

一种基于局部坐标系的3维模型盲水印算法

孙树森¹⁾ 潘志庚¹⁾ 张明敏¹⁾ 叶绿²⁾

¹⁾(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027) ²⁾(浙江科技学院计算机与电子工程学系, 杭州 310023)

摘要 3维模型数字水印是目前数字水印研究的热点之一,鲁棒性和盲检测是3维模型数字水印的难点所在。为了增强3维模型数字水印的鲁棒性、实现盲检测并使检测结果具有可读性,提出了一种基于局部坐标系的3维模型数字水印算法,算法把可读的字符串作为水印信息,通过改变三角网格顶点在其一环邻居所确定的局部坐标系中的位置实现水印的嵌入。该算法在检测水印时,不需要原始模型,而且可以抵抗平移、旋转、缩放、剪切和顶点乱序等攻击。实验结果表明,水印算法具有很好的鲁棒性和不可感知性。

关键词 数字水印 3维模型 三角网格 版权保护

中图法分类号: TP309 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2007)02-0288-06

A Blind 3D Model Watermarking Algorithm Based on Local Coordinate System

SUN Shu-sen¹⁾, PAN Zhi-geng¹⁾, ZHANG Ming-min¹⁾, YE Lu²⁾

¹⁾(State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

²⁾(Department of Computer and Electronics Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023)

Abstract Watermarking of 3D models is one of hot research topics in the field of watermarking. The difficulties for 3D model watermarking are robustness and blind detection. To achieve robustness, implement blind detection and make the detection result unambiguous, this paper proposes a new blind 3D model watermarking algorithm for triangular meshes. The scheme embeds the watermark, which is readable character string rather than meaningless pseudo-sequence, by modifying the location of vertices in their local coordinate system. The original model is not required for detecting watermarks. Experimental results show that the algorithm has good visual quality and is resilient against attacks such as translation, rotation, scaling, model cropping and vertex permutation.

Keywords digital watermarking, 3D model, triangular mesh, copyright protection

1 引言

近年来,作为版权保护的有效技术手段,数字水印技术成了多媒体领域的一个研究热点,但大部分水印研究工作集中在音频、图像和视频上,而对3维模型水印的研究较少^[1,2]。根据检测水印时是否需要原始模型,3维模型水印可分为盲水印与非盲水印,后者在检测水印时需要原始网格,而前者则不需要,无疑盲水印有着更大的实际应用价值。另外,水

印的内容和检测结果的表示也十分重要,检测时只给出模型是否含有水印的算法,通常嵌入的是伪随机序列,信息量相当于1比特二进制信息(0或1),这类水印只含有1bit的信息量,所以称为可检水印;而可读水印嵌入的是人们能直接识别的图像或字符,检测结果以图像或字符的形式给出。显然,可读水印比可检水印更实用。

与图像水印、音频水印和视频水印相比,3维模型水印存在以下难点:首先,3维模型没有统一的表示方法。典型的有体素表示法、CSC树表示法和边

基金项目:国家自然科学基金项目(60473111);浙江省自然科学基金项目(M603178)

收稿日期:2005-03-09;改回日期:2005-11-14

第一作者简介:孙树森(1974~),男,讲师。2006年获浙江大学计算机科学与技术专业博士学位。主要研究方向为多媒体信息处理和信息安全。E-mail: sss@cad.zju.edu.cn

界表示法。其中边界表示法又有隐函数曲面、样条曲面、细分曲面、多边形网格和点几何表示等。这些表示方法之间的转换,往往会造成信息的损失。本文仅对三角网格模型进行研究。

其次,3 维模型的顶点是不规则采样,没有自然的排列顺序,这使得向 3 维模型嵌入可读水印并实现盲检测颇具挑战性。向图像、音频和视频嵌入水印时,可通过改变采样值(像素的灰度、RGB 值)嵌入水印,同时保持采样点的位置(行、列、时间顺序)不变;然而在不考虑模型的外观属性的情况下,3 维模型不存在采样值,只能通过改变采样点的位置嵌入水印,所以盲检测时的同步非常困难,这也是多数 3 维模型水印采用非盲检测的原因之一^[2]。

再者,3 维模型的处理和攻击方式复杂多变。平移、旋转、顶点重排序、均匀缩放、无损压缩等对模型的形状和视觉效果没有任何改变,但对检测水印时的同步影响较大;重新网格化、网格平滑、有损压缩、重采样、噪声、局部变形、整体变形、网格简化、仿射变换、投影变换、非均匀缩放、剪切等进一步加大了 3 维模型鲁棒水印的设计难度。

1997 年,Ohbuchi 第 1 次提出了 3 维模型水印的概念,并提出了三角形相似四元组、四面体体积比等算法^[3,4]。Benedens 通过改变 3 维模型的法线方向来嵌入水印信息^[5-8]。Yeung 提出了一种脆弱的 3 维模型水印算法^[9]。Praun 等人提出的基于插值基函数的扩频水印算法具有很好的鲁棒性,但检测水印时需要原始网格^[10]。喻志强把水印信息分布到置乱的顶点中实现了一种非盲的可检水印^[11]。尹康康用 Guskov 松弛迭代算子对 3 维模型进行多分辨率分解后再嵌入水印的方法也是非盲的^[12]。Mao 通过向模型中插入新的顶点来嵌入水印的方法^[13]和 Sun 提出的抗几何变换的 3 维模型水印算法^[14]虽然是盲检测,但鲁棒性较差。

1998 年,Kanai 提出了一种利用小波变换的三角网格变换域非盲水印算法^[15]。2001 年 Ohbuchi 提出了一种基于网格伪频谱分析的变换域 3 维模型非盲水印算法^[16]。李黎等人提出的基于球面参数化的三角网格数字水印算法,检测水印时也需要原始模型^[17]。Uccheddu 改进了 Kanai 的算法,实现了盲检测,但不是可读水印,且只适用于半规则网格^[18]。

本文提出的 3 维模型数字水印算法,兼顾了水印的鲁棒性和实用性,属可读水印,实现了盲检测,且达到了较好的鲁棒性,能够抵抗平移、旋转、均匀

缩放、顶点乱序、多边形乱序及剪切等攻击。

2 算法的基本原理

对于 3 维模型,可以选择几何信息、拓扑信息或者属性信息来嵌入水印。由于属性信息容易被替换和去除,通常不用来嵌入水印。本文利用几何信息来嵌入水印,一个顶点及其一环邻居作为一个嵌入基元,图 1 为顶点 v_0 及其一环邻居组成的一个嵌入基元。

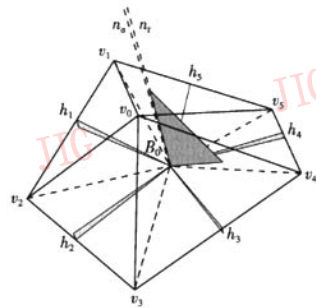


图 1 嵌入基元及其局部坐标系

Fig. 1 Embedding primitive and the local coordinate system

如果不考虑属性信息,三角网格模型 M 可以表示为 $M = \{V_M, K_M\}$, 其中 $V_M = \{0, 1, 2, \dots, |M| - 1\}$ 是 M 的顶点集合, $|M|$ 表示顶点的数目, K_M 是 M 的所有拓扑连接关系的集合, K_M 的元素分为 3 种类型:顶点 $v = \{i\}$, 边 $e = \{i, j\}$, 面 $f = \{i, j, k\}$ 。如果边 $\{i, j\} \in K_M$, 则顶点 $\{i\}$ 和 $\{j\}$ 互称邻居;顶点 $\{i\}$ 的一环邻居定义为 $N(i) = \{j \mid \{i, j\} \in K_M\}$;顶点的度定义为 $N(i)$ 的元素个数 $N(i)$;共享顶点 $\{i\}$ 的三角形的集合记为 $T(i) = \{f \mid i \in f, f \in K_M\}$ 。

为了建立顶点 v_0 的局部坐标系,首先要计算其一环邻居 $N(v_0)$ 的质心

$$B = \frac{1}{|N(v_0)|} \sum N(v_0) \tag{1}$$

接下来,把质心 B 与顶点 v_0 的一环邻居 $N(v_0)$ 的每个顶点分别相连,得到 $|N(v_0)|$ 个三角形,记为 $T(B)$ 。根据这些三角形,用下面两种方法计算质心 B 的法向量。

(1) 直接计算 $T(B)$ 中各三角形的法向量 n_i 的平均值,得到质心 B 的法向量 n_i 。

$$n_i = \text{normolize} \left(\frac{1}{|N(v_0)|} \sum n_i \right) \tag{2}$$

(2) 根据 $T(B)$ 中各三角形的法向量 n_i 及面积

A_i 来计算质心 B 的法向量 n_a 。

$$n_a = \text{normolize} \left(\frac{1}{\sum A_i} \sum n_i A_i \right) \quad (3)$$

利用两种方法计算得到的质心 B 的法向量 n_i 和 n_a ，一般是不相同的，如果相同，则此顶点不嵌入水印信息。法向量 n_a 和质心 B 可以确定一个平面 ψ ，在平面 ψ 上，以质心 B 为极坐标的极点；以 n_i 在平面 ψ 上的投影为极轴；根据平面 ψ 的正方向 n_a ，可以确定极角的方向，这样就得到了一个局部坐标系。顶点 v_0 在平面 ψ 上的投影的极坐标记为 $v_0^p(r_p, \theta_p)$ ，通过改变顶点 v_0 的投影在局部极坐标系中的坐标来嵌入水印，极角、半径分别用来嵌入水印序列的索引和二进制数值。

有了极轴，确定了极角的正方向，则在圆周方向有了参考位置。要实现盲检测，还需要有参考半径 r_0 。如图 1 所示， $T(B)$ 中的每个三角形与质心 B 相对的边的高为 $h_i (i = 1, \dots, |N(v_0)|)$ ，参考半径根据 h_i 在平面 ψ 上的投影 h'_i 的最小值来确定。

$$r_0 = \alpha \min(h'_i) \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, |N(v_0)|, \alpha \in (0, 1.0)$$

然后，在平面 ψ 上，以 B 为圆心， r_0 为半径做圆，沿圆周和半径方向分别等分 m 和 n (这里 $m = 36, n = 3$) 份，如图 2 所示。对于投影坐标为 (r_p, θ_p) 的顶点 v_0 ，可以嵌入 1bit 水印信息。

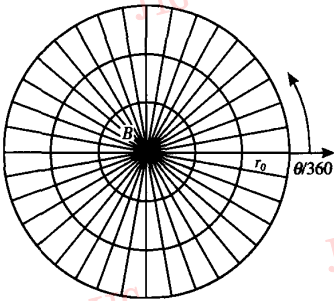


图 2 半径、圆周等分示意图 ($m = 36, n = 3$)

Fig. 2 Iso-partitions in radius and circumference directions

嵌入水印序列 w 的第 i 比特 $w(i)$ 的方法是：

$$\begin{cases} r'_p = \beta r_0 \\ \theta'_p = \begin{cases} \theta_p & \text{不嵌入水印} \\ \frac{360}{m}(i + 0.5) & \text{嵌入水印} \end{cases} \\ \beta = \begin{cases} 1/6 & \text{不嵌入水印} \\ 1/2 & w(i) = 0 \\ 5/6 & w(i) = 1 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

根据 v_0 到平面 ψ 的距离和新的投影坐标，可以计算出顶点 v_0 嵌入水印后的位置 v_1 ，如图 3 所示。在嵌入水印时，参考半径 r_0 、极角的起始位置及正方向没有改变，所以可根据式 (5) 进行水印检测。

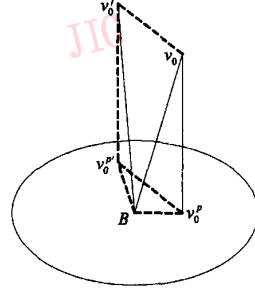


图 3 嵌入水印前后顶点位置改变示意图

Fig. 3 Positions of vertices before and after embedding

3 水印的嵌入和检测

3.1 水印的嵌入

在向一个嵌入基元嵌入水印的基础上，向 3 维模型嵌入水印信息时，还需要考虑：哪些顶点适合嵌入水印，嵌入水印后模型的视觉效果如何。具体的水印的嵌入过程如下：

(1) 计算每个顶点对应的法向量 n_{ii}, n_{ai}

首先必须根据模型的拓扑结构，找出每个顶点的一环邻居并按正确的顺序排列，然后，按照前面的方法，计算每个顶点的一环邻居的质心 B_i 及相应的法向量 n_{ii}, n_{ai} 。

(2) 选择候选顶点

建立顶点的局部坐标系要求 n_{ii}, n_{ai} 不能相同，为了保证嵌入水印后模型的视觉透明性和水印能够正确检测，也需要对顶点进行选择。首先根据法向量 n_{ii}, n_{ai} 的夹角来进行选择。要求 $\angle(n_{ii}, n_{ai}) > \theta_{th}$ ， θ_{th} 为进行选择的夹角阈值。其次，要求候选顶点的一环邻居是封闭的，即 $|T(B_i)| = |N(v_i)|$ 。最后依次把符合条件的顶点作为候选顶点，并把候选顶点的一环邻居排除到候选顶点之外。

(3) 为每个候选顶点建立局部坐标系

根据每个候选顶点对应的一环邻居的质心 B_i 和法向量 n_{ii}, n_{ai} ，按照第 2 节的方法为每个候选顶点建立局部坐标系。

为了达到视觉不可见性，必须限制嵌入水印前后顶点 v_i 的改变量，即嵌入水印前后顶点的位置 v_i 、

v'_i 之间的距离。不失一般性,这里计算所有候选顶点的平均改变量 e 。根据水印嵌入方法,并结合式(4)、式(5),可以得到:

$$e = \frac{1}{N_e} \sum \sqrt{(r_{0i})^2 + (r_{pi})^2 - 2r_{0i}r_{pi}\cos(\angle(B_i v_i^p, B_i v_i^{p'}))}$$

$$= \frac{r_{0i}}{N_e} \sum \sqrt{1 + \beta^2 - 2\beta\cos(\angle(B_i v_i^p, B_i v_i^{p'}))} \quad (6)$$

式中, N_e 为嵌入水印的顶点的数量, v_i^p 和 $v_i^{p'}$ 分别为顶点 v_i 嵌入水印前后在平面 Ψ_i 上的投影, r_{0i} 是顶点 v_i 的参考半径, r_{pi} 是 $v_i^{p'}$ 在平面 Ψ_i 上的投影到质心 B_i 的距离。由式(5)可知,对于一个顶点,如果嵌入水印的内容(0 或 1)及索引确定了,则系数 β 和角度 $\angle(B_i v_i^p, B_i v_i^{p'})$ 就确定了。因此,根据式(6),误差 e 的大小和 r_{0i} 成正比,而 r_{0i} 可以通过选择式(4)中 α 进行调解。也就是说,通过选择 α 可以对误差进行控制,具体数值需要根据实验来确定。

(4) 计算嵌入水印后顶点的位置

对于每个嵌入基元,一旦确定了所要嵌入水印序列 w 的哪一位,即索引值,那么要嵌入的二进制数值 $w(i)$ 也就确定了,利用式(5)计算出顶点在平面 ψ_i 上新的投影位置,由新的投影和顶点到平面 ψ_i 的距离可以得到改变后顶点的位置。每个嵌入基元都嵌入了水印后,就得到了含有水印的 3 维模型。

为了提高鲁棒性,可以对水印进行重复嵌入,达到抵抗剪切攻击的目的。另外,还需要对非候选顶点在其局部坐标系中的投影位置进行微调,使之处于不含水印的位置。

3.2 水印的检测

与嵌入水印相比,水印的检测相对简单。因为每个嵌入基元所嵌入的水印信息包含了索引信息,所以不需要借助原始模型进行同步。直接计算每个顶点的一环邻居所确定的局部极坐标系,然后计算顶点在平面 ψ_i 上的投影 (r_{pi}, θ_{pi}) , 并判断是否落在 $(\frac{1}{3}r_{0i}, r_{0i})$ 区间内,如果不在此区间,说明此顶点不含有水印。相反,则含有水印。如果含有水印,可以进一步确定嵌入的水印信息是 0 还是 1,以及在水印序列中的位置:

$$b_{wi} = \begin{cases} 0 & \frac{1}{3}r_{0i} < r_{pi} < \frac{2}{3}r_{0i} \\ 1 & \frac{2}{3}r_{0i} < r_{pi} < r_{0i} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{Index}_{wi} = \left\lfloor \frac{\theta_{pi}}{15} \right\rfloor$$

4 实验结果及分析

为了验证算法的鲁棒性、不可见性,以及对模型的亏格和拓扑的适应性,采用不同的模型进行了实验。在模型的选择上,综合考虑了顶点的多少、亏格是否为零、模型是否有向以及规则的 1-4 子分网格模型和不规则网格模型。在实验中,式(5)中的 m 取 36,水印信息是 6 个字符,编码为长度为 36 比特的二进制水印序列。

为了确定式(4)中 α 的取值,如图 4 所示,对不同的 α 值进行了实验。可以看出,嵌入相同的水印信息, α 的取值越小,嵌入水印后的模型与原始模型的视觉差异越小,引入的误差也越小,这与第 3 节的分析是一致的;同时也注意到, α 的取值小时,水印的鲁棒性相对要差一些,但影响不大。由于至今 3 维模型水印没有一个量化的误差限,故通过实验,兼顾视觉透明性和鲁棒性,把 α 取值为 0.5。

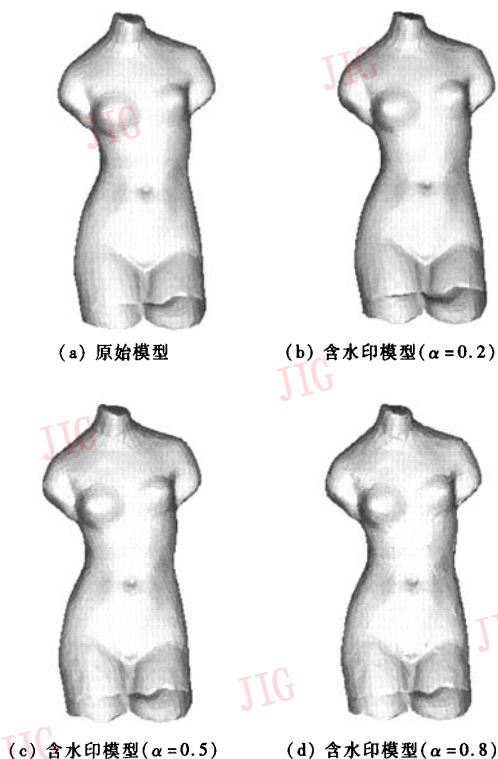


图 4 α 对模型视觉效果的影响

Fig. 4 Visual quality of models watermarked with different α value

根据第 2 节所述的局部坐标系的建立过程可

知,模型的平移、旋转、均匀缩放、顶点乱序和三角形乱序对顶点在局部坐标系中的相对位置没有任何影响,所以算法对这些攻击具有鲁棒性。

另外,由于水印的嵌入过程是每一个嵌入基元嵌入水印的一个比特,所以可以实现重复嵌入,这样,算法可以抵抗一定程度的剪切攻击,而且模型的顶点越多,水印重复嵌入的次数越多,抵抗剪切攻击的能力越强。图 5 的(a)和(b)分别是嵌入过程及结果;(c)和(d)分别是剪切攻击和旋转攻击后的模型。可见图 5(b)~(d)都可以成功检测。更多的攻击实验结果如表 1 所示。

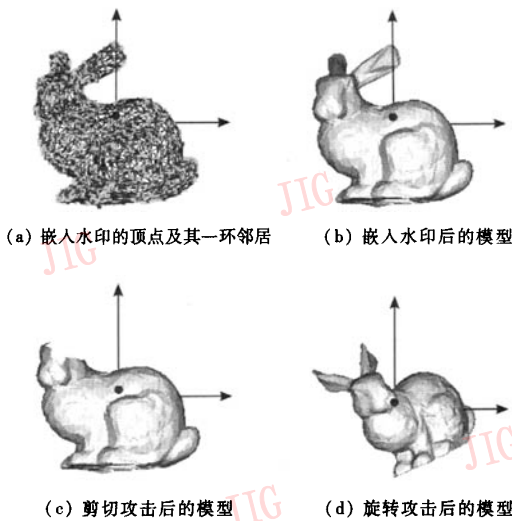


图 5 实验结果

Fig. 5 Experimental results

表 1 实验所采用的模型以及实验结果

Tab. 1 Experimental results with different models

	模型	
	Venus Head	Eight
嵌入的水印	NoCopy	NoCopy
模型参数	顶点数	10 002
	三角面片数	20 000
	亏格	0
不同攻击后检测到的水印	平移	NoCopy
	旋转	NoCopy
	均匀缩放	NoCopy
	顶点乱序	NoCopy
	剪切 20%	NoCopy
	剪切 50%	NoCopy

注: ? 表示检测失败

表 1 的结果与分析的结果是相吻合的: 平移、旋转、均匀缩放和顶点乱序攻击与模型的顶点数目没有关系,而对于剪切攻击,在剪切比例相同的情况下,剩余的顶点数与模型的顶点数成正比,模型的顶点越多,可以成功检测出水印的概率越高。

由于本算法是通过改变顶点在局部坐标系中的位置来嵌入水印信息的,所以在所有的候选顶点都进行嵌入的情况下,算法的计算量与候选顶点的数量成正比。也就是说,模型的顶点越多,候选顶点也越多,计算量也相应地增大。与非盲检测的算法相比,本算法在检测水印时,不需要借助原始模型进行重定位,因此可以省去重定位所需要的大量计算。

5 结论

本文通过修改模型顶点在局部坐标系中的位置,实现了一种新的 3 维模型数字水印算法,算法适用于规则网格和非规则网格,对网格模型的亏格及是否有向没有特殊要求,且嵌入的水印信息为字符串,具有较强的实用价值。检测水印时,算法不需要借助原始模型,而且能够抵抗平移、旋转、缩放、剪切和顶点乱序等攻击。实验结果验证了算法的鲁棒性和视觉不可见性。

参考文献 (References)

- Xia Yu, Lang Rong-ling, Cao Wei-bing, *et al.* Studies of information hiding detection in images [J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2004, 41(4): 728 ~ 736. [夏煜,郎荣玲,曹卫兵等. 基于图像的信息隐藏检测算法和实现技术研究综述[J]. *计算机研究与发展*, 2004, 41(4): 728 ~ 736.]
- Zhang Xin-yu, Peng Wei, Zhang San-yuan, *et al.* Review of watermarking techniques for 3D polygonal models [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2003, 15(8): 913 ~ 920. [张新宇,彭维,张三元等. 3D 网格数字水印研究进展[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(8): 913 ~ 920.]
- Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Embedding data in 3D models [A]. In: *Proceedings of the European Workshop on Interactive Distributed Multimedia Systems and Telecommunication Services '97* [C], Darmstadt, Germany, 1997: 1 ~ 10.
- Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models [A]. In: *Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia '97* [C], Seattle, USA, 1997: 261 ~ 272.
- Benedens O. Geometry-based watermarking of 3D models [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999, 19(1): 46 ~ 55.
- Benedens O. Two high capacity methods for embedding public watermarks into 3D polygonal models [A]. In: *Proceedings of the*

- Multimedia and Security-Workshop at ACM Multimedia [C], Orlando, Florida, 1999: 95 ~ 99.
- 7 Benedens O. Watermarking of 3D-polygon-based models with robustness against mesh simplification[A]. In: Proceedings of SPIE [C], San Jose, CA, USA, 1999, **3657**: 329 ~ 340.
 - 8 Benedens O, Busch C. Towards blind detection of robust watermarks in polygonal models[A]. In: Proceedings of EUROGRAPHICS [C], Interlaken, Switzerland, 2000, **19**(3): C199 ~ C208.
 - 9 Yeung M, Yeo B-L. Fragile watermarking of three-dimensional objects [A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing [C], Chicago, IL, USA, 1998, **2**: 442 ~ 446.
 - 10 Praun E, Hoppe H, Finkelstein A. Robust mesh watermarking [A]. In: Proceedings of SIGGRAPH [C], Los Angeles, CA, USA, 1999: 69 ~ 76.
 - 11 Yu Z Q, Ye H S, Kwok L F. A robust watermarking scheme for 3D triangular mesh models [J]. Pattern Recognition, 2003, **36**(11): 2603 ~ 2614.
 - 12 Yin K K, Pan Z G, Shi J Y, *et al.* Robust mesh watermarking based on multiresolution processing [J]. Computers & Graphics, 2001, **25**(3): 409 ~ 420.
 - 13 Mao X, Shiba M, Imamiya A. Watermarking 3D geometric models through triangle subdivision [A]. In: Proceedings of SPIE [C], San Jose, CA, USA, 2001: 253 ~ 260.
 - 14 Sun S S, Pan Z G, Li L, *et al.* Robust 3D model watermarking against geometric transformation [A]. In: Proceedings of CAD/ Graphics [C], Macao, 2003: 87 ~ 92.
 - 15 Kanai S, Date H, Kishinami T. Digital watermarking for 3D polygons using multiresolution wavelet decomposition [A]. In: Proceedings of International Workshop on Geometric Modeling [C], Tokyo, Japan, 1998: 296 ~ 307.
 - 16 Ohbuchi R, Takahashi S, Miyazawa T, *et al.* Watermarking 3D polygonal meshes in the mesh spectral domain [A]. In: Proceedings of Graphics Interface [C], Ottawa, Canada, 2001: 9 ~ 17.
 - 17 Li L, Zhang D, Pan Z G, *et al.* Watermarking 3D mesh by spherical parameterization [J]. Computers & Graphics, 2004, **28**(6): 981 ~ 989.
 - 18 Uecheddu F, Corsini M, Barni M. Wavelet-based blind watermarking of 3D models [A]. In: Proceedings of the Workshop on Multimedia and Security [C], Magdeburg, Germany, 2004: 143 ~ 154.