

基于视觉模型的双正交小波图像水印算法*

傅瑜** 李文生

(电子科技大学中山学院 广东 中山 528403)

【摘要】提出了一种基于人类视觉系统模型的双正交小波多分辨率图像水印算法,该算法充分利用小波多分辨率的优点及人眼视觉系统的特性,保证了水印的不可见性及鲁棒性,同时在检测水印时也不需要原始图像,仅需涉及到相关的几个细节子图。实验表明该水印算法对于中值滤波、叠加加性噪声、JPEG有损压缩三种图像处理都是鲁棒的。检测算法还有计算量小,检测速度快的特点。

关键词 人类视觉模型; 双正交小波; 图像; 数字水印
中图分类号 TP391 文献标识码 A

Biorthogonal Wavelet Multi-Resolution Watermarking Algorithm for Images Based on Human Visual Model

Fu Yu Li Wensheng

(Zhongshan College, UEST of China Guangdong Zhongshan 528403)

Abstract A new wavelet multi-resolution watermarking algorithm for images based on human visual model is presented. This scheme makes good use of the advantage of wavelet multi-resolution and the feature of human visual system, thus keeping the watermarks invisible and robust. Also, this algorithm need not original image and is only relevant to some detail sub-images during detection. The experimental results have shown that the digital watermarks, which are inserted in host image by the proposed algorithm, is robust for median filtering, salt-and-pepper noise and JPEG compression.

Key words human visual model; biorthogonal wavelet; image; digital watermark

在小波水印技术中,水印的嵌入和提取是在小波变换域中进行的。小波的类型、水印的选取、水印嵌入强度以及水印嵌入的位置都会影响到水印系统的性能,包括水印的鲁棒性和视觉可见性。在已有的几种典型小波水印方案中,文献[1]设计了一种搜索重要小波系数的多阈值小波水印编码方案,选择在各种信号处理操作中都不会有太大变化的系数。如果系数有明显的改变,重构的图像将在视觉上与原始图像有很大的差异。该方法依赖于图像来选择系数,因此适合于纹理图像和光滑图像。文献[2]描述了一种基于小波变换的图像融合水印方法,文献[3]是在不同的分辨率下将水印的小波系数加入到图像的小波系数上,水印的强度由一种人眼视觉模型进行调整。文献[4]提出了一种基于小波变换的分层水印提取方法,可以使水印检测的计算量减少。本文讨论一种基于人类视觉模型的小波多分辨率分析图像水印算法。

1 人眼视觉频率响应

人眼对图像信息的处理不是逐点进行的,而是抽取空间、频率或色彩的特征进行编码。人的视觉感知

2003年9月1日收稿

* 广东省中山市科技基金资助项目,编号:2001A035

** 男 40岁 博士 副教授 主要从事计算机应用、数值分析、小波理论及应用方面的研究

特点与统计意义上的信息分布并不一致,即统计上需要更多信息量才能表达的特征对视觉感知可能并不重要,从感知的角度来讲,无须详细表征这部分特征。文献[5]中提出了一种人眼视觉系统模型(Human Visual System, HVS),并给出了视觉系统的频率响应函数

$$H(w) = (a + bw)\exp(-cw) \quad (1)$$

式中 w 为视角正对的径向频率, a, b, c 为决定HVS曲线形状的常数。当 $w_{\max} = 3$ 时, HVS曲线的形状表示为

$$H(w) = (0.2 + 0.45w)\exp(-0.18w) \quad (2)$$

在图像编码中应用DFT变换时,相当于对原始图像进行对称扩展,但是人眼观察不到这一并不存在的场景变换。故文献[6]给出了一个矫正函数 $A(w)$, 从而使视觉系统的响应函数修正为

$$H'(w) = H(w) |A(w)| = \begin{cases} 0.05\exp(w^{0.554}) & w < 7 \\ \exp(-9[|\lg w - 1g9|^{2.3}]) & w \geq 7 \end{cases} \quad (3)$$

式中

$$w = w_d w_s \quad (4)$$

将二维DFT系数 (u, v) 对应的径向频率 w 的值求出。 $w_d = (u^2 + v^2)^{0.5} / 2N$, $u, v = 0 \sim N-1$; w_s 为依赖于观测距离的采样函数, N 为DFT块的大小。在实验中,取 $w_s = 48^{[6]}$, 即可求得每个 (u, v) 对应的 $H'(w)$, 写成对 (u, v) 的函数就是 $H''(u, v)$ 。

2 基于视觉模型的小波图像水印算法

2.1 图像水印的嵌入

一般,人眼的视觉较敏感于图像平滑部分信息的细微变化,而对图像边缘或纹理等部分信息的微小变化不太敏感。图像经小波变换分解成小波子图后,图像的信息得到了很好的分类,图像边缘或纹理等部分信息主要集中到中高频细节子图的较大小波系数上。因此,适当修改小波系数值,就可以实现某种特征信息的嵌入。本文的水印算法就是基于这种思想。

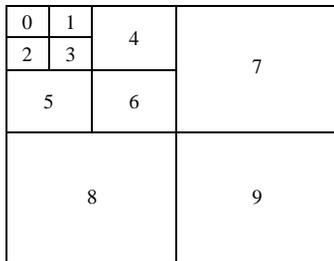


图1 图像的三级小波分解图

对图像进行三级小波分解,各子图如图1所示。

经过三级小波分解后,图像信息得到了很好的分类。为了描述方便,对图1中各子图用0~9给予编号,则0号逼近子图、1~6号细节子图,7~9号细节子图分别集中了图像的低频、中频和低频信息。而图像的纹理、边缘部分信息主要分落在细节子图一些有较大值的小波系数上,用伪随机实数修改这些小波系数,可实现水印的嵌入。

为叙述方便,下面引入几个记号:

$F = [F_{ij}]_{n \times n}$, 原图像矩阵,大小 $n \times n$, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

$F' = [F'_{ij}]_{n \times n}$, 水印图像矩阵,即水印嵌入到原图像 F 后形成的图像矩阵,大小 $n \times n$, i, j 的取值同 F 。

$F'' = [F''_{ij}]_{n \times n}$, 待检测图像矩阵,即水印图像 F' 经网上传输或图像处理得到的图像矩阵,大小 $n \times n$, i, j 取值和 F 一样。

$f(t) = [f_{ij}(t)]_{n_i \times n_i}$, $f'(t) = [f'_{ij}(t)]_{n_i \times n_i}$, $f''(t) = [f''_{ij}(t)]_{n_i \times n_i}$ 分别表示图像矩阵 F , F' , F'' 经三级小波分解后得到的相应小波细节子图系数矩阵,或在水印处理过程中表示相应的一维向量,其中子图大小为 $n_i \times n_i$, 子图号 $t = 1, 2, \dots, 9$, $i, j = 1, 2, \dots, n_i$ 。

$W = [W_{ij}]_{m \times m}$ 具有零均值,方差为1的高斯分布伪随机实矩阵,大小 $m \times m$, 其中 $i, j = 1, 2, \dots, m$ 。

$X = [W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{im}]$, 伪随机实矩阵 W 中第 i 行向量,作为嵌入到图像上去的 m 个伪随机实数, $i = 1, 2, \dots, m$, 因此共有 m 种待选水印序列。

水印的嵌入是对二维细节子图矩阵 $f(t)$, $t = 1, 2, \dots, 9$, 元素 $f_{ij}(t)$ 按照其绝对值从大到小顺序排列成一维向量

$$\mathbf{f}(t) = [f_1(t), f_2(t), \dots, f_k(t), \dots, f_m(t), f_{m+1}(t), \dots, f_{n_t \times n_t}(t)] \quad t=1,2,\dots,9 \quad (5)$$

用向量 X (第 i 个水印序列) 中 m 个伪随机实数修改向量 $f(t)$ 的前 m 个元素, 即

$$f'_k(t) = f_k(t) + \mathbf{a}_t * |f_k(t)| * W_{ik} \quad k=1,2,\dots,m, t=1,2,\dots,9 \quad (6)$$

式中 \mathbf{a}_t 用来控制嵌入水印的强度。当 \mathbf{a}_t 的取值较大时, 水印鲁棒性较好, 但水印对原图像影响较明显, 即水印视觉不可察觉性较差; 反之, \mathbf{a}_t 取值较小时, 水印的不可察觉性好, 但水印鲁棒性弱, 本文的选取值结合了HVS模型。

图像经三级小波分解后, 除0号逼近子图外(设其大小为 $n_0 \times n_0$), 将任一层 $r(r=1,2,3)$ 的每一子带图像 $k(k=1,2,3)$ 分为互相不重叠 $n_0 \times n_0$ 大小的子块 $f_{r,k}^i(x,y)$ 。则1,2,3号子图对应 $f_{r,k}^i(x,y)$, $r=3; k=1,2,3; i=1$; 4,5,6号子图对应 $f_{r,k}^i(x,y)$, $r=2; k=1,2,3; i=1,2,3,4$; 7,8,9号子图对应 $f_{r,k}^i(x,y)$, $r=1; k=1,2,3; i=1,2,\dots,16$ 。 $\mathbf{a}_{r,k}^i$ 定义为^[3]

$$\mathbf{a}_{r,k}^i = \mathbf{b} \left[\frac{\sum H''(u,v) \left| \hat{f}_{r,k}^i(u,v) \right|^2 \right]^{1/2}}{\max_i \left[\sum H''(u,v) \left| \hat{f}_{r,k}^i(u,v) \right|^2 \right]^{1/2}} \quad (7)$$

式中 $\left| \hat{f}_{r,k}^i(u,v) \right|$ 是 $f_{r,k}^i(x,y)$ 进行DFT变换得到的, \mathbf{b} 定义为被隐藏图像全部灰度平均值的0.1。 $\mathbf{a}_{r,k}^i$ 与 \mathbf{a}_t 的对应关系为

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_t &= \mathbf{a}_{3,t}^1 & t=1,2,3 \\ \mathbf{a}_t &= \frac{1}{4} \sum_{j=1}^4 \mathbf{a}_{2,t}^j & t=4,5,6 \\ \mathbf{a}_t &= \frac{1}{16} \sum_{j=1}^{16} \mathbf{a}_{1,t}^j & t=7,8,9 \end{aligned}$$

将由式(6)得到的 m 个 $f'_k(t)$ 替换一维向量 $f(t)$ 中原位置处 $f_k(t)$ 元素, 形成一个新的向量

$$\mathbf{f}'(t) = [f'_1(t), f'_2(t), \dots, f'_k(t), \dots, f'_m(t), f_{m+1}(t), \dots, f_{n_t \times n_t}(t)] \quad t=1,2,\dots,9 \quad (8)$$

将其重新恢复成一个 $n_t \times n_t$ 大小的二维细节子图矩阵 $\mathbf{f}'(t) = [f'_{ij}(t)]_{n_t \times n_t}$ ($t=1,2,\dots,9$), 再经过二维离散小波重构得到了嵌入第 i 个水印序列(m 个伪随机实数)后的水印图像 F' 。

2.2 水印的检测

水印检测就是在待检测图像上检测出是否存在所嵌入的某种特征的信息, 即所选择的伪随机实数。它通过比较伪随机实数矩阵 W 中 m 个伪随机实数序列向量 X 与待检测图像小波细节子图间的互相关性来判定。具体操作是将一个任意的待检测图像 F'' 进行三级小波分解得到图1的分解图, 根据实际需要计算1~9号子图中几个或全部细节子图与 m 个伪随机实数序列向量 X 的互相关系数。水印的检测从高频细节子图开始, 过程如下:

首先, 将9号细节子图 $f''(9)$ 按前面嵌入水印时元素顺序重新排列成一个一维向量

$$\mathbf{f}''(9) = [f_1''(9), f_2''(9), \dots, f_k''(9), \dots, f_m''(9), f_{m+1}''(9), \dots, f_{n_t \times n_t}''(9)] \quad (9)$$

选取前 m 个元素形成

$$\mathbf{X}''(9) = [f_1''(9), f_2''(9), \dots, f_k''(9), \dots, f_m''(9)] \quad (10)$$

向量 X 和向量 $\mathbf{X}''(9)$ 的互相关系数可以表示为

$$\mathbf{r}(j) = X \cdot \mathbf{X}''(9) = \sum_{k=1}^m W_{jk} \cdot f_k''(9)$$

式中 $j=1,2,\dots,m$ 表示 m 种不同的伪随机序列, 因此共有 m 个互相关系数 $\mathbf{r}(j)$, 为了定量比较 m 个互相关系数的大小, 定义参数

$$R_{ratio}(i) = \frac{|\mathbf{r}(i)|}{\max(|\mathbf{r}(j)|)} \quad (j \neq i, j=1,2,\dots,m; i=1,2,\dots,m) \quad (11)$$

它表示互相关系数 $\mathbf{r}(i)$ 与另外 $m-1$ 个互相关系数 $|\mathbf{r}(j)|$ ($j \neq i, j=1,2,\dots,m$) 中的最大值之比, 体现了第 i 个伪随机实数序列相对于其他伪随机序列与待检测图像的相关程度。如果有某一 $R_{ratio}(i) = I$, 其中 I 是预先

设定的一个大于1的正数,则可认为待检测的图像上嵌入了第*i*个水印的*m*个伪随机实数。否则,类似于9号细节子图,继续计算8,9号两个细节子图与伪随机实数序列的互相关系数:

$$r(j) = X \cdot [X''(8) + X''(9)] = \sum_{k=1}^m W_{jk} [f_k''(8) + f_k''(9)] \quad j=1,2,\dots,m \quad (12)$$

从而得到新的参数 $R_{atio}(i)$ 值。如果此时 $R_{atio}(i) > I$, 说明检测到水印, 计算可以结束; 否则, 依此类推, 直到计算到1号细节子图。一般来说, 如果待检测图像 F'' 退化程度比较轻, 只需要计算几个高频细节子图就可以判别水印存在与否; 如果待检测图像 F'' 退化程度较严重, 就需要依次计算除0号低频逼近子图以外的其余9至1号中高频细节子图与伪随机实数序列的互相关系数。如果整个检测过程中所有参数 $R_{atio}(i)$ 值仍然小于 I , 那么无法断定待检测图像上是否存在一个我们所嵌入的水印。

3 实验结果

图像处理对于小波变换的相应滤波器有一定的要求, 如, 滤波器最好是线性相位的、有较好的正则性等。目前满足这些要求的小波滤波器有许多, 选用文献[7]中的线性相位双正交9/7小波滤波器, 它非常适合于图像处理。双正交9/7小波分解滤波器的系数为

$$h_0(k) = \{0.037\ 828, -0.023\ 849, -0.110\ 624, 0.377\ 402, 0.852\ 699, 0.377\ 402, -0.110\ 624, -0.023\ 849, 0.037\ 828\}$$

$$h_1(k) = \{0.064\ 539, -0.040\ 689, -0.418\ 092, 0.788\ 486, -0.418\ 092, -0.040\ 689, 0.064\ 539\}$$

实验在matlab5.3环境下完成, 嵌入的水印序列为 $i=40$, 伪随机实数水印序列及每一序列伪随机数 $m=100$, 图像质量的客观评价采用峰值信噪比。

图2a所示为一个256灰度级lenna图(256×256), 图3b所示为根据本文的算法在图像上嵌入*m*个伪随机实数后得到的水印图像, 其视觉主观效果较好, 基本上看不出嵌入水印的痕迹。图2c、2d、2e所示为对水印图像分别进行中值滤波(6×6)、叠加加性噪声(盐-辣椒)、JPEG有损压缩(压缩后的PSNR=22.173)得到的退化水印图像。

图3所示分别为图3a、3b、3c、3d、3e所测到的*m*个互相关系数, 检测时利用了全部的子图。从图中可以直观的看到, 在原图像中不存在明显的峰值, 而在加水印的且没有经过退化处理的图像3b中有一个最明显的峰值(在横坐标40处), 其中的横坐标代表水印序列的序号即水印的方案序号, 纵坐标代表相应的互相关系数的值。图3c、3d、3e虽然是对水印图像经过了一些退化处理所得到的, 但还是可以看到在40处出现了峰值。

表1所示为使用了不同检测数目的子图所得的实验测量结果。可以看出, 一般情况下, 如果水印图像退化程度较小的话, 水印的检测只需要计算几个高频细节子图。即使水印退化程度比较大, 也可以通过计算几个相关的高中频或低频清晰地检测出水印。实验结果表明了本方法具有很好的鲁棒性。

表1 四种情况的检测结果统计

检测的子图	水印图像		中值滤波后(6×6)		叠加加性噪声		JPEG压缩	
	PSNR	Ratio	PSNR	Ratio	PSNR	Ratio	PSNR	Ratio
9~7		2.61		1.14		2.63		2.00
9~4	30.85	3.12	23.98	1.14	19.24	2.99	22.17	2.17
9~1		2.92		1.25		2.97		2.24

4 结束语

利用小波的多分辨率特性, 结合人眼视觉系统模型, 本文提出了一种静态灰度图像水印嵌入和检测方案。嵌入的水印是一组伪随机实数, 难于被别人仿造。同时检测算法不需要原始图像的参与, 有利于保持原图像的安全性。在水印检测的时候, 可以根据情况决定所检测的子图, 一般情况下只涉及到待检测图像



图2 原图像、水印图像以及处理后的图像

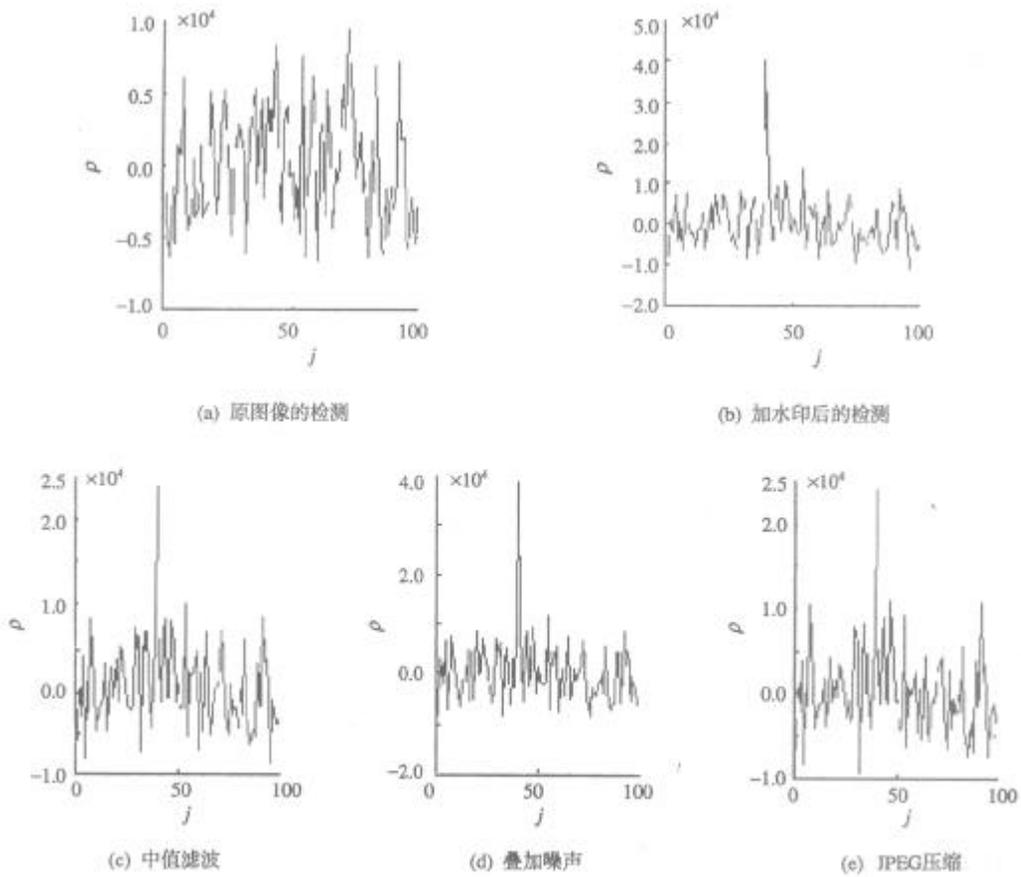


图3 原图像、水印图像以及加水印的图像经过处理后的检测

的相关的几个细节子图,并不需要检测整个图像,使运算量大大减少。实验表明了本文提出的水印算法对于中值滤波、叠加加性噪声、JPEG有损压缩等常见的图像处理都是鲁棒的。在水印的嵌入过程中,利用人眼的视觉模型来选择嵌入强度,可以使水印的不可见性和鲁棒性达到最好的折中。

参 考 文 献

- [1] Wang H, Kuo C C J. Image protection via watermarking on perceptually significant wavelet coefficients[C]. Proceedings of the IEEE Multimedia Signal Processing Workshop, Redondo Beach, California, 1998. 278-284
- [2] Hundur D, Hatzinakos D. A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion[C]. Proceedings of the International Conference on Image Processing, Santa Barbara, California, 1997. 544-547
- [3] Wilson T A, Rogers S K, Myers L R. Perceptual-based hyperspectral image fusion using multiresolution analysis[J]. Optical Engineering, 1995, 34(15): 3 154-3 164
- [4] Xia X, Boncelet C G, Arce G R. Wavelet transform based watermark for digital images[J]. Optics Express, 1998, 3(12): 497-511
- [5] Nill N B. A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment[J]. IEEE Tanscation on Communication, 1985, 33(6):551-557
- [6] Tan S H, Ngan K N. Classified perceptual coding with adaptive puantization[J]. IEEE Transaction on Circuits and systems for Video Technology, 1996, 37(6): 375-383
- [7] Villasenor J D, Belzer B, Liao J. Wavelet filter evaluation for image compression[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1995, 4(8): 1 053-1 060

编辑 漆 蓉

 (上接第672页)

3 结 束 语

本文对嵌入式系统仿真开发集成环境的构造进行了深入的研究,从软件体系结构的高度设计了iBus软总线结构,提出了一个可扩展和稳定的集成框架,在嵌入式系统开发领域具有广阔的前景。

本文研究工作得到校青年基金(YF020806)的资助,在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 魏 忠, 蔡 勇, 雷红卫, 等. 嵌入式开发详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003
- [2] 陈定君, 郭晓东, 张应辉, 等. 嵌入式软件仿真开发系统的研究[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 137-139
- [3] Mary S, David G. Software architecture: perspectives on an emerging disciplines[M]. NewJersey: Prentice Hall, 1996
- [4] 万建成, 卢 雷. 软件体系结构的原理、组成与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [5] Purtilo J M. The polyolith software bus[J]. ACM Transaction on Programming Languages and Systems, 1994, 16(1): 151-174
- [6] Dale R. Inside Com[M]. Seattle: Microsoft Press, 1997
- [7] Frank B, Ragine M, Hans R, *et al.* Pattern-oriented software architecture. Volumn1: A System of Patterns[M]. New York: John Wiley&Sons, 1996
- [8] Eric G, Richard H, Ralph J, *et al.* Design patters: elements of reusable object-oriented software[M]. Boston: Addison Wesley Longman, 1995
- [9] Bergstra J A, Klint P. The toolBus-a component interconnection architecture[R]. Programming Research Group, University Of Amesterdam, 1994

编辑 徐培红