一种鲁棒的 3 维网格模型数字水印算法

杨 斌[1)] 李晓强[1)] 李 伟[2)]

[1)](上海大学计算机工程与科学学院,上海 200072) [2)](复旦大学计算机科学技术学院,上海 200433)

摘 要 提出一种新的空域盲检测 3 维网格模型数字水印算法,它主要利用主成分分析(PCA)和顶点分组技术。首先,使用 PCA 计算 3 维模型顶点坐标协方差矩阵的 3 个特征向量,把笛卡儿坐标系的 3 个坐标轴与这 3 个特征向量对齐。接着以伪随机数产生的向量为中心向量,构造一些互不重叠的圆锥状空间(bin 空间)。最后,先将 3 维网格模型的所有顶点分组到对应得 bin 空间里,再把每个 bin 空间量化成若干个子空间用来嵌入水印。实验结果表明,该算法对仿射变换、顶点乱序、噪声等攻击有较强的鲁棒性。

关键词 数字水印 3 维模型 PCA 鲁棒性

中图法分类号: TP301.6 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2009)12-2635-05

A Robust 3D Mesh Watermarking Scheme

YANG Bin[1)], LI Xiao-qiang[1)], LI Wei[2)]

[1)] (*School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai* 200072)

[2)] (*School of Computer Science, Fudan University, Shanghai* 200433)

Abstract This paper proposed a novel robust oblivious watermarking scheme in the spatial domain suitable for 3D mesh object, which combines the principal component analysis (PCA) method with construction of cone bins. Firstly, PCA is used to calculate the eigenvectors of covariance matrix of vertex coordinates. Then the object is rotated and translated so that its center of mass and the three eigenvectors that coincide with the origin and the three axes of the Cartesian coordinate system. Subsequently, many cone bins are constructed, each bin center according to two angle parameters of spherical coordinate produced by pseudorandom number generators and the vertices are classified into the appropriate cone bins. Each cone bin is divided into a number of sub-bins in order to embed the watermark bit, and the size of sub-bin can make tradeoff between invisible and robustness. Experiment results show the remarkable ability of the proposed mechanism to resist against various attacks such as adding noise, clipping, similarity transform and vertex re-ordering.

Keywords watermarking, 3D model, PCA, Robustness

1 引 言

随着计算机性能的不断提高和计算机图形学的飞速发展,无论是在计算机辅助设计领域还是在 3 维动画和游戏领域,3 维模型都得到广泛的应用。但由于人们可以很容易地传播、复制和编辑 3 维模型,所以如何有效保护 3 维模型的版权是一个迫切需要解决的问题。很多研究者利用数字水印来保护版权,用于保护 3 维模型的数字水印嵌入,也成为多媒体信息安全领域的研究重点。针对 3 维模型的水印算法和其他数字媒体的水印算法一样,也大致分为空域算法[1-6]和变换域算法[7-8]。空域算法是指直接修改顶点的坐标、拓扑结构或者其他数据来嵌入水印的方法,而变换域算法一般都先对原模型做某种变换,通过修改变换域中的数据来嵌入水印,然

基金项目:国家高技术研究发展(863)计划项目(2007AA01Z477);上海市教委重点学科项目(J50103)

收稿日期:2009-09-04;**改回日期**:2009-09-05

第一作者简介:杨斌(1984 ~),男。上海大学计算机工程与科学学院硕士研究生。主要从事 3 维模型数字水印技术研究。E-mail:actualyang@shu.edu.cn

后进行反变换得到嵌入水印后的模型。

文献[2]被公认为是 3 维模型数字水印领域发表的第一篇论文。在这篇论文中,作者开创性地提出了两种空域嵌入方法:TSQ(triangle similarity quadruple)方法和 TVR(tetrahedral volume ratio)方法,但它们的抗攻击能力较差。Benedens 在文献[3]中提出基于面片法向量分布的 3 维水印算法,这种方法通过扩展高斯图像(EGI)算法构造一些面片法向量的集合,然后修改每个集合中面片的法向量的分布来嵌入水印。然而,因为这种方法用到面的信息,所以它对于网格简化、剪切和重新三角化攻击的鲁棒性能比较差。文献[4]中,Stefanos 提出用 PCA 的方法分析网格的主成分,借助网格的主成分实现嵌入端和检测端的同步。该算法的主要缺点是:由于仅选择最大的主成分实现网格对齐,嵌入水印前需要网格模型先转换到球面坐标系,嵌入水印后再将模型从球面坐标系转换回直角坐标系。这个变换过程势必增加算法的复杂度,并且计算误差会导致水印误检率的增加。

早期的频域算法都是非盲检测的算法,文献[7]提出在不需要原始 3 维模型的情况下正确地检测到水印内容。该算法的主要思想是利用类似傅里叶变换的一种流形谐波变换来把原始 3 维网格模型转换到频率域,然后通过修改频率域参数来嵌入水印。该算法可抵抗仿射变换、噪声攻击和网格简化攻击。

本文提出一种新的鲁棒性 3 维网格模型数字水印算法。首先,把 3 维网格模型移动到原点,然后通过 PCA 方法计算出模型的 3 个主成分,通过坐标轴变换把 3 个主成分变成新的 3 个坐标轴。接着通过伪随机数序列技术构造一些分散的向量,由这样向量进而构造出若干个 bin,通过判断网格顶点与 bin 的位置关系,网格顶点会被分类到不同的 bin 当中。最后,以每个 bin 作为一个嵌入基元,通过修改 bin 中某些点的位置来达到嵌入水印的目的。实验结果表明,该算法对仿射变换、顶点乱序和噪声攻击等具有较强的鲁棒性。

2 算法描述

2.1 3 维网格模型转换

首先利用式(1)计算出网格模型的中心,并将网格的中心移动到原点。

$$\boldsymbol{v}^{c} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\boldsymbol{v}_i \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{v}^{c}$ 表示模型的中心,$\boldsymbol{v}_i$ 表示模型的第 i 个顶点,N 表示模型所有顶点的个数。

接着计算所有顶点坐标的协方差矩阵[4]如下:

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{N} x_i^2 & \sum_{i=1}^{N} x_i y_i & \sum_{i=1}^{N} x_i z_i \\ \sum_{i=1}^{N} x_i y_i & \sum_{i=1}^{N} y_i^2 & \sum_{i=1}^{N} y_i z_i \\ \sum_{i=1}^{N} x_i z_i & \sum_{i=1}^{N} y_i z_i & \sum_{i=1}^{N} z_i^2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中,(x_i, y_i, z_i)是顶点 $\boldsymbol{v}_i$ 的坐标,$\boldsymbol{C}$ 代表协方差矩阵。并计算出 $\boldsymbol{C}$ 的 3 个特征向量,也就是网格模型的 3 个主成分。在归一化后设这 3 个向量为

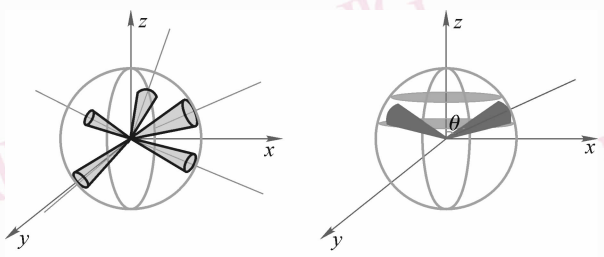
$$\boldsymbol{U} = \{u_x, u_y, u_z\}, \boldsymbol{V} = \{v_x, v_y, v_z\}, \boldsymbol{W} = \{w_x, w_y, w_z\} \tag{3}$$

最后通过式(4)进行坐标系转换,式(3)中 3 个向量将成为新坐标系的 3 个坐标轴。

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{x}}_i = x_i \cdot u_x + y_i \cdot u_y + z_i \cdot u_z \\ \hat{\boldsymbol{y}}_i = x_i \cdot v_x + y_i \cdot v_y + z_i \cdot v_z \\ \hat{\boldsymbol{z}}_i = x_i \cdot w_x + y_i \cdot w_y + z_i \cdot w_z \end{cases} \tag{4}$$

2.2 构造 bin

所有 bin 拥有相同的直径 t(是一个角度值),如图 1(a)所示。构造 bin 的关键步骤是构造 bin 的中心向量,在构造 bin 的中心向量时用球面坐标(ρ, θ, ϕ)表示。由伪随机数产生器产生 N_w 个 θ;每产生一个 θ 的同时,产生 m 个 ϕ(如图 1(b)所示),因此得到 $m \times N_w$ 个向量,这些向量作为为 bin 的中心向量,为描述方便,在下面 bin 构造中设 m 为 1。



(a) 圆锥状bin和bin中心向量 (b) 一个θ对应 m上ϕ

图 1 圆锥状 bin 示意图

Fig. 1 Sketch map of cone bin

bin 的构造过程如图 2 所示,为了避免不同 bin 之间的交叉,在构造第 i 个 bin 时用伪随机数产生器产生随机数 θ_i^{D},作为与第 $i-1$ 个 bin 的间隙,同时

又通过 θ_i^{D} 构造出第 i 个 bin。$\theta_i(i=1,2,\cdots,N_{\mathrm{w}})$ 表示构造第 i 个 bin 时的起始角。见下式:

$$\theta_i=\begin{cases}\theta_{i-1}+\theta_{i-1}^{\mathrm{D}}+t & i=2,\cdots,N_{\mathrm{w}}\\ 0 & i=1\end{cases}\tag{5}$$

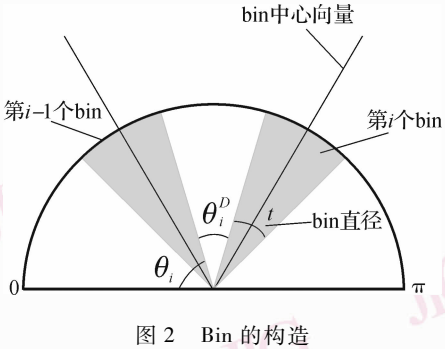


图 2　Bin 的构造

Fig. 2　Construction of bin

第 i 个 bin 的中心向量的关于 θ 的角度为

$$\theta_i^{\mathrm{C}}=\theta_i+\theta_i^{\mathrm{D}}+\frac{t}{2}\tag{6}$$

到目前为止,N_{w} 个不同的 bin 中心向量的 θ 角构造完毕,并且可以确保在 θ 范围内任意两个不同的 bin 不会互相交叉。bin 中心向量的 ϕ 角也是由伪随机数产生器构造,过程与前面 θ 的构造类似,这里不再赘述。

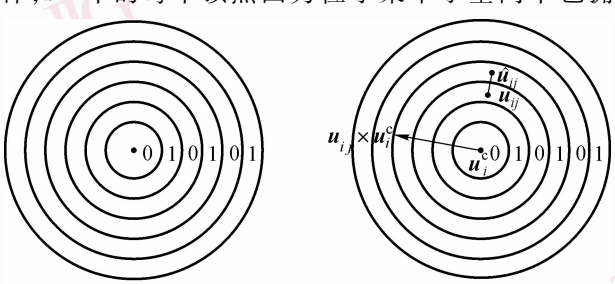
把 bin 中心向量从球面坐标转换为直角坐标,得到的 $m\times N_{\mathrm{w}}$ 个 bin 的中心向量为

$$\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{C}}=(\sin\theta_i^{\mathrm{C}}\cos\phi_i^{\mathrm{C}},\sin\theta_i^{\mathrm{C}}\sin\phi_i^{\mathrm{C}},\cos\theta_i^{\mathrm{C}})\tag{7}$$

在构造完 bin 后,根据顶点与各个 bin 之间的位置关系,把网格中的所有顶点归类到对应的 bin 中。

2.3　嵌入方法

本小节说明如何在保持不可见性地条件下,将水印嵌入到 bin 当中。本文的方法类似量化索引调制方法。把每个 bin 空间分解为 p 个子空间(如图 3(a)所示),每个子空间代表状态 0 或状态 1。这样,bin 中的每个顶点因为位于某个子空间中也拥有了状态 0 或 1。



(a)若干状态为0或1子空间　　(b)水印嵌入过程

图 3　bin 中子空间的划分

Fig. 3　Subspaces of bin

设水印序列为 $w_i(i=1,2\cdots,N_{\mathrm{w}})$。当在某个 bin 中嵌入一位水印时,需要使 bin 中的所有顶点的状态与水印位相一致。状态与水印位相同的顶点保持不动,状态与水印位相反的那些顶点将会被移动到相邻的子空间里,如式(8)所示:

$$d'_{ij}=\begin{cases}d_{ij} & s_{ij}=w_i\\ \left\lceil\frac{d_{ij}}{\Delta}\right\rceil\times\Delta+\frac{\Delta}{2} & s_{ij}\neq w_i\quad d_{ij}<\Delta\times(p-1)\\ \left\lfloor\frac{d_{ij}}{\Delta}\right\rfloor\times\Delta-\frac{\Delta}{2} & s_{ij}\neq w_i\quad d_{ij}\geqslant\Delta\times(p-1)\end{cases}\tag{8}$$

$$\Delta=\frac{t}{2p}\tag{9}$$

这里,d_{ij} 表示顶点坐标向量 $\boldsymbol{u}_{ij}$ 与 bin 中心向量之间的夹角,$\hat{d}_{ij}$ 表示嵌入水印后的顶点坐标向量 $\hat{\boldsymbol{u}}_{ij}$ 与 bin 中心向量之间的夹角,s_{ij} 表示顶点的状态,Δ 是每个子空间的宽度,p 代表子空间的个数。

如果需要改变顶点位置,则将顶点坐标向量旋转 $\hat{d}_{ij}-d_{ij}$ 度。旋转轴为顶点坐标向量与 bin 中心向量的叉积(图 3(b))。变换后的顶点坐标向量如下:

$$\hat{\boldsymbol{u}}_{ij}=\boldsymbol{u}_{ij}\cos\beta_{ij}+(\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{c}}\times\boldsymbol{u}_{ij})\sin\beta_{ij}+\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{c}}(\boldsymbol{u}_i^{\mathrm{c}}\cdot\boldsymbol{u}_{ij})[1-\cos\beta_{ij}]\tag{10}$$

$$\beta_{ij}=\hat{d}_{ij}-d_{ij}\tag{11}$$

2.4　检测算法

水印的检测算法如下:

(1)将 3 维网格的中心以及 3 个主成分与直角坐标系的坐标原点和 3 个坐标轴分别对齐,这一步类似 2.1 节。

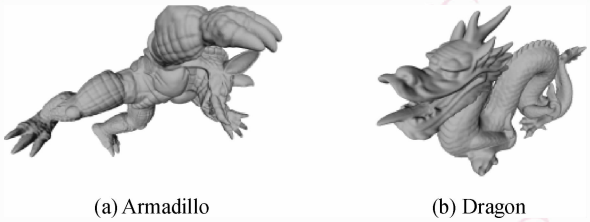
(2)根据 2.2 节的内容构造圆锥状的 bin。这里伪随机数产生器的密钥在检测端要给出,以及后面的量化子空间阶段时子空间的数量 p 也必须预先给出,这样才能最终正确的检测到水印。

(3)计算每个 bin 中顶点状态为 0 的个数和状态为 1 的个数。如果顶点状态为 0 的个数为大于状态为 1 的个数,那么这个 bin 所携带的水印位为 0,反之则为 1。

3　实　验

在实验中利用大量的 3 维网格模型来测试本文的算法,例如图 4(a)的 Armadillo 和图 4(b)的 Dragon。在下面的实验讨论中,以 Stanford 大学的

Bunny 模型为例,如图 5(a)所示。Bunny 模型拥有 35 947个顶点和 69 451 个面。每个 bin 的直径 t 设为 0.05,嵌入 30 位水印,p 为 2 时嵌入水印后的网格模型如图 5(b),p 为 10 时嵌入后网格模型如图 5(c)。



(a) Armadillo (b) Dragon

图 4 两个 3 维网格模型

Fig. 4 Two 3D mesh models

这里,水印的检测性能由检测率(DR)来衡量[9]。DT 代表检测正确的水印,TT 表示水印长度。

$$DR = \frac{DT}{TT} \tag{12}$$

3.1 水印不可见性分析

到目前为止,在 3 维模型数字水印领域对水印的不可见并没有统一的评价标准。Corsini 在文献[10]中提出一种嵌入水印后网格失真程度的客观评价机制,失真度由嵌入前后 3 维网格粗糙度的增量来衡量,如式(13)所示。

$$\Re(M, M^{\omega}) = \log\left(\frac{\rho(M^{\omega}) - \rho(M)}{\rho(M)} + k\right) - \log(k) \tag{13}$$

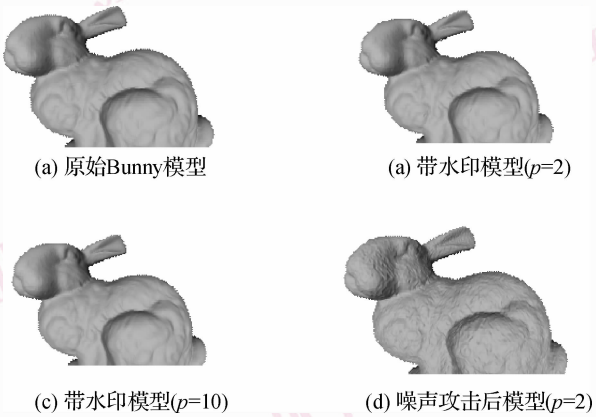
这里,$\rho(M)$ 是原始网格的粗糙度,$\rho(M^{\omega})$ 表示嵌入水印后 3 维网格的粗糙度。k 是为控制增量输出值的范围。$\Re(M, M^{\omega})$ 的值越小表明网格的失真程度越小。如果增量的值为 0,这意味着 3 维网格在嵌入水印后没有任何失真。关于这种方法更多的细节可以参考文献[10]。表 1 是用式(13)评价 3 维网格在嵌入 30 位水印后失真度的结果。

表 1 网格失真测试

Tab. 1 Distortion of mesh

p	$\Re(M, M^{\omega})$	DR(%)
10	2.53	100
8	2.83	100
4	4.9	100
2	5.8	100

在本文的实验里,增量的范围是从 0 到 12。从表 2 中可以发现当 p 的值大于 4 时,失真度已变得相当小。



(a) 原始Bunny模型 (a) 带水印模型(p=2)

(c) 带水印模型(p=10) (d) 噪声攻击后模型(p=2)

图 5 Stanford Bunny 模型

Fig. 5 Stanford Bunny

3.2 鲁棒性分析

表 2 和表 3 分别是 p 为 2 和 p 为 10 的鲁棒性测试结果。从表中可以看出,算法对于仿射攻击和顶点乱序有优异的抗鲁棒性能。这是因为本文算法中用到 PCA 方法对网格模型执行对齐操作,使得算法有仿射不变性。由于本文没有使用顶点拓扑信息所以本算法对于顶点乱序也具有免疫能力。

表 2 鲁棒性测试(p = 2)

Tab. 2 Robustness when p is 2

攻击类型	DR(%)	攻击类型	DR(%)
仿射变换	100	噪声叠加(1%)	100
顶点乱序	100	剪切(0.2%)	100
噪声叠加(0.5%)	100	剪切(1%)	87

从表 2 中看出,p 为 2 时水印对于噪声的攻击抵抗能力比较强,无论是加 0.5% 的噪声还是加 1% 的噪声都可以完全检测到水印。算法对于剪切攻击也有不错的抵抗能力,但是需要看到的是这里剪切的点的数量所占点总数的比例比较小,随着剪切比例的增加,水印的检测率也会降低。

从表 3 中可以看出,水印对于噪声攻击仍有不错的鲁棒性,但是对于剪切攻击,结果不太理想。从表 2 和表 3 中可以看出,p 为 10 时水印对于噪声攻击和剪切攻击的鲁棒性比 p 为 2 时差,但是表 1 中显示 p 为 10 时网格模型的失真程度比 p 为 2 时小。所以,这里也显示出水印的不可见性和鲁棒性有着

反比的关系。

表 3　鲁棒性测试($p=10$)

Tab. 3　Robustness when p is 10

攻击类型	DR(%)	攻击类型	DR(%)
仿射变换	100	噪声叠加 (1%)	84
顶点乱序	100	剪切 (0.2%)	83
噪声叠加 (0.5%)	97	剪切 (1%)	70

4　结　论

本文提出了一种新的基于 PCA 的 3 维网格模型算法。该算法将网格模型的顶点坐标的 3 个特征向量与坐标系 3 个坐标轴对齐。水印被嵌入到一些由随机数产生器构造的 bin 里面。每个 bin 被量化成若干个子空间,用来控制水印的不可见性。本文的算法对仿射变换和顶点乱序有相当优异的鲁棒性能。通过实验证明本文算法对噪声攻击有较强鲁棒性,并且随着 bin 子空间数目的增多鲁棒性能逐渐下降而水印的不可见性能逐渐上升。在以后的研究中,将努力改善该算法使得能够在水印的鲁棒性和不可见方面都有更好的性能。

参考文献(References)

1　Agarwal P, Prabhakaran B. Robust blind watermarking mechanism for point sampled geometry [A]. In: Proceedings of the Ninth ACM Multimedia and Security Workshop [C], Dallas, USA, 2007, 175-186.

2　Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models[A]. In: Proceedings of the Fifth ACM International Conference on Multimedia[C], Seattle, Washington, USA, 1997: 261-272.

3　Benedens O. Geometry-based watermarking of 3D models[A]. IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications [J], 1999, **19**(1):46-55.

4　Zafeiriou S, Tefas A, Pitas I. Blind robust watermarking schemes for copyright protection of 3D mesh objects[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005, **11**(5):596-607.

5　Zhang Jing, Zheng Guo-qing. A geometry property based watermarking scheme for three dimensional meshes[J]. Journal of Computer-Aided Design and 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.]

6　Hu Min, Xie Ying, Xu Liang-feng, *et al*. A Geometry property based adaptive watermarking scheme for 3D Models [J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2008, **20**(3): 390-394. [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.]

7　Liu Yang, Prabhakaran B, Guo Xiao-hu. A robust spectral approach for blind watermarking of manifold surfaces [A]. In: Proceedings of the 10th ACM Workshop on Multimedia and Security[C], Oxford, UK, 2008:43-52.

8　Konstantinides J M, Mademlis A, Daras P. Blind robust 3-D mesh watermarking basedon oblate spheroidal harmonics [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2009, **11**(1):23-38.

9　Cho J W, Kim M S. Robust watermarking on polygonal meshes using distribution of vertex norms [A]. In: Proceedings of International Workshop on Digital Watermarking 2004 [C], Seoul, Korea, 2004: 283-293.

10　Corsini M, Gelasca E D, Ebrahimi T. Watermarked 3-D mesh quality assessment[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2007, **9**(2): 247-256.