

在数字图像上实现隐形签名的研究¹

周亚训 叶庆卫 徐铁峰

(宁波大学信息科学与工程学院 宁波 315211)

摘 要 数字水印作为数字媒体版权保护的有效手段,近几年来在国际上引起了人们极大的兴趣,该文研究了在数字图像上实现隐形签名水印的方法,提出了一个基于小波变换和离散余弦变换(DCT)组合处理的数字图像隐形签名水印方案.它首先对原始图像作适当层次的二维小波分解,然后对低频小波逼近子图和签名水印作二维 DCT,最后签名水印的 DCT 系数被嵌入到逼近子图的中高频段 DCT 系数中.实验结果表明,所提出的数字图像水印方案很好地实现了图像水印的鲁棒性和不可视性间的统一.经常规的数字图像处理操作及噪声干扰,签名水印仍能被可靠、清晰地检测出.

关键词 图像水印,小波变换,离散余弦变换,隐形签名
中图分类号 TN911.73, TN918

1 引 言

随着多媒体网络的不断普及,数字化媒体(数字图像、数字视频、数字音频等)的传输和获取变得越来越便捷.这一方面促进了人类信息的共享,推动了社会的进步,但另一方面也带来了新的问题,即版权问题.如果用户通过一定手段获取网络中的传输数据,未经作者许可,随意使用甚至修改数据内容并在网上发布等,这些都会给作者带来一定的经济损失.因此,怎样更好地保护数字图像、数字视频、数字音频等数字媒体的版权问题成为当前信息时代一个需要解决的课题.数字水印技术正是为解决这一问题而被提出^[1-3].

数字水印是指在原始数字媒体中嵌入某种特征信息,以此用来对数字媒体作出标识.数字水印技术是对传统的数据保密技术的进一步补充.传统的数据保密技术的数据保护功能是有限的,因为数据一旦在接收端被接收并解密,其保护作用随之消失.而数字水印技术通过将水印直接内嵌到原始数字媒体中,成为原始数字媒体的有机组成部分,可以为解密的数据提供进一步的保护.

数字图像水印是数字水印研究中的一个重要分支,对数字图像而言,数字水印方案的实现可表示为 $F' = f(F, W)$. 其中 $f(\)$ 是某个数字水印编码函数, F, F' 分别是原始图像和嵌入水印后的水印图像.一般来说,待嵌入的数字水印 W 是一组伪随机数,可由包含作者信息的随机信号发生器产生,由此生成的数字水印具有难以仿造的优点,保证了数字水印的唯一性和可靠性.

水印鲁棒性和不可视性是数字图像水印技术中的两个基本要素.水印鲁棒性,就是要求嵌入的数字水印具有抵御一般的数字图像处理操作及外来干扰的能力.水印不可视性,就是要求嵌入的数字水印不能破坏原始图像的视觉效果,要求嵌入数字水印后的水印图像不仅要有很好的客观质量,而且要有较好的主观视觉效果.显然,水印鲁棒性和不可视性是一对相互矛盾的因素,它们取决于水印的嵌入强度、水印嵌入的图像位置.在文献[4, 5]中,水印被嵌入到数字图像某些像素的最不重要位(Least significant bits)中,以保证水印的不可视性,然而最不重要位中的信息容易在数字图像处理过程中被丢掉,因而不能保证水印的鲁棒性.在文献[6-8]中,水印被嵌入在视觉上重要的图像位置处,以期具有足够的鲁棒性,但视觉上重要的位置处信息改变对水印不可视性影响较大.文献[9-11]则进行了折衷,以求达到在水印的鲁棒性和不可视性间兼顾的目的.

¹ 2000-10-30 收到, 2001-03-20 定稿
浙江省教育厅资助项目(20010227)

要达到水印鲁棒性和不可视性间的有机协调, 必须结合人眼的视觉特性。心理视觉研究认为^[12,13], 除平滑的低频信息外, 图像的高频边缘细节也是影响人眼视觉的主要因素, 它们结合在一起构成了人眼对图像的主要视觉效果。在这些位置处视觉阈值最低, 任何对数字图像的处理操作当以保持图像边缘细节的完整性和尽可能少改变图像的平滑部分信息为准则。而具有较强纹理背景的图像区域, 视觉阈值较高, 对这些中频信息人眼能容忍较大的视觉失真。

本文研究了用作者签名代替一组伪随机实数作为数字水印在数字图像上实现隐形签名的方案, 提出了一个基于小波变换和离散余弦变换组合处理的数字图像隐形签名水印方案。应用本文水印方案, 在保证水印图像高质量、不可视性前提下, 能可靠、清晰地检测出嵌入的隐形签名。本文中, 首先介绍了数字图像的频域变换理论, 然后给出了一个数字图像隐形签名水印方案的算法, 最后给出了实验结果。

2 图像的小波变换和离散余弦变换

2.1 小波变换和多分辨率分析

S.Mallat 于 1988 年提出的小波变换^[14]是一种非平稳信号的时频分析方法, 其基本思想是以小波函数 $\psi_{a,b}(t)$ 为基底对信号 $f(t)$ 进行分解。

$$Wf(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{a,b}(t)f(t)dt \quad (1)$$

其中小波函数是由同一基底函数 ψ 经平移、伸缩而得到的一组函数:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2}\psi((t-b)/a) \quad a,b \in R, \quad a \neq 0 \quad (2)$$

ψ 称为基小波, a 为伸缩因子, b 为平移因子。

S.Mallat 提出了求解小波系数的塔形算法, 使离散小波变换得以数字 QMF 滤波器组的形式实现。多分辨率分析的小波分解公式为

$$\left. \begin{aligned} c_k^{j-1} &= \sum_m a_{m-2k} c_m^j \\ d_k^{j-1} &= \sum_m b_{m-2k} c_m^j \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

重构公式为

$$c_k^j = \sum_m [p_{k-2m} c_m^{j-1} + q_{k-2m} d_m^{j-1}] \quad (4)$$

将小波变换由一维推广到二维就可适用于数字图像处理。它可以对丰富的图像信息进行细致的频率分离即多分辨率分解, 这与人眼对图像的视觉感知过程相匹配。

图 1 示意出数字图像二维小波变换分解的过程。通过水平和垂直滤波, 离散小波变换将原始图像分为 4 个子带图像: 水平和垂直方向的低频子带图像 LL, 水平方向的低频和垂直方向的高频子带图像 LH, 水平方向的高频和垂直方向的低频子带图像 HL, 水平和垂直方向的高频子带图像 HH。若对子带图像 LL 再进行小波分解, 又可得更低分辨率的 4 个子带图像。如此反复, 可对数字图像进行多级小波分解。

子带图象 LL 集中了原始图象的绝大部分能量, 称为原始图象的逼近子图, 它刻划了原始图象的绝大部分信息。子带图象 LH, HL 和 HH 保持了原始图象的垂直边缘细节、水平边缘细节和斜边缘细节, 统称为原始图象的细节子图, 它们刻划了原始图象的边缘细节特征, 但这些边缘细节易受外来噪声、常规图象处理等因素影响, 其稳定性较差。表 1 给出了 Lena 灰度图

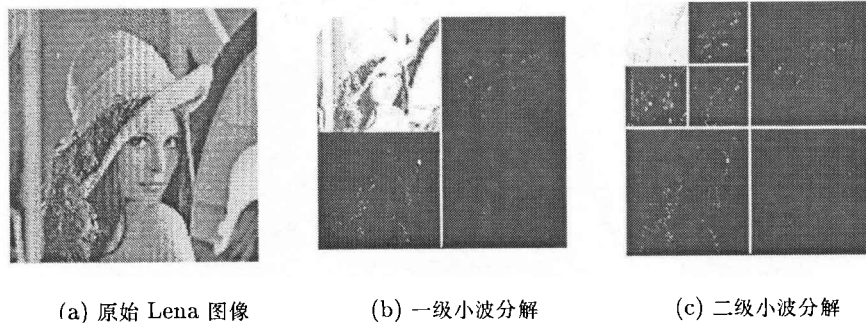


图 1 图像的小波变换分解过程

表 1 Lena 图像退化处理后对各级小波子图的影响 ($\times 10^{-3}$)

	LL ₃	LH ₃	HL ₃	HH ₃	LH ₂	HL ₂	HH ₂	LH ₁	HL ₁	HH ₁
加正态分布噪声 PSNR=30.0dB	0.1	0.9	0.6	1.0	1.4	1.2	2.1	2.3	2.6	7.9
3×3 中值滤波 PSNR=35.7dB	0.05	0.2	0.2	0.3	0.3	0.6	0.6	0.5	1.0	1.2
JPEG 压缩编码 PSNR=34.5dB	0.08	0.4	0.3	0.5	0.6	0.6	1.0	0.6	1.3	1.4

象 (512×512×8bit) 经退化处理后其各小波子图受影响的程度, 用归一化方差值表示之。归一化方差值依下式计算:

$$\text{Std} = \sum_i \sum_j \frac{1}{N \times N} \times \frac{[I(i, j) - I'(i, j)]^2}{\text{Max}(\text{Max}(I(i, j)))^2} \quad (5)$$

其中 $I(i, j)$, $I'(i, j)$ 分别是处理前后对应的小波子图系数值, $N \times N$ 是小波子图大小。

表 1 显示, 图象经退化处理后其三级小波逼近子图 LL₃ 的归一化方差值要远小于其它的小波细节子图, 较小的归一化方差值意味着其具有较强的抗外来影响的能力, 即稳定性好。因此, 作为数字水印, 不应嵌入在原始图象的小波细节子图区域, 这一方面确保了数字水印的鲁棒性, 另一方面也有利于保证图象边缘细节的完整性, 减少由于水印的嵌入引起的图象视觉模糊。

2.2 离散余弦变换

小波逼近子图受外界影响小, 稳定性好, 是水印嵌入的理想区域。但小波逼近子图集中的信息是原始图象的低频信息, 这些信息也是人眼视觉敏感点, 对其直接调制嵌入数字水印同样会引起图像视觉效果破坏。考虑到其细节信息仍然比较丰富, 行列间存在着很大的相关性, 用解相关和聚能作用的离散余弦变换 (DCT) 对其作进一步的频率分离。

离散余弦变换是传统的信号分析工具, 对二维图像信号 $f(m, n) \in L^2(R)$, 二维 DCT 定义为

$$F(u, v) = c(u)c(v) \sum_m \sum_n f(m, n) \cos[\pi(2m+1)u/(2N)] \times \cos[\pi(2n+1)v/(2N)] \quad (6)$$

其中 $c(0) = (1/N)^{1/2}$, $c(u) = (2/N)^{1/2}$, $1 \leq u \leq N$ 。

经过 DCT, 图像信息被进一步集中到少数低频 DCT 系数中。这些低频 DCT 系数对原始图像的质量和视觉效果影响极大, 应当保持不变。其余的大部分中高频段 DCT 系数构成了原始图像的一部分中频段信息, 人眼视觉敏感度相对较低, 对这部分系数的改变, 可以做到水印鲁棒性和不可视性间的协调。

3 隐形签名水印算法

3.1 隐形签名水印的嵌入

签名水印的嵌入过程如图 2 所示。

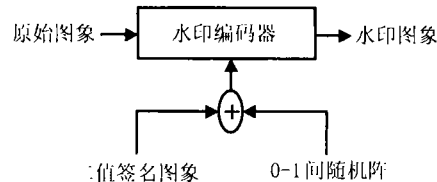


图 2 水印嵌入示意图

(1) 首先, 原始图像经适当层次的二维小波变换分解成一个逼近子图和多个细节子图, 对逼近子图再进行二维离散余弦变换, 得到 DCT 系数阵 $F(u, v)$, $1 \leq u, v \leq N$ 。

(2) 水印 W 可以是作者的任意一个签名图像, 大小满足 $\text{Size}(W) < \text{Size}(F)$ 。为防止签名被人仿造, 确保签名的唯一性和可靠性, 作者在嵌入签名前或是交给第三方去嵌入时, 可由作者自己控制产生的 0-1 间随机阵 Rand 对原始签名图像进行预处理操作, 例如 $W' = \beta(W, \text{Rand})$ 。其中 $\beta(\)$ 是某个水印预处理操作, 可以是简单的相加、相乘或“异或”等操作。

(3) 对经预处理过的签名水印 W' 进行二维离散余弦变换, 得到 DCT 系数阵 $W'(u, v)$, $1 \leq u, v \leq n$ 。依下式将其嵌入到逼近子图的中高频段 DCT 系数中

$$F'_{k+j} = F_{k+j} + \alpha \cdot W'(j), \quad j = 1, 2, \dots, n^2 - 1 \quad (7)$$

式中 F_k 是原始图像小波逼近子图 DCT 系数阵 F 经 Zig-Zag 扫描一维排列后的第 K 个数, 作为签名水印嵌入的起始点。 $W'(j)$ 是签名水印 DCT 系数阵 W' 经 Zig-Zag 扫描一维排列后的第 j 个数, 这里略过了其第一个系数即直流分量 $W'(0)$ 。 α 为水印嵌入强度因子, 其值由实验确定。

(4) 将调制后的 DCT 系数经 Zig-Zag 逆扫描恢复成二维 DCT 系数矩阵 $F'(u, v)$, $1 \leq u, v \leq N$, 经过二维离散余弦逆变换得到嵌入签名水印后的逼近子图, 最后结合细节子图进行二维小波逆变换组合成水印图像。

3.2 隐形签名水印的检测

签名水印的检测过程如下:

(1) 将一个待测的水印图像和原始图像进行适当层次的二维小波变换分解, 再将各自所得的小波逼近子图进行二维离散余弦变换, 并 Zig-Zag 扫描将其系数排列成一维序列。

(2) 根据水印的嵌入位置, 分别抽取相应的 DCT 系数序列:

$$\begin{aligned} F'' &= [F''_{k+1}, F''_{k+2}, \dots, F''_{k+j}, \dots, F''_{k+n^2-1}] \\ F &= [F_{k+1}, F_{k+2}, \dots, F_{k+j}, \dots, F_{k+n^2-1}] \end{aligned} \quad (8)$$

(3) 比较对应元素, 得差值序列, 即可能的经预处理过的签名水印 DCT 交流系数:

$$W'' = F'' - F = \bigcup_{j=0}^{n^2-1} \{(F''_{k+j} - F_{k+j})/\alpha\} \quad (9)$$

(4) 在 W'' 序列中插入直流分量 $W''(0)$ (该值由需要决定, 它的大小只影响恢复图像的亮度), 经 Zig-Zag 逆扫描恢复成二维系数矩阵 $W''(u, v)$, $1 \leq u, v \leq n$, 再经二维离散余弦逆变换得到经预处理过的签名水印 W''' 。

(5) 最后检测出作者嵌入的隐形签名, 即 $W''' = \beta^{-1}(W'', \text{Rand})$ 。其中 $\beta^{-1}(\)$ 是水印的去预处理操作。

本文隐形签名水印方案利用了与当前国际数据压缩标准 (JPEG, MPEG, H261/H263) 兼容的 DCT 算法及新一代国际数据压缩标准 (JPEG2000) 采用的 DWT 算法, 具有算法简单、易于实现的特点。同时, 在宏观上, 签名水印被嵌入在原始图像经小波变换分解所得的低频逼近子图模块内, 这一模块具有很强的抗干扰能力, 显然嵌入的签名水印稳定性好。而在具体实现上, 签名水印被嵌入在低频逼近子图的中高频段 DCT 系数上, 避开了人眼视觉比较敏感的高频边缘细节和能量集中视觉又敏感的低频分量, 很好地利用了人眼视觉特性 (HVS), 有利于实现数字水印的不可视性。

4 实验结果

实验中, 选择了 Daubechies 正交归一小波族 $\{\psi(x)\}$ 中 $\psi(x)$ 小波的低通滤波器序列 $\{h(n) = 0.4829, 0.8346, 0.2241, -0.1294; g(n) = 0.4829, -0.8346, 0.2241, 0.1294\}$ 作为二维小波变换分解和重建滤波器组, 并对原始图像进行三级小波分解。其中水印嵌入强度因子 $\alpha = 0.4$, DCT 系数起始点 $K = 2000$ 。水印检测结果的客观评价采用相关度, 即

$$\rho = \frac{\sum_i \sum_j W(i, j) \cdot W'''(i, j)}{\sum_i \sum_j W(i, j)^2} \quad (10)$$

其中 W 是原始作者签名图像, W''' 是检测到的作者签名。

图 3 中, 原始图像是一个 256 灰度级 Lena 图 (512×512), 水印是一个经 0-1 间随机阵叠加后的二值签名图像“软件” (32×32), 水印图像是基于前面算法在原始图像上嵌入软件签名后的实验结果。可以看到, 在该水印嵌入强度下, 水印图像的客观质量很好 (峰值信噪比 PSNR=39.5dB)。从主观视觉效果上评价, 也与原始图像非常一致, 很难感觉到嵌入的签名水印痕迹, 达到了水印的不可视性要求。如果水印图像没有被任何干扰处理, 本文水印方案可以完全地检测出嵌入的签名水印 ($\rho = 1$)。下面考察水印图像经退化处理后的水印检测结果。

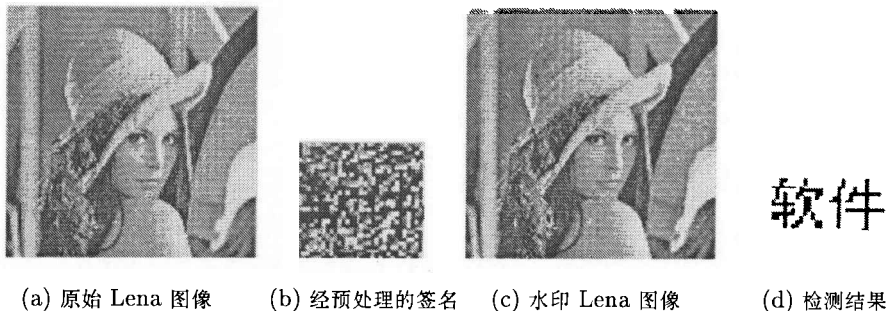


图 3 水印嵌入及检测结果

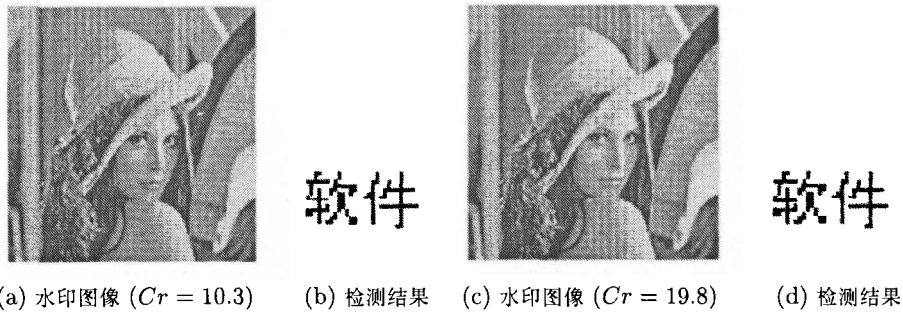


图 4 JPEG 压缩编码对水印影响

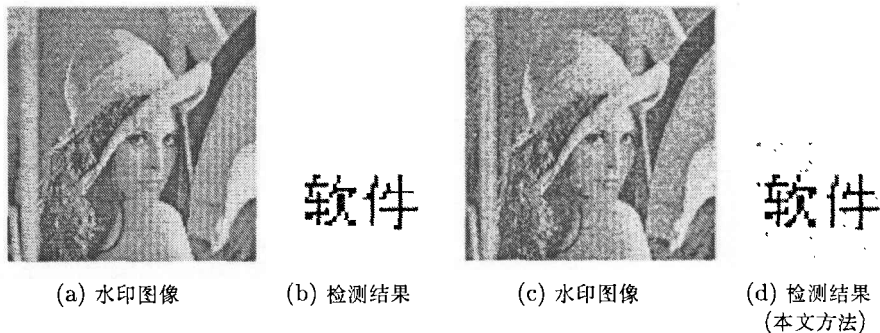


图 5 正态噪声干扰对水印影响

4.1 JPEG 压缩编码

数字媒体尤其是数字图像存在着存贮时占用空间特别大, 传输时占用信道频带又非常宽的问题, 在传输、存贮过程中往往要经过压缩处理。图 4 给出了经 JPEG 压缩编码后的水印图像 (PSNR=34.9dB 和 32.2dB) 及相应的水印检测结果 ($\rho = 0.97$ 和 0.95)。实验发现, 经过允许的失真范围内的 JPEG 压缩编码处理, 签名水印仍能可靠地存在于水印图像中, 而被清晰地检测出, 显示出签名水印抗压缩编码的鲁棒性。

4.2 加噪处理

在网上传输或应用过程中, 数字图像不可避免地会受到噪声的干扰。图 5 给出了受不同程度的加性正态噪声干扰后的水印图像 (PSNR=29.5dB 和 22.9dB) 及相应的水印检测结果 ($\rho = 0.96$ 和 0.92)。实验发现, 水印图像虽经噪声干扰后其客观质量、主观视觉效果明显退化, 但本文签名水印方案仍能可靠、清晰地检测出嵌入的签名水印, 显示出签名水印抗噪声干扰的鲁棒性。

4.3 中值滤波处理

图像水印化本质上是一种图像受噪污染过程, 进行低通滤波处理是信号去噪的基本方法。图 6 给出了经 $[3 \times 3]$ 和 $[5 \times 5]$ 不同窗口尺寸的中值滤波器滤波后的水印图像 (PSNR=34.3dB 和 31.0dB) 及相应的水印检测结果 ($\rho=0.96$ 和 0.93)。实验发现, 经过中值滤波尤其是大窗口尺寸的中值滤波器处理后, 水印图像会明显失真: 图像视觉模糊、质量下降。但本文签名水印方案仍能可靠、清晰地检测出嵌入的签名水印, 显示出签名水印抗滤波处理的鲁棒性。

以上从几个侧面显示了本文提出的数字图像隐形签名水印方案的实验结果, 证实了本文签名水印算法实现的签名水印抗常规的数字图像处理操作及外来噪声干扰的鲁棒性。对其它的诸如图像平滑和锐化、图像增强、直方图均衡化等的数字图像处理操作, 本文签名水印方案也能给出满意可信的检测结果。

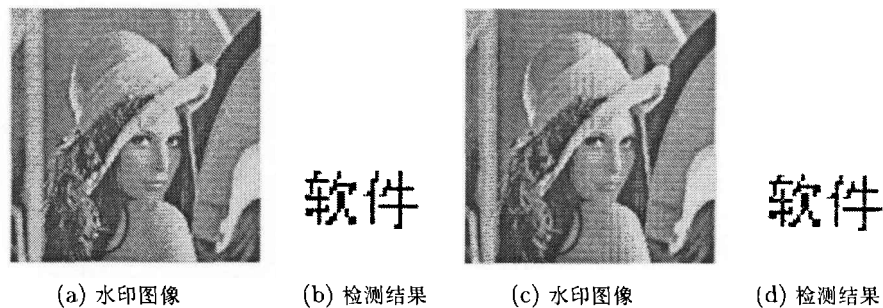


图 6 中值滤波对水印影响

5 结 论

近几年所提出的数字水印方案中, 大都采用一组伪随机数作为数字水印来研究, 然而从信息可懂度而言, 随机数水印没有太大意义。本文研究了用作者签名代替伪随机数作为数字水印在数字图像上实现隐形签名的方法, 实现了一个基于小波变换和离散余弦变换组合处理的数字图像隐形签名水印方案, 这对数字图像水印而言更具现实意义。所实现的隐形签名水印方案具有以下一些优点: (1) 将人眼视觉特性应用于数字图像水印方案中, 水印不可视性好。(2) 能抵御常规的数字图像处理操作及外来噪声的干扰, 水印鲁棒性好。(3) 水印在 DWT、DCT 域内实现, 与当前及未来的国际数据压缩标准相兼容。(4) 算法简单、成熟, 适用于其它数字媒体的水印方案中。

参 考 文 献

- [1] F. Hartung, B. Girod, Digital watermarking of raw and compressed video, SPIE, 2952, 1996, 205-213.
- [2] B. M. Macq, J. I. Quisquater, Cryptology for digital TV broadcasting, Proc. IEEE, 1995, 83(6), 944-957.
- [3] G. Voyatzis, I. Pitas, The use of watermarks in the protection of digital multimedia products, Proc. IEEE, 1999, 87(7), 1197-1207.
- [4] R. G. Van Schyndel, A. Z. Tirkel, C. F. Osborne, A digital watermarks, In: IEEE Int. Conf. on Image Processing, Piscataway, New Jersey, 1994, 2, 86-90.
- [5] D. J. Fleet, Embedding invisible information in color images, In: IEEE Int. Conf. on Image Processing, Piscataway, New Jersey, 1997, 1, 532-535.
- [6] I. J. Cox, J. Kilian, F. T. Leighton, T. Shamoan, Secure spread spectrum watermarking for multimedia, IEEE Trans. on Image Processing, 1997, IP-6(12), 1673-1687.
- [7] M. D. Swanson, M. Kobayashi, A. H. Tewfik, Multiresolution data embedding and watermarking technologies, Proc. IEEE, 1998, 86(6), 1064-1087.
- [8] 钮心忻, 杨义先, 基于小波变换的数字水印隐藏与检测算法, 计算机学报, 2000, 23(1), 21-27.
- [9] M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini, A. Piva, A DCT-domain system for robust image watermarking, Signal Processing, 1998, 66(3), 357-372.
- [10] A. Piva, M. Barni, F. Bartolini, V. Cappellini, DCT-based watermark recovering without resorting to the uncorrupted original image, In: IEEE Int. Conf. on Image Processing, Santa Barbra, California, 1997, 1, 520-523.
- [11] 李 华, 朱光喜, 朱耀庭, 一种基于人眼视觉感知模型的数字水印隐藏方法, 电子学报, 2000, 28(10), 111-114.
- [12] J. Johnston, N. Jayant, R. Safranek, Signal compression based on models of human perception, Proc. IEEE, 1993, 81(10), 518-526.

- [13] L. Torres, M. Kunt, Video Coding, The Second Generation Approach, Boston Hardbound, Kluwer Academic Publishers, 1995, 57-102.
- [14] S. Mallat, A theory of multiresolution signal decomposition: The wavelet representation, IEEE Trans. on PAMI, 1989, 11(7), 674-693.

THE STUDY OF EMBEDDING AN INVISIBLE SIGNATURE WATERMARKING IN A DIGITAL IMAGE

Zhou Yaxun Yie Qingwei Xu Tiefeng

(The College of Information Science and Technology, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract As an effective method to provide copyright protection for digital media, digital watermarking has drawn extensive attention recently. By inserting the signature watermarking DCT coefficients into some middle-high frequency range DCT coefficients of the original image, the paper proposes a watermarking scheme of embedding an invisible signature in a digital image based on the combination of wavelet transform and cosine transform. The experimental results demonstrate the robustness and invisibility of digital image watermarking, and the signature watermark can be reliably and explicitly detected even though the watermarked image being degraded by commonly used image processing techniques.

Key words Image watermarking, Wavelet transform, Discrete cosine transform, Invisible signature

周亚训: 男, 1965年生, 硕士, 副教授, 从事数字信号、图像处理、光纤通信等方面的教学和研究工作.

叶庆卫: 男, 1969年生, 硕士, 讲师, 从事图像处理、神经网络、计算机网络等方面的教学和研究工作.

徐铁峰: 男, 1961年生, 博士, 副教授, 从事信号处理、光纤通信等方面的教学和研究工作.