

# 一种鲁棒的三维水印方案

王颖 郑雪峰 刘海燕

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

**摘要** 提出了一种基于 Spin-Image 的鲁棒水印算法。首先通过 Spin-Image 变换,提取出网格模型的全局几何特征,同时实现几何数据的二维参数化,然后利用 K-L 变换对 Spin-Image 映射的方阵进行降维,保留其主要特征,并利用小波域低频系数构造出用于注册的水印。实验结果表明,该算法很好地平衡了水印鲁棒性和透明性之间的矛盾,而且对常见的水印攻击手段,如平滑、加噪、剪切、网格简化等具有较好的鲁棒性。

**关键词** 三维水印,主成分分析,零水印,Spin-Image

## Robust Watermarking Algorithm of 3D Model

WANG Ying ZHENG Xue-feng LIU Hai-yan

(School of Information Engineering in University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract** A robust watermarking algorithm of 3D model based Spin-Image was proposed. Spin-Image was used to extract the global feature of 3D model, and realize 2D parameterization. And then K-L was applied to reduce these spin images' dimensions, and based on the resulting coefficients, watermarking was calculated. The experimental results show that, the algorithm well deals with the contradiction of watermarking robustness with transparency, and has good robustness against common attacks, such as smoothing, noise addition, cropping, remeshing and so on.

**Keywords** 3D watermarking, PCA, Zero watermarking, Spin-Image

## 1 引言

为解决图像水印算法中水印鲁棒性与透明性之间的矛盾,温泉<sup>[2,3]</sup>等提出了零水印的概念,我们同样可以将该概念应用到三维模型中。自从 Ohbuchi 等<sup>[1]</sup>在 ACM Multimedia 97 国际会议上首次提出了三维网格模型数字水印算法,数字水印技术的研究开始拓展到三维多边形领域。但是与二维水印相比,三维网格水印仍然很不成熟,而且多数算法主要是通过改变三维网格的几何数据或者拓扑结构直接嵌入水印的。这种轻微的扰动对现在的许多 CAD 产品,特别是高精度数字制造产品是致命的,所以零水印的出现能很好地解决这个问题。

所谓零水印<sup>[4]</sup>就是在嵌入水印的同时不改变公开的模型,它是利用数字作品自身特征来构造所要嵌入的水印,从而在嵌入水印时不必改变原数字作品的信息,构造的水印在 IPR(Intellectual Property Rights, 知识产权)信息数据库注册实现版权保护,因此这种算法具有很强的不可见性和保密性。该技术很好地平衡了数字水印算法的鲁棒性、水印的嵌入信息量以及不可觉察性之间的关系。目前在图像零水印技术方面,已有学者进行了研究探讨。文献[4]最早提出了零水印的概念;文献[5-7]提出了基于小波变换的零水印算法,文献[5,

6]算法对于剪切和 JPEG 压缩攻击具有较好的鲁棒性;文献[8]提出的检测方案将零水印与人工智能、计算机视觉、常规水印技术有机结合起来,它对于旋转攻击也具有一定的鲁棒性;文献[9]提出了基于小波包的零水印算法,它对于剪切、噪声、JPEG 压缩等攻击具有较好的鲁棒性;文献[10]提出了基于小波变换和离散余弦变换的零水印算法,并且两种算法可以同时应用,对于 JPEG 压缩攻击具有较好的鲁棒性。从上述研究中可归纳出零水印技术的一些特点,如不对媒体进行任何改动;水印由媒体重要特征生成,长度远小于媒体数据量;对常见攻击具备一定的鲁棒性;水印生成算法简单、快速;检测水印时一般无需原始媒体数据,即盲检测<sup>[2]</sup>。

本文提出了一种基于 Spin-Image 的三维网格模型的零水印算法,先用 Spin-Image 表示模型顶点的全局几何特征,然后对得到的几何数据进行降维,保留模型的主要特征,构造出水印,并对水印的鲁棒性进行了分析。

## 2 Spin-Image 和 PCA 介绍

### 2.1 Spin-Image 介绍

Spin-Image 由 Andrew Johnson<sup>[1]</sup>提出,是三维模型顶点的一种局部特征表示。如图 1 所示, $p$  为三维网格曲面上的任一顶点, $n$  为  $p$  点处的法向量, $P$  为  $p$  点处的切平面,对于

到稿日期 2008-08-04 返修日期:2008-12-23 本文受内蒙古自然科学基金(200711020819)资助。

王颖(1982-),女,博士生,主要研究方向为图像处理、信息隐藏、三维水印等,E-mail: wangying1008@163.com;郑雪峰(1951-),男,教授,主要研究方向为网络技术、信息安全等;刘海燕(1978-),女,博士生,主要研究方向为数字水印、音频水印等。

曲面上的一点  $x$ , 其 Spin-map 定义如下:

$$S(x) \rightarrow (\alpha, \beta) = (\sqrt{\|x-p\|^2 - (n \cdot (x-p))^2}, n \cdot (x-p))$$

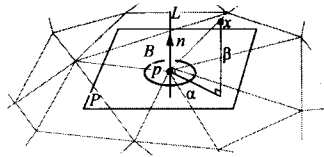


图1 Spin-map 示意图

$S(x)$  是一个能将三维点映射成以  $(p, n)$  为基的二维坐标的函数, 取  $p$  的一个邻域点集, 求得其中每点的 Spin-map, 即  $(\alpha, \beta)$  值, 进而可以得到  $(\alpha, \beta)$  值的二维直方图, 如图 2 所示。

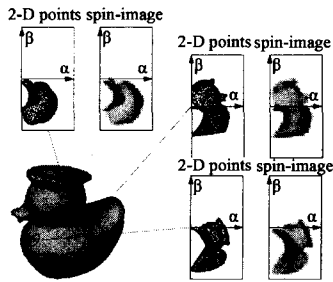


图2 Spin-images 示意图

由图 2 可以看出, Spin-Image 反映了顶点与其邻域点集的几何统计关系, 具有较强的表达能力, 受顶点坐标噪声干扰的影响较小。

## 2.2 主成分分析(PCA)

主成分分析(principal components analysis, PCA)是统计学中分析数据的一种有效的方法, 也称为 K-L 变换, 其目的是在数据空间中找一组向量来尽可能地解释数据的方差, 通过一个特殊的向量矩阵, 将数据从原来的高维空间投影到一个低维的向量空间中, 降维后保存了数据的主要信息, 从而使数据更易于处理。

可以使用迭代公式计算 PCA。第一个主分量方向  $w_1$  定义如下:

$$w_1 = \operatorname{argmax}_{\|w\|=1} E\{(w^T x)^2\} \quad (1)$$

其中  $w_1$  与随机数据矢量  $x$  同维, 就是  $x$  在方差最大的方向上的投影。确定了前  $k-1$  个主分量之后, 第  $K$  个主分量可按下式确定:

$$w_k = \operatorname{argmax}_{\|w\|=1} E\{[w^T(x - \sum_{i=1}^{k-1} w_i w_i^T x)]^2\} \quad (2)$$

则主分量

$$s_i = w_i^T x \quad (3)$$

实际  $w_i$  的计算是通过协方差矩阵  $C = E\{xx^T\}$  完成的。 $w_i$  是对应  $C$  的  $n$  个最大特征值的特征向量。

本文中, 使用 PCA 将选择的图像特征向量降维, 得到的数据既保留了图像的主要特征, 又大大降低了复杂度, 便于之后的生成水印信号。

## 3 算法的描述

典型的网格模型是由网格顶点  $V$  和定义在  $V$  上的拓扑连接数据  $S$  这两个子集组成的。但是网格的拓扑数据是不稳定的, 这就决定了顶点的几何数据更适合作为水印信息的构造源。此外, 受到 IPR 信息数据库容量的限制, 构造出的

水印不能过大, 因此必须对网格进行几何特征提取。目前三维网格模型虽有少量的频谱分解方法<sup>[11,12]</sup>, 但大多对网格拓扑结构有限制要求。本文采用提取三维模型的局部特征结合主成分分析的方法, 即通过 Spin-Image 变换提取出网格模型的全局几何特征, 同时实现几何数据的二维参数化, 然后利用 K-L 变换对 Spin-Image 映射矩阵进行降维。这样, 网格模型的主要能量就集中在小波系数的低频域, 用于版权注册的水印信息由小波域低频系数构造生成。

### 3.1 PCA 降维

对于三维模型  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$ ,

1) 首先求得每个顶点  $q_i$  的 Spin-Images <sub>$i$</sub> , 故得到 Spin-Image 集合  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ ;

2) 将  $s_i$  展开成列向量  $x_i$ , 因此集合  $S$  对应列向量构成的矩阵  $X = (x_1 x_2 \dots x_N)$ , 其协方差矩阵  $C$  定义如下:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$C = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) * (x_i - \bar{x})^T$$

3) 求得协方差矩阵  $C$  的特征值和特征向量, 并按照特征值由大到小排列, 取前  $M$  个最大的特征值对应的特征向量, 即为集合  $S$  的主成分  $E = (e_1, e_2, \dots, e_M)$ 。

主成分  $E$  反映了集合  $S$  的主要变化趋势, 使用主成分  $E$  可以对  $x_i$  进行降维, 如式(4)所示:

$$y_i = E^T * (x_i - \bar{x}) \quad (4)$$

降维后  $y_i$  仅有  $M$  维, 远小于  $x_i$  的维数。

### 3.2 水印生成

取表面上的  $K$  个顶点作为水印嵌入顶点, 按照上节所述的方法对其 Spin-Image 进行降维, 然后取每个顶点特征的第一维, 组成序列  $U = [u_1, u_2, \dots, u_K]$ , 作为水印嵌入序列。嵌入顶点的选取规则为其 shape index 大于或小于某一阈值(通常选  $>0.8$  或  $<0.2$ ), 以保证所选顶点具有足够的代表性。

由随机种子  $R$  生成长度为  $K$  的随机序列  $C = [c_1, c_2, \dots, c_K]$ , 与序列  $U$  构成一一对应的关系。对  $C$  由小到大排序, 相应地调整  $U$  中各变量的顺序。设顺序调整后的  $U$  变为  $D = [d_1, d_2, \dots, d_K]$ , 由序列  $D$  可以根据式(5)得到长度为  $K/2$  的水印序列  $W = [w_1, w_2, \dots, w_{K/2}]$ 。随机种子  $R$  和水印序列  $W = [w_1, w_2, \dots, w_{K/2}]$  需要保存, 以作为版权证据。

$$w_i = \begin{cases} 1 & \text{if } d_{2i-1} \geq d_{2i} \\ 0 & \text{if } d_{2i-1} < d_{2i} \end{cases} \quad 1 \leq i \leq K/2 \quad (5)$$

产生以后的零水印需在版权信息数据库注册。一旦注册, 就可以认为原模型已列入合法版权保护的范畴。

### 3.3 水印检测

提取水印时, 首先需要与原始模型配准。这里采用 Spin-Image + ICP 两步配准算法进行精确配准。

配准后, 可得到待测模型上与原始模型水印嵌入顶点对应的顶点序列。对该序列, 按照上节所述方法, 求其 Spin-Image, 并利用原始模型的主成分  $E$  降维后, 取第一维构成序列  $A = [a_1, a_2, \dots, a_K]$ 。由保存的随机种子  $R$  生成随机序列, 并按照随机序列的大小对  $A = [a_1, a_2, \dots, a_K]$  调整顺序, 进而根据式(5)求得水印序列  $W' = [w_1', w_2', \dots, w_{K/2}']$ 。

得到序列  $W'$  后, 与注册的水印  $W = [w_1, w_2, \dots, w_{K/2}]$  进行比较, 即可鉴定待测网格模型的版权归属。由于待测网格

可能会受到各种有意、无意的攻击,并且网络传输难免会使数据受损,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。水印实际检测时,可通过计算水印相似度  $Sim$  值是否大于指定的阈值来验证:

$$sim = \frac{\sum_{i=1}^L w_i w'_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^L w_i^2 \sum_{i=1}^L w'^2_i}} \quad (6)$$

其中,  $w(i)$  和  $w'(i)$  分别表示在 IPR 数据库注册的水印和由待测网格模型提取出的水印;  $L$  为水印长度。  $0 \leq Sim \leq 1$ ,  $Sim$  值越大,表明水印相似度越高。设定一阈值  $T$ ,当  $Sim > T$  时,即可认为水印存在。再综合考虑虚警率和漏警率,并经过反复实验后,在本文将阈值  $T$  设为 0.7。

## 4 实验及分析

### 4.1 实验数据

本实验采用 Stanford 大学三维模型库中的 Bunny, Buddha 和 Dragon 模型,如图 3 所示。在对模型进行必要的修补之后,3 个模型分别具有 8618, 31770, 22582 个顶点。



图 3 Stanford 大学三维模型 Bunny, Buddha 和 Dragon

### 4.2 实验步骤

为了测试该方法的鲁棒性,实验分别对原始模型进行平滑、加噪和剪切攻击。

1) 平滑攻击:对模型进行 Laplace 平滑之后提取水印。本实验中,分别对 3 个模型平滑 1 至 5 次,计算提取水印与嵌入水印的相关系数。

2) 加噪攻击:对模型的每个顶点,计算其平均邻接边长  $\bar{e}$ ,然后沿法线方向加入  $[0, l\bar{e}]$  的随机噪声。本实验中,  $l$  分别取 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 和 1.0。

3) 剪切攻击:对模型进行随机剪切后提取水印,计算其与嵌入水印的相关系数。图 4 显示了对 Bunny 模型进行如上攻击后得到的模型。

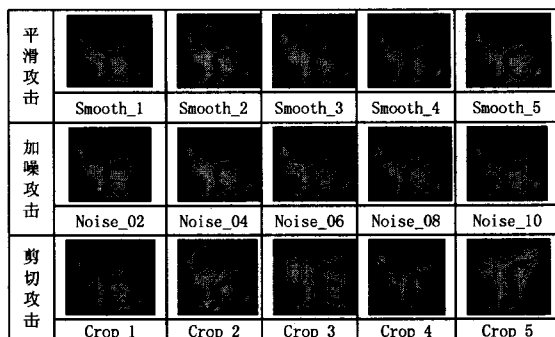


图 4 对 Bunny 模型进行平滑、加噪和剪切攻击后得到的模型

4) 网格简化攻击:在保持模型几何形状不变的前提下,对复杂模型减少顶点、边、面数目来达到简化目的。本实验对 Bunny 和 Dragon 模型进行了网格简化攻击。图 5 显示了网格简化后的模型。



图 5 对 Bunny 模型进行网格简化攻击后得到的模型

### 4.3 实验结果

根据式(6),表 1 至表 4 给出了 3 种模型嵌入水印和遭受攻击后提取的水印之间的相似度。

表 1 平滑攻击

Smooth	1	2	3	4	5
Bunny	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Dragon	0.9740	0.9601	0.9601	0.9477	0.9358
Buddha	0.9905	0.9811	0.9715	0.9715	0.9715

表 2 加噪攻击

Noise	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Bunny	0.9129	0.9129	0.9129	0.9129	0.9129
Dragon	1.0	0.9730	0.9618	0.9358	0.9098
Buddha	0.9811	0.9810	0.9519	0.9533	0.9425

表 3 剪切攻击(其中每个模型的第一行表示剪切后剩下的顶点个数/原始模型的顶点个数)

Crop	1	2	3	4	5
Bunny	7920/8618 0.9129	7387/8618 0.9129	5678/8618 0.7715	5495/8618 0.8333	3413/8618 0.2357
Dragon	19837/22582 1.0	17395/22582 0.9067	15986/22582 0.8494	13362/22582 0.6596	7809/22582 0.5067
Buddha	29327/31770 0.9524	26030/31770 0.9434	22702/31770 0.9346	18812/31770 0.9027	18659/31770 0.6112

表 4 网格简化攻击

	Bunny	Dragon
Remesh	1865/8618 0.7217	5030/22582 0.8001

### 4.4 实验结论

由以上实验结果可以看出,本方法对平滑和加噪攻击具有良好的鲁棒性,对剪切攻击,水印的相似度受剪切位置和剪切顶点数目多少的影响,由于本方法的水印嵌入在 Shape index 较大或较小的区域,而这些区域多为对表述形状较为重要的区域,若将这些嵌入区域剪切掉,剩下的区域已无较大价值,如图 4(Crop\_5)所示。当保留这些区域时,本方法所得到的水印相似度仍然很大,因此可以说本方法对剪切攻击也具有相当的鲁棒性。对于网格简化攻击,虽然顶点数减少至原始模型的 21.64%, 22.27%, 相关系数仍然大于阈值 0.7,因此本方法对网格简化攻击也具有很强的鲁棒性。

对于顶点重排序攻击、平移、旋转和各向一致缩放攻击,由于并不改变顶点个数及相对位置,再进行精确配准后,即可得到准确的水印嵌入顶点,顶点的 Spin-Image 亦不会改变,因此本质上本方法对这些攻击具有鲁棒性。

**结束语** 由理论分析及实验结果可以证明,本文所提的基于 Spin-Image 的零水印方法对于常见的网格模型水印攻击手段,包括顶点重排序、平移、旋转、各向一致缩放、加噪、网格简化、剪切具有良好的鲁棒性,是一种鲁棒的零水印方法。

### 参考文献

- [1] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking. 3D polygonal models[C] // Proceeding of ACM Mul2timeedia'97. New York, USA, 1997:261-272

(下转封三)

## 参 考 文 献

- [1] 王萍. C++面向对象程序设计[M]. 北京:清华大学出版社, 2002
- [2] Wiley D A. Connecting learning objects to instructional design theory: A definition a metaphor, and a taxonomy[EB/OL]. <http://reusability.org/read/chapters/wiley.doc>. 2008-08-25
- [3] 全国信息技术标准化委员会教育技术分技术委员会(CELTSC). CELTS-2[1]. 1(CD2.0) 术语[EB/OL]. <http://www.celtsc.edu.cn/>. 2008-04-25
- [4] Wiley D. Learning Object Design and Sequencing Theory[EB/OL]. <http://opencontent.org/docs/dissertation.pdf>. 2008-08-28
- [5] 胡小勇,祝智庭. 可重用学习对象分类法[J]. 电化教育研究, 2003(8)
- [6] 路秋丽,余胜泉. 面向学习对象的网络课程设计与开发[J]. 中国电化教育, 2005(1)
- [7] South J B, Monson D W. A University-wide System for Creating, Capturing, and Delivering Learning Objects[EB/OL]. <http://www.reusability.org/read/chapters/south.doc>. 2008-08-30
- [8] 全国信息技术标准化委员会教育技术分技术委员会(CELTSC). CELTS-3[1]. 1(CD3.0)学习对象元数据规范:信息模型[EB/OL]. <http://www.celtsc.edu.cn/>. 2008-04-25
- [9] 李恬. U-Learning 教育环境的应用与挑战[J]. 重庆工学院学报, 2007, 21(9): 141-144
- (上接第 264 页)
- [2] 徐涛,张艳宁. 三维网格模型零水印技术[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(4): 901-904
- [3] 温泉,孙铁锋,王树勋. 基于零水印的数字水印技术研究[C]//中国第三届信息隐藏学术研讨会论文集(CIHW2001). 西安:西安电子科技大学出版社, 2001
- [4] 温泉,孙铁锋,王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 214-216
- [5] 杨树国,李春霞,孙枫,等. 小波域内的图像零水印技术的研究[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(6): 664-669
- [6] 杨树国,李春霞,孙尧,等. 基于小波变换的零水印方案[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(29): 128-130
- [7] 杨红梅,张承明,张问银. 一种基于小波变换的零水印算法[J]. 山东农业大学学报:自然科学版, 2004, 35(3): 407-409
- [8] 季称利,杨晓元,张崇,等. 结合空域不变量的变换域零水印二次检测方案[J]. 计算机工程, 2004, 30(14): 105-107
- [9] 张崇,于晓琳,刘建平,等. 结合零水印的小波包图像水印方案[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(27): 84-87
- [10] 玉珍,杨群生. 基于 DCT 域和 DWT 域的图像零水印算法的研究[J]. 电脑开发与应用, 2005, 18(6): 12-14
- [11] Lounsbery M, DeRose T D, Warren J. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type [J]. ACM Trans Graph, 1997, 16(1): 34-273
- [12] Zachl K, Craig G. Spectral compression of mesh geometry [C]// Proc. SIGGRAPH 2000. New Orleans, USA, 2000: 279-2286

## 更 正

刊于 2009 年第 36 卷第 3 期“基于小波树调制及方向可控金字塔域特征的抗几何攻击水印”一文,因作者疏漏,造成数据有误,现更正如下:

1. 表 2 更正为

表 2 旋转攻击角度检测及水印检测结果(相关系数)

Lena			Fishing Boat			Couple			Stream & Bridge		
旋转角度	估计角度	相关系数	旋转角度	估计角度	相关系数	旋转角度	估计角度	相关系数	旋转角度	估计角度	相关系数
1	1.25	0.598	1	0.65	0.621	1	0.80	0.652	1	0.95	0.781
2	2.35	0.531	2	1.70	0.633	2	2.10	0.785	2	2.15	0.719
5	5.35	0.543	5	4.75	0.648	5	5.05	0.789	5	5.20	0.621
10	10.25	0.555	10	9.75	0.664	10	10.05	0.801	10	10.15	0.668
15	15.25	0.621	15	14.75	0.668	15	15.05	0.785	15	15.25	0.590
30	30.35	0.629	30	29.95	0.906	30	30.00	0.805	30	30.20	0.613
45	45.35	0.555	45	44.70	0.629	45	44.70	0.613	45	45.20	0.621

2. 2.1 节 Step4 中:“超树集为  $UT_n(n=1\cdots m/8)$ ”中的  $m/8$  更正为  $m/2$

3. 2.2 节 Step2 中:“得到  $UT_n(n=1\cdots m/8)$ ”中的  $m/8$  更正为  $m/2$