

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2014.04.001

一种抗旋转的彩色图像全息水印防伪方案

谢 勇, 胡亚萍, 谭海湖

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 基于一种用于彩色印刷防伪图像博奇编码的傅里叶计算全息数字水印方法, 设计了一种抗旋转的全息水印防伪方案。通过模拟印刷—图像采集—旋转校正—提取水印的仿真实验, 研究了采集过程中图像旋转一定角度后提取的水印质量问题。实验表明: 该防伪方案对图像采集中的旋转攻击具有较好的鲁棒性, 能满足彩色印刷的防伪要求, 且旋转角度 $\theta \in (-90^\circ, 0^\circ) \cup (0^\circ, 90^\circ)$ 时, 提取的水印质量较好, 能保证识别。另外, 该防伪方案对图像采集中的裁剪、磨损、缩放、平移和翻转攻击, 也有较好的鲁棒性。

关键词: 全息水印; 防伪; Radon 变换; 旋转角度

中图分类号: TS853+.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2014)04-0001-07

Color Image Rotating Distortion Resistant Holographic Watermarking Security Program

Xie Yong, Hu Yaping, Tan Haihu

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: According to Fourier hologram digital watermarking method used in color printing based on Burch's coding method, a packaging printing rotating distortion resistant holographic watermarking security program was designed. The quality issue of extracted watermark of rotated image by certain angle in image acquiring process was studied with simulation experiments of printing-image acquiring-rotation correcting and watermark extraction. The results showed that the security program had good robustness against rotating attack in acquiring process and could satisfy the security requirements of color printing image. With the rotating angle of $\theta \in (-90^\circ, 0^\circ) \cup (0^\circ, 90^\circ)$, the quality of extracted watermark was better and could satisfy the need of recognition. In addition, the security scheme also had good robustness against some attacks, such as cutting, wear, scaling, translation and flip attack.

Key words: holographic watermark; anti-counterfeiting; Radon transform; rotating angle

0 引言

包装印品防伪信息在图像采集—认证过程中, 其印刷图像转为数字图像时不可避免会遭受多种攻击,

如旋转、缩放、平移和透视等。将抗旋转的全息水印技术应用于保护印刷图像的版权, 可达到印品防伪目的, 故提出抗旋转水印方案对包装印刷品图像防伪研究具有重要意义。郑东等^[1]通过逆数对数极

收稿日期: 2014-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170101)

作者简介: 谢 勇(1964-), 男, 湖南攸县人, 湖南工业大学教授, 主要从事功能包装材料及包装防伪技术方面的教学与研究, E-mail: hutxy@126.com

通信作者: 胡亚萍(1991-), 女, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为功能包装材料及包装防伪技术, E-mail: hutyping@126.com

坐标映射相位滤波法,计算出旋转角度,但遍历特征点的方法影响了旋转检测效率,同时也未对旋转后的图像进行校正;Nitin Singhal等^[2]利用局部Zernike矩检幅的旋转不变性提取图像特征点的方法,提高了水印图像的抗旋转性;朱洪庆等^[3]将普通水印图像嵌入离散余弦变换域中,利用Radon变换校正旋转图像提取水印;邓程等^[4]和陈俊宏等^[5]利用不同的方法检测图像特征点,对抗旋转水印做了部分研究;Li Leida等^[6]基于尺度适应特征区域,利用圆形的旋转不变形,提高了水印抗旋转性能。但在目前对数字水印印刷图像的研究中,绝大部分都是通过灰度的宿主图像嵌入水印图像后,经过旋转校正提取水印测试相似度,来评价水印抗旋转效果,对印刷图像采集中抗旋转的全息水印算法研究不多。数字全息图具有天然的加密特性及不可摧毁性(从部分全息图像可再现原物体的像),抗干扰能力强,适合作为水印图像。对此,谢勇等^[7]设计了一种用于彩色印刷防伪图像的傅里叶计算全息数字水印方法。

本文在文献[7]的基础上,提出了一种抗旋转的彩色图像全息水印防伪方案。将原始水印图像制成博奇编码的傅里叶全息水印,利用离散Haar小波变换算法嵌入宿主图像中,制成印刷图像,再通过模拟印刷—信息采集—旋转校正—提取水印的仿真实验,较好地解决了图像旋转一定角度后提取水印质量差的问题,之后进行一些其他攻击鲁棒性的仿真实验,也提取到了质量较好的水印图像。

1 全息水印的生成

根据Leith和Upatnieks的离轴全息图原理^[7],全息图平面的透过率可以描述为

$$h(x,y) = |f(x,y) + R(x,y)|^2 = |A(x,y)\exp[j\phi(x,y)] + R(x,y)\exp[i2\pi\alpha x]|^2 = |A(x,y)|^2 + R_0^2 + 2R_0A(x,y)\cos[2\pi\alpha x - \phi(x,y)], \quad (1)$$

式中: $f(x,y)$ 为物光波的复振幅; $R(x,y)$ 为参考光波,描述为 $R(x,y)\exp[i2\pi\alpha x]$ 。公式中最后一项记录了物体的全部信息(振幅和相位), $(A(x,y)^2 + R_0^2)$ 的作用是使透过率函数为实值非负函数,在计算机编码时,这一项会扩大全息图记录过程中的带宽需求,而且使再现过程中出现多余的衍射像。因此,博奇利用直流偏置分量代替这个非负函数,构成新的全息图透过率函数

$$h(x,y) = K + R_0^2 + 2R_0 \cdot A(x,y) \times$$

$$\cos[2\pi\alpha x - \phi(x,y)], \quad (2)$$

使得对于任意值的 x 和 y ,函数均为实值非负函数,式中 K 为常数。规定 $R_0=1, K=1$,得

$$h(x,y) = 0.5\{1 + A(x,y) \times \cos[2\pi\alpha x - \phi(x,y)]\}. \quad (3)$$

对该函数进行抽样、量化即可制成全息图。

本文制作了像素大小为 64×64 、“0268”字样待隐藏的原始水印图像 $W(p,q)$,如图1a所示。为提高全息图的衍射效率,将 $W(p,q)$ 乘以一个随机相位 $(p,q) \in (0,1)$,即 $W'(p,q) = W(p,q)\exp[i2\pi r \text{and}(p,q)]$ 。对 $W'(p,q)$ 进行快速傅里叶变换,取其振幅和相位后根据公式(3)进行编码,生成像素大小为 256×256 的傅里叶离轴全息图,如图1b所示。

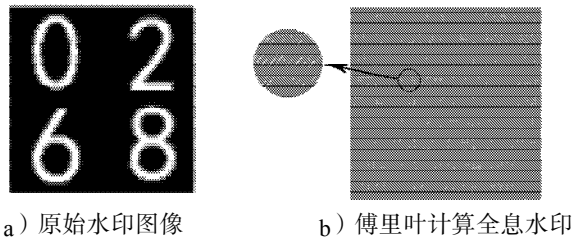


图1 水印图像

Fig. 1 Watermark image

2 水印嵌入

印刷彩色图像时,一般采用青色(C)、品红色(M)、黄色(Y)、黑色(K)4色。将彩色宿主图像分离成C, M, Y, K 4个通道的图像后,分别进行二级Haar小波分解,将水印信息嵌入人眼敏感度较低的高频部分,如图2所示。然后将经过嵌入水印后的CMYK通道进行合并,得到4个通道都嵌有水印的防伪图像。选用大小为 512×512 像素的Lena和Peppers图像作为宿主图像,在CMYK通道分别嵌入水印(嵌入强度为2),图3为Lena图像及其水印嵌入图。Lena-CMYK和Peppers-CMYK嵌入水印前后的图像各通道平均峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR)分别为28.547 5和28.189 6。

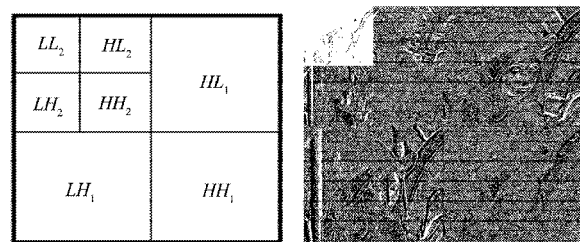


图2 Haar小波二级分解图

Fig. 2 Haar wavelet two levels decomposition of the image

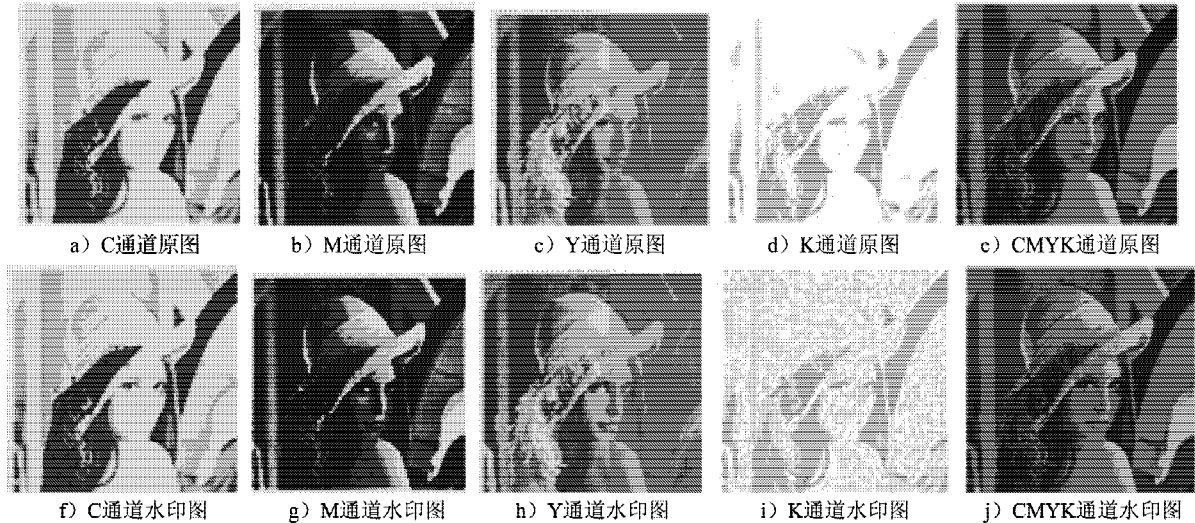


图3 Lena 图像及其水印嵌入图

Fig. 3 Lena image and its watermark embedding

3 Radon 旋转校正算法

二维函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换是该函数沿包含该函数的平面内一组直线的线积分, 定义为:

$$P(r, \theta) = R(r, \theta) \{ f(x, y) \} = \iint f(x, y) \delta(r - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy, \quad (4)$$

式中: $|r|$ 代表坐标原点 O 到直线的距离; $\theta \in [0, \pi)$ 代表直线与 y 轴之间的夹角 (或直线的法线与 x 轴的夹角), 见图 4。

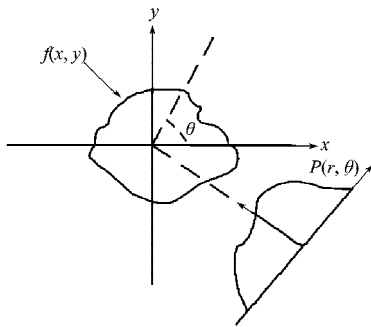


图4 函数 $f(x, y)$ 的 Radon 变换

Fig. 4 The Radon transform of function $f(x, y)$

将函数 $f(x, y)$ 沿直线进行积分, 获得任意 (r, θ) 处函数 $f(x, y)$ 沿着该直线的求和值 (即投影值) $P(r, \theta)$ 。设图像旋转角度为 φ , Radon 变换关于图像的几何变换有如下旋转性质:

$$R(r, \theta) \{ f(x \cos \theta + y \sin \theta - x \cos \varphi + y \sin \varphi) \} = P(r, \theta + \varphi). \quad (5)$$

利用 Radon 变换的这一性质, 可以对图像的旋转进行校正^[8]。

4 仿真实验与分析

包装印品防伪信息采集主要需经受采集 - 检测

过程中所遭受的几何攻击, 如旋转、平移和缩放攻击, 其中对水印质量影响最大的攻击是旋转攻击。几何攻击产生的主要原因是采集 - 检测过程引起了宿主图像和嵌入水印之间的同步误差^[9]。为了评价该方案水印的鲁棒性, 使用 Matlab8.0 编写一系列程序, 进行模拟印刷 - 信息采集 - 旋转校正 - 提取水印的仿真实验。由于印刷制版及工艺的特殊性, 通常先将水印信息嵌入宿主图像, 再进行半色调处理 (网点离散化)。因为误差扩散算法生成的半色调图像保真度较好, 并且经过该方法处理后提取的水印信息质量较好, 故本文通过对含水印的 Lena-CMYK 和 Peppers-CMYK 图像进行误差扩散处理, 来模拟实际印刷中的加网^[10]。图 5 为误差扩散生成的半色调图像。通过对含水印的 Lena-CMYK 和 Peppers-CMYK 图像进行 CMYK-RGB 模式转变和旋转一定角度, 可以模拟拍摄过程中印刷图像到数字图像色彩空间和位置的变化, 如图 6 所示。

本水印嵌入算法的载体图像为 CMYK 彩色图像, 旋转校正算法的载体图像为 RGB 彩色图像, 水印提取算法的载体图像为 GRAY 图像, 其中, CMYK 彩色图像格式为 TIF, RGB 彩色图像和 GRAY 图像格式均为 JPEG 压缩图像, 这很大程度模拟了印刷 - 拍摄 - 认证过程色彩模式的转变和拍摄图像的压缩。

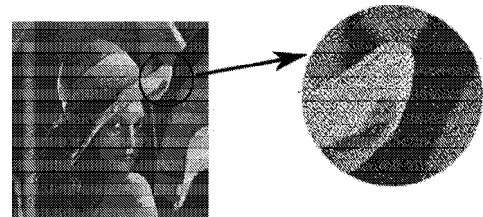


图5 误差扩散生成的半色调图像

Fig. 5 Halftone image generated by error diffusion

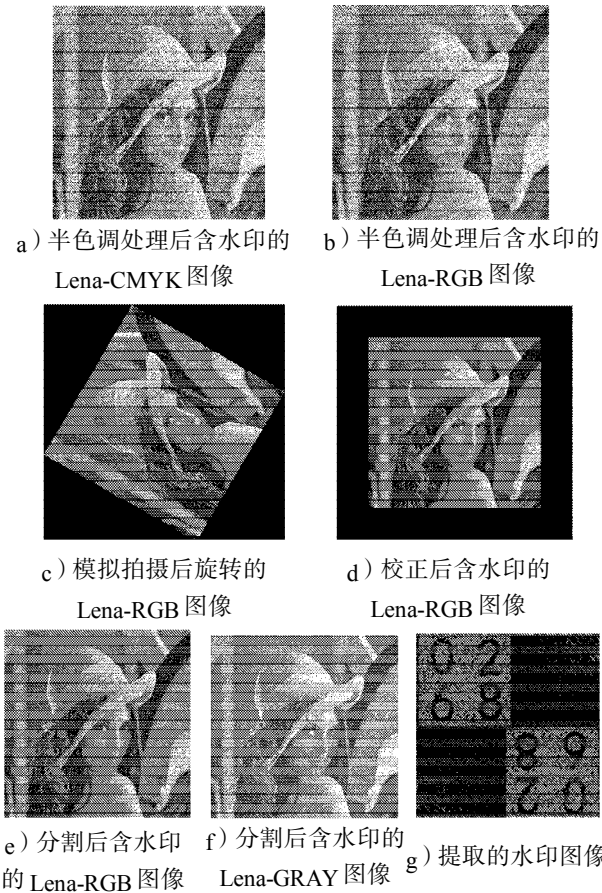


图6 图像校正及水印提取图像

Fig. 6 Image correction and extracted watermark image

4.1 实验仿真过程

1) 将嵌入水印的CMYK彩色图像进行误差扩散半色调处理后转换为RGB模式,模拟图像采集时印刷图像到数字图像的色彩模式转变;

2) 对转换后的RGB图像添加不同角度的旋转攻击,模拟拍摄时彩色数字图像发生的旋转;

3) 对旋转攻击后的RGB图像进行Radon变换,校正并切除因旋转和校正过程中扩容产生的黑边;

4) 将校正分割后的RGB图像转换为GRAY灰度图像后,进行Haar小波变换和逆傅里叶变换,提取水印;

5) 以PSNR对嵌入水印前的RGB图像和校正分割后的RGB图像进行测试,加权求平均后记录数据。

6) 采用归一化系数(normalized coefficient, NC),对经过旋转攻击校正分割后提取的水印与直接提取的水印进行质量评价并记录数据。

4.2 旋转测试

设定逆时针方向旋转为正方向,将含水印的Lena-CMYK图像和Peppers-CMYK图像转换为RGB模式,分别施加1°,5°,10°,15°,30°,45°,60°,75°,89°和-1°,-5°,-10°,-15°,-30°,-45°,-60°,-75°,-89°的旋转攻击,旋转模型如图7所示。图8为含水印的Lena-

CMYK图像和Peppers-CMYK图像在CMYK模式到RGB模式转换时未施加任何角度的旋转攻击,直接由RGB模式转换成的GRAY图像中获得的水印提取像。用校正分割算法将旋转后的图像校正分割提取的水印如图9和图10所示。

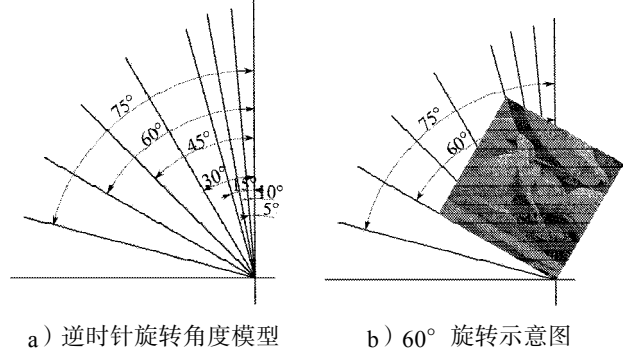


图7 旋转角度模型及旋转示意图

Fig. 7 Rotation angle model and its schematic diagram

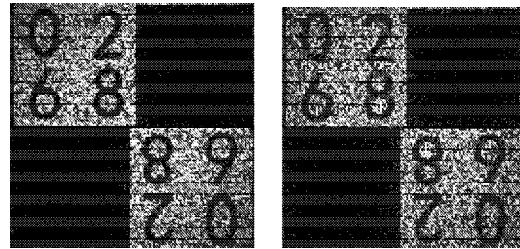


图8 Lena图像和Peppers图像的水印提取图像

Fig. 8 Extracted watermark image of

Lena and Peppers image

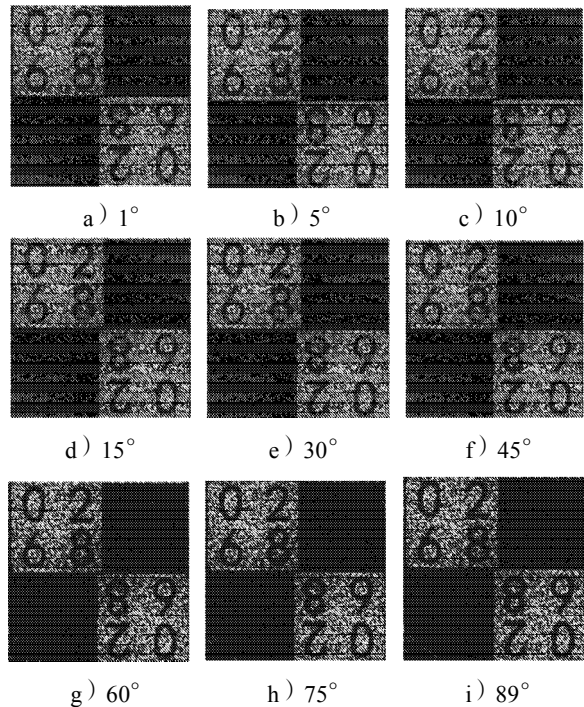


图9 Lena图像旋转校正后的部分水印提取图像

Fig. 9 Extracted watermark image of corrected Lena image

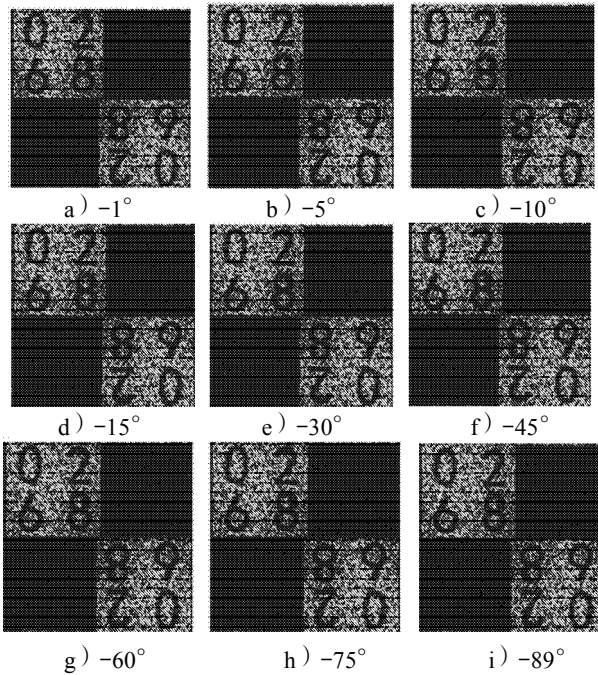


图 10 Peppers 图像旋转校正后的部分水印提取像

Fig. 10 Extracted watermark image of corrected Peppers image

由图8~10可知, Lena、Peppers 图像的水印提取像质量优于旋转校正后水印提取像的质量, 后者质量很好并具有稳定性。以 PSNR 对嵌入水印前的 RGB 图像和校正分割后的 RGB 图像进行测试, 以 NC 对经过旋转攻击校正分割后提取的水印与直接提取的水印进行质量评价, 记录数据后绘制曲线, 见图 11~14。

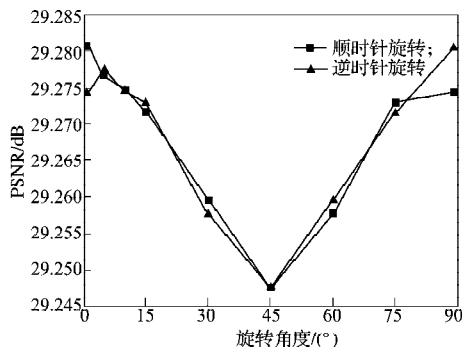


图 11 Lena-RGB 图像旋转校正后图像的 PSNR
Fig. 11 PSNR of corrected Lena-RGB image

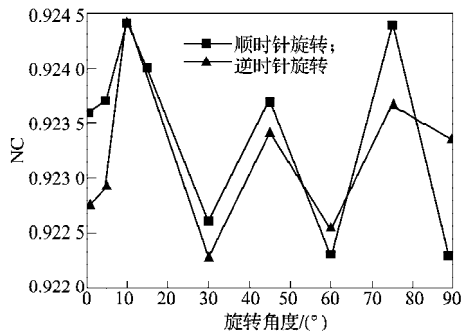


图 12 Lena 图像旋转校正后提取水印的 NC
Fig. 12 NC of watermark extracted from corrected Lena image

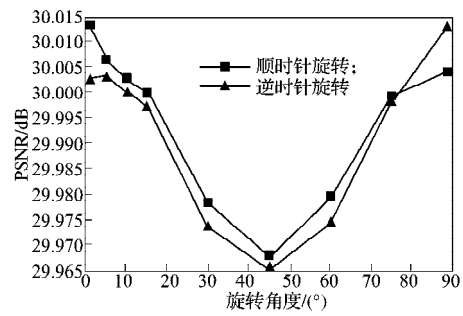


图 13 Peppers-RGB 图像旋转校正后图像的 PSNR
Fig. 13 PSNR of corrected Peppers-RGB image

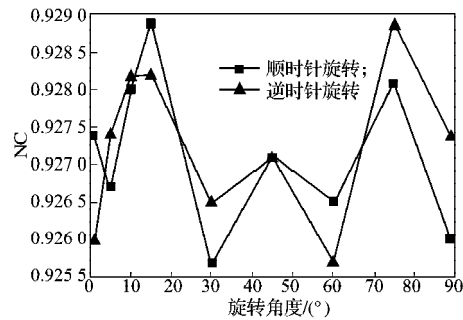


图 14 Peppers 图像旋转校正后提取水印的 NC
Fig. 14 NC of watermark extracted from corrected Peppers image

根据图 11 和 13 所示, 在所测试旋转角度的范围内, 图像遭受旋转攻击校正后, 产生失真较小。Lena 旋转校正后的图像与未嵌入水印的 Lena 图像的 PSNR 大致在 29.2~29.3 dB 附近趋于稳定, 而 Peppers 旋转校正后的图像与未嵌入水印的 Peppers 图像的 PSNR 大致在 29.9~30.0 dB 附近趋于稳定。根据 PSNR 值越大图像保真度越高的特征, 通常其值在 20~45 dB 之间, 所以图像不可见性良好^[7]。

根据图 12 和 14 所示, 在所测试旋转角度的范围内, 提取水印的相似度依然很高, 均在 0.92 以上, 且其再现图像都清晰可辨。Lena 图像旋转校正后提取水印的 NC 稳定在 0.922~0.925 区间内, 而 Peppers 图像旋转校正后提取水印的 NC 稳定在 0.925~0.929 区间内。因为 NC 的数值范围为[0, 1], 值越大表示所提取水印的质量越好, 通常其值在 0.7 以上就被认为符合要求^[8]。所以提取的水印与原始水印相似度较高且较为稳定。对于同一幅图像作顺时针和逆时针旋转所测得的图像 PSNR 值和水印 NC 值的变化随旋转角度的变化趋势一致, 这说明了全息水印还具有旋转对称性。

4.3 其他攻击鲁棒性测试

使用该水印方案, 对其他几何攻击和采集的相关常见攻击的鲁棒性进行了如下测试, 测试内容如图 15~24 所示。

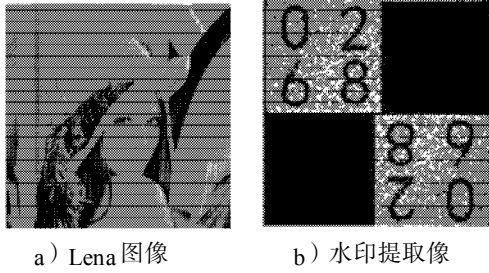


图 15 未受攻击的 Lena 图像及其水印提取像

Fig. 15 Lena image without attack and extracted watermark

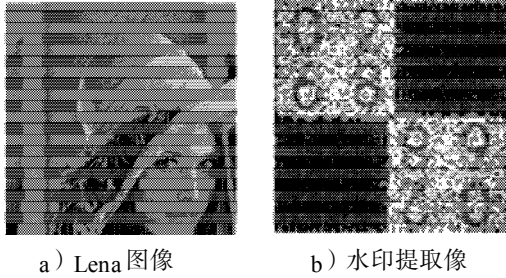


图 16 截取 382 × 382 像素的 Lena 图像及其水印提取图像

Fig. 16 Lena image with 382 × 382 pixels cutting attack and extracted watermark

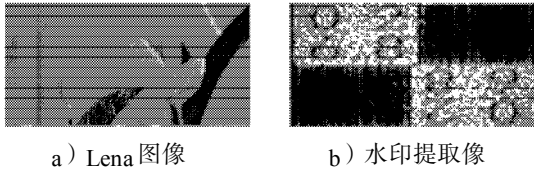


图 17 截取原图 50% 的 Lena 图像及其水印提取图像

Fig. 17 Lena image with 512 × 256 pixels cutting attack and extracted watermark

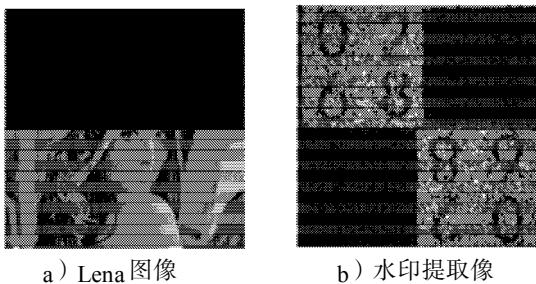


图 18 损失 50% 的 Lena 图像及其水印提取图像

Fig. 18 Lena image with 256 × 512 pixels wear attack and extracted watermark

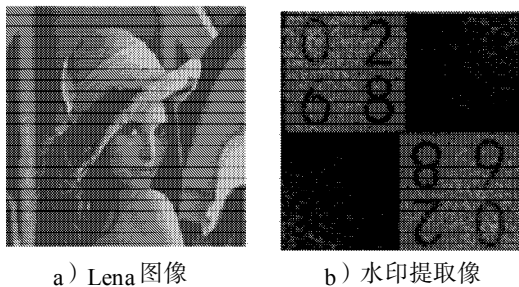


图 19 缩小 50% 的 Lena 图像及其水印提取图像

Fig. 19 Lena image with scaling (0.5) attack and extracted watermark

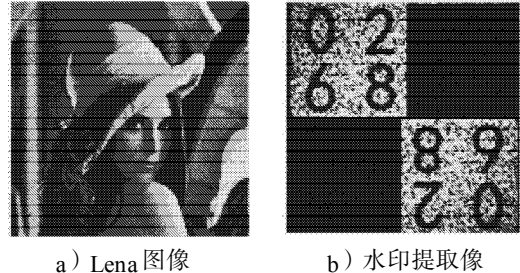


图 20 放大 1.2 倍的 Lena 图像及其水印提取图像

Fig. 20 Lena image with scaling (1.2) attack and extracted watermark

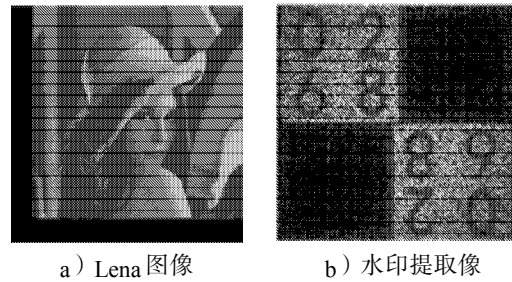


图 21 平移 64 × 64 像素的 Lena 图像及其水印提取图像

Fig. 21 Lena image with translation (64, 64) attack and extracted watermark

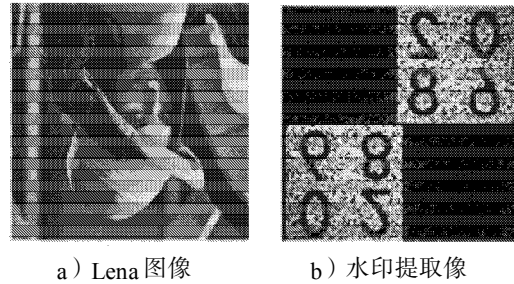


图 22 垂直翻转的 Lena 图像及其水印提取图像

Fig. 22 Lena image with horizontal flip attack and extracted watermark

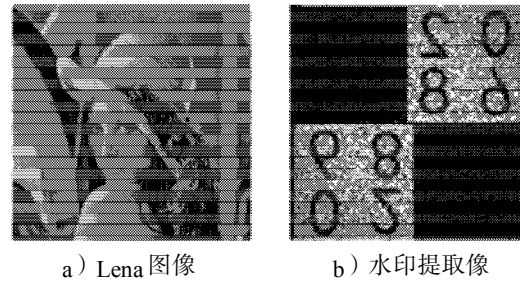


图 23 水平翻转的 Lena 图像及其水印提取图像

Fig. 23 Lena image with vertical flip attack and extracted watermark

对图 15~23 中提取的各个水印图像进行重新定义尺寸，归一化为 128 × 128 像素，测得相似度 NC 值，如表 1 所示。从表 1 和图 15~23 的水印提取像可以论证该方法针对裁剪、缩放、平移和翻转攻击具有良好的鲁棒性，相应的水印提取像能很容易被辨认。当水印图像遭受 50% 的磨损攻击时，提取水印的 NC 值为 0.8 左右。主要原因是，50% 的水印信息丢失。然

而,如图16和图17截取不同部分图像后的水印图像也能很清楚地被辨识,因为即使某些部分丢失,全

息图也可以被再现。针对该方案的常见攻击的鲁棒性也得到了验证。

表1 其他攻击校正后提取水印像的NC

Table 1 NC for the extracted watermarks under other attacks

水印图像	截取 382×382 像素	截取原图 50%	磨损原图 50%	缩小 50%	放大 1.2 倍	平移 64×64 像素	垂直翻转	水平翻转
Lena	0.848 2	0.855 1	0.838 8	0.928 7	0.999 3	0.914 5	0.790 8	0.790 8
Peppers	0.835 4	0.836 3	0.838 0	0.927 1	0.999 0	0.843 6	0.742 4	0.742 4

5 结论

根据 Leith 和 Upatnieks 的离轴全息图原理,本文提出了一种抗旋转的彩色印品全息水印防伪方案。实验结果表明,当旋转角度 $\theta \in (-90^\circ, 0^\circ) \cup (0^\circ, 90^\circ)$ 时,该方案对印刷和拍摄过程中防伪图像受到的旋转攻击有较好的鲁棒性。此外,提出的水印算法对裁剪、磨损、缩放、平移和翻转攻击也有较好的鲁棒性。与传统的数字全息水印方法相比,本文所设计的水印嵌入、提取新方法在彩色印刷图像-数字图像的防伪中具有重要的实用价值。

参考文献:

- [1] Zheng Dong, Liu Yan, Zhao Jiying. RST Invariant Digital Image Watermarking Based on a New Phase-Only Filtering Method[J]. Signal Processing, 2005, 85(12): 2354-2370.
- [2] Nitin Singhal, Lee Young-Yoon, Kim Chang-Su, et al. Robust Image Watermarking Using Local Zernike Moments [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2009, 20(6): 408-419.
- [3] Zhu Hongqing, Liu Min, Li Yu. The RST Invariant Digital Image Watermarking Using Radon Transforms and Complex Moments[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20: 1612-1628.
- [4] Deng Cheng, Gao Xinbo, Li Xuelong, et al. Local Histogram Based Geometric Invariant Image Watermarking [J]. Signal Processing, 2010, 90(12): 3256-3264.
- [5] Chen Chunhung, Tang Yuanliang, Wang Chihpeng, et al.

A Robust Watermarking Algorithm Based on Salient Image Features[J]. Optik, 2014, 125: 1134-1140.

- [6] Li Leida, Yuan Xiaoping, Lu Zhaolin, et al. Rotation Invariant Watermark Embedding Based on Scale-Adapted Characteristic Regions[J]. Information Sciences, 2010, 180(15): 2875-2888.
- [7] 谢勇,李娟,王娟娟.一种抗印刷-扫描倾斜失真的数字水印算法[J].包装工程,2013,34(15):104-108. Xie Yong, Li Juan, Wang Juanjuan. A Kind of Printing and Scanning Tilt Distortion Resistant Digital Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 104-108.
- [8] Li Jianzhong. Robust Image Watermarking Scheme Against Geometric Attacks Using a Computer-Generated Hologram [J]. Applied Optics, 2010, 49(32): 6302-6312.
- [9] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. 数字图像处理: MATLAB 版[M]. 阮秋琦,译.北京:电子工业出版社,2005:280-320. Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital Image Processing Using MATLAB[M]. Ruan Qiuqi, Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 280-320.
- [10] 冯起芹,曹小龙,单武扬,等.印刷品水印图像的半色调算法比较[J].包装学报,2012,4(3):34-38. Feng Qiqin, Cao Xiaolong, Shan Wuyang, et al. Comparison Study of Halftoning Algorithm for Printed Watermarking Image[J]. Packaging Journal, 2012, 4(3): 34-38.

(责任编辑:徐海燕)

