

图文信息技术

基于 YC_oC_g-R 颜色空间与离散余弦变换的 自适应彩色图像水印算法

董夙慧^{1,2}, 孙中廷^{1,2}, 徐永刚¹

(1.中国矿业大学 信息与电气工程学院, 徐州 221008; 2.江苏联合职业技术学院, 徐州 221011)

摘要: 目的 为了解决当前彩色图像水印技术的水印容量和不可感知性不佳等问题, 设计基于 YC_oC_g-R 颜色空间和离散余弦变换的自适应图像水印算法。**方法** 首先, 将载体图像从 RGB 空间转换到 YC_oC_g-R 空间, 计算 Y , C_o , C_g 这 3 个颜色分量; 随后, 引入离散余弦变换 DCT 对 Y 分量进行处理, 获取相应的 DCT 系数; 引入模糊聚类分析, 将 DCT 低频系数视为局部特征, 利用 SVM 机制对 DCT 低频系数进行训练分类, 确定出适合嵌入水印的 DCT 系数; 设计水印嵌入机制, 将水印数据隐藏到合适的 DCT 低频系数中; 借助可逆 DCT 方法, 将 Y 分量从频域变换到空域; 联合初始的 C_o 与 C_g 分量, 将其变换到 RGB 空间, 输出水印图像; 最后, 通过相应的水印提取方法, 复原初始水印信息。**结果** 测试数据表明, 与当前水印方法相比, 所提技术具有更高的不可感知性与水印容量, 其水印图像的 PSNR 值为 43.67 dB, 且其允许的水印容量可超过 1 bits, 在多种攻击下, 复原水印的质量更高, 相关系数 NC 均超过了 0.92。**结论** 所提技术能够较好地将水印信息隐藏在载体图像中, 具有较高的鲁棒性和安全性。

关键词: 图像水印; 离散余弦变换; $YCoCg-R$ 颜色空间; 模糊聚类分析; 低频系数; SVM 机制; 水印嵌入

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)13-0181-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.030

Adaptive Color Image Watermarking Algorithm Based on YC_oC_g-R Color Space and Discrete Cosine Transform

DONG Su-hui^{1,2}, SUN Zhong-ting^{1,2}, XU Yong-gang¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology,
Xuzhou 221008, China; 2. JiangSu Union Technical Institute, Xuzhou 221011, China)

ABSTRACT: The work aims to design the adaptive image watermarking algorithm based on YC_oC_g-R color space and discrete cosine transform, in order to solve the defects like poor watermark capacity and imperceptibility in current watermarking technology of color images. Firstly, three color components (Y , C_o and C_g) were calculated by transforming the carrier image from the RGB space into YC_oC_g-R space. Then, the corresponding DCT coefficients were obtained by introducing the discrete cosine transform (DCT) to process the Y component. The fuzzy clustering analysis was introduced to regard the DCT low frequency coefficients as local features. The DCT coefficients suitable for embedding watermarks were determined by training DCT low frequency coefficients with SVM mechanism. The watermark embedding mechanism was designed to hide the watermark data into the appropriate DCT low frequency coefficients. The Y component was transformed from the frequency domain to the airspace by means of reversible DCT method. The watermark image was outputted by combining the initial C_o and C_g components and transforming them into RGB space. Finally, the initial watermark information was restored by the corresponding watermark extraction method. The test data showed that the proposed technology had higher imperceptibility and watermark capacity compared with the current watermarking method.

收稿日期: 2017-12-14

基金项目: 国家自然科学基金 (51574232); 江苏省自然科学基金 (BD2012129)

作者简介: 董夙慧 (1977—), 男, 硕士, 江苏联合职业技术学院副教授, 主要研究方向为图像识别与应用、信息安全、大数据。

The watermark image had a PSNR value of 43.67 dB, and the watermark capacity of its allowable watermark capacity could be more than 1 bits. Restoration watermark had higher quality and the correlation coefficient NC exceeded 0.92 under a variety of attacks. The proposed technology can better hide the watermark information in the carrier image, and it has higher robustness and security.

KEY WORDS: image watermarking; discrete cosine transform; YCoCg-R color space; fuzzy clustering analysis; low frequency coefficients; SVM mechanism; watermark embedding

图像含有丰富的内容信息，具有良好的直观表达能力，是当前用户进行沟通交流的重要载体，但是，图像通常是在开放的网络中传输，易遭遇网络中的外来攻击，使得图像信息被篡改或泄露^[1—2]，因此，确保图像信息在网络中安全传输，已是当前学者的研究热点与焦点^[3]。其中之一就是图像水印算法，它是将水印数据隐藏到宿主图像中，使其在视觉上只呈现宿主图像的相关信息，具有良好的不可感知性与鲁棒性^[4]。如李景富等^[5]利用小波变换处理载体图像，获取不同方向的子带，引入支持向量回归机对这些子带进行训练，利用训练好的支持向量回归机模型将水印信息嵌入到载体的预测位置中，实验结果表明其算法具有较高的隐秘性与抗攻击能力。Hua 等^[6]利用 SIFT 机制，快速准确检测载体图像的特征点，再基于非下采样 Contourlet 变换机制，将水印信息嵌入到特征点中，综合投票、旋转搜索和形态学技术，对水印嵌入过程进行优化，实验结果验证了其算法的鲁棒性与安全性。Saeid Fazli 等^[7]基于 DWT 机制分解载体图像，得到 4 个频域子块，同时，引入 DCT 机制，设计水印嵌入方法，将水印信息嵌入到频域子块中，利用相应的水印提取技术，复原水印信息，实验结果验证了算法得有效性。

上述算法在将水印信息嵌入到载体图像中时，会引起其 R, G, B 三通道的同步变化，造成较大的修改范围，降低了其不可感知性；另外，此类技术是将水印数据分配到每个像素中，有些图像区域内的像素容易吸引人眼视觉，不适合嵌入水印，使其不可感知性与鲁棒性有待进一步提升。为了解决上述问题，兼顾水印图像的不可感知性与鲁棒性，文中设计基于 YCoCg-R 颜色空间与离散余弦变换的自适应图像水印算法。通过将载体图像从 RGB 空间转换到 YCoCg-R 空间，当把水印嵌入 Y 分量时，并不影响 C_o, C_g 分量；再利用 DCT 机制分解 Y 分量，获取相应的 DCT 系数，在频域中嵌入水印；为了对 DCT 低频系数进行分类，从中选择出适合水印嵌入的目标，文中引入模糊聚类分析，通过将 DCT 低频系数视为局部特征，利用 SVM 机制对 DCT 低频系数进行分类，选择出较优的 DCT 系数；利用水印嵌入机制，将水印数据隐藏到合适的 DCT 低频系数中；借助逆 DCT 机制，联合初始的 C_o 与 C_g 分量，获取水印图像；通过水印提取方法从水印图像中复原初始水印信息。最后，测试所提水印方

法的安全性与鲁棒性。

1 支持向量机

支持向量机 SVM 是在统计学习理论的基础上发展而来的一种基于结构风险最小化原理的学习方法，在解决非线性与局部最优解等方面有一定的优势^[8]。若已知样本为 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_i, y_i)\}, i=1, 2 \dots l$ ，其相应的回归模型为 $f(x)$ 。对于每个目标 x_i ，必存在一个输出值 y_i 与 x_i 对应；且每个目标 x_i 的实际输出值与预测值之间的标准差要低于 ε ，其相应过程可表示为^[9]：

$$f(x) = \omega \cdot x + b \sum_l^i (a' - a) K(x_i - x) + b \quad (1)$$

式中：K 为核函数；b 为阈值；a', a 均是 Lagrange 因子， $a' > 0, a > 0$ 。

再引入 2 个条件对 $f(x)$ 进行约束：

$$\begin{cases} f(x_i) - \eta_i \leq \lambda + \varepsilon_i, & i=1, 2 \dots l \\ \eta_i - f(x_i) \leq \lambda + \varepsilon'_i, & i=1, 2 \dots l \end{cases} \quad (2)$$

$$\min \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \frac{1}{l} \sum_l^i (\varepsilon_i + \varepsilon'_i) \quad (3)$$

式中：C 为惩罚因子。

基于对偶方法，则式（2—3）可变为：

$$\begin{aligned} \max(a' - a_i) = & -\lambda \sum_{i=1}^l (a'_i + a_i) + \eta_i \sum_{i=0}^l (a'_i - a_i) - \\ & \sum_{i=0}^l \sum_{j=0}^l (a'_i - a_i)(a'_j - a_j) K(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (4)$$

对式（4）进行求解，可获取优化的 a' 与 b 值。再把优化的 a' ， a 与 b 值对式（1）完成求解，可获取回归模型 $f(x)$ 。详细的 SVM 机制及其训练过程见文献[10]。

2 文中彩色图像水印算法

所提的基于 YCoCg-R 颜色空间与离散余弦变换的自适应图像水印算法过程见图 1，分为 4 个阶段：载体图像的 YCoCg-R 颜色空间的转换以及 DCT 机制的处理；基于模糊聚类分析与 SVM 机制的 DCT 低频系数选择；水印信息的嵌入；水印信息的提取。

2.1 YCoCg-R 颜色空间转换与 DCT 机制的处理

彩色图像的 R, G, B 分量之间的去相关性不理想，当把水印信息嵌入到其中任意一个分量时，都会

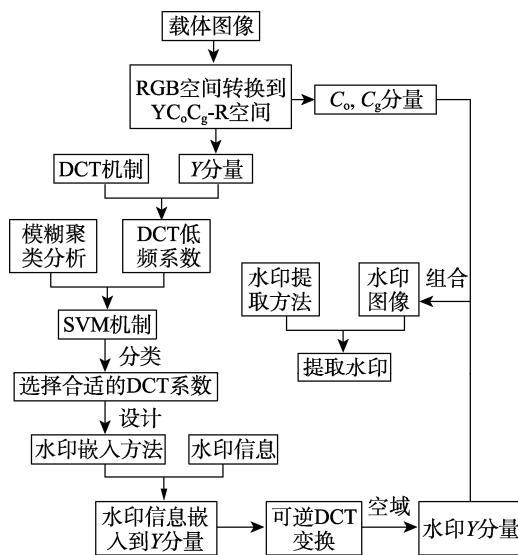


图1 文中图像水印算法的过程

Fig.1 The process of proposed image watermarking algorithm

影响其他2个分量，从而影响了水印图像的不可感知性^[11]。为此，文中依据文献[11]，将载体图像转换到 YC_oC_g-R 颜色空间，实现水印嵌入。 YC_oC_g-R 颜色空间将彩色图像分解为3个分量，依次是亮度 Y ，色度的橙色 C_o 以及色度的绿色 C_g ，具有理想的独立性， Y, C_o, C_g 3个分量之间互不影响，将水印信息嵌入到任意其中一个分量，均不影响其他2个分量，较好地增强了水印图像的隐秘性与鲁棒性^[11]。基于文献[11]，RGB 转换为 YC_oC_g-R 颜色空间的计算函数为：

$$\begin{cases} C_o = R - B \\ t = B + \lfloor C_o/2 \rfloor \\ C_g = G - t \\ Y = t + \lfloor C_o/2 \rfloor \end{cases} \quad (5)$$

YC_oC_g-R 颜色空间转换到 RGB 空间的模型为：

$$\begin{cases} t = Y + \lfloor C_g/2 \rfloor \\ G = C_g + t \\ B = t - \lfloor C_g/2 \rfloor \\ R = B + C_o \end{cases} \quad (6)$$

依据式(5)与文献[11]，可获取载体图像的 Y, C_o, C_g 等3个分量。随后，引入 DCT 机制^[12]，对 Y 分量进行分解，将其从空域变换到频域，有效增强算法的鲁棒性。将 Y 分量分割为一系列子块，其大小均是 $w \times w$ (文中取 $w \times w=4 \times 4$)，则每个子块的 DCT 系数为^[12]：

$$F(u, v) = K(u)K(v)\sqrt{\frac{2}{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos\left[\frac{\pi}{M} u\left(x+\frac{1}{2}\right)\right] \cos\left[\frac{\pi}{N} v\left(y+\frac{1}{2}\right)\right] \quad (7)$$

式中： $F(u, v)$ 为 DCT 系数矩阵； x, y 为输入 Y

分量的像素坐标； $M \times N$ 为 Y 分量的尺寸； u, v 为 $F(u, v)$ 的坐标值； $K(u), K(v)$ 都是常数，见式(8)。

$$K(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2}} & u=0 \\ 1 & 1 \leq u \leq M-1 \end{cases}, K(v) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2}} & v=0 \\ 1 & 1 \leq v \leq N-1 \end{cases} \quad (8)$$

Y 分量经过 DCT 处理后，其主要能量集中在低频系数中，反映载体图像的背景，有效避免了显著性目标，能够改善其隐秘性^[12]，因此，文中选取 DCT 低频系数进行水印嵌入。

2.2 基于模糊聚类分析与 SVM 机制的 DCT 低频系数选择

虽然 DCT 低频系数集中了 Y 分量的主要特性，但是，有些 DCT 系数并不适合嵌入水印，如对比度较大，以及纹理特征明显的 DCT 系数，反而容易引起人眼注意^[13—14]，因此，需要择取出合适的 DCT 低频系数进行水印嵌入。依据人眼视觉特性，当像素对比度值低于 37 时^[13]，不容易被人感知，且当亮度值高于 125 或者低于 75 时，人眼的感知能力较差^[14]；当纹理复杂度低于 2 时，人眼视觉注意力较低。这些像素比较适合嵌入水印，不容易吸引人眼注意。为此，文中引入模糊聚类分析技术^[15]，联合 SVM 机制^[16]，根据相应的阈值（对比度 $C \leq 37$ ，亮度值 $L \leq 75$ ，或者 $L \geq 125$ ，纹理复杂度 $T \leq 2$ ），对 DCT 低频系数进行分类。令 Y 分量经过 DCT 处理后，得到的系数为 $\{h_1, h_2 \dots h_m, H_{m+1} \dots H_{M \times N}\}$ 。其中， h_i 为低频系数； H_i 为高频系数。利用亮度 L 、纹理 T 以及对比度 C 来表征 Y 分量的局部特征，计算函数分别为：

$$C = \max[h_i(x, y)] - \min[h_i(x, y)] \quad (9)$$

$$L(x, y) = \begin{cases} 2 - \frac{1}{256} h_i(x, y), h_i < 128 \\ 1 + \frac{1}{256} h_i(x, y), h_i \geq 128 \end{cases} \quad (10)$$

$$T = \frac{D \lfloor H_i(x, y) \rfloor}{16} \cdot D \lfloor h_i(x, y) \rfloor \quad (11)$$

式中： C 为对比度； L 为亮度，在文中，取其平均值进行分类； T 为纹理； D 为方差； $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整运算； $h_i(x, y)$ 为 Y 分量中位于 (x, y) 处对应的低频系数； $H_i(x, y)$ 为 Y 分量中位于 (x, y) 处对应的高频系数。

根据式(9—11)，能够获取每个低频系数的局部特征值，将其组合起来，形成特征向量，用 $Y\{C, L, T\}$ 来表示。虽然模糊聚类分析能够输出训练样本和聚类中心的最小距离，但是在样本较小的情况下，其聚类结果不可靠^[15]，因此，文中先用模糊聚类分析技术对 DCT 低频系数进行粗选择；再利用 SVM 机制对粗选择结果进行细分类。具体过程如下所述。

1) 在执行模糊聚类分析^[15]时，将隶属度高于用

户阈值的特征矢量视为 SVM 机制的输入样本，而分类数据则视为 SVM 机制的输出结果。令训练样本为 $S_i = \{(y_i, c) | u_{i,c} \geq E, c=1,2,3,4\}$ 。其中， y_i 为第 i 个样本； $u_{i,c}$ 为 y_i 对 c 类的隶属度； E 为隶属度阈值； c 为 SVM 机制的输出结果。详细的模糊聚类分析过程见文献[15]。

2) 依据文献[16]的 SVM 机制训练过程，根据其相应的 SVM 参数，构建 Y 分量的 DCT 低频系数训练模型：

$$C = f(y)|(\alpha^*, b) \quad (12)$$

式中： C 为训练结果； α^* 为 Lagrange 乘子； b 为偏差； $f(y)$ 为输入样本。

3) 将 DCT 低频系数 $\{h_1, h_2 \dots h_m\}$ 视为输入数据，根据式(13)，得到的 C 就是其相应的选择结果。

2.3 水印嵌入过程

根据获取的最优 DCT 低频系数，设计水印嵌入方法，将水印信息隐藏到这些系数中，形成水印图像。过程如下所述。

1) 首先，将载体图像的 Y 分量分割为一系列的 4×4 子块。令 A_l 代表第 l 个子块，且该子块中最大、最小的 DCT 低频系数用 $\max(A)$, $\min(A)$ 来表示； M 为第 l 个子块的均值，则其对应的嵌入强度 α 为：

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\min(A)}{\max(A) - \min(A)} \times (1 - M) \\ M = \frac{1}{16} \sum_{i=0}^{15} h_i \end{cases} \quad (13)$$

2) 根据式(13)的嵌入强度，设计水印嵌入方法，将水印数据 W 嵌入到合适的 DCT 低频系数中：

$$h'_i = \begin{cases} Z & \text{if } Z - h_i < \alpha, \text{and } W_i = 0 \\ Z + \alpha \times W_i & \text{if } h_i - Z < \alpha, \text{and } W_i = 1 \end{cases} \quad (14)$$

$$Z = \left(\sum_{i=1}^s h'_i \right) \times \beta \quad (15)$$

式中： β 为低频系数的影响因子； s 为选择合适 DCT 低频系数的数量； W_i 为水印位； h'_i 为嵌入水印后的 DCT 低频系数。

3) 反复执行上述嵌入过程，直到所有的水印位

均被嵌入；并利用可逆 DCT 变换，将嵌入水印后的 Y 分量转换到空域：

$$f(x, y) = K(u)K(v)\sqrt{\frac{2}{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} F(u, v) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{M}u\left(x+\frac{1}{2}\right)\right] \cos\left[\frac{\pi}{N}v\left(y+\frac{1}{2}\right)\right] \quad (16)$$

4) 将此时的 Y 分量初始的 C_o, C_g 分量进行组合，并依据式(6)，将其从 YC_oC_g-R 空间转换到 RGB 空间，形成最终的水印图像。

2.4 水印提取过程

水印提取是水印嵌入的逆过程。其提取过程如下所述。

1) 根据式(5)，将水印图像从 RGB 空间变换到 YC_oC_g-R 空间，并提取其 Y, C_o, C_g 3 个分量。

2) 选择 Y 分量来进行水印提取。将其分割为一系列的 4×4 子块，利用 DCT 变换，将其变换到频域，获取相应的 DCT 低频系数。

3) 执行 2.2 节中的过程，确定出嵌入水印的低频系数。

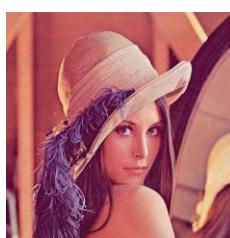
4) 根据式(17—18)，提取水印信息。

$$W_i = \begin{cases} 0 & \text{if } h'_i > Z' \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

$$Z' = \left(\sum_{i=1}^s h'_i \right) \times \beta \quad (18)$$

3 实验结果与分析

借助 Matlab 工具对文中水印算法的不可感知能力与抗攻击能力进行了实验，另外，为了反映该技术的优势，将文献[5]与文献[7]视为对照组。实验条件：DELL vostro1088, 3 GHz, 双核 CPU, 200 GB 硬盘、4 G 内存。为了考虑一般性，从 USC-SIPI 图像库^[17]中随机选择载体图像，见图 2a—c；水印信息见图 2d—f。其中，载体图像的大小为 512×512 、 $w \times w = 4 \times 4$ 、阈值 $E = 0.96$ 、偏差 $b = 0.35$ 、 $\beta = 0.2$ 。水印算法性能的衡量指标为不可感知性、鲁棒性和 ROC 曲线。



a Lena



b Barbara



c Sea



d tortoise



e characters



f words

图 2 载体图像与待嵌入的水印信息
Fig.2 The carrier image and the watermark information to be embedded

3.1 水印图像的不可感知性测试分析

以图 2a—c 为载体, 嵌入率为 0.8 bpp, 借助所提技术、文献[5]与文献[7]算法的水印嵌入过程, 将水印信息图 2d—f 嵌入载体中, 三者所输出的水印图像见图 3。由结果可知, 3 种水印机制都具有较高的视觉隐秘性, 水印图像中只呈现出载体的相关信息。这表明文中所提方法、文献[5]与文献[7]方法都具有良好的不可感知性。

由于主观评估结果无法区分 3 种水印技术的不可感知性的差异, 文中利用直方图来客观评估。一般来说, 若嵌入水印信息后的水印图像与初始载体图像的直方图越接近, 则表明嵌入水印后引起的载体图像的变化更小, 水印算法的不可感知性越强。文中仅测试图 3a、图 3c—e 为对象, 利用 Matlab 工具, 计算了初始载体图像, 与不同算法的水印图像的直方图, 结果见图 4。根据测试结果可知, 文中算法所输出水印图像的直方图与初始载体图像非常相似, 完好地保留了载体图像的直方图分布特性, 见图 4b, 而文献[5]、文献[7]这 2 种算法的水印图像的直方图分布, 与初始载体图像存在不同程度的偏差, 尤其是文献[7]算法, 其水印图像的直方图与初始载体相差较大。同时, 计算了三者的峰值信噪比 PSNR^[18], 得到文中算法的水印图像的 PSNR 值最高, 约为 43.67 dB, 而文献[5]、文献[7]的 PSNR 值均要低于文中算法, 分

别为 41.32, 38.94 dB。

3.2 不同算法的鲁棒性测试

以图 4c—d 为对象, 对其施加 30°的角度旋转、尺度缩放因子为 0.2、方差为 0.03 的高斯噪声以及 JPEG 压缩因子为 40 的攻击类型。再利用文中水印技术、文献[5]、文献[7]算法各自的水印信息提取机制来提取水印信息, 观察其提取质量, 并引入峰值信噪比 PSNR 与相关系数 NC^[19—20]来量化, 测试结果见表 1。

根据表 1 中数据可得, 在遇到不同类型的攻击时, 使其提取的水印信息与初始水印存在一定的视觉偏差, 然而, 文献[7]算法与文中水印技术的提取质量较高, 尤其是文献[7], 其复原的水印信息失真度最小, 对应的 PSNR 与 NC 值均是最大的。文献[5]的水印技术的鲁棒性不理想, 面对上述的几何攻击, 其提取的水印信息与初始水印存在较大的视觉偏差, 其 PSNR 与 NC 是最小的。主要是因为文献[7]算法设计了相应的几何校正机制, 利用该方法对几何攻击参数进行预测, 根据预测结果来完成校正, 使其具备相当好的鲁棒性, 能够较好地抵御几何攻击。文中算法则是利用模糊聚类分析与 SVM 机制来选择载体图像的鲁棒 DCT 低频系数, 并根据其对应的嵌入强度来实现水印信息的隐写, 使其具有良好的鲁棒性, 降低了嵌入失真, 增强其抗几何攻击能力。文献[5]算法通过多尺

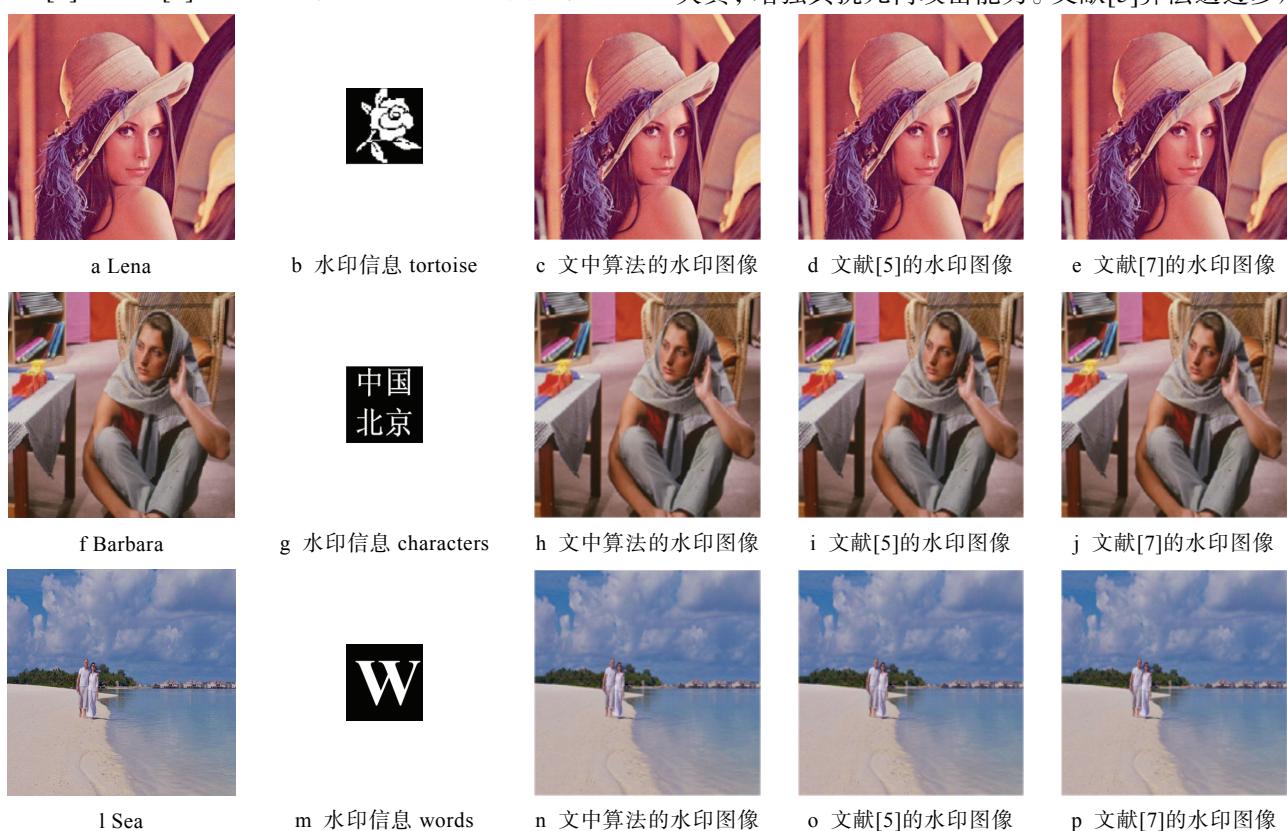


图 3 不同算法的输出水印图像
Fig.3 Output watermark image of different algorithms

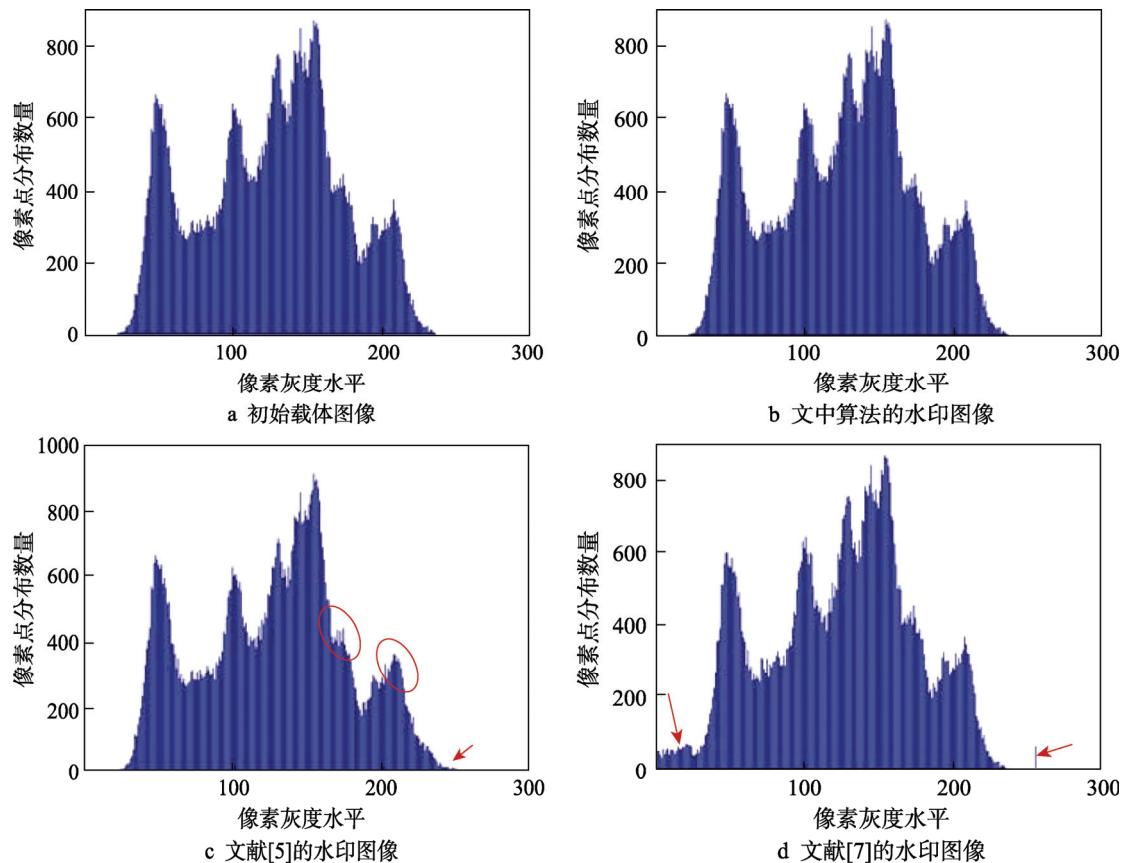


图4 初始图像以及各水印图像对应的直方图

Fig.4 The histogram corresponding to the initial image and each watermark image

表1 3种算法的鲁棒性测试结果
Tab.1 Robustness test results of three algorithms

攻击类型	文中算法			文献[5]			文献[7]		
	PNSR/dB	NC	复原水印	PNSR/dB	NC	复原水印	PNSR/dB	NC	复原水印
旋转	37.26	0.92	中国 北京	34.63	0.837	中国 北京	42.59	0.976	中国 北京
缩放	41.79	0.971	中国 北京	39.76	0.923	中国 北京	42.83	0.984	中国 北京
椒盐噪声	42.31	0.983	中国 北京	39.08	0.901	中国 北京	43.19	0.992	中国 北京
JPRG 压缩	39.66	0.964	中国 北京	35.14	0.868	中国 北京	41.27	0.981	中国 北京

度变换与 SVM 来预测水印嵌入位置，再将水印信息隐藏到这些预测位置中，但是，其忽略了像素的嵌入强度，导致其存在较大的嵌入失真，使其在遇到几何攻击时，提取水印存在较大的视频偏差。

4 结语

设计了基于 YCoCg-R 颜色空间与 DCT 机制的自适应图像水印算法。引入 YCoCg-R 空间，利用 DCT 技术对 Y 分量进行处理，得到了一系列的 DCT 系数。

基于模糊聚类分析与 SVM 方法，选择鲁棒的 DCT 系数，使其更加适合水印嵌入。计算水印嵌入强度，设计水印嵌入机制，将水印数据隐藏到选择的低频系数中，完成了水印嵌入。通过相应的水印提取方法，从水印图像中复原了初始水印信息。所提算法通过利用 YCoCg-R 空间，将水印信息嵌入到载体图像中时，不会影响其他几个分量，从而提高了不可感知性。另外，将水印信息嵌入到合适的 DCT 低频系数中，可增强其抗几何攻击能力。测试结果验证了所提算法的合理性与优异性。

参考文献:

- [1] FRANK Y S, ZZHONG X. Achieving Image Watermarking Robustness by Geometric Rectification[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2017, 31(4): 1754007—1754016.
- [2] WANG Hao-chun, CHEN Ling-yi, CHEN Wei-ming. Image Watermark Protection Based on Self-recovery Images and Sparse Approximation[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(7): 9929—9941.
- [3] 王向阳, 杨红颖, 牛盼盼. 基于四元数指数矩的鲁棒彩色图像水印算法 [J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(3): 651—665.
WANG Xiang-ying, YANG Hong-ying, NIU Pan-pan. Robust Color Image Watermarking Algorithm Based on Four Element Exponential Moments[J]. Computer Research and Development, 2016, 53(3): 651—665.
- [4] THANH T M, TANAKA K. An Image Zero-watermarking Algorithm Based on the Encryption of Visual Map Feature with Watermark Information[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(11): 13455—13471.
- [5] 李景富, 周鹏. 基于多尺度变换和支持向量回归机的数字图像水印算法 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2017, 55(4): 927—932.
LI Jing-fu, ZHOU Peng. Digital Image Watermarking Algorithm Based on Multiscale Transformation and Support Vector Regression Machine[J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2017, 55(4): 927—932.
- [6] HUA K L, DAI B R, SRINIVASAN K. A Hybrid NSCT Domain Image Watermarking Scheme[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2017, 12(1): 1—17.
- [7] SAEID F, MASOUMEH M. A Robust Color Image Watermarking Method Based on DWT, DCT, and SVD Using a New Technique for Correction of Main Geometric Attacks[J]. Optik-international Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(2): 964—972.
- [8] WANG Xiang-ying, WANG Chun-peng, WANG Ai-long. SVM Correction Based Geometrically Invariant Digital Watermarking Algorithm[J]. Media Tools and Applications, 2014, 72(2): 1933—1960.
- [9] 李春花, 凌贺飞, 卢正鼎. 基于支持向量机的自适应图像水印技术 [J]. 计算机研究与发展, 2007, 44(8): 1399—1405.
LI Chun-hua, LING He-fei, LU Zheng-ding. Adaptive Image Watermarking Technology Based on Support Vector Machine[J]. Computer Research and Development, 2007, 44(8): 1399—1405.
- [10] RAI A, SINGH H V. SVM Based Robust Watermarking for Enhanced Medical Image Security[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(18): 18605—18618.
- [11] ROY A, CHAKRABORTY RS, NASKAR R. Reversible Color Image Watermarking in the YCoCg-R Color Space[C]// 2015 International Conference on Information Systems Security. Springer, 2015: 480—498.
- [12] 沈萍萍, 余勤. 基于离散余弦变换的非局部均值图像去噪算法 [J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(1): 183—186.
SHEN Ping-ping, YU Qin. A Non-local Mean Image Denoising Algorithm Based on Discrete Cosine Transform[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(1): 183—186.
- [13] 范晓鹏, 蔡铁峰, 朱枫. 基于人眼亮度阈值特性的图像增强算法 [J]. 光电子激光, 2014, 25(8): 1606—1612.
FAN Xiao-peng, CAI Tie-feng, ZHU Feng. Image Enhancement Algorithm Based on the Characteristics of Human Eye Luminance Threshold[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(8): 1606—1612.
- [14] 俞力克, 代锋, 张勇东. 基于纹理和亮度感知特性的率失真优化策略 [J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(1): 54—61.
YU Li-ke, DAI Feng, ZHANG Yong-dong. Novel Rate Distortion Optimization Strategy Based on Perceptual Properties of Texture and Luminance[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(1): 54—61.
- [15] QI Yan, WANG Xing-qiao. Image Watermarking Technology Based on Lifting Wavelet and Fuzzy Cluster[J]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 462(10): 284—287.
- [16] 李小璐, 周晓谊, 曹春杰. 基于改进的遗传算法和 SVM 的图像 DCT 变换域水印技术 [J]. 现代电子技术, 2016, 39(20): 72—77.
LI Xiao-lu, ZHOU Xiao-yi, CAO Chun-jie. Image DCT Transform Domain Watermarking Technology Based on Improved Genetic Algorithm and SVM[J]. Modern Electronic Technology, 2016, 39(20): 72—77.
- [17] BIRAJDAR G K, MANKAR V H. Blind Method for Rescaling Detection and Rescale Factor Estimation in Digital Images Using Periodic Properties of Interpolation[J]. AEU: International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(7): 644—652.
- [18] 李淑芝, 胡琴, 邓小鸿. 全方向梯度预测和自适应选块的可逆图像水印 [J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(1): 174—178.
LI Shu-zhi, HU Qin, DENG Xiao-hong. Reversible Image Watermarking for All Directional Gradient Prediction and Adaptive Block Selection[J]. Small Mini-computer System, 2017, 38(1): 174—178.
- [19] 王琳娟. 轮廓波变换的激光图像水印技术研究 [J]. 激光杂志, 2017, 38(7): 110—113.
WANG Lin-juan. Research on Laser Image Watermarking Technology of Contourlet Transform[J]. Laser Magazine, 2017, 38(7): 110—113.
- [20] 陈琳, 王建鹏. 最优像素调整耦合基因算法的高容量图像隐写研究 [J]. 计算机应用研究, 2015, 32(8): 2429—2432.
CHEN Lin, WANG Jian-peng. Research on High Capacity Image Steganography With Optimal Pixel Adjusted Coupling Gene Algorithm[J]. Computer Application Research, 2015, 32(8): 2429—2432.