

中图法分类号: TP309 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0324-06

论文索引信息: 何文广, 李岩, 尹朝平. 一种3维模型的网格盲水印算法 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 324-329

# 一种3维模型的网格盲水印算法

何文广<sup>1)</sup>, 李岩<sup>1),2)</sup>, 尹朝平<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(华南师范大学计算机学院, 广州 510631) <sup>2)</sup>(华南师范大学空间信息技术与应用中心, 广州 510631)

**摘要:** 3维模型的数字水印是数字水印研究的热点之一,鲁棒性、嵌入可读性水印和盲检测是3维模型数字水印的难点所在。从增强3维模型数字水印的鲁棒性出发,提出一种基于局部几何空间的3维模型数字水印算法,它以模型三角网格顶点在其一环邻居顶点为所确定的局部几何空间;通过改变顶点在局部几何空间中的位置来嵌入水印,并以调整其间的夹角来嵌入水印序列的索引,而调整顶点与圆心的距离来嵌入较高比特的二进制数值。本文算法在水印检测时,无需原始模型,且可抵抗平移、旋转、均匀缩放、顶点乱序、剪切及网格简化等攻击。实验结果表明,该水印算法具有很好的鲁棒性、可读水印的不可感知性和盲水印检测的优势。

**关键词:** 3维模型数字水印;三角网格;局部几何空间;盲水印算法

## A watermarking algorithm for 3D model triangular meshes

He Wenguang<sup>1)</sup>, Li Yan<sup>1),2)</sup>, Yin Zhaoping<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(School of Computer, South China Normal University, Guangdong Guangzhou 510631 China)

<sup>2)</sup>(Spatial Information Research Center, South China Normal University, Guangdong Guangzhou 510631 China)

**Abstract:** Watermarking a 3D mode is one of the hot topics in digital watermark. The most difficulties of the watermarking model 3D models are mainly on maintaining robustness, embedding readable watermark and blind detecting watermarks. In order to enhance the robustness, this paper proposed a local geometric space based watermarking algorithm for the triangular meshes of 3D models. It is defined as a local geometric space by selected vertex and close neighboring vertices of the triangular meshes in the 3D model, Then the watermarks are embedded through adjusting the position of the selected vertex within their related spaces. The parameter of the central angle is rectified for embedding an index of a series of watermark; The distance between vertex and the central point is rectified for embedding high bit of binary numerical value. The experimental results show that the algorithm guarantees the high performance of the watermark robustness such as translation, rotation, scaling, vertex permutation, model cropping and model simplification with this approach, embedded watermarks can be detected without the original model. And the results also present an evident superiority in non sentience of embedding readable watermark.

**Keywords:** digital watermarking for 3D model; triangular mesh; local geometric space; blind detection algorithm

## 0 引言

数字化技术的发展为信息的获取和传播提供了极大的方便,同时也带来了数字化产品的版权保护

问题。3维模型作为一种新型多媒体产品,正得到日益普及和广泛应用。如何利用数字水印技术,针对3维模型实施有效的版权保护,是当前的研究热点。

数字水印技术是指在数字化的数字内容中嵌入不明显的记号,被嵌入的记号人眼通常不可察,但可

收稿日期:2009-05-18;修回日期:2009-11-25

基金项目:国家自然科学基金项目(60842007);广东省百项工程项目(2002B32101);广东省重点引导项目(2004B32501001, 2005B30801006)。

第一作者简介:何文广(1984—),男,华南师范大学计算机应用技术专业硕士研究生,主要研究方向为图像图形与空间信息技术。

通讯作者:李岩, E-mail: yanli@senu.edu.cn.

以通过计算操作被检测或提取。按水印的特性可将数字水印分为鲁棒性数字水印与脆弱数字水印。鲁棒性数字水印是指具有很强的抗干扰能力,能抵抗各种无意或恶意的攻击,故这种水印有利于数据版权保护;与之相反,脆弱水印必须对信号的改动很敏感,这种水印则主要用于数据完整性保护。本文主要讨论的是鲁棒性数字水印。

数字水印的嵌入对象可以是图像、声音、视频或3维模型等。由于3维模型结构的特殊性,使得3维模型领域的水印算法研究较少<sup>[1]</sup>。其中主要有以下原因:1)3维模型无统一的表示方法;2)3维模型的顶点是不规则采样;3)缺乏一个稳健的空域或频域用于水印嵌入;4)3维模型的处理和攻击方式复杂多变。所以,强鲁棒性的水印算法一直是3维模型数字水印技术的一个难点。

1997年,Ohbuchi率先提出3维模型数字水印的概念,并提出三角形相似四元组、四面体体积比等算法<sup>[2-3]</sup>;后来,Yeung提出一种脆弱的3维模型水印算法<sup>[4]</sup>;而Benedens相继提出顶点束算法、三角形束算法、基于仿射不变量的网格水印算法等;后来,他还提出通过改变3维模型的法线方向来嵌入水印信息<sup>[5-8]</sup>;与此同时,人们针对3维水印的鲁棒性进行了多方面的研究,如:Kanai提出一种利用小波变换的三角网格变换域的非盲水印算法<sup>[9]</sup>;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<sup>[10]</sup>;又有Ohbuchi提出一种网格伪频谱分析变换域的3维模型非盲水印算法<sup>[11]</sup>;尹康康等人用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<sup>[12]</sup>;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<sup>[13]</sup>;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<sup>[14]</sup>,它们均具有很好的鲁棒性,但属非盲水印方法。针对盲水印算法,Mao提出向模型中插入新的顶点来嵌入水印的方法<sup>[15]</sup>;Sun提出的抗几何变换的3维模型水印算法<sup>[16]</sup>,以及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<sup>[17]</sup>。而且这些算法虽均是盲检测水印的方法,但鲁棒性较差。由此,3维数字水印算法的研究重点集中在如何使得3维数字水印技术既可嵌入可读水印,实现盲水印检测,又可保证其鲁棒性,以满足实用性要求。

本文提出一种针对三角网格模型的数字水印算法,它基于3维模型的局部几何空间嵌入和提取数

字水印,重点考虑水印的鲁棒性、可读水印的不可见性和盲水印检测问题。它利用相邻顶点构建一个局部几何空间,并改变目标顶点在该几何空间中的相对位置来实现水印的嵌入和提取;最后,将以实验证明该算法能够抵抗平移、旋转、均匀缩放、顶点乱序、剪切,以及网格简化等攻击。

## 1 算法的基本原理

在3维模型中,可以构造出多种适合用于嵌入水印的基元,但不同的嵌入基元对抗攻击的种类和能力差别较大。鉴于属性信息易被替换和去除,拓扑信息对3维模型有影响等因素,一般采用对几何信息进行数字水印嵌入。

文献[13]提出通过修改顶点到中心的距离来嵌入水印信息。由于该距离是一种全局几何特征,所以该算法在检测水印过程中需要原始模型进行重定位和重采样,降低了算法的实用性。基于此,本文引入局部几何空间的概念,利用目标顶点及其相邻顶点,构建出目标顶点所对应的局部几何空间,通过修改目标顶点在其局部几何空间中的位置来嵌入水印。由于该位置值是一个仿射不变量,所以嵌入的水印可以在经历了几何攻击之后存活下来,提高了算法的鲁棒性。此外,局部几何空间的引入,使得水印检测无需依赖原始模型,这不仅实现了水印的盲检测,并且提高了算法的效率。

### 1.1 局部几何空间的定义

在顶点 $v_0$ 的众多相邻顶点中,选取以下3个不共线的顶点 $\{v_1, v_2, v_3\}$ ,并符合以下要求: $v'_0$ 是顶点 $v_0$ 在 $\{v_1, v_2, v_3\}$ 所确定的平面 $\Psi$ 上的投影,顶点 $o$ 为 $\{v_1, v_2, v_3\}$ 所确定的外接圆的圆心,顶点 $p$ 为顶点 $\{v_1, v_2, v_3\}$ 的质心, $o$ 与 $v'_0$ 的距离最小。根据平面 $\Psi$ 及向量 $\vec{v'_0v}$ ,就可确定一个局部几何空间,如图1所示。这样,就可通过改变顶点 $v_0$ 在局部几何空间中的坐标来嵌入水印;调整 $v'_0o$ 与 $op$ 的夹角 $\theta$ 来嵌入水印序列的索引,调整顶点 $v'_0$ 与圆心 $o$ 的距离 $r$ 来嵌入8 bits、16 bits或32 bits的二进制数值。

### 1.2 局部几何空间的选择

假定, $N$ 为水印序列 $w$ 的长度,则在嵌入水印的过程中,先要为每个比特位选择合适的嵌入基元或局部几何空间。对于任一局部几何空间,都携带了两个重要参数:夹角 $\theta$ 和距离 $r$ ,但参数夹角 $\theta$ 是决定某局部几何空间是否合适的键。

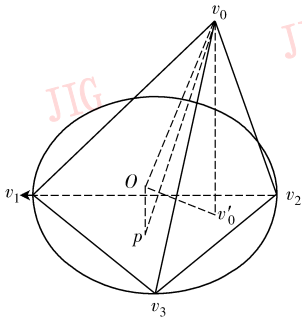


图 1 水印嵌入基元或局部几何空间

Fig. 1 Embedding primitive or local geometric space

当将  $v'_0$  与  $op$  的夹角取值范围为  $[0, 180]$ , 并将其等分为  $m$  份,  $m = N \times k, k = 1, 2, 3, \dots$ 。对于待嵌入水印序列  $w$  的第  $index$  个比特位  $w(index)$ , 最合适的局部几何空间应符合以下要求:

$$\begin{cases} \varphi = \min\left(\left|\theta - \frac{180}{m}(i + 0.5)\right|\right) \\ i = index, index + N, \dots, index + (k - 1) \times N \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\theta$  是被选中的局部几何空间的夹角参数;  $\varphi$  是要调整的度数。可通过选取最小的调整幅度, 以获取模型的较高保真度。由上式可知,  $m$  的值越大, 幅度调整的精度就越细, 嵌入水印所带来的差异性就越小。经过调整, 夹角  $\theta$  的值为  $\frac{180}{m}(i + 0.5)$ , 顶点  $v_0$  的移动距离为  $L = 2 \sin \frac{\theta}{2} |ov'_0|$ ; 而  $o$  与  $v'_0$  的距离  $|ov'_0|$  在局部几何空间中, 已经取得了最小值, 这使得顶点  $v_0$  的移动距离最小。

### 1.3 3 维模型数字水印嵌入方法

在选择了合适的局部几何空间后, 调整  $v'_0$  与  $op$  的夹角  $\theta$  来嵌入水印序列的索引, 则顶点  $v_0$  在局部几何空间内移动到了新位置  $v_n$ ,  $v'_n$  是  $v_n$  在平面  $\Psi$  上的投影, 如图 2 所示。

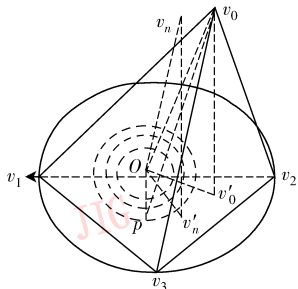


图 2 水印嵌入过程

Fig. 2 Watermark embedding process

在将水印序列索引嵌入后, 则要进行二进制数值的嵌入。首先, 以顶点  $o$  为圆心,  $|op|$  为半径做圆; 然后, 在半径方向上将圆划分为  $3 \times n$  份。在顶点  $v_n$  上嵌入水印序列  $w$  的第  $index$  个比特位  $w(index)$  的方法是:

$$|ov'_n| \% |op| = \beta |op|$$

$$\beta = \begin{cases} \frac{3 \times k + 0.5}{3 \times n} & \text{不嵌入水印} \\ \frac{3 \times k + 1.5}{3 \times n} & w(index) = 0 \\ \frac{3 \times k + 2.5}{3 \times n} & w(index) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n - 1$$

采用上述规则, 通过调整顶点  $v_n$  的位置, 可使得投影点  $v'_n$  处于合适的位置, 即与水印比特值相对应的位置。在嵌入水印比特值的过程中, 顶点  $v_n$  在  $\vec{ov'_n}$  方向上的移动距离上限为  $\frac{|op|}{3 \times n}$ ,  $n$  值的大小取决于容差范围。其中,  $n$  的值越大, 顶点的移动距离就越小, 嵌入水印所带来的差异性就越小。

### 1.4 3 维模型盲水印提取与检测方法

经过两次坐标位置的调整, 一个水印比特位被嵌入到一个局部几何空间内。在提取与检测水印的过程中, 本算法无需原始 3 维模型, 整个过程可以分为 3 个步骤:

1) 首先, 提取出所有嵌入了水印索引的局部几何空间。如前所述, 局部几何空间都携带了两个重要参数: 夹角  $\theta$  和距离  $r$ , 含有水印信息的局部几何空间应该符合:

$$\begin{cases} \theta = \frac{180}{m}(i + 0.5) \\ i = index, index + N, \dots, index + (k - 1) \times N \end{cases} \quad (3)$$

即该局部几何空间携带了水印序列  $w$  的第  $index$  位比特值。

2) 随后, 计算出该局部几何空间携带的水印比特位, 判定比特值的方法遵循下列判定:

$$r \% |op| = \beta |op|$$

$$bit = \begin{cases} \text{无} & \beta = \frac{3 \times k + 0.5}{3 \times n} \\ 0 & \beta = \frac{3 \times k + 1.5}{3 \times n} \\ 1 & \beta = \frac{3 \times k + 2.5}{3 \times n} \end{cases} \quad (4)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, n - 1$$

3)最后,利用所抽取的水印序列和原始水印序列进行相关性分析,以检验其是否为嵌入的水印序列。若相关值大于检测门限  $\text{ThrD}$ ,则认为它是嵌入的水印序列,反之相反。相关函数如下:

$$\text{Cor}(w^d, w) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i^d - \bar{w}^d)(w_i - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i^d - \bar{w}^d)^2 \sum_{i=0}^{N-1} (w_i - \bar{w})^2}} \quad (5)$$

式中,  $w^d$  是从待检测模型中提取出来的水印信息;  $w$  是原始水印信息;  $\text{Cor}(w^d, w)$  是水印  $w^d$  和  $w$  的相关系数。

## 2 3维局部几何空间盲水印的实施

通常,数字水印实施过程主要包括:水印嵌入、提取与检测分析。本文对3维局部几何空间盲水印方法也同样分3步讨论。

### 2.1 水印嵌入

如前所述,本文方法在所选定局部几何空间的基础上,向3维模型嵌入数字水印信息,其水印的嵌入过程如下:

1)计算每个顶点所对应的局部几何空间

首先,根据模型的拓扑结构,找出每个顶点的相邻顶点,并剔除相邻顶点数目小于3的顶点;然后,计算出任意3个不共线的相邻顶点及目标顶点组成的所有局部几何空间,按照1.1节中的定义选择相应的局部几何空间。

2)选择合适的局部几何空间

为了保证嵌入水印后的3维模型仍具保真度和水印的可检测性,需要在候选的局部几何空间中选择那些符合要求的目标空间。一般来说,夹角阈值  $\theta_{th}$  取值  $\frac{90}{m}$ 。局部几何空间的夹角参数  $\theta$  必须满足  $\varphi = \min\left(\left|\theta - \frac{180}{m}(i+0.5)\right|\right) < \theta_{th}$ ,方可针对指定的水印比特位,在该目标局部几何空间内嵌入水印序列的索引和二进制数值。

3)计算嵌入后的顶点位置

对于每个嵌入基元,一旦确定了所要嵌入水印序列  $w$  的某一位,即索引值,那么要嵌入的二进制数值  $w(\text{index})$  也就确定了。利用式(1)可计算出顶点在嵌入水印序列的索引值后的位置,并进行第一次位置的调整。然后,再利用式(2)计算出顶点在嵌入二进制数值后的位置,对其进行第二次位置的

调整。如此循环进行,待所有满足夹角阈值条件的局部几何空间都嵌入了水印后,就得到含有水印的3维模型。

为提高鲁棒性,可对3维模型重复嵌入水印,达到抵抗剪切攻击的目的。另外,还需对落选的局部几何空间进行微调,使相应的顶点处于不含水印的位置,以改善嵌入水印后模型的视觉效果。

### 2.2 水印提取与检测

由于每个嵌入基元所嵌入的水印信息包含了索引信息和水印信息,则水印的提取与检测相对简单。在检测过程中,首先,计算出每个顶点所在的局部几何空间,并计算出夹角参数  $\theta$ ,如果满足式(3),则该局部几何空间含有水印,否则不含有水印。若含有水印,据投影点在平面  $\Psi$  上的位置和式(4)的规则,可进一步确定包含的水印信息是0还是1。最后,再据式(5)对所抽取的水印序列和原始水印序列进行相关性分析,以检验其是否为嵌入的水印序列。

## 3 实验结果与分析

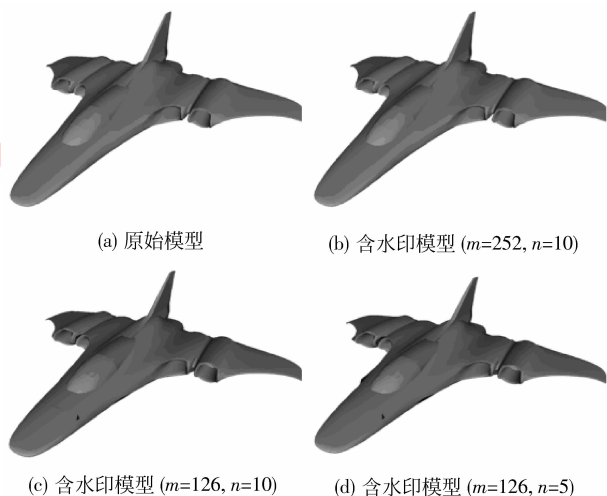
为了验证算法的鲁棒性和可读水印的不可见性,对同一个3D模型进行多次实验,具体步骤如下:首先,选取不同参数,对同一3D模型进行水印嵌入、检测和提取操作,评估嵌入效果和对算法鲁棒性的影响。然后,选择一含有水印的模型,对其进行各种攻击后检测水印的完整性,分析水印鲁棒性。在实验中,所嵌入的水印信息为“空间信息中心”6个字,编码长度为36比特的二进制水印序列。

### 3.1 可读水印的不可见性实验

由第2节的分析可知,式(1)中的  $m$  值、式(2)中的  $n$  值和夹角阈值  $\theta_{th}$  对算法的鲁棒性和不可见性有较大影响。为确定合适的  $m$  值和  $n$  值,实验选择了图3中的不同  $m$  值和  $n$  值进行比较分析。由此发现,若嵌入相同的水印信息,  $m$  和  $n$  的取值越大,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,但相应的会减弱算法的鲁棒性。然而,实验证明  $m$  取值252,  $n$  值取10;夹角阈值  $\theta_{th}$  取值  $\pi/126$  则既可保持算法的鲁棒性,又可满足视觉效果。

### 3.2 水印鲁棒性测试

由于提出水印算法的嵌入基元是局部坐标空间,并通过调整顶点在局部坐标空间中的相对位置嵌入水印信息,则水印鲁棒性测试主要考虑3D模

图 3  $m$  和  $n$  对模型视觉效果的影响Fig. 3 Visual quality of models watermarked with different  $m$  and  $n$  value

型的平移、旋转、均匀缩放、顶点乱序等操作形成的攻击,以及剪切攻击和压缩攻击。

从表 1 的分析实验结果可知,平移、旋转、均匀缩放、顶点乱序等操作或攻击没有改变的模型的顶点数目与拓扑结构,且对顶点在局部几何空间中的相对位置无任何影响,故对水印不具有破坏性,可认为算法对这些攻击具有非常强的鲁棒性。

表 1 实验结果

Tab. 1 Experimental results

	顶点数目	相似度
旋转	2 755	1.0
均匀缩放	2 755	1.0
顶点乱序	2 755	1.0
剪切 48%	1 450	1.0
剪切 78%	621	0.93
简化 10%	2 526	0.91
简化 20%	2 301	0.77

与此同时,剪切攻击和网格简化攻击也是常见的 3 维模型攻击手段。因此,为了提高算法对剪切攻击和网格简化攻击的抵抗能力,可采用重复嵌入的方法,保证同一个水印位被多次嵌入到模型的各个角落。在本文提出的水印算法中,一个局部几何空间嵌入水印的一个比特,模型的顶点越多,可用的局部几何空间相应就越多;相应地,水印重复嵌入的次数越多,抵抗剪切攻击和网格简化攻击的能力也就越强。图(4)分别是旋转、缩放、剪切和压缩(网格简化)攻击后的模型。表 1 中的实验结果表明,

在剪切了 48% 后,检测出的水印仍能保持 1.0 的相似度;在剪切了 78% 后,还能保持 0.93 的相似度;甚至剪切攻击后的模型在剩余 20% 顶点的条件下仍能保证 0.9 以上的水印相似度,表明本文算法具有非常强的鲁棒性。

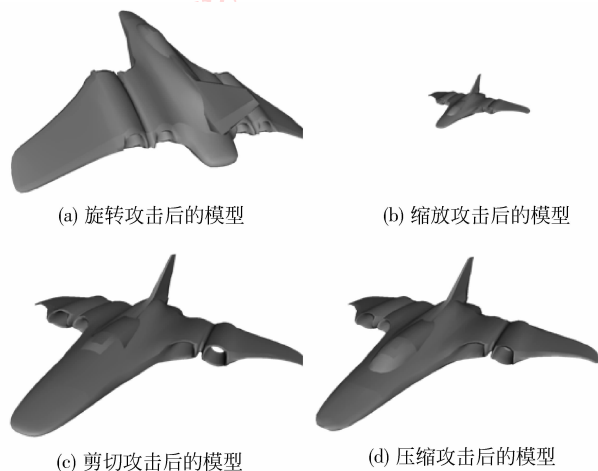


图 4 实验结果

Fig. 4 Experimental results

相比之下,算法对网格简化攻击(压缩攻击)的抵抗能力稍弱,如:从表 1 底部的分析结果可发现,若只对模型进行 10% 的压缩,则可保持 0.91 的相似度;压缩至 20% 后,相似度明显降低至 0.77。然而,压缩后的模型明显失真,所有的顶点信息都受到了改动,已经没有什么实用价值。总之,剪切攻击和网格简化攻击后剩余的顶点越多,成功检测出水印的概率越高。

### 3.3 盲水印检测分析

由于本文提出的水印算法在每个嵌入基元中所嵌入的水印信息包含了索引信息和水印信息,则水印的提取与检测相对简单,并在检测水印时无需借助原始模型进行重定位等预处理操作,故算法具有较低的时间空间复杂度,并属于盲水印算法。

## 4 结 论

提出一种针对 3D 模型中 3 维网格的局部几何空间的盲水印算法,其特点表现为

- 1) 新算法通过定义 3D 模型网格中局部几何空间,并修改其顶点在局部几何空间中的位置,嵌入、检测和提取可读水印,并可使其保持不可见性;
- 2) 提出的新 3 维网格模型水印算法,不仅适用

于规则网格和非规则网格,且具有很强的鲁棒性,其中:对平移、旋转、均匀缩放、顶点乱序等操作,均对顶点在局部几何空间中的相对位置无任何影响;相对而言,对剪切攻击在超过剪切率达78%时,鲁棒性略减弱;而算法的抗压缩攻击的能力稍稍显薄弱,即:当压缩率过高,会使3D模型产生明显变形,使所有顶点信息受到改动,但也失去实际应用价值;

3)算法在进行检测水印时,不需要借助原始3D模型,实现了盲水印的目标。

然而,本算法是以局部几何空间作为嵌入基元,当模型数据量较小时,往往不能嵌入全部的可读水印信息,或者不能多次嵌入,则有可能降低水印的鲁棒性;另外,水印嵌入强度还不能自适应于模型几何特征,以及如何有效地对模型进行多次加水印,也是下一步研究的重点内容。

#### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Zhang Xinyu, Peng Wei, Zhang Sanyuan, 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.]
- [ 2 ] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Embedding data in 3D models [C]// *Proceedings of the European Workshop on Interactive Distributed Multimedia Systems and Telecommunication Services' 97*. Berlin:Springer, 1997:1-10.
- [ 3 ] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models [C]//*Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia' 97*. Washington, DC, USA:ACM, 1997:261-272.
- [ 4 ] Yeung M, Yeo B L. Fragile watermarking of three-dimensional objects[C]// *Proceedings of International Conference on Image Processing*. Los Alamitos CA: IEEE Computer Society, 1998: 442-446.
- [ 5 ] Benedens O. Geometry-based watermarking of 3D models [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1999,19(1):46-55.
- [ 6 ] Benedens O. Two high capacity methods for embedding public watermarks into 3D polygonal models [C]//*Proceedings of the Multimedia and Security-Workshop at ACM Multimedia*. New York:ACM, 1999:95-99.
- [ 7 ] Benedens O. Watermarking of 3D-polygon-based models with robustness against mesh simplification [C]// *Proceedings of SPIE:Security and Watermarking of Multimedia Contents*. San Jose:SPIE, 1999:329-340.
- [ 8 ] Benedens O, Busch C. Towards blind detection of robust watermarks in polygonal models [J]. *Eurographics*, Blackwell Publishers, 2000,19(3):199-208.
- [ 9 ] Kanai S, Date H, Kishinami T. Digital watermarking for 3D polygons using multi resolution wavelet decomposition [C]// *Proceedings of International Workshop on Geometric Modeling*. IFIP/WG5.2/Geo-6'98,1998:296-307.
- [ 10 ] Praun E, Hoppe H, Finkelstein A. Robust mesh watermarking [C]//*Proceedings of SIGGRAPH*. New York:ACM, 1999:69-76.
- [ 11 ] Ohbuchi R, Takahashi S, Miyazawa T, et al. Watermarking 3D polygonal meshes in the mesh spectral domain [C]//*Proceedings of Graphics Interface*. Toronto:Canadian Information Processing Society, 2001:9-17.
- [ 12 ] Yin K K, Pan Z G, Shi J Y, et al. Robust mesh watermarking based on multi resolution processing [J]. *Computers & Graphics*, 2001,25(3):409-420.
- [ 13 ] 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.
- [ 14 ] Mao X, Shiba M, Imamiya A. Watermarking 3D geometric models through triangle subdivision [C]//*Proceedings of SPIE: Security and Watermarking of Multimedia Contents*. San Jose: SPIE, 2001:253-260.
- [ 15 ] Sun S S, Pan Z G, Li L, et al. Robust 3D model watermarking against geometric transformation [C]//*Proceedings of CAD / Graphics*. Macao:Welfare Printing Limited, 2003:87-92.
- [ 16 ] Li L, Zhang D, Pan Z G, et al. Watermarking 3D mesh by spherical parameterization [J]. *Computers & Graphics*, 2004, 28(6):981-989.
- [ 17 ] Uccheddu F, Corsini M, Barni M. Wavelet-based blind watermarking of 3D models [C]//*Proceedings of the Workshop on Multimedia and Security*. New York:ACM, 2004:143-154.