

一种基于量化方法的3D模型盲水印算法

陈冠雄^① 姚志强^{①②}

^①(福建师范大学网络安全与密码技术重点实验室 福州 350007)

^②(福建师范大学软件学院 福州 350007)

摘要: 相对非盲算法而言,盲算法因在水印检测时不需要传输原始载体而使其应用更为广泛。虽然盲水印算法的鲁棒性稍弱,但仍有提高的空间。该文提出一种3D网格盲水印算法,利用伪随机数产生经过模型质心的直线,选取以直线与模型交点为球心的球形邻域作为嵌入对象,水印信息是通过抖动调制邻域内顶点的重心来嵌入的。因为重心依赖于球形邻域所有顶点坐标,所以需解决由调整后的重心逆向估计邻域内顶点坐标问题,文中给出相应的算法。水印算法除了具有抵御顶点重排的免疫力外,也把每比特水印关联到直线与模型的多个交点和多个交点的球形邻域内的成组顶点上,能较好地抵抗剪切攻击和随机噪声。实验数据说明了算法的鲁棒性能。

关键词: 数字水印; 3D模型; 盲检测; 量化

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2963-06

A Blind Watermarking Scheme Based on Quantization for 3D Models

Chen Guan-xiong^① Yao Zhi-qiang^{①②}

^①(Key Laboratory of Network Security and Cryptology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

^②(Faculty of Software, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Generally blind watermarking schemes are more secure in various applications because the cover meshes are absent in the watermark extraction stage, even if they are less robust than non-blind ones. But higher robustness of the blind watermarking schemes is pursued. A blind watermarking algorithm for 3D meshes is proposed in this paper. Firstly, a group of lines through the model center depending on a pseudorandom number is generated. Then the intersection points of these lines and the model's surface are chosen as embedding objects. Neighbor balls are centered on these intersection points and all vertices within the balls are adjusted to new positions according to watermark bits. Most lines have two or more intersections with the model and most balls contain several vertices, so by distributing a bit of watermark into multi-ball and multi-vertex make the algorithm be robust against cropping and random noise. Because the algorithm doesn't choose embedding objects according the vertex number, it can resist vertex reorder attack. The algorithm is also robust against translation, rotation and scaling attacks. Finally the robustness is verified by a set of experiments results.

Key words: Digital watermarking; 3D model; Blind detection; Quantization

1 引言

多媒体技术的发展极大地提高了多媒体信息发布处理的方便性,人们可以通过网络方便复制、存储媒体,但与此同时,版权问题也越来越严重,如何有效地保护个人权益尤其是数字媒体版权已成为版权研究领域的一大热点。数字水印技术就是将特定的信息加入到数字媒体中,从而使媒体具有可识别性和可证明性。近年来,对声音、图像、视频水印的研究已有很大进展,3D模型水印也不例外。

3D模型的水印算法按工作域可分为空间域算法和变换域算法,按水印提取方式分为需要参考原始模型信息的非盲水印算法和不需要参考原始模型信息的盲水印算法。变换域算法方面,文献[1]等提出网格参数化的水印算法,网格先映射为球面信号,对球面信号均匀重采样再施以球面调和变换,实际上球面调和变换是球面经线和纬线方向的傅里叶变换的组合,但球面调和变换后的模型变形较严重,且算法复杂度高,这种傅里叶变换域上的水印能抵抗噪声、滤波、网格重采样、相似变换、剪切、顶点重排、网格等攻击。Motwani^[2]等提出一种自适应的模糊水印算法,算法采用基于小波和模糊逻辑的方法计算要嵌入到模型中的水印幅度最优值并通过

2008-12-01 收到, 2009-04-30 改回

国家自然科学基金(60673014)和福建省自然科学基金(2008J0013)资助课题

修改小波系数嵌入水印,可以抵抗剪切、噪声、网格平滑和仿射变换等多种操作,水印的检测需要原始模型数据。Wang 等提出变换域盲水印算法^[3,4]。在文献[3]中算法对半规则网格模型进行小波分解,通过修改分解后不同分辨率级别的小波系数范数来嵌入水印。算法可以抵抗相似变换、噪声、网格平滑等操作,但不能抵抗剪切攻击。文献[4]中提出一种基于非均匀离散傅里叶变换的3维水印算法,算法利用仿射不变范数对顶点进行分区,接着通过非均匀离散傅里叶变换并量化步长来嵌入水印,可以抵抗相似变换、仿射变换和噪声攻击。文献[5]用松弛算子构造网格的B-A金字塔,并在粗网格上加载水印,这种多分辨率水印方法可抗噪声、滤波、增强、网格简化,但提取水印要求注册网格和重采样网格。

与变换域算法相比,空间域算法计算相对简单,水印加入和检测操作快捷,且非盲水印算法的鲁棒性相对高一些,可以抵抗相似变换、网格简化和噪声攻击^[6,7],也可以做到抗剪切^[8]。但从更高的安全性角度考虑,研究人员倾向于探索盲水印^[9-11]。文献[9]算法通过将3D网格模型反复映射到两个约束集中并修改约束集顶点位置来嵌入水印,可以抵抗网格简化、剪切等攻击。文献[10]提出一种3D模型的仿射不变量,基于该不变量提出一种空域算法,利用加速的顶点和重心连线与模型求交的方法得到交点,从而计算重心交点距离比,通过修改一个三角形面片3个顶点对应的RBC嵌入水印字符。算法可以抵抗仿射变换、顶点乱序及一定程度的噪声攻击。文献[11]提出一种基于局部坐标系统的数字水印算法,算法先将要嵌入水印的对象变换到局部正交坐标系中,再将其转换到局部球面坐标系,通过调整顶点在球面坐标系中的位置来嵌入水印,具有较高的水印容量并可以抵抗相似变换攻击。文献[12]提出一种基于积分不变量的半脆弱3D水印算法,通过修改一些顶点的积分不变量来嵌入,算法可以抵抗刚性变换、格式转换和一些恶意攻击如噪声和剪切操作。但目前空间域盲水印算法多不具备同时抵抗剪切和噪声攻击的能力,如文献[9]逊于抵抗噪声攻击,文献[10,13]不能抵抗剪切操作。为此,本文提出一种新的可抵御相似几何变换、剪切、噪声、顶点重排序等攻击的空间域盲水印算法,利用伪随机数产生一系列与模型相交的直线,接着量化交点到模型质心的距离,通过修改局部顶点的重心投影位置来嵌入水印,算法在提取水印时不需要原始模型。

2 剪切和噪声统计分析

我们先实验观察剪切对顶点集的影响。设过模型质心的 k 条直线与模型的交点个数为 k' ,一般情况下 $k' \geq 2k$ 。本文的思路是如果以交点为中心,以 r 为半径设定球边界,则有 k' 个球形邻域;当相邻的直线夹角大于某个值且 r 取值适当,球形邻域不重叠。在模型受到剪切攻击时,球形邻域出现3种情况之一:(1)整个邻域被切除,(2)球形邻域内的部分模型顶点被切除,(3)不变,其重心在直线上的投影位置也不变。若对球形邻域顶点嵌入水印,那么在提取时就可以通过投影位置来判断球形邻域是否含有水印。具体的初步实验数据情况是:选取Rabbit, VenusHead和Bunny模型,如图1(a)-1(c)所示,顶点个数分别为5002, 10002和5002,生成100条过模型质心的直线,相邻直线夹角 $\beta = 11.9^\circ$,直线与模型的交点个数 k' 分别为202, 200和210,容易计算以交点为中心,以 $d \cdot \sin(\beta/2)$ 为半径的球形邻域内顶点的重心及其在直线上的投影(这里 d 为交点到模型质心的距离)。现分别用与 x 轴, y 轴, z 轴垂直的平面裁减模型(分别表示为方式 x , 方式 y 和方式 z),在这些仿真攻击下,累计各直线上至少有一球形邻域重心投影位置偏差距离不超过 $\Delta/2$ 的直线(这里 $\Delta = 0.2$),用 cnt 表示。令 $\text{rate} = \frac{\text{cnt}}{\text{直线数}} \times 100\%$,结果示于表1。

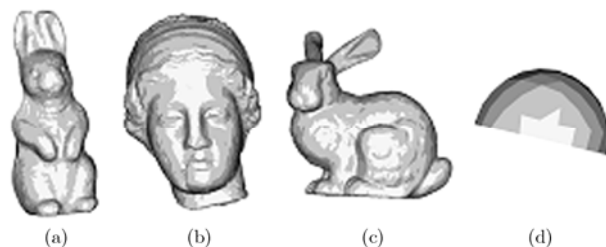


图1 实验模型图

表1 rate值

模型与剪切方式	40%	50%	60%	70%	
VenusHead	方式 x	100	100	77	53
	方式 y	100	92	66	47
	方式 z	100	97	78	62
Rabbit	方式 x	100	94	69	46
	方式 y	100	93	69	44
	方式 z	100	98	52	17
Bunny	方式 x	100	100	75	51
	方式 y	100	78	56	35
	方式 z	100	98	71	50

实验发现剪切率为 50% 时，多数模型中超过 90% 的直线上至少有一球形邻域重心投影位置偏差未超过 $\Delta/2$ 。本文利用球形邻域重心投影位置偏差在容错区间 $(-\Delta/2, +\Delta/2)$ 特点，提出对剪切鲁棒的抖动量化调整投影位置的水印方法。

为统计噪声攻击对顶点集重心在直线上投影位置的影响，选取一个半球模型做实验，如图 1(d)，其顶点数为 85，面片 144。生成的直线经过半球重心并与切割平面垂直，用均匀的噪声，对所有顶点进行扰动。统计不同噪声强度下半球重心在射线上投影位置相对于原位置的偏移量，在不同的噪声强度下进行 5 次实验并取偏移量平均值，结果如表 2 所示，数据显示重心投影的偏移量很小。

表 2 噪声强度对顶点集重心投影位置的影响

噪声强度 (%)	0.5	1	1.5	2
偏移量 (10^{-4})	2.07	4.90	6.51	11.8

利用以上在剪切和噪声攻击下顶点集重心投影位置变化较少这一特点，本文提出一种水印算法，通过量化步长并调整顶点集重心的投影位置来嵌入水印。

3 数字水印系统

在阐述水印算法之前，先给出若干术语、参数及参数计算方法。设 Dijkstra 距离表示模型中两顶点之间的最小边数， $d(p, q)$ 表示点 p 与 q 的欧氏距离。

定义 1 与顶点 v 的 Dijkstra 距离不超过 e 的所有模型顶点(不包括 v 本身)称为 $D_v(e)$ 域点集； $D_v(e)$ 域内所有顶点坐标的平均值称为 $D_v(e)$ 域重心。

定义 2 以点 $v \in R^3$ 为球心，半径不超过 r 的球体内的所有模型顶点称为 $B_v(r)$ 域点集； $B_v(r)$ 域内所有模型顶点坐标的平均值称为 $B_v(r)$ 域重心。

3.1 水印嵌入

水印嵌入算法步骤如下：

步骤 1 对模型进行归一化处理，并计算模型质心 $m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$ ，平移模型使质心 m 与坐标系原点对齐，计算任一顶点 v 的 $D_v(e)$ 域重心，(经验上 e 取 5 或 6)。为简洁起见，也称 $D_v(e)$ 域重心为域重心。设与质心 m 距离最大的域重心为 $q_g^{(f)}$ ，距离最小的域重心为 $q_g^{(n)}$ ，当有多个重心距离相等的最远域重心(或最近域重心)时，把它们之和作为 $q_g^{(f)}$ (或 $q_g^{(n)}$)。

以 m 为中心旋转模型使 $q_g^{(f)}$ 位于 x 轴正半轴上，使 $q_g^{(n)}$ 位于 xoy 平面上，且使其 y 轴坐标值大于 0。一般情况下， m ， $q_g^{(f)}$ ， $q_g^{(n)}$ 3 点不共线，用这种方法对齐的模型位置是唯一的。

步骤 2 设水印是由 1 和 0 组成的序列，其长度为 N_w ，取 $N_l = kN_w$ ，整数 $k \geq 1$ 。设置一个伪随机数种子(设为密钥 key)，用直线生成算法生成 N_l 条直线簇 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{N_l}\}$ (限于篇幅，不再赘述直线生成算法)，每比特水印映射到 k 条直线。将每一直线视为以质心 m 为端点的两条射线，设这簇射线与模型的交点之集为 Q ，令 $d_m = \max_{q \in Q} d(m, q)$ ，且使 $d(m, q)$ 取最大值的点为 q 。取 $r = d_m \cdot \sin(\theta/2)$ ，并设 $B_q(r)$ 域重心为 q_g ， $D_m = \mathbf{m}q_g \cdot \mathbf{m}q / \|\mathbf{m}q\|$ ，则令步长为

$$\Delta = D_m / \text{step_n} \quad (1)$$

其中 step_n 为量化区间数，通过 3D 模型数据分析来确定，在本文第 4 节阐述。

步骤 3 取水印比特 $w=0$ 或 1，与 w 关联的 $2k$ 条射线 $l_i (i=1, 2, \dots, 2k)$ 与模型的交点记为 $q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in_i}$ ，将 $d_{is} = d(m, q_{is}), s=1, 2, \dots, n_i$ 递减排序，分别得到距离和交点的置换 $d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{in_i}$ 和 $q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in_i}$ 。接着依照交点置换顺序逐一计算 $r_{it_j} = d_{it_j} \cdot \sin(\theta/2) (j=1, 2, \dots, n_i)$ 和 $B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$ 域中未嵌水印顶点集的重心 p_{it_j} ，设 p_{it_j} 在 l_i 上的投影为点 p'_{it_j} ， $D = d(m, p'_{it_j})$ ， $t = \lfloor D/\Delta \rfloor$ ， $c = D - \Delta \cdot t$ ，由式(2)求得初始的水印抖动调制幅度，即

$$\delta = \begin{cases} (t + 0.5)\Delta - D, & \text{当 } w \text{ 与 } t \text{ 奇偶性相异} \\ (t + 1.5)\Delta - D, & \text{当 } w \text{ 与 } t \text{ 奇偶性相同, 且 } c > \Delta/2 \\ (t - 0.5)\Delta - D, & \text{当 } w \text{ 与 } t \text{ 奇偶性相同, 且 } c \leq \Delta/2 \end{cases} \quad (2)$$

步骤 4 拟对 $B_{v_{it_j}}(r_{it_j})$ 域中未嵌水印的每一个顶点 v_o 采用形如 $v_{ow} = v_o + \beta_{it_j} \cdot \mathbf{m}q_{it_j} / \|\mathbf{m}q_{it_j}\|$ (β_{it_j} 为标量)的加性水印公式调制水印以得到含水印的模型顶点 v_{ow} 。初始时，取 $\beta_{it_j} = \delta$ ，这时 q_{it_j} 产生 $\delta \cdot \mathbf{m}q_{it_j} / \|\mathbf{m}q_{it_j}\|$ 增量(记 $\hat{q}_{it_j} = q_{it_j} + \delta \cdot \mathbf{m}q_{it_j} / \|\mathbf{m}q_{it_j}\|$)；同时，因为 d_{it_j} 的增量为 δ ，因此 $r_{it_j} = (d_{it_j} + \delta) \sin(\theta/2)$ ，即 $B_{\hat{q}_{it_j}}(r_{it_j})$ 球半径的增量为 $\delta \sin(\theta/2)$ ，显然 $B_{\hat{q}_{it_j}}(r_{it_j} + \delta \sin(\theta/2))$ 域中的顶点较 $B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$ 中的顶点有所增减，反过来必然影响到 $B_{\hat{q}_{it_j}}(r_{it_j} + \delta \sin(\theta/2))$ 域的重心位置和 D 值。为此，令 $B = B_{\hat{q}_{it_j}}(r_{it_j} + \delta \sin(\theta/2)) - B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$ ，把 B 中的顶

点按一定规则全部移入 $B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$ 域, 并重新计算 $B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$ 域重心、 D 和 δ , 如此迭代, 直到 $B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$ 域不变。其具体实现用以下算法伪代码描述:

```

 $q_{it_j} \leftarrow$  射线  $l_i$  与模型的交点;
 $m_1 \leftarrow \delta$ ;  $m_2 \leftarrow -\delta$ ;
while  $m_1$  和  $m_2$  异号
     $\hat{q}_{it_j} \leftarrow q_{it_j} + \delta \cdot \mathbf{mq}_{it_j} / \|\mathbf{mq}_{it_j}\|$ ;
    { 记  $B = B_{\hat{q}_{it_j}}(r_{it_j} + \delta \sin(\theta/2)) - B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$ ,
    把  $B$  中各顶点按一定规则全部移入  $B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$  域}
    while  $v_b \in B$  尚在  $B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$  域外
        dif  $\leftarrow d(v_b, q_{it_j}) - r_{it_j}$ ;
         $v'_b \leftarrow v_b - \text{dif} \cdot \mathbf{q}_{it_j} \mathbf{v}_b / \|\mathbf{q}_{it_j} \mathbf{v}_b\|$ ;
    end_while
    {用式(2)计算  $\delta'$ }
     $p'_{it_j} \leftarrow B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$  域重心在  $l_i$  的投影;
     $D \leftarrow d(m, p'_{it_j})$ ;  $t \leftarrow \lfloor D / \Delta \rfloor$ ;  $c \leftarrow D - \Delta \cdot t$ ;
     $\delta' \leftarrow$  式(2);  $m_2 \leftarrow \delta'$ ;  $\delta \leftarrow \delta'$ ;
end_while
通过迭代求得  $\delta$  之后, 对  $B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$  域中的每一个

```

顶点 v_b , 令 $v_{bw} = v_b + \delta \cdot \mathbf{mq}_{it_j} / \|\mathbf{mq}_{it_j}\|$, v_{bw} 即为抖动调制后的顶点坐标。

步骤 5 重复执行步骤 3-步骤 4, 直到所有水印比特被嵌入。

步骤 6 计算当前模型的质心 m_w , V 为模型顶点全集, $V_w = \{v_w | v_w \text{ 为模型中调制水印的顶点}\}$, 令:

```

 $v'_R = v_R - (N/R)m_w$ ,  $v_R \in V - V_w \cup D_{q_g^{(f)}}(e) \cup D_{q_g^{(n)}}(e)$ 
其中,  $N$  为模型顶点数,  $R$  为  $V - V_w \cup D_{q_g^{(f)}}(e) \cup D_{q_g^{(n)}}(e)$  元素数目。这样得到水印模型。

```

以上算法使每比特水印关联到多条射线, 每条射线又有若干个 $B_v(r)$ 域抖动调制该水印比特, 当模型遭受一定程度的剪切时, 仍保留一定量的水印信息, 因此算法有抵御剪切攻击的能力; 而且每比特水印抖动调制到 $B_v(r)$ 域多个顶点之后, 因噪声的均值为 0, 所以它对 $B_v(r)$ 域重心和重心在射线上投影的影响较小, 有较强的噪声免疫力。

3.2 水印提取

水印提取时不需要原始模型, 而要用到密钥 key, 过程如下:

步骤 1 对模型归一化处理计算每个顶点的 $D_v(e)$ 域重心, 选出与质心距离最大的和最小的重

心, 同嵌入算法步骤 1, 对齐模型。

步骤 2 将密钥 key 代入直线生成算法产生空间中的直线簇 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{N_l}\}$ 。

步骤 3 对当前要提取的水印比特, 因每比特水印与 $2k$ 条射线 $l_i (i = 1, 2, \dots, 2k)$ 关联, 设 l_i 与模型的交点为 $q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{in_i}$, 将 $d_{is} = d(m, q_{is}), s = 1, 2, \dots, n_i$ 递减排序, 分别得到距离和交点的置换 $d_{it_1}, d_{it_2}, \dots, d_{it_{n_i}}$ 和 $q_{it_1}, q_{it_2}, \dots, q_{it_{n_i}}$ 。接着依照交点置换顺序逐一计算 $r_{it_j} = d_{it_j} \cdot \sin(\theta/2) (j = 1, 2, \dots, n_i)$ 和 $B_{q_{it_j}}(r_{it_j})$ 域中未提取水印顶点集的重心 p_{it_j} , 及其在 l_i 上的投影点 p'_{it_j} , $D_{it_j} = d(m, p'_{it_j})$, $t_{it_j} = \lfloor D_{it_j} / \Delta \rfloor$, $c_{it_j} = D_{it_j} - \Delta \cdot t_{it_j}$ 。为描述方便, 称 $(x + 0.5)\Delta, x = 0, 1, 2, \dots$ 为可信点位置。当 t_{it_j} 为偶数, 且 p'_{it_j} 在可信点位置, 则提取 1; 当 t_{it_j} 为奇数, 且 p'_{it_j} 在可信点位置, 则提取 0。若 p'_{it_j} 不在可信点位置, 令 $E = \{j | t_{it_j} \text{ 为偶数}\}$, $O = \{j | t_{it_j} \text{ 为奇数}\}$, $n_1 = |E|$, $n_2 = |O|$, ($|\cdot|$ 表示集合元素数目), 并计算投影点到最邻近的可信点位置的

距离 $C_{\text{sum}1} = \sum_{j \in E} |c_{it_j} - 0.5|$, 和 $C_{\text{sum}2} = \sum_{j \in O} |c_{it_j} - 0.5|$, 提取的水印比特:

$$w = \begin{cases} 1, & \text{当}(n_1 > n_2) \text{ 或 } (n_1 = n_2 > 0, C_{\text{sum}1} < C_{\text{sum}2}) \\ 0, & \text{当}(n_1 < n_2) \text{ 或 } (n_1 = n_2 > 0, C_{\text{sum}1} \geq C_{\text{sum}2}) \\ 1, & \text{当 } n_1 = 0 \text{ 且 } n_2 = 0 \end{cases}$$

当 n_1 和 n_2 都为 0 时, 我们认为此水印比特已丢失, 用 1 代替。

步骤 4 重复步骤 3 直到所有水印比特提取完毕。

4 实验结果与分析

本文用相关性来衡量水印的质量^[5], 计算相关性时要把原水印和提取水印的比特 0 映射为 -1, 比特 1 保持不变; 用 $\text{SNR} = 10 \lg(\text{var}\|v_o - m\| / \text{var}\|v_o - v_{ow}\|)$ 函数来衡量水印嵌入后模型的失真度, 这里 $\text{var}(x)$ 为变量 x 的方差, m 为模型质心, v_o 和 v_{ow} 分别表示原始模型顶点和水印模型顶点。我们选择 100 bit 的水印, $e = 5$, 直线数与水印比特数相等, 从 Venus 模型(顶点数和面片数分别为 10002 和 20000) 的实验数据看出, step_n 增大(即 Δ 减小), SNR 也增大, 如图 2 所示, 说明不可觉察性更佳。反过来, Δ 减少, 鲁棒性降低。所以折衷选取 step_n = 2000。

通常为了证明模型中存在水印信息, 要求提取到的水印相关性值大于某一阈值。为确定阈值, 实

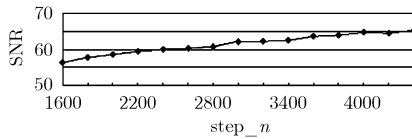


图 2 step_n 与 SNR 关系

验时随机生成 30000 个与原水印不同的长度为 100 的水印信号，分别与原始水印做相关性检测，实验得到的相关性最大值为 0.3996。为提高准确性，本文把阈值定为 0.5，认为当检测得到的相关性大于 0.5 时水印是存在的。下面进行鲁棒性分析仿真实验。

(1)剪切攻击实验 选取 3 个模型，分别为 Venus 模型(顶点 10002，面片 20000)，Bunny(顶点 12581，面片 24999)和 Horse 模型(顶点 10002，面片 20000)，用一组平行的平面剪切模型，剪切率分别为 40%，50%，60%和 70%。以 Bunny 为例的水印嵌入前后模型示于图 3(a)~3(b)，图 3(c)显示剪切 50%的 Horse 模型，算法鲁棒性能指标列于表 3。



图 3 原始模型与水印模型

表 3 剪切率 40%~70%的 Corr 值

模型	40%	50%	60%	70%
Venus	1.0000	1.0000	0.7669	0.6183
Bunny	1.0000	1.0000	0.8138	0.5327
Horse	1.0000	1.0000	0.7901	0.4985

当模型受到剪切攻击时，对于未受影响的 $B_v(r)$ 域可以准确地提取出水印比特，对于个别顶点丢失的 $B_v(r)$ 域，由于 $B_v(r)$ 域重心投影位置并未发生大的变化即仍落在原步长范围内，仍能较准确地提取到水印。

(2)噪声攻击实验 对嵌入水印后的 Venus 模型(顶点 10002，面片 20000)做实验，水印长度 50，每比特水印映射到两条直线上，设定 step_n 值为 2000， e 为 5。在不同噪声强度下进行十次实验，取 Corr 平均值，实验结果如表 4 所示。

由于算法通过调整 $B_v(r)$ 域重心位置嵌入水印，因此可以较好地抵抗噪声攻击。算法在提取水印前

表 4 噪声攻击实验结果

噪声强度 (%)	0.1	0.2	0.25	0.3	0.35
相关性	1.0000	0.9450	0.8289	0.6819	0.5822

对模型进行归一化，因此也可以抵抗相似变换与噪声的混合攻击。

(3)简化攻击实验 选取的模型及参数设置与噪声实验相同，实验结果如表 5 所示，表明算法具有一定的抗简化攻击能力。

表 5 简化攻击实验结果

简化率 (%)	3	5	7	8	9
相关性	0.9606	0.8000	0.6795	0.5993	0.5230

(4)相似变换实验 从算法容易看出平移、旋转、缩放不影响水印的提取，相关性均为 1。

(5)重排序实验 随机选择两个顶点交换顺序，执行 $10 \times N$ 次(N 为模型顶点个数)，相关性为 1。

(6)算法比较 本文与文献[14]的算法相比较，用 stanford bunny 模型(顶点 35947，面片 69451)做实验，水印长度 50。算法设置 1 bit 水印对应 2 条直线， e 的值为 6，在 SNR 与文献[14]相同的情况下(SNR 值 43)进行实验。噪声和剪切攻击的实验结果如表 6 所示，其中噪声实验为用均值为 0 的噪声对所有顶点扰动，分别在不同强度下进行 10 次实验并取 Corr 平均值作为结果。剪切实验为用一组垂直于 x 轴的平面对模型进行切割。相比之下，由于本文算法将 1 bit 水印分布到两条直线上，并通过调整 $B_v(r)$ 域重心嵌入水印，因此具有更好的抗噪声能力。

表 6 噪声和剪切攻击实验比较

参数	1%噪声	2%噪声	剪切 60%	剪切 70%
本文算法	0.9921	0.9410	1.0000	0.8046
文献[14]算法	0.7841	0.4097	0.9203	0.7627

5 结束语

本文提出了一种 3D 模型盲检测数字水印算法，通过射线交点选取 $B_v(r)$ 域点集作为嵌入对象，算法具有一定的抗剪切和噪声攻击能力；由于嵌入对象的选取不依赖于顶点顺序，因此也可以抵抗顶点重排序攻击；算法利用最远和最近 $D_v(e)$ 域重心定位模型，并通过归一化还原模型，可以抵抗相似变换攻

击。容易看出算法适用于在模型质心对称位置至少有一端封闭的模型，我们将在后面的工作中解决两端非封闭的情形，并进一步研究抗非均匀缩放、网格细分和多重攻击的算法。

参考文献

- [1] Li Li, Zhang D, and Pan Z G, *et al.*. Watermarking 3D mesh by spherical parameterization[J]. *Computers & Graphics*, 2004, 28(6): 981-989.
- [2] Motwani M, Beke N, and Bhoite A, *et al.*. Adaptive fuzzy watermarking for 3D models[C]. International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications, Sivakasi, Dec, 2007, 4: 49-53.
- [3] Wang K, Lavoue G, Denis F, and Baskurt A. Hierarchical blind watermarking of 3D triangular meshes[C]. International Conference on Multimedia and Expo, Beijing, China, Jul, 2007: 1235-1238.
- [4] Yao Z Q, Yang S C, and Chen L P, *et al.*. A non-uniform scale, rotation and translation resilient public watermarking for 3D models[C]. International Conference on Cyberworlds, Hangzhou, China, Sep, 2008: 531-535.
- [5] Yin K K and Pan Z G, *et al.*. Robust mesh watermarking based on multiresolution processing[J]. *Computers & Graphics*, 2001, 25(3): 409-420.
- [6] Song H S and Cho N I. Digital watermarking of 3D geometry[C]. Proceedings of 2004 International Symposium on ISPACS, Seoul, Korea, Nov, 2004: 272-277.
- [7] Yu Z Q, Ip H HS, and Kwok L F. A robust watermarking scheme for 3D triangular mesh models[J]. *Pattern Recognition*, 2003, 36(11): 2603-2614.
- [8] 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.
- [9] Hu Min, Xie Ying, and Xu Liang-feng, *et al.*. A geometry property based adaptive watermarking scheme for 3D models[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2008, 20(3): 390-394.
- [9] Lee S H and Kwon K R. Mesh watermarking based projection onto two convex sets[J]. *Multimedia Systems*, 2008, 13(5-6): 323-330.
- [10] 廖学良, 王瑀屏. 一种新的三维模型水印嵌入空域算法[J]. 计算机学报, 2008, 31(10): 1848-1856.
- [10] Liao Xue-liang and Wang Yu-ping. A new spatial domain method for watermarking in 3D models[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2008, 31(10): 1848-1856.
- [11] Yang S C, Yao Z Q, and Weng B, *et al.*. A 3D model data hiding algorithm based on local coordinate system[C]. The 11th International Conference on Communication Technology, Hangzhou, China, Nov, 2008: 781-784.
- [12] Wang Y P and Hu S M. A new watermarking method for 3D models[J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(2): 285-294.
- [13] Cho J W, Prost R, Jung H Y. An oblivious watermarking for 3-D polygonal meshes using distribution of vertex norms[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(1): 142-155.
- [14] Lee S H and Kwon K R. A watermarking for 3D mesh using the patch CEGIs[J]. *Digital Signal Processing*, 2007, 17(2): 396-413.

陈冠雄: 男, 1985年生, 硕士生, 研究方向为多媒体安全.

姚志强: 男, 1967年生, 教授, 研究方向为多媒体安全、图形图像处理.