

一种基于混沌调制的零水印算法

向华¹⁾ 曹汉强¹⁾ 伍凯宁¹⁾ 魏访²⁾

¹⁾(华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074) ²⁾(华中科技大学图像所, 武汉 430074)

摘要 数字水印是一种通过在数字媒体里嵌入秘密信息来保护知识产权的技术。由于在图像中嵌入数字水印后,会导致图像一定程度的失真,因此,近年来出现了一种新的零水印方法。针对数字水印的不可感知性和鲁棒性之间的矛盾问题,提出了一种基于混沌调制的图像零水印方法,即该方法是从原始图像或测试图像的小波变换系数中提取低频子带部分小波系数的特征作为水印,而所抽取的小波系数的位置则由混沌法随机生成。实验结果表明,此算法的不可觉察性很好,并对一些诸如中值滤波、JPEG压缩、附加高斯噪声、裁剪和旋转等各种图像处理攻击有较强的鲁棒性。该方法改变了传统的向原始图像中嵌入水印信息的做法,不仅其得到的水印图像是无失真的,而且在不知道混沌初值的情况下,不可能成功地提取特征水印。

关键词 零水印 小波变换 混沌

中图分类号: TP309 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)05-0720-05

A Zero-watermarking Algorithm Based on Chaotic Modulation

XIANG Hua¹⁾, CAO Han-qiang¹⁾, WU Kai-ning¹⁾, WEI Fang²⁾

¹⁾(Department of Electronics & Information Engi, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

²⁾(Institute of Pattern Recognition & Artificial Intelligence, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract In this paper, a chaotic modulation digital image zero-watermarking method is proposed. Select some low frequency wavelet coefficients of original or tested image and compute the character of the selected coefficients to create watermarking. The wavelet coefficients is randomly selected by the chaotic method. The experimental results show that the watermarking method is invisible and robust against some image processing such as median filtering, JPEG compression, additive Gaussian noise, cropping and rotation attacks and so on. This method changes the traditional doings that watermarking is embedded into images, and make the watermarked image distortion-free. If the initial value of chaos is unknown, the characteristic watermarking can not be extracted correctly.

Keywords zero-watermarking, discrete wavelet transform(DWT), chaos

1 引言

随着信息技术和计算机网络的发展,不但各种数字媒体得到广泛的使用,而且越来越多的信息都通过网络传输,但数字化时代在给人类带来便利的同时,也出现了诸如侵权、拷贝等一系列问题,数字水印就是在这样一种背景下提出的^[1,2]。数字水印就是在多媒体数据(图像、声音、视频信号)中添加

数字信息(水印)而不影响原数据的视听效果,并且这些数字信息可以全部或部分从混合数据中恢复出来,以起到版权保护的作用。

目前虽已提出了许多数字水印方法,但无论是频域水印法,还是空域水印法,都是通过对图像的空域信息或其频域信息做了一定的修改来嵌入水印信息,而这些修改都会导致图像产生一定程度的失真。这样,水印信息的嵌入在达到保护数字媒体版权作用的同时,也降低了其使用价值,这就是数字水印的

基金项目:国家自然科学基金项目(6027099);湖北省科技攻关重点项目(2003AA101B03)

收稿日期:2005-03-21;改回日期:2005-07-06

第一作者简介:向华(1979~),男,2005年获华中科技大学硕士学位。主要研究方向为信息安全、数字水印。E-mail:itdnet@mail.hust.

可感知性和鲁棒性之间的矛盾。那么有没有调和这两者之间矛盾的方法呢?目前,已有研究人员提出了利用图像的重要特征来构造水印信息,而不是修改图像重要特征的水印方法,这种不修改原图任何数据的水印称为“零水印”。零水印方法是一种新的数字水印方法,它能够很好地解决不可见数字水印的不可感知性和鲁棒性之间的矛盾^[3,4]。文献[3]的零水印采用的是高阶累积量的方法,由于其算法非常复杂,计算量过大,因此不易推广到实用。文献[4]的零水印是通过判断小波系数所处的区间位置来确定,如果低频小波系数比较接近的话,则在提取时的误差将非常大。本文根据小波变换低频子带部分小波系数的特征,采用混沌法随机抽取小波系数,提出了一种基于混沌调制的图像零水印方法。实验表明,这种水印不仅稳定性和安全性能好,而且算法的鲁棒性强。

2 基于小波变换的零水印算法

基于小波变换的零水印算法的基本思路是:首先对原始图像进行 L 级小波变换,然后抽取小波分解后的低频子带部分小波系数的特征作为水印。之所以选择低频子带,是由于低频子带携带了图像的最重要信息的缘故,如果低频子带系数破坏很大,则图像失真将很严重,其中所抽取的小波系数的位置是由混沌法随机生成的。水印的嵌入和检测流程图分别如图 1、图 2 所示。

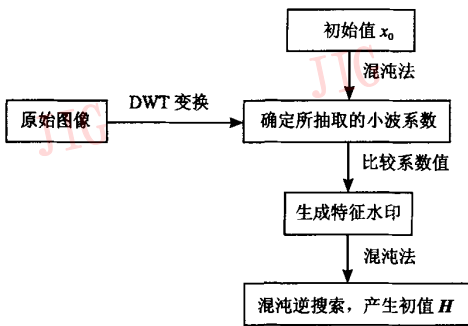


图 1 嵌入水印流程图

Fig. 1 Watermark embedding flowchart

2.1 水印的嵌入方法

2.1.1 小波系数位置的确定

要确定小波系数的位置,首先要确定选取的小波系数的数量,而后者则和图像的大小以及小波分解的

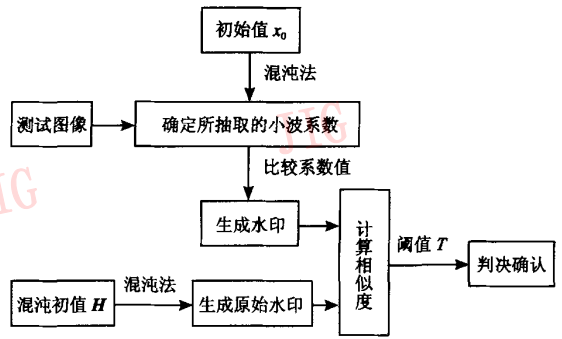


图 2 检测水印流程图

Fig. 2 Watermark detecting flowchart

级数^[5]有关,比如一幅 256×256 大小的图像,在进行 3 级小波变换后,其低频子带的大小是 32×32 ,因此能够选取的小波系数的个数小于 1024。若选取的小波系数的个数是 N ,则具体的位置确定方法如下:

假设混沌的初始值为 x_0 ,则可首先采用下面的 Logistic 映射^[6]

$$x_{i+1} = 4x_i(1 - x_i) \quad (0 < x_i \leq 1) \quad (1)$$

来产生长度为 N 的序列,然后再转化成 $1 \sim 1024$ 间的整数,即可得到对应选择的小波系数的位置。其转化的方法是

$$X_i = \text{ceil}(1024 \cdot x_i) \quad (1 \leq i \leq N) \quad (2)$$

其中 $\text{ceil}()$ 为向上取整函数。

2.1.2 生成特征水印

假设特征水印是 W ,其长度是 $N/2$ 。

然后,根据确定的位置,就可以得到 N 个小波系数的值,该值用 f_i 表示, $1 \leq i \leq N$ 。比较相邻的小波系数的值,如比较系数 f_1 和 f_2 ,若 $f_1 - f_2 > 0$,则 $w_1 = 1$,否则 $w_1 = 0$ 。具体公式如下:

$$w_j = \begin{cases} 1 & \text{if } f_{2j-1} - f_{2j} > 0 \\ 0 & \text{if } f_{2j-1} - f_{2j} \leq 0 \end{cases} \quad 1 \leq j \leq N/2 \quad (3)$$

2.1.3 混沌搜索,确定初始值

假设有一个初始值 x_0 ,经过式(1)的 Logistic 映射,即可得到长度为 $N/2$ 的序列 $x = \{x_i, 1 \leq i \leq N/2\}$ 。然后将 x_i 经过下面的映射来生成水印 \hat{W} 。

$$\hat{w}_i = \begin{cases} 1 & \text{if } 0.5 < x_i \leq 1 \\ 0 & \text{if } 0 \leq x_i \leq 0.5 \end{cases} \quad 1 \leq i \leq N/2 \quad (4)$$

如果 W 和 \hat{W} 相同,则 x_0 就是需要的混沌初值。 x_0 的取值范围是在 $(0, 1)$ 间,在搜索时,首先给 x_0 一个比较小的初值,如 $x_0 = 0.0001$,如果 Logistic 映射生成 \hat{W} 不成功,则再以一个比较小的步长来增加

初值 x_0 , 如 $x_0 = x_0 + 0.0001$ 。当 x_0 的值等于 1 的时候, 如果还是无法成功生成 \hat{W} , 则可以进一步减小 x_0 和步长, 同时也可以采取将特征水印分成几段的方法, 使每段对应一个初值, 这样生成成功的几率要大得多, 另外还可以大大缩短搜索的时间。本文在实验的过程中, 就将水印分成 10 段, 其在搜索初值的时候非常迅速。

假设在确定低频子带小波系数的位置时, 用到的混沌映射的初值为 x_0 , 由特征水印搜索到的初值为 H (H 可能是向量), 则 x_0 和 H 在水印检测时都是需要的。

2.2 水印的检测方法

水印检测步骤如下:

(1) 对检测图像进行 L 级小波变换, 首先得到低频子带的小波系数;

(2) 由确定位置的混沌初值 x_0 来找到所要选择的小波系数 $\hat{f}_i, 1 \leq i \leq N$;

(3) 根据 \hat{f}_i , 由式(3)来生成长度为 $N/2$ 的检测图像的特征水印 \hat{W} ;

(4) 由混沌初值 H 来生成长度为 $N/2$ 的原始图像的特征水印 W ;

(5) 比较 W 和 \hat{W} , 假设两者中元素相同的个数为 C , 则相似度可以定义为 $S = C/N$;

(6) 给定一个阈值 T , 如果 $S > T$, 则认为检测图像中含有原始特征水印, 图像的版权属于作者, 否则认为图像不具有原始特征水印, 图像的版权与作者无关。

2.3 阈值 T 的分析

特征水印 W 是由 $\{0, 1\}$ 序列组成, 该水印序列元素值的确定过程是首先计算每一个元素相对应位置的两个低频小波系数差值, 若差值是正, 则元素值是 1, 否则元素值就是 0。对一个毫不相关的测试图像来说, 由于根据它的任意两个低频小波系数的差值来确定的一个水印元素值, 其正确概率都是 0.5, 所以计算出来的整个特征水印的相似度也在 0.5 左右。针对这一点, 本文特地进行了实验, 即首先用混沌法随机生成 100 幅 $256 \times 256 \times 256$ 的灰度图像, 然后用 2.2 节中的检测方法计算出相似度 S , 其对应图形如图 3 所示。

实验中计算出的相似度的最小值是 0.3700, 最大值是 0.6200, 均值是 0.5007。进一步实验发现, 如果检测原始图像自身的相似度, 那么即使在原始图像遭到各种严厉攻击 (如剪切、剪切替换、压缩、旋转等), 已导致检测图像失真很大、峰值信噪比很

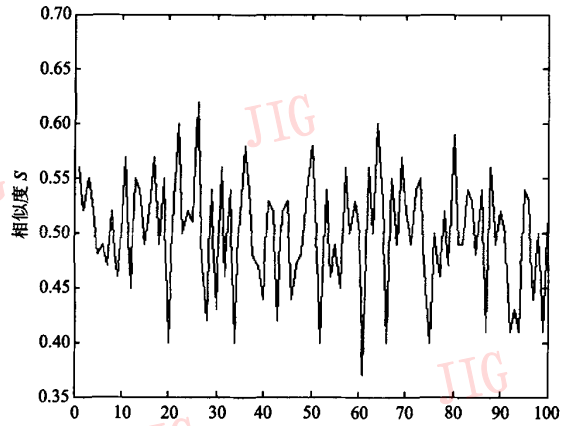


图 3 从随机的 100 幅图像中检测出的特征水印的相似度

Fig. 3 Similarity degree of character watermark detecting from 100 random images

低的情况下, 由于其得到的相似度 S 都还在 0.9 以上, 非常接近 1, 所以可以选取阈值 $T = 0.9$ 来作为判决测试图像是否含有原始特征水印的依据。

3 实验结果及分析

实验采用的原始图像是 $256 \times 256 \times 256$ 的 Lena 灰度图像 (如图 4 所示), 实验时, 首先对其进行 3 级小波变换^[6], 然后进行水印嵌入, 即提取其特征水印。因为本文水印算法没有嵌入任何数据, 所以对原始图像来讲没有任何失真。



图 4 Lena 原始图像

Fig. 4 Lena raw image

下面给出各种攻击实验的数据和分析 (取阈值 $T = 0.9$)。

(1) JPEG 有损压缩实验

首先对含水印的 Lena 图像进行 JPEG 有损压缩, 然后进行检测, 检测结果如表 1 所示, 其中 Q 表示压缩质量因子, S 表示相似度。

表 1 JPEG 有损压缩含水印图像检测的结果

Tab.1 Detecting results in JPEG loss compression for watermarked images

Q	90	70	50	30	20	10	5
相似度 S	1.0	1.0	0.99	0.98	0.97	0.93	0.91
PSNR(dB)	41.83	36.68	34.61	32.80	31.42	28.87	26.03

由表 1 可见,在 Q 逐渐变小的情况下,图像的压缩比增大,相似度也逐渐变小,说明 JPEG 压缩对图像低频系数的破坏程度加大,即使当 Q 等于 5,压缩比约为 37.7 的时候, S 值仍大于阈值 T ,这表明该算法针对 JPEG 压缩有很强的鲁棒性。

(2) 中值滤波实验

对含水印的 Lena 图像进行中值滤波实验的计算结果如表 2 所示。

表 2 中值滤波后含水印图像检测的结果

Tab.2 Detection results in mean filter for watermarked images

滤波器尺寸	PSNR(dB)	相似度 S
3×3	31.83	0.98
5×5	29.41	0.98
7×7	27.56	0.97

由于中值滤波可以有效地去除脉冲型噪声,因



(a) 剪切纹理区



(b) 剪切边缘区



(c) 剪切平滑区



(d) 大范围的剪切替换

图 5 剪切和剪切替换图

Fig.5 Crop and substitute images

表 4 剪切和剪切替换含水印图像的检测结果

Tab.4 Detection results in crop and substitution for watermarked images

检测指标	剪切类型			
	剪切纹理区 (a)	剪切边缘区 (b)	剪切平滑区 (c)	剪切替换 (d)
PSNR(dB)	20.33	18.99	19.79	18.77
相似度 S	0.97	0.98	0.91	0.96

此对图像的边缘有很好的保护,其对于图像来说,主要是破坏细节部分,但对于小波系数来说,破坏的是高频系数,由于本文的特征水印是针对低频子带的,所以对中值滤波具有较强的鲁棒性。

(3) 添加噪声实验

本实验噪声攻击是采用在含水印的 Lena 图像中添加高斯白噪声和椒盐噪声后来进行检测,所得检测结果如表 3 所示。

表 3 噪声攻击后含水印图像的检测结果

Tab.3 Detection results in noises for watermarked images

检测指标	噪声类型			
	高斯 (0,0.01)	高斯 (0,0.02)	椒盐 (0.02)	椒盐 (0.04)
PSNR(dB)	20.02	17.08	22.57	19.65
相似度 S	0.96	0.95	0.97	0.96

由表 3 可见,随着噪声的加大,虽然图像的 PSNR 降低很多,此时图像的失真已很大,但检测出的相似度值 S 仍大于阈值 T ,这说明该算法对噪声攻击具有很强的抵抗性。

(4) 剪切和剪切替换实验

对含水印的 Lena 图像的不同部位进行剪切和剪切替换实验的图像如图 5 所示,相应的 PSNR 和相似度 S 如表 4 所示。

(5) 旋转攻击实验

实验时,首先对含水印的 Lena 图像作旋转处理。检测时,将旋转后的图像反向旋转同样的角度,由于此时图像的尺寸变大,因此要对图像进行裁剪,但应尽可能地保留中心点附近的像素,并且图像被裁去部分用原图像填充。如图 6 所示,图 6(a)是旋转 20° 后的图像,图 6(b)是反向旋转 20° 后的图



图 6 Lena 图像旋转和反向旋转

Fig. 6 Rotation and reverse rotation of Lena images

像。表 5 是旋转不同角度下含水印图像的检测结果。

表 5 旋转不同角度的含水印图像的检测结果

Tab. 5 Detection results in various rotations for watermarked images

检测指标	旋转度数(°)						
	2	5	10	15	20	30	40
PSNR(dB)	22.19	28.33	22.90	21.93	28.50	22.80	22.26
相似度 S	0.95	1.0	0.95	0.94	1.0	0.96	0.95

旋转对于图像而言是很严厉的攻击,一般水印算法对其都比较敏感。从上表可以看出,该水印算法对旋转攻击的鲁棒性还是比较强的。

4 结 论

目前已有的关于数字水印的算法虽很多,但一般都有以下两个比较明显的弊端:一是易对图像造成破坏,因为即使再优秀的嵌入式水印算法,都是在图像中嵌入了数据(水印),这就不可避免地对图像造成一定程度的破坏;二是由于不可见性和鲁棒性不易兼得,为了增强不可见性,嵌入水印的强度要小,而为了增强水印的鲁棒性,则嵌入水印的强度要大,因此嵌入强度是一个非常难于处理的问题。而零水印则正好可以解决这些问题,由于零水印只是从图像中提取出某些特征,因此若把它作为水印,则这种水印与原始图像的主要特征紧密结合,就能在图像的质量得到保证的情况下,使这种水印的稳定

性和安全性都能得到充分的保证,而又不损害原始图像。

本文提出的零水印方案有以下优点:

(1) 因没有向宿主图像嵌入数据,故不可见性好;

(2) 由于小波变换只是用来从原始图像或测试图像中提取低频子带的小波系数,这不仅不需要进行逆小波变换,而且也避免了数值误差,所以利用该方法得到的水印图像是无失真的;

(3) 利用了混沌算法,由于其在不知道混沌初值的情况下,不可能提取特征水印,所以安全性很好;

(4) 水印算法的鲁棒性很强。

零水印的提出虽是对常规的嵌入水印的方法的一个突破,但这种思想和方法还有待进一步的研究和论证,使之得到更好的完善,以便使之可行性和实用性更强。

参考文献 (References)

- 1 YANG Yi-xian, NIU Xin-xin. Review of multi-media information camouflage[J]. Journal of China Institute of Communications, 2002, 23(5):32~38. [杨义先, 钮心忻. 多媒体信息伪装综述[J]. 通信学报, 2002, 23(5):32~38.]
- 2 YI Kai-xiang, SHI Jiao-ying. Digital Watermarking Techniques: An Introductory Review [J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(2):111~117. [易开祥, 石教英. 数字水印技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(2):111~117.]
- 3 WEN Quan, SUN Tan-feng, WANG Shu-xun. Research of digital watermarking technique based on zero-watermark [A]. In: Proceedings of the 3rd National Conference in Information Hiding [C]. Xi'an, 2001:97~101. [温泉, 孙铁锋, 王树勋. 基于零水印的数字水印技术研究[A]. 全国第三届信息隐藏学术研讨会论文集[C], 西安, 2001:97~101.]
- 4 YANG Shu-guo, LI Chun-xia, SUN Yao, et al. A non-watermark scheme based on discrete wavelet transform[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 6(8):664~669. [杨树国, 李春霞, 孙尧等. 基于小波变换的零水印方案[J]. 中国图象图形学报, 2003, 6(8):664~669.]
- 5 Pecora L M, Carroll T L. Synchronizing chaotic circuits[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1991, 38(4):453~456.
- 6 Watson A B, YANG Cloria Y, Solomon J A, et al. Visibility of wavelet quantization noise [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(8):1165~1175.