

基于奇偶量化的空域抗几何攻击图像水印算法

李雷达^① 郭宝龙^① 表金峰^②

^①(西安电子科技大学智能控制与图像工程研究所 西安 710071)

^②(拉夫堡大学计算机科学系 英国 莱斯特郡)

摘要: 数字水印对几何攻击的鲁棒性问题一直没有得到很好的解决, 该文提出了一种能够抵抗 RST(旋转、缩放、平移)攻击, 局部剪切以及常规信号处理攻击的多比特图像水印算法。该文利用尺度不变特征变换(SIFT)进行水印信号的同步; 设计了一种圆环形的水印模式, 并在空域采用奇偶量化嵌入水印; 并设计了一种奇偶检测器提取水印。实验结果表明该算法能获得很好的图像质量, 且能十分有效地抵抗各种几何攻击以及常规的压缩, 滤波等攻击。

关键词: 图像水印; 几何攻击; SIFT 特征点; 奇偶量化

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0134-05

Spatial Domain Image Watermarking Scheme Robust to Geometric Attacks Based on Odd-Even Quantization

Li Lei-da^① Guo Bao-long^① Biao Jin-feng^②

^①(Institute of Intelligent Control & Image Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Department of Computer Science, Loughborough University, Leics, United Kingdom)

Abstract: Watermark robustness to geometric attacks is still an open problem. This paper presents a new multi-bit image watermarking scheme that can resist Rotation, Scaling, Translation (RST), cropping as well as common signal processing attacks. The proposed scheme achieves watermark synchronization using Scale-Invariant Feature Transform (SIFT). The watermark is designed in a cirque pattern and it is embedded in spatial domain using odd-even quantization. An odd-even detector is designed to extract the watermark. Simulation results show that the proposed scheme achieves good image quality and it is robust to geometric attacks as well as traditional image compression, filtering operations.

Key words: Image watermarking; Geometric attacks; SIFT features; Odd-even quantization

1 引言

数字水印技术是对多媒体产品进行版权保护的一种有效手段^[1]。许多已有的图像水印算法仅能抵抗图像压缩, 滤波等信号处理攻击, 不能抵抗旋转、缩放、平移(RST), 剪切等几何攻击。几何攻击对水印系统的影响在于水印信号仍然存在于图像中, 但是位置已经发生变化。抗几何攻击图像水印算法常用的方法有^[2]: (1)在对几何攻击具有不变性的域嵌入水印^[3-5]; (2)嵌入一个额外的模板估计图像的几何变换参数^[6]; (3)利用图像的特征点进行水印同步^[7-9]。利用图像的特征点进行水印同步是第二代水印的典型特征, 也是近年来研究的热点。

利用图像特征点进行水印的同步要求在原始图像和受攻击图像中分别提取特征点, 并进行匹配, 利用匹配的特征点对进行水印同步。Bas 等利用 Harris 角检测器从原始图像和受攻击图像中检测特征点, 并对特征点进行三角剖分, 生

成三角形集合, 在三角形中进行水印的嵌入和提取^[7]。该方法的缺点在于 Harris 特征点对图像的尺度变化敏感, 且提取的特征点过多。因此, 水印嵌入和提取时生成的三角形不能很好地匹配。Tang 等利用墨西哥帽小波尺度交互特征提取图像的特征点, 据此生成圆形的局部区域, 并进行归一化, 在 DFT 域嵌入水印^[8]。该方法最大的缺点是不能抵抗缩放攻击, 因为圆形区域的半径是固定的, 当图像存在缩放的时候, 局部区域包含的内容不同, 因此很小的尺度变化就会导致水印检测失败。笔者在文献^[9]中提出的算法利用尺度不变特征变换(SIFT)进行水印信号的同步, 水印信号由 Zernike 矩生成。该算法能抵抗多种几何攻击, 但仅能判断水印存在与否, 且由于利用了 Zernike 矩, 计算代价相对较高。

本文中提出了一种新的抗几何攻击图像水印算法。算法的核心是基于 SIFT 的水印同步和基于空域奇偶量化的圆环形水印嵌入和提取。该算法能有效地抵抗 RST 攻击, 局部剪切等几何攻击以及常见的信号处理攻击。

2 基于 SIFT 特征点的水印同步

2.1 SIFT

SIFT 由 Lowe 于 2004 年提出^[10]。SIFT 特征点对图像

2007-06-25 收到, 2007-10-31 改回

国家 863 计划项目(2006AA01Z127), 国家自然科学基金(60572152)和教育部博士点基金(20060701004)资助课题

的旋转, 缩放及平移具有不变性, 并且特征点的匹配速度快, 精度高。其提取过程主要分为以下步骤: (1)尺度空间极值检测, 确定特征点所在位置和尺度; (2)去除对比度较低的特征点; (3)对特征点赋方向; (4)生成 SIFT 特征向量。

如图 1 所示, 将原始图像与不同尺度的高斯函数卷积, 得到图像的尺度空间。将尺度空间中相邻的图像相减, 便得到高斯差(DoG)图像。将 DoG 图像中的每一点与其周围的 8 个点以及相邻的上下尺度图像中对应位置的各 9 个点进行比较, 若均大于或均小于这 26 个点, 则确定为候选特征点。

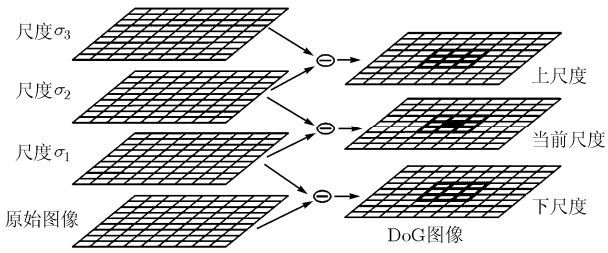


图 1 图像的尺度空间与高斯差(DoG)图像

接着去除对比度较低及处于图像边缘上的点, 利用 Hessian 矩阵计算其主曲率:

$$H = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} \\ D_{xy} & D_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

则特征点的稳定性由下式决定:

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

其中 r 表示矩阵 H 特征值最大值与最小值之比, D_{xx}, D_{xy} 和 D_{yy} 分别表示尺度空间图像的导数。

下面取特征点邻域方向直方图最大值方向作为特征点的主方向。最后以主方向为基准根据特征点邻域图像的特性生成一个 128 维的特征向量。该特征向量具有很好的独特性 (Distinctiveness), 可用于特征点的匹配。详细的 SIFT 特征提取过程见文献[10]。

2.1 水印同步方案

由于 SIFT 特征点具有 RST 不变性, 本文利用其进行水印同步。但由于 SIFT 最初是为图像匹配提出的, 提取的特征点数多。典型地, 从一幅 512×512 大小的图像上能提取超过 1000 个特征点, 但这些特征点并不都适于水印同步。每个 SIFT 特征点都对应一个尺度, 但大尺度和小尺度的特征点在当图像受到缩放攻击的时候很容易消失。因此, 对从原始图像中检测到的所有特征点, 首先去除那些尺度太小和太大的特征点, 本文中采用的特征点尺度区间为^[4, 8]。

在嵌入端, 首先对原始图像检测 SIFT 特征点, 取尺度大小处于区间^[4, 8]内的特征点, 根据其对应的 DoG 函数值大小, 选出其中 DoG 函数值最大的特征点, 设其坐标为

(p_1, p_2) , 对应的尺度为 σ , 根据下式生成圆形的特征区域:

$$(x - p_1)^2 + (y - p_2)^2 = (k\sigma)^2 \quad (3)$$

接着从剩下的特征点中选出 DoG 函数值最大, 且由式 (3)确定的圆形区域与之前的区域不重叠的特征点。对所有的特征点进行上述操作, 便得到了原始图像中的互不重叠的圆形特征区域。同时, 将采用的这些特征点的特征向量作为密钥 key 进行保存, 用于在水印检测时进行同步。图 2 所示为从 512×512 大小 Lena 图像中提取的圆形特征区域, 其中参数 k 设置为 10。



图 2 用于水印嵌入的局部特征区域

在检测端, 首先对受攻击图像提取 SIFT 特征点, 根据密钥 key 进行水印同步。实际操作中就是利用快速最近邻域法^[10]对密钥中的特征向量和检测出的特征点特征向量进行匹配, 并根据匹配到的特征点利用式(3)确定嵌入了水印的区域。图 3 所示为利用上述同步方案从 Lena 图像及受攻击图像中提取的局部区域。

由图 3 可见, 从原始图像和受攻击图像中提取的局部区域在图像受到压缩, 滤波, 噪声攻击及旋转, 缩放等几何攻击时包含相同的图像内容, 因此若将水印嵌入到上述圆形区域内, 则水印信号对上述攻击具有鲁棒性。

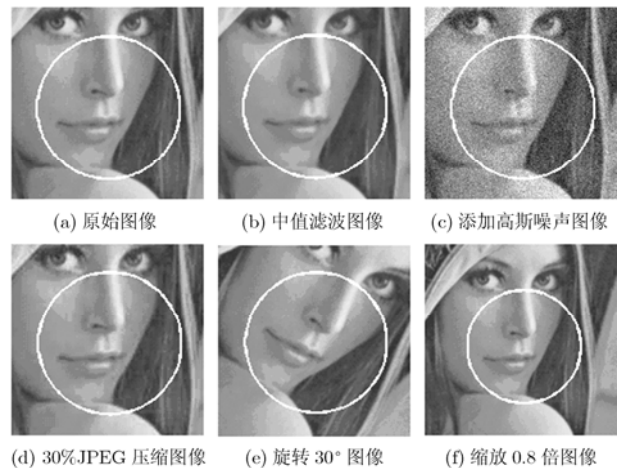


图 3 利用本文算法提取的图像局部区域

3 本文水印算法

3.1 水印嵌入

图4为水印嵌入框图。对原始图像首先检测 SIFT 特征点, 并利用第2节的方法生成圆形的特征区域, 水印将重复地嵌入到这些圆形区域中。设待嵌入水印序列为 $w = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_N\}$, 具体嵌入时, 首先将每个圆形区域分割成图5所示的同心圆环区域, 圆环个数由水印位数 N 确定。

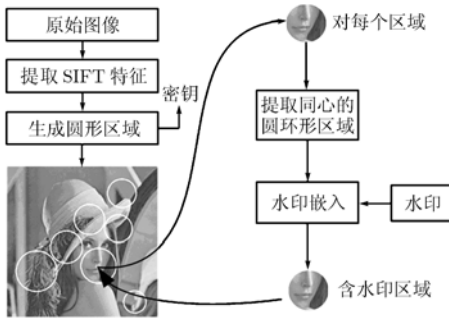


图4 水印嵌入框图

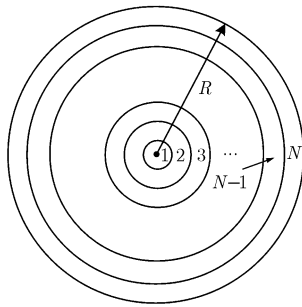


图5 圆形区域的分割

具体操作时, 首先将坐标中心移至圆心处, 并将像素坐标 (x, y) 变换为极坐标, 即

$$\rho_{x,y} = \sqrt{x^2 + y^2}, \theta_{x,y} = \arctan(y/x) \quad (4)$$

其中 ρ 表示极坐标半径, θ 表示角度。则从内至外第 i 个圆环区域 CR_i 可以表示为

$$CR_i = \left\{ (x, y) \left| (i-1) \cdot \frac{R_0}{N} \leq \rho_{x,y} < i \cdot \frac{R_0}{N} \right. \right\}, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

接着根据所要嵌入的水印位利用奇偶量化^[11]由内至外对每一个圆环内的像素进行修改, 将圆环修改为“奇”圆环或“偶”圆环。具体操作时, 先利用量化函数给每一个像素 $I(x, y)$ 赋符号“0”或“1”:

$$Q(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{若 } k\Delta \leq I(x, y) < (k+1)\Delta, \text{ 其中 } k = 0, \pm 2, \pm 4, \dots \\ 1, & \text{若 } k\Delta \leq I(x, y) < (k+1)\Delta, \text{ 其中 } k = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots \end{cases} \quad (6)$$

其中 Δ 表示量化步长。在对像素进行量化修改的时候, 为了增强鲁棒性, 应使得修改后的像素值处于相应的量化区间的中间值^[12]。因此, 本文对像素的修改按照下面的规则进行:

设圆环 CR_i 要嵌入的水印位为 w_i , 首先利用下式计算 CR_i 中每一个像素的量化噪声:

$$r(x, y) = I(x, y) - \left\lfloor \frac{I(x, y)}{\Delta} \right\rfloor \cdot \Delta \quad (7)$$

其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示下取整。为使修改后像素值处于量化区间的中间, 像素的修改量由下式确定:

$$u(x, y) = \begin{cases} -r(x, y) + 0.5\Delta, & \text{若 } Q(x, y) = w_i \\ -r(x, y) + 1.5\Delta, & \text{若 } Q(x, y) \neq w_i \text{ 且 } r(x, y) > 0.5\Delta \\ -r(x, y) - 0.5\Delta, & \text{若 } Q(x, y) \neq w_i \text{ 且 } r(x, y) \leq 0.5\Delta \end{cases} \quad (8)$$

最后, 修改后的像素值 $I^*(x, y)$ 为

$$I^*(x, y) = I(x, y) + u(x, y) \quad (9)$$

对每一个圆形区域进行上述嵌入操作, 便得到整幅加水印图像。

3.2 水印提取

图6为水印提取框图。对受攻击图像, 首先检测 SIFT 特征点, 并根据密钥 Key 对含水印区域进行同步。对每一个同步到的圆形区域, 进行与嵌入过程相同的圆环区域分割, 然后对每一个圆环区域内的像素利用式(6)计算量化函数值, 并记函数值为 0 的像素个数为 $NUM_{i,0}$, 函数值为 1 的像素个数为 $NUM_{i,1}$, 通过下式提取水印:

$$w'_i = \begin{cases} 0, & \text{若 } NUM_{i,0} > NUM_{i,1} \\ 1, & \text{若 } NUM_{i,1} > NUM_{i,0} \end{cases} \quad (10)$$

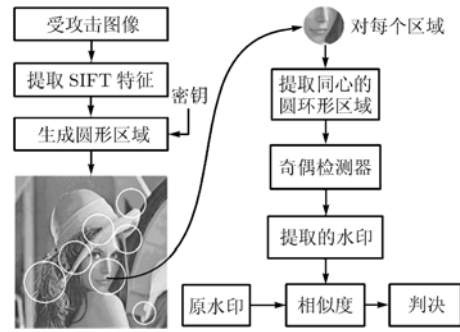


图6 水印提取框图

我们称式(10)为奇偶检测器。最后计算原始水印 w 和提取水印 w' 的归一化相关函数(NC):

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^N w(i)w'(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N w^2(i)} \sqrt{\sum_{i=1}^N w'^2(i)}} \quad (11)$$

由于每一个圆形区域内都可以提取一个水印信号, 最后取所有 NC 值中最大的一个作为最后的水印检测结果。

4 实验结果与讨论

实验中图像为 512×512 大小的灰度图像, 包括 Lena, Peppers, Baboon, Girl, House 等。嵌入水印的长度为 16 bit, 奇偶量化的步长 $\Delta=6$ 。

4.1 水印不可见性

图 7 为水印嵌入效果图。从图中可以看出原图像与加水印图像在视觉上并没有明显的差别, Lena, Baboon 图像加水印后的峰值信噪比(PSNR)分别为 40.32dB 和 40.86dB。实验中其它图像的 PSNR 值也都在 40dB 以上。可见, 本文算法能获得很高的图像质量。

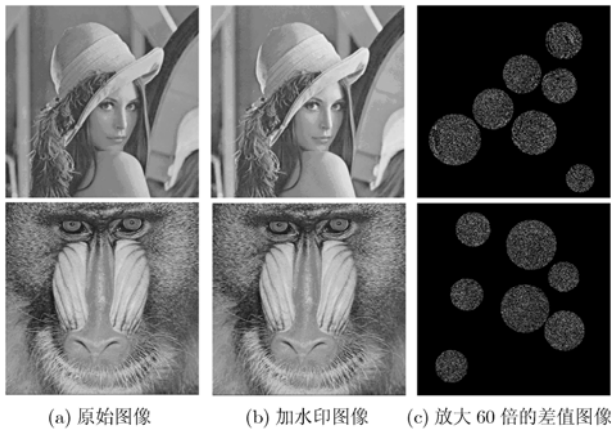


图 7 图像加水印效果

4.2 水印鲁棒性

实验中对加水印图像分别进行了常规信号处理攻击, 如 JPEG 压缩, 中值滤波, 高斯噪声, 以及几何攻击, 如旋转, 缩放, 平移, 剪切等。提取水印的相似度如表 1 所示。

表 1 水印图像受攻击后提取水印的相似度

攻击类型	图 像		
	Lena	Baboon	Peppers
50% JPEG 压缩	1	0.7500	0.8750
3×3 中值滤波	1	1	1
添加高斯噪声	0.9375	0.9375	0.8750
旋转 10°	1	1	1
旋转 30°	1	1	1
旋转 60°	1	1	1
旋转 90°	1	1	1
旋转 5°+剪切	1	1	1
旋转 15°+剪切	1	1	1
旋转 45°+剪切	1	1	1
缩放 0.6 倍	0.9375	0.8125	0.8750
缩放 0.8 倍	1	0.8750	1
缩放 1.2 倍	1	1	1
缩放 1.5 倍	1	1	1
向右下平移 20 像素	1	1	1
向右下平移 40 像素	1	1	1
中心剪切 10%	1	1	1
中心剪切 25%	1	1	1
旋转 20°+缩放 0.8 倍	1	1	1
旋转 40°+缩放 1.5 倍	1	1	1

由表 1 可以看出, 本文算法能同时抵抗常规的信号处理攻击和 RST、局部剪切等几何攻击。虽然压缩, 噪声等常规攻击能够改变空域像素的奇偶性, 但由于每一位水印的嵌入是通过修改对应圆环区域的所有像素进行的, 而圆环区域像素整体的奇偶性是不易改变的, 因此文中基于统计特性的奇偶检测器能够成功地提取水印。本文算法能够抵抗平移和剪切攻击是因为水印的嵌入是在图像的局部区域进行的; 能抵抗缩放攻击是因为水印的嵌入区域具有缩放不变性, 即当图像发生缩放时局部区域包含的图像内容是相同的; 能抵抗旋转攻击是因为本文在水印嵌入时选取了圆环形的区域, 其本身具有旋转不变性。对实验中所测试的旋转攻击、剪切攻击和平移攻击, 能准确无误地提取水印, 水印的相似度都为 1。对缩放攻击, 当图像放大时, 能完全提取水印, 当图像缩小时, 由于存在信息丢失, 提取水印的相似度稍低。对常规信号处理攻击, JPEG 压缩和添加噪声会对本文算法造成较大的影响, 但水印的相似度都足以判断水印存在。对 Baboon 图像, 由于其本身含有较多的噪声, 所以水印的鲁棒性相对于其它平滑的图像稍差一些。此外, 本文算法还能抵抗一些组合攻击, 如旋转加剪切, 旋转加缩放等。算法的整体性能较为理想。

5 结束语

本文提出了一种新的能够抵抗几何攻击的图像水印算法。算法的核心在于利用 SIFT 特征点进行水印信号的同步, 以及基于奇偶量化的空域圆环模式的水印嵌入。由于 SIFT 特征点具有对旋转, 缩放, 平移等的不变性, 因此水印嵌入区域具有几何不变性。将水印信号以一种圆环形的模式嵌入到上述局部区域中则保证了水印能够抵抗各种几何攻击。实验结果表明本文算法在获得较高图像质量的前提下, 能够十分有效地抵抗旋转、缩放、平移、剪切等几何攻击, 以及压缩, 滤波, 噪声等常规的信号处理攻击。

参 考 文 献

- [1] Cox I J and Miller M L. The first 50 years of electronic watermarking. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, 2002, 9(2): 126-132.
- [2] Licks V and Jordan R. Geometric attacks on image watermarking systems. *IEEE Multimedia*, 2005, 12(3): 68-78.
- [3] Oruanaidh J J K and Pun T. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking. *Signal Processing*, 1998, 66(3): 303-317.
- [4] 桑茂栋, 赵耀. 基于几何矩的抵抗 RST 攻击的数字图像水印. *电子与信息学报*, 2007, 29(4): 76-80.
- [5] Sang Mao-dong and Zhao Yao. Moment based multibit digital image watermarking resisting to RST attacks. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(4): 76-80.
- [5] Zhang L, Qian G B, and Xiao W W, et al. Geometric

- invariant blind image watermarking by invariant Tchebichef moments. *Optical Express*, 2007, 15(5): 2251-2261.
- [6] Pereira S and Pun T. Robust template matching for affine resistant image watermarks. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(6): 1123-1129.
- [7] Bas P, Chassery J M, and Macq B. Geometrically invariant watermarking using feature points. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2002, 11(9): 1014-1028.
- [8] Tang C W and Hang H M. A feature-based robust digital image watermarking scheme. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2003, 51(4): 950-959.
- [9] Li L D, Guo B L, and Shao K. Geometrically robust image watermarking using scale-invariant feature transform and Zernike moments. *Chinese Optics Letters*, 2007, 5(6): 332-335.
- [10] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [11] Kundur D and Hatzinakos D. Digital watermarking for telltale tamper proofing and Authentication. *Proc. IEEE*, 1999, 87(7): 1167-1180.
- [12] Yu G J, Lu C S, and Liao H Y M. Mean-quantization-based fragile watermarking for image authentication. *Optical Engineering*, 2001, 40(7): 1396-1408.
- 李雷达: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为图像处理、模式识别、数字水印.
- 郭宝龙: 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 西安电子科技大学智能控制与图像工程研究所(ICIE)所长, 研究领域为神经网络、图像处理与图像通信等.
- 表金峰: 男, 1984 年生, 硕士生, 研究方向为信息安全、图像识别.