

基于视觉内容分析和遗传算法优化的鲁棒图像水印算法

左悦

(南宁学院, 南宁 530200)

摘要: **目的** 为了兼顾水印图像的不可感知性与鲁棒性, 利用 DCT (Discrete Cosine Transform) 变换域, 设计载体视觉内容分析耦合遗传算法优化的鲁棒图像水印技术。**方法** 首先, 将载体图像分割为一系列的非重叠子块, 并引入奇异值分解机制, 定义视觉内容分析方法, 获取每个子块的活性因子, 活性因子值较大的子块为水印嵌入位置; 利用 DCT 机制处理活性因子值较大的子块得到相应的直流系数; 联合结构相似度 SSIM、峰值信噪比 PSNR 以及归一化相关系数 NC, 并基于权重因子设计适应度函数, 通过执行遗传算法寻找最优的嵌入强度; 根据优化的嵌入强度构建水印嵌入方法, 将二值水印隐藏到这些直流系数中, 通过逆 DCT 变换输出水印图像; 设计水印检测方法, 从水印图像中提取二值水印。**结果** 实验数据显示, 与当前基于变换域的水印技术相比, 所提算法具有更高的视觉不可感知性与抗几何攻击能力, 面对多种几何攻击, 所提算法的 PSNR 与 NC 值分别保持在 45 dB, 0.96 以上。**结论** 所提算法能够较好地将水印信息隐藏在载体中, 具有较高的视觉不可感知性与抗几何攻击能力, 在版权保护、信息防伪等领域具有较好的参考价值。

关键词: 图像水印; 视觉内容分析; 活性因子; 奇异值分解; 适应度函数; 遗传算法; 嵌入强度

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)01-0209-09

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.01.031

Robust Image Watermarking Algorithm Based on Visual Content Analysis and Genetic Algorithm Optimization

ZUO Yue

(Nanning University, Nanning 530200, China)

ABSTRACT: The work aims to design a robust image watermarking technique based on carrier visual content analysis and genetic algorithm optimization by means of DCT (Discrete Cosine Transform), in order to balance the imperceptibility and robustness of the watermark image. Firstly, the carrier image was divided into a series of non-overlapping sub-blocks, and the singular value decomposition mechanism was introduced to define the visual content analysis method for obtaining the active factor of each subblock, so that the subblock with the larger active factor was viewed as the watermark embedding position. The DCT method was used to process the subblocks with larger active factor, in order to get the corresponding DC coefficients. Then, combined with the SSIM, PSNR and NC, the fitness function was designed based on weight factor. The optimal embedding strength was found by implementation of genetic algorithm. According to the optimized embedding strength, the watermark embedding method was constructed to hide binary watermark into these DC coefficients, and the watermark image was outputted through inverse DCT transform. Finally, the watermark detection method was designed to extract binary watermark from watermark image. Experimental data showed that, compared with the current watermarking technology based on transform domain, the proposed algorithm had higher visual imperceptibil-

收稿日期: 2018-09-15

基金项目: 广西高校科学技术研究项目基金 (KY2015YB525)

作者简介: 左悦 (1981—), 女, 硕士, 南宁学院讲师, 主要研究方向为图形图像处理、计算机应用。

ity and anti-geometric attack ability. The PSNR and NC values of the proposed algorithm were kept over 45 dB and 0.96 respectively in the face of various geometric attacks. The proposed algorithm can better hide watermark information into the carrier, and has higher visual imperceptibility and anti-geometric attack ability, which has better reference value in copyright protection, information security and other fields.

KEY WORDS: image watermarking; visual content analysis; active factor; singular value decomposition; fitness function; genetic algorithm; embedding strength

随着多媒体与互联网技术的发展,图像因其包含了诸多用户想要表达的内容,具有理想的直观表达特性,在医疗、安防与模式识别等行业具有重要作用^[1]。随着软件技术的日益完善,市场上出现了多种强大的编辑工具,在开放的网络中传输时,它们能够肆意修改图像,且不留篡改痕迹,导致用户无法对其真实性进行决策,对图像信息安全造成了隐患^[2]。这使得对防止非法使用受版权保护数据具有强烈要求,因此,保护图像信息的安全,防止其在网络传输中遭受几何攻击,已成为当前研究人员的关注焦点^[3]。其中,数字水印技术是实现多媒体版权保护与信息完整性保证的有效方法,具有深刻的研究意义,它是将水印嵌入到宿主图像中,使得最终结果只呈现宿主图像信息,具有较高的视觉隐秘性与鲁棒性^[4]。在当前的图像水印技术中,主要分类两大类:基于空域的水印技术^[5-7]与基于变换域的水印技术^[8-10]。空域水印技术主要是直接修改载体图像的空间信息,如像素值和统计特性,曹再辉等^[5]为了提高水印容量与鲁棒性,设计了基于混合进制系统与像素差异的无损水印算法,该技术利用混合进制系统来获取不同的基数,并考虑人眼视觉特性,设计像素区间自适应调整机制,改进 diamond 编码技术,完成水印信息的嵌入。Niu 等^[6]为了改善水印系统的不可感知性与抗几何能力,提出了基于局部不变有效位平面直方图的鲁棒水印技术,利用载体图像的的稳定特征点来建立特征区域,通过将水印信息隐藏到这些特征区域的直方图中,实现水印信息的嵌入,实验结果验证了其技术的优异性与合理性。He 等^[7]为了增强水印图像的鲁棒性,设计了基于直方图修改的图像水印算法,此技术是通过修改图像直方图的灰度样本数,将水印信息嵌入到宿主图像中,并且在固定的灰度范围内,每 3 个连续的 bin 被分成一组,用于嵌入一位的水印信息,通过将一个 bin 的采样值修改为另一个相邻 bin 来完成水印信息的嵌入。

上述空域水印技术具有较高的效率与较好的不可感知性,但是,此类方法的鲁棒性较低,无法抵抗噪声攻击和几何攻击^[8]。相对于空域水印技术,基于变换域的水印技术具有更强的鲁棒性,如张虹等^[8]为了更好地平衡水印系统的不可感知性与抗攻击能力,提出了基于压缩感知和离散余弦变换的数字图像水印算法,利用离散余弦变换与压缩感知对载体图像的非重叠子块进行分解与压缩,通过相应的水印嵌入方

法,将二值水印隐藏到 DCT 系数中,从而获取水印图像。但是,该技术是将水印信息嵌入到整个载体中,引起的修改范围较大,使其不可感知性较低。Wang 等^[9]提出了基于模糊最小二乘支持向量机与几何校正机制的鲁棒水印算法,利用四元离散 Fourier 变换来处理载体图像的最大中心区域,再通过水印嵌入方法,将水印信息隐藏到四元离散 Fourier 变换的低频信息中,同时,利用训练的模糊最小二乘支持向量机模型来设计几何校正技术,评估几何变换参数,完成水印图像的校正,从而准确解码,测试数据表明其算法具有较高的抗几何攻击能力。然而,此方法严重依赖于训练样本,限制了其几何校正能力,对几何失真变换的鲁棒性不理想,且复杂度较高。Zhou 等^[10]提出了基于离散小波变换与全相位离散余弦双正交变换的鲁棒水印技术,利用离散小波变换分解载体图像的子块,获取相应的 DC 系数,并基于全相位离散余弦双正交变换与奇异值分解,构建了水印嵌入方法,将二值水印嵌入到 DC 系数中。但是,在其水印嵌入过程中,没有考虑像素的嵌入强度对水印系统的影响,而且采用一个经验值来完成水印嵌入,使其鲁棒性有待提高。

为了解决上述问题,文中采用变换域思想,设计载体视觉内容分析耦合遗传算法优化的鲁棒图像水印技术。通过定义视觉内容分析方法,使其考虑了人眼视觉特性,从载体中选择出最佳嵌入位置,并联合 DCT 机制,选取其 DC 系数作为修改对象,不仅增强了水印信息在载体中的隐秘性,而且确保了水印容量。利用结构相似度、峰值信噪比以及归一化相关系数,来设计遗传算法的适应度函数,从而获取最优的嵌入强度,可以最大程度地提高水印系统的鲁棒性。最后,测试所提水印技术的不可感知性与抗几何失真能力。

1 文中鲁棒水印算法

所提的视觉内容分析耦合遗传算法优化的鲁棒图像水印算法的过程见图 1,主要分为 3 个过程:基于视觉内容分析的最佳子块选择;基于遗传算法优化的水印嵌入;水印检测,利用视觉内容分析机制,将载体中的高亮度与复杂纹理区域选择出,作为最佳的位置来嵌入水印,显著提高水印系统的视觉掩蔽效果,将遗传算法引入水印嵌入过程,通过优化嵌入强度,最大化水印图像的鲁棒性。

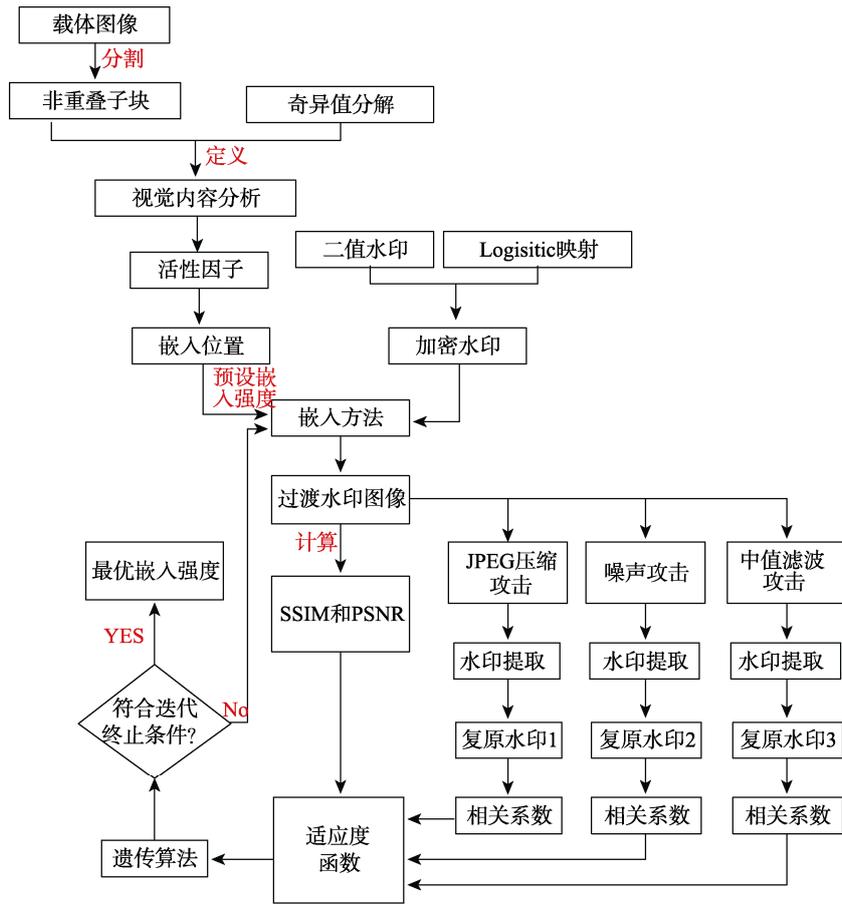


图 1 所提算法的水印过程
Fig.1 Watermark process of the proposed algorithm

1.1 基于视觉内容分析的最佳子块选择

任意一个载体图像都有自己的灰度信息和纹理特征，且其包含了复杂和平滑区域。现有的水印技术通常忽略了这个特性，其载体图像中所有的像素或者子块都有相同的概率被用于嵌入水印，使其忽略了人眼视觉特性，导致其不可感知性不理想。一般而言，图像的高亮度和复杂纹理区域具有良好的视觉掩蔽效果。如果水印信息嵌入到这些位置，可增强水印系统的不可感知性，因此，在进行水印嵌入前，文中对载体内容进行分析，确定最佳嵌入位置。首先，将输入载体图像 $f(x,y)$ 分割为一系列的 8×8 子块 B_k ；随后，引入奇异值分解机制^[10]，处理所有的子块 B_k ：

$$B_k = USV^T \quad (1)$$

式中： U 、 V 为正交矩阵； $S = \{s_{ii}\}, i=1,2..n$ 为对角矩阵； T 为转置符号。

令 λ_{11} 与 λ_{22} 为对角矩阵 S 中最大的 2 个元素，满足 $\lambda_{11} \geq \lambda_{22} \geq \dots \geq \lambda_{rr} \geq \lambda_{r+1, r+1} = \lambda_n = 0$ ，再根据 λ_{11} 、 λ_{22} 与 λ_{rr} 计算 2 个因子：

$$\begin{cases} E = \lambda_{11}/\lambda_{22} \\ E_{\max} = \lambda_{11}/\lambda_{rr} \end{cases} \quad (2)$$

随后，对因子 E 进行归一化处理：

$$A_k = \frac{E}{E_{\max}} \quad (3)$$

式中： k 为子块的索引序号。

对于每个子块 B_k 的方差 V ，并找出这些子块中最大的方差 V_{\max} ：

$$M_k = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_k(i,j) \quad (4)$$

$$V_k = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (B_k(i,j) - M_k)^2 \quad (5)$$

式中： M_k 为子块 B_k 的均值。

随后，再根据 V 、 V_{\max} 计算每个子块的活性因子：

$$F = \alpha \times A_k + (1-\alpha) \times \frac{V}{V_{\max}} \quad (6)$$

式中： F 为子块 B_k 的活性因子； α 为权重因子。

根据式 (6) 得到的活性因子 F ，按照升序对 F 进行排序，则较大的 F 值对应的子块具有复杂纹理与高亮度，比较适合水印嵌入。以图 2a 与图 2b 为例，根据上述过程，得到的内容分析结果见图 2c 和图 2d。依图 2 可知，黑色部分是非活性区域，不适用于嵌入水印，剩余区域则为文中选择的最佳子块位置。

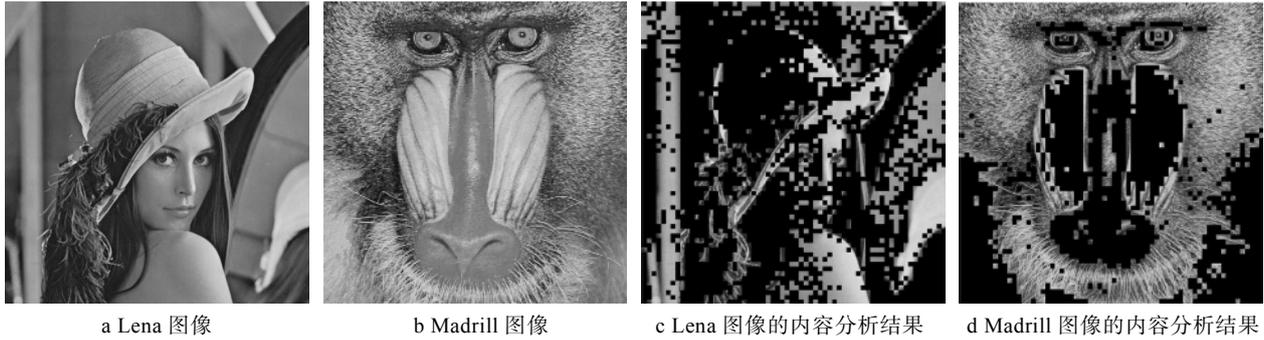


图2 载体图像的内容分析结果
Fig.2 Content analysis results of carrier images

为了直观描述每个子块的复杂度,文中定义一个阈值 T , 来形成一个标记映射 Y :

$$Y = \begin{cases} 1 & \text{if } F \geq T \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

式中: T 为判断图像亮度和复杂度以及是否嵌入水印的阈值, 主要用于控制嵌入子块的数量。 T 值越大, 则选择的最佳子块数较少, 对载体图像的修改范围也就小, 从而使其不可感知性更高, 但是相应的水印容量较小; 反之, 则视觉掩蔽效果不佳, 但水印容量更大。为此, 需要对阈值 T 进行优化, 以兼顾不可感知性与水印容量。

1.2 基于遗传算法优化的水印嵌入

为了改善水印系统的鲁棒性, 文中引入离散小波变换 DCT^[11]来处理上述过程得到的最佳子块, 在频域中完成水印信息的嵌入。DCT 函数为^[11]:

$$C(u, v) = S(u)S(v) \sqrt{\frac{2}{LH}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{L}u\left(x+\frac{1}{2}\right)\right] \cos\left[\frac{\pi}{H}v\left(y+\frac{1}{2}\right)\right] \quad (8)$$

式中: $C(u, v)$ 为 DCT 函数; x, y 为图像 $f(x, y)$ 的像素坐标; $L \times H$ 为图像尺寸; u, v 为 $F(u, v)$ 的坐标值; $s(u), s(v)$ 均为 $C(u, v)$ 的核变换:

$$s(u) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2}} & u=0 \\ 1 & 1 \leq u \leq L-1 \end{cases}; \quad s(v) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{2}} & v=0 \\ 1 & 1 \leq v \leq H-1 \end{cases} \quad (9)$$

根据式(8)与式(9), 可以得到每个子块的 DC 系数与 AC 系数。与 AC 系数相比, DC 系数的幅度值更大, 可以提高水印系统的容量; 另外, DC 分量比 AC 分量具有更好的稳健性, 低通滤波和无损压缩等常规攻击对 DC 成分的影响更小。为此, 文中选择最佳子块的 DC 系数来完成水印嵌入。

随后, 预设嵌入强度, 构建水印嵌入函数:

$$B_k^{DC}(i, j) = B_k^{DC}(i, j) + \beta \times w \quad (10)$$

式中: β 为嵌入强度; $B_k^{DC}(i, j)$ 为初始载体的 DC 系数; $B_k^{DC}(i, j)$ 为嵌入水印后的 DC 系数; w 为

经过 Arnold 映射^[12]加密后的水印:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{Z} \quad (11)$$

式中: (x, y) 为二值水印的像素坐标; (x', y') 为加密水印的像素坐标; Z 为水印图像矩的阶数; mod 为求模运算。

在水印嵌入过程中, 嵌入强度 β 对水印图像的鲁棒影响较大, 为此, 文中引入遗传算法来优化 β , 以最大程度增强其抗攻击能力。首先, 根据初始载体图像与水印图像之间的结构相似度 SSIM、峰值信噪比 PSNR 以及初始水印与提取水印之间的归一化相关系数 NC 来构建遗传算法的适应度函数, 以优化水印系统的不可感知性与鲁棒性。令初始载体图像为 $I(x, y)$, 根据式(10)形成的水印图像为 $I'(x, y)$, 则二者之间的 SSIM 函数为^[13]:

$$\begin{cases} \text{SSIM} = \frac{(2u_x u_y + c_1)((2\sigma_{xy} + c_2))}{(u_x^2 + u_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \\ c_1 = (K_1 L)^2; c_2 = (K_2 L)^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: u_x, u_y 分别为 x, y 的均值; σ_x, σ_y 分别为 x, y 的方差; σ_{xy} 为协方差; L 为图像像素的动态范围; K_1, K_2 均为一个较小的常量, 在文中, 取 $K_1=0.01, K_2=0.03$ 。

若水印图像大小为 $M \times N$, 则其与载体图像 $I(x, y)$ 之间的峰值信噪比 PSNR 函数为^[14]:

$$\begin{cases} \text{PSNR} = 10 \lg \frac{\max(I^2(x, y))}{\text{MSE}} \\ \text{MSE} = \frac{1}{M \times N} \sum_{I=1}^M \sum_{J=1}^N [I(x, y) - I'(x, y)]^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: MSE 为载体与水印图像之间的均方误差。

在式(12)和式(13)中, SSIM 值越大, PSNR 值越大, 则说明水印图像的失真越小, 算法的不可感知性越高。归一化相关系数^[14]NC ($NC \in [0, 1]$) 则是衡量水印系统鲁棒性的重要量化指标, 若 NC 值越接近 1, 则表明提取的水印与初始水印更加相似, 其函数为:

$$NC = \frac{\sum_{x=1}^H \sum_{y=1}^L W(x,y) \times W'(x,y)}{\sum_{x=1}^H \sum_{y=1}^L [W(x,y)]^2} \quad (14)$$

式中: H 为水印的高度; L 为水印的宽度; W 为初始水印; W' 为复原水印。

联合 SSIM, PSNR 与 NC, 构建第 m 轮遗传算法的适应度函数为:

$$f_m = PSNR_m + \lambda_1 SSIM + \lambda_2 \sum_{i=1}^3 NC_{m,i} \quad (15)$$

式中: f_m 为遗传算法迭代 m 轮对应的适应度。

由于 PSNR 值要比 SSIM, NC 值大几十倍, 所以利用权重因子 λ 来放大 SSIM, NC 值, 以平衡三者的值大小。根据式 (15), 则式 (10) 中的嵌入参数 β 的优化过程如下所述。

1) 预设嵌入强度 β , 根据式 (10), 将加密后的水印嵌入到载体图像中的最佳子块对应的 DCT 系数中, 形成过渡水印图像 I_1 。

2) 根据式 (12)、式 (13) 分别计算载体图像与 I_1 之间的 SSIM, PSNR 值。

3) 对水印图像 I_1 施加 JPEG 压缩、高斯噪声与

中值滤波攻击, 形成 3 个新的水印图像 I_2, I_3, I_4 ; 根据 1.3 节过程, 从 3 幅水印图像中复原水印, 分别为 w_2, w_3, w_4 。

4) 根据式 (14) 计算初始水印与 w_2, w_3, w_4 之间的归一化相关系数 NC 值, 分别为 NC_2, NC_3, NC_4 。

5) 再利用式 (15) 构建遗传算法的适应度函数 f_m 。

6) 基于文献[15]提供的遗传算法训练过程, 利用式 (15) 替换其适应度函数, 通过执行 m 轮训练过程, 输出最优的嵌入强度 β' ; 根据 β' , 利用式 (10), 完成水印的优化嵌入, 输出最终的水印图像。

以图 2a 为载体图像, 以图 3a 为待嵌入水印, 预设嵌入强度 $\beta=7.561$, JPEG 压缩因子为 55, 噪声方差为 0.06, 中值滤波因子为 0.49; 再依据上述过程, 将图 3a 隐藏到图 2a 中的最佳子块中, 输出的水印图像见图 3c。由图 3c 可知, 输出的水印图像只呈现出载体信息, 没有泄露出任何水印特征, 对应的直方图变化非常小, 分别见图 3d 和图 3e, 其与载体图像之间的 SSIM, PSNR 值分别为 0.989, 47.36 dB。

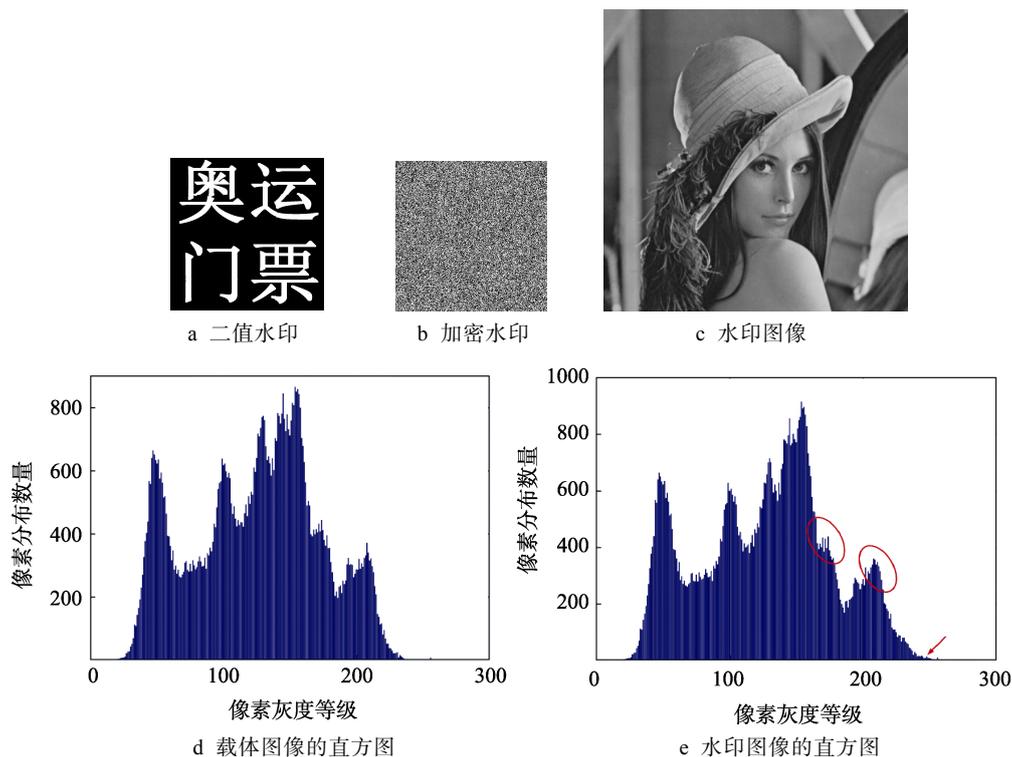


图 3 水印嵌入测试
Fig.3 Watermark embedding test

1.3 水印检测

水印的提取是水印嵌入的逆过程, 用户通过此方法, 可以从水印图像中复原用户想要的真实水印数据^[16], 对应的检测过程如下所述。

1) 根据 1.1 节的过程, 设置阈值 T , 从水印图像中的选择最佳子块。

2) 利用 DCT 机制分解这些子块, 输出对应的 DC 系数。

3) 根据嵌入强度, 构建水印检测函数:

$$w' = (B_k^{DC}(i, j) - B_k^{DC}(i, j)) / \beta \quad (16)$$

其中，在执行遗传算法前， β 为预设值；在获取最终的水印图像后，利用最优的嵌入强度 β' 来完成水印检测。

4) 最后，利用 Arnold 逆映射，对加密水印完成复原。

以图 3c 为例，根据上述检测过程，从中提取的水印结果见图 4。依图 4 可知，所复原的水印清晰完整，较好地保持了初始水印的信息，二者之间的归一化相关系数 NC 值为 0.936。



图 4 水印检测结果
Fig.4 Watermark detection results

2 实验结果及分析

为了测试所提水印系统的视觉隐秘性与鲁棒性，借助 Matlab 平台来实施验证，另外，为了体现该方法的优势，将文献[8]、文献[10]作为对照组。实验条件为：DELL 电脑，3.5 GHz，双核 CPU，500 GB 硬盘与 8 G 内存。不失一般性，在 USC-SIPI 数据集^[17]中

任意挑选 3 幅图像，见图 5a—c，其尺寸均为 512×512；并把图 5d—f 作为待嵌入的二值水印，尺寸均为 64×64。实验参数为：遗传算法的迭代次数 $m=300$ ， $Z=2$ ， $K_1=0.01$ ， $K_2=0.03$ 。评价指标：不可感知性与鲁棒性。

2.1 阈值 T 的优化选择

在 1.1 节中，在形成最佳子块的标记映射时，需要借助一个阈值 T 。该阈值主要是衡量算法的嵌入容量与水印质量。为此，文中从 USC-SIPI 数据库^[17]中选择“Bird”，“Barbara”，“Peppers”3 幅图像作为样本，见图 5a—c，并置不同阈值 $T=0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.45, 0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7$ ，根据上述水印过程，获取对应的水印图像，并测试其相应的 PSNR 值与嵌入率，结果见图 6。对于不同的载体图像，阈值 T 是不同的。随着 T 的增大，PSNR 值均在增大，但是水印容量确在下降。对于 Bird 图像，当 $T=0.55$ 时，对应 PSNR 值约为 46.7 dB，嵌入率仍可达到 1.9 bpp，较好地衡量了水印图像的不可感知性与嵌入容量。对于 Barbara 图像，最佳 T 值取 0.45；而 Peppers 图像的最佳阈值 T 为 0.4。

2.2 不可感知性测试

不可感知性是评估水印信息在载体图像中的隐藏效果的重要指标^[2]。为此，利用文中水印技术、文

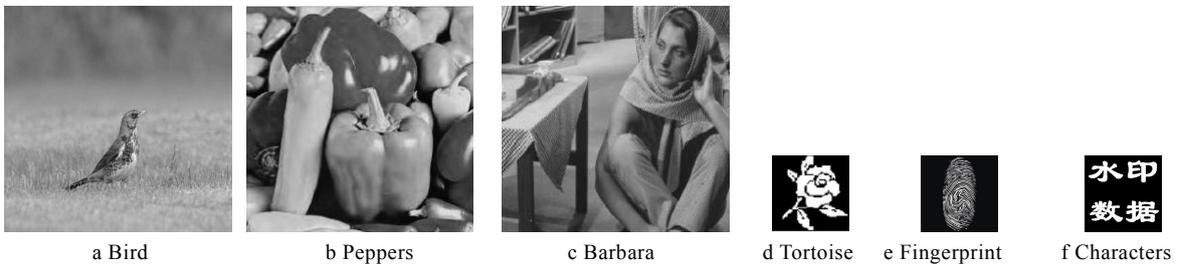


图 5 载体图像及二值水印
Fig.5 Carrier image and binary watermark

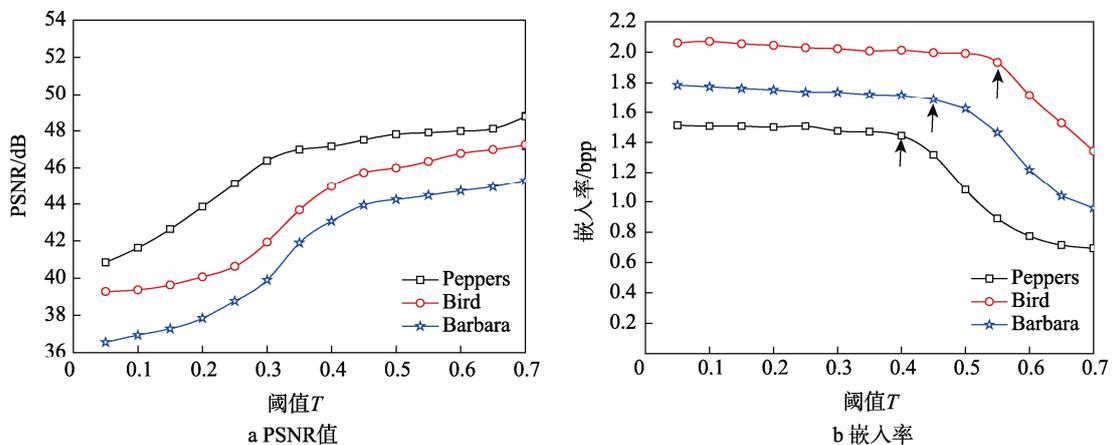


图 6 阈值 T 的优化选择
Fig.6 Optimal selection of threshold T

献[8]和文献[10]的嵌入过程, 将图 5 中的水印信息分别嵌入初始载体中, 输出的水印图像见图 7。由嵌入效果可知, 所提技术、文献[8]以及文献[10]均具备良好的视觉不可感知性, 输出结果中只呈现初始载体的信息, 基本与载体图像一样。为了客观衡量这 3 种方案的视觉隐秘性能的优劣, 利用差分图^[2]来评价。以图 7k、图 7m—v 为对象, 通过统计其灰度分布情况, 形成的差分图见图 7。依图 7 可知, 所提算法所输出的水印图像与初始载体的像素灰度分布拟合度最佳, 没有出现“阶梯效应”, 这说明所提技术的视觉隐秘性最好。文献[8]技术的不可感知性不理想, 其水印图像的灰度分布与初始载体存在差异, 有轻微的“阶梯效

应”。原因是所提算法基于人眼视觉系统, 定义了视觉内容分析方法, 通过获取载体图像的每个子块的活性因子, 根据活性因子的大小选择最佳子块作为嵌入位置, 使其不仅对载体的修改程度最小, 而且这些嵌入位置均具有良好的视觉掩蔽效果, 从而增强了所提技术的不可感知性。文献[8]技术是将水印信息嵌入整个载体中, 引起的修改范围较大, 而且有些子块容易引起视觉注意, 使其不可感知性较低。文献[10]虽然从所有子块中选择出部分合适的位置来嵌入水印, 对载体的修改范围较小, 但是, 在确定最佳子块时, 忽略了人眼视觉特性, 导致存在某些子块的视觉掩蔽效果不佳, 使其不可感知性要略低于所提算法。



图 7 不同算法的水印图像
Fig.7 Watermarking image of different algorithms

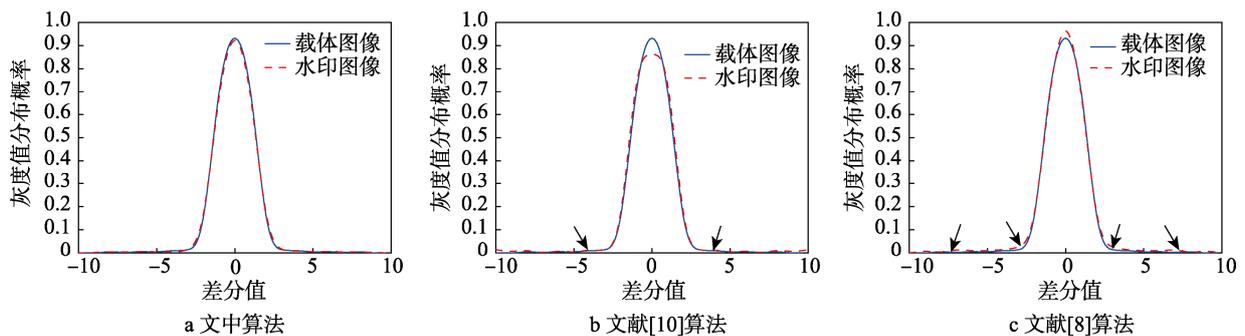


图 8 不同水印算法的差分图测试
Fig.8 Differential graph testing of different watermarking algorithms

2.3 鲁棒性测试

理想的水印技术除了具备较高的不可感知性之外,还应有较强的鲁棒性^[2]。为了反映文中方案的鲁棒性,以图 7m—v 为样本,对其施加不同类型的攻击,见表 1。随后,利用文中方案与文献[8]、文献[10]对应的水印提取过程,从几何变换后水印图像中提取水印信息,并通过计算初始水印与其之间的 PSNR 与 NC 值^[14]来客观评价,测试数据见表 2。根据表 2 中数据可知,水印图像在遇到几何变换时,3 种技术提取的水印都存在失真现象。然而,除了旋转攻击外,所提技术的鲁棒性要略低于文献[8],对于其他类型的几何攻击,所提技术的抗攻击能力最高,表现出理想的鲁棒性,可检测出清晰完整的水印,其 PSNR, NC 值始都要大于对照组。文献[8]、文献[10] 2 种方案的鲁棒性有待提高,当水印图像遇到几何变换时,其检测的水印都存在失真现象,相应的 PSNR, NC 值均低于文中方法。原因是所提方案采用了归一化相关系数 NC 来设计遗传算法的适应度函数,通过执行遗传算法来寻找最优的嵌入强度,可最大程度提高水印系统的鲁棒性。文献[8]则是依据载体图像的照度特性和纹理特征来确定嵌入强度,并将水印图像与初始载体进行匹配来检测水印,使其同样具有较高的抗几何攻击能力,但是此技术的嵌入强度主要是根据子块的方差来确定,虽然具有适应性,但是不能确定出最佳值,导致其鲁棒性要略低于所提技术,而文献[10]算法在水印嵌入过程中,利用一个经验值作为嵌入强度,没有考虑像素的嵌入强度对水印系统的影响,使其鲁棒性不理想。

表 1 攻击类型及其参数值

Tab.1 Type of attack and its parameter value

名称	角度旋转/(°)	尺度变换	椒盐噪声	JPRG 压缩
数值	40	0.3	0.03	55

表 2 各水印技术的鲁棒性测试

Tab.2 Robustness testing of watermarking techniques

名称	实验结果	旋转	尺度变换	椒盐噪声	JPRG 压缩
文中算法	PNSR/dB	45.74	46.61	47.19	45.82
	NC	0.962	0.983	0.987	0.969
	复原水印	水印数据	水印数据	水印数据	水印数据
文献[8]	PNSR/dB	45.86	46.59	47.03	43.58
	NC	0.973	0.981	0.985	0.946
	复原水印	水印数据	水印数据	水印数据	水印数据
文献[10]	PNSR/dB	42.766	45.35	46.98	40.74
	NC	0.939	0.946	0.982	0.859
	复原水印	水印数据	水印数据	水印数据	水印数据

3 结语

为了保持水印系统的不可感知性与抗几何攻击特性,文中通过引入遗传算法与定义载体视觉内容分析机制,提出了一种新的鲁棒水印方案。利用奇异值分解来定义载体视觉内容分析机制,将水印嵌入到人眼不敏感区域,从而提高了水印系统的不可见性。同时,为了解决了视觉不可感知性与嵌入容量的矛盾,所提技术使用了一个阈值来控制,通过对其完成优化,以最大化水印图像的容量与视觉隐秘性。另外,为了优化水印图像的鲁棒性,所提方法还引入了遗传算法,通过联合初始载体图水印图像之间的 SSIM 与 PSNR,以及初始水印与提取水印的 NC 值来构建适应度函数,在水印嵌入过程中,找出出最优的嵌入强度。实验数据验证了所提水印方法具有理想的不可感知性,且面对常规的几何变换,具有较高的鲁棒性。

参考文献:

- [1] SU Qing-tang, WANG Gang, ZHANG Xiao-feng. A New Algorithm of Blind Color Image Watermarking Based on LU Decomposition[J]. Multidimensional Systems and Signal Processing, 2018, 29(3): 1055—1074.
- [2] 李红日, 方遂. 基于误差扩展与像素容量评估的图像水印算法[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(10): 109—118.
LI Hong-ri, FANG Kui. Image Watermarking Algorithm Based on Error Expansion and Pixel Capacity Evaluation[J]. Journal of Southwestern University(Natural Science Edition), 2017, 39(10): 109—118.
- [3] 赵刚, 张晶, 方旺盛. 基于小波包变换和人类视觉系统的数字水印算法研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 45—49.
ZHAO Gang, ZHANG Jing, FANG Wang-sheng. Research on Digital Watermarking Algorithms Based on Wavelet Packet Transform and Human Vision System[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science Edition), 2014, 35(2): 45—49.
- [4] 顾宇鑫, 马小虎. 采用稀疏变换和拉普拉斯金字塔的数字水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(5): 901—910.
GU Yu-xin, MA Xiao-hu. Sparse Transform and Laplace Digital Watermarking Algorithm in Pyramid[J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2018, 30(5): 901—910.
- [5] 曹再辉, 吴庆涛, 施进发. 基于混合进制系统与像素差异的无损水印算法[J]. 计算机工程与设计, 2018, 39(6): 1704—1710.
CAO Zai-hui, WU Qing-tao, SHI Jin-fa. Lossless Watermarking Algorithm Based on Mixed Binary System and Pixel Difference[J]. Computer Engineering and Design, 2018, 39(6): 1704—1710.

- [6] NIU Pan-pan, WANG Xiang-yang, LIU Yu-nan. A Robust Color Image Watermarking Using Local Invariant Significant Bitplane Histogram[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(3): 3403—3433.
- [7] HE Xuan-sen, ZHU Tao, YANG Gao-bo. A Geometrical Attack Resistant Image Watermarking Algorithm Based on Histogram Modification[J]. *Multidimens Syst Signal Process*, 2015, 26(1): 291—306.
- [8] 张虹. 基于压缩感知和离散余弦变换的数字图像水印算法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2017, 55(6): 1504—1510.
ZHANG Hong. Digital Image Watermarking Algorithm Based on Compressed Sensing and Discrete Cosine Transform[J]. *Journal of Jilin University(Engineering Edition)*, 2017, 55(6): 1504—1510.
- [9] WANG Chun-peng, WANG Xing-yuan, ZHANG Chuan. Geometric Correction Based Color Image Watermarking Using Fuzzy Least Squares Support Vector Machine and Bessel K Form Distribution[J]. *Signal Processing*, 2017, 134(12): 197—208.
- [10] ZHOU Xiao, ZHANG Heng, WANG Cheng-you. A Robust Image Watermarking Technique Based on DWT, APDCBT, and SVD[J]. *Symmetry*, 2018, 10(3): 77—86.
- [11] 董凤慧, 孙中廷, 徐永刚. 基于 YCoCg-R 颜色空间与离散余弦变换的自适应彩色图像水印算法[J]. *包装工程*, 2018, 39(13): 181—187.
DONG Su-hui, SUN Zhong-ting, XU Yong-gang. Adaptive Color Image Watermarking Algorithm Based on YCoCg-R Color Space and Discrete Cosine Transform[J]. *Packaging Engineering*, 2018, 39(13): 181—187.
- [12] WANG Xiang-yang, LIU Yu-nan. Robust Image Watermarking Approach Using Polar Harmonic Transforms Based Geometric Correction[J]. *Neurocomputing*, 2016, 174(12): 627—642.
- [13] 靳鑫, 蒋刚毅, 陈芬. 基于结构相似度的自适应图像质量评价[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(2): 378—385.
JIN Xin, JIANG Gang-yi, CHEN Fen. Adaptive Image Quality Assessment Based on Structural Similarity[J]. *Opto-Electronic Laser*, 2014, 25(2): 378—385.
- [14] 姚军财. 基于小波变换和奇异值分解的图像水印算法研究[J]. *光学技术*, 2017, 43(5): 439—444.
YAO Cai-jun. Image Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform and Singular Value Decomposition[J]. *Optical Technology*, 2017, 43(5): 439—444.
- [15] 钟宁, 何遵文, 匡镜明. 基于遗传算法的图像水印优化嵌入技术研究[J]. *兵工学报*, 2008, 29(9): 1054—1058.
ZHONG Ning, HE Zun-wen, KUANG Jing-ming. Research on Image Watermarking Optimization Embedding Technology Based on Genetic Algorithm[J]. *Journal of Ordnance Industry*, 2008, 29(9): 1054—1058.
- [16] 方云录. 基于容量评估与径向谐波傅里叶矩的图像水印算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(6): 139—147.
FANG Yun-lu. Image Watermarking Algorithm Based on Capacity Evaluation and Radial Harmonic Fourier moments[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2018, 32(6): 139—147.
- [17] BIRAJDAR G. 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.