示速度是近年来图形学研究的一个热点问题. Clark 最先提出了构造多分辨率模型来表示具有不同层次细节(level of detail, 简称 LOD)的场景^[1]. 绘制系统可以在保持视觉等价的前提下选择最粗的层次模型, 从而提高绘制速度. 由于多分辨率模型在虚拟现实^[2]、地形模拟^[3]、可视化^[4]、实时图像通信^[5]、飞行模拟等很多方面都有重要的应用前景, 很多研究小组对其都做了相关研究, 并提出了一些行之有效的算法.

目前已提出的三维场景的多分辨率模型算法主要有以下 4 类.

(1) 基于表面重新划分的 LOD 模型. Turk 提出根据曲率将给定数量的一组新点分布到模型的曲面上, 新顶点与老顶点结合形成中间网格, 然后去除老顶点, 对遗留的空洞重新三角化形成简化网格^[6].

(2) 基于顶点聚合的 LOD 模型. 文献^[7,8]依据邻近点聚合的策略, 将一组点聚合成为一个点, 从而实现网格模型的简化.

(3) 基于小波的方法. Lounsbery 针对具有分割连续性的网格模型, 提出了利用小波变换自动生成多分辨率模型的方法^[9]. 为了解决 Lounsbery 方法只适用于具有分割连续性网格的局限性, Eck 提出将任意网格转化成具有分割连续性的网格(remeshing), 从而实现了基于小波的任意网格的多分辨率模型的自动生成^[10].

(4) 基于几何元素删除的 LOD 模型. Schroeder 提出了基于顶点删除的网格简化方法^[11], 首先根据点的局部拓扑、几何信息将各顶点分类(简单点、复杂点、边界点、内部点、角点), 然后删除满足删除标准(大于点到平均平面, 或点到边的距离阈值)的顶点, 并对由此产生的空洞进行三角剖分. 文献^[12~15]研究了基于边删除、面删除的网格简化问题.

以上这些方法, 都是根据景物网格模型结点之间, 或点与面片之间, 或点与边之间的空间距离来判断是否保留几何元素. 在绘制过程中, 通过控制误差阈值, 使简化后的网格模型与原模型在屏幕空间的投影误差足够小,

* 收稿日期: 1999-05-07; 修改日期: 1999-09-21

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(69925204); 国家优秀重点实验室基金资助项目(69823003); 国家骨干年轻教师基金资助项目

作者简介: 曹卫群(1972—), 河北人, 博士生, 主要研究领域为计算机图形学, 虚拟现实, 计算机辅助设计; 鲍虎军(1966—), 男, 浙江人, 博士, 研究员, 主要研究领域为计算机图形学, 虚拟现实, 计算机动画; 彭群生(1947—), 男, 湖南人, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为真实感图形, 计算机动画, 虚拟现实.

以保持简化模型与原模型视觉等价.注意到在景物模型中,有些几何结构在景物空间的几何尺寸较小,但对定义景物的几何特征起着很重要的作用.如果单纯以景物空间的距离作为判据,在取较大阈值时,势必会造成这些景物几何特征的丢失.因而,为保持视觉等价,需要定义较小的阈值.但这样生成的景物简化模型并不能达到充分的简化程度.

由于景物模型的几何特征与模型表面的法向变化有着严格的对应关系,所以对基于景物网格模型中面片的共面特征进行简化,能在有效地保持景物模型几何特征的前提下,最大程度地简化景物模型.文献[4,16,17]提出了基于共面合并的算法.首先,将网格模型中的共面或近似共面的面片合并,形成较大的多边形,然后将该多边形重新三角化,得到简化的网格模型.

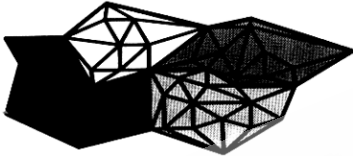


Fig. 1 Superface

图1 超面

大量的狭长三角形.

本文所提出的基于高斯球的景物表面网格简化方法与文献[4]的方法类似,但又有所不同.文献[4]是以某一个面片作为种子面片,而与其相邻接的面片称为它的边界面片.Kalvin从种子面片开始,按照一定的几何距离误差检测标准(若经扩展,原始网格中的各结点与扩展后形成的简化网格的距离小于给定的阈值 ϵ ,则满足标准)向其边界面片扩展,形成一个由若干近似共面的面片组成的超面(superface,如图1所示,用同一灰度标识的三角形近似共面,组成超面).此外,文献[4]对超面的边界进行星型三角化,因而不能处理含有孤岛的超面,而且会产生

1 基于法向的共面合并 LOD 模型自动生成算法

本文提出的算法基于法向进行共面合并和网格简化,从而生成多层次细节模型.算法由超面边界搜索、邻近边界点合并、重新三角化等部分组成.

算法以相邻面片法向夹角的大小作为判断共面的标准.首先,根据网格模型中面片的法向把它们划分为一些面片族.然后在近似共面的面片族内对相邻面片进行合并,并搜索合并后所形成的超面的边界信息.算法采用 Delaunay 方法对超面重新三角化,适用范围广,简化效果好.对于超面边界上的邻近顶点,本算法依据一定的重要度准则对它们进行合并,可删除面积小、视觉重要度低的表面细节.

本算法采用八连通邻域面片合并的策略生成多层次细节模型,实现了较好的简化效果.同时,简化模型能很好地保持原模型的拓扑及几何特征.

1.1 高斯球面的层次分割

首先,对平面九叉树作如下定义:

平面九叉树表示一种层次数据结构.如图2所示,正方形为树的根结点,其边长为 3^n .将正方形等分为9个小正方形,其边长为原正方形边长的 $1/3$,即 3^{n-1} .然后,将这9个小正方形分别递归剖分,则得到平面九叉树.

算法基于平面九叉树层次分割的思想对高斯球面进行剖分.

首先,将某一立方体映射到球面.然后对立方体各面分别进行平面九叉树剖分(如图2所示),并将其剖分结果映射到球面上,从而得到层次分割的球面.算法用三元组 (d_1, d_2, d_3) 存储球面网格编码.其中 d_1 从0~5取值,表示网格位于哪一立方体表面; d_2, d_3 表示网格在立方体表面上的位置(d_2 对应于 x 向, d_3 对应于 y 向),其取值范围依当前所选用的细节层次 Level 而定,为 $0 \sim 3^{Level}$.这里,我们令 MeshNum 代表一个立方体表面上沿一个坐标轴方向的网格总数,即 $MeshNum = 3^{Level}$.

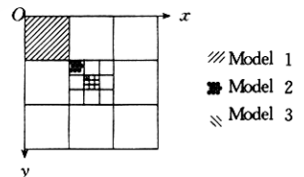


Fig. 2 Hierarchical structure: planar-eneatree
图2 层次网格:平面九叉树

为了简化计算,立方体到球面的映射定义如下:如图3(a)所示的6个平面与球面相交,得到映射到球面上的立方体的12条棱边.这些边将球面分割成6个相等的曲面,分别与立方体的6个面对应.然后,在球面上用大

圆弧进行近似等立体角划分,如图 3(b)所示。

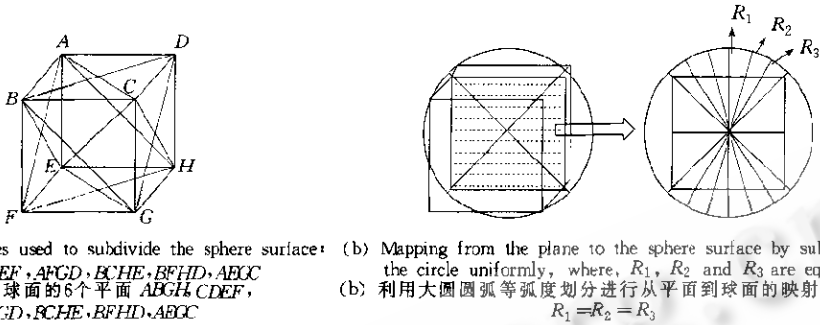


Fig. 3 Grids mapping from cube surfaces to Gauss sphere surface
图3 立方体表面网格到高斯球面的映射

图 2 表示为将要映射到高斯球面上的立方体的一个表面。由立方体的 6 个表面形成的 6 个球面网格为层次球面网格最粗的一层 S^1 。以模式 1 标识的网格由 S^0 层细分得到,属于 S^1 层;以模式 2 标识的网格由 S^1 层细分得到,属于 S^2 层;以模式 3 标识的网格由 S^2 层细分得到,属于 S^3 层,... 由此,整个球面网格形成一个以 S^0 层的 6 个节点为根的森林结构。

我们采用层次分割的高斯球面来定义近似共面合并的误差阈值,该值即为高斯球面的一个网格定义的最大法向夹角(度): $\sqrt{2} \times 90/3^{Level}$ 。Level 值越小,网格越粗,误差阈值越大;Level 值越大,网格越细,则误差阈值越小。

1.2 超面边界搜索

如果在相连通的若干面片中,任一对面片的法向夹角均小于用户定义的共面误差阈值,则可被近似看做平面,并定义为超面。

1.2.1 景物网格模型各面片的分类

生成最精细的简化景物网格模型 $M^{MaxLevel-1} (6 \times MeshNum \times MeshNum)$,需要按最底层高斯球面网格对场景中的各景物面片分类,即根据景物网格模型中各面片的法向,将它们归类到相应的高斯球面网格中,形成面片族。面片族中的面片,可能连通,或者不连通,其中,相连通的面片构成一个超面,因此,一个面片族与一个或多个超面对应。

1.2.2 面片族内超面边界的搜索

在对面片分类的同时,算法还找到属于同一高斯球面网格内的景物网格模型的顶点簇。在搜索超面的边界之前,先将各高斯球面网格中的顶点分类:位于一个超面内部的顶点为内点,存于高斯球面网格的内点表中;属于两个以上超面的则为边界点,存于边界点表中。然后,在边界点表中搜索封闭的环,并将属于环的点定义为该环的边界点。这里的环可能是一个超面的外边界,也可能是超面的内孔的边界。内外边界的判断有很多方法,本文算法采用的是先将环投影到最大投影平面上,然后判断其顺、逆时针的方法。经过判断之后,对内边界需要找出与其匹配的外边界。与内边界匹配的外边界很容易通过网格各点、面的连通关系找到,在此不再赘述。

1.3 进一步简化处理

采用共面区域公共边界直线化、邻近边界点合并等原则,可对近似共面区域的边界作进一步简化。

1.3.1 超面边界直线化

在允许的误差范围内,可认为超面是一个平面。注意到两平面交于一条直线,因此两相邻超面的公共边界应近似为直线。根据这一原理,我们对各超面的边界进一步简化,如图 4 所示,即用直线代替相邻超面的公共边界。

可以证明,超面边界直线化产生的法向误差,并不会超过超面所屬细节层次的误差阈值。对于平均法向接近的两超面(如图 4(c)所示),可能会有直线化的边界与原边界几何空间距离较大的情况,但是在这种情况下,直线化产生的几何空间误差显然对模型的几何结构影响很小。实验结果表明,边界直线化可使网格模型得到大幅度简化。

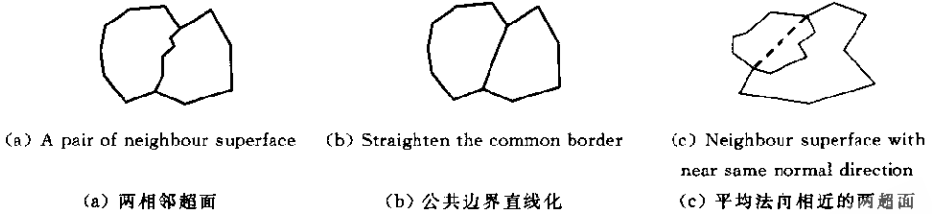


Fig.4 Straighten the border of superface
图4 超面边界直线化

1.3.2 邻近边界点合并

在进行一系列简化处理之前,可根据超面边界顶点周围面片法向分布的情况将其分类为一般点、棱边内部点、角点(如图5所示).顶点周围面片可根据法向分组:首先找到法向夹角最大(A_1)的两个面片,然后,分别以这两个面片作为两面片组的基准面片,根据与基准面片的夹角把其余面片分别归至两组中.两组内面片法向分别形成法向锥, A_2 取值为其中较大法向锥角度.



Fig.5 Classify vertices according to the dispersion of the normals of each vertex's surrounding facets
图5 按顶点周围面片法向分布进行顶点分类

一般点:若 A_1 小于阈值,则该点为一般点(如图5(a)所示).角点:若 A_2 大于阈值,则该点为角点(如图5(c)所示).棱边内部点:若 A_1 大于阈值,且 A_2 小于阈值,则该点为棱边内部点(如图5(b)所示).角点对定义模型的几何特征贡献最大,也就是说,角点的重要度最大,其次是棱边内部点,一般点的重要度则最低.

合并处理是在超面的边界环内进行的.在邻近边界点合并的过程中,将重要度低的点移动到重要度高的点.角点只能作为目标点,即只能通过将其他点移到角点来实现边删除.若两点均为角点,则合并操作不执行.因为算法只对极近点合并,因此可以在实现简化的同时保持原景物模型的几何、拓扑特征.

1.4 超面的重新三角化

给定一个区域的边界环,对该区域进行三角化有很多方法,本文提出的算法是采用先将边界环投影到最大投影面,然后在2D空间进行Delaunay三角化的方法(如图6所示).实验结果表明,采用该方法生成三角化网格,可尽量减少狭长三角形,三角化结果较好.

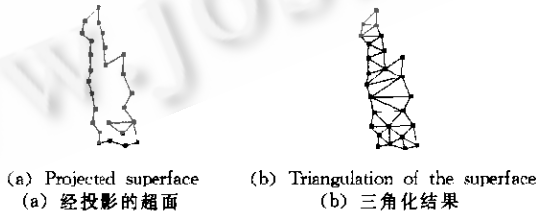


Fig.6 Re-Triangulating the superface
图6 超面重新三角化

至此,已生成最精细的简化景物网格模型 $M^{\text{MaxLevel}-1}$ (MaxLevel 是 LOD 的细节层次总数).

1.5 生成多层次细节模型

由已知的 M^i 层细节模型,生成 M^{i-1} 层(较粗)的过程,是通过合并高斯球面八连通邻域内各高斯球面网格中的超面实现的.

设图7所示为 S^i 层高斯球面网格所对应的立方体,其高层网格 S_{i-1} 的结点由 S^i 层结点合并得到.模式4及模式5标识的网格合并成的较粗网格为 S^{i-1} 层结点 Mesh(S^{i-1})(i, j, k),那么 Mesh(S^{i-1})(i, j, k) 的子结点 (S^i

层网格结点)从左上结点开始依次为 $\text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j, 3 * k), \text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j, 3 * k + 1), \text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j, 3 * k + 2), \text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j + 1, 3 * k), \text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j + 1, 3 * k + 1), \text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j + 1, 3 * k + 2), \text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j + 2, 3 * k), \text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j + 2, 3 * k + 1), \text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j + 2, 3 * k + 2)$. 其中 $\text{Mesh}(S^i)(i, 3 * j + 1, 3 * k + 1)$, 即模式 4 标识的网格为父结点 $\text{Mesh}(S^{i-1})(i, j, k)$ 的中心子结点. 模式 5 标识的网格为父结点 $\text{Mesh}(S^{i-1})(i, j, k)$ 的周边子结点.

超面合并经过以下几个步骤实现:

(1) 以中心子结点中的各超面为种子, 向邻接超面扩展. 若当前超面的邻接面(包括边邻接和点邻接)是其同父兄弟结点内的超面, 则执行扩展, 即当前的超面与其邻接超面合并, 形成新的超面. 这样的扩展递归地执行下去, 直到当前超面不再有可合并的邻居为止.

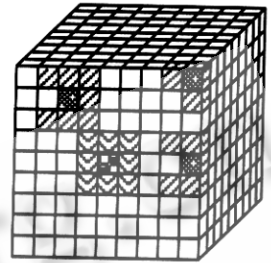
如果高斯球面网格的各层维持固定的边界, 也就是说, 景物网格模型的简化仅限于以中心子结点中的各超面为种子向邻近同胞兄弟结点扩展, 产生的较粗景物网格模型的共面集合可能并不合理. 例如, 即使两个面片的法向十分接近, 如果它们分别对应不同立方体表面(d_1 不同), 直到简化的最高层 M^0 层, 两面片也不能被合并. 为解决这种情况, 算法除以中心子结点中各超面为种子扩展外, 还以周边子结点中各超面为种子进行扩展.

(2) 以周边子结点中的各超面为种子, 向邻接超面扩展. 如图 7 所示, 模式 6 标识的网格为父结点的周边子结点, 除了网格自身内面片以外, 它们可合并周边网格中以模式 7 标识的网格结点, 即除其父结点的中心子结点外的八连通领域内的网格结点内的超面. 这样的扩展递归地执行下去, 直到当前超面不再有可合并的邻接超面为止.

在以上两个步骤中, 扩展涉及的超面与扩展最终生成的超面为父子关系.

(3) 把 M^i 层结点中的超面转存到各自的父结点, 即 M^{i-1} 层结点中. 然后, 对各超面进行边界取直及三角化等操作, 最后生成满足 M^{i-1} 层阈值的 M^{i-1} 层简化网格.

(4) 递归生成其他层次简化网格, 直到最粗层 M^0 层.

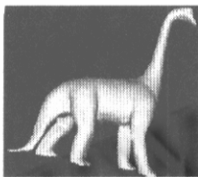


mode 4: , mode 5: ,
mode 6: , mode 7: 

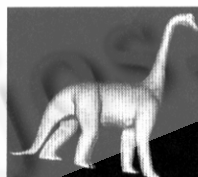
Fig. 7 Merge the eight-connected nodes
图 7 八连通网格结点合并

2 实验结果

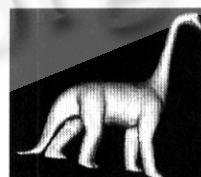
该算法已在 Pentium 350 上用 C 语言实现, 并成功地应用于不同的模型, 图 8 和图 9 分别是算法对恐龙模



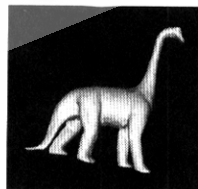
(a) The original model^①,
47 858 triangles^②.



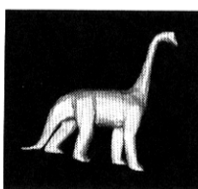
(b) M^4 : 47 776 triangles



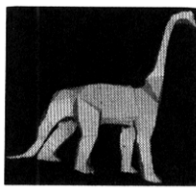
(c) M^3 : 46 538 triangles



(d) M^2 : 32 100 triangles



(e) M^1 : 7 690 triangles



(f) M^0 : 3 468 triangles

①原数据集, ②三角形.

Fig. 8 Multi-Level of detail model of dinosaur

图 8 恐龙的多分辨率模型

型和牛模型简化的结果,所取 $MaxLevel=5$,图中(a)~(f)依次为原模型及 M^4, M^3, M^2, M^1, M^0 共 5 个层次细节模型. 由图可见,即使最简化的 M^0 层细节模型,也能很好地保持原模型的几何特征. 应用该算法建立恐龙模型、牛模型层次结构所用的时间分别为 190.89040 秒和 8.63359 秒.

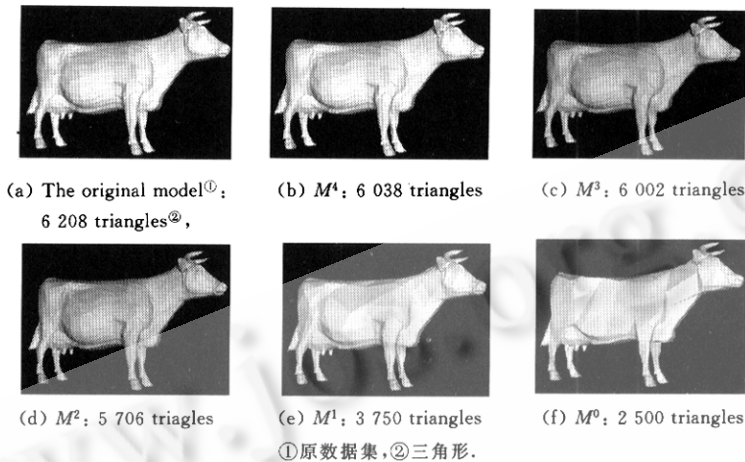


Fig. 9 Multi-Level of detail model of cow

图 9 牛的多分辨率模型

3 结论与未来的工作

本文提出了一种采用近似共面合并的多层次细节模型生成算法. 算法基于法向近似面片合并原则,可在层次分割高斯球面的基础上生成多层次细节模型. 算法在预处理阶段执行. 在视点变换时,可根据当前的视点参数,动态地生成包含不同细节的层次模型. 这是由于算法严格定义了各层次超面之间的父子关系,在实时显示过程中,可根据当前视线方向对高斯球面的不同部分选用不同的细节层次,从而生成在该时刻保持视觉等价的包含不同细节的场景模型. 至于如何根据景物面片与视点的距离及方位选取恰当的阈值以控制不同景物面片细节显示的层次,则有待继续做深入研究.

References:

- [1] Clark, J. H. Hierarchical geometric models for visible surface algorithm. *Communications of the ACM*, 1976,19(10): 547~554.
- [2] Pan, Zhi-geng, Ma, Xiao-hu, Shi, Jiao-ying. The automatic generation algorithm for models at multiple levels of detail in virtual environment. *Journal of Software*, 1996,7(9):526~531 (in Chinese).
- [3] Liu Xue-hui. Research on multiple levels of detail generating for 3D complex objects used in virtual reality [Ph. D. Thesis]. Institute of Software, The Chinese Academy of Sciences, 1998 (in Chinese).
- [4] Kalvin, A. D., Taylor, R. H. Surfaces: polygonal mesh simplification with bounded error. *IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications*, 1996,16(3):64~77.
- [5] Finkelstein, A., Jacobs, C. E., Salesin, D. H. Multiresolution video. In: Rushmerier, H. ed. *Proceedings of SIGGRAPH'96*. New York: ACM Press, 1996. 281~290.
- [6] Greg Turk. Re-Tiling polygonal surfaces. *Computer Graphics*, 1992,26(2):55~64.
- [7] Rossignac, J., Borrel, P. Multi-Resolution 3D approximation for rendering complex scenes. In: Falcidieno, B., Kunii, T. eds. *Geometric Modeling in Computer Graphics*. New York: Springer-Verlag, 1993. 455~465.
- [8] Garland, M., Heckbert, P. S. Surface simplification using quadric error metrics. In: Whitted, T. eds. *SIGGRAPH '97 Proceedings*. New York: ACM Press, 1997. 209~216.
- [9] Lounsbery, J. M. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type [Ph. D. Thesis]. University of

- Washington, 1994.
- [10] Eck, M., DeRose, T., *et al.* Multiresolution analysis of arbitrary meshes. In: Cook, R. ed. SIGGRAPH'95 Proceedings. New York: ACM Press, 1995. 173~182.
- [11] Schroeder, W. J., Zarge, J. A., *et al.* Decimation of triangle meshes. *Computer Graphics*, 1992, 26(2): 65~70.
- [12] Hoppe, H., DeRose, T., Duchamp, T., *et al.* Mesh optimization. In: Kajiyi, J. T. ed. SIGGRAPH'93 Proceedings, New York: ACM Press, 1993. 19~26.
- [13] Zhou Xiao-yun, Liu Shen-guan. Polyhedral model simplification method based on feature angle criterion. *Chinese Journal of Computers*, 1996, 19(supplement): 217~223 (in Chinese).
- [14] Hamann, B. A data reduction scheme for triangulated surfaces. *Computer Aided Geometric Design*, 1994, 11(2): 197~214.
- [15] Li Jie, Tang Ze-sheng, Guo Hong-hui. Hierarchical multiresolution modeling based on fractal dimension. *Chinese Journal of Computers*, 1998, 21(9): 780~786 (in Chinese).
- [16] De Haemer, M. J., Zyda, M. J. Simplification of objects rendered by polygonal approximations. *Computer & Graphics*, 1991, 15(2): 175~184.
- [17] Hinker, P., Hansen, C. Geometric optimization. In: Rosenblum L. J., *et al.* eds. Visualization'93 Proceedings. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1993. 189~195.

附中文参考文献:

- [2] 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): 526~531.
- [3] 刘学慧. 虚拟现实三维复杂几何形体的层次细节模型的研究[博士学位论文]. 中国科学院软件研究所, 1998. 281~290.
- [13] 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, 19(增刊): 217~223.
- [15] 李捷, 唐泽圣. 基于分形维数的层次多分辨率模型. *计算机学报*, 1998, 21(9): 780~786.

A Level of Detail Model by Merging Near-Coplanar Faces Based on Gauss Sphere

CAO Wei-qun, BAO Hu-jun, PENG Qun-sheng

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

E-mail: {bao, peng}@cad.zju.edu.cn

Received May 7, 1999; accepted September 21, 1999

Abstract: Multiple LOD modeling is an effective approach to speed up the rendering of 3D scenes. An algorithm that creates multiple levels of detail for 3D scene by merging near-coplanar faces is presented in this paper. First a Gauss sphere is defined for the modeling of the scene, which is divided into patches uniformly. Faces of objects in the scene are then attached to the respective spherical patches according to their normal direction. If faces attached to the same patch are adjacent to each other, they are merged to form a near coplanar area (superface). Isolated vertices inside the area are removed and the area is retriangularized. To further improve the simplification, vicinity vertices on the border of the area are merged. The algorithm adopts a planar separation rule to support the hierarchical model. The experimental result shows that the algorithm can achieve the desired simplification effect.

Key words: multiple levels of detail model; mesh simplification; Gauss sphere; coplanar merging; superface