

# 基于几何特征的3维网格模型零水印算法

徐涛 张艳宁 孙瑾秋 郑江滨 林增刚

(西北工业大学计算机学院, 西安 710072)

**摘要** 由于3维网格模型对水印嵌入强度高度敏感,为避免外观视觉效果严重失真,如今多数水印算法只能采用低强度的嵌入策略,从而导致其鲁棒性能下降。为了解决水印鲁棒性和透明性之间的矛盾问题,提出了一种不对网格模型数据进行任何改动的零水印算法。该方法首先对网格模型的几何数据进行校准预处理,然后对网格按顶点包围盒进行分割来提取几何数据空域特征,进而再应用3维DCT变换在变换域中进一步集中能量,其水印由若干DCT大值系数构造生成,并在IPR数据库注册获得版权保护,该水印的检测过程无需原始网格模型数据的参与。实验结果表明,该算法构造的水印不仅能抵抗顶点重排序、平移、旋转、各向一致缩放等攻击,而且对加噪、网格简化、网格滤波和二次水印等也表现出一定的鲁棒性。

**关键词** 3维水印 网格水印 零水印

中图法分类号:TP309 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2009)09-1819-06

## Zero-watermarking Scheme for 3D Meshes Based on Geometric Property

XU Tao, ZHANG Yan-ning, SUN Jin-qiu, ZHENG Jiang-bin, LIN Zeng-gang

(School of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** 3D mesh models are high sensitive to the magnitude of their embedding watermarks, and most watermarking algorithms only use low-magnitude embedding method to avoid serious distortion of visual-effect, but unfortunately, it would degrade robustness. In order to compromise the robustness and the transparency of watermarked 3D meshes, a zero-watermarking algorithm that modified nothing of 3D mesh data is presented. After calibrating mesh geometric data, mesh vertices are divided into some blocks according to their bounding-box, and then apply 3D-DCT to integrate the energy in transformed domain. Watermarking signals are constructed by some bigger DCT coefficients and registered in the database of IPR to obtain copyright protection. Original 3D mesh data are not needed when detecting watermark. Experimental results show the watermark constructed by presented algorithm can resist vertex reordering, translating, rotating, uniformed scaling, and show robustness against adding noise, mesh simplifying, mesh filtering, and adding a secondary watermark.

**Keywords** 3D watermarking, mesh watermarking, zero-watermark

## 1 引言

自 Ohbuchi 等人首次发表3维网格模型数字水印算法<sup>[1]</sup>以来,不少专家学者对数字水印技术在3维网格模型领域中的应用进行了深入研究。现阶段

所提出的算法多以网格模型的几何数据作为水印载体,并通过对其进行轻微扰动来实现水印嵌入,但3维网格模型对高强度的水印十分敏感,多数情况下水印只能以很低的强度嵌入(水印载体实际改动值一般小于1%),否则人眼很容易就察觉到模型的外观视觉质量受损,而采用低强度的水印,则又将直接

**基金项目:**国家自然科学基金项目(60472072);国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA01Z324);陕西省自然科学基金项目(F0206);教育部“新世纪优秀人才计划”项目(NCET-05-0866)

**收稿日期:**2008-01-31; **改回日期:**2008-05-28

**第一作者简介:**徐涛(1974~),男。现为西北工业大学计算机学院博士研究生。主要研究方向为多媒体信息安全及数字水印技术。

E-mail: master\_xutao@163.com

导致水印鲁棒性能下降。

为了折中图像水印鲁棒性和透明性之间的矛盾问题,温泉等人提出了零水印的概念<sup>[2]</sup>,即在不对媒体进行任何改动的前提下,利用其重要特征来构造水印,水印生成后在 IPR (intellectual property rights) 信息数据库注册,并实现版权保护,该技术在图像水印领域已得到一定的应用和推广<sup>[3-4]</sup>。

由于零水印技术无需对媒体进行任何改动,同时又能抵抗常见的一些攻击,因此可考虑对 3 维网格模型这类水印高敏感性的数字媒体应用零水印技术来进行版权保护。本文提出了一种基于几何特征的 3 维网格模型零水印算法,该算法以网格顶点的几何数据作为水印信息的构造源,其在进行水印检测时,无需原始网格模型数据参与。

## 2 基于面加权的主元分析预处理

旋转变换和网格简化为 3 维网格模型常见的攻击类型,极易造成水印提取不同步,而且现有不少的网格模型水印算法<sup>[5-6]</sup>为抵抗这两类攻击,均需要原始网格模型参与顶点的对齐和配准,即不能实现水印盲检测,从而明显降低了算法的实用性。为解决这一问题,笔者决定采用基于面加权的主元分析来对 3 维网格模型进行坐标系旋转归一化预处理,把模型调整到主轴的方向上,而在检测水印时,也采用同样方法进行预处理,以确保生成水印和检测水印时的模型姿态一致,以便可顺利提取到水印信息。

传统的主元分析是先以 3 维网格模型顶点坐标的协方差矩阵的特征向量生成变换矩阵,然后按顶点分布最广的 3 个方向确定出 3 根主轴来对顶点进行坐标变换,以实现模型的校准定位,该方法在其他水印算法中<sup>[7]</sup>也有采用。但需要指出的是,由于该方法未考虑三角形面片的因素,致使传统的主元分析对网格模型简化处理的鲁棒性表现明显不足,因此本文采用了文献[8]提出的一种基于面加权的主元分析方法,即首先将 3 维网格模型  $M$  的质心设为 3 维笛卡儿直角坐标系的原点,同时计算网格各顶点在以模型质心为原点的坐标系中的新坐标值,此时网格模型  $M$  可视为由两个子集组成的集合,即  $M = \{S, V\}$ ,其中  $V$  是坐标移位后由网格顶点几何数据组成的子集,子集  $S$  为定义在  $V$  上的一组拓扑连接数据,可用其表示各三角形面片的信息,为了降低网格简化带来的影响,对网格的每个顶点还定义

了一个面积加权因子

$$q_i = \frac{\sum_{j=1}^l A_{i,j}}{A(M)} \quad (1)$$

其中,  $A(M)$  为该网格模型的所有三角形面片面积的总和,  $A_{i,j}$  表示拥有第  $i$  个顶点  $v_i$  的第  $j$  个面片的面积,  $l$  为共享顶点  $v_i$  的三角形面片的个数,则新的顶点集  $U$  定义如下:

$$U = \{u_i | u_i = v_i \cdot q_i, i = 1, 2, \dots, n\} \quad (2)$$

计算新顶点集  $U$  中所有顶点的  $X, Y, Z$  坐标分量的均值,即可得到质心点  $c$ ,再通过计算  $U$  的协方差矩阵

$$I = E\{(U - c)(U - c)^T\} \quad (3)$$

来求出该矩阵的 3 个特征值,  $I$  为  $3 \times 3$  实矩阵, 3 个特征值按降序排列,记为  $\eta_1, \eta_2, \eta_3$ , 其对应的特征向量记为  $e_1, e_2, e_3$ , 其中  $e_1$  代表顶点分布最广的方向,即主轴 1,  $e_2$  和  $e_3$  分别表示顶点分布次广的主轴 2 和主轴 3,以  $e_1, e_2, e_3$  构造旋转变换矩阵  $R$ 。

再用旋转变换矩阵  $R$  对顶点集  $V$  中的各顶点进行坐标变换,即可得到姿态调整后的顶点集  $\tilde{V}$  和网格模型  $\tilde{M}$ 。

## 3 水印生成与检测算法

由于 IPR 信息数据库容量有限,要求构造出的水印信息必须短小,而 3 维网格模型通常包含大量的顶点几何数据,因此有必要对网格几何数据进行特征提取。本文的思路是在空间域中首先将网格模型的顶点几何数据按其包围盒分割为若干分块;然后通过计算各分块内的模型顶点几何数据的统计平均值来提取网格模型的全局几何特征;同时实现几何数据的 3 维规则参数化,进而应用 3 维离散余弦变换 (DCT) 在频域中再次对几何数据的能量进行集中;最后通过选取若干大值 DCT 系数来构造水印。

### (1) 顶点几何数据空间域能量提取

在对网格模型进行基于面加权的主元分析预处理后,先按姿态调整过的模型顶点坐标求出顶点的包围盒,并依据包围盒的尺寸将顶点集  $\tilde{V}$  分割为  $N \times N \times N$  个分块;然后在各分块内计算网格顶点至网格中心点矢量长度的均值,即可得到一个大小为  $N \times N \times N$  的 3 维数组  $A$ 。

### (2) 3 维 DCT 变换和构造水印

对上步得到的 3 维数组  $A$  先应用 3 维 DCT 变

换来得到由3维DCT变换系数组成的数组  $\mathbf{B}$ , 即

$$B(u, v, w) = \alpha\beta\theta \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} A(i, j, k) \cdot \cos \frac{(2i+1)u\pi}{2N} \cdot \cos \frac{(2j+1)v\pi}{2N} \cdot \cos \frac{(2k+1)w\pi}{2N} \right\} \quad (4)$$

其中,

$$\alpha = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} & u=0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & u \neq 0 \end{cases} \quad \beta = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} & v=0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & v \neq 0 \end{cases} \quad \theta = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}} & w=0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}} & w \neq 0 \end{cases}$$

然后将  $\mathbf{B}$  中的绝对值较大的一半 DCT 大值系数排列为一个长度为  $N \times N \times N/2$  的 1 维数组  $\tilde{\mathbf{B}}$ , 再以  $\tilde{\mathbf{B}}$  中各元素的正负极性对  $\tilde{\mathbf{B}}$  进行二值量化来生成  $N \times N \times N/2$  的水印序列  $\mathbf{W}$ , 即

$$W(i) = \begin{cases} 0, & \text{如果 } \tilde{B}(i) \leq 0 \\ 1, & \text{如果 } \tilde{B}(i) > 0 \end{cases}$$

为加强水印的安全性保护, 先以密钥  $Key$  来对水印序列进行置乱变换, 再在 IPR 信息数据库进行注册, 而密钥  $Key$  则由原创作者保管, 这样该网格模型即已列入合法版权保护的范畴。

### (3) 水印检测

提取水印时, 无需原始网格模型数据的参与, 首先从 IPR 信息数据库中取出注册的水印, 再以原创者提供的密钥  $Key$  对注册水印进行逆置乱处理, 即可得到原始水印序列  $\mathbf{W}$ , 并可由水印的长度  $L$  求得网格模型分割的尺寸:  $N = \sqrt[3]{2L}$ , 水印检测时, 可按前文方法进行基于面加权的主元分析预处理, 姿态调整后再将待测网格模型几何数据的包围盒按  $N \times N \times N$  份进行分割, 重复执行前述步骤后, 即可提取出一组待验证的水印序列  $\tilde{\mathbf{W}}$ , 再与原始水印序列  $\mathbf{W}$  进行比较, 即可鉴定待测网格模型的版权归属。由于待测 3 维网格模型可能会受到各种有意、无意的攻击, 并且网络传输难免会带来数据受损, 因此多数情况下提取出的水印并不能保证与注册水印完全相同, 实际水印检测时, 可通过计算水印的相似度是否大于指定的阈值来验证, 相似度计算公式为

$$S = \frac{\sum_{i=1}^L W(i) \tilde{W}(i)}{\sum_{i=1}^L (W(i))^2} \quad (5)$$

其中  $W(i)$  和  $\tilde{W}(i)$  分别表示原始注册水印序列和由待测网格模型提取出水印序列的第  $i$  位值,  $L$  为水印序列的长度。该公式反映了归一化的水印相关系数, 而且水印匹配程度越高, 其分子部分取值越接近分母值, 当水印序列完全匹配时, 分子项取值达到最大, 与分母值相同, 因此  $0 \leq S \leq 1$ , 且  $S$  值越大, 表明水印的相似度越高。

阈值  $T$  的选择需综合考虑, 其取值过低时, 容易出现虚警, 而取值过高则又容易漏警, 笔者先随机生成了 10 000 组与原始注册水印序列长度相同的二进制序列, 然后让这些二进制序列与原始注册水印序列做相似度检测, 由于重复多次实验后, 随机二进制序列的相似度一般不超过 0.7, 因此最终将水印相似度检测阈值  $T$  设为 0.75。

## 4 水印鲁棒性讨论分析

下面将本文算法对一些常见的抗 3 维网格模型水印攻击所表现出的鲁棒性进行讨论分析。

### (1) 顶点重排序

由于水印的构造、提取过程与网格模型顶点的拓扑排列顺序无关, 因此顶点重排序攻击不会对水印提取产生任何影响。

### (2) 平移、旋转和各向一致缩放攻击

由于水印构造和提取都是针对坐标原点移至模型中心后的网格进行操作, 因此平移攻击对水印提取不会产生影响; 由于水印构造和提取前, 都对网格模型采用了主元分析进行预处理, 以确保模型可自动校准定位, 因此可抵抗旋转攻击; 各向一致缩放攻击相当于将网格顶点至网格模型中心矢量长度值放大或缩小某个常数倍, 而且根据包围盒构造出的 3 维数组在进行 3 维 DCT 变换后的系数也将放大或缩小常数倍, 由于水印的构造和提取是基于 DCT 系数正负极性的二值量化, 因此对于各向一致的缩放攻击, 同样也不会对水印提取产生影响。

### (3) 随机噪声攻击和网格简化攻击

添加随机噪声后, 网格顶点至网格模型中心的矢量长度值会产生扰动, 由于较大强度的噪声将使得模型的外观质量严重下降, 没有实际攻击意义, 而低强度的噪声只会造成包围盒各分块内该矢量长度均值的微小波动, 3 维 DCT 变换后的系数, 尤其是大值系数, 同样受影响不大, 而且采用了 DCT 系数的

正负极性二值量化法来构造水印,因此遭受一般强度的噪声攻击时,水印受损程度有限;由于采用了基于面加权的主元分析预处理,从而确保了网格模型在遭受低强度的简化攻击时,仍能基本保持生成水印时的模型姿态,同时网格模型简化的一个重要前提条件是保持模型几何形状不变,这就意味着在包围盒各分块内网格顶点至网格模型中心的矢量长度值的分布范围不会发生大的变化,即各分块内的顶点数目虽减少了一部分,但各块内网格顶点至网格模型中心的矢量长度均值的波动幅度不会太大,因此水印可抗较低强度的简化攻击。

## 5 实验结果

为了检测算法的性能并同其他 3 维网格模型的

水印算法进行比较,笔者在 VC++6.0 和 OpenGL 平台上对上述算法进行了编程实现,实验采用的模型为标准测试模型 Bunny(35 947 个顶点,69 451 个三角形面片)和 Happy Buddha(543 652 个顶点,1 087 716 个三角形面片)。网格模型的包围盒分割尺寸为  $6 \times 6 \times 6$ ,最终生成在 IPR 信息数据库注册的水印长度为 108。为了能让水印的检测结果能有个直观表示,本文采用了文献[2]的方法来构造水印探测器,即产生 10 000 个由 1 和 0 组成的长度为 108 的二进制随机序列,令第 5 000 个随机序列为原始水印序列,然后将提取的水印序列和这 10 000 个序列做相似度检测,若在横坐标 5 000 处出现明显高于其他点的峰值,即认为水印存在。当网格模型未受攻击时,则提取出的水印与原始注册水印完全相似,检测结果参见图 1。

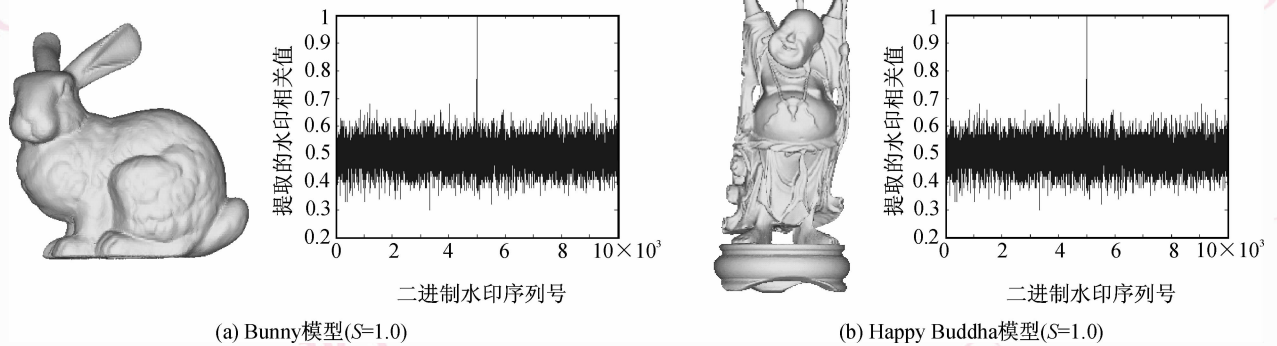


图 1 未受任何攻击时的水印探测器的检测结果

Fig. 1 Watermark detecting results (no attacking)

为检验算法的抗攻击效果,笔者对多种常见的攻击进行了测试,包括顶点重排序、平移、旋转、各向一致缩放这类几何数据的无损性攻击,以及随机噪声攻击(随机噪声沿模型中心至顶点矢量方向添加)、简化

攻击(Melax 提出的简化算法<sup>[9]</sup>)、网格滤波(Taubin 提出的滤波算法<sup>[10]</sup>)、添加二次水印(Yu 等人提出的网格模型水印算法<sup>[5]</sup>)等这类几何数据的有损性攻击,其水印检测结果如图 2、图 3 和表 1 所示。

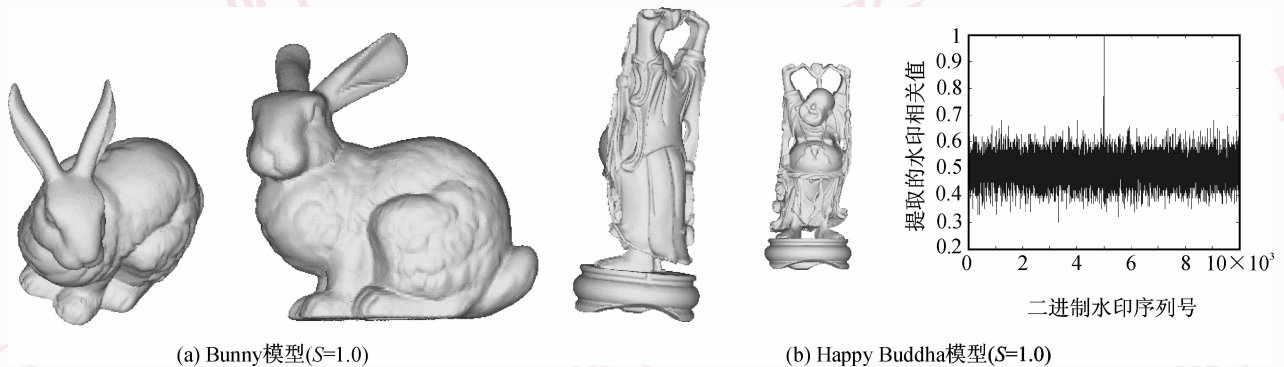


图 2 几何数据无损类攻击时的水印探测器的检测结果

Fig. 2 Watermark detecting results (lossless geometric attacking)

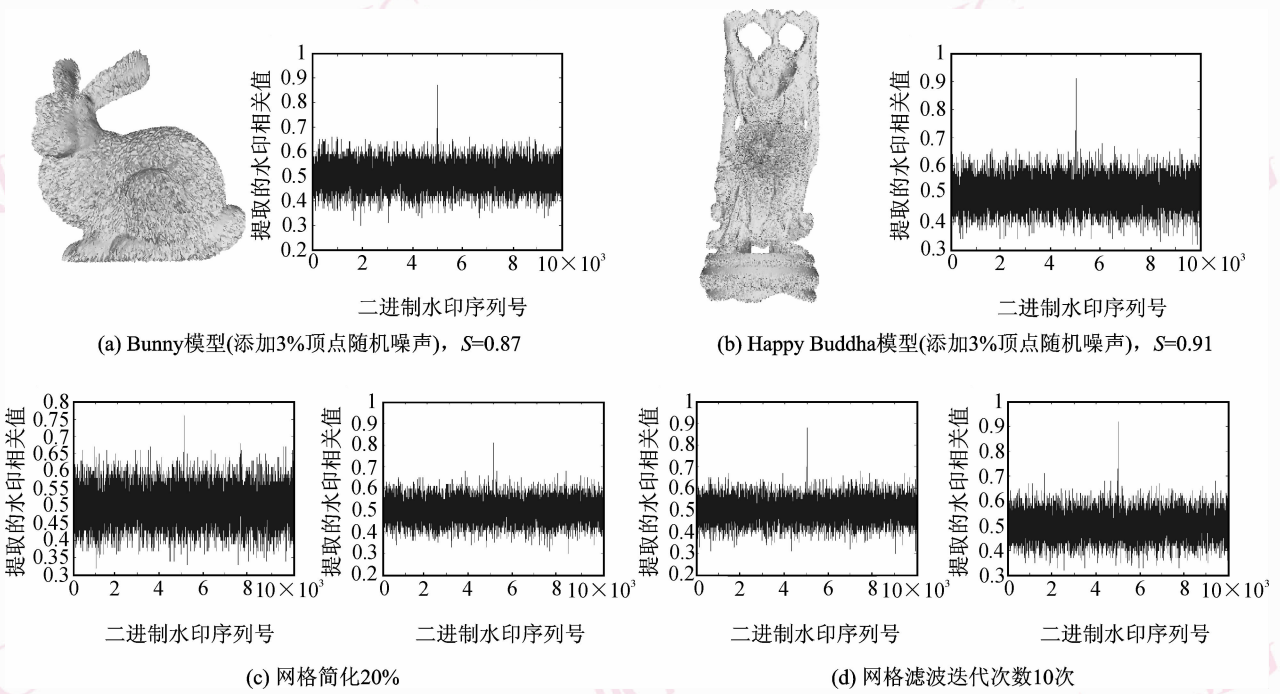


图 3 遭受随机噪声、简化和滤波攻击时的水印探测器的检测结果

Fig. 3 Watermark detecting results (adding random noise, mesh simplifying, and mesh filtering)

表 1 二次水印攻击水印检测结果

Tab. 1 Watermark detecting results( adding a secondary watermark )

水印嵌入强度 (%)	Bunny 模型水印相似度	Happy Buddha 模型水印相似度
3	1.0	1.0
5	0.95	0.97
8	0.89	0.92

本文算法在水印盲提取的前提下,对于顶点重排序、平移、旋转、各向一致的缩放攻击等几何数据

的无损性攻击可保证提取的水印完全相似,而对于有损攻击,同样表现出一定的鲁棒性:如可抵抗 3% 的噪声攻击,这已远高于其他盲水印嵌入算法<sup>[7,11-13]</sup>,可抵抗强度约 20% 的网格简化攻击等。当网格模型遭受剪切攻击时,将导致模型的面加权主元分析预处理过程失效,即待测的网格模型无法校准为生成水印时的原始模型姿态,因此本文算法不能抵抗剪切攻击,此为不足之处。与其他盲水印算法抗攻击性能的比较结果见表 2。

表 2 与其他盲水印算法的抗攻击性能比较

Tab. 2 Comparisons with other blind watermarking algorithm

	平移	旋转	各向一致缩放	顶点重排序	可抗随机噪声强度 (%)	可抗简化强度 (%)
本文算法	可抗	可抗	可抗	可抗	3	20
文献[7]算法	可抗	可抗	可抗	可抗	0.5	不可抗
文献[11]算法	可抗	有限角度	可抗	可抗	0.44	不可抗
文献[12]算法	可抗	可抗	可抗	不可抗	0.5	不可抗
文献[13]算法	可抗	可抗	可抗	可抗	0.6	50

## 6 结 论

将零水印技术应用到了 3 维网格模型的版权保护领域,提出了一种基于几何特征的 3 维网格模型零水印算法,该算法在构造和检测水印之前,先采用

基于面加权的主元分析对网格模型进行预处理,以确保水印在遭受旋转攻击和简化攻击时仍能实现盲提取,而生成水印时则以顶点的几何数据作为水印的构造源,在空域几何特征提取后,再应用 3 维 DCT 变换在变换域中进一步集中能量,同时以变换域中的大值系数构造出反映网格模型全局几何特征的水

印信息,并在 IPR 信息数据库注册来实现版权保护,该水印对多种常见攻击均表现出一定的鲁棒性。

零水印技术为 3 维网格模型水印鲁棒性和透明性之间的矛盾问题提供了一个新的解决方案,其对于 3 维网格模型这类对水印嵌入具有高敏感性的数字媒体的版权保护,有着较高的应用价值。

### 参考文献 (References)

- Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking 3D polygonal models [A]. In: Proceedings of ACM Multimedia' 97 [C], New York, USA, 1997: 261-272.
- Wen Quan, Sun Tan-feng, Wang Shu-xun. Concept and application of zero-watermark [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 3(1): 214-216. [温泉,孙钺锋,王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报,2003,3(1):214-216.]
- Yang Shu-guo, Li Chun-xia, Sun Feng, *et al.* Study on the method of image non-watermark in DWT domain [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(1): 664-669. [杨树国,李春霞,孙枫等. 小波域内图象零水印技术的研究[J]. 中国图象图形学报,2003,8(1):664-669.]
- Wang Cheng-ru, Li Duan. Image Zero-watermarking utilizing wavelet zerotree structure and PCA [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(4): 75-77. [王成儒,李段. 利用小波零树结构和 PCA 构造图像零水印[J]. 光电工程,2005,32(4):75-77.]
- Yu Zhi-qiang, Horace H S, Kwok L F. A robust watermarking scheme for 3D triangular mesh models [J]. Pattern Recognition, 2003, 36(11): 2603-2614.
- Zhang Jing, Zheng Guo-qin. A geometry property based watermarking scheme for three dimensional meshes [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(4): 740-747. [张静,郑国勤. 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.]
- Kalivas A, Tefas A, Pitas I. Watermarking of 3D models using principal component analysis [A]. In: Proceedings of the International Conference on Multimedia and Expo 2003 [C], Baltimore, Maryland, USA, 2003:637-640.
- Cui Chen-yang. Research on Key Technology in 3D Model Retrieval [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. [崔晨阳. 三维模型检索中关键技术的研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.]
- Melax Stan. A simple, fast, and effective polygon reduction algorithm [J]. Game Developer, 1998, 5(11): 44-49.
- Taubin Gabriel. A signal processing approach to fair surface design [A]. In: Proceeding of ACM International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, [C], Los Angeles, CA, USA, 1995: 351-358.
- Cayre F, Rondao-Aliace P, Schmi F, *et al.* Application of spectral decomposition to compression and watermarking of 3D triangle mesh geometry [J]. Signal Processing: Image Communication, 2003, 18(4):309-319.
- Li Li, Pan Zhi-geng, Zhang David. A public mesh watermarking algorithm based on addition property of Fourier transform [J]. International Journal of Image and Graphics, 2006, 6(1): 35-43.
- Cho Jae-won, Rémy Prost, Jung Ho-youl. An oblivious watermarking for 3-D polygonal meshes using distribution of vertex norms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(1): 142-155.