

基于离散余弦变换的三维点云模型全息盲水印

商静静, 孙刘杰, 王文举, 秦杨, 周中原

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 为保护三维模型版权, 提出一种基于离散余弦变换的三维点云模型全息盲水印算法。 **方法** 对三维点云模型进行仿射不变性处理, 将三维模型由直角坐标系转到球坐标系, 并对球坐标中的角度值进行升序排序; 将顶点到质心的距离按顺序存入 64×64 的数组中, 作为水印嵌入对象; 二值水印图像经全息水印技术生成全息水印, 并对全息水印进行分块离散余弦变换, 在该变换域的中频部分实现对水印的嵌入, 再经过离散余弦逆变换, 实现由频域到空间域的变换, 生成带有水印的三维模型。 **结果** 提出的算法是一种盲水印算法, 对一些仿射攻击具有较好的鲁棒性。将水印嵌在变换域的中频部分, 水印的不可见性及稳定性增强。 **结论** 提出算法可成功获得水印信息, 采用全息技术实现了三维模型版权保护。

关键词: 三维点云模型; 离散余弦变换; 全息水印; 鲁棒性

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)13-0111-04

Holographic Digital Blind Watermark Algorithm for 3D Point Cloud Model Based on Discrete Cosine Transform

SHANG Jing-jing, SUN Liu-jie, WANG Wen-ju, QIN Yang, ZHOU Zhong-yuan

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: In order to protect copyright of 3D model, this paper present a kind of algorithm of holographic digital blind watermark for 3D point cloud model based on discrete cosine transform. Firstly, affine invariant preprocessing was used for the 3D model. Then, coordinates of the 3D model were switched to spherical coordinates with the angle value in an ascending sort order. The distance from the object center to the vertices was taken as the watermark embedding object to embed the watermark in the 64×64 array. Holographic watermarking technology turned binary watermark image into holographic watermark. By discrete cosine transform, the intermediate frequency part of holographic watermark was embedded with the watermark through inverse discrete cosine transform to realize the transformation from the frequency domain to the spatial domain. The proposed algorithm belonged to blind watermark and had the high performance of the watermark robustness. Also, the performance of invisibility and stability was enhanced because the watermark was embedded in the intermediate frequency part. The algorithm can obtain the watermark from the 3D model successfully, and also the holographic watermarking technology can protect copyright of 3D model better.

KEY WORDS: 3D point cloud model; discrete cosine transform; holographic digital watermark; robustness

随着计算机网络的快速发展,越来越多的数字产品在网络间进行传播,而数字产品的版权保护问题也显得愈发重要。相对于图像、视频等数字产品版权保护技术的成熟,三维模型的版权保护研究则较晚。随

着三维模型的应用越来越广泛,关于三维模型的版权保护成为近几年的研究热点。

在数字水印技术的研究中,常用的三维模型包括点云模型和多边形网格模型^[1-2]。而在实际应用中,点

收稿日期: 2014-12-27

基金项目: 上海市教委科研创新重点项目(13ZZ111); 2013年“上海高校青年教师培养资助计划”(5114309101)

作者简介: 商静静(1991—),女,河南济源人,上海理工大学硕士生,主攻模式识别。

通讯作者: 孙刘杰(1965—),男,安徽怀宁人,博士,上海理工大学教授、硕导,主要研究方向为数字水印、模式识别、印刷防伪。

云模型比多边形模型更易获取。与传统的多边形网格模型相比,点云模型的处理更显灵活和简单。根据提取水印是否需要原始载体,将水印嵌入算法分为盲水印和非盲水印,相较而言,盲水印更具使用价值。

Ohbuchi于1997年首先提出了基于三维网格模型的数字水印技术^[3],开启了人们对三维模型数字水印的研究。在此之后,人们不断提出新的方法来实现三维模型的水印嵌入。1998年,Kanai和Date提出了一种基于多分辨率小波分解的三角形网格水印算法^[4],该算法具有较好的鲁棒性,但是需严格要求三维网格具有子分性质,具有一定的局限性;2000年,Wagner提出了一种用于任意拓扑结构的多边形网格鲁棒水印算法^[5],该算法对仿射变换的鲁棒性较好,但是并不抗网格简化;2004年,张静等人提出了一种基于几何特征的三维网格数字水印算法^[6],实现较为简单,鲁棒性较好,但其提取水印时需要原始三维模型。在此,提出了一种基于离散余弦变换的三维点云模型全息盲水印算法,该算法选取顶点到中心点的距离 R 作为水印嵌入对象。选取一定数目的 R 值,对其进行分块离散余弦变换,每块的中频部分嵌入1位全息水印信息。对嵌入水印后的 R 值进行离散余弦逆变换,得到嵌入水印后的三维模型。

1 算法理论分析

1.1 全息水印算法

将水印图像 $w_0(x,y)$ 进行随机相位模板的调制,得到随机相位的水印图像 $w(x,y)$,即:

$$w(x,y)=w_0(x,y)\exp[j\phi(x,y)] \quad (1)$$

式中: $\phi(x,y)$ 为二维相位,由高斯随机数决定。

将1束平行光垂直照射在相位随机的水印图像 $w(x,y)$ 上,经过傅里叶变换透镜进行傅里叶变换,即:

$$G(u,v)=\int w(x,y)\exp[-j2\pi(ux+vy)]dx dy \quad (2)$$

经过傅里叶变换后,将输出与另外一束有一定倾角的平行参考光进行干涉,2束光进行相干叠加,即可得到傅里叶全息图像^[7],即:

$$H_1(u,v)=|G(u,v)+R(u,v)|^2=|G(u,v)|^2+|R(u,v)|^2+G^*(u,v)R(u,v)+R^*(u,v)G(u,v) \quad (3)$$

式中: $R(u,v)$ 为幅值为 R_0 且有一定倾角的平行参考光。

$$R(u,v)=R_0\exp[j2\pi(au,bv)] \quad (4)$$

式(3)中第1项和第2项是傅里叶变换全息图的

晕轮光和中心亮点^[10],对水印再现有一定的影响,故将其除去,得到:

$$H(u,v)=G^*(u,v)R(u,v)+R^*(u,v)G(u,v) \quad (5)$$

此时便得到了所需的全息水印信息。

全息水印重建是生成的逆过程。首先对全息水印进行高斯低通滤波,然后将1束参考光以适当的角度照射在全息水印图像上,为简化计算,这束参考光为平面参考光,相角为 0° ,幅值为1。再经过傅里叶逆变换后可获取原始的水印信息。公式为:

$$w'(u,v)=\int H(x,y)\exp[j2\pi(ux+vy)]dudv= w^*[(x-a),(y-b)]+w[(x-a),(y-b)] \quad (6)$$

式(6)表明,提取出的水印信息包含原始水印信息及共轭信息^[10]。

1.2 离散余弦变换

离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)是一种实数域变换。DCT变换首先需要将图像分成 4×4 的像素块,然后对每个像素块进行二维DCT变换,得到 4×4 的DCT系数矩阵。对于 $M \times N$ 的矩阵 f ,其二维DCT变换公式^[11]为:

$$F(k,l) = \alpha_k \alpha_l \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m,n) \cos \frac{(2m+1)k\pi}{2M} \cdot \cos \frac{(2n+1)l\pi}{2N} \quad (7)$$

$$0 \leq k \leq M-1, 0 \leq l \leq N-1$$

其中,

$$\alpha_k = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}}, & k=0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}}, & 1 \leq k \leq M-1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\alpha_l = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & l=0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & 1 \leq l \leq N-1 \end{cases}$$

式中: $F(k,l)$ 为 f 的DCT系数。系数矩阵的左上角部分为直流系数和低频系数,右下角部分为高频系数,中间区域为中频部分。因高频部分不稳定,而低频部分的改变会引起图像较大的变动,水印的不可见性会受到影响,故水印信息应嵌在中频区域,兼顾了水印的稳定性和不可见性。

相应地,二维离散余弦逆变换(IDCT)实现由变换域到空间域的转变,公式为:

$$f(m,n) = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} \alpha_k \alpha_l F(k,l) \cdot$$

$$\cos \frac{(2m+1)k\pi}{2M} \cos \frac{(2n+1)l\pi}{2N}$$

$$0 \leq k \leq M-1, 0 \leq l \leq N-1 \quad (9)$$

1.3 主成分分析

主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)是将多个变量通过线性转变为少数重要变量,能够有效地提取三维模型的主要成分,在一定程度上去除数据的噪音和干扰,即寻找数据的主轴方向,由主轴构成新的坐标系。这种方法是三维模型处理中常用的方法。

用 V 表示三维点云模型,其顶点数为 N ,则模型顶点集合为 $V\{v_i, i=1, 2, \dots, N\}$,其中 v_i 表示每个顶点的坐标, $v_i = \{x_i, y_i, z_i\}$ 。计算模型的质心坐标 U ,并平移模型,以质心作为新的原点^[12],即:

$$U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (10)$$

U 为模型的质心坐标:

$$\begin{cases} x'_i = x_i - x_u \\ y'_i = y_i - y_u \\ z'_i = z_i - z_u \end{cases} \quad (11)$$

式中: (x_u, y_u, z_u) 为质心坐标; (x_i, y_i, z_i) 为模型中某一点的坐标; (x'_i, y'_i, z'_i) 为平移后新的坐标。

计算顶点的协方差矩阵 A :

$$A = \frac{v \cdot v^T}{N-1} \quad (12)$$

计算出协方差矩阵 A 的特征值,并对其进行降序排列,从而选取模型的最大主成分。旋转模型使最大主成分与 z 轴重合。这样,得到的三维模型具有一定的仿射不变性^[13]。

2 全息盲水印算法设计

2.1 水印嵌入

提出的水印嵌入步骤如下所述。

1) 对三维模型进行主成分分析。

2) 将三维模型由顶点坐标转换为球面坐标,转换公式^[12]为:

$$\theta_i = \arctan \frac{y'_i}{x'_i},$$

$$\varphi_i = \arctan \frac{z'_i}{\sqrt{x'^2_i + y'^2_i}},$$

$$r_i = \sqrt{x'^2_i + y'^2_i + z'^2_i} \quad (13)$$

式中: $0 \leq \theta_i \leq 2\pi$, $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi_i \leq \frac{\pi}{2}$, $0 \leq r_i$ 。坐标按 θ 的大小进行升序排序。

3) 按顺序依次选取 $n \times n$ 的 r 值,存入矩阵 R 中,作为水印嵌入的对象。

4) 将水印图像进行全息处理,生成全息水印 H 。

5) 对矩阵 R 进行分块离散余弦变换,每块大小为 4×4 ,在每块的中频部分进行水印的嵌入;选取适当的嵌入系数 k ,用 $k \times H(i, j)$ 替换所选的中频系数,实现水印的嵌入。

6) 嵌入水印后,对其进行离散余弦逆变换,实现由变换域到空间域的转变,得到新的矩阵 R' ,将球面坐标还原到顶点坐标,即可得到嵌入水印的三维模型。

2.2 水印提取

水印提取的步骤如下所述。

1) 首先将顶点坐标转变为球面坐标,并进行升序排列。

2) 按顺序将顶点到中心点的距离 r 存入 $n \times n$ 矩阵 R' 中,即可得到水印所嵌入部分。

3) 对矩阵 R' 进行 DCT 变换,找到中频系数,进行水印的提取,即可得到所嵌入的全息水印信息。

4) 对全息水印信息进行重建,即可获取原始水印信息及其共轭信息。

3 实验与结果分析

在传输过程中,信息不可避免地总会受到各种各样的攻击,对信息产生一定的破坏。因此,嵌入水印后的模型必须具有一定的鲁棒性才有实用价值。为验证其提出算法的鲁棒性,选取 16×16 的水印图像进行实验。对嵌入水印的模型进行不同的攻击。

在未攻击情况下,原始三维模型及嵌入水印模型提取的水印信息见图 1。对嵌入水印模型进行不同程度噪声攻击,噪声因子越大,受到的噪声攻击就越强。当噪声因子分别为 1%, 10%, 20% 和 50% 时,提取结果见图 2。对嵌入水印的模型旋转不同的角度,再进行水印提取,提取结果见图 3。分别对模型进行等比例缩放及平移,提取结果分别见图 4 和图 5。相关实验结果表明:该算法对噪声、旋转、等比例缩放和平移等攻击具有一定的鲁棒性。

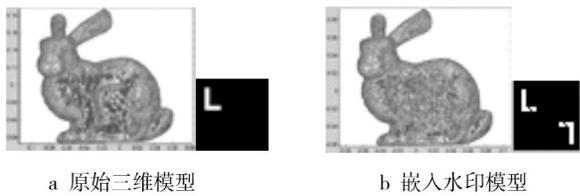


图1 未受攻击模型及提取水印信息
Fig.1 3D Model without attack and extracted watermark

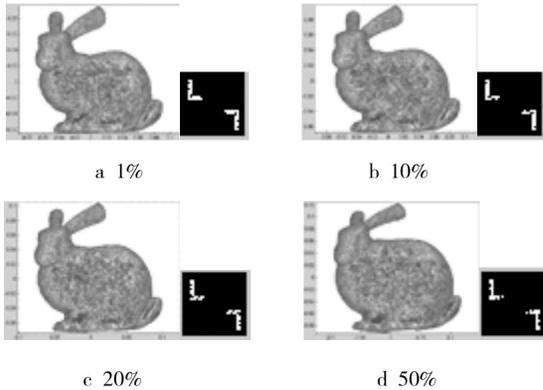


图2 噪声攻击实验
Fig.2 Noise attack experiment

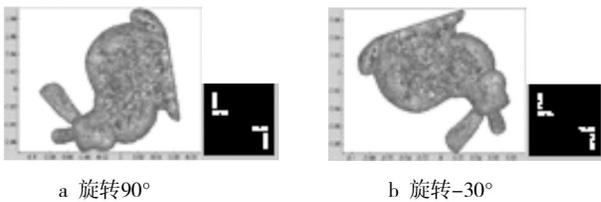


图3 旋转攻击实验
Fig.3 Rotation attack experiment

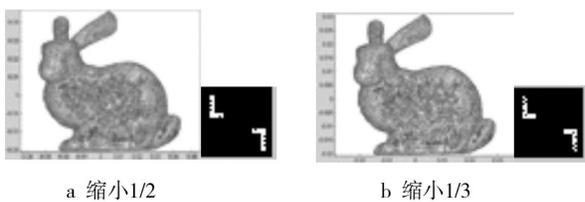


图4 缩放攻击实验
Fig.4 Scaling attack experiment

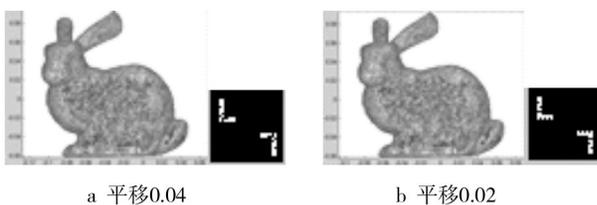


图5 平移攻击实验
Fig.5 Translation attack experiment

4 结语

近些年来,关于三维模型水印嵌入的方法越来越多,每种方法各有优劣。提出的基于离散余弦变换的三维点云模型全息盲水印算法,是将水印嵌在离散余弦变换的中频部分,水印具有较高的不可见性及稳定性。该算法对水印图像进行全息变换,进一步对水印信息进行了保护。提出的水印嵌入算法为盲水印,提取时不需要原始的三维模型,提高了三维模型水印嵌入的实用性。该算法仍存在一定的不足,水印嵌入量较小,后续需要进一步的优化。

参考文献:

- [1] 崔汉国,刘健鑫,代星,等. 三维模型数字水印技术研究进展[J]. 图学学报,2013,34(5):1—6.
CUI Han-guo, LIU Jian-xin, DAI Xing, et al. Progress of Digital Watermarking Technology for 3D Model[J]. Journal of Graphics, 2013, 34(5): 1—6.
- [2] 羌鑫林. 三维点云数据数字水印算法研究[D]. 南京:南京师范大学,2013.
QIANG Xin-lin. Digital Watermarking Algorithm Research for 3D Point Cloud Model[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2013.
- [3] OHBUCHI R, MASUDA H, AONO M. Embedding Data in 3D Models[C]//Proceedings of the European Workshop on Interactive Distributed Multimedia Systems and Telecommunication Services '97, Darmstadt, 1997: 1—10.
- [4] KANAI S, DATE H, KISHINAMI T. Digital Watermarking for 3D Polygons Using Multiresolution Wavelet Decomposition [C]// Proceedings of International Workshop on Geometric Modeling, 1998: 296—307.
- [5] WAGNER M G. Robust Watermarking of Polygonal Meshes [C]// Proceedings of Geometric Modeling and Processing, IEEE Computer Society, 2000: 201—208.
- [6] 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像学学报, 2005, 17(4): 740—747.
ZHANG Jing, ZHENG Guo-qin. A Geometry Property Based Watermarking Scheme for Three Dimensional Meshes[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(4): 740—747.
- [7] 李晨璐,孙刘杰,李孟涛. 强鲁棒性全息水印算法[J]. 包装工程, 2012, 33(13): 104—107.
LI Chen-lu, SUN Liu-jie, LI Meng-tao. Robust Holographic Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(13): 104—107.

(下转第 121 页)

- proved Otsu Algorithm in the Defect Detection of Aluminum-plastic Blister Drugs[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(15):15—18.
- [12] 邱丽君. Otsu 图像分割方法的研究与应用[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- QIU Li-jun. Research and Application of Otsu Image Segmentation Algorithm[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2011.
- [13] 吕燕. 基于阈值算法图像分割的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- LYU Yan. The Study of Image Segmentation Based on Thresholds[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [14] 杨修国. 图像阈值分割方法研究与分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- YANG Xiu-guo. Threshold Image Segmentation Research and Analysis[D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [15] 胡庆婉. 使用 MATLAB 曲线拟合工具箱做曲线拟合[J]. 电脑知识与技术, 2010, 6(21):5822—5823.
- HU Qing-wan. Curve Fitting by Curve Fitting Toolbox of Matlab[J]. Computer Knowledge and Technology, 2010, 6(21):5822—5823.
- [16] 梁忠伟, 叶邦彦, 彭锐涛, 等. 基于灰度直方图拟合曲线的数字图像多阈值分割技术研究[J]. 现代制造工程, 2007(9):103—106.
- LIANG Zhong-wei, YE Bang-yan, PENG Rui-tao, et al. Multi-threshold Dividing Technology of Digital Image Based on Gray Histogram Fitting Curves[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007(9):103—106.

(上接第 114 页)

- [8] 孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. 光学学报, 2007, 27(4):6218—6224.
- SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Forgery Prevention Based on In-Line Fourier Holographic Watermark with Double Random Phase Encryption[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4):6218—6224.
- [9] 孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密全息标识防伪技术研究[J]. 光学学报, 2007, 27(1):31—34.
- SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Anti-fake Technique by Double Random Phase Encrypted Holographic Mark[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(1):31—34.
- [10] 李国明, 李象霖. 采用 DFT 域嵌入的全息水印方法[J]. 计算机系统应用, 2011, 20(5):42—46.
- LI Guo-ming, LI Xing-lin. Holographic Watermarking Scheme Based on DFT Domain Embedding[J]. Computer Systems & Applications, 2011, 20(5):42—46.
- [11] 刘旺, 姜守达, 孙圣和. 基于三维 DCT 变换的体数据鲁棒数字水印嵌入算法[J]. 电子学报, 2005, 33(12):2174—2177.
- LIU Wang, JIANG Shou-da, SUN Sheng-he. Robust Watermarking for Volume Data Based on 3D-DCT[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(12):2174—2177.
- [12] 张小梅, 刘泉. 基于全局几何特征的三维模型数字水印算法[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(12):123—126.
- ZHANG Xiao-mei, LIU Quan. Geometric Feature Based Digital Watermarking Algorithm for 3D Models[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(12):123—126.
- [13] KALIVAS A, TEFAS A, PITAS I. Watermarking of 3D Models Using Principal Component Analysis[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, & Signal Processing, 2003:6—10.
- [14] 刘晓宁, 周明全, 耿国华, 等. 三维几何模型综述[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(6):14—17.
- LIU Xiao-ning, ZHOU Ming-quan, GENG Guo-hua, et al. A Summary of Watermarking Three-Dimensional Polygonal Models[J]. Computer Applications and Software, 2007, 24(6):14—17.
- [15] 王索真. 三维模型数字水印典型算法研究与实现[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- WANG Suo-zhen. Research and Implementation of Typical Algorithms for 3D Model Watermark[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [16] 潘志庚, 孙树森, 李黎. 三维模型数字水印综述[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2006, 18(8):1103—1110.
- PAN Zhi-geng, SUN Shu-sen, LI Li. An Overview of 3D Model Watermarking[J]. Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(8):1103—1110.