

基于高频分量修正的图像水印混合方法^①

江芝蒙¹, 侯翔², 李杰³

1. 四川文理学院 信息化建设与服务中心, 四川 达州 635000;

2. 四川文理学院 智能制造学院, 四川 达州 635000;

3. 四川文理学院 科技处, 四川 达州 635000

摘要: 针对图像版权保护中图像水印受攻击的鲁棒性问题, 提出一种基于高频分量修正(high frequency component modification, HFCM)的图像水印混合方法. 在嵌入部分, 首先利用高斯低通滤波器对原始图像进行预处理, 使用秘钥随机选择多个灰度级, 并且构造滤波图像关于这些选择的灰度级直方图; 然后引入直方图形状相关指标来选择像素数最高的像素组, 并在所选择的像素组和未选择的像素组之间建立安全带. 该文提出了一种 HFCM 机制的水印嵌入方案, 将水印嵌入到所选像素组中, 以进一步提高鲁棒性. 在解码端, 基于可用的秘钥识别水印像素组, 并从中提取水印. 实验结果表明, 该文算法对不同的攻击具有较强的鲁棒性, 且性能优于其他算法.

关键词: 图像水印; 高频分量修正; 高斯滤波; 直方图; 鲁棒性

中图分类号: TP309

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2019)11-0102-08

随着互联网技术的迅速发展, 数字图像的获取变得更加容易. 然而, 随着数字图像的轻松获取, 数字图像的非法复制数量不断增加, 并没有考虑该图像上的现有版权问题^[1-2]. 此外, 许多数字图像处理软件更容易对数字图像进行快速操作和修改, 从而增加了盗版和滥用数字图像版权的机会^[3-4]. 图像水印是识别所有者问题的一个解决方案^[5-6], 数字水印可以是插入数字文件(如图像, 音频或视频)的比特模式. 数字水印的一个重要特征是对多种类型的攻击或常见图像操作(如旋转、过滤、缩放、裁剪和压缩)的鲁棒性和不可感知性. 数字水印算法的效能完全基于嵌入水印对多种攻击的鲁棒性. 现有的水印方法能够有效解决信号处理攻击, 但是不能很好地应对几何攻击, 为了解决几何攻击, 已经在图像水印中使用了各种技术, 这些技术可以大致分为非盲水印技术和盲水印技术^[7]. 非盲水印技术需要在解码端使用主图像进行水印提取, 因此在实际使用中局限性较大, 而盲水印技术不需要解码器中的主图像信息, 使得其更适用于现实世界的应用.

大多数盲水印技术可分为穷举搜索、变换域、模板和基于特征的技术, 但是穷举搜索方法在计算上非常昂贵, 且错误检测率很高^[8]. 对于文献[9]中水印嵌入在 DFT 变换域中实现, 该域对于缩放和旋转是不变的, 但是容易受到裁剪的影响. 文献[10]中 HWT-DCT 图像水印算法易受到随机弯曲攻击的影响. 文献[11]中 DCT 图像水印算法在信号处理攻击和一些几何攻击(例如缩放和旋转)方面表现不佳. 文献[12]中将线结构应用于模板, 在文献[13]中 chirp-Z 变换用于更准确和更快速的模板匹配, 基于模板的方法主要缺点是攻击者可以估计模板, 然后将其删除, 由于图像信息永久丢失, 这种方法不能保证在剪切攻击下成功提取嵌入的水印. 在文献[14]和[15]中, 图像的空间统计特征被用于提取矩不变量, 然后用于水印嵌入, 这种方法对于仿射攻击是不变的, 但它极易受到裁剪攻击的影响.

为了解决现有方法的问题, 本文提出一种基于直方图-哈夫曼编码的 HFCM 混合图像水印算法, 该算

① 收稿日期: 2018-06-27

基金项目: 四川省教育厅自然科学基金项目(17ZB0376, 17ZB0369).

作者简介: 江芝蒙(1981-), 男, 硕士, 实验师, 主要从事计算机应用与技术研究.

法在嵌入阶段首先构造高斯滤波图像的直方图与使用密钥随机选择的多个灰度级, 直方图形状相关索引来选择像素数最多的像素组, 并在选定和未选像素组之间建立一个安全带, 通过将一些像素移动到像素组内的某些灰度级, 将水位位插入到所选组中, 并在水印嵌入过程中, 提出一种新的高频分量修正(HFCM)方案来补偿高斯滤波的副作用, 从而进一步增强了鲁棒性.

1 高斯滤波和 Huaffman 编码

1.1 高斯滤波

通过将水印嵌入到图像的低频分量中, 可以实现对常见信号处理攻击的鲁棒性. 因此, 首先通过二维高斯低通滤波器对灰度图像 I 进行预处理.

$$F(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{1}$$

其中, (x, y) 表示像素的位置, σ 是高斯分布的标准差, 一般选择 $\sigma = 1$. 滤波后的图像 I_{low} 可以表示为

$$I_{low} = F(x, y, \sigma) * I(x, y) \tag{2}$$

其中, $*$ 表示卷积运算. 如果 I_{high} 代表从主图像 I 去除高斯滤波的高频分量, 则表示为

$$I_{high}(x, y) = I(x, y) - I_{low}(x, y) \tag{3}$$

实际上, 通常使用表达式 $(2k\sigma + 1)^2$ 来选择高斯掩模 F 的大小, 其中 k 是正整数. 由于高斯分布 99.7% 的能量集中在平均值的 3 个标准偏差内, 可以将 k 设置为 3. 因此, 本文使用的高斯掩模 F 的大小为 7×7 .

1.2 Huffman 编码

Huffman 编码可用于压缩信息, 原始宿主图像被转换为比特序列, 并且根据每个符号的出现频率制作霍夫曼字典. 根据字符串内出现的次数选择概率, 然后使用该字典对图像的高频分量进行霍夫曼编码. 该编码序列再次进行算术编码, 以获得更好的结果. Huffman 编码是基于 Huffman 树结构的, 构建 Huffman 树的流程见图 1.

遍历树种子节点和根节点路径, 设定左节点编码为 0, 右节点编码为 1, 对各个节点进行编码.

2 基于 HFCM 的水印混合方法

本文所提方法的水印嵌入过程如图 2 所示, 该算法由 4 个步骤组成: 高斯滤波、直方图构造、像素组选择和基于 HFCM 的水印嵌入.

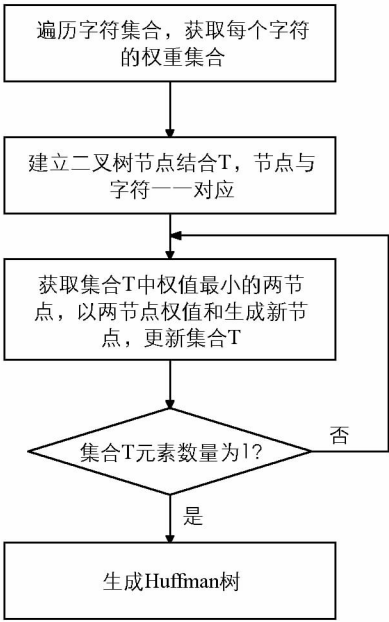


图 1 Huffman 树生成流程图

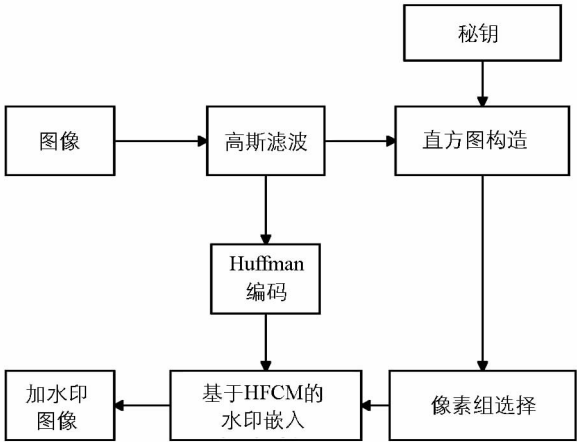


图 2 水印嵌入流程图

2.1 直方图构造

假设滤波图像 I_{low} 低具有 K 灰度级, 8 位灰度图像具有 $K = 256$ 灰度级, 范围从 0 到 255, 直方图的形状与图像内容相关, 用于提取隐藏在图像中的数据. 使用长度为 K 的伪噪声(pseudo-noise, PN)序列作为安全密钥, 从 K 个可用灰度级中随机选择 S 个灰度级, 其中 $\frac{K}{2} \leq S < K$. $p(n)$ 每个元素随机取 $[0, K-1]$ 范围内的整数, $K_1, \dots, K_S$ 表示 S 选择的灰度级, 则图像 I_{low} 的直方图可以表示为

$$H_S = \{h_S(K_i) \mid i = 1, 2, \dots, S\} \quad (4)$$

其中, $h_S(K_i)$ 是对应于灰度级 K_i 的像素数量.

2.2 像素组构造

在构造直方图 H_S 之后, 取 H_S 中的 L_B 个相邻灰度级来形成一个 bin, 则第 i 个 bin 中像素数为

$$h_B(i) = h_S(K_{(i-1) \cdot L_B+1}) + h_S(K_{(i-1) \cdot L_B+2}) + \dots + h_S(K_{i \cdot L_B}) \quad (5)$$

其中: L_B 为一常数, 表示相邻灰度级的个数, $i = 1, 2, \dots, M_B$, $M_B = \lfloor \frac{S}{L_B} \rfloor$, $\lfloor \cdot \rfloor$ 取整函数, 两个相

邻的 bin 组合起来形成一个组, 总共有 $\frac{M_B}{2}$ 组, 对于第 i 组, 两个 bins(Bin_1 和 Bin_2) 分别包含 $h_B(2i-1)$ 和 $h_B(2i)$ 个像素. 其中 $i = 1, 2, \dots, \frac{M_B}{2}$, 则第 i 组中的像素数为

$$\begin{cases} h_G(i) = h_B(2i-1) + h_B(2i)h_S \\ i = 1, 2, \dots, \frac{M_B}{2} \end{cases} \quad (6)$$

设 N_S 是对应于 S 选择灰度级的像素总数.

$$N_S = \sum_{i=1}^S h_S(K_i) \quad (7)$$

为了使像素组的选择适应直方图形状, 基于 $h_G(i)$ 和 N_S 之间比率的像素组选择标准为

$$g(i) = \frac{h_G(i)}{N_S} \quad (8)$$

如果 $g(i)$ 大于预定阈值 T_G , 则选择 i 个像素组用于水印嵌入, 该阈值 T_G 用于平衡鲁棒性和嵌入率, T_G 值越大, 由于组中像素越多, 鲁棒性越高, 但是水印嵌入的像素组越少, 嵌入率就越低. 本文将 T_G 作为经验选择 $T_G = \text{图像总像素数} / 4L_B$. 设 L_G 为适合嵌入水印的像素组, 其中 $L_G \leq \frac{M_B}{2}$.

在水印解码过程中, $g(i)$ 值将被估计, 然后用于识别包含水印的 L_w 像素组, $g(i)$ 的值在攻击后会有所变化, 导致识别加水印像素组时会出错. 为了消除这种情况, 针对 L_w 选择像素组和嵌入过程中未选择像素组之间的 $g(i)$ 引入安全带.

假设 $g_{\min}$ 是 L_w 选择像素组中的最小 $g(i)$ 值, 安全带的宽度设置为 $\alpha \cdot g_{\min}$, 其中 α 是控制安全带强度的参数. 对于每个非选择组中随机选取的 $\lceil g(i) - (1-\alpha) \cdot g_{\min} \rceil \cdot N_S$ 像素, 如果相应的 $g(i)$ 满足 $(1-\alpha) \cdot g_{\min} < g(i) < g_{\min}$, 则这些像素的灰度值被改变, 使得其落入最接近的选定组中, 形成宽度为 $\alpha \cdot g_{\min}$ 的安全带.

2.3 基于 HFCM 的水印嵌入

水印的嵌入式通过 bins 之间像素传输实现, 设 $w_1, w_2, \dots, w_{L_w}$ 分别是嵌入到 L_w 选择组中的水印比特, 每选择第 i 个组由两个 bins 组成: (Bin_1 和 Bin_2), 分别包含 $h_B(2i-1)$ 和 $h_B(2i)$ 个像素, 可以使用式(9)中嵌入规则将水印 w_i 嵌入到第 i 个选择组中.

$$\begin{cases} \frac{h_B(2i-1)}{h_B(2i)} \geq 1, w_i = 1 \\ \frac{h_B(2i-1)}{h_B(2i)} \leq 1, w_i = 0 \end{cases} \quad (9)$$

如果 $w_i = 1$, 一定数量的像素(比如 N_1) 应该从 Bin_2 转移到 Bin_1, 使得 $h_B(2i-1) \geq 2h_B(2i)$; 如果 $w_i = 0$, 应当将 N_0 像素从 Bin_1 转移到 Bin_2, 使得 $h_B(2i-1) \leq \frac{1}{2}h_B(2i)$. N_0 和 N_1 的最小值定义为

$$\begin{cases} N_0 = \frac{h_B(2i-1) - h_B(2i)}{3} \\ N_1 = \frac{h_B(2i) - h_B(2i-1)}{3} \end{cases} \quad (10)$$

像素转移将影响图像的感知质量, 为了获得更好的感知质量, 像素值的变化应该很小. 因此, 使用新的像素传输方法来减小像素移动的程度, 转移情况分两种:

1) $N_{K_i, L_B+1} \geq N_0$, 则将 Bin_2 中的 N_0 像素从灰度级 K_{i, L_B+1} 移动到灰度级 K_{i, L_B+2} , 然后从 Bin_1 中选择 N_0 个像素, Bin_1 中选择的像素移动到 Bin_2 中的灰度级 K_{i, L_B+1} .

2) $N_{K_i, L_B+1} \leq N_0$, 从 K_{i, L_B+1} 级灰度移动所有 N_{K_i, L_B+1} 像素到 K_{i, L_B+2} 级灰度, 然后以 1) 中描述的方法从 Bin_1 的 L_B 灰度级中选择 N_0 像素. 在这些选择的像素中, 将第一个 N_{K_i, L_B+1} 像素移动到灰度级 K_{i, L_B+1} , 剩下的 $N_0 - N_{K_i, L_B+1}$ 像素到灰度级 K_{i, L_B+2} .

在不使用 HFCM 的情况下, 用 I'_{low} 表示水印的低频分量, 可以得到相应的水印图像 $I^W = I'_{low} + I_{high}$, 其中 I_{high} 为图像的高频分量, 设 I' 为水印解码阶段的接收图像. 在没有攻击的情况下 $I' = I^W$, 水印隐藏在图像的的低频分量中, 因此在编码和解码阶段使用相同的高斯掩模 F , I'_{low} 是从水印图像提取的.

$$I'_{low} = F * I' = F * I^W = F * (I'_{low} + I_{high}) \quad (11)$$

如果 $I'_{low} = I'_{low}$, 可以正确地提取水印嵌入在图像中. 由于高斯滤波的副作用, 两者不相等.

为了正确地提取嵌入水印, 需要对 I_{high} 进行适当修改, 以补偿高斯滤波的副作用, 使得嵌入端的水印低频分量等于其在解码端的对应分量. 在 I_{low} 的像素由于水印嵌入而改变之后, 将通过 HFCM 修改 I_{high} 中的对应像素. 如图 3 所示, 将高斯掩模 F 应用于以像素 I_{44} 为中心的主图像 I , I_{44} 的低频分量 I_{44_low} 可以表示为

$$I_{44_low} = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 I_{ij} F_{ij} \quad (12)$$

由于水印嵌入, 像素被 ξ 修改, 得到水印的低频分量 $I_{44_low}^W = I_{44_low} + \xi$. 图像高频分量的修正量为 $I_{44_high} = \frac{(1-F_{44})\xi}{F_{44}}$, 改变 I_{44_high} 将影响相邻像素并降低感知质量. 因此, 引入参数 β 来控制 HFCM 的强度, $I_{44_high} = \beta * I_{44_high}$, 其中 β 是一个常数.

2.4 水印解码过程

水印解码过程包括高斯滤波、霍夫曼解码、直方图构造、水印组识别和水印提取, 具体流程见图 4.

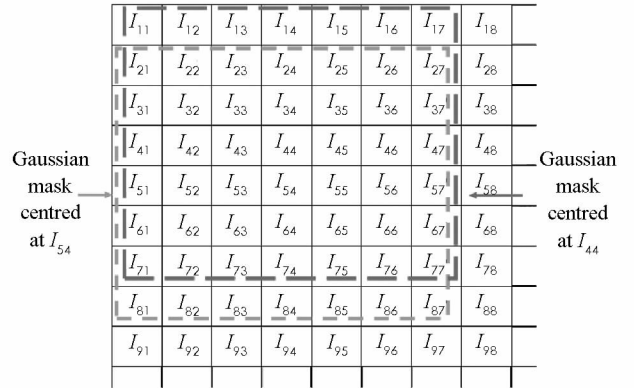


图 3 水印嵌入流程图

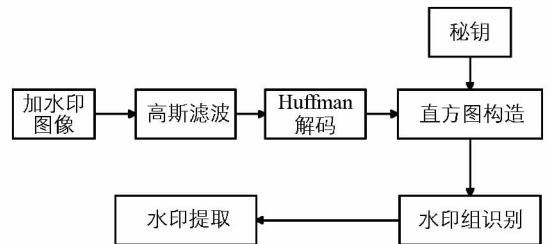


图 4 水印解码提取流程图

3 实验结果与分析

本文通过实验来评估所提方法的感知质量和鲁棒性, 并和文献[10] 和[16] 中的方法进行比较. 使用 512×512 大小的标准灰度图像作为主机图像评估本文水印算法, 并且版权使用尺寸为 32×32 的二进制图像, 选择 6 个标准灰度图像 Lena, F16, Pepper, Shingboat, Entagon, Barbara 用作实验图像. 本文采用峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)、结构相似性(SSIM) 指数和相关系数作为评估性能指标.

本文算法参数经过多次实验, 并根据经验选择 $S = 246$, $L_B = 3$, $L_w = 25$. 对于 α 的选择, α 控制安全带宽强度, 从而控制鲁棒性. α 越大, 鲁棒性越好, 增加 α 会导致更多的像素修改, 从而对感知质量产生更多负面影响. 图 5(a) 显示了当 $\beta = 0$ 时, α 如何影响感知质量.

可以看到, 当 α 大于 0.15 时, 进一步增加 α 只会对鲁棒性产生较小的改善, 但会导致相当大的感知质量下降. 因此, 为了在保持良好感知质量的同时实现高鲁棒性, 凭经验选择 $\alpha = 0.15$. β 的选择: 图 6 给出 β 对感知质量和鲁棒性的影响, 其中 $\alpha = 0.15$.

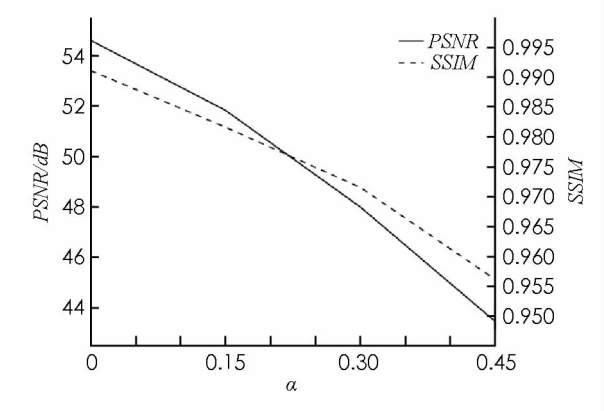


图 5 不同 α 对感知质量的影响

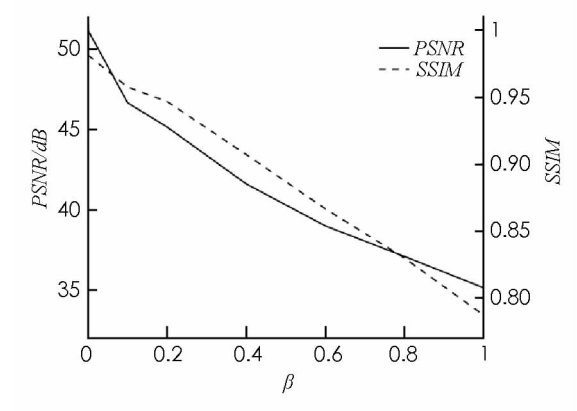


图 6 不同 β 对感知质量的影响

由图 6 可以看出, β 的上升使得 PSNR 和 SSIM 均下降, 这是因为较大的 β 意味着更强的 HFCM, 相当于像素高频分量的更多变化, 导致感知质量降低. 随着 β 值增加, PSNR 和 SSIM 值减小, 为了保持较高的感知质量, 选择 $\beta = 0.1$. 表 1 给出了本文算法对不同图片的 PSNR 和 MSE 性能指标, 表 2 给出了本文算法与其他方法的性能比较.

表 1 嵌入水印后 PSNR 和 MSE 指标 dB

图片	PSNR	MSE
Lena	48.220 5	3.097 7
F16	47.998 4	3.260 1
Pepper	48.231 7	3.089 7
Shingboat	48.404 5	2.969 2
Entagon	48.342 8	3.011 6
Barbara	48.237 5	3.085 5
Average	48.239 2	3.085 6

表 2 不同方法下 PSNR 性能指标 dB

方法/水印图像	本文方法	文献[10]	文献[16]
Lena	51.220 5	38.433	44.674
Pepper	51.231 7	38.817	44.559

从表 1 和表 2 中数据可以看出, 本文图像水印算法 PSNR 可达到 50 dB 以上, 而其他两种算法在 38~44.7 dB 之间, 远低于所提方法, 说明本文算法感知性和鲁棒性较好, 且性能优于其他两种算法. 图 7 给出了不同类型的攻击, 表 3 给出了在图 7 攻击影响下所提方法的提取水印关联系数, 当没有攻击时, 关联系数为 1.



图 7 水印图像和受不同攻击水印图像

表 3 不同攻击下提取水印的关联系数

攻击	关联系数	攻击	关联系数
JPEG	0.945 1	高斯噪声	0.836 4
中值滤波	0.929 3	缩放	0.910 1
旋转缩小	0.937 8	整体弯曲	0.909 5
椒盐噪声	0.890 9	裁剪	0.897 4

从表 3 数据可以看出, 几种攻击的平均关联系数为 0.919, 说明本文方法具有良好的稳健性, 这种良好的性能取决于 3 个因素: ①由于使用了基于直方图形状的像素组选择标准, 因此本文方法用于嵌入水印的像素组包含像素数多于其他方法中的像素数; ②在本文方法中, 用于水印嵌入的像素组和非选择像素组之间建立安全带; ③本文方法使用独特的 HFCM 方案。

4 结 论

本文提出一种新的图像水印方法, 对常见攻击具有鲁棒性. 为了处理信号攻击, 采用高斯低通滤波器对宿主图像进行预处理, 使得水印只嵌入到宿主图像的低频分量中. 为了解决几何攻击, 利用直方图形状

相关索引来形成和选择最适用于水印嵌入的像素组。此外,在所选择的像素组和未选择的像素组之间引入安全带,提高对几何攻击的鲁棒性。此外,提出了一种新的 HFCM 方案来补偿高斯滤波的副作用,从而进一步增强了鲁棒性。由于密钥的使用,所提出的水印方法安全。实验结果验证了本文方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] MISHRA A, AGARWAL C, SHARMA A, et al. Optimized Gray-Scale Image Watermarking Using DWT - SVD and Firefly Algorithm [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(17): 7858-7867.
- [2] GUPTA V, BARVE M A. Digital Watermarking Techniques: Review [J]. International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering, 2017, 7(1): 7-9.
- [3] GUPTA M K, PANT D R. An Approach for Image Copyright Protection by Using Walsh Hadamard Method [J]. Journal of the Institute of Engineering, 2017, 12(1): 142-168.
- [4] BENYOUSSEF M, MABTOUL S, EL MARRAKI M, et al. Medical Image Watermarking for Copyright Protection Based on Visual Cryptography [C]//2014 International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS), New York: IEEE, 2014.
- [5] MAK BOL N M, KHOO B E, RASSEM T H. Block-Based Discrete Wavelet Transform-Singular Value Decomposition Image Watermarking Scheme Using Human Visual System Characteristics [J]. IET Image Processing, 2016, 10(1): 34-52.
- [6] 陆 璐, 杨志献, 姜永亮. 一种基于 HVS 的 DWT 数字水印算法研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(11): 165-169.
- [7] ALI M, AHN C W, PANT M, et al. An Image Watermarking Scheme in Wavelet Domain with Optimized Compensation of Singular Value Decomposition Via Artificial Bee Colony [J]. Information Sciences, 2015, 301: 44-60.
- [8] SOLTANI P A, VAN SCHYNDEL R, SELLIS T. Towards an Asynchronous Aggregation-Capable Watermark for End-to-end Protection of Big Data Streams [J]. Future Generation Computer Systems, 2017, 72: 288-304.
- [9] CEDILLO-HERNÁNDEZ M, GARCÍA-UGALDE F, NAKANO-MIYATAKE M, et al. Robust Hybrid Color Image Watermarking Method Based on DFT Domain and 2D Histogram Modification [J]. Signal, Image and Video Processing, 2014, 8(1): 49-63.
- [10] ZEAR A, SINGH A K, KUMAR P. A Proposed Secure Multiple Watermarking Technique Based on DWT, DCT and SVD for Application in Medicine [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(4): 4863-4882.
- [11] DAS C, PANIGRAHI S, SHARMA V K, et al. A Novel Blind Robust Image Watermarking in DCT Domain Using Inter-Block Coefficient Correlation [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2014, 68(3): 244-253.
- [12] ZONG T R, XIANG Y, NATGUNANATHAN I, et al. Robust Histogram Shape-Based Method for Image Watermarking [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2015, 25(5): 717-729.
- [13] AGOYI M, ÇELEBI E, ANBARJAFARI G. A Watermarking Algorithm Based on Chirp z-Transform, Discrete Wavelet Transform, and Singular Value Decomposition [J]. Signal, Image and Video Processing, 2015, 9(3): 735-745.
- [14] WANG W, LI W H, LIU Y K, et al. A SVD Feature Based Watermarking Algorithm for Gray-level Image Watermark [J]. Journal of Computers, 2014, 9(6): 1497-1502.
- [15] ZHANG Y P, WANG C Y, WANG X L, et al. Feature-Based Image Watermarking Algorithm Using SVD and APBT for Copyright Protection [J]. Future Internet, 2017, 9(2): 13.
- [16] KISHORE R R. Digital Watermarking Based on Visual Cryptography and Histogram [J]. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering, 2016, 10(7): 1264-1269.

Image Watermark Mixing Method Based on High Frequency Component Correction

JIANG Zhi-meng¹, HOU Xiang², LI Jie³

1. Center of Information construction and service center , Sichuan University of arts and science , Dazhou Sichuan 635000 , China ;
2. School of intelligent Manufacturing , Sichuan University of arts and science , Dazhou Sichuan 635000 , China ;
3. Department of Science and Technology , Sichuan University of Arts and Science , Dazhou Sichuan 635000 , China

Abstract: Aiming at the robustness of image watermarking under attack in image copyright protection, an image watermarking hybrid method based on high frequency component modification (HFCM) has been proposed in this paper. In the embedding part, the original image is preprocessed by Gaussian low-pass filter. Then, a secret key is used to randomly select a number of gray levels and the histogram of the filtered image with respect to these selected gray levels is constructed. After that, a histogram-shape-related index is introduced to choose the pixel groups with the highest number of pixels and a safe band is built between the chosen and non-chosen pixel groups. A watermark embedding scheme based on HFCM mechanism has been proposed, which embeds the watermark into the selected pixel group to further improve the robustness. At the decoding end, based on the available secret key, the watermarked pixel groups are identified and watermarks are extracted from them. Experimental results show that the proposed algorithm is robust to different attacks, and its performance is better than other algorithms.

Key words: image watermarking; high frequency component modification; Gaussian Filtering; Histogram; robustness

责任编辑 夏 娟