

基于QR码的DWT-SVD数字水印算法

于海娇, 孙刘杰, 李毓彬, 包观笑

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要:目的 结合奇异值和小波变换的优点, 针对彩色载体图像进行水印的嵌入和提取, 提高水印的鲁棒性和安全性。方法 根据基于DWT-SVD的数字水印算法, 对彩色载体图像进行RGB到Lab颜色空间的转换, 对L分量作二级离散小波变换, 选择低频子带并对其进行奇异值分解, 同时对原始QR码水印进行奇异值分解。最后根据人眼视觉系统(HVS)特性, 选择合适的嵌入强度因子嵌入水印。结果 文中算法对于高斯噪声、椒盐噪声、斑纹噪声和泊松噪声、JPEG压缩、小角度的旋转攻击、缩放攻击以及对比度增强有一定的鲁棒性。结论 该算法能够抵抗常见的水印攻击, 满足数字防伪以及版权保护的需要。

关键词: 数字水印; QR码; 奇异值分解; 离散小波变换; 人眼视觉系统特性

中图分类号: TS865 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)23-0125-05

Digital Watermark Algorithm with DWT-SVD Based on QR Code

YU Hai-jiao, SUN Liu-jie, LI Yu-bin, BAO Guan-xiao

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: Based on the advantages of wavelet transform and singular value decomposition, a new method was put forward for watermark embedding and extraction of color images, in order to improve the robustness and safety of watermark. A novel digital watermark algorithm based on singular value decomposition and wavelet transform method was used for color space conversion of the color host image from RGB to Lab. Two levels wavelet transformation was carried out on the L components of the color host image in the standard color space, and singular value decomposition was carried out on low frequency sub-band and the original quick response code. At last, the watermark was embedded with an appropriate embedding strength coefficient obtained on the basis of human visual system. The experiments showed that the proposed algorithm had strong robustness against Gaussian, salt & pepper, speckle and Poisson noise attacks, JPEG compression attacks, small-angle rotation attacks, compression attacks and contrast enhancement attacks. In conclusion, the watermarking algorithm was able to resist common watermark attacks and could meet the requirements of digital anti-counterfeiting and copyright protection.

KEY WORDS: digital watermark; quick response code; singular value decomposition; DWT transform; human visual system characteristics

数字技术使存储、复制与传播多媒体信息(图像、文本、音频和视频等)变得非常方便, 在有益于人类发展的同时, 带来了盗版以及版权归属权的问题。数字水印技术的产生与发展已经为相关问题的解决提供了一个很好的方式。数字水印技术是一种用于证明

数字作品版权的真实性、跟踪盗版行为或者提供产品附加信息的特殊的隐藏技术。嵌入产品的水印信息不会影响产品的可观性和完整性。条形码技术自从出现之后发展较快, 近年来, 学者们开始研究将二维条形码作为水印信息嵌入图像。FENG Xiao-fei^[1]依据

收稿日期: 2015-04-24

基金项目: 上海市教委科研创新重点项目(13ZZ111)

作者简介: 于海娇(1990—), 女, 内蒙古呼伦贝尔人, 上海理工大学硕士生, 主攻数字水印、图像处理。

通讯作者: 孙刘杰(1964—), 男, 安徽人, 上海理工大学教授, 主要研究方向为数字水印。

人眼的视觉特性有效提高了水印的鲁棒性,文中使用的是PDF417二维码。王子煜^[2]利用加密傅里叶全息技术处理QR码后将其作为水印嵌入到载体明度分量二级小波变换后的低频系数中,并采用综合滤波的方式对提出的水印进行图像质量增强,效果不错,但是数字水印的鲁棒性有待提高。许诗旸^[3]提出了新的基于DWT-SVD的数字水印算法,鲁棒性很强,但是水印图像局限性比较强,只能为二值图像,同时没有考虑彩色载体图像。

文中根据人眼视觉特性,提出基于DWT-SVD的数字水印算法,采用QR码作为水印进行嵌入,同时载体图像是彩色图像。算法的嵌入系数根据人眼的视觉特性进行选择,水印的不可见性较好。

1 关键技术

1.1 图像的奇异值分解

奇异值分解^[8-10]隶属于线性代数,是一种非对称正交变换,它以特征向量为基础,被广泛应用于数字图像处理。奇异值在图像受到一些干扰时不会发生明显改变,稳定性好,奇异值代表了一幅图像的本质特性,水印嵌入后,在图像受到简单攻击时,奇异值变化很小。正是由于它不表现图像的视觉特性这个优势,使得奇异值分解具有比较好的隐蔽性和抵抗几何攻击能力,能够很好地弥补离散小波变换不能很好抵抗几何攻击的缺陷,所以图像的奇异值分解和离散小波变换可以很好地结合起来,用来提高数字水印的鲁棒性和数字水印算法的执行速率,还使得嵌入系数有了更多的选择。

图像奇异值分解的基本思想:如果把一幅数字图像用矩阵 $A^{n \times n}$ 形式来表示,那么矩阵 A 的奇异值分解定义如下:

$$A=USV^T \tag{1}$$

$$U = \begin{bmatrix} U_{1,1} & \cdots & U_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ U_{n,1} & \cdots & U_{n,n} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$S = \begin{pmatrix} S_{1,1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & S_{n,n} \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$V = \begin{bmatrix} V_{1,1} & \cdots & V_{1,n} \\ \vdots & & \vdots \\ V_{n,1} & \cdots & V_{n,n} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中: U, V 为正交矩阵; S 为对角矩阵,其非对角

线上的元素均为0,对角线上元素满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_r \geq \lambda_{r+1} = \cdots = \lambda_n = 0$, r 是矩阵的秩,它等于非0奇异值的个数, $\lambda_i (i=1, 2, \cdots, n)$ 称为 A 的奇异值。

1.2 离散小波变换

离散小波变换^[9-11]是一个时间和频率的局域变换,能够在不同尺度上分析信号。小波变换的概念于1974年提出,假设任意函数 $x(t)$ 的小波变换为 $W(a, b)$,对尺度参数 a 和定位参数 b 进行离散化处理,可以选取 $a = a_0^m, a_0 > 0, m \in Z$;令 $b = nb_0 a_0^m, b \in R, n \in Z$ 。于是小波函数 $\psi_{(a,b)}(t)$ 变换为:

$$\psi_{(m,n)}(t) = a_0^{-m/2} (a_0^{-m} t - nb_0) \tag{5}$$

离散小波变换定义为:

$$DWT = \int_R f(t) \psi_{(m,n)}(t) dt \tag{6}$$

DWT变换算法具有良好的时间频率局部性,对于一幅图像,在经过一级小波分解之后,能够得到4个子图像,分别为低频子带 LL_1 和高频子带 LH_1, HL_1 和 HH_1 ,其低频子带保留了原图像的最基本特征,剩下3个子带代表高频方向的细节部分,小波分解的数据传递见图1。小波变换在各层按照左上、右下、左下、右下的顺序递归进行。若再对低频子带 LL_1 做一次小波分解, LL_2 是进一步的低频子图,同级分辨率下 HL_2 包含了水平方向和垂直方向较多的边缘信息,以此类推 LH_2, HH_2 。该方法在图像处理领域应用广泛,它有许多独特的优势。首先是适合于当前最新的JPEG2000图像压缩标准,此外DWT变换算法能够较好地与HVS(人眼视觉系统)特性相匹配,有助于水印的隐蔽性。DWT变换算法有较好的抵御滤波和压缩处理等外界干扰的能力,速度较快,其中在DWT小波基的选择上倾向于Haar小波,它能很好地抵抗噪声和滤波攻击。图像经小波变换之后,在图像压缩上,有利于量化后提高压缩比,选取要使用的低频子带,对其子图像的系数进行处理。DWT变换算法不具有旋转不变性的特点,在与SVD相结合后,水印的嵌入系数选择具有多样性,子带编码时更加方便,还能提高水印抗几何

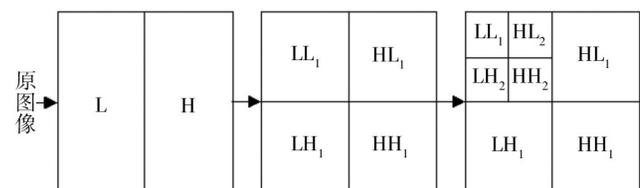


图1 二层小波分解过程

Fig.1 Process of second wavelet transform

攻击的鲁棒性。

1.3 QR码

QR码^[7]的“QR”是Quick Response的缩写,又称快速响应矩阵码。传统的条形码只能处理20位左右的信息量,与此相比,一个QR码最多可以处理7089字(仅用数字时)的巨大信息量。另外,QR码还可以支持所有类型的数据。QR码具有“纠错功能”,即使编码变脏或破损,也可自动恢复数据。这一“纠错能力”具备4个级别,用户可根据使用环境选择相应的级别。调高级别,纠错能力也相应提高,但由于数据量会随之增加,编码尺寸也会变大。如图2所示,QR码呈正方形,由编码区、功能图形和空白区等3部分组成。

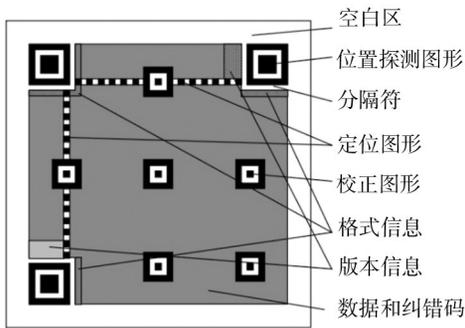


图2 QR码结构

Fig.2 Map of QR code structure

文中选定QR码的纠错等级为M,选定的版权标识信息为usst,按照GB/T 18284—2000中相关规定编码为QR码。

2 水印的嵌入和提取

2.1 水印的嵌入

实验选用RGB模式的像素大小为512×512的lena彩色图像作为载体图像,见图3a。将文字信息usst编码为QR码作为水印图像,大小为128×128的像素,见图3b。选定彩色lena图像作为载体图像,并对其进行RGB颜色空间到Lab颜色空间的转换,提取出L分量作二级离散小波变换,选其低频子带进行SVD变换,得到奇异值矩阵。将生成的QR码也进行奇异值分解,得到它的奇异值矩阵。根据HVS特性,选择嵌入系数,利用加性原则对2个奇异值矩阵进行计算。对得到的矩阵进行二级离散小波逆变换,获得含水印的图像。



图3 原始载体图像与原始水印图像

Fig.3 The original host image & the original watermark

2.2 提取水印

对含水印图像进行颜色空间的转换,把提取出的L分量进行二级小波分解并选取低频子带,对低频子带作SVD分解。根据嵌入算法进行水印解密并重建。得到的含水印图像和重建水印图像见图4。对提取出的QR码进行译码。



图4 含水印图像与重建水印图像

Fig.4 The watermarked image & the extracted watermark image

3 结果与分析

3.1 水印的评价指标

数字水印算法的评价指标有多种,常采用峰值信噪比(PSNR)及归一化相似度(NC)。M×N大小的lena图像,嵌入水印后与原始图像的PSNR为:

$$PSNR=10 \lg \frac{255^2 MN}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (l(i,j) - l_w(i,j))^2} \quad (7)$$

式中: $l_w(i,j)$ 为嵌入水印后图像的R,G,B分量的像素值; $l(i,j)$ 为原始水印图像的R,G,B分量的像素值。其中,PSNR值的单位为dB,值越大,证明失真越小,则该算法充分满足了人眼视觉要求,有很好的效果。

为了衡量提取后水印图像和原始水印图像的相

关程度,采用归一化相似度(NC)进行客观评价。公式为:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i,j)w'(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w(i,j)w(i,j)} \quad (8)$$

式中: $w(i,j)$ 为算法原始使用的水印; $w'(i,j)$ 为重建的水印信息。文中除了利用NC值进行水印的客观评价之外,还根据译码成功率来评价该水印算法。这是由于受到攻击的水印图像提取出QR码之后,就算有一定程度的破损,但是只要能够译码成功,都可以完整地保留版权标识信息。目前,只要是具有扫码功能的智能手机都能对文中的QR码进行译码,所以有时即使得到的归一化相似度值不是很高,也能保证文中算法的有效性。

3.2 结果

文中原始彩色载体图像与嵌入水印后的载体图像PSNR值为49.5 dB。对于提取出的水印图像,可以利用手机等设备成功译码,提取的QR码水印与原始QR码水印的NC值为1。通过文献[2]的方法得到含水印图像的PSNR值为38.4 dB,提取的QR码水印与原始QR码水印的NC值为1。结果表明,文中算法优于文献[2]的算法。水印具有良好的不可见性,提取出的水印图像能正确译出其携带的版权标识信息。

算法在正常情况下的嵌入和提取表现良好,那么含水印图像遭遇各种攻击后,该算法能否重建清晰完整的水印信息是接下来要进行验证的。文中对含水印图像进行了几种常见的攻击,其中包括不同的噪声攻击、JPEG压缩攻击、小角度旋转攻击、对比度增强等,而后计算出载体图像的PSNR值与水印图像的NC值,实验结果见图5。

为了有对比效果,对文献[2]使用的方法进行仿真,同时对已嵌入水印的图像进行高斯噪声和椒盐噪声攻击,实验结果见图6。

从图6可以看出,同样条件的攻击,对比来看,文中算法提取出的水印要比文献[2]算法提取出的水印更加清晰,同时版权标识信息识别更快。实验数据见表1。

由表1可知,文中算法较之文献[2]的算法在对抗高斯噪声、椒盐噪声、JPEG压缩以及缩放攻击方面有一定优势。同时,对于文献[2]没有进行的泊松噪声、斑纹噪声攻击以及小角度旋转和对比度增强攻击方面也有一定的抵抗能力,在水印受到攻击后,仍然能够正确译码,得到版权标识信息。由此可见,文中算



图5 受到攻击后的载体图像与提取的水印图像

Fig.5 The attacked host images & the extracted watermark images



图6 文中和文献[2]受到攻击后的载体图像与提取的水印对比

Fig.6 The attacked host images & the extracted watermark images of this paper and literature[2]

表1 水印攻击实验结果

Tab.1 Experimental results of watermarking attacks

攻击方式	文献[2]实验数据		文中实验数据			
	PSNR	NC	能否译码	PSNR	NC	能否译码
椒盐噪声2%	0.85	可以	34.02	0.98	可以	
椒盐噪声4%	0.85	可以	28.71	0.91	可以	
高斯噪声(0,0.005)	0.93	可以	28.64	0.98	可以	
高斯噪声(0,0.01)	0.91	可以	24.15	0.96	可以	
放大后缩小	0.97	可以	61.40	0.99	可以	
缩小后放大	0.93	可以	40.53	0.88	可以	
JPEG压缩(40%)	0.91	可以	49.08	0.99	可以	
JPEG压缩(80%)	0.94	可以	49.66	0.99	可以	
旋转攻击(5°)			6.04	0.63	可以	
泊松噪声			34.35	0.99	可以	
斑纹噪声(0.1)			12.38	0.72	可以	
对比度增强			3.89	0.79	可以	

法的不可见性较好,安全性较高,鲁棒性较强。

4 结语

文中在前人的基础上,结合QR码、奇异值分解以及离散小波变换,提出了一种新的数字水印算法。在小波变换后得到的低频子带嵌入水印信息结合奇异值分解的几何不变性,使嵌入水印的同时拥有较好的隐蔽性以及鲁棒性。该算法能够抵抗常见的水印攻击,如高斯噪声、椒盐噪声、泊松噪声、斑纹噪声以及JPEG压缩、小角度旋转、缩放等攻击。实验结果表明,与同类算法相比,该水印算法在抵抗噪声、小角度旋转以及对对比度增强攻击方面有一定的提高,同时,文中算法针对的是彩色载体图像,实现了对数字版权的保护。

参考文献:

[1] FENG Xiao-fei,JI Xing-zhong. A Blind Watermarking Method with Strong Robust Based on 2D-barcode[C]// 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science,2009:452—456.

[2] 王子煜,孙刘杰.改进的基于QR码的数字全息水印[J].包装工程,2014,35(7):144—148.
WANG Zi-yu,SUN Liu-jie. Improved QR Code -based Digital Holographic Watermark[J]. Packaging Engineering, 2014,35(7):144—148.

[3] 王晓红,许诗吻.基于W-SVD的强鲁棒性复制图像水印算法[J].包装工程,2012,33(11):113—119.
WANG Xiao-hong,XU Shi-yang. Digital Image Watermark

Algorithm with Strong Robustness Based on W-SVD[J]. Packaging Engineering,2012,33(11):113—119.

[4] 冯汉禄,黄颖为,牛晓娇,等. QR码纠错码原理及实现[J]. 计算机应用,2011,31(1):40—42.
FENG Han-lu,HUANG Ying-wei,NIU Xiao-jiao, et al. Principle and Implementation of Error Correcting Coding of QR Code[J]. Journal of Computer Applications,2011,31(1):40—42.

[5] 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,2013,33(13):104—107.
BAI Tao-tao,LIU Zhen,LU Peng. Geometrical Attack Resistant Digital Watermarking Based on QR Code[J]. Packaging Engineering,2013,34(13):104—107.

[6] 肖菲菲,刘真. 二维码防伪技术在可变数据印刷中的应用[J]. 包装工程,2011,32(21):102—109.
XIAO Fei-fei,LIU Zhen. Application of Anti-counterfeiting Technology Based on Two-dimensional Bar Code in Variable Data Printing[J]. Packaging Engineering,2011,32(21):102—109.

[7] VONGPRADHIP S,RUNGRAUNGLIP S. QR Code Using Invisible Watermarking in Frequency Domain[C]// 2011 Ninth International Conference on ICT and Knowledge Engineering,2012:47—52.

[8] LAI C C. An Improved SVD-based Watermarking Scheme Using Human Visual Characteristics[J]. Optics Communications,2011,284(4):938—944.

[9] 熊祥光,王力.一种改进的DWT-SVD域参考水印方案[J]. 计算机工程,2014,50(7):75—79.
XIONG Xiang-guang,WANG Li. Improved Reference Watermarking Scheme in DWT-SVD Domain[J]. Computer Engineering and Applications,2014,50(7):75—79.

[10] 朱建忠,姚志强.基于DWT-SVD和Turbo码的彩色图像盲水印算法[J]. 吉林大学学报(理学版),2014,52(7):773—778.
ZHU Jian-zhong,YAO Zhi-qiang. Blind Watermarking Algorithm for Color Images Based Oil DWT-SVD and Turbo Codes[J]. Journal of Jinlin University(Science Edition),2014,52(7):773—778.

[11] SANTHI V,THANGAVELU A. DWT-SVD Combined Full Bang Robust Watermarking Technique for Color Image in YUV Color Space[J]. International Journal of Computer Theory and Engineering,2009,1(4):424—429.

[12] 孙刘杰,徐卓.一种基于Contourlet变换的彩色图像全息水印算法[J]. 包装工程,2013,33(9):10—13.
SUN Liu-jie,XU Zhuo. Novel Color Image Hologram Watermarking Algorithm Based on Contourlet Transform[J]. Packaging Engineering,2013,33(9):10—13.

[13] 孙刘杰,李孟涛.基于CMYK颜色空间的光全息水印算法
(下转第154页)

- Evaluation Methods for Ink Trapping[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(6): 64—83.
- [10] KIPPHAN H, PRINTMEDIEN H. Technologien und Produktionsverfahren[M]. Berlin: Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [11] SCHLAEPFER K. Farbmétrikinder Reproduktionstechnikund Mehrfarbendruck[M]. UGRA: Switzerland, 2000.
- [12] KIPPHAN H. Handbook of Print Media[M]. Heidelberg: Springer Press, 2001.
- [13] WYSZECKIG S. Color Science[M]. New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [14] 郑元林, 杨淑蕙. CIE1976 色差公式的均匀性研究[J]. 包装工程, 2005, 26(2): 48—49.
ZHEN Yuan-lin, YANG Shu-hui. Study on the Uniformity of CIE1976 Color Difference Formula[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(2): 48—49.
- [15] 武兵. 印刷色彩学[M]. 北京: 印刷工业出版社, 2008.
WU Bing. Printing Color Science[M]. Beijing: Printing Industry Publishing House, 2008.

(上接第 129 页)

- 研究[J]. 包装工程, 2012, 33(9): 27—32.
SUN Liu-jie, LI Meng-tao. Study on Light Holographic Watermarking Algorithm Based on CMYK Color Space[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(9): 27—32.
- [14] 李晨璐, 孙刘杰, 李孟涛. 强鲁棒性全息水印算法[J]. 包装工程, 2012, 33(13): 104—107.
LI Chen-lu, SUN Liu-jie, LI Meng-tao. Robust Holographic Watermarking Algorithm[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(13): 104—107.
- [15] 李晨璐, 孙刘杰. 一种新的彩色图像变换域全息水印算法[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 84—88.
LI Chen-lu, SUN Liu-jie. New Color Image Holographic Watermarking Algorithm in Transform Domain[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 84—88.
- [16] CHENG C J, HWANG W J, ZENG H Y, et al. A Fragile Watermarking Algorithm for Hologram Authentication[J]. Journal of Display Technology, 2014: 319—327.

(上接第 143 页)

- 研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2009.
WANG Na, WEI Xian-fu, HUANG Pei-qing. Research of UV Inkjet Ink Dispersion and Rheological Properties[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2009.
- [15] 张开瑞, 张涛, 李涛, 等. 高分子分散剂对 UV 喷墨色浆分散稳定性的影响[J]. 现代化工, 2014, 34(1): 75—78.
ZHANG Kai-rui, ZHANG Tao, LI Tao, et al. Impact Polymer Dispersant on the Dispersion Stability of UV Inkjet Colorants [J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(1): 75—78.
- [16] 曹进, 宗小顺, 黄培青, 等. 研磨条件对 UV 喷墨油墨分散性的影响[J]. 北京印刷学院学报, 2010, 18(2): 13—16.
CAO Jing, ZONG Xiao-shun, HUANG Pei-qing, et al. Effect of Polishing Conditions on UV Inkjet Ink Dispersibility[J]. Journal of Beijing Institute of Graphic Communication, 2010, 18(2): 13—16.
- [17] 张婉, 魏先福, 黄培青, 等. 单体和预聚物对 UV 喷墨油墨性能的影响[J]. 信息记录材料, 2008, 9(1): 3—7.
ZHANG Wan, WEI Xian-fu, HUANG Pei-qing, et al. Monomers and Prepolymers Impact on the Performance of UV Inkjet Ink[J]. Information Recording Materials, 2008, 9(1): 3—7.