

基于结构森林边缘和 SIFT 的鲁棒水印算法

刘颖^{1,2}, 杨星^{1*}, 朱婷鸽^{1,2}

¹西安邮电大学通信与信息工程学院, 陕西 西安 710121;

²电子信息现场勘验应用技术公安部重点实验室, 陕西 西安 710121

摘要 为了均衡水印的视觉不可见性与鲁棒性, 解决数字多媒体产品的版权保护和内容认证问题, 提出了一种基于结构森林边缘与尺度不变特征转换(SIFT)的鲁棒水印算法。首先, 将彩色图像从 RGB 颜色空间转换到 Lab 颜色空间, 并提取 L 分量的 1024 个 SIFT 稳定点作为水印的嵌入位置; 然后利用训练好的随机决策森林模型提取图像边缘作为水印图像, 对水印图像进行离散小波变换(DWT) 得到低频子带, 将低频子带划分成不重叠的子块, 得到每个子块的最大值并利用 Arnold 变换进行加密。实验结果表明, 所提算法具有良好视觉不可见性的同时, 能够有效地抵抗剪切、斑点噪声、运动模糊等攻击, 具有较好的鲁棒性, 并且有效地保护了图像的原始边缘特征。

关键词 机器视觉; 视觉不可见性; 版权保护; 内容认证; 结构森林边缘; Arnold 变换

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0615006

Robust Watermarking Algorithm Based on Structured Forests Edge and SIFT

Liu Ying^{1,2}, Yang Xing^{1*}, Zhu Tingge^{1,2}

¹ School of Communication and Information Engineering, Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an, Shaanxi 710121, China;

² Key Laboratory of Electronic Information Application Technology for Scene Investigation, Ministry of Public Security, Xi'an, Shaanxi 710121, China

Abstract To balance the vision imperceptibility and robustness of a watermark and address copyright protection and content authentication issues in digital multimedia products, this study proposes a robust watermarking algorithm that is based on structured forests edge and the scale invariant feature transform (SIFT). First, a color image is converted from an RGB space to a Lab space, and the 1024 stable SIFT points are extracted based on an L component as the embedding position of watermark. Second, the image edge is extracted using a trained random decision forest model as the watermark image that is decomposed by the discrete wavelet transform (DWT) to obtain a low-frequency sub-band that is divided into nonoverlapping blocks. The maximum values of the blocks are obtained and encrypted using the Arnold transform. Experimental results show that the proposed algorithm exhibits better imperceptibility and robustness to resist various attacks, such as cropping, speckle noise, and motion blur, in comparison with other related algorithms. Furthermore, it effectively protects the original edge features of an image.

Key words machine vision; vision imperceptibility; copyright protection; content authentication; structured forests edge; Arnold transform

OCIS codes 150.0155; 100.3008; 110.2970

收稿日期: 2020-07-21; 修回日期: 2020-09-17; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0803805)、国家自然科学基金(61801381)、公安部科技强警项目(2019GABJC41)、研究生创新基金重大项目(CXJJLD2019023)

* E-mail: 1830850314@qq.com

1 引言

互联网和多媒体技术的飞速发展和图像处理工具的强大,使得数字多媒体内容的非法复制、篡改及盗版现象越来越严重,造成了很多版权纠纷。数字水印技术^[1-2]成为解决这些问题的关键技术,它在版权保护、内容认证、隐匿通信、真伪鉴别等方面应用广泛。

现有的变换域水印算法,如分数阶傅里叶变换(FRFT)^[3]、离散余弦变换(DCT)^[4-5]等虽然提高了水印的鲁棒性,但是图像视觉质量和嵌入容量下降。为了寻求视觉不可见性和鲁棒性之间的平衡,文献[6]提出了一种基于特征分类森林的自适应盲水印算法,该算法利用水印图像的特征建立关联规则,并将规则嵌入到载体图像中,代替以往水印像素的嵌入,但图像的视觉效果差,嵌入容量小。文献[7]提出了一种新颖的基于扩频的图像自适应水印技术,该技术将图像分块后求取熵。由于高熵区域图像的高复杂性和不确定性降低了图像的视觉效果,因此对高熵块进行离散小波变换(DWT),选择低频系数嵌入水印,水印的强度因子可以灵活地调整,但是图像抵抗几何攻击的能力很弱。文献[8]利用具有亮度和纹理特征的视觉掩盖技术来自适应地调整水印的嵌入强度,虽然视觉提高了,但是图像难以很好地抵抗一些几何攻击。综上可知,这些自适应算法都是一些将一幅完整的图像作为水印的嵌入区域的全局水印算法^[9-11]。经大量实验研究发现,嵌入区域的选择至关重要。局部水印算法^[12-13]利用原始图像的特征点,如尺度不变特征转换(SIFT)、加速稳健特征(SURF)等定位嵌入区域,然后和其他变换域算法结合嵌入水印。文献[14]在非下采样 Contourlet(NSCT)域对图像进行变换,选取低频子带提取的 SIFT 稳定点作为嵌入位置,解决了嵌入区域的定位与同步问题,该算法对缩放攻击的鲁棒性很好,但该特征点对图像本身的修改不理想,对剪切攻击的抵抗力很差。

基于水印的视觉不可见性和鲁棒性无法均衡问题,本文提出了一种自适应鲁棒水印算法。采用局部嵌入技术,利用 Hessian 矩阵消除不稳定的点,并提取图像的 1024 个 SIFT 稳定点构造矩阵作为水印的嵌入位置;同时使用结构森林边缘作为水印图像,对水印图像进行一级 DWT,然后对低频子带进行分块,选择每个子块的最大值作为嵌入的水印信息并进行 Arnold 加密。实验结果表明,所提算法具

有良好的视觉不可见性和较强的鲁棒性,在两者之间达到了平衡。

2 基于结构森林边缘和 SIFT 的水印算法

为了解决数字多媒体的版权保护问题,防止盗版和专利侵权等现象,提出了一种基于结构森林边缘和 SIFT 的自适应鲁棒水印算法。该算法分为 4 部分,第 1 部分是 SIFT 特征点的提取,主要目的是获取 1024 个 SIFT 稳定点位置,即水印的嵌入位置。第 2 部分是水印的获取与加密。利用机器学习中的结构化随机森林,将彩色图像输入到训练好的模型中得到灰度边缘,然后进行二值化得到原始图像的边缘,对边缘图像进行 DWT 得到低频子带 LL_1 ,然后将 LL_1 分成 8×8 不重叠的子块,得到子块的最大值并进行 Arnold 变换,将加密后的图像作为水印信息。第 3 部分是水印的嵌入,选择 Lab 颜色空间来嵌入数字水印图像,其三个通道是正交且相互独立的。Lab 颜色空间^[15]的 L 分量表示亮度,它与人类对亮度的感知性最接近,表示从黑到白。第 4 部分是水印的提取。

2.1 SIFT 特征点的提取

为了平衡水印的不可见性和鲁棒性,使用彩色图像 L 分量的 1024 个 SIFT 稳定点作为水印的嵌入位置,其目的是保证水印的视觉不可见性和鲁棒性。虽然 SURF 算子和 SIFT 算子都可以提取特征点,但 SURF 运算速度更快,SIFT 稳定性更高,因此采用 SIFT 算子提取局部特征点。SIFT 特征点对旋转、尺度缩放、亮度等保持不变性,对噪声等具有一定程度的稳定性。SIFT 算子能够提取多个特征点,主要提取过程为构造尺度空间、高斯差分(DOG)金字塔空间极值检测、剔除不稳定点和边缘响应点、确定特征点的主方向。提取特征点的流程如图 1 所示。

2.2 水印图像获取及加密

为了使原始图像本身信息保持完整性,提取彩色图像的结构森林边缘^[16-18]作为水印图像,为后期图像检索、分割、分类等提供原始的边缘纹理特征。结构森林边缘广泛用于图像处理中,它能够有效地区分背景和细节边缘的差异,提取的边缘鲁棒性很强,解决了原始图像在传播过程中的噪声干扰问题,是计算机视觉中前沿的边缘提取算法。同时为了提高水印方案的安全性,应将水印图像在嵌入之前加密,这样即使非法获取了水印的提取算法,也会因为

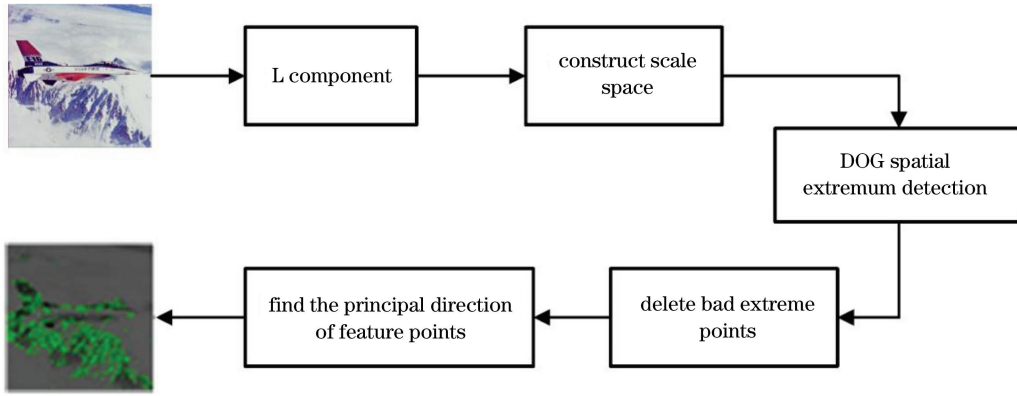


图 1 SIFT 算子提取 1024 个稳定点的流程

Fig. 1 Flow chart of SIFT operator extracting 1024 stable points

不清楚密钥而无法获得正确的水印信息。

水印图像获取通过结构森林边缘算法,其原理是:先训练一个随机决策森林,然后向已经训练完成的决策模型输入整幅图像 \mathbf{X} 分割的像素块 x ,得到分类结果 $y \in \mathbf{Y}$,其中 \mathbf{Y} 表示标签空间。给定一个节点 n ,其训练集 $S_n \subset \mathbf{X} \times \mathbf{Y}$ 。训练决策森林的目的是找到分离函数 $h(x, \theta_n)$ 的参数 θ_n ,使数据有“良好”分割。

$$h(x, \theta_n) = [x(k) < \gamma], \quad (1)$$

式中: $\theta = (k, \gamma)$, k 为 x 的某一量化特征,每个特征有一个单独的阈值 γ 。选择分离参数 θ_n ,以最大化信息增益 $I_n = I(S_n, S_n^L, S_n^R)$,然后递归训练。使用 $S_n^R = S_n / S_n^L$ 训练右节点,使用 $S_n^L = \{(x, y) \in S_n | h(x, \theta_n) = 0\}$ 训练左节点,直至达到最大的树深度。

水印图像获取及加密具体过程如下所示。

1) 将平滑滤波后的彩色图像 \mathbf{I} (大小为 $N \times N$) 输入到训练好的决策模型中进行边缘检测,得到图像的灰度边缘,对灰度边缘进行二值化得到水印图像,用 \mathbf{W}_{Ed} 表示,其大小为 $N \times N$ 。

2) 对水印图像 \mathbf{W}_{Ed} 进行一级 DWT 得到低频子带 LL_1 , 将 LL_1 分成 8×8 不重叠的子块 \mathbf{B}_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, N/16$, 则嵌入的水印信息为 $\mathbf{W}_{\text{LL}_1} = \mathbf{B}_{ij\text{max}}$, $i, j = 1, 2, \dots, N/16$ 。其中 $\mathbf{B}_{ij\text{max}}$ 为每个子块 \mathbf{B}_{ij} 64 个像素中的最大值。

3) 对 \mathbf{W}_{LL_1} 进行 Arnold 变换,经过加密处理后水印信息 \mathbf{W}_{LL_1} 的大小为 $(N/16) \times (N/16)$ 。

2.3 水印嵌入

一幅图像的背景越亮,人类对像素的改变越不敏感,人眼对图像改变的可见性越低,那么所嵌入的水印强度就越大。图像纹理复杂区域对水印的承受

能力比较强,提高水印的嵌入强度,从而增强了水印的鲁棒性,但是并不会影响图像的视觉质量。水印的具体嵌入步骤如下所示,水印的嵌入流程如图 2 所示。

1) 将彩色图像 \mathbf{I} 转换到 Lab 颜色空间,并提取 L 通道的图像 \mathbf{I}_L 。

2) 使用 SIFT 算子提取图像 \mathbf{I}_L 中 1024 个稳定特征点,确定嵌入位置。根据特征点的位置坐标获取像素值,得 1×1024 维序列,并转换成 32×32 的矩阵 \mathbf{A} 。对 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{M \times M}$ 进行奇异值分解 (SVD)。

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{U} \in \mathbf{R}^{M \times M}$ 、 $\mathbf{V} \in \mathbf{R}^{M \times M}$ 分别为左、右奇异矢量; $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{M \times M}$ 为奇异值矩阵,表示图像的能量或者亮度,奇异值 S_i 满足 $S_1 \geq S_2 \geq S_3 \geq \dots \geq S_M \geq 0$ 。SVD 在图像处理中具有很好的稳定性能。当图像遭受了微小的干扰,图像数据的奇异值几乎很难发生改变。

3) 根据水印嵌入的加性原则,在 \mathbf{S} 中添加 \mathbf{W}_{LL_1} , 完成嵌入。

$$\mathbf{S}_w = \mathbf{S} + \alpha \mathbf{S}_{\text{LL}}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{W}_{\text{LL}_1} = \mathbf{U}_{\text{LL}} \mathbf{S}_{\text{LL}} \mathbf{V}_{\text{LL}}^T$, α 为嵌入强度因子,根据原始图像的纹理特征可任意调整的常数; \mathbf{S}_w 为嵌入水印信息的奇异值矩阵。

4) 对 (2) 式中的 \mathbf{U} 、 \mathbf{V} 和 \mathbf{S}_w 进行逆奇异值分解,得到含水信息的矩阵 \mathbf{A}_1 。

5) 将含有水印信息的矩阵 \mathbf{A}_1 降维到 1×1024 维序列,替换原始图像的特征点,得到 Lab 颜色空间 L 通道含有水印信息的图像 \mathbf{I}'_L , 再将图像 \mathbf{I}'_L 由 Lab 颜色空间转换到 RGB 颜色空间,得到含有水印信息的图像 \mathbf{I}_w 。

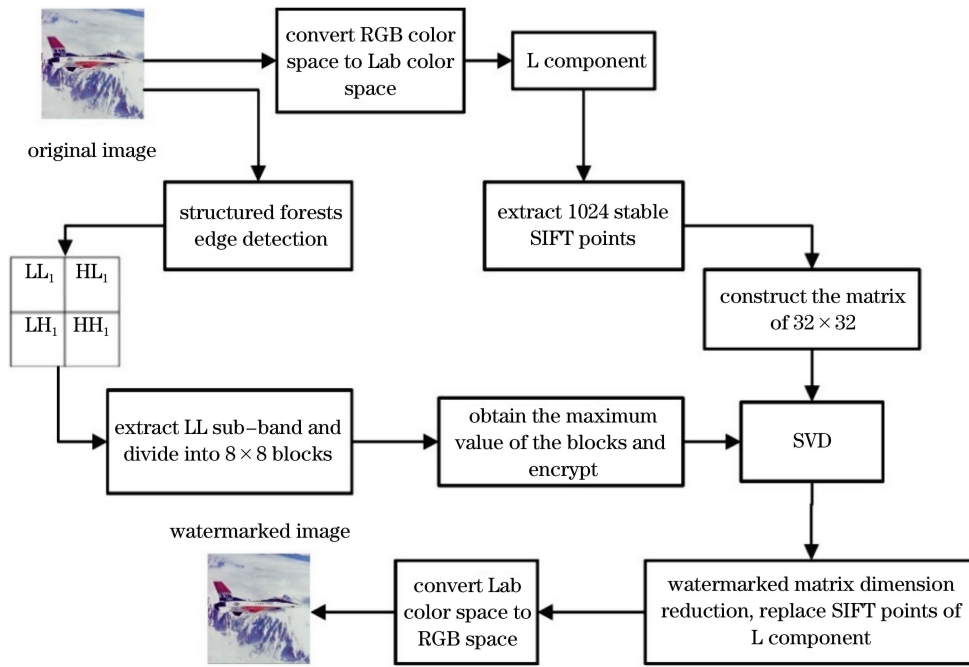


图 2 水印嵌入流程图

Fig. 2 Flow chart of watermark embedding

2.4 水印提取

含水印信息的图像 I_w 的大小为 $N \times N$, 具体嵌入步骤如下所示, 水印提取流程如图 3 所示。

1) 将含水印信息的图像 I_w 由 RGB 空间转换到 Lab 空间, 并提取 L 通道的图像 I_{wL} 。

2) 从图像 I_{wL} 的 1024 个嵌入位置提取相应的像素值, 得 1×1024 维序列, 并转换为矩阵 A_{w2} , 对 A_{w2} 进行奇异值分解, 得到含水印信息的奇异值矩阵 S_{w2} 。

3) 由(3)式可以得出 $S_{ext} = |S_{w2} - S| / \alpha$, S_{ext} 为提取的水印信息的奇异值矩阵, 则提取的水印信息为

$$W_{ext} = U_{LL} S_{ext} V_{LL}^T \quad (4)$$

4) 对 W_{ext} 进行 Arnold 逆变换, 然后替换 2.2 节中每个子块 B_{ij} 的最大值构成的矩阵, 得到低频子带 LL_{new} , 并与经 DWT 所得的其他 3 个子带进行离散小波逆变换, 得到提取的水印图像 W'_{Ed} 。

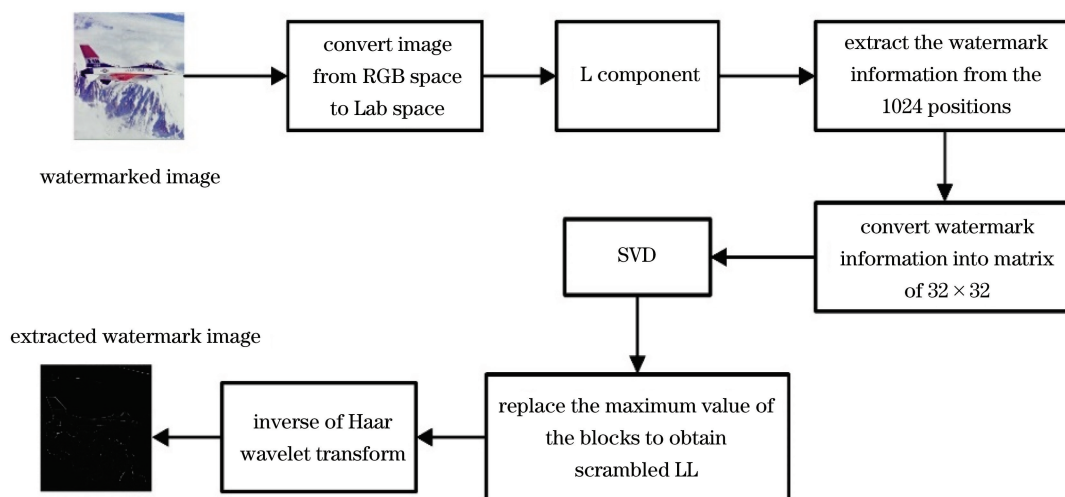


图 3 水印提取流程图

Fig. 3 Flow chart of watermark extraction

3 实验结果与分析

使用 Matlab 2016a 软件进行实验仿真,从 SIPI 图像数据库中选择 4 幅具有不同边缘特征的 512×512 彩色图像,分别为 Lena、Peppers、Plane 和 Mandrill,如图 4(a)~(d)所示。图 5 为水印图像,水印图像大小为 512×512 ,经过处理后嵌入的水印信息的大小为 32×32 。图 5(a)~(d)依次为图 4(a)~(d)对应的结构森林边缘图像,即水印图像。

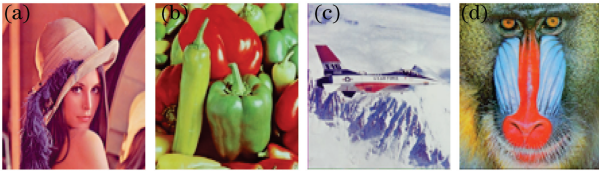


图 4 载体图像。(a) Lena; (b) Peppers; (c) Plane; (d) Mandrill

Fig. 4 Cover images. (a) Lena; (b) Peppers; (c) Plane; (d) Mandrill

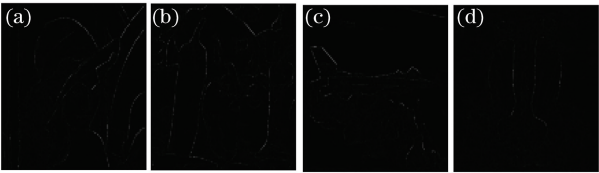


图 5 水印图像。(a) Lena_W; (b) Peppers_W; (c) Plane_W; (d) Mandrill_W

Fig. 5 Watermark images. (a) Lena_W; (b) Peppers_W; (c) Plane_W; (d) Mandrill_W

3.1 水印系统性能评价指标

使用三个参数作为水印系统性能评价指标^[19-21]。使用峰值信噪比(PSNR)评价含水印图像的视觉不可见性;将相关系数(NC)作为水印图像鲁棒性的评价指标;使用结构相似度(SSIM)来测量两幅图像之间的结构相似性,进而确定图像的失真程度。

$$R_{\text{PSN}} = 10 \times \lg \frac{(2^m - 1)^2}{1/M \times N \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [\mathbf{X}(i, j) - \mathbf{Y}(i, j)]^2}, \quad (5)$$

$$C_N = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{W}(i, j) \mathbf{W}'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{W}^2(i, j)} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \mathbf{W}'^2(i, j)}}, \quad (6)$$

$$S_{\text{SIM}}(x, y) = \frac{(2\mu_x \mu_y + C_1)(2\sigma_{xy} + C_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2)}, \quad (7)$$

式中: M 和 N 分别为图像的高度和宽度; $m=8$ 表示一个像素用 8 bit; $\mathbf{X}(i, j)$ 为原始图像; $\mathbf{Y}(i, j)$ 为经过处理后的图像; $\mathbf{W}(i, j)$ 为水印图像,即结构森林边缘图像; $\mathbf{W}'(i, j)$ 为从含水印图像中提取的水印图像; C_1, C_2 均为常数项; μ_x, μ_y 为原始图像 \mathbf{X} 和经过处理后图像 \mathbf{Y} 的平均灰度值; σ_x, σ_y 为标准偏差; σ_{xy} 为互协方差。

3.2 未攻击时视觉不可见性和鲁棒性测试分析

所提算法的目的是将水印嵌入到原始图像用于标识图像的版权信息,在未攻击的情况下,分别对 4 种含水印图像进行 PSNR、NC、SSIM 测试,以衡量水印算法性能,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出:就视觉不可见性和结构相似性来看,PSNR 均在 55 dB 以上,SSIM 均为 1,表明含水印图像的视觉质量良好,与原始载体图像相比,没有出现明显的失真,保真度高;就鲁棒性来看,水印的 NC 均为 1,表明提取的水印图像和原始水印图像完全相同,所提算法具有很强的鲁棒性。

表 1 未攻击下含水印图像的测试结果

Table 1 Test results of watermarked images without attacks

Parameter	Lena	Peppers	Plane	Mandrill
PSNR /dB	55.39	56.18	59.43	58.33
NC	1	1	1	1
SSIM	1	1	1	1

为了验证所提算法的优越性,在未受到攻击情况下,对所提算法、文献[8]、[22]中的算法进行对比实验,结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,在同样使用颜色空间转换、DWT、SVD 的情况下,所提算法的 PSNR 大于文献[8]、[22]中的算法,表明所提算法具有优良的视觉不可见性。载体图像嵌入水印后的视觉质量良好,达到了隐藏水印信息的目的。就鲁棒性而言,所提算法的 NC 均为 1,提取的水印与原始水印图像完全相同;而文献[8]、[22]中的算法提取的水印图像 NC 值在 0.9602 到 0.9921 之间,鲁棒性略小于所提算法。

表 2 未攻击下不同载体图像的对比结果

Table 2 Comparison results of different cover images without attacks

Algorithm	Lena		Peppers		Plane		Mandrill	
	PSNR /dB	NC	PSNR /dB	NC	PSNR /dB	NC	PSNR /dB	NC
Proposed algorithm	55.39	1	56.18	1	59.43	1	58.33	1
Algorithm in Ref. [8]	47.96	0.9775	47.34	0.9602	44.52	0.9830	48.34	0.9793
Algorithm in Ref. [22]	52.34	0.9889	53.21	0.9891	50.96	0.9883	54.69	0.9921

3.3 不同攻击下鲁棒性测试分析

为了更好地验证水印方案的鲁棒性,对含水印图像进行了不同类型的攻击:椒盐噪声(噪声密度 d 取 0.01, 0.03)、高斯噪声(方差 var 取 0.005, 0.01)、剪切(20 列、30 列、40 列)、JPEG 压缩(质量因子 Q 取 0.5、0.7)、中值滤波(窗口[3,3])、直方图均衡化、旋转(45°)、均值滤波(窗口[3,3])、锐化、对

比度调整、斑点噪声(方差 var 取 0.01, 0.05)、运动模糊、高斯滤波(窗口[3,3]),测试结果如表 3 所示。由表 3 可以看出,在对含水印图像进行攻击后,提取出来的水印图像 NC 值在 0.95 以上,特别对于剪切、JPEG 压缩、斑点噪声,随着攻击强度的增强,NC 值的变化幅度很小,均接近于 1,与原始水印图像高度相关,表明所提算法具有较好的鲁棒性。

表 3 各种攻击下提取的水印 NC 值

Table 3 NC values of the extracted watermarks against various attacks

Attacks	Lena	Peppers	Plane	Mandrill
No attack	1	1	1	1
Salt & pepper noise($d=0.01$)	0.9824	0.9867	0.9859	0.9825
Salt & pepper noise($d=0.03$)	0.9585	0.9593	0.9591	0.9608
Gaussian noise ($m=0$, var is 0.005)	0.9893	0.9809	0.9826	0.9972
Gaussian noise ($m=0$, var is 0.01)	0.9601	0.9700	0.9717	0.9961
Cropping (20 columns)	0.9987	0.9954	0.9972	0.9964
Cropping (30 columns)	0.9979	0.9927	0.9963	0.9945
Cropping (40 columns)	0.9917	0.9936	0.9949	0.9908
JPEG compression ($Q=50$)	0.9954	0.9982	0.9963	0.9975
JPEG compression ($Q=70$)	1	0.9991	1	0.9984
Median filter (3×3)	0.9870	0.9889	0.9907	0.9861
Sharpening	0.9927	0.9842	0.9993	0.9878
Histogram equalization	0.9552	0.9982	0.9692	0.9576
Rotation (45°)	0.9829	0.9748	0.9599	0.9767
Average filter (3×3)	0.9629	0.9879	0.9879	0.9824
Contrast adjustment	0.9889	0.9936	0.9916	0.9962
Speckle noise (var is 0.01)	0.9907	0.9926	0.9946	0.9975
Speckle noise (var is 0.05)	0.9963	0.9935	0.9958	0.9963
Motion blur	0.9842	0.9879	0.9757	0.9861
Gaussian filter (3×3)	0.9761	0.9889	0.9898	0.9870

3.4 与相关算法的对比实验

为了验证所提算法的鲁棒性,选取图像 Lena 和文献[19]、[23]中的图像进行对比,结果如图 6 所

示。由图 6 可以看出:攻击后提取的水印图像 NC 值在 0.96 以上,在椒盐噪声密度为 0.01 和高斯噪声方差为 0.01 时略小于文献[19]中图像的 NC 值;

在剪切 40 列和 JPEG 压缩质量因子为 50 时略小于文献[23]中图像的 NC 值;其他情况下所提算法得到的水印图像 NC 值高于文献[19]、[23]中的图像,表明了所提算法的可行性和有效性。

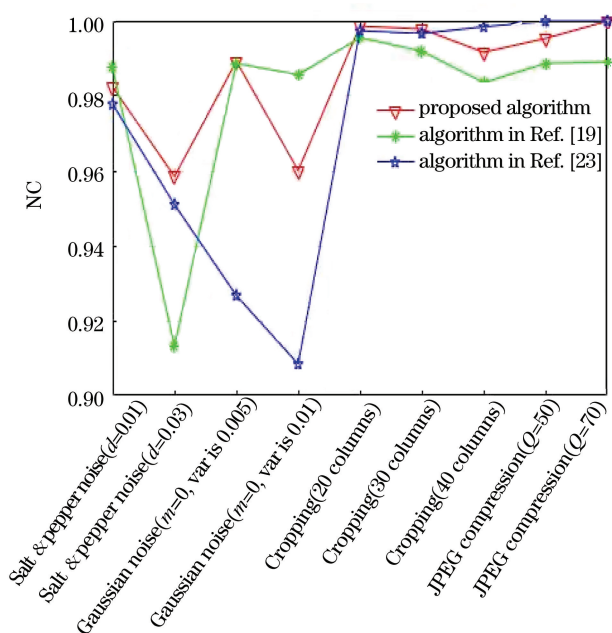


图 6 在不同攻击下提取的水印 NC 值

Fig. 6 NC values of the extracted watermark against different attacks

4 结 论

运用数字水印技术的主要目的是开发一种有效的水印方案,以保护高质量的数字图像免受各种攻击。提出了一种基于结构森林边缘和 SIFT 的自适应鲁棒水印算法,该算法能够有效地解决数字多媒体产品的版权保护和内容认证问题。将彩色图像转换到 Lab 空间,使用局部嵌入算法,将在 L 分量上提取的 SIFT 稳定点作为水印的嵌入区域,然后将 DWT 和 Arnold 变换加密处理后的水印信息自适应地嵌入到特征区域,保证了水印的安全性、水印提取位置和嵌入位置的同步性。与其他同类算法相比,所提算法处理的含水印载体图像具有较高的 PSNR,图像视觉质量良好,而且能够抵抗多种不同的攻击,具有良好的视觉不可见性和较强的鲁棒性,在两者之间达到了平衡,同时也有效地保护了图像的原始边缘特征。接下来会继续优化算法框架,降低算法的复杂度,同时增加 SIFT 稳定点的个数,提高嵌入容量。

参 考 文 献

- [1] Kumar A, Santhi V. A review on geometric invariant digital image watermarking techniques [J]. International Journal of Computer Applications, 2011, 12(9): 31-36.
- [2] Mohrekech M, Azizi S, Shirani S, et al. Hierarchical watermarking framework based on analysis of local complexity variations [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(23): 30865-30890.
- [3] Singh P, Raman B, Misra M. A secure image sharing scheme based on SVD and fractional Fourier transform [J]. Signal Processing: Image Communication, 2017, 57: 46-59.
- [4] Parah S A, Sheikh J A, Loan N A, et al. Robust and blind watermarking technique in DCT domain using inter-block coefficient differencing [J]. Digital Signal Processing, 2016:11-24.
- [5] Kang X B, Zhao F, Lin G F, et al. A novel hybrid of DCT and SVD in DWT domain for robust and invisible blind image watermarking with optimal embedding strength [J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(11): 13197-13224.
- [6] Chang C S, Shen J J. Features classification forest: a novel development that is adaptable to robust blind watermarking techniques [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(8): 3921-3935.
- [7] Yadav N, Singh K. Robust image-adaptive watermarking using an adjustable dynamic strength factor [J]. Signal, Image and Video Processing, 2015, 9(7): 1531-1542.
- [8] Roy A, Maiti A K, Ghosh K. An HVS inspired robust non-blind watermarking scheme in YCbCr color space [J]. International Journal of Image and Graphics, 2018, 18(3): 1850015.
- [9] Veni M, Meyyappan T. Digital image watermark embedding and extraction using oppositional fruit Fly algorithm [J]. Multimedia Tools and Applications, 2019, 78(19): 27491-27510.
- [10] Ishtiaq M, Ali W, Shahzad W, et al. Hybrid predictor based four-phase adaptive reversible watermarking [J]. IEEE Access, 2018, 6: 13213-13230.
- [11] Lu R B, Chen L Y, Ding L, et al. Adaptive and robust watermarking scheme based on Contourlet domain coefficients suppositional tree model and FOA-SVR [J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(3): 674-679.
- [12] Zhang L, Tang B. A combination of feature-points-鲁荣波, 陈留洋, 丁雷, 等. 基于 Contourlet 域虚拟树结构和 FOA-SVR 的自适应鲁棒数字水印算法 [J]. 电子学报, 2017, 45(3): 674-679.
- [1] Kumar A, Santhi V. A review on geometric invariant

- based and SVD-based image watermarking algorithm [C] // 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, August 23-25, 2012, Xi'an, China. New York: IEEE Press, 2012: 1092-1095.
- [13] Ye X Y, Chen X T, Deng M, et al. A SIFT-based DWT-SVD blind watermark method against geometrical attacks [C] // 2014 7th International Congress on Image and Signal Processing, October 14-16, 2014, Dalian, China. New York: IEEE Press, 2014: 323-329.
- [14] Zhang J L, Li M, He Y J. Image watermarking algorithm against attacks based on SIFT feature point and cross-ratio value [J]. Journal on Communications, 2014, 35(11): 170-181.
张金利, 李敏, 何玉杰. 基于 SIFT 特征点和交比值的水印图像抗攻击算法[J]. 通信学报, 2014, 35(11): 170-181.
- [15] Yang C, Liu B Y. Image foreground-background separation based on texture features extracted in Lab color space[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 121001.
杨超, 刘本永. 基于 Lab 颜色空间纹理特征的图像前后景分离[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 121001.
- [16] Gao J Y, Xu H L, Shao K L, et al. An adaptive edge detection method based on local edge feature descriptor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(6): 0604003.
高佳月, 许宏丽, 邵凯亮, 等. 基于局部边缘特征描述子的自适应边缘检测算法[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 0604003.
- [17] Dollár P, Zitnick C L. Structured forests for fast edge detection [C] // 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, December 1-8, 2013, Sydney, NSW, Australia. New York: IEEE Press, 2013: 1841-1848.
- [18] Ma Q Q, Wang C F. Non-local stereo matching algorithm based on color and edge information [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101020.
马晴晴, 王彩芳. 基于颜色和边缘信息的非局部立体匹配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101020.
- [19] Zhu T G, Cao H L, Liu Y, et al. Dual watermarking algorithm for color image based on improved color space [J]. Control and Decision, 2019, 34(6): 1141-1150.
朱婷鸽, 曹海龙, 刘颖, 等. 基于改进颜色空间的彩色图像双水印算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(6): 1141-1150.
- [20] Sandaruwan G W R, Ranathunga L. Robust and adaptive watermarking technique for digital images [C] // 2017 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), December 15-16, 2017, Peradeniya, Sri Lanka. New York: IEEE Press, 2017.
- [21] Verma V S, Jha R K, Ojha A. Digital watermark extraction using support vector machine with principal component analysis based feature reduction [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2015, 31: 75-85.
- [22] Singh D, Singh S K. DWT-SVD and DCT based robust and blind watermarking scheme for copyright protection [J]. Multimedia Tools and Applications, 2017, 76(11): 13001-13024.
- [23] Roy, S, Pal, A K. A blind DCT based color watermarking algorithm for embedding multiple watermarks [J]. AEU - International Journal of Electronics and Communications, 2017, 72: 149-161.