

# 基于 Zernike 矩和 NSCT-SVD 的数字水印算法研究

陈 盈 郑洪源 丁秋林

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院 南京 210016)

**摘 要** 以非下采样 Contourlet 变换、奇异值分解以及 Zernike 矩知识为基础,结合图像不变质心在几何攻击前后相对位置不变的特性和 Zernike 矩对旋转、缩放攻击的不变性以及对待噪声不敏感的特性,提出了一种利用 Zernike 矩对图像几何校正的 NSCT-SVD 几何鲁棒盲水印算法。该方案中宿主图像通过非下采样 Contourlet 变换分解提取出低频区域,通过量化每块奇异值矩阵的欧氏范数来嵌入水印。水印检测时,先利用 Zernike 矩和不变质心等几何参数对被检测图像进行几何攻击校正,恢复水印的同步信息后再提取水印。实验结果表明,该算法对噪声、滤波、压缩以及各类几何攻击具有较好的鲁棒性。

**关键词** 非下采样 Contourlet 变换, SVD, Zernike 矩, 欧氏范数, 不变质心

**中图分类号** TP309 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.8.017

## Watermarking Algorithm Based on Zernike Moments and NSCT-SVD

CHEN Ying ZHENG Hong-yuan DING Qiu-lin

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract** In this paper, we proposed a NSCT-SVD blind geometric robust watermarking algorithm by using the geometric correction to image that based on non-subsampled contourlet transform, singular value decomposition and Zernike moment, which combines both the invariance of Zernike moment to attack and rotate, the fixation of invariant centroid relative place both before and after attack and insensitive characteristics to noise. In the algorithm, the host image extracts low-frequency region by NSCT decomposition, the watermarking is embedded with quantizing the Euclidean norms of every Singular of Zernike moments and invariant centroid, then the watermarking is extracted after recovering the synchronization information. The experimental results show that the algorithm has better robustness for various processing such as noise, filtering, compression, and all kinds of geometric attack.

**Keywords** Non-subsampled contourlet transform, SVD, Zernike moments, Euclidean norm, Invariant centroid

## 1 引言

随着网络的普及和多媒体技术的发展,数字媒体得到了广泛的传播,但与此同时,数字媒体版权的保护也面临着日益严重的挑战。水印技术作为信息隐藏技术的分支,能够将版权信息嵌入到数字媒体中,从而达到保护版权的目的,是近年来信息安全领域研究的热点<sup>[1]</sup>。

几何攻击可破坏水印嵌入和检测的同步性,使得水印无法被正常提取,因此如何对抗几何攻击一直是水印技术的重点和难点。到目前为止,抗几何攻击的水印算法大致可分为基于图像特性和不变矩的算法。在各类不变矩的算法中, Zernike 矩<sup>[2]</sup>由一组正交复数矩所表示,并且具有旋转不变性以及对待噪声不敏感的特性,能够较好地表达图像特征,因此一经出现就被应用到抗几何攻击数字水印中。文献[3]结合了归一化技术和低阶的 Zernike 不变矩,提出了一种具有几何不变性的水印。文献[4]将含有数字水印图像的 Zernike 矩

重新构造嵌入到原始图像中,设计了一种抗旋转攻击的水印。文献[5]对原始图像进行预处理后进行分块 SVD,将置乱后的水印信号逐比特自适应地量化嵌入到各子块的最大奇异值中,提取水印采用 Zernike 矩估计旋转角度并旋回。文献[6]结合 Zernike 矩和小波域模板设计了一种鲁棒水印算法,算法中运用向量 DWT-HMM 来嵌入和检测水印。文献[7]提出基于 Zernike 和 DWT-SVD 的水印算法,利用 DWT-SVD 算法嵌入水印后,计算 Zernike 矩值校正攻击图像,再进行水印检测。文献[14]利用非下采样 Contourlet 变换的多向和冗余的特性,为抵抗旋转攻击提出了基于 NSCT 的数字水印算法。

结合上述算法,本文在文献[7,14]的基础上改进设计了一种基于 Zernike 矩和 NSCT-SVD 的水印算法。先通过非下采样 Contourlet 变换提取出低频区域,通过量化每块奇异值矩阵的欧氏范数来嵌入水印。水印检测时,先利用 Zernike 矩和不变质心对被检测图像进行几何攻击校正,恢复水印的

到稿日期:2015-06-12 返修日期:2015-08-23 本文受江苏省产学研联合创新资金项目(SBY201320423)资助。

陈 盈(1990—),女,硕士生,主要研究方向为知识工程、信息系统与信息安全, E-mail: chwn\_ying@qq.com; 郑洪源(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为知识工程、信息系统与信息安全、人机交互; 丁秋林(1936—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为信息系统、企业信息化。

同步信息后再提取水印。实验结果表明,该算法对各类几何攻击都具有较好的鲁棒性。

## 2 基础知识

### 2.1 NSCT 非下采样 Contourlet 变换

非下采样 Contourlet 变换由 A. L. Cunha 等<sup>[8]</sup>于 2005 年在受构造非下采样小波的启发下提出,可以分成均具有平移不变性的两个部分:非下采样塔形滤波器(NSP),确保多尺度性;非下采样方向性滤波器(NSDFB),确保多方向性。该变换首先采用非下采样塔式滤波器组对图像进行多尺度分解,然后采用非下采样方向滤波器组对得到的各尺度子带图像进行方向分解<sup>[9]</sup>。NSCT 具有多尺度性、平移不变性、多方向性,能够快速实现。非下采样 Contourlet 变换既具有 Contourlet 变换的优点,又具有平移不变性,有效地解决了伪 Gibbs 失真问题,相对于小波变换和 Contourlet 变换来说是一种非常完善的变换。其构造原理和频域示意图如图 1 所示。

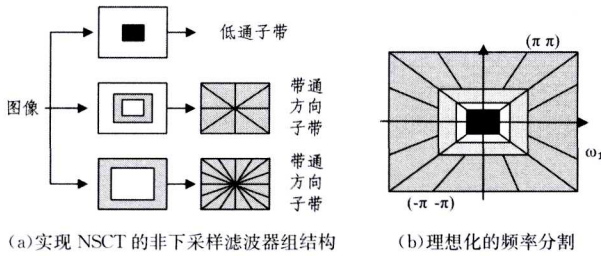


图 1 非下采样 Contourlet 变换

#### 2.1.1 非下采样金字塔(NSP)

非下采样金字塔为 NSCT 提供了多尺度特性,是一种平移不变的滤波器结构,能实现和拉普拉斯金字塔分解类似的子带分解形式。NSP 还可以通过双通道非下采样二维滤波器组来设计。各层的滤波器设计可以通过对第一层滤波器进行上采样获得,这样在获取多尺度特性的同时又不需要设计额外的滤波器。

#### 2.1.2 非下采样方向滤波器组(NSDFB)

NSCT 在风扇滤波器组或钻石滤波器组的基础上,通过对滤波器的操作来得到需要的象限滤波器组、平行滤波器组,避免了对图像的采样操作。风扇滤波器组和钻石滤波器组可以通过调制  $\pi$  来相互转换。象限滤波器组和平行滤波器组对钻石滤波器组(或风扇滤波器组)分别向 4 个方向拉长 2 倍,这样非下采样方向滤波器组的结构为:1)先经过风扇滤波器组和象限滤波器组将图像分为 4 个方向的子带;2)经过平行滤波器组的迭代分为各个不同的方向子带。NSCT 是通过将 NSP 与 NSDFB 结合构成的(如图 1(a)所示)。由上述分析可知,非下采样 Contourlet 变换能抵抗平移攻击,所以它能够有效地弥补 Zernike 矩不抗平移攻击的缺陷。

## 2.2 奇异值分解(SVD)

奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)由 Beltrami 和 Jordan 提出并应用在正交矩阵中。SVD 作为一种特殊的矩阵变换,表征了图像内部的性质,由于奇异值具有稳定性、转置不变性、旋转不变性、缩放不变性等特性,奇异值分解也成为了数字水印技术中的一个重要工具。一幅数字图像可以看成是一个具有相同大小的矩阵。因此,可将各种矩阵变换引入到图像处理领域中,以实现大规模数据的快速处理。

若用  $A \in R^{M \times N}$  表示一个图像矩阵,则矩阵  $A$  的奇异值分解可定义为:

$$A=USV^T \quad (1)$$

其中, $U \in R^{M \times M}$ , $V \in R^{N \times N}$  都是正交矩阵; $S \in R^{M \times N}$  为对角矩阵,其非对角线上的元素均为 0,对角线上的元素满足  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r \geq \lambda_{r+1} = \dots = \lambda_M = 0$ , $r$  是矩阵的秩,它等于非 0 奇异值的个数, $\lambda_i$  ( $i=1,2,\dots,M$ ) 称为  $A$  的奇异值。

### 2.3 不变质心

设原始图像为  $f(x,y)$ ,那么该图像的几何矩可定义为:

$$m_{p,q} = \sum_x \sum_y x^p y^q f(x,y) \quad (2)$$

质心可表示为:

$$x_c = m_{1,0}/m_{0,0}, y_c = m_{0,1}/m_{0,0} \quad (3)$$

式(3)显示如果图像像素值改变,那么  $f(x,y)$  的质心也会不同。因此 Kim 等提出一种迭代方法找出图像的不变质心。不变质心  $C$  的计算步骤如下:

1)在低通滤波后,运用式(3)计算图像初始质心  $C_0$  作为不变质心  $C$  的初始值。

2)按式(3)求取图像上一个以  $C$  为中心、 $r$  为半径的圆形区域的质心  $C_1$ 。

3)如果  $C=C_1$ ,那么  $C$  为所求的不变质心,如果  $C \neq C_1$ ,返回上一步。

### 2.4 Zernike 矩

Zernike 作为一种理想的图像特征描述符,具有对噪声不敏感、表达简单的优点,通常被应用于模式识别、图像理解等领域。

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。Zernike 矩定义为:

$$V_{n,m}(x,y) = V_{n,m}(r,\theta) = R_{n,m}(r)e^{jm\theta} \quad (4)$$

其中, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , $\theta = \arctan(y/x)$ , $n$  是一个非负整数, $m$  是满足  $n - |m|$  为偶数且  $|m| \leq n$  的整数。 $R_{n,m}(r)$  称为 Zernike 矩的径向多项式,定义为:

$$R_{n,m}(r) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} (-1)^s \times \frac{(n-s)!}{s! \left(\frac{n+|m|}{2} - s\right)! \left(\frac{n-|m|}{2} - s\right)!} \times r^{n-2s} \quad (5)$$

设一幅图像为  $f(x,y)$ ,Zernike 矩是  $f(x,y)$  在正交多项式上的投影,以  $m$  为循环指标的  $n$  阶 Zernike 矩定义如下:

$$Z_{n,m} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x,y) V_{n,m}^*(x,y) \quad (6)$$

其在极坐标下定义为:

$$Z_{n,m} = \frac{n+1}{\pi} \sum_r \sum_\theta f(r,\theta) \times R_{n,m}(r) \times e^{m(-\theta)} \quad (7)$$

### 2.5 几何失真校正

文献[10]提出了一种基于 Zernike 矩的图像几何失真校正方法,但是这种方法不能有效地检测出平移参数。为了克服这一缺点,在原有基础上加入了图像不变质心技术来进行改进。在改进的校正算法中,不需要原始图像,但需要用到原图像的不变质心  $C$  以及 Zernike 矩等少量辅助信息来计算几何失真参数。

#### 2.5.1 翻转校正

设  $A_{p_i}$  和  $A_{p_i}^h$  分别为图像  $f(x,y)$  水平翻转前后的 Zernike

矩,由 Zernike 矩定义可知:当  $q$  为偶数时,  $A_{pq}^h = A_{pq}$ ; 当  $q$  为奇数时,  $A_{pq}^h = -A_{pq}$ 。相应地,设  $A_{pq}^h$  为垂直翻转后的图像的 Zernike 矩,则无论  $q$  是奇数还是偶数,都有  $A_{pq}^h = A_{pq}$ 。因此,通过 Zernike 矩的变化可有效地判断图像是否被翻转。在检测到翻转类型后,可对失真图像进行校正。

### 2.5.2 平移校正

平移失真参数检测过程如下:

- (1) 计算失真图像的不变质心  $C_t = (c_{xt}, c_{yt})$ ;
- (2) 通过式(8)计算图像的平移量:

$$\Delta x = c_{xt} - c_x, \Delta y = c_{yt} - c_y \quad (8)$$

(3) 将失真图像分别沿  $x, y$  轴平移  $-\Delta x$  和  $-\Delta y$  个像素。

计算平移后的图像的不变质心  $C_{t'} = (c_{xt'}, c_{yt'})$ ,若  $C = C_{t'}$ ,则可证明失真图像被平移攻击,且  $(\Delta x, \Delta y)$  为平移量,并且平移图像即为校正图像。

### 2.5.3 旋转、缩放以及旋转-缩放校正

设  $A_{pq}$  和  $A_{pq}'$  分别为图像缩放变换前后的 Zernike 矩,则缩放因子  $\beta$  可由式(9)计算得到:

$$\beta = (A_{pq}' / A_{pq})^{1/(2+p)}, |q| = p, p = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

设  $f(x, y)$  被旋转  $\alpha$  度,则旋转后的图像的 Zernike 矩  $A_{pq}'$  与原图像的 Zernike 矩  $A_{pq}$  的关系如下:

$$A_{pq}' = A_{pq} \exp(-jq\alpha) \quad (10)$$

根据 Zernike 矩的相位信息可估计图像的旋转角度  $\alpha$ :

$$\alpha = (\arg(A_{pq}') - \arg(A_{pq})) / q, q \neq 0 \quad (11)$$

先将失真图像旋转  $\alpha$  得到  $f'$ ,然后计算  $f'$  的缩放因子  $\beta$ ,接着以  $1/\beta$  为缩放因子,对  $f'$  进行缩放得  $f''$ ,则  $f''$  为校正图像。如果  $\beta = 1$ ,则失真图像仅被旋转攻击;否则图像被旋转-缩放组合攻击。

### 2.5.4 RST 攻击校正

图像常常会被旋转、缩放和平移组合攻击。在这种情况下,可联合使用前面的方法来估计旋转、缩放和平移参数。首先计算失真图像  $f_{rs}$  的旋转角度  $\alpha$  和缩放因子  $\beta$ ;然后根据所得参数对失真图像进行校正得  $f'$ ;接着估计平移量并校正  $f'$  得最终校正图像  $f''$ 。注意,因为旋转和缩放会影响不变质心的计算,所以平移参数的估计必须在校正旋转和缩放后进行。

## 3 水印算法

### 3.1 水印嵌入

水印嵌入的流程如图 2 所示。

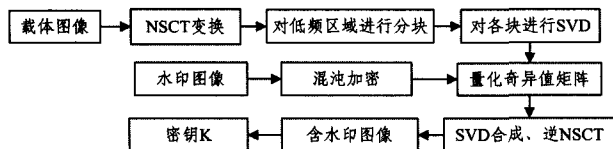


图 2 水印嵌入流程

水印嵌入的具体步骤如下。

(1) 对载体图像进行三级 NSCT 变换后,提取出低频区域。然后将低频区域分割成大小为  $k \times k$  的矩阵,  $A_i$  表示第  $i$  个矩阵块,对每个分块矩阵进行 SVD 分解即  $A_i = U_i S_i V_i^T$ ,令  $Y_i = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r]$ ,  $\lambda_j$  表示奇异值矩阵  $S_i$  的第  $j$  个非零奇异值,其中  $k \times k, r$  是矩阵  $A_i$  的秩。

(2) 利用 Arnold 映射对待嵌入的水印图像进行加密,得到置乱后图像,利用 zigzag 扫描使水印图像变为一维数组  $W_0$ 。

(3) 计算向量  $Y_i$  的欧几里德范数,  $Norm(Y_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^r \lambda_j^2}$ ,选择 Delta 作为  $Norm(Y_i)$  的量化步长,令  $N = [Norm(Y_i) / Delta]$ ,  $[ \cdot ]$  表示取整。

(4) 根据如下规则嵌入比特  $b$ :

$$b = 1 \begin{cases} \text{if}(N \text{ 是奇数}), & N' = N + 1 \\ \text{else}, & N' = N \end{cases}$$

$$b = 0 \begin{cases} \text{if}(N \text{ 是偶数}), & N' = N \\ \text{else}, & N' = N + 1 \end{cases}$$

(5) 计算  $Norm(Y_i') = N' \times Delta + (Delta/2)$ ;  $Y_i' = Y_i \times (Norm(Y_i') / Norm(Y_i))$ 。根据向量  $Y_i'$ ,得到新的奇异值矩阵  $S_i'$ ,重构新的矩阵块  $A_i' = U_i S_i' V_i^T$ ,得到新的低频区域。

(6) 对变换低频区域图像进行重构。计算含水印图像中不变质心  $C$  和 Zernike 矩计算域的 3 个矩值  $A_{00}, A_{11}$  和  $A_{22}$  作为校正几何攻击的参数,记为密钥  $K$ 。

### 3.2 水印提取

水印提取的流程如图 3 所示。

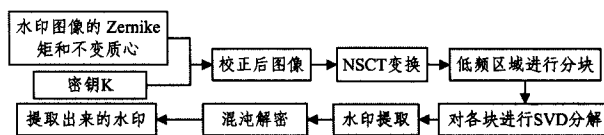


图 3 水印提取流程

水印提取的具体步骤如下。

(1) 计算水印图像的不变质心和 3 个 Zernike 矩:  $A_{00}, A_{11}$  和  $A_{22}$ ,与密钥  $K$  比较,判定攻击类型,并校正攻击参数,之后对校正后图像进行三级 NSCT 变换,获得低频区域。

(2) 对低频区域进行  $k \times k$  分块,对每一个小块  $A_i''$  进行 SVD 分解即  $A_i'' = U_i'' S_i'' V_i''^T$ ,令  $Y_i'' = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r]$ ,  $\lambda_j$  是奇异值矩阵  $S_i''$  的第  $j$  个奇异值,  $j = 1, 2, \dots, r, r$  是矩阵  $A_i''$  的秩。

(3) 计算向量  $Y_i''$  的欧几里德范数:

$$Norm(Y_i'') = \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \dots + \lambda_r^2} \quad (12)$$

(4) 计算  $N'' = [Norm(Y_i'') / Delta]$ ,  $[ \cdot ]$  表示取整。

(5) 若  $N''$  是偶数,则提取比特  $b = 1$ ,否则  $b = 0$ ,然后将提取出的一维序列进行反 zigzag 扫描合成矩阵,对该矩阵进行混沌解密即可恢复水印。

## 4 实验仿真及分析

实验仿真中使用 Windows 7 操作系统和 MATLAB 7.0 作为实验平台,选取  $512 \times 512$  像素的 Lena 灰度图像作载体图像,  $32 \times 32$  像素的“南航”二值图像作为水印,非下采样 Contourlet 变换的 PF 滤波器选用“maxflat”,DF 滤波器选用“dmaxflat7”,分解层次分别设置为  $[1, 2, 3]$ ,量化步长 Delta 设为 36。选取 PSNR 和 NC 值作为指标来评价新算法的相关性能。

### 4.1 几何攻击校准测试

实验仿真当图像遭受平移、缩放、旋转以及旋转缩放组合攻击和 RST 攻击后,通过 Zernike 矩和不变质心进行旋转角度与平移的校准,得到的校准实验结果如表 1 所列。从实验结果中可明显看出,通过 Zernike 矩校准角度与精确校准角度相差无几,同时实验结果表明通过不变质心技术可以准确

校准平移攻击后的图像。

表1 攻击校准数据

攻击方式	攻击校准		
	旋转校准	缩放校准	平移校准
平移[15,15]	/	/	[15,15]
平移[35,25]	/	/	[35,25]
旋转(5°)	4.895°	/	/
旋转(25°)	25.161°	/	/
旋转(60°)	59.988°	/	/
缩放(0.4)	/	0.398	/
缩放(0.75)	/	0.751	/
旋转(30°)+缩放(0.3)	30.063°	0.288	/
旋转(80°)+缩放(0.5)	79.976°	0.499	/
缩放(1.5)+平移[5,5]+ 旋转(15°)	14.998°	1.498	[5,5]
缩放(0.5)+平移(25,25)+ 旋转(40°)	39.985°	0.502	[25,25]

## 4.2 不可见性测试

无攻击条件下的水印嵌入和提取如图4所示。

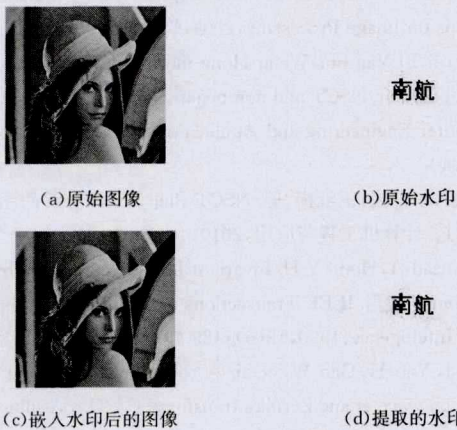


图4 无攻击条件下水印的嵌入和提取

经过多次仿真实验得出,嵌入水印后图像的  $PSNR=40.9716\text{dB}$ ,提取水印的  $NC=1.0000$ ,说明本文算法不仅对图像质量影响较小,而且在无攻击的情况下能够完全正确地提取出水印。

## 4.3 鲁棒性测试

### 4.3.1 翻转攻击

对水印图像进行水平翻转和垂直翻转攻击。利用Zernike矩参数校正图像以提取出水印,如图5所示。实验结果显示,无论哪种翻转攻击,提取的水印的  $NC$  都为1。

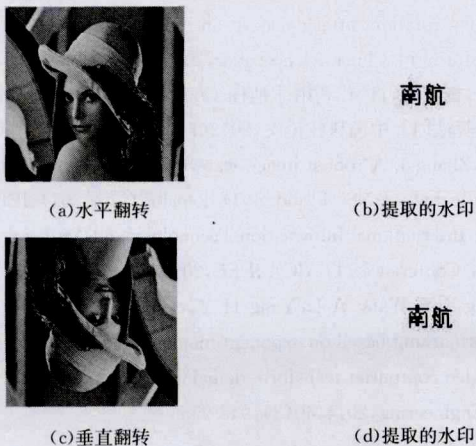


图5 翻转攻击及水印的提取

### 4.3.2 平移攻击

在实验中对含水印图像进行平移[35,25]攻击。为获得水印信息,首先计算受到攻击后的水印图像的不变质心  $C$ ,并将其与未受攻击的含水印图像进行比较计算,得出平移量校正图像后进行水印提取。实验显示,经过平移校正的图像与精准校正的图像无差别,只是缺少了受平移攻击部分的图像信息。如图6所示,图6(a)为平移攻击后含水印图像,图6(b)为提出的水印图像,归一化互相关系数  $NC=0.9071$  优于文献[7]的归一化互相关系数  $NC=0.872$ 。



图6 平移攻击及水印的提取

### 4.3.3 旋转攻击

首先计算受到攻击后的水印图像的3个矩值:  $A_{00}$ 、 $A_{11}$  和  $A_{22}$ ,然后与密钥  $K$  进行对比,确定攻击类型,并校正攻击参数,以确保水印在受到攻击的情况下能够被正确提取。

对水印图像进行间隔为  $5^\circ$  的  $0^\circ \sim 90^\circ$  ( $0^\circ \sim 360^\circ$  为  $0^\circ \sim 90^\circ$  的延拓)的旋转攻击,然后进行水印测试。各个旋转水印的归一化互相关系数  $NC$  及与文献[7]的比较结果如图7所示,结果显示利用本文算法提取出的水印健壮性优于文献[7]的。

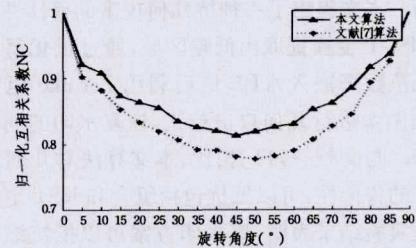


图7 旋转攻击及算法比较

### 4.3.4 缩放攻击

实验仿真含有水印图像受不同程度的缩放攻击,利用式(9)计算缩放因子校正图像。表2列出了含水印图像受到缩放攻击后原始水印和提取的水印之间的归一化互相关系数  $NC$ ,以及与其他文献算法的比较结果。实验结果显示,本文算法明显优于文献[11]算法,并且在缩放比例大于0.3的情况下优于文献[7]算法。

表2 本文算法与其他算法的比较

缩放比例	本文算法	文献[7]算法	文献[11]算法
0.3	0.9636	0.9678	0.7631
0.4	0.9974	0.9914	0.8617
0.5	1.0000	1.0000	0.8991
0.75	1.0000	1.0000	0.9861

### 4.3.5 组合攻击

对含水印图像进行组合攻击,先是图像旋转  $80^\circ$ ,再以0.5比例缩小。图8(a)是攻击图像,图8(b)是提取出的水印。相关系数  $NC$  为0.8537。



(a)组合攻击后的图像



(b)提取的水印

图8 平移攻击及水印的提取

#### 4.3.6 RST 攻击

实验首先对图像作如下几何操作:将图像放大 1.5 倍,然后向右和向下各平移 5 个像素,接着旋转  $15^\circ$ 。对失真图像进行几何校正后检测水印与标准校正后检测水印进行比较,提取出的水印结果如图 9 所示。标准校正后的归一化互相关系数  $NC$  为 0.8823,几何校正后的归一化互相关系数  $NC$  为 0.8800。从图 9 可以看出,经过几何校正,本文算法对 RST 攻击有很强的鲁棒性。



(a)RST 攻击后的图像



(b)几何校正提取的水印



(c)标准校正提取的水印

图9 平移攻击及水印的提取

**结束语** 本文提出了一种抗几何攻击的鲁棒性盲水印方法。通过 NSCT 变换提取出低频区域,通过量化每块奇异值矩阵的欧氏范数来嵌入水印,最后利用 Zernike 矩和不变质心对被检测图像进行几何攻击校正,恢复水印的同步信息后再提取水印。与文献[7,11]相比,本文算法对几何攻击方案提供了更好的鲁棒性,可以抵抗包括组合和 RST 更多类型的几何攻击。实验结果表明,该水印方案可以抵抗缩放、旋转、平移、翻转和联合攻击,以及各种常见的几何攻击。

#### 参考文献

- [1] Miller M L, Cox I J. The First 50 Years of Electronic Watermarking[J]. *Eurasip Journal on Applied Signal Processing*, 2002, 2002(2): 126-132
- [2] Haddadnia J, Ahmadi M, Faez K. An Efficient Feature Extraction Method with Pseudo-Zernike Moment in RBF Neural Network-Based Human Face Recognition System[J]. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2003(9): 890-901
- [3] Chen Q, Yang X, Zhao J. Robust image watermarking with Zernike moments[C]// *Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering*, 2005: 1340-1343
- [4] Xin Y, Liao S, Pawlak M. A Multibit Geometrically Robust Image Watermark Based on Zernike Moments[C]// *International Conference on Pattern Recognition*. IEEE Computer Society, 2004: 861-864
- [5] Li Hai-feng, Wang Shu-xun, et al. Robust Image Watermarking

Based on Block SVD and Zernike Moments[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2005, 18(3): 359-365 (in Chinese)

李海峰,王树勋,等.基于分块 SVD 和 Zernike 矩的鲁棒图像水印[J]. *模式识别与人工智能*, 2005, 18(3): 359-365

- [6] Wang Chun-tao, Ni Jiang-qun, Huang Ji-wu, et al. A RST-invariant Robust DWT-HMM Watermarking Algorithm Incorporating Zernike Moment and Template[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(7): 1250-1257 (in Chinese)
- 王春桃,倪江群,黄继武,等.结合 Zernike 矩和模板具有 RST 不变性的 DWT-HMM 鲁棒水印算法[J]. *中国图象图形学报*, 2008, 13(7): 1250-1257
- [7] Li J, Zhu Y. A geometric robust image watermarking scheme based on DWT-SVD and Zernike moments[C]// *2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology (ICCSIT)*. IEEE, 2010: 367-371
- [8] Cunha A L D, Zhou J, Do M N. The Nonsubsampled Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(10): 3089-3101
- [9] Li Mei-li, Li Yan-jun, Wang Hong-mei, et al. Image fusion algorithm based on NSCT and non-negative matrix factorization[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(8): 21-24 (in Chinese)
- 李美丽,李言俊,王红梅,等. NSCT 和非负矩阵分解的图像融合方法[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(8): 21-24
- [10] Khotanzad A, Hong Y H. Invariant Image Recognition by Zernike Moments[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 1990, 12(5): 489-497
- [11] Chen J, Yao H, Gao W, et al. A robust watermarking method based on wavelet and Zernike transform[C]// *Proceedings of the 2004 International Symposium on Circuits and Systems, 2004 (ISCAS'04)*. IEEE, Vol. 2, 2004: II-173-6
- [12] Wo Yan, Han Guo-qiang. Geometrically Robust Image Watermarking Using Modified Zernike Moments[J]. *Computer Science*, 2009, 36(5): 247-250, 281 (in Chinese)
- 沃焱,韩国强.基于修改的 Zernike 矩的抗几何攻击的数字水印方法[J]. *计算机科学*, 2009, 36(5): 247-250, 281
- [13] Narasimhulu C V, Prasad K S. A Novel Robust Watermarking Technique Based on Nonsubsampled Contourlet Transform and SVD[J]. *International Journal of Multimedia & Its Applications*, 2011, 3(8): 27-36
- [14] Zhao J, Yang B F, Xiao B. A digital watermarking method against rotation attack based on nonsubsampled Contourlet transform[J]. *China Sciencepaper*, 2012(7) (in Chinese)
- 赵杰,杨滨峰,肖斌.利用非抽样 Contourlet 变换的抗旋转攻击水印算法[J]. *中国科技论文*, 2012(7)
- [15] Li J, Zhang J. A robust image watermarking scheme with kinofom in hybrid NSCT and SVD domain[C]// *2014 IEEE 7th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. IEEE, 2014: 48-52
- [16] Wang X Y, Wang A L, Yang H Y, et al. A new robust digital watermarking based on exponent moments invariants in nonsubsampled contourlet transform domain[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2014, 40(3): 942-955