

基于三维离散余弦变换的鲁棒彩色图像水印算法

熊祥光, 韦 立

(贵州师范大学 数学与计算机科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘 要: 针对常见的彩色图像水印算法仅在亮度分量或在每一分量嵌入水印, 致透明性和鲁棒性不能达到权衡的问题, 提出了一种新颖的基于三维离散余弦变换的 RGB 彩色图像水印算法. 为增强水印的安全性, 先对水印图像进行异或加密和 Arnold 置乱处理; 其次对彩色图像进行互不重叠的分块处理, 并对每一分块进行三维离散余弦变换; 最后对每一分块三维离散余弦变换后的第一个系数采用量化的嵌入方法嵌入水印信号. 实验表明, 提出的算法具有较好的透明性和鲁棒性, 对彩色图像的版权保护应用具有一定的应用价值.

关键词: 彩色图像水印; 三维离散余弦变换; 量化; 鲁棒性

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)01-0100-05

Robust Color Image Watermarking Algorithm Based on 3D-DCT

XIONG Xiang-guang, WEI Li

(School of Mathematics and Computer Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: For common color image watermarking algorithms embed watermarking only in luminance component or each color component separately lead to the watermarked image's transparency and robustness problems cannot achieve trade-off, a new RGB color image watermarking algorithm based on three-dimensional discrete cosine transform (3D-DCT) is proposed. Firstly, to enhance the security of the watermarking, the watermark image is processed by XOR encryption and Arnold scrambling. Secondly, the RGB color image is subdivided to non-overlapping blocks, and performs 3D-DCT for each block. Finally, the first coefficient of each block after performing 3D-DCT is modified by exploiting quantification method to embed watermarking. Experimental results show that the proposed algorithm has good transparency and robustness, and it has some practical for color image copyright protection applications.

Key words: color image watermarking; three-dimensional discrete cosine transform; quantization; robustness

1 引言

在网络环境下如何对数字产品实施有效的版权保护已成为目前研究的热点^[1-2]. 通过嵌入水印来保护多媒体产品的版权为多媒体内容的版权保护提供了一种有效的解决方案. 文献[3]中先对原始视频的每一帧图像进行 Contourlet 变换, 之后对低频图像进行分组, 再对每一分组进行三维离散余弦变换, 最后在变换后的直流系数中采用量化的方法嵌入水

印. 提取水印时不需要原始视频的参与, 并且该算法具有较好的不可感知性和抵抗多种攻击的能力. 文献[4]中先将水印图像利用扩频通信技术生成待嵌入的体水印信息, 其次分别对体水印图像和载体数据进行分块三维离散余弦变换. 实验表明该算法具有较好的透明性和鲁棒性, 但是该算法提取水印时需要原始的体数据, 限制了该算法的应用. 文献[5]中先将 RGB 彩色图像转换为 YIQ 彩色图像, 其次在 Y 分量中嵌入水印. 文献[6]中先对选取彩色视

收稿日期: 2014-03-17; 修回日期: 2014-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(61309006); 贵州省科学技术厅、贵州师范大学联合科技基金(黔科合 LH 字[2014]7041 号)

频帧的每一通道进行分块,其次分别对选取的每一分块的红、绿和蓝通道进行整数小波变换,最后在考虑人类视觉系统特点的基础上,通过调整相连两块对应高频子带均值之间的大小关系来嵌入水印.文献[7]中利用发送分集技术的思想,将经过伪随机调制和交织编码后的水印信号嵌入到彩色图像的红色、绿色和蓝色通道中.文献[8]中先对 RGB 彩色图像的每一分量进行离散余弦变换,其次选择相应的嵌入点,最后采取“加性”的嵌入方法在每一个分量嵌入一个完整的水印.文献[9]中提出了一种基于三维离散余弦变换和量化索引调制的视频水印算法,通过调整所选择块的离散余弦变换系数之间的关系嵌入水印.实验表明该算法具有较好的透明性和抵抗多种攻击的能力.从以上文献可以看出,对于原始载体彩色图像或视频,大部分的水印算法都是先进行色彩空间的变换,再在亮度分量嵌入水印,或分别在彩色图像的每一个分量中嵌入水印,未充分利用彩色图像的冗余空间,影响水印的透明性和鲁棒性.鉴于此,本文不选择在亮度分量或在彩色图像的某一分量中嵌入水印,而是将 RGB 彩色图像当作一个三维的体数据.嵌入水印时,先对其进行分块处理,其次对每一个三维分块进行三维离散余弦变换,最后在三维离散余弦变换后的直流系数中采用量化的嵌入方法嵌入异或加密和 Arnold 空间置乱后的水印信号.实验结果表明,提出的算法不仅具有较好的透明性,而且对多种攻击也具有较强的鲁棒性.

2 三维离散余弦变换基础

2.1 三维离散余弦变换

设三维数据块 V 的大小分别为 $n_x, n_y, n_z, f(x, y, z)$ 表示三维数据块 V 在 (x, y, z) 处的数据值, $F(a, b, c)$ 表示该三维数据块对应的三维离散余弦变换系数,则三维离散余弦变换的计算公式如下^[10]:

$$F(a, b, c) = C(a)C(b)C(c) \left[\sum_{x=0}^{n_x-1} \sum_{y=0}^{n_y-1} \sum_{z=0}^{n_z-1} f(x, y, z) \frac{(2x+1)a\pi}{2n_x} \frac{(2y+1)b\pi}{2n_y} \frac{(2z+1)c\pi}{2n_z} \right] \quad (1)$$

式中,

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

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

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

2.2 三维离散余弦逆变换

设三维数据块 V 的大小为 n_x, n_y, n_z , 则三维离散余弦逆变换的计算公式如下^[10]:

$$f(x, y, z) = \sum_{a=0}^{n_x-1} \sum_{b=0}^{n_y-1} \sum_{c=0}^{n_z-1} [C(a)C(b)C(c)F(a, b, c) \frac{(2x+1)a\pi}{2n_x} \frac{(2y+1)b\pi}{2n_y} \frac{(2z+1)c\pi}{2n_z}] \quad (2)$$

式中, $C(a), C(b)$ 和 $C(c)$ 的意义与三维离散余弦变换公式(1)中的相同.

3 提出的彩色图像水印算法

3.1 水印图像的预处理

(1) 为了增强嵌入水印的安全性和抵抗剪切攻击的能力,选取初值 x_0 , 利用式(3)产生混沌序列 x_k , 再选定相应的阈值将 x_k 转换为二值序列 x_k .

$$x_{k+1} = 1 - 2x_k^2, -1 \leq x_k \leq 1, k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

(2) 先将二维的二值水印图像转换为一维序列 w_k , 再将序列 x_k 和 w_k 进行异或运算, 得到异或加密后的一维序列.

(3) 将异或加密后的一维序列 w_k 转换为二维, 再选定迭代次数 t 对其进行 Arnold 置乱, 得到待嵌入的二值水印信号.

需要注意的是, 在进行解密时, 应先进行 Arnold 逆置乱, 再进行异或解密. 另外, 需要知道混沌序列的初始值 x_0 和 Arnold 空间置乱迭代的次数 t , 否则不能恢复嵌入的二值水印图像.

3.2 水印的嵌入

水印嵌入过程如图 1 所示.

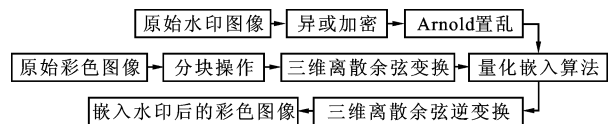


图 1 水印嵌入过程

水印嵌入过程的详细步骤如下:

(1) 采用 3.1 节中的方法对二值水印信号进行异或加密和 Arnold 置乱, 得到待嵌入的水印信号.

(2) 对大小为 $M \times M$ 的 RGB 彩色图像进行互不重叠的 8×8 分块, 则每一分块的大小为 $8 \times 8 \times 3$, 可将载体图像分成 $(M \times M)/(8 \times 8)$ 块. 嵌入水印时, 若待嵌入的水印信号总的位数不大于分块的块

数,则可以随机不重复地选取分块嵌入水印,直到水印信号嵌入完毕为止;若待嵌入的水印信号总的位数大于分块的块数,则可以调整分块的大小,使载体图像能嵌入完整的水印信号。

(3) 对每一分块进行三维离散余弦变换. 设分块进行三维离散余弦变换后的第一个系数为 $C(1, 1)$, 采用式(4) 嵌入预处理后的二值水印图像。

$$C^*(1, 1) = \begin{cases} (C(1, 1) + 1) \times Q, & \text{if } \text{mod}(C(1, 1), 2) \neq w \& w = 1 \\ (C(1, 1) - 1) \times Q, & \text{if } \text{mod}(C(1, 1), 2) \neq w \& w = 0 \\ C(1, 1), & \text{if } \text{mod}(C(1, 1), 2) = w \end{cases} \quad (4)$$

式中, $C(1, 1) = \text{round}(C(1, 1)/Q)$, $C^*(1, 1)$ 表示嵌入水印后的系数, w 表示一位二值水印位, Q 是水印嵌入强度, 影响水印的透明性和鲁棒性, 符号 $\text{mod}(\cdot)$ 表示取模运算, $\text{round}(\cdot)$ 表示取整运算。

(4) 对每一分块调整后的系数进行三维离散余弦逆变换, 得到嵌入水印的分块。

(5) 重复步骤(3) 和(4), 直到所有的水印信号嵌入完毕后, 得到最终含水印的彩色图像。

3.3 水印的提取

水印提取过程是水印嵌入过程的逆过程. 该算法的提取过程非常简单, 不需要原始载体彩色图像的参与, 水印提取过程如图 2 所示。



图 2 水印提取过程

水印提取过程的步骤如下:

(1) 对含水印的 RGB 彩色图像进行互不重叠的 8×8 分块, 并对每一分块进行三维离散余弦变换。

(2) 设每一分块进行三维离散余弦变换后的第一个系数为 $CW(1, 1)$, 按式(5) 提取待解密的二值水印图像。

$$W = \begin{cases} 1, & \text{if } \text{mod}(\text{round}(CW(1, 1)/Q), 2) = 1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

(3) 对提取的二值水印图像先使用嵌入时选取的迭代次数 t 进行逆 Arnold 置乱并将转换为一维序列 w_k 。

(4) 用初值 x_0 生成二值混沌序列 x_k 和 w_k 进行异或运算得到 w , 再将一维的 w 转换为二维的图像得到最终提取的二值水印图像。

4 仿真实验结果

4.1 透明性实验测试

本算法在 Windows XP 操作系统和

Matlab2007b 平台下进行仿真实验, 水印嵌入强度 Q 取值为 40. 原始载体彩色图像为 2 幅 24 位的大小为 512×512 的真彩色标准 Lena 和 Tiffany 图像, 分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 原始的水印图像采用大小为 64×64 标识“贵州师大”的二值图像, 如图 3(c) 所示. 图 3(d) 和图 3(e) 是嵌入水印后的图像, 图 3(f) 是从含水印的 Lena 图像提取的二值水印图像. 从提取的水印图像可见, 当含水印的彩色图像未受到任何的攻击时, 能完整地提取嵌入的二值水印图像。



图 3 透明性测试结果

对于嵌入水印后的图像的不可感知性测试, 采用峰值信噪比 PSNR(Peak Signal to Noise Ratio) 来客观评价嵌入水印后的图像与原始载体图像的差别, PSNR 值越大, 越难感知水印信号的存在. PSNR 的计算公式如下:

$$\text{PSNR} = 10 \lg(M \times N \times I_{\max}^2 / (\sum \sum (I - I')^2)) \quad (6)$$

式中, M 和 N 分别表示载体图像的长和宽, I 和 I' 分别表示原始载体图像和嵌入水印后的图像。

为了验证算法的透明性和鲁棒性, 选择采用同样的量化嵌入方法在彩色图像的 R 分量嵌入水印信号(以下简称算法 1). 在嵌入强度相同的情况下, 采用提出的算法和算法 1 嵌入水印后的图像与原始载体图像的 PSNR 值如表 1 所示. 从图 3 和表 1 可以看出, 嵌入水印后的彩色图像很难感知水印信号的存在, 满足不可见水印透明性的基本要求. 与算法 1 相比, 提出的算法具有更好的透明性。

4.2 鲁棒性实验测试

对于鲁棒性测试, 采用归一化互相关 NC

(Normalize Correlation) 来客观评价提取的二值水印图像与原始二值水印图像的相似性,NC 值越高,表明提取的水印失真越小,水印抵抗攻击的能力越强.NC 的计算公式如下:

表 1 透明性测试结果

载体图像	提出算法的 PSNR 值			算法 1R 分量的 PSNR 值
	R 分量	G 分量	B 分量	
Lena	41.587	41.345	41.024	36.966
Tiffany	41.572	41.572	41.572	37.026

$$NC = \sum \sum (W \oplus \bar{W}) / (K \times G) \quad (7)$$

式中, K 和 G 分别表示水印图像的长和宽, W 表示提取的二值水印图像, $\bar{W}$ 表示原始二值水印的逻辑非运算, $\oplus$ 表示异或运算。

为验证提出的算法抵抗各种攻击的能力,我们对嵌入水印后的 2 幅彩色图像进行了多种攻击实验,都具有较强的鲁棒性。下面分别以采用提出的算法和算法 1 嵌入水印后的 Lena 彩色图像为例,进行

诸如滤波、剪切、JPEG 压缩(品质百分数分别为 50、70 和 90)和噪声等多种攻击实验,相应的实验结果如图 4 和表 2 所示(为了实验结果具有可比性,在进行比较实验时,算法 1 的嵌入强度 Q 取值为 24,PSNR 值为 41.317,与提出算法的 PSNR 值基本相同)。从图 4 和表 2 可见,在 PSNR 值基本相当的情况下,提出的算法鲁棒性较好,对常见的图像处理操作具有较好的抵抗能力。与采用同样的嵌入方法在彩色图像的 R 分量中嵌入水印相比,该算法抵抗攻击的能力更优越。

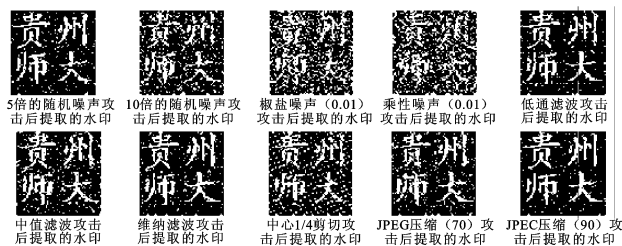


图 4 提取的部分水印图像

表 2 鲁棒性实验结果

攻击方式	提出算法的 PSNR 值			提出算法的 NC 值	算法 1R 分量的 PSNR 值	算法 1R 分量的 NC 值
	R 分量	G 分量	B 分量			
5 倍的随机噪声	33.930	33.767	33.078	0.952	33.959	0.905
10 倍的随机噪声	28.901	28.056	27.670	0.876	28.815	0.715
15 倍的随机噪声	25.923	24.919	24.442	0.744	25.918	0.577
椒盐加噪(0.01)	24.693	25.067	25.266	0.775	24.782	0.725
椒盐加噪(0.02)	21.736	22.194	22.554	0.626	21.671	0.596
乘性加噪(0.01)	22.971	26.964	27.036	0.765	22.972	0.560
乘性加噪(0.02)	20.250	24.068	24.154	0.662	20.260	0.536
低通滤波(3×3)	38.206	37.338	35.730	0.947	38.098	0.932
低通滤波(5×5)	38.194	37.320	35.715	0.946	38.085	0.932
中值滤波(3×3)	35.775	32.425	30.179	0.909	35.715	0.932
中值滤波(5×5)	32.382	28.652	27.691	0.793	32.348	0.807
维纳滤波(3×3)	36.687	34.630	33.073	0.946	36.617	0.937
维纳滤波(5×5)	34.098	32.497	31.450	0.776	34.051	0.776
左上角 1/4 剪切	8.370	13.775	13.034	0.879	8.340	0.879
中心 1/4 剪切	8.867	12.890	12.115	0.872	8.867	0.871
JPEG 压缩(50)	32.423	32.307	29.282	0.827	32.554	0.576
JPEG 压缩(70)	33.088	33.435	29.502	0.913	33.216	0.707
JPEG 压缩(90)	34.310	35.647	31.111	0.967	34.424	0.905

5 结束语

提出了一种新颖的基于三维离散余弦变换的彩色图像算法。该算法未进行色彩空间转换或分别在

彩色图像的每一分量中嵌入水印信号,而是将载体彩色图像当作体数据。嵌入水印时,算法先对其进行分块,其次对每一分块进行三维离散余弦变换,最后采用基于量化的嵌入方法嵌入预处理后的水印信

号,提取水印时不需要原始载体图像和原始水印的参与,是一种盲水印算法.仿真实验表明,提出的算法具有较好的透明性和鲁棒性.与采用同样的嵌入方法在彩色图像的 R 分量中嵌入水印相比,提出的算法具有更好的抵抗攻击的性能.

参考文献:

- [1] 邹长华,谭世恒,林土胜.基于混沌置乱和混沌加密的 DCT 域数字水印算法[J].微电子学与计算机,2011,28(5):58-62.
- [2] 熊祥光.基于量化和关系的图像水印算法[J].微电子学与计算机,2013,30(9):71-74.
- [3] 李涛,孙锐,徐彩臣.基于 Contourlet 域伪 3D-DCT 变换的视频水印[J].电子测量与仪器学报,2011,25(8):734-740.
- [4] 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.
- [5] 孙克辉,包善琴.小波变换和子采样在彩色图像水印中的应用[J].中南大学学报:自然科学版,2011,42(2):404-408.
- [6] 熊祥光,王力,瞿云云.基于整数小波变换的彩色视

频水印算法[J].微电子学与计算机,2013,30(4):41-45.

- [7] 李晓强,薛向阳.基于多通道的彩色图像水印方案[J].计算机学报,2004,27(9):1238-1244.
- [8] Bami M, Bartolim F, Piva A. Multichannel watermarking of color images[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2002, 12(3): 142-156.
- [9] Hui Y H, Cheng H Y, Wen H H. A video watermarking technique based on pseudo-3-D DCT and quantization index modulation[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2010, 5(4): 625-637.
- [10] Rao K, Yip R. Discrete cosine transform: algorithms, advantages, applications[M]. Boston: Academic Press Inc., 1990.

作者简介:

熊祥光 男,(1984-),硕士,讲师,CCF 会员(E200022762M).研究方向为数字水印和图像处理. E-mail:xxg0851@163.com.

韦立 男,(1981-),副教授,博士.研究方向为计算复杂性理论,图像处理.

(上接第 99 页)

参考文献:

- [1] 陈国亮,杨凌,张海桥.基于 logistic 混沌序列的彩色图像加密方法[J].甘肃科技,2012,28(14):23-25.
- [2] 郑凡.基于混沌的数字加密应用技术研究[D].吉林:吉林大学,2008.
- [3] 阚兢.基于混沌的数字图像的加密方法研究[D].太原:太原理工大学,2007.
- [4] 李玲,王伟男,李建杰,等.基于 Logistic 映射和超混沌的自适应图像加密算法[J].微电子学与计算机,2012,29(1):42-46.
- [5] 赵怀勋,程甲.基于三维超混沌系统的彩色图像加密算法[J].微电子学与计算机,2010,27(2):72-74.
- [6] Tomas Pevny, Patrick Bas, Jessica Fridrich. Steganalysis by subtractive pixel adjacency matrix[J]. IEEE Transaction on Information Forensics and Security, 2010, 5(2): 215-224.
- [7] Sahar Mazloom, Amir-Masud Eftekhari-Moghadam.

Color Image crypto system using chaotic maps[C]// Computational Intelligence for Multimedia, Signal and Vision Processing (CIMSIVP) Rajasthan, India: IEEE, 2011: 142-147.

- [8] Indrakanti S P, Avadhani P S. Permutation based image encryption technique[J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 28(8): 45-47.
- [9] Jamei M K, Enyatifar R, Hassanpour H. Hybrid model of chaotic signal and complete binary tree for image encryption[J]. International Journal of the Physical Sciences, 2011, 6(4): 837-842.

作者简介:

任晓奎 男,(1965-),副教授.研究方向为通信与计算机应用. E-mail:machao198491@163.com.

马超 男,(1984-),硕士研究生.研究方向为通信与计算机应用.