

基于 SURF 和半色调映射加密的彩色零水印算法

胡森¹, 吴德阳^{2*}, 仲美玉², 王苗苗¹, 赵静^{2**}, 唐勇², 曲长波^{1***}

¹ 辽宁工程技术大学软件学院, 辽宁 葫芦岛 125105;

² 燕山大学信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 针对现有数字水印算法对于几何攻击稳健性差、嵌入彩色版权图像信息量过多导致效率低下等问题, 提出一种基于 SURF(speed up robust features)几何校正和半色调映射加密的彩色零水印算法。基于 SURF 提取载体图像的特征点, 并将其特征点信息保存为密钥用于实现盲检测。在版权验证过程中, 提取受攻击图像的特征点并进行密钥匹配, 使用筛选后的特征点估计出仿射矩阵, 对受攻击的图像进行几何校正。同时, 根据半色调原理对版权标识进行预处理, 使用像素扩展的三通道二值矩阵表示彩色图像, 并根据加密规则对水印图像进行半色调子块映射加密, 在减少嵌入信息量的同时保留了彩色版权图像的颜色和结构信息, 增加了水印信息的安全性。实验结果表明, 提出的零水印算法在面对几何攻击和非几何攻击时都具有很强的稳健性, 生成的零水印信息更安全。

关键词 图像处理; 彩色零水印; 半色调映射加密; SURF

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2010017

Color Zero-Watermarking Algorithm Based on SURF and Halftone Mapping Encryption

Hu Sen¹, Wu Deyang^{2*}, Zhong Meiyu², Wang Miaomiao¹, Zhao Jing^{2**}, Tang Yong²,
Qu Changbo^{1***}

¹ College of Software, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning, 125105, China;

² College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei, 066004, China

Abstract A color zero-watermarking algorithm based on speeded-up robust features (SURF) to correct geometric distortions and halftone mapping encryption is proposed to address problems associated with poor robustness against geometric attacks in existing digital watermarking algorithms and low efficiency due to excessive embedded color copyright image information. First, the feature points of the carrier image based on SURF algorithm were extracted and feature point information was saved as a key for blind detection. In the copyright verification process, after the feature points of the attacked image were extracted and keys were matched, the geometric correction of the attacked image was implemented based on affine matrix estimated by filtered feature points. Simultaneously, the copyright identification was preprocessed according to the halftone principle. The color image was represented by a three-channel binary matrix with pixel expansion, and the watermark image was encrypted by halftone sub-block mapping according to the encryption rules. In proposed algorithm, the color and structure information of the copyright images were retained while the amount of embedded information was reduced, and the security of the watermark information was increased. The experimental results demonstrate that the proposed zero-watermark algorithm is robust against geometric and nongeometric attacks and the generated zero-watermark information is more secure.

Key words imaging processing; color zero-watermarking; halftone mapping encryption; speed up robust features

收稿日期: 2020-12-23; 修回日期: 2020-12-30; 录用日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(61902340)、河北省自然科学基金(F2018203060)、秦皇岛市科学技术研究与发展计划项目(201602A018)

通信作者: *wdy_ysu@126.com; **zhaojing@ysu.edu.cn; ***fx_qcb@126.com

1 引言

随着通信技术和多媒体技术的飞速发展,数字版权的非法复制、篡改和修改已成为一个亟待解决的问题^[1]。数字水印作为一种版权保护技术,能够有效地解决版权纠纷和内容认证等问题,近年来许多学者针对保护彩色图像的版权进行了探索和研究。如文献[1]利用 Schur 矩阵分解快速的优势和酉矩阵 U 中第二行和第三行元素的稳定性,在彩色载体图像中嵌入彩色水印图像,但由于直接将彩色水印图像中的像素转换成二进制,会导致图像中嵌入大量的二值信息,故图像质量降低,由于 Schur 分解的酉矩阵 U 中第二行和第三行数值主要体现矩阵中数值的波动,因此该水印算法对于中值滤波攻击的稳健性较差。文献[2]在载体图像的空域中嵌入彩色水印图像,使算法具有较高的实时性,但由于空域信息易受干扰、不稳定,故算法对于滤波和噪声攻击的稳健性较差。文献[3]对图像进行 4×4 分块的 Walsh-Hadamard 变换^[4],并选择对整体图像质量影响较小的第三行和第四行系数嵌入彩色水印图像,在保障图像质量的同时嵌入了信息量较大的彩色水印图像,但对于压缩、噪声和滤波攻击,水印算法稳健性不佳。文献[5]利用离散小波变换、离散余弦变换、奇异值分解处理 YCbCr 空间彩色载体图像的亮度分量 Y ,提升了算法稳健性。同时使用混沌映射和 Arnold 置乱加密水印信息,提升了算法安全性。但由于使用了多次频域变换和混沌加密,算法计算成本较高,且忽略了奇异值分解的稳定性问题。

传统的嵌入水印算法^[1-5]虽然能够保证图像的版权和安全性,但嵌入的信息较大时容易造成图像失真,嵌入的信息较小时提取的版权信息的噪声点较多。为了解决传统数字水印技术稳健性和透明性之间的不平衡问题。温泉等^[6]提出了零水印的概念,其基本思想是通过构造具有唯一性的载体特征,然后与二值版权图像进行逻辑运算,生成零水印信息,并将零水印信息注册到版权保护中心,用于后期的版权认证。零水印由于不需要将版权信息嵌入载体图像中,对于载体信息的完整性起到了保护作用,因此近年来受到广泛的关注。如文献[7]提出了一种彩色图像的零水印算法,解决了嵌入彩色水印影响载体透明度的问题,同时使用了彩色版权图像。该算法不仅可以表现更多的信息,而且在遇到轻微

攻击时彩色版权图像本身也具有一定的稳健性,但算法在零水印生成过程中进行了多进制转换,增大了时间开销和内存开销。文献[8]提出了一种小波域结合视觉密码的零水印算法,先将载体图像进行小波变换获得低频信息,并提取特征信息,然后利用视觉密码原理构造零水印。该方法生成的零水印过程简单且安全,但只适用于二值版权图像,并且抵抗高强度几何攻击的能力不佳。文献[9]先将载体图像混沌加密,在加密域中对载体图像进行尺度不变特征变换(SIFT)和离散余弦变换以提取稳定的特征序列,在一定程度上提升了几何攻击的稳健性,同时保证了信息安全,但由于 SIFT 特征点对于噪声和滤波攻击的稳健性较差,该算法对于非几何攻击的稳健性不佳。文献[10]使用可变参数的 Arnold 置乱对水印图加密,并将置乱的参数作为密钥,增加了密钥的数量,提升了安全性,但在载体二值特征提取的过程中,使用固定阈值的二值化图像,未考虑二值特征矩阵的 0、1 分布问题。文献[11]将载体图像变换到 YUV(亦称 YCrCb)空间,对 Y 分量进行分块正交三角(QR)分解,取上三角矩阵的第一行元素作一维离散余弦变换,根据相邻子块的直流分量的大小关系构造二值特征矩阵,由于直接在空域进行矩阵分解,该算法稳健性不佳。为此,文献[12]在广义复指数变换(GPCET)^[13]的基础上,提出了一种基于快速傅里叶变换的极坐标系运算方法,并使用四元数表示法表示彩色图像,对载体图像进行快速四元数广义极复指数变换(FQGPCET),变换后得到的系数具有旋转和尺度不变性,根据变换得到的系数生成混合低阶矩特征(MLMF),再对混合低阶矩特征混沌加密得到特征矩阵,以增强算法安全性。文献[14]计算载体图像的径向 Krawtchouk 矩^[15],取低阶系数构建二值特征矩阵,并与经过耦合混沌映射(MLNCLM)^[16]混沌加密的版权图像异或生成零水印,径向 Krawtchouk 矩的旋转不变性提升了算法对旋转攻击的稳健性,使用 MLNCLM 混沌加密和 Arnold 置乱的双加扰策略提升了安全性。文献[17]改进了分段线性混沌映射(PWLCM)^[18]加密算法,使用变参数混沌映射(VPCM)序列提取图像特征并加密版权水印图像,提升了稳健性和安全性,同时对载体图像进行非下采样金字塔分解(NSPD)^[19],相比于非下采样小波分解具有更好的多分辨率特征和平移不变性。文

献[20]提出了一种改进奇异值的强稳健水印算法,通过改进传统奇异值的方法,降低最大奇异值的变化率,进而提升算法的稳健性。同时,对二值版权图像进行子块映射,提升了信息的安全性。

针对上述问题,本文提出了一种抗几何攻击的半色调映射加密彩色零水印方案,使用加速稳健特征(SURF)^[21]几何校正、Contourlet 变换频域,对低频系数分块并进行 Schur 分解,提升了算法的稳健性。根据彩色图像半色调原理对版权标识进行半色调加密处理,生成加密的 RGB 三通道二值版权水印图像,在减少彩色图像信息量的同时增强安全性,减少了水印图像和载体特征逻辑运算生成零水印时的时间消耗和空间消耗。

2 基础理论

2.1 特征点选择的 SURF 几何校正

本文采用 Bay 等^[21]提出的一种加速版且具有稳健性的特征算法,即 SURF 算法。该算法提取到的特征对于旋转、尺度变换、亮度变化具有较高的稳健性,相比 SIFT 算法有更快的速度^[21]。SURF 算法的特征点检测过程主要分为两个步骤,特征点定位和特征点描述。第一步定位出多尺度图像金字塔中符合条件特征点的位置。第二步根据该位置的特征点邻域内的信息生成特征点描述子。最后通过比较两个特征点描述子的相似程度,可实现相似图像中的特征点匹配。

根据 SURF 特征点匹配对,只需三对特征点估计仿射矩阵;考虑到算法运行效率问题,只需检测少量的特征点用于匹配特征点对。在选择特征点的过程中,若匹配的特征点对出现共线或重叠的状况,如图 1(a)所示,则仿射矩阵难以正确估计,校正结果会出现较大偏差,如图 1(b)所示。为解决这一问题,需要滤除三点共线或任意两点重叠的特征点,经过特征点筛选后的匹配点对如图 1(d)所示。由较为分散的特征点对估计出的仿射变换矩阵,可以正确校正图像,如图 1(e)所示。并且如果仅仅使用三对特征点对估计一个仿射矩阵,则少量特征点的定位误差会导致 SURF 几何校正不够精确,因此需要估计多个仿射矩阵,取仿射矩阵的平均值来减小由单个特征点定位误差导致的校正误差。

在特征点筛选前后提取版权水印。图 1(c)为未筛选特征点的提取结果,其归一化相关系数(NC)值为 0.7631,图 1(f)为筛选特征点之后的提取结果,其 NC 值为 0.8488,这表明对特征点筛选

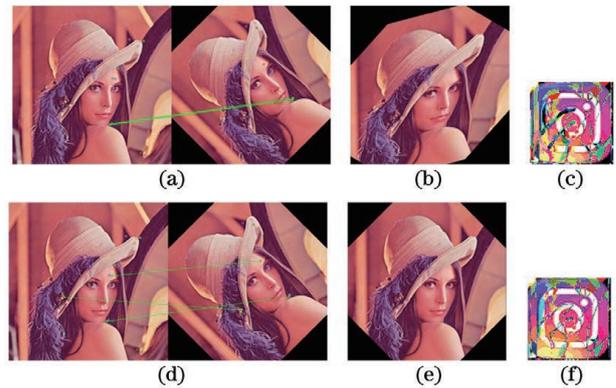


图 1 特征点筛选前后对比。(a)特征点重叠;(b)误差较大的校正结果;(c)错误校正的提取结果;(d)筛选后的特征点匹配;(e)正确校正图像;(f)正确校正的提取结果

Fig. 1 Comparison of feature points before and after screening. (a) Feature point overlap; (b) correction results with large error; (c) extraction results of error correction; (d) filtered feature point matching; (e) corrected image; (f) correctly corrected extraction results

可提高几何校正精度,进而提升算法稳健性。

特征点筛选阶段:生成多组特征点匹配对,挑选三对不共线且任意两对不重叠的特征点对,作为一组特征点对估计仿射矩阵,特征点筛选具体步骤如下。

1) 将 k 对匹配的特征点对按照匹配程度排序,将 SURF 特征点匹配对的坐标存放至数组 V 。

2) 选择数组 V 中的第 i 个元素 V_i 和元素 V_{i+1} ,计算两点坐标之间的距离 l_1 。若距离 l_1 小于阈值 q ,则 $i=i+1$,重新选择坐标点并计算距离,直到两点间距离 l_1 大于阈值 q 。将元素 V_i 和元素 V_{i+1} 存放进数组 V' ,并计算出 V_i 的坐标和 V_{i+1} 的坐标所组成的直线 k 。

3) 根据步骤 2)中 i 的数值在数组 V 中选择第 $i+2$ 个元素 V_{i+2} ,计算元素 V_{i+2} 的坐标到直线 k 的距离 l_2 ,若距离 l_2 小于阈值 $0.8 \times q$,则 $i=i+1$,重新选择坐标点并计算距离 l_2 ,直到元素 V_{i+2} 到直线 k 的距离 l_2 大于阈值 $0.8 \times q$ 时,将元素 V_{i+2} 放进数组 V' 。

此时特征点筛选过程完毕,数组 V' 中的三对特征点位置较为分散且不共线,故可准确估计仿射矩阵,避免由点坐标重叠或共线带来的误差。

仿射变换阶段:根据多组筛选后的特征点对估计出多个仿射矩阵,对多个仿射矩阵取均值计算出最终较为精确的仿射矩阵,以减小单个特征点定位

误差带来的几何校正误差。对受到旋转或偏移等攻击的图像进行几何仿射校正,实现了图像几何校正功能。

2.2 彩色版权水印半色调映射加密

半色调技术是利用人眼视觉的低通特性,把具有连续色调的原始图像转化为由离散的黑点与白点组成的半色调图案,并使之看上去具有连续色调的感觉^[23]。本研究将版权图像的每个像素扩展成 2×2 的子块,根据子块内 0 和 1 的个数表示原图 R、G、B 分量中的不同灰度值,根据版权图像中的像

素值生成索引矩阵,并在索引矩阵中加入偏移量,对索引矩阵进行分块,对版权图像进行半色调像素映射加密,最后将偏移量的初始值和索引矩阵分块方式作为密钥。半色调映射加密过程具体步骤如下。

1) 将 $m \times n \times 3$ 大小的彩色版权图像 \mathbf{W} 进行 R、G、B 三通道分解,得到 \mathbf{W}^R 、 \mathbf{W}^G 、 \mathbf{W}^B 三张位深度为 8 的灰度图像。

2) 灰度图像 \mathbf{W}^R 、 \mathbf{W}^G 、 \mathbf{W}^B 的像素取值区间为 $\{0 \sim 255\}$,根据像素值映射成索引矩阵 $\mathbf{M}_{\text{index}}^c$,其中 $c \in \{R, G, B\}$,映射方式表示为

$$M_{\text{index}}^c(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{if } W^c(i, j) \in [0, 50] \\ 1, & \text{if } W^c(i, j) \in [51, 101] \\ 2, & \text{if } W^c(i, j) \in [102, 152], \\ 3, & \text{if } W^c(i, j) \in [152, 203] \\ 4, & \text{if } W^c(i, j) \in [204, 255] \end{cases} \quad (1)$$

其中, $i \in \{1, 2, 3, \dots, m\}$, $j \in \{1, 2, 3, \dots, n\}$, $M_{\text{index}}^c(i, j)$ 和 $W^c(i, j)$ 均为 $\mathbf{M}_{\text{index}}^c$ 和 \mathbf{W}^c 的矩阵元。

3) 对索引矩阵 $\mathbf{M}_{\text{index}}^c$ 进行分块,将每个索引子块记为 $\mathbf{b}_{p,q}^c$,其中 $p \in \left\{1, 2, 3, \dots, \frac{m}{m_{\text{block}}}\right\}$, $q \in \left\{1, 2, 3, \dots, \frac{n}{n_{\text{block}}}\right\}$, m_{block} 和 n_{block} 为子块 $\mathbf{b}_{p,q}^c$ 的尺寸。

4) 在索引子块 $\mathbf{b}_{p,q}^c$ 中添加动态偏移量 H^c ,添加方式为

$$b_{p,q}^c(u, v) = \text{mod}[b_{p,q}^c(u, v) + H^c, 5], \quad (2)$$

$$H^c = \text{mod}[(H^c + 1), 5], \quad (3)$$

其中 $u \in \{1, 2, \dots, m_{\text{block}}\}$, $v \in \{1, 2, \dots, n_{\text{block}}\}$, $\mathbf{b}_{p,q}^c$ 为偏移之后的索引子块,mod 为取模函数。在子块

内循环进行(2)式和(3)式的操作,直到索引子块内全部添加偏移量 H^c 。

5) 将添加了动态偏移量的索引子块 $\mathbf{b}_{p,q}^c$ 合并成索引矩阵 $\mathbf{M}'_{\text{index}}^c$,根据 $\mathbf{M}'_{\text{index}}^c$ 生成映射加密后的半色调版权图像,生成方式为

$$W'^c[(2 \times i - 1):2 \times i, (2 \times j - 1):2 \times j] = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, & \text{if } M'_{\text{index}}^c(i, j) = 0 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, & \text{if } M'_{\text{index}}^c(i, j) = 1 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } M'_{\text{index}}^c(i, j) = 2。 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } M'_{\text{index}}^c(i, j) = 3 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } M'_{\text{index}}^c(i, j) = 4 \end{cases} \quad (4)$$

得到的 \mathbf{W}'^c 为映射加密后的半色调版权图像,将其中的 \mathbf{W}'^R 、 \mathbf{W}'^G 、 \mathbf{W}'^B 组成 RGB 半色调加密彩色水印 \mathbf{W}' ,将分块方式和偏移量初值保存为用户密钥 K_2 。

本研究测试了在分块密钥为 2×2 和 4×4 下的

半色调映射加密结果,偏移量初值密钥的取值范围为 $\{0, 1, 2, 3, 4\}$ 。图 2(a)、图 2(b)和图 2(e)为 RGB 三通道使用相同分块密钥、不同偏移量初值时的加密结果,从中可以看出原图[图 2(f)]中的

部分结构信息;图 2(c)和图 2(d)为 RGB 三通道使用不同分块密钥时的加密结果,可以看出加密图像隐藏了原图的颜色信息,同时增加了干扰信

息。这表明本文提出的半色调映射加密算法在不同密钥下加密结果均可以很好地隐藏版权水印信息。

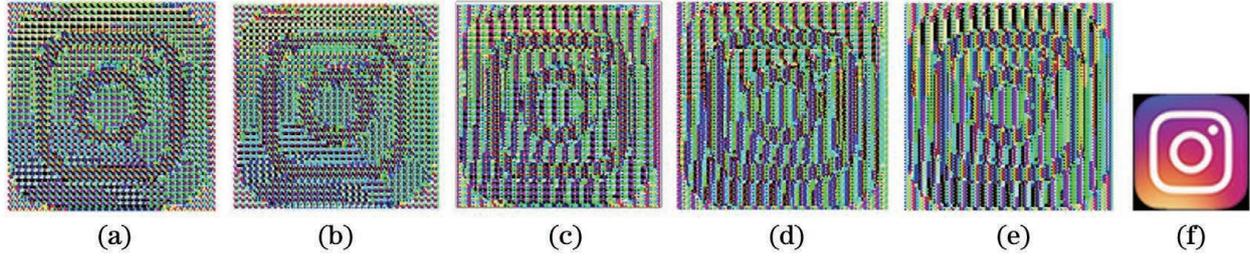


图 2 不同密钥下的加密图像和原图对比。(a)(b)(e)使用相同分块密钥、不同偏移量初值时的加密结果;(c)(d)使用不同分块密钥时的加密结果;(f)原图像

Fig. 2 Comparison of encryption image and original image under different keys. (a) (b) (e) Encryption results with the same key and different initial offset values; (c) (d) encryption results with different keys; (f) original image

将半色调加密映射后的版权图像和原图像生成零水印,版权信息检测过程中,提取出半色调映射加密后的版权水印,并进行解密,得到半色调版权水印图像。解密过程具体步骤如下。

1) 提取出加密后的半色调版权图像并分解成 RGB 三通道 W^c , 将 W^c 进行不重叠的 2×2 分块, 计算子块内数值总和, 构造出索引矩阵 M''^c_{index} , 构造方式为

$$b^c_{i,j} = W^c[(2 \times i - 1):2 \times i, (2 \times j - 1):2 \times j], \quad (5)$$

$$M''^c_{\text{index}}(i,j) = \text{sum}[\text{sum}(b^c_{i,j})], \quad (6)$$

其中 $b^c_{i,j}$ 为 2×2 的子块, M''^c_{index} 为构造出的索引矩阵。

2) 根据分块方式密钥, 对索引矩阵 M''^c_{index} 进行分块, 将每个索引子块记为 $b^c_{p,q}$ 。

3) 在索引子块 $b^c_{p,q}$ 中添加动态偏移量 H^c , 添加方式为

$$b''^c_{p,q}(u,v) = \text{mod}[b^c_{p,q}(u,v) - H^c, 5], \quad (7)$$

$$H^c = \text{mod}[(H^c + 1), 5]. \quad (8)$$

其中, $b''^c_{p,q}$ 为偏移之后的索引子块。在子块内循环进行(7)式和(8)式的操作, 直到索引子块内全部添加偏移量 H^c 。

4) 将添加了动态偏移量的索引子块 $b''^c_{p,q}$ 合并成偏移修正后的索引矩阵 M'''^c_{index} , 根据 M'''^c_{index} 生成映射加密后的半色调版权图像, 生成方式为

$$W^c[(2 \times i - 1):2 \times i, (2 \times j - 1):2 \times j] = \begin{cases} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, & \text{if } M'''^c_{\text{index}}(i,j) = 0 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, & \text{if } M'''^c_{\text{index}}(i,j) = 1 \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } M'''^c_{\text{index}}(i,j) = 2. \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } M'''^c_{\text{index}}(i,j) = 3 \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, & \text{if } M'''^c_{\text{index}}(i,j) = 4 \end{cases} \quad (9)$$

半色调映射解密后的结果如图 3 所示。图 3(a)、(b)、(c)和(d)分别为半色调映射加密后的 RGB 三通道分量和通道融合的彩色图像;使用正确密钥解密出的半色调版权对应图像, 如图 3(e)、(d)、(g)和(h)所示。

为测试本文提出的半色调映射加密算法的有效

性, 进行密钥错误时的提取实验, 选取两种分块方式 2×2 和 4×4 作为分块密钥, 偏移量初值密钥的取值范围为 $\{0, 1, 2, 3, 4\}$, 在使用不同密钥情况下的提取结果如图 4 所示。

从图 4 中可以发现, 分块密钥对图像信息的影响较大, 在密钥的不同错误程度下, 恢复出的图像质量不

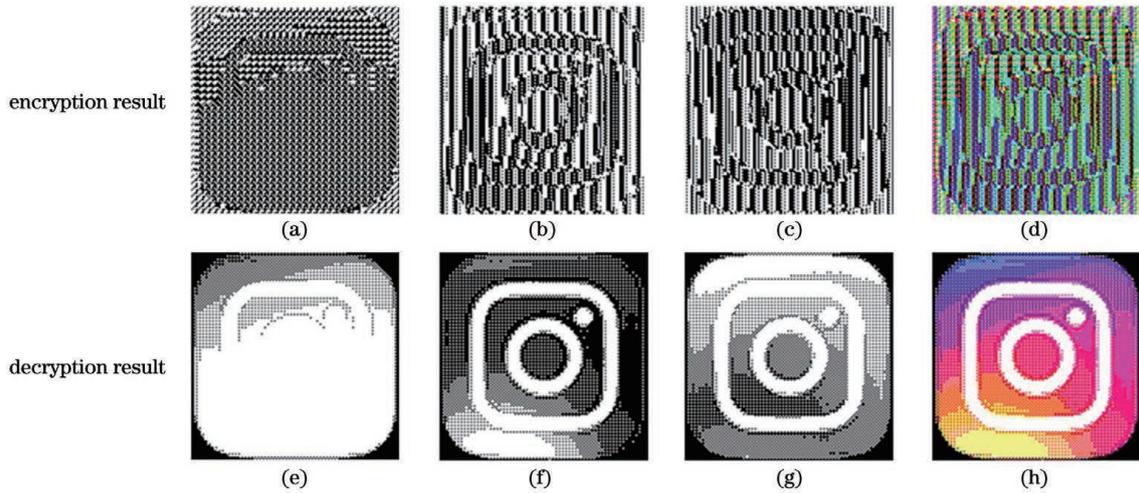


图 3 半色调解密结果。(a)(e)R 通道的加密、解密图像；(b)(f)G 通道的加密、解密图像；(c)(g)B 通道的加密、解密图像；(d)(h)通道融合后的加密、解密图像

Fig. 3 Halftone decryption results. (a) (e) Encryption and decryption images of R channel; (b) (f) encryption and decryption images of G channel; (c) (g) encryption and decryption images of B channel; (d) (h) encryption and decryption images after channel fusion

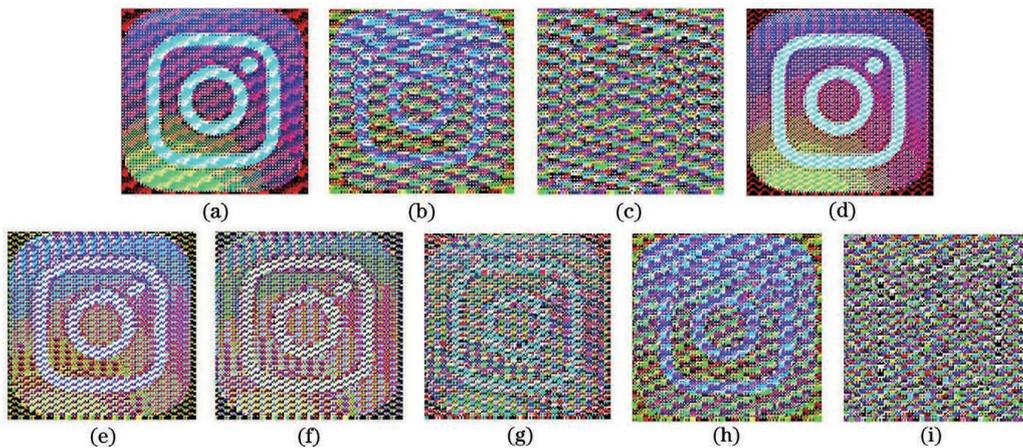


图 4 不同密钥情况下的提取结果。(a)R 通道分块密钥错误时；(b)R 通道和 G 通道分块密钥错误时；(c)RGB 三通道分块密钥均错误时；(d)R 通道初值密钥错误时；(e)R 通道和 G 通道初值密钥错误时；(f)RGB 三通道初值密钥错误时；(g)R 通道分块密钥错误、R 通道和 G 通道初值密钥错误时；(h)R 通道和 G 通道分块密钥错误、R 通道初值密钥错误时；(i)RGB 三通道分块密钥错误、RGB 三通道初值密钥错误时

Fig. 4 Extraction results under different key conditions. (a) Sub-block segmentation key has error in R channel; (b) sub-block segmentation key has error in R and G channels; (c) sub-block segmentation key has error in R, B and G channels; (d) initial key has error in R channel; (e) initial key has error in R and G channels; (f) initial key has error in R, B and G channels; (g) sub-block segmentation key has error in R channel and initial key has error in R and G channels; (h) sub-block segmentation key has error in R and G channels and initial key has error in R channel; (i) sub-block segmentation key and initial key has in R, B and G channels

同。在实际应用中可以使用多种分块方式，故本文提出的半色调映射加密算法具有较为丰富的密钥空间。

3 彩色零水印算法

3.1 构造彩色零水印

将载体图像使用 SURF 算法提取特征点，保存

特征点信息作为密钥 K_1 ，先将彩色载体图像分离成 R、G、B 三通道，分别对每个通道分量进行特征提取，得到二值特征矩阵，然后将 R、G、B 通道的二值特征和预处理之后的版权图像进行异或操作生成彩色零水印，并保存至认证中心。彩色图像零水印生成和版权标识提取过程如图 5 所示。

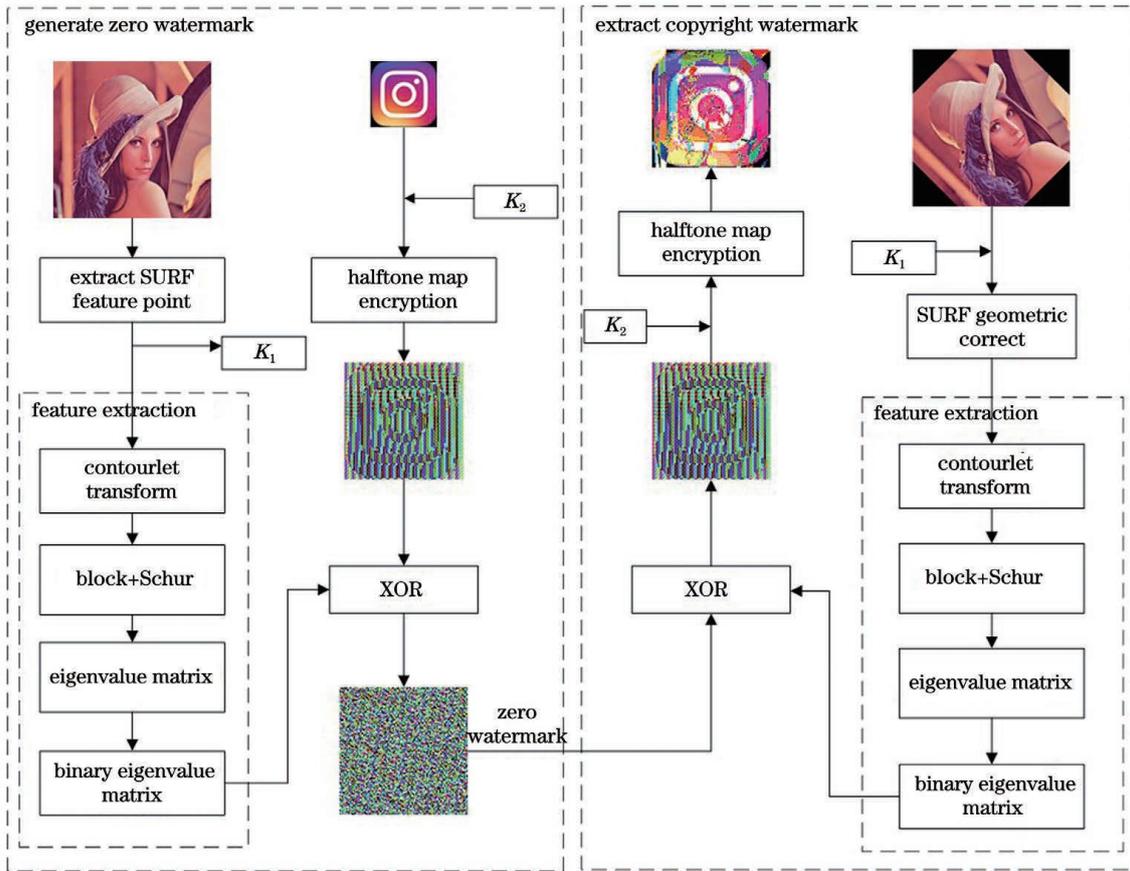


图 5 零水印生成和版权标识提取图

Fig. 5 Zero watermark generation and copyright logo extraction

假设原始载体图像为 I , 图像尺寸为 $M \times N \times 3$, 半色调映射加密后的版权信息图像为 W^c , 图像尺寸为 $(2 \times m) \times (2 \times n) \times 3$, 其中 m 和 n 为连续色调的版权信息图像尺寸, 彩色零水印的生成过程具体如下。

1) 使用 SURF 算法提取载体图像 I 的稳健特征点, 将特征点信息存储作为密钥文件 K_1 , 用于版权认证阶段。

2) 对原始载体进行 R、G、B 三通道分离, 得到 I^R 、 I^G 、 I^B 三个分量, 并分别对 I^R 、 I^G 、 I^B 进行两级 contourlet 分解, 得到低频子带 L^R 、 L^G 、 L^B 。

3) 对低频子带 L^R 、 L^G 、 L^B 进行步长为 1 的 4×4 分块, 每个子块记为 $b_{i,j}^c$, $b_{i,j}^c = \frac{L^c}{(2 \times m) \times (2 \times n)}$, 其中 $i \in \{1, 2, 3, \dots, (2 \times m)\}$, $j \in \{1, 2, 3, \dots, (2 \times n)\}$, $(2 \times m)$ 和 $(2 \times n)$ 为半色调映射加密后的版权标识图像的大小。

4) 对每个子块 $b_{i,j}^c$ 进行 Schur 矩阵分解, 并选取上三角矩阵 T 对角线上的最大值 $s_{i,j}$ 构造特征值矩阵 S^c , 具体构造方式为

$$[U, T] = \text{Schur}(b_{i,j}^c), \quad (10)$$

$$s_{i,j} = \max(\max(\text{abs}(T))), \quad (11)$$

$$S^c = \begin{pmatrix} s_{11} & \cdots & s_{1j} \\ \vdots & & \vdots \\ s_{i1} & \cdots & s_{ij} \end{pmatrix}. \quad (12)$$

5) 由特征值矩阵 S^c 与整体均值的关系构建过渡矩阵 Y^c , 构造方式为

$$S_{\text{mean}}^c = \text{mean}(\text{mean}(S^c)), \quad (13)$$

$$Y^c(i, j) = \begin{cases} 0, & S^c(i, j) < S_{\text{mean}}^c \\ 1, & S^c(i, j) \geq S_{\text{mean}}^c \end{cases}. \quad (14)$$

6) 将版权标识图像进行半色调映射加密, 加密密钥为 K_2 , 二值特征矩阵 Y^c 和半色调加密图像 W^c 异或 (XOR), 得到彩色零水印 Z 的 R、G、B 三个分量, 并将 R、G、B 三个分量合成彩色零水印 Z , 即

$$Z^c = \text{XOR}(Y^c, W^c), \quad (15)$$

$$Z = Z^R + Z^G + Z^B. \quad (16)$$

将合成的彩色零水印存放至版权保护中心, 密钥 K_1 、 K_2 由用户保存。

3.2 版权认证过程

图像版权认证时, 需要从用户处取得密钥 K_1 、

K_2 , 并从版权中心取得零水印图像 Z , 提取过程和水印生成过程相似, 具体步骤如下。

1) 对受攻击之后的载体图像 I' 提取 SURF 特征点, 将 K_1 密钥中的特征点和载体图像 I' 特征点匹配, 根据 2.1 节中特征点筛选阶段中的具体步骤, 选出三对不重合且不共线的匹配点, 生成仿射矩阵, 对载体图像 I' 进行仿射变换得到校正后载体图像 I'' 。

2) 根据校正之后的图像 I'' , 按照 3.1 节中彩色零水印生成算法的步骤 2)~步骤 5) 进行处理, 提取受攻击后的特征矩阵 Y'^R, Y'^G, Y'^B 。

3) 从版权认证中心提取零水印 Z , 进行 R、G、B 三通道分离, 得到三个二值矩阵 Z^R, Z^G, Z^B , 将特征矩阵 Y'^R, Y'^G, Y'^B 和二值矩阵 Z^R, Z^G, Z^B 分别进行异或运算, 提取出加密的半色调版权图像 W''^c 。

4) 根据密钥 K_2 对加密的半色调版权图像 W''^c 进行解密操作, 如根据 2.2 节中彩色版权水印半色调加密中的解密步骤, 得到半色调彩色版权图像。该图像在视觉效果上显示了原版权图像的信息, 可以用于所有权证明。

4 实验结果及分析

4.1 实验参数设计及评价标准

为验证算法的有效性, 选择大小 $512 \times 512 \times 3$ 的标准彩色图像为载体图像, 如图 6(a)~(f) 所示, 选择大小为 $64 \times 64 \times 3$ 的彩色图像作为版权水印, 如图 6(g) 所示。选用软件平台为 Windows 10 操作系统和 Matlab R2015b, 硬件平台为 i5-4210H CPU 2.90 GHz 和 8 GB 内存。

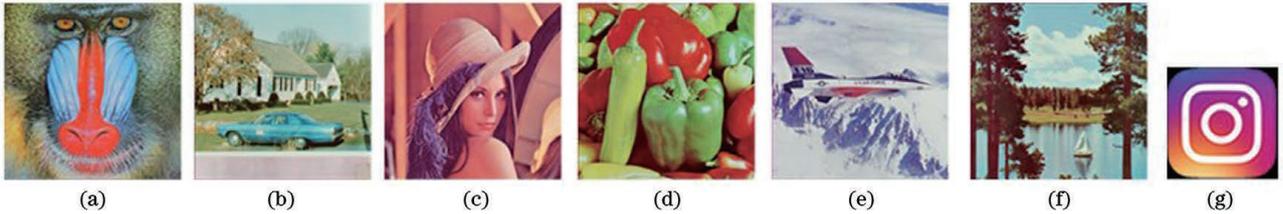


图 6 载体图像和版权标识。(a) Baboon 图; (b) car 图; (c) Lena 图; (d) pepper 图; (e) plane 图; (f) sailboat 图; (g) logo 图
Fig. 6 Host images and logo images. (a) Baboon; (b) car; (c) Lena; (d) pepper; (e) plane; (f) sailboat; (g) logo

采用峰值信噪比 (PSNR, P_{PSNR}) 和归一化相关系数 (NC) 作为评价指标衡量算法的稳健性, 计算方法如下。

$$M_{\text{MSE}} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [f(i, j) - g(i, j)]^2, \quad (17)$$

$$P_{\text{PSNR}} = 10 \times \lg \left(\frac{M_{\text{max}}^2}{M_{\text{MSE}}} \right), \quad (18)$$

其中 m, n 为图像尺寸, $f(i, j), g(i, j)$ 分别为原图像和目标图像中的像素点, M_{max} 为图像中像素值的最大值。PSNR 值越高, 说明目标图像和原图像越相近, 在 PSNR 值大于 36 dB 时目标图像和原图像在人眼观测效果中没有明显差别。

$$N_{\text{NC}} = \frac{\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [W(i, j, k) \times W'(i, j, k)]}{\sqrt{\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [W(i, j, k)]^2} \sqrt{\sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [W'(i, j, k)]^2}}, \quad (19)$$

其中 W, W' 分别表示初始版权水印图像和提取出的版权水印图像, NC 值的取值范围在 0 到 1 之间, NC 值越接近 1, 表示提取的版权水印越接近初始版权水印。

基于 SURF 算法的图像特征点具备一定的稳健性, 但面对噪声和滤波等攻击时, 仍然会出现定位点偏移的情况。在非几何攻击中, SURF 算法由于特征点偏移误差, 进行了错误的仿射变换, 引入了额外误差。为解决这个问题, 本文在版权图像提取阶

段, 进行两次版权图像的提取, 第一次使用 SURF 校正算法进行提取, 第二次不使用 SURF 校正算法, 取两次提取结果中 NC 值的较大值, 作为最终提取结果, 用于解决校正误差问题。

4.2 虚警实验和安全性分析

零水印方案未改变载体图像, 在版权认证过程中, 受零水印保护的图像和其他无关图像的认证结果应具有较高的区分度。为了验证不同图像生成的零水印之间虚警性, 分别对 6 幅图像生成的彩色零水印

图像进行虚警测试,使用 NC 值作为度量参数,NC 值为 1 代表正确提取到版权水印,实验结果见表 1。

表 1 虚警率实验结果

Table 1 Experimental results of false alarm rate

Logo image	False alarm rate of input image					
	Baboon	Car	Lena	Pepper	Plane	Sailboat
Baboon	1.0000	0.5602	0.5640	0.5672	0.5925	0.5558
Car	0.5585	1.0000	0.5731	0.5580	0.4810	0.5585
Lena	0.5697	0.5637	1.0000	0.5671	0.5729	0.5604
Pepper	0.5605	0.5588	0.5636	1.0000	0.5329	0.5605
Plane	0.5650	0.6008	0.5669	0.5537	1.0000	0.5909
Sailboat	0.5885	0.5526	0.5573	0.5857	0.5324	1.0000

表 1 中,最低的 NC 值为 0.4810,最高的 NC 值为 1,从中可以看出输入原图可正确提取版权图像,输入其他图像提取到的版权水印的平均 NC 值为 0.5624,故可有效区分不同图像,这表明生成的零水印具有很强的唯一性。本文算法在版权信息提取过程中,由于首先要提取图像特征点和经密钥 K_1 匹配后的特征点对,生成仿射矩阵,对输入图像进行几何校正,故当输入与载体图像相似度较高的无关图像时,所提取出的结果仍有较高区分度。

4.3 稳健实验

数字水印攻击手段可分为非几何攻击和几

何攻击,其中几何攻击中的旋转和偏移攻击,使图像整体发生旋转和偏移,改变了大量像素值,导致普通水印算法难以抵抗高强度的几何攻击。在本文稳健性实验部分,使用几何攻击和非几何攻击两大类中的常见攻击方法,来测试本文算法稳健性。

为验证本算法对非几何攻击的稳健性,使用噪声、滤波、JPEG 压缩等图像处理方法攻击彩色载体图像,使用 NC 值来度量算法稳健性,使用 PSNR 值表示图像受到攻击的强度,实验结果见表 2。

表 2 非几何攻击实验结果(NC)

Table 2 Experimental results of non geometric attack (NC)

Attack type	Parameter	Baboon	Car	Lena	Pepper	Plane	Sailboat
Gaussian noise	0.02	0.9887	0.9877	0.9860	0.9900	0.9906	0.9948
	0.05	0.9820	0.9801	0.9780	0.9833	0.9849	0.9925
Salt & pepper Noise	0.02	0.9935	0.9936	0.9924	0.9946	0.9945	0.9974
	0.05	0.9896	0.9888	0.9890	0.9923	0.9912	0.9956
Speckle noise	0.02	0.9939	0.9914	0.9931	0.9957	0.9926	0.9975
	0.05	0.9883	0.9851	0.9881	0.9933	0.9889	0.9952
Median filtering	3×3	0.9949	0.9964	0.9982	0.9981	0.9975	0.9984
	7×7	0.9890	0.9897	0.9930	0.9955	0.9905	0.9947
Wiener filtering	3×3	0.9986	0.9988	0.9992	0.9992	0.9990	0.9994
	7×7	0.9953	0.9947	0.9965	0.9969	0.9964	0.9978
Low pass filtering	3×3	0.9984	0.9986	0.9982	0.9985	0.9983	0.9991
	7×7	0.9976	0.9977	0.9975	0.9980	0.9974	0.9986
JPEG compression	10	0.9810	0.9800	0.9757	0.9844	0.9832	0.9910
	50	0.9955	0.9947	0.9947	0.9954	0.9960	0.9978

由表 2 实验结果可知,不同载体图像面对多种攻击时,最低的 NC 值为 0.9757,这说明本文算法有较好的稳健性。选择 Lena 图像为载体,较高攻击强度下的检测结果如图 7(a)~(d)所示,从图中

可以看出提取出的版权图像有较高的辨识度,且包含丰富颜色信息的半色调彩色图像,由此证实本文算法的有效性。



图 7 非几何攻击下的 Lena 图和检测结果。(a)高斯噪声(0.05);(b)椒盐噪声(0.05);(c)中值滤波(7×7);(d)JPEG 压缩(10%)

Fig. 7 Lena graph and detection results under non geometric attacks. (a) Gaussian noise (0.05); (b) salt-and-peppers noise (0.05); (c) median filtering (7×7); (d) JPEG compression(10%)

几何攻击对载体图像的整体改变较大。接着,使用剪旋转、行列偏移攻击和缩放操作测试算法的抗

几何性能,使用 NC 值衡量算法的稳健性,使用 PSNR 值表示图像受到攻击的强度。实验结果见表 3。

表 3 几何攻击实验结果(NC)

Table 3 Experimental results of geometric attack (NC)

Attack type	Parameter	Baboon	Car	Lena	Pepper	Plane	Sailboat
Rotation	0°	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	25°	0.8826	0.8077	0.8667	0.8717	0.8237	0.9359
	50°	0.8477	0.7679	0.8489	0.8568	0.8117	0.9170
	75°	0.9091	0.8608	0.9088	0.9148	0.8326	0.9464
	100°	0.9435	0.9044	0.9336	0.9361	0.9212	0.9606
	125°	0.8615	0.7780	0.8469	0.8556	0.8103	0.9220
	150°	0.8167	0.7876	0.8566	0.8716	0.8235	0.9199
	175°	0.9596	0.9515	0.9725	0.9725	0.9599	0.9845
Move	5 lines and 5 columns	0.9937	0.9899	0.9906	0.9924	0.9823	0.9961
	10 lines and 20 columns	0.9793	0.9643	0.9755	0.9789	0.9644	0.9875
Scaling	0.25	0.9945	0.9943	0.9974	0.9972	0.9912	0.9974
	1.25	0.9997	0.9998	0.9999	0.9998	0.9991	0.9999

旋转攻击、行列偏移攻击和缩放攻击过程会丢失部分边缘信息,故这些攻击无法通过几何校正恢复。在实验所选用的 6 幅图像中,不同的载体图像对于几

何攻击所表现出的稳健性不同,car 图像和 plane 图像的边角部分较为明亮,丢失的边角信息对图像整体像素值的影响较大,而 sailboat 图的边角部分较暗,丢失

的边角信息对图像整体像素值的影响较小,因此在表 4 中 sailboat 的 NC 值较高,car 图像和 plane 图像的 NC 值较低,在大尺度的旋转攻击下,NC 值均高于

0.76,这表明本文算法对于几何攻击有较强的稳健性。选取 car 图像和 sailboat 图像受旋转攻击后的校正图像和提取到的版权图像,如图 8(a)~(n)所示。

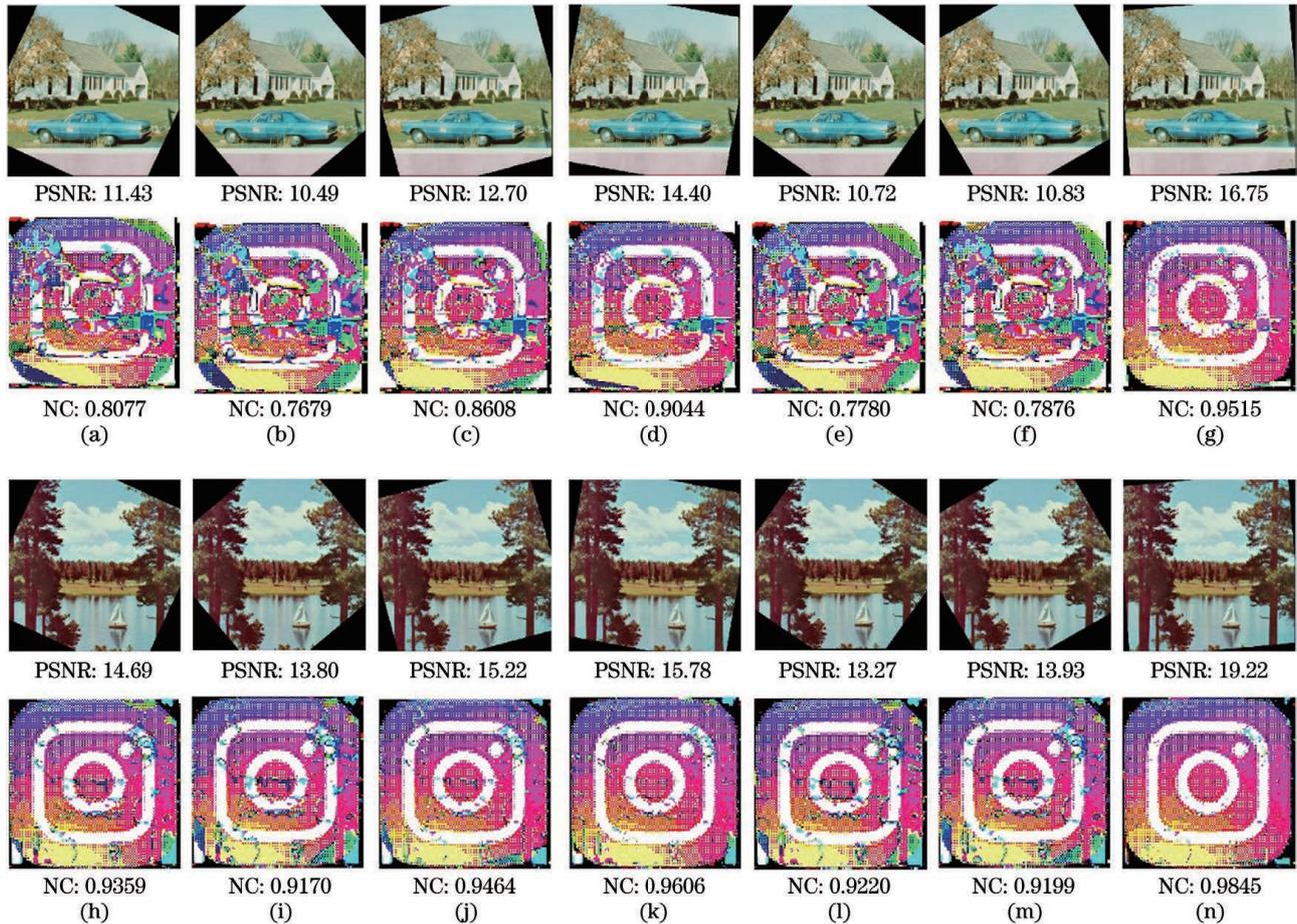


图 8 几何校正结果和版权标识。(a)(h) 旋转 25°; (b)(i) 旋转 50°; (c)(j) 旋转 75°; (d)(k) 旋转 100°; (e)(l) 旋转 125°; (f)(m) 旋转 150°; (g)(n) 旋转 175°

Fig. 8 Geometric correction results and copyright logo. (a)(h) rotate 25°; (b)(i) rotate 50°; (c)(j) rotate 75°; (d)(k) rotate 100°; (e)(l) rotate 125°; (f)(m) rotate 150°; (g)(n) rotate 175°

由图 8(a)~(n)的实验结果可知,在剪切边角的旋转攻击中,计算原图和旋转攻击校正图之间的 PSNR 值,作为载体受攻击强度的度量,不同载体图像的几何校正结果存在差异。图 8(b)、(e)、(f)提取结果的 NC 值较低,但由于半色调图像的视觉特性,仍能正确识别出版权信息,这说明本文算法在面向高强度几何攻击时,具有强的稳健性。

4.4 对比实验

为了验证算法的优越性,选择文献[9-11]进行实验对比,主要进行的对比实验分别有:高斯噪声(均值为 0,方差分别为 0.01,0.02,0.03,0.04,0.05)、椒盐噪声(均值为 0,0.01,0.02,0.03,0.04,0.05)、JPEG 压缩(压缩因子分别为 10,20,30,40,50)、中值滤波(模板大小为 3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9 ,

11×11)、高斯滤波(模板大小为 3×3 , 5×5 , 7×7 , 9×9 , 11×11)、旋转攻击(顺时针旋转 1° , 2° , 3° , 4° , 5°)、行列偏移攻击(向右偏移 1,2,3,4,5 行)和缩放攻击(缩放因子为 0.25,0.5,0.75,1.25,1.5),并根据得到的 NC 值画出对比实验结果图,具体实验结果如图 9 所示。

如图 9(a)和图 9(b)所示,随着高斯噪声和椒盐噪声的攻击强度增大,文献[9-11]的 NC 值逐渐下降,但本文算法的 NC 值均在文献[9-11]之上,这表明本文算法的抗噪声性能要比文献[9-11]更优。如图 9(c)所示,对于 JPEG 压缩,当进行强度为 10 的攻击时,文献[9,11]的 NC 值较低,文献[10]的 NC 值为 0.9500 左右,本文算法的 NC 值整体都在文献[9-11]之上,且 NC 值曲线变化较为缓慢。如

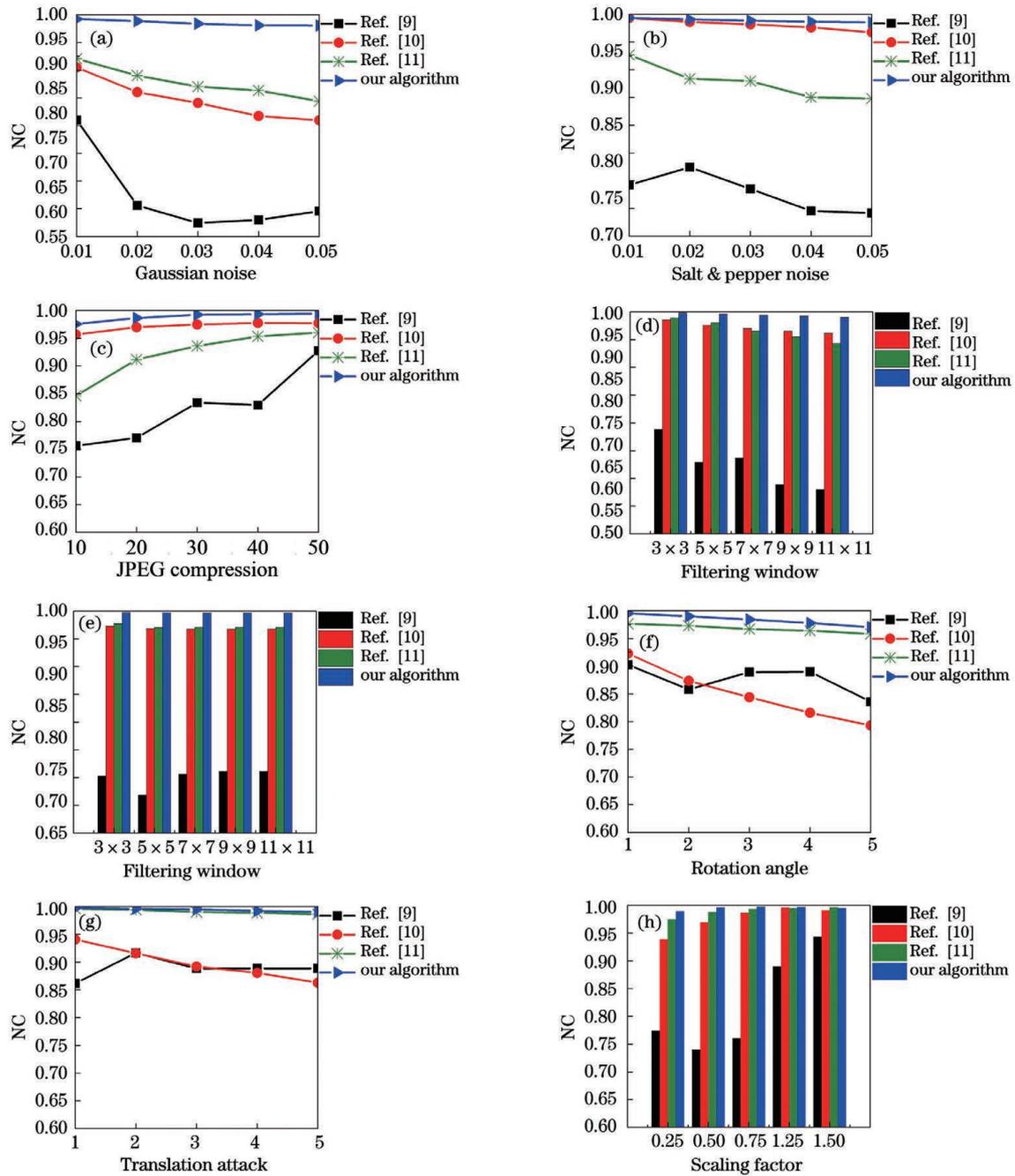


图 9 对比实验结果。(a) 高斯噪声;(b) 椒盐噪声;(c) JPEG 压缩;(d) 中值滤波;(e) 高斯滤波;(f) 旋转攻击;
(g) 行列偏移;(h) 缩放攻击

Fig. 9 Comparative experiment results. (a) Gaussian filtering; (b) salt-and-peppers noise; (c) JPEG compression;
(d) median filtering; (e) Gaussian filtering; (f) rotation attack; (g) translation attack; (h) scaling attack

图 9(d)和图 9(e)所示,对于中值滤波和低通滤波,在不同模板大小的滤波攻击下,本文算法的 NC 值均在 0.9900 以上,而文献[9]的 NC 值仅为 0.7500 左右。如图 9(f)和图 9(g)所示,在旋转攻击和行列偏移攻击下,4 种算法的 NC 值逐渐下降,文献[9-10]的变化较快,本文算法在 SURF 几何校正过程中,受到旋转攻击的图像经过仿射变换,修正了旋转攻

击的偏差,因此本文算法的 NC 值变化趋势平缓,且本文算法的整体 NC 值均在文献[9-11]之上。如图 9(h)所示,在 0.25 的缩放攻击下,本文算法的 NC 值均比文献[9-11]的 NC 值高,而文献[9]的 NC 值仅为 0.75 左右。

4.4.1 稳健性分析

文献[9]采用了 SIFT 和 DCT 提取特征信息,

由于 DCT 只能将能量聚焦至左上角处,且文中直接针对 4×8 的 DCT 系数进行二值化操作,故特征丢失严重。在非几何攻击下,特征点描述子组成的矩阵经过 DCT 分解后的 32 位系数变化较大,因此无法提取清晰的版权图像。文献[9]虽然引入了 SIFT 用于提取特征点,但未对特征点进行筛选,因此提取的特征信息包含过多的冗余信息,算法稳健性差。文献[10]在载体图像的空间域中直接提取像素值进行二值化作为特征信息,由于图像的空域信息在非几何攻击下相比频域信息变化快,故当攻击强度增大时,图像的像素值变化大,致使二值特征信息的鲁棒性较差。文献[11]利用 QR 分解和一维 DCT 提取载体特征,然后利用 DCT 相邻系数关系构造二值特征信息。由于相邻 DCT 系数之间的关系容易受到大尺度攻击的影响,在噪声攻击下,在 DCT 系数矩阵中离左上角系数越远的数值越敏感,而在几何攻击下,QR 分解得到的奇异值也会受到影响,因此,随着攻击强度增大时,稳健性逐渐变差。本文算法对于不同强度的非几何攻击,都表现出较强的稳健性和稳定性,其原因主要在于:1)本文算法在构造特征时引入了 Contourlet 变换和 Schur 分解。这两种工具能够提取稳定的主成分信息,当受到噪声攻击、滤波攻击和 JPEG 压缩时,Contourlet 变换可以很好地将高频信号去除,保留代表载体图像的低频信息。2)本文算法还引入了 SURF 提取载体图像的特征点,并对旋转攻击进行校正,因此,在几何攻击下,本文算法仍能表现出强的稳健性。综合分析可知,本文算法在非几何攻击和几何攻击下,其稳健性比文献[9-11]中方法的稳健性好。

4.4.2 安全性分析

文献[9]只使用 Logistic 混沌映射对版权图像进行加密操作。文献[10]使用 Arnold 置乱对版权信息进行置乱操作,由于 Arnold 置乱具有周期性,通过逐次尝试的方法可以得到 Arnold 置乱次数。文献[11]则通过圆环排列的方式将生成的特征图像进行重新排列。同时文献[9-11]生成的零水印信息均为二值零水印信息。本文算法利用半色调映射加密算法对版权标识进行加密,经过测试可知,本文提出的加密算法具有较高的安全性,且以子块构造方式和偏置初值作为密钥,具有较丰富的密钥空间。在半色调映射加密的同时,压缩了图像的信息量,使得加密版权图像可以直接和载体图像二值特征进行异或,生成彩色零水印信息。由于三通道的彩色零水印可以显示多种颜色信息,二值零水印只有 0 和

1 两个像素级,因此,本文算法相比文献[9-11]的算法具有更高的安全性。

4.5 算法时间消耗测试

本文算法使用的 SURF 几何校正相比于 SIFT 几何校正,算法效率得到提高,使用奇异值分解的中间步骤——Schur 矩阵分解,缩短了生成零水印和检测版权标识时耗费的时间。为验证算法在实际应用中的实时性,测试了在载体图像 $512 \times 512 \times 3$ 、版权图像 $64 \times 64 \times 3$ 尺寸下的零水印生成和版权信息检测过程的运行时间,测试结果见表 4。

表 4 运行时间测试表

Table 4 Run time test table

Step	Time /s
Copyright watermark preprocessing	0.1821
Generate zero watermark	0.5643
Original image	0.6009
20° rotation	0.6026
45° rotation	0.6241
Salt-and-pepper noise 0.08	0.6344
Wiener filter 9×9	0.6089

在版权水印提取过程中,选取受旋转攻击、噪声攻击、滤波攻击后的图像和原图像进行对比,测试了版权检测过程中所耗费的时间。由于在检测过程中需要提取图像的全部 SURF 特征点用于几何校正,且受不同攻击的图像在 SURF 几何校正部分所消耗的时间存在微小差别,故原始图像和受不同攻击后的图像(4 种)在提取过程中所耗费的时间有微弱的差别。表中 5 种图像的特征提取所耗费的平均时间为 0.6142 s,这说明在水印检测过程中本文算法具有较高的效率。在彩色零水印生成过程中,由于版权信息的检测过程中,在载体图像中提取了少量的 SURF 特征点作为密钥,因此不同载体图像对于零水印生成速度的影响不大,生成零水印所耗费的时间为 0.5643 s,这表明本文算法可有效应对批量生成零水印的情况。

5 结 论

提出一种抗几何攻击的半色调映射加密彩色零水印算法,使用筛选后的 SURF 特征点估计仿射矩阵,进行几何校正,提高了 SURF 几何校正精度,解决了高强度几何攻击下稳健性差的问题。通过 Schur 分解的特性,提高了算法生成零水印和版权

认证过程的时间效率。提出了半色调映射加密算法用于彩色水印图像的预处理,即在减少彩色图像的信息量的同时,对彩色版权标识进行映射加密,解密后的结果可显示出原始彩色版权图像的颜色和结构信息。相比于传统的进制转换方法,本文所提算法缩短了彩色图像生成零水印时所消耗的时间,增强了安全性。实验过程中发现,面对几何攻击导致边缘信息丢失的问题,本文所提算法的稳健性下降幅度较大,在今后的研究中将尝试构造包含冗余版权信息的零水印,以解决边缘信息丢失导致的稳健性下降问题。

参 考 文 献

- [1] Su Q T, Chen B J. An improved color image watermarking scheme based on Schur decomposition [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76 (22): 24221-24249.
- [2] Zhang X T, Su Q T, Yuan Z H, et al. An efficient blind color image watermarking algorithm in spatial domain combining discrete Fourier transform [J]. *Optik*, 2020, 219: 165272.
- [3] Prabha K, Sam S I. An effective robust and imperceptible blind color image watermarking using WHT [J/OL]. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*. [2020-12-15]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157820303384?via%3Dihub>.
- [4] Meenakshi K, Rao C S, Prasad K S. A robust watermarking scheme based Walsh-Hadamard transform and SVD using ZIG ZAG scanning [C]//2014 International Conference on Information Technology, December 22-24, 2014, Bhubaneswar, India. New York: IEEE Press, 2014: 167-172.
- [5] Shen Y B, Yang Y, Li Z. Digital watermarking algorithm for color images on QR codes [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2020, 15 (5): 949-955.
沈艳冰, 杨阳, 李竹. 一种适用于 QR 码的彩色图像数字水印算法 [J]. *智能系统学报*, 2020, 15 (5): 949-955.
- [6] Wen Q, Sun T F, Wang S X. Concept and application of zero-watermark [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, 31(2): 214-216.
温泉, 孙铁锋, 王树勋. 零水印的概念与应用 [J]. *电子学报*, 2003, 31(2): 214-216.
- [7] Qu C B, Wu D Y, Xiao C L, et al. Color zero watermarking algorithm in RGB spatial [J]. *Journal of Frontiers of Computer Science and Technology*, 2019, 13(4): 666-680.
- [8] Qu C B, Yang X T, Yuan D N. Zero-watermarking visual cryptography algorithm in the wavelet domain [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19 (3): 365-372.
曲长波, 杨晓陶, 袁铎宁. 小波域视觉密码零水印算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2014, 19(3): 365-372.
- [9] Liu J L, Li J B, Chen Y, et al. A robust zero-watermarking based on SIFT-DCT for medical images in the encrypted domain [J]. *Computers, Materials & Continua*, 2019, 61(1): 363-378.
- [10] Sun L, Xu J C, Zhang X X, et al. A novel generalized Arnold transform-based zero-watermarking scheme [J]. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2015, 4: 2023-2035.
- [11] 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.
- [12] Yang H Y, Qi S R, Niu P P, et al. Color image zero-watermarking based on fast quaternion generic polar complex exponential transform [J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2020, 82: 115747.
- [13] Hoang T V, Tabbone S. Generic polar harmonic transforms for invariant image representation [J]. *Image and Vision Computing*, 2014, 32 (8): 497-509.
- [14] Yamni M, Karmouni H, Daoui A, et al. Blind image zero-watermarking algorithm based on radial krawtchouk moments and chaotic system [C]//2020 International Conference on Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV), June 9-11, 2020, Fez, Morocco. New York: IEEE Press, 2020: 1-7.
- [15] Raj P A, Venkataramana A. Radial Krawtchouk moments for rotational invariant pattern recognition [C]//2007 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing, December 10-13, 2007, Singapore. New York: IEEE Press, 2007: 1-5.
- [16] Zhang Y Q, Wang X Y. Spatiotemporal chaos in mixed linear-nonlinear coupled logistic map lattice [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2014, 402: 104-118.
- [17] Wang R, Shaoheng H, Zhang P, et al. A novel zero-watermarking scheme based on variable parameter chaotic mapping in NSPD-DCT domain [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 182391-182411.

- [18] Caragata D, El Assad S, Luduena M. An improved fragile watermarking algorithm for JPEG images[J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2015, 69(12): 1783-1794.
- [19] Zhang X D, Wang W B, Wang D F, et al. A fusion algorithm for remote sensing images based on nonsub-sampled pyramids and bidimensional empirical decomposition[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(1): 196-204.
- [20] Wu D Y, Zhao J, Wang G P, et al. An image zero watermarking technology based on ameliorated singular value and subblock mapping[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2010002.
吴德阳, 赵静, 汪国平, 等. 一种基于改进奇异值和子块映射的图像零水印技术[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2010002.
- [21] Bay H, Ess A, Tuytelaars T, et al. Speeded-up robust features (SURF) [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2008, 110(3): 346-359.
- [22] Zou B J, Ruan P, Xiang Y, et al. An automatic panoramic images mosaic algorithm with precise matching [J]. Computer Engineering & Science, 2010, 32(8): 60-63.
邹北骥, 阮鹏, 向遥, 等. 一种精确匹配的全景图自动拼接算法[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(8): 60-63.
- [23] Zheng H H, Wang Y F, Zeng P, et al. A review of robust watermarking for halftone images[J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(5): 782-788.
郑海红, 王义峰, 曾平, 等. 稳健的半色调图像水印综述[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(5): 782-788.