

纹理特征自适应的全息水印算法

龚一珉, 孙刘杰

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 在保证算法鲁棒性的同时最大化实现水印的不可见性, 自适应地选择水印的嵌入区域, 并根据图像特征嵌入不同强度的水印信号。**方法** 利用分块的思想, 根据载体图像灰度共生矩阵二次统计量下的各特征参量选择纹理复杂度最高的区域, 通过模糊 C 均值聚类实现对纹理特征的定义, 再利用灰度直方图分析各分块的纹理强弱, 将不同强度的光全息加密水印信号自适应嵌入至图像小波域的对角分量。**结果** 水印的不可见性得到显著提高 (PSNR=49), 且图像在滤波、噪声、剪切和旋转等操作下提取的水印内容依旧可被清晰识别。**结论** 文中算法在确保鲁棒性和安全性的同时, 极大地提升水印的不可见性。

关键词: FCM 聚类; 灰度共生矩阵; 光全息加密; Hough 变换

中图分类号: TS801.3; TS206 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)23-0211-06

Algorithm of Holographic Watermark with Adaptive Textural Features

GONG Yi-min, SUN Liu-jie

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

ABSTRACT: The work aims to maximize the invisibility of watermark while ensuring the algorithm robustness, adaptively select the embedded area of the watermark and embed the watermark signals of different intensities according to the image features. By means of blocked image, the area with the most complicated texture was selected according to the various characteristic parameters of gray-level co-occurrence matrix quadratic statistic for the carrier image. Textural features were defined by fuzzy C-means (FCM) cluster. Then, the texture intensity of all blocks was analyzed by grey level histograms. Optical holography encrypted watermark signals with diverse intensities were adaptively embedded into the diagonal component of image wavelet domain. The invisibility of watermark was significantly improved (PSNR=49), and the watermark information extracted when the image was subject to such operations as filtering, noise, cutting and rotation could still be clearly recognized. The proposed algorithm has greatly improved the invisibility of watermark while ensuring the robustness and security.

KEY WORDS: FCM cluster; gray-level co-occurrence matrix; optical holographic encryption; Hough transform

数字水印技术发展至今, 国内外学者日渐将研究重点放在提高算法的鲁棒性上, 提出了抗滤波攻击和几何变换的强鲁棒性水印技术^[1], 然而算法大都忽视不同载体图像各评价指标参量的差异而直接针对图像全局嵌入水印, 这使得嵌入算法一旦确定水印的嵌入量也随之固定, 这样在对不同载体图像嵌入水印的过程中会造成水印的隐蔽性各异, 在图像平滑以及中等亮度区域内的水印信息容易被察觉^[2]。算法为了保证这些区域满足水印不可见的基础上确定嵌入量,

牺牲了鲁棒性。

为此, 一些学者提出了基于人类视觉特征的自适应水印算法, 充分分析人眼对图像各属性敏感度后自适应调节水印的嵌入方式。Watson^[3]提出了一种视觉模型, 在考虑图像的亮度、纹理和边缘的基础上结合 JPEG 量化思想计算每一个像素的 JND 值以嵌入合适强度的水印, 该算法考虑到像素级别的差异, 因此算法计算量过大, 公式复杂, 且水印的不可见性有待提高。Surekha B, Swamy G N 等^[4]提出一种基于视觉掩

收稿日期: 2017-05-22

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。

蔽下的数字水印算法,该算法考虑到JPEG压缩对DCT系数的影响,利用最大可容忍失真控制每个DCT系数上的水印嵌入强度,避免了在图像细节丰富和对象边缘等部位出现可察觉的失真,保证了水印的不可见性。算法不能抵御较大幅度的剪切、旋转等几何攻击。申静^[5]结合图像变换域频谱特征和人眼对比度敏感视觉特性,提出一种新的人眼感知图像误差阈值的计算方法。依据计算的阈值,设计一种新的基于人眼视觉特性的彩色图像水印嵌入和提取技术方案。由于算法依托主观实验,无法避免的存在偶然误差,影响算法的精度和对水印不可见性的判断。

基于以上问题笔者认为,在保证算法鲁棒性的基础上,最大化实现水印不可见性的途径即为在人眼对图像最不敏感的区域,根据图像纹理复杂程度自适应地嵌入不同强度的水印信号,因此文中通过对载体图像灰度共生矩阵(GLCM)各特征参数的分析以及借助模糊聚类理论来实现对纹理特征的再定义,确定水印的嵌入方式。

1 理论依据

1.1 灰度共生矩阵下的纹理特性

灰度共生矩阵(GLCM)可以反映一幅图像灰度在不同方向、不同位置变化的程度,而图像的纹理则是空间灰度变化的集合^[6]。由此可以通过灰度共生矩阵来描述图像的纹理信息。定义一幅灰度图像中相距某一固定位置 (d, θ) 的某2个确定的灰度级 i, j 的点同时出现的概率所组成的 256×256 的矩阵为图像的灰度共生矩阵,记为 $P(i, j, d, \theta)$:

$$P(i, j, d, \theta) = \left\{ \begin{aligned} &[(x, y), (x + \Delta x, y + \Delta y)] \\ &f(x, y) = i, f(x + \Delta x, y + \Delta y) = j \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: i, j 为灰度级; x, y 为像素点坐标; d 为2个像素间的空间位置关系; θ 为灰度共生矩阵方向,通常选取 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$,即涵盖了二维平面上间隔 45° 的所有8个方向^[7]。为了更加直观地描述图像的纹理特征,将灰度共生矩阵的各元素 $P(i, j, d, \theta)$ 除以总和以获得归一化共生矩阵 $\hat{P}(i, j, d, \theta)$,目的为获取二次统计量^[8]。Haralick等定义了14个灰度共生矩阵下分析纹理特征的特征参数,文中选取4个特征参数加权以获得载体图像的纹理特性(P 和 $\hat{P}$ 分别代表归一化前后的灰度共生矩阵)。

$$\text{二阶矩(能量): } E_n = \sum \sum P^2 \quad (2)$$

$$\text{对比度: } I_n = \sum \sum [(j-i)^2 \hat{P}] \quad (3)$$

$$\text{相关: } C_n = \frac{\sum \sum (ij\hat{P} - \mu_1\mu_2)}{\sigma_1^2\sigma_2^2}, \mu_{1/2} = \sum i/j \sum \hat{P},$$

$$\sigma_{1/2}^2 = \sum (i/j - \mu_{1/2})^2 \sum \hat{P} \quad (4)$$

$$\text{熵: } H_n = -\sum \sum \hat{P}(\log \hat{P}) \quad (5)$$

若 E_n 值大,则表示图像中所有的像素值差异很大,纹理较粗,能量大。若 I_n 值大,则表示纹理沟纹较深,图像清晰。若 C_n 值大,则表示图像在某一方向像素的相似程度大,相关性强。若 H_n 值大,则表示图像纹理较为复杂。

为了减少计算量提高算法运行速度,将原始载体图像灰度级进行压缩,将其量化为16个灰度级。取距离 $d=1$,在4个方向上生成4个灰度共生矩阵,分别获得对应二次统计量下的各特征参量 $E_n, I_n, C_n, H_n, n=1, 2, 3, 4$ 。根据式(6)将 S_1 评分最高的区域设定为待嵌入水印的特征区域。

$$S_1 = \frac{\overline{E_n} \cdot \overline{I_n} \cdot \overline{H_n}}{\overline{C_n}} \quad (6)$$

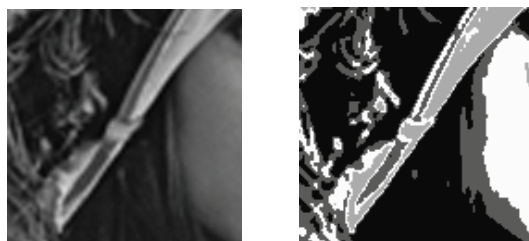
1.2 模糊C均值聚类方案设计

模糊C均值(FCM)聚类的核心思想是计算图像中像素与 C 个聚类中心之间的隶属度(加权相似度),相比于传统硬聚类算法有更高的精度^[9]。通过对目标函数进行多次迭代最小化以确定元素的最佳所属类别。目标函数 $J(U, V)$ 表示图像中每个像素点到各聚类中心的加权距离平方和,需满足式(10—11)等约束条件^[10]。

$$J(U, V) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n (u_{ik})^m \|x_k - v_i\|^2 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^c u_{ik} = 1, u_{ik} \in [0, 1] \quad (8)$$

式中: c 为聚类中心的类数; n 为样本数; m 为加权指数; U 为 $c \times n$ 维矩阵; $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$ 为 C 个聚类中心; x_k 为第 k 个样本, u_{ik} 为第 k 个样本对 i 的隶属度。FCM聚类过程:①随机生成满足约束条件的隶属度初始矩阵,设定 c, m 及迭代截至误差值 ε ;②计算聚类中心 V ;③更新隶属度 u_{ik} ;④重复步骤②,③直至2次迭代结果误差小于 ε ;⑤样本归类。



a 图像特征区域

b FCM聚类结果

图1 模糊C均值聚类结果($C=4$)

Fig.1 Results of fuzzy C-means cluster ($C=4$)

为了确定待嵌入水印的特征区域各分块适合嵌入的水印强度,通过FCM聚类实现对纹理的再定义。将图像灰度级归类为10, 90, 170, 250等4个级别,统计

区域内各分块聚类后的灰度直方图中各灰度级出现的数量及比例，以最终确定该区域可嵌入的水印强度。

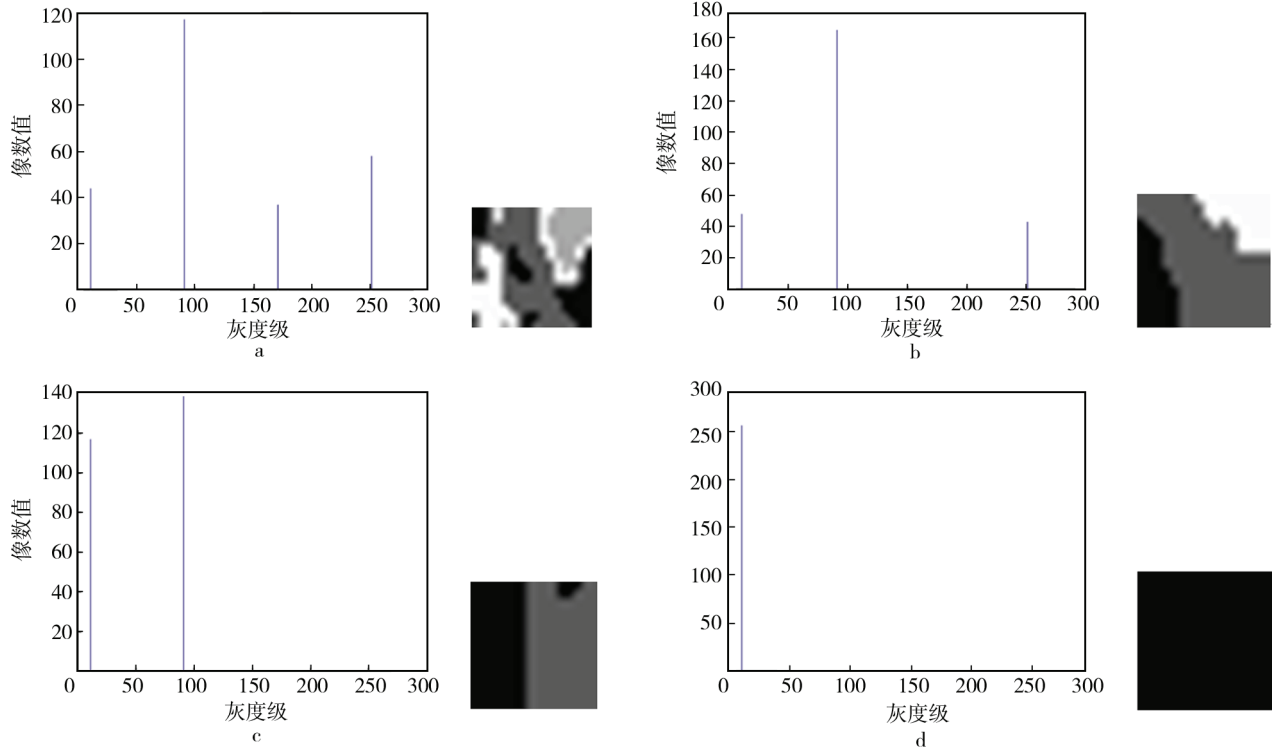


图 2 聚类后分块的灰度直方图（4 种情况）及对应分块

Fig.2 Grey level histogram of block after clustering (4 situations) and the corresponding block

1.3 水印的光全息加密

全息术的优势诸多，如仅凭部分信息即可恢复整体，强位压缩以及良好的抗干扰特性等优势可以被用来作为水印的加密技术，水印在遭受各类攻击后可以凭借全息术的以上特性尽可能的恢复出可被辨认的原始水印信息^[11]，因此出于提高鲁棒性的考虑，文中将对水印图像采用光全息加密见图3。

对水印图像做傅里叶全息加密，为保证信息的安全性采用双随机相位调制信号，即生成 b, p 这2个随机模板。加密过程即首先由模板 b 调制原始水印信号后进行傅里叶变换，再经模板 p 调制后做逆傅里叶变换得到双随机相位调制后的加密图像。再经过同轴参考光 L 干涉生成光全息加密后的水印图像^[12]。

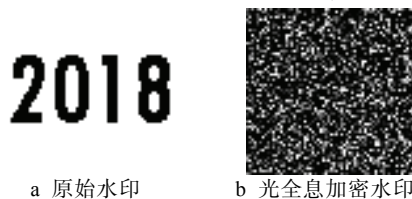


图 3 双随机相位调制的同轴全息加密

Fig.3 Coaxial holographic encryption by double random phase modulation

1.4 Hough 变换旋转校正

Hough变换可以检测到图像中的长直线，而这些

度。灰度级别数量为4, 3, 2, 1的图像块以及它们所对应的直方图见图2。

直线往往代表着图像纹理的主要方向以及边框和轮廓。在遭受旋转攻击的含水印图像中提取水印是一个难点和值得研究的热点。文中利用Hough变换提取旋转后图像的边缘轮廓，根据其倾斜角度逆向旋转校正后提取水印见图4，实验证明该算法快速、有效且精准度高。

二维图像的讨论是建立在笛卡尔坐标系下，即以 xOy 作为坐标轴以定义图像中的点。Hough变换将空间坐标系转换，建立 (ρ, θ) 平面， ρ 为坐标原点到线段的距离， θ 为线段的方向角，由此进行一次坐标转



图 4 Hough 变换旋转校正

Fig.4 Rotation correction by Hough transform

换获得新的参数方程^[13-14]见式(9)。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (9)$$

边缘提取后的图像经过Hough变换，原坐标系下的直线线段转换为新空间中的一个点，而原坐标系下的一

点则对应于参数空间中的一条正弦曲线。若参数空间中2条曲线产生交点就表示原坐标系下的这2点共线,故在参数空间中,有越多的正弦曲线过同一个点,即表示笛卡尔坐标系的图像中有越多的点经过一条直线。

2 水印的嵌入与提取

水印的嵌入流程见图5。水印的嵌入步骤如下所述。

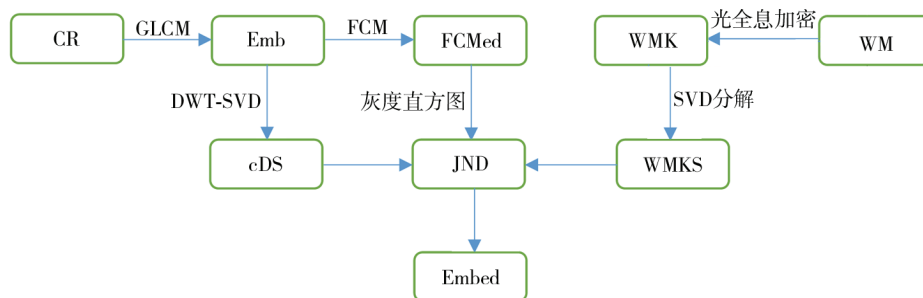


图 5 水印的嵌入过程

Fig.5 Embedding process of watermark

1) 对64×64像素的二值水印图像WM做双随机相位调制的同轴全息加密,得到加密光全息图像WMK。

2) 对WMK做SVD分解获得奇异值矩阵WMKS。

3) 将512×512像素的原始载体图像CR分成不重叠的4×4个块。

4) 分别求取每一分块的灰度共生矩阵GLCM以进行纹理分析。

5) 将各分块灰度共生矩阵中的各元素除以各元素之和获得归一化灰度共生矩阵,依据式(2—7)获得其二次统计量下的二阶矩(能量)、对比度、相关度和熵等特征参数,各分块具体参数见图6。

6) 根据式(6)综合各参量选择视觉感知度最低(S_i 得分最高)的分块为嵌入水印的特征区域Emb(128×128像素)。

7) 对Emb做FCM聚类以求将连续的灰度级离散化。根据水印嵌入级别的需要初始化4个聚类中心:10, 90, 170, 250, 计算图像各像素对各聚类中心的隶属度,根据隶属度修正聚类中心,重复此步骤进行迭代,直至2次结果误差小于极小值(0.0001),则聚类结束;将所有样本进行归类,将图像像素划分为4个灰度级。

8) 将聚类后的图像FCMed进行8×8分块。

9) 求取每一分块的灰度直方图,通过统计各灰度级出现的频率和比例以刻画边缘的强弱,设置4类调节因子以确定各分块改进的JND参数即水印嵌入强度,预设的嵌入强度分别为0.8, 0.5, 0.3, 0.1。

10) 根据各分块的JND对64个分块分类,在载体图像特征区域Emb的小波域对角分量的奇异值矩阵cDS嵌入不同强度的光全息加密水印信号后,做小波还原并将嵌入水印的区域Embed放回原始载体图像得到含水印图像。

水印的提取是嵌入的逆过程,原理参考嵌入步骤。对于遭受旋转攻击的含水印图像,根据1.4节理论对其做Hough变换旋转校正后方可提取水印,具体

的校正步骤为:Canny算子提取含水印图像的边缘;获得二值化后的含水印图像;根据式(9)进行坐标系转换;做Hough变换,设置步长为1,即在图像中做180个方向的直线检测;将最多点所在的直线作为旋转角度进行逆向旋转校正。

0.1718	0.2624	0.0772	0.115
0.2204	0.0596	0.0859	0.1062
0.1251	0.0825	0.0825	0.1271
0.1558	0.2046	0.2133	0.1079

a 各分块的二阶矩(能量)

0.1158	0.2154	0.4183	0.4504
0.2006	0.5163	0.7942	0.5317
0.265	0.5618	0.4731	0.372
0.3285	0.3143	0.1542	0.2976

b 各分块的对比度

0.2951	0.2517	0.151	0.1033
0.4041	0.1577	0.1383	0.2416
0.171	0.105	0.1312	0.1496
0.1312	0.1173	0.1809	0.1814

c 各分块的相关度

2.0908	2.0862	2.9502	2.8212
2.0804	3.2121	3.16	2.735
2.5713	3.0876	3.0063	2.6411
2.4454	2.25	2.101	2.7034

d 各分块的熵

图 6 4×4 分块的特特征参数

Fig.6 Characteristic parameter of 4×4 blocks

3 仿真实验结果

3.1 不可见性

选用512×512像素的lena灰度图像作为载体,将

“2018”字样的二值图像嵌入其中。提取出的水印利用形态学滤波（以特定结构元素对图像先后做一次开、闭运算）处理以提高信息的可辨识度。载体图像与经 GLCM选取的待嵌入水印的图像块（特征区域）见图 7，水印的嵌入和提取结果见图 8。



图 7 特征区域选取
Fig.7 Feature area selection



图 8 水印的嵌入和提取
Fig.8 Watermark embedding and extraction

由表1可知，含水印图像与原始载体图像之间的峰值性噪比达到49，相比于现有的基于人类视觉的自适应水印算法^[15—17]有不同幅度的提高，人眼更加无法辨别图像的变化以及察觉到水印的存在。提取的水印经数学形态学滤波后与原水印图像间的相似度NC值为0.97。

表 1 水印的不可见性对比
Tab.1 Invisibility comparison of watermark

算法	关键技术	PSNR
文中	FCM-GLCM	49
文献[15]	DWT	41
文献[16]	Kmeans	47
文献[17]	Contourlet	42

3.2 鲁棒性

对含水印图像进行仿真攻击测试以验证算法的鲁棒性。根据实验结果所示，嵌入的水印在经过任意角度旋转的攻击后仍然可被提取并识别，对于各种信号处理的鲁棒性较强，同时可以抵御大面积的裁剪攻击。部分实验结果和数据见图 9 和表 2。

由实验结果可知，算法可以抵御不同类型和不同级别的噪声和滤波攻击，证明了其对于信号处理有良好的鲁棒性。另外，即便对图像进行大面积裁剪且恰

好切除掉一半水印所在区域的极端情况下，水印信息在提取后和原始水印之间的 NC 值仍可保持在 0.90 左右，可辨识度依旧较高。由于引入能够检测图像直线的 Hough 变换技术，当图像面临任意角度的旋转攻击，均可将其进行还原校正后提取水印，NC 值均大于 0.96。



图 9 攻击结果
Fig.9 Attack results

表 2 鲁棒性测试数据
Tab.2 Robustness test data

攻击类型	参数	NC值			
		文中算法	文献[15]	文献[16]	文献[17]
高斯噪声	0.01	0.93	0.80	0.92	0.83
中值滤波	3×3	0.98	0.93	0.91	0.82
维纳滤波	3×3	0.98	0.91	—	—
特征区	1/4	0.95	0.90	0.90	0.80
域裁剪	1/2	0.89	—	0.91	0.64
旋转	45°	0.97	—	—	0.91（小于1°）
	75°	0.97			
	120°	0.96			
涂抹攻击	—	0.96	—	—	—
对比度增强	—	0.98	—	—	—

4 结语

提出的基于人类视觉系统的自适应水印算法,论证了水印的嵌入方式对其不可见性的影响。在此基础上利用灰度共生矩阵选择载体图像中水印嵌入的区域,同时根据模糊 C 均值聚类理论将聚类后各分块的灰度直方图作为评价工具,设置不同的嵌入强度将光全息加密的水印嵌入载体小波域,获得人眼难以察觉的含水印图像。水印的不可见性得到大幅提升,鲁棒性优势明显,是一种有效实用的水印算法。

参考文献:

- [1] 白韬韬, 刘真, 卢鹏. 基于计算全息的强鲁棒性自适应水印算法[J]. 液晶与显示, 2015, 30(1): 170—179.
BAI Tao-tao, LIU Zhen, LU Peng. Adaptive Watermarking Algorithm Based on CGH with Strong Robustness[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2015, 30(1): 170—179.
- [2] SUREKHA B, SWAMY G N. Visual Secret Sharing Based Digital Image Watermarking[J]. International Journal of Computer Science Issues(IJCSI), 2012, 9(3): 312—317.
- [3] WATSON A B. Digital Image and Human Vision[M]. Cambridge: MIT Press, 1993.
- [4] SUREKHA B, SWAMY G N. A Semi-blind Image Watermarking Based on Discrete Wavelet Transform and Secret Sharing[C]// Proceedings of the International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT'12), October 2012, Mumbai, India: 1—5.
- [5] 申静. 基于人眼对比度敏感视觉特性的彩色图像水印技术研究[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 78—83.
SHEN Jing. Color Image Watermark Technology Based on Contrast Sensitivity of Human Vision System[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 78—83.
- [6] TIEN C L, LYN Y R. Optical Surface Flatness Recognized by Discrete Wavelet Transform and Grey Level Co-occurrence matrix[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(8): 2299—2305.
- [7] 郑红, 李钊, 李俊. 灰度共生矩阵的快速实现和优化方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2509—2515.
ZHENG Hong, LI Zhao, LI Jun. Study on Fast Implementation and Optimal Method of Gray Level Co-occurrence Matrix[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2509—2515.
- [8] SIELER L, TANOUGAST C, BOURIDANCE A. A Scalable and Embedded FPGA Architecture for Efficient Computation of Grey Level Co-occurrence Matrices and Haralick Textures Features[J]. Microprocessors and Microsystems, 2010, 34: 14—24.
- [9] BERGET I, MEVIK B H, NAS T. New Modifications and Applications of Fuzzy C-means Methodology[J]. Computational Statistics & Data Analysis, 2008(52): 2403—2418.
- [10] 黄海新, 孔畅, 于海斌, 等. 自适应特征熵权模糊 C 均值聚类算法的研究[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(1): 219—223.
HUANG Hai-xin, KONG Chang, YU Hai-bin, et al. Research on Adaptive Entropy Weight Fuzzy C-means Clustering Algorithm[J]. Systems Engineering-theory & Practice, 2016, 36(1): 219—223.
- [11] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. Appl Opt, 2002, 41(5): 865—873.
- [12] 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.
- [13] RAMAKRISHNAN A, THOMAS C, THARAKAN T J. Spray Characterisation Using Combined Radon and Hough Transforms[C]// IEEE International Conference on Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems, 2015.
- [14] 王少伟, 尚媛园, 丁辉, 等. 一种改进的 RGB Hough 车牌校正定位算法[J]. 光学技术, 2014, 40(1): 35—39.
WANG Shao-wei, SHANG Yuan-yuan, DING Hui, et al. An Improved License Plate Correction and Localization Algorithm Based on RGB Hough[J]. Optical Technique, 2014, 40(1): 35—39.
- [15] 许卓. 基于图像内容的自适应全息水印技术研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2013.
XU Zhuo. A Study on Adaptive Color Image Watermarking Algorithms Based on Content Features and Holographic Encryption[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2013.
- [16] 孙刘杰, 李晨璐. 基于图像特征区域的加密全息水印算法[J]. 包装工程, 2013, 34(15): 109—113.
SUN Liu-jie, LI Chen-lu. Encrypted Holographic Watermark Algorithm Based on Image Feature Area[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(15): 109—113.
- [17] 孙刘杰, 许卓. 一种基于 Contourlet 变换的彩色图像全息水印算法[J]. 包装工程, 2013, 34(9): 10—13.
SUN Liu-jie, XU Zhuo. Novel Color Image Hologram Watermarking Algorithm Based on Contourlet Transform[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(9): 10—13.