

# 基于小波变换的三维网格感兴趣区域编码

郑红娟, 刘 波, 张鸿宾  
(北京工业大学计算机学院, 北京 100022)

**摘 要:** 在实际应用中, 用户可能只对三维网格的部分区域感兴趣, 希望该区域能够快速、高质量地解码, 而非感兴趣区则要求一般, 以便节省网络带宽和存储。目前还未见三维网格感兴趣区编码的相关工作发表。本文提出一种基于网格小波变换的三维感兴趣区的编码方法, 提出了两种感兴趣区优先编码策略和四种编码模型, 以及建立感兴趣区域掩模的快速方法。实验结果表明, 本文方法有效地实现了三维网格的感兴趣区域编码, 较好地满足了用户浏览的交互性和个性化的要求。

**关键词:** 感兴趣区域编码; 三维网格; 小波变换; SPHT 算法

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 04-0618-06

## Region-of-Interest Coding of 3D Meshes Based on Wavelet Transform

ZHENG Hong-juan, LU Bo, ZHANG Hong-bin  
(Computer Institute, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** In applications, users may be only interested in parts of a mesh, and demand higher reconstruction fidelity of the region of interest (ROI) than that of non-ROI at very low bit rate. Up to now, there have no publications on ROI coding of 3D meshes. We proposed an efficient method of 3D mesh ROI coding in this paper. Two methods to code the ROI firstly and four ROI coding models are proposed. A quick scheme for constructing ROI mask is also suggested. Experimental results show that the proposed method has achieved the ROI coding of 3D meshes efficiently, and supported the browsing of 3D meshes on Internet interactively and individually.

**Key words** region-of-interest coding; 3D meshes; wavelet transform; SPHT algorithm

### 1 引言

三角形网格是表示三维物体几何形状的最普遍的方法。它的数据量一般都很大, 需要经过压缩来减少对网络带宽和存储空间的需求。与图像、视频压缩的研究相比, 三角形网格的压缩<sup>[1-3]</sup>是一个较新的课题。网格压缩一般分为渐进压缩和非渐进压缩。渐进压缩可以产生嵌入式的位流, 并支持渐进传输。基于小波变换的方法是目前压缩效率最高的渐进压缩方法<sup>[2]</sup>。它把原始网格分解成表示其大概轮廓的基网格 (base mesh) 和一系列表示物体表面细节的小波系数, 并采用边传输边解码的方式, 即先得到基网格数据, 然后随着小波系数数据的陆续到达, 重构出的网格越来越接近于原始网格, 用户无需等到全部数据到达就可以开始交互。

在三维网格的实际应用中, 用户可能只对网格的部分区域感兴趣, 希望该区域能够快速、高质量地解码, 而非非

感兴趣区则不作此要求。在这种情况下, 应该将有限的带宽资源优先分配给感兴趣区。在解码时, 只要感兴趣区的质量达到要求, 用户就可以中断传输, 从而进一步节约网络带宽和存储空间。

一般的三维网格渐进压缩方法对感兴趣区和非感兴趣区是同等对待的, 不能满足感兴趣区快速、高质量的解码要求。为实现在解码时感兴趣区的质量比非感兴趣区高, 需要对感兴趣区域进行特殊处理, 即进行三维网格的感兴趣区编码。图像和视频的感兴趣区编码已有许多工作发表<sup>[4,5]</sup>。但据作者所知, 目前还没有三维网格感兴趣区编码的相关工作发表。三维网格与二维图像有很大的差别, 如三维网格顶点间的连接关系不规则, 存在曲率等几何性质和拓扑结构等。这些差别使得图像的感兴趣区编码方法不能直接适用于三维网格。

本文提出一种三维网格感兴趣区域编码的方法, 希望实现在实现感兴趣区编码的同时, 能够取得好的压缩性能。本

文利用网格小波变换将三维网格分解成基网格和小波系数, 对小波系数进行位平面编码来得到嵌入式的渐进位流. 重构感兴趣区所需要的小波系数构成了感兴趣区的掩模, 将感兴趣区掩模中的小波系数进行位平面上移, 可以使它们在位平面编码时能较早地得到编码、传输和解码, 从而使感兴趣区域的质量比非感兴趣区域的高.

本文第 2 节描述重新网格化 (remeshing) 与网格小波变换方案, 第 3 节描述建立感兴趣区掩模的快速方法, 第 4 节描述感兴趣区域编码方案, 第 5 节是实验结果, 最后是结论.

## 2 重新网格化与小波变换

小波变换的强去相关能力可以使三维网格压缩获得很高的压缩效率, 但三维网格的连接关系不规则以及存在曲率等特点, 使得在非正规网格上建立小波变换非常困难. 目前的网格小波变换只适用于半正规网格, 即由一个基网格进行一级或多级一分四划分后得到的网格 (见图 1(a)). 为了进行小波变换, 人们提出了一些重新网格化方法<sup>[6,7]</sup>, 将一般的非正规网格转化为半正规网格.

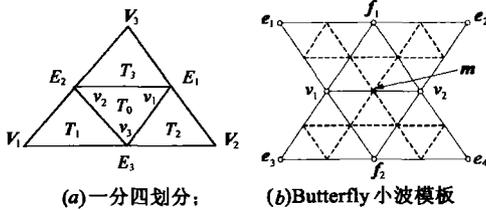


图 1 半正规网格的小波变换

本文采用 M APS<sup>[6]</sup>方法进行重新网格化, 它具有思想简单、计算复杂度低等优点. M APS 首先通过网格简化得到基网格, 并在原始网格和基网格之间建立一种映射关系, 然后对每个基三角形进行一分四划分, 并利用已建立的映射关系, 求出一分四划分引入的基三角形上的新顶点在原始网格表面上的对应点, 这些点就是重新网格化后的新顶点. 当所有基三角形经过多级一分四划分以后, 就建立了一个与原始网格形状近似的半正规网格, 这个半正规网格与原始网格之间的形状误差随着划分级数的增加而变小.

经过重新网格化得到的半正规网格可以进行小波变换. 目前常用的小波变换有 Butterfly 小波<sup>[8]</sup>和 Loop 小波<sup>[2]</sup>, 它们的压缩性能相差不大, 但 Butterfly 小波更简单, 且分解的计算复杂度比 Loop 小波低. 本文采用了 Butterfly 小波, 其模板如图 1(b)所示, 分解和重构公式如式 (1)和式 (2)所示, 其中  $K(j)$  为层次  $j$  的尺度系数的集合,  $M(j)$  为层次  $j$  的小波系数的集合.  $K_m = \{v_1, v_2, f_1, f_2, e_1, e_2, e_3, e_4\}$ ,  $S_{j,k,m}$  为权值. 小波分解时, 第  $j$  层顶点  $m$  处的小波系数  $y_{j,m}$  等于  $j+1$  层顶点  $m$  的坐标  $l_{j+1,m}$  与周围 8 个顶点  $(v_1, v_2, f_1, f_2, e_1, e_2, e_3, e_4)$  坐标的加权平均值之差. 重构时, 先对每个三角形进行一分四划分, 在每条边上引入一个新顶点, 如图 1(a)中的  $v_1, v_2, v_3$  等; 每个新顶点的坐标

为 Butterfly 模板中 8 个顶点的坐标加权平均与小波系数值之和.

小波分解:

$$\begin{cases} k \in K(j), & l_k = l_{j+1,k} \\ m \in M(j), & y_{j,m} = l_{j+1,m} - \sum_{k \in K_m} S_{j,k,m} l_k \end{cases} \quad (1)$$

小波重构:

$$\begin{cases} k \in K(j), & l_{j+1,k} = l_k \\ m \in M(j), & l_{j+1,m} = y_{j,m} + \sum_{k \in K_m} S_{j,k,m} l_k \end{cases} \quad (2)$$

## 3 感兴趣区域形状及其掩模的确定

在进行感兴趣区编码前, 必须确定感兴趣区的形状以及重构这个区域所需要的小波系数, 以便在编码时特殊处理它们. 下面描述本文感兴趣区形状和掩模的确定方法.

### 3.1 感兴趣区域形状的确定

感兴趣区域形状可以由编码端在编码前确定, 也可以由用户在解码端指定 (此时编码端在得到感兴趣区形状信息后才开始编码). 对于任意形状的三维网格, 本文采用了一个三维的矩形盒把用户的感兴趣区包围起来 (如图 8(c)所示), 并规定感兴趣区由该矩形盒内的基三角形以及它们的子三角形组成.

### 3.2 感兴趣区域掩模的确定

感兴趣区掩模是重建感兴趣区时所必需的小波系数的集合. 一般是在小波分解时, 通过检查哪些小波系数是重构感兴趣区时所需要的来确定. 例如: 若分解前原始信号样本用  $X(n)$  表示,  $L(n)$  和  $H(n)$  分别表示分解后低频子带和高频子带的采样, 则每次分解后都要检查哪些  $L(n)$  和  $H(n)$  是计算位于感兴趣区的各个  $X(n)$  所必需的尺度系数和小波系数, 这些必需的小波系数就构成了感兴趣区掩模. 对于多级的小波分解, 需要检查每层中重构感兴趣区所必需的小波系数. 各层中重构感兴趣区所必需的小波系数的总和就构成了感兴趣区的掩模.

在小波分解时, 如果对感兴趣区的每个顶点都要检查重构该顶点所需的小波系数, 将使算法非常繁琐, 增加计算复杂度. 本文提出了一种三维网格感兴趣区掩模的快速建立方法.

假设图 2(a) 是第  $j$  层网格的三角形, 中间的白色区域为感兴趣区. 重构时, 首先采用一分四划分法将图 2(a) 中每个基三角形划分为四个子三角形. 感兴趣区中的大多数顶点在重构时所需要的小波系数都位于该区域内, 只有重构边界三角形上的点时才需要区域外的小波系数. 例如, 重构边界点  $m_1$  时需用其 Butterfly 模板中 8 个顶点的小波系数 (如图 2(a) 中的  $v_1, v_2, f_1, f_2, e_1, e_2, e_3, e_4$ ). 在这些小波系数中, 一部分位于感兴趣区内部或边界 (如图 2(a) 白色区域中  $v_1, v_2, f_1, e_1, e_2$ ), 另一部分则位于感兴趣区外部靠近感兴趣区的第  $j$  层三角形中 (如图 2(a) 深灰色区域

中,  $f_j, e_j, e_4$ ). 图 2(b) 显示了第  $j+1$  层网格继续重构为第  $j+2$  层网格的示意图, 其中浅灰色区域中是重构边界所需的小波系数. 与图 2(a) 中边界点  $m_1$  一样, 重构图 2(b) 中边界点  $m_2$  也需用其 Butterfly 模板中 8 个顶点的小波系数 (图中未标出), 但所需的小波系数分布在感兴趣区周围更上一层三角形范围内 (即图 2(a) 深灰色区域中三角形经过一分四划分后与感兴趣区相邻的子三角形中). 图 2(c) 则显示了重构时所需的第  $j$  层和  $j+1$  层的小波系数的总和, 即白色区域、浅灰色区域和深灰色区域的叠加. 不难发现, 重构感兴趣区内部顶点所需的小波系数仍位于感兴趣区内部, 而重构边界上顶点所需的小波系数一部分位于感兴趣区内部或边界, 另一部分位于感兴趣区域外与其相邻的三角形中. 一分四划分的级数越高, 重构边界上新顶点所需小波系数的分布就越靠近感兴趣区.

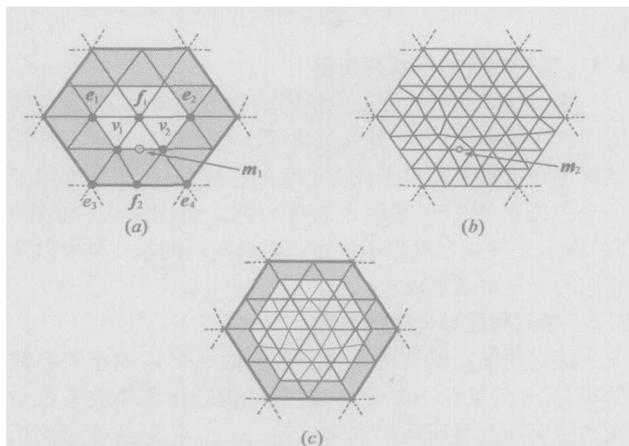


图2 建立感兴趣区域掩模的方法. (a) 重构第  $j+1$  层感兴趣区域所需的第  $j$  层小波系数; (b) 重构第  $j+2$  层感兴趣区域所需的第  $j+1$  层小波系数; (c) 重构第  $j+2$  层感兴趣区域所需的第  $j$  层和第  $j+1$  层小波系数的总和

综上所述, 当感兴趣区的形状确定后, 应首先找出感兴趣区内部和边界上的所有小波系数, 然后确定感兴趣区各个相邻基三角形中靠近感兴趣区的那些子三角形, 找出位于这些子三角形内部和边界上的所有小波系数, 两者之和就是感兴趣区掩模, 从而可以快速确定感兴趣区掩模.

## 4 感兴趣区域编码方案

### 4.1 三维网格感兴趣区域优先编码策略

量化后的小波系数经过位平面编码可以实现渐进编码, 但还没达到感兴趣区优先编码的目的. 本文实现三维网格感兴趣区编码的方法是把感兴趣区掩模中的小波系数三个分量分别上移若干位平面, 与没有上移的非感兴趣区小波系数组成新的位平面, 最后采用位平面编码方法对感兴趣区和非感兴趣区统一编码, 使感兴趣区信息位于码流的前面, 达到优先编码的目的.

本文提出两种优先编码策略, 即部分上移位平面方法 (图 3(b)) 和最大上移位平面方法 (图 3(c)). 如果用户对感兴趣区重构质量要求较高, 可采用最大上移位平面的方

法, 即完成感兴趣区位平面编码后, 才开始对非感兴趣区位平面进行编码. 如果对感兴趣区重构质量的要求一般, 则可采用部分上移位平面方法, 其上移位平面数不同, 感兴趣区重构质量的级别也不同.

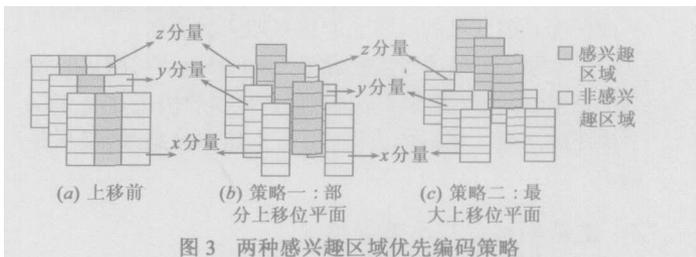


图3 两种感兴趣区域优先编码策略

对于部分上移位平面的方法, 由于感兴趣区和非感兴趣区的部分位平面有重叠现象, 对位平面进行编码将使感兴趣区和非感兴趣区的数据混淆, 所以需要在解码端建立与编码端一样的掩模来区分感兴趣区和非感兴趣区的数据. 而对于最大上移位平面方法则可以采用以下方法来区分小波系数: 假设所有感兴趣区的小波系数在上移  $S$  个位平面后都大于某个值  $X$ , 而非感兴趣区的小波系数值都小于  $X$  值, 解码端把解码出的小波系数值与  $X$  进行比较, 就可以确定该小波系数是否属于感兴趣区.

### 4.2 零树编码

上移感兴趣区的位平面后, 本文采用零树编码的方法进行位平面编码. 零树编码方法可以有效利用子带间的自相似性和衰减性, 取得很高的压缩效率. 对三角形网格而言, 小波系数是定义在边上的, 顶点之间并不能形成零树结构. 本文采用了 FGC 方法<sup>[2]</sup>的零树构造方案, 把小波系数按照边构成的零树结构组织起来 (图 4), 即将基网格中两个相邻三角形公共边上的小波系数作为零树的根节点, 并将一分四划分生成的子三角形中相同方向的四条边上的小波系数作为四个子节点, 依此类推.

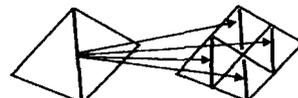


图4 三维网格小波系数的零树结构

小波系数组织成零树结构后, 可以利用修改的 SPHT 算法来进行位平面编码. 原 SPHT 算法是一种针对图像的零树编码算法, 其关键是当扫描并输出零树结构各节点的值时, 如果零树中有值为“1”的节点, 就将一棵大零树分裂为四棵小零树, 直到零树中节点值都为“0”为止, 并用一个“0”表示整个零树中所有节点的值, 从而达到压缩的目的. 本文算法与原始 SPHT 算法的不同之处主要有: 本文处理的是矢量的小波系数, 需要对三个分量独立进行零树编码, 并使各分量的位流交错传输, 保持位流的渐进性; 原 SPHT 算法对 LL 子带与各级小波系数同时进行编码, 而在网格的情形中, 小波零树的根不像图像那样位于 LL 子带 (即基网格), 因此本文算法对基网格采用非渐进方法单独进行编码.

### 4.3 三维网格感兴趣区域编码模型

根据 4.1 节提出的两种感兴趣区优先编码策略, 并针对对感兴趣区可以由编码端或者解码端确定的两种情况, 本文提出以下四种三维网格的感兴趣区编码模型:

模型 1: 感兴趣区由编码端确定, 并且采用最大上移位平面策略. 编码时, 首先把原始网格重新网格化为半正规网格, 并利用小波变换得到基网格和几个小波子带; 然后用非渐进方法对基网格进行压缩, 放在位流的前面; 确定感兴趣区及其掩模后, 最大上移掩模中小波系数的位平面并确定阈值 X, 然后采用上述修改的 SPHT 算法对小波系数各分量进行位平面编码. 为了进一步提高压缩比, 本文最后对整个位流进行算术编码<sup>[10]</sup>. 解码过程与编码相反, 但不必在解码端建立感兴趣区掩模, 只需把解码出的小波系数数值与 X 进行比较, 就可以判断是否属于感兴趣区. 模型 1 的编、解码过程如图 5、6 所示.

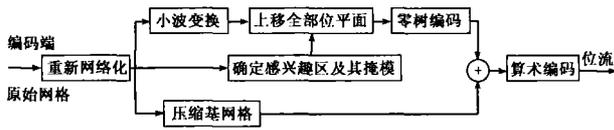


图 5 模型 1 的编码流程图

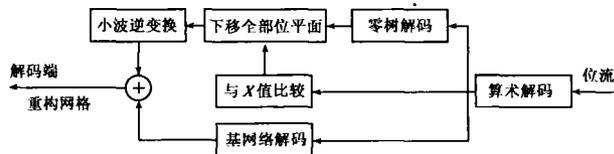


图 6 模型 1 的解码流程图

模型 2 感兴趣区由编码端确定, 并且采用部分上移位平面策略. 模型 2 与模型 1 的编码过程大致相似, 主要区别在于, 模型 2 中部分感兴趣区和非感兴趣区的位平面编码数据混合在一起, 解码端需要建立感兴趣区掩模来区分小波系数.

模型 3 感兴趣区由解码端确定, 并且采用最大上移位平面策略. 编码时, 首先把原始网格重新网格化为半正规网格并进行小波变换, 然后用非渐进压缩方法对基网格进行压缩, 并传输给解码端, 同时等待解码端传回感兴趣区形状信息; 解码端接收到基网格后, 可以由用户确定感兴趣区, 然后把感兴趣区形状信息传送给编码端; 编码端接收到感兴趣区形状信息后开始进行编码, 此后过程与模型 1 类似. 模型 3 的编、解码过程如图 7 所示.

模型 4 感兴趣区由解码端确定, 并且部分上移感兴趣区位平面. 模型 4 与模型 3 相似, 区别在于模型 4 需要在解码端

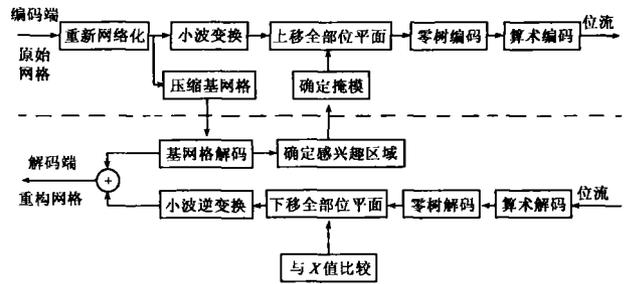


图 7 模型 3 的编、解码流程图

建立感兴趣区掩模.

## 5 实验结果及讨论

为了验证本文方法的有效性, 我们分别对两种三维网格优先编码策略进行了实验, 并与没有实现感兴趣区编码的通常渐进编码方法进行了比较. 本文对各个三维网格进行了 5 级 Butterfly 小波分解, 并对小波系数进行了 12 位标量化.

### 5.1 采用不同的感兴趣区域优先编码策略的实验

实验数据的 Venus 模型如图 8(a) 所示, 顶点数为 134345 个. 重新网格化后的模型如图 8(b) 所示, 顶点数为 198658 个. 感兴趣区如图 8(c) 中矩形盒所示. 对感兴趣区掩模中小波系数分别上移 4 个、8 个、12 个位平面, 其中上移 4 个和 8 个位平面都属于优先策略一, 上移 12 个位平面属于优先策略二. 表 1 显示了在两种优先策略下, 感兴趣区的不同质量解码所需的位率, 其中  $bpv$  (bits per vertex) 表示每个顶点所需的比特数, S 表示上移的位平面数.

从表 1 的各行可以看出, 解码出相同质量的感兴趣区时, 本文方法需要的位率比一般渐进解码要少得多. 比如, 当将感兴趣区全部解码出来时 (解码出全部 12 个位平面), 采用部分上移位平面 (上移 4 个位平面时) 方法所需的位率为 7.15bpv, 最大上移位平面方法需 3.08bpv 而一般渐进解码则需 11.28bpv. 从表 1 还可以看出, 感兴趣区上移的位平面数越多, 解码出同样质量的感兴趣区所需的位率越少. 以 16 个位平面解码为例, 上移 4 个位平面时需 11.85bpv, 上移 8 个位平面时需 5.15bpv, 上移 12 个位平面时则只需 3.2bpv. 这是因为上移的位平面数越多, 则位流前部更多的数据是感兴趣区的编码数据.

表 1 Venus 模型两种感兴趣区域优先编码策略的比较

| 解码位平面数    | 优先策略<br>位率 (bpv) |                  | 模型 2 与模型 4        | 模型 1 与模型 3        | 一般渐进编码 |
|-----------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------|
|           | 部分上移位平面<br>(S=4) | 部分上移位平面<br>(S=8) | 部分上移位平面<br>(S=12) | 最大上移位平面<br>(S=12) | 不上移位平面 |
| 4 个位平面解码  | 0.02             | 0.02             | 0.02              | 0.02              | 0.08   |
| 8 个位平面解码  | 0.56             | 0.52             | 0.52              | 0.52              | 2.09   |
| 12 个位平面解码 | 7.15             | 3.11             | 3.11              | 3.08              | 11.28  |
| 16 个位平面解码 | 11.85            | 5.15             | 5.15              | 3.2               | —      |
| 20 个位平面解码 | —                | 12.42            | 12.42             | 9.18              | —      |
| 24 个位平面解码 | —                | —                | —                 | 12.5              | —      |

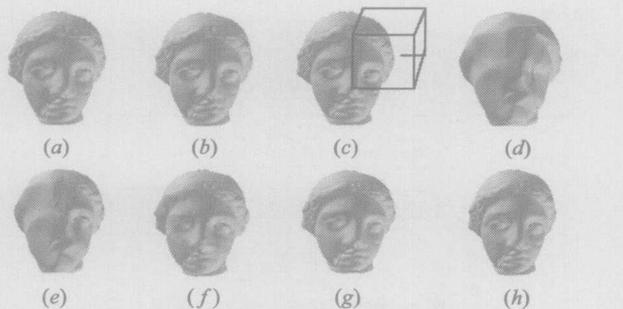


图8 Venus模型采用部分上移位平面的渐进解码结果。(a)原始网格;(b)重新网格化后生成的半正规网格;(c)采用矩形盒指定感兴趣区域;(d)4个位平面解码;(e)8个位平面解码;(f)12个位平面解码;(g)16个位平面解码;(h)20个位平面解码

图8(d)~(h)显示了Venus模型采用感兴趣区部分上移位平面( $S=8$ )时的渐进解码过程,和不同位平面数解码时的效果。从图8可以明显看出,前几个位平面解码时,感兴趣区的质量比其他区域明显要高,随着数据的陆续到达,非感兴趣区的质量也逐渐提高,直到最后所有的位平面全部解码。图9显示了采用部分上移位平面方法时Horse网格和Rabbit网格的解码效果,其中指定Horse和Rabbit的头部为感兴趣区,并上移8个位平面。

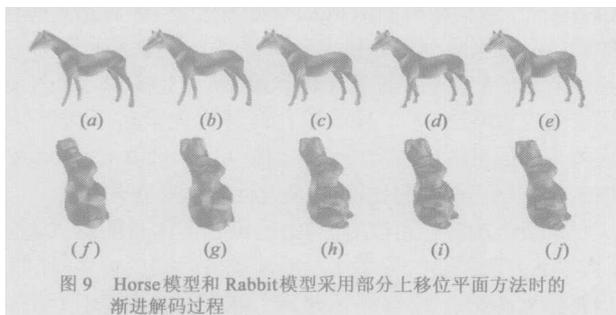


图9 Horse模型和Rabbit模型采用部分上移位平面方法时的渐进解码过程

## 5.2 感兴趣区域编码对全局信噪比的影响及其分析

图10是Venus、Horse、Rabbit三个网格模型进行感兴趣区编码后的峰值信噪比(PSNR)曲线图,各曲线分别对

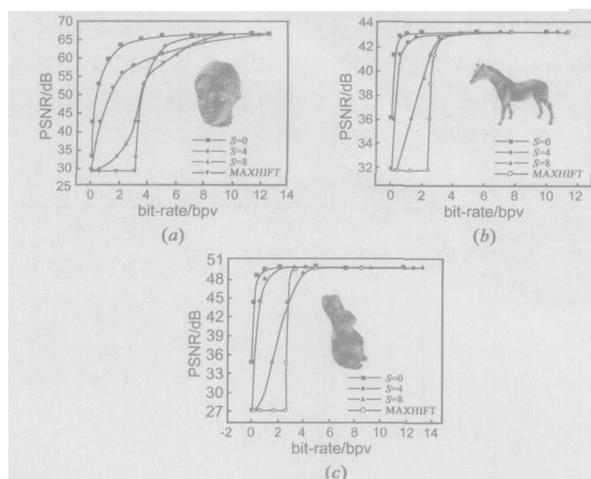


图10 三维网格感兴趣区域编码的率失真曲线图

应于将感兴趣区的小波系数上移不同的位平面数( $S=4, 8, 12$ )以及不进行位平面上移( $S=0$ 即一般渐进编码),其中 $PSNR = 20 \lg_0(\text{peak}/d)$ , peak是网格包围盒的对角线长度,  $d$ 是重构网格的失真,用Metro<sup>[11]</sup>工具测量。从图10可以看出,各PSNR曲线在低位率时比较平坦,且感兴趣区编码的失真比一般渐进编码大。这是因为在低码率时,解码端接收的是感兴趣区的数据,而感兴趣区只占整个网格的一小部分,对减少整个网格的失真贡献不大。实验还表明,三维网格感兴趣区编码后的位流总大小比一般渐进编码的要大一些。这是因为感兴趣区上移若干位平面以后,增加了实际需要编码的位平面数。所以,三维网格的感兴趣区编码是以增加总的位流大小以及牺牲低码率下的全局信噪比为代价的。

## 6 结论

本文基于网格小波变换和修改的SPHT位平面编码算法,实现了三维网格的感兴趣区编码。提出了两种三维网格的感兴趣区优先编码策略:部分上移位平面和最大上移位平面。根据这两种优先策略,以及感兴趣区是由编码端还是解码端确定,设计了四种三维网格的感兴趣区编码模型。本文还提出了一种建立感兴趣区掩模的快速方法,简化了掩模的建立过程。实验结果表明,本文方法可以有效实现低位率时感兴趣区重构质量比非感兴趣区高的要求,从而节约网络带宽和存储空间。

## 参考文献:

- [1] Taubin G, Rossignac J. 3D geometry compression [Z]. Proceedings of ACM SIGGRAPH 99 Course Notes 21, 1999.
- [2] Khodakovskiy A, Schroder P, Sweldens W. Progressive geometry compression [A]. Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000 [C]. New York NY: Association for Computing Machinery, 2000: 271-278.
- [3] 刘波. 三维网格压缩 [D]. 北京: 北京工业大学计算机学院, 2004.
- [4] ISO/IEC FCD 15444-1: 2000. JPEG 2000 [S].
- [5] 卓力, 沈兰荪, Lam Kin man. 基于感兴趣区的图像编码与渐进传输 [J]. 电子学报, 2004, 32(3): 411-415. Zhuo Li, Shen Lan-sun, Lam Kin man. Region of Interest based image coding and progressive Transmission [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(3): 411-415 (in Chinese).
- [6] Lee A W F, Sweldens W, Schroder P, et al. MAPS: Multiresolution adaptive parameterization of surfaces [A]. Proceedings of SIGGRAPH 98 [C]. New York NY: Association for Computing Machinery, 1998: 95-104.
- [7] Eck M, DeRose T, Duchamp T, et al. Multiresolution ar

- analysis of arbitrary meshes[ A ]. Proceedings of ACM SIGGRAPH 1995[ C]. New York, NY: Association for Computing Machinery, 1995. 173- 182.
- [ 8 ] Schröder P, Sweldens W. Spherical wavelets efficiently representing functions on the sphere[ A ]. Proceedings of SIGGRAPH 95[ C]. New York, NY: Association for Computing Machinery, 1995. 161- 172.
- [ 9 ] Said A, Pearlman W A. A new, fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical Trees[ J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6( 3): 243- 250.
- [ 10 ] Witten IH, Neal R M, Cleary J G. Arithmetic coding for data compression[ J]. Comm ACM, 1987, 30( 6): 520- 540.
- [ 11 ] Cignoni P, Montani C, Rocchini D, et al. Metro measuring error on simplified surface[ J]. Computer Graphics Forum, 1998, 17(2): 167- 174.

## 作者简介:



郑红娟 女, 1974年生于四川省达州市。2005年北京工业大学硕士研究生毕业。研究方向为模式识别与图像处理、计算机图形学。

E-mail hongjianzhen@hotmail.com

刘波 男, 1975年生于湖南。2004年毕业于北京工业大学计算机学院, 获博士学位。现在北京工业大学计算机学院从事教学与科研工作, 主要研究方向为计算机图形学、多媒体数据压缩。

张鸿宾 男, 1944年生于河北。教授, 博士生导师。1968年清华大学自动控制系毕业, 1981年清华大学模式识别与智能控制专业研究生毕业, 1986~ 1989年日本京都大学, 1993~ 1994年美国 RPI高级访问学者。目前主要从事模式识别、图像处理与计算机视觉、人工神经网络、计算机图形学以及信息隐藏和数字水印等方面的研究工作。