

基于多边形顶点法矢量的网格模型简化算法

周石琳¹⁾ 汤晓安¹⁾ 陈 敏²⁾ 郝建新¹⁾ 孙茂印¹⁾

¹⁾(国防科技大学电子科学与工程学院信息与通信工程系, 长沙 410073)

²⁾(国防科技大学航天与材料工程学院宇航科学与工程系, 长沙 410073)

摘 要 在计算机图形学中,经常采用网格模型进行几何物体的描述,而网格模型的大数据量成为实时绘制的瓶颈,因此,必须对网格模型进行简化.目前的简化算法,主要是以网格模型几何误差的最小化为准则,而忽略了模型的视觉特征.为此提出了一种基于法矢量的模型简化算法,其简化准则是视觉特征的最优化.首先获取多边形顶点的平均法矢量,然后依据该法矢量确定简化门限.实验结果表明,当地景模型简化至 95.4% 时,仍然保持了令人满意的图象质量.该算法能够在保证高度真实感视觉效果的前提下,实现模型较大幅度的简化.

关键词 模型简化 细节层次 法矢量 梯度

中图法分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2002)06-0601-05

An Algorithm of Vertex Normal-Based Mesh Model Simplification

ZHOU Shi-ling¹⁾, TANG Xiao-an¹⁾, CHEN Min²⁾, HAO Jian-xin¹⁾, SUN Mao-yin¹⁾

¹⁾(Electronic Science and Engineering College of National University of Defense Technology, Chang Sha 410073)

²⁾(Aerospace and Material Engineering College of National University of Defense Technology, Chang Sha 410073)

Abstract Model simplification is very important in the fields of virtual reality and real-time simulation. In computer graphics, objects and scenes are often described by mesh models, such as terrain model, Stanford's scanning models and so on, but, a complicated model often includes large-scale data, the large data scale is a bottle-neck of fast-speed rendering, so it is necessary to simplify mesh model. The approach of levels of detail (LOD) is good, there have been some efficient algorithms for LOD and model simplification, these algorithms' simplification criteria are minimizing the geometry errors. It has been found that the last destination for simplification is to obtain fast rendering speed as well as good visual effects, hence, visual effects can and should become simplification criteria. This paper gives an algorithm of normal-based mesh model simplification. First, this paper gives a mathematics model for curve, and concludes that grads can express a curve's visual effects. Second, this paper uses normal of mesh models to replace grads, if the normal is averaged three times or more, a mesh can simulate a curve well, and the averaged normal can replace grads to become simplification criteria. Finally, this paper defines an angle between a normal of given point of intersection of the mesh model and those around this point, and uses this angle to simply mesh models. A group of experimental results are also given, which illustrate that the above algorithm can realize model simplification effectively, and at the same time, keep the models highly accurate.

Keywords Model simplification, Levels of detail, Normal vector, Grads

0 引 言

在计算机图形学领域,经常采用多边形网格来描述物体模型,而由三维模型重构方法得到的多边

形网格模型通常由成千上万个多边形面片组成.由于绘制时间与多边形的数量成正比,过于庞大的物体网格模型通常不能满足实时绘制的需要,因此,需要对模型进行简化.模型简化在虚拟现实、交互式可视化、计算机仿真等领域具有有广阔的应用前景.

基于 LOD(Levels Of Detail, 层次细节模型)的简化是一种很好的方法. 目前, 国外对 LOD 的研究已有一系列成果, 距离门限(Distance Threshold)的多边形网格模型简化方法^[1]; 基于顶点删除的网格删减方法^[2]; 优化的顶点聚类网格简化方法^[3]; 能量函数最优化的网格简化方法^[4]等.

国内在这方面也开展了一些卓有成效的研究工作^[5~7]. 这些简化算法通常是以几何误差的最小化为准, 对模型的视觉效果有较大影响, 即不同层次的模型的逼真度具有较大差别, 这在对逼真度有较高要求的场合是不适用的, 如落点分析, 细节仿真等. 因此, 需要寻找一种更为有效的模型简化算法, 在不损害逼真度的前提下, 实现模型的较大幅度简化. 为此, 本文提出了一种基于法矢量的网格模型简化算法, 其主要从影响网格面视觉效果的主要因素——法矢量及梯度的角度对模型数据进行抽取与简化, 最终较好地实现了高逼真度与大压缩比的统一.

1 模型简化的判决准则

网格模型是对曲面的逼近, 理想情况下(不考虑绘制时间, 只考虑高度真实感要求), 可以使用曲面(如 Bezier 或 Nurbs 曲面)进行真实感绘制. 而曲面的视觉特征主要是其起伏的变化及其视觉反映. 从观察的角度看, 这种变化具有很大的数据冗余度, 如大片平坦变化的区域(如地景模型的草原、平原、盆地或变化平缓的山地及其他模型的变化平缓区域等), 网格模型的部分数据在一定绘制精度下是不必要的. 曲面的 1D 数学模型如图 1 所示, 点 a 的梯度为

$$\text{grad}(a) = \left[\frac{df(t)}{dt} \right] i \Big|_{t=a}$$

将其扩展到欧氏空间, 则

$$\text{grad}(a) = \left[\frac{\partial f(x, y, z)}{\partial x} i + \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial y} j + \frac{\partial f(x, y, z)}{\partial z} k \right] \Big|_{(x, y, z)=a} \quad (1)$$

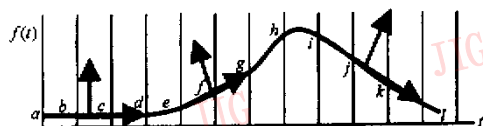


图1 网格曲面的一维数学模型

上式中, 以矢量 a 表示点 a 的三维坐标. 同理可以求得其他各点的梯度.

显然 $\text{grad}(a) = \text{grad}(b) = \text{grad}(c) = \text{grad}(d)$, 即 a, b, c, d 的起伏变化相同, 因此, b, c 是冗余点, 可以由矢量 $\vec{ad}$ 代替 $\vec{ab}, \vec{bc}, \vec{cd}$, 同时, 考虑到 $\text{grad}(e), \text{grad}(f), \text{grad}(g)$ 以及 $\text{grad}(i), \text{grad}(j), \text{grad}(k), \text{grad}(l)$ 的变化很小, 即起伏变化很小, 可以判定, f, j, k 是冗余点, 所以经过简化后, 只剩下 a, d, e, g, h, i, l 点.

由于梯度表示方向导数取最大值的方向, 即曲面起伏变化的最大方向, 因此以梯度来判决冗余点可以保证对曲面的起伏变化影响最小. 为了降低绘制复杂度, 通常使用网格面对曲面进行逼近, 因此, 可以使用网格面中的细节法矢量(如网格模型中的四边形、三角形或网格交叉点等的法矢量)对曲面梯度进行近似, 同时, 模型的逼真绘制通常需要计算法矢量, 因此使用法矢量进行判决可以减少不必要的计算量, 大大降低计算复杂度.

由以上分析, 可得到如下判决准则:

准则 计算网格模型的细节法矢量, 然后由法矢量的集合根据绘制精度对冗余点进行判决.

2 算法描述

2.1 绘制精度定义

定义绘制精度为 ϵ , 当法矢量夹角小于 ϵ 时, 网格点将被删除. 设存在两个面 l_1, l_2 , 它们的法矢量分别为 n_1, n_2 , 其夹角为 θ (如图 2 所示).

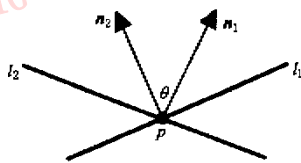


图2 ϵ 的定义

以上 l_1, l_2 也可以是网格面中相邻的网格线, 为了清楚地表示法矢量的关系, 将它们通过平移合并到一起(不会影响法矢量的方向). 考虑以下条件:

(1) 若 $\theta = 0$, 则 $n_1 = n_2$, 网格线 l_1, l_2 的相对起伏变化为 0, l_1, l_2 可合并为一条网格线;

(2) 若 $\theta \leq -\pi/2$ 或 $\theta \geq \pi/2$, 则网格线 l_1, l_2 的相关性为 0, l_1, l_2 不可合并;

(3) 若 $-\pi/2 < \theta < \pi/2$, 则网格线 l_1, l_2 具有一

定的相关性,且 θ 越趋于0,其相关性越强(当 $\theta=0$ 时,该条件转变为条件(1),可以根据所要求的精度决定 l_1, l_2 是否合并);

因此, θ 可以成为网格简化的条件,即 θ 可以表示绘制精度,由此,令 $\varepsilon=\theta$. 为了满足归一化的条件,则

$$\varepsilon = \text{Normalize}(\theta) = \theta / \pi$$

即取 ε 为归一化的 θ 值.

2.2 算法描述

网格模型在实际绘制时通常需要进一步细分,由于三角形可以决定一个平面,因此通常将网格面细分为三角形面,若网格面为 $M \times N$,则三角形面的个数为 $2(M \times N)$. 设存在如图3所示的网格面,进行三角形细分后,对网格面中的任意一个交点 p ,其周围将存在 n 个(此处为6个, $n=6$)三角形,设第 i 个三角形的单位法矢量为 e_i ($i=1, 2, \dots, n$). 现定义交点 p 的法矢量为其周围所有(此处为6个)三角形法矢量的平均,并以 p 表示交点 p 的法矢量,则

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$$

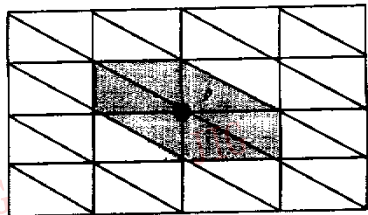


图3 模型网格面及其三角形细分

现对其进行归一化(即取模为1),令归一化后的单位法矢量以 s 表示,则

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{\left| \sum_{i=1}^n e_i \right|} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n e_{ix} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n e_{iy} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n e_{iz} \right)^2}} \quad (2)$$

上式即为任意一个网格交点 p 的单位法矢量. 为了使网格面进一步逼近曲面,现将交点 p 的单位法矢量 s 进一步修正为包围 p 的所有交点的单位法矢量之均值. 如图4所示,包围 p 的所有网格交点分别为 $p_1, p_2, \dots, p_8$,这8个交点的单位法矢量已由公式(2)得到,分别为 s_j ($j=1, 2, \dots, 8$). 现对这8个单位法矢量取平均,从而得到交点 p 修正后的新的法

矢量,令该法矢量以 q 表示,则

$$q = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 s_j$$

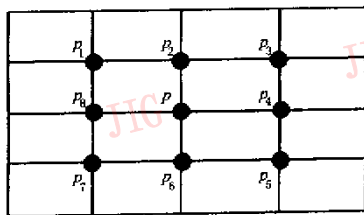


图4 网格交点及其法矢量平均

上式是根据 p 周围的8个相邻点得到的公式,对不同的网格划分(如网格的不等间距划分), p 周围的相邻点数可能有所不同. 不失一般性,令 p 周围存在 m 个相邻点,则上式变为

$$q = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j$$

对该式进行归一化,则该式进一步表示为

$$q = \frac{\sum_{j=1}^m s_j}{\left| \sum_{j=1}^m s_j \right|} \quad (3)$$

至此,已得到交点 p 所对应的单位法矢量 q . 对任意一个网格交点 p_k ,则有 q_k 与之对应.

已知 ε 是给定的简化精度, $p_1, p_2, \dots, p_m$ 是包围交点 p 的所有网格点(其中, m 是包围交点 p 的所有网格点数,图4中, $m=8$), $q_1, q_2, \dots, q_m$ 是 $p_1, p_2, \dots, p_m$ 的单位法矢量. 若交点 p 的单位法矢量 q 与 $q_1, q_2, \dots, q_m$ 的夹角均小于 ε ,表明 p 与 $p_1, p_2, \dots, p_m$ 的相关性均在 ε 的控制范围之内,故可删除网格交点 p . 也即,若以下逻辑表达式成立

$$\left[\frac{\arccos(q \cdot q_1)}{\pi} < \varepsilon \right] \text{AND} \left[\frac{\arccos(q \cdot q_2)}{\pi} < \varepsilon \right] \text{AND} \dots \text{AND} \left[\frac{\arccos(q \cdot q_m)}{\pi} < \varepsilon \right] = \text{TRUE} \quad (4)$$

则删除 p 点.

2.3 算法步骤

算法步骤如下:

- (1) 给定精度 ε ;
- (2) 对网格面进行三角形细分;
- (3) 由式(2)、式(3)计算网格交点的平均法矢量;
- (4) 扫描网格点,代入式(4),若成立,则删除该网格点.

3 误差分析

设 p 点被删除,形成不等间距网格,如图 5 所示。当 p 点被删除后,原 p 点位置的法矢量由 p_1, p_3, p_5, p_7 的法矢量决定,定义重构的法矢量为 p' ,则

$$\begin{aligned} p-p' &= \frac{1}{8}(p_1+p_2+p_3+p_4+p_5+p_6+p_7+p_8)- \\ &\quad \frac{1}{4}(p_1+p_3+p_5+p_7) \\ &= \frac{1}{8}[(p_2+p_4+p_6+p_8)-(p_1+p_3+p_5+p_7)] \\ \arccos[p \cdot (p-p')] &< \arccos\{[\cos(\pi \epsilon)]/2\} \end{aligned}$$

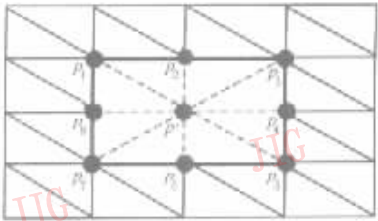


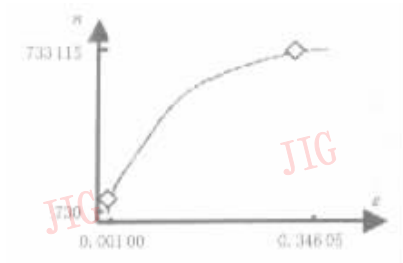
图 5 顶点删除后的网格面

4 实验结果及分析

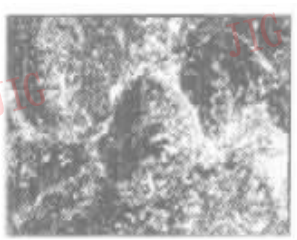
采用湖南桃源地区的 985×748 (736 780 个网格点)DEM 数据,在 P II 400(TNT2)微机上进行实验,实验结果如图 6 所示。

网格重构原则是,选取面积最大的正方形,来删除点的包围面,以构成新的网格面(而不是以包围面内网格点的数量多少为重构原则),同时,为了进一步增加平滑性,对生成的图象在新构成的网格面区域内进行了基于 3D Warp 的图象重构^[8]。

由图 6(a)看出,删除点的个数与绘制精度近似成正弦曲线的关系,最大删除精度趋近 0.35。图 6(b)是原始网格面绘制图,图 6(c)、(d)、(e)分别是简化比为 36.1%($\epsilon = 0.017$)、69.9%($\epsilon = 0.061$)及 95.4%($\epsilon = 0.104$)时的绘制结果,由绘制结果可以看出,当简化比为 36.1%、69.9%时,其逼真度几乎没有变化,当简化比为 95.4%时,结果图失去了部分细节,但其主要地形特征仍然存在,且视觉效果比较理想。因此,该方法在保证逼真度方面具有明显优势。



(a) 简化网格点曲线



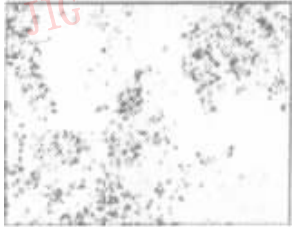
(b) 原始图



(c) 简化 36.1%



(d) 简化 69.9%



(e) 简化 95.4%

图 6 不同简化程度下的绘制结果

和以几何误差最小化为准则的算法(如顶点聚类、能量函数最优化等)相比,此算法由于仅需要一次扫描,不需进行迭代运算,因此,算法的时间复杂度有较大降低。此外,该算法并不排斥其他的模型简化算法,当使用其他的模型简化算法之后,仍可以继续使用该算法,这是因为该算法的简化准则是视觉

特征的最优化,其和基于几何误差最小化的准则有本质的区别。

今后的研究还有两个方面,一是将该方法与其前级的基于视点的模型简化结合起来,使极大数据量模型的高度真实感实时绘制成为可能;二是与其后级的基于 2.5D 图象^[9]的连续模型简化结合起

来,实现高度真实感简化模型的平滑过渡.

参 考 文 献

1 Erikson Carl M. Hierarchical levels of detail to accelerate the rendering of large static and dynamic polygonal environments [D]. Stanford: university of Stanford, 2000,5.

2 Schroeder W J, Zarge J A *et al.* Decimation of triangle meshes [J]. Computer Graphics, 1992,26(2):65~70.

3 Low K, Tan T. Model simplification using vertex-clustering [A]. In: Symposium on Interactive 3D Graphics Proceedings [C], RI, USA. , 1997:75~82.

4 Hoppe H. View-dependent refinement of progressive meshes [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH 97[C], Addison Wesley, 1997:189~197.

5 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[J]. 软件学报, 1996,7(9):526~531.

6 陶志良, 潘志庚, 石教英. 基于能量优化的网格简化算法及其应用[J]. 软件学报, 1997,8(12):881~888.

7 周昆, 潘志庚, 石教英. 一种新的基于顶点聚类的网格简化算法[J]. 自动化学报, 1999,25(1):1~8.

8 汤晓安, 蔡宣平, 孙茂印等. 基于 3D WARP 的混合绘制算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2001,6A(7):700~714.

9 Tamara Munzner. Interactive visualization of large graphs and networks[D]. Stanford: university of Stanford, 2000,6.



周石琳 1965,国防科技大学电子科学与工程学院副教授,博士,主要研究方向为图形、图象与信息可视化。



汤晓安 1968 年生,国防科技大学电子科学与工程学院讲师,现在职攻读博士学位. 主要研究方向为图形、图象与信息可视化。

陈 敏 1969 年生,国防科技大学航天与材料工程学院讲师. 主要研究方向为人工智能与模式识别。

郝建新 1956 年生,国防科技大学电子科学与工程学院副院长. 主要研究方向为实时信息处理与信息可视化。

孙茂印 国防科技大学电子科学与工程学院教授、博士生导师. 主要从事计算机图形、图象、虚拟现实技术等方面的研究工作. 发表论文 60 余篇,曾获国家科技进步三等奖 2 项,部委级科技进步一、二等奖 5 项。