

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2016.01.001

抗印刷/扫描彩色图像零水印方案

谢 勇, 谭海湖, 王凯丽

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对印刷/扫描对图像特征的影响规律, 设计了一种基于离散小波变换及奇异值分解的抗印刷/扫描鲁棒性零水印方案, 用于印刷品的防伪认证。将彩色图像转换到 CIE Lab 色彩空间, 对亮度分量做一次小波分解, 再对其低频子图进行分块奇异值分解, 以其最大奇异值矩阵构造零水印。仿真及印刷实验结果表明: 该方案具有较好的抗印刷/扫描鲁棒性。

关键词: 零水印; 离散小波变换; 奇异值分解; 印刷/扫描

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)01-0001-07

A Zero-Watermark Scheme Robustness Against Printing-Scanning Color Image

XIE Yong, TAN Haihu, WANG Kaili

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

Abstract: Aimed at the influencing pattern of printing-scanning on image features, a zero-watermark scheme based on discrete wavelet transform and singular value decomposition was designed. The scheme robustness against printing-scanning could be applied in anti-counterfeiting authentication of packaging printing images. Firstly color images were converted to the Lab color space, then a wavelet decomposition was conducted on luminance component. The low frequency sub-graph was divided into non-overlap block, then singular value decomposition (SVD) on every sub-block was constructed. The largest singular value matrix was used to construct zero-watermark. The experimental results of simulation and printing showed that the scheme had good robustness for printing and scanning process.

Key words: zero-watermark; discrete wavelet transform; singular value decomposition; print-scanning

0 引言

数字水印技术是将一些标识信息(即数字水印)直接嵌入数字载体(包括多媒体、文档、图像、软件等)中,或间接表示(如修改特定区域的结构),在不影响原载体的使用价值及不易被探知和再次修改的情况下,达到防伪的目的。数字水印图像的出

现在一定程度上抑制了图像造假和篡改等现象^[1-6]。零水印技术^[7]是指利用图像本身的固有特征,构造出认证信息,并对认证信息进行注册保护,在认证过程中,对待检测图像进行相同方式的特征提取,再与注册的保护信息进行校对,以实现对待检测信息的认证识别。相较于其他水印技术,这一类水印技

收稿日期: 2015-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61170101), 湖南省研究生创新科研基金资助项目(CX2015B562)

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: 谭海湖(1991-), 男, 湖南衡阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为包装防伪技术, E-mail: haihutan@163.com

术不会对宿主信息产生影响,可以规避传统水印中无法避免的可见性与鲁棒性之间的矛盾,更利于印刷品的版权保护。

近年来,零水印技术得到了快速发展,取得了一些突破性成果。Cao Hangqiang 等人^[8]提出了一项基于离散小波变换(discrete wavelet transform, DWT)与混沌调制的零水印算法,该算法选择原图像部分低频小波系数计算选择出来的系数的相关性构造水印,系数的选择是利用混沌调制随机选取的。该方案对于如中滤波、JPEG压缩、加性噪声、剪切旋转等攻击具有鲁棒性,并且混沌调制的参数可以作为水印的密钥。Aihab Khan 等人^[9]提出了一种检测和表征数据关系恶意修改的脆弱性零水印方案。该方案能够避免目前大多数数据关系水印会给原数据引入错误或失真的问题,而这些失真会影响关系型数据的完整性;同时,该方案不仅可以检测到恶意篡改,还可对攻击类型进行分类表征。Zunera Jalil 等人^[10]提出了一种基于结构组成的文本文档零水印方案,该方案对于正常的文档内容修改具有鲁棒性,同时可检测出恶意篡改。Khalid Edris 等人^[11]提出了一种基于复杂 Zernike 矩的鲁棒性零水印方案,该技术能够抵抗各种信号处理操作及几何变换操作。在这些研究成果中,针对印刷品彩色图像的零水印技术研究相对较少,而印刷/扫描过程中存在模数转换、色彩空间转换、几何失真等多元异类的不可控影响,针对印刷品彩色图像的零水印技术尤其需要注重其鲁棒性。本文从印刷/扫描过程对图像特征的影响规律着手,结合奇异值分解及离散小波变换的特点,设计出一种抗印刷/扫描的彩色图像零水印方案。

1 印刷/扫描对图像特征的影响

印刷是通过油墨在承印物上呈色以对数字原稿进行复现的过程。印刷技术结合了数字半色调技术及色彩成像原理,印刷过程一般有分色加网、制版、四色叠印等步骤。半色调技术的应用使得二值输出设备可以呈现出变化丰富的连续调图像特征,但是这只能在一定程度上做到对数字原稿的阶调复现,且由于技术本身不可避免的缺陷以及设备、油墨本身存在的固有误差,印刷图像不可避免地会出现色彩阶调的损失及色彩失真。

图像的认识识别需将印刷品进行扫描处理转变为数字图像,才能对其进行相应的操作处理。扫描过程中产生的图像失真^[12]可分为3类:一是像素点失真,包括亮度对比度变化、颜色变化、模糊噪声;二

是几何失真,一般由扫描过程中操作不当或不可避免的旋转、尺度变化及剪切造成;三是模数转换过程中的误差,包括色彩空间转换、色光加色法呈色与色料减色法呈色的差异等造成的色彩失真。

以标准测试图像 Peppers 为例,将其数字图像与印刷/扫描图像的分色灰度直方图进行对比,观察数字图像与印刷/扫描图像之间的差异。印刷/扫描过程中的实验参数如下:

印刷机为威海滨田 Weihai Hamada 452A 六开四色印刷机,印刷油墨为 UNI-100 高级四原色东吴油墨,UV 板材(1.5 mm 超薄型),调幅(amplitude modulation, AM)加网方式,网点形状为方形,加网线数为 175 lpi,加网角度为 K45°,通过打孔定位,由计算机直接到印版(computer to plate, CTP)制版机制版,承印材料为 300 g/m² 的铜版纸;扫描仪为 Canon 5600 F 扫描仪,扫描分辨率为 300 dpi。

标准测试图像 Peppers 的数字图像及其印刷/扫描前后各通道的灰度图见图 1~2,印刷/扫描前后各通道的灰度直方图见图 3~4。

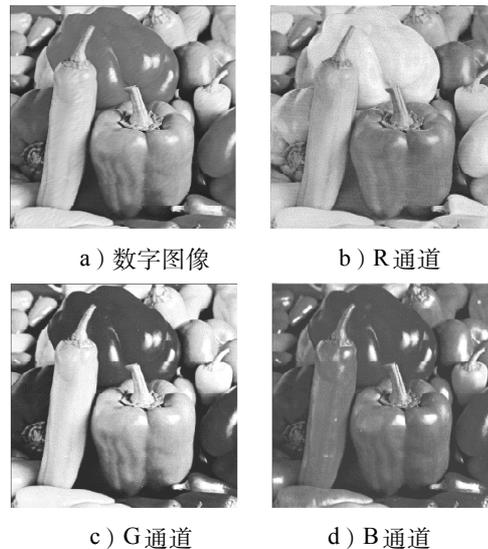


图 1 标准测试图像 Peppers 的数字图像及其印刷/扫描前各通道的灰度图

Fig. 1 Digital color image Peppers and its color component gray images before printing-scanning

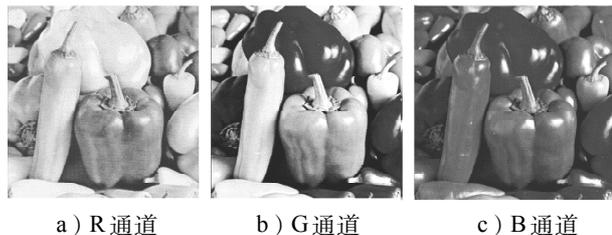


图 2 Peppers 图像印刷/扫描后各通道的灰度图
Fig. 2 Color component gray images after printing-scanning color image Peppers

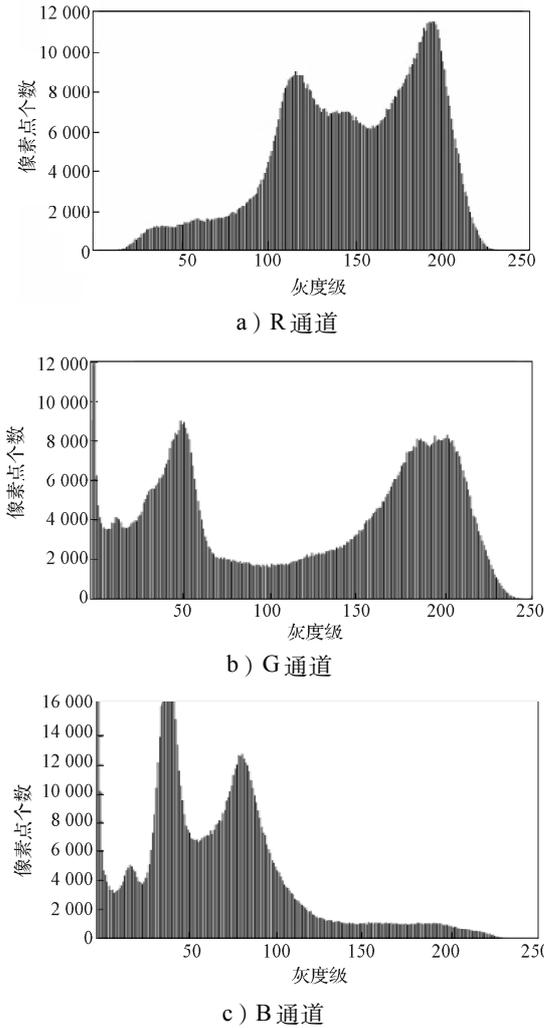


图3 Peppers 图像印刷/扫描前各通道的灰度直方图
Fig. 3 Color component gray image histogram before printing-scanning color digital image Peppers

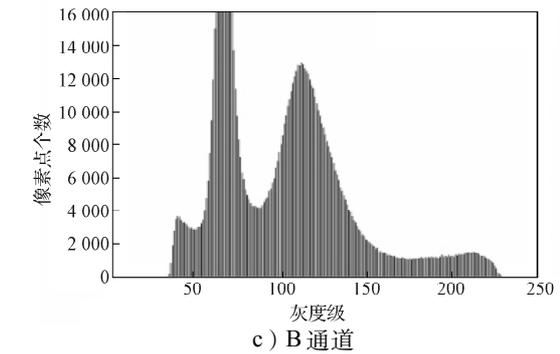
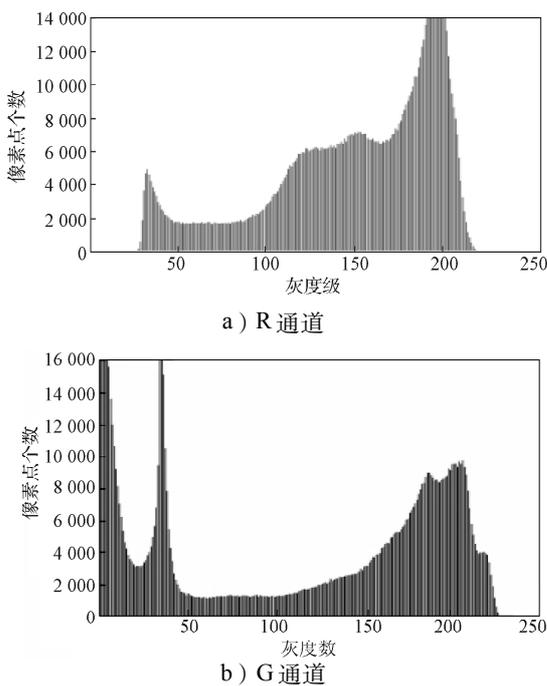


图4 Peppers 图像印刷/扫描后各通道的灰度直方图
Fig. 4 Color component gray image histogram after printing-scanning color image Peppers

从图1~4中可以看出: 1) 各颜色通道的印刷前后改变量不同, 图像在印刷/扫描前后色彩失真严重; 2) 改变主要集中在灰度级的两端, 也就是高亮区和最暗部分; 3) 改变后直方图轮廓变得平滑, 峰值信息丢失, 从图像频域角度看, 这是由图像的高频细节信息丢失造成的。

2 算法设计

2.1 奇异值分解

奇异值分解 (singular value decomposition, SVD) 是一种基于特征向量的矩阵变换方法, 适用于任意形式矩阵的分解。任意一个矩阵都是唯一的, 其表现了矩阵数据的分布特征^[13]。

设 A 为数字图像, 则 A 的 SVD 可描述为

$$A = USV = U \begin{bmatrix} \Delta & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} V = \sum_{i=1}^r A_i = \sum_{i=1}^r u_i s_i v_i, \quad (1)$$

式中: u_i 和 v_i 分别为正交矩阵 U 和 V 的列矢量, 非零奇异对角阵 Δ 和零奇异值构成了矩阵 A 的奇异值对角阵 S , $\Delta = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_{r-1}, s_r)$, $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_{r-1} \geq s_r > 0$, $r = \text{rank}(A)$ 。

对图像的奇异值分解所得到的3个矩阵中, 左右的正交矩阵包含了图像的结构特征; 分解得到的对角矩阵则包含了图像的阶调特征。对图像进行分块处理, 分块的最大奇异值代表块的能量。

2.2 离散小波变换

图像经过离散小波变换^[14]可以分解成4个大小相等的频带: 低频 LL、水平高频 HL、垂直高频 LH 以及对角高频 HH。其中, 水平、垂直、对角3个方向上的子图为高频细节子图, 主要表现了图像中纹理、轮廓、边缘等细节信息; 低频子图主要表现了原数字图像的近似分量信息, 且图像能量主要集中在子图中。因此, 可以将高频子图称为细节图像, 将低频子图称为亮度图像。为更加直观地说明小波

分解的效果,以标准测试图像 Peppers 的灰度图像为例,利用离散 Haar 小波变换,将其进行一级小波分解,分解效果如图 5 所示。

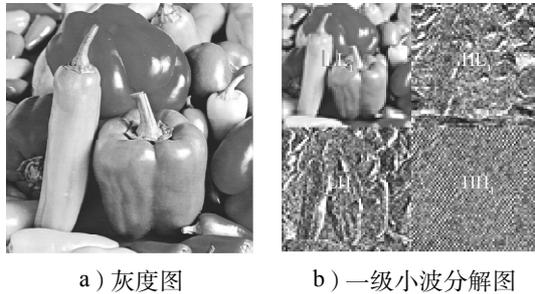


图 5 Peppers 灰度图及其小波分解图

Fig. 5 Discrete wavelet transform image of Peppers

在 CIE Lab 颜色空间中: L 分量用于表示像素的亮度,取值范围为 $[0, 100]$,表示从纯黑到纯白; a 表示从红色到绿色的范围,取值范围为 $[127, -128]$; b 表示从黄色到蓝色的范围,取值范围为 $[127, -128]$ 。将扫描的彩色图像转换到 CIE Lab 色彩空间,利用亮度分量提取特征信息,可以降低印刷/扫描过程中的色差变化对图像特征的影响。

归一化相关系数 (normalized correlation, NC) 的计算公式为

$$NC = \frac{\sum_{x,y} w'(x,y)w(x,y)}{\sum_{x,y} w^2(x,y)} \quad (2)$$

式中: $w(x,y)$ 表示待评价图像, $w'(x,y)$ 表示参考图像。

NC 取值范围为 $[0, 1]$, 数值越大,表示两图相似度越高,应用于水印领域时,说明此时的水印算法具有较强的鲁棒性。

2.3 零水印信息构造步骤

步骤 1: 将彩色图像 I (大小为 $m \times m$) 由 RGB 色彩空间转换到 CIE Lab 色彩空间,取亮度分量灰度图 I_L 作为待提取特征图像。

步骤 2: 对 I_L 进行 Haar 小波分解,得到低频子图 I_{LL} 、对角高频子图 I_{HH} 、垂直高频子图 I_{HL} 及水平高频子图 I_{LH} 。

步骤 3: 对 I_{LL} (大小为 $m/2 \times m/2$) 进行分块处理,块大小为 8×8 。

步骤 4: 对每一分块进行奇异值分解,取每一分块的最大奇异值 $\sigma(i, j)$, 计算分块最大奇异值均值 σ_{mid} 。

步骤 5: 构建二值零水印信息,二值化规则为

$$I(i, j) = \begin{cases} 0, & \sigma(i, j) \leq \sigma_{mid}; \\ 1, & \sigma(i, j) > \sigma_{mid} \end{cases} \quad (3)$$

步骤 6: 为提高水印信息的安全性,将版权信息

(本实验中以图 6 所示的文字信息“湖南工大”作为版权信息)进行 Arnold 置乱处理,然后与提取得到的零水印特征信息进行异或运算,对得到的含水印的版权信息进行注册保护。

$$I_{zero} = I \otimes w, \quad (4)$$

式中: I 表示用零水印特征信息提取方法得到的图像特征信息; w 表示版权信息; I_{zero} 表示注册保护的信息; 符号 \otimes 表示异或运算。

按照上述零水印信息构造方法,对 4 幅数字测试图像 (见图 7) 进行信息提取与注册信息构造,所得结果见图 8。

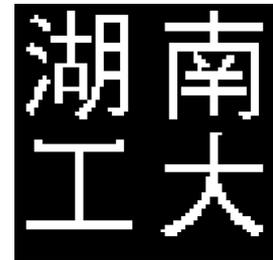
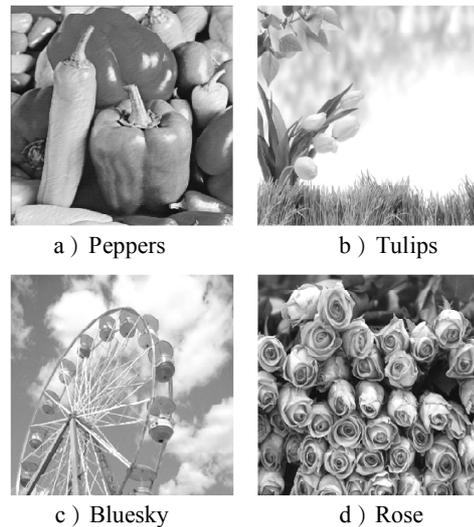


图 6 版权信息

Fig. 6 Copyright information



a) Peppers

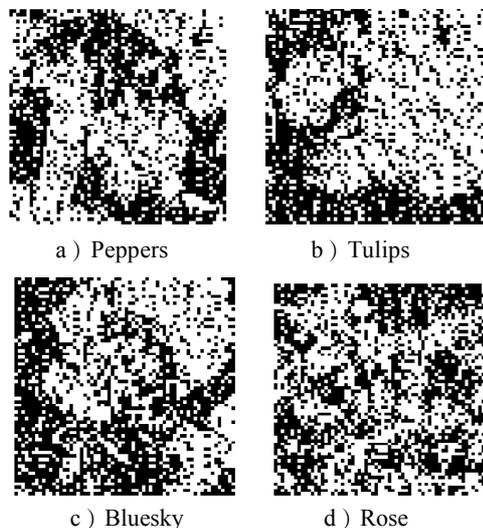
b) Tulips

c) Bluesky

d) Rose

图 7 数字测试图像

Fig. 7 Digital image



a) Peppers

b) Tulips

c) Bluesky

d) Rose

图 8 数字测试图像的零水印构造信息

Fig. 8 Zero-watermark information of digital image

2.4 水印信息检测

水印信息检测按如下步骤进行。

步骤1: 对待认证检测的图像进行水印信息构造处理, 方法同2.3中所述步骤。

步骤2: 将提取得到的特征信息 I' 与注册保护的认证信息进行异或运算。

步骤3: 对提取得到的认证信息 w' 进行逆 Android 置乱, 得到最终的认证信息。

$$w' = I_{zero} \otimes I', \quad (5)$$

式中: w' 表示提取的经置乱的认证信息; I_{zero} 表示被保护的注册认证信息; I' 表示从待认证图像中提取得到的特征信息。

零水印构造及认证识别流程如图9所示。

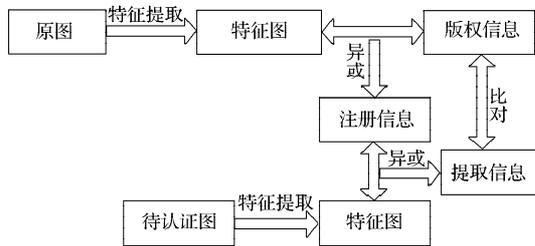


图9 零水印构造及认证识别流程

Fig. 9 Zero-watermark build and authentication flow diagram

3 算法性能测试

印刷/扫描过程对图像的噪声攻击可以通过对图像进行一定的噪声攻击进行模拟。

1) 印刷中的加网线数可以通过更改分辨率进行仿真;

2) 印刷过程中产生的阶调复现不完整、细节信息丢失可以通过低通滤波进行仿真;

3) 承印物表面粗糙、不平整, 油墨可能出现附着不上等情形, 可以通过一定程度的椒盐噪声攻击图像进行仿真;

4) 印刷品图像模糊可以通过高斯模糊噪声攻击进行仿真;

5) 印刷过程的攻击是一个高强度组合攻击, 所以可采用组合攻击测试进行仿真。

文献[15]也提出了一种基于小波分解及奇异值分解的彩色图像零水印方案。本文对彩色图像的处理是将其转换到 CIE Lab 色彩空间, 以更好地减弱印刷/扫描过程中色彩空间转换以及印刷固有颜色失真对图像特征的影响。文献[15]中选取小波分解后的高频图像进行特征提取, 而本文选择小波分解后的低频区进行特征提取。为验证本文所提出算法的性能, 以

数字图像 Peppers (图像大小为 1 024 dpi × 1 024 dpi, 分辨率为 300 dpi) 为测试对象进行攻击, 并按对比文献所述, 在灰度图像的小波分解高频区进行零水印特征信息的提取, 作为本文的对比算法。本文算法及对比算法所提取的特征信息见图 10~11, 其 NC 值对比见表 1。

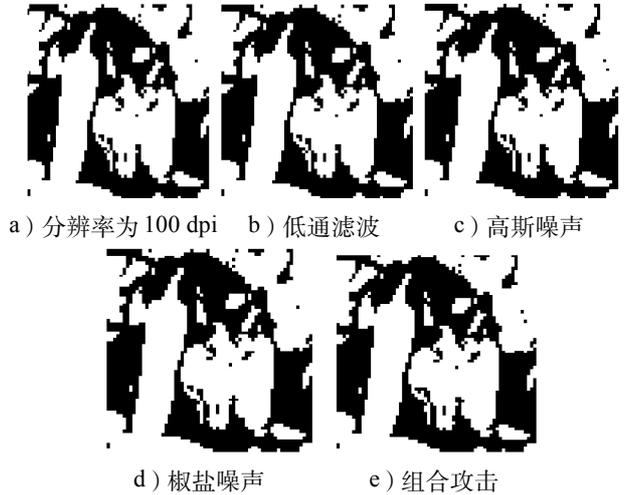


图10 本文算法所提取的特征信息

Fig. 10 Extracted information by proposed algorithm

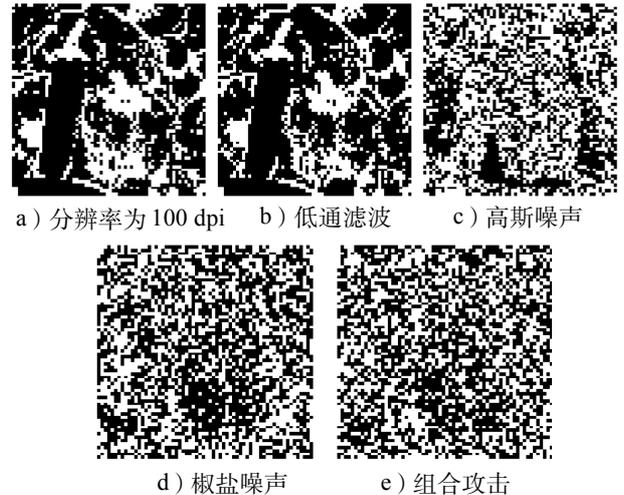


图11 对比算法所提取的特征信息

Fig. 11 Extracted feature information by contrast algorithm

表1 本文算法与对比算法的 NC 值对比

Table 1 The NC of extracted information by proposed algorithm and contrast algorithm

算法	分辨率 100 dpi	低通滤波	高斯噪声	椒盐噪声	组合攻击
本文算法	1	1	0.999 9	1	0.999 8
对比算法	1	0.976 2	0.935 3	0.931 3	0.932 8

实验结果表明, 本文所提出的零水印特征提取方法对噪声攻击的鲁棒性效果较好, 同时得到的特征信息丰富。相较于对比文献, 本文在将提取区域

转变为 CIE Lab 色彩空间亮度分量的离散小波变换低频分量的改变上, 算法的鲁棒性得到了很好的提升。同时, 对比文献是通过编码的方法对图像进行认证, 对于不同图像, 其编码信息重复的机率很大, 不具备唯一性; 而本文的图像特征水印信息量大, 不同图像具有完全不同的特征, 且在认证过程中结合了置乱变换, 在安全性方面也有很大的提高。

4 印刷实验验证

选取如图 7 所示的 4 幅测试图像, 拼成一张印版进行印刷, 印刷/扫描参数同前文所述。

印刷/扫描图像及其特征信息、提取信息如图 12~14 所示。

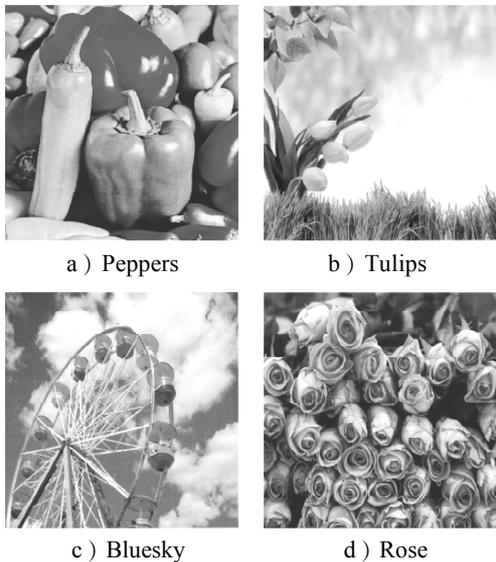


图 12 印刷图像

Fig. 12 Printed image

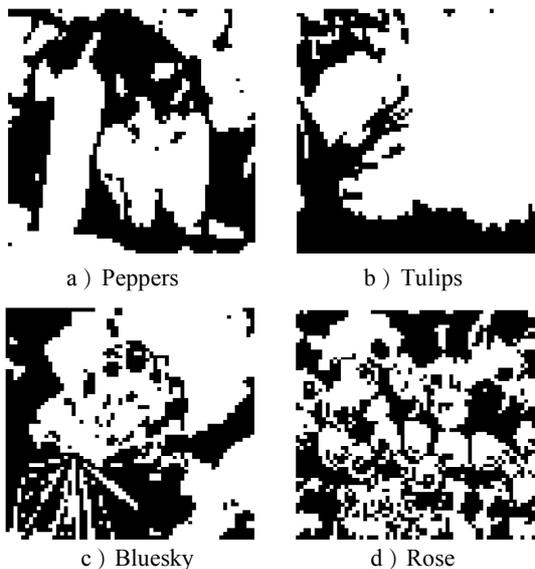


图 13 特征信息

Fig. 13 Feature information

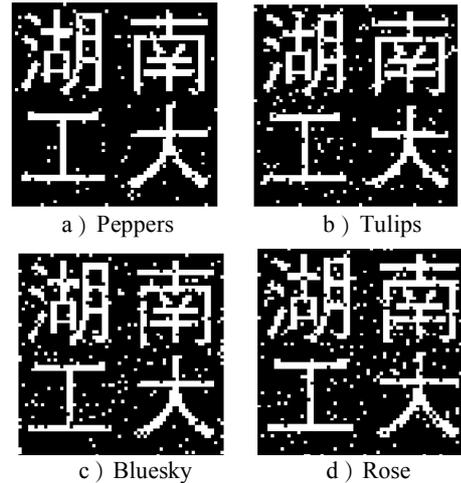


图 14 提取信息

Fig. 14 Extracted information

从印刷/扫描实验结果可以清晰地看到, 版权信息提取完整, 这证明了本文所提出的零水印算法对于印刷/扫描攻击具有很好的鲁棒性, 可用于印刷品的识别认证。

5 结语

本文采用的将印刷/扫描图像转换到 CIE Lab 色彩空间, 结合离散小波分解及奇异值分解的零水印方案, 能够很好地抵抗印刷/扫描攻击及其他常见的噪声攻击。

本文所提出的零水印方案之所以具备抗印刷/扫描鲁棒性的优点, 其原因如下: 首先, 将图像转换到 CIE Lab 色彩空间再对其亮度分量作特征提取, 可以减少印刷/扫描过程中色彩失真的影响; 其次, 进行离散小波分解并选取低频部分信息进行特征提取, 既避免了高频噪声的影响, 又保留了图像的整体特征; 再者, 利用奇异值分解, 依据印刷/扫描前后图像分块间亮度大小关系不变的规律, 构造了鲁棒性零水印特征。

本文所提出的零水印方案可以应用于印刷图像认证, 水印信息提取过程中采用的方法也可以应用于抗印刷/扫描的水印嵌入算法。

参考文献:

- [1] XIE Yong, SHAN Wuyang, CAO Xiaolong, et al. Analysis and Comparison of Holographic and Traditional Digital Image Watermarking in DWT Domain[C]//Computer Science & Education(ICCSE). Melbourne: IEEE, 2012: 790-793.
- [2] 肖颖喆, 张雯, 谢勇. CMYK与RGB颜色空间数字水印在印刷品中的应用比较[J]. 包装学报, 2015, 7(2):

- 11-15.
XIAO Yingzhe, ZHANG Wen, XIE Yong. The Application of Digital Watermarking Technology for Printings in CMYK and RGB Color Space[J]. Packaging Journal, 2015, 7(2): 11-15.
- [3] CHAITANYA K, REDDY E S, RAO K G. Digital Color Image Watermarking Using DWT-DCT Coefficients in RGB Planes[J]. Global Journal of Computer Science and Technology, 2013, 5(13): Online ISSN 0975-4172.
- [4] WANG Shuozhong, HUANG Sujuan, ZHANG Xinpeng, et al. Hologram-Based Watermarking Capable of Surviving Print-Scan Process[J]. Applied Optics, 2010, 49(7): 1170-1178.
- [5] XIE Yong, SHAN Wuyang, FENG Qiqing, et al. Performance Comparison of Holographic Watermarking for Color Images in RGB and CMYK Channels[C]//Control and Decision Conference(CCDC). Guiyang: IEEE, 2013: 3024-3027.
- [6] 谢 勇, 胡亚萍, 谭海湖. 一种抗旋转的彩色图像全息水印防伪方案[J]. 包装学报, 2014, 6(4): 1-7.
XIE Yong, HU Yaping, TAN Haihu. Color Image Rotating Distortion Resistant Holographic Watermarking Security Program[J]. Packaging Journal, 2014, 6(4): 1-7.
- [7] 温 泉, 孙钺锋, 王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报, 2003, 31(2): 214-216.
WEN Quan, SUN Tanfeng, WANG Shuxun. Concept and Application of Zero-Watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216.
- [8] CAO Hangqiang, XIANG Hua, LI Xutao, et al. A Zero-Watermarking Algorithm Based on DWT and Chaotic Modulation[C]//Defense and Security Symposium. Orlando (Kissimmee), FL: International Society for Optics and Photonics, 2006. DOI: 10.117/12.663927.
- [9] KHAN A, HUSAIN S A. A Fragile Zero Watermarking Scheme to Detect and Characterize Malicious Modifications in Database Relations[J]. Scientific World Journal, 2013 (1): 17-22.
- [10] JALIL Z, MIRZA A M, IQBAL T. A Zero-Watermarking Algorithm for Text Documents Based on Structural Components[C]//Information and Emerging Technologies (ICIET). Bali Island: IEEE, 2010: 1-5.
- [11] EDRIS K, FAKHRELDIN M A I, ZAIN J M, et al. Robust Image Zero-Watermarking Based on Complex Zernike Moment[C]//Electronic Design(ICED). Stockholm: IEEE, 2014: 219-223.
- [12] 牛少彰, 伍宏涛, 谢正程, 等. 抗打印扫描数字水印算法的鲁棒性[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2004, 43(增刊2): 1-4.
NIU Shaozhang, WU Hongtao, XIE Zhengcheng, et al. Robustness Investigation of Digital Watermarking Algorithm for Print-and-Scan Process[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2004, 43(S2): 1-4.
- [13] 王娟娟. 基于图像相异性的水印印刷图像质量评价方法[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2014.
WANG Juanjuan. Research on Quality Evaluation of Lithographic Watermarked Image Based on Image Dissimilarity [D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2014.
- [14] 杨素敏, 王嘉祯, 彭德云, 等. 基于HVS和小波变换的零水印数字图像算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(12): 63-65.
YANG Sumin, WANG Jiazhen, PENG Deyun, et al. Zero-Watermark Algorithm Based on HVS and Wavelet Transforming[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(12): 63-65.
- [15] 谢 勇, 张金龙, 张 雯. 一种基于奇异值的抗打印/扫描的彩色图像零水印方案[J]. 包装学报, 2014, 6(3): 10-13.
XIE Yong, ZHANG Jinlong, ZHANG Wen. A Zero-Watermark Scheme Based on Singular Value of the Resistance to Printing/Scanning Color Image[J]. Packaging Journal, 2014, 6(3): 10-13.

(责任编辑: 徐海燕)