

基于图像 Tchebichef 矩抗几何攻击的零水印算法

程兴宏, 侯榆青*, 程璟星, 蒲鑫

(西北大学 信息科学与技术学院, 西安 710127)

(*通信作者电子邮箱 houyuqin@nwnu.edu.cn)

摘要: 由于目前基于图像矩技术的水印算法水印容量小, 算法复杂, 鲁棒性有待提高, 提出一种新颖的抗几何攻击的零水印算法。该算法以图像归一化技术和 Tchebichef 矩系数的特点为基础, 首先计算原始图像单位圆内旋转归一化的 Tchebichef 矩, 将 Tchebichef 矩的左上角部分扫描成数值矩阵; 然后根据数值矩阵和水印图像生成二进制密钥并保存到零水印信息库。证明版权时待检测图像也按相同的流程处理, 利用密钥和生成的数字矩阵提取待检测图像的水印。实验结果表明, 该算法对任意角度的旋转、缩放和常规信号处理及其组合攻击具有很强的鲁棒性。

关键词: 零水印; Tchebichef 矩; 图像归一化; 几何攻击; 鲁棒性

中图分类号: TP309.2 **文献标志码:** A

Image zero-watermarking algorithm against geometric attacks based on Tchebichef moments

CHENG Xinghong, HOU Yuqing*, CHENG Jingxing, PU Xin

(School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an Shaanxi 710127, China)

Abstract: The existing watermarking algorithm based on image moments has the disadvantages of small capacity, large complexity and its robustness should be improved in further study. A new zero-watermarking against geometric attacks was proposed. Using the image normalization and the features of Tchebichef moments, the rotation normalized Tchebichef moments of original image was calculated in the unit circle, and the upper-left corner of Tchebichef moments was scanned into numerical matrix. Afterwards, binary secret key was generated according to numerical matrix and watermark image, and saved to zero-watermarking information database. In detection, the same process was executed to draw out numerical matrix from the unauthenticated image, and watermark image was extracted by using the secret key and numerical matrix. The experimental results show that this algorithm is robust against rotation attacks of random angles, scaling attacks and common signal processing operations, even combined attacks.

Key words: zero-watermarking; Tchebichef moment; image normalization; geometric attack; robustness

0 引言

水印技术作为数字媒体版权保护和内容认证的重要手段之一, 已经得到广泛的关注和研究。几何攻击破坏了水印信号的同步, 改变了像素灰度值与坐标之间的对应关系, 阻止了水印信号的正常提取, 因此同步问题是抗几何攻击水印算法要解决的关键技术。图像的归一化是通过一定的算法^[1], 将图像变换为统一大小和方向的标准形式, 水印的嵌入和提取在图像统一的形式中进行, 从而实现水印信号的同步。

图像矩是一种图像形状的全局特性描述子, 提供大量物体特有的几何信息, 近年来, 矩技术作为一种有效的图像特征描述方法, 被应用到图像水印领域^[2-5]。常用的图像矩有 Hu 矩^[6]、Zernike 矩^[7-8]、Tchebichef 矩^[9]等。Hu 矩是离散矩, 不具有正交性, 由于可利用的不变矩的数量有限, 水印容量受到限制。Zernike 矩是连续正交矩, 具有旋转不变性, 对噪声不敏感且能较好地表达图像的特征, 如王忠等^[8]利用 Zernike 矩的旋转不变性构造抗几何攻击的水印算法。但 Zernike 矩是连续矩, 数字图像是离散信号, 图像的 Zernike 矩计算过程中存在离散近似误差和坐标空间转换。Tchebichef 矩是一种离散正交矩, 对噪声不敏感, 有很好的重构性。如孙丽萍等^[9]

利用图像的 Tchebichef 矩重构性能好的特点, 通过修改 Tchebichef 矩系数的方法构造扩频水印算法, 但扩频水印算法存在不可见性和鲁棒性相互制约, 提取水印需要原始图像等问题。

零水印^[10]是一种不改变图像内容, 利用图像重要特征构造水印信息的算法, 有效地解决了水印算法不可感知性、鲁棒性和嵌入容量相互制约的问题。现有的零水印算法主要包括基于图像特征值的方法^[11]、基于图像变换域的方法^[12-13]、基于图像不变矩的方法^[6-8]等。本文利用 Tchebichef 矩对噪声的不敏感性和良好的图像特征描述能力, 结合图像归一化技术, 用体现图像轮廓信息的低阶 Tchebichef 矩构造零水印算法。该算法不需要确定图像经过的几何攻击类型, 也不用将图像逆归一化, 适用于原始图像不可得的公共水印情况。

1 图像的 Tchebichef 矩

Tchebichef 矩是以 Tchebichef 多项式为核函数的离散正交矩, Tchebichef 多项式定义^[14]如下:

$$t_n(x) = (1 - N)_n {}_3F_2(-n, -x, 1 + n; 1, 1 - N; 1) \quad (1)$$

其中: $x, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1, N$ 为图像的大小; ${}_3F_2(\cdot)$ 是超几何分布函数, 其定义为

收稿日期: 2012-08-02; 修回日期: 2012-09-18。 基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2011JQ8029, 2009JM8004)。

作者简介: 程兴宏(1983-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理、图像水印; 侯榆青(1963-), 女, 陕西榆林人, 教授, 主要研究方向: 数字图像处理、数字水印; 程璟星(1989-), 男, 山西晋中人, 硕士研究生, 主要研究方向: 数字信号处理; 蒲鑫(1986-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要研究方向: 图形图像处理。

$${}_3F_2(a, b, c; d, e; z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(a)_k (b)_k (c)_k z^k}{(d)_k (e)_k k!} \quad (2)$$

$(a)_k$ 为 Pochhammer 符号,其定义为

$$(a)_k = a(a+1)\cdots(a+k-1) = \frac{\Gamma(a+k)}{\Gamma(a)} \quad (3)$$

Tchebichef 多项式满足如下正交属性:

$$\sum_{x=0}^{N-1} t_m(x) t_n(x) = \rho(n, N) \delta_{mn} \quad (4)$$

$$\rho(n, N) = (2n)! \binom{N+n}{2n+1} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: $0 \leq m, n \leq N-1$ 。

为了避免多项式值的发散,提高图像重构精度,对多项式进行正则化处理。规格化 Tchebichef 多项式定义^[15]如下:

$$\tilde{t}_n(x) = \frac{t_n(x)}{\beta(n, N)} \quad (6)$$

其中 $\beta(n, N)$ 是一个与 x 无关的恒量。如果 $\beta(n, N) = \sqrt{\rho(n, N)}$, 则得到正则化的 Tchebichef 多项式。

当 $N = 50$ 时,正则化 Tchebichef 多项式 $\tilde{t}_n(x)$ 初始几阶的值如图1所示。

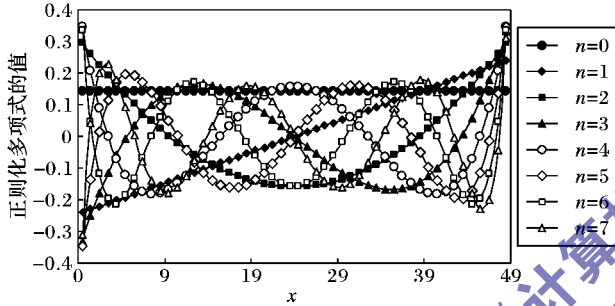


图1 正则化 Tchebichef 多项式曲线图 ($N = 50$)

大小为 $N \times N$ 、灰度函数为 $f(x, y)$ 的图像,其 $(m+n)$ 阶 Tchebichef 矩用正则化 Tchebichef 多项式表示为

$$T_{mn} = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{N-1} \tilde{t}_m(x) \tilde{t}_n(y) f(x, y) \quad (7)$$

由式(7)得出正则化 Tchebichef 矩反变换为

$$f(x, y) = \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} T_{mn} \tilde{t}_m(x) \tilde{t}_n(y) \quad (8)$$

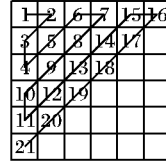
可以看出,图像的 Tchebichef 矩具有良好的特征描述能力,图像可以通过其 Tchebichef 矩完全重建。

2 水印算法

图像的 Tchebichef 矩是正交矩,其核函数如图1所示, n 越小,多项式 $\tilde{t}_n(x)$ 频率越低; n 越大,多项式 $\tilde{t}_n(x)$ 频率越高。因此低阶 Tchebichef 矩包含图像的轮廓信息,高阶矩包含图像的细节信息。计算图像的特征矩,由矩幅度分布可知,其低阶矩系数较大,高阶矩系数趋近于0。图像的特征矩本身不具备几何不变性,当图像受到常规信号处理和缩放攻击时,代表图像轮廓信息的低阶 Tchebichef 矩大小发生变化,但正负号并未发生变化;当图像被旋转时,低阶 Tchebichef 矩大小和正负号均发生变化。因此本文利用这一性质和图像的旋转归一化构造能够抗几何攻击的水印算法。将图像 Tchebichef 矩左上角的低阶矩按图2(a)所示的 Zig-Zag 扫描方式扫描成序列,选择绝对值较大的矩系数组成矩阵,正的系数用“1”表示,负的系数用“0”表示,得到图像的特征矩阵。

水印图像采用图2(b)所示的二值图像。由于图像的特征矩阵是二值矩阵,根据式(9)异或运算规则,将特征矩阵与 Arnold 置乱的二值水印逐位异或生成密钥,提取水印时将图像的特征矩阵与密钥异或运算,再通过 Arnold 置乱恢复水印图像。

$$\begin{cases} T \oplus W = K \\ T \oplus K = W \end{cases} \quad (9)$$



数字
水印



(a) Zig-Zag 扫描方式 (b) 原始水印 (c) 置乱水印(置乱次数为9)

图2 Zig-Zag 扫描方式和水印图像的预处理

2.1 图像的旋转归一化

由于图像全局旋转归一化前后的大小不同,本文借鉴文献[9]图像单位圆旋转归一化的方法。

灰度值为 $f(x, y)$ 的图像其 $p+q$ 阶几何矩 $m_{p,q}$ 定义^[9]如下,式(10)、(11)中 Γ 表示图像支集。

$$m_{p,q} = \iint_{\Gamma} x^p y^q f(x, y) dx dy \quad (10)$$

图像的 $p+q$ 阶中心矩 μ_{pq} 定义为

$$\mu_{pq} = \iint_{\Gamma} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy \quad (11)$$

其中: $\bar{x} = m_{1,0}/m_{0,0}$, $\bar{y} = m_{0,1}/m_{0,0}$ 为图像的质心。

定义变量 t_1 、 t_2 和 t_3 如下, α 为旋转归一化角度。

$$t_1 = \mu_{12} - \mu_{30} \quad (12)$$

$$t_2 = \mu_{21} - \mu_{03} \quad (13)$$

$$\alpha = \arctan(-t_1/t_2) \quad (14)$$

$$t_3 = -t_1 \sin \alpha + t_2 \cos \alpha \quad (15)$$

当 $t_3 < 0$ 时, $\alpha = \alpha - \pi$ 。图像旋转归一化角度 α 是相对于质心 (\bar{x}, \bar{y}) 的,将图像旋转 α ,即可得原始图像的旋转归一化图像。

如图3所示,第一列分别为原始 Lena 图像、旋转 30° 和缩小 0.8 倍 Lena 图像,第二列分别为第一列对应图像的单位圆内图像,第三列分别为第二列对应图像的旋转归一化。不管单位圆内图像大小和初始角度是多少,旋转归一化后图像具有相同的方向。

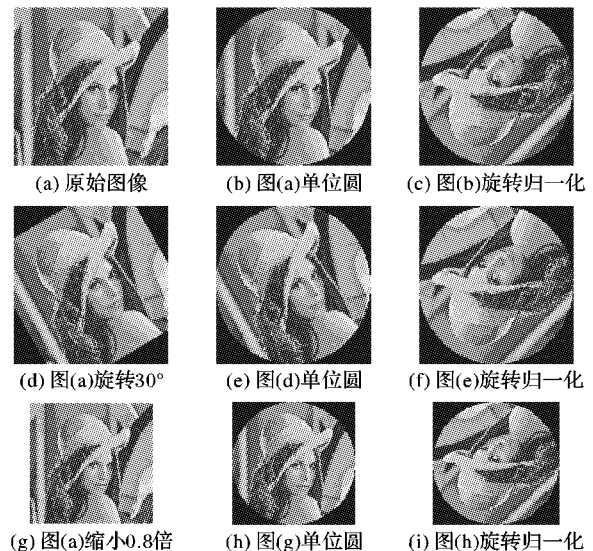


图3 图像几何攻击后的旋转归一化

2.2 零水印的构造

综上所述,图像特征水印构造过程描述如下:

步骤1 将原始图像单位圆内部分旋转归一化;

步骤2 计算归一化处理图像的 Tchebichef 矩左上角部分,按 Zig-Zag 扫描方式扫描生成数值序列;

步骤3 选择绝对值较大的矩系数组成矩阵,并记录选择矩系数的位置信息;

步骤4 根据矩阵数值的正负生成特征矩阵,并与 Arnold 置乱的二值水印图像逐位异或生成密钥,加上日期戳向零水印信息库登记注册。

2.3 水印检测过程

水印检测过程如下:

步骤1 求待检测图像的单位圆内图像并且旋转归一化;

步骤2 计算旋转归一化后图像 Tchebichef 矩左上角的数据,按 Zig-Zag 扫描方式扫描成序列;

步骤3 提取相应位置的矩系数组成矩阵,根据数值矩阵的正负生成特征矩阵,与注册的相似图像密钥逐位异或运算;

步骤4 根据 Arnold 置乱次数恢复水印图像并计算和原始水印图像的相似度,根据阈值认定版权。

检测过程如图4所示。

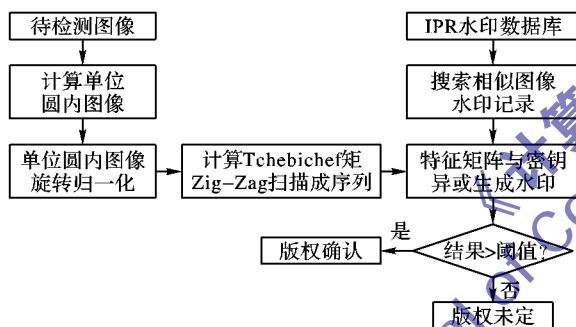


图4 零水印检测流程

2.4 水印检测阈值的确定

由于原始图像的水印为二值图像,因此相似度 S 定义为提取水印与原始水印对应位相同的个数与水印元素总数的比值,取值范围在 $[0,1]$ 。不相关的图像按照本文算法提取的水印和原始水印的相似度约为 0.5。如图5所示,任意选择 200 幅图像按本文算法提取的水印和 Lena 图像的水印相似度最大为 0.5602,最小为 0.4467,均值为 0.5014。对于同一幅图像,即使在遭受严重攻击且图像质量严重失真的情况下,水印相似度仍保持在 0.8 以上。基于上述实验和分析,阈值 T 选择 0.75 ~ 0.85 的值,具体值由多次实验确定。 T 过大则会产生水印检测的漏警错误,而 T 过小则会导致水印检测的虚警错误。在计算相似度 S 后,若 S 大于识别阈值 T ,则认为待检测图像含有原始图像的水印信息,否则认为水印不存在。

3 实验仿真与分析

本文采用测试图像 Lena(256 × 256)作为实验素材,对于其他图像也有类似的结论。将原始图像单位圆旋转归一化,计算图像的 Tchebichef 矩 T_{mn} ,其中 $0 \leq m, n, m+n \leq 50$,将其按照 Zig-Zag 扫描方式扫描成序列,选择绝对值较大的 1024 个矩系数组成矩阵,将矩阵按正负性生成特征矩阵,与

Arnold 置乱的水印图像(32 × 32)逐位异或生成密钥,存入零水印信息库作为版权证明。在图像没有失真的情况下,提取的水印和原始水印的相似度应为 1,实际情况中图像会受到各种攻击,相似度 S 随着攻击强度的增大而减少。经过多次实验,本文取阈值 T 为 0.82,将本文算法数据和参考文献[8]作对比。

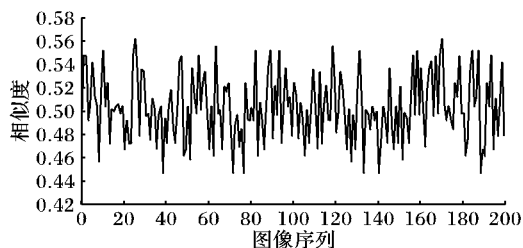


图5 Lena 图像和随机图像特征水印的相似度

3.1 常规信号处理测试

将原始图像分别进行 JPEG 压缩、加噪和滤波,计算处理后图像和原始图像的峰值信噪比(Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR)及水印相似度。

表1 常规信号处理检测结果

攻击操作	PSNR/dB	相似度	
		本文方法	文献[8]方法
JPEG 压缩(Q=10)	27.5010	0.9564	—
JPEG 压缩(Q=20)	29.8459	0.9873	0.9846
高斯噪声(0,0.05)	13.1085	0.9284	0.9110
椒盐噪声(0.05)	17.8910	0.9590	0.9167
椒盐噪声(0.08)	15.9348	0.9443	0.9086
维纳滤波(7×7)	28.5987	0.9843	—
中值滤波(7×7)	25.3985	0.9611	—

注:“—”表示文献[8]没有提供该数据。

如表1所示,对原始图像进行常规信号处理后所提取的水印与原始水印的相似度很高,均在 0.9 以上,可以看出本文算法对常规信号处理的鲁棒性较好。

3.2 几何攻击测试

本文选择缩放和旋转攻击检验算法的抗几何攻击鲁棒性。

1) 缩放攻击。由于利用整体图像的 Tchebichef 矩,图像缩放时,代表图像轮廓信息的低阶 Tchebichef 矩大小发生变化,但正负符号并没有改变,即这种水印算法本身对缩放攻击具备良好的鲁棒性。对图像进行 0.5 ~ 2 倍的缩放,检测结果如表2所示。

表2 缩放攻击检测结果

缩放率	相似度	
	本文方法	文献[8]方法
0.5	0.9624	0.9475
0.8	0.9826	0.9754
1.25	0.9905	—
1.5	0.9893	0.9848
1.8	0.9889	0.9886
2	0.9862	0.9848

注:“—”表示文献[8]没有提供该数据。

2) 旋转攻击。由实验结果可得,原始图像旋转归一化角度 α 为 -133.7020° 。对任意角度的旋转攻击,将单位圆图像旋转归一化,提取水印并计算与原始水印的相似度 S 。实验结果如表3所示。

表3 旋转攻击检测结果

旋转 角度/(°)	$\alpha/(^{\circ})$		S	
	原始图像	攻击后	本文算法	文献[8]算法
5	-133.7020	-128.6863	0.9914	0.9848
15	-133.7020	-118.6592	0.9873	0.9659
20	-133.7020	-113.6786	0.9912	0.9632
30	-133.7020	-103.6700	0.9872	0.9621
50	-133.7020	-83.6834	0.9896	0.9598
60	-133.7020	-73.6716	0.9878	0.9811
75	-133.7020	-58.6829	0.9916	0.9843
90	-133.7020	-43.7020	1	1

从表2和表3数据看出,本文算法和文献[8]算法水印相似度都在0.94以上,本文算法抗旋转缩放攻击的鲁棒性较好。

3.3 组合攻击测试

对于单一的常规信号处理和几何攻击,本文算法具有很好的鲁棒性,下面对图像进行组合攻击,检测算法的抗组合攻击鲁棒性。实验结果如表4所示。

表4 组合攻击检测结果

组合攻击类型	$\alpha/(^{\circ})$		S
	原始图像	攻击后	
0.8倍缩放 + 0.02椒盐噪声	-133.7020	-133.5715	0.9404
0.8倍缩放 + 高斯噪声(0,0.02)	-133.7020	-133.3436	0.9238
旋转20° + 0.05椒盐噪声	-133.7020	-113.6155	0.9564
旋转20° + 高斯噪声(0,0.05)	-133.7020	-114.2324	0.9247
旋转20° + 0.8倍缩放	-133.7020	-113.7784	0.9795
旋转20° + JPEG压缩($Q=10$)	-133.7020	-113.9667	0.9473
旋转20° + 中值滤波(7×7)	-133.7020	-113.7887	0.9594
旋转20° + 维纳滤波(7×7)	-133.7020	-113.6508	0.9824

图像遭受组合攻击时检测过程的预处理包括待检测图像单位圆化和旋转归一化两个过程,水印提取结果如图6所示。由于图像被攻击破坏而数据失真,旋转归一化受其影响,这时提取的水印相似度的降低包括图像失真和旋转归一化偏差两部分,而且后者受到前者的影响,即图像失真越严重,图像旋转归一化与原始图像旋转归一化偏差越大,水印相似度越小,这时失真严重的图像也失去了使用价值。

4 结语

本文以图像的 Tchebichef 矩性质为基础,利用单位圆内旋转归一化构造抗几何攻击的零水印算法。其主要特点包括:

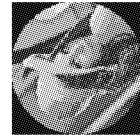
- 1) 利用图像 Tchebichef 矩系数在图像遭受攻击时的正负性变化特点构造水印算法,因而算法具有很强的鲁棒性;
- 2) 结合单位圆内旋转归一化使水印得到同步,提取水印不需要原始图像也不用对图像逆归一化,增加了算法的安全性和有效性;

3) 利用图像的特征构造零水印,具有水印容量大、不可感知性好、鲁棒性强等优点,有效地解决了常规水印算法上述方面相互制约的矛盾。

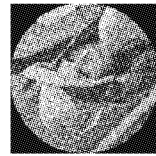
实验结果表明,该算法对 JPEG 压缩、噪声、滤波等常规信号处理和旋转、缩放等几何攻击及其组合具有很强的鲁棒性。



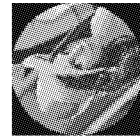
(a) 高斯噪声攻击(0,0.05)及提取的水印($S=0.9284$)



(b) 0.8倍缩放攻击及提取的水印($S=0.9826$)



(c) 旋转20° + 高斯噪声(0,0.05)组合攻击及提取的水印($S=0.9247$)



(d) 旋转20° + 0.8倍缩放组合攻击及提取的水印($S=0.9795$)

图6 图像遭受攻击后预处理图像及其提取的水印

参考文献:

- [1] 张翼,唐向宏.基于图像归一化的抗几何攻击水印技术[J].电路与系统学报,2009,14(6):53-58.
- [2] ALGHONIEMY M, TEWFIK A H. Geometric invariance in image watermarking [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(2): 145-152.
- [3] ZHANG L, QIAN G B, XIAO W W, et al. Geometric invariant blind image watermarking by invariant Tchebichef moments [J]. Optics Express, 2007, 15(5): 2251-2261.
- [4] 吕婉丽,郭玉堂,罗斌.一种基于 Tchebichef 矩的半脆弱图像数字水印算法[J].中山大学学报:自然科学版,2009,48(1):16-21.
- [5] 李建忠.抗几何攻击的鲁棒计算全息零水印算法[J].光电工程,2010,37(8):67-75.
- [6] 何冰,王珉,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.
- [7] 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.
- [8] 王忠,孙钰.基于 Zernike 不变矩的零水印算法[J].计算机应用,2008,28(9):2233-2235.
- [9] 孙丽萍,郭宝龙.基于 Tchebichef 矩的抗几何攻击图像水印[J].光电工程,2008,35(6):101-107.
- [10] 温泉,孙铁锋,王树勋.零水印的概念与应用[J].电子学报,2003,31(2):214-216.
- [11] 李学斌,俞登峰,程亮.基于奇异值分解的零水印算法[J].计算机工程,2009,35(11):163-165.
- [12] 叶天语,马兆丰,钮心忻,等.强鲁棒性零水印技术[J].北京邮电大学学报,2010,33(3):126-129.
- [13] 何冰,王珉,赵杰,等.基于 Contourlet 变换的抗旋转攻击零水印算法[J].计算机应用,2009,29(3):801-804.
- [14] MUKUNDAN R, ONG S H, LEE P A. Image analysis by Tchebichef moments [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(9): 1357-1364.
- [15] MUKUNDAN R. Some computational aspects of discrete orthonormal moments [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(8): 1055-1059.