

文章编号: 1005-0523(2006)04-0055-04

基于小波变换的数字水印算法研究

费伦科, 汤文亮, 丁振凡

(华东交通大学 信息工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 基于小波变换的数字水印技术是当前的一个研究热点, 本文系统分析和总结了基于小波域的数字水印算法, 并根据水印算法的特点对其进行了分类, 详细分析了各类水印算法的各种嵌入和检测技术以及各自的优缺点, 最后给出了图像水印算法的测试结果.

关键词: 版权保护; 小波变换; 数字水印; 水印算法

中图分类号: TP391

文献标识码: A

1 引言

随着计算机通信技术的迅速发展, 多媒体存储和传输技术的进步使存储和传输数字化信息成为可能, 然而, 这也使盗版者能以低廉的成本复制及传播未经授权的数字产品内容, 出于对利益的考虑, 数字产品的版权所有者迫切需要解决知识产权 (Intellectual Property Rights) 的保护问题. 1995年人们提出了信息伪装技术, 其中, 数字水印是数字产权保护技术的主要技术.

目前数字水印算法主要是基于空域和变换域的, 其中基于变换域的技术可以嵌入大量比特的数据而不会导致察觉的缺陷, 成为数字水印技术的主要研究技术, 它通过改变频域的一些系数的值, 采用类似扩频图像的技术来隐藏数字水印信息. 主要有离散余弦变换 (DCT)、小波变换 (WT)、付氏变换 (FT 或 FFT) 以及哈达马变换 (Hadamard Transform) 等等^[3,4]. 其中小波变换因其优良的多分辨率分析特性, 使得它广泛应用于图像处理. 特别是 2000 年新一代静止图像压缩编码标准 JPEG2000 (相对于 JPEG, 它放弃了 JPEG 所采用的 DCT, 而采用 DWT)

公布并开始实行, 并且考虑了版权保护问题, 使基于小波变换的水印算法越来越引人瞩目. 因此, 小波域数字水印的研究非常有意义.

2 小波变换

小波变换的理论是近年来兴起的新的数学分支, 基本思想就是把图像进行多分辨率分解, 分解成不同空间、不同频率的子图像, 然后再对子图像的系数进行处理. 根据 S. Mallat 的塔式分解算法, 图像经过小波分解后被分割成 4 个频带: 水平方向、垂直方向、对角线方向以及低频部分, 其中低频部分可以继续分解. 图像经过小波变换后, 产生 LH_i 、 HL_i 、 HH_i ($i=1, 2, 3$) 三个高频带系列和一个 LL_3 低频带, 图像的能量主要集中于低频部分, 而水平、垂直和对角线部分的能量则较少; 水平、垂直和对角线部分表征了原图像在水平、垂直和对角线部分的边缘信息, 具有明显的方向特性^[5]. 以 lena 图像小波变换为例, 小波变换构成了对它的多尺度时频分解, 变换图像如图 1 所示:

收稿日期: 2006-01-08

作者简介: 费伦科 (1982-), 男, 江西九江人, 华东交通大学信息工程学院硕士研究生.



图1 lena 图像小波变换图

3 数字水印嵌入技术

与其他域的水印技术一样,小波域水印也分为水印嵌入和水印检测两部分,其中水印嵌入过程如图2所示^[6]:

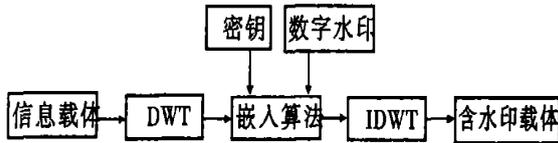


图2 小波域水印嵌入的一般框图

水印嵌入过程中将重点考虑水印添加的稳健性、不可感知性等性能,根据嵌入的水印特征,把数字水印嵌入方法分为图像水印嵌入方法和序列水印嵌入方法。

3.1 图像水印的嵌入法

图像数字水印技术是根据图像小波变换后小波系数的特点,把一幅 $m \times m \times k$ bit ($k=8, 24, \dots$) 的图像作为水印信息嵌入到图像中,其中 m 表示图像的大小, k 表示颜色的深度. 图像水印嵌入的位置为载体图像小波变换后的低频子带和高频子带中。

3.1.1 低频子带嵌入法

低频子带水印嵌入方法是在原图小波分解后低频子带的系数中嵌入水印. 由于低频子带代表图像中平坦的部分,具有较高的感觉容量,嵌入水印的鲁棒性强. 该类方法对高频滤波、有损压缩都有较好的抗攻击性. 但同时正因为低频分量直接影响着图像的质量,水印嵌入容量过大会直接影响图像的视觉效果。

该嵌入方法基本思想是:对原始图像进行 n_1 层小波变换,得到图像小波变换系数细节子图 $p_c^i(x, y)$ (c 表示分解的层次, $c=1, 2, \dots$, 其中 $i=1, 2, 3$ 分别代表水平方向、垂直方向和对角线方向的三个细节子图,下同) 和一个逼近子图 $p_0^0(x, y)$; 对水印图像进行 n_2 层小波变换,得到水印的小波变换系

数 $\omega_c^i(x, y)$ (i 和 c 的意思同上), 考虑到图像进行图像压缩的顽健性,水印图像小波变换次数 n_2 小于原始图像小波变换次数 n_1 , 根据相应的策略,把水印图像小波系数矩阵 $\omega_c^i(x, y)$ 嵌入到某一 $p_c^i(x, y)$ 中. 大多算法采用如下嵌入公式^[7]:

$$p'(x, y) = p(x, y) + \partial^* \omega(x, y) \quad (1)$$

$$p'(x, y) = p(x, y) A * (1 + \partial^* \omega(x, y)) \quad (2)$$

其中 ∂ 为水印嵌入的强度, ∂ 越大,水印的稳健性越好,但水印的可见性越差,反之, ∂ 越小,水印的可见性越好,但水印的稳健性越差. 对 p' 进行逆小波变换将得到嵌入水印的图像。

3.1.2 重复嵌入法

为了提高水印嵌入的稳健性,该方法在低频子带嵌入算法的基础上,采用低频重复嵌入方法来提高水印的稳健性,即:

a. 对大小 $M \times M$ 的原始图像 X 进行 n (一般取 $n=3$) 层小波分解,得到不同分辨率下的细节子图 p_c^i 和一个逼近子图 p_0^0 ;

b. 把所有的细节子图分割成互部重叠的子图块,并且使每一子图块的大小与水印的大小相同;

c. 将水印中的数据分别与每一子图块依次进行分块组合,高频部分被反复的嵌入水印,而低频部分只嵌入一次水印,嵌入公式可参考公式(1)和公式(2);

d. 把经过运算的子图块进行重新拼接得完整的小波变换系数,再进行逆小波变换,即可实现水印图像的嵌入。

3.1.3 位平面分解嵌入法

该方法在嵌入灰度图像不是像基于低频域方法那样,其主要思想是先把灰度层水印 $W(i, j)$ 分解为 N 个二值位图平面^[8],这些二值图像相当于若干个 0-1 序列,在根据相关策略把这些 0-1 序列嵌入到原始图像当中,具体的嵌入方法在下面介绍。

3.2 序列数字水印嵌入方法

序列数字水印技术是把要嵌入水印信息(如作者的姓名、序列号等信息)生成一个固定长度的随机序列,主要包括 0-1 序列、满足某种分布的随机序列以及二值图像等,再把该序列嵌入到载体信息当中。

3.2.1 量化算法

该类方法通过修改载体图像的同分辨率层中三个不同方向的细节分量系数的幅度关系,来嵌入一种二值水印. 在其方案中,水印是二值序列 $\{0, 1\}$.

1). 使用 Daubechies 小波对原始图像进行 3 级分解. 该算法在高频子带中随机选择水印嵌入位置(当然选择系数的个数不少于水印序列的个数,位置的选择可设置密钥来控制),每一次在小波分解的每一级的三个高频子带中各选择一个系数,即 $p_c^i(x, y)$ (c 代表小波分解的第 c 级, $k=1, 2, 3$ 分别表示水平垂直和对角线方向的高频子带). 首先,将这三个系数按由小到大的顺序排列,假设 $p_c^1(x, y) \leq p_c^2(x, y) \leq p_c^3(x, y)$. 然后,对中间的系数 $p_c^2(x, y)$ 进行量化用来代表一个水印信息位 W_i . 量化中, $p_c^1(x, y)$ 到 $p_c^3(x, y)$ 的范围被等分为 $2Q-1$ 份,即每一份的宽度 $d=(p_c^3(x, y) - p_c^1(x, y))/(2Q-1)$, 其中 Q 可以自己定义,用来控制量化步长, Q 越小,水印越鲁棒,但同时带来更大的失真. 量化公式为:

$$s(t) = p_c^1(x, y) + (t-1) * d \quad (3)$$

当要嵌入信息位“0”时, t 取偶数, 当要嵌入信息位“1”时, t 取奇数, 把 $s(i)$ 量化成离 $p_c^2(x, y)$ 值, 再 $p_c^2(x, y) = s(i)^{[9]}$.

3.2.2 细节分量嵌入算法

小波变换后近似图像系数的分布是很均匀的, 大多数的系数接近于 0, 只有很少一部分对应于图像边缘和纹理信息的系数具有较大的峰值, 含有较明显的能量. 如果有水印信息落在这些区域, 那么在进行有损数据压缩时, 这部分水印会丢失. 另外在进行低通滤波或受到噪声干扰时, 这些小系数也会受到较大影响. 所以在细节分量系数中可靠嵌入水印, 必须选择一些显著系数进行水印嵌入或者对水印能力进行加权, 以便在显著系数中嵌入更多的能量. 水印嵌入强度可以自适应于子带能量, 分解层和子带的方向. 在一般的算法当中, 系数的显著性由系数和门限的比较而确定^[6]:

$$T(c, i) = \max \{ |p_c^i(x, y)| \} / 2 \quad (4)$$

该门限值由第 c 分解层、方向为 i 的子带的系数绝对值的最大值决定.

另一改进的细节分量水印算法为: 先对待嵌入的原始图像 $f(x, y)$ 进行三层小波变换, 得到不同分辨率的细节子图 $p_c^i(x, y)$ 和一个逼近子图 $p_c^0(x, y)$; 对 $p_c^i (i=1, 2, 3)$ 子图分割成不重叠的 4×4 的子图块, 然后查找大于阈值的子图块, 在该子图块中嵌入水印.

4 数字水印检测技术

中国知网 <https://www.cnki.net>

水印检测的过程为水印嵌入的逆过程, 它的框

图可参见图 3.1 所示, 根据水印检测时需要的信息, 可分为非盲检测、半盲检测和盲水印. 非盲检测时需要原始图像的参与来提取水印; 半盲检测时需要一些参考信息; 而盲算法只需要嵌入水印的图像, 因此更加灵活, 但是也更难实现.

4.1 非盲检测算法

非盲水印检测算法通常针对水印为数字图像. 水印提取时, 采用嵌入的逆过程, 提取公式为^[7]:

$$w = (p' - p) / a \quad (5)$$

$$w = (p' / p - 1) / a \quad (6)$$

其中 p' : 待检测图像点, p : 原始图像点. 非盲水印的检测的缺点就是在水印检测时需要原图的参与.

4.2 半盲检测算法

半盲水印的检测过程不需要原图, 但需一些参考信息. 一般的自适应水印属于这一类型, 此类算法需要通过阈值来筛选嵌入水印的位置, 往往生成一个定位水印位置的 0-1 矩阵, 1: 代表嵌入, 0: 代表未嵌入; 或产生一个一维序列, 记录嵌入位置的坐标^[10].

4.3 盲检测算法

盲水印检测是水印检测的最高境界, 检测过程不需原图或参考信息, 它灵活, 但算法较复杂, 主要是针对嵌入水印为随机序列的情况, 常将提取水印与嵌入水印进行相关性计算, 结果与阈值做比较, 来检测水印是否存在. 先根据嵌入方法从载体中的相关分量中提取水印信息 w' , 再将 w' 和原始的水印信息 w 来计算求出他们相关系数, 相关系数的计算主要公式有^[10]:

$$\text{sim}(\omega, \omega') = \frac{\omega \cdot \omega'}{\|\omega\| \|\omega'\|} \quad (7)$$

或

$$\text{sim}(\omega, \omega') = \frac{\sum \omega \cdot \omega'}{\sqrt{\sum \omega^2} \sqrt{\sum \omega'^2}} \quad (8)$$

再将相关系数 Sim 与阈值 T 进行比较来判断是否嵌入水印.

还有一种就是不需提取水印, 他们的相关值计算是通过检测图像与原水印进行计算, 公式如下:

$$\rho(X', W) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M X'_{k, o}(u, v) \omega(i) \quad (9)$$

$X'_{k, o}$ 表示 k 层 o 方向的图像. 阈值 T 的确定与虚警概率和漏警概率有关, 减小 T , 漏警概率降低而虚警概率提高, 反之, 增加 T , 虚警概率降低而漏警概率提高. 盲检测技术具有非常广泛的应用前景, 但由于阈值难以给出导致其实现起来难度较大.

5 算法测试结果

笔者用 visual c++ 实现了在低频域嵌入图像



图3 小波域水印嵌入和检测测试图

在水印的检测过程中,为检测水印的鲁棒性,笔者对加了水印的图像进行了相应的图像处理测试,得到相应的测试结果如图4所示,从测试的结果可以发现,该算法嵌入的水印对常见的图像处理具有一定的鲁棒性,同时笔者还进行了模糊、锐化、中值滤波等处理,此时提取水印就出现了大的失真。



(a)图像压缩 (b)灰度均衡处理 (c)线性变换 (d)灰度拉伸

图4 图像经过处理后提取的水印

6 结束语

基于小波变换的数字水印方法具有可选择性高,安全性强,良好的空间一尺度定位,且能充分利用 HVS 的特性以及计算简单等特性,本文对基于小波变换的数字水印算法进行系统全面的分析,随着基于小波的图像编码技术的飞速发展,尤其是新一代图像压缩编码标准 JPEG2000 的公布,这一领域越来越受到关注。

参考文献:

水印的算法,在测试中用 $256 \times 256 \times 24$ bit lena 图像作为载体图像,水印图像为 $64 \times 64 \times 24$ bit 的华东交通大学校徽图像,测试检测结果如图3所示:

- [1] Chin-Chen Chang, Kuo-Feng Hwang, Min-Shiang Hwang. A Feature-oriented Copyright Owner Proving [J]. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering. 2002 (3): 317-330.
- [2] 夏煜等. 基于图像的信息隐藏检测算法和实现技术研究综述[J]. 计算机研究与发展. 2004(4): 728-736
- [3] M. Barni, F. Bartolini and A. Piva. Imporved wavelet-based watermarking through pixel-wise masking [J]. IEEE Trans. Image Process. 2001 (5): 783-791.
- [4] Saeid Belkasim, XianYu Hong. Content Based Image RetrieVal Using Discretre Wavelet Transform [J]. International Journal of Pattern Rccognition and Artificial Intelligence. 2004 (1): 19-32.
- [5] 张晓峰,等. 基于小波变换的图像水印嵌入方法[J]. 计算机工程与应用, 2004(11): 667-671.
- [6] 王病锡,等. 数字水印技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003.
- [7] 张 冉,等. 一种基于小波变换的灰度数字水印嵌入技术[J]. 通信学报. 2004(2): 125-130.
- [8] 张 军,等. 数字图像的自适应公开水印技术[J]. 计算机学报. 2002(12): 1371-1377.
- [9] 李宗志,等. 基于图像小波变换的数字水印[J]. 计算机工程, 2004(21): 109-110.
- [10] Tzung-Her Chen, Gwoboa Horng, Sang-Hao Wang. A Robust Wavelet-Based Watermarking Scheme Using Quantization and Human Visual System Model [J]. Pakistan Journal of Information and Technology 2003(3): 213-230.

Survey of Digital Watermarking Algorithms Based on Wavelet Transform

FEI Lun-ke, TANG Wen-liang, DING Zhen-fan

(School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: This paper have analyzed and summarized the watermarking algorithms of wavelet transform, and classifies these algorithms by their characteristics, and gives the test result of image watermarking algorithm.

Key words: copyright; wavelet transform; digital watermarking; watermarking algorithms