

# 基于 SIFT 和伪 Zernike 矩归一化的抗几何攻击水印

孙劲光, 何巍, 杨忠旭

SUN Jin-guang, HE Wei, YANG Zhong-xu

辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105

Department of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao, Liaoning 125105, China

E-mail: sweet\_catt@126.com

SUN Jin-guang, HE Wei, YANG Zhong-xu. Anti-geometric attacks image watermarking scheme based on SIFT and normalization of pseudo-Zernike moment. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(36): 154-157.

**Abstract:** Present an anti-geometric attacks image watermarking scheme based on SIFT and normalization of pseudo-Zernike moment. Firstly, detect image feature points by SIFT and select some suitable ones to be keypoints. Second, determine square sub-regions of host image using keypoints. After computing these regions by pseudo-Zernike moments, normalizing the moments, and quantizing some low-lever moments, the digital watermark is embedded into the host image. To implement the geometric robustness, SIFT is used to detect the rotated angle and the scale that the image has undergone. And restore the image using parameters obtained. Experimental results show this scheme is robust against the rotation, shearing, JPEG, compression, noise and filtering attack.

**Key words:** digital watermark; Scale Invariant Feature Transformation(SIFT); pseudo-Zernike moment; normalized moment

**摘要:** 提出一种基于 SIFT 和伪 Zernike 矩归一化的抗几何攻击水印方案。首先用 SIFT 方法提取载体图像的特征点, 筛选得到关键点。然后在关键点确定载体图像的方形子区域嵌入水印。嵌入时计算方形子区域的伪 Zernike 矩值, 并对矩值作归一化处理, 选择部分低阶矩幅值抖动量化嵌入水印。为抵抗几何攻击, 检测前进行基于 SIF 关键点的几何失真校正, 对校正后的图像提取水印。实验结果表明该算法对旋转、剪切、JPEG、压缩、噪声、中值滤波等攻击有很好的鲁棒性。

**关键词:** 数字水印; 尺度不变特征变换(SIFT); 伪 Zernike 矩; 矩的归一化

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.36.046 文章编号: 1002-8331(2009)36-0154-04 文献标识码: A 中图分类号: TP391

## 1 引言

随着数字水印技术的发展, 对数字产品的版权保护起到了非常重要的作用<sup>[1-2]</sup>。目前鲁棒水印技术的研究与应用取得了很大进展。但是如何抵抗几何攻击仍然是水印领域所面临的最大困难, 成为当前数字水印产品商业化最大的障碍, 也是研究的热点之一。

基于特征点的局部区域嵌入与检测是抗几何攻击的常用方法。文献[3]采用 Harris-Laplace 检测器提取载体图像特征点, 在确定的局部区域内嵌入水印。文献[4]在小波域内嵌入水印, 用 SIFT 对待攻击图像进行缩放和旋转角度的恢复。文献[5]提出用 Harris 算子检测合适的图像特征点, 对圆形区域归一化处理作 DFT 变换, 幅值量化嵌入水印。文献[6]计算图像 Zernike 矩值自适应生成水印, 嵌入在 SIFT 提取的特征点确定的区域内。文献[7]用 SIFT 进行图像特征点的检测, 在合适的特征点生成的圆片区域中划分扇形进行奇偶量化嵌入水印。该文将图像的特征点与几何不变量相结合, 提出了一种基于 SIFT 和伪 Zernike 矩归一化的抗几何攻击水印方案。

## 2 水印方案流程图

该文水印方案流程图如图 1 所示。



图 1 水印系统流程图

## 3 SIFT 特征提取

SIFT 算法是一种基于尺度空间理论提取图像局部特征的算法, 在尺度空间寻找极值点, 提取位置、尺度、旋转不变量。SIFT 特征尺度具有缩放、亮度变化保持不变性, 对视角变化、

**基金项目:** 辽宁省高校重点实验室基金(the Key Laboratory of Colleges in Liaoning Province of China under Grant No.2008s115); 辽宁工程技术大学研究生科研项目(the Postgraduate Research Project of Liaoning Technical University No.Y200900502)。

**作者简介:** 孙劲光(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为图形图像, 数据挖掘; 何巍(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究领域为图形图像处理, 数字水印; 杨忠旭, 男, 硕士研究生, 主要研究领域为通信与信息系统。

**收稿日期:** 2009-09-01 **修回日期:** 2009-10-16

压缩、滤波、噪声也保持一定程度的稳定性。具体算法步骤如下:

### 3.1 尺度空间极值检测

为了达到尺度不变性,理论上需在图像所有可能的尺度空间中搜索不变的特征,但实际上这是不可能的。解决方法就是对尺度空间图像进行亚采样,将平滑和亚采样重复进行,就可得到能构成高斯金字塔的一系列图像。如下定义二维高斯滤波函数,其中  $\sigma$  表示高斯函数的方差:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}}{4\pi\sigma^2} \quad (1)$$

一幅  $N \times N$  的图像  $I(x, y)$ , 在不同尺度空间下的表示可以由图像与高斯核卷积得到 Gaussian 图像:

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) \times I(x, y) \quad (2)$$

其中,  $(x, y)$  是空间坐标,  $\sigma$  是尺度坐标。高斯金字塔各阶相邻图像做差分生成高斯差分尺度空间, 即 DOG 空间。

$$D(x, y, \sigma) = (G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)) \times I(x, y) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (3)$$

图 2、图 3 给出了由 Lena 图像构造的 4 阶高斯金字塔和 DOG 空间的过程。



图 2 构造高斯金字塔



图 3 构造 DOG 空间

为了检测  $D(x, y, \sigma)$  的局部极值点, 需要比较 DOG 图像中每个像素与其 26 个(上一个尺度的 9 个点+同尺度的 8 个点+下一个尺度的 9 个点)近邻像素的值, 如图 4 所示。所有这样的局部极值点, 就构成了一个 SIFT 候选关键点的集合。

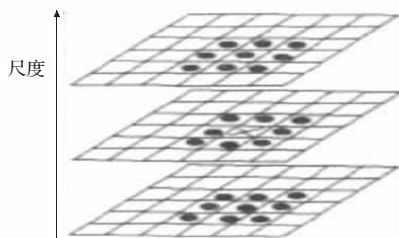


图 4 尺度空间极值点的确定

### 3.2 筛选极值点得到关键点

在极值点所在位置和尺度上利用  $2 \times 2$  Hessian 计算其稳定性, 剔除非稳定的边缘点。Hessian 的计算公式如下:

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{稳定性} = \frac{(D_{xx} + D_{yy})^2}{D_{xx} D_{yy} - D_{xy}^2} < \frac{(r+1)^2}{r} \quad (5)$$

$D$  表示 DOG 空间图像的导数。若极值点不满足式(5), 说明该点是边缘点, 稳定性差, 需剔除。 $r$  是最大特征值和最小特征值的比率, 用来控制特征点的稳定性。

### 3.3 指定关键点方向

为了达到图像旋转不变性, 采样直方图确定每个关键点的主方向。利用像素的差别, 计算梯度幅值  $m$  和方向  $\theta$ 。

$$m = \sqrt{(L(x+1, y) - L(x-1, y))^2 + (L(x, y+1) - L(x, y-1))^2} \quad (6)$$

$$\theta(x, y) = \arctan^{-1} \left( \frac{L(x, y+1) - L(x, y-1)}{L(x+1, y) - L(x-1, y)} \right) \quad (7)$$

计算时在关键点为中心的邻域窗口内采样, 用直方图统计邻域像素的梯度方向, 直方图的峰值就代表关键点处邻域梯度主方向, 即确定了该关键点的方向。

### 3.4 生成关键点描述符

首先将坐标轴旋转为关键点的方向, 以确保旋转不变性, 如图 5 所示。然后以关键点为中心取  $16 \times 16$  的窗口(图 5 只显示了  $8 \times 8$  的窗口, 原理相同), 将其均匀地分为 16 个  $4 \times 4$  的小块, 在每个小块 8 个方向( $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ )的梯度直方图, 绘制每个梯度方向的累加值, 形成一个种子点。每个种子点含有 8 个方向的信息向量。一个特征点用 16 个种子点描述, 即由 128 维向量来描述。

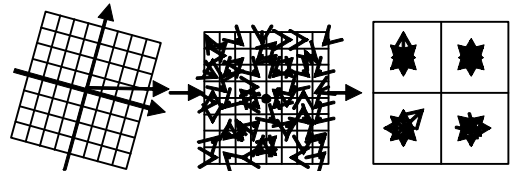


图 5 SIFT 描述子生成过程

## 4 基于 SIFT 关键点的几何失真校正

### 4.1 关键点匹配

根据关键点的 SIFT 特征描述符计算欧式距离作为两幅图中关键点的相似性判定度量。取原始图像中的某个关键点, 找出其与几何失真图像中的欧式距离最近的前两个关键点, 在这两个关键点中, 如果最近的距离除以次近的距离小于某个比例阈值时, 则表示原始图像中该关键点与几何失真图像中距离最近的关键点匹配。

### 4.2 几何失真校正

令攻击前后的两幅图像关键点匹配的点构成集合  $M$ , 匹配点的个数为  $m$ 。原图像中关键点  $P_i$  的尺度系数为  $p_i$ , 中心角为  $\theta_i$ ; 攻击后图像中对应匹配关键点  $Q_i$  的尺度系数为  $q_i$ , 中心角为  $\theta_{i1}$ 。

缩放校正: 设图像缩放系数为  $s$ , 则有

$$s = \frac{\sum_{i=1}^m q_i}{\sum_{i=1}^m p_i} \quad (8)$$

旋转校正: 设图像旋转角度为  $\theta$ , 则有

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^m (\theta_{i1} - \theta_i)}{m} \quad (9)$$

这样就能按照上述校正参数对攻击图像进行缩放倍数和旋转角度的估计。

## 5 构造局部特征区域

以图像关键点为中心,  $R$  为半径作圆构造局部区域嵌入水印。  $R = K \times \text{round}(s)$ ,  $\text{round}$  为四舍五入操作,  $K$  为正整数,  $s$  是关键点的尺度。特征点的稳定性取决于尺度的大小。大尺度对应于图像概貌特征, 小尺度对应于纹理特征, 在经过常规的图像处理之后尺度较大的点稳定性好。该文选取尺度在 (4, 10) 范围的关键点构造特征区域。对于重叠的圆形区域, 保留尺度较大的圆。最后对不重叠圆形区域四周补 0, 得方形子图, 即局部特征区域。

## 6 伪 Zernike 矩归一化

伪 Zernike 矩是一种正交的复数矩, 它利用的正交多项式集是一个在单位圆内的完备正交集。由于图像是离散的, 对于  $N \times N$  的数字图像伪 Zernike 矩如下式:

$$Z_{m,n} = \frac{n+1}{\pi} \sum_i \sum_j [V_{m,n}(x,y)]^* f(x,y) \quad (10)$$

上式中,  $m=0, 1, 2, \dots, \infty$ ,  $f(x,y)$  是图像亮度函数,  $V_{m,n}(x,y)$  是径向多项式。\* 表示复数共轭,  $n$  是整数并且满足  $(0 \leq |n| \leq m)$ 。

伪 Zernike 矩的极坐标表示形式为:

$$Z_{m,n} = \frac{m+1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r,\theta) [V_{m,n}(r,\theta)]^* r dr d\theta, r \leq 1 \quad (11)$$

其中,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\theta = \tan^{-1}(y/x)$ 。而径向多项式  $V_{m,n}(x,y)$  在极坐标中表示为:

$$[V_{m,n}(r,\theta)] = S_{m,n}(r) \exp(jn\theta) \quad (12)$$

$$S_{m,n}(r) = \sum_{s=0}^{m-n} \frac{(-1)^s (2m+1-s)!}{s! (m-n-s)! (m+n+1-s)!} r^{m-s} \quad (13)$$

由于伪 Zernike 多项式的这种正交完备性, 单位圆中的任一幅图像可以由其展开, 也称之为伪 Zernike 矩的重构。

$$f(x,y) = \sum \sum Z_{m,n} V_{m,n}(x,y) \quad (14)$$

伪 Zernike 矩在图像应用中的旋转不变性较好, 但是比例不变性差。一般的处理方法是在提取图像的伪 Zernike 矩之前对图像做归一化处理。该文采用计算伪 Zernike 矩后对矩值进行归一化处理的方法, 用矩的归一化<sup>[8]</sup>代替图像归一化, 使伪 Zernike 矩有更好的旋转和比例不变性。

伪 Zernike 矩的归一化计算如下:

- (1) 计算出图像中目标的 (0, 0) 阶几何矩  $m_{0,0}$ 。
- (2) 计算各阶伪 Zernike 矩  $Z_{m,n}$ 。
- (3) 归一化伪 Zernike 矩  $Z'_{m,n} = Z_{m,n} / m_{0,0}$ 。

## 7 数字水印的嵌入和提取

### 7.1 水印嵌入

(1) 由密码  $key_1$  生成伪随机序列  $W = \{w_i, i=0, 1, \dots, L\}$  作为水印,  $w_i \in (0, 1)$ 。

(2) 利用 SIFT 对载体图像  $I$  提取特征点并筛选, 得到性能稳定的图像关键点集  $Q = \{q_i, i=1, 2, \dots, n\}$ 。

(3) 利用关键点构造特征区域。

(4) 对每个局部特征区域计算伪 Zernike 矩并做矩的归一化, 然后采用抖动量化矩幅值的方法嵌入水印。并将计算后的结果  $Z'_{m,n}$  幅值集合记为  $S$ 。

在  $S$  中用密钥  $key_2$  随机选取  $L$  个进行幅值量化。量化步

长  $\Delta$  将  $Z'_{m,n}$  幅值长度的坐标分割成  $A$ 、 $B$  交错相隔的区间。属于  $A$  区间集的坐标代表比特“1”, 属于  $B$  区间集的坐标都代表比特“0”。量化后的矩值模  $M$  由水印信息进行调制。当  $w=0$  时,  $M$  的模等于与  $Z'_{m,n}$  模最接近的  $B$  区间的中间坐标值,  $w=1$  时,  $M$  的模等于与  $Z'_{m,n}$  模最接近的  $A$  区间的中间坐标值。由于  $Z'_{m,n}$  与  $Z'_{m,-n}$  共轭,  $Z'_{m,-n}$  也要做相应的改变。修改后的结果由  $L$  个矩组成的向量为  $Z$ 。

(5) 生成带有水印信息的局部区域。将修改伪 Zernike 矩的重构部分和未修改的局部区域部分合成, 得嵌入水印的局部特征区域。

(6) 最后将含有水印的局部方形区域四周“去 0”, 替换掉原始局部特征区域的圆形部分即可得到含水数字图像  $I^*$ 。

## 7.2 数字水印检测

(1) 使用嵌入密钥  $key_1$  生成水印, 记为  $wk$ 。

(2) 提取待检测图像 SIFT 关键点, 与载体图像的关键点进行匹配。由此估计待检测图像的旋转角度和缩放倍数, 并将待检测图像按照估计值恢复到攻击前。

(3) 对恢复后的图像提取 SIFT 关键点, 构造局部特征区域。

(4) 计算局部区域的伪 Zernike 矩, 并归一化矩值。用密钥  $key_2$  提取  $L$  个归一化的矩值  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_L\}$ , 对应的模为  $m_1, m_2, \dots, m_L$ 。用量化步长  $\Delta$  划分区间集, 如果矩落在  $A$  区间, 则嵌入到该矩的水印是“1”; 落在  $B$  区间, 则嵌入到该矩的水印是“0”。提取水印记为  $re$ 。

(5) 对每个局部区域计算提取水印  $re$  和原始水印  $wk$  的相关系数。计算方法如下:

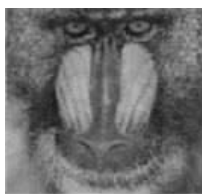
$$wr = \frac{\sum_{i=1}^L (re(i) - \bar{re})(wk(i) - \bar{wk})}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (re(i) - \bar{re})^2 \sum_{i=1}^L (wk(i) - \bar{wk})^2}} \quad (15)$$

当  $wr$  大于某一阈值  $T$  时则认为该区域中包含水印。只要有一个局部区域检测到水印即认为该图像包含水印信息。

## 8 实验结果

为了验证该文数字图像水印算法的高效性, 以下分别给出了检测性能测试、抗攻击(包括常规信号处理和几何攻击)能力测试的实验结果。实验中所选用的载体为  $512 \times 512 \times 8$  bit 的标准灰度图像 Baboon 和 Barbara, 数字水印采用了 32 bit 的二元伪随机序列,  $\Delta = 3.0$ 。检测阈值选取为  $T = 24$  (即虚警率  $PF\text{-}image \approx 5 \times 10^{-4}$ )。图 6、图 7 分别给出了该文方法及文献[3]方法的含水数字图像。表 1 给出了该文算法与文献[3]算法的含水数字图像与原始载体间的峰值信噪比结果。

为了检测该文算法的鲁棒性能, 仿真实验对该文算法的含水数字图像进行了一系列攻击。用重构率  $DR$  表示水印算法抵抗几何攻击的能力。



(a) 含水数字图像 Baboon



(b) 含水数字图像 Barbara

图 6 该文算法嵌入水印的效果



(a) 含水印图像 Baboon



(b) 含水印图像 Barbara

图7 文献[3]算法的嵌入水印效果

表1 含水印图像与原始载体间

的峰值信噪比

dB

图像	该文算法	文献[3]算法
Baboon	49.820	49.263
Barbara	48.975	48.727

$$DR = \frac{R}{D} \quad (16)$$

$D$  表示原始载体图像中确定的局部特征区域的个数,  $R$  表示待检测图像能检测到水印的局部特征区域的个数。表2和表3分别给出了该文算法对常规信号攻击和几何攻击的抵抗能力。重构率的分子表示原始载体图像中利用 SIFT 确定的局部特征区域的个数, 分子表示攻击后的水印图像由 SIFT 确定的局部特征区域的个数。

表2 数字水印对常规信号处理的抵抗能力(重构率)

攻击方式		重构率 DR/(%)			
		Barbara		Baboon	
		该文方法	文献[3]算法	该文方法	文献[3]算法
椒盐噪声	0.02	4/9	3/8	5/12	4/11
高斯滤波	3×3	5/9	5/8	10/12	9/11
JPEG	70	6/9	6/8	11/12	10/11
压缩	30	6/9	5/8	6/12	5/11
缩放 3×3+JPEG90		5/9	4/8	5/12	4/11
高斯滤波 3×3+JPEG90		3/9	3/8	8/12	7/11

该文以尺度不变特征变换 SIFT 和伪 Zernike 矩归一化相关知识为基础, 提出了一种基于 SIFT 和伪 Zernike 矩归一化的抗几何攻击水印方案, 嵌入了伪随机序列作为水印信息。其主要特点为: (1) 构造的局部区域较稳定; (2) 计算伪 Zernike 矩时用矩的归一化代替图像归一化提高计算精度; (3) 水印检测前对图像估计缩放和旋转参数进行失真校正, 提高抗几何攻击的能

表3 数字水印对几何攻击及联合几何攻击的抵抗能力(重构率)

攻击方式	重构率 DR/(%)			
	Barbara		Baboon	
	该文方法	文献[3]算法	该文方法	文献[3]算法
中间剪切 10%	6/9	5/8	9/12	7/11
中间剪切 20%	5/9	--	8/12	--
旋转 20°	4/9	3/8	4/12	3/11
旋转 40°	3/9	--	3/12	--
平移 10	8/9	7/8	10/12	9/11
平移 20	8/9	--	9/12	--
缩放 0.6	2/9	--	2/12	--
缩放 0.8	3/9	2/8	4/12	3/11
缩放 1.2	5/9	4/8	7/12	5/11
中间剪切 10%+旋转 5°	5/9	4/8	5/12	4/11
缩放 0.8+平移 20+旋转 10°	4/9	3/8	5/12	4/11
缩放 0.6+平移 10+旋转 20°	4/9	--	4/12	--
缩放 1.2+平移 10+旋转 40°	3/9	--	4/12	--

力。下一步的工作是针对嵌入容量和非等比例缩放, 设计抗几何攻击的水印算法。

### 参考文献:

- [1] Cox I J, Miller M L, Bloom J A. Digital watermarking[M]. USA: Morgan Kaufman Publisher, 2002.
- [2] 俞龙江, 牛夏牧, 孙圣和. 一种旋转尺度变换和平移鲁棒水印算法[J]. 电子学报, 2003, 31(12).
- [3] 王向阳, 侯丽敏, 杨红颖. 基于图像特征点与伪 Zernike 矩的鲁棒水印算法[J]. 计算机研究与发展, 2008, 45(5): 772-778.
- [4] 何利英, 李智勇, 刘伟灵, 等. 基于 SIFT 特征点的抗几何失真数字水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(13): 58-60.
- [5] 王向阳, 侯丽敏, 郭俊. 基于图像特征点的强鲁棒水印嵌入方案[J]. 自动化学报, 2008, 34(1): 1-6.
- [6] Leida L, Guo Bao-long, Shao Kai. Geometrically robust image watermarking using scale-invariant feature transform and Zernike moments[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(6): 332-335.
- [7] 李振宏, 吴慧中. 基于 SIFT 的抗几何攻击局部化图像水印[J]. 计算机工程, 2008, 34(19): 154-156.
- [8] 叶斌, 彭嘉雄. 伪 Zernike 不变性分析及其改进研究[J]. 中国图形图像学报, 2008, 8A(3): 246-252.
- [9] Tuysuz F, Kahraman P. Project risk evaluation using a fuzzy analytic hierarchy process: An application to information technology projects: research articles[J]. International Journal of Intelligent System, 2006, 6(14): 559-584.
- [10] 汪楚娇, 林果园. 网络安全风险的模糊层次综合评估模型[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2006, 52(5): 622-626.
- [11] 陈秀真, 郑庆华, 管晓宏, 等. 层次化网络安全威胁态势量化评估方法[J]. 软件学报, 2006, 17(4): 885-897.
- [12] Saaty T L. The analytic hierarchy process[M]. [S.L.]: McGraw Hill Company, 1980.
- [13] 李伟明, 雷杰, 董静, 等. 一种优化的实时网络安全风险量化方法[J]. 计算机学报, 2009, 32(4): 793-804.
- [14] 张海霞, 连一峰. 基于安全状态域的网络评估模型[J]. 软件学报, 2009, 20(2): 451-461.

(上接 94 页)

求的矩阵, 获得满足实际需求的权值, 并将其运用到所提出的评估模型中。实验结果表明, 从攻击和防御两个角度综合评估各级安全态势, 所得实验结果更加客观真实, 并能直观地为安全管理人员呈现出服务、主机和网络的安全态势走势, 减轻其数据分析负担, 进而及时调整系统安全策略, 同时, 所得出的网络安全态势为网络安全态势的预测奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] Bass T. Intrusion detection system and multi-sensor data fusion[J]. Communications of the ACM, 2000, 43(4): 99-105.
- [2] 王慧强, 赖积保, 朱亮, 等. 网络态势感知系统研究综述[J]. 计算机科学, 2006, 33(10): 5-10.