第35卷 第22期 计 算 机 工 程 2009年11月
Vol.35 No.22 Computer Engineering November 2009
·安全技术· 文章编号：1000—3428(2009)22—0134—03 文献标识码：A 中图分类号：TP391

基于 DWT 的抗 RST 攻击鲁棒性数字水印

何 冰，王 晅，赵 杰
(陕西师范大学物理学与信息技术学院，西安 710062)

摘 要：针对现有数字图像水印方法对几何变换攻击鲁棒性不足的问题，提出一种基于离散小波域的抗几何攻击数字水印方法，对图像进行离散小波变换，在其低频逼近子图嵌入水印，通过检测其不变矩实现数字水印检测。由于所选不变矩具有旋转、平移、尺度变换不变特征，因此该方法对几何变换攻击具有鲁棒性。仿真实验结果表明，该方法对普通加噪、滤波、JPEG 压缩攻击以及旋转、缩放、平移等几何攻击均具有较好的鲁棒性。

关键词：鲁棒性；RST 变换；不变矩；数字小波变换

Robust Digital Watermark Resistant to RST Attacks Based on DWT

HE Bing, WANG Xuan, ZHAO Jie
(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi’an 710062)

【**Abstract**】Aiming at the problem that existed digital image watermark method lacks of enough robust to geometrical transform attacks, this paper proposes a novel digital watermark method based on Digital Wavelet Transform(DWT). The DWT is utilized to transform the image, and the digital watermark is embedded into the low frequency subband. The watermark detection is implemented by determine images’ invariant moments. Since these moments are invariant to rotation, scaling and translation transforms, this method is robust to geometrical transform attacks. Simulation experimental results show this method is robust to adding noise, filtering, JPEG compression attacks and RST transforms.

【**Key words**】robust; RST transforms; inavriant moments; Digital Wavelet Transform(DWT)

1 概述

数字水印技术是通过对宿主信号进行一定的修改(例如在原始信号上加一个水印信号)实现的，这些水印信号数据可以是扩频伪随机序列、二值图像、灰度图像、音频流、视频流等。所嵌入的水印必须是不可感知的，同时必须能抵抗一些有意或无意的变换，如线性或非线性的滤波、压缩、加噪声、图像增强和几何变换。根据嵌入域的不同，现有的水印技术可以分为 2 种：变换域水印法[1-2]和空域水印方法[3-4]。空域水印法是将水印信息直接嵌入原始数字图像，而变换域水印法是将水印信息嵌入图像的变换域中。有学者提出第 2 代数字水印的概念，即图像局部水印嵌入的方法[5]。这种方法在一定程度上增强了图像抵抗剪切攻击的能力，例如，本文使用的 Krawtchouk 不变矩就可以实现第 2 代数字水印的功能。在空域水印方法中，文献[6]提出一种基于 Zernike 矩的数字水印方法，将一幅图像分成多层圆环，在这些圆环中嵌入水印，利用这些圆环中的幅值系数进行图像重构，但它只给出旋转不变的结果。为了能够使水印图像抵抗 RST 攻击，文献[7]提出另一种方法：通过幅度系数实现旋转的不变性，通过图像归一化实现缩放的不变性。但这 2 种方法有 2 个缺陷：计算误差大及容易引起图像的几何失真。

基于以上原因，本文提出一种新的不变矩抗旋转、缩放、平移鲁棒性数字水印，不需要在水印嵌入后利用几何矩进行图像的重构，而只是对图像在 DWT 域的低频逼近子图进行不可感知的修改(满足 HVS 模型)，水印检测时只需计算修改后图像的不变矩，用它判断水印是否存在，且不需要对图像进行尺度的归一化，这样减少了计算量，降低了图像的几何失真。

2 不变矩

本文主要将 Hu 正交不变矩、Flusser 仿射不变矩、Krawtchouk 不变矩应用到数字水印技术中，实现图像的旋转、缩放、平移三不变。

2.1 Hu 矩

Hu M K 根据几何不变量理论引进几何矩的概念，图像的几何矩是像函数在空域内的积分。所有的图像研究考虑的都是有限的像空间，且认为所有的积分在此有限的空间内进行。本文只讨论平面图像的情形，图像 $f(x,y)$ 的 $(p+q)$ 阶原点矩(也称普通矩)，中心矩以及归一化中心矩依次定义为：

(1) $(p+q)$ 阶原点矩：

$$m_{pq}=\iint x^p y^q f(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad q,p=0,1,2\cdots \tag{1}$$

(2) $(p+q)$ 阶中心矩：

$$u_{pq}=\iint (x-\bar{x})^p (y-\bar{y})^q f(x,y)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \quad q,p=0,1,2\cdots \tag{2}$$

(3)归一化的中心矩：

$$\eta_{pq}=\frac{u_{pq}}{(u_{00})^{\gamma}} \quad \gamma=(p+q+2)/2 \tag{3}$$

这里给出 Hu 的 7 个不变矩：

$$\phi_1=\eta_{20}+\eta_{02}$$

基金项目：陕西省自然科学基础研究计划基金资助项目(2009JM8002)；陕西师范大学研究生培养创新基金资助项目(2008CXS036)
作者简介：何 冰(1982－)，男，硕士研究生，主研方向：图像处理，数字水印，信息隐藏；王 晅，副教授、博士；赵 杰，硕士研究生
收稿日期：2009-07-20 **E-mail**：wxuan@snnu.edu.cn

$$\phi_2=(\eta_{20}-\eta_{02})^2+4\eta_{11}^2$$
$$\phi_3=(\eta_{30}-3\eta_{12})^2+(\eta_{03}-3\eta_{21})^2$$
$$\phi_4=(\eta_{30}+\eta_{12})^2+(\eta_{03}+\eta_{21})^2$$
$$\phi_5=(\eta_{30}-3\eta_{12})(\eta_{30}+\eta_{12})[(\eta_{30}+\eta_{12})^2-3(\eta_{21}+\eta_{03})^2]+(\eta_{03}-3\eta_{21})(\eta_{03}+\eta_{21})[(\eta_{03}+\eta_{21})^2-3(\eta_{12}+\eta_{30})^2]$$
$$\phi_6=(\eta_{20}-\eta_{02})[(\eta_{30}+\eta_{12})^2-(\eta_{03}+\eta_{21})^2]+4\eta_{11}(\eta_{30}+\eta_{12})(\eta_{03}+\eta_{21})$$
$$\phi_7=(3\eta_{21}-\eta_{03})(\eta_{30}+\eta_{12})[(\eta_{03}+\eta_{21})^2-3(\eta_{21}+\eta_{03})^2]+(\eta_{30}-3\eta_{21})(\eta_{21}+\eta_{03})[(\eta_{03}+\eta_{21})^2-3(\eta_{30}+\eta_{12})^2] \tag{4}$$

2.2 Flusser 仿射不变矩

Flusser 等人在 Hu 矩的基础上做了修正，提出以下 4 个仿射不变矩：

$$\psi_1=[u_{20}u_{02}-u_{11}^2]/u_{00}^4$$
$$\psi_2=[u_{30}^2u_{03}^2-6\mu_{30}u_{21}u_{03}+4\mu_{30}u_{21}^3+4\mu_{21}^3u_{03}-3\mu_{21}^2\mu_{12}^2]/\mu_{00}^{10}$$
$$\psi_3=[\mu_{20}(\mu_{12}\mu_{03}-\mu_{12}^2)-\mu_{11}(\mu_{30}\mu_{03}-\mu_{21}\mu_{12})+\mu_{02}(\mu_{30}\mu_{12}-\mu_{21}^2)]/u_{00}^7$$
$$\psi_4=[\mu_{20}^3u_{03}^2-6u_{20}^2u_{11}u_{12}u_{03}-6u_{20}^2u_{02}u_{21}u_{03}+9u_{20}^2u_{02}u_{12}^2+12u_{20}u_{11}^2u_{21}u_{03}+6u_{20}u_{11}u_{02}u_{30}u_{03}-18u_{20}u_{11}u_{02}u_{21}u_{12}-8u_{11}^3u_{30}u_{03}-6u_{20}u_{02}^2u_{30}u_{21}+u_{02}^3u_{30}^2]/u_{00}^{11} \tag{5}$$

2.3 Krawtchouk 不变矩的构造

Krawtchouk 矩的基函数是离散的 Krawtchouk 多项式 $\{k_n(x;p,N)\}$，n 阶 $\{k_n(x;p,N)\}$ 定义为

$$K_n(x;p,N)=\sum_{k=0}^{N}a_{k,n,p}x^k={}_2F_1(-n,-x;-N;\frac{1}{p}) \tag{6}$$

其中，$x,n=0,1,\cdots,N,N>0,p\in(0,1)$；${}_2F_1$ 是 hypergeometric 函数：

$${}_2F_1(a,b;c;z)=\sum_{k=0}^{\infty}\frac{(a)_k(b)_k}{(c)_k}\frac{z^k}{k!}$$

其中，$(a)_k$ 是 Pochhammer 算子：

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

$(n+1)$ 阶 $\{k_n(x;p,N)\}$ 构成一个离散的加权基函数闭集，其加权函数为：$\omega(x;p,N)=\begin{bmatrix}N\\x\end{bmatrix}p^x(1-p)^{N-x}$，加权函数满足正交条件：

$$\sum_{x=0}^{N}\omega(x;p,N)K_n(x;p,N)K_m(x;p,N)=\rho(n;p,N)\delta_{nm}$$
$$n,m=0,1,\cdots,N\quad \rho(n;p,N)=(-1)^n(\frac{1-p}{p})^n\frac{n!}{(-N)_n}$$

在通常情况下，为了避免计算过程中产生误差，对其进行归一化处理。归一化的 Krawtchouk 多项式定义为

$$\tilde{K}(x;p,N)=\frac{K_n(x;p,N)}{\sqrt{\rho(n;p,N)}} \tag{7}$$

则正交条件转换为

$$\sum_{x=0}^{N}\bar{K}_n(x;p,N)\bar{K}_m(x;p,N)=\delta_{nm}$$

图像 $f(x,y)$ 的 $(n+m)$ 阶 Krawtchouk 矩可以表示为

$$Q_{nm}=\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{M-1}\bar{K}_n(x;p_1,N-1)\bar{K}_m(y;p_2,M-1)f(x,y) \tag{8}$$

Krawtchouk 矩可以由几何矩计算得到，图像 $\bar{f}(x,y)=\frac{f(x,y)}{\sqrt{w(x)w(y)}}$ 的 Krawtchouk 矩可以由几何矩表示为

$$Q_{nm}=\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{M-1}\bar{K}_n(x;p_1,N-1)\bar{K}_m(y;p_2,M-1)\bar{f}(x,y)=[\rho(n)\rho(m)]^{-\frac{1}{2}}\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{M-1}a_{i,n,p_1}a_{j,m,p_2}M_{ij} \tag{9}$$

式(9)用非正交的几何矩来表示正交的 Krawtchouk 矩，Krawtchouk 矩依赖同阶的几何矩，为了构造仿射不变性 Krawtchouk 矩，通过将 $f(x,y)$ 平移到其质心位置 $(\bar{x},\bar{y})$ 保证平移的不变性。其中，$\bar{x}=\frac{m_{10}}{m_{00}}$，$\bar{y}=\frac{m_{01}}{m_{00}}$。为了保证旋转不变性，通过将其旋转主轴转换为 x 轴来实现，转化式为

$$\begin{cases}x'=x\cos\theta-y\sin\theta\\ y'=x\sin\theta+y\cos\theta\end{cases}$$

其中，旋转角度 θ 定义为 $\theta=\frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{2u_{11}}{u_{20}-u_{02}}$；$\mu_{nm}$ 为中心矩；旋转角度 θ 的值域为 $-45^\circ\le\theta\le45^\circ$。

若求解的 θ 在 $0^\circ\sim360^\circ$ 范围内可以进行相应的调整。为了保证尺度变换不变性，将平移和旋转之后的图像进行尺度变换得到归一化图像 $g(x,y)$，其中，尺度变换因子 $\alpha=\left[\frac{N}{2m_{00}}\right]^{\frac{1}{2}}$。注意到，Krawtchouk 矩的中心在 $\left[\frac{N}{2},\frac{N}{2}\right]$ 处，因此，将 $g(x,y)$ 的中心平移到 $\left[\frac{N}{2},\frac{N}{2}\right]$ 处，则 $g(x,y)$ 与 $f(x,y)$ 的关系为

$$g(x+\frac{N}{2},y+\frac{N}{2})=f(\bar{x}+\frac{x\cos\theta+y\sin\theta}{\alpha},\bar{y}+\frac{y\cos\theta-x\sin\theta}{\alpha}) \tag{10}$$

$g(x,y)$ 的不变矩为

$$\tilde{\nu}_{nm}=\sum_{x=0}^{N-1}\sum_{y=0}^{N-1}\frac{N^2/2}{M_{00}}f(x,y)\times\{[(x-\bar{x})\cos\theta+(y-\bar{y})\sin\theta]\sqrt{\frac{N_2/2}{M_{00}}}+\frac{N}{2}\}^n\times\{[(y-\bar{y})\cos\theta-(x-\bar{x})\sin\theta]\sqrt{\frac{N^2/2}{M_{00}}}+\frac{N}{2}\}^m \tag{11}$$

此时，图像的中心位于 $\left[\frac{N}{2},\frac{N}{2}\right]$ 处，且图像是尺度归一化的 $\tilde{\nu}_{00}=(N^2/2)$。显然这个矩是旋转、平移和尺度不变性的。Krawtchouk 旋转、平移和尺度变换可以用不变矩 $\tilde{\nu}_{nm}$ 代替式(11)中的几何矩实现，即：

$$\tilde{Q}_{nm}=[\rho(n)\rho(m)]^{-\frac{1}{2}}\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}a_{i,n,p_1}a_{j,m,p_2}\tilde{\nu}_{ij} \tag{12}$$

这里给出本文实验中使用的几个 Krawtchouk 不变矩：

$$\tilde{Q}_{00}=\Omega_{00}\tilde{\nu}_{00}$$
$$\tilde{Q}_{10}=\Omega_{10}[\tilde{\nu}_{00}-\frac{1}{(N-1)p_1}\tilde{\nu}_{10}]$$
$$\tilde{Q}_{01}=\Omega_{01}[\tilde{\nu}_{00}-\frac{1}{(N-1)p_2}\tilde{\nu}_{01}]$$
$$\tilde{Q}_{11}=\Omega_{11}[\tilde{\nu}_{00}-\frac{1}{(N-1)p_1}\tilde{\nu}_{10}-\frac{1}{(N-1)p_2}\tilde{\nu}_{01}+\frac{1}{(N-1)^2p_1p_2}\tilde{\nu}]$$
$$\tilde{Q}_{20}=\Omega_{20}[\tilde{\nu}_{00}-\frac{2(N-2)p_1+1}{(N-1)(N-2)p_1^2}\tilde{\nu}_{10}+\frac{1}{(N-1)(N-2)p_1^2}\tilde{\nu}_{20}]$$
$$\tilde{Q}_{02}=\Omega_{02}[\tilde{\nu}_{00}-\frac{2(N-2)p_2+1}{(N-1)(N-2)p_2^2}\tilde{\nu}_{01}+\frac{1}{(N-1)(N-2)p_2^2}\tilde{\nu}_{02}]$$

$$\tilde{Q}_{12}=\Omega_{02}[\tilde{\nu}_{00}-\frac{2(N-2)p_2+1}{(N-1)(N-2)p_2^{\;2}}\tilde{\nu}_{01}+\frac{1}{(N-1)(N-2)p_2^{\;2}}\tilde{\nu}_{02}-$$
$$\frac{1}{(N-1)p_1}\tilde{\nu}_{10}+\frac{2(N-2)p_2+1}{(N-1)^2(N-2)p_1p_2^{\;2}}\tilde{\nu}_{11}-\frac{1}{(N-1)^2(N-2)p_1p_2^{\;2}}\tilde{\nu}_{12}]$$
$$\tilde{Q}_{21}=\Omega_{21}[\tilde{\nu}_{00}-\frac{1}{(N-1)p_2}\tilde{\nu}_{01}-\frac{2(N-2)p_2+1}{(N-1)(N-2)p_1^2}\tilde{\nu}_{10}+\frac{2(N-2)p_1+1}{(N-1)^2(N-2)p_1^2p_2}\tilde{\nu}_{11}+$$
$$\frac{1}{(N-1)(N-2)p_1^2}\tilde{\nu}_{20}-\frac{1}{(N-1)^2(N-2)p_1^2p_2}\tilde{\nu}_{21}]$$

其中，$\Omega_{nm}=[\rho(n;p_1,N-1)\rho(m;p_2,N-1)]^{-(1/2)}$。

3　水印的设计方案

Step1 一般基于不变矩的数字水印为了保持水印在嵌入和检测时图像的大小不变，通常是对待检测的图像做一个尺度大小规定化的映射(也称图像大小归一化)，这种方法有一定的缺陷：例如，图像在缩小时，要把它映射为一种规定的大小就必须对其部分区域进行插值运算，这种运算类似于Fourier_mellin 变换时的对数极坐标转化，而这种插值运算会引入一定的误差，并且有一定的计算量。本文提出一种使用零像素值模板背景图像的方法很好地解决了这个问题。首先，建立一幅 $N\times M$ 大小的零像素值模板背景图像，N,M 的大小应视其要嵌入水印的原始图像大小($n\times m$)而定，一般来说 $N\geq\sqrt{n^2+m^2}, M\geq\sqrt{n^2+m^2}$。另外，$N,M$ 还可以作为水印检测时的密钥。

Step2 定义一个函数 f，使得 f 满足：$d-\varepsilon\leq f\leq d+\varepsilon$ 条件。d 是与原始图像相关的一个提前预定义好的数值，ε 表示容忍度。以 Hu 不变矩为例进行说明(Flusser 仿射不变矩，Krawtchouk 不变矩方法相同)：为了满足 $d-\varepsilon\leq f\leq d+\varepsilon$，可以通过 $\tilde{I}=I+\Delta I$ 对原始图像进行修改，其中，I 表示原始图像；$\tilde{I}$ 表示修改后的图像；$\Delta I=\beta\log(I)$，这样可以采用遍历 β 值的方法使得 $d-\varepsilon\leq f\leq d+\varepsilon$ 成立(本实验中将 f 定义为 $f=\frac{1}{7}\sum_{i=1}^{7}|\log(\phi_i)|\quad 1\leq i\leq 7$，其中，$\phi_i$ 表示 Hu 的 7 个不变矩)。

Step3 对修改后的图像进行二级小波分解，取其低频逼近子图，然后进行图像置乱操作，得到置乱后的图像。

Step4 将置乱后的低频逼近子图加载到零像素值模板背景图像中。由于加载后的图像除实际的低频逼近子图的置乱图像外其余图像部分的像素值为零，因此几何矩都为零，对实际的图像不产生任何影响，只是图像的大小改变为 $N\times M$，实验中取 $N=M=90$。

Step5 计算图像的几何不变矩的均值 f，若满足 $d-\varepsilon\leq f\leq d+\varepsilon$，则证明水印存在，否则水印不存在。

4　实验仿真

实验中所用到的图像为 256×256 的 Lena 图像，d,β 的取值分别为 $d=14.0$，$\beta=8.650$；根据实验的需要 $\varepsilon=0.2$。图 1 给出了仿真实验中的图像。

(a)零像素值模板背景图　(b)原始 Lena 图像　(c)修改后的 Lena 图像

图 1　仿真实验中的图像

表 1 给出了测试图像为原始 Lena 图像和受攻击之后 Hu 正交不变矩、Flusser 仿射不变矩以及 Krawtchouk 不变矩的均值 f，其中，原始图像的 Hu 正交不变矩、Flusser 仿射不变矩以及 Krawtchouk 不变矩分别为 13.544, 16.822, 5.529 5。

表 1　原始图像经过各种攻击后的不变矩的均值 *f*

攻击类型	Hu 正交不变矩	Flusser 仿射不变矩	Krawtchouk 不变矩
加入 1%的椒盐噪声	13.551	16.824	5.528 9
加入高斯噪声	13.583	16.869	5.524 3
均值滤波	13.544	16.822	5.529 5
中值滤波	13.523	16.805	5.529 5
JPEG 压缩	13.523	16.805	5.529 5
旋转 2°	13.539	16.806	5.529 8
旋转 10°	13.531	16.741	5.561 7
缩放 75%	13.542	16.780	5.529 4
缩放 150%	13.552	16.876	5.529 5
平移(向左 10 个像素)	13.544	16.822	5.529 5
平移(向右 30 个像素)	13.544	16.822	5.529 5

表 2 给出了使用 Hu 正交不变矩在各种攻击之后水印的检测结果，其中，Yes 表示水印存在；No 表示水印不存在；原始图像的 f, $|f\text{-}d|$以及检测结果分别为 13.544, 0.45 和 No。

表 2　修改后的 Lena 图像经过各种攻击后的实验结果

攻击类型	f	$\|f\text{-}d\|$	检测结果
嵌入水印的 Lena 图像	14.001	0.001	Yes
平移(向左 10 个像素)	14.001	0.001	Yes
平移(向右 30 个像素)	14.001	0.001	Yes
平移(向上 30 个像素)	14.001	0.001	Yes
缩放 75%	13.998	0.003	Yes
缩放 150%	14.009	0.008	Yes
旋转 2°	13.995	0.006	Yes
旋转 10°	13.880	0.121	Yes
JPEG 压缩(50%)	14.001	0.001	Yes
JPEG 压缩(75%)	14.001	0.001	Yes
中值滤波	13.996	0.005	Yes
均值滤波	14.000	0.001	Yes
加入高斯噪声	13.931	0.070	Yes
加入 1%的椒盐噪声	14.012	0.011	Yes

为了验证本文方法的可靠性，分别选取 baboon, plane, pepper 3 幅不同的灰度图像进行虚警率实验，实验结果如表 3 所示。

表 3　虚警率实验结果

不同的灰度图像	f	$\|f\text{-}d\|$	检测结果
baboon	13.749	0.252 3	No
plane	14.874	0.874 3	No
pepper	13.425	0.575 2	No

从仿真实验结果可以看出，本文算法对图像的旋转、缩放、平移、加噪、滤波、JPEG 压缩具有很强的鲁棒性，通过虚警率实验也可以看出本文算法具有很好的可靠性。

5　结束语

本文提出一种基于小波域抗旋转、缩放、平移鲁棒性数字水印方法。通过仿真实验证明了该方法对于普通的加噪、滤波、JPEG 压缩攻击具有一定的鲁棒性。同时，对于旋转、缩放、平移等几何类攻击也具有很好的鲁棒性，且具有很低的虚警率和误检率，是种简单、实用、可靠的数字水印方法。

(下转第 140 页)