

基于 SIFT 抗几何攻击的数字水印算法

高虎明, 李凯捷*, 王英娟

(天津财经大学 管理信息系统系, 天津 300222)

(* 通信作者电子邮箱 lkj_871129@126.com)

摘要:针对数字水印信息易遭几何攻击的问题以及水印算法的不可见性与鲁棒性的平衡性问题,提出一种基于尺度不变特征变换(SIFT)的图像局部特征点的数字水印算法。首先利用 SIFT 算法在原始图像中寻找局部特征点,再以局部特征点确定多个满足一定条件的圆形局部特征区域(LFA),经 LFA 正规化后将水印嵌入到 LFA 的离散余弦变换(DCT)域的中频系数中。其中,考虑到水印信息对图像质量的影响,嵌入强度根据 Watson 人类视觉模型进行动态调整。实验结果表明,该算法得出的峰值信噪比(PSNR)和水印相似度数值较高,说明该算法不仅保证了较好的水印不可见性,并且在一定的几何攻击下表现出较强的鲁棒性。

关键词:尺度不变特征变换;局部特征区域;嵌入强度;Watson 人类视觉模型

中图分类号: TP391;TP391.9 **文献标志码:** A

Digital watermarking algorithm of anti-geometric attacks based on SIFT

GAO Huming, LI Kaijie*, WANG Yingjuan

(Management Information System Department, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China)

Abstract: To solve the problems that the digital watermark information are vulnerable to geometric attacks and the balance between invisibility and robustness of watermarking algorithm, a digital watermarking algorithm was proposed based on Scale Invariant Feature Transform (SIFT) for image local feature points. Based on SIFT algorithm local feature points, circular Local Feature Area (LFA) that met certain conditions were found. After the LFA regularization, the watermarking was embedded in intermediate frequency coefficient of LFA Discrete Cosine Transform (DCT) domain. Among them, considering the influence of the watermark information on the image quality, the embedding strength was dynamically adjusted according to the Watson human visual model. The experimental results show that the Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and the similarity of watermark get higher. The algorithm guarantees better watermark invisibility and robustness performance under certain geometric attacks.

Key words: Scale Invariant Feature Transform (SIFT); Local Feature Area (LFA); embedding strength; Watson human visual model

0 引言

近年来数字产品(如图像、数字音乐、视频等)的版权保护成为当前的热点问题。数字水印技术利用数据隐藏原理使版权标志不可见或不可听,既不损害原来产品,又达到了版权保护的目。目前国际上出现许多数字水印方案,但作为一个技术体系,数字水印技术尚不完善,每个研究者的介入角度各不相同,研究的方法策略也都不同。这其中以图像特征点为基础进行水印嵌入是许多研究者研究的主要方向^[1-2],但是大多数水印算法在抗几何攻击方面表现较差,并且不能较好地保证水印信息的不可见性和鲁棒性的平衡。柏均等^[3]提出一种基于 Harris 的图像特征点的水印嵌入算法,利用 Harris 算子提取图像特征点,以特征点为基准形成多个互不重叠区域嵌入水印,但是 Harris 算子仅在单一尺度空间上选取极值点,当发生图像仿射变化时不能准确检测出特征点。Lee 等^[4]直接将水印信息嵌入到由尺度不变特征变换(Scale-

Invariant Feature Transform, SIFT)算子提取的特征点所构造出的特征区域内,克服了 Harris 算子的缺陷,可以在多尺度空间上提取特征点,但是由于直接将水印嵌入到原始图像的空域内,因此算法的鲁棒性不高。Lu 等^[5]和李健等^[6]使用不同尺度空间下的高斯函数和 SIFT 算子提取的特征点来构造 Delaunay 三角形局部特征区域(Local Feature Area, LFA),利用三角形的几何协变性抵抗攻击,但是三角形区域需要多个特征点才能确定,如果提取水印时有一个或几个特征点提取不出来,则无法构造三角形区域,水印提取就会失败。陈杰等^[7]和景丽^[8]推导出离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)域中水印嵌入强度与图像质量判定标准,即峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)之间的关系,以此确定水印嵌入强度,但未能自适应地动态调整水印嵌入强度。

参考以上研究的优缺点,考虑运用 SIFT 能够在多尺度空间下提取稳定特征点以及圆形特征区域的仿射不变性,并结

收稿日期:2012-09-25;修回日期:2012-11-14。

基金项目:国家 973 计划项目(2012CB9555804);国家自然科学基金资助项目(11171251)。

作者简介:高虎明(1963-),男,山西吕梁人,副教授,博士,主要研究方向:电子商务、信息安全、信息系统开发管理;李凯捷(1987-),男,天津人,硕士研究生,主要研究方向:信息安全、数字水印;王英娟(1986-),女,辽宁本溪人,硕士研究生,主要研究方向:客户关系管理、信息系统开发管理。

合 Watson 人类视觉感知模型^[9] 动态调整嵌入强度,提出一种新的基于图像局部特征点的数字水印算法,从而提高了水印算法的抗几何攻击性,并且优化了水印信息的不可见性和鲁棒性的平衡问题。

1 基于 SIFT 图像特征点提取及分布优化

1.1 SIFT 简介

Lowe 提出的 SIFT 算子^[10] 是一种图像的局部描述子,具有尺度、旋转、平移的不变性,而且对光照变化、仿射变换和三维投影变换具有一定的鲁棒性。SIFT 算法有以下几个步骤:

第1步 检测尺度空间的极值点。

将图像 $I(x, y)$ 的尺度定义为一个函数 $L(x, y, \sigma)$, 它由高斯函数 $G(x, y, \sigma)$ 和图像 $I(x, y)$ 卷积得到:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \times I(x, y) \quad (1)$$

为了在尺度空间中高效的检测稳定特征点的位置, Lowe 提出在高斯差分函数与图像卷积得到的 Difference-of-Gaussian 空间中 $D(x, y, \sigma)$ 寻找极值点。

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) \times I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma)$$

其中: $G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right)$, 相邻两个尺度由一个常数 k 分开。

第2步 抽取稳定的特征点。

上一步已经求出了极值点,现在要对这些极值点进行筛选,去除不稳定的点,以增强特征点匹配时的稳定性、提高抗噪声能力。不稳定的点包括低对比度的点和边缘上的点。

第3步 为每个特征点指定方向。

梯度的模和角度分别表示为:

$$\begin{cases} m(x, y) = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \\ \theta(x, y) = \arctan \frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \end{cases}$$

其中 $L(x, y, \sigma)$ 为式(1)定义。

第4步 生成特征点描述向量。

通过对特征点周围图像区域分块,计算块内梯度直方图,生成具有独特性的向量,这个向量是该区域图像信息的一种抽象,具有唯一性。

1.2 图像特征点提取筛选及分布优化

本文使用 1.1 节介绍的 SIFT 算法提取局部特征点,如图 1(a)所示,其中白色点即为提取的特征点。然而经过 SIFT 提取出来的特征点不仅数量多并且分布不均匀,特征点数量过多使得嵌入时容易造成重叠嵌入并且影响原始图像质量,分布不均匀不易抵抗剪切等局部几何攻击。为了克服以上缺陷,首先对原始图像进行高斯低通滤波,减少特征点数量并提高特征点稳定性,然后再运用 SIFT 提取特征点,最后再进行特征点筛选并做分布优化,如图 1(b)所示。

具体步骤如下:

第1步 对原始图像进行高斯低通滤波得到预处理的图像。

第2步 运用 1.1 节介绍的 SIFT 算法对预处理图像提

取局部特征点。

第3步 特征点筛选。具体原则:以特征点坐标 (x, y) 为圆心, r 为半径画圆,将 r 值定义一个范围,将不符合以下条件的特征点删除。

$$\frac{\min(M, N)}{32} \leq r \leq \frac{\min(M, N)}{8}$$

其中:

$$r = \mu \times \text{round}(\sigma) \quad (2)$$

(M, N) 为图像长宽, μ 预设为 4。

第4步 特征点分布优化。具体原则:计算出圆的四个顶点坐标,以此来判断是否与其他特征点坐标有重叠,将所有重叠依照特征点 r 较大者留下,其余删除。

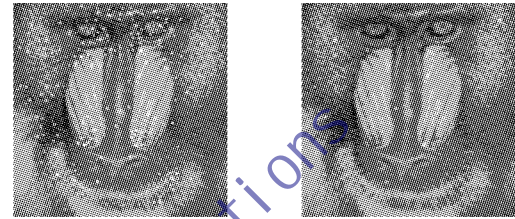


图1 特征点提取筛选及分布优化

2 LFA 生成及其正规化

2.1 LFA 生成

经过 1.2 节图像特征点提取筛选及分布优化后,就可得到图像所有特征点描述,包括坐标位置 (x, y) 、尺度空间 (σ) 和方向 (θ) 。以所有特征点为中心, R 为半径画圆。

$$R = \sqrt{2}r$$

其中 r 为式(2)定义。计算圆的四个顶点坐标,利用这四个顶点形成一个正方形,即一个 LFA。

2.2 LFA 正规化

图像正规化是将原始图像经变换后具有旋转不变性的一个变换过程,利用特征点的方向 (θ) , 将其旋转到 0° 方向。具体方法:首先以 LFA 为基准,把方向 (θ) 旋转到 0° 方向,再以每个 LFA 的特征点为中心, r 为半径画圆,此圆的外接正方形就为水印嵌入区域,之后就可以把水印信息重复地嵌入到每个正方形区域内,如图 2 所示。

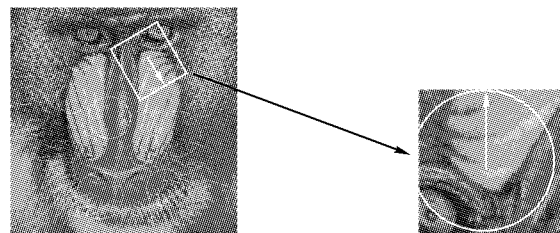


图2 LFA 正规化

3 水印信息嵌入及提取

3.1 量化误差与 PSNR 的定量关系

水印嵌入过程要综合考虑嵌入后的图像质量问题,本文用 PSNR 作为图像质量的客观评价。通过逆 DCT 公式推出 DCT 系数的量化误差与图像像素灰度误差的关系,进而推导出量化误差 α 与 PSNR 之间的定量关系^{[8]36-48}。根据 2 维 DCT 逆变换公式:

$$\begin{cases} I(x, y) = \frac{2}{\sqrt{MN}} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} a(p)a(q)F(p, q) \cos \frac{(2x+1)p\pi}{2M} \cos \frac{(2y+1)q\pi}{2N} \\ I'(x, y) = \frac{2}{\sqrt{MN}} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} a(p)a(q)F'(p, q) \cos \frac{(2x+1)p\pi}{2M} \cos \frac{(2y+1)q\pi}{2N} \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$a(p) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & p = 0 \\ 1, & 1 \leq p \leq M-1 \end{cases}$$

$$a(q) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, & q = 0 \\ 1, & 1 \leq q \leq N-1 \end{cases}$$

图像嵌入水印前后像素灰度值均方差 (Mean Squared Error, MSE) 公式为:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I'(x, y) - I(x, y))^2 \quad (4)$$

以及文献[8]中的推导公式:

$$E(F_i(x, y) - F'_i(x, y))^2 = \alpha^2/3 \quad (5)$$

由式(4)~(5)推导出:

$$MSE = \frac{4\alpha^2\delta}{3MN} \quad (6)$$

其中:

$$\delta = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{p=0}^{M-1} \sum_{q=0}^{N-1} \left(a(p)a(q) \cos \frac{(2x+1)p\pi}{2M} \times \cos \frac{(2y+1)q\pi}{2N} \right)^2$$

再由 PSNR 的定义及式(6)可以推出:

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{255^2 \times 3MN}{4\alpha^2\delta} \quad (7)$$

经式(7)变化得出:

$$\alpha = 255 \times \sqrt{\frac{3MN}{4 \times 10^{\frac{PSNR}{10}} \times \delta}} \quad (8)$$

3.2 水印嵌入

该算法采用重复嵌入方法,将水印信息重复嵌入到所有 LFA 中,如图3所示。

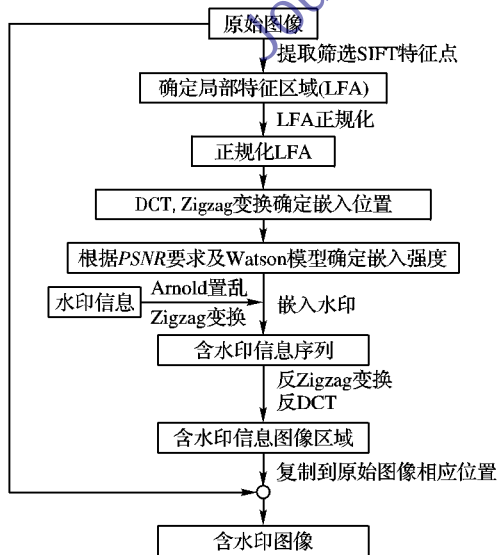


图3 水印嵌入流程

具体步骤如下:

第1步 首先利用第1章的方法提取图像所有特征点,

再利用第2章方法确定所有特征点的正规化 LFA。

第2步 将每个正规化后的 LFA 做 DCT,再将转换后的 DCT 系数做 Zigzag 变换,从中选取 K 个中频系数 $C(i) = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 嵌入水印信息。

第3步 二值水印图像做 Arnold 置乱处理,将置乱后的图像做 Zigzag 变换得到水印信息 $W(i) = \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$,其中 $W(i)$ 取 0 或者取 1。

第4步 动态调整量化误差 α 。根据 3.1 节的方法确定量化误差 α 与 PSNR 的关系,根据嵌入水印前后对 PSNR 的要求确定,然后根据式(9)确定嵌入每位水印的嵌入强度 α_i 。

$$\alpha_i = \frac{\mu_i}{\text{mean}(\mu_i)} \alpha \quad (9)$$

其中 μ_i 根据 Watson 人类视觉感知模型^[9] 中的松弛度得出, $\text{mean}(\mu_i)$ 为 μ_i 的平均值。

第5步 将 $W(i)$ 嵌入 $C(i)$ 中得到 $C'(i)$,在每个 LFA 中重复嵌入。

$$C'(i) = C(i) + (2W(i) - 1)\alpha_i$$

其中 α_i 为嵌入强度。

第6步 在每个 LFA 中依次嵌入水印后,做反 Zigzag 变换、反 DCT 以及反正规化变换,将得到的图像复制在原图像的相应位置,即得到含有水印的图像。

3.3 水印检测

水印检测为水印嵌入的逆过程,其流程如图4所示。

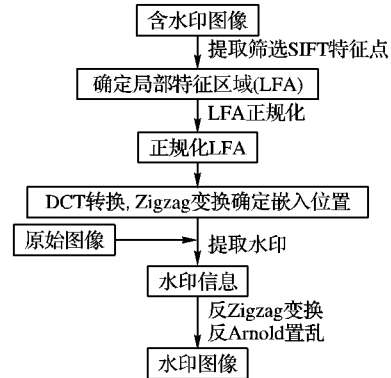


图4 水印检测流程

首先提取图像 SIFT 特征点,形成 LFA 区域并进行正规化,再利用正方形区域做 DCT, Zigzag 变换,在嵌入的相同位置提取 $C'(i)$,根据式(10)得到 $W'(i)$ 。

$$W'(i) = \begin{cases} 0, & C'(i) \leq C(i) \\ 1, & C'(i) > C(i) \end{cases} \quad (10)$$

由于水印是重复嵌入在图像每一个 LFA 中,提取时得到一系列 $W'(i)$,对于每一位水印信息选择 $W'(i)$ 较多的那个值作为该位提取的水印信息。最后将得到的水印信息进行反 Zigzag 变换,反 Arnold 置乱处理,得到水印图像。

4 实验结果分析

本实验选用 512×512 的 Baboon 图像为原始图像,如图5(a)所示,水印图像为 32×32 的标有 CS 的二值图像,如图5(b)所示。按照本文算法利用 Matlab 进行仿真^[11-12],首

先将水印图像进行 Arnold 置乱,将水印嵌入原始图像中得到嵌入水印后的载体图像,如图 6(a) 所示,从嵌入水印后的图像直接提取水印,得到提取的水印图像,如图 6(b) 所示。

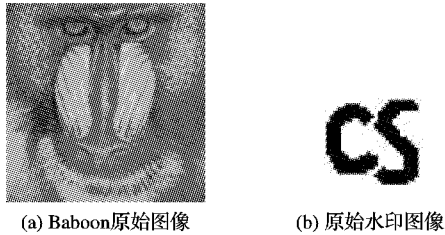


图5 原始图像及原始水印图像

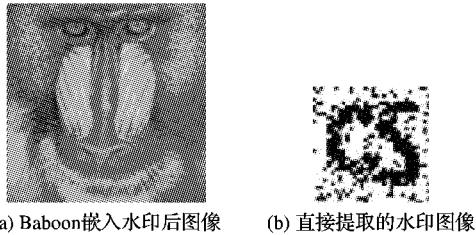


图6 嵌入水印后图像及提取的水印图像

为验证嵌入水印后图像的不可见性,本文运用 *PSNR* 作为水印嵌入后图像和原始图像差异的客观度量,并用肉眼辅助观察其差异性。在验证算法鲁棒性方面运用归一化相似度函数 *NC* 作为图像提取水印图像与原始水印图像相似度度量,并用肉眼辅助观察其相似度。*PSNR* 和 *NC* 的计算公式如下:

$$PSNR = 10 \times \lg \frac{255^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I'(i, j) - I(i, j))^2} \quad (11)$$

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q W(i, j) W'(i, j)}{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q W^2(i, j)} \quad (12)$$

观察并对比图 5(a) 和图 6(a),用肉眼不能分辨出差异,其 *PSNR* 值为 35.79,由此可证明水印算法具有较好的不可见性。观察并对比图 5(b) 和图 6(b),用肉眼可以分辨出 CS 字样,其 *NC* 值为 0.88,这是由于算法中有旋转等操作,利用 Matlab 进行仿真过程中会产生一些不可避免的旋转边缘误差,因此直接提取水印时不能完全显示与原水印相同的图像,但是根据 *NC* 值还是可以证明水印提取算法可以较好地提取出水印。为了验证对几何攻击的鲁棒性,进行了多个实验,包括面对剪切、平移、旋转、缩放等攻击后的鲁棒性:

1) 剪切攻击验证。

将嵌入水印后的图像中心位置进行剪切,剪切掉 100 × 100 像素,如图 7(a) 所示,然后在图像中提取水印,如图 7(b) 所示,用肉眼可以分辨出水印图像中的 CS 字样。由实验结果得出 *NC* 值为 0.88,表明该算法具有较强的抗剪切攻击能力。

2) 平移攻击验证。

将嵌入水印后的图像向右移动 100 像素,向下移动 100 像素,如图 8(a) 所示,然后再提取水印,如图 8(b) 所示,用肉眼可以分辨出水印图像中的 CS 字样。由实验结果得出 *NC* 值为 0.86,表明该算法具有较强的抗平移攻击能力。

3) 旋转攻击验证。

将嵌入水印后的图像逆时针旋转 45°,如图 9(a) 所示,然

后提取水印,如图 9(b) 所示,用肉眼可以分辨出水印图像中的 CS 字样。由实验结果得出 *NC* 值为 0.80,表明该算法具有较强的抗旋转攻击能力。

4) 缩放攻击验证。

将嵌入水印后的图像缩放到原来的 0.5 倍,如图 10(a) 所示,然后提取水印,如图 10(b) 所示,用肉眼能模糊地分辨出水印图像中的 CS 字样。由实验结果得出 *NC* 值为 0.68,表明该算法对缩放攻击也表现出一定的抵抗能力。

以上 4 种几何攻击验证该算法对剪切、平移和旋转攻击都具有较强的鲁棒性,但是对缩放攻击的鲁棒性不强,这是因为缩放后有的特征点被删除,或者水印信息被删除,使得提取的水印图像不能清晰地显示原水印信息。

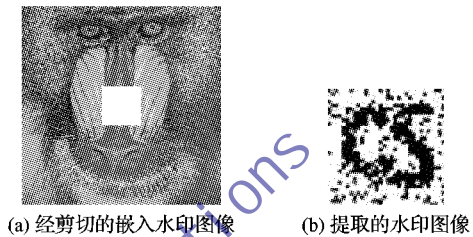


图7 剪切实验

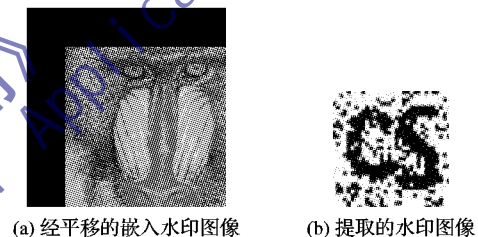


图8 平移实验

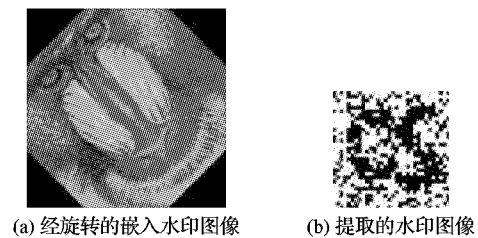


图9 旋转实验

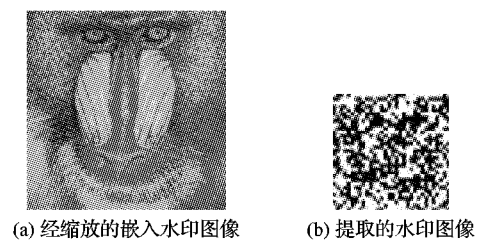


图10 缩放实验

5 结语

本文利用 SIFT 提取特征点,筛选并做分布优化,形成 LFA,再做正规化处理,最后将水印嵌入 LFA 的 DCT 域的中频系数中。水印嵌入强度上综合考虑了图像质量的要求,根据 Watson 人类视觉感知模型动态调整水印嵌入强度。该算法根据 SIFT 的抗几何变换性提取稳定的特征点,从而使嵌入 LFA 区域内的水印信息能够抵抗旋转、缩放等全局几何攻击,而且水印被重复嵌在多个 LFA,可以有效抵抗平移、剪切等局部几何攻击,具有较强的鲁棒性。除此之外,动态调整水印嵌

(下转第 755 页)

表2 各种攻击下提取的水印系数 R

攻击类型	Lena		Goldhill		Peppers	
	灰度水印	二值水印	灰度水印	二值水印	灰度水印	二值水印
剪切 25% (Max)	0.943 5	0.950 4	0.935 1	0.948 7	0.941 1	0.969 2
剪切 25% (Min)	0.921 7	0.943 7	0.921 1	0.927 1	0.926 3	0.941 8
剪切 50% (Max)	0.932 8	0.942 2	0.922 7	0.931 2	0.933 7	0.949 7
剪切 50% (Min)	0.917 3	0.938 4	0.896 3	0.919 9	0.907 8	0.936 5
高斯噪声	0.943 1	0.917 3	0.942 8	0.925 3	0.878 8	0.931 6
椒盐噪声	0.942 9	0.922 1	0.942 8	0.931 7	0.872 9	0.925 6
JPEG 压缩(质量因子 90)	0.939 2	0.947 4	0.921 2	0.938 5	0.922 1	0.931 5
JPEG 压缩(质量因子 80)	0.931 7	0.939 8	0.896 4	0.901 9	0.917 8	0.905 3
PS 攻击	0.926 8	0.885 3	0.895 3	0.867 3	0.921 5	0.889 6

注:Max、Min 表示同一实验重复 50 次获得 R 的最大值和最小值。

4 结语

本文提出了基于双水印数字全息的图像水印算法,该算法是盲水印,通过校正几何失真和像素失真,可从 PS 图像中盲提取出较强的水印信息,且具有较强的抗剪切攻击、JPEG 压缩攻击、噪声攻击的性能。与同类水印算法相比,提高了水印不可见性,增强了水印鲁棒性,为平面媒体知识产权保护提供了新的有效手段。

参考文献:

- [1] HARTUNG F, KUTTER M. Multimedia watermarking techniques [J]. Proceedings of IEEE, 1999, 87(7): 1079 - 1107.
- [2] 杨义先, 钮心忻. 数字水印理论与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 97 - 138.
- [3] LIN C Y, CHANG S F. Distortion modeling and invariant extraction for digital image print-and-scan process[C]// International Symposium on Multimedia Information Processing. Taiwan: [s. n.], 1999: 1 - 10.
- [4] FUNG L W W, KUNISA A. Rotation, scaling and translation-invariant multi-bit watermarking based on log-polar mapping and discrete Fourier transform[C]// 2005 International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005.
- [5] CHIU Y, TSAI W. Copyright protection against print-and-scan operations by watermarking for color images using coding and synchronization of peak locations in frequency domain[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2006, 22(1): 483 - 496.
- [6] GUO C G, XU G A, NIU X X, et al. A color image watermarking algorithm resistant print-scan[J]. International Conference on Wireless Communications, Networking and Information Security, 2010, 10(1): 518 - 521.
- [7] TAKAI N, MFUNE Y. Digital watermarking by a holographic technique[J]. Applied Optics, 2002, 41(5): 865 - 873.
- [8] CHANG H T, TSAN G T. Image watermarking by use of digital holography embedded in the discrete cosine transform domain[J]. Applied Optics, 2005, 44(29): 6211 - 6219.
- [9] 尉迟亮, 顾济华, 刘薇, 等. 基于数字全息及离散余弦变换的图像数字水印技术[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 355 - 361.
- [10] 黄建平. 一种基于数字全息及小波变换的图像水印算法[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2008, 19(5): 536 - 539.
- [11] 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.
- [12] 孙云峰, 翟宏琛, 杨晓苹, 等. 傅里叶计算全息数字水印在彩色图像印刷防伪中的应用[J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 952 - 955.
- [13] 黄素娟, 王朔中, 于瀛洁. 共轭对称延拓傅里叶计算全息[J]. 物理学报, 2009, 58(2): 952 - 958.
- [14] 黄素娟, 王杜瑶, 任艳丽. 基于数字全息及失真校正的抗打印扫描数字图像水印[J]. 应用科学学报, 2011, 29(3): 281 - 288.
- [15] WANG S Z, HUANG S J, ZHANG X P, et al. Hologram-based watermarking capable of surviving print-scan process[J]. Applied Optics, 2010, 49(7): 1170 - 1178.

(上接第 751 页)

入强度又保证了嵌入水印后的图像质量,嵌入到 DCT 域又使得水印具有较好的不可见性。

实验结果表明,该算法在不可见性和鲁棒性之间达到较好的平衡,不仅保证了嵌入水印后的图像质量,而且在抵抗任何攻击方面也具有较强的抗攻击能力。

参考文献:

- [1] LOOG M, LAUZE F. The improbability of Harris interest points [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(6): 1141 - 1147.
- [2] WANG X Y, YANG Y P, YANG H Y. Invariant image watermarking using multi-scale Harris detector and wavelet moments [J]. Computers and Electrical Engineering, 2010, 36(1): 31 - 44.
- [3] 柏均, 张敏瑞, 梁文莉. 基于特征点的图像水印嵌入方案[J]. 计算机工程, 2011, 37(13): 139 - 140, 149.
- [4] LEE H Y, KIM H S, LEE H K, et al. Robust image watermarking using local invariant features [J]. Optical Engineering, 2006, 45(3): 1 - 10.
- [5] LU C S, SUN S W, HSU C Y. Media Hash-dependent image watermarking resilient against both geometric attacks and estimation attacks based on false positive-oriented detection [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2006, 8(4): 668 - 685.
- [6] 李健, 叶有培, 何春梅, 等. 基于 SIFT 特征点的抗几何攻击水印算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(19): 170 - 171, 174.
- [7] 陈杰, 付永刚. DCT 域基于 PSNR 的扩频水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(7): 111 - 114, 118.
- [8] 景丽. 结合图像局部特征的数字水印技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2009.
- [9] WATSON A B. DCT quantization matrices optimized for individual images [C]// SPIE Proceedings of Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV. Bellingham, WA: SPIE Press, 1993: 202 - 216.
- [10] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 91 - 110.
- [11] 金聪. 数字水印理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [12] 张强, 王正林. 精通 Matlab 图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.