

DOI:10.16136/j.joel.2022.03.0464

采用几何校正优化的轮廓波水印算法

郑秋梅^{1*}, 陈亚茹¹, 林 超²

(1. 中国石油大学(华东) 计算机科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油大学(华东) 信息化建设处, 山东 青岛 266580)

摘要:针对目前的图像水印难以同时抵抗常规攻击和几何攻击的不足,提出一种新的轮廓波水印算法。水印嵌入阶段,该方法将宿主图像进行离散小波变换和非下采样轮廓波变换,并将水印嵌入到熵值最大的高频子带,解决了将水印嵌入低频无法抵抗几何攻击及高频不能很好抵抗滤波等常规攻击的问题。在水印嵌入前对嵌入区域进行加密处理,提高算法的安全性。水印提取阶段,利用 Zernike 矩对含水印图像进行几何校正再进行提取,进一步提高了算法的抗几何攻击能力。最后利用峰值信噪比和归一化系数对算法进行评价,验证算法的不可感知性和鲁棒性。仿真实验结果表明,算法在不同的宿主图像和水印图像上均表现良好。该算法在具有较好不可见性的基础上,除了对常规攻击具有很好的抵抗力,对几何攻击也具有强鲁棒性,归一化系数(normalization coefficient, NC)均达到了 0.99 以上。

关键词:图像水印; 非下采样轮廓波变换; 几何校正; 鲁棒性

中图分类号: TP309.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)03-0330-07

Contourlet watermarking algorithm based on geometric correction optimization

ZHENG Qiumei^{1*}, CHEN Yaru¹, LIN Chao²

(1. College of Computer Science and Technology, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Information Construction Department, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong 266580, China)

Abstract: In view of the fact that the current robust watermarking is difficult to resist both conventional attacks and geometric attacks, a new contourlet watermarking algorithm is proposed. In this watermark embedding stage, the host image is transformed by discrete wavelet transform and non-subsampled contourlet transform, and the watermark is embedded into the high frequency subband with the maximum entropy, which solves the problems that embedding the watermark in the low frequency can not resist geometric attacks and high frequency can not resist conventional attacks such as filtering. The embedded area is encrypted before the watermark is embedded, which improves the security of the algorithm. In the watermark extraction stage, the watermark is geometrically corrected and extracted by using Zernike moments, which further improves the anti-geometric attack ability of the algorithm. Finally, the algorithm is evaluated by peak signal-to-noise ratio and normalized coefficient to verify the imperceptibility and robustness of the algorithm. Simulation results show that the algorithm performs well on different host images and watermark images. On the basis of good invisibility, the algorithm not only has good resistance to conventional attacks such as filtering and noise, but also has strong robustness to geometric attacks such as translation and rotation, and the normalization coefficient (NC) value is more than 0.99.

Key words: image watermarking; non-subsampled contour transform; geometric correction; robustness

* E-mail: zhengqiumei@upc.edu.cn

收稿日期: 2021-07-01 修订日期: 2021-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(52074341, 51874340)资助项目

1 引言

数字水印^[1-3]据水印的嵌入域分为变换域水印和空间域水印。变换域水印通过修改宿主图像的变换域系数实现水印的嵌入,相比空间域水印算法具有更好的抗攻击能力。变换域水印^[4-6]通常选择变换后的低频或者中高频区域作为水印的嵌入位置,低频子带嵌入可以保证算法一定的鲁棒性,中高频子带嵌入不影响宿主图像的视觉效果,但是这两类水印算法均存在抗几何攻击能力差的问题。

ANSARI等^[7]将水印嵌入到宿主图像经离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)后的低频子带,低频子带包含了图像的大部分能量,使算法可以有效地抵抗噪声和压缩等攻击,但由于方向滤波类型的限制,小波变换不能有效地表示图像的方向信息,导致算法的抗几何攻击能力差。针对DWT变换缺乏平移不变性的特点,马婷等^[8]将非下采样轮廓波变换(non-subsampled contourlet transform, NSCT)与DWT变换相结合提出了一种混合域强鲁棒水印算法,结合NSCT和DWT的优点,使算法在抗压缩方面表现出了较好的稳健性,与文献[7]类似,因为水印的嵌入位置是缺乏方向轮廓信息的低频子带,其抗旋转、缩放攻击的能力有待提升。针对水印抗几何攻击能力低的问题,学者们提出了许多的方法去解决,主要可以分为2类。一类是基于特征点提取的水印算法,通过利用图像中稳定的特征点,来提高水印的抗几何攻击的鲁棒性。周琳等^[9]提出了一种利用Blob-Harris算子提取特征点构建水印嵌入区域的水印算法,相较于文献[7]和[8],利用特征点使算法抗旋转和缩放的能力有了进一步提高,但是此类算法计算量大,复杂度高,并且效果并不理想。另一类是基于几何校正的水印算法。几何攻击会打破水印与图像的同步性,利用不变矩对图像进行几何校正可以在一定程度上提高水印的鲁棒性。陈莹和孔凡芝等^[10,11]利用Zernike矩对图像进行旋转校正。Zernike矩可以根据相位信息估算图像的旋转角度,为算法提供了较好的抗旋转攻击能力。但是,算法没有提供较好的抗常规攻击的鲁棒性。因此,如何使图像在遭受到不同类型的常规攻击和几何攻击后,均能提取出有效的水印信息,是当前主要的研究内容。

综上分析,本文提出了一种结合几何校正方法的DWT-NSCT水印算法。将几何校正技术与变换域算法相结合,利用NSCT变换的平移不变性、多尺度和多方向性的特点,对DWT变换后的

近似子带进行NSCT变换,选择包含更多方向轮廓信息的高频子带作为水印嵌入区域,同时利用Zernike矩对图像进行旋转校正进一步优化算法。实验表明该算法对常规攻击和几何攻击均具有强鲁棒性。

2 基本原理

2.1 DWT

DWT^[12]是一个多尺度信号分析方法,具有多分辨率和局部信号分析等特点。DWT将图像分解成四个大小相等的子带,其中高频子带则包含图像的纹理特征和边缘信息,低频子带是图像的近似子带,包含图像大部分能量,将水印嵌入这一区域,水印算法具有较好的鲁棒性。

2.2 NSCT

NSCT^[13]是一种能有效逼近图像特征并且很好地捕捉图像特征的快速变换,由非下采样塔式滤波器(non-subsampled pyramid, NSP)和非下采样方向滤波器组(non-subsampled directional filter bank, NSDFB)2部分组成。其中NSP对图像进行多尺度分解,NSDFB对高频部分进行多方向分解,使得NSCT变换具有平移不变性、多尺度和多方向性的特点。

2.3 奇异值分解(singular value decomposition, SVD)

SVD^[14]是数值线性代数中一种高效的矩阵对角化算法,可以将图像矩阵分解成三个矩阵。大小为 $M \times N$ 的图像 $\mathbf{A}$ 可分解为2个正交矩阵和1个对角矩阵,其中对角矩阵是图像的奇异值矩阵。图像的奇异值具有很好的稳定性,当图像受到轻微扰动时,其奇异值不会发生显著变化。

2.4 Zernike 矩

本算法利用Zernike矩对受到旋转攻击的图像进行校正处理。Zernike矩^[15]具有旋转不变性,因此可以根据Zernike矩估计图像的旋转角度,即可以利用旋转前后图像的Zernike矩估算图像的旋转角度,其表达式为^[15]:

$$B = \frac{\arg(\mathbf{A}') - \arg(\mathbf{A})}{m}, \quad (1)$$

式中, $\mathbf{A}'$ 为图像旋转后的Zernike矩, $\mathbf{A}$ 为原始图像的Zernike矩, $\arg(\cdot)$ 代表Zernike矩的相位角。 m 为正或负整数, m 的取值影响估算角度的准确性,本文选择 $m=2$ 。

对Lena图像进行15°、45°和75°旋转攻击后,通过Zernike矩估算旋转角度如表1所示。

从表1可以得出,通过Zernike矩可以准确地估算出图像受到的旋转攻击角度,因此在水印提取前

利用 Zernike 矩进行图像的预处理,可以有效的提高 算法的抗旋转攻击能力。

表 1 估算旋转角度
Tab. 1 Estimating rotation angles

Rotation attacks			
Estimate angles	15°	45°	75°

3 水印算法

算法选择 YcbCr 彩色空间的 Y 分量进行水印嵌入, YCbCr 空间的 Y 分量相关度相较于 RGB 空间低, 选择 YCbCr 颜色空间有利于提高算法的鲁棒性。DWT 变换将图像分为四个子带, 其中低频区域是对图像的最佳逼近, 将水印嵌入这一区域可以提供较好的鲁棒性, 但是将水印嵌入这一区域无法很好的抵抗几何攻击。DWT 变换的高频子带只包含 4 个方向的信息, NSCT 变换可以提取出 8 个方向的信息, 因此将水印嵌入 NSCT 的高频子带可以在图像受到旋转缩放等破坏水印和宿主图像同步性的几何攻击时仍能提取出有效的水印。因此, 结合 DWT 低频子带包含大量能量和 NSCT 高频子带包含更多轮廓方向信息及奇异值稳定性高的特点, 通过对宿主图像进行 DWT-NSCT-SVD 变换得到水印的嵌入位置, 同时在 SVD 分解之前对高频子带进行 Arnold 置乱可以提高水印的安全性。为了进一步提高水印抗旋转攻击的能力, 水印提取前通过 Zernike 矩对图像进行旋转校正。

3.1 水印的嵌入

水印的嵌入流程如图 1 所示, 具体步骤如下:

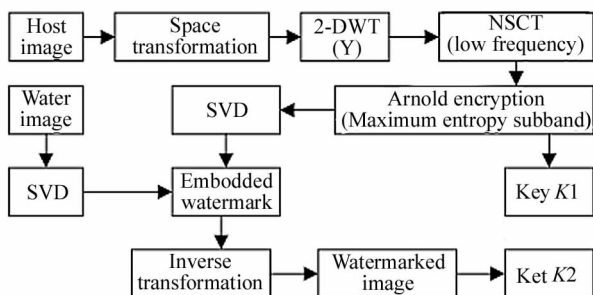


图 1 水印的嵌入流程

Fig. 1 Embedding process of watermark

1) 将 RGB 宿主图像转换到 YCbCr 颜色空间。

根据人眼对亮度成分不敏感特性^[16], 选择 Y 分量作为水印的嵌入位置。

2) 对提取出的 Y 分量做 2-DWT 变换。选择低频子带作为水印的嵌入位置。

3) 对图像的低频子带做 2 层 NSCT 变换。通过式(2)计算出 4 个高频子带的信息量, 并对最大信息量子带进行 K 次 Arnold 置乱得到嵌入区域 H_m , 嵌入子带的置乱次数 K 记为密钥 K1。

$$H(X) = E\left[\log \frac{1}{p(\alpha_i)}\right] = - \sum_{i=1}^n p(\alpha_i) \log p(\alpha_i), \quad (2)$$

式中, $p(\alpha_i)$ 代表图像中灰度值为 α_i 的像素所占的比例。

4) 对 H_m 和水印图像分别进行 SVD, 并将水印的奇异值嵌入到宿主图像中。

$$S_m = S + \beta S_w, \quad (3)$$

式中, S 为宿主图像的奇异值, S_w 为水印图像的奇异值, β 为可调节嵌入强度。

5) 重构得到含水印图像。依次进行逆 SVD、K 次的逆 Arnold 置乱、逆 NSCT 变换、逆 DWT 变换以及彩色空间转换得到含水印图像。

6) 计算嵌入水印的宿主图像的 Zernike 矩, 并保存 Zernike 矩为密钥 K2。

3.2 水印的提取

水印的提取流程如图 2 所示, 具体提取步骤如下:

1) 图像的预处理。计算含水印图像的 Zernike 矩, 与密钥 K2 对比, 计算图像的旋转角度。

2) 对图像进行几何校正。将受到旋转攻击的图像进行反方向旋转, 得到校正后的图像。

3) 与水印嵌入的流程相同, 通过彩色空间转换、DWT 变换和 NSCT 变换, 利用密钥 K1 对高信息量子带进行置乱解密及 SVD 分解, 得到含水印信息的

奇异值 S_1 。

4) 利用宿主图像的 S 奇异值及水印图像的 U_w 和 V_w 进行逆 SVD 变换,根据式(4)和(5)得到提取水印。

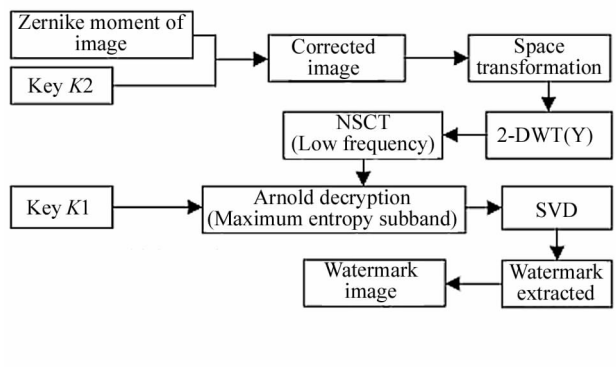


图 2 水印的提取流程

Fig. 2 Extraction process of watermark

$$S_{uu} = \frac{S_1 - S}{\beta}, \quad (4)$$

$$E_{water} = U_w S_{uu} V_w^T. \quad (5)$$

4 仿真实验

在 Matlab R2019b 中使用 3 张水印图像以及从图像数据库^[17]中选择的 4 张大小为 $512 \times 512 \times 3$ 像素的 Lena、Baboon、Pepper 和 Airplane 图像作为宿主图像验证提出的算法。大小为 128×128 像素的 UPC、C 和 logo 作为水印图像。

实验使用峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, $PSNR$)^[18] 和归一化系数 (normalization coefficient, NC)^[19] 来评估水印算法的不可见性和鲁棒性,其中 $PSNR$ 和 NC 的计算式为:

$$PSNR(I, I') = \log_{10} \frac{N \times N \times 255^{20}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [I(i, j) - I'(i, j)]^{20}}, \quad (6)$$

式中, I 为原始宿主图像, I' 为嵌入水印图像后的宿主图像。

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W(i, j) \times W'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W'(i, j)} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W(i, j)}}, \quad (7)$$

式中, $W(i, j)$ 为原始水印图像, $W'(i, j)$ 为提取出来的水印图像。

4.1 不可见性分析

通过向四张宿主图像中分别嵌入 UPC 和 LOGO 2 个水印图像并计算提取水印和原水印的

$PSNR$ 值来验证算法的不可见性,其结果如表 2 所示。

从表 2 可见, $PSNR$ 值均大于 38 dB, 根据人眼视觉系统 (human visual system, HVS)^[20] 分析, 当 $PSNR > 35$ dB 时, 水印具有很好的不可见性, 说明算法具有很好的不可感知性。

表 2 不可见性结果
Tab. 2 Invisibility results

Host	Watermark	$PSNR$ /dB
Lena	UPC	39.055 2
	LOGO	38.848 0
Baboon	UPC	39.050 8
	LOGO	38.659 4
Pepper	UPC	38.993 5
	LOGO	39.086 7
Airplane	UPC	38.837 5
	LOGO	38.651 2

4.2 鲁棒性分析

为了验证算法对常规攻击具有很强的鲁棒性。选择 Lena 为宿主图像, Logo 为水印图像, 对嵌入水印后的图像分别施加不同类别与不同强度的常规攻击, 其提取的水印 NC 值, 如表 3 所示。

表 3 常规攻击下提取的水印 NC 值
Tab. 3 Watermark NC values extracted under conventional attacks

Attack	Parameter	NC
Contrast	20%	0.997 1
Gaussian filtering	3×3	0.999 5
Average filtering	3×3	0.999 9
Median filtering	3×3	0.999 5
Gaussian noise	0.01	0.998 3
Salt and pepper noise	0.01	0.998 9
Speckle noise	0.01	0.999 2
JPEG2000	10	0.999 1
JPEG	80%	0.999 1
Sharpen	0.8	0.998 2
Histogram equalization		0.998 1

从表 3 可分析出, 图像在受到高斯滤波、均值滤波、中值滤波、高斯噪声、椒盐噪声、斑点噪声和压缩等常规攻击的情况下, 均可以提取出清晰有效的水

印图像。尤其是图像在均值滤波的攻击下提取水印的 NC 值达到了 0.9999, 说明算法可以很好地抵抗该攻击, 并且在其余攻击下提取水印的 NC 值基本达到了 0.999, 表现出算法在对抗上述攻击时具有强鲁棒性。

相较于常规攻击, 几何攻击能够破坏水印分量的同步, 从而导致许多算法不能提取出有效的水印。为了验证本文算法抵抗几何攻击的能力, 对含水印图像分别进行了平移、剪切和旋转等不同类型的图像攻击及水印提取如图 3 所示。

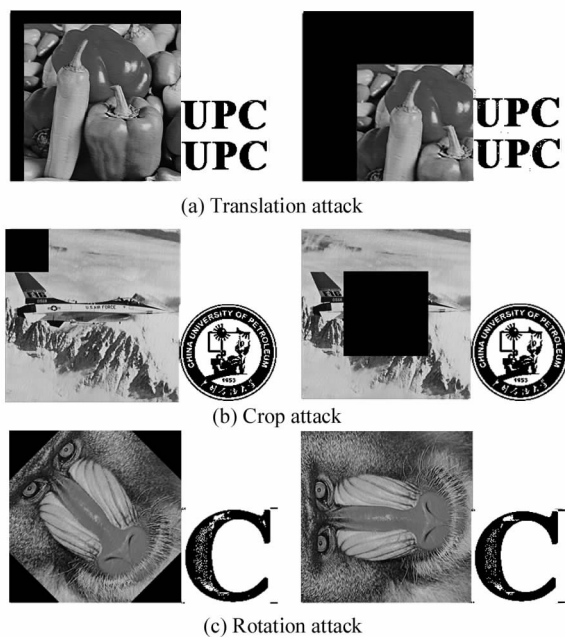


图 3 图像攻击及水印提取:

(a) 平移攻击; (b) 剪切攻击; (c) 旋转攻击

Fig. 3 Image attack and watermark extraction:

(a) Translation attack;

(b) Crop attack; (c) Rotation attack

从图 3 可分析出在不同攻击强度下, 水印图像几乎没有任何影响, 均可以提取出清晰有效的水印图像, 说明算法具有抗平移、剪切和旋转攻击的能力。

表 4 为图像在受到各种类型的几何攻击下提取的水印 NC 值。如表 4 所示, 随着攻击强度的增加所提取水印的 NC 值并没有太大的改变, 所提取水印的 NC 值均在 0.99 以上, 提取的水印与原始水印相似度高表明算法在抗几何攻击方面鲁棒性强。

本文算法采用 Zernike 矩在水印提取前对图像进行预处理, 通过计算图像的 Zernike 矩, 判断图像

是否受到旋转攻击及攻击强度并进行校正, 以确保水印图像在受到攻击后也可以被准确地提取。

表 4 几何攻击下提取水印的 NC 值

Tab. 4 Watermark NC values extracted under geometric attack

Attack	Parameter	NC
Crop	128×128	0.9989
	256×256	0.9991
Rescale	0.25	0.9995
	4	0.9992
Translation	20	0.9984
	80	0.9983
Rotation	5°	0.9954
	45°	0.9965
	90°	0.9992
Motion blur	$\theta=4, I=7$	0.9996

图 4 显示了校正前后算法对比, 在使用 Zernike 矩前后提取出的水印 NC 值对比, 对图像进行 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的旋转攻击, 然后提取水印进行 NC 值计算。结果显示, 使用 Zernike 矩对算法进行几何校正, 提取水印的 NC 值接近于 1, 相比于几何校正前的算法, 对抗旋转攻击的能力有了大幅度的提高。

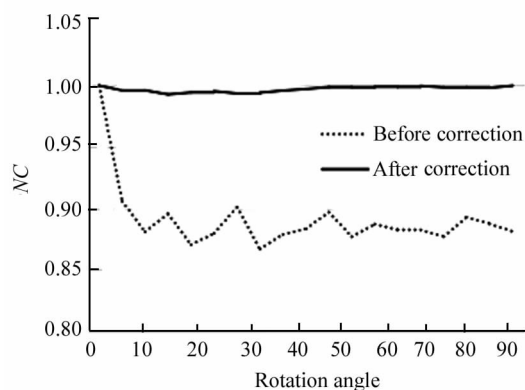


图 4 校正前后算法对比

Fig. 4 Comparison of algorithms before and after correction

为了进一步验证本文算法对抗各类攻击的鲁棒性, 将与文献[7]、文献[8]和文献[9]算法的攻击测试对比, 结果如表 5 所示。

文献[7]使用了 3 级 DWT 变换, 将水印嵌入其低频区域, 本文算法与之相比, 不仅在抗几何攻击方面优于对方, 并且抗常规攻击能力也有一定提高。文献[8]使用 NSCT-DWT 变换进行水印嵌入, 但是

仍然将水印嵌入到了低频区域,从表 5 可分析出,本文算法将水印嵌入宿主图像低频区域中经 NSCT 变换的高频子带,使算法的鲁棒性相较于文献[8]有了很大的提升。本文算法与利用特征区域提高抗几何攻击的水印算法相比,在平移和旋转攻击下提取水印的 NC 值也远大于文献[9]。如表 5 所示,本文算法无论是在噪声和滤波等常规攻击下,还是在几何攻击下,均具有强鲁棒性。

表 5 与其他算法的攻击测试对比

Tab. 5 Comparison of attack tests with other algorithms

Attack	Ref. [7]	Ref. [8]	Ref. [9]	NC
Salt and pepper noise	0.983 0	0.943 2	0.835 0	0.998 9
Gaussian noise	0.901 9	0.897 7	0.893 0	0.999 1
Gaussian filter	0.988 2	0.983 5	0.919 0	0.999 5
Median filter	0.934 1	0.989 1	0.948 0	0.999 5
Crop	0.909 3	0.922 6	0.952 0	0.999 2
Translation	0.768 5	—	0.984 0	0.998 4
Rotation	0.723 9	0.878 8	0.892 0	0.995 5

注:表中的“—”表示空值

从数据库^[17]中随机抽选 10 张图像作为宿主图像,验证算法的普适性,对水印嵌入后的图像分别进行了高斯滤波、椒盐噪声、JPEG 压缩、平移、缩放和旋转等 6 种具有代表性的攻击,在多张图像上的验证结果如图 5 所示。所有图在各类攻击下所提取水印的 NC 值均接近 1,算法在不同图像上表现出很好的鲁棒性,表明算法具有很好的普适性。

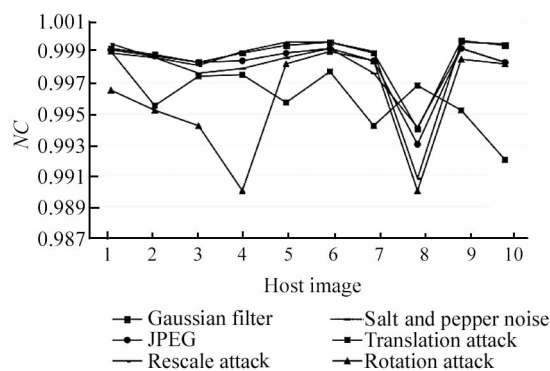


图 5 在多张图像上的验证结果

Fig. 5 Verification results on multiple images

5 结 论

本文提出的采用几何校正优化的轮廓波水印算法,结合 DWT 和 NSCT 2 种变换和奇异值的优点实

现了水印的不可见性和鲁棒性,Arnold 置乱提高了水印的安全性。在水印提取过程中通过 Zernike 矩对水印进行旋转校正,进一步提高了水印的抗旋转攻击能力。算法具有良好的水印不可见性,且对常规攻击及几何攻击均具有很强的鲁棒性,能有效保护图像的版权。

参考文献:

[1] CUI X, NIU Y, ZHENG X, et al. An optimized digital watermarking algorithm in wavelet domain based on differential evolution for color image[J]. Plos One, 2018, 13(5): e0196306.

[2] HUANG Y, NIU B, GUAN H, et al. Enhancing Image Watermarking with Adaptive Embedding Parameter and PSNR Guarantee[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2019, 21(10): 2447-2460.

[3] GIRI K J, QUADRI S M K, BASHIR R, et al. DWT based color image watermarking: a review[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(3): 32881-32895.

[4] YS A, CHEN T A, MIN X A, et al. A DWT-SVD based adaptive color multi watermarking scheme for copyright protection using AMEF and PSO-GWO[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 168(15): 114414.

[5] THAKKAR F, SRIVASTAVA V K. An adaptive, secure and imperceptible image watermarking using swarm intelligence, Arnold transform, SVD and DWT[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80(5): 1-18.

[6] LIU J, HUANG J, LUO Y, et al. An optimized image watermarking method based on HD and SVD in DWT domain[J]. IEEE Access, 2019, 7(99): 80849-80860.

[7] ANSARI I A, PANT M. Multipurpose image watermarking in the domain of DWT based on SVD and ABC[J]. Pattern Recognition Letters, 2017, 94(15): 228-236.

[8] MA T, CHEN N T, WANG X. A robust multi-digital watermarking algorithm based on NSCT-DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 50-55.

马婷, 陈农田, 王欣. 基于 NSCT-DWT-SVD 的强鲁棒多重数字水印算法[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 50-55.

[9] ZHOU L, ZHANG T Q, FENG J X, et al. Robust image watermarking algorithm based on blob-harris feature region combined with CT-SVD[J]. Signal Processing, 2020, 36(4): 520-530.

周琳, 张天骐, 冯嘉欣, 等. Blob-Harris 特征区域结合 CT-

- SVD 的鲁棒图像水印算法[J]. 信号处理, 2020, 36(4): 520-530.
- [10] CHEN Y, ZHENG H Y, DING Q L. Research on digital watermarking algorithm based on Zernike moment and NSCT-SVD[J]. Computer Science, 2016, 43(8): 84-88.
陈盈, 郑洪源, 丁秋林. 基于 Zernike 矩和 NSCT-SVD 的数字水印算法研究[J]. 计算机科学, 2016, 43(8): 84-88.
- [11] KONG F Z, LI J L, WU D M. Robust video watermarking algorithm based on DWT-DCT and Zernike moment[J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(4): 309-315.
孔凡芝, 李金龙, 吴冬梅. 基于 DWT-DCT 和 Zernike 矩的鲁棒视频水印算法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(4): 309-315.
- [12] ARAGHI T K, MANAF A A. An enhanced hybrid image watermarking scheme for security of medical and non-medical images based on DWT and 2-D SVD[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 101: 1223-1246.
- [13] LIU R, TAN T. An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2002, 4(1): 121-128.
- [14] DA, CUNHA, ARTHUR, et al. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and applications[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10): 3089-3101.
- [15] HU Z Y, SU X F. Rotation invariance of Zernike moment and estimation of rotation angle[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 1994, 1994(4): 55-60.
胡正仪, 苏祥芳. ZERNIKE 矩的旋转不变性及对旋转角度的估计[J]. 武汉大学学报(自然科学版), 1994, 1994(4): 55-60.
- [16] KUMAR S, SINGH B K. DWT based color image watermarking using maximum entropy[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021(prepublish).
- [17] WEINA Z, JAN D, GEGENFURTNER K R, et al. Animal detection in natural images: effects of color and image database[J]. Plos One, 2013, 8(10): 78516-78522.
- [18] ZHENG Q M, LIU N, WANG F H. Fragile watermark image integrity authentication algorithm based on complex attack[J]. Computer Science, 2020, 47(10): 332-338.
郑秋梅, 刘楠, 王风华. 基于复杂攻击的脆弱水印图像完整性认证算法[J]. 计算机科学, 2020, 47(10): 332-338.
- [19] ZHENG Q, LIU N, WANG F. An adaptive embedding strength watermarking algorithm based on shearlets' capture directional features[J]. 2020, 8(8): 8081377.
- [20] ZEBBICHE K, KHELIFI F, LOUKHAOUKHA K. Robust additive watermarking in the DTCWT domain based on perceptual masking[J]. Multimedia Tools and Applications, 2018, 77(16): 21281-21304.

作者简介:

郑秋梅 (1964—), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事图像处理、图像分类、目标检测等方面的研究。