

## 一种保留特征的网格简化和压缩递进传输方法

沈旭昆 赵学伟 赵沁平

(北京航空航天大学虚拟现实新技术教育部重点实验室 北京 100083)

(xkshen@vrlab.buaa.edu.cn)

## Feature-Preserved Progressive Texture-Mesh in Digital Museum

Shen Xukun, Zhao Xuewei, and Zhao Qiping

(Ministry of Education Key Laboratory of Virtual Reality Technology, Beihang University, Beijing 100083)

**Abstract** In practice, feature information such as colors, textures, surface normals, etc. is necessary to represent 3D models besides geometry and topology information of triangle meshes. However, with the rapid improvement of 3D capture equipments, the accuracy of 3D models increases and results in the large volume of 3D data. Most traditional methods could not deal with the feature of mesh models such as boundary edges and textures during simplification. So, in order to decrease the data volume of 3D textured models in digital museum and retain significant feature synchronously, a new algorithm of texture-mesh based on triangle collapse is presented. By the concept of geometry and texture boundary, the original meshes are divided to boundary, corner, interior or color triangles according to different boundary conditions. In this way, the quadric and error criterion is improved, and constraint strategies are adopted to preserve the feature of geometry boundaries and texture attributes during the simplification process. In addition, a method combining octree-based compression with progressive meshes is given to provide a continuous multi-resolution representation of 3D models. The proposed method is successfully applied to progressive transmission and presentation system of 3D models over the Internet.

**Key words** digital museum; 3D model; mesh simplification; texture; boundary; octree; progressive meshes

**摘要** 针对数字博物馆中三维藏品网络传输及传输过程中藏品特征保留的需要,提出了一种保留拓扑及纹理特征的网格简化方法,在三角形折叠简化算法的基础之上,通过引入边界三角形和色异三角形等概念,对误差矩阵的计算和误差控制方法进行了改进,保留了原始模型的几何边界和纹理属性等特征信息,并结合递进网格和压缩编码,构造了基于八叉树编码的递进网格文件,从而实现了基于网络的三维模型递进传输系统。

**关键词** 数字博物馆; 三维模型; 网格简化; 纹理; 边界; 八叉树; 递进网格

中图法分类号 TP391.41

数字博物馆是以现代信息技术为主要手段对文化遗产的各方面信息进行采集并进行管理,以互联网为主要传播平台向用户提供展示、教育和研究等

多种服务的信息系统。三维几何模型被称为是自音频、视频、图像之后的第4种数字媒体形式<sup>[1]</sup>,因此在数字博物馆中除了传统的多媒体表现形式外,

使用三维交互技术展示一些具有珍贵历史价值的文物和三维场景是近年来竞相研究和采用的最新技术手段之一。然而,使用网格来表示的三维模型往往数据量非常庞大,这给藏品的数字存储、传输和绘制都带来诸多困难,因此,解决网络传输的瓶颈限制是数字博物馆三维展示的迫切需要。

传统的单分辨率模型的网络传输采取先下载后显示(download-and-display)的模式,即将三维模型的所有相关数据都下载到客户端之后再显示,这种方式的不足之处在于响应时间太长。对此的改进是由 Hoppe 提出的递进网格方法<sup>[2]</sup>,即采用多分辨率模型,首先传送一个粗糙的大概轮廓到客户端并显示,然后再逐渐地传输一系列的细节优化信息,对最初的粗糙模型进行细化,这样就能够很短的时间内给用户响应,并且可以随时停止传输,这是一种边下载边显示(download-while-display)模式的递进传输方法。

为了划分多分辨率模型,需要对高精度的三维模型进行简化。Schroeder 等人提出了基于顶点删除的网格删减方法<sup>[3]</sup>;Hoppe 在网格优化算法<sup>[4]</sup>的基础上提出了基于边折叠的递进网格生成方法<sup>[2]</sup>;Isler 等人使用边折叠和三角形折叠操作来实时生成简化模型<sup>[5]</sup>;Garland 等人利用二次误差<sup>[6]</sup>方法来控制网格简化误差;周昆等人则结合 Isler 和 Garland 的方法提出了新的三角形折叠算法<sup>[7]</sup>;Fahn 利用二次误差提出了保留面片颜色和边界边的方法<sup>[8]</sup>;Yang 等人则提出了递进传输中优化的几何/纹理多路复用方法<sup>[9]</sup>。

与简化相关的另一个概念是网格压缩,压缩的目的是在不改变原始网格拓扑结构的情况下,采用尽可能少的比特数来表示三维模型,从而降低模型网络传输的时间。许多研究人员将压缩和递进编码结合起来,提出了压缩递进网格的概念。

但是,上述方法大多是针对比较规整、不含属性的几何模型来进行处理的,而在数字博物馆中,三维数据不仅含有几何、拓扑信息,而且包含颜色、纹理等属性,并且不可避免地存在边界和孔洞,这些信息对于保持模型的外观和真实感具有重要作用,必须在处理过程中加以保留。

为了解决以上问题,本文给出了一种基于三角形折叠算法的保留几何及纹理特征的网格简化方法,不仅有效地控制了简化网格与原始网格之间的几何误差,而且较好地保留了模型的边界信息及纹理属性。另外,还结合递进网格和几何压缩,给出了

基于三角形折叠的结合八叉树(octree)编码的递进网格构造方法,从而支持多个细节层次(level-of-detail, LOD)模型之间的平滑过渡,为数字博物馆中带纹理的三维模型的递进传输提供了解决方案。

## 1 保留边界的网格简化

为叙述简便起见,首先引入一些基本概念。

### 1.1 基本概念

首先,将在空间中沿公共边及在顶点处相邻接的一组三角形定义为三角形网格  $TM$ ,则  $TM$  可由顶点集  $V=(v_1, v_2, \dots, v_n)$  和三角形集合  $T=(T_1, T_2, \dots, T_m)$  所组成的二元组  $(V, T)$  来表示。

定义 1. 对  $TM$  中任一顶点  $v_i$ ,所有以  $v_i$  为一个顶点的三角形  $T_{ik}$  构成的集合,称为与顶点  $v_i$  相关的三角形集合  $P_i$ 。

定义 2. 对  $TM$  中任一三角形  $T_i$ ,与  $T_i$  的 3 个顶点相关的三角形集合的并集,称为与三角形  $T_i$  相关的三角形集合  $C_i$ 。

定义 3. 对  $TM$  中任一条边,如果该边只为一个三角形所拥有,则称该边为边界边,该边所在的三角形为边界三角形。

定义 4. 对  $TM$  中除边界三角形外的任一三角形  $T_i$ ,如果  $T_i$  至少有 1 个顶点在边界边上,则称该顶点为角点,该三角形为角点三角形。

定义 5. 对  $TM$  中任一三角形  $T_i$ ,如果其 3 个顶点都不在边界边上,则称该三角形为内部三角形。

定义 6. 对  $TM$  中任一三角形  $T_i$ ,如果  $T_i$  与其周围三角形的颜色值的差超过预先指定的阈值  $\tau$ ,则称该三角形为色异三角形。

### 1.2 三角形折叠简化

本文采用基于三角形折叠的网格简化算法,如图 1 所示,通过对三角形  $T_i$  执行折叠操作,使它的 3 个

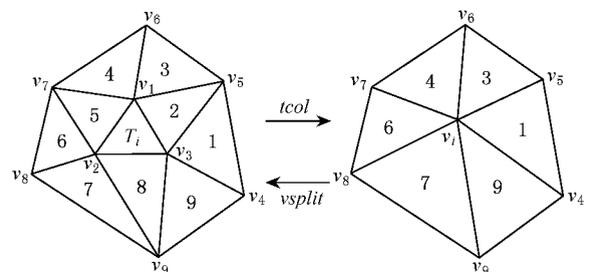


Fig. 1 Triangle collapse. 3 vertices  $v_1, v_2, v_3$  of triangle  $T_i$  merge to 1 vertex  $v_i$ . The reversal operation is vertex split.

图 1 三角形折叠操作 ( $v_1, v_2, v_3$ ) 折叠成  $v_i$

顶点合并为一个顶点  $v_i$ , 从而简化了原来的网格。

该算法对于原始网格中的每个三角形  $T_i$ , 配备一个误差矩阵  $Q_i$ , 如果三角形  $T_i$  折叠为点  $v_i = [x_i \ y_i \ z_i \ 1]^T$ , 则计算折叠误差并选择当前折叠误差最小的  $T_i$  进行折叠操作, 其中折叠误差  $\epsilon(T_i)$  定义为该三角形折叠后的新点到该三角形集合中每个三角形所在平面的距离平方之和:

$$\epsilon(T_i) = \sum_{p \in C_i} (p^T v_i)^2, \quad (1)$$

这里  $p = [a \ b \ c \ d]^T$  表示与三角形  $T_i$  相关的三角形集合  $C_i$  中, 每个三角形所在平面的平面方程  $ax + by + cz + d = 0$  (其中  $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ ), 于是式(1)给出的误差标准可以转换为式(2)的二次形式:

$$\begin{aligned} \epsilon(T_i) &= \sum_{p \in C_i} (v_i^T p)(p^T v_i) = \\ &= \sum_{p \in C_i} v_i^T (pp^T) v_i = v_i^T \left( \sum_{p \in C_i} M_p \right) v_i, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $M_p = pp^T$  是  $4 \times 4$  的对称矩阵, 表示三角形网格中任一点到平面  $p$  的距离:

$$M_p = pp^T = \begin{bmatrix} a^2 & ab & ac & ad \\ ab & b^2 & bc & bd \\ ac & bc & c^2 & cd \\ ad & bd & cd & d^2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

而误差矩阵  $Q_i$  为  $T_i$  所有相关三角形的  $M_p$  相加  $\sum_{p \in C_i} M_p$ , 对于  $v_i$  位置的选取, 则通过使得  $\epsilon(T_i)$  最小来得到。

### 1.3 几何边界保留

对于一些包含孔洞等特殊边界信息的模型, 如颅骨的眼眶, 其孔洞的几何边界有其特殊意义, 在简化过程中需加以保留。为此, 将原始网格中所有三角形根据定义 3.4.5 标记为 3 类具有不同几何特征的三角形。如图 2 所示:

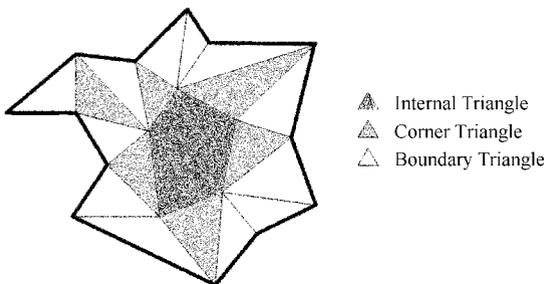


Fig. 2 Marking all the original triangles into 3 types: internal, corner and boundary.

图 2 三类三角形: 内部三角形、角点三角形、边界三角形

为了保留边界边, 即控制边界三角形不参与折叠操作, 可以根据标记的不同调整每个三角形二次误差的权重。在得到每个三角形的折叠误差后, 增大边界三角形的误差, 使边界三角形的折叠误差最大, 而内部三角形的折叠误差最小:

$$\epsilon(T_{boundary_i}) = \max_{T_i \in TM} (\epsilon(T_i)). \quad (4)$$

这种方法的不足是当角点三角形参与折叠时, 会使角点处的边界产生塌陷, 导致缺口的出现; 对此, 可以通过限定其折叠后的新点为该三角形的边界点来解决, 这样, 角点三角形便收缩为原网格边界上一点, 而不会导致边界塌陷的产生。

### 1.4 纹理边界保留

对于原始网格中的每个三角形, 如果它与周围三角形的颜色差别越大, 其对模型整体属性的贡献就越大, 即可以将其三条边视为一种颜色特征的边界来进行保留。这里为了与几何边界三角形相区分, 定义其为色异三角形。

通常, 包含纹理的网格模型, 是通过纹理映射的方式将纹理图像映射到几何网格表面上的。几何网格与纹理的对应方式有两种类型: 顶点对应和三角形对应。如图 3 所示:

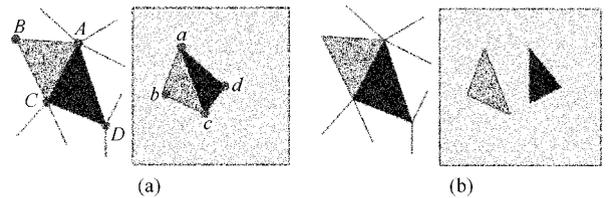


Fig. 3 2 types of mapping between geometry/texture. (a) Texture coordinate corresponds to geometry vertex and (b) Texture triangle corresponds to geometry triangle.

图 3 几何/纹理对应的两种类型。(a)顶点对应 (b)三角形对应

对于前一种映射方式, 可以通过纹理坐标在纹理图像上找到对应于该顶点的颜色信息  $[r_i \ g_i \ b_i]^T$  (其中  $0 \leq r_i, g_i, b_i \leq 1$ ), 从而为每个三角面计算一个相应的纹理颜色值。本文使用每个三角形 3 个顶点像素值的平均值作为该三角形的纹理颜色值:

$$[r \ g \ b]^T = \left( \sum_{i=1}^3 [r_i \ g_i \ b_i]^T \right) / 3. \quad (5)$$

根据定义 6 的判断标准, 对网格中的三角形进行标记, 其中阈值  $\tau$  则可以根据用户对几何及属性信息保留的不同优先级要求来选取。对于三角形  $T_i$ , 假设其某个相关三角形为  $T_p$ , 且对应于  $T_i, T_p$

的颜色值分别为  $[r_i \ g_i \ b_i]^T$   $[r_p \ g_p \ b_p]^T$  ,若

$$\sum_{p \in C_i} (|r_i - r_p| + |g_i - g_p| + |b_i - b_p|) > \tau, \quad (6)$$

则将  $T_i$  标记为一个色异三角形,并采用与处理边界三角形类似的方法,增大其折叠误差,从而保留了相对重要的属性特征。

对于后一种映射方式,则首先通过纹理坐标计算几何三角形在纹理图像上所对应的三角形的重心,使用重心处的像素值来代替几何三角形的颜色值:

$$[u \ w]^T = \left( \sum_{i=1}^3 [u_i \ w_i]^T \right) / 3, \quad (7)$$

其中  $[u_i \ w_i]^T$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为几何三角形每个顶点的纹理坐标,  $[u \ w]^T$  为纹理三角形的重心坐标. 在得到纹理等价颜色值后,采用与前一种方式相同的方法对色异三角形进行保留。

### 1.5 本文算法描述

本文提出的基于三角形折叠的结合属性的非封闭网格简化算法如下:

- 1) 对原始网格进行预处理,建立顶点表、三角形表并计算三角形相关性;将所有三角形划分为边界三角形、角点三角形、内部三角形 3 类;
- 2) 对原始网格中每个三角形  $T_i$ , 计算其误差矩阵  $Q_i$  以及颜色值  $C(T_i)$ ;
- 3) 计算颜色差值并标记所有色异三角形;
- 4) 对于原始网格中每个三角形  $T_i$ , 通过其误差矩阵  $Q_i$  计算每个三角形折叠后生成的新顶点的位置  $v_i$ , 并通过  $v_i^T Q_i v_i$  计算其折叠误差;对于边界三角形和色异三角形,增大其折叠误差;
- 5) 按折叠误差从小到大排列三角形;
- 6) 从三角形序列中选取折叠误差最小的三角形执行折叠操作,更新所有相关信息;
- 7) 重复执行步骤 6),直至三角形序列为空或误差已达到用户要求结束。

## 2 结合八叉树编码的递进传输

### 2.1 递进网格(PM)的表示

Hoppe 提出了基于边折叠的递进网格的构造方法,基本原理是每次对原始网格  $M$  执行一次边折叠操作,逐步将分辨率降低,最后得到一个简化的粗糙网格  $M^0$  和一系列细节信息序列;以这一序列的逆序对最简网格执行折叠操作的逆操作——顶点分

裂,重新向网格中插入节点和三角形,从而恢复出原始模型。

本文采用三角形折叠的方法,与 Hoppe 方法类似,把参与折叠消失的三角形的顶点坐标以及其相关三角形的序号等信息记录下来,依靠索引关系,不难从  $M^0$  重建出  $M$ ,上述过程可以描述为:

简化过程

$$(M = M^n) \xrightarrow{tcol_{n-1}} M^{n-1} \dots \xrightarrow{tcol_1} M^1 \xrightarrow{tcol_0} M^0;$$

恢复过程

$$M^0 \xrightarrow{vsplit_0} M^1 \xrightarrow{vsplit_1} \dots M^{n-1} \xrightarrow{vsplit_{n-1}} (M^n = M).$$

于是,  $\{M^0, \{vsplit_0, \dots, vsplit_{n-1}\}\}$  就组成了  $M$  的一个 PM 表示。

对于包含纹理的模型,可以对顶点坐标表达进行扩展,将顶点信息表示为  $v_i(x_i, y_i, z_i, u_i, w_i)$ ,其中  $x_i, y_i, z_i$  为顶点坐标,  $u_i, w_i$  为顶点对应的纹理坐标,经过以上处理,就可以将属性信息记录在递进网格文件中,从而在重建原始几何模型的同时提供属性的恢复。

### 2.2 基于八叉树的几何压缩编码

基于 Octree 的编码<sup>[10-12]</sup>是一种高效的几何压缩编码方案,其基本原理是对顶点的几何坐标用 bit 位进行量化,主要有以下 3 个步骤:

- 1) 对几何模型的顶点进行 Octree 的多分辨率层次化组织,直到最精细化的树节点能够表达量化的精度;首先通过对模型包围盒进行递归细分,生成 Octree 隐含表示顶点的空间位置,其中每个树节点记录其子树所含顶点的个数,对于不含顶点的树节点将不再继续子分,包含顶点的树节点将被迭代子分,直到节点为空或只含一个顶点且达到最大精度层为止;因此包围盒的精度是由量化精度决定的,而最精细层的树节点能够恢复顶点坐标的量化结果;用二维的例子描述如图 4 所示;

2) 由粗到细以广度优先的方式遍历 Octree 的各个节点,并输出描述顶点位置情况的 3 个数据流:根据节点中所含顶点的个数,对于每个非空节点,用 1bit 标识其是否是一个单节点;对于一个单节点,用 3bit 来标识该单节点中的哪个子节点包含惟一顶点;而对于非空非单节点,则产生一个 8bit 的标识,表示该节点的子节点是否非空;如此循环直至访问到最精细层的节点停止;

- 3) 用算术编码方法对这 3 个数据流进行编码。

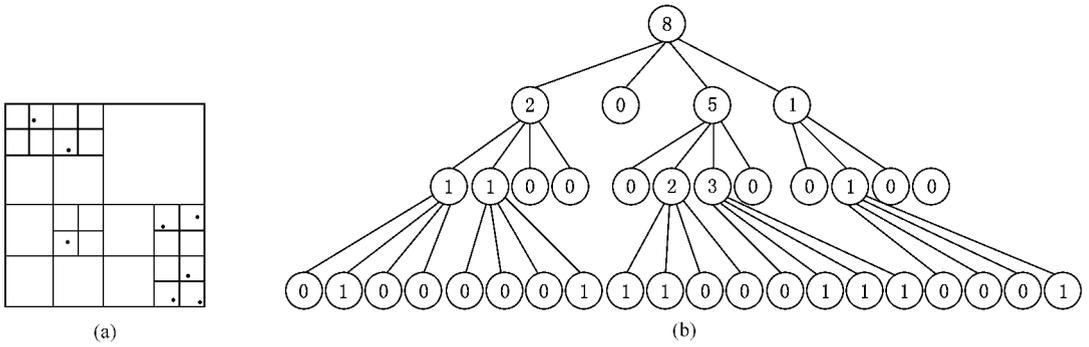


Fig. 4 A 2D example of octree-based division. ( a ) Vertices distribution( denoted in 2D ) and ( b ) The corresponding octree( denoted in quad-tree ).

图 4 基于 Octree 划分的几何编码。( a ) 空间内顶点位置分布的二维表示 ( b ) 对应的八叉树( 以四叉树表示 )

### 2.3 结合 PM 与 Octree 的递进传输

对于原始网格面片数很大的模型,仅仅采用简化处理后,其基网格数据量仍然较大;另外,对于包含纹理的网格模型,由于施加了上述边界保留限制,其基网格也会维持在一定的细节层次上不能再简,这些情况也会增加响应时间,不利于模型的实时浏览。在提出解决方法之前,首先来分析一下几种传输方法的特点:

图 5 描述了模型精确度随时间变化的关系,横轴时间通过逐渐传输的 bit 位数来表示;纵轴代表模型的相似度,模型分辨率越高,相似度越大。

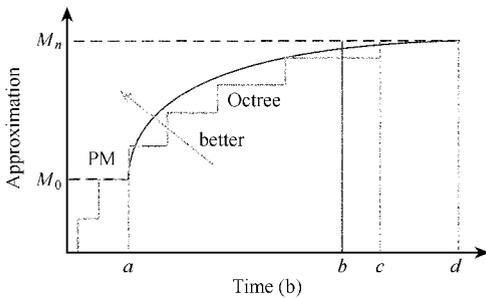


Fig. 5 Approximation/time diagrams of 3 types of transmission methods. Vertical line for non-P, curve for PM, and ladder for OT.

图 5 三种传输方式的相似度/时间曲线比较:非递进、递进网格、八叉树编码

传统的传输方法如图 5 中黑色直线所示,它是一种先下载后显示的非递进过程,需要用户等待很长时间( $b$  bits)直到全部模型解码完毕才能显示,这种方法最大的不足在于响应时间太长。

递进网格传输是一种细粒度的模型多分辨率传输方案。如图 5 中黑色曲线所示,假设需要消耗  $a$  bits 来传输最初的粗糙网格  $M^0$ ,在得到基网格数据后,可以马上开始对粗糙模型的渲染和细化过程,并

且可以提供较其他方法更高精确度的模型,但其不足在于与非递进方法相比,需要消耗很长的时间( $d$  bits)来恢复出完整的最高分辨率模型。

基于八叉树的递进编码是一种粗粒度的模型多分辨率传输方案。如图 5 中灰色阶梯状折线所示,由于压缩后文件数据量较小,它的响应时间很短,随着恢复信息的传输和解码,模型几何数据成批更新,模型分辨率逐层提高,其消耗的总时间( $c$  bits)比非递进方法略长而比递进网格方法缩短许多,但其不足是模型分辨率的提升不连续,存在跳变,且恢复过程中模型的精确度相对递进网格方法要低。

可见,递进网格作为一种构造连续 LOD 模型的方法,为三维数据的网络传输提供了有效的增量传输方法,其优点在于提供了一系列高相似度的多分辨率模型,而与之对应的压缩编码可以在不改变原始网格拓扑结构的情况下,尽可能采用较少的比特数来表示三维模型,并且较好地缩短了传输总时间。因此,将两种方法的优点结合起来,对基网格的几何数据进行基于八叉树的压缩和递进编码,如图 6 所示:

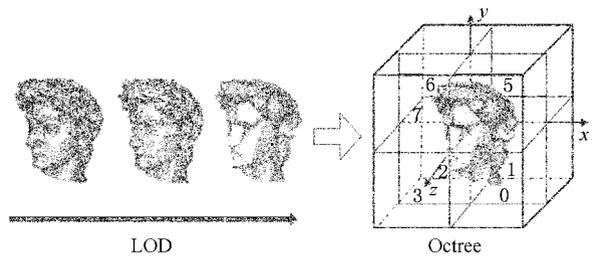


Fig. 6 Octree-based encoding of the base mesh.

图 6 基网格的八叉树压缩编码

在对响应时间要求高而对模型精确度要求不高的传输起始阶段,采用 Octree 解码方式,直至基网格数据传输完毕;在之后的时间里,采用 PM 传输方式始终保持较高且连续的模型分辨率提升,以使用户根据需要随时中止。

### 3 实验结果

根据以上算法,对几组不同特征的三维模型进行了网格简化和测试.

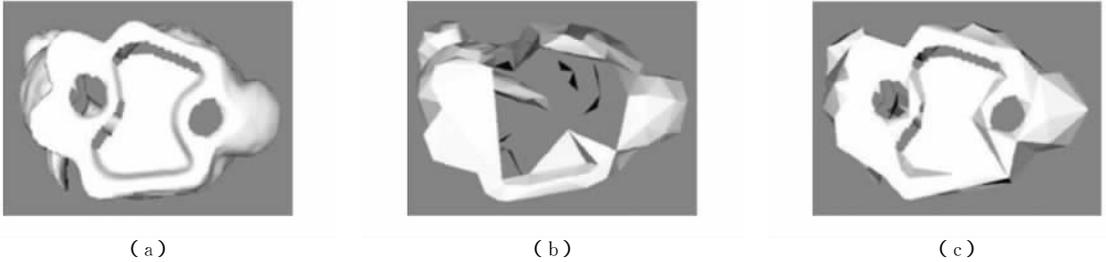


Fig. 7 Boundary preservation of bunny. (a) Original mesh; (b) Before boundary preservation (simplified by 99%); and (c) After boundary preservation (simplified by 99%).

图7 兔子模型的几何边界保留。(a)原始模型 (b)采用边界保留算法前(简化99%) (c)采用边界保留算法后(简化99%)

### 3.2 胶囊模型保留纹理边界的简化

图8为对胶囊模型的纹理边界进行保留的简化

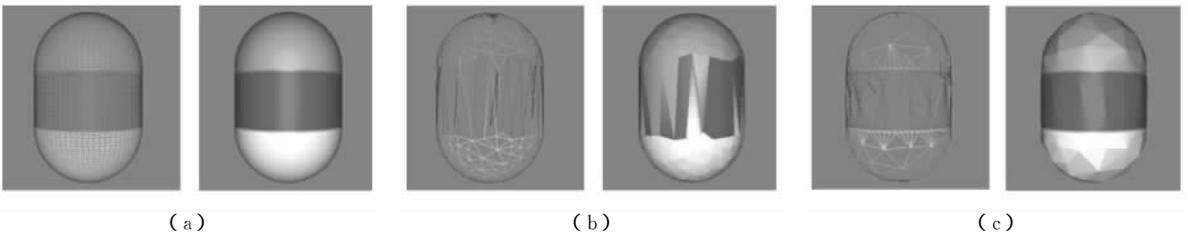


Fig. 8 Texture preservation of capsule. (a) Original mesh; (b) Before texture preservation (simplified by 94%); and (c) After texture preservation (simplified by 94%).

图8 胶囊模型的纹理边界保留。(a)原始模型 (b)采用纹理保留算法前(简化94%) (c)采用纹理保留算法后(简化94%)

### 3.3 结合 Octree 编码的递进传输

综合使用本文方法,对几组模型采用了结合 Octree 编码的递进传输.从图9和图10的传输过程

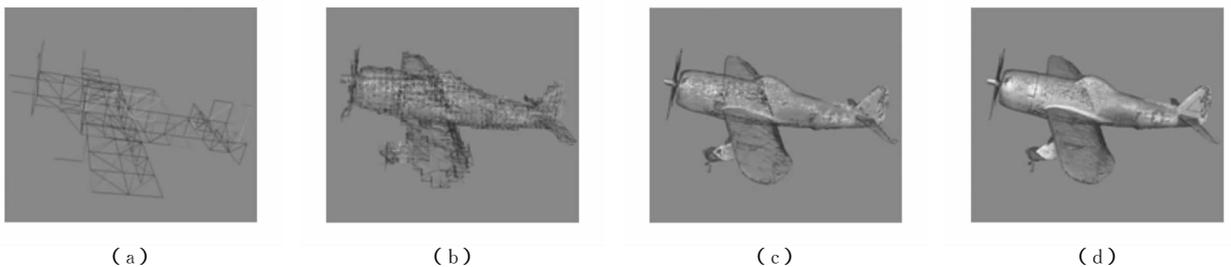


Fig. 9 Progressive transmission of P-47. (a) Octree initialization (140 triangles, refined by 0.15%); (b) Octree decoding (17410 triangles, refined by 18%); (c) Base mesh (20672 triangles, refined by 21%); and (d) Original mesh (96720 triangles, refined by 100%).

图9 P-47的递进传输。(a) Octree 启动(140个三角形,恢复0.15%) (b) Octree 解码(17140个三角形,恢复18%) (c) 基网格(20672个三角形,恢复21%) (d) 原始模型(96720个三角形,恢复100%)

### 3.1 兔子模型保留几何边界的简化

图7所示的兔子模型底部存在有若干孔洞和缝隙,可以看出,经过边界保留处理,在简化99%后仍可以较好地保持模型的几何边界特征.

结果,可以看出,采用属性边界保留方法后,模型的颜色特征及分界线得到了很好的保持.

可以看出,在 Octree 启动并解码传输20%之后得到的基网格,与原始模型除了在几何相似性上非常接近外,还较好地保留原始模型的边界、轮廓及纹理特征.

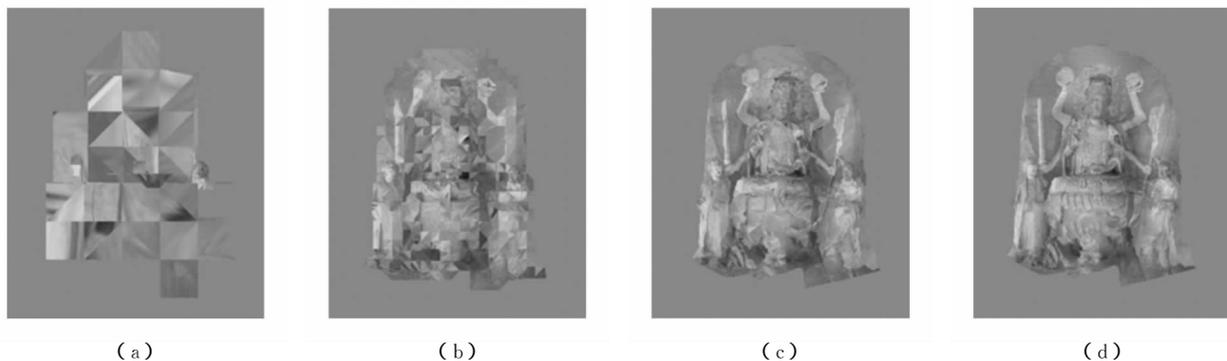


Fig. 10 Progressive transmission of Kwan-yin. (a) Octree initialization (120 triangles, refined by 0.3%); (b) Octree decoding (6058 triangles, refined by 15%); (c) Base mesh (8080 triangles, refined by 20%); and (d) Original mesh (40384 triangles, refined by 100%).

图 10 日月观音的递进传输。(a) Octree 启动(120 个三角形,恢复 0.35%) (b) Octree 解码(6058 个三角形,恢复 15%) (c) 基网格(8080 个三角形,恢复 20%) (d) 原始模型(40384 个三角形,恢复 100%)

### 3.4 结果分析

本文提出的方法已基于 Java 及 Java3D 实现,实验环境为 Pentium IV 3.0GHz 512MB 内存的 PC 机,表 1 给出了几组模型的实验数据,所有模型均包

含特征信息。

从实验结果可以看出,本文采用 Octree 编码后,生成的基网格数据量进一步缩小,大大减少了网络传输延迟,缩短了模型在客户端显示的响应时间。

Table 1 Experiment Data Comparison

表 1 实验数据:面片数、文件量及传输时间比较

Models	Triangle Numbers			File Size( MB )			Response Tim( s )			Transmission Tim( s )		
	Org.	BM	Src.	BM		PM	Non-P	PM	OT + PM	Non-P	PM	OT + PM
				Before	After							
Capsule	12460	830	0.6	0.05	0.02	0.3	2.0	1.1	0.2	2.0	3.0	2.5
Kwan-yin	40384	3158	2.5	0.50	0.25	1.5	8.5	2.9	0.8	8.5	12.0	11.0
Bunny	69451	693	2.5	0.59	0.30	1.7	8.0	2.1	0.2	8.0	15.0	13.0
P-47	96720	8428	7.8	1.10	0.47	2.3	14.0	3.0	0.5	14.0	30.0	28.0

Note: Data include the triangle numbers of original mesh/base mesh, file size of source/base mesh( before compression )/base mesh( after compression )/progressive mesh, response time and total transmission time of non-progressive mode/progressive mesh mode/octree-initialized progressive mode.

## 4 结束语

本文基于三角形折叠的算法提出了一种对结合纹理的网格模型进行几何边界和纹理特征保留的简化算法,通过一系列三角形折叠的操作及基网格的几何压缩编码,生成了连续的多分辨率模型,从而实现了一种结合递进网格和 Octree 编码的传输方法,用于基于 Web 的数字博物馆的三维展示。本文提出的方法不但可以高质量地保持模型表面的几何相似性,而且通过约束策略有效地保存了边界边和模型表面色彩属性,保证了模型的真实感。

另外,本文的方法还可以很容易地扩展到保留

模型的多种标量属性上:如表面材质信息、透明度等,然而,随着信息数量的增大,不可避免地增加了运算量和内存的消耗,因此如何设计一种更有效的数据结构和快速高效的简化算法是将来工作的主要内容;此外,对于纹理数据量较大的高精度模型,需要采取更优的纹理传输和映射策略,以便更好地与几何模型同步递进显示。

## 参 考 文 献

- [1] P Schroeder, W Sweldens. Digital geometry processing [C]. Course Notes for ACM SIGGRAPH, Los Angeles, California, 2001

- [2] H Hoppe. Progressive meshes[J]. *ACM Computer Graphics*, 1996, 30(1):99-108
- [3] William J Schroeder, Jonathan A Zarge, William E Lorensen. Decimation of triangle meshes[J]. *Computer Graphics*, 1992, 26(2):65-70
- [4] H Hoppe, T DeRose, T Duchamp. Mesh optimization[J]. *ACM Computer Graphics*, 1993, 27(1):19-26
- [5] V Isler, R W H Lau, Green Mark. Real-time multiresolution modeling for complex virtual environments[C]. In: *Proc of ACM Symp on Virtual Reality Software and Technology*. New York: ACM Press, 1996. 11-19
- [6] M Garland, P S Heckbert. Surface simplification using quadric error metrics[J]. *Computer Graphics*, 1997, 31(3):209-216
- [7] Zhou Kun, Pan Zhigeng, Shi Jiaoying. Mesh simplification algorithm based on triangle collapse[J]. *Chinese Journal of Computers*, 1998, 21(6):506-513 (in Chinese)  
(周昆,潘志庚,石教英. 基于三角形折叠的网格简化算法[J]. *计算机学报*, 1998, 21(6):506-513)
- [8] Chin-Shyurng Fahn. Polygonal mesh simplification with face color and boundary edge preservation using quadric error metric[C]. In: *Proc of the IEEE 4th Int'l Symp on Multimedia Software Engineering*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2002. 174-181
- [9] Sheng Yang, Meiyin Shen, C-C J Kuo. Progressive coding of 3D textured graphic model via joint mesh-texture optimization[C]. *ICASSP*, Montreal, 2004
- [10] J Peng, C-C J Kuo. Geometry-guided progressive lossless 3D mesh coding with octree(OT)decomposition[J]. *ACM Trans on Graphics*, 2005, 24(3), 609-616
- [11] R Schnabel, R Klein. Octree-based point-cloud compression[C]. *Eurographics Symp on Point-Based Graphics*, Boston, 2006
- [12] Y Huang, J Peng, C-C J Kuo, et al. Octree-based progressive geometry coding of point clouds[C]. *Eurographics Symp on Point-Based Graphics*, Boston, 2006



**Shen Xukun**, born in 1965. He has been professor of Beihang University since 1998, senior member of China Computer Federation. His main research interests are analogism, virtual reality and visualization.

沈旭昆, 1965年生, 教授, 中国计算机学会高级会员, 主要研究方向为类比推理、虚拟现实与可视化。



**Zhao Xuewei**, born in 1982. M. A. in computer engineering from Beihang University. His current research interests include multimedia, virtual reality and visualization.

赵学伟, 1982年生, 硕士, 主要研究方向为多媒体、虚拟现实与可视化(tinshock@126.com)。



**Zhao Qiping**, born in 1948. Professor and Ph. D. supervisor of Beihang University. Senior member of China Computer Federation. His main research interests include artificial intelligence, virtual reality

and visualization.

赵沁平, 1948年生, 教授, 博士生导师, 中国计算机学会高级会员, 主要研究方向为人工智能、虚拟现实与可视化。

## Research Background

In digital museum, 3D models comprise geometry, topology as well as color, texture and other attributes. All the feature information is important for maintaining the appearance and reality of 3D models. As the data volume of 3D models is usually very large, it leads to difficulties in storage, transmission and rendering. To solve this problem, multi-resolution meshes are often used via simplification or compression, such as progressive meshes. However, most methods mainly handle regular models without attributes, and cannot retain model features during processing. In this paper, we present a simplification method for texture-mesh models with geometry and texture feature preservation based on the triangle collapse algorithm. Through a series of collapse operations and compression of base mesh, we create a multi-resolution mesh, and accomplished an octree-initialized progressive transmission used in digital museum for 3D exhibition. This method can not only maintain the surface quality of the geometry similarity, but also preserve the boundary edges as well as color attributes to ensure the reality of 3D models. Our work is supported by NCF (60533070).