

# 基于小波矩的抗几何攻击数字图像水印算法研究

王向阳<sup>1), 2)</sup> 杨艺萍<sup>1)</sup> 杨红颖<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (辽宁师范大学计算机与信息技术学院, 大连 116029) <sup>2)</sup> (北京大学视觉与听觉信息处理国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要** 针对旋转、缩放和平移等几何攻击破坏水印检测同步, 从而导致水印检测失败等问题, 利用归一化图像的缩放、平移不变性及小波矩的旋转不变特性, 结合奇偶量化技术, 提出了一种有效抵抗几何攻击的数字图像水印新算法。首先利用图像归一化技术将原始载体映射到几何不变空间内; 然后计算归一化图像的小波矩, 并选取部分稳定的低阶小波矩用于水印嵌入; 最后利用奇偶量化方法将水印信息嵌入到所选小波矩的不变量内。仿真实验结果表明, 该图像水印方案不仅具有良好的透明性, 而且具有较强的抵抗常规信号处理、几何攻击、联合攻击等能力。

**关键词** 图像水印 几何攻击 归一化 小波矩 量化

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2009)01-0015-05

## A New Robust Digital Image Watermarking Based on Wavelet Moments

WANG Xiang-yang<sup>1), 2)</sup>, YANG Yiping<sup>1)</sup>, YANG Hong-ying<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (School of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029)

<sup>2)</sup> (National Laboratory on Machine Perception, Peking University, Beijing 100871)

**Abstract** In image watermarking, the watermark robustness to geometric transformations is still an open question. Using invariant image features to carry the watermark is an effective approach to address this problem. In this paper, a geometrically robust image watermarking algorithm using image normalization and wavelet moments is proposed. The geometrically invariant space is constructed by using image normalization. Some wavelet moments of the normalized image are selected, and their magnitudes are dither-modulated to embed the digital watermark. The watermarked image is obtained via reconstruction from the modified moments. Simulation results show that the hidden message can be decoded at low error rates, robust against image rotation, scaling and translation, and as well a variety of other distortions such as lossy compression.

**Keywords** image watermarking, geometric attacks, image normalization, wavelet moments, quantization

## 0 引言

近年来, 数字图像水印研究取得了很大进展, 但抗几何攻击的强鲁棒图像水印算法研究仍然是一项富有挑战性的工作<sup>[1]</sup>。截止到目前, 人们主要采用 3 类方案设计抗几何攻击的鲁棒图像水印算法<sup>[2]</sup>, 分别为构造同步不变特征、隐藏模板或可识别结构、利用原始数据重要特征等。其中, 基于同步不变特征的图像水印方案以其工作原理简单、无需辅助信

息、检测性能稳定等特点而受到人们重视, 该类方案是从原始图像中找到具有同步不变性的量来隐藏水印, 而人们所采纳的同步不变量主要包括 Fourier-Mellin 变换、Radon 变换和几何不变矩等。

在众多几何不变矩中, Zemke 矩与伪 Zemke 矩以其表达有效、描述精确、可任意构造高阶矩等特点而得到广泛应用。Kin 等人通过修改低 5 阶 Zemke 矩实现了数字水印嵌入<sup>[3]</sup>, 但水印信息容量仅仅为 2bits。Chen 等人计算水印图像的 Zemke 矩<sup>[4]</sup>, 重构后直接嵌入到原始载体中, 但其无法有效

基金项目: 国家自然科学基金项目 (60773031, 60873222); 辽宁省教育厅高等学校科研项目 (2008351)

收稿日期: 2008-09-05 改回日期: 2008-11-11

第一作者简介: 王向阳 (1965—), 男, 教授。主要研究领域为网络信息安全、视听觉信息计算。E-mail: Wxy37@126.com

抵抗缩放和平移等攻击。Xin等人提出了一种基于伪Zemke矩的鲁棒图像水印方案<sup>[5]</sup>，其首先计算原始载体图像的伪Zemke矩，然后利用抖动调制方法将水印信息嵌入到部分伪Zemke矩幅值中。Xin等人全面分析了Zemke矩和伪Zemke矩的不变特性<sup>[6]</sup>，给出了Zemke矩与伪Zemke矩的选取规则，进而构造了基于Zemke矩与伪Zemke矩的鲁棒图像水印方案。从理论上讲，Zemke矩与伪Zemke矩均可较好描述图像特征，但由于计算是在空间域完成，故其仅能捕获图像全局特征，而无法得到图像局部特征。此外，Zemke矩与伪Zemke矩还容易受噪声干扰。

小波矩<sup>[7]</sup>不仅融合了小波分析与不变矩的优点，能够降低小波变换对信号分析的几何变化敏感性，而且提高了对图像精细结构的把握程度。本文以小波矩理论及图像归一化技术为基础，提出了一种可有效抵抗几何攻击的数字图像水印新方案。

### 1 小波矩基本理论

设  $f(x, y)$  代表某一连续图像函数，则可将图像的连续标准矩定义为

$$M_{p,q} = \iint y^q f(x, y) dx dy \tag{1}$$

将式(1)从直角坐标系转换到极坐标系，可以得到矩特征表达式

$$F_{p,q} = \iint r; \theta) g_p(r) e^{jq\theta} r dr d\theta \tag{2}$$

这里， $F_{p,q}$  为图像的  $p+q$  阶矩； $g_p(r)$  为极径变量  $r$  的函数； $p, q$  均为整数。

为把 2 维图像特征提取简化成 1 维图像特征提取，可将式(2)改写为

$$F_{p,q} = \int (r) g_p(r) r dr \tag{3}$$

比较式(2)和式(3)，有

$$s_q(r) = \int r; \theta) e^{jq\theta} d\theta$$

所谓图像的小波矩，就是指取小波基函数作为  $g_p(r)$  而得到的矩特征  $F_{p,q}$ 。考虑小波函数族

$$\Psi_{a,b}(r) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi \left| \frac{r-b}{a} \right| \tag{4}$$

式中， $a$  是尺度因子， $b$  是平移因子。用式(4)代替式(3)中的  $g_p(r)$ ，即可得到图像小波矩。

鉴于三次 B 样条函数具有良好的平滑性、对称性、紧支集、高斯逼近性和时频局部性，且形式接近

于Lis(或Zemke)多项式矩<sup>[7]</sup>，故本文采用三次 B 样条函数作为母小波  $\Psi(r)$ ，即

$$\Psi(r) = \frac{4a^{n+1}}{\sqrt{2\pi(n+1)}} \sigma_w \cos(2\pi f_0(2r-1)) \times \exp \left| -\frac{(2r-1)^2}{2\sigma_w^2(n+1)} \right| \tag{5}$$

式中， $n = 3$   $a = 0.697\ 066$   $f = 0.491\ 77$   $\sigma_w^2 = 0.561\ 145$ 。

在实际应用过程中，需要对  $\Psi_{a,b}(r)$  进行离散化处理。此时，尺度因子  $a$  和平移因子  $b$  的离散化可分别通过  $a = a_0^m$  和  $b = nb_0 a_0^m$  来进行。这里， $m, n$  是整数。由于图像总是通过处理映射到区域  $\{r \leq 1\}$  内，故可把参数设置为  $a_0 = b_0 = 0.5$   $m = 0, 1, 2, 3, \dots$   $n = 0, 1, 2, \dots, 2^{m+1}$ 。离散化的小波函数表达式为

$$\Psi_{m,n}(r) = 2^{m/2} \Psi(2^m r - 0.5n)$$

选择不同的  $m$  和  $n$  值，即可得到图像的全局特征和局部特征。因此，可将小波矩不变量定义为

$$\|F_{m,n,q}\| = \left\| \int (r) \Psi_{m,n}(r) r dr \right\|$$

式中， $m = 0, 1, 2, 3, \dots$   $n = 0, 1, \dots, 2^{m+1}$   $q = 0, 1, 2, 3, \dots$ 。

由于小波矩特征  $F_{p,q} = \int (r) g_p(r) r dr$  实质上是对  $s_q(r) r$  求小波变换，所以对  $F_{a,b,q}$  求逆可得到  $s_q(r) r = \text{IWT}(F_{a,b,q})$ ，即

$$\int r; \theta) r e^{jq\theta} d\theta = \text{IWT}(F_{a,b,q})$$

于是，有

$$f(r; \theta) = \frac{1}{r} \int \text{IWT}(F_{a,b,q}) e^{-jq\theta} dq$$

式中， $\text{IWT}()$  为整数小波变换，由于小波矩的阶数  $q$  是整数，所以将上式离散化即可求得逆小波矩。进一步，将极坐标还原成直角坐标便得到了重构图像。

总体说来，小波矩是一个理想的形状描述算子，其具有旋转不变、低噪声敏感等优点。尽管小波矩描述子也存在不足之处，即它没有平移不变性和比例不变性，但完全可以通过图像归一化等方法，使其平移不变性和比例不变性在某种程度上得到实现。

### 2 数字水印的嵌入

设原始载体为 256 级灰度图像

$$I = \{f(x, y), 1 \leq x \leq N; 1 \leq y \leq N\}$$

其中， $f(x, y)$  表示原始载体第  $x$  行、第  $y$  列的像素灰

度值。则数字水印的嵌入过程可描述如下:

1) 水印产生。由密钥  $Key1$  产生一个伪随机序列  $W = \{w_i, i = 1, \dots, L\}$  作为数字水印信息。其中,  $L$  为数字水印的大小,  $w_i \in \{0, 1\}$ 。

2) 图像归一化。对原始载体图像进行归一化处理<sup>[8]</sup>, 以消除缩放、平移等攻击影响。

3) 小波矩计算。计算所得归一化图像的小波矩, 以消除旋转攻击影响。

4) 选择小波矩。由小波矩相关理论知<sup>[7]</sup>: 部分小波矩存在微小的计算误差。也就是说, 必须合理选择小波矩用于水印嵌入。总体说来, 选择小波矩应该考虑如下两个方面: (1) 选择阶数较低的小波矩。因为当阶数  $q$  高于某一数值时, 小波矩计算将不再准确。为此, 本文选取性能稳定的低阶小波矩 ( $q = 1, 2, 3$ ) 用于嵌入水印信息; (2) 实验结果表明, 平移因子  $n = 4i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ) 的小波矩存在微小计算误差, 故不适合嵌入水印。因此, 可用于数字水印嵌入的小波矩集合为

$$S = \{F_{m, n, q}, 0 < q < 4, n \geq 0, n \neq 4i\} \quad (6)$$

为了提高系统安全性能, 可利用密钥  $Key2$  从小波矩集合  $S$  中随机选择  $L$  个小波矩  $F = (F_{m_1, n_1, q_1}, \dots, F_{m_L, n_L, q_L})$  用于水印嵌入。设其对应的小波矩不变量为  $A = (A_{m_1, n_1, q_1}, \dots, A_{m_L, n_L, q_L})$ 。

5) 数字水印嵌入。本文采用量化调制小波矩不变量的方法实现水印信号嵌入, 量化规则如下:

$$A'_{m_i, n_i, q_i} = \left\lfloor \frac{A_{m_i, n_i, q_i} + d(w_i)}{\Delta} \right\rfloor \Delta + d(w_i) \quad (i = 1, \dots, L)$$

这里,  $\lfloor \cdot \rfloor$  是四舍五入操作;  $\Delta$  是量化步长;  $d(\cdot)$  是通过密钥  $Key3$  产生的量化函数, 且满足  $d(1) = \frac{\Delta}{2} + d(0)$ ,  $d(0) \in [0, 1]$ 。

6) 含水印归一化图像生成。含水印归一化图像由两部分合并而成:

第一部分是未被修改的小波矩所重构的数字图像

$$f^*(x, y) = f_0(x, y) - f_w(x, y) \quad (7)$$

这里,  $f_0(x, y)$  是原始载体的归一化图像;  $f_w(x, y)$  是待修改小波矩的重构部分图像。

第二部分是已修改小波矩的重构部分图像  $f_w^*(x, y)$ 。

将上面两部分合并, 即得到含水印归一化图像

$$\hat{f}(x, y) = f^*(x, y) + f_w^*(x, y) \quad (8)$$

7) 含水印图像生成。对含水印归一化图像  $\hat{f}(x, y)$  进行逆归一化处理, 即可得到含水印数字图像  $\hat{I}$ 。

### 3 数字水印的检测

本文讨论的数字图像水印检测算法属于目标检测算法, 即在检测数字水印时不需要原始的载体图像。设待检测图像为  $\hat{I}$ , 则数字水印检测过程可描述如下:

(1) 对待检测图像  $\hat{I}$  实施归一化处理。

(2) 计算所得归一化图像的小波矩。

(3) 利用密钥  $Key2$  选择  $L$  个小波矩  $F' = (F'_{m_1, n_1, q_1}, \dots, F'_{m_L, n_L, q_L})$  用于水印提取。设其对应的小波矩不变量为  $A' = (A'_{m_1, n_1, q_1}, \dots, A'_{m_L, n_L, q_L})$ 。

(4) 数字水印提取。首先, 利用密钥  $Key3$  产生量化函数  $d(\cdot)$ , 使之满足  $d(1) = \frac{\Delta}{2} + d(0)$ , 且  $d(0) \in [0, 1]$ 。

然后, 采用与嵌入过程相同的量化公式, 用两个量化函数  $d(0)$ ,  $d(1)$  分别量化  $A'_{m_i, n_i, q_i}$  ( $i = 1, \dots, L$ )

$$(A'_{m_i, n_i, q_i})_{0j} = \left\lfloor \frac{A'_{m_i, n_i, q_i} - d(j)}{\Delta} \right\rfloor \Delta + d(j) \quad (j = 0, 1)$$

通过上式, 可以得到两组向量式  $(A'_{m_i, n_i, q_i})_0$  和  $(A'_{m_i, n_i, q_i})_1$ ,  $i = 1, \dots, L$ 。

最后, 通过比较  $A'_{m_i, n_i, q_i}$  及其两组量化式距离<sup>[3]</sup> 提取水印信息, 即

$$w_i = \arg \min_{j \in \{0, 1\}} ((A'_{m_i, n_i, q_i})_{0j} - (A'_{m_i, n_i, q_i}))^2 \quad (i = 1, \dots, L)$$

设  $\sigma_w^2$  表示最大含水印图像方差,  $\sigma_n^2$  为高斯白噪声方差, 则整个图像的数字水印容量为

$$C = \frac{N \times N}{2} \log_2 \left[ 1 + \frac{\sigma_w^2}{\sigma_n^2} \right]$$

### 4 实验结果与结论

为了验证本文数字图像水印算法的高效性, 以下分别给出了透明性能测试、抗攻击能力测试的实验结果, 并对 Zemike 矩方法、伪 Zemike 矩方法进行了对比。实验中, 所选用的原始载体分别为  $128 \times 128 \times 8$  bits 的标准灰度图像 Lena、Baboon 和 Barbara。数字水印采用了 64 bits 的二元随机序列。另外,

量化步长  $\Delta=20$ 。以下在完全相同的实验环境和条件下,给出了 3 种图像水印方法的透明性对比(如表 1 所示)。图 1 给出了本文方法的含水印图像 Lena、Baboon 和 Barbara。图 2 给出了本文方法的差值图像(原始图像和含水印图像的差值图像,已将像素扩大 50 倍显示)。

表 1 含水印图像与原始载体间的峰值信噪比

Tab 1 The PSNR for three image watermarking

图像	本文算法	Zemike 矩法	伪 Zemike 矩法
Lenaon	46.458	44.367	44.243
Baboon	46.461	46.035	45.012
Barbara	44.743	44.765	44.384

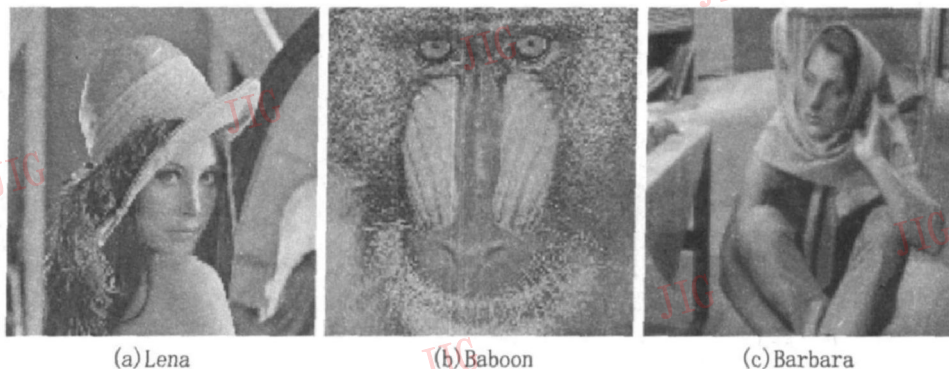


图 1 数字水印的嵌入效果(含水印图像)

Fig. 1 The watermarked image

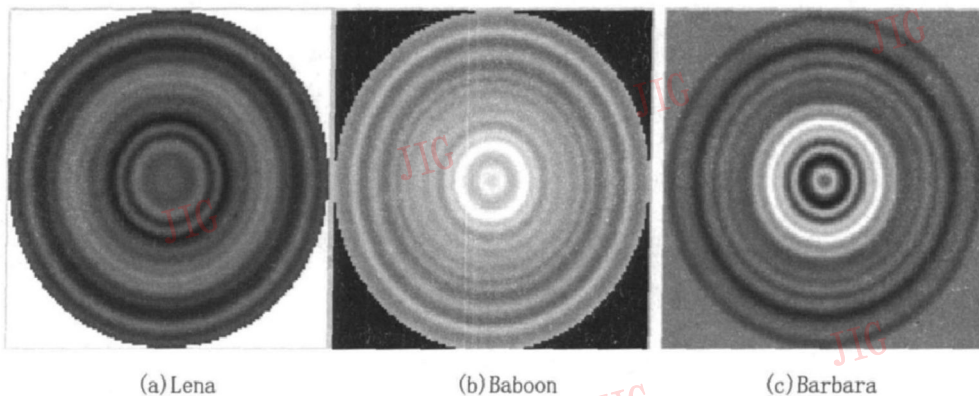


图 2 含水印图像与原始载体的差值图像

Fig. 2 The difference image

为了检测本文算法的鲁棒性能,仿真实验分别对本文算法、Zemike 矩方法及伪 Zemike 矩方法的含水印图像进行了一系列攻击。在完全相同的实验

环境和条件下,表 2 和表 3 分别给出了 3 种方法的抗攻击能力。

表 2 数字水印对常规信号处理的抵抗能力(失真率 BER)

Tab 2 The watermark detection results for common signal processing (BER)

攻击方式	Lena			Baboon			Barbara		
	本文方法	伪 Zemike 矩法	Zemike 矩法	本文方法	伪 Zemike 矩法	Zemike 矩法	本文方法	伪 Zemike 矩法	Zemike 矩法
JPEG 压缩 70	0	0	15.62	0	0	1.56	0	0	0
JPEG 压缩 30	3.08	4.69	15.62	5.70	7.56	9.35	0	1.56	4.68
高斯滤波 3*3	6.40	10.94	15.62	6.01	8.25	23.43	13.27	18.75	32.81
高斯噪声 0.01	5.53	15.62	42.18	12.35	18.75	37.50	9.08	23.43	45.31
椒盐噪声 0.01	3.43	9.37	51.56	3.84	18.75	28.12	8.75	12.25	20.31

表 3 数字水印对几何攻击及联合攻击的抵抗能力 (失真率 BER)

Tab 3 The watermark detection results for geometric attacks and combination attack (BER)

攻击方式	Lena			Baboon			Barbara			
	本文方法	伪 Zemike矩法	Zemike矩法	本文方法	伪 Zemike矩法	Zemike矩法	本文方法	伪 Zemike矩法	Zemike矩法	
旋转	10°	0	1.00	1.56	0.24	1.56	7.81	0	2.01	4.68
	15°	0	3.12	7.81	1.17	3.12	4.68	0	0	9.37
缩放	0.8	6.02	8.00	7.81	5.26	7.81	12.50	2.45	7.81	15.62
	1.2	0.93	1.05	1.21	0	0	1.56	0.90	1.15	2.08
平移 (水平 10、 垂直 10)		0	0	28.43	0	0	30.00	0	0	30.00
缩放 1.2+ 旋转 10°		1.24	3.12	4.68	1.07	3.02	1.56	0	3.25	9.37
旋转 10°+ 平移 20		3.30	9.37	25.31	5.29	9.81	28.43	6.73	9.94	31.56

本文以小波矩理论及图像归一化技术为基础,提出了一种可有效抵抗几何攻击的数字图像水印新算法,其主要特点为:(1)具有较好的抗噪声攻击能力;(2)能够有效抵抗平移、缩放、联合攻击等多种形式的几何攻击;(3)算法简单、容易实现,且抽取水印时无需原始载体。其整体性能明显优于 Zemike矩、伪 Zemike矩图像水印方案。

### 参考文献 (References)

- [1] Cox I J, Matthew L M, Jeffrey A B, et al. Digital Watermarking and Steganography [M], Second Edition. Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann Publishers (Elsevier), 2007.
- [2] Zheng Dong, Liu Yan, Zhao Jiyang, Abdumotaleb El saddik. A survey of RST invariant image watermarking algorithms [J]. ACM Computing Surveys, 2007, 39(2): 1-91.
- [3] Kim H S, Lee H K. Invariant image watermark using zemike moments [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2003, 13(8): 766-775.
- [4] Chen Q, Yang X L, Zhao J Y. Robust image watermarking with zemike moments [C] // Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE). Saskatoon, Saskatchewan, Canada: IEEE Press, 2005, 1340-1343.
- [5] Xin Y, Liao S, Pawlak M. Geometrically robust image watermarking via pseudo-Zemike moments [C] // Proceedings of IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Ontario, Canada [s.n.], 2004, 2(2): 939-942.
- [6] Xin Yongqing, Liao Simon, Pawlak M. Circularly orthogonal moments for geometrically robust image watermarking [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(12): 3740-3752.
- [7] Cohen L. Wavelet moments and time-frequency analysis [C] // Proceedings of SPIE, Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures and Implementations IX, Denver, Colo, USA: [s.n.], 1999, 3807: 434-445.
- [8] Son Y H, You B J, Oh S R, et al. Affine-invariant image normalization for Log-Polar Images using moments [C] // Proceedings of the 2002 International Conference on Control, Automation, and Systems, Gyeongju, Korea [s.n.], 2003, 1140-1145.