

一种基于离散小波变换的数字水印算法

王吉林

(盐城工学院 信息工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:概括了数字水印的研究现状和基本原理,分析了基于小波变换的数字水印算法的优势,提出的算法结合了 Arnold 置乱方法和 DWT 变换多分辨率特性,采用线性的、不同的嵌入强度的方法,有效的提高了水印的安全性。实验结果表明该算法具有较强的掩蔽性和鲁棒性。

关键词:数字水印;小波变换;掩蔽性;鲁棒性

中图分类号:TP751

文献标识码:A

文章编号:1671-5322(2010)02-0035-05

数字水印技术是利用数字图像中普遍存在的冗余数据与随机性把版权信息嵌入在数字图像本身中,从而起到保护数字图像版权或者完整性的一种技术。理想的数字水印方案应该是只有版权所有人才能加载水印,但任何人都可以对其进行验证的水印方案。根据数字水印的嵌入技术不同,水印的嵌入方式可分为空间域和变换域。空间域算法以 LSB (最低有效位)为主,就是将水印信息嵌入到数字图像的某些像素位,具有算法简单、嵌入容量大、不可见性好和提取信息时不需要宿主图像等优点,但 LSB 算法的安全性好、鲁棒性较差。变换域算法则是对公开的宿主信息做正交变换后,利用视觉器官对频域数据的感觉冗余,将水印信息嵌入到隐蔽的频域中,因此具有较强的鲁棒性。如 DCT(离散余弦变换)、DWT(离散小波变换)等是目前应用很广泛的算法。目前人们普遍认为变换域数字水印有更好的稳健性,因此人们对数字水印的研究相对集中于后者。

基于离散小波变换的数字水印算法本身具有良好的空间频率特性和多分辨率表示的优点。文中正是基于小波变换的多分辨率特性实现了一种线性数字水印算法。

1 数字水印算法的基本原理

数字水印的基本原理是将作为标识数据的水印信息嵌入到被保护的宿主数据中,使得水印在宿主数据中不可感知并且足够安全。通常的水印

算法包括3个基本方面:水印的生成、嵌入和提取,并会涉及到水印的选择、水印的验证及基于视觉特性的水印等几项关键技术。

1.1 水印的生成

水印信号分为无意义水印信号和有意义水印信号两种。无意义水印信号的产生通常基于伪随机数发生器或混沌系统,产生的水印信号往往需要进一步的变换以适应水印嵌入算法的需要。有意义水印信号包括二值图像、灰度图像和彩色图像等。有意义的图像可以直接作为水印嵌入到载体数据中,但是为了增强水印的安全性,一般需要先对水印进行加密预处理,处理的方法包括使用 m 序列进行扩频、对水印信号进行位分解及利用图像的置乱对水印进行预处理等。

1.2 水印的嵌入

水印的嵌入从数字通信的角度看,可以理解为一个宽带的信道上用扩频通信技术加入一个窄带信号,由此会涉及到嵌入的方法、嵌入的位置及嵌入的信息量等问题。

小波水印嵌入算法首先将原始图像的二维信号进行小波变换,将水印信息嵌入小波分解的高频子带中可以满足隐蔽性的要求,但增加分解层次会对人类视觉产生很大的影响,同时水印嵌入的低频系数或者高频系数均难以同时满足不可感知性和鲁棒性的要求。

1.3 水印的提取与检测

水印的提取与检测是一个在有噪信道中弱信

收稿日期:2010-03-31

作者简介:王吉林(1966-),男,江苏盐城人,副教授,主要研究方向为电子技术与信息处理。

号的检测问题,最终目的在于判断水印信号是否存在或把水印提取出来。在对提取的水印和原始的水印进行判断和检测的过程中,可以通过输出一个 0 或 1 决策来判断水印的有无。设 C 为相关检测函数, W 为原始水印, W' 为提取水印, K 为密钥, d 为决策阈值,则有:

$$C(W, W', K, d) = \begin{cases} 1, & w \text{ 存在} \\ 0, & w \text{ 不存在} \end{cases} \quad (1)$$

2 基于小波数字水印算法

由于在各种图像处理过程中有损压缩对数字水印的生存打击较大,因此数字水印在嵌入和提取过程中必须利用各种有损压缩的特点来寻求最大的鲁棒性。离散余弦变换是从图像空间到频率空间的全局变换,而离散小波变换是一种局部的变换。由于离散余弦变换的全局本质,在变换空间中任何一个数据的误差都会影响到图像中的每一个像素。离散小波变换的特点是它具有多尺度分析的能力。利用小波变换把原始图像或原始视频序列分解成多频段的子图像能适应人眼的视觉特性且使得水印的嵌入和检测可分多个层次进行,小波变换域数字水印方法兼具时空域方法和 DCT 变换域方法的优点。

2.1 离散小波变换

在连续小波变换中,由于伸缩参数和平移参数连续取值不利于计算机处理,因此连续小波变换主要用于理论分析,在实际应用中离散小波变换更适用于计算机处理。离散小波的定义可由下式表示:

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \psi\left(\frac{t - nb_0}{a_0^m}\right) = a_0^{-\frac{m}{2}} \psi(a_0^{-m}t - nb_0) \quad (2)$$

其中,一般选取 m, n 为整数, $a_0 > 1, b_0 > 0$ 。相对应的离散小波变换可由下式定义

$$\langle f, \psi_{m,n} \rangle = a_0^{-\frac{m}{2}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt \quad (3)$$

$f(t)$ 的重构公式为:

$$f(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \langle f, \psi_{m,n} \rangle \psi_{m,n}(t) \quad (4)$$

2.2 水印加密技术

置乱技术是一种图像加密技术,它利用数字图像具有的数字阵列的特点,搅乱图像中像素的位置或颜色使之变成一幅杂乱无章的图像,从而

达到无法辨认出原图像的目的。Arnold 变换是最常见的置乱技术,它是通过像素坐标的改变来实现图像的置乱。对于大小为 N 的图像,Arnold 变换的定义为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \bmod N \quad (5)$$

其中 (x, y) 表示该图像矩阵的某个像素在未变换时的位置, (x', y') 表示变换后新的位置, $\bmod$ 表示求余操作。把灰度值移到位置 (x', y') 后完成对像素 (x, y) 的 Arnold 变换。

2.3 水印的嵌入与提取

提出的算法结合了 Arnold 置乱方法和 DWT 变换多分辨率特性,首先将原始图像用离散小波变换进行 3 级小波分解,将水印图像用 Arnold 变换后再用离散小波变换进行 1 级小波分解。取两个嵌入强度,将分解后的水印子图分别与原始图像经过 3 级小波分解后的 3 级子图线性相加,最后对加密后图像进行逆小波变换得到最后图像。

2.3.1 嵌入过程

水印嵌入整个过程:

(1) 将原始载体图像用二维离散小波变换进行 3 级小波分解得到分解后的 4 个子图;

(2) 选取合适的水印图像,对二值水印图像进行 Arnold 置乱变换;

(3) 将置乱后的水印图像用二维离散小波变换进行 1 级小波分解得到 4 个子图;

(4) 分别对原始载体图像小波分解后的的低频部分与高频部分用不同的嵌入强度值进行线性嵌入:

$$\begin{cases} I'_L = I_L + \alpha \cdot I_w \\ I'_H = I_H + \beta \cdot I_w \end{cases} \quad (6)$$

其中 I_L, I_H 分别为原始载体分解图像的低频和高频部分; I_w 为欲嵌入的变换后的水印部分; α, β 分别为低频和高频部分的嵌入强度; I'_L, I'_H 分别为水印嵌入后的低频和高频部分;

(5) 将产生的 4 个新的小波系数用二维离散小波逆变换进行逆变换,从而得到含有水印信息的图像。

2.3.2 提取过程

水印的提取过程是水印嵌入的逆过程。水印的提取就是将包含水印信息的公开图像中的水印信息从中分离出来。水印提取过程:

(1) 原始图像分解。将原始图像用离散小波变换进行 3 级小波分解得到子图;

(2) 嵌入水印图像分解。对二值水印图像进行 Arnold 置乱变换;

(3) 将嵌入水印后的图像用离散小波变换进行 3 级小波分解得到 3 级分解后的 4 个子图;

(4) 利用嵌入水印算法的逆过程将水印部分提取出来,进行反 Arnold 变换得到水印图像;

(5) 对得到的 4 个小波系数进行离散小波逆变换得到原始载体图像。

2.4 评价标准

数字水印算法性能评价的两个重要准则是透明性和鲁棒性。对水印透明性的评估可以通过主观观察或者定量度量来衡量,然而仅凭人的主观观察来判别质量的变化是不够准确的,在某些情况下需要进行定量的失真度检测。目前常用的失真度检测方法主要有:

(1) 峰值信噪比 (PSNR) 计算公式如下:

$$\text{PSNR} = 10 \lg_{10} \frac{255^2}{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |f'(m,n) - f(m,n)|^2} \quad (7)$$

(2) 相关系数 (NC) 即表示原始水印与检测到的水印的相似性,计算公式如下:

$$\text{NC} = \frac{\sum_{m,n} f'(m,n)f(m,n)}{\sum_{m,n} f^2(m,n)} \quad (8)$$

其中 $f(m,n)$ 和 $f'(m,n)$ 分别表示原始图像和嵌入水印后的图像, m,n 表示图像大小。

3 实验结果及分析

本次实验主要是针对灰度图像的水印技术进行研究。载体图像采用尺寸大小为 512×512 灰度为 256 级的 Lena 图像,数字水印图像采用尺寸大小为 64×64 灰度为 256 级的自制水印图像,如图 1 所示。

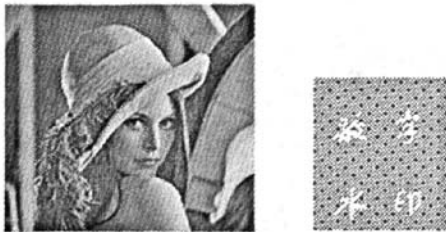


图 1 载体图像与数字水印图像

Fig. 1 Carrier image and digital watermarking image

3.1 水印嵌入

在指定位置嵌入数字水印图像,对图像进行观察可知水印图像不可见,图像质量未见变化。对含有水印的载体图像进行小波变换,在指定位置提取数字水印图像,对图像进行观察可知数字水印图像完整,图像质量变化不大,计算提取水印与原水印的相关系数 NC,得 $\text{NC} = 0.9785$ 。

3.2 抗空间几何攻击失真能力测试

数字水印嵌入方法性能的好坏除了要看视觉上的不可见性以外,最重要的是看它对几何空间失真、频域上的滤波以及常见的 JPEG 标准压缩的鲁棒性有多强,这是因为载体图像在传播使用的过程中都会受到有意或无意的损坏,只要载体图像被损坏情况不是很严重(面目全非)还能抽取出其中的数字水印,这种数字水印嵌入方法才可以在实际的版权保护中得以应用。

3.2.1 抗空间几何失真的鲁棒性测试

图 2 所示为所做剪切攻击实验其中的一例(从右侧剪切 60 列像素)。通过实验可知剪切位置对水印提取有影响,从左侧、上边或左上角开始剪切将无法提取水印,如果从其它部位剪切并且剪切量较大水印信息将受到较大破坏。原因是本文采用小波变换域内进行水印嵌入方法的局限性造成的,即小波变换对图像起始位置信息敏感及水印信息被均匀扩散到载体图像中。



图 2 含水印载体图像剪切的鲁棒性测试

Fig. 2 Sheared watermarking Image robustness testing

3.2.2 对旋转的鲁棒性测试

图 3 所示为所做旋转攻击实验其中的一例(顺时针旋转 5°)。通过实验可知旋转对水印提取有较大影响,原因也是本文采用小波变换域内进行水印嵌入方法的局限性造成的。

总之,对于小波变换域的水印嵌入方法而言,由于水印信号的嵌入需要涉及到所有的原始图像数据,因此大多小波变换域数字水印嵌入的方法对剪切、旋转等几何变换的抵抗能力往往会



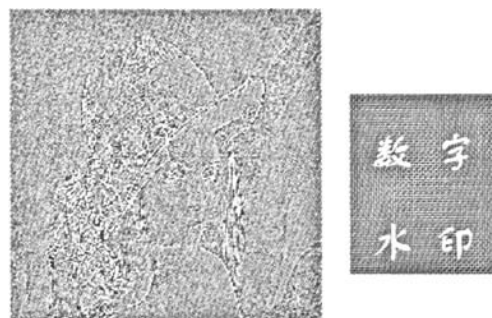
图 3 含水印载体图像旋转的鲁棒性测试

Fig. 3 Rotating watermarking Image robustness testing

比较弱,并且多数小波变换域的数字水印嵌入方法具有同样的问题,这是小波变换域数字水印嵌入方法亟待解决的问题。

3.3 抗数字信号处理的鲁棒性测试

对含有数字水印载体图像在经过特定数字信号处理后提取的数字水印进行测试,可以检测本文提出的数字水印嵌入方法在抗数字信号处理方面的鲁棒性。特定的数字信号处理包括低通滤波、高通滤波、均值滤波、直方图均衡化、锐化和噪声高斯滤波等。图 4 所示为嵌入水印的载体图像经各种数字信号处理后的图像及检测出的数字水印图像,表 1 为各种图像处理对数字水印信息的影响。



a 锐化后的水印图像

提取的水印图像



b 低通滤波后的水印图像

提取的水印图像



c 加高斯噪声的水印图像 提取的水印图像

图 4 经过 3 种处理的水印图像及提取的水印图像

Fig. 4 Processed watermarking Image and extracted watermarking image

表 1 各种图像处理对数字水印信息的影响

Table 1 Impact of information on processed digital watermarking

处理方式	锐化	低通滤波	加噪声高斯滤波
NC	0.904 3	0.978 4	0.804 9

3.4 抗 JPEG 格式压缩的鲁棒性测试

JPEG 格式压缩编码对图像的质量有较强损伤,本文实验对嵌入数字水印的载体图像进行以图像质量百分数从 75% 到 100% 的压缩,然后进行数字水印信息的提取,计算所提取的数字水印与原数字水印的相关系数。不同质量条件下提取数字水印结果见表 2。

表 2 各种压缩质量对数字水印信息的影响

Table 2 Impact of information on compressed digital watermarking

压缩比/%	75	80	85	90	95
NC	0.771 9	0.838 9	0.887 9	0.925 2	0.967 9

从上面针对本文数字水印嵌入方法进行鲁棒性测试的实验结果表明,本文提出的基于小波多分辨率分解的数字水印嵌入方法不但是数字水印图像不可见,而且所嵌入的数字水印图像具有较强的鲁棒性。

4 总结

提出的算法结合了 Arnold 置乱方法和小波域的特性,并在嵌入时采用嵌入两个不同嵌入强度系数,有效地提高了水印的安全性。用加入噪

声、滤波、旋转、剪切及压缩等攻击测试分别测试了本算法数字水印的鲁棒性,并用不同的评价标准分别对各种攻击测试作了分析与评价,验证了文中算法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] 王道顺,梁敬弘,戴一奇,等. 图像水印系统有效性的评价框架[J]. 计算机学报,2003,26(7):652-655.
- [2] 黄兴,张敏瑞. 图像置乱程度的研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2008,33(5):77-80.
- [3] 杨枝灵,王开. Visual C++ 数字图像获取、处理及实践应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [4] 许慧. 基于小波包变换的数字水印技术[D]. 长沙:湖南大学,2008.
- [5] Zhang X D, K. T. Feng Lo J, et al. A Robust Image Watermarking Using Spatial - Frequency Feature of Wavelet Transform [A]. 5th International Conference on Signal Processing, 2000.
- [6] 陈天平,吴昌银,岳青松. 一种基于 DCT 和 DWT 的数字图像水印算法[J]. 微电子学与计算机,2009(4):58-60.
- [7] 张民,郭玉彬,张德伟. 基于小波系数块能量和 HVS 的 FCM 水印算法[J]. 微电子学与计算机,2010(5):139-141.

A Digital Watermarking Algorithm Based on Discrete Wavelet Transform

WANG Ji-lin

(School of Information Engineering, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China)

Abstract: This paper sums up the status of the technique of digital watermarking and its basic principles, then we analyze the advantage of the digital watermarking based on wavelet transform, the algorithm of digital watermarking based on Arnold and DWT by making use of the linear and different embedding operator is proposed, which effectively improves the security of the watermarking. The results of the experiment prove the algorithm has better invisibility and robustness.

Keywords: digital watermarking; wavelet transform; invisibility; robustness

(责任编辑:沈建新;校对:张英健)