

## 基于伪 Zernike 矩和 DWT-SVD 抗旋转水印算法

陈青, 张超

(上海理工大学, 上海 200093)

**摘要:** **目的** 提出一种基于伪 Zernike 矩和 DWT-SVD 的抗旋转图像盲水印算法。**方法** 对原始图像内切圆的内接正方形区域进行二级小波变换, 对其低频子带进行奇异值分解。在一定的嵌入强度下将水印叠加到奇异值矩阵中, 实现水印的嵌入。记录含水印图像的伪 Zernike 矩的相位信息用于检测旋转角度, 在提取水印时校正旋转攻击。**结果** 仿真结果表明, 该算法水印的不可见性很好, PSNR 值高达 45.12, 提取的水印与原水印相似度很高, NC 值为 1。该算法对旋转攻击具有很强的鲁棒性, 对常见的信号处理攻击具有很强的鲁棒性。**结论** 该算法对任意角度的旋转攻击都有很强的鲁棒性, 能满足数字产品的版权保护需要。

**关键词:** 伪 Zernike 矩; 小波变换; 奇异值分解; 旋转攻击

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)15-0179-05

## An Anti-rotation Watermarking Algorithm Based on Pseudo Zernike Moments and DWT-SVD

CHEN Qing, ZHANG Chao

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** The work aims to propose a blind watermarking algorithm for anti-rotation images based on pseudo Zernike moments and DWT-SVD. First of all, the secondary wavelet transform was done on inscribed square area in the inscribed circle of the original image. SVD decomposition was made for the low-frequency sub-bands. In a certain embedding strength, the watermark was added to the singular value matrix and the watermark embedding was achieved. Finally, the phase information of the pseudo Zernike moments of the watermark image was recorded to detect the rotation angle and to correct the rotation attack in the watermark extracting process. Simulation results indicated that the algorithm had a good visibility that the PSNR value was as high as 45.12, the similarity of the extracted watermark and the original watermark was high, and the NC value was 1. The robustness of the proposed algorithm to rotation attacks was strong and had a good robustness to the common signal processing attacks. This algorithm has strong robustness for resistance against rotation attacks at any angle, and can satisfy the needs of digital products' copyright protection.

**KEY WORDS:** pseudo Zernike moments; wavelet transform; SVD; rotation attack

随着互联网技术和数字多媒体技术的发展, 数字产品在网上的传播越来越方便, 使得数字作品的版权保护问题越来越引起人们的关注<sup>[1-3]</sup>。数字水印技术使数字产品的版权得到了有效的保护, 版权信息通过该技术嵌入数字产品中, 只能通过专门的提取工具才能检测出来<sup>[4-6]</sup>。目前数字水印算法主要有空间域算

法和变换域算法这 2 类, 变换域算法由于它的强鲁棒性, 受到越来越多的青睐<sup>[7-8]</sup>。现有的数字水印算法能抵挡常规的数字信号处理, 但抗几何攻击的能力特别是抗旋转攻击的能力差强人意, 因此, 抵抗旋转攻击的数字水印技术是现在研究的热点也是难点。周中原<sup>[9]</sup>等提出一种抗旋转全息数字水印算法, 经过离散

收稿日期: 2016-09-12

基金项目: 上海理工大学国家级项目培育基金 (16HJPY-MS06); 上海自然科学基金(12ZR1420800); 国家高技术研究发展计划(863) (2012AA050206)

作者简介: 陈青 (1962—), 女, 博士, 上海理工大学副教授、硕导, 主要研究方向为信号处理。

小波变换,离散余弦变换和奇异值分解,将进行双随机相位的全息加密数字水印信息嵌入到载体图像中,该算法能抵抗旋转攻击。何冰<sup>[10]</sup>等提出一种基于不变矩的鲁棒性数字水印算法,该算法对旋转、缩放、平移等攻击具有较强的鲁棒性。陈青、翁旭峰<sup>[11]</sup>提出基于伪 Zernike 矩的水印算法,通过合适的矩量化调制嵌入水印信息,该算法对旋转攻击有一定的鲁棒性。文中提出一种基于伪 Zernike 矩和 DWT-SVD 抗旋转数字水印算法,选取载体图像的内切圆的内接正方形区域,经过 DWT-SVD 变换后嵌入水印,然后比较攻击前后水印图伪 Zernike 矩的相位进行旋转校正。

## 1 基本理论

### 1.1 伪 Zernike 矩

图像映射到一组基函数上就得到了该图像的伪 Zernike 矩,该基函数叫做伪 Zernike 矩的基<sup>[11-12]</sup>,记为  $\{V_{nm}(x, y)\}$ 。这组基构成了单位圆( $x^2+y^2 \leq 1$ )内的一组完备正交基,伪 Zernike 矩的定义为:

$$Z_{n,m} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) [V_{n,m}(x, y)]^* dx dy \quad (1)$$

式中:  $n$  为非负整数;  $m$  为整数,且  $|m| \leq n$ ;  $*$  为复数共轭。伪 Zernike 矩的极坐标表示式为:

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

式中:  $r = \sqrt{x^2+y^2}$ ;  $\theta = \arctan(y/x)$ 。伪 Zernike 矩基的多项式见式(3)。

$$[V_{n,m}(r, \theta)] = S_{n,m}(r) \exp(jn\theta) \quad (3)$$

$S_{n,m}(r)$  为正交径向多项式:

$$S_{n,m}(r) = \sum_{s=0}^{n-m} \frac{(-1)^s (2m+1-s)!}{s! (m-n-s)! (m+n+1-s)!} r^{n-s} \quad (4)$$

一幅大小为  $N \times N$  的数字图像,  $(n, m)$  阶伪 Zernike 矩为:

$$Z_{n,m} = \frac{n+1}{\pi} \sum_i \sum_j [V_{n,m}(x, y)]^* f(x, y) \quad (5)$$

原始图像  $f(x, y)$  旋转  $\alpha$  角度后,伪 Zernike 矩的幅度不变,旋转前后的伪 Zernike 矩  $Z_{nm}$  与  $Z'_{nm}$  有以下关系:

$$Z'_{nm} = Z_{nm} \exp(-jm\alpha) \quad (6)$$

由上可得  $|Z_{nm}| = |Z'_{nm}|$ , 旋转前后伪 Zernike 的幅度值不变,也即旋转不变性<sup>[12]</sup>,因此,伪 Zernike 的相位信息可以被用来估计图像的旋转角。

$$\arg(Z'_{nm}) = \arg(Z_{nm}) + m\alpha \quad (7)$$

图像旋转后的角度  $\alpha$  可由式(8)求得。

$$\alpha = \frac{\arg(Z'_{nm}) - \arg(Z_{nm})}{m} \quad (8)$$

通过大量的实验发现,  $(n, m)$  取值为(2,1), (3,1), (4,1), (4,2), (4,3)时估计的旋转角度精度较高<sup>[11]</sup>,所以

通过取平均值可以提高估计角度的准确度。

$$\alpha = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \alpha_i \quad (9)$$

式中:  $\alpha_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$  分别为  $(n, m)$  取值为(2,1), (3,1), (4,1), (4,2), (4,3)时估计的旋转角度。图像的旋转与校正见图1。



图1 图像的旋转校正

Fig.1 Rotation correction of image

### 1.2 小波变换

小波变换具有多分辨率的特性,在数字水印,图像压缩,图像去噪中都有很广泛的应用<sup>[13]</sup>。小波是一种有限波,设  $\psi(t) \in L^2(R)$  ( $L^2(R)$  为平方可积实数空间)其傅里叶变换为  $\hat{\psi}(\omega)$ ,当  $\hat{\psi}(\omega)$  满足  $C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$  时,称  $\psi(t)$  为一个“基小波”,也称为“母小波”,将“母小波”经伸缩和平移后,就得到了一个小波序列。将小波函数的尺度因子和平移因子离散化后就得到了离散小波函数。

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k), j, k \in Z \quad (10)$$

对任意函数  $f(t)$  的离散小波变换为:

$$WT_x(j, k) = \int f(t) \psi_{(j,k)}^*(t) dt \quad (11)$$

对图像进行一级小波变换分解,就得到4个不重叠的子带(LL, HL, LH, HH)。其中LL是低频子带,HL是水平高频子带,LH是垂直高频子带,HH是对角线高频子带,下一级分解是对LL子带进行分解。图像的小波分解见图2。

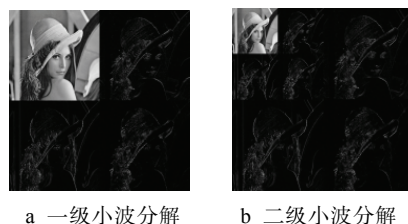


图2 图像的小波分解

Fig.2 Wavelet decomposition of image

### 1.3 奇异值分解

矩阵的奇异值分解(SVD)是一种正交变换,在图像压缩、数字水印和其他图像处理中有非常广泛的应用<sup>[14]</sup>。设  $A$  是一个  $N \times M$  的数字图像,则奇异值分解为:

$$A = U \times S \times V^T \quad (12)$$

式中:矩阵  $U$  和  $V$  是大小分别为  $N \times N$  和  $M \times M$  的正交矩阵,分别称为左奇异值矩阵和右奇异值矩

阵; 矩阵  $S$  是一个大小为  $N \times M$  的奇异值矩阵, 也是对角矩阵, 非对角线上元素为 0, 其对角元素  $\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_n = 0$ ,  $r$  是矩阵  $S$  的秩, 因此  $A$  可以表示为:

$$A = \sigma_1 U_1 V_1^T + \sigma_2 U_2 V_2^T + \dots + \sigma_r U_r V_r^T \quad (13)$$

图像奇异值分解具有以下特点<sup>[15]</sup>: 图像作较小的变化时, 奇异值不会发生太大的变化; 图像的奇异值表示其代数性质, 而不是其视觉特性, 故水印嵌入其中能保证水印具有较好的透明性; 几何失真不会改变奇异值。水印被嵌入到图像的奇异值矩阵中, 不仅具有良好的隐蔽性, 而且还可以抵抗几何攻击。

## 2 水印的嵌入与提取算法

嵌入水印后的图像经过一定角度的旋转后会破坏水印信息使水印提取失败, 无法起到版权保护的作用。文中算法在提取水印前, 利用伪 Zernike 矩的相位信息估计图像旋转的角度, 将图像反向旋转相同的角度, 以抵抗旋转攻击, 提高数字水印的鲁棒性。图像旋转校正后, 4 个角的信息就丢失了, 如果将整幅图像作为原始图像嵌入水印, 就会丢失部分水印信息, 为解决这个问题, 将图像内切圆的内接正方形区域作为嵌入水印的载体图像。

### 2.1 水印嵌入

水印的嵌入过程见图 3。

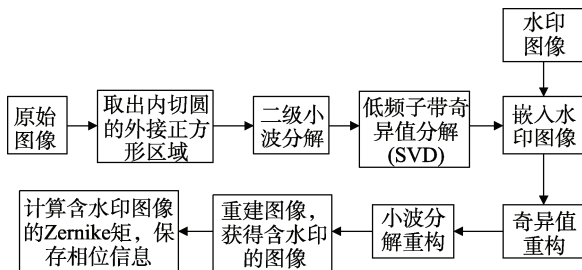


图 3 嵌入水印

Fig.3 Embedding watermarking

- 1) 选取原始图像的内切圆的内接正方形区域, 记为  $A$ 。
- 2) 对图像  $A$  进行 2 级小波分解, 得到低频子带  $LL_2$ 。
- 3) 对低频子带  $LL_2$  作奇异值分解  $LL_2 = USV^T$ 。
- 4) 将水印嵌入奇异值矩阵  $S$  中, 并对新矩阵进行奇异值分解  $S + \alpha W = U_1 S_1 V_1^T$ ,  $\alpha$  为嵌入强度。
- 5) 由  $U$ ,  $S_1$ ,  $V$  得到嵌入水印后的低频子带  $LL'_2 = US_1 V^T$ 。
- 6) 进行小波逆变换, 得到嵌入水印后的图像区域  $A'$ , 重建图像, 得到嵌入水印后的图像。
- 7) 计算嵌入水印后的图像的 Zernike 矩, 并记录下相位信息  $\beta$ 。

嵌入水印过程中的矩阵  $U_1$ ,  $V_1$ ,  $S$  作为提取水印时的密钥。

### 2.2 水印提取

水印的提取过程见图 4。

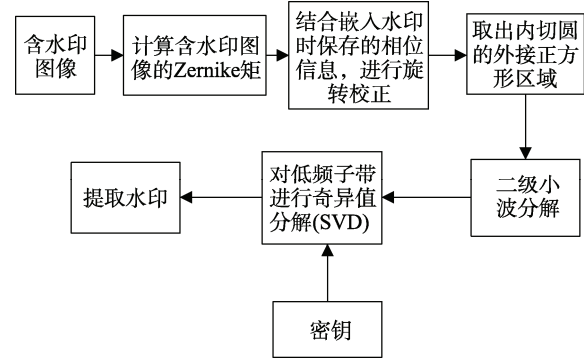


图 4 提取水印

Fig.4 Extracting watermarking

- 1) 计算遭旋转攻击后含水印图像的伪 Zernike 矩, 记录相位信息  $\beta'$ 。
- 2) 比较  $\beta$  与  $\beta'$ , 若不相等, 则将图像方向旋转  $\beta' - \beta$  角度, 若相等, 进行步骤 3)。
- 3) 对校正后的图像, 提取该图像的内切圆的内接正方形区域, 进行 2 级小波分解, 得到低频子带  $LL^w_2$ 。
- 4) 对低频子带  $LL^w_2$  进行奇异值分解  $LL^w_2 = U'S'V'^T$ 。
- 5) 由密钥  $U_1$ ,  $V_1$  进行奇异值重构  $W' = U_1 S' V_1^T$ 。
- 6) 由密钥  $S$  和嵌入因子提取水印  $W = (W' - S) / \alpha$ 。

## 3 实验结果分析

水印的不可见性用峰值信噪比(PSNR)用来衡量, PSNR 的值越大, 表明嵌入的水印不可见性越好<sup>[15-16]</sup>。

$$PSNR = 10 \lg \frac{255^2 M \times N}{\frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I(i, j) - I'(i, j)]^2} \quad (14)$$

式中:  $I(i, j)$  为原图像;  $I'(i, j)$  为嵌入水印后的图像, 图像大小为  $M \times N$ 。

采用归一化相关系(NC)数来度量攻击后水印图像的鲁棒性, NC 值越大, 说明水印的鲁棒性越好<sup>[17-18]</sup>。

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (W(i, j) \times W'(i, j))}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (W(i, j))^2} \quad (15)$$

式中:  $W(i, j)$  为原始水印;  $W'(i, j)$  为提取的水印。

实验采用  $512 \times 512$  的 Lena 灰度图像作为原始图像, 使用的平台为 Matlab2014a。水印图像是  $64 \times 64$  的 USST 标志二值图像, 嵌入强度为 0.25。原始图像和含水印图像见图 5, 原始水印及提取出的水印见图 6。



图 5 原始图像和含水印图像  
Fig.5 Original image and watermark image



图 6 原始水印和提取的水印  
Fig.6 Original watermark and extracted watermark

由表 1 可知,该算法能对任意角度的旋转攻击均能有效提取出水印信息,NC 接近 1,说明该算法对旋转攻击的鲁棒性很好。含水印图像对其它常规的信号处理的攻击和几何攻击的实验结果见表 2。由表 2 可知,该算法对常见的信号处理攻击具有很好的鲁棒性。

表 1 旋转攻击后的提取实验  
Tab.1 Extraction experiment after rotation attack

| 旋转角度/(°) | 提取水印 | NC     |
|----------|------|--------|
| 0        |      | 0.9896 |
| 10       |      | 0.9903 |
| 20       |      | 0.9896 |
| 30       |      | 0.9900 |
| 40       |      | 0.9859 |
| 45       |      | 0.9903 |
| 50       |      | 0.9894 |
| 60       |      | 0.9881 |
| 70       |      | 0.9888 |
| 80       |      | 0.9911 |
| 90       |      | 1      |

表 2 信号处理攻击和其它几何攻击实验结果  
Tab.2 Experimental results of signal processing attack and other geometric attacks

| 攻击          | 提取水印 | NC     |
|-------------|------|--------|
| 椒盐噪声        |      | 0.9657 |
| 高斯噪声        |      | 0.9654 |
| 直方图均衡       |      | 0.9630 |
| 剪切 1/16     |      | 0.9889 |
| JPEG 压缩 80% |      | 0.9742 |
| JPEG 压缩 40% |      | 0.9701 |
| 中值滤波        |      | 0.9784 |

## 4 结语

文中提出了一种基于 Zernike 矩和 DWT-SVD 数字水印抗旋转攻击的数字水印算法,巧妙地选取特定区域,通过 DWT-SVD 方法嵌入水印,利用 Zernike 矩相位信息对旋转攻击后的图像进行校正。实验结果表明,该算法具有良好的不可见性,抗旋转攻击能力很强,同时对传统的信号处理攻击也有很强的鲁棒性。

## 参考文献:

- [1] YUAN Xiao-chen, PUN Chi-man, PHILIP C L. Geometric Invariant Watermarking by Local Zernike Moments of Binary Image Patches[J]. Signal Processing, 2013(93): 2087—2095.
- [2] MARDANPOUR M, CHAHOOKI M A Z. Robust Transparent Image Watermarking with Shearlet Transform and Singular Value Decomposition[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2016(70): 790—798.
- [3] MUSRRAT A, CHANG W A, MILLIE P, et al. An Image Watermarking Scheme in Domain with Optimized Compensation of Singular Value Decomposition Via Artificial Bee Colony[J]. Information Sciences, 2015(301): 44—60.
- [4] KESHAVARZIAN R, AGHAGOLZADEH A. ROI Based Robust and Secure Image Watermarking Using DWT and Arnold Map[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2016(70): 278—288.
- [5] SHI Hui, LI Ming-chu, FANG Ling-ling, et al. A Robust Digital Image Watermarking Based on Adaptive Multifunctional Scheme[J]. Optik, 2015(126): 804—812.
- [6] ALI M, CHANG W A. Optimized Gray-scale Image Watermarking Using DWT-SVD and Firefly Algorithm[J]. Expert Systems with Applications An International Journal, 2015, 42(5): 2392—2394.
- [7] ALI M, CHANG W A. An Optimized Watermarking Technique Based on Self-adaptive DE in DWT-SVD Transform Domain[J]. Signal Processing, 2014, 94(1): 545—556.
- [8] CHEN Yu, QU Fang, HU Jian-bin, et al. A Geometric Robust Watermarking Algorithm Based on DWT-DCT and Zernike Moments[J]. Wuhan University Journal of Nature Sciences, 2010, 13(6): 753—758.
- [9] 周中原, 孙刘杰, 唐波, 等. 一种抗旋转的全息水印算法[J]. 包装工程, 2013, 34(19): 95—100.  
ZHOU Zhong-yuan, SUN Liu-jie, TANG Bo, et al. A Holographic Watermarking Algorithm of Anti-rotation[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(19): 95—100.
- [10] 何冰, 王暄, 赵杰. 基于不变矩的抗旋转、缩放、平

- 移鲁棒性数字水印[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(1): 183—186.
- HE Bing, WANG Xuan, ZHAO Jie. Robust Image Watermarking Resisting to RST Attacks Based on Invariant Moments[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(1): 183—186.
- [11] 陈青, 翁旭峰. 一种新的基于伪 Zernike 矩的图像盲水印算法[J]. 计算机应用研究, 2016(9): 1—5.
- CHEN Qing, WENG Xu-feng. Novel Blind Image Watermarking Based on Pseudo Zernike Moments[J]. Application Research of Computers, 2016(9): 1—5.
- [12] 朱丹丹, 吕鲤志. 基于伪 Zernike 矩和 Contourlet 变换的抗几何攻击图像水印算法[J]. 计算机科学, 2016(43): 131—134.
- ZHU Dan-dan, LYU Li-zhi. Anti-geometric-attack Watermarking Algorithm Based on Pseudo Zernike Moments and Contourlet Transform[J]. Computer Science, 2016(43): 131—134.
- [13] FAZLI S, MOEINI M. A Robust Image Watermarking Method Based on DWT, DCT, and SVD Using a New Technique for Correction of Main Geometric Attacks[J]. Optik International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(2): 964—972.
- [14] JIA Shao-li. A Novel Blind Color Images Watermarking Based on SVD[J]. Optik, 2014(125): 2868—2874.
- [15] ALI M, CHANG W A, PANT M. A Robust Image Watermarking Technique Using SVD and Differential Evolution in DCT Domain[J]. Optik-international Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(1): 428—434.
- [16] ISMAIL I A, SHOUMAN M A, HOSNEY K M, et al. Invariant Image Watermarking Using Accurate Zernike moments[J]. Journal of Computer Science, 2011, 6(1): 52—59.
- [17] 马婷, 陈农田, 王欣. 基于 NSCT-DWT-SVD 的强鲁棒多重数字水印算法[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 50—55.
- MA Ting, CHEN Nong-tian, WANG Xin. Stronger Robust Multiple Digital Watermarking Algorithm Based on NSCT-DWT-SVD[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 50—55.
- [18] 于海娇, 孙刘杰, 李毓彬, 等. 基于 QR 码的 DWT-SVD 数字水印算法[J]. 包装工程, 2015, 36(23): 125—129.
- YU Hai-jiao, SUN Liu-jie, LI Yu-bin, et al. Digital Watermarking Algorithm with DWT-SVD Based on QR Code[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(23): 125—129.