

小波变换系数奇异值分解数字水印防伪算法

付文亭, 邓体俊, 陈海生

(中山火炬职业技术学院, 中山 528436)

摘要: **目的** 研究针对打印扫描盗版方式的数字水印防伪算法。 **方法** 结合矩阵奇异值分解(SVD)的抗几何畸变特性和离散小波变换(DWT)多分辨率分解特性,提出一种基于CIE1976L*a*b*颜色空间的彩色图像数字水印防伪算法,并通过仿真实验评价算法的有效性。 **结果** 含水印彩色图像与原始彩色图像的色差均值为1.2183,小于3,且提取的水印中至少有1个水印有效,其相关系数均满足 $R>0.6$ 。 **结论** 在保证水印不可见性的同时,该算法对打印-扫描操作及大多数常规图像处理具有很好的鲁棒性。

关键词: 数字水印; 离散小波变换; 奇异值分解; 打印-扫描; 印刷防伪

中图分类号: TS865 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)21-0128-05

A Watermarking Algorithm for Security Based on Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition

FU Wen-ting, DENG Ti-jun, CHEN Hai-sheng

(Zhongshan Torch Polytechnic College, Zhongshan 528436, China)

ABSTRACT: This study focused on watermarking algorithm for security targeting at the piracy approach of printing and scanning. According to the character of resisting geometrical transformations of singular value discrete (SVD) and multi-resolution transform of discrete wavelet transform (DWT), a watermark algorithm was proposed which based on CIE1976L*a*b* color space. And through the simulation experiment, the efficiency of the algorithm was evaluated. The E value between the watermarked color image and the original image was 1.2183, which was less than 3. And at least one of the watermarks which were extracted from the image was effective, the R value was larger than 0.6. The algorithm can insure the watermark to be invisible and is robust against common printing and scanning process or image processing operations.

KEY WORDS: digital watermarking; DWT; SVD; PS; forgery prevention

近年来,假冒者通过扫描彩色印刷正品,篡改后依靠打印或者印刷方式轻易地获得仿冒品,严重损害了企业和消费者的利益。数字水印是一个崭新的信息隐藏技术,是指将一些标识信息(即数字水印)直接嵌入数字载体当中,但不影响原载体的使用价值,也不容易被他人觉察或注意到。将数字水印技术与印刷防伪、包装防伪相结合^[1-5],是对商品防伪技术的重要发展与改进。

经过打印-扫描处理后的数字图像,可看作是打印图像经过一系列几何变换后且含有扫描噪声的失

真版本,主要存在像素值失真、几何失真、实验客观条件带来的随机误差失真等。像素值失真包括亮度、对比度、gamma调整、复合点变化及边缘噪声等,主要是A/D(模拟/数字)转换过程扫描仪工作性能、D/A(数字/模拟)转换过程打印半色调处理及设备颜色空间色域不同等引起的。几何失真包括旋转、平移、剪切和缩放等,主要是扫描过程人为因素及打印分辨率和扫描分辨率不相同造成的^[6-7]。这里针对打印扫描的盗版方式,结合离散小波变换(DWT)多分辨率分解特性和矩阵奇异值分解(SVD)的抗几何畸变特性,提出一种

收稿日期: 2015-05-05

作者简介: 付文亭(1984—),女,土家族,湖南慈利人,硕士,中山火炬职业技术学院讲师,主要研究方向为图形图像处理。

基于CIE1976 L*a*b*颜色空间的彩色图像数字水印防伪算法。

1 算法理论

1.1 离散小波变换(DWT)

离散小波变换(DWT)在图像数字水印技术中的应用越来越受到重视^[7],主要是由于DWT正交多尺度分解可以将图像分解到一个低频系数子带(LL)和一系列不同尺度、方向的高频系数子带(HL, LH, HH)上,保证了水印嵌入位置选择的多样性。同时,经过DWT多分辨率分解,不同子带代表了图像不同的细节信息,低频带集中了原始图像大部分的能量,高频带代表了图像的边缘和纹理细节信息,充分模拟了人的视觉系统(HVS)识别图像的特性。因此,基于DWT域的数字水印技术可以嵌入大量数据到不同的小波系数上,但总是存在鲁棒性和不可见性的冲突。若将水印嵌入到幅值较大的高频系数中,可以提高水印的不可见性,但鲁棒性低;而采用幅值较大的低频小波系数嵌入水印,可以提高水印的鲁棒性,但同时降低了不可见性。研究表明,基于DWT域的数字水印可以抵抗各种滤波和压缩攻击等常见的图像处理,但若不辅助其他改进措施,却难于抵抗常见的几何攻击。

1.2 奇异值分解法(SVD)

奇异值分解法(SVD)是一种可靠的正交矩阵分解法。对于任一矩阵 $X \in R^{M \times M}$ (R 为实数域),有 $XX^T \geq 0$, $X^T X \geq 0$,且 $\text{rank}\{XX^T\} = \text{rank}\{X^T X\} = \text{rank}\{X\}$,则奇异值分解定义为:

$$X = USV^T = \sum_{k=1}^M S_k U_k V_k^T \quad (1)$$

式中: $X \in R^{M \times M}$ 和 $V \in R^{M \times M}$ 都是酉矩阵,各列正交,分别是 XX^T 和 $X^T X$ 的特征向量。 U 称为左奇异矩阵,对应列向量 U_k 称为左奇异向量; V 称为右奇异矩阵,对应列向量 V_k 称为右奇异向量, $k=1, 2, \dots, M$ 。 $S \in R^{M \times M}$ 是一个非对角线上的项都为0的矩阵,其对角线上元素 σ_i ($i=1, 2, 3, \dots, M$)满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_M = 0$,称做 X 的奇异值,由式(1)唯一确定,它是 XX^T 或 $X^T X$ 特征值的平方根,其中 $r = \text{rank}\{X\}$,满足 $r \leq M$ 。噪声对矩阵奇异值的影响有助于数字水印的研究,Weyl定理^[6]给出了受噪声扰动奇异值与未受噪声扰动奇异值之差的一个上界。设 E 为噪声, $\tilde{S}$ 为加入噪声后的奇异值矩阵,对应的奇异值为 $\tilde{\sigma}_i$,则

$$|\tilde{\sigma}_i - \sigma_i| \leq \|E\|_2, i=1, 2, \dots, M。$$

基于图像奇异值分解(SVD)水印技术的优越性是:矩阵奇异值的稳定性非常好,在整个矩阵被施加小的扰动时其奇异值也不会有大的变化;奇异值所表现的是矩阵内在的代数特性。研究表明,基于图像奇异值分解(SVD)的水印技术,对大多数图像处理及几何变换攻击具备很好的鲁棒性^[8-10]。

1.3 基于小波变换系数奇异值分解的数字水印算法

利用DWT的优点及SVD特性,通过对图像小波系数进行奇异值分解获得小波系数奇异值,将水印同时嵌入到图像小波系数的4个系数频带上,以解决打印-扫描过程中所带来的几何失真问题。同时,考虑到色彩模式转换时色彩损失等问题,在L*a*b*颜色空间进行水印的嵌入,以解决像素失真问题。

假设算法采用 $M \times M$ 大小的原始彩色图像 A , $N \times N$ 大小的灰度水印图像 W ,满足 $M=4N$ 。水印嵌入算法如下所述。

1) 将原始图像 A 从RGB颜色空间转换到L*a*b*颜色空间,对图像的亮度分量 L 进行2级小波变换,获得2个尺度下的4个频带小波系数矩阵LL2, LH2, HL2, HH2,见图1。

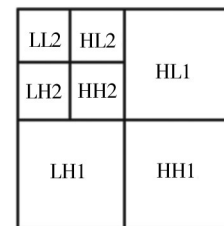


图1 二级小波分解

Fig.1 Second-level wavelet decomposition

2) 对4个子带矩阵进行奇异值分解: $L^k = U_A^k S_A^k (V_A^k)^T$, $k=1, 2, 3, 4$ 分别代表LL2, LH2, HL2和HH2; S_i^k ($i=1, 2, \dots, M/4$)为 S_A^k 中的对角元素,是对应 L^k 的奇异值。

3) 对灰度水印图像 W 进行奇异值分解: $W = U_w S_w (V_w)^T$, S_{wi} ($i=1, 2, \dots, N$)为 S_w 中的对角元素,是对应 w 的奇异值。

4) 将水印的奇异值分别嵌入到4个子带奇异值中: $S_i^{*k} = S_i^k + \alpha_k S_{wi}$, $i=1, 2, \dots, N$; $k=1, 2, 3, 4$ 。 α_k 为不同频带上水印嵌入强度因子,用以平衡水印鲁棒性和不可见性。由4个频带上的小波系数可知,LL频带上的奇异值与其他3个子带的奇异值相差较大,故

对LL频带取强度因子 α_1 ,其他3个子带取较小值 α_2 ,具体大小由实验确定。

5) 重新恢复修改过的奇异值的4个子带小波系数: $L^{*k} = U_A^k S_A^{*k} (V_A^k)^T, k=1,2,3,4$ 。对 L^{*k} 进行2级小波逆变换和Lab颜色空间逆变换,获得嵌入水印后的彩色图像 A^* 。

水印嵌入算法流程见图2。

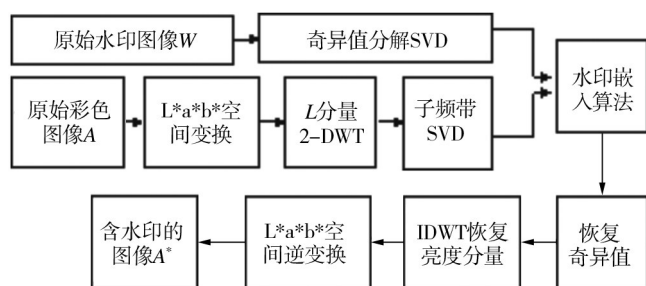


图2 水印嵌入算法流程

Fig.2 Schematic diagram of the watermark embedding algorithm

水印提取算法采用嵌入算法的逆过程,需要借助于原始彩色图像和水印图像,结果可以从4个频带中提取出4个灰度水印图像,水印提取算法流程见图3。

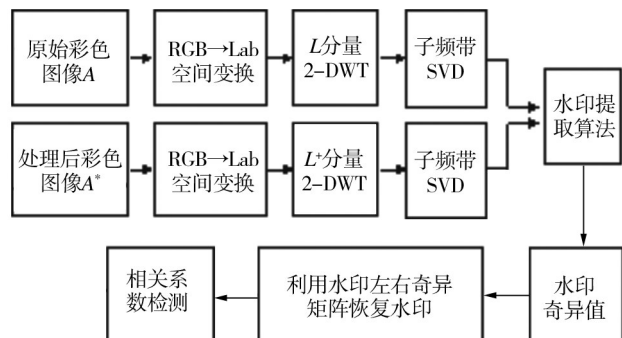


图3 水印提取算法流程

Fig.3 Schematic diagram of the watermark extraction algorithm

1.4 算法评价

色差均值 $\Delta \bar{E}$ 能够客观反应人眼对图像颜色差别的视觉效果,可通过计算原始彩色图像A和嵌入水印后彩色图像 A^* 之间各像素点的色差 $\Delta E_i (i=1,2,\dots, M \times M)$,然后求均值 $\Delta \bar{E}$,将其作为水印不可见性的评价指标。 $\Delta \bar{E}$ 越小,表明水印不可见性越好,一般要求 $\Delta \bar{E} \leq 3$ 。

当含水印的图像受到不同图像处理攻击后,提取的水印与原始水印相比较有一定程度的退化,水印图像的检测主要通过计算原始灰度水印和提取灰度水印之间的相关系数R来判断。

$$R = \frac{\sum \sum (W^* - \bar{W}^*)(W - \bar{W})}{\sqrt{\sum \sum (W^* - \bar{W}^*)^2} \sqrt{\sum \sum (W - \bar{W})^2}} \quad (2)$$

R取值为-1~1,R值越接近1,表明提取的水印效果越好,水印算法鲁棒性越强。若为负值,表明2幅水印图像相差较大。

2 仿真实验

2.1 实验条件

实验采用 256×256 的8位彩色原始图像和 64×64 的8位灰度水印图像进行算法测试,见图4。并采用Haar小波滤波器进行小波分解和重构。实验的主要条件:EPSON R230彩色喷墨打印机,最高分辨率为 $5760 \text{ dpi} \times 1440 \text{ dpi}$,实验打印分辨率为 300 dpi ;中晶1660XL平板扫描仪,光学分辨率为 $800 \text{ dpi} \times 1600 \text{ dpi}$,实验采用扫描分辨率为 300 dpi ;打印的材料为定量 100 g/m^2 的A4彩喷纸;测试软件为Adobe Photoshop CS3和Matlab2010。



图4 原始图像和水印图像

Fig.4 The original image and the watermark image

实验采用6种图像处理攻击来检验算法的鲁棒性,包括打印-扫描处理、JPEG压缩、添加高斯噪声、旋转、直方图均衡和剪切处理。其中,打印-扫描处理主要是先将含水印的彩色图像用彩色喷墨打印机以 300 dpi 分辨率打印在彩喷纸上,然后以 300 dpi 的扫描分辨率扫描输入,输入的数字图像为用Photoshop进行2次立方下、采样大小为 $256 \text{ 像素} \times 256 \text{ 像素}$ 的彩色数字图像。

2.2 结果与分析

含水印的彩色图像及在图像未受任何处理下从4个小波子带提取的水印图像见图5。为便于观察,水印图像均放大1倍显示。实验分别取LL2(左上)、HL2(右上)、LH2(左下)和HH2(右下)等4个频带提取水印图像。其中,LL2子带的尺度因子 α_1 为0.05,其他3

个子带的尺度因子 α_2 均为0.006。



图5 未受任何处理下的原始图像与提取的水印

Fig.5 The original image and the extracted watermark without any treatment

从图5a可以看出,含水印的彩色图像Lena与原始彩色图像Lena很相似,其 $\Delta \bar{E}=1.2183<3$,说明提出的水印算法能较好地满足水印不可见性的要求。

各种攻击后的含水印图像和从4个频带中提取出的水印图像,以及各种攻击的相关主要参数值见图6。不同子带嵌入水印受图像攻击处理后与原始水印图像作相关计算,得到的相关系数 R 值分别记为 R_1 , R_2, R_3, R_4 ,见表1。

表1 含水印图像与水印图像受攻击处理前后对比

Tab.1 The contrast of the watermarked image and the watermark image before and after the treatment

图像	R_1	R_2	R_3	R_4
处理方式	(LL2)	(HL2)	(LH2)	(HH2)
打印-扫描	0.41	0.8	0.74	0.89
添加高斯噪声	0.95	0.52	0.47	0.42
旋转10°	0.44	0.60	0.50	-0.07
直方图均衡	0.47	0.61	0.64	0.7
两边剪切	0.14	0.61	-0.37	0.99
JPEG压缩	0.99	0.89	0.82	0.83

从图6及表1可以看出:在同种攻击下,从小波4个频带所提取的水印图像效果并不相同,表明利用不同子带嵌入水印具有不同的抗攻击性能。结合 R 值和主观视觉评价,得到不同小波频带的抗攻击性能。LL频带能抵抗高斯噪声、JPEG压缩攻击,HL频带能抵抗打印-扫描、旋转、直方图均衡、JPEG压缩攻击,LH频带能抵抗旋转、直方图均衡、JPEG压缩攻击,HH频带能抵抗打印-扫描、直方图均衡、剪切攻击;若将相同水印嵌入到小波分解后的4个子频带中,提取的水印中至少有1个水印是有效的,其相关系数都能满足 $R>0.6$,相关性较强,因而要移除水印是比较困难的,可见水印的安全性较高;仅通过相关



图6 各种攻击后含水印图像及其从4个频带中提取的水印图像

Fig.6 The watermarked image and the watermark image extracted from the 4 frequency bands after all kinds of attacks

系数 R 来检验水印的存在性是不够的,需要结合主观视觉评价才能达到更好的检验效果。例如,在图6d的HL分量中提取的水印相关系数 $R=0.61>0.6$,但是水印图像却完全辨认不出来。

3 结语

提出基于小波变换系数奇异值分解的数字水印算法,结合了离散小波变换(DWT)多分辨率分解特性和矩阵奇异值分解(SVD)的抗几何畸变特性,在 $L^*a^*b^*$ 颜色空间进行水印的嵌入后,在保证水印不可见性的同时,该算法对打印-扫描操作及大多数常规图像处理具有很好的鲁棒性,可有效地应用于彩色图像印刷品的版权保护及防伪。

参考文献:

- [1] 孙刘杰,王子煜. 一种新的安全鲁棒全息数字水印技术[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 106—109.
SUN Liu-jie, WANG Zi-yu. A New Holographic Digital Watermarking Technology with Good Security and Robustness [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 106—109.
- [2] 白韬韬,刘真,卢鹏. 基于QR码的抗几何攻击数字水印[J]. 包装工程, 2013, 34(11): 113—116.
BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Geometrical Attack Resistant Digital Watermarking Based on QR Code[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(11): 113—116.
- [3] 李毓彬,孙刘杰,包观笑. 一种基于QR码的彩色图像数字水印[J]. 包装工程, 2015, 36(7): 91—95.
LI Yu-bin, SUN Liu-jie, BAO Guan-xiao. A Novel Color Image Digital Watermarking Algorithm Based on QR Code[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7): 91—95.
- [4] 周中原,孙刘杰,王文举,等. 抗几何攻击的强鲁棒性全息水印研究[J]. 包装工程, 2014, 35(5): 131—135.
ZHOU Zhong-yuan, SUN Liu-jie, WANG Wen-ju, et al. Holographic Digital Watermarking Algorithm Against Geometric Attacks with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(5): 131—135.
- [5] 周中原,孙刘杰,唐波,等. 一种抗旋转的全息水印算法[J]. 包装工程, 2013, 34(19): 95—99.
ZHOU Zhong-yuan, SUN Liu-jie, TANG Bo, et al. An Anti-rotation Holographic Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(19): 95—99.
- [6] 包观笑,孙刘杰,李毓彬,等. 抗任意旋转攻击的数字水印防伪技术[J]. 光电子·激光, 2015, 26(1): 156—161.
BAO Guan-xiao, SUN Liu-jie, LI Yu-bin, et al. Digital Watermarking Technology Against Arbitrary Rotation Attack[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2015, 26(1): 156—161.
- [7] 肖颖喆,张雯,单武扬. 全息数字水印技术在防伪印刷领域的应用研究[J]. 包装学报, 2013, 5(4): 47—51.
XIAO Ying-zhe, ZHANG Wen, SHAN Wu-yang. Research on Application of Holographic Digital Watermarking Anti-Counterfeiting Printing[J]. Packaging Journal, 2013, 5(4): 47—51.
- [8] 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): 103—108.
XIE Yong, LI Juan, WANG Juan-juan. A kind of Printing and Scanning Tilt Distortion Resistant Digital Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 103—108.
- [9] 李旭东. 基于奇异值分解的灰度级数字水印算法[J]. 武汉大学学报, 2010, 35(11): 1305—1308.
LI Xu-dong. Gray-level Digital Watermarking Algorithm Based on SVD[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(11): 1305—1308.
- [10] 曹文梁. 基于奇异值分解和整数小波变换的优化图像数字水印[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(8): 2251—2254.
CAO Wen-liang. A Novel Image Watermarking Algorithm Based on the Singular Value Decomposition and the Integer Wavelet Transform[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(8): 2251—2254.
- [11] 石永福,杨得国,李智. 一种基于小波变换的数字图像水印新算法[J]. 华中师范大学学报, 2013, 47(14): 479—482.
SHI Yong-fu, YANG De-guo, LI Zhi. A new Way of Digital Watermark Based on Wavelet Transformation[J]. Journal of Huazhong Normal University, 2013, 47(14): 479—482.
- [12] SONG Y J, LIU R Z, TAN T N. Digital Watermarking for Forgery Detection in Printed Materials[C]// Proc of the Second IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia in Beijing, 2001: 403—410.
- [13] MIZUMOTO T, MATSUI K. Robustness Investigation of DCT Digital Watermark for Printing and Scanning[J]. Electronics and Communication in Japan, 2003, 86(4): 72—76.
- [14] WANG S, ZHENG D, ZHAO J. An Image Quality Evaluation Method Based on Digital Watermarking[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2007, 17(1): 98—101.
- [15] XIE Yong, SHAN Wu-yang, CAO Xiao-long, et al. Analysis and Comparison of Holographic and Traditional Digital Image Watermarking in DWT Domain[C]// The 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE2012). Melbourne, Australia, 2012: 790—793.
- [16] YU Long-jing, NIU Xia-mu, SUN Sheng-he. Print-and-scan Model and the Watermarking Countermeasure[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23: 807—814.