

·信号与信息处理·

基于Tetrolet变换和SVD的QR码数字水印

王珺玥, 陈大庆, 顾济华

(苏州大学, 江苏 苏州 215006)

摘要: 针对QR码数字水印的鲁棒性和不可感知性的平衡问题, 提出一种基于Tetrolet变换和奇异值分解(SVD)的数字水印技术。首先, 利用Tetrolet变换将QR码图像的能量信息集中于Tetrolet系数中, 再对该系数进行SVD分解, 最后将置乱加密的水印图像嵌入奇异值矩阵中, 完成水印的嵌入。仿真实验结果表明, 该方法可以有效抵抗高斯、椒盐、乘积等多种噪声攻击和旋转、剪切、平移等几何攻击。该算法能在图像不失真的前提下, 有效提高水印的抗噪声和抗几何攻击的能力, 实现数字水印系统不可感知性和鲁棒性的平衡, 具有较强的实用性。

关键词: Tetrolet变换; 奇异值分解; QR码; 数字水印

中图分类号: TP352

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-01-0050-06

Digital Watermarking Technology for QR Code Based on Tetrolet Transform and SVD

WANG Jun-yue, CHEN Da-qing, GU Ji-hua

(Soochow University, Suzhou 215006, China)

Abstract: According to the balancing problem of the robustness and invisibility, a new digital watermarking technology for quick response (QR) code based on Tetrolet transform and singular value decomposition (SVD) is proposed. At first, the energy information of the QR code image is concentrated in Tetrolet coefficient using Tetrolet transform. And then, the coefficient is decomposed by SVD. At end, the watermarking embedding is completed by embedding the scrambling encryption watermarking image to the singular value matrix. The simulation results show that this algorithm can effectively resist noise attacks of Gauss, salt and pepper and multiplicative. It also can resist geometric attacks of rotation, shear and translation. This algorithm can effectively improve the ability to resist noise and geometric attacks, achieve the balance between the robustness and invisibility of the digital watermarking system in the prerequisite with the image without distortion. It shows a high practicability.

Key words: Tetrolet transform; singular value decomposition (SVD); quick response (QR) code; digital watermarking

近年来, 二维码技术在各行各业被广泛应用。QR码作为二维码的一种, 与传统二维条形码相比, 更是具有占有空间小、纠错能力强、应用成本低、读取速度快的优点。但二维码并不具有安全严格的加密防伪技术, 因此如何提高二维码的安全性, 提高其防伪能力, 已逐渐成为研究的热点^[1-2]。

现有的数字水印技术, 主要分为空间域和变换

域算法。其中, 二维离散小波变换(DWT)在数字水印领域获得了广泛的应用^[3]。这是由于其优秀的空间特性和多分辨率特性, 而且这一理论与人类的视觉系统模型(HVS)相似。但是, 传统DWT独立的将一维小波变换应用于图像的行和列。因此, DWT处理二维或更高维的信号时存在缺陷, 在表达图像的几何结构特征方面, 也达不到最佳的

图像处理效果^[4]。文中使用的 Tetrolet 变换由 DWT 发展而来。它在进行图像处理时考虑了图像的几何特性,能够精确的表达图像的结构、纹理、边缘方向性等图像信息。同时, Tetrolet 变换也使得图像能够被更稀疏的表示,能量系数更为集中,这能有效减少图像处理过程产生的图像失真,提高抗噪能力^[5]。

奇异值分解(SVD)是一种有效的矩阵分析工具。它表现的是图像的内蕴特性,与人类的视觉特性无关。因此利用奇异值分解嵌入水印,可以很好的保证水印的不可感知性。此外,由于奇异值极强的抗干扰能力,当图像受到一定程度的干扰时,并不会发生明显的变化。将图像看作矩阵进行分析,可以进一步提高水印算法的抗几何攻击能力^[6-8]。

提出的 Tetrolet 变换与 SVD 相结合的算法,能在图像不失真的前提下,实现数字水印系统不可感知性和鲁棒性的平衡。

1 Tetrolet 变换

Tetrolet 变换具有自适应性,在进行图像处理时,它能选择与图像几何结构相适应的四格拼板并进行 Haar 小波变换。

具体分解步骤如下:

(1) 将图像 I 分解为 4×4 的块 Q_{ij} ($i, j=0, 1, \dots, \frac{N}{2^{r+1}-1}$)。

(2) 对每个 Q_{ij} 用 5 种基本且独立的四格拼板(图 1)进行划分,共有 117 种可能。不考虑镜像和旋转,有 22 种划分形式(图 2), $c=1, 2, \dots, 22$ 。

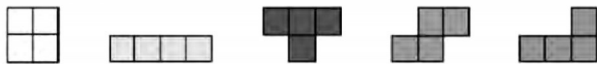


图 1 5 种独立四格拼板

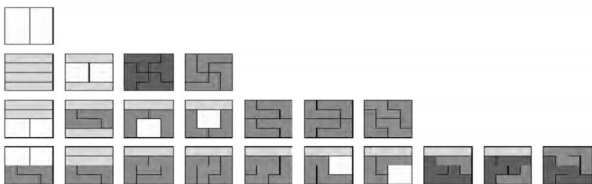


图 2 4×4 块的 22 种基本填充形式

(3) 对划分的每部分 $I_s^{(c)}(s=0, 1, 2, 3)$, 进行 haar 小波变换,得到 4 个低频系数(式(1))和 12 个高频系数(式(2))。

$$a^{r(c)}[s] = \sum_{(m,n) \in I_s^c} \varepsilon[0, L(m, n)] a^{r-1}[m, n], s=0, 1, 2, 3 \quad (1)$$

$$w_l^{r(c)}[s] = \sum_{(m,n) \in I_s^c} \varepsilon[l, L(m, n)] a^{r-1}[m, n], s=0, 1, \dots, 12 \quad (2)$$

其中, $\varepsilon[l, L(m, n)] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$

(4) 根据式(4)选择高频系数并进行重新排列。以此类推,进行下级分解,直到分解至 r 级。

$$c^* = \arg \max_c \sum_l \left\| w_l^{r(c)} \right\|_l = \arg \max_c \sum_{l=1}^3 \sum_{s=0}^3 \left| w_l^{r(c)}[s] \right| \quad (4)$$

2 奇异值分解

利用 SVD 对矩阵进行分解时,能够有效的获取矩阵的基本结构特征。SVD 运用了矩阵的正交变换,是矩阵对角化的数值运算。对于 $N \times M$ 的数字图像 A,可将其看成一个非负矩阵,即 $A \in R^{N \times M}$, R 表示实数域。其分解形式如式(5)。

$$A = USV^T \quad (5)$$

式中, $U \in R^{N \times N}$ 和 $V \in R^{M \times M}$ 为正交阵; $S \in R^{N \times M}$ 为奇异值矩阵; S 的奇异值满足从大到小的排列,且非零奇异值个数与 A 的秩相等。即满足式(6)。

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_m = 0 \quad (6)$$

因此,图像 A 的分解形式可用式(7)表示。

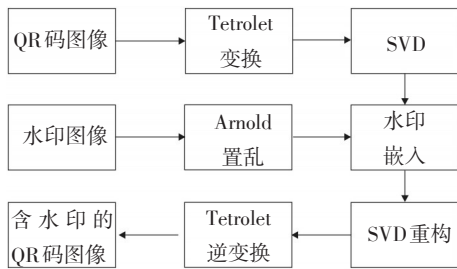
$$A = \sigma_1 U_1 V_1^T + \sigma_2 U_2 V_2^T + \dots + \sigma_r U_r V_r^T \quad (7)$$

3 QR 码

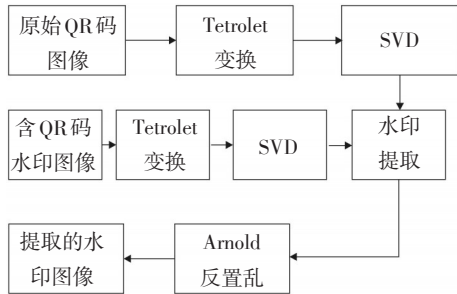
QR 码也称快速识别矩阵码,是一种矩阵形式的二维码。QR 码图像利用黑白相隔的点来记录数据信息,为二值黑白图像。在对 QR 码图像进行水印嵌入时,为了不破坏水印的不可感知性,必须综合考虑每个像素点及其邻域的情况。因此,文中算法将 QR 码图像进行灰度化处理,再进行水印的嵌入^[9-10]。

4 水印的嵌入与提取

水印嵌入与提取算法如图3所示。首先对QR码图像和水印图像进行预处理,再利用SVD,将处理后的水印图像嵌入到QR码图像的Tetrolet系数中。



(a)嵌入水印



(b)提取水印

图3 水印嵌入与提取的流程

4.1 水印的嵌入

使用大小为 256 pixel×256 pixel、纠错等级为 30%,文本信息“养天地正气,法古今完人。123abc”的QR码图像I。水印图片为 128 pixel×128 pixel的灰度图像W。

水印嵌入算法如下:

(1)对水印图像W进行Arnold置乱,得到置乱

后的图片 W_A ,同时将置乱次数保存为密钥Key;

(2)对I进行灰度化处理,再进行Tetrolet变换,并提取其Tetrolet系数T;

(3)对T进行奇异值分解 $T=USV^T$,并将置乱后的水印图片 W_A 嵌入到奇异值矩阵S中 $S_w = S + k \times W_A$,其中k为水印嵌入强度。k值增大能一定程度上提高水印的鲁棒性,但会影响其不可感知性,选择 $k=0.03$;

(4)将 S_w 进行奇异值重构,得到重构后的Tetrolet系数 $T_w = US_w V^T$;

(5)对 T_w 进行Tetrolet逆变换,得到嵌入水印后的图像 I_w 。

4.2 水印的提取

提取水印的过程需要用到原宿主图像I,提取算法如下:

(1)将待检测的图像 I_w 和原宿主图像I进行Tetrolet变换,得到Tetrolet系数 T_w' 和 T' ;

(2)将Tetrolet系数进行SVD,分别得到奇异值矩阵 S_w' 和 S' ;

(3)利用公式 $W_A' = (S_w' - S') / k$ 提取出水印信息;

(4)通过密钥Key对 W_A' 进行Arnold反置乱变换,得到提取出的水印图像 W' 。

5 实验结果与分析

在 MatlabR2014a 平台上对文中算法进行仿真实验。使用 256 pixel×256 pixel的QR码图像作为宿主图像,128 pixel×128 pixel的灰度图像作为水印图像。水印嵌入强度 $k=0.03$,密钥Key=35,Tetrolet分块参数设置为22。仿真结果见图4。



(a)原始QR码图像



(b)原始水印图像



(c)含水印QR码图像



(d)提取水印图像

图4 仿真实验结果

为验证文中算法抗噪声和抗几何攻击能力,采用峰值信噪比(PSNR)和归一化相关系数(NC)来进行客观评价,并与文献[9]进行比较。

PSNR(式(8))越大表明水印的失真度越小。

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{255^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [x(i,j) - \hat{x}(i,j)]^2} \quad (8)$$







NC(式(9))越接近于1表明水印的鲁棒性越好。

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w^*(i,j)w(i,j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w^{*2}(i,j)} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w^2(i,j)}} \quad (9)$$

5.1 噪声攻击实验

为验证水印算法的抗噪声能力,对QR码水印进行高斯、椒盐、乘性等噪声攻击。实验结果如表1所示。

表1 噪声攻击实验

噪声种类	QR码水印图像	提取水印图像	PSNR/dB	NC	文献[9]NC
高斯噪声 (0.005)			21.819 2	0.940 0	0.917 5
椒盐噪声(0.05)			21.669 4	0.938 8	0.873 8
乘性噪声(0.05)			22.020 0	0.942 9	0.916 4







5.2 几何攻击实验

为验证水印算法的抗几何攻击能力,对QR码







水印进行旋转、剪切、平移等几何攻击。实验结果如表2所示。

表2 对QR码水印进行旋转、剪切、平移等几何攻击的实验结果



(a) 旋转攻击实验

旋转角度/(°)	QR码水印图像	提取水印图像	PSNR/dB	NC	文献[9]NC
5			21.064 0	0.930 7	0.606 6
30			21.475 8	0.936 3	0.892 3
45			22.572 5	0.949 2	0.881 6

(b) 剪切攻击实验

剪切比例/%	QR 码水印图像	提取水印图像	PSNR/dB	NC	文献[9]NC
5			23.949 4	0.961 7	0.908 9
20			23.940 1	0.962 0	0.845 2
40			26.904 0	0.980 1	0.878 0

(c) 平移攻击实验

平移尺度	QR 码水印图像	提取水印图像	PSNR/dB	NC	文献[9]NC
[0,100]			30.228 9	0.990 6	0.920 4
[80,120]			30.228 9	0.990 6	0.928 2

通过仿真实验结果,以及与文献[9]的对比可以看出,文中方法在抵抗高斯、椒盐、乘积等多种噪声攻击和旋转、剪切、平移等几何攻击方面有较强的优越性。

6 结论

在不影响QR解码的基础上,提出了一种基于Tetrolet变换和SVD的QR码数字水印算法。利用SVD的抗干扰特性,将数字水印图片嵌入到QR码图像的Tetrolet系数中,生成含水印的QR码图像。通过仿真实验结果表明,该算法在保证水印不可感知性的同时,也提高了水印的抗噪声和抗几何攻击能力,实现了不可感知性和鲁棒性的平衡,具有较强的实际应用价值。

参考文献

- [1] Panyavaraporn J, Horkaew P, Wongtrairat W. QR code watermarking algorithm based on wavelet transform[J]. IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies, 2013, 13(3):791-796.
- [2] Vongpradhip S, Rungraungsilp S. QR Code Using Invisible Watermarking in Frequency Domain[C]//2011 Ninth International Conference on ICT and Knowledge Engineering, 2012:47-52.
- [3] 卢峰, 刘瀚, 宋涛, 等. 基于多级小波分解的复合数字水印检测技术[J]. 光电技术应用, 2010, 25(6):59-62.
- [4] Al-Haj A. Combined DWT-DCT digital image watermarking[J]. Journal of computer science, 2007, 3(9): 740-746.
- [5] Krommweh J. Tetrolet transform: a new adaptive Haar wavelet algorithm for sparse image representation[J]. Journal of Visual Communication & Image Representation, 2010, 21(4):364-374.

- [6] Lai C C, Tsai C C. Digital image watermarking using discrete wavelet transform and singular value decomposition [J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2010, 59(11): 3060-3063.
- [7] 何冰,朱志平.基于对数极坐标下的SVD数字水印算法[J].计算机与数字工程,2011,39(10):138-141.
- [8] 刘丽,周亚建,张斌,等.基于DCT和SVD的QR码数字水印算法[J].红外与激光工程,2013,42(S2):304-311.
- [9] 于海娇,孙刘杰,李毓彬,等.基于QR码的DWT-SVD数字水印算法[J].包装工程,2015(23):125-129.
- [10] 龚冬梅,顾济华,陈大庆,等.基于QR码的抗几何攻击数字全息水印[J].包装工程工程版,2015,36(9):124-128,138.

(上接第14页)

此在实际操作中要根据荧光粉形状的几何特性,优化出光路径,配合适当的激发光源,才能得到理想的白光。

参考文献

- [1] ZHU Yi-ting, Narebdran Nadarajah. Optimizing the performance of Remote Phosphor LEDs[J]. J Light&Vis. Env, 2008, 32(2):115-119.
- [2] CHUNG Shang-chao, HO Pei-chen, LI Dunru. Effect of chip spacing on light extraction for light-emitting diode array[J]. Opt Express, 2015, 23(11): A640-A649.
- [3] CHEN Kuo-ju, CHEN Hsin-chun, SHIH Min-hsiung, et al. Enhanced luminous efficiency of WLEDs using a dual-layer structure of the remote phosphor package[J]. J. Lightwave Technol, 2013, 31(12): 1941-1945.
- [4] HUANG Hsin-tao, HUANG Yi-pai, TSAI Chuang-chuang, et al. Planar lighting system using array of blue LEDs to excite yellow remote phosphor film[J]. J Disp Technol, 2011, 7(1):44-51.
- [5] Narendran N, GU Y, Freyssonier-Nova J P, et al. Extracting phosphor-scattered phosphors to improve white LED efficiency[J]. Phys Stat Sol, 2015, 202(6): R60-R61.
- [6] KIM Jong Kyu, LUO Hong. Strongly enhanced phosphor efficiency in GaInN white light-emitting diodes using remote phosphor configuration and diffuse reflector cup[J]. Jpn J Appl Phys, 2005, 44(5L): L649.
- [7] Keppens A, Denijs S, Wouters S, et al. Modelling the spatial colour distribution of phosphor-white high power light-emitting diodes[J]. SPIE, 2010, 77(17):77170J-1-77170J-10.
- [8] 徐国芳,饶海波,余心梅,等.白光LED光斑均匀性的改进[J].发光学报,2008,29(4):707-712.
- [9] SUN Ching-cherng, CHEN Ching-yi, CHEN Cheng-chien, et al. High uniformity in angular correlated-color-temperature distribution of white LEDs from 2800K to 6500K[J]. Opt Express, 2012, 20(6): 6622-6630.
- [10] WANG Si-min, CHEN Xing, CHEN Ming-xiang, et al. Improvement in angular color uniformity of white light-emitting diodes using screen-printed multilayer phosphor-in-glass[J]. Appl Optics, 2014, 53(36): 8492-8498.
- [11] LIU Zong-yuan, WANG Kai, LUO Xiao-bing, et al. Realization of high spatial color uniformity for white light-emitting diodes by remote hemispherical YAG: Ce phosphor film[C]//2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2010: 1703-1707.
- [12] KUO Hao-chung, HUNG Cheng-wei, CHEN Hsin-chu, et al. Patterned structure of remote phosphor for phosphor-converted white LEDs[J]. Opt Express, 2011, 19(104): A930-A936.
- [13] LIU Zong-yuan, LIU Sheng, WANG Kai, et al. Studies on optical consistency of white LEDs affected by phosphor thickness and concentration using optical simulation[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2010, 33(4): 680-687.
- [14] 刘志彬,钱可元,罗毅.荧光粉层形状对白光LED空间色温均匀性的影响[J].半导体光电,2012,33(5):651-655.
- [15] 宋国,缪建文,施建珍,等.一种提高白光LED相关色温分布均匀性的方法[J].光电子·激光,2010,21(7):983-987.
- [16] CHEN Hsin-chu, CHEN Kuo-ju, LIN Chien-chung, et al. Improvement in uniformity of emission by ZrO₂ nano-particles for white LEDs[J]. Nanotechnology, 2012, 23(26): 265201.
- [17] SU Qiang, PEI Zhi-wu, CHI Li-sheng, et al. The yellow-to-blue intensity ratio (Y/B) of Dy³⁺ emission[J]. J Alloy Compd, 1993, 192(1): 25-27.
- [18] CHEN Hai-wei, LUO Zhen-yue, ZHU Rui-dong, et al. Tuning the correlated color temperature of white LED with a guest-host liquid crystal[J]. Opt Express, 2015, 23(10): 13060-13068.