

基于小波变换和视觉掩蔽的自适应水印方案*

周 熠

(中南民族大学 计算机学院, 湖北 武汉 430074)

摘 要:随着计算机网络技术与多媒体技术的快速发展,数字产品的版权保护已经成为信息技术领域中最重要的问题之一。提出了一种小波域透明图像水印算法,该算法的特点是选择一个二值图像作为水印,将其内嵌到原始图像经过小波多分辨率分解后的低频子带上,并利用人眼视觉掩蔽特性对水印的添加强度进行自适应调节,设立标志矩阵记录水印嵌入信息并用作水印的检测。实验结果表明:水印是不可察觉的,经过常用的图像处理仍是鲁棒的。

关键词:版权保护; 小波变换; 图像水印; 视觉掩蔽

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2004)05-0524-04

Self-adaptive watermark scheme based on wavelet transform and visual masking*

ZHOU Yi

(College of Computer Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract: With the rapid development of computer networks and the further progress of multimedia technologies, copyright protection of digital media has been one of the most important issues in information technology field. An approach for transparent image watermark based on wavelet multiresolution decomposition is proposed in which a binary image is embedded in the original image. The method uses the characteristic of Human Visual System (HVS) to adjust the intensity of the watermark adaptively. A flag matrix is set to record information about embedding watermark and be used for detecting the watermark. Experimental results show that the watermark is invisible and the algorithm is robust to common image processing.

Key words: Copyright protection; Wavelet transform; Image watermark; Visual masking

0 引 言

随着计算机及网络技术的迅猛发展,多媒体产品的复制与发行变得更加快捷和方便,与此同时,多媒体产品的产权保护问题也变得日益迫切。非数字艺

术品可以通过签名、加盖印章等手段保护作品的版权和防止伪造。而对于数字图像来说,众多的图像处理技术使得“所见即为真”这一命题不再总是成立,加密系统也只能解决部分问题,因为一旦解密,所有者对其作品便失去了控制。为此,一种新的富有潜力的产权保护方案——数字水印技术应运而生。由于数字

收稿日期:2003-10-29; 修订日期:2004-01-06

* 基金项目:国家民委重点科研基金资助项目(MZY02004)

作者简介:周熠(1966-),女,湖北武汉人,讲师,硕士,研究方向为图像处理与信息安全,发表论文数篇。

水印技术可以在数字文件中内嵌识别代码,因而被作为开放的网络环境中的多媒体版权保护方法而提出^[1]。要求所嵌入水印对于常用的信号处理方法有鲁棒性,同时要求嵌入水印信息后不会引起图像质量的明显下降。对于水印,人们作了很多研究^[1,2],按其嵌入方式可分为两类:一类是将数字水印直接迭加到图像的空间域上;另一类是先将图像做某种变换,然后将水印嵌入到图像的变换域中。从综合性能分析,变换域方法更有效,是发展的趋势。

本文提出了一种小波变换的频域水印算法,根据小波变换低频子带抗干扰性强的特性,选择在小波变换域低频子带中加入水印,并综合人类视觉系统的纹理掩蔽特性来调节强度因子,实验结果表明,该算法对常见的图像处理,如 JPEG 压缩和滤波等具有较好的鲁棒性。

1 图像的小波变换与多分辨率分解

小波变换是一种新型的信号分析理论,将其用于图像分解与重构,很好地实现了人眼视觉对图像多分辨率的描述,并且能够实现图像中平稳成分和非平稳成分的分离,具有与人眼视觉特性相结合的特点。因此非常适合于图像处理。

小波变换用于图像处理的基本思想是对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。对系数的处理是小波变换用于图像处理的核心。根据 S. Mallat 的塔式分解算法^[3],图像经过小波变换后被分解为两个部分,即低频平滑部分(LL)和 高频细节部分(LH、HL、HH),共 4 个子带。这个分解过程可重复地用于分解 LL 部分。图像的 2 级小波分解如图 1 所示。

图像经过小波分解后生成的小波图像具有与原

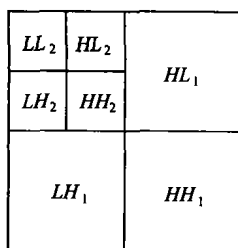


图 1 图像的 2 级小波分解
Fig. 1 Image after wavelet decomposition twice

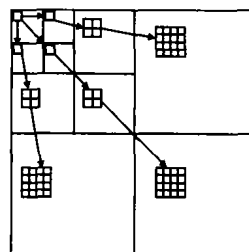


图 2 小波分解后系数树状结构
Fig. 2 Tree structure after wavelet decomposition

图像不同的特性,表现在子带图像 LL 中集中了原始图像的绝大部分信息,称为原始图像的逼近子图;子带图像 LH、HL 和 HH 保持了原始图像的垂直边缘细节、水平边缘细节和斜边缘细节,统称为原始图像的细节子图,它们刻画了原始图像的边缘细节特征。在倍频分解下,由不同频带、代表同一空间位置的系数构成了一种树型结构,如图 2 所示。图中箭头表明了节点的父子关系。以 3 级小波分解为例,除了根节点最低频率的子带 LL₃ 小波系数外,其他所有的父系数均有 4 个子系数,这 4 个子系数处于父节点较高频率的子带上,并且在空间上位置是相同的。

如果把由相关联的系数所组成的树状结构统称为小波子树,那么小波子树把空间域同一位置,不同尺度、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。

2 基于小波变换的图像自适应水印算法

水印的鲁棒性和透明性是数字图像水印技术的基本要求。为了保证鲁棒性的要求,水印应放置在图像中视觉系统感觉重要的分量处^[1],对应于图像变换域中的低频区域。但低频成分是图像的平滑部分,人眼对这部分比较敏感,在这部分嵌入水印容易引起图像失真,影响水印的透明性。因此,如何实施有效的掩蔽,保证水印的不可见成为问题的关键。

由于水印编码可看作是在强背景(原始图像)下迭加一个弱信号(水印),只要迭加信号的幅值低于人类视觉系统对比度门限,视觉系统就无法感觉到信号的存在^[4]。根据视觉照度掩蔽特性,对比度门限和背景信号的幅值成比例。根据视觉纹理掩蔽特征,水印的不可见性受背景纹理复杂性的影响,纹理越复杂(或有边缘存在),门限就越高。这意味着在保证水印不可见的前提下,具有不同幅值的低频系数、不同纹理特性的局部区域,允许迭加的信号是不同的。因此,可根据图像低频系数的大小、图像局部纹理复杂度的不同,对水印嵌入强度做自适应调整。

根据以上分析,设计以下水印嵌入和提取方法,该算法嵌入的水印信号不是传统的序列码或比特流,而是将水印作为一幅二值图像来处理与隐藏,这使水印所含信息更加丰富、直观。

2.1 水印的嵌入

假设待嵌入水印的原始图像大小为 $2^l M_r \times$

$2^L M_y$, 水印图像大小为 $N_x \times N_y$ (设 $L=3$), 且满足条件: $M_x \times M_y \geq N_x \times N_y$ 。水印嵌入算法步骤如下:

(1) 对原始图像进行 L 级小波分解, 得到不同分辨率级下的细节子图 HL_i 、 LH_i 、 HH_i ($i=1, 2, 3$) 和一个逼近子图 LL_3 。

(2) 将需要隐藏的二值水印图像转化为位流 b_i 。基于稳健性考虑, 在嵌入水印之前, 首先将位流中的 0 和 1 作以下处理:

如果 $b_i=0$ 那么 $b_i=-1$

其他 $b_i=1$

对所得 b_i , 通过二值伪随机序列 $p_i, p_i \in \{-1, +1\}$ 进行调制, 得到水印序列 $W_i = b_i \cdot p_i$ ($0 \leq i < N_x \times N_y$)。

(3) 选择小波变换后的低频子图中按幅值大小排序的前 K ($K=N_x \times N_y$) 个重要系数 $X = \{X_0, X_1, X_2, \dots, X_{K-1}\}$, 设立标志矩阵 $A_{M_x \times M_y}$ ($M_x \times M_y$ 为图像低频子带大小) 并使其初始状态为 0, 矩阵元素分别与小波低频子带系数矩阵中的元素对应。

对于矩阵 $A_{M_x \times M_y}$, 设 $a_{ij} \in A_{M_x \times M_y}$, 若 $a_{ij}=0$, 表示该位置上的系数非前 K 个低频重要系数; 否则, a_{ij} 的值即为该重要系数的大小。由此生成的矩阵 $A_{M_x \times M_y}$ 包含了水印的嵌入信息, 将其保存在系统中, 以便后续的水印检测。

(4) 按如下公式, 在前 K 个低频重要系数中嵌入水印:

$$X_i = X_i + \alpha_i \times |X_i| \times W_i$$

式中 水印的嵌入强度为 $\alpha_i \times |X_i| \times W_i$, 保证了其与小波低频系数 X_i 的幅值成比例, 自动利用了视觉系统的照度掩蔽特性。其中, α_i 为拉伸因子, 用以控制水印的添加强度, α_i 取值大, 鲁棒性好, 透明性差; 反之, α_i 取值小, 透明性好, 但鲁棒性差。根据视觉纹理掩蔽特性, 对 α_i 作自适应调节。具体方法如下:

分别计算每一个低频重要系数 X_i ($0 \leq i < K$) 所对应的小波子树中的 HL_i 、 LH_i 、 HH_i ($i=1, 2$) 子带的方差, 并将该 6 个子带方差的和作为参考方差 (用 $ckfc_i$ 表示), 方差越大, 其参考方差也越大, 表示其中的边缘纹理分量越丰富, 对应的 X_i 系数的 α 因子的取值就越大。因此, 找出 K 个参考方差中的最小参考方差 \min_fc 与最大参考方差 \max_fc , 并与此对应设置 2 个 α 值: α_{\min} 和 α_{\max} (具体取值可由实验确定), X_i 所对应的拉伸因子 α_i 的取值如下:

$$\alpha_i = \alpha_{\min} + \frac{ckfc_i - \min_fc}{\max_fc - \min_fc} (\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$$

(5) 通过对嵌入水印后的系数进行小波反变换, 即可获得加水印后的图像。

2.2 水印的检测

水印的检测只需掌握标志矩阵 $A_{M_x \times M_y}$ 和密钥。

(1) 对隐藏水印后的图像进行 L ($L=3$) 层小波多分辨率分解, 得到不同分辨率级下的细节子图和逼近子图, 根据标志矩阵 $A_{M_x \times M_y}$ 中的水印嵌入位置信息, 获取逼近子图系数 X' 序列。

(2) 由标志矩阵 $A_{M_x \times M_y}$ 中的非零元素, 得到嵌入水印前的低频重要系数序列 X_i , 将 X' 和 X_i 对应相减, 得到提取的水印序列 W' 。

若相减值大于零, 则 $W'_i = +1$; 否则 $W'_i = -1$

(3) 由提取出的水印序列及二值伪随机噪声序列, 得到提取出的二值水印图像。

3 模拟实验及结果

利用给出的水印算法进行仿真实验, 原始图像采用 $512 \times 512 \times 8$ 的标准 Lena 图像, 水印采用 40×40 的二值图, 选择 Daubechies2 正交小波对原始图像进行 3 级小波分解与重构。由于水印在感知上是可视的, 所以提取的水印信息很容易辨别。采用归一化互相关系数 (Normalized Cross-Correlation, NC) 来表征水印与原始水印的相似性, 同时采用峰值信噪比 (PSNR) 作为水印图像质量的客观评价, 其公式为:

$$NC = \frac{\sum_{v_i} W_i W'_i}{\sqrt{\sum_{v_i} (W_i)^2}}$$

式中 W_i 表示长度为 $N_x \times N_y$ 的原始水印序列; W'_i 为提取出的水印序列。

$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{M \times N \times 255^2}{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (Y(i, j) - Y'(i, j))^2} \right)$$

式中 $M \times N$ 代表原始图像的大小 (即 $M \times N = 2^L M_x \times 2^L M_y$); $Y(i, j)$ 与 $Y'(i, j)$ 分别表示原始图像和加水印图像在 (i, j) 处像素值大小。

图 3 是嵌入水印后的 Lena 图像 ($PSNR=42.97$) 和水印检测结果 ($NC=1$)。可以看出, 这时水印图像的主、客观质量都很好, 很难看出嵌入的水印痕

迹,完全满足透明性的要求。在水印图像未受任何攻击时,嵌入的水印能完全恢复。

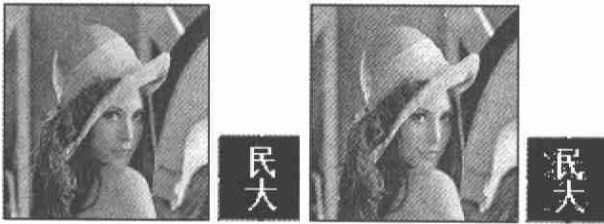


图 3 加水印的图像与检测结果 Fig. 3 Image with embedded watermark and detecting result



图 4 加噪后图像及检测结果 and detecting result

下面从几个方面验证水印算法的鲁棒性。

(1) 加噪处理

对水印图像加入高斯噪声,对于一定功率下的噪声,这种分布的干扰效果最为严重。图 4 为加噪后的水印图像 ($PSNR = 25.64$) 及检测结果 ($NC = 0.9313$)。这时,水印图像的主、客观质量已退化,检测仍然是成功的。

(2) 滤波处理

使用 (3×3) 的全 1 滤波器对图像进行滤波,图 5 给出了滤波后的水印图像 ($PSNR = 28.84$) 和检测结果 ($NC = 0.95$)。这时,水印图像的细节信息已比较模糊,质量退化,但算法仍能可靠、清晰地检测出嵌入的水印。

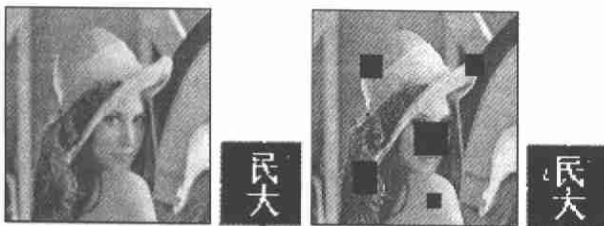


图 5 滤波后图像与检测结果 Fig. 5 Image after filtering and detecting result



图 6 剪切后图像与检测结果 Fig. 6 Image after cutting and detecting result

(3) 几何失真

考察水印图像遭到部分破坏后对水印检测的影响。图 6 是经过随机剪切后的水印图像 ($PSNR = 17.00$) 及相应的水印检测结果 ($NC = 0.9438$),可见,算法对几何破坏有较好的鲁棒性,可以从部分图像中恢复出嵌入的水印。

(4) JPEG 图像压缩

对水印信息嵌入后的图像,用 Photoshop 进行

JPEG 压缩,品质因数 Q 分别为 0、1、2 时提取出的水印图像如图 7 所示。其中, $Q = 0$ 时, NC 达到 0.9875,水印图像与原始水印图像已非常相似,而当 $Q \geq 1$ 时, $NC = 1$,嵌入的水印能完全恢复。可见,算法具有很强的抗压缩性。



图 7 JPEG 压缩后提取的水印 Fig. 7 Watermarks extracted from images compressed by JPEG

以上几个方面的仿真结果显示了算法对常见的图像处理及外来噪声的干扰有较强的抵抗力。

4 结束语

本文提出了一种基于小波变换的静态数字图像水印嵌入与检测算法,该算法选择标识图像作为水印,将其嵌入到图像小波变换的低频域内的重要系数中,根据视觉照度掩蔽特性实施嵌入处理,根据纹理掩蔽特性实现水印强度的自适应调节。水印的嵌入和提取过程中都使用了密钥以加强安全性。仿真实验证明:该算法简便易行,计算量小,速度快,既不会引起图像的严重失真,又可保证水印的鲁棒性,是一种行之有效的方法。

参考文献:

[1] Cox J J, Killian J, Leighton T. Secure spread spectrum watermarking for multimedia[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1687.

[2] Kaewkamnerd N, Rao K R. Wavelet based image adaptive watermarking scheme[J]. Electronics Letters, 2000, 36(2): 312-313.

[3] Mallat S. A theory of multiresolution signal decomposition the wavelet representation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligent, 1989, 11(5): 647-693.

[4] 郭捷, 施鹏飞. 基于亮度和纹理特征的可见水印技术[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 92-95.