

# 基于频域线性拟合的数字水印算法

丁莹, 袁源, 袁道华, 李炳法

(四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 在分析了现有的抗几何攻击的水印技术的基础上, 提出了一种 DFT-DCT 变换域下抗几何攻击, 尤其是能有效地抗旋转攻击的数字水印算法。这种算法主要的特点是: 方法简单、易于实现; 不需添加模板和特征值; 隐藏的信息量大; 应用直线拟合实现图像经旋转后的配准; 除了可以有效抵抗旋转攻击, 还可以抵抗裁剪, 以及伴随裁剪的旋转、压缩等攻击, 具有较高的鲁棒性。

**关键词:** 抗旋转; 数字水印; 图像配准; 直线拟合

中图法分类号: TP309.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3695(2006)03-0079-03

## Rotation Resilient Watermarking Algorithm Based on Frequency Domain

DING Ying, YUAN Yuan, YUAN Dao-hua, LI Bing-fa

(School of Computer Science, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract:** This paper gave the analysis of geometric distortion, and proposed a robust watermarking algorithm against geometric distortion, especially rotation distortion, based on frequency domain. This algorithm was simple and realized easily. It needn't embed template or eigenvalue. It could hide a large number of information. It could do image registration efficiently with beeline simulation. Besides rotation resilient, it was also robust against cropping, cropping with rotation and compressing.

**Key words:** Rotation Resilient; Digital Watermark; Image Registration; Beeline Simulation

数字水印作为数字媒体中一种版权保护的手段, 近年来引起了人们的高度重视并逐渐成为多媒体信号处理领域的一个研究热点。从实现的角度图像水印算法可分为两类: 空域的方法和变换域的方法。这两类方法分别通过改变某些像素的灰度和变换域下一些系数的值来隐藏水印。与空域的方法相比, 变换域的方法具有如下优点: 在变换域中嵌入的水印信号能量可以分布到空域的所有像素上, 有利于保证水印的不可见性。在变换域, 视觉系统的某些特性(如频率掩蔽特性)可以更方便地结合到水印编码过程中。变换域的方法可与国际数据压缩标准兼容, 从而实现在压缩域内的水印编码。

数字水印技术发展到今天, 已有许多不同的算法。每种算法都具有一定的稳健性, 但大多数算法所强调的稳健性是水印算法对抗一般信号处理的稳健性, 许多甚至不能抵抗微小的几何攻击。其原因在于: 几何攻击会破坏同步性, 使水印嵌入和水印检测位置偏离不再相符。对抗这种攻击的难点在于载体数据中对原始水印参考点的寻找。

### 1 抗几何攻击算法分析

水印对抗几何攻击是一个十分困难而极具挑战性的课题。该课题的研究刚刚起步, 目前抵抗几何攻击的算法大致可以分为以下四类<sup>[1]</sup>:

(1) 将水印嵌入到几何不变量中。几何不变量是指图像中存储的除了位置、方向或缩放以外的所有信息。O'Ruanaidh 等人首先提出把水印嵌在 Fourier2-Mellin 变换域的幅值空间中。该空间具有旋转、缩放、平移(RST)不变性。Lin 等人<sup>[2]</sup>改

进了 O'Ruanaidh 的方法, 对图像离散傅里叶变换(DFT)的幅度谱重采样后做对数极坐标映射(LPM), 再沿着坐标轴  $\log(r)$  把幅度系数连加得到一维函数, 最后把水印加载到该函数上。对水印图像的旋转和缩放攻击则利用简单的搜索和相关检测度量来补偿。上述算法的主要缺点是在进行 LPM 和逆 LPM 时, 由于需要某种形式的插值会导致水印图像质量的急剧下降。

(2) 在图像中除嵌入水印外, 还嵌入一个模板用于抵抗几何攻击。该类算法<sup>[3]</sup>的模板由 DFT 幅度谱中额外的极值点组成, 水印按不同的编码也嵌入到 DFT 域。水印检测时, 首先通过检查模板的变化决定水印图像可能遭受的几何攻击; 然后对水印图像进行逆变换就可在 DFT 域内检测到水印。但在应用中, 这个模板往往成了水印方案的致命弱点, 如果模板被攻击者破坏, 水印的检测过程就无法进行。

(3) 将水印以一个可识别的结构嵌入到载体数据中。Kutter 等人把一个由二维伪随机序列构成的空间水印模式多次嵌入到载体图像的不同区域中。在水印提取过程中, 一个估计出的水印模式的自相关函数可以被计算出来, 以此决定水印图像可能遭受的仿射变换。该算法的主要缺点是易受压缩的影响。

(4) 应用数据的重要特征来嵌入水印信息, 这就是所谓的第二代数字水印。但合适的特征抽取是该类水印要解决的一个十分困难的问题。Kutter 等人给出了一个第二代水印的例子, 该算法首先对图像进行 Mexican2Hat 小波分解, 然后在特征点最邻近区域将图像划分为若干部分, 在各部分中分别嵌入扩频水印。

综合目前抗几何攻击的水印算法可以看出, 通过采用 Fourier2-Mellin 变换来构造几何不变特征、隐藏几何校正模型等方法, 为解决抗 RST 问题提供了可能的途径。本文提出的

抗几何攻击的算法与上述算法有所不同,它是 DFT-DCT 域下的一种有意义图像水印算法。该算法借助直线拟合,有效地将旋转后的图像配准,而不需要建立模板,选择图像的特征值。

## 2 频域下的线性拟合方法

通过上节的分析可知道,目前许多抗几何攻击的水印算法都是建立在图像配准的基础之上,这些配准技术或者需要事先建立模板,或者需要选择特征点。一旦这些标记被破坏,图像就无法配准,被检测图像就无法与原图像同步,下面介绍一种在频域下利用直线拟合来获得配准的方法。这种配准方法是根据 DFT 下图像频谱的特征——中心处的十字亮线来实现图像的配准。由图像 DFT 变换的旋转特性可知:图像在空域中旋转一个角度,由此得到的频谱也旋转相同的角度,即如果  $f(x, y)$  旋转一个角度  $\theta$ ,则  $f(x, y)$  的谱  $F(u, v)$  也旋转相同的角度。设  $F(u, v)$  和  $f(x, y)$  在极坐标下表示为  $F(\rho, \phi)$  和  $f(r, \theta)$ ,用公式表示为

$$f(r, \theta + \theta_0) \leftrightarrow F(\rho, \phi + \theta_0) \quad (1)$$

实验证明,频谱图中的十字亮线发生了相同角度旋转,如图 1 所示,于是对亮线偏转角度的计算就可得到图像的旋转角度。亮线的偏转角度可用直线拟合的方法来获得。

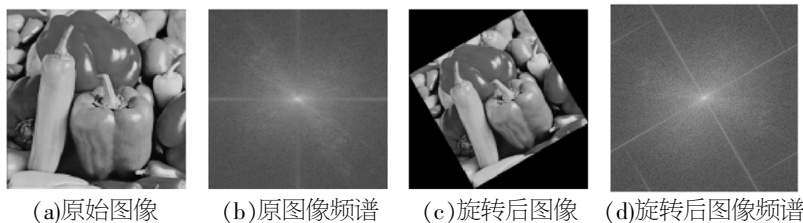


图 1 旋转效果图

### 2.1 直线拟合

若  $x$  和  $y$  都是被测量的物理量,并且  $y$  是  $x$  的函数,函数关系为

$$y = bx + a \quad (2)$$

虽然从理论上函数的线性关系已知,但由于系数  $b, a$  是未知的,因此方程的具体形式也是未知的。为了测定理论直线,对不同的  $x$  测量  $y$  的数值,获得  $x$  和  $y$  的  $k$  对测量值,即得到  $xy$  平面上的  $k$  个实测点:

$$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_k, y_k) \quad (3)$$

直线拟合的任务是根据这些实测值寻求  $b, a$  的最佳估计值  $B, A$ ,即寻求理论值(式(2))的最佳估计  $y = Bx + A$

如果不存在测量误差,式(3)中各个实测点都应准确地落在理论直线(式(2))上,即满足

$$y_i = bx_i + a \quad (i = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (4)$$

要确定未知参数  $b, a$ ,只需要任意选出两对不同的实测值,然后联立方程组(式(4))即可。

由于实测值总是有误差的,因此各个实测点并不准确地落在理论直线(式(2))上。在  $k > 2$  的情况下,方程组(式(4))成为矛盾方程组,不能用解方程组(式(4))的办法求出未知参数  $b, a$  的数值,只能用直线拟合的方法,根据带有误差的实测值求理论直线系数的估计值  $B, A$  从而获得直线的最佳估计  $y = Bx + A$

统计法是求经验公式最精确的方法,它是使所求得的经验公式  $y = Bx + A$  的残差的平方和最小(最小二乘方准则):

$$\sum_{i=1}^k v_i^2 = \text{最小} \quad (5)$$

由  $k$  对实测点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_k, y_k)$  与最佳估计直线  $y = Bx + A$  有

$$\begin{aligned} y_1 - Bx_1 - A &= v_1 \\ y_2 - Bx_2 - A &= v_2 \\ \dots \\ y_k - Bx_k - A &= v_k \end{aligned} \quad (6)$$

解得

$$\begin{aligned} B &= \frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2} \\ A &= \bar{y} - B\bar{x} \end{aligned} \quad (7)$$

通过这种方法能够非常精确地计算出直线的倾斜角为  $\arctan B$ 。

### 2.2 图像旋转后的配准

(1) 通过设定门限值将频谱图转换为一个二值图像,从而使十字亮线更加突出。得到二值图像,如图 2 所示。

(2) 对其中一条亮线进行采样,得到序列  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_k, y_k)$ 。

(3) 运用公式(7)计算亮线角度  $\theta$ 。

(4) 估计直线的误差,对  $\theta$  进行修正。通过实验测试,如图 3 所示,计算平均误差为  $\theta_{avg}$ ,最后得到的修正值  $\theta_{corr} = \theta + \theta_{avg}$ 。

使用该方法计算出的旋转角度误差很小,通过对  $1^\circ \sim 90^\circ$  旋转角的测量,实验误差不超过  $\pm 0.4^\circ$ 。经修正误差进一步减小。将图像进行逆旋转即可与原图像配准。

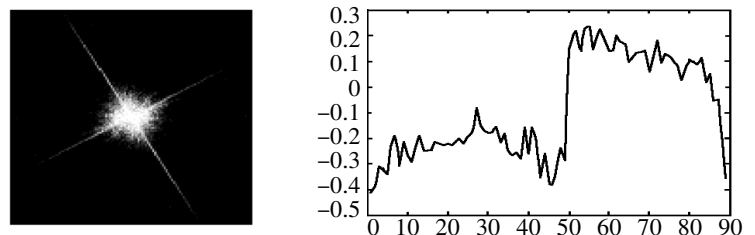


图 2 经处理的频谱图

图 3 角度误差

## 3 水印的嵌入算法

本文提出的数字水印算法利用 DFT-DCT 变换下的特性,在图像 DFT 变换的中频选择载体,对载体进行 DCT 变换,再在变换后的中频加入水印。

数字水印的嵌入要求既要考虑视觉透明性,又要保证嵌入的数字水印的稳健性,这两个方面存在着矛盾。变换域图像的大部分能量集中在低频部分,DCT 变换后低频系数值较大,而高频系数值较小。人眼对于低频区敏感,对于高频区则不十分敏感,将水印嵌入到图像的高频分量中能保证视觉透明性。但是,各种图像处理操作对于图像高频部分的损坏可能性大,如有损压缩、低通滤波等,水印很容易在经历图像处理的过程中损失,稳健性较差。如果要获得很好的稳健性,数字水印应加在低频部分,但是这样引起的图像降质较大,无法保证视觉透明性<sup>[5]</sup>。因此为了避开这一矛盾,在本文中数字水印的嵌入选在图像的 DFT 中频部分,用水印序列对中频参数进行调制,从而在视觉透明性和稳健性之间进行折中。具体做法如下:

(1) 选择合适的水印信息  $(W)$ ,本文下面实验选择的是一幅  $25 \times 25$  的二值图像。二值图像是一个  $(0, 1)$  序列,加载方便、可视性强。

(2) 对图像进行离散傅里叶变换(DFT),得到其频谱图  $(F)$ 。在其左上和右上的中频处选择两个水印载体  $C_A, C_B$ ,载体的大小应大于水印图像的大小。

(3) 对  $C_A, C_B$  进行离散余弦变换(DCT)并嵌入水印。由于 DFT 是复值的, 而 DCT 是实值的, 因此对  $C_A, C_B$  的模值矩阵  $C_{AM}, C_{BM}$  分别进行 DCT 变换。水印嵌入的公式为

$$\begin{aligned} A_{i,j} &= A_{i,j} (W_{i,j}=1) \\ A_{i,j} &= A_{i,j} (W_{i,j}=0) \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\alpha$  为拉伸因子, 且  $\alpha > 1$ 。通过调整  $\alpha$  值来控制水印添加强度, 它对数字水印的影响很大。当  $\alpha$  趋近于 1 时, 相当于未嵌入水印。 $\alpha$  值越小, 则视觉透明性越好, 但水印的稳健性越差;  $\alpha$  值越大, 则水印嵌得越深, 稳健性越好, 同时视觉透明性越差。由于 DCT 变换后的图像中频系数很小, 因此  $\alpha$  的取值可以取到 10 左右, 具体视情况而定。

(5) 对嵌入水印的两个模值矩阵进行逆 DCT 变换, 得到  $C_{AM}, C_{BM}$ ; 求系数矩阵  $M_A = C_{AM}/C_{AM}$  和  $M_B = C_{BM}/C_{BM}$ ; 最后令  $C_A = M_A C_A, C_B = M_B C_B$ 。

(6) 对嵌入水印信息的频谱图( $F$ )进行逆傅里叶变换, 得到添加水印的图像( $D$ )。

#### 4 水印的检测算法步骤

(1) 添加水印的图像( $D$ )和原始图像( $D$ )配准使两者同步。若  $D$  遭受到旋转的攻击, 可以利用第 2 节介绍的方法将图像配准; 若遭受其他的几何攻击也是采用先找到攻击的方法, 再进行逆操作使被检测图像和原始图像配准。

(2) 将被检测图像( $D$ )和原始图像( $D$ )分别进行 DFT 变换得到( $F$ )和( $F$ )。

(3) 通过判决取得水印信息。在  $F$  中取得加入水印的载体  $C$ , 在  $F$  中取得水印载体  $C$ , 分别对  $C$  和  $C$  的模值矩阵做 DCT 变换, 提取水印信息。判决方法为: 若  $C_{i,j} = C_{i,j}$ , 判断为 0, 否则判断为 1。为了提高检测的精确度, 将提取的两个水印进行比较。当两者的对应位均为 0 时才判定水印位为 0, 否则判断为 1。最终得到的 0, 1 序列就是检测出的水印序列, 将其以图像格式输出就得到水印图像  $W$ 。

我们使用相似函数来测试原水印数据  $W$  和提取出的水印数据  $W'$  之间的相关性, 以完成水印测试。相似函数定义为

$$\text{sim}(W, W') = \frac{\sum_{n=1}^{wl} W(n) \cdot W'(n)}{\sum_{n=1}^{wl} W^2(n)} \quad (9)$$

在下面的实验中, 当取得的水印数据完全准确时, 相关系数依照公式求得为 22.226 1。水印存在与否的判定标准为<sup>[4]</sup>: 若  $\text{sim}(W, W') > T$ , 可以判定被测图像中有水印  $W$  存在; 否则没有水印  $W$ 。  $T$  的选择要同时考虑虚警概率和漏警概率<sup>[4]</sup>。  $T$  减小, 漏警概率降低而虚警概率提高;  $T$  增大, 则虚警概率降低而漏警概率提高。根据实际需要, 本文将  $T$  设定为 20。

#### 5 实验数据及分析

在纹理复杂程度不同的图像 Lena(512 × 512) 和 Peppers(512 × 512) 中, 用本文介绍的算法对其添加水印, 所选择的水印是一幅 25 × 25 的二值图像。对图像 Peppers,  $\alpha = 10$ , 对图像 Lena,  $\alpha = 9$ 。水印载体均选取 DFT 变换的中频部分 150 × 150 某一区域, 在该区域 DCT 变换的中频嵌入水印。检测时根据需要进行选择不同的  $\alpha$  值。当图像未受攻击时, 测试结果如 4、图 5 所示。实验结果显示, 添加水印后的图像和原始图像在人眼看

来是没有什么差别的, 并且通过提取算法, 可以很完整地提取到水印。



(a)Lena 原始图像 (b)Lena 加水印图像 (c)Peppers 原始图像 (d)Peppers 加水印图像

图 4 原始图像和添加水印的图像的对比

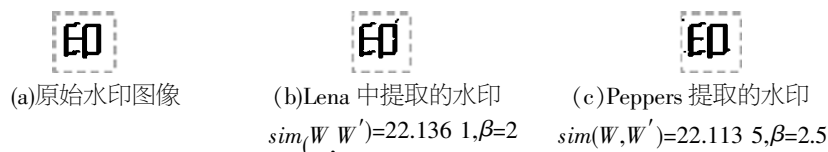


图 5 原始水印和提取的水印的对比图

#### 5.1 旋转测试

攻击者对图像攻击时常采用旋转的方法, 旋转一个微小的角度以破坏水印提取的同步性。当图像受到旋转攻击时, 采用的方法是: 按第 2 节介绍的配准方法求得旋转角度, 再将图像反旋转回原位置, 使被检测图像和原始图像同步, 这样就很好地检测出水印。我们随机选取  $0^\circ \sim 360^\circ$  中的五个角度进行测试, 图像受到旋转攻击时的试验结果如图 6 所示。

旋转角 $\theta$	$1^\circ$	$5^\circ$	$70^\circ$	$195^\circ$	$230^\circ$
提取的水印 $W'$					
$\text{sim}(W, W')$	21.379 7	21.503 8	21.415 7	21.522 6	21.325 0
$\beta$	2	2	1.8	1.8	1.8

(a)Lena 测试结果

旋转角 $\theta$	$1^\circ$	$5^\circ$	$70^\circ$	$195^\circ$	$230^\circ$
提取的水印 $W'$					
$\text{sim}(W, W')$	21.414 6	21.450 8	21.480 6	21.512 7	21.193 4
$\beta$	2.5	2.5	2.3	2	2

(b)Peppers 测试结果

图 6 试验结果

进一步实验表明, 当图像遭受旋转攻击且转动微小角度时, 不进行匹配同样可以很好地提取水印。在这种情况下, 能够经受的旋转攻击的平均最大角度不小于  $0.1$ 。

#### 5.2 裁剪测试

对图像进行裁减不但会破坏图像, 同时也破坏了嵌入图像中的水印。本文提出的算法对裁减攻击有较好的抵抗性, 图像遭受裁减攻击时, 无论是规则裁减还是随机裁减都可以提取出其中的水印信息。测试结果如图 7 所示。



图 7 添加水印后的图像裁减后的测试结果

裁剪后图像	(a)	(b)	(c)	(d)
提取的水印				
$\text{sim}(W, W')$	20.012 7	20.263 1	22.113 5	22.113 5
$\beta$	1.3	1.7	2.5	2.5

图 7 添加水印后的图像裁减后的测试结果

图 7 添加水印后的图像裁减后的测试结果

以上结果表明, 当图像被裁减后, 用黑色对裁减掉的区域填补, 然后用本文提出的检测算法检测。图像虽然经历了大面积的裁减, 但是仍然可以提取出水印图像。上述实验证明该水印算法对裁减有较好的鲁棒性。

(下转第 84 页)