

三维网格模型零水印技术

徐 涛, 张艳宁

(西北工业大学 计算机学院, 西安 710072)

摘要:为解决网格模型水印算法中水印鲁棒性与透明性之间的矛盾,提出了一种适用于任意拓扑连通结构的网格模型零水印算法。水印由网格的几何数据经过空域特征提取及变换能量集中后生成。实验结果表明:算法构造的水印不仅能抵抗顶点重排序、平移、旋转、各向一致缩放等攻击,而且对加噪、网格简化攻击也表现出较好的鲁棒性。

关键词:信息处理技术;三维水印;网格水印;零水印

中图分类号:TN911.73 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2007)04-0901-04

Zero-watermarking technique of three-dimensional meshes

Xu Tao, Zhang Yan-ning

(School of Computer, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to compromise the robustness and transparency of watermarked 3D meshes, proposed a zero-watermarking algorithm could be used in meshes with any topological connectivity. Watermarking signal was constructed by geometric data of mesh, after geometric feature extracting in spatial domain and energy's convergence in transformed domain. Experimental results show the watermark constructed by proposed algorithm can resist vertex reordering, translating, rotating, uniformed scaling, and show good robustness against adding noise and mesh simplifying.

Key words: information processing; 3D watermarking; mesh watermarking; zero-watermark

Ohbuchi 等^[1]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,标志着数字水印技术的研究开始从音频、图像等一维、二维媒体拓展到三维多边形领域。目前,网格模型水印算法多以网格的几何数据为水印载体,通过对其进行轻微的扰动来实现水印嵌入。与二维图像相比,网格的几何数据对水印的嵌入显得更加敏感,如基于人类视觉系统(HVS)门限的图像水印算法可对视觉不敏感区域(如强纹理区域)的像素嵌入高强度水印,而现阶段三维模型

视觉特性的研究尚不成熟,为避免模型外观失真,多数情况下水印只能以很低的强度嵌入,从而降低了水印的鲁棒性。为解决图像水印算法中水印鲁棒性与透明性之间的矛盾,温泉等^[2,3]提出了零水印的概念,在不对图像进行任何改动的前提下,利用其重要特征构造水印,再将水印在 IPR 信息数据库注册实现版权保护。目前在图像零水印技术方面,已有学者进行了研究探讨^[4,5],从中可以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

收稿日期:2006-07-21.

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20040699034).

作者简介:徐涛(1974-),男,博士研究生. 研究方向:网络安全和数字水印. E-mail:master_xutao@163.com

通讯联系人:张艳宁(1967-),女,教授,博士生导师. 研究方向:图像处理,信号与信息处理.

E-mail:ynzhang@nwpu.edu.cn

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。作者提出了一种三维网格模型的零水印算法,通过对网格几何数据的空域特征提取和变换域二次能量集中,构造出反映网格全局几何特征的水印,并对水印的鲁棒性进行了分析。

1 算法描述

一个典型的网格模型 M 可视为由两个子集组成的集合,即 $M = \{S, V\}$,其中 V 是网格顶点组成的子集,为一组三维坐标几何数据, S 子集为定义在 V 上的一组拓扑连接数据,包括边信息、面信息等,水印需从这两类数据中选择一个来生成。与顶点几何数据相比,网格的拓扑数据是不稳定的,如顶点重排序后,虽然模型的外观质量没有发生任何改变,但拓扑顺序则可能已经不同,拓扑数据的脆弱性决定了顶点的几何数据更适合作为水印信息的构造源。

IPR 信息数据库容量有限,要求构造出的水印信息必须短小,而三维网格模型通常包含大量的顶点几何数据,因此有必要对网格进行几何特征提取。现有的图像零水印算法多利用小波变换、DCT 变换等频谱分解方法将图像的主要空域特征集中到变换域中的重要系数(一般为大值系数)上,再以此来构造水印。目前三维网格模型虽有少量频谱分解方法,但大多对网格拓扑结构有限制要求,或计算复杂度较高,如缓慢小波(Lazy Wavelet)分解^[6]只适用于一分四子分连通结构的网格模型,而基于拉普拉斯矩阵特征值分解的频谱分析^[7]计算量过大。

考虑到现有的网格频谱分析方法仍不完善,作者采用空域几何特征提取结合二维频谱分解能量集中的方法:通过构造球面坐标映射方阵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,然后利用二维小波变换对球面坐标映射方阵频谱分解,反映网格模型几何特征的主要能量在小波系数的低频子带再次得到集中,用于版权注册的水印信息由小波域低频系数构造生成。下面对算法的步骤进行详细的描述。

(1) 构造网格的球面坐标映射方阵

首先将网格模型 M 的中心移到三维笛卡儿直角坐标系原点,计算网格各顶点在以模型中心为原点的球面坐标系中的坐标值,包括半径 r 、经

度角 θ 、纬度角 φ 。

考虑到网格模型可能会遭受旋转攻击和顶点重排序攻击,因此需选定一特殊顶点作为网格分割的起始标志点,选取规则如下:按最大的 r 值搜索顶点,检查符合条件的顶点数目是否唯一,若不唯一,则按次大的 r 值继续上述过程,直至找到具有相对最大 r 值且数目唯一的顶点,选择其作为起始标志点。按起始标志点的参数修正网格各顶点的经、纬度角值: $\theta_i = \theta_i - \Delta\theta$, $\varphi_i = \varphi_i - \Delta\varphi$, $\Delta\theta$ 和 $\Delta\varphi$ 分别为起始标志点的经、纬度角值。

设定经度方向的间隔角度 d_θ 和纬度方向的间隔角度 d_φ ,将网格模型划分为 $N \times N$ 个分块,由于经度角的取值范围为 0 到 2π ,而纬度角的取值范围为 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$,因此 $d_\theta = 2\pi/N$, $d_\varphi = \pi/N$ 。计算落入各分块中顶点半径 r 的平均值,将其填入由间隔角度 d_θ 和 d_φ 决定的 $N \times N$ 方阵对应各格中,得到网格模型的球面坐标映射方阵 I 。

(2) 球面坐标映射方阵二维小波变换

对球面坐标映射方阵 I 进行二维 Haar 小波变换,产生 LL、HL、LH、HH 四个子频带,其中 LL 子频带为原始映射方阵的最佳逼近,集中了绝大部分的能量,更能反映网格模型的外观几何特征,故选择它作为水印信息的构造源。

(3) 水印生成

以 LL 子带系数的均值 Avg 为阈值对 LL 子带中的各个系数进行二值量化,生成大小为 $N/2 \times N/2$ 的水印方阵:

$$\text{watermark}(m, n) = \begin{cases} 0, & \text{if } LL(m, n) \leqslant Avg \\ 1, & \text{if } LL(m, n) > Avg \end{cases}$$

将水印方阵编码为一组长度为 L 的一维二进制序列,在 IPR 信息数据库注册,该网格模型即已列入合法版权保护的范围。

(4) 水印检测

提取水印时,无需原始网格模型参与。从 IPR 信息数据库中取出注册的水印,由水印的长度 L 求得网格模型分割的尺寸: $N = 2\sqrt{L}$ 。按上述方法将待测网格按 $N \times N$ 分割,重复执行前述步骤后提取出水印,与注册的水印进行比较,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,实际水印检测时,可通过计算水印相似度 Sim 值是否大于指定的阈值来验证:

$$Sim = \frac{\sum_{i=1}^L w(i) w_x(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^L w_x^2(i)}}$$

式中: $w(i)$ 和 $w_x(i)$ 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,在综合考虑虚警率和漏警率,并经过反复实验后,作者将阈值 T 设为0.7。

2 水印鲁棒性分析

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、剪切等,下面就本文算法对这些攻击表现出的鲁棒性进行逐一分析。

(1) 顶点重排序攻击

由于水印的构造、提取过程与网格的拓扑数据无关,且设置了一特殊顶点作为网格划分的起始标志点,因此顶点重排序攻击不会对水印提取产生任何影响。

(2) 平移、旋转和各向一致缩放攻击

由于水印的构造和提取过程都是针对坐标原点移至模型中心后的网格进行操作的,因此平移攻击对水印提取不会产生影响;起始标志点的设置使得旋转后的网格在分割前可以自动恢复为原始网格分割时的形态,因此旋转攻击不会对水印提取产生影响;各向一致缩放攻击相当于将网格顶点的半径 r 值放大或缩小某个常数倍,与此同时,构造出的球面坐标映射方阵及其二维小波变换域的小波系数也将放大或缩小常数倍,而水印的构造和提取是基于小波系数的均值二值量化,因此各向一致缩放攻击也同样不会对水印提取产生影响。

(3) 噪声攻击和网格简化攻击

球面坐标映射方阵中的元素为网格分割后各分块内顶点半径 r 的均值,水印由该方阵小波分解后的低频带系数按均值二值量化生成,即只有当多个分块内 r 均值波动相当大时,水印才会受损。噪声攻击表现为 r 值的扰动,由于较大强度的噪声将使得模型的外观质量严重下降,并无实际意义,而低强度的噪声只会造成块内 r 均值的

微小波动,因此水印受损程度有限;网格简化是指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,模型几何形状的保持意味着在各分块内 r 均值的分布范围不会发生大的变化,即简化虽然造成块内顶点的缺失,但 r 均值的波动幅度不会太大,一般来说,分块内包含顶点数目越多, r 均值波动的幅度越小,因此模型越复杂(包含顶点数目越多),本文算法抵抗网格简化的效果越好。

(4) 剪切攻击

由于模型中心的移位可能导致待测网格构造的球面坐标映射方阵与原始网格的映射方阵产生较大差异,因此本文算法只能抵抗未改变模型中心坐标位置的低强度剪切。

3 实验结果

在VC++6.0和OpenGL平台上对上述算法进行了编程实现,采用的模型为Stanford大学提供的标准测试模型Happy Buddha(543 652个顶点,1 087 716个三角形面片)和模型Dragon(437 645个顶点,871 414个三角形面片)。实验中作者设定的球面坐标映射方阵的大小为40×40,生成的水印长度为400。水印检测器的构造采用了文献[3]的方法,即产生10 000个由0和1组成的二进值随机序列,令第5000个为原始水印,然后将提取的水印和这10 000个序列做相似度检测,若在横坐标5000处出现明显高于其他点的峰值,即认为水印存在。为检验算法的抗攻击效果,作者对多种常见攻击手段进行了测试,包括噪声攻击(随机噪声沿模型中心至顶点矢量方向添加)、简化攻击(简化算法采用Melax的方法^[8])、剪切攻击、顶点重排序、平移、旋转、各向一致缩放攻击等,水印检测结果参见图1。

实验结果表明,本文算法除能抵抗顶点重排序、平移、旋转、各向一致缩放攻击外,对噪声和简化攻击表现出良好的鲁棒性:至少可抵抗5%的噪声攻击(没有对更高强度的噪声攻击再做测试,因为模型质量严重下降使得攻击无实际意义),远高于传统的网格水印嵌入算法;可抵抗减掉80%顶点数目的网格简化攻击,同样优于绝大多数水印嵌入算法。不足之处为抗剪切能力较差,只能抵抗未改变模型中心位置的低强度剪切。

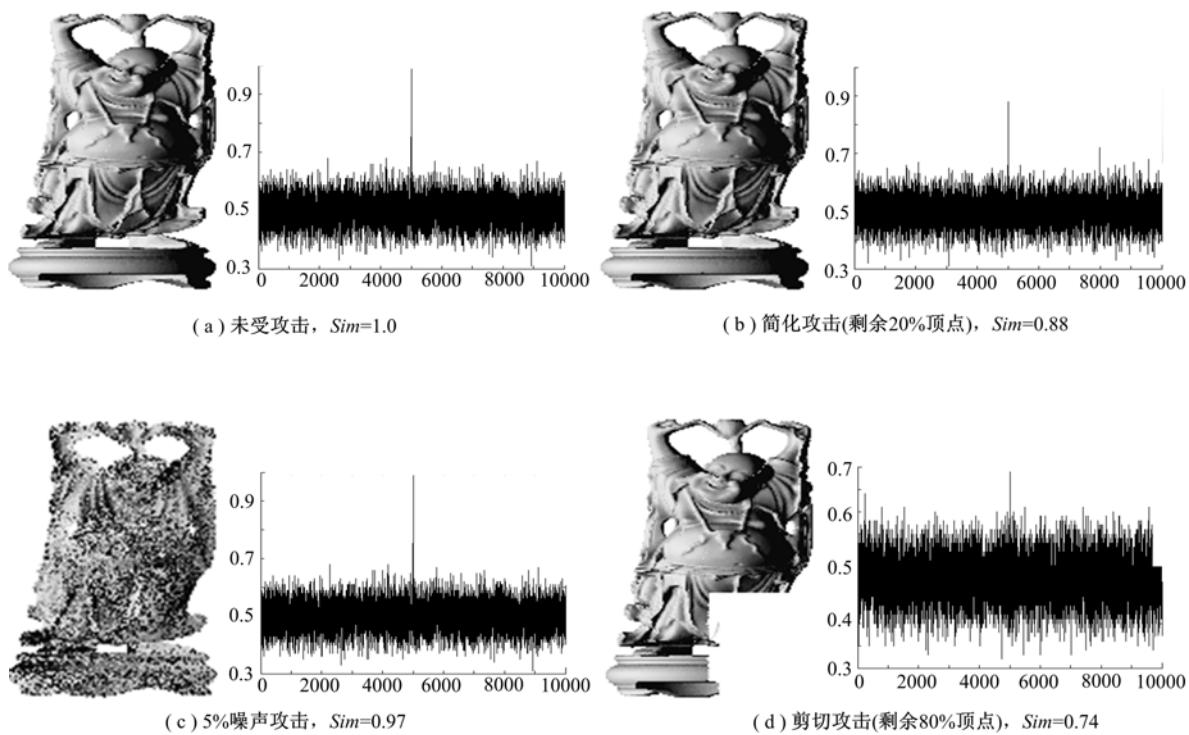


图1 部分攻击水印检测结果

Fig. 1 Watermark detecting results (part attacks)

4 结束语

零水印技术为解决网格模型水印鲁棒性与透明性之间的矛盾提供了一个新的方案。本文算法选取稳定性较高的网格几何数据作为水印的构造源,通过空域的几何特征提取和变换域的能量集中,构造出反映网格全局几何特征的水印信息,对多种常见攻击表现出良好的鲁棒性,由于算法与拓扑数据无关,因此可适用于任意拓扑结构类型的网格模型,同时作为一种盲水印算法,水印检测时无需原始网格模型的参与。

参考文献:

- [1] Ohbuchi R, Masuda H, Aono M. Watermarking, 3D polygonal models[C]// Proceeding of ACM Multimedia97, New York, USA, 1997: 261-272.
- [2] 温泉,孙锬锋,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(CIHW-2001),西安:西安电子科技大学出版社,2001.
- [3] 温泉,孙锬锋,王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报,2003,31(2):214-216.
Wen Quan, Sun Tan-feng, Wang Shu-xun. Concept and application of zero-watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216.
- [4] 杨树国,李春霞,孙枫,等. 小波域内图像零水印技术的研究[J]. 中国图象图形学报,2003,8(1):664-669.
Yang Shu-guo, Li Chun-xia, Sun feng, et al. Study on the method of image non-watermark in DWT domain[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8 (1): 664-669.
- [5] 王成儒,李段. 利用小波零树结构和PCA构造图像零水印[J]. 光电工程,2005,32(4):75-77.
Wang Cheng-ru, Li Duan. Image zero-watermarking utilizing wavelet zerotree structure and PCA [J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(4): 75-77.
- [6] Lounsbery M, DeRose T D, Warren J. Multiresolution analysis for surfaces of arbitrary topological type[J]. ACM Trans Graph, 1997, 16(1):34-73.
- [7] Karni Zachi, Gotsman Craig. Spectral compression of mesh geometry [C] // Proc SIGGRAPH 2000, New Orleans, USA, 2000:279-286.
- [8] Horn B K P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions[J]. Journal of the Optical Society of America, 1987, 4(4):629-642.