

基于局部 Zernike 矩的 RST 不变零水印算法*

汤继生, 冯 桂

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 旋转、缩放和平移(RST)等几何攻击能够破坏水印检测的同步性,使得水印检测失败。针对此问题,提出了一种基于图像局部 Zernike 矩的 RST 不变零水印算法。Zernike 矩的幅度具有旋转不变性,再结合图像归一化,使其具有缩放和平移不变性。由于 Zernike 矩的图像重构效果不理想且重构过程中复杂度高,因此水印嵌入选择零水印方案。实验结果表明,该算法对旋转、缩放和平移(RST)的攻击具有很好的鲁棒性,同时对 JPEG 压缩、加噪、滤波等常见的图像处理操作也具有很好的鲁棒性。

关键词: 零水印; 旋转、缩放和平移(RST); Zernike 矩; 图像归一化

中图分类号: TP309.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)16-0047-04

RST invariant zero-watermarking algorithm based on local Zernike moments

Tang Jisheng, Feng Gui

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Geometrical attacks, such as rotation, scale and translation(RST) attack, can desynchronize the watermark detection, a RST invariant zero-watermarking algorithm is proposed by using local Zernike moments in this paper. Rotation invariance is achieved by taking the magnitude of the Zernike moments. Image normalization method is used for scale and translation invariance. Because of the reconstruction procedure suffering the fidelity degradation and requiring Zernike moments with high order, zero-watermarking technique is employed. Experimental results show that the scheme is robust against rotation, scale and translation(RST), as well as a variety of common manipulations such as JPEG compression, additive noise and filtering.

Key words: zero-watermarking; rotation, scale and translation (RST); Zernike moments; image normalization

随着多媒体数字产品的快速发展,人们可以随意访问每个数字图像,并能对图像对象进行旋转、缩放、平移等各种几何操作。几何攻击能极大地破坏水印检测的同步性,即使微小的几何攻击也可能使水印检测失败,这使得数字图像水印技术变得更加复杂,因此,开发一种能有效抵抗旋转、缩放和平移(RST)等几何攻击的图像水印技术迫在眉睫。

在抗几何攻击的水印方法中,不少算法利用了图像的各种不变矩,目前常用的矩主要有几何矩、中心矩和正交不变矩。Zernike 矩的基是正交径向多项式,可以保证所提取的特征相关性小、冗余性小;与其他不变矩相比,Zernike 矩还具有旋转不变性、对噪声的鲁棒性以及多层次表达等优点,为此,开始探索将 Zernike 矩引入抗几何攻击的图像水印算法中。

针对上述问题,本文提出计算图像局部重要区域

Zernike 矩的抗几何攻击的水印算法。由于图像在受到旋转、缩放和平移(RST)等几何攻击时,图像的中心不会发生变化,因此选取以图像的中心为原点,并采用图像边缘检测的方法,找到包含图像对象的局部重要区域,从而减小由于旋转带来的边缘影响,提高了 Zernike 矩的旋转不变性。然后,结合图像的缩放归一化,实现水印对缩放攻击的鲁棒性。由于 Zernike 矩的图像重构效果并不理想,而且重构过程中需要高阶矩,计算复杂度较高。因此,在水印算法的设计中,不能通过直接修改原始图像的 Zernike 矩并进行重构来嵌入水印,所以水印嵌入选用零水印方案。实验结果表明,该算法对旋转、缩放和平移(RST)的攻击具有很好的鲁棒性,同时对 JPEG 压缩、加噪、滤波等常见的图像处理操作也具有鲁棒性。

1 Zernike 矩及其性质

1.1 Zernike 矩的定义

Zernike 于 1934 年提出了一组多项式 $\{V_m(x,y)\}$,这组

* 基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2010J01340)

图形、图像与多媒体

多项式在单位圆($x^2+y^2 \leq 1$)内是完备正交的,其形式^[1]为:

$$V_{nm}(x,y) = V_{nm}(\rho,\theta) = R_{nm}(\rho) \cdot \exp(jm\theta) \quad (1)$$

其中: n 为非负整数,称为阶数(order); m 为整数,称为重复度(repetition),两者满足 $n-|m|$ 为偶数并且 $|m| \leq n$ 。 e 、 θ 分别为极坐标半径和角度; $R_{nm}(e,\theta)$ 为径向多项式(radial polynomial),其定义为:

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \cdot \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2}-s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2}-s\right)!} \cdot \rho^{n-2s} \quad (2)$$

Zernike 矩是将图像映射到这些正交基函数上得到的。Zernike 矩的定义为:

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x,y) \cdot V_{nm}^*(\rho,\theta) dx dy \quad (3)$$

对于数字图像 $f(x,y)$,积分可由求和代替,其 Zernike 矩为:

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x,y) V_{nm}^*(\rho,\theta) \quad (4)$$

为计算给定图像的 Zernike 矩,选取图像的中心为极坐标的原点,单位圆内的像素坐标被映射为极坐标,落到单位圆外部的像素不参加计算。

1.2 Zernike 矩的旋转不变性

设一幅图像为极坐标 $f(\rho,\theta)$,旋转 α 角度后的图像为 $f'(\rho,\theta)$ 。旋转后图像的 Zernike 矩 A'_{nm} 与原始图像的 Zernike 矩 A_{nm} 关系为:

$$A'_{nm} = A_{nm} \exp(-jma) \quad (5)$$

于是有: $|A'_{nm}| = |A_{nm}|$ 。

由此可见,如果将图像的 Zernike 矩的幅度作为水印,则水印具有旋转不变性。

1.3 Zernike 矩的平移归一化

图像的中心(形心)对于旋转、缩放和平移是不变的,因此可以将坐标原点平移到图像的中心,来实现图像的平移不变性。

设原图像为 $f(x,y)$,图像的中心为 (x_0,y_0) ,将坐标原点平移到图像中心后的图像为 $f'(x,y)$,其平移公式为:

$$f'(x,y) = f(x+x_0,y+y_0) \quad (6)$$

1.4 Zernike 矩的缩放归一化^[3]

缩放归一化 Zernike 矩的具体步骤如下。

(1) 计算图像重要区域(水印嵌入区域)的零阶几何矩

$$m_{00}, \text{ 即 } m_{00} = \sum_x \sum_y f(x,y);$$

(2) 计算图像重要区域的 Zernike 矩 A'_{nm} ;

(3) 进行归一化:

$$A_{nm} = A'_{nm} / m_{00} \quad (7)$$

2 水印算法

由于 Zernike 矩的灰度图像重构效果并不理想,而且重构过程中需要高阶矩,计算复杂度较高。因此,在水印

算法的设计中,不能通过直接修改原始图像的 Zernike 矩并进行重构来嵌入水印。针对上述问题,采用“零水印”方案^[4]。

2.1 零水印的构造算法

零水印的构造算法如下。

(1) 读入一幅图像,将坐标原点平移到图像的中心,然后采用图像边缘检测的方法,找到包含图像对象的局部重要区域,并把它映射到单位圆内;

(2) 计算圆形区域(水印嵌入区域)的零阶几何矩;

(3) 计算圆形区域(水印嵌入区域)的 Zernike 矩 A'_{nm} ,利用式(7)进行缩放归一化;

(4) 提取归一化后的 Zernike 矩 A_{nm} 的幅度作为特征矢量,即:

$$\vec{p} = (p_1, p_2, \dots, p_N) = (|A_{22}|, |A_{31}|, |A_{33}|, \dots, |A_{nm}|) \quad (8)$$

特征矢量的选择主要考虑以下三点:①归一化后的图像 $|A_{00}|$ 、 $|A_{11}|$ 是独立于图像的^[5],因此不能作为特征矢量。②重复度为 $4 \times i$ ($i=0,1,2,\dots$) 的 Zernike 矩计算是不准确的,因此也不适合作为特征矢量^[6]。③低阶 Zernike 矩描述图像的轮廓信息,高阶 Zernike 矩描述图像的细节信息^[7]。本文试验中,阶数 n 取 22。

(5) 将特征矢量 \vec{p} 二值化,得到二值水印序列 W ,即:

$$W_i = \begin{cases} 1 & p_i > T \\ 0 & p_i \leq T \end{cases} \quad i=1,2,\dots,N \quad (9)$$

其中, T 为阈值。本文试验中,取其特征矢量的均值作为阈值 T 。

(6) 为了满足保密性,可以对水印加密。由密钥 K 来生成一个长度为 N 的序列 $S = \{0,0,1,1,0,0,1,1,\dots\}$ 。用序列 S 中的元素与水印序列 W 对应的元素进行异或操作,来生成加密后的特征水印序列:

$$\vec{W} = \{S_i \oplus W_i, i=1,2,3,\dots,N\} \quad (10)$$

2.2 零水印的检测算法

零水印的检测算法如下。

(1) 按照水印构造的步骤,计算待检测图像对象的归一化的 Zernike 矩的幅度 A'_{nm} 及特征矢量 \vec{p}' 。

(2) 将特征矢量 \vec{p}' 二值化,得到二值水印序列 W' 。

(3) 将存储的特征水印序列 \vec{W} 用密钥 K 来解密,得到 W ,然后和待检测水印图像的水印序列 W' 按式(11)进行计算,得到相似度。

$$\text{sim} = \frac{(W_1 \oplus W'_1) + (W_2 \oplus W'_2) + \dots + (W_N \oplus W'_N)}{N} \quad (11)$$

从它的意义上可知, $0 \leq \text{sim} \leq 1$ 。sim 的值越大,其相似度越高。根据实验设置一个阈值 T_s ,当 $\text{sim} > T_s$ 时,认为水印存在,否则水印不存在。经过实验反复测量,阈值 T_s 设为 0.7。

3 实验及结果

实验选取 256×256 的 lena、 128×128 的 camera 和

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 53

图形、图像与多媒体

Image Processing and Multimedia Technology

128×128 的 akiyo 作为原始测试图像,为简单起见,只考虑原始图像中仅含一个图像对象且图像背景较为单一的情况。

证明该算法的可行性,256×256 的 lena、128×128 的 camera 和 128×128 的 akiyo 三幅图像完全不相关,其中 lena 图像与 camera 图像的水印序列相似率 $sim=0.574\ 257 < 0.7$, lena 图像与 akiyo 图像的水印序列相似率 $sim=0.514\ 851 < 0.7$, camera 图像与 akiyo 图像的水印序列相似率 $sim=0.603\ 960 < 0.7$ 。大量实验证明,不同图像由零水印构造的二值水印序列相似率都不会大于 0.7。

为了测试该算法的鲁棒性,用各种几何操作对图像进行攻击实验。

3.1 旋转攻击

在数字图像处理领域中,图像旋转有两种不同的形式^[8]:Crop rotation 和 Loose rotation。Akiyo 图像在两种不同形式下旋转 30°后的水印图像如图 1(b)和图 1(e)所示。

Crop rotate 攻击后,本文算法水印检测响应曲线如图 1(a)所示,其中横轴表示旋转角度。可以看出,本文算法对于 Crop rotate 攻击,检测的相似度都在 0.95 以上。

Loose rotate 攻击后,本文算法和参考文献[10]中的算法水印检测响应曲线分别如图 1(c)和图 1(d)所示,其中横轴表示旋转角度。可以看出,本文算法对于 Loose rotate 攻击,检测的相似度都在 0.92 以上,相比于参考

文献[10]中的算法,鲁棒性有一定的提高。

3.2 缩放攻击

缩放攻击后,本文算法和参考文献[10]算法水印检测的响应曲线分别如图 2(a)和图 2(b)所示,其中横轴表示放大倍数。对于缩放攻击,本文算法和参考文献[10]算法的鲁棒性能基本一致。

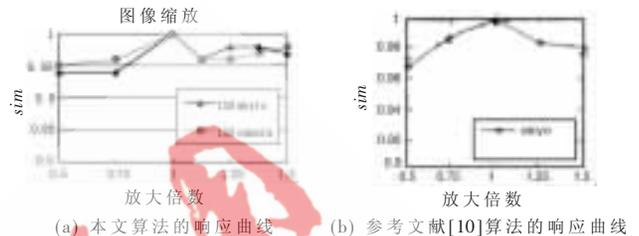


图 2 缩放攻击实验结果

3.3 噪声攻击

加入不同高斯噪声后,本文算法和参考文献[10]的算法水印检测响应曲线分别如图 3(a)和图 3(b)所示,其中横轴表示噪声强度。Akiyo 加入强度为 30 的高斯噪声后的水印图像如图 3(c)所示。对于噪声攻击,本文算法和参考文献[10]的算法,相比鲁棒性能有一点下降。

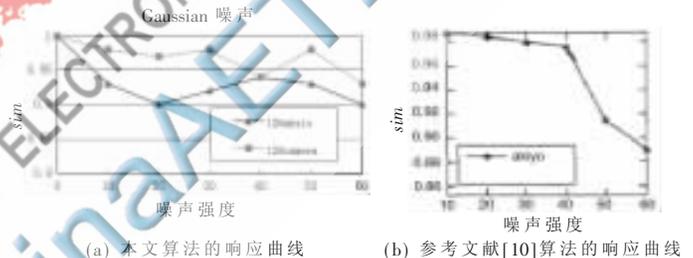
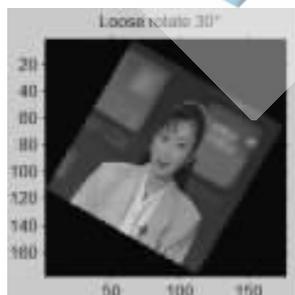
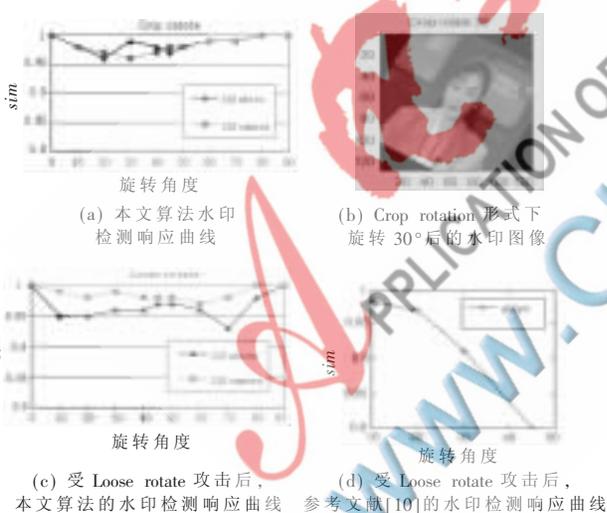


图 3 噪声攻击实验结果



(e) Loose rotation 形式下旋转 30°后的水印图像

图 1 旋转攻击实验结果

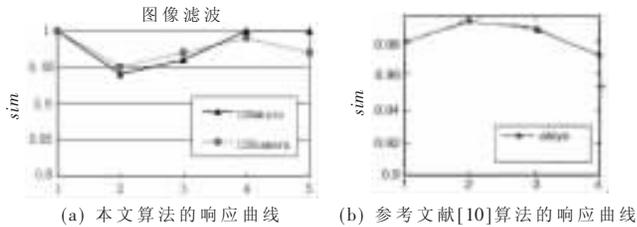
3.4 滤波攻击

滤波攻击后,本文算法和参考文献[10]的算法水印检测响应曲线如图 4(a)和图 4(b)所示,其中横轴从左到右依次表示为没有受到攻击、5×5 中值滤波、3×3 中值滤波、3×3 均值滤波、5×5 均值滤波。Akiyo 经过 5×5 均值滤波后的水印图像如图 4(c)所示。对于滤波攻击,本文算法和参考文献[10]算法的鲁棒性能几乎一样。

3.5 压缩攻击

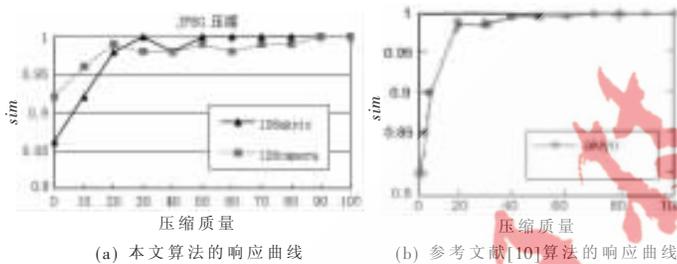
图像经 JPEG 压缩攻击后,本文算法和参考文献[10]算法的水印检测响应曲线如图 5(a)和图 5(b)所示,其中横轴表示压缩质量百分数。Akiyo 受到压缩质量百分数

《微型机与应用》2011 年 第 30 卷 第 16 期



(c) 5×5 均值滤波后的水印图像

图4 滤波攻击实验结果



(c) 20% JPEG 压缩后的水印图像

图5 压缩攻击实验结果

为 20% 的 JPEG 压缩后的水印图像如图 5(c) 所示。对于低质量压缩攻击,相比于参考文献[10]的算法,本文算法的鲁棒性有一定提高。

利用归一化后的 Zernike 矩的幅度具有 RST 不变的

性质, 将从图像中提取的局部 Zernike 矩的幅度矢量作为图像的特征矢量, 二值化后作为零水印, 实现了具有 RST 不变性的水印。实验结果表明, 该算法对旋转、缩放和平移(RST)的攻击具有很好的鲁棒性, 同时对 JPEG 压缩、加噪、滤波等常见的图像处理操作也具有很好的鲁棒性。

参考文献

- [1] KHOTANZAD A, HONG Y H. Invariant image recognition by Zernike moments[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(5):489-497.
 - [2] KINTNER E C. On the mathematical properties of Zernike polynomials[J]. Optica Acta, 1976, 23(8):679-680.
 - [3] 叶斌, 彭嘉雄. Zernike 矩不变性分析及其改进[J]. 红外与激光工程, 2003(01):37-41.
 - [4] 马建湖, 何甲兴. 基于小波变换的零水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(4):581-585.
 - [5] KHOTANZAD A, HONG Y H. Invariant image recognition by Zernike moments[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, 12(5):489-497.
 - [6] XIN Y Q, LIAO S, PAWLAK M, et al. Geometrically robust image watermark via pseudo-Zernike moments[A]. CCECE, 2004:0939-0942.
 - [7] 李雷达, 郭宝龙, 孙磊. 基于局部 Zernike 矩的 RST 不变水印[J]. 光电子·激光, 2007, 18(1):117-120.
 - [8] Image processing toolbox: imrotate function. http://www.mathworks.com/access/helpdesk_r13/help/toolbox/images/imrotate.html.
 - [9] Xiang Shijun. On invariance analysis of Zernike moments in the presence of rotation with crop and loose modes[J]. Multimed Tools Appl, 2010, 25(5).
 - [10] 徐达文, 王继成, 王让定. 基于 Zernike 矩的视频对象零水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(9):1825-1831.
- (收稿日期: 2011-06-17)

作者简介:

汤继生, 男, 1982 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像分析和应用。