

基于 DWT-SVD 和 QR 码的抗几何攻击数字水印技术

薛青晨, 吴丹, 陈大庆, 陈维霞, 顾济华
(苏州大学, 苏州 215006)

摘要: **目的** 为了抵御 QR 码数字水印图像的几何攻击, 提出一种基于奇异值分解和离散小波变换的数字水印技术。**方法** 利用 QR 码编码规则, 将文本信息编码生成宿主图像; 将宿主图像进行对数极坐标变换, 然后进行一级小波分解, 利用奇异值分解原理在其低频分块中嵌入置乱后的水印图像, 形成含水印的 QR 码图像。**结果** 实验结果表明, 该算法可以使 QR 码水印图像抵抗旋转、缩放、平移 (RST) 等几何攻击。**结论** 算法有良好的鲁棒性和不可见性, 能够作为一个可行的版权保护和认证的工具。

关键词: 离散小波变换; 奇异值分解; QR 码; 几何攻击

中图分类号: TS865; TP309.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)11-0158-06

Geometrical Attack Resistant Digital Watermarking Technology Based on DWT-SVD and QR Code

XUE Qing-chen, WU Dan, CHEN Da-qing, CHEN Wei-xia, GU Ji-hua
(Soochow University, Suzhou 215006, China)

ABSTRACT: In order to enhance the resistance of QR code watermark image against geometric attack, the paper proposed a new watermarking algorithm based on singular value decomposition and discrete wavelet transform. The text information was transformed to host image by the principle of encoding; then the logarithmic coordinates transform was applied to the host image. Afterwards, the scrambled watermark was embedded into the low-frequency sub-block of the host image through discrete wavelet transform using singular value decomposition principle, forming the watermarked QR code. Experiments showed that this algorithm could make the QR codes watermark image resist rotation, scaling and translation (RST), and other geometric distortions. The algorithm had good robustness and invisibility, and can thus serve as a viable copyright protection and authentication tool.

KEY WORDS: discrete wavelet transform; singular value decomposition; QR code; geometric distortion

二维条形码是一种可读性的条码, 由于其具有大存储容量、高安全性能、强纠错能力、低应用成本等良好性能, 在电子客票服务、物流、邮政等领域有着广泛的应用^[1-2]。然而由于易被伪造和复制, 所以并不是一种严格意义上的安全信息技术。如何在二维条形码中嵌入防伪信息以保证其性能安全,

已成为研究和应用二维条码技术的一个重要课题。在目前的信息和数字时代, 数字水印技术成为版权保护和认证的一种重要技术。由于数字水印技术具有良好的性能, 作为一种保护二维条码安全的方案, 它被证明具有良好的发展前景和潜在的应用领域^[3-6]。

收稿日期: 2015-11-10

作者简介: 薛青晨 (1990—), 男, 江苏盐城人, 苏州大学硕士生, 主攻数字水印。

通讯作者: 顾济华 (1957—), 男, 江苏苏州人, 博士, 苏州大学教授, 主要研究方向为光学测量与光信息处理。

在图像水印的应用中, 水印可以被嵌入在空间域或变换域中, 比如离散小波变换 (DWT)、奇异值分解 (SVD) 和离散余弦变换 (DCT), 水印必须满足感知透明度高、容量大、鲁棒性强等条件^[7]。离散小波变换具有优良的降噪能力和多分辨率分析特性, 能对图像进行多尺度分析, 具有抗噪声攻击、鲁棒性强等特点。奇异值分解是一种有效的矩阵分析工具, 而图像可看作矩阵, 因此可用 SVD 来分析图像, 并且它对几何攻击也具有较好的鲁棒性。文中针对 QR 码图像, 提出一种基于离散小波变换和奇异值分解的抗几何攻击数字水印技术的方法, 利用对数极坐标变换将图像的旋转、缩放转化为图像的平移^[8-9]; 利用图像矩阵的奇异值具有的稳定性 (当图像被施加一定的扰动时, 其奇异值不会有大的变化), 并且奇异值对几何失真 (平移、旋转、镜像、缩放等) 具有不变性, 将数字水印信息隐藏在宿主图像经一级离散小波变换后的低频分块中。

1 离散小波变换

小波变换是在短时傅里叶变换的基础上发展起来的, 能够对局部信号进行更有效的分析。离散小波变换 (DWT) 是对连续小波平移和尺度离散化。设任意函数 $x(t)$ 的小波变换为 $W(c,d)$, 对 c 二进制离散化, 则设 $c=2^i$, $i>0$, $i \in \mathbb{Z}$; 对 d 进行离散化, 即设 $d=kT_s 2^i$, T_s 为采样时间间隔, 小波函数序列则可表示为:

$$\Psi_{ik}(t) = 2^{-\frac{i}{2}} \Psi(2^{-i}t - k) \quad (1)$$

任意函数 $x(t)$ 的离散小波变换为:

$$WTx(i,k) = \int x(t) \Psi_{ik}^*(t) dt \quad (2)$$

离散小波变换是把宿主图像多分辨率分解成频率和空间都不同的子图像, 人眼视觉特性 (HVS) 和其空间-频率特性很相似, 据此可把数字水印信息嵌入在 HVS 敏感度不高的区域, 在确保图像质量的情况下, 最大程度地增强水印的强健性^[10]。

小波变换是将一幅宿主图像根据频带宽度的不同, 将其分解成高频和低频部分, 即细节子带 (HH, HL, LH) 和低频子带 (LL)。低频部分集中了大部分原始图像的能量; 高频部分则表示了图像的纹理、轮廓、边缘等细节信息^[11]。宿主图像一级小波分解见图 1。

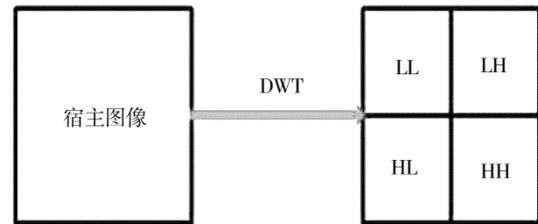


图 1 宿主图像的一级小波分解

Fig.1 One level wavelet decomposition of the host image

2 奇异值分解

矩阵的奇异值分解 (SVD) 是一种正交变换, 是矩阵对角化的数值运算, 而一幅图像可看作一个非负矩阵。设 A 为一副 $N \times M$ 大小的数字图像, 则 A 的奇异值分解定义为:

$$A = U \Sigma V^T \quad (3)$$

其中: 矩阵 U 和 V 分别为大小 $N \times N$ 和 $M \times M$ 的左右奇异值矩阵, 且都是正交矩阵; 矩阵 Σ 是大小为 $N \times M$ 的奇异值矩阵, 矩阵 Σ 的 M 个奇异值满足 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_m = 0$, 其中 r 为 Σ 的秩, 因此 A 的奇异值分解可表示为:

$$A = \sigma_1 U_1 V_1^T + \sigma_2 U_2 V_2^T + \dots + \sigma_r U_r V_r^T \quad (4)$$

由式(4)可知, 数字图像的奇异值分解特征有: 图像的奇异值表现的不是图像的视觉特性, 而是图像的能量特性 (内蕴特性), 也就是把数字水印信息隐藏在图像的奇异值中, 能够保证水印有较好的透明性, 而不会影响图像的视觉效果; 图像的奇异值具有良好的稳定性, 即图像在微小的扰动作用下, 图像的奇异值不会发生明显的改变^[12]。利用图像奇异值来嵌入水印, 可减少由于图像像素值的改变所引发的视觉失真, 大大提高水印的透明性和鲁棒性。

3 QR 码

QR 码属于矩阵式二维码, 相比一维条码除具有高可靠性、大数据容量、可显示图像和汉字等多种文字信息、高保密性等特点外, 还具有不依赖数据库、强纠错能力、可全方位超高速识读、应用方便等特点, 因此, 二维条码的解码与编码技术比一维条码更为复杂。二维条码是按一定的规律用某种特定的几何图形, 在平面分布的黑白相间的图形上记录数据符号信息。在识别的过程中, 即使有 30% 的图像信息丢失, 仍可以较好地恢复原始图像^[13-15]。

一个由 2121 正方形小模块所构成的阵列结构

见图2,由编码区域和包括校正图形、分隔符、寻像图形和定位图形在内的功能图形组成。编码区域由二进制编码组成,它由文本信息转化而来,包括纠错码字、版本信息、数据码字和格式信息。功能图形不能用于数据编码。

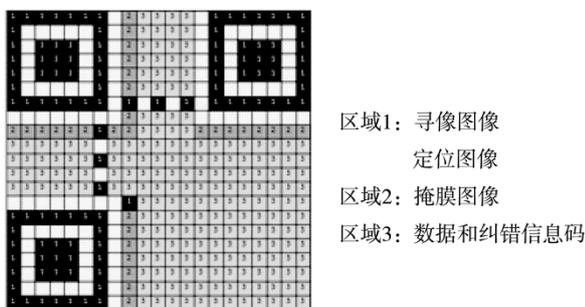


图2 QR码结构
Fig.2 Structure diagram of QR code

4 水印的嵌入与提取算法

首先利用对数极坐标变换将QR码图像从笛卡尔坐标系转换到对数极坐标系,可以使对QR码图像的旋转、缩放攻击转换为平移攻击。在嵌入方式上,利用奇异值分解原理选择了在QR码图像的低频部分嵌入水印,因为DWT的低频子带LL集中了原始图像的大部分能量,受外界影响小,稳定好,是水印嵌入的理想区域。数字水印的嵌入与提取算法见图3。

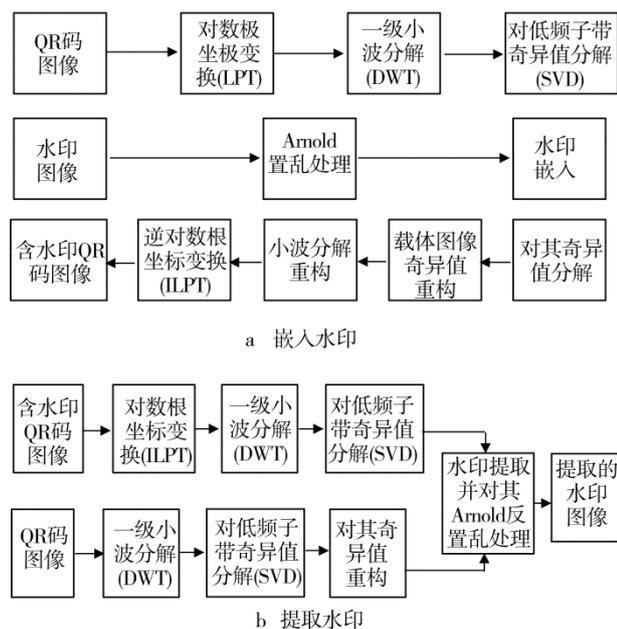


图3 嵌入算法和提取算法流程
Fig.3 The flow chart of embedding and extracting algorithm

4.1 水印的嵌入算法

为了更好地验证算法的有效性,载体图像是以版本号为7,纠错等级是30%,掩码为1的文本字符串“有志者,事竟成! where there is a will there is a way”编码生成的256 pixel×256 pixel QR码图像I,水印图像为128 pixel×128 pixel的太极图W,则水印的嵌入算法如下所述。

1) 运用置乱变换方法,对水印图像W进行预处理,生成置乱后水印。

2) 对I进行对数极坐标变换,极轴和极角的采样个数均为256,得到对数极坐标下的图像匹配,即LPM后的图像大小为256 pixel×256 pixel;再对I做一级离散小波变换,将其分成4个频带:水平子带HL、垂直子带LH、对角子带HH和低频子带LL。

3) 对小波分解后的低频子带实行奇异值分解。利用加法算法,把数字水印信息嵌入到奇异值分解后的对角矩阵S中,即 $T=S+K \cdot \text{Arnoid } W$,其中K为水印的嵌入强度。

4) 对T再进行奇异值分解,将所得的奇异值 S_1 进行奇异值重构,即得 $cA_1=US_1V^T$ 。

5) 对 cA_1 进行一级离散小波逆变换,再将其逆对数极坐标变换后,即得QR码数字水印图像 I_w 。

4.2 水印的提取算法

水印的提取是从嵌入水印的QR码水印图像中提取水印信息,其提取算法如下:

1) 对待检测的含水印QR码图像首先进行对数极坐标变换,对所得结果进行一级离散小波变换(DWT),对所得的低频子带进行奇异值分解 $cA_2=U_2S_2V_2^T$,得到 S_2 。对 S_2 进行奇异值重构,得到 $T_2=U_1S_2V_1^T$ 。

2) 与水印嵌入时相同,对原始QR码图像I进行对数极坐标变换,对所得结果进行一级离散小波分解并对其低频子带进行奇异值分解,得到对角矩阵S。

3) 按照 $W_1=(T_1-S)/K$,再将其运用Arnold置乱逆变换,得到水印图像 W_2 。

5 仿真结果与分析

在Matlab 2012B的平台上进行仿真实验,使用256 pixel×256 pixel的QR码原始图像作为载体

图像, 选择了 128 pixel × 128 pixel 的太极图作为嵌入的水印图像, 水印的嵌入强度 K 为 0.03。原始 QR 载体图像和 QR 码水印图像见图 4, 原始水印图像和提取水印图像见图 5。



图 4 实验结果

Fig.4 The picture of the experimental results

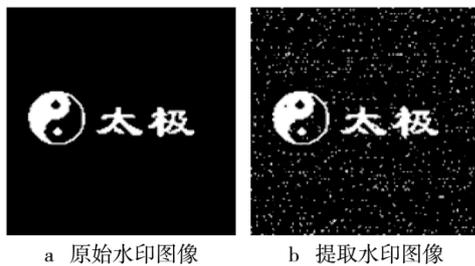


图 5 水印图像

Fig.5 The picture of watermark

采用峰值信噪比 PSNR 来度量嵌入水印的质量, 即载体图像的不可见性; 采用相关失真度量中的归一化相关函数 NC 作为提取和嵌入水印原图的比较评价标准, 即提取水印的鲁棒性。为了更好地验证算法在抵抗几何攻击的鲁棒性, 将其与文献[8]方法作对比实验。

5.1 剪切攻击实验

使用 Matlab 对含有水印 QR 码的载体 QR 码图像进行了不同比例的剪切攻击(剪切倍数分别为 5%, 10%, 15%, 20%, 30%, 40%)。各种比例剪切攻击后的 QR 码图像以及提取的水印图像见图 6。本方法的 PSNR 和 NC 以及文献[8]方法的 NC 系数见表 1, 可知文中方法在抵抗剪切攻击上更有效。实验证明, 6 种比例剪切攻击后, QR 码可以正确解码。

5.2 旋转攻击实验

采用 bilinear 插值方法对含水印的 QR 码图像进行不同角度的旋转攻击(旋转角度分别为 2°, 5°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°)。各种角度旋转攻击后的 QR 码图像以及提取的水印图像见图 7。文中方法的 PSNR 和 NC 以及文献[8]方法的 NC 系数见表 2, 可知文中

方法具有较强的抵抗角度旋转攻击的鲁棒性。

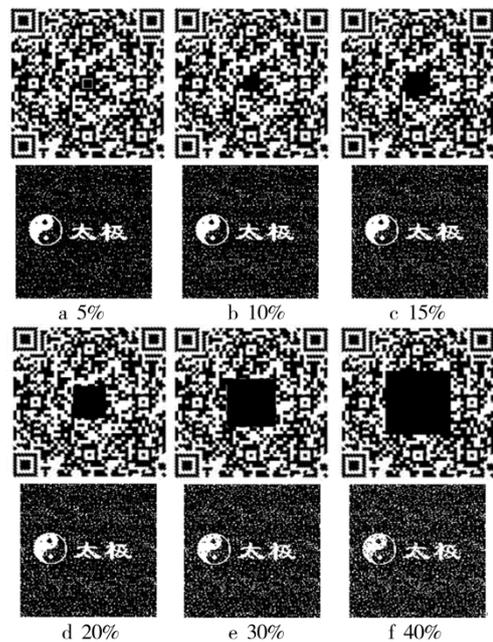


图 6 剪切攻击

Fig.6 Cropping attack

表 1 剪切攻击对比实验

Tab.1 Cropping attack contrast experiment

剪切比例/%	PSNR/dB	文中算法 NC/%	文献[8]算法 NC/%
5	32.8216	0.9948	0.9358
10	30.2123	0.9906	0.8212
15	27.6686	0.983	0.652
20	25.9224	0.9745	0.4964
30	22.7169	0.9489	0.3093
40	20.1016	0.9085	0.1988

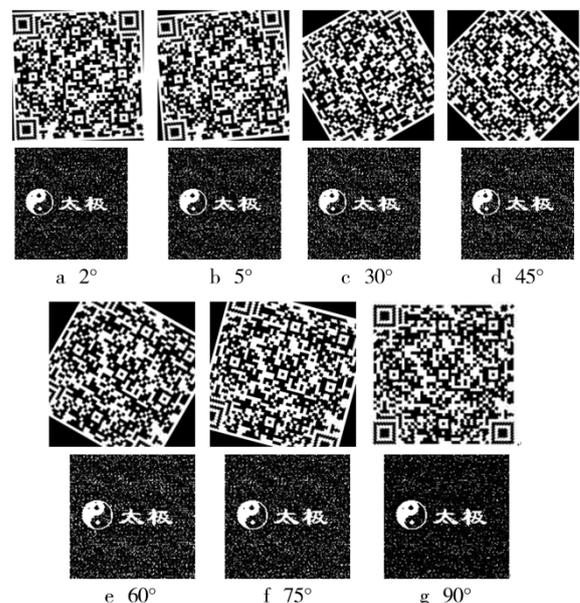


图 7 旋转攻击

Fig.7 Rotation attack

表2 旋转攻击对比实验
Tab.2 Rotation attack contrast experiment

旋转角度/(°)	PSNR/dB	文中算法 NC/%	文献[8]算法 NC/%
2	30.5853	0.9913	0.5322
5	29.7975	0.9896	0.5368
30	27.4834	0.9826	0.4547
45	25.6172	0.9727	0.448
60	27.3414	0.9819	0.4505
75	29.5742	0.9891	0.5275
90	35.2427	0.997	0.9428

5.3 缩放攻击实验

采用 bilinear 插值方法对含水印的 QR 码图像进行同等比例缩放的攻击(缩放比例分别为 0.5, 0.75, 0.875, 1.25, 1.5, 2 倍)。各种等比例缩放后的 QR 码图像以及提取的水印图像见图 8。文中方法的 PSNR 和 NC 以及文献[8]方法的 NC 系数见表 3, 可知文中方法抵抗缩放攻击更有优势。

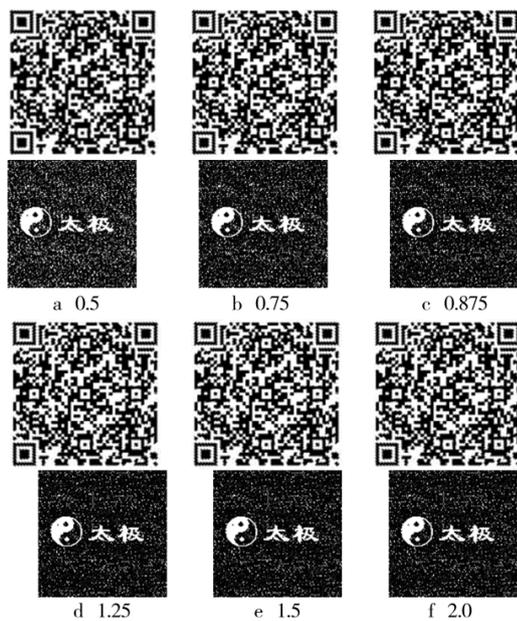


图8 等比例缩放攻击
Fig.8 Scaling attack

表3 等比例缩放对比实验
Tab.3 Scaling attack contrast experiment

缩放比例	PSNR/dB	文中算法 NC/%	文献[8]算法 NC/%
0.5	22.3013	0.946	0.1838
0.75	28.1651	0.9864	0.3066
0.875	30.9181	0.9923	0.4187
1.25	33.48	0.9956	0.5734
1.5	33.458	0.9955	0.5749
2	33.3202	0.9954	0.5658

5.4 平移攻击实验

对含有水印 QR 码的载体 QR 码图像进行不同尺度的平移(平移尺度分别为向右平移 100 pixel, 向右平移 200 pixel, 向下平移 100 pixel, 向下平移 200 pixel, 向右平移 120 pixel、向下平移 80 pixel, 向右平移 50 pixel、向下平移 150 pixel)。平移后 QR 码图像以及提取的水印图像见图 9。表 4 明显地反映出了文中算法在抵抗平移攻击上的有效性。

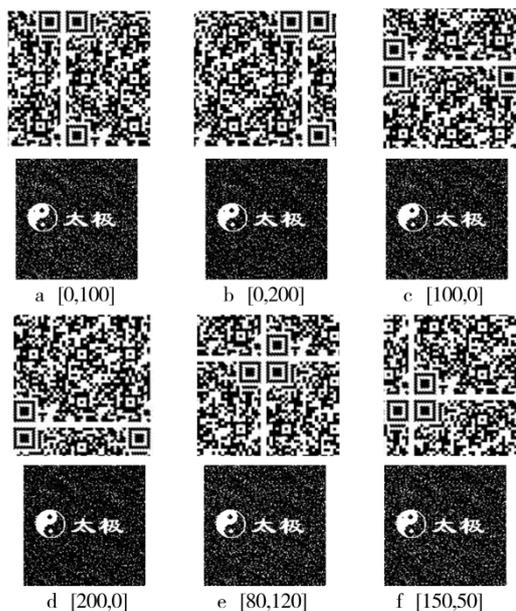


图9 平移攻击
Fig.9 Translation attack

表4 平移尺度对比实验
Tab.4 Translation attack contrast experiment

平移尺度	PSNR/dB	文中算法 NC/%	文献[8]算法 NC/%
[0,100]	24.5442	0.9667	0.7763
[0,200]	23.2876	0.9564	0.9236
[100,0]	22.5306	0.9618	0.8239
[200,0]	22.5306	0.9488	0.9173
[80,120]	24.7444	0.9682	0.6131
[150,50]	23.2603	0.9561	0.7321

6 结语

提出了一种基于 DWT-SVD 的 QR 码的数字图像水印方案, 利用离散小波变换的多分辨率特性和矩阵奇异值的稳定性, 将水印信息嵌入到载体 QR 码图像 LL 低频子带中, 使水印的鲁棒性和不可见性有着较好的平衡性。实验结果表明, 本算法在 QR 码抵抗几何攻击方面有着很强的鲁棒性。

参考文献:

- [1] XIE Rong-sheng, WU Ke-shou, XU Gao-pan, et al. Research on Anti-Counterfeiting Quick Response 2D Barcode Techniques Based on Digital Watermark[J]. Shanghai Jiaotong Univ (sci), 2013, 18(4):443—447.
- [2] 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.
- [3] 王子煜, 孙刘杰, 李孟涛. 强鲁棒性 QR 码水印技术[J]. 包装工程, 2012, 33(15):84—87.
WANG Zi-yu, SUN Liu-jie, LI Meng-tao. QR Code Watermark Technology with Strong Robustness[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(15):84—87.
- [4] 郭倩, 陈广学, 陈奇峰. 基于 DCT-SVD 的双 QR 码水印防伪算法[J]. 包装工程, 2015, 36(17):119—125.
GUO Qian, CHEN Guang-xue, CHEN Qi-feng. Double QR Code Watermarking Algorithm Based on DCT-SVD [J]. Packaging Engineering, 2015, 36(17):119—125.
- [5] VONGPRADHIPS, RUNGRAUNGSILPS. QR Code Using Invisible Watermarking in Frequency Domain [Z]. ICT and Knowledge Engineering, 2012.
- [6] 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.
- [7] RUNGRAUNGSILPS, KETCHAMM, KOSOLVIJAKV. Data Hiding Method for QR Code Based on Watermark by Comparing DCT and DFT Domain[C]// International Conference on Computer and Communication Technologies (ICCCT'2012), 2012:26—27.
- [8] 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.
HE Bing, ZHU Zhi-ping. A Digital Watermarking Algorithm Based on SVD and Log-polar Coordinates[J]. Computer & Digital Engineering, 2011, 39(10):138—141.
- [9] ZHENG D, ZHAO J Y, SADDIK A E. RST Invariant Digital Image Watermarking Based on Log-polar Mapping and Phase Correlation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8):753—765.
- [10] 李京兵. 抗几何攻击数字水印技术[M]. 北京:知识产权出版社, 2007.
LI Jing-bing. Watermarking Technology Resist to Geometric Attacks[M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2007.
- [11] SAXENA P, GARG S, SRIVASTAVA A. DWT-SVD Semi-Blind Image Watermarking Using High Frequency Band[C]// Proceedings of 2012 International Conference on Computer Science and Information Technology. Washington, USA: IEEE Computer Society, 2012:138—142.
- [12] 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.
LIU Li, ZHOU Ya-jian, ZHANG Bin, et al. Digital Watermarking Method for QR Code Images Based on DCT and SVD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S2):304—311.
- [13] 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.
- [14] 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—136.
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—136.
- [15] 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, 2015, 36(9):124—128.
GONG Dong-mei, GU Ji-hua, CHEN Da-qing, et al. Holographic Digital Watermarking Algorithm against Geometric Attacks Based on QR Code[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(9):124—128.