

# 基于几何特征的三维模型双重数字水印算法<sup>①</sup>

陈丽萍, 孔祥增, 姚志强

(福建师范大学 网络安全与密码技术重点实验室, 福州 350007)

**摘要:** 提出了一种新的数字水印方法,通过一次水印嵌入操作同时嵌入鲁棒和脆弱双重水印。该水印信号自适应于局部几何特征。通过嵌入的脆弱水印可以检测出顶点是否被篡改,进而在水印检测过程中通过赋予未被篡改的顶点更重的权重提出了一种水印检测权重方法。提出的算法可以实现三维模型的版权保护和完整性验证双重目的。该水印方案是专为发送者检查版权的所有权(鲁棒水印)和接收者核实所收到的媒体的完整性(脆弱水印)。

**关键词:** 三维模型; 双重数字水印; 掩蔽因子; 仿射变换

## Geometry Property-Based Double 3D Digital Watermarking Scheme

CHEN Li-Ping, KONG Xiang-Zeng, YAO Zhi-Qiang

(Key Lab of Network Security and Cryptology, Fijian Normal University, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** A novel method for the watermarking of 3D models is proposed, which is embed robust and fragile double watermark by once operation and the strength of the watermark signal is adaptive with respect to the local geometry of the model. We can detect the intact watermark vertex by fragile watermarking. Furthermore, this paper developed a weighting process of for watermark detection by let the intact watermark vertex have more weight. It can realize the double aims of the copyright protection and the integrity authentication of 3D mesh model. The watermarking schemes is designed for the sender to check the copyright ownership (robust watermarking) and for the receiver to verify the authentication of the received media

**Key words:** 3D model; double digital watermark; masking factor; affine transformation

## 1 引言

数字媒体已经被广泛地应用,因为人们可以很容易地获取、复制、处理、和传输这么媒体内容。但是,这些特征也被那些剽窃者利用。剽窃者可以利用他们来获得个人的利益,并且损害媒体提供者的合法权益。作为传统加密技术的有效补充,数字水印技术已经被应用来解决这些日益严峻的版权保护问题。根据最终应用来分类,数字水印可以分为两类:鲁棒水印和脆弱水印。在鲁棒水印中,除非版权所有者提供相关信息,否则嵌入的水印是不可检测的并且水印可以抵抗各种无意的和恶意的攻击。跟鲁棒水印相反,嵌入的脆弱水印对三维模型任何的篡改都敏感。鲁棒水印被应用来解决合法所有权保护问题,而脆弱水印可以用来验证三维模型的完整性。

虽然对于 2D 多媒体内容研究者已经做了很多工作,近来,三维对象的数字水印也越来越受到关注,而且已经获得了相当多研究的成果。大部分三维模型数字水印的文章是关于鲁棒水印的,Ohbuchi 在 1997 年第一次提出了三维网格模型数字水印算法在文献[1,2]中。在文献[3]中 Ohbuchi 提出三个水印算法即三角形相似比算法、四面体体积比嵌入算法、网格密度样式嵌入算法,该文中提出了许多有用的网格水印嵌入方法。Benedens 提出了几个水印算法:那些算法是鲁棒的对于网格简化和仿射变换<sup>[4-6]</sup>,高容量水印<sup>[7]</sup>和组合攻击<sup>[8]</sup>。在文献[9]中提出的方法是将信息分布到整个模型通过顶点置乱来实现。然而,只有很少一些文章是关于 3D 网格模型认证的,实际上第一篇关于 3D 网格模型认证的文章是 Yeo 和 Yeung 在文

① 基金项目:福建省自然科学基金(2008J0013);福建省教育厅 B 类项目(JB09061)

收稿时间:2010-11-19;收到修改稿时间:2010-12-07

献[10]中提出的。文献[11,12]改进了 Yeo 和 Yeung 提出的算法克服顶点之间相互影响等问题。Fornaro 和 Sanna 在文献[13]中提出了 CSG 模型的公钥水印认证算法。文献[14]中提出的算法可以抵抗对顶点的改写攻击。文献[15]的算法对三维模型具有平移、旋转和统一缩放不变性。

本文提出了一种具有几何自适应的三维模型双重数字水印算法。根据脆弱性、半脆弱性和完全鲁棒性,该算法实现了三维模型的版权保护和完整性认证的双重目标。该水印方案是专为发送者检查版权的所有权(鲁棒水印)和接收者核实所收到的媒体的完整性(脆弱水印)。

## 2 算法原理

### 2.1 三维模型仿射不变性

给定三维模型  $M(V,C)$ , 其中  $V$  是顶点集合且  $C$  是网格  $M$  上的邻接关系。顶点  $v_i$  记为  $v_i(x_i, y_i, z_i)$ 。为了提高三维模型水印的鲁棒性, 采用如下仿射不变性<sup>[16]</sup>操作:

**Step1.** 定义新坐标系。设  $U$  为三维模型所有顶点对的向量类, 计算距离最长的向量  $u_1$ ,  $|u_1| = \max \{ |u| : U \in U \}$ 。然后寻找距离  $u_1$  最远的顶点  $v_d$  和它到  $u_1$  的投影  $O_N$ , 并记  $u_2$  为  $v_d$  和  $O_N$  组成的向量。定义  $O_N$  为新坐标系的原点,  $u_2$  为新坐标系的  $x$  轴,  $u_1$  为新坐标系下的  $z$  轴。

**Step2.** 旋转和平移。将三维模型平移到新的原点。这样就实现了平移不变性。然后旋转模型使得向量  $u_1$  与  $z$  轴重合, 向量  $u_2$  与  $x$  轴重合。

**Step3.** 模型缩放。计算新原点到  $v_d$  的距离记为  $d_{max}$ , 然后, 缩放模型使得  $d_{max} = 1$ 。这样通过旋转、平移、和缩放操作使得三维模型变换到了直径为 1 的一个球形空间里。

通过上述变换, 使三维模型获得了平移不变性、旋转不变性和缩放不变性, 因而嵌入的水印可以抵抗平移、旋转和缩放的几何攻击。

### 2.2 水印嵌入过程

水印嵌入过程的步骤如下:

(a) 通过伪随机数字发生器对水印信息或安全密钥进行处理得到二进制随机序列作为水印信号:

$W = (w_0, w_1, \dots, w_{N-1}) : W = G(P)$ , 其中  $N$  是水印系列的长度,  $w_i \in \{-1, 1\}$ ,  $G$  表示水印发生器。  $P$  是足够大的数字集合。

(b) 根据密钥  $P$  将原始模型顶点置乱:  $V'_o =$

$\text{Permute}(V_o; P)$ , 其中  $V_o = (v_{o0}; v_{o1}; \dots; v_{oL-1})$  表示原始模型的顶点,  $L$  是顶点数,  $V'_o = (v'_{o0}, v'_{o1}, \dots, v'_{oL-1})$  表示顶点置乱后的模型顶点。

(c) 从  $V'_o$  中选择前  $S \times N$  个顶点, 将他们分成  $N$  块,  $V'_{oi} = (v'_{oi0}, v'_{oi1}, \dots, v'_{ois-1})$ , 其中  $0 \leq i < N$ 。每块有  $S$  个顶点。

(d) 每一块嵌入一个水印位

$$\vec{L}_{oij}^w = \vec{L}_{oij} + w_i \left[ \alpha \frac{\vec{M}_{oij}}{k} \right] k \vec{U}_{oij} \quad 0 \leq i < N, \quad 0 \leq j < S, \quad \text{其中 } \vec{L}_{oij} \text{ 表示从模型中心到第 } i \text{ 块的}$$

第  $j$  个顶点的向量。  $\vec{L}_{oij}^w$  表示嵌入水印后的从模型中心到第  $i$  块的第  $j$  个顶点的向量,  $\alpha$  是用来控制全局嵌入水印信号强度的强度系数,  $w_i$  是第  $i$  位水印信息,  $\vec{M}_{oij}$  是局部水印嵌入强度参数, 它使得水印嵌入强度自适应于模型的局部几何特征。  $k$  是脆弱水印的嵌入参数, 将在下一部分具体讨论该参数。向量  $\vec{U}_{oij}$  是  $\vec{L}_{oij}$  的单位向量。

(e) 恢复水印顶点的原始顺序。

水印提取过程

水印提取过程步骤如下:

(a) 将嵌入水印后的待检测三维模型  $G_1$  变换到仿射不变性空间(方法见 § 2.1) 得到  $G_2$ 。

(b) 重采样待检测模型<sup>[17]</sup>, 重采样过程如下: 从原始模型的中心到原始顶点  $V_{oi}$  作一条射线 与待检测模型相交。

如果射线跟待检测模型相交于一个或者多个点, 点  $V_{di}$  是跟  $V_{oi}$  距离最近的交点, 那么  $V_{di}$  被判定为跟  $V_{oi}$  相对应的顶点, 即  $V_{di} = V_{oi}$ 。

(c) 跟嵌入过程中的步骤(b)和(c)一样, 置乱并将原始模型和待检测模型分成  $N$  块, 原始模型记为  $V'_{oi} = (v'_{oi0}, v'_{oi1}, v'_{ois-1})$ , 检测模型记为  $V'_{di} = (v'_{di0}, v'_{di1}, v'_{dis-1})$  其中  $0 \leq i < N$ 。

(d) 计算待检测模型中心到顶点  $V_{di}$  的距离与原始模型中心到顶点  $V_{oi}$  的距离的差:

$$D_{oij} = L_{oij}^d - L_{oij}^o$$

其中  $L_{oij}^o$  是原始模型第  $i$  块第  $j$  个顶点到中心的距离,  $L_{oij}^d$  是待检测模型第  $i$  块第  $j$  个顶点到中心的距离。  $D_{oij}$  是  $L_{oij}^d$  和  $L_{oij}^o$  之间的长度差。

(e) 给步骤(d)中计算得到的长度差赋予权重并且计算每一个分块的所有长度差的和如下:

$$D_{oi} = \sum_{j=0}^{S-1} W_{oj} D_{oj}$$

其中,

$$W_{oj} = \begin{cases} m, & m>1; D_{oj} \text{ 能被 } k \text{ 整除} \\ 1, & \text{否则} \end{cases}$$

如果  $D_{oj}$  能被  $k$  整除( $k$  是水印嵌入过程中给定的脆弱水印参数),这表示改水印位是完整的未被篡改。未被篡改的顶点在水印检测过程中应该富裕更大的权重比率跟被篡改的顶点相比。因此我们根据顶点是否被篡改赋予顶点不同的权重。

(f) 提取出水印系列:

$$w_i^d = \text{sign}(D_{oi}), 0 \leq i < N$$

(g) 通过计算提出出的水印系列与原设计的水印系列之间的相关性来判断水印是否出现在模型中:

$$\text{Cor}(W_d, W) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i^d - \bar{W}^d)(w_i - \bar{W})}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} (w_i^d - \bar{W}^d)^2 + \sum_{i=0}^{N-1} (w_i - \bar{W})^2}}$$

其中  $W^d$  是提取的水印系列,  $W$  是原设计的水印系列。 $\bar{W}^d$  是  $W^d$  的均值,  $\bar{W}$  是  $W$  的均值,  $N$  是水印系列的长度。如果计算出的相关值大于一定的域值  $\text{ThrD}$ , 那么我们判定原设计的水印系列出现在待检测模型中。

### 3 水印强度控制参数

为了增加本水印算法的鲁棒性, 本算法采用了一些控制参数和权重方法来调节水印嵌入强度和水印检测方法。本节将详细讨论这些计算控制参数。第一个参数  $M_{oj}$  用来控制局部水印强度, 这里将讨论如何计算该参数的值。第二个参数  $k$  是用来嵌入脆弱水印的参数。第三个参数是水印检测权重参数  $W_{oj}$ , 该参数用来抵消噪声攻击的影响。

为了提高不可见性, 定义一个参数  $M_{oj}$  用来控制局部水印强度, 它使得水印强度自适应于三维模型的局部几何特征, 对每个顶点  $v_{ij}$  定义该顶点的  $M_{oj}$ ,  $M_{oj}$  表示  $v_{ij}$  与邻接顶点的差即:

$$M_{oj} = \frac{1}{|S_{ij}|} \sum_{k \in S_{ij}} (v_k - v_{ij})$$

其中,  $|S_{ij}|$  表示与顶点  $v_{ij}$  相邻接的顶点的数量, 因此  $M_{oj}$  是水印强度掩蔽因子。参数  $k$  有两个功能, 一是用该参数来嵌入脆弱水印, 另一个是控制失真控制。作为脆弱水印参数, 如果  $D_{oj}$  (在水印提出步骤(e) 中被定义) 能够被  $k$  整除, 那么表示该顶点是完整的未被篡改, 否者, 表示该

顶点被篡改。如图 1 所示, 按文献[18]的方法我们来定义失真。从图中我们可以看出, 对于给定的  $\alpha$ ,  $k$  越大误差越小。因此平均失真度可以通过参数  $k$  来控制。第三个参数是水印检测权重参数  $W_{oj}$ , 该参数用来抵消噪声攻击的影响。赋予未被篡改的顶点跟大的权重这样我们可以更准确的提取出水印。实验结果将在下一节中看出。

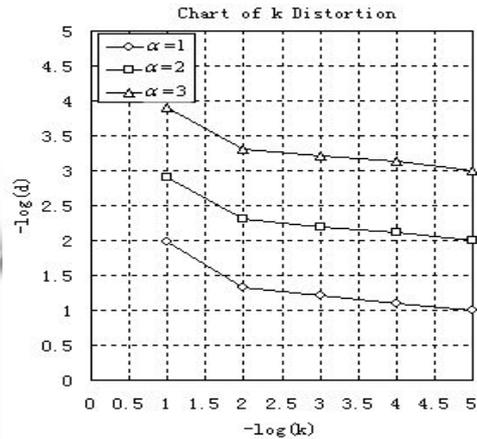
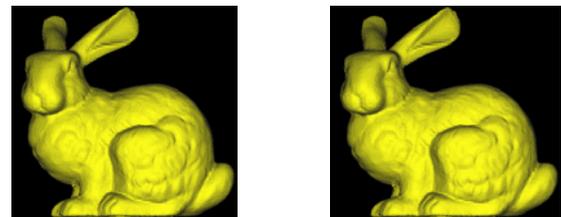


图 1 失真控制分析

### 4 实验结果

为了测试本文提出的算法, 本文对三角形 Bunny 模型进行实验。该模型包含 12581 个顶点和 24499 个三角形面片。嵌入 120 位的水印系列, 设置参数  $S=60$ ,  $m=2$ ,  $k=0.00013$  和  $\alpha=0.05$ 。水印嵌入后的模型如图 2.b 所示, 图 2.a 是原始模型。从图中可以看出我们嵌入的水印是不可见的。为了检测该算法的鲁棒性, 我们对嵌入水印后的模型实施多边形简化操作、噪声攻击、剪切操作以及混合攻击。实验结果表明该算法对这些攻击是鲁棒的并且能够检测出模型是否完整。这些结果从以下的实验中可以看出。



(a) 原始模型 (b) 水印模型

图 2 三维 Bunny 模型

为了验证本文算法抵抗噪声攻击的鲁棒性, 添加噪声向量到各个顶点. 重复执行 3 次测试, 分别添

加 最长向量长度 0.25%, 0.5% 和 0.6% 的随机噪声。实验结果表明该算法能很好地抵抗噪声攻击, 如表 1 和图 3 所示。

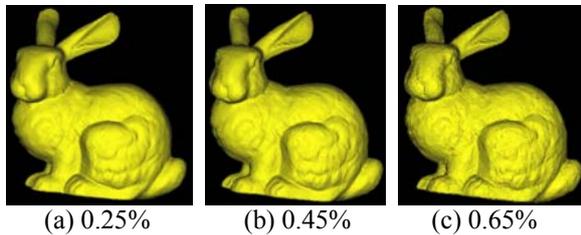


图 3 (a - c)噪声攻击

表 1 噪声攻击结果

噪声攻击强度	0.25%	0.5%	0.6%
相关系数 1	0.94	0.76	0.64
相关系数 2	1.0	1.0	0.95

注: 相关系数 1 是没有采用权重系数的计算结果, 相关系数 2 是采用了权重系数后的计算结果

对于简化攻击, 本文采用文献[19]提出的简化算法来简化 bunny 模型。分别简化模型顶点数的 30%, 50%, 和 70%。实验结果如表 2 和图 4 所示。

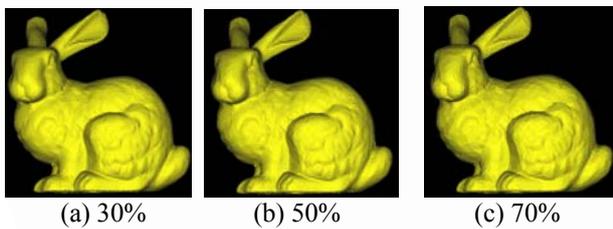


图 4 (a - c)简化后的模型.

表 2 简化攻击结果

剩余顶点数	17499	12499	7499
简化率	30%	50%	70%
相关系数 1	1.0	0.9853	0.6974
相关系数 2	1.0	0.9853	0.6974

本文也对剪切攻击进行了测试分别剪去模型顶点数的 30%, 50%和 70%。实验结果如表 3 和图 5 所示。实验结果表明对于剪切攻击本文的算法也具有鲁棒性。

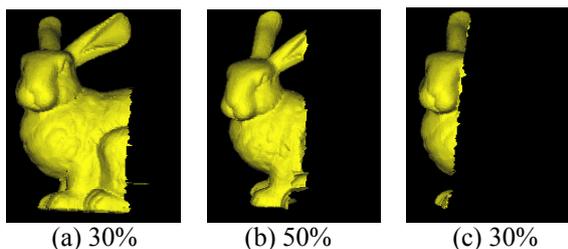


图 5 (a - c) 剪切攻击

表 3 剪切攻击结果

剩余顶点数	17408	13242	6224
剪切率	30%	50%	70%
相关系数 1	1.0	0.9847	0.6549
相关系数 2	1.0	1.0	0.6549

通过三种不同攻击情况来测试本算法对旋转攻击的鲁棒性。这三种攻击包括将水印模型绕 x 轴旋转 180°、绕 y 轴旋转 150° 和绕 z 轴旋转 30°。实验结果如表 4 和图 6 所示。实验结果表明本算法可以抵抗旋转攻击。在本文 2.1 节中对原始模型进行了仿射不变性变换, 因此模型具有平移不变性、旋转不变性和统一缩放不变性。所以嵌入水印后的模型能够抵抗平移、旋转和统一缩放攻击。

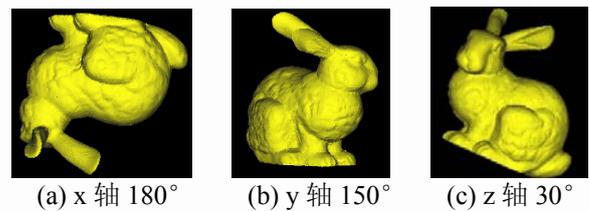


图 6 (a - c)旋转攻击

表 4 旋转攻击结果

旋转角度	x 轴 180°	y 轴 150°	z 轴 30°
相关系数 1	1.0	1.0	1.0
相关系数 2	1.0	1.0	1.0

## 5 结论

本文提出了一种通过修改局部几何特征来嵌入双重数字水印的算法。水印嵌入的对象是顶点到模型中心的向量。算法的主要特点是通过一次操作来嵌入双重数字水印并且水印强度自适应于模型的局部几何特征。另外, 本文还提出了一种水印检测过程中使用的权重方法, 通过赋予未被篡改的顶点更大的权重使得水印模型抵抗各种攻击的鲁棒性增强。实验结果表明该算法能够抵抗各种普通的攻击如多边形网格简化、随机噪声攻击、模型剪切攻击和旋转攻击等。

## 参考文献

1 Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Embedding data in 3D models. Proceedings of the European Workshop on

- Interactive Distributed Multimedia systems and Telecommunication Services'97, Darmstadt, 1997.1-10.
- 2 Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models. Proceedings of the ACM International Conference on Multimedia' 97, Seattle, 1997. 261-272.
- 3 Ohbuchi R, Masuda H, Aono M, Watermarking three-dimensional polygonal models through geometric and topological modifications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998,16(4): 551-560.
- 4 Benedens O. Affine Invariant Watermarks for 3D Polygonal and NURBS Based Models. Springer Information Security, third International Workshop Australia. 2000:15-29.
- 5 Benedens O. Geometry-based Watermarking of 3D Models, IEEE Computer Graphics and applications, 1999,19: 46-55.
- 6 Benedens O. Watermarking of 3D Polygon Based Models with Robustness against Mesh Simplification. Proc. of SPIE: Security and Watermarking of Multimedia Contents. 1999, 3657: 329-340.
- 7 Benedens O. Two High Capacity Methods for Embedding Public Watermarks into 3D Polygonal Models. Proc. of the Multimedia and Security Workshop at ACM Multimedia 99, Orlando, Florida, 1999. 95-99.
- 8 Benedens O. Towards Blind Detection of Robust Watermark in Polygonal Models. Eurographics, 2000,19(3):2000.
- 9 Yu ZQ, Horace HSIp, Kowk LE. Robust Watermarking of 3D Polygonal Models based on Vertice Scrambling. Proc. of Computer Graphics International CGI'03,2003.
- 10 Yeung M, Yeo BL. Fragile watermarking of three dimensional objects. Proc. 1998 Int'l Conf. Image Processing, ICIP 98, volume 2: 442-446.
- 11 Chou CM, Tseng DC. A public fragile watermarking scheme for 3D model authentication. Computer-Aided Design 38, 2006.1154-1165.
- 12 Lin HYS, Liao HYM, et al. Fragile Watermarking for authenticating 3-D Polygonal Meshes. IEEE Trans. on Multimedia, 7(6):997-1005.
- 13 Fornaro C, Sanna A. Public key watermarking for authentication of CSG models. Computer-Aided Design, 2000, 32: 727-735.
- 14 Lin HY, Liao HM, Lu CS, Lin JC. Fragile watermarking for authenticating 3-D polygonal meshes. Proc. 16th IPPR Conf. on CVGIP, 2003.298-304.
- 15 Wu HT, Cheung YM. A fragile watermarking scheme for 3D meshes. Proc the 7th Workshop on Multimedia and Security. 2005. 117-123.
- 16 Hu M, Xie Y, Xu LF, et al. A Geometry Property Based Adaptive Watermarking Scheme for 3D Models. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 20(3):390-402
- 17 Yu ZQ, Zhao RC, Horace H.S.Ip, et al. A Robust Watermarking Scheme for 3D Models. Computer Engineering and Applications, 38(2): 23-27
- 18 Chou CM, Tseng DC. A public fragile watermarking scheme for 3D model authentication. Computer-Aided Design, 2006,38:1154-1165.
- 19 Stan M. A simple, fast, and effective polygon reduction algorithm. Game Developer, 1998,11:44-49.