

包装印刷

基于 Hough 变换旋转校正的 QR 码全息水印算法

龚一珉, 孙刘杰

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 为了解决 QR 码图像不易隐藏水印的难题, 提出一种针对 QR 码载体图像的强鲁棒性频率域数字水印算法。**方法** 利用经双随机相位调制的傅里叶全息技术对水印进行加密, 同时对 QR 码载体图像进行包含高斯模糊以及去除视觉敏感区域的预处理, 将全息加密水印的奇异值矩阵加权嵌入到经过二级小波分解的 QR 码的中频系数后进行还原。Hough 变换通过坐标系转换检测 QR 码图像同方向边缘的直线, 后进行旋转校正, 以提取水印。**结果** 在合适的嵌入强度下, 水印保持了良好的不可见性 (PSNR=32.3)。经过二值化攻击、信号处理 (滤波、噪声、压缩)、几何变换 (平移、旋转、缩放) 以及打印扫描处理等一系列攻击, 提取出的水印依旧清晰可见。**结论** 提出的算法针对各类攻击有较强的鲁棒性, 可抵御任意角度旋转攻击, 同时兼顾水印的不可见性, 针对 QR 码的防伪技术具有一定的应用价值。

关键词: Hough 变换; QR 码; 全息水印; 奇异值分解

中图分类号: TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)09-0213-06

Algorithm of QR Code Holographic Watermark Based on Skew Correction by Hough Transform

GONG Yi-min, SUN Liu-jie

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

ABSTRACT: The work aims to put forward a frequency domain digital watermarking algorithm for QR code carrier image which has strong robustness, in order to overcome the problem that QR code image is hard to hide watermarks. Fourier holography technology subject to double random phase modulation was used to encrypt watermark and the pre-treatment was made including Gaussian blur and the removal of visual sensitive area for QR code carrier image at the same time. Then the singular value matrix of holography encrypted watermark was weighted and embedded into the middle frequency coefficient of QR code after secondary wavelet decomposition and then was restored. The straight line at the edge of QR code image in the same direction was detected by Hough transform through coordinate system transformation and then skew correction was done to extract the watermark. Watermark kept good invisibility (PSNR=32.3) under the suitable embedding strength. After a series of attacks, including binarization attack, signal processing (filtering, noise and compression), geometric transformation (translation, rotation and scaling) and print-scan attack, the extracted watermark was still clearly visible. The proposed algorithm has strong robustness for various types of attacks and it can resist rotation attack at any angle, and it also meets the requirement of invisibleness. The algorithm has certain application value in QR code anti-counterfeit technology.

KEY WORDS: Hough transform; QR code; holographic watermark; SVD

随着信息时代的到来以及智能手机的普及, “扫一扫”已经成为一种家喻户晓的生活方式。二维条码以其存储的信息容量大, 纠错能力强^[1], 具有一定的保密性的同时制作成本低廉和使用便捷等优势, 被广泛使用于各行各业。也正是因为其可被轻易复制

且本身并不具有完全的防伪特性, 加密技术也只是公开的位异或算法^[2], 理论上每个人都可以窃取和伪造。由于数字水印技术本身具有极佳的隐蔽性和证明版权者所有权的能力, 并且经过加密的水印即便被提取在无密钥的情况下也无法获得水印信息以证明版

收稿日期: 2016-07-27

作者简介: 龚一珉 (1992—), 男, 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 (1965—), 男, 博士, 上海理工大学教授, 主要研究方向为图像处理、数字水印。

权,所以数字水印技术与二维条码的结合可以发挥各自优势。

目前关于二维条码的水印防伪算法主要集中在空间域。针对 PDF417 码,陈峰等^[3]提出了基于边界移位的隐藏信息嵌入算法,赵博等^[4]提出一种基于结构微调法的水印算法,对组成条空进行适量的微调将信息隐藏。孙丙等^[5]提出了根据 PDF417 码的嵌入容量自适应调节行列的算法。何小龙等^[6]对不同容错级别的 QR 码嵌入位数进行测试并提出一种改进的 LSB 算法。频率域, M.A.Suhail 等^[7]提出一种在图像 DCT 域嵌入水印的算法,载体图像被分成不同的区段后在每个图像块中嵌入伪随机序列作为水印。此外, Vongpradhip S 等^[8]将秘密信息隐藏于 DCT 域的中频系数中。谢荣生等^[9]提出 QR 码二值图像 Rand 灰度化和背景图灰度化方法,结合离散小波变换以提高防伪水印容量,该算法较为繁复且鲁棒性有待提高。但是,以上算法对水印鲁棒性的测试大部分集中在信号处理方面,而对于 QR 码在实际应用中可能会面临的几何攻击并未做过多涉猎,尤其是遭受旋转攻击的图像几乎很难再提取出可辨识的水印信息。针对这个问题,周中原^[10]提出的基于傅里叶-梅林变换的旋转校正算法通过坐标系转换对几何变换具有不变性,只对 45°范围内的小角度攻击具有鲁棒性。通过 SIFT 或 SURF 的特征点匹配^[11]进行校正的方法需通过特征点匹配、特征点描述以及多次优化、筛选特征点来完成,算法复杂对测试环境要求较高。

这里提出一种结合全息加密和奇异值分解的 QR 码数字水印技术,将 Hough 变换善于检测直线的能力最大化利用,与边缘为直线线段的 QR 码图像一拍即合,通过旋转校正以提高鲁棒性。

1 基本理论

1.1 基于 Hough 变换的 QR 码旋转校正

Hough 变换是一种形状匹配技术^[12],其基本思想是通过 2 个坐标系之间的转换来检测出前一个坐标系平面内的直线或者有规律的曲线。建立新的坐标系,它与原坐标系之间的点和线存在一一对应关系,即对于笛卡尔坐标系 xoy 平面中的一条直线 $y=kx+b$,将其转换到新的参数空间 (ρ, θ) ,表达式为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (1)$$

式中: ρ 为原点到直线的距离; θ 为直线与 x 轴正方向的夹角。

QR 码图像可以看作是若干个矩形块经一定规律排列和组合得到的图像,图像经边缘检测的结果为仅存在水平和竖直 2 个方向直线线段的组合。而 Hough 变换的实质是对图像各个方向上的直线线段做统计,这样针对 QR 码图像的统计结果获得最大的

2 个值必然是原图像水平和竖直的方向,其差值为 90°,根据任意一个结果均可以确定 QR 码图像旋转的角度。

具体原理为对于扫描得到的嵌入水印后的 QR 码图像,利用 Sobel 算子^[13]检测边缘后设置步长,量化为许多小格,根据每个点带入量化值,算出每个 ρ 的值,经量化后落入某个小格内,使得该小格的计数累加器加 1,当全部点转换完毕后,对所有小格进行统计,最大的计数值的小格对应于共线点,它们组成图像中最长的直线,其对应的角度 θ 可以被判定为旋转偏移的角度进行逆向旋转。基于 Hough 变换旋转校正的 QR 码见图 1,实验对任意方向偏移旋转下的校正的成功率为 100%,根据实验结果可知,基于 Hough 变换的 QR 码旋转校正可抵御任意方向旋转攻击。

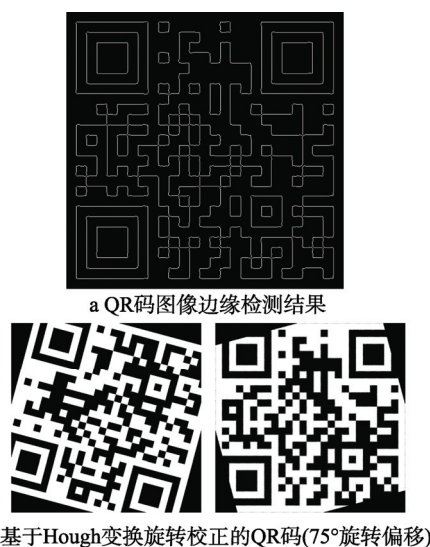


图 1 Hough 变换旋转校正
Fig.1 Rotating correction by Hough transform

1.2 双随机相位调制的加密同轴全息技术

将水印信息进行全息加密以提高其安全性^[14]。设水印图像为 $f(x_0, y_0)$ 其大小为 $M \times N$ 。产生 2 个随机相位模板 RP_1 与 RP_2 作为光全息系统的双相位^[15],即加密解密系统的双密钥,其中: $RP_1 = \exp\{j2\pi p(x_0, y_0)\}$, $RP_2 = \exp\{j2\pi b(\xi, \eta)\}$ 。首先 $f(x_0, y_0)$ 经过 RP_1 调制后进行傅里叶变换,再由 RP_2 进行调制后进行逆傅里叶变换,这样就得到了加密图像 $\phi(x, y)$ 。即:

$$\psi(x, y) = \{f(x, y) \exp[j2\pi p(x, y)]\} \otimes h(x, y) \quad (2)$$

其中, RP_1 和 RP_2 中的 $b(\xi, \eta)$ 和 $p(x_0, y_0)$ 是均匀分布在 $[0, 1]$ 之间的 2 个独立白噪声随机函数。式中: $h(x, y)$ 为 $\exp[j2\pi b(\xi, \eta)]$ 的脉冲响应函数;符号 $\otimes$ 为卷积运算; $\psi(x, y)$ 为随机复振幅白噪声函数,其均值为 0,

方差 $\sigma_\psi^2 = \frac{1}{M \times N} \left[\sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} |f(u, v)|^2 \right]$ 。引入同轴参考光

与加密图像 $\phi(x, y)$ 形成的物光干涉, 形成加密同轴全息图。解密过程是加密的逆过程, 这里不再赘述。

通过仿真实验对大小为 64×64 像素的二值水印图像 (见图 2a) 进行双随机相位调制的傅里叶全息同轴加密, 结果见图 2b, 再经过解密复原得到的水印图像见图 2c, 与原水印图像的相关性系数 (NC) 为 0.99, 水印图像清晰可见。

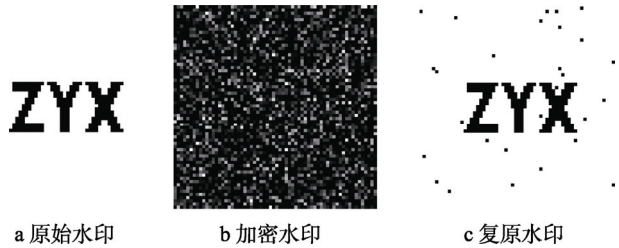


图 2 水印图像加密解密过程

Fig.2 Process of encryption and decryption for watermark image

2 水印的嵌入与提取

2.1 嵌入算法

水印的嵌入过程 (见图 3): 对原始 QR 码载体图像进行高斯模糊处理; 提取高斯模糊后的图像的 3 个位置探测图形和分隔符区域, 置 255 由白色替代该位置; 对经过上一步预处理的图像进行二级小波分解, 提取其中频部分的对角分量系数矩阵; 对该分量进行奇异值分解, 获得奇异值矩阵 S_m ; 生成 2 个随机相位模板 p, b 作为水印加密系统的双密钥; 对二值水印图像进行双随机相位调制的傅里叶全息加密并

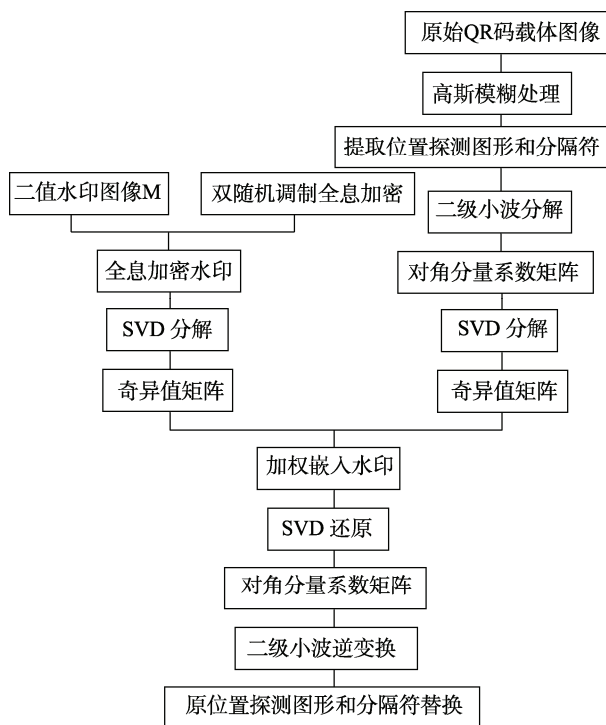


图 3 水印的嵌入过程

Fig.3 The embedding process of watermark

生成同轴加密全息图 H ; 对 H 进行奇异值分解, 获得奇异值矩阵 S_w ; 设置加权系数为 $\alpha=0.8$, 加权关系为 $S_m + \alpha S_w$; SVD 还原、二级小波逆变换; 放回位置探测图形和分隔符区域, 得到嵌入水印后的图像。

2.2 提取算法

水印的提取过程见图 4。对于受到旋转 (扫描) 攻击的 QR 码图像首先利用 Hough 变换检测其偏移角度后进行逆向旋转校正方可依照以下步骤提取水印: 提取含水印图像的 3 个位置探测图形和分隔符区域 (受几何攻击的图像直接进行下一步); 对上一步处理后的图像进行二级小波分解, 提取其中频部分的对角分量系数矩阵; 对该分量进行奇异值分解, 获得奇异值矩阵 S_e ; 根据公式 $(S_e - S_m)/\alpha$ 提取嵌入的水印部分并进行 SVD 还原; 利用双密钥 $-b, -p$ 进行解密; 对上一步解密后的图像进行二值化处理, 获得提取的二值水印图像。

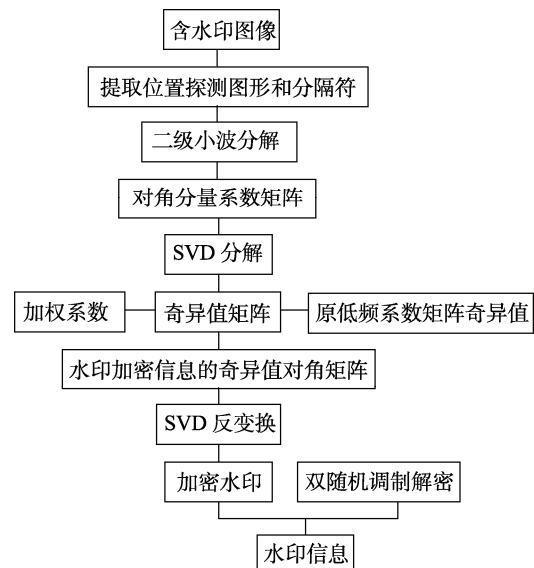


图 4 水印的提取过程

Fig.4 The extraction process of watermark

3 实验的结果与分析

3.1 不可见性

实验用载体图像为 512×512 像素容错级别 30% 的 QR 码 (由文字信息 USST-AlvinGONG 编码而成), 水印图像为 64×64 像素的二值图像。用峰值信噪比 (PSNR) 来衡量水印嵌入的不可见性, 提取出的水印与原始水印之间相似度采用相关性系数 (NC) 做客观评价。载体 QR 码经过预处理后的结果见图 5。水印的嵌入和提取结果见图 6。

设置加权系数 $\alpha=0.8$ 的嵌入强度, 嵌入水印后 QR 码图像与原图像的 PSNR 为 32.3, 人眼几乎无法分别二者之间的差别, 而提取出的水印与原始水印之间的 NC 值为 0.98。结果表明, 算法在满足水印不可

见性的前提下提取出的水印轮廓依旧清晰可辨。



图 5 QR 码预处理
Fig.5 Pretreatment for QR code

3.2 鲁棒性

针对该算法嵌入水印在经受各类攻击后还能否提取清晰可见的水印信息,进行鲁棒性测试。模拟的攻击类型有二值化攻击、信号处理(滤波、压缩、噪

声)、几何变换(平移、旋转、缩放)及打印扫描攻击(使用 HP CP5225 四色喷墨打印机,打印分辨率为 300 dpi, 纷腾 9800XL 高精度扫描仪,扫描精度为 600 dpi)等。受到攻击后的 QR 码图像和提取出的水印见图 7, 攻击实验数据结果见表 1。



图 6 水印的嵌入和提取

Fig.6 Watermark embedding and extraction

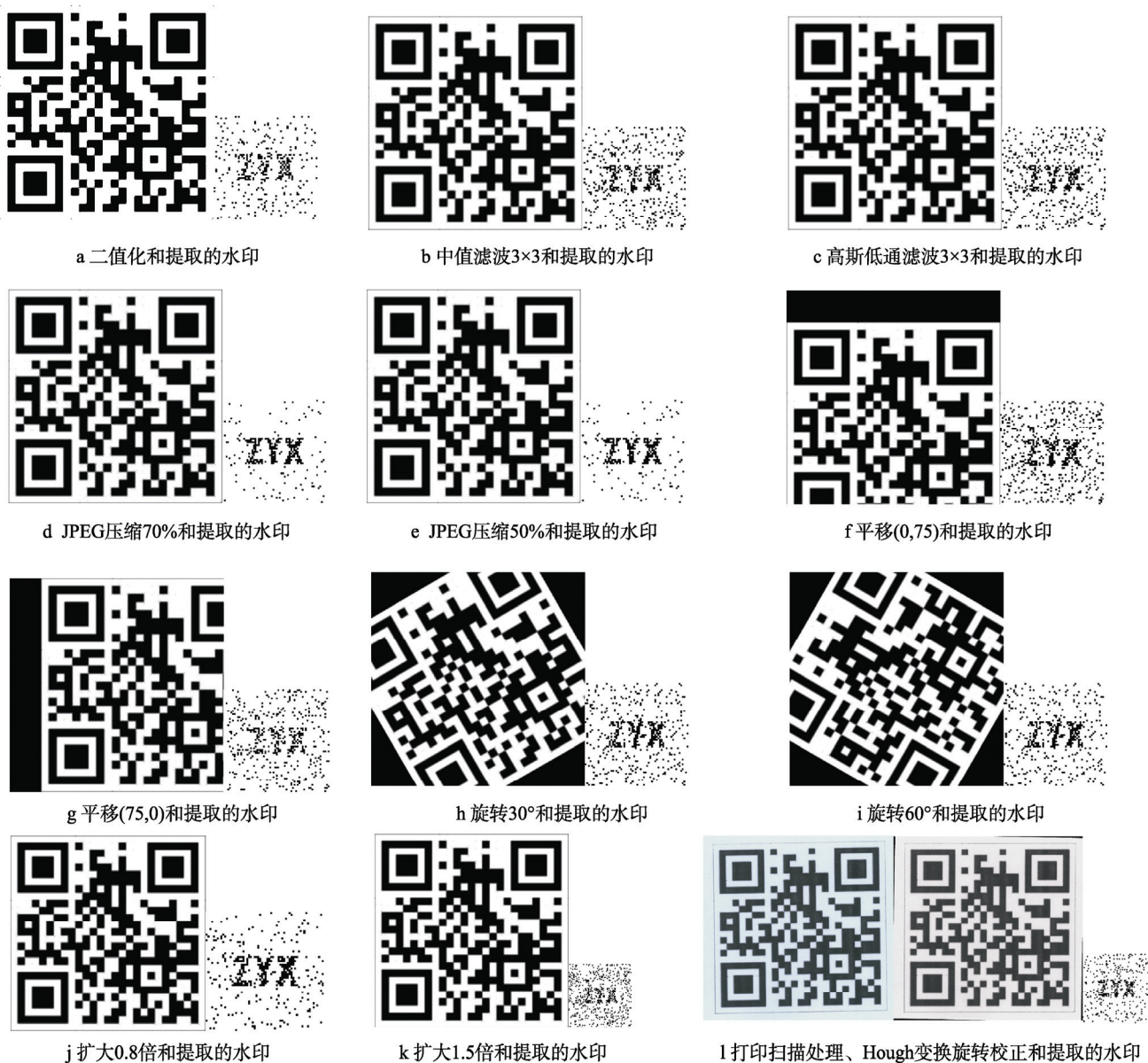


图 7 攻击结果

Fig.7 Attack test

表 1 鲁棒性实验结果
Tab.1 Experimental result of robustness test

攻击种类	攻击类型	参数	NC 值
二值化			0.94
信号攻击	中值滤波	3×3	0.91
	高斯低通滤波	3×3	0.90
	JPEG 压缩	90%	0.97
		70%	0.97
		50%	0.97
	高斯噪声	0.01	0.76
	椒盐噪声	0.01	0.76
几何攻击	平移	(0,75)	0.89
		(75,0)	0.92
	旋转	10°	0.95
		30°	0.92
		60°	0.92
		0.8	0.95
	缩放	1.2	0.95
		1.5	0.87
打印/扫描攻击		300/600 (dpi)	0.93

4 结语

提出了一种在频率域嵌入水印的 QR 码防伪技术。通过双随机相位调制的傅里叶全息同轴加密技术增强水印的安全性，利用高斯低通滤波器对二维条码（二值载体图像）进行模糊处理变图像为 8 位以提高嵌入容量和增加嵌入水印不可见性，利用奇异值分解改善鲁棒性。在提取经旋转攻击的图像时，针对二维条码边缘均为直线的特性，创新且针对性地提出了利用 Hough 变换（拥有极强地检测直线的能力）检测图像边缘，根据偏移角度进行逆向旋转校正的思路。算法可以抵御任意角度旋转，相比于傅里叶梅林变换只可抗小角度旋转以及算法复杂的特征点匹配矫正需要的大运算量优势明显。结合全息水印的抗撕毁性既可以抵御二值化攻击使得文件在线上传输过程中水印不会完全丢失，在线下经打印扫描后亦可提取水印信息，因而针对 QR 码防伪具有较强的实际应用价值。

参考文献：

[1] 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.

[2] 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.

[3] 陈峥, 姚宇红, 王晓京. 一种基于二维图形码的数字水印技术[J]. 计算机应用, 2006, 26(8): 1998—2000.

CHEN Zheng, YAO Yu-hong, WANG Xiao-jing. A Digital Watermarking Technology Based on 2-d Barcode[J]. Computer Application, 2006, 26(8): 1998—2000.

[4] 赵博, 黄进. 基于 PDF417 条码的信息隐藏方法[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(19): 4806—4809.

ZHAO Bo, HUANG Jin. Information Hiding Technique Based on PDF417 Barcode[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(19): 4806—4809.

[5] 孙丙, 高美凤. 基于 QR 码的数字水印算法研究[J]. 计算机与现代化, 2011(11): 74—77.

SUN Bing, GAO Mei-feng. Research on Digital Watermarking Algorithm Based on QR Barcode[J]. Computer and Modern, 2011(11): 74—77.

[6] 何小龙, 安虎, 张无忌, 等. 基于改进 LSB 算法的 QR 条码数字水印[J]. 计算机与信息技术, 2010(10): 1—5.

HE Xiao-long, AN Hu, ZHANG Wu-ji, et al. QR Barcode Digital Watermark Based on Improved LSB Algorithm[J]. Computer and Information Technology, 2010(10): 1—5.

[7] PIAO Cheng-ri, WOO D M, PARK D C, et al. Medical Image Authentication Using Hash Function and Integer Wavelet Transform[C]// Image and Signal Processing, New York, 2008: 7—10.

[8] VONGPRADHIP S, RUNGRAUNGSILP S. QR Code Using Invisible Watermarking In Frequency Domain[J]. ICT and Knowledge Engineering(ICT & Knowledge Engineering), 2012: 47—52.

[9] 谢荣生, 赵欢喜, 陈玉明. 基于 QR 码的防伪电子票数字水印方法[J]. 厦门大学学报, 2013, 52(3): 338—342.

XIE Rong-sheng, ZHAO Huan-xi, CHEN Yu-ming. Digital Watermarking Methods for Anti-counterfeit Electronic Ticket Based on QR Code[J]. Journal of Xiamen University, 2013, 52(3): 338—342.

[10] 周中原. 抗几何变换的全息水印技术研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2015.

ZHOU Zhong-yuan. Research on Holographic Digital Watermarking Algorithm Against Geometric Attacks[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2015.

- [11] 李毓彬, 孙刘杰, 包观笑, 等. 基于 SIFT 图像特征区域的全息水印技术[J]. 光学技术, 2016, 42(4): 371—375.
LI Yu-bin, SUN Liu-jie, BAO Guan-xiao, et al. Holographic Watermarking Algorithm Based on SIFT Feature Region[J]. Optical Technique, 2016, 42(4): 371—375.
- [12] 杨冬梅. 车牌定位和倾斜校正算法的研究与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.
YANG Dong-mei. Research and Realization of Vehicle License plate Location and Slant Correction[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012.
- [13] AGAIAN S, ALMUNTASHRI A, PAPAGIANNAKIS A T. An improved Canny Edge Detection Application for Asphalt Concrete[C]// IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics IEEE, 2009: 3683—3687.
- [14] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. Appl Opt, 2002, 41(5): 865—873.
- [15] 孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 621—624.
SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Forgery Prevention Based on Inline Fourier Holographic Watermark with Double Random Phase Encryption[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 621—624.