

基于小波域的第二代数字水印算法的研究

兰红星^{1,2}, 陈松乔¹, 胡爱娜², 李陶深^{1,2}

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410083; 2. 广西大学计算机与电子信息学院, 广西南宁 530004)

摘 要: 提出一种基于离散小波变换(DWT)域的第二代水印算法. 该算法在CBWM模型基础上, 把视觉系统掩蔽特性应用于水印的编码过程, 引入了小波块的概念. 算法首先从小波变换后的系数中提取出图像的重要特征值作为水印信息, 然后通过调制将水印依次嵌入到图像的分解层中, 最后该特征值在提取水印时作为位置参考点. 实验结果表明, 该水印算法对一般的几何攻击具有较强的鲁棒性, 对旋转具有独特的抗干扰性.

关键词: 数字水印; 离散小波变换; 第二代水印; 人眼视觉特性; 小波块; 几何攻击

中图分类号: TN319 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2007)09-1799-05

Research on the Second Generation Digital Watermarking Algorithm Based on DWT Domain

LAN Hongxing^{1,2}, CHEN Songqiao¹, HU Aina², LI Taoshen^{1,2}

(1. School of Information science and Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. School of Computer, Electronics and Information, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: A new second generation watermarking method based on DWT was presented in the paper. Based on the model of CBWM, this algorithm applies the visual masking of HVS to the code of watermark, and introduces concept of wavelet block. At first, the algorithm extracts the most important image characteristic value from the coefficients of wavelet transformation as watermark information. And then, it embeds the watermark to decomposing layer of image by modulating. When extracting watermark, the characteristic value is acted as position reference point of watermark. Experiment results show that the watermarking algorithm is robust against common geometry attacks and special anti-interference resistance to rotation.

Key words: digital watermarking; DWT; the second generation watermark; HVS; wavelet block; geometry attacks

1 引言

近年来人们对小波域的图像水印技术进行了积极的研究, 提出了许多有效的水印算法^[1,2]. 现有的水印算法中, 水印的选择一般均与图像内容无关, 这对算法的安全性和鲁棒性是不利的, 因为当水印图像遭受到有意或者无意的攻击时, 攻击者往往可以很容易在不破坏图像基本质量的情况下去掉水印. 当水印与图像本身捆绑在一起的时候, 水印被破坏时图像特征也被破坏, 也就失去了图像的应用价值. 为此, Kutter 等人提出了第二代水印的概念^[3]. 第二代水印方案考虑的不是应用像素或者变换系数, 而是根据数据的重要特征嵌入水印信息, 它把水印和图像本身联系在一起, 大大提高了算法的抗干扰性和隐蔽性, 具有更高的鲁棒性, 是目前新兴的研究领域. 所谓图像的重要特征通常包括边界特征、角特征、纹理特征等. 并不是所有的图像特征都适合水印, Kutter 等提出了适合水印的视觉重要特征一般应具

有以下性质^[4]:

- (1) 对噪音不敏感(有损压缩、加性、乘性噪音等);
- (2) 适应几何变换(旋转、平移、下采样、长度比改变等);
- (3) 局部性(图像裁剪不会改变剩下的特征点).

Clík 等^[5]分析了特征用于水印检测参考点的水印算法, 讨论了算法每一部分的要求、满足要求的解决方案以及方案在理论和实践上的限制. 基于文献[5]最直接的例子是 Bas 等在文献[6]中提出的算法. Kaewkamnerd 等^[7]提出了一个基于 DWT 和特征的水印算法, 该算法把一个无意义的伪随机序列组成的水印嵌入到小波分解高频带的大系数中, 即把水印直接潜入到特征点.

近年来, 人们研究的抗几何攻击水印技术主要集中在抗旋转、缩放和平移(简称 RST), 先后提出了一些算法^[8]. Zhou 等^[9]从理论上证明, 图像的奇异值对于几何失真(转置、镜像、旋转、放大、平移)具有不变性, 可以用来嵌入水印. Emi 等^[10]将离散小波变换(DWT)与奇异值

分解(SVD)结合起来, 对小波变换系数进行奇异值分解, 在 4 个子带中分别嵌入水印, 取得了较好的效果.

本文对基于离散小波变换域的第二代数字水印进行研究, 提出了能充分利用图像特征点信息的水印算法, 选择更合适的尺度因子来控制水印嵌入的强度和能量, 从而有效地抵抗几何攻击和 Stirmark 基准攻击.

2 水印嵌入算法

2.1 特征向量的选取

文献[11]通过实验证明了低频系数较高频系数具有较大的容量. 因此, 特征向量一般都是从低频系数矩阵 C' 中提取, 以保证水印有足够的鲁棒性. 在本文算法中, 采用从低频系数矩阵 C' (32×32) 中获得的特征向量 $D = \{d_k\}$ 的方法, 即由低频系数 C' 中局部极大值组成. 而且 LL_m 的数据量是原始图像的 $\frac{1}{4^m}$, 从而可在较大程度上降低特征提取的计算量.

2.2 水印的选择

对于一幅原始图像的特征向量 $D = \{d_k\}$, 一般均可找到相应的与 D 正交的水印空间 $F_w \subset F^k$ (F 代表实数域), 其中:

$$F_w = \{W: \sum_k d_k w_k = 0, k = 1, 2, \dots, k\} \quad (1)$$

即对任何属于 F_w 的向量 $W = \{w_k\} \in F_w$, 有:

$$D^T W = 0 \quad (2)$$

其中 $W = \{w_k\} \in \{1, -1\}$, $k = 1, 2, \dots, K$. 那么满足式(1)的水印有多个, 这里水印空间的确定是一个受约束的优化过程, 即 $W = \arg \min_{w \in F^k} |D^T W|$.

在实际操作中, 其优化的中止条件为:

$$|D^T W| < \theta \quad (3)$$

其中 θ ($\theta > 0$) 是优化过程中预定义的阈值.

2.3 小波块的分类

对于一幅原始图像, 其空间域上的每一个像素块对应于小波变换域中的几个块, 分别可由一棵四叉树表示其位置关系, 根据它们所在的方向分别称为水平子树、竖直子树和对角子树, 总称为小波子树(如图1所示). 小波子树的树根在低频带, 对应于同一空间位置的相同方向、不同尺度的小波系数成为它的孩子. 在低频带, 若父结点的位置为 (i, j) , 则它的 3 个子结点的位置为 $(i, j + N)$, $(i + N, j)$, $(i + N, j + N)$, 其中 N 为低

频带的宽度. 在其他频带, 若父结点的位置为 (i, j) , 则它的 4 个子结点的位置为 $(2i, 2j)$, $(2i, 2j + 1)$, $(2i + 1, 2j)$, $(2i + 1, 2j + 1)$. 小波子树的详细描述见文献[12].

小波块的块数为低频带系数的个数, 一个低频系数对应一个小波块. 小波块把空间域同一位置不同尺度、不同方向的小波系数组织在一起, 从而把小波系数和它代表的空间域联系在一起. 低频系数代表它所在的小波块对应的图像块的平均亮度.

为了尽可能提高水印嵌入强度, 我们将小波块分为两类: 具有较弱纹理的为第 1 类, 记为 S_1 ; 具有较强纹理的为第 2 类, 记为 S_2 . 较大的小波系数对应着原始图像的像素突变点, 因此一个小波块内大的小波系数越多, 纹理就越强. 即如果 $\text{number}\{ |F(u, v)| > T_f, (u, v) \in w_k \} \leq T_2$, 则小波块 $w_k \in S_1$; 否则 $w_k \in S_2$. 其中 T_f 和 T_2 为预先设定的门限. 根据大量实验可得, T_f 取 0 和 40 时对不同类的图像有较好的稳健性.

2.4 水印的嵌入算法

设 $A = \{a_{ij}\} \in F^{M \times N}$ 为原始图像, $B = \{b_{ij}\} \in F^{M \times N}$ 为加载水印后图像, 那么该水印的嵌入算法的步骤如下:

Step 1: 对原始图像作三级小波分解(DWT), $f: A \rightarrow A'$;

Step 2: 从小波变换域 A' 的低频系数矩阵 C' 中, 选择一个特征向量 $D = \{d_k\} \in C'$;

Step 3: 按照下述公式将水印 $W = \{w_k\}$ 嵌入到 $\{d_k\}$ 中, 以得到新的特征向量 $D' = \{d'_k\} \in B'$;

$$d'_k = d_k (1 + \alpha w_k), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

其中参数 α 是控制水印嵌入强度或能量的常数. 可以通过参数 α 来利用视觉系统的纹理掩蔽特性, 在满足不可见性的前提下, 合理地分配嵌入的水印强度. 本文在分配嵌入强度时, 参照上述小波块分类的结果进行调整控制因子的大小, 即若 d_k 所在的小波块属于较强纹理类 S_2 时, 则 $\alpha = 0.015$; 若 d_k 所在的小波块属于较弱纹理类 S_1 时, 则 $\alpha = 0.005$.

Step 4: 用新的变换域矩阵 B' 重构水印子图像 B , $f^{-1}: B' \rightarrow B$.

3 水印的提取及检测算法

本文算法属于盲水印, 在水印检测时不需要原始图像, 而只需要原始图像的特征向量在变换域中的位置, 即可直接提取 $D' = \{d'_k\} \in B'$. 在基于图像特征或图像内容的数字水印算法中, 许多文献一般只描述水印的检测, 而不介绍水印解码. 因为水印检测只给出一个水印存在与否的二值决策, 即在给定一个预定义的正数 θ 作为阈值的情况下, 若图像的特征向量 D 和给出的水印 W 满足式(3), 那么, 计算标量 Z 的公式为:

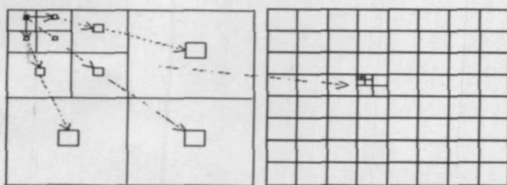


图1 小波数和小波块示意图

$$\begin{aligned} Z &= \sum_k d'_k w_k = \sum_k [d_k(1 + \alpha_k w_k)] w_k \\ &= \sum_k d_k w_k + \sum_k \alpha_k d_k w_k^2 \end{aligned} \tag{5}$$

事实上, 如果图像包含水印, 那么有:

$$Z = \sum_k d'_k w_k = \sum_k d_k w_k + \sum_k \alpha_k d_k w_k^2 \leq \theta + m \cong m \tag{6}$$

若图像不包含水印, 则式(5) 变为:

$$Z = \sum_k d'_k w_k = \sum_k d_k w_k \leq \theta \tag{7}$$

由于在式(3) 中, θ 非常小, 可以忽略不计, 所以水印检测可以化为如下的假设检验

$$H_1: Z = m + e(t), H_0: Z = e(t) \tag{8}$$

其中, m 是常数, $e(t)$ 表示由图像的失真而产生的误差. 这里, 把由图像失真(如图像滤波、添加噪声、几何变换等) 产生的误差看成是随机噪声, 并认为服从高斯分布 $e(t) \sim N(0, \sigma^2)$.

本文的算法根据 Neyman-pearson 准则来计算决策阈值 Z_r , 若 $Z > Z_r$, 则判定水印存在; 若 $Z < Z_r$, 则判定水印不存在. 这里水印检测算法依据 Neyman-pearson 决策^[13], 具体检测方法参照文献[13].

4 实验结果以及性能分析

4.1 检测结果与性能分析

本文对 256×256 的灰度图像 Lena(如图 2(a)) 进

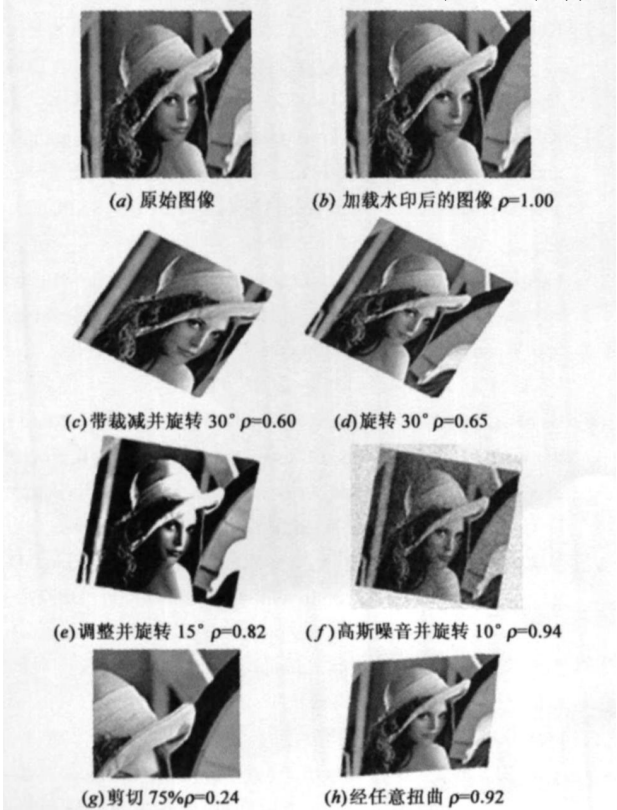


图 2 水印图像 Lena 经过各种攻击后的结果图以及相关系数值 ρ

行了测试, 水印图像的峰值信噪比 PSNR= 45. 068dB. 图 2(b)~(h) 列出了部分测试图像, 代表了不同的攻击情况. 下面将对几种不同的攻击的检测情况进行简单描述.

(1) 抗 Stirmark 攻击

Stirmark 是目前比较权威的水印攻击软件, 它使得很多经典的水印算法失效. 这种攻击是对图像的局部几何性质进行了改变, 而且不能通过仿射变换达到同样的攻击效果.

本文测试时的旋转攻击选用对图像单独旋转不同角度、带尺度变换和剪切的不同角度旋转等.

分析图 2 的测试结果, 可以看出本文算法对于 Stirmark 攻击有相对较好的稳健性.

为了证实本文算法的有效性, 实验中我们还分别对文献[12] 和文献[13] 给出的两种具有代表性的算法进行了鲁棒性测试. 实验结果如表 1 所示. 分析图 2 和表 1 的实验结果, 可以得出以下几点结论:

①中值滤波、中心裁剪、几何变换等多种情形都会导致文献[14] 算法的检测失败.

②当水印图像的剪切超过 10% 或旋转超过 13° 后, 文献[13] 中算法不能正确地检测出来水印, 而对其它的情形均可以检测出来.

③本文算法在测试时, 当图像经过轻微旋转后, 仍可以准确地检测到水印. 随着旋转角度的增大, 原始水印和提取水印之间的相关系数也逐渐减小, 但是其检测系数依然大于相关系数的阈值 0.58, 也就是说算法依然可以成功检测出水印信息. 当水印图像的旋转超过 20° 后, 水印检测失效. 显然, 在旋转攻击方面, 本文算法的性能要优于文献[12] 和[13] 的算法.

表 1 本文算法与文献[12]、[13] 算法的实验结果对比

测试类型	测试数目	文献[12] 算法	文献[13] 算法	本文 算法
滤波(高斯、锐化、中值)	5	4	5	4
JPEG	10	10	10	10
尺度变换	5	5	5	4
带尺度变换和裁剪的旋转	15	7	9	8
不带尺度变换的旋转	15	8	10	12
几何变换(平移、缩放)	5	3	5	5
合计	55	37	44	43

(2) 抗 JPEG 攻击

这种方法是最常见的水印攻击方法. 本文对加载水印的图像进行了质量因子分别为 90、60、30 的攻击测试. 从测试结果可以看出, 本文算法均可正确的检测到水印.

(3) 抗剪切攻击

本文对水印图像进行不同尺度的缩放、扩大等测试操作。测试结果表明, 本文算法对于图像的几何变换中的图像平移、图像按比例缩放、坐标转换具有一定的抵抗能力, 但是也存在检测失败的情况。

(4) 抗滤波、加噪攻击

测试主要进行加高斯噪音等攻击测试。测试结果表明本文算法对高斯噪音攻击也具有一定的抵抗能力, 但其鲁棒性还有待进一步改善。

4.2 同类算法比较

为了说明本文算法的鲁棒性, 我们分别将算法与文献[14]和[15]中提出的水印算法进行了鲁棒性检测的实验对比, 实验的结果如图3、图4所示。文献[14]提出了一种基于图像内容的局部化自适应数字水印算法, 该算法类似于文献[4]中算法。从理论上讲, 文献[14]的算法只要裁剪下来的部分图像中至少包含一个特征点和与该特征点对应的子图像区域, 水印就可以被检测到。但是图像经过压缩和其他图像处理(如滤波、添加噪声等), 其特征点不一定能被检测到, 此时可能会造成水印提取失败。因此, 文献[14]的算法对于裁剪攻击后子图像的鲁棒性还有待提高。从图3的实验结果来看, 对于 JPEG、带尺度的旋转、几何变换等攻击, 本文算法的鲁棒性与文献[14]的算法的鲁棒性相当; 但是对于不带尺度的旋转攻击, 本文算法的鲁棒性相对较强。

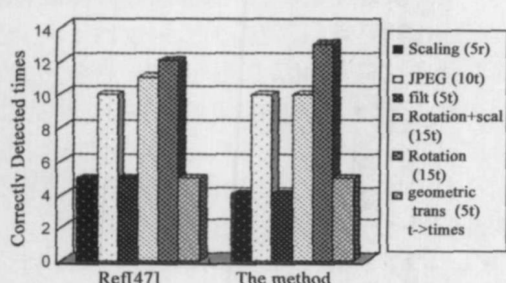


图3 本文算法和文献[14]算法的实验结果对比

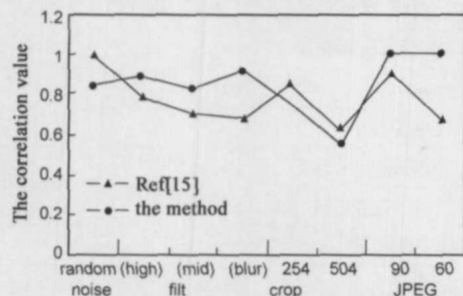


图4 本文算法和文献[15]算法的实验结果对比

从图4所示的实验结果对比中可以看出, 本文算法对于 JPEG 压缩和滤波的鲁棒性要优于文献[15]的算法; 对于色彩调整攻击, 两种算法的鲁棒性能相当; 但是在裁剪和叠加噪音方面, 文献[15]算法的鲁棒性能相对较强, 而本文算法在裁剪和叠加噪音方面的鲁棒性还有待改善。

5 结论

本文在研究第二代水印算法特点的基础上, 提出了一种基于 DWT 域的数字水印算法。该算法充分利用了图像的特征点, 首先从小波变换后的系数中提取出图像的重要系数作为水印信息, 然后通过调制将水印依次嵌入到图像的低频、高频带中。我们通过 Stirmark 工具对算法的稳定性进行检测, 并且检测该水印算法对于攻击工具 Photoshop 的鲁棒性。通过实验和与相关算法进行性能分析对比, 说明本文的水印算法对一般的几何攻击具有较强的鲁棒性, 对旋转具有独特的抗干扰性。

下一步我们将选择更合适的尺度因子、小波块的分类在空间域里进行、与局部水印算法结合等几个方面对算法进行改进, 以便更有效地抵抗裁剪和 Stirmark 攻击, 提高水印算法的鲁棒性。

参考文献:

- [1] Zhang X, Wang S. Watermarking scheme capable of resisting sensitivity attack[J]. Signal Processing Letters, IEEE, 2007, 14 (2): 125-128.
- [2] Wang S, Zheng D, Zhao J. An image quality evaluation method based on digital watermarking[J]. Circuits and Systems for Video Technology, IEEE, 2007, 17(1): 98-105.
- [3] Kutter M, Bhattacharjee S, K Ebrahimi. Towards second generation watermarking scheme[A]. Proc of ICIP 99[C]. Kobe, Japan: IEEE, 2002, 1: 320-323.
- [4] Kutter, Martin. Watermarking resistance to translation, rotation, and scaling[A]. In proceedings of SPIE: Multimedia Systems and Applications[C]. San Jose, USA: SPIE, 1998, 3528: 423-431.
- [5] Clik M U, Saber E, Sharma G. Analysis of feature-based geometry invariant watermarking[A]. In Processing of SPIE: Security and Watermarking of Multimedia Contents III[C]. San Jose, USA: SPIE, 2001, 4314: 261-268.
- [6] Bas P, Chassery L M, Macq B. Robust watermarking based on the waping of pre-defined triangular patterns[A]. In proceedings of SPIE: Security and watermarking of multimedia contents II[C]. San Jose, CA, USA: SPIE, 2000, 3971: 99-109.
- [7] Kaewhamnerd N, Rao k R. Wavelet Based Watermarking Detection Using Multi Resolution Image Registration[DB/OL]. http://www-ee.uta.edu/dip/paper/tencon_water.pdf.
- [8] Lin CY, Wu M. Rotation scale and translation resilient watermarking for images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(5): 765-782.
- [9] Zhou B, Chen J. A geometric distortion resilient image watermarking algorithm based on SVD[J]. Image and Graphics, 2004, 9(4): 506-512.

- [10] Emir Ganic, Ahmet M. Eskicioglu. Robust DWT-SVD domain image watermarking: embedding data in all frequencies[A]. Proceedings of the 2004 Workshop on Multimedia and Security[C]. Magdeburg, Germany: ACM Special Interest Group on Multimedia, 2004. 166- 174.
- [11] Huang Daren, Liu Jiufen, Huang Jiwu. An embedding strategy and algorithm for image watermarking in DWT domain[J]. Journal of Software, 2002, 13(7): 1290- 1296.
- [12] Cox I J, Matt L Miller. A review of watermarking and the importance of perceptual modeling[A]. Proceeding of SPIE Conference on Human Vision and Electronic Imaging[C]. Santa Clara, California: SPIE. 1997. 92- 99.
- [13] Liu Ruizhen, Wang yunhong, Tang Tieniu. Image content based watermarking model[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6A(6): 558- 562.
- [14] 王贤敏, 关泽群, 吴严寒. 基于图像内容的局部化自适应数字水印算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(4): 465- 469.
- [15] 孙鑫, 易开祥, 贾敏锐. 一种基于图像特征区域的数字水印系统[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(23): 88- 91.

作者简介:



兰红星 男, 1956 出生于广西容县, 中南大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要从事计算机网络、数字水印、信息安全等方面的研究.



胡爱娜 女, 1980 年出生于河南省, 硕士. 主要从事数字水印、信息安全等方面的研究.



陈松乔 男, 1941 年出生于湖南省, 中南大学信息科学与工程学院教授, 博士生导师. 主要从事软件工程和计算机算法等方面的研究.



李陶深 男, 1957 年出生于广西南宁市, 中南大学信息科学与工程学院博士研究生. 主要从事计算机网络、分布式数据库、信息安全等方面的研究.