

## 基于三维模型几何信息的纹理图像压缩

吴晓军<sup>1,2)</sup>, 徐广毅<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (哈尔滨工业大学深圳研究生院机电工程与自动化学院 深圳 518055)

<sup>2)</sup> (深圳先进运动控制技术与现代自动化装备重点实验室 深圳 518055)  
(wuxj@hitsz.edu.cn)

**摘 要:** 为进一步压缩三维模型数据, 提高网络传输的速度, 同时不降低模型渲染的视觉表现效果, 提出了一种基于三维模型几何信息的纹理图像压缩算法. 首先对模型三维网格做重网格化, 使网格具备半正则的规则拓扑结构; 然后利用半正则网格表面的几何信息对模型的三维特征点进行提取, 对三维特征点在纹理空间的映射点应用  $k$ -means 聚类算法获取感兴趣区域; 最后结合基于感兴趣区域的嵌入式零树小波压缩算法, 实现对模型纹理图像数据的编码和解码操作. 实验结果表明, 该算法提取的纹理图像感兴趣的细节区域更精确、压缩比高, 经过解码和重建后的纹理图像在对三维模型表面贴图映射后具有更好的视觉效果.

**关键词:** 三维模型; 几何信息; 纹理压缩  
**中图分类号:** TP391.41

## Texture Image Compression Algorithm Based on 3D Geometric Information

Wu Xiaojun<sup>1,2)</sup> and Xu Guangyi<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Mechanical Engineering and Automation, Shenzhen Graduate School, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055)

<sup>2)</sup> (Shenzhen Key Laboratory for Advanced Motion Control and Modern Automation Equipment, Shenzhen 518055)

**Abstract:** To further compress the 3D mesh data and improve the network transmission speed, meanwhile not reduce the model rendering visual appearance, this paper presents a texture compression algorithm based on 3D geometric information. Firstly, remesh the 3D mesh to get semi-regular topology structure. Secondly, extract the 3D feature points on the semi-regular mesh and the corresponding features in texture image are clustered with  $k$ -means method to form some regions of interest (ROI). Finally, the encoding and decoding operations are realized on the texture image by combining the embedded zero-tree wavelet based on the ROIs. The experimental results show that the proposed algorithm can acquire more accurate ROI in texture image with high compression rate. After being decoded, reconstructed, and texture mapping, the texture mapped to 3D model has a better visual effect.

**Key words:** 3D model; geometry information; texture compression

随着计算机图形学理论以及相关软硬件技术不断成熟, 三维建模技术逐渐融入于互联网应用, 并在 web3D 电子商务中取得了重要的应用, 使得用户在网络环境中也可以得到类似现实世界的体

验. 然而, 高精度三维扫描及重建技术在满足用户对虚拟场景及物体模型真实感需要的同时, 也使得模型数据和纹理数据量十分庞大<sup>[1]</sup>. 这些数据不仅占据了大量的存储空间, 还降低了模型传输和

收稿日期: 2015-03-01; 修回日期: 2015-09-21. 基金项目: 深圳市科技计划项目(CXB201105100073A, JCYJ20150928162432701, JCYJ20140417172417166). 吴晓军(1975—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为机器视觉、图像三维重建、几何模型处理等; 徐广毅(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为几何模型处理、纹理压缩.

加载的速度,严重影响网络用户的体验,也制约了 web3D 的发展。

研究人员通过几何信息和纹理信息压缩以减少数据量,经过多年的发展,几何信息压缩方面已经取得了较多的研究成果<sup>[2-4]</sup>,而三维模型纹理图像的压缩仍是图形学领域关注的热点问题之一。根据压缩研究方向的发展阶段,纹理压缩算法可以分为 2 类:

1) 基于图像特性的纹理图像压缩算法。1996 年,Beers 等<sup>[5]</sup>提出了一种纹理压缩方法,专门针对绘制过程的纹理压缩方法应当满足的特殊条件制定了一些压缩规则,以保证解压缩的快速性和对纹理像素访问的随机性。快速的解压缩能够保证纹理数据被及时加载和处理,随机性访问则可以保证对提前未知的贴图区域进行即时处理。S3 公司提出的 S3 Texture Compression 纹理压缩格式,将纹理图像分成区块,每个区块的颜色空间被当作具有线性特性的空间。但该方法在纹理图像空间中边缘效应明显的区域将会出现非连续效应。为了克服这种效应带来的影响,Levkovich-Maslyuk 等<sup>[6]</sup>从颜色金字塔模型中选择区块像素的像素值。Pereberin<sup>[7]</sup>提出基于变换编码的纹理编码算法,将图像分割为长宽分别为 4 的区块,区块之间没有交集;它可以用来对多分辨率的法向纹理贴图进行编码。该算法可以并行压缩几层具有父子关系的法向纹理贴图,其将图像转换成用明亮度、色度、饱和度 3 个特性描述的数据,每个通道单独压缩;但其结果是这 3 个通道的数据相关性在压缩的过程中被忽略,导致数据不能充分压缩。Ivanov 等<sup>[8]</sup>对 S3 Texture Compression 压缩格式加入了新特性,扩大了 RGB 通道数值的取值区域。2003 年,Fenney<sup>[9]</sup>提出了一种新的纹理图像编码算法,其在精确度不高的高频带数据中加入多个低频带的信息,最终减少了数据总量。低频带数据的特性在于保留了大量的初始纹理图像的直观信息,这些信息可以被用来增强视觉效果,所以在高频信息中加入低频数据可以帮助提升压缩图像的综合质量。上述算法的关注点在于图像的内容、数据类型、频域特性等各种二维特征,并没利用纹理数据由三维空间到二维空间的生成过程或是由二维空间映射到三维空间的贴图过程中的各种特性。

2) 基于映射特性的纹理压缩算法。这类算法利用纹理像素到模型表面的映射过程中的特性,对纹理空间内的数据完成一些特殊的操作。Bal-

melli 等<sup>[10]</sup>从纹理映射的数学模型入手,提出了一种纹理压缩算法的优化方法。类似于图像频率均衡程度度量方法<sup>[11]</sup>,Balmelli 等也利用提高图像频率的均衡程度使纹理的存储空间需求被降低,但其使用小波分析工具对纹理图的频域数据进行分析。小波分析方法能够反映一幅图像在时域和频域 2 个方面的特性,并能够在多分辨率尺度下进行分析。然而这种方法要求纹理映射函数是已知的,在通常情况下较难满足这一条件。本文与 Balmelli 等方法类似的方面包括使用小波工具分析图像以及区分图像的有效和无效区域,但本文通过三维网格几何信息确定纹理图像中的重要区域,不需借助纹理映射函数。

对三维图形数据进行压缩编码的研究通常分为对网格数据的压缩和纹理图像的压缩这 2 个相对独立的部分,很少有人关注利用二者的关联特性对这 2 种数据进行压缩编码和压缩。这方面代表性的工作有几何及纹理信息相结合的压缩算法<sup>[12]</sup>和 PCTM 方案<sup>[13]</sup>。邵亚娟<sup>[14]</sup>提出三维网格和纹理图像的同步压缩与渐进传输方案,其思路是通过纹理颜色信息和能量函数综合决定网格的压缩方法,仅根据三维模型的三角网格信息和纹理图像信息,并不依赖建模时的映射模型。目前,使用网格几何信息来研究降低纹理局部区域分辨率的代价尚未有人研究过。本文即从这个方向入手,利用网格的几何信息确定纹理图像的重要区域,实现纹理图像感兴趣区域数据的优先压缩和传输。

## 1 算法概述

本文算法主要围绕在纹理图像感兴趣区域提取及纹理压缩的各个环节,包括纹理特征点的提取、纹理图像感兴趣区域的确定和纹理图像压缩编码 3 个部分,具体过程包括:使用基于流形网格的网格半正则化处理方法<sup>[15]</sup>将原始网格重网格化,生成具有半正则结构的多分辨率网格<sup>[16]</sup>,并利用网格压缩的方法<sup>[17]</sup>对半正则网格建立点、边、面的二叉树结构;求取基网格以外的所有层次顶点实际位置和预测位置的偏移量,并构建偏移量小波生成树<sup>[18]</sup>;在偏移量小波树中选择一层可以反映细节几何信息的偏移量集合作为研究对象,从中抽取偏移量较大的偏移量,并将对应的顶点作为特征点。本文的算法流程如图 1 所示。

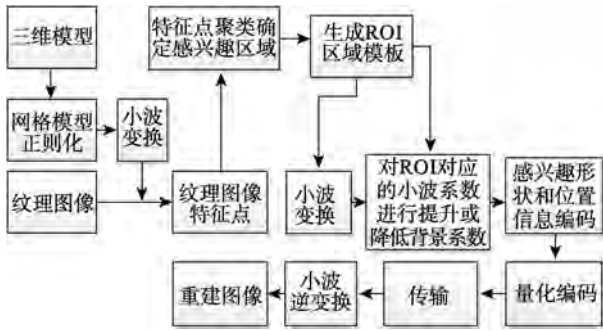


图1 基于几何信息的纹理图像压缩算法流程

## 2 纹理图像特征点的提取

### 2.1 模型几何信息和纹理图像的关系

纹理图像呈现在人眼的状态和普通图像不同。首先，贴图前纹理图像中的背景像素在贴图后完全没有映射到模型表面，这部分信息对于观察模型时的人眼完全不可见，可以考虑在压缩时去除。另一方面，人眼对模型的感兴趣区域多集中于表面细节丰富的区域，在网络传输中，这部分信息应当被优先传达到客户端。因此，在纹理图像的压缩过程中，应当充分考虑感兴趣区域的优先传输。

纹理贴图中由纹理坐标系到设备坐标系的变换，往往便是纹理映射的逆过程。给定空间曲面  $F \in \mathbb{R}^3$ ，对于  $F$  中的任一点  $(x, y, z)$ ，通过纹理映射  $\phi$  找到它在参数域中的对应点  $(u, v)$ ，即

$$(x, y, z) \in F \rightarrow \phi(x, y, z) = \begin{bmatrix} \phi_u(x, y, z) \\ \phi_v(x, y, z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (1)$$

纹理映射函数  $\phi$  满足使输入集合和输出集合互为单射关系的条件。所有的模型空间点坐标  $(x, y, z)$  及其在纹理空间的对应坐标  $(u, v)$  都是三维模型数据中已知的部分，因此不妨先提取三维模型网格顶点中的特征顶点，然后将其映射到纹理坐标系中，即可得出纹理图像上感兴趣区域中的特征点。这些特征点一定分布在贴图后纹理的可见性区域，并且集中在人眼所感兴趣模型的表面几何信息复杂部分，最后借助理纹理图像内容的连续性，可求解出纹理图像的感兴趣区域。

### 2.2 多分辨率网格的偏移量小波生成树的建立

普通三维模型的网格拓扑信息极其复杂，不利于求取三维模型三角网格顶点区域的特征点。用分辨率方法处理三维图形，将模型分为粗糙的基网格和加入不同程度细节信息的多个层次，可以为网格建立四叉树结构，方便提取三角网格在

不同尺度下的几何信息。本文采用基于多分支的半正则重网格化处理<sup>[15]</sup>，新生成的网格具有半正则化拓扑结构。除了基网格部分顶点的出度(和顶点相邻的边的数量)不为6，派生子面的顶点全部具有数值为6的出度。如图2所示，半正则网格的面具有天然的1-4细分结构，可以建立1-4生成树。不仅如此，边和边上的点也同样具有树形结构，图3说明了这种结构。

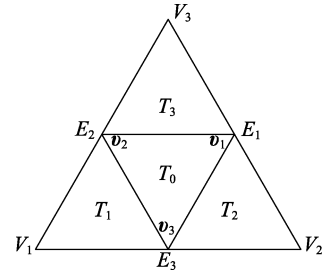


图2 三角面的1-4细分结构

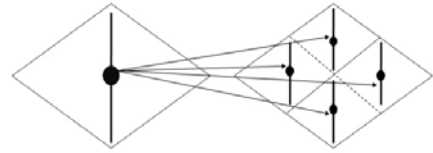


图3 边和顶点的四叉树结构

应用改进的 Loop 模式(modified Loop)<sup>[18]</sup>，用

$$v_0 = \frac{3}{8}(v_1 + v_2) + \frac{1}{8}(v_3 + v_4) \quad (2)$$

对高分辨率层次的顶点进行预测操作。如图4所示，先利用低分辨率层级的顶点预测分辨率上更高层中顶点的位置，再用预测位置与实际位置之差  $d$  代替高层顶点的位置。自顶向下应用这种方式进行处理，则半正则网格可化为基网格顶点集合  $M_0$  和多层渐进网格的顶点与其自身预测值的偏移量的集合  $d_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，其中  $n$  为基网格向下细化的层次数目。这种对网格的表示方法尽可能

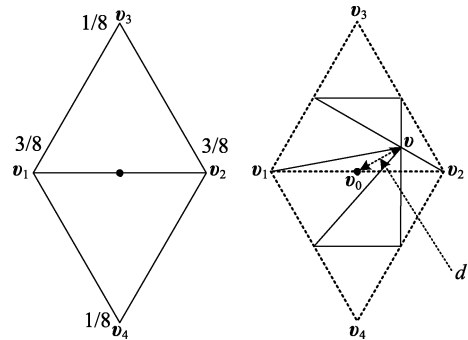


图4 顶点预测位置的差值向量

地去除了网格的拓扑信息,而保留了模型表面的几何信息.

### 2.3 提取网格的几何特征点和纹理图像特征点

传统的基于局部曲率的几何特征提取方法虽然简单,但无法设置合适的曲率阈值将弱特征提取出来,如果模型中包含噪声时,噪声点处的曲率会超过弱特征的曲率,特征提取不稳定.在观察物体时,人眼对物体细节的分辨率是有限的,其关注度可能集中于某个分辨率层次,高于该层次的信息易于获取和分辨,低于该层次的细节将难以被辨认和关注.所以在提取网格不同分辨率下的偏移量时,处理到某一层次就可以满足人眼的观察需求了.本文按照  $d_1 \rightarrow \dots \rightarrow d_{n-1} \rightarrow d_n$  的顺序对某一适合我们需求的层次的偏移量小波系数集合做以下操作:首先对当前集合  $d_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ,  $n$  为

当前层级网格的偏移量总数),设阈值  $\varepsilon_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_i^j$ .

依次将  $d_i$  中的每一个小波系数  $d_i^j$  ( $1 \leq j \leq i$ ) 和阈值  $\varepsilon_i$  比较,若小波系数大于阈值,则选择该小波

系数所属的三维点作为备选的特征点保存.然后检测当前分辨率下的集合中所有符合条件的特征点数目,如果数目大于预设值(本文综合考虑精度和运算量将备选特征点数目设置为 2 000),则将当前阈值增大一倍,重复求取备选特征点;直到点的总数不多于预设值,最终保存这些点作为特征点.最后遍历所有的已保存特征点,对每个特征点  $v_m$ ,从模型的未经处理的原始网格中找到其空间距离最小的点  $v_k$ ,并根据原始网格中为每个顶点提供的在纹理空间的映射位置,得到该点在二维图像空间上的对应像素点  $T_{vk}$  和  $T_{vk}$  即为我们需要的纹理图像特征点.

将上述操作应用到几组三维模型的纹理图像上,可得图 5 所示的一系列结果.从图 5 可以清楚地观察到,所求得纹理特征点精确地分布在模型几何形状复杂的部分对应的纹理区域,如图 5a 中衣物的褶皱、图 5b 中 Buddha 的头部、图 5c~5d 中 Rabbit 面部及身上的花纹,以及图 5e~5h 中 Bear 的面部和四肢等区域.

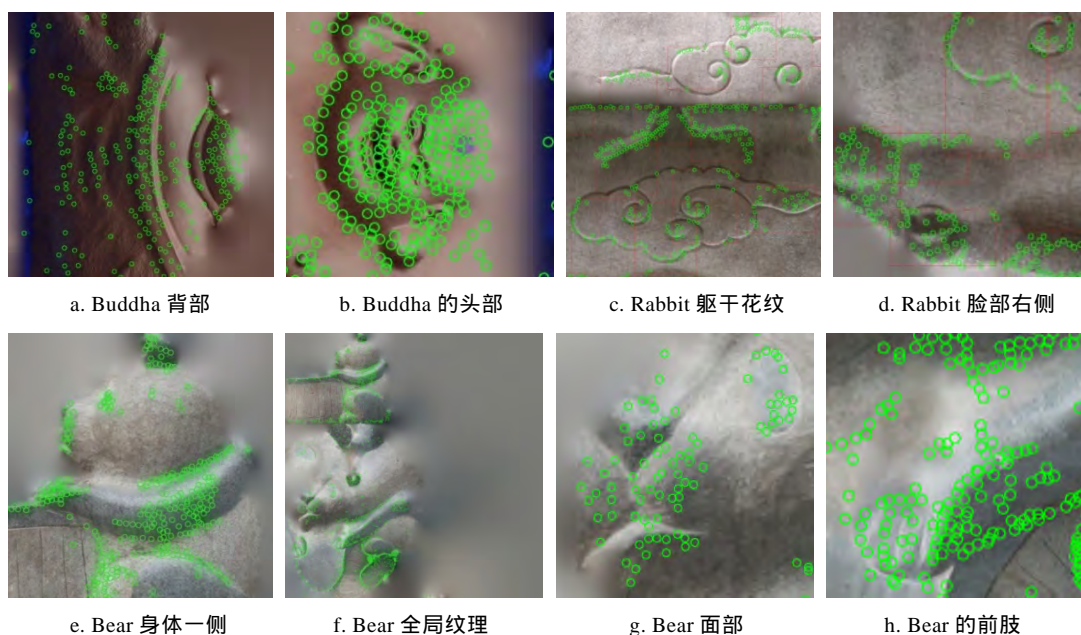


图 5 纹理图像的特征点提取结果

### 3 纹理图像的感兴趣区域提取和小波变换

通过前面的网格特征点提取及特征点对  $UV$  坐标系的映射,可以获得纹理图像中的特征点的分布.因此,如果能够确定一些区域,并让其完全包括特征点,就可以得到我们需要的感兴趣区域<sup>[19]</sup>.位于同一区域的特征点彼此之间的纹理坐标应当接近,

因此可以把图像特征点的二维纹理坐标作为研究对象进行分析,根据坐标的接近程度对不同特征点进行分类.将物理或抽象对象的集合分成由类似对象组成的多个类的过程被称为聚类<sup>[20]</sup>.经过对图像特征点进行聚类而形成的感兴趣区域,可以进一步对图像小波变换域的系数进行处理. $k$ -means 聚类算法<sup>[21]</sup>恰好适用于解决对象规模较小的二元问题.



获得纹理图像上的特征点后,首先计算出特征点在纹理图像上的包围盒,将包围盒里的数据点做四叉树剖分,每个叶节点内的特征点数限制在10~40个点之间,然后在四叉树非空的叶节点内选靠近叶节点中心的一特征点作为种子点,这样可以获得 $n$ 个种子点作为待聚类的中心,如图6所示.聚类时的点集不受叶节点内点的限制,重复计算每个点到聚类中心的距离,并将其归类到离该点最近的类中去,直到算法的结果收敛,不能被聚类的点认为是噪声点.记录完整包围一个类所有特征点的矩形区域,即矩形包围盒.如图7所示,图中这些包含特征点的红色边缘围绕的矩形区域即可被看作是图像上入眼的感兴趣区域.

对原图像进行一步横向的小波分解,用低频带存储原图像相邻像素的均值,高频带存储相邻像素差值的折半.再在纵向做一次同样的操作,则图像完成了一层小波分解,所有低频系数都存在于图像左上角区域.如果对图像继续进行Haar小波变换<sup>[22]</sup>,则仅对原图的低频部分操作即可.图像

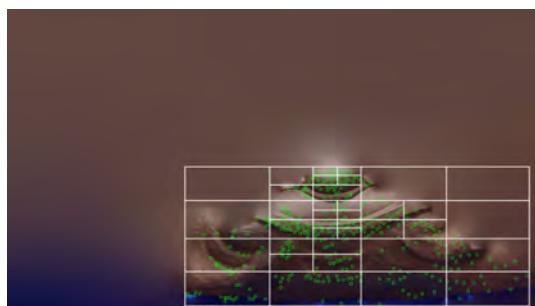
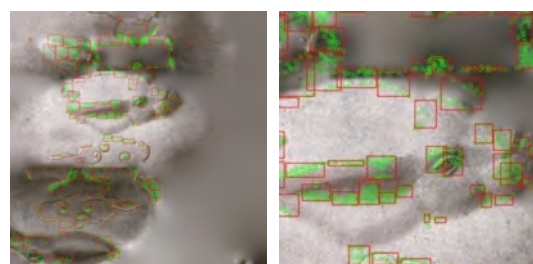
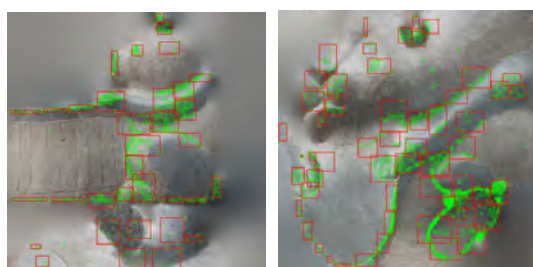


图6 纹理图像特征点四叉树及聚类种子点选择



a. Bear 的底座

b. Bear 的头部



c. Bear 的腿和脚

d. Bear 全局贴图

图7 通过聚类算法得到的纹理图像感兴趣区域

经过小波变换后,包含了一幅不同分辨率的图像金字塔的所有内容.小波变换操作并不会压缩原始图像的数据量,变换后的图像的像素数目与原图像的像素数目相等.原始图像经过变换后,需要在感兴趣区域实现优先编码,首先需要提升区域内部的小波系数,在解码时也要相应的降低感兴趣区域的系数.本文采用最大位移法<sup>[23]</sup>,位移因子 $s$ 满足 $s \geq \max(M_b)$ ;其中, $M_b$ 是小波系数幅值位平面的最大值, $s$ 是位移系数.经位平面提升的感兴趣区域小波系数的最小幅度大于背景小波系数的最大幅值.以幅值 $2^s$ 为界限,幅值小于该值为背景小波系数,幅值大于该值为感兴趣区域小波系数.因此在图8b中背景颜色为黑色.确定感兴趣区域小波系数后,将这些系数右移 $s$ 位,即可还原感兴趣区域系数.

对本文提取的纹理感兴趣区域进行六层金字塔迭代运算后生成二值化的小波系数模板,模板大小和纹理图像相同.图8c中模板的白色区域对应所有频带中需要保留的小波系数所在的区域,需要保留的小波系数包括高频带中感兴趣区域的小波系数以及低频带的全部系数;图8d中对于低频带背景系数的提升将会让图像在重建时得到较好的整体显示效果.

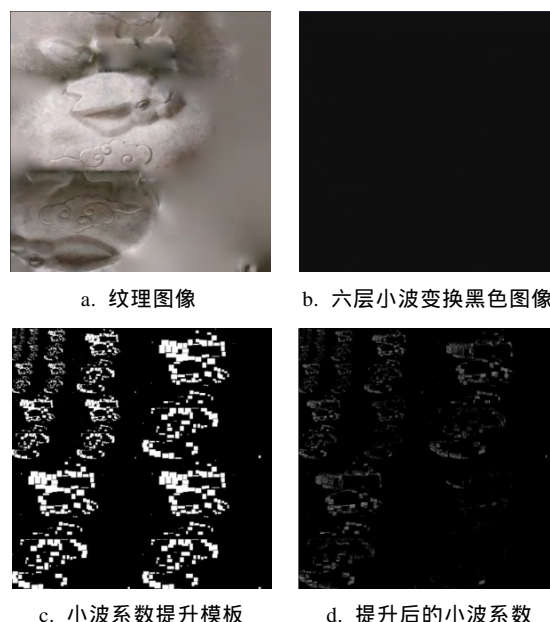


图8 最大位移法提升后的小波系数

#### 4 嵌入式零树小波编码和图像重建

嵌入式零树小波编码(embedded zerotree wave-

lets, EZW)<sup>[24]</sup>充分利用了小波图像金字塔形态数据的统计特性,改善了小波系数的组织方法,保证了重要的小波系数优先表示和编码,降低了对非重要系数的位运算次数,并有效地提高了反映图像重建质量的峰值信噪比.如图 9 所示,EZW 首先选择初始阈值(首次扫描得到的阈值)  $T_0 = 2^{\lfloor \lg \max\{|c_{i,j}|\} \rfloor}$ ,其中  $\{|c_{i,j}|\}$  是  $L$  级小波的分解系数; $|c_{i,j}|$  是  $c_{i,j}$  的绝对值,之后的每次扫描的阈值是前次扫描阈值的一半  $T_i = \frac{T_{i-1}}{2}$ , ( $i=1,2,\dots,L$ ); 然后是主辅扫描,记录系数的符号位  $P$  和  $N$  以及零树根  $T$  和孤立零点  $Z$ ,并对小波系数进行量化,最终输出编码信号.

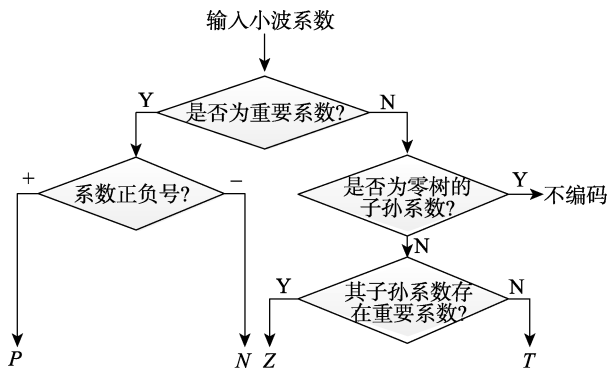


图 9 EZW 编码流程图

经过最大位移法提升处理的小波系数应用嵌入 EZW, 对于 EZW 编码主扫描和辅助扫描的输出结果, 可以借助霍夫曼编码<sup>[25]</sup>再次压缩, 最终编码成的二进制文件, 即为纹理图像的压缩文件. 网络传输时, 解码器可随时用接收到的小波系数对图像进行重建, 解码操作可看作是编码操作的逆过程. 值得注意的是, 对于经过提升区域内部的小波系数, 在解码时也要相应的降低感兴趣区域的系数.

## 5 实验结果

对 Buddha, Rabbit, Bear 等三维模型经过最大位移法处理的纹理图像小波系数进行嵌入式压缩编码和熵编码, 实验模型的纹理尺寸全部是  $4096 \times 4096$  像素, 未压缩纹理图像的大小分别为 33.4 MB, 33.2 MB 和 33.1 MB. 应用本文算法提取特征区域并用 EZW 算法做感兴趣区域编码处理, 得到压缩文件分别为 1.21 MB, 1.09 MB 和 1.15 MB, 相较原始未压缩的纹理图像文件, 压缩比分别为 3.6%, 3.3% 和 3.5%.

然后, 在解码端对压缩文件中对经过位移处理的系数(感兴趣区域系数)进行优先解码和图像重建, 重建效果如图 10 所示. 对于 Buddha 模型的纹理图像, 背景区域向解码端暂时只传递了低频带系数, 缺少高频带小波系数, 导致其分辨率大大降低; 而感兴趣区域(图 10 b 对应 Buddha 的头、腹部等部分)由于各个频带经过位移提升的系数全部传送到解码端, 很好地保留了清晰度.



a. Buddha 纹理图像

b. Rabbit 纹理图像



c. Bear 纹理图像

d. Buddha 感兴趣区域重建图像



e. Rabbit 感兴趣区域重建图像

f. Bear 感兴趣区域重建图像

图 10 用经过最大位移提升的小波系数得到的重建图像

同时记录解压前代表感兴趣区域小波系数的二进制码的数据量, Buddha, Rabbit, Bear 3 组模型的数据量分别为 0.38 MB, 0.49 MB 和 0.48 MB. 用经过不完全解码的文件重建的纹理图像对三维模型进行贴图映射, 得到一系列三维模型贴图的结果. 可以看出, 纹理图像上分辨率不高的部分对模型表面集合细节复杂部分的颜色影响较小. 如图 11a~11c 所示, Buddha 的眼、嘴、手指的纹路及手中念珠这些我们更关注的部分, 其色彩的分辨率

都很高;而其他平坦和不重要的区域,如膝盖上的衣物分辨率很低.总体上来看,用压缩文件中很少的一部分数据(对 Buddha 压缩文件来说是 32.0% 的数据)即可得到较好的纹理重建效果和贴图显示效果.

对 Rabbit 和 Bear 进行相同实验,可得到类似的效果.如图 12a 所示 Rabbit 身上的花纹、图 12b 所示双眼和图 12f 所示 Bear 的眼、鼻,图 12g 所示四肢,这些区域的纹理较为精细,而模型的其他表面区域则具有很低的纹理分辨率.

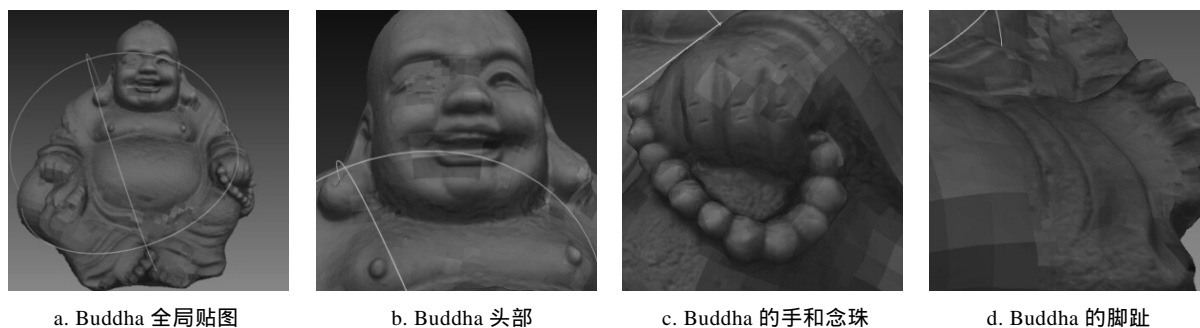


图 11 优先传递系数重建纹理图像对 Buddha 模型的贴图

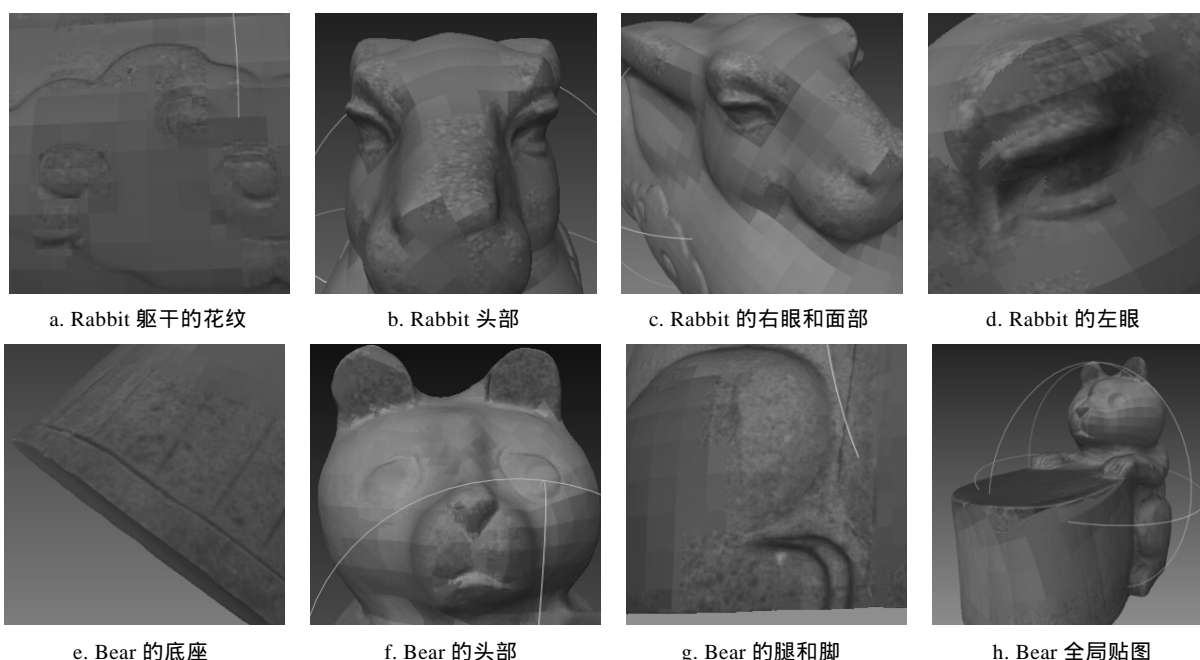


图 12 优先传递系数重建纹理图像对 Rabbit, Bear 模型的贴图

最后,将压缩文件连同剩余部分全部解码.由于对原始纹理图像进行 Haar 小波变换<sup>[26]</sup>时只损失了小波系数小数数位的精度,而描述系数幅值的整数部分没有改变,因此可以依靠这些系数对图像进行精确的还原.全部解码后生成的纹理图像对 Rabbit 模型贴图效果如图 13 所示,经贴图后,模型不仅在眼、鼻、躯干的花纹处具有较高清晰度,所有部位的纹理图案都保持了很高的高分辨率,此时解码器完整地复现了原模型的颜色信息.

表 1 记录了实验模型压缩前的文件比特数、经过 EZW 压缩后的文件的大小,以及优先传输的

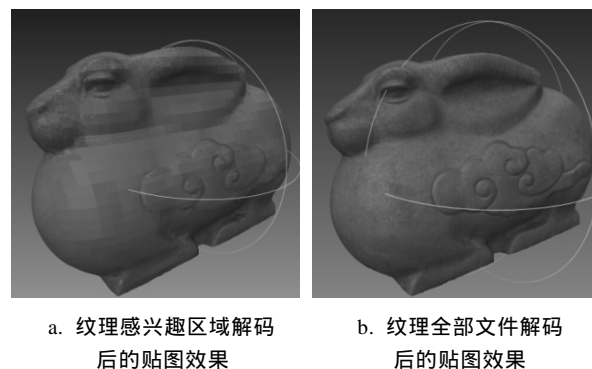


图 13 对压缩文件进行感兴趣区域系数解码和全部解码的效果对比图

表 1 对压缩文件进行不同码率解码的数据

模型类别	Budda	Rabit	Bear
未压缩文件体积/MB	33.4	33.2	33.1
感兴趣区域数据/MB	0.377	0.494	0.479
EZW 压缩后总数据量/MB	1.215	1.094	1.149
感兴趣区域数据占压缩文件的比例/%	32	45.2	

文件大小和优先传输的部分占全部压缩文件的百分比。可以看出,对于实验模型,通过传输具有高优先级的 30%~50% 文件,即可较好地复现原模型的形态;对模型表面的复杂部分,纹理的清晰度较高。继续传输剩余文件并用重建文件贴图,即可得到图 13b 所示最高分辨率的显示效果,它和原始纹理图像对网格模型的贴图效果并无不同。

## 6 结 语

本文针对压缩过程中如何求取纹理图像上人眼感兴趣区域的问题进行了深入研究,提出了基于三维模型表面信息的纹理图像压缩算法,利用模型网格数据求取纹理图像上的人眼感兴趣区域。根据纹理的视觉表现形式,提取了代表三维模型多分辨率重网格化后表面细节信息的三维特征点,以及在纹理空间上的映射点作为纹理特征点。根据图像空间的连续性,利用  $k$ -means 聚类算法对图像中的特征点进行了类聚合,取得了纹理图像的感兴趣区域,并提高了感兴趣区域和背景的区分精度。搭建基于感兴趣区域的 EZW 编解码实验系统对压缩算法进行验证,取得了比较好的实验效果。

本文通过计算正好包含聚类后同一个类中所有特征点的矩形包围盒来确定图像的感兴趣区域,这种方式有可能增大感兴趣区域的无效面积。实际应用中可以考虑将矩形包围盒换成由类内点组成的凸包,使得提取的感兴趣区域更加精确。另外,本文算法需要对原网格所有顶点进行遍历,求得和每一个半正则网格特征点空间距离最近的原始网格顶点,进而得出纹理特征点,因此特征点数量的增加将会降低算法的运行效率。将来工作可以考虑建立合理的数学模型,预测特征点集合的规模,使算法的重建精度和执行效率得到改善。

## 参考文献(References):

- [1] Wu Yanfang. Virtual exhibition and customization based on Web3D[J]. *Journal of Graphics*, 2012, 33(3): 85-89(in Chinese)
- (武艳芳. 基于 Web3D 的产品虚拟展示与用户定制[J]. *图学学报*, 2012, 33(3): 85-89)
- [2] Qin Aihong, Peng Haoyu, Shi Jiaoying. An approach for eliminating accumulative error for 3D geometry compression algorithms[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(9): 1900-1905(in Chinese)
- (秦爱红, 彭浩宇, 石教英. 三维几何数据压缩算法的累计误差消除方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(9): 1900-1905)
- [3] Liu Ying, Liu Xuehui, Wu Enhua. An mode-based connectivity compression for triangular meshes[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2007, 19(6): 703-707 (in Chinese)
- (刘 迎, 刘学慧, 吴恩华. 基于模版的三角网格拓扑压缩[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(6): 703-707)
- [4] Ma Zhigang, Wang Nan, Wang Guoping, *et al.* Multi-stream progressive geometry compression[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2006, 18(2): 200-207 (in Chinese)
- (马志刚, 王 楠, 汪国平, 等. 多码流渐进几何压缩[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, 18(2): 200-207)
- [5] Beers A C, Agrawala M, Chadda N. Rendering from compressed textures[C] // *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH*. New York: ACM Press, 1996: 373-378
- [6] Levkovich-Maslyuk L, Kalyuzhny P G, Zhirkov A. Texture compression with adaptive block partitions[C] // *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Multimedia*. New York: ACM Press, 2000: 401-403
- [7] Pereberin A V. Hierarchical approach for texture compression[C] // *Proceedings of GraphiCon*. Moscow, GraphiCon Scientific Society Press, 1999: 1-6.
- [8] Ivanov D V, Kuzmin Y P. Color distribution - a new approach to texture compression[J]. *Computer Graphics Forum*, 2000 19(3): 283-289
- [9] Fenney S. Texture compression using low-frequency signal modulation[C] // *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/ EUROGRAPHICS Conference on Graphics Hardware*. Aire-La-Ville: Eurographics Association press, 2003: 84-91
- [10] Balmelli L, Taubin G, Bernardini F. Space-optimized texture maps[J]. *Computer Graphics Forum*, 2011, 21(3): 411-420
- [11] Hunter A, Cohen J D. Uniform frequency images: adding geometry to images to produce space-efficient textures[C] // *Proceedings of the Conference on Visualization*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000: 243-250
- [12] Okuda M, Chen T. Joint geometry/texture progressive coding of 3D models[C] // *Proceedings of International Conference on Image Processing*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000, 3: 632-635
- [13] Nagatomo K, Yoshikai D, Okuda M, *et al.* Progressive coding of textured 3D models[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2002, 1: 357-360
- [14] Shao Yajuan. 3D mesh and texture synchronizd compression and progressive transmission[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004(in Chinese)
- (邵亚娟. 三维网格和纹理图像的同步压缩与渐进传输[D].



- 北京: 北京工业大学, 2004)
- [15] Guskov I. Manifold-based approach to semi-regular remeshing[J]. *Graphical Models*, 2007, 69(1): 1-18
- [16] Lee A W F, Sweldens W, Schröder P, *et al.* MAPS: multi-resolution adaptive parameterization of surfaces[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 1998: 95-104
- [17] Khodakovsky A, Schröder P, Sweldens W. Progressive geometry compression[C] //Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH. New York: ACM Press, 2000, 271-278
- [18] Ma Jianping, Luo Xiaonan, Chen Bo, *et al.* Triangle mesh compression based on reverse subdivision for mobile terminals [J]. *Journal of Software*, 2009, 20(9):2607-2615(in Chinese)  
(马建平, 罗笑南, 陈 渤, 等. 面向移动终端的三角网格逆细分压缩算法[J]. *软件学报*, 2009, 20(9): 2607-2615)
- [19] Si Bailu. An image retrieval method based on regions of interest[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences. Institute of Computing Technology, 2002(in Chinese)  
(斯白露. 基于感兴趣区域的图像检索方法[D]. 北京: 中国科学院计算技术研究所, 2002)
- [20] Liu Ming, Liu Bingquan, Liu Yuanchao. A fast clustering algorithm for information retrieval[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2013, 50(7): 1452-1463(in Chinese)  
(刘 铭, 刘秉权, 刘远超, 等. 面向信息检索的快速聚类算法[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(7): 1452-1463)
- [21] Clausi D A. K-means iterative fisher (KIF) unsupervised clustering algorithm applied to image texture segmentation[J]. *Pattern Recognition*, 2002, 35(9): 1959-1972
- [22] Kang Xuejing. Research on wavelet image denoising and compressing method for mobile internet of things[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2012(in Chinese)  
(康学净. 面向移动互联网应用的小波图像去噪及压缩方法研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2012)
- [23] Yan Xiumei. Wavelet and Contourlet transform based interested region coding[D]. Wuhan: South-Central University for Nationalities, 2010(in Chinese)  
(晏秀梅. 基于小波和轮廓波变换的感兴趣区域编码研究[D]. 武汉: 中南民族大学, 2010)
- [24] Shapiro J M. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3445-3462
- [25] Lin Y K, Huang S C, Yang C H. A fast algorithm for Huffman decoding based on a recursion Huffman tree[J]. *Journal of Systems and Software*, 2012, 85(4): 974-980
- [26] Liu Fangmin, Wu Yonghui, Yu Jianxin. Image compression process and principle of JPEG2000[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2002, 14(10): 905-911+916 (in Chinese)  
(刘方敏, 吴永辉, 俞建新. JPEG2000 图像压缩过程及原理概述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(10): 905-911+916)