

基于椭圆特征区域与重要位平面分解的鲁棒图像水印算法

杨金劳¹, 付利军¹, 张福泉²

(1.山西运城农业职业技术学院 信息技术系, 运城 044000; 2.北京理工大学 软件学院, 北京 100081)

摘要: **目的** 为了解决当前基于特征点的水印方案难以描述图像的非纹理区域(像素强度变化较大的边缘、像素强度值较小或趋于 0 的均匀区域), 降低了局部特征区域的鲁棒性, 使其抗几何失真能力不佳的问题, 提出基于椭圆特征区域与重要位平面分解的鲁棒图像水印算法。**方法** 根据彩色载体的 RGB 分量, 计算颜色不变性; 基于颜色不变性的强度概率密度, 推导概率密度梯度估计函数; 利用概率密度梯度值, 计算二阶 Hessian 矩阵, 改进 SURF 方法, 充分提取彩色载体中纹理与非纹理区域的鲁棒特征点; 再求取 Hessian 矩阵的特征值与特征向量, 以计算椭圆的长轴、短轴半径与方向角度, 并以特征点为中心, 建立局部椭圆特征区域; 定义鲁棒特征区域选择规则, 确定合适的水印嵌入位置; 引入位平面分解技术, 获取鲁棒椭圆特征区域的重要位平面图像, 并提取其直方图, 以此设计水印嵌入方法, 将二值水印隐藏到这些直方图中, 形成水印图像; 根据水印检测机制, 复原二值水印。**结果** 实验结果显示, 与基于特征点的水印方案相比, 所提算法具有更高的不可感知性与鲁棒性, 复原水印失真度最小。**结论** 所提算法具有较高的视觉隐秘性和抗几何失真能力, 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; 颜色不变性; 局部椭圆特征区域; 位平面分解; 概率密度梯度; Hessian 矩阵; 直方图中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)21-0206-10
DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.21.036

Robust Image Watermarking Algorithm Based on Elliptical Feature Region and Important Bit-Plane Decomposition

YANG Jin-lao¹, FU Li-jun¹, ZHANG Fu-quan²

(1.Department of Information Technology, Shanxi Yuncheng Vocational and Technical College of Agricultural, Yuncheng 04400, China; 2.School of Software, Beijing University of Technology, Beijing 100081, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a robust image watermarking algorithm based on elliptical feature region and important bit-plane decomposition, for the purpose of solving the defects such as low robustness of the local feature region induced by difficulty in describing the non-texture region of the image (the edge with greater pixel intensity changes, uniform area where pixel intensity is smaller or tends to be zero) in current watermarking scheme based on feature points, thus resulting in its poor anti-geometric distortion ability. Firstly, the color invariance was calculated according to the RGB component of the color carrier. The probability density gradient estimation function was derived based on the intensity probability density of color invariance. Subsequently, the probability density gradient was used to compute the two-order Hessian matrix for improving the SURF method, which fully extracted the robust feature points of the texture and non-texture regions in the color image. The eigenvalues and eigenvectors of the Hessian matrix were obtained to calculate the radius of the long axis and short axis with the ellipse, as well as the angle of the direction; and the local elliptical feature region was established by taking the feature points as the center. Then, a robust feature region selection rule was defined to determine the appropriate watermark embedding location. The bit-plane decomposition technique was introduced to get the important bit-plane image of the robust elliptical feature region, and its histogram was extracted. Based on that, the watermark embedding method was designed to hide the binary watermark in these histograms for forming

收稿日期: 2018-05-05

基金项目: 国家教育部博士点基金(20121101110037); 山西省自然科学基金(2013011121-1)

作者简介: 杨金劳(1982—), 女, 硕士, 山西运城农业职业技术学院讲师, 主要研究方向为图形图像处理、软件工程、机器学习。

watermark image. Finally, the binary watermark was restored based on watermark detection mechanism. The experimental results showed that the proposed algorithm had higher uncertainty and robustness, as well as the least distortion of the restored watermark, compared with the current watermarking scheme based on feature points. The proposed algorithm has higher visual stealth and anti-geometric distortion ability, which has better reference value in copyright protection, information security and other fields.

KEY WORDS: image watermarking; color invariance; local elliptical feature region; bit-plane decomposition; probability density gradient; Hessian matrix; histogram

图像水印技术作为一种较常用的数据嵌入方法,它是将水印信息嵌入到载体图像像素中,以获取一幅水印图像,且整个图像不会出现任何有关水印的信息,具有较高的视觉隐秘性与鲁棒性,能够较好地防止数据在网络中遭受攻击^[1-3]。当前的图像水印技术主要分为 4 大类,分别是扩频调制方法^[4-5]、不变性变换^[6-7]、同步校正^[8-9]以及基于特征点的水印算法^[10-12]。如 Zhang 等^[4]利用离散余弦变换处理载体图像,输出变换系数,并根据线性分段混沌映射与扩频调制原理,设计水印嵌入机制,将水印信息隐藏到加密后的载体变换系数中,形成水印图像。包锐等^[5]利用离散余弦变换处理载体的 B 分量,根据扩频调制,设计水印嵌入方法,将水印信息嵌入到中频系数中,同时,引入纠错编码,构建水印提取机制,从水印图像中复原水印信息。虽然扩频调制方法具有良好的不可感知性,但是,载体图像的干扰效应会降低水印的提取质量,且抗几何失真能力较差^[1]。对此,学者们利用不变性变换来设计水印技术,如 Sharma 等^[6]利用有限 Radon 变换处理载体图像,在此基础上,再进行 Fourier 变换,得到相应的奇异值,以此设计水印嵌入方法,完成水印信息的嵌入。Khalid 等^[7]通过利用 Arnold 变换加密二值水印后,引入精确极谱变换,计算载体图像的极谱变换矩,通过对选定的极谱变换矩进行量化,实现水印嵌入。但是,此类水印技术不能预测这些几何失真参数,使其复原水印质量不理想。为了准确预测几何失真参数,研究人员利用同步校正技术来实现水印嵌入,如 Wang 等^[8]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。Rajesh 等^[9]引入了水平提升小波变换,获取载体图像的 4 个子带,将 LL 子带分割为非重叠子块,利用模糊熵值选择合适的子块作为水印嵌入位置,并利用水平提升小波变换系数训练拉格朗日支持向量回归模型,根据基因算法优化的嵌入强度,将二值水印嵌入到选择的子块中。由于这种技术严重依赖于训练样本,限制了其几何校正能力,因此对局部几何失真变

换的鲁棒性不理想。

相对于以上 3 种类型的水印技术,基于特征点的水印技术表现出更好的水印性能,具有出色抵御全局与局部几何失真能力,并兼顾良好的视觉不可感知性,得到了诸多学者的广泛研究,如侯翔等^[10]设计了基于 SURF 特征区域的鲁棒水印算法,在图像中检测 SURF 特征点,选取鲁棒性强的点构造互不重叠的特征区域并进行归一化处理,进而对归一化的区域实施整数小波变换,根据生成的模板选取相应位置的系数,最后通过量化的方式将水印信息重复嵌入到每个特征区域内。Summuyya 等^[11]利用 Harris 算子来检测载体的特征点,并根据 Delaunay 三角网,将载体分割为一系列的三角形区域,并计算每个区域对应的 Zernike 矩,通过抖动调制,构建水印嵌入机制,将水印嵌入到 Zernike 矩的幅度系数中,完成水印嵌入。Wang 等^[12]利用容错恢复的 SIFT 算子构建特征点检测器,获取载体图像的稳定彩色特征点,根据局部图像内容变化,建立局部特征区域,通过修改不变四元 PHT 模系数,将数字水印嵌入到局部区域中,形成水印图像,实验结果验证了其算法的优异性。

虽然基于特征点的水印技术具有良好的抗几何失真能力和不可感知性,但是该水印方案有 2 个不足:其采用的特征点检测器主要基于强度梯度,所检测到的特征点分布不均,主要集中在纹理区域,使其抗局部几何失真能力不理想;所建立的局部特征区域并不是完整的仿射不变性,使得该区域的鲁棒性不理想,降低了水印图像的鲁棒性。

为了解决上述问题,为了兼顾水印算法的抗全局与局部几何失真能力,文中基于局部椭圆特征区域与重要位平面分解的鲁棒图像水印算法。利用彩色载体的 RGB 分量,计算颜色不变性,增强算法对颜色攻击的鲁棒性;利用颜色不变性的概率密度梯度来计算二阶 Hessian 矩阵,从而改进了 SURF 方法,充分提取彩色载体中纹理与非纹理区域的鲁棒特征点,使其分布较为均匀,增强抗局部几何失真能力;通过局部椭圆特征区域与定义鲁棒特征区域选择规则,确定合适的水印嵌入位置;引入位平面分解技术,获取鲁棒椭圆特征区域的重要位平面图像对应的直方图,设计水印嵌入方法,将二值水印隐藏到这些直方图中,形

成水印图像。最后，测试了该算法的不可感知性与鲁棒性。

1 加速鲁棒特征 SURF 算子

加速鲁棒性特征算法^[13]是一种新的对SIFT算子改进的图像特征点提取算法。一般而言，SURF方法是使用Hessian矩阵的行列式来检测^[14]。若初始图像为I，则位于(x,y)处的像素点的积分图像可表示为^[13]：

$$I_{\Sigma}(x,y) = \sum_{i=0}^{x} \sum_{j=0}^{y} I(x,y) \tag{1}$$

根据式(1)得到的 $I_{\Sigma}(x,y)$ ，形成相应的Hessian矩阵，有效减少计算时间：

$$H(x,\sigma) = \begin{bmatrix} L_{xx}(x,\sigma) & L_{xy}(x,\sigma) \\ L_{xy}(x,\sigma) & L_{yy}(x,\sigma) \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中： σ 为尺度因子； $L_{xx}(x,\sigma)$ 为二阶高斯微分与图像I在点x的卷积。

根据式(2)计算的近似Hessian矩阵，则图像特征点检测过程如下^[13]所述。

1) 式(1)根据式(2)，得到图像I中任意像素点的Hessian矩阵的行列式 $H(x,\sigma)$ 。若 $H(x,\sigma) < 0$ ，则该像素点属于非局部极值点；反正，若 $H(x,\sigma) > 0$ ，则表明该像素点是局部极值点。

2) 引入非极大值抑制法，对局部极值点完成优化，把集中程度最高的极值点视为候选特征点；

3) 将候选特征点的像素值与其相邻的8个像素点进行极值比较的同时，还与相邻尺度的18个像素点值进行比较^[13]，见图1。若某个候选特征点的像素值最大，则将其视为该区域的真实特征点；否则，则为伪特征点。

4) 基于3D线性插值机制^[13]，根据预设的阈值，将小于阈值的特征点删除，输出鲁棒特征点。

以Lena为对象，借助经典的SURF方法对其处理，得到的特征点见图2b。依图2b可知，该方法所提取的特征点主要集中在纹理区域，无法提取图像的非纹理区域的鲁棒特征点。

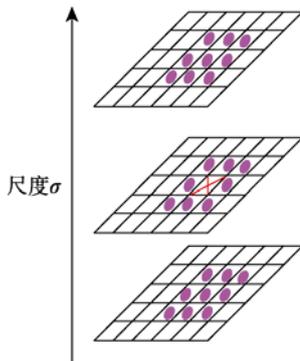


图1 特征点检测

Fig.1 Feature point detection



a Lena图像

b 特征点检测结果

图2 SURF算法的特征点检测结果

Fig.2 Feature point detection results of SURF algorithm

2 文中图像水印算法

所提的基于局部椭圆特征区域与重要位平面分解的鲁棒水印算法过程见图3。依图3可知，该技术主要分为3个过程：基于概率密度梯度值估计的载体图像特征点检测；基于重要位平面直方图的水印嵌入；水印信息的提取。

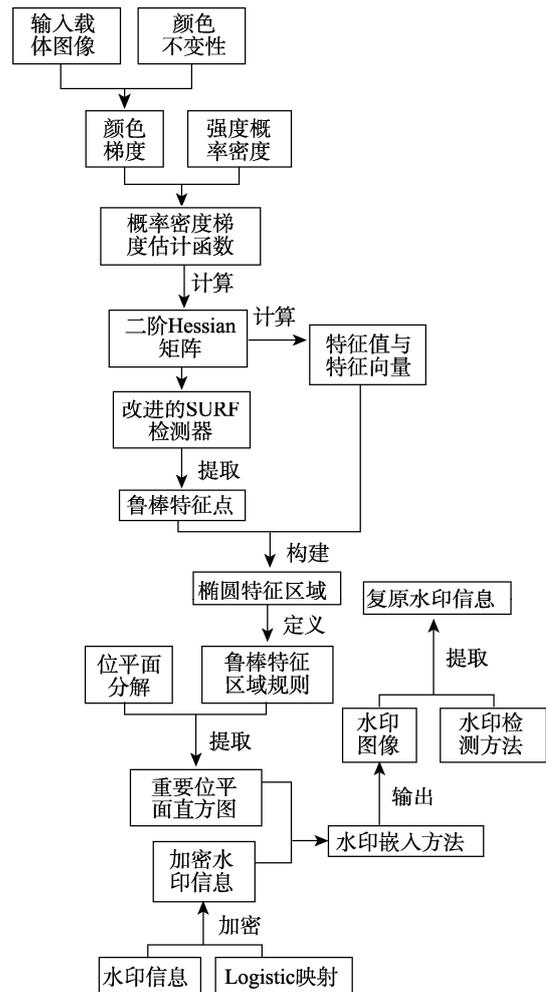


图3 文中鲁棒图像水印算法的过程

Fig.3 Process of the proposed robust image watermarking algorithm

2.1 基于概率密度梯度的载体图像特征点检测

2.1.1 彩色载体的鲁棒特征点的检测

在当前的彩色图像特征点检测方法中，诸如 SIFT, SURF 以及 Harris-Laplace 算子，大都忽略了图像的颜色信息，导致获取的特征点对亮度方向、强度和颜色变化的稳健性不佳。故引入颜色不变性模型^[15]，设计一种新的彩色图像特征点检测器。根据文献[16]可知，对于一幅彩色图像，在选取光波波长 $\lambda=520\text{ nm}$ 时，可得到 RGB 模式下的颜色不变性模型为：

$$\begin{bmatrix} E \\ E_\lambda \\ E_{\lambda\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.63 & 0.27 \\ 0.30 & 0.04 & -0.35 \\ 0.34 & -0.06 & 0.17 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据上述 $E, E_\lambda, E_{\lambda\lambda}$ ，计算颜色不变性的梯度：

$$F = \sqrt{E^2 + E_\lambda^2 + E_{\lambda\lambda}^2} \quad (4)$$

为了兼顾水印图像的不可感知性与鲁棒性，需要在颜色不变性梯度中确定出鲁棒性的特征点^[16]。对于一幅图像，可将其视为二维强度函数，也可把它描述为均匀网格中像素强度的随机分布^[17]，那么根据像素强度，可将整幅图像分为纹理区域与非纹理区域：纹理区域，其像素响度梯度值很大，而且梯度方向随机分布，互不相同；非纹理区域，主要包含 2 类，一个是像素强度值较小或趋于零的均匀另外另一个是像素强度变化较大的边缘区域，且梯度方向与边缘垂直，因此，文中利用强度概率密度梯度代替强度梯度，重新定义了 SURF 方法的二阶 Hessian 矩阵。

Kernel 密度估计是目前较为常用的密度估计方法^[18]。对于任意的图像，其每个像素的强度概率密度均可利用 Kernel 密度估计来获取，若像素点的位置为 (x, y) ，则其强度概率密度 $P(x, y)$ 为^[18]：

$$P(x, y) = \frac{C}{h_s^2 h_r} \sum_{(i, j) \in W} k_1 \left(\left\| \frac{(x, y) - [(x+i, y+j)]}{h_s} \right\| \right) k_2 \left(\left\| \frac{c - c_j}{h_r} \right\| \right) \quad (5)$$

式中： W 为观察窗口； $(x+i, y+j)$ 为 W 内的像素； c, c_j 分别为像素点 (x, y) ， $(x+i, y+j)$ 的强度； h_s, h_r 分别为空域带宽和区间子域带宽^[18]； C 为归一化常数； k_1, k_2 为 Kernel 函数：

$$k_1 = k_2 = g(\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-(x^2+y^2)/2\sigma^2} \quad (6)$$

基于式 (6)，对其完成二阶偏导，可构建像素 (x, y) 的概率密度梯度值估计函数 $G(x, y)$ ：

$$G(x, y) = \nabla P(x, y) = \begin{bmatrix} P_{xx} \\ P_{yy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$P_{xx} = \frac{d^2 P(x, y)}{dx^2} = \frac{C}{h_s^2 h_r} \sum_w \frac{d^2}{dx^2} \left(k_1 \left(\left\| \frac{(x, y) - [(x+i, y+j)]}{h_s} \right\| \right) k_2 \left(\left\| \frac{c - c_j}{h_r} \right\| \right) \right) \quad (8)$$

$$P_{yy} = \frac{d^2 P(x, y)}{dy^2} = \frac{C}{h_s^2 h_r} \sum_w \frac{d^2}{dy^2} \left(k_1 \left(\left\| \frac{(x, y) - [(x+i, y+j)]}{h_s} \right\| \right) k_2 \left(\left\| \frac{c - c_j}{h_r} \right\| \right) \right) \quad (9)$$

为了直观展示概率密度梯度的优势，以图 2a 为例，其相应的颜色不变性梯度与概率密度、强度梯度分别见图 4a—c；再基于式 (5—9)，可获取概率密度梯度估计，见图 4d。根据测试结果可知，所提概率密度梯度估计能够更好地描述图像的局部属性，见图 4d 中的圆圈所指。

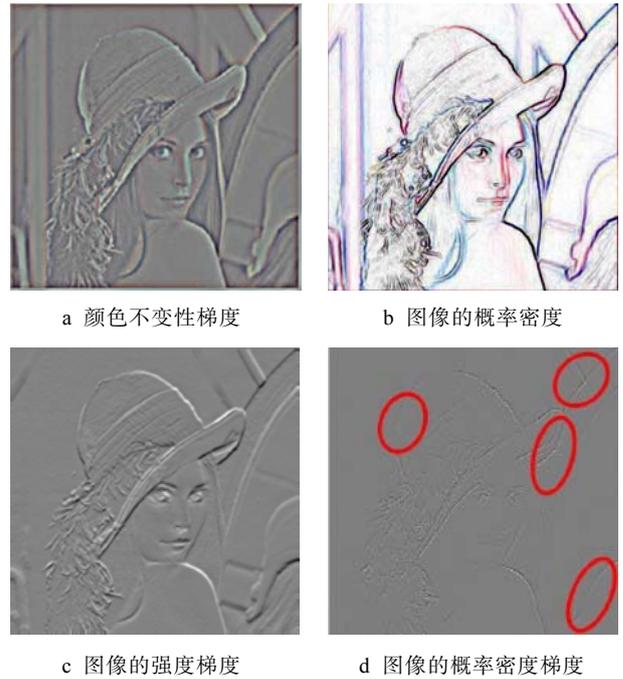


图 4 图像的强度梯度与概率密度梯度
Fig.4 Intensity gradient and probability density gradient of images

再按照式 (7) 计算的概率密度梯度值，改进了 SURF 方法。首先，根据概率密度梯度计算新的二阶 Hessian 矩阵：

$$\mathbf{H}'(x, y, \delta) = \delta^2 \times G(\delta) \times \begin{bmatrix} P_x^2(x, y, \delta) & P_x P_y(x, y, \delta) \\ P_x P_y(x, y, \delta) & P_y^2(x, y, \delta) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中： δ 为尺度因子； P_a 为 a 方向的微分。

利用式 (10) 计算新的近似 Hessian 矩阵 $\mathbf{H}'(x, y, \delta)$ ，替换文献[13]中的矩阵 $\mathbf{H}(x, y, \delta)$ ，从而改进了 SURF 算子，以准确检测图像的特征点。详细的 SURF 特征检测过程见文献[13]。

以图 2a 为例，对其进行不同类型的几何失真变换，再利用文献[13]的 SURF 方法，与文中改进的 SURF 算子来检测其特征点，结果见图 5。通过对比图 2b 与图 5a 可知，改进前后的 SURF 方法对几何攻击均有良好的鲁棒性。但经典的 SURF 方法只能获取

图像纹理区域的特征点;而改进后的 SURF 方法不仅可以检测纹理区域的特征点,而且还能捕获非纹理区域的特征点,使其检测到的特征点分布更加均匀。



a 基于改进的 SURF 特征点与检测结果 b 基于改进的 SURF 颜色不变性的特征点检测结果

图 5 彩色图像的均匀与鲁棒特征点检测结果

Fig.5 Detection results of uniform and robust feature points of color images

2.1.2 局部椭圆特征区域的构建

局部特征区域作为载体图像的子集,能够很好地反映图像的重要语义^[19],但是如何确保局部特征区域对局部去同步攻击具有理想的不变性是非常重要的。Chen 等^[20]通过研究发现,相对于圆形、三角形与矩形,椭圆特征区域具有更加理性的鲁棒性,对全局与局部几何失真具有很好的不变性。文献[20]中的椭圆特征区域主要基于图像强度梯度来构建,不能有效地描述图像内容细节。为此,文中利用局部概率密度的变化来构建局部鲁棒特征区域,过程如下所述。

1) 根据 2.1.1 节中的特征点,根据式(5—7),对颜色不变梯度 F 完成概率密度梯度值估计 $G(x, y)$ 。

2) 再根据式(8—9),计算每个特征点的 $G(x, y)$ 的二阶偏导 P_{xx}, P_{yy} ; 根据 P_{xx}, P_{yy} , 计算其对应的 Hessian 矩阵。

3) 根据新的 Hessian 矩阵,计算每个特征点对应的特征值 (λ_1, λ_2) 和特征矢量 (v_1, v_2) 。

4) 基于每个特征点对应的 (λ_1, λ_2) 和 (v_1, v_2) , 计算椭圆特征区域的长轴 A_t 、短轴 B_t 半径与方向角度 θ_t 。

$$A_t = \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}}, B_t = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}}, \theta_t = \arctan\left(\frac{\text{sgn}(v_2) \cdot v_{2,y}}{v_{2,x}}\right) \quad (11)$$

5) 以特征点为中心,以 A_t 个像素为长轴半径、以 B_t 个像素为短轴半径,通过方向角度 θ_t , 构建局部椭圆特征区域。以图 5b 为例,根据上述过程所形成的局部特征区域,见图 6a。

2.2 基于重要位平面直方图的水印嵌入

1) 根据上述过程会形成非常多的局部区域,且存在重叠部分,易降低水印图像质量。故需要从这些区域中,选择非重叠特征区域进行水印嵌入,以提高算法的鲁棒性。对此,文中定义鲁棒特征区域选择规

则,确定合适的水印嵌入位置。对上述局部椭圆特征区域施加多种几何攻击,包括噪声、旋转、平移、缩放和裁剪(包括中心裁剪与非中心裁剪);根据攻击前后的直方图特性,确定出鲁棒性更好的特征区域作为候选子集;基于候选区域的面积,从大到小进行排序,将面积较大的非重叠区域视为最终的局部椭圆特征区域,见图 6b。



a 初始的局部椭圆特征区域 b 选择的鲁棒特征区域

图 6 局部椭圆特征区域的构建与选择

Fig.6 Construction and selection of local elliptical feature region

2) 提取这些局部特征区域的直方图,设计水印嵌入方法。根据位平面理论可知,不同信息位对数字图像的贡献是不同的^[21],而且高位平面(重要位平面)始终反映了原始图像的主要内容,对各种常见的处理操作具有较强的鲁棒性。令 $F = \{f^c(x, y), 0 \leq x < M, 0 \leq y < N, c = R, G, B\}$ 表示一幅彩色载体图像; $f^R(x, y), f^G(x, y), f^B(x, y)$ 是像素 (x, y) 的颜色值,则彩色图像 F 的位平面分解为^[21]:

$$d_p^c(x, y) = \begin{cases} 1 & \left(\text{int}\left(\frac{f^c(x, y)}{2^p}\right)\right) \bmod(2) = 1 \\ 0 & \left(\text{int}\left(\frac{f^c(x, y)}{2^p}\right)\right) \bmod(2) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $p=0,1,2...7$ 是图像位平面。

图像的重要位平面可使用 H 个高位平面 $d_p^c(x, y)(p=8-H, 9-H...7)$ 来表示:

$$D_p^c(x, y) = \sum_{p=8-H}^7 d_p^c(x, y) \times 2^p \quad (13)$$

3) 再提取重要位平面 $D_p^c(x, y)$ 的直方图。

4) 为了降低载体图像的修改范围,需要确定合适的像素值范围。采用文中算法,根据直方图 bin 的不变统计描述,将二值水印隐藏到椭圆局部特征区域中,因此,选择最佳像素值范围(包括 bin 的数量和宽度)是非常重要的,因为一个大的像素值有助于嵌入大量的水印。假设重要位平面 $D_p^c(x, y)$ 的均值和标准差分别为 μ^c, σ^{c^2} , 则对于任意的整数 ε , 则其像素分布概率 P 满足如下条件:

$$P\{|D^c - u^c| < \varepsilon\} \geq 1 - \frac{\sigma^{u2}}{\varepsilon^2} \quad (14)$$

根据式 (14) 可知, 若给定最小概率, 则可以计算最佳像素值范围。对于像素值的正态分布, σ^2 可用于计算 ε :

$$\varepsilon = K\sigma^{c2} \quad (15)$$

式中: K 为一个整数。

根据均值 μ^c 与 ε , 则合适的像素值范围 A^c 为:

$$A^c = [A_{\min}^c, A_{\max}^c] = [u^c - K\sigma^{c2}, u^c + K\sigma^{c2}] \quad (16)$$

5) 选择直方图的 bin 数量和宽度。令直方图 bin 数量和宽度分布用 L^c, z^c 表示, 根据确定的像素值范围 A^c , 则 L^c 与 z^c 的关系为:

$$L^c = \frac{A_{\max}^c + A_{\min}^c + 1}{z^c} \quad (17)$$

令 $a^c(i^c)$ 表示第 i 个直方图 bin 中的总样本, 其计算函数为:

$$a^c(i^c) = [A_{\min}^c + (i^c - 1) \times z^c, A_{\min}^c + i^c \times z^c - 1] \quad (18)$$

其中, $i^c = 1, 2 \dots L^c$ 。

若重要位平面 $D_p^c(x, y)$ 中的任意像素值都属于像素值范围 A^c 内, 则 i^c 的计算函数为:

$$i^c = \left\lfloor \frac{D_H^c(x, y) - A_{\min}^c}{z^c} \right\rfloor + 1 \quad (19)$$

6) 令 $W^c = \{w^c(i, j), 0 \leq i < P, 0 \leq j < Q\}$ 是二值水印图像, 其尺寸为是 $P \times Q$, 且 $w^c(i, j) \in [0, 1]$ 。为了有效破坏二值水印的像素空间关系, 提高隐秘性, 文中利用 Arnold 映射^[22], 对二值水印进行加密。

其中, Arnold 映射为^[22]:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{Z} \quad (20)$$

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 为图像矩的阶数; mod 为求模运算。

基于式 (22) 的计算, 可获取加密水印 $W^c = \{w^c(i, j), 0 \leq i < P, 0 \leq j < Q\}$ 。

7) 根据 $a^c(i^c)$, 设计水印嵌入方法, 通过利用加密水印 $W^c, c=R, G, B$ 来修改局部椭圆特征区域的重要位平面 $D_p^c(x, y)$ 中的每一个直方图 bin, 以完成水印嵌入:

$$D_H^c(x, y) = \begin{cases} A_{\min}^c + (i^c - 1) \times z^c + \Delta^c & \text{if } D_H^c(x, y) \in a^c(i^c), \& ((\text{mod}(\Delta^c, 2) = 0) \& w^c(i^c) = 0 | (\text{mod}(\Delta^c, 2) = 1) \& w^c(i^c) = 1) \\ A_{\min}^c + (i^c - 1) \times z^c + \Delta^c & \text{if } D_H^c(x, y) \in a^c(i^c), \& ((\text{mod}(\Delta^c, 2) = 0) \& w^c(i^c) = 1 | (\text{mod}(\Delta^c, 2) = 1) \& w^c(i^c) = 0) \\ D_H^c(x, y) & \text{if } D_H^c(x, y) \notin a^c \end{cases} \quad (21)$$

式中: $\&$ 为“且”运算符号; $\Delta^c = \lceil z^c / 2 \rceil$ 为嵌入强度; mod 为求余运算; $D_H^c(x, y)$ 为嵌入水印后的像素; z^c 为每个直方图 bin 的宽度。

基于式 (21), 把整个加密水印 $W^c = \{w^c(i, j), 0 \leq i < P, 0 \leq j < Q\}$ 隐藏到重要位平面 $D_p^c(x, y)$ 的直方图中, 输出水印图像 I^* 。以图 7a 为水印, 经过式

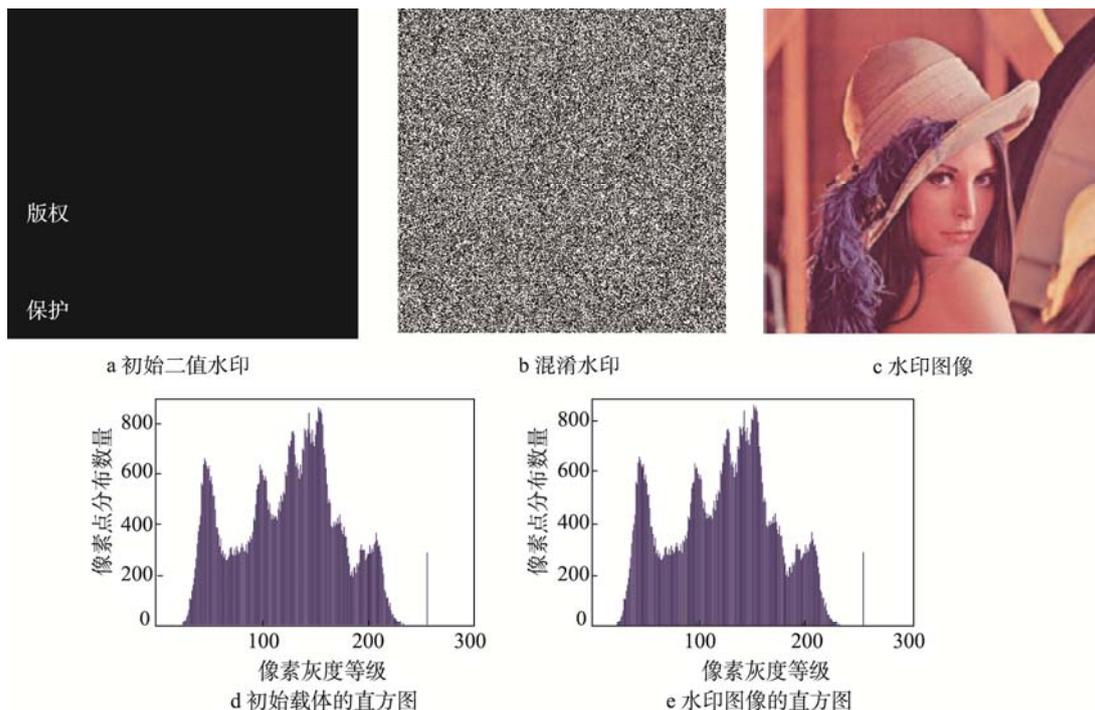


图 7 水印信息的嵌入测试

Fig.7 Embedding test of watermark information

(20)的加密后,结果见图7b。再以图2a为载体,基于上述嵌入过程,将水印隐藏到图2a中,结果见图7c。根据测试结果可知,水印图像与初始载体几乎无视觉差异,二者对应的直方图非常接近,分别见图7d与图7e。这表明所提水印算法对载体图像的修改程度非常小,具备理想的不可感知性。

2.3 水印提取

1) 基于颜色不变性与概率密度梯度,检测水印图像 I^* 的特征点;并将这些特征点组成一个集合 $P^* = \{P_i^*, k=1, 2, \dots, m\}$ 。 m 是检测到的特征点数量。

2) 再根据 2.1.2 节构建椭圆特征区域;将其组合为一个集合 $O^* = \{o_i^*, k=1, 2, \dots, m\}$ 。

3) 根据鲁棒特征区域选择规则,确定合适的区域作为水印嵌入位置。

4) 对于所选择的水印椭圆特征区域 $O^* = \{o_i^*, k=1, 2, \dots, m\}$ 的重要位平面图像 $D_H^*(x, y)(c=R, G, B)$, 统计其直方图 bin $a^c(i^c)$ 中的像素值的频率;并用 $A^*(i^c)$ 来表示像素值的最高频率。随后,设计水印提取方法,从 $a^c(i^c)$ 中复原水印:

$$w^{*c}(i^c) = \begin{cases} 1 & \text{if } (u^c = \Delta^c | u^c = 0) \& (\text{mod}(\Delta^c, 2) = 1) \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

$$u^c = \text{mod}((A^*(i^c) - A_{\text{min}}^c), z^c) \quad (23)$$

5) 重复上述过程,直到水印椭圆特征区域 $O^* = \{o_i^*, k=1, 2, \dots, m\}$ 的重要位平面图像 $D_H^*(x, y)(c=R, G, B)$ 中的嵌入水印 W^{*R}, W^{*G}, W^{*B} 都被检测出来,从而输出加密水印 $W^* = \{W^{*R}, W^{*G}, W^{*B}\}$ 。再根据解密密钥,输出二值水印。

以图7c为样本,通过水印提取机制,可复原二值水印,见图8。依图8可知,所提取的二值水印与初始水印很相似,二者之间的结构相似度为0.992。



图8 提取水印质量

Fig.8 Extracted watermark quality

3 实验结果及分析

为了验证所提水印技术的不可感知性与抗几何失真能力,利用 Matlab 软件进行测试,同时,为了验证文中方法的优势,将文献[10]、文献[12]作为对照组。测试环境为: 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^[23]中任意挑选 1 幅彩色图像,见图9a,其尺寸是 512×512;并将图9b作为待嵌入的水印,尺寸为 64×64。通过反复测试,实验参数为: bin 的宽度 $z=4, K=2$, 概率密度参数 $h_s=7, h_t=24$ 。评价指标:不可感知性和鲁棒性。



图9 彩色载体及二值水印

Fig.9 Color carrier and binary watermark

3.1 不可感知性测试

基于所提水印技术、文献[10]与文献[12],将待嵌入的水印信息分别隐藏到彩色载体中,输出的水印结果见图10。根据3种算法的输出结果可知,所提技术、文献[10]和文献[12]都有良好的视觉隐秘性,输出的水印图像中没有泄露任何有关二值水印的信息,几乎与载体图像是一样的。

主观评估无法体现3种水印方案的差别,因此,为了客观衡量这些水印算法的不可感知性,文中引入差分图^[2]来进行量化。以图10c—e为对象,所提技术、文献[10]和文献[12]算法对应的差分图分别见图11a—c。根据差分图可知,文中技术的水印信息隐藏效果更好,对应的差分图不存在阶梯效应,其灰度值分布与彩色载体的非常接近,见图11a。文献[10]、文献[12]的隐秘效果不理想,均存在不同程度的阶梯效应。原因是所提算法利用了 Arnold 变换来加密二值水印,充分破坏了像素关系,并考虑了图像的颜色不变性,根据概率密度梯度值改进了 SURF 算子,使其可充分提取均匀、鲁棒的特征点,从而设计了局部椭圆特征区域,根据鲁棒区域选择规则,确定合适的水印嵌入位置,基于选择的鲁棒椭圆特征区域的重要位平面图像直方图,设计水印嵌入方法,将二值水印隐藏到这些直方图 bin 中,使其对载体图像的修改范围较小,最大程度地保留了载体图像的特性,使其视觉不可感知性最高。文献[10]则是利用 SURF 算子检测的特征点所形成的互不重叠的特征区域作为嵌入位置,根据整数小波变换来完成水印信息的嵌入,但是, SURF 算子是基于强度梯度,所检测到的特征点分布不均,无法获取非纹理区域的信息,使其对载体图像描述不充分,并将水印信息嵌入到所有的特征区域内,没有对这些特征区域进行刷选,使其对载体图

像的修改范围较大，造成不可感知性不佳。文献[12]则是利用容错恢复的 SIFT 算子检测的特征点来形成局部特征区域，并充分利用四元 PHT 变换的鲁棒性对局部特征区域进行处理，获取相应的 PHT 变换系数，通过将水印信息嵌入到这些系数中，输出水印图像，改进的 SIFT 算子虽然具有更好的鲁棒性，但是，其与 SURF 算子一样，主要是依靠图像的强度梯度来检测特征点，对图像的描述能力不强，使其形成的特征区域稳健性不理想，且其是将水印信息嵌入到所有的 PHT 变换系数中，没有对嵌入位置进行优化，从而削弱了算法的不可感知性。



图 10 不同算法的水印图像
Fig.10 Watermark images of different algorithms

3.2 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]。为了测试所提技术的抗几何失真能力，考虑文章篇幅，文中将图 10c—e 为目标，将表 1 中的几何攻击施加于每幅图像。再根据所提技术、文献[5]与文献[7]的水印检测方法，从攻击水印图像中复原二值水印，同时，根据峰值信噪比 PSNR、归一化系数 NC^[17]与结构相似度 SSIM^[24]评估提取质量，结果见表 2。由表 2 可知，当水印图像遭受几何攻击时，3 种算法的复原水印均受到不同程度的失真。当面对全局几何失真与局部几何攻击时，文中水印算法的鲁棒性最高，其复原的二值水印图像质量最高，对应的 PSNR, NC 值均为最大。文献[10]算法对于旋转、缩放与噪声攻击具有良好的鲁棒性，但是对局部几何失真变换攻击（中心裁剪 15%）的鲁棒性较弱，所复原的二值水印失真较大，对应的 PSNR=23.58, NC=0.409, SSIM=0.435。文献[12]对旋转、缩放具有理想的稳健性，但是，对噪声较为敏感，且难以抵御局部几何攻击，提取的二值水印质量不佳，对应的 PSNR=34.17, NC=0.615, SSIM=0.637。原因是

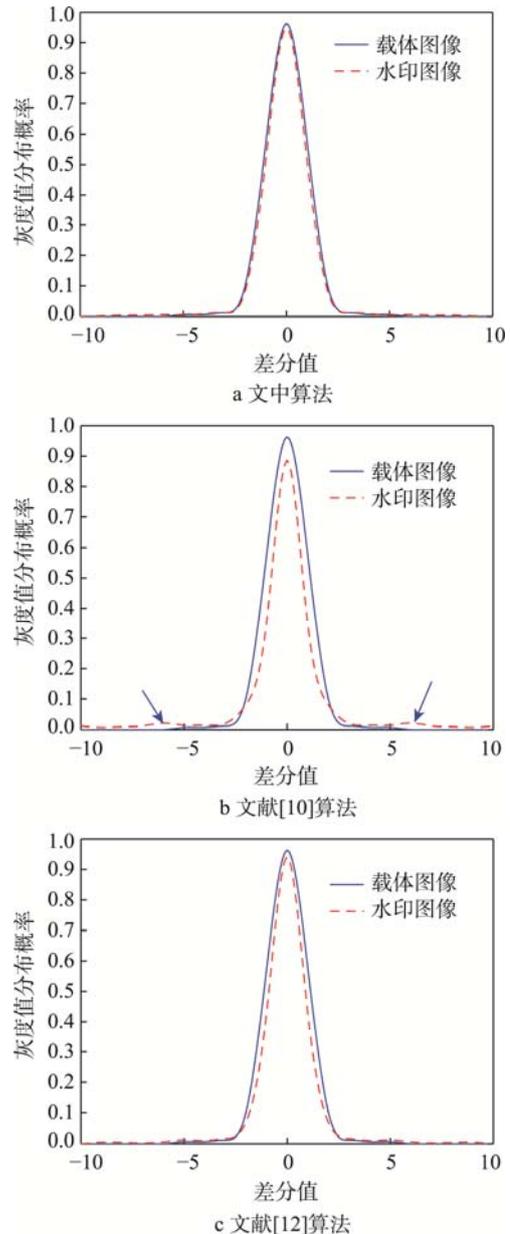


图 11 3 种算法的差分图测试
Fig.11 Differential graph test of three algorithms

表 1 几何失真变换及其参数值
Tab.1 Geometric distortion transformation and its parameter value

名称	角度旋转/(°)	缩放	椒盐噪声	图像中心裁剪
参数值	45	0.5	0.06	15%

所提算法考虑了颜色不变性，并利用概率密度梯度估计替代传统的强度梯度，改进了 SURF 方法，充分提取彩色载体中纹理与非纹理区域的鲁棒特征点，使其检测的特征点分布较为均匀，使得局部椭圆特征区域的鲁棒更好，而且定义鲁棒特征区域选择规则，确定合适的水印嵌入位置，基于鲁棒椭圆特征区域的重要位平面图像直方图所设计的水印嵌入方法来完成水印信息的隐藏，从而增强了水印图像的抗几何失真能力。文献[10]、文献[12]算法均是基于强度梯度，所

表2 3种算法的鲁棒性测试结果
Tab.2 Robustness test results of three algorithms

实验结果	文中算法				文献[10]				文献[12]			
	PNSR/dB	NC	SSIM	复原水印	PNSR/dB	NC	SSIM	复原水印	PNSR/dB	NC	SSIM	复原水印
旋转	48.25	0.983	0.993		46.83	0.963	0.977		47.96	0.979	0.985	
缩放	47.98	0.981	0.987		47.52	0.974	0.981		47.83	0.975	0.983	
椒盐噪声	47.23	0.976	0.984		45.29	0.958	0.962		41.67	0.883	0.891	
中心裁剪	43.64	0.903	0.921		23.58	0.409	0.435		34.17	0.615	0.637	

检测到的特征点分布不均，主要集中在纹理区域，导致检测的特征点分布不均，使其抗局部几何失真能力不理想。

4 结语

为了增强水印算法的抗几何失真能力，文中通过改进 SURF 算子，联合重要位平面直方图，设计了一种新的彩色图像水印技术。考虑彩色图像的颜色不变性，利用概率密度梯度估计替代强度梯度，改进了 SURF 方法，从彩色载体中提取稳定的特征点；并根据概率密度梯度计算的 Hessian 矩阵，构建了椭圆不变局部特征区域，从中选择出鲁棒的特征区域作为水印嵌入位置；最后，根据重要位平面直方图，设计了水印嵌入机制，将水印信息嵌入到椭圆不变局部特征区域的直方图中。实验结果表明了所提水印算法不仅具备较高的不可感知性，同时还具有理想的抗几何失真能力。

由于所提算法所建立的是非重叠的圆形特征区域，限制了算法的水印容量。后续将对圆形特征区域的构建进行优化，增加水印容量。另外，后续还将对彩色图像的颜色空间模型进行分析，确定出一种较优的颜色空间模型进行水印嵌入，并根据选择的颜色空间模型，将结构模板水印信息与认证水印嵌入到不同的颜色通道中，降低色差与扫描过程中的几何变形，以提高算法在印刷图像中的应用价值。

参考文献:

[1] MATHON B, CAYRE F, BAS P. Optimal Transport for Secure Spread-Spectrum Watermarking of Still Images[J]. IEEE Trans Image Process, 2014, 23(4): 1694—1705.
 [2] 李红日, 方逵. 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] 王胜, 解辉, 张福泉. 利用边缘检测与 Zernike 矩的半脆弱图像水印算法[J]. 计算机科学与探索, 2018, 12(4): 629—641.
 WANG Sheng, XIE Hui, ZHANG Fu-quan. Semi-Fragile Image Watermarking Algorithm by Using Edge Detection and Zernike invariant moments[J]. Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2018, 12(4): 629—641.
 [4] ZHANG Xiao-qian, WANG J Z. Spread Spectrum Image Data Hiding in the Encrypted Discrete Cosine Transform Coefficients[J]. Journal of Electronic Imaging, 2013, 22(4): 1—10.
 [5] 包锐, 张天骐, 王玉娥. 基于纠错编码和扩频调制的彩色图像水印算法[J]. 电视技术, 2011, 35(17): 8—11.
 BAO Rui, ZHANG Tian-qi, WANG Yu-e. Color Image Watermarking Algorithm Based on Error Correcting Coding and Spread Spectrum Modulation[J]. Television Technology, 2011, 35(17): 8—11.
 [6] SHARNA A J B, SHARMA K K, PUROHIT S D. Hybrid Watermarking Algorithm Using Finite Radon and Fractional Fourier Transform[J]. Fundamenta Informaticae, 2017, 151(4): 523—543.
 [7] KHALID M H, MOHAMED M D. Invariant Image Watermarking Using Accurate Polar Harmonic Transforms[J]. Computers and Electrical Engineering, 2017, 62(8): 429—447.
 [8] 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.
 [9] RAJESH M, NAVIN R. Robust Image Watermarking Scheme in Lifting Wavelet Domain Using GA-LSVR Hybridization[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2018, 9(1): 145—161.
 [10] 侯翔, 闵连权. 基于 SURF 特征区域的鲁棒水印算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(3):

- 421—426.
HOU Xiang, MIN Lian-quan. Robust Watermarking Algorithm Based on SURF Feature Region[J]. Journal of Wuhan University (Information Science Edition), 2017, 42(3): 421—426.
- [11] SUMMUYYA M, ASIFULLAH K. Robust Image Watermarking Technique Using Triangular Regions and Zernike Moments for Quantization Based Embedding[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(6): 8695—8710.
- [12] WANG Xiang-yang, LIU Yu-nan, HAN Meng-meng. Local Quaternion PHT Based Robust Color Image Watermarking Algorithm [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 38(10): 678—694.
- [13] 陈青, 姚绍华, 陈祥. 基于SURF的NSCT域抗几何攻击水印算法[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 162—167.
CHEN Qing, YAO Shao-hua, CHEN Xiang. SURF Based NSCT Domain Anti Geometric Attack Watermarking Algorithm [J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 162—167.
- [14] ZHILA B, FARDIN A T. A New Robust Video Watermarking Algorithm Based on SURF Features and Block Classification[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(1): 327—345.
- [15] 巩家昌. 基于局部颜色不变性特征的图像复制粘贴篡改取证研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
GONG Jia-chang. Image Copy-Paste and Tamper Forensics Based on Local Color Invariance[D]. Tianjin: Tianjing University, 2015.
- [16] YANG Hong-ying, WANG Pei, WANG Xiang-yang. Robust Digital Watermarking Based on Local Invariant Radial Harmonic Fourier Moments[J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 74(23): 10559—10579.
- [17] 孙达. 基于概率密度的图像处理算法的研究与应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
SUN Da. Research and Application of Image Processing Algorithm Based on Probability Density[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [18] WANG Xiang-yang, NIU Pan-pan, YANG Hong-ying. Affine Invariant Image Watermarking Using Intensity Probability Density-Based Harris Laplace Detector[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2012, 23(6): 892—907.
- [19] TSAI J, HUANG W, KUO Y. Joint Robustness and Security Enhancement for Feature-Based Image Watermarking Using Invariant Feature Regions[J]. Signal Process, 2012, 92(6): 1431—1445.
- [20] CHEN C H, TANG Y L, WANG C P. A Robust Watermarking Algorithm Based on Salient Image Features[J]. Optik-Int J Light Electron Optics, 2014, 125(3): 1134—1140.
- [21] 曲长波, 王东峰. 基于位平面理论和奇异值分解的鲁棒零水印算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(12): 3462—3465.
QU Chang-bo, WANG Dong-feng. Robust Zero Watermarking Algorithm Based on Bit Plane Theory and Singular Value Decomposition[J]. Computer Application, 2014, 34(12): 3462—3465.
- [22] WANG Xiang-yang, LIU Yu-nan. Robust Image Watermarking Approach Using Polar Harmonic Transforms Based Geometric Correction[J]. Neurocomputing, 2016, 174(12): 627—642.
- [23] 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.
- [24] 李淑芝, 龙香玉, 邓小鸿. 结合纹理复杂度和JND模型的图像水印算法[J]. 计算机应用研究, 2018, 36(2): 101—107.
LI Shu-zhi, LONG Xiang-yu, DENG Xiao-hong. Image Watermarking Algorithm Combining Texture Complexity and JND Model[J]. Application Research of Computers, 2018, 36(2): 101—107.