

一种强壮的基于几何特征分布的 3 维点模型数字水印算法

冯小青^{1,2)} 李黎³⁾ 潘志庚¹⁾

¹⁾ (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027) ²⁾ (浙江财经学院信息学院计算机应用技术研究所, 杭州 310018)

³⁾ (杭州电子科技大学计算机学院图形图像研究所, 杭州 310018)

摘要 3 维点模型与传统的三角网格模型相比, 更适合处理外形非常复杂并且不规则的几何体, 但基于点模型的数字水印算法却屈指可数。为了对 3 维点模型进行有效的保护, 提出了一种新的基于几何特征分布的 3 维点模型数字水印算法。该算法首先根据所需嵌入的水印信息来修改主元分析后 3 维点模型中各个点到模型中心的距离值, 然后通过移动整个模型点距离分布的平均值来达到嵌入水印的目的。该算法在嵌入水印时, 并不需要对点模型进行网格化的预处理, 是一种真正的直接面向点模型的数字水印算法; 另外, 为验证算法的有效性, 还分析了原始点模型和嵌入水印后的点模型之间的几何失真程度, 并讨论了强度系数和水印长度对算法鲁棒性的影响。实验证明, 该算法在遭受仿射攻击、重排序攻击, 提取水印时, 不需要原始点模型信息, 并且该点模型水印算法对于仿射攻击、重排序攻击、简化、剪切、噪声和局部几何失真的各种变形攻击具有较强的鲁棒性。

关键词 点模型 几何特征 数字水印 几何失真 鲁棒性

中图法分类号: TP309 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)08-1534-08

A Robust Watermarking Scheme for 3D Point Model Based on Geometrical Property

FENG Xiao-qing^{1,2)}, LI Li³⁾, PAN Zhi-geng¹⁾

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

²⁾ (Institute of Computer Application Techniques, College of Information, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018)

³⁾ (Hangzhou Dianzi University, Institute of Graphics and Image, Hangzhou 310018)

Abstract Compared with traditional triangle meshes, point models are suitable to represent irregular objects with complex geometry. However, there are few digital watermarks algorithm based on point models. In order to protect effectively 3D point model, a new method for digital watermarking of a 3D model defined as a set of un-oriented points based on geometrical property is proposed in this paper. Our approach is to modify the distance between each point and the center of the model after principle component analysis according to the watermarking bits. At last, embed watermarking by shifting the mean value of the distance distribution. Mesh pre-processing doesn't need before watermarking is embedded into the point model in the algorithm. In addition, geometrical distortion degree between the original and the tested model is analyzed, and two parameters of watermark strength factor and the size of bin that affect the robustness of the proposed methods are discussed. After conducting the affine transformation and vertex reordering attacks, the original model is not needed during the watermarking extraction. Experiments show that this approach is greatly robust against attacks, such as affine transformation, resorting, simplification, cropping, nosing and various distortion ones with local geometric alterations.

Keywords point model, geometry property, watermarking, geometry distortion, robustness

基金项目: 国家自然科学基金项目(60703087, 60473111); 浙江省科技厅基金项目(2008C23004)

收稿日期: 2007-11-31; 改回日期: 2008-04-14

第一作者简介: 冯小青(1977~), 女, 讲师。浙江大学计算机辅助设计及图形学专业博士研究生。主要研究方向为计算机图形图像、信息安全、数字水印。E-mail: fxq_snake@163.com

1 引言

随着 Internet 的发展,如文本、图像、声音、视频、3 维点模型等各类信息在网络上的交换和传输变得更加便捷。与此同时,也出现了有意或无意地复制、修改和传播这些信息的侵权行为。数字水印技术作为一种有效的版权保护和信息安全的手段,近年来被广泛地研究。但当前的数字水印的研究主要集中在文字、音频、图像等这些传统的媒体数据上,而关于 3 维几何模型的数字水印技术的研究则较少,且主要集中在基于空域和频域的 3 维网格模型水印技术方面。基于空域的水印技术是利用网格的各种几何或拓扑特征来加入水印。如 Ohbuchi 等人提出的三角形相似四元组法、四面体体积比算法、可视网格水印算法等^[1],这些算法虽提供了许多网格水印嵌入技术的有用信息,但是算法对大多数攻击不具有鲁棒性。Benedens 等人对网格的三角面片先按法向进行分组,然后通过改变组的平均法向来加入水印^[2]。Yeung 等人提出了一种 3 维脆弱水印嵌入算法^[3],该算法是利用一种图像认证技术将 2 维图像嵌入到 3 维点模型中。基于 3 维网格分解的水印算法属于频域水印算法,如 Kanai 等人提出的一种基于小波变换的 3 维点模型数字水印算法^[4]。尹康康提出了一种用金字塔算法构造多分辨率网格的算法^[5],该算法通过多级分解去除了网格表示中的“高频信息”,并将水印信息嵌入到“低频信息”中。李黎等人提出的基于球面调和分析的 3 维网格模型水印算法^[6]对于增强、加噪、裁剪和滤波等操作具有很强的鲁棒性。Cho 等人提出了通过嵌入水印信息来修改网格模型顶点范数的直方图分布的网格数字水印算法^[7]。

但随着计算机图形模型的多边形复杂度的急剧增长,如何有效地管理、处理、操作这类大规模多边形网格的连通信息,面临着很多困难,而点模型则由于各采样点元之间没有连接关系,故其在处理复杂的 3 维物体时显得特别灵活和简单,且点是表示 3 维物体的几何与外观信息的离散构件,这恰如像素是图像的基本数字元素一样。因此,以采样点作为基本元素进行表面几何建模和绘制,在计算机图形学领域内,受到研究者越来越多的关注。但关于点模型的水印技术的研究却是屈指可数。Conting 等人提出了一种基于点采

样几何模型的鲁棒性水印算法^[8],该算法需要把点模型先分成一系列小面片;然后把每个小面片映射到一个逼近拉普拉斯算子的特征函数空间上,其目的是为了把每个面片的曲面分解到离散的频谱上;最后把水印嵌入到频谱的低频部分。Ohbuchi 等人也提出了一种点模型数字水印算法^[9],其是一种网格水印算法在点模型上的扩展,该算法首先需要对点模型进行网格化,然后进行网格频谱分析,在嵌入水印时,需要利用网格化后的点与点的连接信息。这两种点模型的水印算法都是属于频域的私有水印算法,其在检测水印信息时,都需要原始的点模型信息。

总体来说,有关点模型的水印算法的研究工作比较少,而 Ohbuchi 等人提出的关于点模型的水印算法^[9]由于先要把点模型转换到网格模型,然后再用网格频谱分析技术来嵌入水印,故其不是一个真正的点模型数字水印算法。本文在对上述已有的网格模型算法^[7]和点模型数字水印算法及点模型自身的几何特征进行分析的基础上,结合主元分析的优点,提出了一种新的基于几何特征的 3 维点模型数字水印算法。该算法是通过统计和修改点模型的距离集的均值来达到嵌入水印信息的目的。且在嵌入水印时,不需要对点模型进行网格化的预处理,是一个真正的直接对点模型进行水印信息嵌入的算法。实验证明,本文算法对仿射攻击、重排序攻击、简化、剪切、噪声和造成局部几何失真的各种变形攻击均具有较强的鲁棒性。

2 算法原理

为了使点模型具有较强的几何不变性,算法首先对点模型进行主成分分析(PCA)处理,然后计算点模型中每个点到点模型中心的距离,并对该距离集中的元素进行升序排列,再对排好序的距离集根据水印信息的长度分解成若干个独立的元组,且每个元组嵌入 1 bit 的水印信息;最后通过修改点模型的距离集均值,把水印信息嵌入到点模型中。可见该方法主要是根据所需嵌入的水印信息的值,通过调整整个点模型距离分布的平均值来嵌入水印,算法原理示意图如图 1 所示。实验表明,利用基于几何特征的统计特性的水印算法嵌入水印,其对于点模型的非变形攻击,以及造成局部几何失真的各种变形攻击具有较强的鲁棒性。

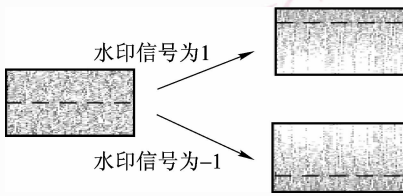


图 1 根据水印信息修改距离集的均值(虚线)

Fig. 1 Modifying the mean of the distribution (purple line) according to the watermark bit to be embedded

2.1 水印嵌入

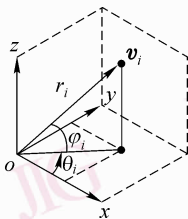
水印嵌入步骤如下:

(1) 主元分析。为了使 3 维点模型能够抵抗各种仿射变换攻击,应该使点模型具有较强的几何不变性,可在嵌入水印前先把 3 维点模型的重心移到原点,然后再对 3 维点模型进行主元分析^[10],即得到点模型的 3 个主方向,最后为 3 维点模型构建一个新的坐标系,则点模型可描述为 $\mathbf{V} = \{\mathbf{v}_i \in \mathbf{R}^3, 0 \leq i \leq N\}$, $\mathbf{v}_i = (x_i, y_i, z_i)$, x_i, y_i, z_i 为新坐标系下点 \mathbf{v}_i 的坐标值。

(2) 根据图 2 所示的球坐标系,利用式(1)将点 \mathbf{v}_i 转换成球坐标 $\mathbf{q}_i = (r_i, \theta_i, \varphi_i)$,其中

$$\begin{aligned} r_i &= \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} \\ \theta_i &= \arctan\left(\frac{y_i}{x_i}\right), 1 \leq i \leq L \\ \varphi_i &= \arctan\left(\frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

其中 r_i 是点 \mathbf{v}_i 与新坐标系的原点的距离

图 2 x, y, z 和 r, θ, φ 之间的关系Fig. 2 The relationship between x, y, z and r, θ, φ

(3) 先对所有距离进行升序排列,构建一个点模型的距离集,再将距离集按照嵌入的水印信息的长度分成若干元组,即 $\mathbf{B}_n = \{r_{n,j} | r_{n,j} \in \mathbf{F}, 1 \leq j \leq L\}$, \mathbf{F} 是按升序排序后的距离集, L 是嵌入的水印信息的长度。

(4) 对每个元组中的元素按式(2)进行归一化处理。

$$\tilde{r}_{n,j} = \frac{r_{n,j} - \min_{r_{n,j} \in \mathbf{B}_n} \{r_{n,j}\}}{\max_{r_{n,j} \in \mathbf{B}_n} \{r_{n,j}\} - \min_{r_{n,j} \in \mathbf{B}_n} \{r_{n,j}\}} \quad (2)$$

(5) 根据所需要嵌入的水印信息和已知的参考值来判断是否需要调整每个元组的均值,以便通过修改元组中的每个距离值来把水印信息嵌入到点模型中。在调整均值的过程中,本文采用了文献^[7]中的迭代计算方法来改变距离值。当嵌入的水印信息为 +1 时,则首先判断该元组的均值是否小于已知的参考值;若大于参考值,则不进行任何操作,若小于参考值,则连续修改指数 k_n 值,直至该元组的均值大于该参考值。当嵌入的水印信息为 -1 时,则判断该元组的均值是否大于已知的参考值,若小于参考值,则不进行任何操作,若大于参考值,则连续修改指数 k_n 值,直至该元组的均值小于该参考值。具体步骤如下:

若 $w_i = 1$, 则

① 初始化 $k_n = 1$,

② $\hat{r}_{n,j} = (\tilde{r}_{n,j})^{k_n}$

③ 按以下公式计算该元组元素的平均值,

$$\bar{e}_n = \frac{\sum_{j=1}^L \hat{r}_{n,j}}{L} \quad (3)$$

④ 如果 $\bar{e}_n < m + \zeta$, 则修改 $k_n = k_n - \Delta k$, 返回步骤②。

⑤ 用 $\hat{r}_{n,j}$ 来修改该元组中元素的距离 $\tilde{r}_{n,j}$ 。

若 $w_i = -1$, 则方法类同,但需修改步骤④: 如果 $\bar{e}_n > m - \zeta$, 则修改 $k_n = k_n + \Delta k$ 。这里 m 是整个距离集的距离均值, ζ 是水印强度系数,本文用它来控制水印的透明性。

(6) 对归一化后的每个距离按式(4)进行逆操作。

$$\rho_{n,j} = \hat{r}_{n,j} \cdot \left(\max_{r_{n,j} \in \mathbf{B}_n} \{r_{n,j}\} - \min_{r_{n,j} \in \mathbf{B}_n} \{r_{n,j}\} \right) + \min_{r_{n,j} \in \mathbf{B}_n} \{r_{n,j}\} \quad (4)$$

其中, $\max_{r_{n,j} \in \mathbf{B}_n} \{r_{n,j}\}$ 和 $\min_{r_{n,j} \in \mathbf{B}_n} \{r_{n,j}\}$ 是水印嵌入步骤(4)中元素距离 r 的最大值和最小值。

(7) 把球面坐标 $\tilde{\mathbf{q}}_i = (\rho_i, \theta_i, \varphi_i)$ 转换成笛卡尔坐标 $\tilde{\mathbf{v}}_i = (\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i)$ 。

2.2 水印提取

水印提取步骤如下:

(1) 对于遭受旋转、平移、均匀缩放等仿射变换攻击或噪声攻击的点模型,可直接用 PCA 的方法进行自动对齐操作。而对于遭受简化或剪切攻击的模型则需要重定位和重采样的预处理。重定位采

用文献[8]中的方法对点模型进行对齐操作;重采样^[11]就是从原模型的中心引出一条到点 v_i 的射线与待测 3 维模型进行相交,如果存在交点 v_{si} ,则认为点 v_{si} 为点 v_i 的匹配点,否则取 $v_{si} = v_i$ 。

(2)先求待测模型的距离集,然后进行类似嵌入水印过程时的元组划分,并对每个距离进行归一化处理。

(3)通过比较每个元组的平均值 \bar{e}_n^* 与参考值来提取水印信息。

$$w_n^* = \begin{cases} +1 & \text{如果 } \bar{e}_n^* > m \\ -1 & \text{如果 } \bar{e}_n^* < m \end{cases}$$

(4)相关性计算,相关性系数^[12]定义为

$$corr = \frac{\sum_{n=1}^L (w_n^* - \bar{w}^*) (w_n - \bar{w})}{\sqrt{\sum_{n=1}^L (w_n^* - \bar{w}^*)^2 \times \sum_{n=1}^L (w_n - \bar{w})^2}}$$

这里 \bar{w} 是原始水印信息的平均值, \bar{w}^* 是提取的水印信息的平均值。相关性系数的取值在 $[-1, 1]$ 之间。如果这一相关值超过某一阈值,则判定网格中存在此水印。

2.3 阈值设定

为了确定水印检测中相关测试的阈值,本文进行了阈值确定实验^[13]。其方法是先随机生成 10 000 个长度为 64 的随机实数水印信号(其中第 5 000 个水印信号是原始水印信号),然后分别与原始的水印信号进行相关检测(如图 3 所示)。实验结果表明,随机生成的水印信号与正确的水印信号的最大相关值在 0.4 左右。为了降低系统发生虚检的概率,本文把检测阈值定为 0.5。

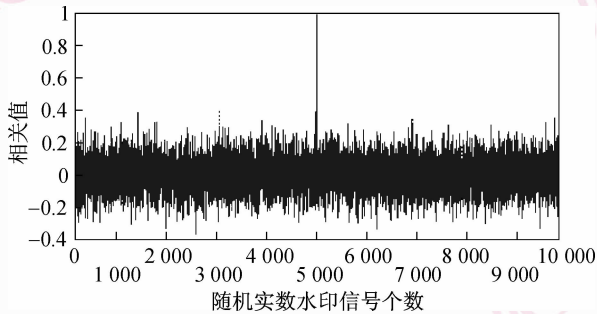


图 3 水印判决的阈值确定

Fig. 3 Threshold selection for watermarking detection

3 实验结果与分析

为检验本文提出的水印算法的性能,本文用 Matlab6.5 实现了一个 3 维点模型水印原型系统,并

在 PⅢ 的机器上对 cat 模型(4 539 点)、horse 模型(10 002 点)、rabbit 模型(10 002 点)、venushead 模型(15 002 点)、fo1 模型(12 083 点)、fo2 模型(16 695 点)、cow 模型(17 225 点)、footbone 模型(23 085 点)等多个点模型(如图 4 所示)进行了实验,实验中使用的水印信号是一个 64 bits 的随机二值序列,即 $w_i \in \{-1, 1\}$, $(i = 1, \dots, 64)$,水印强度系数 $\zeta = 0.02$ 。

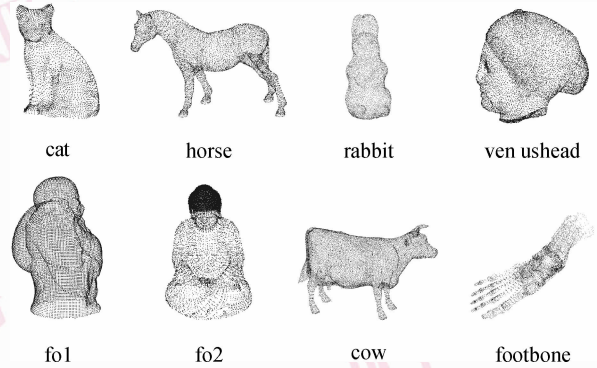


图 4 原始点模型

Fig. 4 Original point models

3.1 模型几何误差分析

为了定量地度量水印嵌入后引起的几何误差,本文采用 Metro^[14]的工具来计算原始点模型和水印点模型之间的几何失真度。由于 Metro 是测试三角网格模型的几何误差工具,所以需要首先对原始点模型和水印点模型进行三角化,得到原始网格模型 M 和水印网格模型 \tilde{M} ,然后通过计算前、后的 Hausdorff 距离值,取两者的最大值 $H(M, \tilde{M})$ 来估算原始模型和水印模型的几何误差。

$$D_{forward}(M, \tilde{M}) = \max_{v \in M} \{ \min_{\tilde{v} \in \tilde{M}} \|v - \tilde{v}\| \}$$

$$D_{backward}(M, \tilde{M}) = \max_{\tilde{v} \in \tilde{M}} \{ \min_{v \in M} \|\tilde{v} - v\| \}$$

$$H(M, \tilde{M}) = \max \{ D_{forward}(M, \tilde{M}), D_{backward}(\tilde{M}, M) \}$$

其中, $v \in M$, $\tilde{v} \in \tilde{M}$ 分别是原始点模型网格化和水印点模型网格化后的顶点。cat 等点模型嵌入水印后,模型的几何误差分析如表 1 所示。实验表明,该算法对模型的几何误差影响较小。

表 1 模型的几何误差,抗仿射攻击和重排序攻击的鲁棒性

Tab. 1 Models' geometrical error, and evaluation of robust against affine or resorting attack

模型	$H(M, \tilde{M})$	仿射攻击(旋转, 平移, 均匀缩放) 的相关系数	重排序攻击 的相关系数
cat	0.000 156 91	1	1
horse	0.000 187 56	1	1
rabbit	0.000 138 92	1	1
venushead	0.000 198 22	1	1
cow	0.000 364 11	1	1
fo1	0.000 422 74	1	1
fo2	0.000 121 23	1	1
footbone	0.000 354 86	1	1

3.2 攻击分析

为了验证本文算法的鲁棒性,还对其进行了一系列的攻击实验,如:仿射攻击、重排序攻击、简化攻击、噪声攻击以及一些组合攻击等。

(1) 仿射变换攻击

仿射变换攻击包括平移、旋转、均匀缩放等攻击。本文对上述 cat 等多个点模型进行了攻击仿真实验,实验结果表明,该算法对各种对称和非对称模型的仿射变换具有强鲁棒性,在经受各种仿射攻击后,水印信息仍能完整提取,实验结果如表 1 所示。而文献[9]算法对对称的模型进行水印提取时,则水印信息会丢失。

(2) 重排序攻击

嵌入水印前,先对距离进行升序排列,该处理能有效地抵抗模型的重排序攻击。实验结果表明模型经重排序攻击后,水印信息仍能完整提取(如表 1 所示)。

(3) 简化攻击

简化后的点模型效果如图 5 所示,简化攻击的实验结果如表 2 所示。

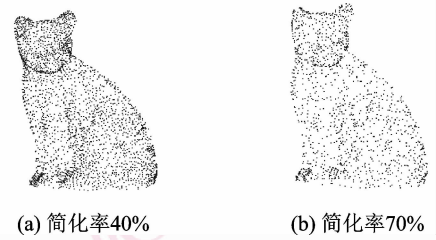


图 5 cat 模型简化效果

Fig. 5 Point reduction of cat model

表 2 抗简化攻击的鲁棒性评估

Tab. 2 Evaluation of robust against reducing attack

模型	简化率 (%)	相关性系数	模型	简化率 (%)	相关性系数
cat	20	1	cow	20	1
	40	1		40	0.969 0
	70	0.737 0		70	0.514 7
horse	20	1	fo1	20	1
	40	1		40	1
	70	0.843 2		70	0.659 8
rabbit	20	1	fo2	20	1
	40	0.969 0		40	0.937 3
	70	0.719 2		70	0.512 8
venushead	20	1	foot bone	20	1
	40	0.969 0		40	0.969 0
	70	0.874 5		70	0.843 2

(4) 剪切攻击

剪切后的点模型效果如图 6 所示,剪切攻击的实验结果如表 3 所示。



图 6 cat 模型剪切效果

Fig. 6 Cropped watermarked cat model

表 3 抗剪切攻击的鲁棒性评估

Tab. 3 Evaluation of robust against cropping

模型	剪切率 (%)	相关性系数值	模型	剪切率 (%)	相关性系数值
cat	20.25	1	fo1	20.25	1
	45.08	1		45.08	0.874 5
	72.28	0.625 6		72.28	0.603 4
horse	20.25	1	fo2	20.25	1
	45.08	0.909 4		45.08	0.843 9
	72.28	0.623 5		72.28	0.467 9
rabbit	20.25	1	cow	20.25	1
	45.08	0.969 0		45.08	0.875 8
	72.28	0.749 0		72.28	0.405 3
venushead	20.25	1	footbone	20.25	0.969 2
	45.08	1		45.08	0.781 2
	72.28	0.946 0		72.28	0.654 5



(a) 加入0.25%噪声 (b) 加入0.6%噪声 (c) 加入1%噪声

图 7 加入噪声后的 cat 模型

Fig. 7 Adding 0.25%, 0.6%, 1% noise to cat model

(5) 噪声攻击

噪声攻击就是添加一个平均分布的随机噪声,即对点模型中的各个点加上一个噪声向量,噪声向量的方向为沿点模型中各个点到原点的连线,而将噪声的幅度定义为噪声向量的长度与模型中各个点到模型中心的距离的比值,它体现了噪声的强弱^[15]。图 7 是 cat 模型分别加入强度为 0.25%, 0.6%, 1% 的噪声后的效果图,表 4 是抗噪声攻击的实验结果。

表 4 抗噪声攻击的鲁棒性评估

Tab. 4 Evaluation of robust against noise attack

模型	噪声强度 (%)	相关性系数值	模型	噪声强度 (%)	相关性系数值
cat	0.25	0.939 3	fo1	0.25	0.906 1
	0.6	0.780 3		0.6	0.686 3
	1	0.625 6		1	0.467 9
horse	0.25	1	fo2	0.25	1
	0.6	1		0.6	0.939 3
	1	0.960 2		1	0.855 0
rabbit	0.25	1	cow	0.25	0.969 0
	0.6	1		0.6	0.876 7
	1	0.906 5		1	0.729 2
venushead	0.25	0.969 0	footbone	0.25	1
	0.6	0.846 0		0.6	1
	1	0.654 5		1	1

(6) 组合攻击

该算法对一些组合攻击也有很强的鲁棒性。

① 组合攻击 1

对上述 8 个 3 维点模型进行了多种仿射变换组合攻击,如:平移($x:200, y:300, z:100$) + 均匀放大($x:2, y:2, z:2$), 旋转($x:0, y:60^\circ, z:0$) + 平移($x:200, y:300, z:100$), 均匀放大($x:2, y:2, z:2$) + 旋转($x:0, y:60^\circ, z:0$), 平移($x:200, y:300, z:100$) + 均匀放大($x:2, y:2, z:2$) + 旋转($x:0, y:60^\circ, z:0$), 水印信息提取的相关性系数值都为 1。实验表明,该算法对仿射变换的组合攻击具有强鲁棒性。

② 组合攻击 2

对上述 8 个模型,在组合攻击 1 的基础上分别再加上重排序攻击后,水印信息仍能完整提取,即相关系数值为 1。实验表明,该算法对仿射变换和重排序的组合攻击也有强鲁棒性。

本文算法与文献[9]算法在预处理和攻击实验方面的性能对比如表 5 所示。

表 5 本文算法与文献[9]算法的性能比较

Tab. 5 Comparison between our algorithm and the algorithm proposed in paper [9]

本文算法	文献[9]算法
不需要对点模型进行网格化的预处理	需要对点模型进行网格化的预处理
能处理对称和非对称的点模型	只能处理非对称的点模型
提取遭受仿射攻击、重排序攻击的水印时,不需要原始模型	对于任何攻击,提取水印时,都需要原始模型
能完全抵抗重排序攻击	不能抵抗重排序攻击
能抵抗组合攻击 1	不能抵抗组合攻击 1
能抵抗组合攻击 2	不能抵抗组合攻击 2

3.3 参数的鲁棒性分析

本文算法通过选择合适的水印强度系数 ζ 和水印长度系数 L 的值来提高算法的鲁棒性。为了分析水印强度系数 ζ 对算法鲁棒性的影响,本文对 cat 模型在嵌入的水印信息长度为 64 的状态下,进行了噪声、简化、剪切等攻击实验。图 8 描述了在不同的水印强度系数 ζ 的状态下,水印检测的相关性系数,同时对模型的几何误差 $H(\mathbf{M}, \tilde{\mathbf{M}})$ 也进行了描述。实验表明,水印强度系数 ζ 对水印系统的强健性和透明性产生了一定的影响,因强度越大,虽然算法的强健性随之增大了,但同时点模型的几何误差也增大了,故强健性与透明性之间需取得一个平衡。实验结果表明,当 $\zeta = 0.02$ 时,在能获得较高的相关性系数的同时,又能保持模型具有较小的几何失真度。

算法中的另一个参数——水印长度系数 L 对算法的鲁棒性也产生了一定的影响。图 9 是 $\zeta = 0.02$,

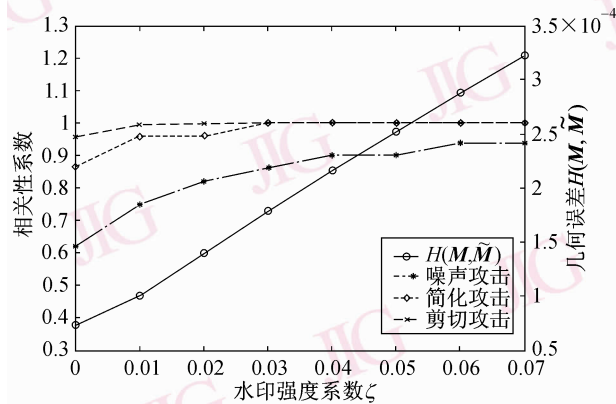


图 8 水印强度系数 ζ 和相关性系数及几何误差度 $H(\mathbf{M}, \tilde{\mathbf{M}})$ 的关系

Fig. 8 Relationship between ζ , corr and $H(\mathbf{M}, \tilde{\mathbf{M}})$

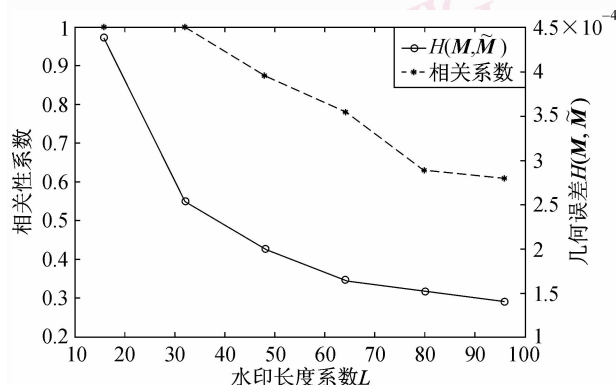


图 9 长度系数 L 和相关性系数及几何误差度 $H(\mathbf{M}, \tilde{\mathbf{M}})$ 的关系

Fig. 9 Relationship between L , corr and $H(\mathbf{M}, \tilde{\mathbf{M}})$

对 cat 模型进行 0.6% 的噪声攻击实验时,水印长度系数 L 对算法的鲁棒性和模型几何误差产生的影响度的描述。实验表明,当 $L = 64$ 时,在相关性系数和模型几何误差 $H(\mathbf{M}, \tilde{\mathbf{M}})$ 之间能获得一个较好的平衡。

4 结 论

本文提出了一种全新的基于几何特征的强壮的 3 维点模型数字水印算法。该算法首先通过修改模型点距离分布的均值来实现水印信息的嵌入,同时引入了 Hausdorff 距离,用来定量地度量水印对点模型的几何失真度的影响;然后通过对水印强度系数 ζ 和水印长度系数 L 的实验统计分析,设定了不同的经验值,从而使该算法在相关系数值和模型几何误差 $H(\mathbf{M}, \tilde{\mathbf{M}})$ 之间获得了较好的平衡,而且该算法在嵌入水印时,不需要对点模型进行网格化的预处理操作,是一种真正的直接面向点模型的数字水印算法。实验结果表明,该算法能完全抵抗仿射攻击和重排序攻击,同时该算法对简化、局部剪切和一定强度的噪声攻击也有较强的鲁棒性。但对于剪切率较高 (>70% 以上) 的攻击,该算法对于一些点模型会出现一定的虚检情况。由此可见,如何加强抗高剪切率攻击和高强度的噪声攻击,以及建立算法抗攻击的评价体系是需要进一步研究的重要课题。

参考文献 (References)

- Ryutarou O, Hiroshi M, Masaki A. Watermarking three dimensional polygonal models through geometric and topological modifications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communication, 1998, **16**(4): 551-560.
- Benedens O. Geometry based watermarking of 3D models[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1999, **19**(1): 46-55.
- Yeung M, Yeo B L. Fragile watermarking of three dimensional objects[A]. In: Proceedings of International Conference on Image Processing[C], Chicago, Illinois, USA, 1998: 442-446.
- Kanai S, Date H, Kishinami T. Digital watermarking for 3D polygons using multiresolution wavelet decomposition [A]. In: Proceedings of the 6th IFIP WG 5.2 International Workshop on Geometric Modeling [C], Tokyo, Japan, 1998, 296-307.
- Yin Kang-kang, Pan Zhi-geng, Shi Jiao-ying. A robust mesh watermarking algorithm [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2001, **13**(2): 102-107. [尹康康, 潘志庚, 石教英. 一种强壮的网格水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, **13**(2): 102-107.]
- Li Li, Zhang D, Pan Zhi-geng, et al. Watermarking 3D mesh by

- spherical parameterization [J]. Computers and Graphics, 2004, **28**(6): 98-989.
- 7 Cho J W, Prost R, Jung H Y. An oblivious watermarking for 3D polygonal meshes using distribution of vertex norms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, **55**(1): 142-155.
- 8 Cotting D, Weyrich T, Pauly M, *et al.* Robust watermarking of point sampled geometry [A]. In: the Proceedings of the International Conference on Shape Modeling and Application [C], Genova, Italy, 2004: 233-242.
- 9 Ohbuchi R, Mukaiyama A, Takahashi S. Watermarking a 3D shape model defined as a point set [A]. In: Proceedings of the International Conference on Cyber Worlds [C], Tokyo, Japan, 2004, 392-399.
- 10 Kalivas A, Tefas A. Watermarking of 3D models using principal component analysis [A]. In: Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C], Hongkong, China, 2003, **5**: 637-640.
- 11 Yu Zhi-qiang, Zhao Rong-chun, Horace H S Ip, *et al.* A robust watermarking scheme for 3D models [J]. Computer Engineering And Applications, 2002, **38**(22): 23-27. [喻志强, 赵荣椿, 叶豪盛等. 自适应于局部几何特征的三维模型水印算法 [J]. 计算机工程与应用, 2002, **38**(22): 23-27.]
- 12 Praun E, Hoppe H, Finkelstein A. Robust mesh watermarking [A]. In: Proceedings of ACM, Annual Conference Series, SIGGRAPH [C], New York, NY, USA, 1999:49-56.
- 13 Zhou Xin. Research on Digital Watermarking Techniques and Algorithms of Three Dimensional Models [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002. [周昕. 三维几何模型数字水印技术及算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.]
- 14 Cignoni P, Rocchini C, Scopigno R. Metro: Measuring error on simplified surfaces [J]. Computer Graphics Forum, 1998, **17**(2): 167-174.
- 15 Zhang Jing, Zhen Guo-qing. 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.]