

# 基于修改的 Zernike 矩的抗几何攻击的数字水印方法

沃 焱 韩国强

(华南理工大学计算机科学与工程学院 广州 510640)

**摘 要** 利用图像 Zernike 矩的幅度具有旋转不变的性质,提出了一种抗几何攻击的图像盲水印算法。算法首先对载体图像进行分块,计算子图像的 Zernike 矩后将其进行正则化,对正则化后的 Zernike 矩进行筛选,根据水印信息对选中的 Zernike 矩进行修改,并对差矢量进行 Zernike 矩重构,通过将重构的图像在空域迭加到原始子图像中实现水印的嵌入。该算法在抽取水印时不需要原始载体图像和原始水印。实验结果表明,该算法能够抵抗旋转、缩放攻击、裁剪攻击、JPEG 压缩、噪声、滤波等常规攻击。

**关键词** 信息隐藏,图像水印,几何攻击,Zernike 矩

**中图法分类号** TP391.4 **文献标识码** A

## Geometrically Robust Image Watermarking Using Modified Zernike Moments

WO Yan HAN Guo-qiang

(College of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract** A geometrically robust blind watermarking algorithm was proposed by using the rotation invariant property of Zernike moments. This arithmetic divided the carrier image into sub-images; then computed and normalized the Zernike moments of the sub-images. The normalized Zernike moments were selected to be modified according to the watermark bits. And the difference vector will be reconstructed and added to the cover image in spatial domain to obtain the watermarked image. This arithmetic can detect the digital watermark without the original carrier image and the original watermark. Experimental results show its robustness to rotation, scaling, as well as common attacks such as JPEG compression, added noise and filtering.

**Keywords** Information hiding, Image watermarking, Geometric attacks, Zernike moments

在数字水印技术中,旋转、缩放等几何攻击能够破坏水印检测的同步性,微小的几何攻击就可能使得水印检测失败。因此,设计能够抵抗几何攻击的水印算法成为水印技术研究的一个新热点。目前,抗几何攻击的水印算法主要有基于图像特征的方法和基于不变矩的方法。在基于不变矩的方法中,Zernike 矩除了具有旋转不变性,还具有对噪声不敏感的特性,能够较好地表达图像特征<sup>[1]</sup>,因此很多学者提出了基于 Zernike 矩的抗几何攻击的数字水印方法<sup>[2-6]</sup>。Farzam<sup>[2]</sup>将水印信息嵌入 Zernike 矩,由嵌入水印信息的 Zernike 矩重建生成含水印图像。该方法对噪声、JPEG 压缩和旋转都具有鲁棒性。但要得到高质量的重建图像,需计算高阶 Zernike 矩,时间复杂度高;另外 Zernike 矩对二值图像的重构效果较好,但对于灰度图像的重构效果较差。Kim 等<sup>[3]</sup>将修改后的 Zernike 矩与原始 Zernike 矩之间的差值进行重构后,在空域通过调节加入原始图像,避免了由修改后的 Zernike 矩重构含水印图像引起的问题。该方法提取水印时需要原始水印,另外为使水印不可见需要人为进行多次调节。Xin 等<sup>[4,5]</sup>对图像进行 Zernike 矩特征矢量提取,根据随机比特序列进行

抖动调制嵌入水印,将修改后的 Zernike 矩与原始 Zernike 矩之间的差值进行重构后,在空域直接加入原始图像。

由于 Zernike 矩只具有旋转不变性,为了使其具有缩放、平移不变性需对图像进行归一化后再计算 Zernike 矩;另外,Zernike 矩对裁剪不具有鲁棒性,因此多数基于 Zernike 矩的水印算法不能抵抗裁剪攻击。在对图像进行归一化过程中因重采样和重量化而引入了误差。Kamila<sup>[7]</sup>提出一种对 Zernike 矩正则化的方法,用零阶几何矩对 Zernike 矩正则化以消除平移、旋转、缩放误差,从而使修改后的 Zernike 具有平移、旋转、缩放不变性,且对噪声不敏感。本文利用修改的 Zernike 矩(Modified Zernike Moment, MZM)的幅度具有平移、旋转、缩放不变的性质,通过对 MZM 修改方法的研究,提出了一种抗几何攻击的图像盲水印算法。该算法嵌入实际的比特序列,能够抵抗几何攻击,并能抵抗裁剪攻击,且在检测时不需要原始图像和水印信息。

## 1 Zernike 矩及其性质

### 1.1 Zernike 矩的计算与图像重构

到稿日期:2008-06-11 本课题得到国家自然科学基金资助项目(60573019),广东省自然科学基金资助项目(05103541),广东省自然科学基金博士科研启动基金资助项目(07300561),广东省重点实验室开放基金(CCNL-200704)资助。

沃 焱(1975-),女,博士,主要从事多媒体应用技术研究,E-mail:woyan@scut.edu.cn;韩国强 教授,博士生导师,主要从事多媒体应用技术研究。

单位圆内连续的图像函数  $f(x, y)$  的 Zernike 矩定义为<sup>[8]</sup>

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

其中:  $n$  为非负整数, 称为阶数;  $m$  为整数, 称为重复度。两者满足  $n - |m|$  为偶数并且  $|m| \leq n$ 。复多项式集合  $\{V_{nm}(x, y)\}$ , 构成了单位圆 ( $x^2 + y^2 \leq 1$ ) 内的完全正交集。其形式为:

$$V_{nm}(x, y) = V_{nm}(\rho, \theta) = R_{nm}(\rho) \exp(jm\theta) \quad (2)$$

$\rho, \theta$  分别为极坐标半径和角度;  $R_{nm}(\rho)$  为径向多项式, 定义为

$$R_{nm}(\rho) = \sum_{s=0}^{n-|m|/2} \frac{(-1)^s [(n-s)!] \rho^{n-2s}}{s! (\frac{n+|m|}{2}-s)! (\frac{n-|m|}{2}-s)!} \quad (3)$$

$R_{n,-m}(\rho) = R_{n,m}(\rho)$ , 这些多项式相互正交, 满足

$$\iint_{x^2+y^2 \leq 1} V_{nm}^*(x, y) \times V_{kl}(x, y) dx dy = \frac{\pi}{k+1} \delta_{nk} \delta_{ml} \quad (4)$$

其中:

$$\delta_{ab} = \begin{cases} 1, & a=b \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

Zernike 矩是将图像映射到这些正交基函数上得到的。

对于数字图像, 则将积分号用连加号来代替, 即

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_x \sum_y f(x, y) V_{nm}^*(\rho, \theta) \quad (5)$$

为了计算图像的 Zernike 矩, 选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, 单位圆外的像素在计算时不予考虑。另外有

$$A_{nm}^* = A_{n,-m} \quad (6)$$

由 Zernike 矩可重构图像。若已知图像最高  $n_{\max}$  阶的 Zernike 矩  $\{A_{nm}\}$ , 由 Zernike 基的正交性, 重构后的图像为

$$\hat{f}(x, y) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_m A_{nm} V_{nm}(\rho, \theta) \quad (7)$$

低阶 Zernike 矩包含图像的轮廓信息, 高阶矩包含了图像的细节信息。如果  $n_{\max}$  接近极限, 则重构图像接近原始图像。

## 1.2 Zernike 矩的有关性质

对于图像旋转, Zernike 矩的幅值保持不变。旋转后图像的 Zernike 矩  $A_{r_{nm}}$  与原 Zernike 矩  $A_{nm}$  的关系为<sup>[8]</sup>

$$A_{r_{nm}} = A_{nm} \exp(-jm\theta) \quad (8)$$

于是,  $|A_{r_{nm}}| = |A_{nm}|$ 。如果将图像的 Zernike 矩幅度作为水印, 水印具有旋转不变性。有许多文献根据这一性质构造了可抵抗几何攻击的数字水印<sup>[2-6]</sup>。

Zernike 矩不具有缩放不变性, 尺度和传输不变性可以通过利用图像正则化技术来达到<sup>[3]</sup>。正则化图像的 Zernike 矩幅度具有旋转、缩放和平移不变性, 且对噪声不敏感。但图像在进行正则化过程中, 因重采样和重量化而引入了误差。Kamila<sup>[7]</sup> 提出用零阶几何矩  $m_{00}$  对 Zernike 矩正则化以消除平移、缩放、旋转误差。

$$A_{nm}^N = \frac{A_{nm}}{m_{00}} \quad (9)$$

其中  $m_{00}$  是零阶常规矩:

$$m_{00} = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) \quad (10)$$

修改后的 Zernike 具有平移、旋转、缩放不变性且对噪声不敏感, 还在不变性方面明显优于由正则化图像计算 Zernike 矩的方法。

## 2 基于 Zernike 矩的抗几何攻击的水印算法

### 2.1 对 Zernike 矩的修改

最早的基于 Zernike 矩的水印算法根据量化修改后的 Zernike 矩对图像进行重建<sup>[2]</sup>, 得到含水印图像。这种方法在理论上是可行的, 但在实际应用中具有很大难度。1) 如果用于重建图像的 Zernike 矩的阶数不够高, 则重建图像的质量很差, 而高阶的 Zernike 矩计算需要耗费很多时间; 2) Zernike 矩是在单位圆内进行计算的, 所以由 Zernike 矩重建图像有损失。因此, 不能通过直接修改图像的伪 Zernike 矩嵌入水印。可以利用 Zernike 多项式, 将重构后的图像在空域直接添加到原始图像中, 以达到嵌入水印的目的<sup>[3]</sup>。

假设对原始图像  $f(x, y)$  的 Zernike 矩  $\{A_{nm}, 0 \leq n \leq n_{\max}\}$  修改  $\{\epsilon_{nm}, 0 \leq n \leq n_{\max}\}$ , 修改后的矩记为  $\{A_{nm}', 0 \leq n \leq n_{\max}\}$ , 则由修改后的矩重构的图像  $f'(x, y)$  为:

$$\begin{aligned} f'(x, y) &= \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_m A_{nm}' V_{nm} = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_m (A_{nm} + \epsilon_{nm}) V_{nm} \\ &= \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_m A_{nm} V_{nm} + \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_m \epsilon_{nm} V_{nm} \\ &= f(x, y) + \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_m \epsilon_{nm} V_{nm} \end{aligned} \quad (11)$$

重构图像与原始图像的差值图像  $g(x, y)$  为

$$g(x, y) = \hat{f}(x, y) - f(x, y) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_m \epsilon_{nm} V_{nm} \quad (12)$$

我们可以直接将差值图像  $g(x, y)$  加到载体图像  $f(x, y)$  中, 得到含水印图像。因此, 可以通过对 Zernike 矩进行修改, 并将由矩的变化量组成的矢量进行重构, 在空间域添加到原始图像中嵌入水印。

### 2.2 水印的嵌入

#### 2.2.1 Zernike 矩的量化与量化步长的计算

假设需将水印序列  $W = (w_1, w_2, \dots, w_L)$  嵌入图像  $f(x, y)$  中, 令  $A = (|A_{p_1, q_1}|, |A_{p_2, q_2}|, \dots, |A_{p_L, q_L}|)$  为水印矢量。选择水印矢量主要考虑两点: 1) 对于归一化后的  $|A_{00}|$  和  $|A_{11}|$  是独立于图像的, 因此不作为水印矢量。2) 重复度为  $4 \times i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots$ ) 的 Zernike 矩计算是不准确的, 因此也不适合于作为水印矢量<sup>[5]</sup>。将剩下的矩幅度作为水印矢量。记选取的矩集合为  $S$ , 即  $S = \{A_{nm}, 2 \leq n \leq N_{\max}, m \geq 0, m \neq 4i\}$ 。本文用奇偶量化的方式对 Zernike 矩的幅值进行量化修改, 修改后的 Zernike 矩矢量为

$$\bar{A} = (|\bar{A}_{p_1, q_1}|, |\bar{A}_{p_2, q_2}|, \dots, |\bar{A}_{p_L, q_L}|)$$

其中:

$$\begin{aligned} |\bar{A}_{p_i, q_i}| &= Q(|A_{p_i, q_i}|, \Delta) + \frac{\Delta}{2} w_i, i = 1, \dots, L \\ \bar{A}_{p_i, q_i} &= \frac{|\bar{A}_{p_i, q_i}|}{|A_{p_i, q_i}|} A_{p_i, q_i}, i = 1, \dots, L \end{aligned} \quad (13)$$

$$\epsilon_{p_i, q_i} = \bar{A}_{p_i, q_i} - A_{p_i, q_i}$$

$Q(x, \Delta)$  表示用量化步长  $\Delta$  对  $x$  量化取整, 有:

$$Q(x, \Delta) = \left\lfloor \frac{x}{\Delta} + 0.5 \right\rfloor \Delta \quad (14)$$

由于 Zernike 矩的共轭对称性, 修改  $A_{k,l}$  时, 必须同时修改  $A_{k,-l}$  来保证重构的图像为实值。根据式(12)可推知调整幅值后的 Zernike 矩与原始 Zernike 矩差值的重建图像为:

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^L [(\bar{A}_{p_i, q_i} - A_{p_i, q_i}) V_{p_i, q_i} + (\bar{A}_{p_i, -q_i} - A_{p_i, -q_i}) V_{p_i, -q_i}]$$

$$= \sum_{i=1}^L (\epsilon_{p_i, q_i} V_{p_i, q_i} + \epsilon_{p_i, -q_i} V_{p_i, -q_i}) \quad (15)$$

将  $g(x, y)$  加到载体图像  $f(x, y)$  中, 得到含水印图像  $f'(x, y)$ 。含水印图像  $f'(x, y)$  的峰值信噪比为

$$PSNR(f, f') = 10 \log_{10} \frac{255}{\sigma_e^2} \quad (16)$$

其中:

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [f(x, y) - f(x, y)]^2 = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [g(x, y)]^2 \quad (17)$$

由文献[5]有

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [g(x, y)]^2 = \frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^L \frac{1}{p_i + 1} (|\bar{A}_{p_i, q_i}| - |A_{p_i, q_i}|)^2 \quad (18)$$

$$E[|\bar{A}_{p_i, q_i}| - |A_{p_i, q_i}|]^2 = \frac{\Delta^2}{12} \quad (19)$$

故

$$E\sigma_e^2 = \frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^L \frac{1}{p_i + 1} E[|\bar{A}_{p_i, q_i}| - |A_{p_i, q_i}|]^2 = \frac{\pi \Delta^2}{24} \sum_{i=1}^L \frac{1}{p_i + 1} \quad (20)$$

由式(16)、式(20)可推知量化步长与含水印图像信噪比之间的关系为

$$\Delta = 255 \left[ 10^{\frac{PSNR}{10}} \frac{\pi}{24} \sum_{i=1}^L \frac{1}{p_i + 1} \right]^{-0.5} \quad (21)$$

在用式(13)对 Zernike 矩进行修改时, 首先要确定量化步长  $\Delta$ ,  $\Delta$  的选择决定了水印的鲁棒性和不可见性。 $\Delta$  越大, 水印的鲁棒性越好, 而水印不可见性越差。反之亦然。因此选择  $\Delta$  时需要综合考虑水印的鲁棒性和不可见性。式(21)描述了  $\Delta$  与含水印图像信噪比之间的关系, 可以根据含水印图像信噪比及嵌入的水印信息长度来确定  $\Delta$ 。含水印图像信噪比 (PSNR) 由两个因素确定: 在给定嵌入信息的长度时, PSNR 由  $\Delta$  确定,  $\Delta$  越大, 水印鲁棒性越好, 而含水印图像信噪比 PSNR 越低, 图像质量越差; 当给定  $\Delta$  时, PSNR 由嵌入信息的长度确定, 嵌入信息的长度越长, 含水印图像信噪比 PSNR 越低, 图像质量越差。反之亦然。

### 2.2.2 图像分块与分块 Zernike 矩的计算

由式(21)可见嵌入水印时调节的 Zernike 矩越多(即嵌入水印长度越大),  $\Delta$  的取值越小, 水印的鲁棒性越差; 另外, 在修改的矩数目较少时, 被修改矩的幅度变化很明显, 对其它矩幅度的影响较小。当修改的矩数目较多时, 这种影响会累积, 使得未修改的矩有较大幅度变化, 水印检测时误检率提高。此外 Zernike 矩对裁剪不具有鲁棒性, 因此如果对图像的 Zernike 矩直接进行调节, 水印算法不能抵抗裁剪攻击。为嵌入实际的比特序列, 即嵌入一定长度的水印信息, 在保证含水印图像质量的同时使嵌入水印强度较大, 同时减少调节 Zernike 矩的个数, 以避免影响累积, 本文采取对图像进行分块的方法嵌入水印。

Zernike 矩具有旋转不变性, 为使分块后的图像子块能经受同样的旋转攻击, 对图像分块时不采用常规的直接方法, 而是通过同心环的方法进行分块。图像分块和分块子图像的 Zernike 矩的计算过程如下:

#### 算法 1 图像分块及子图像的 Zernike 矩计算

1) 将图像映射到单位圆, 根据由质心确定的同心圆将图

像分割成子图像  $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ ;

2) 计算子图像的 Zernike 矩:

$$A_{mn}^i = \frac{n+1}{\pi} \sum_{(x,y) \in f_i} f(x,y) V_m^*(\rho, \theta) \quad (22)$$

3) 对子图像的 Zernike 矩进行正则化。 $A_{mn}^i$  的幅值同样具有旋转不变性, 要使  $A_{mn}^i$  的幅值具有尺度不变性和平移不变性, 同样需要用子图像的零阶常规矩对其进行正则化:

$$A_{mn}^{in} = \frac{A_{mn}^i}{m_{00}^i} \quad (23)$$

其中  $m_{00}^i$  是子图像的零阶常规矩。

### 2.2.3 嵌入算法

本文的水印算法将二值水印序列通过修改指定的矩, 并对由矩的改变量组成的差矢量进行重构, 将重构后的图像在一定强度下在空间域迭加到原始图像中, 实现水印的嵌入。水印嵌入算法描述如下:

#### 算法 2 水印嵌入算法

1) 根据所要嵌入的水印长度确定要分割的子图像数  $m$ , 将水印序列  $W$  置乱后等分成  $m$  个子序列  $\{W_i, 1 \leq i \leq m\}$ ;

2) 用算法 1 对图像分块得到子图像序列  $f = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$  及每个子图像正则化后的 Zernike 矩;

3) 对每个图像子块  $f_i$  根据矩的选择原则对矩进行筛选, 得到集合  $S_i$ ;

4) 用式(21)及给定的含水印图像所要达到的 PSNR 计算出量化步长  $\Delta$ ;

5) 水印子序列  $W_i$  对  $S_i$  中的矩进行修改, 修改方法采用式(13);

6) 对由  $e_{mn} = m_{00}^i (A_{mn}^{in} - A_{mn}^i)$  组成的矩矢量用式(15)进行重构, 得到图像  $g_i$ ; 将  $g_i$  在空域迭加到原始子图像  $f_i$  中, 得到加水印图像  $f_i'$ 。

### 2.3 水印提取

水印提取算法描述如下:

#### 算法 3 水印提取算法

1) 用算法 1 对图像分块得到子图像序列  $f' = \{f_1', f_2', \dots, f_m'\}$  及每个子图像正则化后的 Zernike 矩;

2) 对每个图像子块  $f_i'$  根据矩的选择原则对矩进行筛选, 得到集合  $S_i$ ;

3) 用二分之一  $\Delta$  对  $S_i$  中的矩进行量化, 如果量化后的值为奇数, 则该系数所含的水印信息为 1, 否则为 0, 由此测得水印子序列  $W_i^*$ ;

4) 将抽取的水印子序列  $\{W_i^*, 1 \leq i \leq m\}$  合并为水印序列  $W^*$ ;

为描述抽取水印和原始水印之间的相似性, 我们用归一化互相关<sup>[10]</sup>来度量原始水印序列  $W$  和提取水印  $W^*$  的相似性:

$$NC = \frac{\sum_{m,n} w^*(m,n) w(m,n)}{\sum_{m,n} w^2(m,n)} \quad (24)$$

## 3 试验结果和分析

图 1 是用  $256 \times 256$  的 256 灰度级 Lena 图像为载体,  $16 \times 32$  大小的二值图像为水印图像的实验结果。图 1(a) 是原始载体图像, 利用算法 1 将载体图像映射到标准圆后分成 16 块, 得图 1(b); 利用算法 2 将水印图像嵌入载体中, 得图 1

(c),图 1(d)是含水印图像,图 1(e)是利用算法 3 由图 1(d)中抽取的水印。

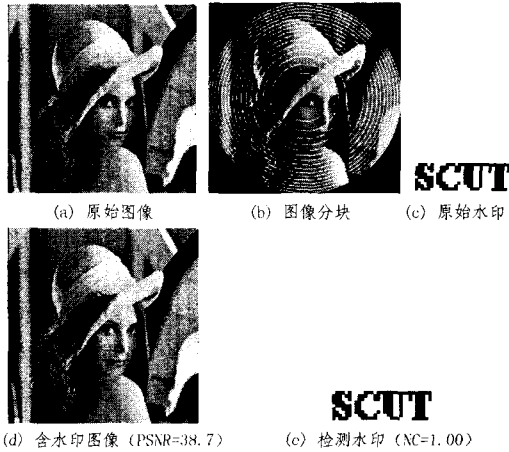


图 1 水印嵌入和提取实验结果

为验证算法对于几何攻击的鲁棒性,在载体图像中嵌入不同比特数的水印后进行旋转和缩放攻击实验。另外,对 JPEG 压缩、噪声等操作也进行了实验。

### 3.1 旋转攻击

将加水印图像进行旋转,表 1 为嵌入不同比特时检测水印的 NC 值。表 1 中的最后一列为未旋转时含水印图像的 PSNR 值。由表 1 可见,水印对于任意角度的旋转具有较好的检测性能。

表 1 水印抗旋转攻击的结果

水印大小 (bits)	15°	30°	45°	60°	75°	90°	PSNR (dB)
8×8	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	42.1
8×16	0.99	0.98	1.00	1.00	0.99	1.00	40.6
16×16	0.95	0.97	0.98	0.99	0.97	1.00	39.5
16×32	0.83	0.89	0.95	0.97	0.93	1.00	38.7

### 3.2 缩放攻击

对缩放攻击,在水印检测前首先将其恢复到原始大小。实验中,对图像进行 0.5~4.0 倍的缩放。水印检测的 NC 值曲线如图 2 所示。由该图可见,水印对于缩放具有较好的检测性能。

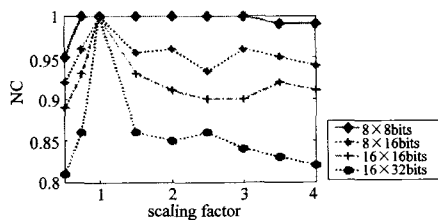


图 2 水印抗缩放攻击的结果

### 3.3 裁剪攻击

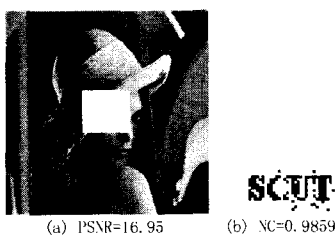


图 3 水印抗裁剪攻击的结果

由于对图像进行裁剪以后 Zernike 矩是不同的,因此大多基于 Zernike 矩的数字水印方法很难抵抗裁剪攻击。本文利用分块的方法进行水印嵌入,因此裁减只会影响到被裁剪区域所在的块,而其余没有被裁剪的图像块的水印提取没有受到影响。对裁剪攻击进行实验,水印检测结果如图 3 所示。

### 3.4 常规攻击

常规攻击包括 JPEG 压缩、加噪处理和滤波。JPEG 压缩的检测结果如图 4 所示。可见,本文算法对于品质因数在 30%以上的 JPEG 压缩,NC 检测值均在 0.80 以上。

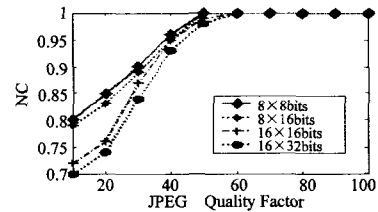


图 4 水印抗 JPEG 压缩的结果

在嵌入 16×32bits 时,分别添加高斯、椒盐和乘性噪声(方差均为 0.005),检测结果分别为 0.96,0.97 和 0.95,说明本文算法对噪声具有很好的鲁棒性。对嵌入 8×8bits,8×16bits,16×16bits 以及 16×32bits 的含水印图像分别用 3×3 大小的窗口进行中值滤波后的检测结果分别为 0.99,0.99,0.97 和 0.96,说明本文算法对滤波同样具有很好的鲁棒性。

**结束语** 本文利用修改的 Zernike 矩的幅度具有平移、旋转、缩放不变的性质,提出了一种抗几何攻击的图像盲水印算法。该算法具有以下特点:1) 将图像进行分块后计算 Zernike 矩并进行正则化,水印嵌入在图像子块的 Zernike 矩中,从而水印算法在抵抗几何攻击的同时可抵抗裁剪攻击。另外,在图像子块中嵌入水印,可减少调节 Zernike 矩的个数,从而可提高量化步长,减少 Zernike 矩之间的相互影响,提高水印算法的鲁棒性。2) 算法根据水印信息对选中的 Zernike 进行修改,并对差矢量进行 Zernike 矩重构,通过将重构的图像在空域迭加到原始图像中实现水印的嵌入,避免了由 Zernike 矩重构含水印图像而带来的图像降质。3) 算法可根据量化步长来控制含水印图像的 PSNR,避免了为使水印不可见而需要重复调节。4) 抽取水印时不需要原始载体图像和原始水印。

该算法可嵌入实际的比特序列。实验结果证明本文提出的水印算法能够抵抗几何攻击,并能抵抗裁剪攻击。且在检测时不需要原始图像和水印信息,具有较好的透明性和鲁棒性,水印检测结果准确,因此具有很强的实用性。

### 参考文献

- [1] Liao S X, Pawlak M. On the accuracy of Zernike moments for image analysis[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, 1998,20 (12):1358-1364
- [2] Farzam M, Shirani S. A robust multimedia watermarking technique using Zernike transform[A]// IEEE International Workshop Multimedia Signal Processing[C]. Cannes, 3-5 Oct. 2001: 529-534
- [3] Kim H S, Lee H K. Invariant image watermark using Zernike moments [J]. IEEE Transactions on Circuits and System for Video Technology, 2003, 13(8): 766-775

(下转第 281 页)

色最深的菱形区域为覆盖次数为  $\max$  的区域,如图 7(a)所示。重建的等效范围由被覆盖次数大于  $\max/2$  的点组成,图中用黑色区域表示,如图 7(b)所示。

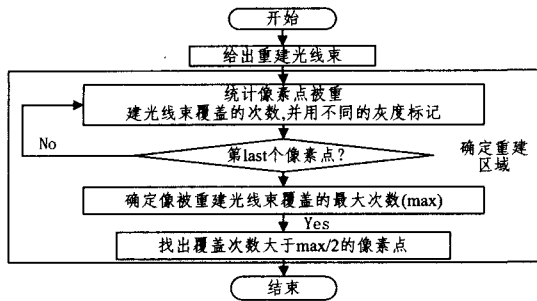


图 6 实验流程图

实验中微透镜宽度  $\varphi$  为 0.6mm,焦距  $f$  为 2mm,微透镜阵列的中心为坐标原点,重建的等效范围用黑色区域表示。图 7(b)中黑色区域即为空间一深度为 24mm 的点在分辨率无穷大时的重建范围。

继续以深度  $d=24\text{mm}$  为例,分别模拟了记录分辨率  $res$  为 8, 10, 12, 50 时的三维重建情况(如图 7(c)~图 7(f)所示)。由上面的式(8)可知,当深度  $d$  为 24mm,最小记录分辨率为 12 时,所有记录点是可分辨的。而由实验结果也可以看出,当  $res$  为 12 时,重建结果达到我们预期的效果(如图 7(e)所示),与分辨率无穷大时重建的理想结果非常接近,当  $res$  继续增大时,重建结果没有明显的变化,如图 7(e)、图 7(f)所示。

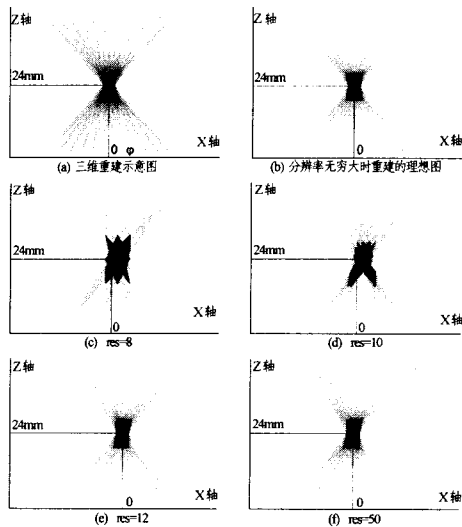


图 7 记录分辨率为 8, 10, 12, 50 时的重建图

为了验证记录分辨率与深度的关系,接下来改变点的深度进行多组重建实验。从实验中得到不同深度点恰好可被分辨的记录分辨率,并展示两者关系,如图 8 黑色标志点所示。

图中黑色线条表示理论分析得出的临界记录分辨率  $res$  值与深度  $d$  的关系。从图 8 中可以看出实验结果与理论分析结果吻合,从而得到所有临界  $res$  值与深度  $d$  成正比例关系,与前面的分析结果一致(见式(8))。

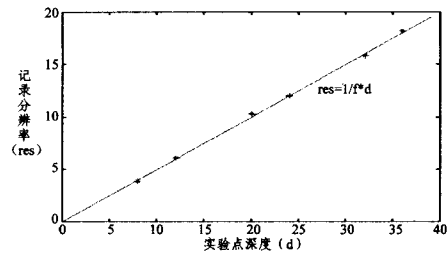


图 8 记录分辨率与深度关系图

**结束语** 本文在深度优先的 II 系统中分析研究了记录分辨率对 II 三维重建分辨率的影响,计算出在传统 II 成像系统中,当深度为 24mm 时,不影响三维重建效果的记录分辨率需达到的最小值为 12,推导出记录分辨率与深度成正比例关系,并在最后以实验验证了所得结果的正确性。本文对 II 成像系统优化参数设计、物体空间分辨率分析及未来三维电视的数据处理具有重要意义。

### 参考文献

- [1] Okoshi T. Three dimensional imaging Techniques [M]. London: Academic Press, 1976
- [2] Davis N, et al. Design and analysis of an image transfer system using microlens arrays [J]. Optical Engineering, 1994, 33 (11): 3624-3633
- [3] Kim Y, Kim J, Kang J, et al. Point light source integral imaging with improved resolution and viewing angle by the use of electrically movable pinhole array [J]. Optics Express, 2007, 15 (26): 18253-18267
- [4] Burckhardt C B. Optimum parameters and resolution limitation of integral photography [J]. J. Opt. Soc. Am., 1968, 58: 71-76
- [5] Okoshi T. Optimum design and depth resolution of lens - sheet and projection-type three-dimensional displays [J]. Applied Optics, 1971, 10: 2284-2291
- [6] Hoshino H, Okano F, Isono H, et al. Analysis of resolution limitation of integral photography [J]. J. Opt. Soc. Am., 1998, 15: 2059-2065
- [7] Park J H, Kim Y, Lee B. Elemental image generation based on integral imaging with enhanced resolution [C] // Proceedings of SPIE. 2005, 5642: 186-194
- [8] Jin F, Jang J S. Effects of device resolution on three-dimensional integral imaging [J]. Optics Letters, 2004, 29 (12): 1345-1347
- [9] Brewin M, Forman M, et al. Electronic capture and display of full parallax 3D images [C] // Proceedings of the SPIE. 1995, 2409: 118-124

(上接第 250 页)

- [4] Xin Y Q, Pawlak S. A multibit geometrically robust image watermark based on Zernike moments [A] // 17th International Conference on Pattern Recognition [C]. 23-26 Aug. 2004, 14: 861-864
- [5] Xin Y, Liao S, Pawlak M. Geometrically robust image watermarking on a circular domain [J]. Pattern Recognition, 2007, 40 (1): 3740-3752
- [6] 李雷达, 郭宝龙, 刘雅宁. 基于伪 Zernike 矩的抗几何攻击图像

水印 [J]. 光电子·激光, 2007, 18(2): 221-235

- [7] Kamila N K, Mahapatra S, Nanda S. Invariance image analysis using modified Zernike moments [J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26(1): 747-753
- [8] Xin Y, Pawlak M, Liao S. Accurate Computation of Zernike Moments in Polar Coordinates [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2): 581-587
- [9] 吴乐南. 数据压缩 [M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2005
- [10] Hsu C T, Wu J L. Image Hidden digital watermarks in images [J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1999, 8(1): 58-68