

基于表面粗糙度的三维模型质量评价研究

杨斌¹ 李晓强¹ 李伟² 丁广太¹

(上海大学计算机工程与科学学院 上海 200072)¹ (复旦大学计算机科学技术学院 上海 200433)²

摘要 数字水印的嵌入会引起三维模型数据的失真,正确评价含水印三维模型的质量可以为三维水印算法的测评提供统一标准。提出了一种新的三维模型质量的评价方法,它首先利用网格模型中二面角为基本度量单位计算出整个原始三维模型的粗糙度,然后在嵌入水印以后用同样的方法计算出含水印三维模型的粗糙度,最后得到嵌入水印前后粗糙度的增量,并将其作为水印嵌入对三维模型造成的失真度的度量。大量实验结果表明,相比传统的质量评价方法,该方法更加适用于三维网格模型。该质量评价方法还可用于评价各种水印攻击对含水印三维模型造成损害的程度。

关键词 三维模型数字水印,粗糙度,三维网格,水印算法

Quality Assessment for 3-D Model Based on Surface Roughness

YANG Bin¹ LI Xiao-qiang¹ LI Wei² DING Guang-tai¹

(School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200072, China)¹

(Department of Computer Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)²

Abstract In the process of 3-D model watermarking, embedding watermark will make distortion on the 3-D model. Assessing the quality of 3-D watermarked model correctly can behave as one of the principles of assessing 3-D watermarking scheme. In this paper, a quality assessment measure for the 3-D model was proposed. To compare with traditional quality assessment methods such as SNR ratio and Hausdorff, this method is more suitable for 3D models. First, we calculated the roughness of the mesh model with the dihedrals which is the primitive of a 3D model. Second, we calculated the roughness of the watermarked model after watermarking. Last we calculated the increment of roughness between the original mesh and the watermarked mesh in order to assess the distortion made by watermarking. Moreover, the proposed method can estimate the distortion of watermarked mesh model made by various attacks.

Keywords 3-D model digital watermarking, Roughness, 3-D mesh, Watermarking scheme

1 引言

随着计算机性能的不断提高和三维动画创作与编辑软件的飞速发展,大量三维作品不断涌现,这带来了如何保护三维作品知识产权的问题。1997年,日本学者 Ohbuchi 等^[1]在 ACM Multimedia 国际会议上发表了第一篇关于三维模型数字水印的文章,探讨了如何解决三维模型数据的版权保护问题。从此,越来越多的学者关注于三维模型数字水印的研究。然而,三维模型数字水印技术的发展远不及图像水印和音频水印那样成熟。例如:在三维模型数字水印算法的3个主要性能指标、有效负载、鲁棒性和不可见性(或不可感知性)中,有效负载以及鲁棒性都可用传统的相关方法评价,所以相对容易;而水印的不可见性评价难度最大,因为传统的失真度评价方法不适用于三维网格模型水印。到目前为止,三维模型数字水印的不可见性仍然没有一个统一的评判标准。

水印的不可感知性(水印嵌入对宿主信号造成的质量损失)评价方法主要有两种,一种是主观评价,一种是客观评价。主观评价是通过人眼视觉直接去观察嵌入前后的载体得出水印嵌入后载体的失真度,而客观评价则是通过理论分析来得

出结果。主观评价最直观准确,但是主观评价往往要花费大量的人力和财力,并且由于大量的人工介入而不能实现自动化,从而导致主观评价的实用性大大降低。传统的水印不可感知性的客观评价方法主要有信噪比和 Hausdorff 方法,但是这两种方法主要应用于图像水印或音频水印领域,对于三维模型数字水印算法对三维模型造成的质量损失并不能精确地评估,三维模型水印不可感知性评价标准仍然是一个悬而未决的问题。

在已经公开发表的三维模型数字水印算法中,主要把信噪比或者 Hausdorff 距离作为水印不可感知性的客观评价标准。文献[2]通过实验把信噪比方法和 Hausdorff 方法与主观判断相比较,发现它们与主观判断得出的结果并不一致,所以信噪比的方法和 Hausdorff 方法不适用于三维模型水印质量的评价。

Corsin 等^[2]提出一种适合三维网格模型质量评价的方法,其主要思想是利用网格模型中二面角为基本度量单位计算出整个原始三维模型的粗糙度,并根据嵌入水印前后的粗糙度的增量获得三维模型的失真程度。但是这个三维模型质量评价方法存在一些缺陷,首先它没有考虑三维网格模型拓

到稿日期:2010-03-10 返修日期:2010-05-30 本文受国家自然科学基金(60873255),上海市自然科学基金(10ZR1411700),上海市教委重点学科项目(J50103),上海大学创新基金(A. 10-0108-07-002),上海大学研究生创新基金(A. 16-0108-09-511)资助。

杨斌(1984—),男,硕士生,主要研究方向为三维模型数字水印等,E-mail: actualyang@126.com; 李晓强 男,副研究员,主要研究方向为图像处理、模式识别等; 李伟 男,副教授,主要研究方向为音频水印认证和检索等; 丁广太 男,副教授,主要研究方向为图像处理。

扑的复杂性,只简单考虑了三维网格理想的拓扑情形,即每个定点周围都被三角形完全包围,而实际的三维网格模型并非如此;其次,它没有考虑三维网格模型的变换问题,三维网格缩放后的网格粗糙度应该与缩放前是相同的,但是按照文献[2]中的方法得出的缩放前后网格的粗糙度是不同的。针对这两个问题,本文对文献[2]的三维模型质量评价方法进行改进。大量实验结果表明,本文提出的质量评价方法与主观评价有着高度的一致性。

本文第2节介绍几种典型的三维模型数字水印算法;第3节介绍本文的质量评价方法;第4节给出基于质量评价方法的实验结果和讨论;最后对全文进行总结。

2 三维模型数字水印算法简介

三维模型数字水印算法可以有多种分类方法,从嵌入域上可以分为两种:空间域和频率域。空间域的算法又分为修改顶点位置的算法和修改网格拓扑信息的算法,修改拓扑信息的算法由于对于某些攻击的鲁棒性很差逐渐被淘汰。

Ohbuchi等文献[1]中首次提出三维模型数字水印概念,并详细介绍了包括TSQ在内的几种三维网格模型数字水印算法。TSQ算法的全称为三角形相似四元组算法,其利用符合条件的4个三角形作为一个宏嵌入基元(Macro Embedding Primitive, MEP),如图1所示。一个MEP的四个三角形分别代表Marker, Subscript, Data1和Data2。Marker代表这个MEP是否嵌入了水印,Subscript代表此MEP的序号,而Data1和Data2则代表水印的内容。算法通过一个距离比组成的二元组序列 $\{a/b, h/c\}$ 记录一组相似三角形,如图1(a)所示。这两个距离比分别是两个边的长度比、高和底的比。算法就是通过修改二元组序列使三角形与给定的三角形相似来达到嵌入信息的目的。检测时首先找到Marker三角形,表明此MEP嵌入了水印,然后找到Data1和Data2获得水印内容,最后根据Subscript的内容将水印排序得到完整的水印内容。

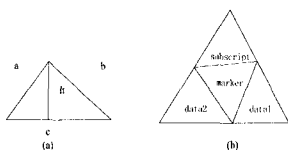


图1 TSQ算法图示

变换域的三维模型水印算法实现主要有两种途径。一种是直接对网格的几何信息进行频率域变换,然后在频率域嵌入水印信息;另外一种是多分辨率分析的方法,即利用例如小波分解这样的多分辨率分析的方法。文献[3]就是由Kanai等人提出的一种通过三维小波变换将原始网格分解为粗糙网格和一系列小波系数,然后通过修改小波系数的模嵌入水印信息,最后还要经过小波逆变换把网格从频率域转换为空间域。检测时需要原始网格的介入,对原始网格和待检测网格分别进行小波分解,然后根据小波系数的差值提取水印。

3 质量评价方法

3.1 三维模型水印的载体

三维模型主要有两种表示形式:第一种由参数曲面例如NURBS(Non Uniform Rational B-Spline, NURBS)曲面等组成,第二种由若干多边形组成的网格组成。而以三维参数曲面模型为载体的三维模型数字水印算法并不多见,文献[4,5]提出了两种以NURBS曲面为载体的三维水印算法。大部分

的水印算法还是以多边形网格模型为载体。本文的研究对象是基于三角形网格的三维模型,这种模型是由若干三角形来逼近光滑的曲面,其数据结构中主要包括两种信息,即模型的顶点坐标和模型的拓扑结构。

3.2 粗糙度的度量

粗糙度度量方法最早起源于文献[6]。此方法以三维网格模型中的二面角为计算单位。二面角是两个相邻三角形之间的夹角,如图2(a)所示。二面角本身就代表了一种粗糙度,这种粗糙度叫做二面角粗糙度:

$$\rho_d = 1 - (\vec{N}_1 \cdot \vec{N}_2) \quad (1)$$

式中, N_1 和 N_2 分别表示两个相邻三角形的法向量。 ρ_d 中的下标 d 是为了说明 ρ_d 表示的是二面角的粗糙度(d 乃是 dihedral angle 的缩写)。

然后,计算三角形粗糙度。设一个三角形 T , 它有3个顶点 v_1, v_2 和 v_3 , 那么三角形 T 的粗糙度计算如下:

$$\rho(T) = \frac{G(v_1)V(v_1) + G(v_2)V(v_2) + G(v_3)V(v_3)}{V(v_1) + V(v_2) + V(v_3)} \quad (2)$$

$G(v_i), i=1,2,3$ 是点 v_i 周围相邻面的二面角之间的均值,如 $G(v_1)$ 表示 T 与 T_1, T_1 与 T_2, T_2 与 T_3, T_3 与 T_4, T_4 与 T_5, T_5 与 T 之间的二面角的均值,而 $V(v_i), i=1,2,3$ 表示 v_i 周围相邻面二面角之间的方差,如图2(b)所示。

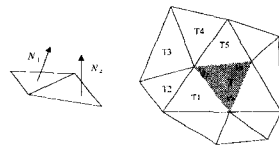


图2 二面角及其粗糙度计算

式(2)来源于文献[2],但是式(2)有局限性。图2(b)中的情况对于式(2)是属于最理想的状态,即每个点都完全被三角形包围,但是有的三维网格模型有着很多的不规则性,例如图3的三维网格拓扑情况。灰色的三角形的3个顶点的周围的二面角都只有一个,所以方差都为零,即此时式(2)的分母为0。但是此三角形周围仍存在二面角,也即存在二面角的粗糙度,所以不能忽略。这里我们对式(2)作了修改,变成式(3):

$$\rho(T) = \begin{cases} \frac{G(v_1)V(v_1) + G(v_2)V(v_2) + G(v_3)V(v_3)}{V(v_1) + V(v_2) + V(v_3)}, & \text{如果 } V(v_1) + V(v_2) + V(v_3) \neq 0 \\ \frac{G(v_1) + G(v_2) + G(v_3)}{3}, & \text{如果 } V(v_1) + V(v_2) + V(v_3) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

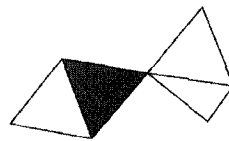


图3 一种网格的局部拓扑结构

接着,再把三角形的面积以及网格的凹凸程度考虑进去,得到三维网格模型中每个点的粗糙度^[2]:

$$\rho^N(v) = \frac{1}{|S_v^N|} \sum_{i \in S_v^N} \rho(T_i) A_{T_i} \quad (4)$$

式中, A_{T_i} 表示 T_i 的面积; S_v^N 表示顶点 v 的 N 环面的集合,如果 N 等于1就表示顶点 v 的相邻面,通过式(4)计算三维网格的凹凸程度。文献[2]中取了几个不同的 N 来计算式(4),然后取它们的最大值。但是随着 N 的值的变大,整个算法的复杂度也急剧增加。

式(4)存在的问题是,当一个嵌入水印后的三维网格模型

遭到缩放攻击以后,三维网格模型的同一个三角形的面积就会发生变化,从而导致点的粗糙度改变,但是事实上粗糙程度没有改变。为了克服这个缺点,我们对式(4)作了修改,对三角形面积进行归一化,见式(5)。另外一种情况是,不同网格模型点的坐标的尺度相差比较大,也就导致不同模型三角形的面积大小比例相差较大,通过三角形面积归一化也可以让不同模型由坐标尺度的差异产生的对粗糙度的影响降至最低。

$$\rho^N(v) = \frac{1}{|S_T^N|} \sum_{i \in S_T^N} \frac{A_{T_i}}{A_{\min}} \quad (5)$$

式中, $A_{\min}$ 表示三维网格模型中最小三角形的面积。

最后,把网格中所有顶点的粗糙度相加得到三维网格模型的粗糙度,见式(6)。其中, N_v 表示网格顶点的数目。

$$\rho(M) = \sum_{i=1}^{N_v} \rho(v_i) \quad (6)$$

3.3 粗糙度增量表示的质量失真度

此步骤是求嵌入水印前后网格的粗糙度的增量,见式(7):

$$R(M, M^*) = \log\left(\frac{\rho(M^*) - \rho(M)}{\rho(M)} + k\right) - \log(k) \quad (7)$$

式中, $\rho(M)$ 表示的是原网格模型的粗糙度,而 $\rho(M^*)$ 表示的是嵌入水印后网格模型的粗糙度。 k 是控制参数,有两个作用:一是当 $\rho(M)$ 和 $\rho(M^*)$ 很接近时可以防止 $\log$ 运算后的值趋向于 $-\infty$;二是可以通过 k 的值来调节最后 $R(M, M^*)$ 值的范围。

4 实验

本文的实验环境为 VC++ 6.0 和 Meshlab 软件,在奔腾 2.0 的机器上测试实验程序,在实验中使用众多三维模型来测试本文的评价方法,以下以 Stanford 兔子模型(见图 4)为例来分析。Bunny 模型是 Stanford 的图形学研究人员采集的三维网格模型,模型的信息由顶点和面的信息组成,它一共有 35947 个顶点和 69451 个面。以下的实验主要分为 3 个方面:本文的方法对于缩放操作的不变性、本文方法对于嵌入水印造成失真的评价和对于攻击造成失真的评价。

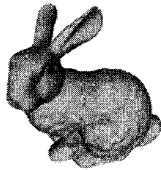


图 4 Stanford 兔子模型

(1) 本文方法的缩放不变性

从式(5)可以看出本文的方法对于缩放变换具有鲁棒性。而文献[2]中的方法不具有这一特性。表 1 中是缩放变换后本文方法与文献[2]的比较。缩放变换对于粗糙度是没有任何影响的(即粗糙度增量为 0),本文的方法正确地体现了这一点,而文献[2]中的方法却得出了错误的结果。其中缩放 A 操作时将三维网格模型缩小 1 倍,缩放 B 和缩放 C 是将三维网格模型分别增加 0.5 倍和 1 倍。

表 1 缩放操作后的粗糙度变化

缩放变换	R(本文)	R(文献[1])
缩放 A	0	10.53
缩放 B	0	9.65
缩放 C	0	10.52

(2) 对嵌入水印造成失真的评价

为测试本文所提质量评价算法的有效性,我们实现了文献[7-9]中的 3 种不同的三维网格模型数字水印算法。计算含水印三维网格模型与原三维网格模型之间的粗糙度增量,作为评价水印不可见性的标准,粗糙度增量越小说明网格的失真程度越小,从而说明嵌入水印算法的保真性能越好。

文献[9]通过把三维模型进行仿射变换以达到模型的旋转不变性和缩放不变性,然后将各顶点邻域内顶点位置的平均差值作为掩蔽因子确定水印嵌入的强度,利用此强度进行坐标的叠加来嵌入水印内容。表 2 是文献[9]中的水印算法分别用不同的强度系数嵌入水印,嵌入 500 个点,每个点的 3 个分量都包含一个水印位,所以一共嵌入 15000 位水印。 k 值取 0.00008。从实验中可以看到随着粗糙度增量越大,水印的不可见性就越差,实验中显示当 $R(M, M^*)$ 值达到 9 时,可以观察网格有明显的改动。而当 $R(M, M^*)$ 小于 3 时,人几乎不能观察到任何的改动。

表 2 文献[9]应用不同嵌入强度

强度因子	$R(M, M^*)$	对应网格模型
3	9.20	
1	6.92	
0.5	2.78	

文献[7]通过修改从中心到顶点的距离来嵌入水印信息,该算法对噪声攻击具有较强鲁棒性,但该算法为非盲检测算法。文献[8]算法与文献[7]算法有相似之处,它首先把网格上的点到网格中心的距离看成一维的空域数字信号,利用一维 DCT 把三维网格变化到频域;然后在频域信号上通过信号叠加的方式嵌入水印,再通过逆向 DCT 转回空域信号。表 3 是使用文献[7,8]中水印算法得到的结果,在这两种算法中仍然嵌入 15000 个水印位。

表 3 文献[7,8]嵌入水印

嵌入强度	$R(M, M^*)$	对应网格模型
0.00005 (文献[7])	5.66	
0.00001 (文献[8])	6.94	

从表 2 和表 3 可以看出,文献[9]中水印算法的不可见性较好,因为它虽然也是嵌入 15000 位水印,但是只修改了 500 个点,而文献[7,8]中的水印算法都修改了 15000 个点。

本文方法不仅能够评价不同水印算法对网格质量的影响方面作为一个参考标准,而且在代替人为观察判断网格质量变化上更有意义,在对三维模型嵌入水印时可根据网格模型失真程度来调整嵌入水印的强度或其它参数。使用本文提出的质量评价方法,当 $R(M, M^*)$ 为 5 以下便具有不错的水印不可见性。读者可根据具体的实验环境设定参数 k 的值,以便在水印不可感知的前提下使用最大强度嵌入水印。

(3) 攻击造成失真的评价

本文的这种方法不仅可用于前述几种场合,也可以作为判断被攻击后的网格模型受攻击的程度。表 4 是文献[9]中对嵌入强度为 0.5 的带水印的三维模型进行攻击后的质量变化的分析。

在表 4 中分别使用 4 种攻击手段——平滑、噪声、网格重构(remeshing)和剪切,可以很明显地看出三维网格模型质量的变化。其中也可看出本文评价方法准确地估计出噪声对三

(下转第 285 页)

更具有统计特性,能够平滑个别网格因噪声而导致盒子数发生的跳变,具有更多的图像信息。

本文所提出的重叠网格差分盒算法中,两个重叠的网格一定会存在其中一个网格包含这个普通差分盒两个网格间的灰度跳变信息,因此它能很好地解决普通 DBC 差分盒模型中网格间灰度跳跃无法反映在分形维数中的问题,其计算出的分形维数也将更符合图像纹理。

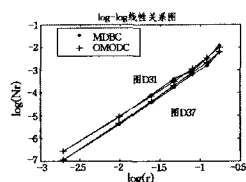


图 6 拟合的线性关系

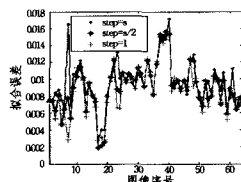


图 7 重叠网格跨度对拟合性的影响

结束语 差分盒方法计算分形维数在很多方面有着广泛的应用,特别是在图像纹理特征提取方面,取得了很大进展。本文提出的基于统计自相似的网格重叠差分盒方法,用不同的尺度去度量纹理图像分形维数,能取得比较好的拟合性,其拟合距离误差非常小,相比于传统的差分盒估计分形维数性能有了更多的改进,并且提出了非整数表达盒子数和测量尺度整数化,进一步提高了差分盒中盒子数的计算精度,测量出的图像分形维数介于 2 和 3 之间,更符合图像维数的实际意义。

参考文献

- [1] Keller J M, Chen S S, Crowner R M. Texture Description and Segmentation through Fractal Geometry[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1987, 2(45): 150-166
- [2] Peleg S, Naor J, Hartley R. Multiple Resolution Texture Analysis and Classification[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1984, 6: 518-523
- [3] Chaudhuri B B, Sarkar N, Kundu P. Improved Fractal Geometry

Based Texture Segmentation Technique [C] // Proceedings of Computers and Digital Techniques, 1993, 140: 233-241

- [4] Penland A P. Fractal-based description of natural scenes [J]. IEEE Trans PAM I, PAM I, 1986, 6(6): 661-674
- [5] Fortin C, et al. Fractal dimension in the analysis of medical images[J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology, 1992, 6: 173-181
- [6] 刘明芹, 张晓光. 差分盒维法在焊缝边缘检测上的应用研究[J]. 河北工业科技, 2009, 26(5): 300-302
- [7] 杨词银, 许枫. 一种抗噪分形维计算方法及其在声纳图像识别中的应用[J]. 应用声学, 2008, 27(2): 95-101
- [8] 陈廷, 张维龙. 分形维数在原棉纤维图像处理中的应用[J]. 测试技术学报, 2009, 23(3): 248-252
- [9] 孙晓妍, 董槐林. 遥感图像中船只目标区域的分割方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(10): 196-198
- [10] 张小京, 孙万蓉. 基于分形维数的白细胞图像特征提取研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(4): 941-943
- [11] Yu L, Zhang D, Wang K, et al. Coarse iris classification using box-counting to estimate fractal dimensions[J]. Pattern Recognition, 2005, 38: 1791-1798
- [12] 张涛, 孙林, 黄爱民. 图像分形维数的差分盒方法的改进研究[J]. 光电与控制, 2007, 14(5): 55-57
- [13] 刘松涛. 用盒子维评估红外烟幕对舰船目标的遮蔽效果[J]. 光电工程, 2009, 36(2): 35-38
- [14] 刘明芹, 张晓光. 一种计算图像分形维数的有效方法[J]. 西安科技大学学报, 2009, 29(3): 369-372
- [15] Jiang L, Du Q. An improved box-counting method for image fractal dimension estimation[J]. Pattern Recognition, 2009, 42: 2460-2469
- [16] Sarkar N, Chaudhuri B B. An efficient approach to estimation fractal dimension of textural images[J]. Pattern Recognition, 1992, 25(9): 1035-1041
- [17] Sarkar B B, Chaudhuri B B. An efficient differential box-counting approach to compute fractal dimension of image[J]. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, 1994, SMC-24 (1): 115-120

(上接第 278 页)

维模型质量的影响:随着噪声强度的增强三维模型的失真也随之变大,这可以用于在多个受噪声攻击的模型中判断哪个模型受过较少的攻击,从而可以采集到最有利用价值的三维网格模型。

表 4 网格攻击后的质量变化

攻击方法	顶点数	面个数	$R(M_0, M_0')$
Smoothing	35945	69451	10.13
Noise Addition(0.5)	35945	69451	6.31
Noise Addition(1.0)	35945	69451	9.20
Noise Addition(1.5)	35945	69451	9.65
Noise Addition(2.0)	35945	69451	10.81
Remeshing	36471	70489	11.30
Cropping	34370	66240	7.30

结束语 本文主要介绍了一种新的三维网格模型数字水印失真度的客观评价方法——基于网格粗糙度的评价方法,此方法是对文献[2]中的粗糙度计算方法的改进,消除了文献[2]中可能出现的几种严重问题。这种客观评价方法有别于传统的信噪比和 Hausdorff 距离的评价方法,它与主观评价方法有着高度的一致性。在实验中,我们使用本文提出的质量评价算法对几种典型的三维模式水印算法的性能进行评价,结果表明,本文方法可用于对网格失真程度的评价,对水印算法中嵌入强度的选择有指导作用,并可评估被攻击网格模型受攻击的程度。

参考文献

- [1] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models[A] // Proceedings of the fifth ACM international conference on multimedia[C]. Seattle, Washington, United States, 1997: 261-272
- [2] Corsini M, Gelasca E D. Watermarked 3-D Mesh Quality Assessment[J]. IEEE Transaction on Multimedia, 2007, 9(2): 247-256
- [3] Kanai S, Date H, Kishinami T. Digital watermarking for 3D polygons using multiresolution wavelet decomposition [A] // Proceedings of International Workshop on Geometric Modeling[C]. Tokyo, Japan, 1998: 296-307
- [4] Funk W. Reversible Watermarking of NURBS-Based CAD Models[A] // 9th International Workshop on Information Hiding [C]. Alexandria, United States of America, 2007: 172-187
- [5] 刘旺, 孙圣和. 基于三维 DCT 变换的 NURBS 模型鲁棒数字水印嵌入算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2005, 19(6): 1-5
- [6] Wu Jian-hua, Hu Shi-min, Sun Jia-guang, et al. An effective feature-preserving mesh simplification scheme based on face contraction[A] // Ninth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications [C]. Tokyo, Japan, 2001: 12-21
- [7] 喻志强, 叶豪盛, 赵荣椿, 等. 稳健的三角形网格数字水印技术[J]. 计算机应用, 2002, 22(9): 94-96
- [8] 张静, 郑国勋. 基于几何特征的三维网格数字水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(4): 740-747
- [9] 胡敏, 谢颖, 许良凤, 等. 基于几何特征的自适应三维模型数字水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(3): 390-394