

结合初级视皮层特性的感兴趣区域数字水印算法

吕皖丽¹, 郭玉堂^{1,2}, 罗斌¹

(1. 安徽大学计算机科学与技术学院 合肥 230039; 2. 安徽省教育学院计算机科学与技术系 合肥 230061)

【摘要】提出一种新的结合初级视皮层特性的感兴趣区域图像数字水印算法, 尽可能最大限度地保护图像的主题内容。Berkeley变换是一种符合视皮层V1区特性的完全正交小波变换, 视觉特性好, 计算速度快。水印提取过程采用独立分量分析, 真正实现了盲水印提取。实验表明, 算法自动搜寻主题内容, 透明性较好, 对常见的攻击具有很好的鲁棒性, 更重要的是, 在对图像背景作大面积删除后, 仍然能提取出高质量的数字水印。

关键词 Berkeley小波变换; ICA; ROI; 数字水印

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2011.06.021

Novel ROI Watermarking Scheme Combined with the Behavior of Primary Visual Cortex

LÜ Wan-li¹, GUO Yu-tang^{1,2}, and LUO Bin¹

(1. School of Computer Science and Technology, Anhui University Hefei 230039;

2. Computer Department, Anhui Institute of Education Hefei 230061)

Abstract If obvious objects in an image are deleted, the image would be meaningless. The protection of the image contents is imminence. A novel image watermarking scheme combined with the behavior of primary visual cortex is proposed. The Berkeley wavelet transform shares many characteristics with the receptive fields of neurons in mammalian primary visual cortex (V1). The watermark is embedded into the region-of-interest (ROI) position of an image. Independent component analysis (ICA) is adapted to the watermark extraction procedure and the original image is not necessary. Experimental results demonstrate that the proposed watermarking technique successfully locates ROI position automatically, has a good vision performance and robustness against some attacks as JPEG compress, noises, and little rotation and scale, luminance and contrast enhancement and low pass filtering. More importantly, the proposed scheme can extract the watermarks with high quality even if majority background of an original image is removed.

Key words Berkeley wavelet transform; ICA; ROI; watermarking

对于一幅图像, 人们关注的实际上是图像的主要内容, 即图像中人们感兴趣的区域(region-of-interest, ROI)。文献[1]提出了图像关键属性抽象^[1]的概念, 指出理想的图像认证方法应该以图像关键属性作为水印, 保护的對象是图像的内容而非形式。基于该概念, 文献[2]将联合图像专家组(joint photographic experts group, JPEG)制定的静态图像压缩标准图像的高压缩版本作为图像的水印信息, 嵌入在图像空域的最低位平面中。文献[3]则将水印嵌入在图像量化后的中频DCT系数中。但是, 即使嵌入大量的水印信息在图像背景中, 如果ROI中没有嵌入信息, 同样会造成版权保护困难。而目前的

数字水印算法基本都是对图像的整体特征操作, 在图像纹理丰富区域嵌入大量高强度水印, 在平坦区域嵌入少量低强度水印, 不分主题和背景, 基本无法起到对主题内容的保护作用。文献[4]使用图像的矩将数字水印嵌入图像的ROI中, 但是需要手动标注图像的ROI。文献[5]提出使用基于特征的数字图像水印方案, 详细分析了在几何变换下图像特征点具有的不变特性。文献[6]则利用不同尺度下的墨西哥小帽变换得到特征点, 以特征点为中心将水印嵌入圆盘区域中。但是上述方案都存在如下问题: 1) 提取的图像特征点稳定性较差, 且分布不均匀, 严重影响数字水印对剪切等攻击的抵抗能力; 2) 未能结

收稿日期: 2010-01-19; 修回日期: 2011-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(61003038), 安徽高等学校省级自然科学研究重点项目(KJ2009A145)

作者简介: 吕皖丽(1974-), 女, 博士, 主要从事模式识别、数字水印等方面的研究。

合图像内容自适应确定图像局部特征区域尺寸,采用固定尺寸的局部特征区域,降低了抵抗缩放等攻击的能力。文献[7-8]使用多尺度 Harris 检测算子从载体图像中提取稳定的特征点,产生局部特征区域,但 Harris 角点对噪声点非常敏感。

本文提出一种新颖的模拟视皮层V1区特性的图像数字水印算法,自动搜寻ROI,并在ROI中嵌入水印信息,尽可能最大限度地同时满足数字水印的不可感知性、鲁棒性、实时性,以及针对载体图像主题内容的尽量大的容量要求。Berkeley小波变换(Berkeley wavelet transform, BWT)^[9]由4对完全正交基构成,变换和反变换计算快捷。BWT变换在空间位置、空间频率和方向带宽上模拟灵长类动物大脑初级视觉皮层的生理学特质,符合人类的视觉特性。传统的模拟大脑初级视觉皮层的Gabor小波与BWT变换相比,其计算量非常大。因此,BWT变换可在初级视觉模拟和可计算性方面得到很好的折衷。

1 Berkeley小波变换

1.1 符合视皮层V1区模型标准的Berkeley小波

在图像特征的选择和提取过程中,找到更加符合人类视觉感知的特征类型及其描述形式,一直是人们广泛探讨的问题。然而,并非所有符合人类视觉感知的图像特征都可以用于ROI选择。人类人眼视觉系统对中频范围内的亮度变化最为敏感,而在较低和较高频率处,人类的视觉灵敏度会降低。特别地,人眼对于图像中水平和垂直的线条以及边缘最为敏感,而对成45°倾斜的线条和边缘最不敏感;亮度越高,人眼越不敏感。哺乳动物对外界图像的感知,导致了图像信息在视觉通路间的逐级传递和提取。哺乳动物视皮层V1区简单细胞感受野具有空间的局部性、方向性,以及频域的带通性(在不同尺度上具有选择性)等特性。Berkeley小波^[9]选择的小波基具有与哺乳动物视皮层V1区简单细胞感受野特性尽可能吻合的属性。

1.2 BWT母小波

BWT由分别具有0°、45°、90°和135°方向的4对母小波构成,每对母小波则由一个奇对称母小波和一个偶对称母小波构成。

用符号 $\Theta = \{\theta\} = \{0, 45, 90, 135\}$ 表示角度,符号 $\Phi = \{\phi\} = \{o, e\}$ 表示对称性,符号 $\beta_{\theta, \phi}$ 表示Berkeley母小波。定义二值函数:

$$u(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 < x \leq 1, \quad 0 < y \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

则4对母小波可分别定义为:

$$\beta_{0,o}(x, y) = \left[-u\left(x, \frac{y}{3}\right) + u\left(x-2, \frac{y}{3}\right) \right] / \sqrt{6} \quad (2)$$

$$\beta_{0,e}(x, y) = \left[-u\left(x, \frac{y}{3}\right) + 2u\left(x-1, \frac{y}{3}\right) - u\left(x-2, \frac{y}{3}\right) \right] / \sqrt{18} \quad (3)$$

$$\beta_{45,o}(x, y) = [-u(x, y-2) + u(x-1, y) + u(x-2, y-1) + u(x, y-1) + u(x-1, y-2) + u(x-2, y)] / \sqrt{6} \quad (4)$$

$$\beta_{45,e}(x, y) = \left[-u\left(x, \frac{y-1}{2}\right) + u(x-1, y) + u(x-1, y-2) + u\left(x-2, \frac{y}{2}\right) + 2u(x, y) + u(x-1, y-1) + u(x-2, y-2) \right] / \sqrt{18} \quad (5)$$

$$\beta_{90,o}(x, y) = \left[u\left(\frac{x}{3}, y\right) - u\left(\frac{x}{3}, y-2\right) \right] / \sqrt{6} \quad (6)$$

$$\beta_{90,e}(x, y) = \left[-u\left(\frac{x}{3}, y\right) + 2u\left(\frac{x}{3}, y-1\right) - u\left(\frac{x}{3}, y-2\right) \right] / \sqrt{18} \quad (7)$$

$$\beta_{135,o}(x, y) = [-u(x, y) + u(x-2, y-1) + u(x-1, y-2) + u(x, y-1) + u(x-1, y) + u(x-2, y-2)] / \sqrt{6} \quad (8)$$

$$\beta_{135,e}(x, y) = [-u(x, \frac{y}{2}) + u(x-1, y) + u(x-1, y-2) + u(x-2, \frac{y-1}{2}) + 2u(x, y-2) + u(x-1, y-1) + u(x-2, y)] / \sqrt{18} \quad (9)$$

该4对完全正交基构成Berkeley变换。

1.3 BWT变换和反变换

母小波生成不同尺度的子小波 $\beta_{\theta, \phi}^{m, n, s}$, (m, n) 为子小波在 (x, y) 的平面坐标,变换尺度 s 有:

$$\beta_{\theta, \phi}^{m, n, s} = \frac{1}{s^2} \beta_{\theta, \phi}(3^s(x-m), 3^s(y-n)) \quad (10)$$

直流分量 $\beta_0 = \left[u\left(\frac{x}{3}, \frac{y}{3}\right) \right] / \sqrt{9}$ 。由于BWT小波

具有完全正交基和自反性,反变换过程可以通过BWT变换系数迅速重建为:

$$I_{\text{recon}}(x, y) = \sum_{\theta \in \Theta} \sum_{\phi \in \Phi} \sum_{m, n, s} I_{\text{BWT}, m, n, s}^{\theta, \phi} \beta_{\theta, \phi}(3^s(x-m), 3^s(y-n)) \quad (11)$$

式中, $I_{\text{BWT}, m, n, s}^{\theta, \phi}$ 是图像 I 经过BWT变换后得到的变换系数。

1.4 BWT变换的性质

BWT小波变换可变化为三进小波变换。常用的二进小波不可能同时拥有正交性、对称性或差值性等特性, 因而其对应的滤波器参数会受到很多制约。三进小波不仅具有更多的分频段特性, 而且还有其它一些优良性质, 尤其是在图像处理应用中, 可使图像的信息更加集中, 便于更好地处理图像不同视觉区域的重要性程度, 例如位于较中心位置上的对象一般在视觉上会得到较高的重视。

2 数字水印的嵌入

本文利用BWT变换的视觉特性, 建立相应的多尺度、多方向对比度图像金字塔, 对原始图像进行完全BWT变换, 将变换系数重复利用, 不仅能找到原始图像的ROI, 并且能在ROI中嵌入水印信息。

2.1 基于初级视皮层特性的水印嵌入区域预处理

文献[10]引入了多尺度技术, 在多个尺度层中设置多个不同尺寸和形状的邻域。BWT变换可以在8个方向和多个尺度上对图像进行处理。本文在BWT变换的基础上, 引入多尺度技术, 使用图像的角度变化特征和亮度变化特征, 在8个方向和多个尺度上寻找图像的ROI。

算法1 输入: 原始载体图像 I ; 输出: 水印嵌入区域坐标矩阵 P 、载体图像变换系数矩阵 I_{BWT} 和阈值 t 。

基于初级视皮层特性的原始图像水印嵌入区域预处理过程如下。

1) 由于三进小波变换要求输入矩阵大小为3的整数次幂的方阵, 因此, 将原始图像缩放到最接近原始尺寸的3的整数次幂。图像 I 经过缩放后记为 I_p 。

2) 将 I_p 进行完全BWT变换, 得到BWT变换系数矩阵 I_{BWT} 。

3) 由于人类视觉系统对图像对比度的变化十分敏感, 因此使用图像金字塔提取 I_p 经过 S 级尺度变换的各个不同尺度下的角度变化特征和亮度变化特征分别为:

$$I_p(u, v) = |I_p(u) \odot I_p(v)| \quad (12)$$

$$O_p(u, v) = |O_p(u) \odot O_p(v)| \quad (13)$$

式中, 符号 \odot 定义为求图像尺度 u 和尺度 v 之间的对比度操作; $0 < u < v < s$ 。

4) 归一化各个不同尺度下的角度变化特征和亮度变化特征, 从不同尺度下寻找特征变化最大的

区域作为ROI并标记位置, 坐标矩阵按照坐标大小排序, 记为 P , 作为密钥保存。

由于本文寻找ROI是为了在ROI区域嵌入水印信息, 而大尺度下的图像信息稍作变化就会对重建的图像产生较大的视觉影响, 而细尺度的图像信息则抗攻击性较弱。因此, 本文在标记ROI时, 选择的尺度介于最大尺度和最小尺度之间。根据被标记的ROI, 选择相应的 I_{BWT} 系数作为水印嵌入位置, 统计可嵌入水印的系数的个数 λ , 调整阈值 t , 使 $\text{int}(\sqrt{\lambda})$ 为3的整数次幂。阈值 t 的选择不仅受即将嵌入的水印位置的影响, 也受载体图像视觉注意区域的影响。因受JPEG压缩标准以及视觉的影响, 图像的平坦区不适合嵌入水印。而阈值 t 越小, 表示当前尺度下图像看起来越平坦。阈值 t 设置好后作为密钥保存。

2.2 数字水印嵌入

算法2 输入: 载体图像水印嵌入区域坐标矩阵 P_1 及其变换系数矩阵 I_{BWT} 、水印图像 W ; 输出: 添加水印图像 I' 、密钥矩阵 K^H 。

数字水印的嵌入过程如下。

1) 将水印图像 W 进行预处理, 水印图像尺寸调整为 $\text{int}(\sqrt{\lambda}) \times \text{int}(\sqrt{\lambda})$, 使用版权拥有者的密钥 k_1 对扩展填充后的水印加密置乱。 W 经过预处理后记 W_p 。

2) 将 W_p 进行BWT变换, 得到BWT变换系数矩阵 W_{BWT} 。

3) 根据标记的水印嵌入位置, 将 I_{BWT} 中的相应系数单独提出, 记为 I_E 。

4) 线性叠加得到混叠矩阵:

$$H_1 = I_E + a_1 \times W_{\text{BWT}} \quad (14)$$

$$H_2 = I_E + a_2 \times W_{\text{BWT}} \quad (15)$$

式中, a_1 为水印嵌入强度因子; a_2 为提取水印强度因子。 a_1 和 a_2 在使用后被抛弃。

5) 将混叠矩阵 H_1 中的元素按照标记位置逐个替代 I_{BWT} 中的相应元素, 得到 I'_{BWT} , 将 I'_{BWT} 进行逆BWT变换, 得到添加水印图像 I' 。 H_2 使用版权拥有者密钥 k_2 进行加密置乱, 得到密钥矩阵 K^H 作为验证水印密钥保留。

3 数字水印的提取过程

3.1 动态时间规整(DTW)

动态时间规整(dynamic time warping, DTW)也称为动态时间规正, 是一种基于动态规划(dynamic

programming, DP)方法,把时间规划和距离测度计算结合起来的非线性规整技术。动态时间规整实际是解决两个向量间的非线性映射问题。一般而言,对于 n 维空间的两个向量,如果向量的长度不同,就无法使用线性映射来表示元素间的对应关系。假设该两向量的元素位置都表示时间,动态时间规整就是寻找一个时间规整函数,实现两个向量的非线性映射。

3.2 独立分量分析(ICA)

独立分量分析的目的是对由独立信源产生并且经过未知线性混合的观测信号进行盲分离,从而重现原来的独立信号源,其应用主要集中在盲源分离和特征提取两方面。文献[11]将ICA用于数字水印检测过程,使用ICA进行盲源分离将水印信息分离出来。

3.3 基于感兴趣区域(ROI)的数字水印提取过程

本文将ICA技术和动态时间规整(dynamic time warping, DTW)技术用于数字水印提取过程。数字水印的提取不需要原始图像参与,属于盲水印提取算法。由于ICA自身的特性,算法对于专业的图像水印鲁棒性测试基准软件Stirmark中提供的一些图像处理操作具有良好的鲁棒性,包括图像压缩、图像剪切、删除行或列、尺度变换等。也是由于ICA自身的特性,算法比较容易在伪造攻击下无力应对,因此,本文在数字水印提取过程中使用动态时间规整技术,可以有效抗伪造攻击。

算法 3 输入:待检测图像 I' 、密钥矩阵 K_H 、阈值 t 、载体图像水印嵌入区域坐标矩阵 P_1 、版权所有者的密钥 k_1 和 k_2 ; 输出:提取的水印图像 W' 。

基于 ROI 的数字水印提取过程如下。

1) 将待检测图像 I' 进行预处理,缩放到最接近原始尺寸的 3 的整数次幂,记为 I'_p 。

2) 使用算法 1,通过阈值 t 寻找待检测图像的 ROI,标记 ROI 坐标,记为 P_2 。读取水印密钥 K^H ,使用版权所有者密钥 k_2 进行逆置乱解密,得到 H_2 ,统计 H_2 的元素个数,记为 γ 。使用 DTW 配对 P_1 和 P_2 之间的相应元素,标记 P_1 和 P_2 对应的坐标对,统计 P_1 和 P_2 匹配正确 ROI 个数 γ' ,如果 $\frac{|\gamma - \gamma'|}{\gamma} < e$, $0 < e \leq 0.1$,提取相应标记位数据,得到 I'_{BWT} 。否则,认为没有找到正确 ROI,算法直接退出。

3) 将 I'_{BWT} 和 H_2 作为 ICA 的输入,分离混合矩阵,得到分离后的水印系数矩阵 W'_{BWT} ,将 W'_{BWT} 进行逆 BWT 变换得到 W'_p 。

4) 用版权所有者的密钥 k_1 对 W'_p 进行解密并逆置乱,得到提取的水印图像 W' 。

水印的质量使用误码率 BER 衡量,若 BER 不超过 0.15,且视觉可辨,则接受水印图像 W' 。

4 实验

4.1 透明性

图 1 是实验原始图像,背景有相对平坦的天空,也有迷惑视觉的影子,还有纹理丰富的草地树林,可从不同角度测试算法对 ROI 定位的准确性。



a. 踢球者



b. 表



c. 足球赛

图1 原始图像

实验中,嵌入 81 bit 水印信息,选用峰值信噪比(PSNR)衡量嵌入水印图像的质量。对于大小为 $M \times N$ 像素的 8 位灰度图像,峰值信噪比为:

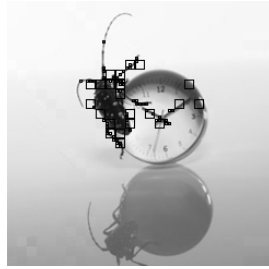
$$\text{PSNR} = 10 \lg \left(\frac{255^2 \times m \times n}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (I'(i, j) - I(i, j))^2} \right) \quad (16)$$

图 2a、图 2b 和图 2c 使用算法 1 标注原始图像的 ROI; 图 2d、图 2e 和图 2f 使用算法 2 添加水印

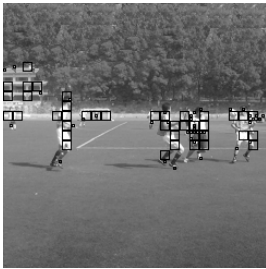
图像。由图可见,标注的 ROI 区域集中于重要部位。



a. 算法 1 标注“踢球者”的 ROI



b. 算法 1 标注“表”的 ROI



c. 算法 1 标注“足球赛”的 ROI



d. 算法 2 为“踢球者”添加水印



e. 算法 2 为“表”添加水印



f. 算法 2 为“足球赛”添加水印

图 2 算法 1 标注 ROI 图像和算法 2 添加水印图像

4.2 抗图像处理的鲁棒性实验

表 1 是使用 Stirmark 或 Photoshop 对添加水印的图像根据 JPEG 制定的静态图像压缩标准进行图像压缩处理后提取水印的误码率。

表1 根据JPEG制定的静态图像压缩标准进行图像压缩处理的鲁棒性实验

质量因子	提取水印 BER	质量因子	提取水印 BER
90	0	40	0.061 7
80	0	30	0.061 7
70	0	25	0.086 4
60	0	20	0.012 3
50	0	15	0.259 3

从表 1 中可以看出,根据 JPEG 制定的静态图像压缩标准进行图像压缩,压缩质量在 50 以上时,算法表现良好,误码率为 0;压缩质量低于 15 时,误码率迅速上升。本文算法具有一定的抗加性噪声能力。

本文使用两种方法检测算法的抗尺度变换特性: 1) 在 Photoshop 中将添加水印图像不同的缩小和放大比例系数,然后使用算法 3 提取水印,检测

水印误码率。表 2 显示了按比例缩放攻击图像后提取的水印误码率如表 2 所示添加水印,图像经过放大后仍然能够提取质量很高的水印图像。

表2 按比例缩放攻击图像后提取水印误码率实验

缩放比例	提取水印 BER	缩放比例	提取水印 BER
25%	未检出	150%	0
50%	0	200%	0

2) 使用 Stirmark 对添加水印图像旋转,并且缩放为原始图像大小,然后提取水印。经过顺时针和逆时针小角度旋转 0.25°,本文算法提取的水印误码率为 0。

本文算法对高斯和椒盐噪声攻击的抵抗能力也较好。不同强度高斯噪声攻击图像后提取水印的误码率如表 3 所示。

椒盐噪声攻击实验中,添加强度为 0.01 的椒盐噪声,提取水印的误码率为 0;添加强度为 0.02 的椒盐噪声,提取水印的误码率为 0.086 4。

表3 高斯噪声攻击图像后提取水印的误码率

方差	均值	提取水印 BER
0.001	0	0
0.005	0	0.024 7
0.01	0	0.111 1

4.3 对剪切攻击的实验

图 3 对添加水印图像进行了部分剪切和拷贝。

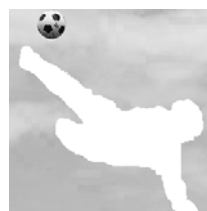
图3a和图3c剪切了原始图像的重要内容,损失了图像表达的意义,在水印提取过程中未检测出水印。图3e清除了图像的背景,保留了图像的内容,提取水印的误码率为0.024 7。图3g拷贝了原始图像的足球部分并进行粘贴,提取水印的误码率为0。由此可见,只要保留图像中的重要内容,便可提取水印信息。



a. 剪切图 1a 中的足球部分



b. 剪切足球部分后标注 ROI



c. 剪切图 1a 中的运动员部分



d. 剪切运动员部分后标注 FOA

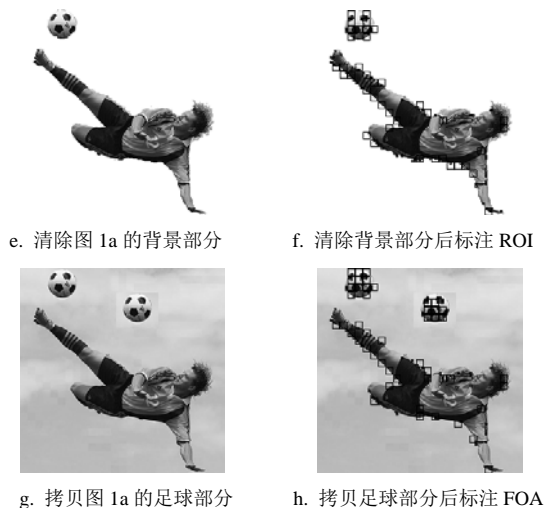


图3 剪切/拷贝部分区域后标注ROI

5 结束语

常规的数字水印嵌入算法在整幅图像中根据图像的纹理情况按照不同的强度嵌入水印。本文在图像的ROI中实现数字水印的嵌入,通过模拟视皮层V1区特性的Berkeley小波变换,自动搜寻ROI并在ROI中嵌入水印信息。实验表明,该算法不仅视觉效果好,而且对于常见的攻击具有很好的鲁棒性。在剪切/拷贝实验中,只要保留图像中的重要内容,便可从图像内容中提取出水印信息,因而具有很强的实用价值。本文设计数字水印算法时并未考虑ROI经过旋转、位移后如何检测出水印,但水印对象的自动检测为下一步抵抗第二代水印攻击时进行水印同步提供了新的思路。

参 考 文 献

[1] SCHNEIDER M, CHANG S F. A robust content based digital signature for image authentication[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Lausanne, Switzerland: [s.n.], 1996: 227-230.

- [2] FRIDRICH J, GOLJAN M. Images with self-correcting capabilities[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. Kobe, Japan: [s.n.], 1999: 792-796.
- [3] LIN C Y, CHANG S F. Semifragile watermarking for authenticating JPEG visual content[C]//Proceedings of SPIE, Security and Watermarking of Multimedia Contents II. San Jose: [s.n.], 2000: 140-151.
- [4] ZHANG L, XIAO W, QIAN G, et al. Rotation, scaling, and translation invariant local watermarking technique with Krawtchouk moments[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(1): 21-24.
- [5] BAS P, CHASSERY J M, MACQ B. Geometrically invariant watermarking using feature points[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2002, 11(9): 1014-1028.
- [6] TANG C W, HANG H M. A feature-based robust digital image watermarking scheme[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(4): 950-959.
- [7] WANG X, WU J, NIU P. A new digital image watermarking algorithm resilient to desynchronization attacks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2007, 2(4): 655-663.
- [8] 王向阳, 侯丽敏, 邬俊. 基于图像特征点的强鲁棒数字水印嵌入方案[J]. 自动化学报, 2008, 34(1): 1-6.
WANG X Y, HOU L M, WU J. Feature-based digital image watermarking scheme robust to geometric attacks[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(1): 1-6.
- [9] WILLMORE B, PRENGER R J, WU M C K, et al. The Berkeley wavelet transform: a biologically inspired orthogonal wavelet transform[J]. Neural Computation, 2008, 20(6): 1537-1564.
- [10] SIAGIAN C, ITTI L. Rapid biologically-inspired scene classification using features shared with visual attention[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(2): 300-312.
- [11] PEI S C, ZENG Y C. A novel image recovery algorithm for visible watermarked images[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2006, 1(4): 543-50.

编辑 黄 莘