

文章编号:1007-2780(2009)02-0283-05

文物模型的简化与纹理映射研究

杨丽萍

(包头师范学院 信息科学与技术学院, 内蒙古 包头 014030, E-mail: ylp2004gis@163.com)

摘 要: 提出了一种基于顶点聚类的新简化算法。通过引入二次误差测度求解网格单元的最优代表点,提高了简化质量。分析了文物模型纹理映射的特殊性,提出合适的映射方法,建立了几何模型与纹理图像之间的映射关系,实现了非参数化三维模型的纹理映射,使得模型具有照片真实感。

关 键 词: 顶点聚类; 模型简化; 二次误差测度; 纹理映射
中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

1 引 言

随着数据采集技术的提高以及更精细的计算机仿真建模技术的出现,在计算机图形学、计算机辅助设计技术以及地理信息系统等领域内所构造和使用的模型越来越复杂。模型复杂程度的提高,对计算机的存储容量、计算速度和传输速率等均提出了很高的要求^[1,2]。

在文物保护领域,通常一些珍贵文物的展示使用的都是仿制品。在仿制品的制作中,文物的形状很容易模仿,但仅仅是形状相同还远不能做到高仿真,文物表面的纹理是很重要的。利用纹理映射的方法,可给仿制品赋上几乎完全相同的纹理。所谓纹理映射,就是在已有的纹理图和模型之间建立对应关系,从而能够给模型覆盖上纹理。模型简化是指采用适当的算法减少该模型的面片数、边数和顶点数。模型的简化对于其存储、传输、处理以及实时绘制有重要的意义。

本文提出了一种基于顶点聚类的新简化算法用于文物简化模型的建立。通过引入二次误差测度求解网格单元的最优代表点,提高了简化质量。建立了几何模型与纹理图像之间的映射关系,实现了非参数化三维模型的纹理映射,使得模型具有照片真实感。

2 改进的顶点聚类算法

2.1 算法简介

该算法是 Rossignac 和 Borrel 提出的顶点聚

类算法以及 Garland 和 Heckbert 提出的二次误差测度(QEM)^[3]的综合。通过引入二次误差测度这一变量来求网格单元中的最优代表点,从而提高了简化速度和简化质量。下面分别对顶点聚类算法和二次误差测度进行简要描述。

顶点聚类方法首先用一个包围盒将原始模型包围起来,然后通过空间划分将包围盒分成若干区域,原始模型的所有顶点分别落在这些小区域内,将同一区域内的顶点合并成一个新顶点,再根据原始网格的拓扑关系对这些新顶点进行三角化,从而得到简化模型,其过程如图 1 所示。这种算法不能保持原模型的拓扑结构,可以处理任意拓扑类型的网格模型。由于此方法是将模型的包围盒均匀分割,所以无法保持那些大于分割频率的特征,同时新顶点的生成只是采取简单的加权平均,而没有较好的误差控制,生成的模型质量不高。对顶点聚类算法进行改进,采用二次误差矩阵这一几何误差度量来确定新代表顶点,使得代

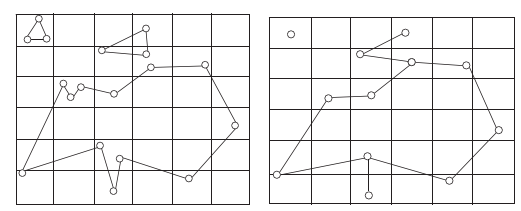


图 1 顶点聚类法的简化过程

Fig. 1 Simplification process of vertex clustering algorithm

表顶点设置在到小格内每个三角形所在平面的距离平方和最小的位置,算法的简化结果质量较好。

二次误差测度(QEM)以点到平面距离的平方和作为误差测度,对于顶点 v ,与其相对应的三角面的集合记为 $\text{planes}(v)$,Garland 定义顶点 v 的二次误差测度等于 v 到这些三角面的距离平方和:

$$\Delta(v) = \Delta([v_x \ v_y \ v_z \ 1]^T) = \sum_{p \in \text{planes}(v)} (P^T v)^2$$

其中 $v=[v_x \ v_y \ v_z \ 1]^T$, $p=[a \ b \ c \ d]^T$, p 表示三维空间中的一个平面,平面方程为: $ax+by+cz+d=0(a^2+b^2+c^2=1)$,平面法向量为 $n=[a \ b \ c]^T$ 。上式可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} \Delta(v) &= \sum_{p \in \text{planes}(v)} (v^T p)(p^T v) = \\ &= \sum_{p \in \text{planes}(v)} (v^T)(pp^T)v = \\ &= v^T \left(\sum_{p \in \text{planes}(v)} K_p \right) v \\ K_p &= pp^T = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

令 $Q = \sum_{p \in \text{planes}(v)} K_p$ 为顶点 v 的二次误差测度矩阵, Q 是一个 4×4 的对称矩阵。则二次误差测度可以表示为 $\Delta(v) = v^T Q v$,二次误差 $\Delta(v)$ 的方程式如下:

$$\begin{aligned} v^T Q v &= q_{11}x^2 + 2q_{12}xy + 2q_{13}xz + 2q_{14}x + \\ &+ q_{22}y^2 + 2q_{23}yz + 2q_{24}y + q_{33}z^2 + 2q_{34}z + q_{44} \end{aligned}$$

一般地, $\Delta(v) = \epsilon$ 表示一个二次曲面,该曲面由点的集合组成,这些点与二次误差矩阵 Q 相关的二次误差为 ϵ 。由于二次误差函数是一个二次方程式,求该方程的最小值是一个线性问题,函数取得最小值时,该函数对自变量 x, y, z 的偏微分必然都为 0,即 $\partial \Delta / \partial x = \partial \Delta / \partial y = \partial \Delta / \partial z = 0$,这等价于求解如下方程式:

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \overline{v} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

如果二次误差测度矩阵 Q 是一个可逆矩阵,则上式可以写成如下形式:

$$\overline{v} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

由上式可直接求出到 n 个平面距离最小的点,即最优代表点。如果二次误差测度矩阵 Q 不可逆,可以采用最小二乘法计算最优近似解,因为求二次误差测度的最小值实质上相当于求解以下关于 x, y, z 的方程组:

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z + d_1 = 0 \\ \vdots \\ a_nx + b_ny + c_nz + d_n = 0 \end{cases}$$

以上方程组试图求解位于 n 个平面上的点(该点到所有平面的距离均为 0)。当 $n > 3$ 时,方程一般无解。但可以采用最小二乘法计算该方程的最优近似解,即求出到这 n 个平面距离最小的点。

2.2 算法实现

对于均匀划分后的模型,算法通过顺序读入每个三角形,将三角形的 3 个顶点的二次误差矩阵叠加到它落入的 Cell 中,求解每个非空 Cell 中最优代表点,最后,那些 3 个顶点落入不同 Cell 的三角形作为简化结果。

确定聚类格网之后,每次读入原始模型 T_{in} 中的一个三角形 t ,获取三角形 3 个顶点的坐标,为三角形的每个顶点构造一个来自格网单元的哈希关键字(即此顶点所在格网单元的编号),并构造一个哈希查找表,这个动态哈希表实现格网单元 cell 与简化模型中顶点的对应关系。如果一个格网单元还没有被访问,就增加一个新的输出顶点的标识变量 V_{out} ,并把与 V_{out} 相关的二次误差矩阵初始化为空。如果此三角形的两个以上的顶点属于同一个格网单元 cell,那么它将简化为一条边或一个顶点,在简化模型中不被输出。否则,把此三角形的顶点索引加入简化模型的顶点集合 V_{out} 中,把三角形加入简化模型的三角形集合 T_{out} 中。计算三角形各个顶点的二次误差矩阵,并把各个顶点的二次误差矩阵累加到该顶点所属的格网单元 cell 中。然后继续读入原始模型 T_{in} 中的下一个三角形,并对其进行上述相同的处理,直到原始模型 T_{in} 中的所有三角形都被处理完为止,最后会得到一个二次误差矩阵列表和一个三角形列表,二次误差矩阵列表中每一个值都对应着属于同一个格网单元的顶点和三角形的累加二次误差矩阵,由这个二次误差矩阵可以计算出该格网单元中的新代表顶点 V_{out} ,即简化模型中的一个顶点。最后输出集合 V_{out} 和集合 T_{out} 中的所有元素即可得到简化模型。

2.3 实验结果

本文的实验数据包括石狮和小兔子的三维数据,首先对石狮和小兔子的数据分别采用 MC 方

法建模^[4],得到原始模型,然后用上述算法对原始模型进行简化,图 2 给出了简化比率分别为 60%和 30%时的简化结果,其中(a)为石狮模型,(b)

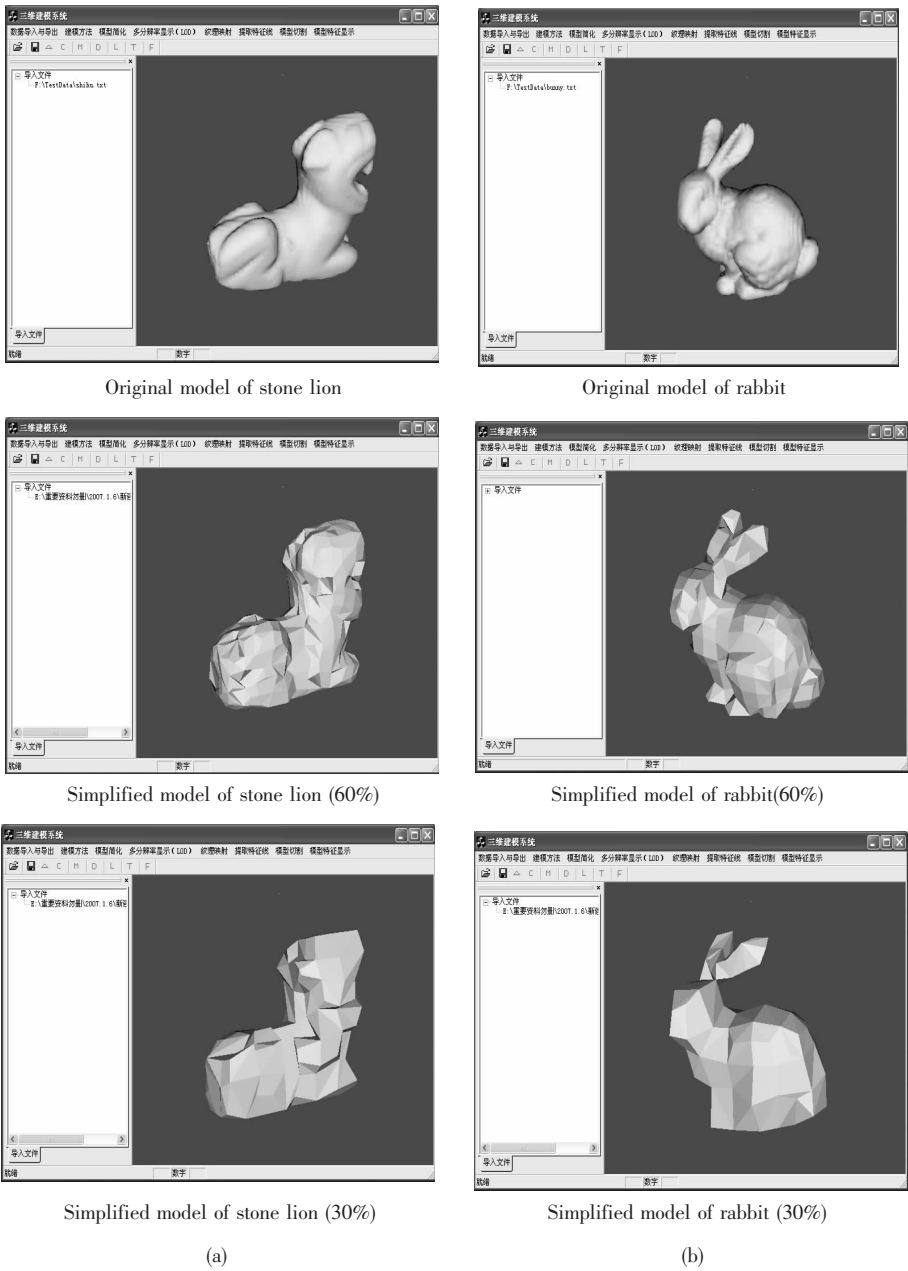


图 2 不同简化比率下的简化结果图

Fig. 2 Simplification result pictures with different simplification ratio

为小兔子模型。

3 文物模型纹理映射的特殊性

文物模型的纹理映射与一般场景纹理映射相比有自己的特殊性,首先,文物模型表面曲率变化一般比较明显,不能直接实现曲面的参数化,这为

实现纹理映射增加了难度^[5]。其次,文物模型需要添加真实的纹理信息才具有一定的观赏和研究价值,而且几何模型与纹理图像之间必须精确对应才能还原真实的文物^[6]。针对这些特殊性,本文提出了适用于文物模型的纹理映射方法,不需要对模型表面进行参数化,取得了很好的映射结果。

4 纹理映射的实现

4.1 选取特征点对

Vivid9i 在获取文物三维点云数据的同时,可以拍摄该文物在同一视点下的彩色图像,自带相机采集的彩色图像以数组形式表示,数组的每一个元素表示图像中的一个像素,由红、绿、蓝颜色值以及透明度组成。每个像素点的坐标 (u,v) 由该像素在图像上自左向右的列数和自上向下的行数确定。

文物几何模型与每一幅文物彩色图像之间的透视投影关系都可以由一个透视投影矩阵 $\mathbf{M}$ 唯一确定,可以利用投影矩阵对模型各点进行纹理映射。由相机的透视投影成像原理可以得出以下公式:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ l \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

(1)

其中, (x_c,y_c,z_c) 为点 P 在相机坐标系下的坐标, (u,v) 为点 P 在图像坐标系下的坐标, (x,y,z) 为点 P 在空间坐标系下的坐标, $\mathbf{M}$ 为 3×4 矩阵,称为透视投影矩阵。

为了建立几何模型与纹理图像之间的对应关系,要求出透视投影矩阵 $\mathbf{M}$,我们通过选择一些几何模型与彩色图像之间的特征点对,即几何模型上的一个顶点 P 和其在彩色图像上的对应像素 p ,然后把点 P 的 (x,y,z) 坐标与点 p 的 (u,v) 坐标分别代入式(1),即可求出 $\mathbf{M}$ 。本文采用手工标定来确定特征点对,通常选择文物在几何和颜色信息上容易识别的位置作为特征点。

4.2 计算透视投影矩阵

设标定了 n 组特征点对 (P_i,p_i) , P_i 的坐标为 (x_i,y_i,z_i) , p_i 的坐标为 (u_i,v_i) ,分别代入式(1),可得:

$$z_{Gi} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$$

使用一组特征点对的坐标,可以得到关于矩阵 $\mathbf{M}$ 元素的两个方程,选定 n 组点对,会有 $2n$ 个关于 $\mathbf{M}$ 元素的线性方程,由于 $\mathbf{M}$ 中共含有 12 个元素,理论上当 $n=6$ 时,即可求出 $\mathbf{M}$,为了降低误差造成的影响,我们通常选取多于 6 组的特征点对,使用最小二乘法求解。

求出 $\mathbf{M}$ 后,就可以利用式(1)计算文物几何模型上任意一点的图像坐标,即纹理坐标,然后取出该纹理坐标处的纹理值,赋给模型上的对应点。

本文首先对石狮和小兔子的数据分别采用 MC 方法建模,得到原始模型,然后用上述纹理映射方法把纹理映射到模型上,图 3 为映射结果,其中(a)为石狮模型,(b)为小兔子模型。

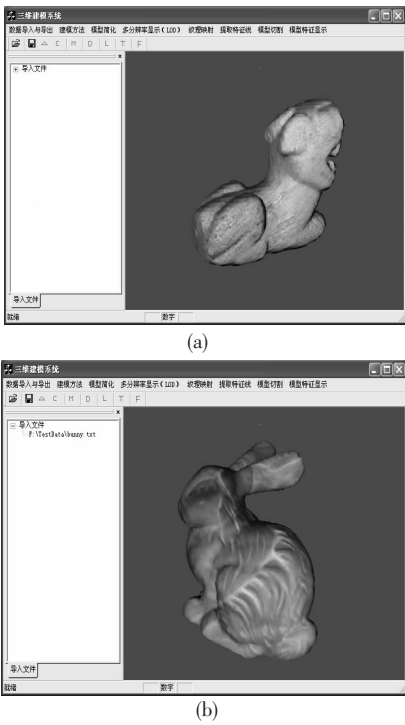


图 3 模型的纹理映射。(a)石狮模型映射结果;(b)小兔子模型映射结果。

Fig. 3 Texture mapping of the models. (a)Texture mapping result of stone lion model;(b)Texture mapping result of rabbit model.

5 结 论

提出了一种基于顶点聚类的新简化算法,该算法采用二次误差测度这一几何误差度量来确定新代表顶点,使得代表顶点设置在到小格内每个三角形所在平面的距离平方和最小的位置,可以得到高质量的简化模型。建立了几何模型与纹理图像之间的映射关系,实现了非参数化三维模型的纹理映射,使得模型具有照片真实感。本文在实现由非参数化面片组成的三维物体的纹理映射时,需要手工标定来确定特征点对,这样会存在一定的人为误差,在以后的工作中,力求设计一种有效的算法能够由计算机自动识别特征点对,减少误差,提高映射的精确度。

参 考 文 献:

[1] 唐泽圣,陈莉,邓俊辉,等. 三维数据场可视化 [M]. 北京:清华大学出版社,1999.

[2] 何友兵,李大海,李良玉,等. 彩色立体图像匹配算法研究 [J]. 液晶与显示,2007,22(4):417-422.

[3] Garland M, Heckbert P. Surface simplification using quadric error metrics [C]//*Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, Los Angeles, USA:Addrson Wesley Publishing Co.,1997:209-216.

[4] Allen P K, Stamos I, Troccoli A, *et al.* 3D Modeling of historicities using range and image data [C]// *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, Taipei:IEEE, 2003:145-150.

[5] 胡海龙,刘树群. Catmull-Clark 细分曲面的纹理映射技术 [J]. 微计算机信息,2007,23(6-3):275-276.

[6] 唐晶磊,景旭,何东健. 基于两步法的交互式纹理映射研究 [J]. 计算机工程与设计,2008,29(8):2062-2064.

Simplification and Texture Mapping of Cultural Relic Model

YANG Li-ping

(Information Science and Technology Department, Baotou Normal Institute,
Baotou 014030, China, E-mail: ylp2004gis@163.com)

Abstract

A novel simplification algorithm based on vertex clustering was proposed in this paper. The simplification quality was improved by using Quadric Error Metrics to compute the placement of each cluster's representative vertex. Based on the analysis for the particularity of texture mapping of cultural relic model, the appropriate mapping method was proposed, the mapping relations for geometric model and texture image was established, and the texture mapping of the three-dimensional model composed of the non-parameterized surfaces was realized. These processes enable the model photo-realistic.

Key words: vertex clustering; model simplification; quadric error metrics; texture mapping

作者简介:杨丽萍(1979—),女,山西大同人,硕士,研究方向为三维空间信息获取与表达。