

# 基于图像特征点的强鲁棒数字水印嵌入方案

王向阳<sup>1,2</sup> 侯丽敏<sup>1</sup> 邬俊<sup>1</sup>

**摘要** 提出了一种抵抗一般性几何攻击的数字水印新算法. 该算法首先利用多尺度 Harris 检测算子从载体图像中提取出稳定的特征点; 然后根据特征尺度自适应确定局部特征区域, 并对其实施归一化处理; 最后结合预失真补偿理论, 采纳 DFT 中频幅值比较策略将水印信息重复嵌入到多个归一化局部特征区域内. 仿真实验表明, 本文算法不仅具有较好的透明性, 而且对常规信号处理和一般性几何攻击均具有较好的鲁棒性.

**关键词** 图像水印, 一般性几何攻击, 特征点, 归一化, 预失真补偿  
**中图分类号** TP391

## Feature-based Digital Image Watermarking Scheme Robust to Geometric Attacks

WANG Xiang-Yang<sup>1,2</sup> HOU Li-Min<sup>1</sup> WU Jun<sup>1</sup>

**Abstract** A new feature-based image watermarking scheme robust to unclassified geometric attacks is proposed in this paper. Firstly, the multiscale Harris detector is utilized to extract steady feature points from the host image; then, the local feature regions (LFR) are ascertained adaptively according to the feature scale theory, and they are normalized by normalization technique; finally, according to the predistortion compensation theory, several copies of the digital watermark are embedded into the nonoverlapped normalized LFR by comparing the DFT mid-frequency magnitudes. Experimental results show that the proposed scheme is not only invisible, but also robust against common signals processing and unclassified geometric attacks.

**Key words** Image watermarking, unclassified geometric attacks, feature points, normalization, predistortion compensation

抗一般性几何攻击的强鲁棒图像水印方法研究是一项富有挑战性的工作. 一般性几何攻击包括全局仿射变换、局部几何失真、几何变换组合等多种形式. 截止到目前, 人们主要采用三种措施设计抗一般性几何攻击图像水印方案, 即构造几何不变量、隐藏模板或可识别结构以及利用原始数据重要特征等<sup>[1-7]</sup>. 其中, 前两种方案可以抵抗常规的信号处理和全局仿射变换, 却无法有效抵抗局部失真、随机剪切、几何变换组合等较复杂的攻击.

相比之下, 基于原始载体特征的数字水印方案(即第二代数字水印)具有更好的鲁棒性能. 然而, 理论分析和实验结果表明, 现有基于特征的数字图像水印方案<sup>[4-6]</sup>存在如下问题: 1) 提取的图像特征点不仅稳定性差, 而且分布不均匀, 严重影响数字水印对剪切等攻击的抵抗能力; 2) 未能结合图像内容自适应确定局部特征区域尺寸(即采纳了固定尺寸的局部特征区域), 降低了其抵抗缩放等攻击的能力; 3) 未能对局部特征区域进行有效的不变域处理(指没有构建局部特征区域的不变域), 影响了整个水印系统抵御局部攻击的能力.

鉴于此, 本文以多尺度空间理论及图像归一化技术为基础, 提出了一种可有效抵抗一般性几何攻击(包括全局仿射变换、局部失真等)的强鲁棒第二代数字图像水印算法.

## 1 多尺度 Harris 算子与特征点提取

### 1.1 多尺度 Harris 算子

多尺度 Harris 算子以自相关矩阵 (Auto-correlation matrix) 为基础<sup>[8]</sup>, 利用自相关矩阵特征值估计特征强度, 并通过阈值法选取出稳定的图像特征点. 自相关矩阵  $M$  定义如下

收稿日期 2006-07-20 收修改稿日期 2006-10-30  
Received July 20, 2006; in revised form October 30, 2006  
国家自然科学基金 (60773031), 计算机软件新技术国家重点实验室 (南京大学) 开放基金 (A200702), “图像处理与图像通信”江苏省重点实验室 (南京邮电大学) 开放基金 (ZK205014), 江苏省计算机信息处理技术重点实验室 (苏州大学) 开放课题基金 (KJS0602) 资助  
Supported by National Natural Science Foundation of China (60773031), the Open Foundation of State Key Laboratory for Novel Software Technology (Nanjing University) (A200702), the Open Foundation of Key Laboratory of Image Processing and Image Communication (Nanjing University of Posts and Communications) (ZK205014), the Open Foundation of Jiangsu Province Key Laboratory for Computer Information Processing Technology (Soochow University) (KJS0602)  
1. 辽宁师范大学计算机与信息技术学院 大连 116029 2. 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093  
1. School of Computer and Information Technique, Liaoning Normal University, Dalian 116029 2. State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093  
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.00001

$$M(x, y, \delta_I, \delta_D) = \delta_D^2 \cdot G(\delta_I) * \begin{bmatrix} L_x^2(x, y, \delta_D) & L_x L_y(x, y, \delta_D) \\ L_x L_y(x, y, \delta_D) & L_y^2(x, y, \delta_D) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$L(x, y, \delta_D) = G(x, y, \delta_D) * f(x, y) \quad (2)$$

$$G(x, y, \delta_D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta_D} \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2 \cdot \delta_D^2}\right) \quad (3)$$

其中,  $\delta_I$  表示积分尺度,  $\delta_D$  表示微分尺度,  $G$  表示高斯函数,  $L_a$  表示计算函数  $L$  在  $a$  方向上的偏导数,  $*$  表示卷积操作,  $f(x, y)$  表示数字图像, 其与高斯函数做卷积 (即低通滤波) 的目的在于去除噪声干扰。

由上述公式知, 对于给定的  $\delta_I$  和  $\delta_D$ , 可以确定出像素点  $(x, y)$  的特征强度  $R(x, y)$ :

$$R(x, y) = \det(M(x, y, \delta_I, \delta_D)) - k \cdot \text{tr}^2(M(x, y, \delta_I, \delta_D)) \quad (4)$$

其中,  $\det(\cdot)$  表示矩阵的行列式,  $\text{tr}(\cdot)$  表示矩阵的迹,  $k$  为常数 (通常取 0.04)。这样, 当像素点  $(x, y)$  的特征强度  $R(x, y)$  大于某个特定阈值  $T$ , 且该像素点为邻域内极值点时, 便可认为该像素点为图像特征点。

## 1.2 特征尺度与特征点提取

本文所述的特征尺度 (Feature scale), 是指在某一特定尺度搜索范围内, 函数极值点所对应的尺度。对于数字图像而言, 其特征尺度反映了图像局部特征与操作算子间的最大相似程度。若操作算子确定, 则特征尺度仅仅取决于图像的局部特性, 而完全独立于数字图像尺寸。可见, 在特征尺度下所提取的图像特征点具有较好的缩放不变性。本文将结合 LOG (Laplacian-of-Gaussians) 算子选取特征尺度。LOG 算子的定义如下

$$\text{LOG}(x, y, \delta_I) = \delta_I^2 \left| \frac{\partial^2 G(x, y, \delta_I)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G(x, y, \delta_I)}{\partial y^2} \right| * f(x, y) \quad (5)$$

其中,  $f(x, y)$  表示待检测函数 (即数字图像)。

对于给定的图像像素点及尺度搜索范围, LOG 算子局部极值所对应的尺度即为特征尺度。而基于特征尺度的多尺度 Harris 图像特征点提取过程可描述如下:

首先, 给定尺度空间  $\delta_I^{(n)} = 1.4^n \cdot \delta_0$ ,  $\delta_D^{(n)} = 0.7 \cdot \delta_I^{(n)}$  ( $n = 1, 2, \dots, 15$ ) 和阈值  $T$  (本文选取为

1000), 利用多尺度 Harris 算子计算出候选的图像特征点 (其中,  $\delta_0$  表示初始尺度, 本文选取为 1.2)。

然后, 对每个候选特征点, 采用迭代法搜索出最终的特征点和特征尺度。具体步骤为:

1) 设  $p_k$  为候选图像特征点, 检验该点的 LOG 算子能否在整个尺度搜索范围内获得局部极值。如果不能获得极值, 则舍弃该点。尺度搜索范围限定为  $\delta_I^{(k+1)} = t \cdot \delta_I^{(k)}$ , 其中  $t = 0.7, 0.8 \dots, 1.4$ 。

2) 对 LOG 算子能获得极值的图像特征点  $p_k$ , 在该点的邻域内搜索特征强度  $R$  最大的特征点  $p_{k+1}$ , 若  $p_{k+1}$  存在则舍弃  $p_k$ 。

3) 重复步骤 1) 和 2), 直到  $\delta_I^{(k+1)} = \delta_I^{(k)}$  或  $p_{k+1} = p_k$  为止。

## 2 局部特征区域的构造

所谓局部特征区域 (Local feature region, LFR), 是指以图像特征点为标识, 从载体图像中分割出的一分子图像, 以其作为数字水印的嵌入和检测区域。由于特征尺度仅取决于图像局部特性, 且其大小随图像局部特性改变而改变, 因此可以选取一部分特征强度较大的特征点作为局部特征区域的圆心, 并将这些特征点所对应的特征尺度倍数作为半径, 从载体图像中自适应地分割出圆形的局部特征区域 (即“圆片”)。而圆片半径大小定义为

$$\mathfrak{R} = \tau \cdot \text{round}(\delta) \quad (6)$$

其中,  $\mathfrak{R}$  表示局部特征区域半径;  $\delta$  表示当前图像特征点的特征尺度;  $\text{round}(\delta)$  表示对  $\delta$  四舍五入;  $\tau$  为自适应常数 (正整数), 用于调节  $\mathfrak{R}$  的大小 (即局部特征区域尺寸)。  $\mathfrak{R}$  的上界为载体图像尺寸的一半 (假设当前特征点位于图像的中心, 该上界仅仅是理论上的, 一般取不到), 其下界为  $\text{round}(\delta)$  (当  $\tau = 1$  时)。因此,  $\mathfrak{R}$  的理论取值范围是

$$\text{round}(\delta) \leq \mathfrak{R} \leq \frac{\min(M, N)}{2} \quad (7)$$

其中,  $M$  和  $N$  分别表示原始载体图像的长和宽。为了保持局部特征区域的独立性, 必须使得所有局部特征区域不能重叠。为此, 我们选择含有特征点数目较多的圆片作为局部特征区域, 因为这样的区域属于纹理区, 可以更好地满足数字水印的透明性。图 1 给出了标准图像 Barbara、Baboon 和 Peppers (512 × 512) 的局部特征区域 (本文方法)。

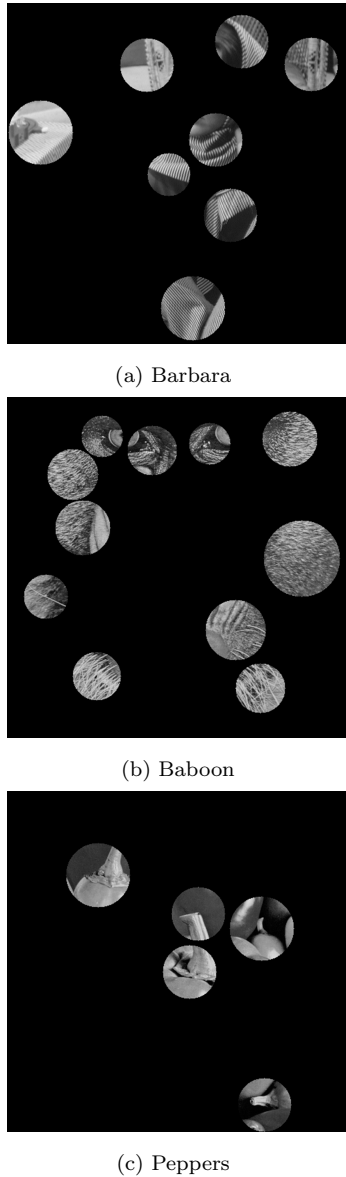


图1 Barbara, Baboon 和 Peppers 的局部特征区域  
Fig.1 The LFRs of Barbara, Baboon, and Peppers

### 3 图像归一化技术

图像归一化是计算机视觉、模式识别领域常用的一种技术<sup>[3]</sup>. 所谓图像归一化, 就是通过一系列变换, 将原始图像转换成相应的唯一标准形式 (该标准形式图像对仿射变换具有不变特性). 一般说来, 基于矩的图像归一化过程包括四个步骤<sup>[3]</sup>, 即坐标中心化、 $x$ -shearing 归一化、缩放归一化和旋转归一化.

### 4 数字水印的嵌入

整个数字水印的嵌入过程 (关键步骤) 可描述如下:

1) 水印产生. 由密钥 Key1 产生一个伪随机序列  $W = \{w_i, i = 1, \dots, L\}$  作为数字水印信息, 其中,  $L$  为水印大小,  $w_i \in \{0, 1\}$ .

2) 特征点提取. 利用多尺度 Harris 检测算子从原始载体  $I$  中提取图像特征点 (见第 1 节), 以得到图像特征点集  $P = \{p_i, i = 1, \dots, n\}$ .

3) 局部特征区域构造. 以图像特征点为中心, 利用基于特征尺度的局部特征区域确定方法 (见第 2 节) 对载体图像进行分割, 以得到一系列局部特征区域  $O = \{o_k, k = 1, \dots, m\}$ .

4) 局部特征区域归一化. 为了有效抵抗局部任何攻击, 本文首先从局部特征区域集  $O$  中取出局部特征区域 (圆片)  $o_k (k = 1, \dots, m)$ , 并将其四周“补 0”以得到外接方形子图像; 然后对方形子图像实施归一化处理 (见第 3 节), 以得到归一化子图像 (并作为数字水印嵌入区).

5) 数字水印嵌入. 对步骤 4) 所得到的归一化子图像进行 DFT 变换 (变换原点为子图像中心), 得到中心化频谱  $F_k (k = 1, \dots, m)$ , 并取出其幅值谱  $M_k (k = 1, \dots, m)$  和相位谱  $\phi_k (k = 1, \dots, m)$ . 接下来, 采用 DFT 中频幅值比较策略嵌入数字水印, 具体操作过程为:

首先, 在幅值谱  $M_k$  内选择半径  $r_1$  和  $r_L$ , 且满足  $r_1 < r_L$ , 使  $r_1$  和  $r_L$  之间的环形区域覆盖中频带. 这里, 我们将  $r_1$  和  $r_L$  分别称为内环半径和外环半径, 如图 2 所示.

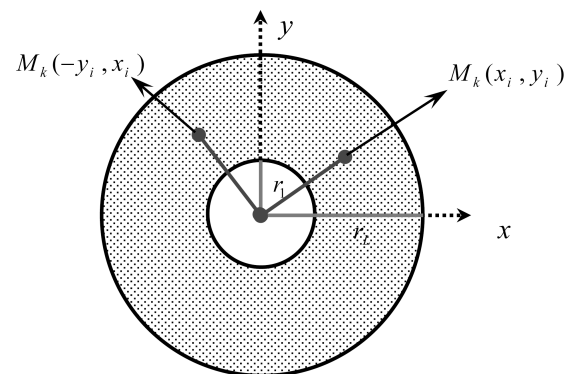


图2 DFT 中频幅值对 (成  $90^\circ$  系数幅度值)

Fig.2 The pairs apart on the DFT plane

其次, 通过密钥 Key2 在图 2 所示的中频带第一象限内随机选择  $L$  个起始点, 并表示为  $\{M_k(x_i, y_i), i = 1, \dots, L\}$ .

最后, 根据水印序列中的每一比特信息  $w_i \in \{0, 1\}$ , 修改坐标点  $(x_i, y_i)$  与  $(-y_i, x_i)$  的 DFT 系数幅度值, 以完成水印嵌入. 其基本工作原理为:

修改坐标点  $(x_i, y_i)$  与  $(-y_i, x_i)$  的 DFT 系数

幅度值,使修改后的系数满足式(8)来嵌入数字水印.

$$\begin{aligned} M'_k(x_i, y_i) - M'_k(-y_i, x_i) &\geq \alpha, & \text{如果 } w_i &= 1 \\ M'_k(x_i, y_i) - M'_k(-y_i, x_i) &\leq -\alpha, & \text{如果 } w_i &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $M'_k(x_i, y_i)$  和  $M'_k(-y_i, x_i)$  是坐标点  $(x_i, y_i)$  与  $(-y_i, x_i)$  修改后的 DFT 系数幅度值. 如果  $w_i$  等于 1, 且坐标点  $(x_i, y_i)$  与  $(-y_i, x_i)$  的 DFT 系数幅度值大于  $\alpha$ , 那么不需要修改两点系数的幅度值.  $\alpha$  表示数字水印的嵌入强度, 水印嵌入强度  $\alpha$  取值越大, 水印信号越鲁棒但透明性越差, 反之亦然. 然后, 读入下一比特水印信息  $w_i$ , 重复上述过程, 直到将  $L$ -bit 水印信息全部嵌入在归一化子图像的中频系数上. 由于归一化子图像的 DFT 系数幅度值是关于原点对称的, 故为了保证 DFT 反变换得到实数矩阵, 必须对另一个半平面的 DFT 系数进行同样修改.

这样, 待水印信息全部嵌入以后, 直接将含水印幅值谱  $M_k^*$  及原始相位谱  $\phi_k$  组成新的 DFT 频谱系数  $F_k^*$ , 再对  $F_k^*$  进行 IDFT 变换, 便可得到含有水印信息的归一化子图像.

6) 差值子图像计算. 将步骤 5) 所得到的含水印归一化子图像与步骤 4) 所得到的原始归一化子图像作差, 即得到相应的差值子图像.

7) 含水印局部方形子图像产生. 对步骤 6) 所得到的差值子图像进行反归一化处理, 并叠加于局部特征区域的外接方形子图像, 即得到相应的含水印局部方形子图像.

重复步骤 4)~7), 直到所有局部特征区域都按照上述过程处理完毕为止. 接下来, 将含有水印的局部方形子图像四周“去 0”, 即得到含水印局部特征区域  $o_k^*$ , 用其替换原始的局部特征区域, 即可得到含水印数字图像  $I^*$ .

## 5 数字水印的检测

整个数字水印的检测过程如下:

1) 使用与嵌入过程相同的密钥 Key1 产生原始水印序列  $W = \{w_i, i = 1, \dots, L\}$ .

2) 利用多尺度 Harris 检测算子从待检测图像  $\tilde{I}$  中提取图像特征点 (见第 1 节), 以得到图像特征点集  $\tilde{P} = \{\tilde{p}_i, i = 1, \dots, n\}$ .

3) 以图像特征点为中心, 利用基于特征尺度的局部特征区域确定方法 (见第 2 节) 对待检测图像  $\tilde{I}$  进行分割, 以得到一系列局部特征区域  $\tilde{O} = \{\tilde{o}_k,$

$k = 1, \dots, m\}$ . 一般说来, 含水印图像遭受攻击以后, 所得到的新局部特征区域可能会发生变化, 但至少有一部分含水印局部特征区域仍存在于  $\tilde{O}$  内.

4) 从局部特征区域集  $\tilde{O}$  中取出局部特征区域 (圆片)  $\tilde{o}_k (k = 1, \dots, m)$ , 并将其四周“补 0”以得到外接方形子图像. 并对其实施归一化, 以得到归一化子图像 (用于水印提取).

5) 对步骤 4) 所得到的归一化子图像进行 DFT 变换 (变换原点为子图像中心), 得到中心化频谱  $\tilde{F}_k (k = 1, \dots, m)$ , 并取出其幅值谱  $\tilde{M}_k (k = 1, \dots, m)$  和相位谱  $\tilde{\phi}_k (k = 1, \dots, m)$ . 接下来, 使用与嵌入过程相同的密钥 Key2 确定 DFT 系数幅度值  $\{\tilde{M}_k(x_i, y_i), i = 1, \dots, L\}$ , 并按下式提取水印信息

$$\tilde{w}_i = \begin{cases} 1 & \text{如果 } \tilde{M}_k(x_i, y_i) - \tilde{M}_k(-y_i, x_i) \geq 0 \\ 0 & \text{如果 } \tilde{M}_k(x_i, y_i) - \tilde{M}_k(-y_i, x_i) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\tilde{W} = \{\tilde{w}_i, i = 1, \dots, L\}$  为从局部特征区域  $\tilde{o}_k$  中所提取出的数字水印.

然而, 在数字水印检测过程中, 经常会发生虚警错误 (False-alarm error), 为了降低虚警错误发生的概率 (虚警率), 对所提取出的水印与原始水印进行比较, 当匹配的比特数大于某检测阈值时, 才能认为待检测媒体中存在数字水印. 由于二元随机序列与原始水印之间每位匹配的概率为 0.5, 故局部特征区域  $\tilde{o}_k$  的虚警率为

$$P_{F\_disk} = \sum_{r=T_d}^L (0.5)^L \cdot \left( \frac{L!}{r!(L-r)!} \right) \quad (10)$$

其中,  $r$  表示所提取出数字水印与原始水印间匹配的比特数;  $L$  表示水印长度;  $T_d$  表示检测阈值. 此外, 如果认为待检测图像  $\tilde{I}$  中存在数字水印, 则待检测图像  $\tilde{I}$  内至少要有两个以上局部特征区域能够检测到水印信息. 依此规则, 待检测图像  $\tilde{I}$  的虚警率为

$$P_{F\_image} = \sum_{i=2}^m (P_{F\_disk})^i \cdot (1 - P_{F\_disk})^{m-i} \cdot \binom{m}{i} \quad (11)$$

其中,  $m$  表示待检测图像  $\tilde{I}$  中局部特征区域的个数. 当虚警率  $P_{F\_image}$  给定后, 就可选定检测阈值  $T_d$ . 将提取出的数字水印  $\tilde{W}$  与原始水印  $W$  作比较, 当匹配比特数  $r \geq T_d$  时, 认为局部特征区域  $\tilde{o}_k$  中存在水印; 否则, 不存在.

重复步骤 4) 和 5), 直到所有局部特征区域检测完毕为止. 只要有二个以上局部特征区域成功检测到数字水印, 便可认为待检测图像中存在数字水印, 即检测成功; 否则, 检测失败.

## 6 仿真实验与结论

本文实验中使用的原始载体图像分别为  $512 \times 512$  Barbara、Baboon 和 Peppers 标准图像, 水印采用 32 bit 二元随机序列 (文献 [5] 使用 16 bit 二元随机序列). 自适应常数  $\tau = 8$ , 水印嵌入强度  $\alpha = 1000$ , 内环半径  $r_1 = \lceil \mathfrak{R}/6 \rceil$ , 外环半径  $r_L = \lceil \mathfrak{R}/3 \rceil$  ( $\mathfrak{R}$  为局部特征区域的半径,  $\lceil \cdot \rceil$  表示取上整). 检测阈值选取为  $T_d = 24$  (即虚警率  $P_{F\_image} \approx 5 \times 10^{-4}$ ).

### 6.1 检测性能测试

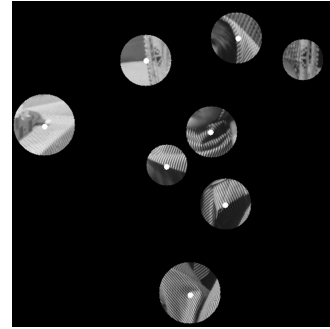
对于原始载体图像 Barbara、Baboon 和 Peppers, 利用本文方法所确定的局部特征区域数目分别为 8、11 和 5 (见图 1), 它们与其含水印图像的 PSNR 值分别为 51.973、50.439、52.477. 图 3 给出了未受攻击的含水印图像 Barbara、Baboon 和 Peppers 的检测结果, 其成功检测到数字水印的局部特征区域数目分别为 7、10 和 5 (注意: “白点”标识的局部特征区域表示已成功检测到数字水印).

### 6.2 抗攻击能力测试

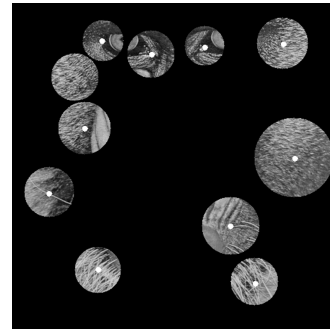
为了检测本文算法的鲁棒性能, 表 1 和表 2 (见下页) 是本文算法和文献 [5] 算法的鲁棒性能对比.

本文提出了一种可有效抵抗一般性几何攻击的强鲁棒第二代数字图像水印算法, 其主要特点为: 1) 所提取的图像特征点不仅稳定性好, 而且分布均匀, 提高了整个水印系统对常规信号处理、随机剪切等攻击的抵抗能力; 2) 能够结合图像内容自适应确定局部特征区域尺寸, 大大增强了抵抗缩放等仿射变换能力; 3) 结合归一化技术及失真补偿理论, 构造了局部特征区域的不变域, 改善了整个系统的抗局

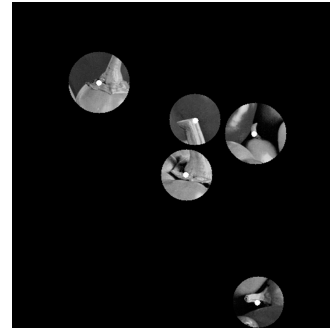
部攻击能力.



(a) Barbara



(b) Baboon



(c) Peppers

图 3 Barbara, Baboon 和 Peppers 含水印图的检测结果  
Fig. 3 The detected results from watermarked image ((a) Barbara; (b) Baboon; (c) Peppers)

表 1 数字水印对常规信号处理的抵抗能力 (重构率)

Table 1 Fraction of correctly detected watermark disks under common signal processing (detection rates)

| 攻击方式              | Baboon |        | Peppers |        |
|-------------------|--------|--------|---------|--------|
|                   | 本文方法   | 文献 [5] | 本文方法    | 文献 [5] |
| 中值滤波 (3×3)        | 4/11   | 2/11   | 2/5     | 1/4    |
| 锐化 (3×3)          | 4/11   | 4/11   | 4/5     | 4/4    |
| JPEG 50           | 8/11   | 7/11   | 3/5     | 3/4    |
| 锐化 (3×3)+JPEG 90  | 3/11   | 2/11   | 4/5     | 4/4    |
| 中值滤波 (3×3)+JPEG90 | 3/11   | 1/11   | 2/5     | 1/4    |

注: 表中分子表示从攻击后含水印图像中成功检测到数字水印的局部特征区域数目, 而分母表示载体图像中嵌有水印的局部特征区域数目, 以下同.

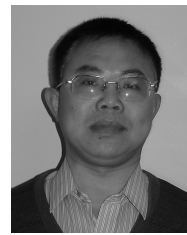
表 2 数字水印对抗一般性几何攻击的抵抗能力 (重构率)

Table 2 Fraction of correctly detected watermark disks under geometric attacks (detection rates)

| 攻击方式                     | Baboon |        | Peppers |        |
|--------------------------|--------|--------|---------|--------|
|                          | 本文方法   | 文献 [5] | 本文方法    | 文献 [5] |
| 去除 1 行 5 列               | 9/11   | 6/11   | 5/5     | 3/4    |
| 去除 5 行 17 列              | 6/11   | 3/11   | 3/5     | 1/4    |
| 中心裁掉 5%                  | 6/11   | 2/11   | 4/5     | 2/4    |
| 中心裁掉 10%                 | 5/11   | 2/11   | 3/5     | 2/4    |
| 行剪去 5%, 列剪去 5%           | 4/11   | 2/11   | 2/5     | 0/4    |
| 去除 5 行 17 列 + JPEG70     | 6/11   | 3/11   | 2/5     | 1/4    |
| 中心裁剪 10%+ 旋转 5 度         | 4/11   | 0/11   | 2/5     | 0/4    |
| 中心裁剪 5%+ 旋转 1 度 + 缩放 1.2 | 5/11   | 4/11   | 3/5     | 2/4    |

## References

- Licks V, Jordan R. Geometric attacks on image watermarking system. *IEEE Multimedia*, 2005, **12**(3): 68–78
- Liu Jiu-Fen, Huang Da-Ren, Huang Ji-Wu. Survey on watermarking against geometric attack. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2004, **26**(9): 1495–1503  
(刘九芬, 黄达人, 黄继武. 图像水印抗几何攻击研究综述. 电子与信息学报, 2004, **26**(9): 1495–1503)
- Dong P, Brankov J G, Galatsanos N P, Yang Y Y, Davoine F. Digital watermarking robust to geometric distortions. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(12): 2140–2150
- Bas P, Chassery J M, Macq B. Geometrically invariant watermarking using feature points. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, **11**(9): 1014–1028
- Tang C W, Hang H M. A feature-based robust digital image watermarking scheme. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, **51**(4): 950–959
- Weinheimer J, Qi X J, Qi J. Towards a robust feature-based watermark. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing. New York, USA: 2006. 1401–1404
- Ji Z, Xiao W W. A rotation and scaling invariant second generation watermarking scheme. In: Proceedings of the 10th Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering. Beijing, China: IEEE, 2002. 921–924
- Mikolajczyk K, Schmid C. Scale and affine invariant interest point detectors. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(1): 63–86



王向阳 辽宁师范大学计算机系教授. 主要研究方向为信息隐藏与数字水印、多媒体数据压缩技术. 本文通信作者.

E-mail: wxy37@126.com

(WANG Xiang-Yang Professor in Department of Computer Science at Liaoning Normal University. His research interest covers information hiding, digital watermarking, and multimedia data compressing technology. Corresponding author of this paper.)



侯丽敏 辽宁师范大学硕士研究生. 主要研究方向为数字水印技术.

E-mail: xiaobing0107@163.com

(HOU Li-Min Master student at Liaoning Normal University. Her research interest covers digital watermarking.)



邬俊 辽宁师范大学硕士研究生. 主要研究方向为数字水印技术.

E-mail: wujunas8@yahoo.com.cn

(WU Jun Master student at Liaoning Normal University. His research interest covers digital watermarking.)