

基于几何特征的鲁棒三维网格数字水印算法

刘辉,胡敏

LIU Hui,HU Min

合肥工业大学 计算机与信息学院,合肥 230009

School of Computer and Information,Heifei University of Technology,Hefei 230009,China

E-mail:gmluihui@gmail.com

LIU Hui,HU Min.Geometry property based robust watermarking scheme for three dimension meshes.Computer Engineering and Applications,2009,45(9):98-101.

Abstract: This article proposes a robust watermarking scheme for three-dimensional triangle meshes.First,the 3D mesh model is affine transformed into a new 3D model ,which is robustness to translation,rotation and scaling.Second,the distance of each vertex in the mesh to the origin of the mesh is calculated,and the real number sequence of distance is transformed to a signal in frequency domain using one-dimensional discrete cosine transform(DCT).A watermark is embedded into the signal in frequency domain,and the embedded watermark is imperceptible.Experimental results show the proposed method is not only robust to affine attack,but also robust against common mesh attacks such as mesh simplification,mesh cropping,random noise added and combined attacks.

Key words: watermarking;robust;geometry property;3D mesh model

摘要:文中算法首先将三维网格模型进行仿射变换,以获得模型的旋转不变性、缩放不变性;然后,将空间坐标系原点到模型顶点的距离通过一维 DCT 变化到频域,在频域信号上加入水印,使得嵌入的水印具有不可见性。实验结果表明:该算法不仅对仿射攻击具有较强的鲁棒性,而且对网格简化、加噪声和剪切攻击以及它们的联合攻击具有较好的鲁棒性。

关键词:数字水印;鲁棒;几何特征;三维网格模型

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2009.09.028 **文章编号:**1002-8331(2009)09-0098-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP309

1 引言

随着数字媒体在日常生活中的广泛应用,人们通过互联网等工具可以很方便地获取、复制、操作和发布数字媒体,数字媒体的产权保护已经成为学术界与产业界共同关注的问题。作为传统加密方法的有效补充手段,数字水印技术本身并不能阻止盗版活动的发生,但它可以判别对象是否受到保护,监视被保护数据的传播、进行真伪鉴别、防止非法拷贝、解决版权纠纷等。数字水印的嵌入对象可以是图像,音频,视频或三维模型等。与数字图像水印不同的是三维网格模型的载体数据较少,同一模型的表示方法不具有唯一性,而且模型数据缺少内在顺序,难以将模型变换到频域进行操作,以及存在较多几何或拓扑操作对嵌入在模型中的水印进行攻击等,这使得三维模型水印技术研究逐渐成为当前水印技术研究中的一个难点和热点。

Ohbuchi^[1-4]等人较早地关注了三维几何模型数字水印,提出了几种 3D 网格数字水印嵌入算法:三角形相似四元组(TSQ)嵌入算法、四面体体积比(TVR)嵌入算法和网格密度模式(MDP)嵌入算法,这些算法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的鲁棒性较差,无法应用于实际的版权保护。Benedens^[5]通过修改表面法向量嵌入数字水印,实验结果表明该方法能抵抗 3D 模型简化攻击。Wagner^[6]在网格顶点法向的二进制表示上加水印,水印加在二进制数的高位比加在低位的鲁棒性好,但对原始网格形状的影响也更大。喻志强^[7]等提出修改模型中心到顶点的向量长度的方法,该算法能够抵抗一般的 3D 模型攻击,但嵌入强度不能太大,否则就会改变模型的视觉效果。以上算法都是在空域上加入水印,因此水印的鲁棒性不高。为获得更好的鲁棒性,把研究的焦点转移到了频域。Praun 等人^[8]将二维水印中的扩频技术扩展应用到三维模型水印中,该算法具有较好的鲁棒性,但计算量大,执行速度慢。Ohbuchi^[9]等根据网格的拓扑结构构造拉普拉斯矩阵,对拉普拉斯矩阵做特征值分解,得到一系列特征向量。对应于小特征值的特征向量代表网格的低频成分。将网格中所有点的 x 值、 y 值和 z 值映射到由特征向量组成的坐标系上,得到三个新向量,扰动新向量加入水印。这种算法可以抵抗如仿射变换、顶点坐标值的随机噪声、网格平滑、局部剪切等攻击。张静^[10]所提

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60473114, No.60575023);安徽省自然科学基金(the Natural Science Foundation of Anhui Province of China under Grant No.070412046)。

作者简介:刘辉(1979-),男,硕士,主要研究方向为三维模型数字水印技术;胡敏(1967-),女,副教授,博士,硕士生导师,主要研究领域为计算机图形学,数字图像处理等。

收稿日期:2008-01-31 **修回日期:**2008-04-11

出的一种基于几何特征的三维网格数字水印算法,该算法对剪切攻击的鲁棒性较差。周昕等^[11]将三维网格的顶点以及三角面片里的部分点对应为二维平面上的点,然后在得到的二维图像上使用二维的信号处理方法加入水印,但当从二维平面逆映射回三维网格时,只用了部分二维点。因为另一部分二维点被映射成三角面片里的点,它们对重构三维网格没有贡献,这部分点上的水印信息就被丢失了。

本文提出一种基于几何特征的鲁棒性三维网格数字水印算法。该算法将规范化后的模型的原点到顶点的距离进行DCT,再在部分DCT系数上嵌入水印。该算法将一组水印多次嵌入到三维模型的不同部位。上述实验结果表明提出的数字水印嵌入算法具有不可见性,对网格简化、加噪声和剪切攻击以及它们的联合攻击具有较好的鲁棒性。

2 算法的基本原理

在视觉效果相同的条件下同一个三维模型可以有成千上万种不同的三角形网格表示形式,说明这些三角形网格表示具有某些相同或基本相同的全局几何特征,如三维模型的大小、表面曲率、表面各点到中心的距离等。要使水印信息稳健地嵌入到三维模型中,必须选择某种全局几何特征作为嵌入对象。与文献[10]和[12]不同的是本文先对三维模型进行规范化处理,将模型仿射变换到一个几何不变的空间,使三维模型对仿射变换具有较好的鲁棒性,然后将变换后的模型表面各点到坐标系原点距离值序列通过DCT转换成频域信号,在频域的高频系数上加入水印,由此带来更高的鲁棒性。算法将一组水印多次嵌入到模型的不同部位,这样的水印不宜被抹去,保证了抗攻击能力。

2.1 三维模型的预处理

三维网格模型可表示为 $M_0=\{V_0, E_0\}$, 其中, $V_0=\{v_{oi}|v_{oi}=(x_{oi}, y_{oi}, z_{oi}), i=1, 2, \dots, n\}$ 代表由 n 个网格顶点组成的集合; $E_0=\{e_k|e_k=(i_k, j_k), k=0, \dots, m, 0 \leq i_k \leq n; 0 \leq j_k \leq n\}$ 是网格中边的集合, (i_k, j_k) 表示一条连接第 i_k 个和第 j_k 个顶点的边。首先对三维网格模型进行预处理,将三维模型变换到一个几何不变的空间,使三维模型获得了平移不变性、旋转不变性和缩放不变性,从而使嵌入的水印可以抵抗平移、旋转和缩放的几何攻击。具体处理步骤如下:

(1)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 为新坐标系的 z 轴。向量 u_1 的两个端顶点和顶点 O_N 不参与水印的嵌入过程。

(2)旋转和平移。将三维模型平移和旋转到新坐标系下,即 O_N 点为三维模型的新原点, 向量 u_2 与 x 轴重合, 向量 u_1 与 z 轴重合。

(3)模型缩放。以 $|O_N V_d|$ 为缩放因子对三维模型进行缩放处理。通过上述变换,得到预处理后的三维模型,表示为 $M_T=\{V_T, E_0\}$, 其中顶点 $V_T=\{v_i|v_i=(x_i, y_i, z_i), i=1, 2, \dots, n\}$ 。

2.2 水印的嵌入过程

水印加入的具体过程如下:

(1)按图 1 所示的球坐标系将 V_T 中的顶点坐标从 x_i, y_i, z_i 转换到球坐标系下的 θ_i, φ_i, r_i 。即:

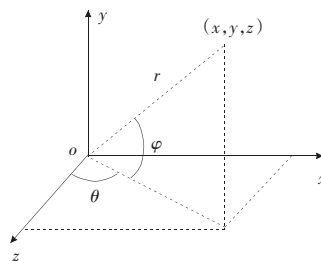


图 1 x, y, z 与 θ, φ, r 的关系

$$r_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2};$$

$$\theta_i = \begin{cases} \arccos(z_i / \sqrt{x_i^2 + z_i^2}) & x_i \geq 0 \\ 2\pi - \arccos(z_i / \sqrt{x_i^2 + z_i^2}) & x_i < 0 \end{cases}$$

$$\varphi_i = \begin{cases} \arccos(\sqrt{x_i^2 + z_i^2} / r_i) & y_i \geq 0 \\ -\arccos(\sqrt{x_i^2 + z_i^2} / r_i) & y_i < 0 \end{cases}$$

其中 $0 \leq \theta_i < 2\pi; -\pi/2 \leq \varphi_i \leq \pi/2$ 。 r_i 是第 i 个顶点到原点的距离。

(2)按照文献[10]的思想,根据下述式(1)和(2)以及各顶点的 θ_i, φ_i 的值调整网格顶点的顺序。

$$\frac{\pi}{2} m_1 \leq \theta_i \leq \frac{\pi}{2} (m_1 + 1), \text{ 其中 } m_1 = 0, 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\pi}{2} (m_2 - 1) \leq \varphi_i < \frac{\pi}{2} m_2 & m_2 = 0 \\ \frac{\pi}{2} (m_2 - 1) \leq \varphi_i < \frac{\pi}{2} m_2 & m_2 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)是将 θ_i 的取值区间分成 4 段,式(2)是将 φ_i 的取值区间分成 2 段。整个规范化后的三维模型被分成了 4×2 块。将各顶点归入相应的块,同一块内的顶点随便取一个顺序即可。将所有的顶点排成一个一维序列,顶点对应的 r 值也相应地形成一个序列 $R: \{r_{ik} | k=1, 2, \dots, n\}, \{i_k | k=1, 2, \dots, n\}$ 是 $\{i | i=1, 2, \dots, n\}$ 的一种排列。序列 R 将用于嵌入水印,提取水印时的顶点顺序要和此处的顺序一致。

(3)设要加入的水印长度为 L ,将序列 R 中的数字每 K 个一组, $K > L$ 即可。对每组进行一维 DCT。将每一组得到的 K 个变换后的系数序列记为 $s=\{s_j | j=1, 2, \dots, K\}$ 。取出后 L 个交流系数 $S_{K-L+1}, S_{K-L+2}, \dots, S_K$, 每个系数上加 1 比特水印信息,前 $K-L$ 个系数保持不变,于是得到 s' 。即

$$s'_j = s_j, \quad 1 \leq j \leq K-L$$

$$s'_j = \begin{cases} s_j + \alpha \times \varepsilon_{j-(K-L)} \times 1, & w_{j-(K-L)} = 1 \\ s_j + \alpha \times \varepsilon_{j-(K-L)} \times (-1), & w_{j-(K-L)} = 0 \end{cases}, \quad K-L < j \leq K \quad (3)$$

在式(3)中, α 是水印的嵌入强度, $\varepsilon=(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_L)$ 是用于调制的服从 $[0, 1]$ 均匀分布的随机数, $w_{j-(K-L)}$ 是水印的第 $j-(K-L)$ 位。将嵌入水印后的序列 s' 进行逆 DCT 后重新得到距离序列 $R': \{r'_{ik} | k=1, 2, \dots, n\}$, 于是可得规范化后嵌入水印的各顶点坐标: $x'_i = r'_i \times \cos \varphi_i \times \sin \theta_i, y'_i = r'_i \times \sin \varphi_i, z'_i = r'_i \times \cos \varphi_i \times \cos \theta_i$, 再根据 2.1 节,对模型进行逆向的缩放、旋转、平移后,便得到嵌入水印后的三维网格模型。

2.3 水印的提取算法

水印提取过程如下:

(1)网格重定位。当三维模型受到平移、旋转和等比例缩放攻击时,模型会发生改变。通过网格重定位可使模型恢复到原

来的位置、方向和比例。根据第 2.1 节所描述的过程将原始模型 M_0 和待测模型 M_1 进行平移、旋转和缩放, 得到 M_{0T} 和 M_{1T} 。 M_{1T} 即为重定位后的待测模型。

(2) 网格重采样。对 M_{0T} , 加入水印时用的顶点序列 R 中的每个顶点可表示为 θ_i, φ_i, r_i , 加入水印后表示为 $\theta_i, \varphi_i, r'_i$ 。从 M_{0T} 的原点沿 θ_i, φ_i 方向引一条射线与 M_{1T} 相交。由于网格会遭受攻击(如剪切攻击), 真正的对应点可能不存在; 而且由于加水印和攻击都对顶点进行了扰动, 求交得到的可能不是真正的对应点, 所以设置了一个阈值 β 。当 r_i 和求得的对应点的 r 值误差超过 β 时按无交点处理, 若无交点, 则用 r_i 作为该点的 r 值; 若有一个以上的交点, 则取与 r'_i 误差最小的 r 值作为其对应点的 r 值, 这是与文献[10]和[12]的不同之处, 以便使所求交点更逼近原模型对应点。

(3) 提取水印。由步骤(2)得到了用于提取水印的顶点的一维序列, 该顶点序列中顶点的 r 值也同时排成一个序列 R_1 。设水印长度为 L , 分别把序列 R_1 和加入水印时的序列 R 每 $K(L < K)$ 个一组进行一维 DCT, 变换后的系数分别为: $s = \{s_j | j=1, 2, \dots, K\}$ 和 $s^* = \{s^*_j | j=1, 2, \dots, K\}$ 。 s 和 s^* 的后 L 个系数分别相减, 即 $d_{j-(K-L)} = s^*_j - s_j, K-L < j \leq K$, 得差值序列 $d: \{d_1, d_2, \dots, d_L\}$, 根据 d 提取出水印:

$$w_i = \begin{cases} 0, & d_i < 0 \\ 1, & d_i \geq 0 \end{cases}; 1 \leq i \leq L$$

(4) 判定水印的正确性。采用相关函数 Cor 进行相关性的计算, 利用相关值判定水印的正确性。用比特误差率 Ber 度量水印的误差率。相关函数的定义如下:

$$Cor = \frac{\sum_{i=1}^L (w_i^d - \bar{W}^d)(w_i - \bar{W})}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (w_i^d - \bar{W}^d)^2 \sum_{i=1}^L (w_i - \bar{W})^2}} \quad (4)$$

式(4)中 W^d 是提取出来的水印序列, W 是原始水印序列, \bar{W}^d 是 W^d 序列中各位的平均值, \bar{W} 是 W 序列中各位的平均值, L 是水印序列长度。文献[11]通过大量实验得到的最大相关值在 0.47 左右, 本文相关性系数 Cor 设置为 0.5。如果提取出的水印与原始模型作者所出示水印的相关值不小于 0.5, 则可证明作者拥有版权; 否则, 不能证明作者拥有版权。

3 实验及结果分析

本文在兔子模型和牛模型的网格上进行实验, 来验证本文算法。网格的形状如图 2 和图 3 所示, 其中兔子模型由 1 494 个顶点和 2 915 个三角片构成, 牛模型由 2 904 个顶点和 5 904 个三角片构成。



图 2 兔子的原始模型

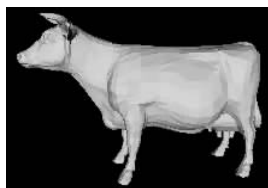


图 3 牛的原始模型

加入水印后的模型进行简化、加随机噪声、剪切以及它们的联合操作等攻击, 来检验算法的鲁棒性。对兔子模型和牛模型做相同的实验, 实验如下:

(1) 水印嵌入实验: 水印长度为 64 位, 即 $L=64$, 每 128 个顶点为一组, 即 $K=128$ 。对这 128 个距离值进行一维 DCT 后得到 128 个系数。这 128 个系数中前 64 个保持不变, 后 64 个使用式(3)加入水印, 得到 128 个新的系数。然后用逆 DCT 将 128 个系数重新变成 128 个距离值, 根据距离值修改顶点坐标, 得到加了水印的网格。本文的水印嵌入强度 α 在不影响视觉效果的前提下取 0.012, 阈值 β 取 0.015 8。兔子模型中水印重复嵌入次数为 $1\ 494/128=9$ 次, 牛模型中水印重复嵌入次数为 $2\ 904/128=22$ 次, 实验结果如图 4 和图 5 所示。



图 4 嵌入水印后的兔子模型

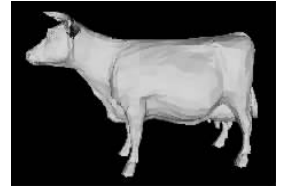


图 5 嵌入水印后的牛模型

通过图 2 和图 4 比较以及图 3 和图 5 比较, 可知本文水印算法满足水印的不可见性条件。

(2) 简化攻击实验。采取 Stan Melax^[12]的简化算法对嵌入水印后的模型进行简化攻击, 简化率即为简化掉的顶点数占原模型总顶点数百分比。简化后的模型如图 6 和图 7 所示。结果如表 1 所示。



图 6 简化 50% 的兔子模型

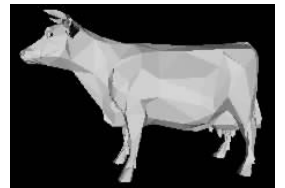


图 7 简化 75% 的牛模型

从表 1 可以看出, 即使受攻击模型只剩很少的顶点, 本文算法仍表现出很强的鲁棒性。

(3) 噪声攻击实验。对已加水印模型的顶点坐标加入均匀的随机噪声。噪声的幅度定义为噪声向量的长度与网格顶点到网格中心的距离的比值^[9], 它体现了噪声的强弱。噪声攻击实验的结果如表 2 所示, 加过噪声的兔子模型模型如图 8 至图 11 所示。



图 8 噪声幅度 0.5%



图 9 噪声幅度 1%



图 10 噪声幅度 1.5%



图 11 噪声幅度 2%

本文通过水印的嵌入实验来检验水印的不可见性; 通过对

表 1 简化攻击实验结果

剩余顶点数(简化率)	兔子模型(Bunny)				牛模型(Cow)			
	1 121(25%)	747(50%)	374(75%)	149(90%)	2 178(25%)	1 452(50%)	726(75%)	290(90%)
Cor	0.969 223	0.939 336	0.847 483	0.659 153	0.939 336	0.906 693	0.875 000	0.784 706
Ber	0.015 625	0.031 250	0.078 125	0.171 875	0.031 250	0.046 875	0.062 500	0.109 375

表 2 噪声攻击实验结果

噪声幅度	兔子模型(Bunny)				牛模型(Cow)			
	0.5%	1%	1.5%	0.2%	0.5%	1%	1.5%	0.2%
Cor	1.000 000	0.937 500	0.876 714	0.814 092	0.969 223	0.939 336	0.875 000	0.784 706
Ber	0.0	0.031 250	0.062 500	0.093 750	0.015 625	0.031 250	0.062 500	0.109 375

表 3 剪切攻击实验结果

剩余顶点数(裁剪率)	兔子模型(Bunny)				牛模型(Cow)			
	792(47%)	598(60%)	294(81%)	149(90%)	1 540(47%)	1 162(60%)	552(81%)	290(90%)
Cor	0.969 223	0.969 223	0.969 223	0.939 336	0.969 223	0.939 336	0.844 162	0.750 000
Ber	0.015 625	0.015 625	0.015 625	0.031 250	0.015 625	0.031 250	0.078 125	0.125 000

由图 8 至图 11 可知,在严重影响视觉效果的情况下(如噪声幅度为 2%),本文算法仍具有较强的鲁棒性。通过表 2 的数据比较可知本文算法所得的相关性系数均高于文献[9]和文献[11-12],接近或高于文献[10]。

(4)剪切攻击实验。裁剪率即为裁剪的顶点数占原模型总顶点数百分比。剪切攻击实验的结果如表 3 所示,剪切过的兔子模型和牛模型如图 12 和图 13 所示。



图 12 顶点剩余 47% 的兔子模型 图 13 顶点剩余 47% 的牛模型

表 3 中当所剩余顶点只有 10%时,相关系数仍大于 0.5,表明本文算法对剪切攻击具有很强的鲁棒性。通过比较,在同等级度的剪切率下,本文算法所得相关系数接近文献[12]的,高于文献[9-11]的。

(5)联合攻击实验。首先用剪切攻击和噪声攻击的混合攻击对算法进行了四种情况的实验,兔子模型的实验结果见表 4;然后用简化攻击、剪切攻击和噪声攻击的联合攻击进行了实验,兔子模型的实验结果见表 5。实验结果均表明该算法对这类联合攻击具有较强的鲁棒性。

表 4 兔子模型的剪切、噪声联合攻击实验结果

剪切率	噪声幅度	Cor	Ber
40%	0.5%	0.937 500	0.031 250
50%	0.5%	0.906 693	0.046 875
70%	0.5%	0.875 000	0.062 500
80%	0.5%	0.751 500	0.125 000

表 5 兔子模型的剪切、简化和噪声联合攻击实验结果

简化率	剪切率	噪声幅度	Cor	Ber
10%	50%	0.5%	0.906 693	0.046 875
25%	50%	0.5%	0.875 000	0.062 500
50%	50%	0.5%	0.875 000	0.062 500
75%	50%	0.5%	0.814 092	0.093 750

4 结论

提出一种基于几何特征的鲁棒性三维网格数字水印算法。首先,对三维网格模型进行仿射变换预处理,使嵌入的水印能较好地抵抗三维几何变换的攻击;然后,把网格顶点到空间坐标系原点的距离看成一维的空域数字信号,对其进行一维 DCT 变换,在频域中加入水印,以增强水印的鲁棒性。实验结果表明所提出的数字水印嵌入算法具有不可见性,对网格简化、加噪声和剪切攻击以及它们的联合攻击具有较好的鲁棒性。

参考文献:

- [1] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models [C]//Proceedings of ACM Multimedia 97. New York: ACM Press, 1997: 261-272.
- [2] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models[J]. IEEE J Sel Areas Commun, 1998, 16(4): 551-560.
- [3] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking three-dimensional polygonal models through geometric and topological modifications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 16(4): 551-559.
- [4] Tefas A, Pitas L. Robust spatial image watermarking using progressive detection [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2001.
- [5] Benedens O. Watermarking of 3D polygon based models with robustness against mesh simplification [C]//Proceedings of SPIE: Security and Watermarking of Multimedia Contents, San Jose, California, 1999: 329-340.
- [6] Wagner M. Robust watermarking of polygonal meshes [C]//Proceedings of Geometric Modeling and Processing, Hong Kong, 2000: 201-220.
- [7] Yu Zhiqiang, Horace Ho-Shing IP, Zhao Rongchun, et al. A robust watermarking technique of triangular meshes [J]. Computer Applications, 2002, 22(9): 94-96.
- [8] Praun E, Hoppe H, Finkelstein. A robust mesh watermarking [C]//Proceeding of SIGGRAPH, 1999: 49-56.