

基于三维 DCT 变换的体数据鲁棒 数字水印嵌入算法

刘 旺, 姜守达, 孙圣和

(哈尔滨工业大学自动化测试与控制系, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 本文基于三维离散余弦变换 (3D DCT) 技术和扩频通信技术提出三维体数据鲁棒水印嵌入算法. 算法将原始的二值图像水印利用扩频通信技术生成可以直接嵌入的体水印信息; 分别对体水印信息和原始的体数据进行分块离散余弦变换, 在变换域内实现水印嵌入. 该算法嵌入的水印信息具有不可见性, 能够抵抗剪切、加噪、滤波、旋转等常见攻击. 仿真实验验证了算法的有效性.

关键词: 数字水印; 体数据; 三维离散余弦变换; 鲁棒

中图分类号: TP309 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 12-2174-04

Robust Watermarking for Volume Data Based on 3D-DCT

LIU Wang, JIANG Shou da, SUN Sheng he

(Department of Automatic Test and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: This paper proposes a robust watermarking algorithm for volume data based on three dimension discrete cosine transform (3D DCT) and spread spectrum communication technique. Original binary image watermark is mapped to volume watermark, which can be directly embedded to the host, with spread spectrum communication technique. The block 3D DCT is applied to the volume watermark and the original volume data, respectively, to implement watermark embedding. The embedded watermark is invisible and withstands the common attacks such as cropping, adding noise, filtering and rotation. The validity of proposed algorithm has been confirmed with experiments.

Key words: Digital Watermarking; Volume Data; 3D DCT; Robust

1 引言

随着数字媒体处理技术和数字内容发布的出现, 数字媒体的应用变得更加广泛, 且出现了越来越多的数字产品. 通过许多现有的工具和 Internet 网络, 使得人们获取、复制、处理和发布这些媒体的内容相对更容易, 这种便利性也带来诸如产品的随意复制、盗用、篡改等问题. 作为对传统加密技术的一种有效补充, 数字水印技术被用来尝试解决日益增长的版权保护问题. 除解决版权保护问题外, 数字水印技术同样也用来解决拷贝控制、认证问题和传送私人秘密信息等等, 数字水印更多的应用信息可参见文献[1~3]. 由于数字水印技术在数字内容保护方面所具有的潜在的更广泛的应用, 所以它在最近几年引起了人们更大关注并且成为多媒体研究领域中的一个主要研究方向, 出现了越来越多的研究成果. 然而多数工作主要集中在图像数字水印^[4]、音频数字水印和视频数字水印^[5]嵌入技术上. 目前, 国际上也出现了一些新颖的算法将数字水印信息嵌入到 3D 模型中, 如任意三角形模型^[6~8]、NURBS 曲线或曲面模型^[9, 10]和体数据^[11]中, 文献[11]基于小波变换提出了体数据水印嵌入算法. 这些算法对医学、考古学等领域 3D 模型版权保护、内容真实性和完整性认证等具有重要意

义.

本文提出了一种基于 3D DCT 变换和扩频通信技术的体数据数字水印嵌入算法, 该算法嵌入的水印信息具有不可见性和鲁棒性, 能够抵抗常见攻击. 仿真结果表明, 水印信息在生成的 2D 图像中是不可见的, 并且通过计算含水印体数据的峰值信噪比 PNSR (Peak Signal to Noise Ratio) 进行定量验证. 同时, 引入几种常见攻击进行鲁棒性实验, 结果表明本文提出的体数据数字水印嵌入算法对常见的攻击具有鲁棒性.

2 体数据数字水印嵌入算法

在体数据中实现水印嵌入, 最重要的是找到一种能够修改体元数据的方法, 使得嵌入的水印体具有不可见性. 本文利用扩频技术^[12]和 3D DCT 变换技术在频域中实现上述目的, 完成水印嵌入. 在频域中完成水印嵌入的目的是通过将水印信息隐藏到多个频率分量上, 以实现鲁棒性要求. 假设被嵌入水印的体数据 V 大小为: $N_x \times N_y \times N_z$, 嵌入算法如下:

2.1 体水印生成算法

设待嵌入的原始水印是一维二值信息序列, 水印信息位 $a_j \in \{-1, 1\}$. 为了增强水印信息抵抗常见攻击 (如剪切) 的能力, 采用如下水印生成算法:

首先利用较大的扩展因子 σ (称为片率) 将这些信息位序列进行扩展, 得出一个扩展序列 b_i

$$b_i = a_j \quad j\sigma \leq i < (j+1)\sigma \quad (1)$$

然后, 扩展的 b_i 用伪随机序列 $p_i \in \{-1, 1\}$ 进行调制, 生成能直接嵌入的水印信息, 调制方式如下:

$$w_i = p_i b_i \quad (2)$$

最后, 将生成的 w_i 以光栅扫描顺序(升维运算)生成大小为 $N_x \times N_y \times N_z$ 的体水印信息。

2.2 三维 DCT 变换(3D DCT)

大小为 $n_x \times n_y \times n_z$ 的数据块, 3D DCT 变换计算^[13]:

$$F(u, v, w) = C(u)C(v)C(w) \left[\sum_{x=0}^{n_x-1} \sum_{y=0}^{n_y-1} \sum_{z=0}^{n_z-1} f(x, y, z) \cdot \frac{(2x+1)u\pi(2y+1)v\pi(2z+1)w\pi}{2n_x 2n_y 2n_z} \right] \quad (3)$$

其中

$$C(u) = \begin{cases} \sqrt{1/n_x} & u=0 \\ \sqrt{2/n_x} & u \neq 0 \end{cases}, \quad C(v) = \begin{cases} \sqrt{1/n_y} & v=0 \\ \sqrt{2/n_y} & v \neq 0 \end{cases}$$

$$C(w) = \begin{cases} \sqrt{1/n_z} & w=0 \\ \sqrt{2/n_z} & w \neq 0 \end{cases}$$

这里 $f(x, y, z)$ 是体数据 V 在 (x, y, z) 处的体元数据值, $F(u, v, w)$ 是该体元数据对应的 3D DCT 变换系数。

2.3 三维逆 DCT 变换(3D IDCT)

大小为 $n_x \times n_y \times n_z$ 的分块, 3D IDCT 变换计算^[13]:

$$f(x, y, z) = \sum_{u=0}^{n_x-1} \sum_{v=0}^{n_y-1} \sum_{w=0}^{n_z-1} \left[C(u)C(v)C(w) \frac{(2x+1)u\pi}{2n_x} \cdot F(u, v, w) \frac{(2y+1)v\pi(2z+1)w\pi}{2n_y} \right] \quad (4)$$

其中, $C(u)$, $C(v)$, $C(w)$ 与 3D DCT 变换式(3)中的相同。

2.4 体数据水印嵌入算法

水印嵌入过程如下:

(1) 如果原始水印信息不是一维序列, 例如图像水印等, 应对其进行降维运算生成一维序列, 按照 2.1 介绍的方法生成待嵌入的体水印信息 W ;

(2) 利用密钥产生一个长度为 $N_x \times N_y \times N_z$ 伪随机序列 PN_{xyz} , 利用该序列对原始体数据 V 进行伪随机排序, 排序后的体数据为 V_{prt} ;

(3) 按照 $n_x \times n_y \times n_z$ 大小分别对体数据 V_{prt} 和体水印信息 W 进行分块操作, 获得 3D DCT 变换块 $b_{iprt}^v \in V_{prt}$ 和 $b_i^w \in W$;

(4) 对 b_{iprt}^v 和 b_i^w 分别进行 3D DCT 变换, 得到对应的频域系数 B_{iprt}^v 和 B_i^w 。将 B_{iprt}^v 和 B_i^w 按照下式进行运算得到含水信息体的数据 \hat{V}_{prt} 的 3D DCT 域系数

$$\hat{V}_{prtDCT} = B_{iprt}^v + \alpha B_i^w \quad (5)$$

α 为水印嵌入能量的权值;

(5) 将 \hat{V}_{prtDCT} 进行分块 3D IDCT 变换, 得到含水信息的体数据 \hat{V}_{prt} ; (6) 将 \hat{V}_{prt} 利用伪随机序列 PN_{xyz} 进行伪随机逆排序得到与原始体数据 V 对应的含水信息体的体数据 \hat{V} 。

3 水印提取算法

水印提取过程如下:

(1) 对原始体数据 V 和含水信息的体数据 \hat{V} (此处用 \hat{V} 代替 V , 原因是 \hat{V} 可能已遭受攻击) 利用 PN_{xyz} 进行伪随机排序, 生成排序后的 V_{prt} 和 \hat{V}_{prt} ; (2) 分别对 V_{prt} 和 \hat{V}_{prt} 进行分块大小为 $n_x \times n_y \times n_z$ 的 3D DCT 变换, 获得相应的 3D DCT 变换系数 B_{prt}^V 和 \hat{B}_{prtDCT}^V ;

(3) 通过下式运算获得体水印信息 W (水印可能已受到攻击, 所以用 W 代替 W) 的 3D DCT 变换系数 B^W , 此时

$$B^W = (\hat{B}_{prtDCT}^V - B_{prt}^V) / \alpha \quad (6)$$

(4) 将 B^W 进行三维逆 DCT 变换, 提取出体水印 W , 将其进行降维运算得到一维水印序列 \hat{w}_i ;

(5) 利用水印生成过程中使用的调制序列 $p_i \in \{-1, 1\}$ 对序列 \hat{w}_i 进行解调, 即

$$\hat{b}_i = p_i \hat{w}_i \quad (7)$$

(6) 在每一个二进制片段里(片段大小为 cr), 将每个信号成分 b_i 相加:

$$s_j = \sum_{i=jcr}^{(j+1)cr-1} \hat{b}_i = \sum_{i=jcr}^{(j+1)cr-1} p_i^2 b_i + \Delta \quad (8)$$

此处 Δ 表示由于攻击引起的误差, 通过选取较大的 σ 获得足够的冗余后, 则求和运算可以近似为^[14]

$$s_j \approx \sum_{i=jcr}^{(j+1)cr-1} \hat{b}_i \approx cr \times a_j \quad (9)$$

因此, 提取的受攻击的水印信息位表示为

$$\hat{a}_j = \text{sign}(s_j) \quad (10)$$

如果原始水印信息不是一维序列, 应将提取的水印信息位 \hat{a}_j 进行升维运算, 获得与原始水印相对应的水印信息。

4 仿真实验

为了验证本文提出算法的性能, 使用大小为 $128 \times 128 \times 84$ 的体数据作为原始数据进行水印嵌入, 如图 1 所示。使用的水印信号为 64×64 的二值图像。利用峰值信噪比 PSNR 来定量评价含水信息体数据的质量, 即

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \frac{\sum_i p_{\max}^2}{\sum_i (v'_i - v_i)^2} \quad (11)$$

其中, v_i 和 v'_i 分别表示原始体数据 V 和含水信息体数据 \hat{V} 的第 i 个体元数据值。为了定量评价提取的水印和原始水印之间的相似度, 利用归一化互相关系数 NC 来评价, 即

$$\text{NC} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} W(i) \times \hat{W}(i)}{\sum_{i=0}^{N-1} W^2(i)} \quad (12)$$

其中, W 表示长度为 N 的原始数字水印序列, \hat{W} 表示提取的数字水印序列。

利用上述算法进行水印嵌入时, 选取 3D DCT 分块大小为 $n_x \times n_y \times n_z = 4 \times 4 \times 4$, $\alpha = 1.0$, $cr = 336$ 得到的含水信息体数据的 PSNR = 44.7 dB, 图 2 给出了经过 VoIPack 软件^[15] 渲染后



图 1 原始体数据:由 VolPack 图 2 含水印体数据渲染图像
渲染生成的图像

的图像.由图 1 和图 2 对比得到利用该算法嵌入的水印信息具有不可见性.

为了验证算法的鲁棒性,对含水印的体数据进行了剪切、加噪、滤波和旋转攻击.剪切攻击后提取的水印图像和 NC 值分别见图 3 和表 1.由于尺度变换(包括重采样)、量化和重量化等攻击均可看作是对含水印体数据加入噪声,因此本文对嵌入水印的体数据进行了加噪攻击,攻击结果见表 2 和图 4.对含水印体数据每个切片进行相同的滤波处理,攻击结果见表 3 和图 5.将含水印体数据每个切片旋转相同角度,攻击结果见表 4 和图 6.

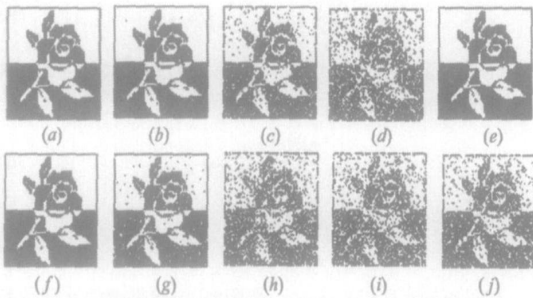


图 3 剪切攻击后提取的水印图像:(a)原始水印;(b)-(j)攻击后提取的水印

表 1 剪切攻击结果

体数据大小	归一化系数 NC	提取的水印信息
128 × 128 × 76	0.9966	图 3(b)
128 × 128 × 68	0.8564	图 3(c)
128 × 128 × 60	0.6299	图 3(d)
120 × 120 × 84	1.0000	图 3(e)
112 × 112 × 84	1.0000	图 3(f)
104 × 104 × 84	0.9351	图 3(g)
96 × 96 × 84	0.6250	图 3(h)
104 × 104 × 68	0.5938	图 3(i)
112 × 112 × 68	0.7314	图 3(j)

表 2 噪声攻击结果

高斯噪声 SNR(dB)	归一化系数 NC	提取的水印信息
20	1.0000	图 4(b)
17	1.0000	图 4(c)
15	0.9995	图 4(d)
12	0.9834	图 4(e)
10	0.9346	图 4(f)
8	0.9286	图 4(g)
5	0.8638	图 4(h)
2	0.5386	图 4(i)
1	0.4932	图 4(j)

表 3 滤波攻击结果

滤波器类型		归一化系数 NC	提取的水印信息
中值滤波	3 × 3	0.6128	图 5(b)
平均滤波	3 × 3	0.6128	图 5(c)
低通滤波	128 × 128	0.5908	图 5(d)

表 4 旋转攻击结果

切片旋转角度	归一化系数 NC	提取的水印信息
0.50°	1.0000	图 6(b)
1.00°	0.6792	图 6(c)
1.50°	0.2744	图 6(d)

图 3~ 图 6 提取的水印图像和表 1~ 表 4 给出的测试结果表明本文提出的算法能够抵抗剪切、加噪、滤波攻击,但对于旋转攻击抵抗力较差.

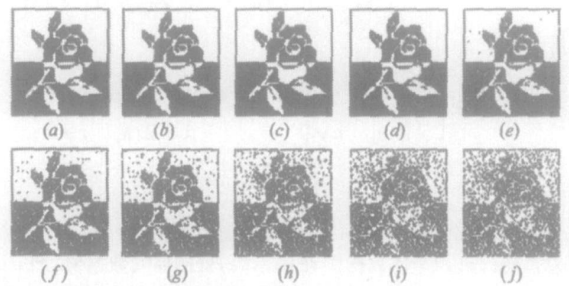


图 4 噪声攻击后提取的水印图像:(a)原始水印;(b)-(j)攻击后提取的水印

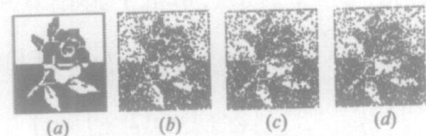


图 5 滤波攻击后提取的水印图像:(a)原始水印;(b)-(d)提取的水印

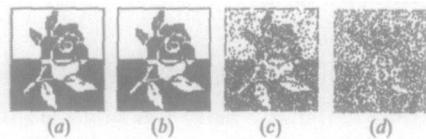


图 6 旋转攻击后提取的水印图像:(a)原始水印;(b)-(d)提取的水印

为了进一步验证本文算法的抗攻击能力,将其与文献[16]给出的算法进行比较(结果见表 5).比较结果表明本文提出的算法与文献[16]介绍的算法相比,在抵抗噪声攻击、滤波攻击和旋转攻击的能力基本相同,但在抵抗剪切攻击的能力方面有所提高,这是由于本文算法在嵌入水印时将原始体数据进行了伪随机排序的缘故.

5 结论

本文提出了基于 3D DCT 变换技术和扩频通信技术的体数据鲁棒水印嵌入算法.在扩频通信技术基础上实现了水印生成方法,同时将原始体数据和水印信息变换到 DCT 域,实现水印嵌入.实验结果表明,本文提出的算法对常见攻击如剪切、加噪、滤波、旋转等具有鲁棒性.但是,在提取水印时需要

原始体数据和在嵌入过程中使用的伪随机序列. 算法抗攻击的评价问题是我们将要进一步研究的重要课题.

表 5 算法比较结果

攻击类型		归一化系数 NC	
		本文算法	文献[16]算法
剪切 攻击	128×128×76	0.9966	0.9102
	112×112×84	1.0000	0.9482
	104×104×84	0.9351	0.7969
	112×112×68	0.7314	0.7222
噪声 攻击	17	1.0000	0.9995
	10	0.9346	0.9463
	SNR(dB)	1	0.4932
滤波 攻击	高斯低通(128×128)	0.5908	0.6022
	平均滤波(3×3)	0.6128	0.5938
	中值滤波(3×3)	0.6128	0.5835
旋转 攻击	0.5°	1.0000	1.0000
	1.0°	0.6792	0.6260
	1.5°	0.2744	0.2466

参考文献:

- [1] 孙圣和, 陆哲明. 数字水印处理技术[J]. 电子学报, 2000, 28(8): 85-90.
Sun Sheng he, Lu Zhe ming. Digital watermarking techniques [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2000, 28(8): 85-90. (in Chinese)
- [2] A B Jeffery, J C Ingemar, K Ton. Copy protection for DVD video [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1267-1276.
- [3] K Deepa, H Dimitrios. Digital watermarking for telltale tamper proofing and authentication [J]. Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1167-1180.
- [4] M S Kankanhalli, Rajmohan, K R Ramakrishnan. Content-based watermarking of images [A]. Proceedings of ACM MM'98[C]. Bristol, U K: ACM Press, 1998. 61-70.
- [5] J Ditman, M Stabenan, R Steirnetz. Robust MPEG video watermarking technologies [A]. Proceedings of ACM MM'98 [C]. Bristol, U K: ACM Press, 1998. 71-80.
- [6] Oliver Benedens. Geometry based watermarking of 3D models [J]. Image Security IEEE, 1999. 46-55.
- [7] E Praun, H Hoppe, A Finkelstein. Robust mesh watermarking [A]. Proceedings of Computer Graphics ACM SIGGRAPH 99 [C]. Los Angeles: ACM Press/Addison-Welsey Publishing Co, 1999. 69-76.
- [8] R Ohbuchi, H Masuda, M Aono. Watermarking three dimensional polygonal models [J]. IEEE J Sel Areas Commun, 1998, 16(4): 551-560.

- [9] R Ohbuchi, H Masuda, M Aono. A shape preserving data embedding algorithm for NURBS curves and surfaces [A]. Proceedings of Computer Graphics International [C]. Canmore, Alberta, Canada: IEEE Computer Society Press, 1998, 7 11: 180-187.
- [10] J J Lee, N I Cho, and J W Kim. Watermarking algorithms for 3D NURBS graphical data [J]. Eurasip J Appl Sign Process, 2004, 2004(14): 2142-2152.
- [11] X Guan, Y Wu, M S Kankanhalli, Z Huang. Invisible watermarking of volume data using wavelet transform [A]. Proceedings of MMM'2000 [C]. Nagano, Japan: World Scientific, 2000. 152-166.
- [12] I J Cox, J Kilian, T Leighton, T Shamon. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.
- [13] K Rao, R Yip. Discrete cosine transform: algorithms, advantages, applications [M]. Boston: Academic Press Inc, 1990.
- [14] Hartung F, B Girod. Digital watermarking of MPEG-2 coded video in the bitstream domain [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. Munich: IEEE, 1997, 4: 2621-2625.
- [15] P Lacroute, J Zideh. VolPack for windows [DB/OL]. <http://graphics.stanford.edu/software/volpack/>, 2002-04-22/2004-09-20.
- [16] Y H Wu, X Guan, M S Kankanhalli, Z Y Huang. Robust Invisible Watermarking of Volume Data Using 3D DCT [A]. Proceedings of Computer Graphics International [C]. Hong Kong, China: IEEE Computer Society Press, 2001, 3(6): 359-362.

作者简介:



刘 旺 男, 1974 年 6 月出生于山东省泗水县, 分别于 1999 年 7 月和 2001 年 7 月在哈尔滨工业大学自动化测试与控制系获得学士和硕士学位. 现为哈尔滨工业大学讲师、博士研究生, 主要研究领域为数字图像处理、三维模型数字水印技术和自动化测试与控制技术等.

E-mail: liuwang@hit.edu.cn.

姜守达 男, 1964 年出生于黑龙江, 于 1984 年 7 月在哈尔滨工业大学无线电技术专业获得学士学位, 分别于 1997 年 8 月和 2003 年 7 月在该校自动化测试与控制系获得硕士和博士学位, 现为哈尔滨工业大学研究员、博士生导师, 主要研究领域为通用自动测试技术、仿真及控制系统体系结构和软件的开发、虚拟仪器设计及数据传输与压缩技术等, 发表学术论文 20 余篇.