

文章编号:1000-582X(2005)07-0059-05

一种新的图像自适应水印算法*

黄松,杨小帆,彭求明,李思静

(重庆大学计算机学院,重庆 400030)

摘要:数字水印是数字媒体版权保护的一种有效方法.提出了一种新的基于DCT(Discrete Cosine Transform)域的盲图像自适应数字水印算法.该算法利用视觉系统HVS(Human Visual System)特性和图像的局部特点,自适应地选择量化步长对图像各个分块的直流分量通过量化来嵌入水印,同时为了弥补在感知容量小的分块直流分量上水印嵌入强度的不足,利用照度掩蔽特性对该分块的部分低频系数也自适应地嵌入同一水印信号,从而使水印的稳健性和不可见性之间达到很好的平衡.水印的提取不需要原始图像.实验结果表明该算法实现的水印具有良好的不可见性,并对常见的几种图像处理和噪声干扰也具有很好的稳健性,其性能优于其它文献上的相近算法.

关键词:数字水印;量化;人类视觉系统;块分类;图像自适应

中图分类号:TP391

文献标识码:A

数字水印技术由于在数字产品版权保护方面的潜在应用得到了越来越多的研究者的重视,并成为数据图像处理和信息安全领域的一个研究热点^[1-2].数字水印技术指通过修改媒体信号而在其中隐藏数据和信息,且这些隐藏信息在视觉和听觉上不可感知,即使媒体被压缩或编辑等操作后仍能复原.这就需要水印至少满足两个重要属性:不可见性和稳健性.然而不可见性和稳健性又在一定程度上相互矛盾.一方面,稳健性要求水印的嵌入强度要大;另一方面,不可见性又要求嵌入的水印不要对宿主数据产生任何感知上的变化.因而任何一个好的图像水印方案应该是不可见性和稳健性之间的最佳折衷^[3].

水印的不可见性和稳健性除了跟所放置的位置有关外,还和嵌入的水印强度有关.因此对水印嵌入的要求应该是在保证水印不可见性的前提条件下,在合适的位置(频域或者空域)嵌入尽可能高强度的水印信号. Cox等^[4]提出水印应该放在视觉系统感觉上最重要的分量上(相对应于DCT域的低频系数),其理由是感觉上重要的分量是图像信号的主要成分,携带的信号能量较多,在图像有一定失真的情况下,仍能保留主要成分.然后根据人类视觉系统HVS的特性分析,DC

(直流)分量携带的信号能量更多,水印信号容量也更大.在DCT域,就稳健性而言,在保证水印不可见性的前提下,DC分量比任何AC(交流)分量更适合嵌入水印^[5],但DC分量的修改容易导致块效应现象,因而对DC分量的操作应该小心进行.解决这一问题的一条有效途径是充分利用视觉系统(HVS)的视觉特性来实现自适应^[6].文献[5,7]提出了利用人类视觉系统特性将水印嵌入到DC分量的自适应水印算法.

笔者提出了一种新的DCT域自适应水印算法.首先将图像分成 8×8 的块,利用人类视觉系统(HVS)特性和分块的局部特点对分块进行分类,对不同分类的块进行不同的处理;对感知容量相对较大的分块直接采用相应较大的量化步长通过量化DC分量来嵌入水印;对感知容量相对较小的分块除了采取较小量化步长量化DC分量外,还选择部分低频系数利用照度掩蔽特性进行自适应量化处理来嵌入同一水印信号,在提取时采用“多数表决”方法来判定水印信号.这里DC分量和AC分量分别采取不同的量化方法来实现水印的自适应嵌入.实验结果表明所提水印算法很好地实现了水印稳健性和不可见性的折衷.

* 收稿日期:2005-02-27

基金项目:重庆市应用基础研究基金资助项目(8028)

作者简介:黄松(1977-),男,重庆人,重庆大学硕士研究生,研究方向:数字水印、图像处理.

1 自适应水印算法

1.1 基于人类视觉系统(HVS)的块分类

水印可看为在强背景(原始图象)下迭加一个弱信号(水印). 只要迭加的信号低于对比度门限(contrast sensitivity threshold), 视觉系统就无法感觉到信号的存在. 根据人类视觉系统(HVS)的对比度特性, 该门限值受背景照度、背景纹理复杂性和信号频率的影响. 背景越亮, 门限就越高(照度掩蔽^[8]); 纹理越复杂, 门限就越高(纹理掩蔽^[9]).

根据 Weber 定理^[10], 若背景照度为 I , 那么在均匀背景下, 人眼刚好可以识别的物体照度为 $I + \Delta I$, ΔI 满足 $\Delta I \approx 0.02I$. 由于图像中各个区域的背景亮度和纹理复杂度差异较大, 其临界可见门限也有差别. 为了充分利用这一特性, 使各个区域中嵌入的水印都具有最大强度同时又不影响该区域的感知质量, 笔者对图像进行分块处理, 利用不同块的局部特性来确定水印的嵌入强度. 根据视觉系统照度掩蔽和纹理掩蔽特性, 把图像块分为 3 类. 第 1 类(R_1) 平均灰度较低(暗), 且灰度变化比较平滑, 人类视觉系统(HVS)对其中像素值的改变较为敏感; 第 3 类(R_3) 平均灰度较高, 且纹理复杂(或存在边缘), 人类视觉系统(HVS)对其中像素值的改变敏感性最弱; 余下的为第 2 类(R_2). 这里采用文献[6]的块分类器进行分类.

1.2 水印的嵌入算法

设原始图像为 $f(x, y)$, 二值水印 W 大小为 $M \times N$. 则水印嵌入可分为以下几个步骤:

1) 将原始图像分成互不重叠的 8×8 的块, 记为 $B_k, k=0, 1, \dots, K-1$, 即

$$f(x, y) = \bigcup_{k=0}^{K-1} B_k = \bigcup_{k=0}^{K-1} f_k(x', y'), \quad 0 \leq x', y' < 8. \quad (1)$$

2) 利用分块的不同局部特性按 1.1 节的方法将块进行分类.

3) 对各个分块分别进行 DCT 变换,

$$F_k(i, j) = \text{DCT}\{f_k(x', y'), 0 \leq x', y' < 8\}, \quad 0 \leq i, j < 8. \quad (2)$$

4) 将二值图像水印降维为一维水印序列 $W_s, s=0, 1, \dots, M \times N - 1$. 为了抵抗剪裁操作, 进行伪随机排序, 排序由密钥控制以保证安全^[11].

5) 分别对各个分块的 DC 分量进行水印嵌入. 通过量化将水印信号 w_s 嵌入到每个分块 DCT 系数的 DC 分量 $F_k(0, 0)$. 同时考虑到水印的不可见性, 采用了纹理和照度掩蔽方法, 根据分块纹理和照度自适应

地选择量化步长. 具体如下:

$$F'_k(0, 0) = \begin{cases} \Delta \cdot Q_0(F_k(0, 0)/\Delta), & \text{当 } w_s = 0 \text{ 时,} \\ \Delta \cdot Q_1(F_k(0, 0)/\Delta), & \text{当 } w_s = 1 \text{ 时,} \end{cases} \quad (3)$$

其中 Q_0 指量化为最近的偶数, Q_1 指量化为最近的奇数, Δ 为对应于不同分类块的量化步长, 它意味着水印嵌入的强度大小. 当 Δ 的值与 DC 分量相比足够小时, 块效应就可以避免. Δ 取值如下: 当 $B_k \in R_1$ 时, $\Delta = 8$; 当 $B_k \in R_2$ 时, $\Delta = 16$; 当 $B_k \in R_3$ 时, $\Delta = 24$. Δ 取不同步长的目的是在不影响图像感观质量的基础上充分利用图像的局部特性以尽可能最大强度地嵌入水印信号, 从而保证水印的稳健性和不可见性.

6) 为了在保证水印不可见性的条件下进一步提高水印的稳健性, 笔者引入了对第 1 类分块的部分 AC 系数的自适应量化处理. 这里采用文献[12]的简化模型, 根据这个模型可以得到在不影响感知质量的情况下每个 8×8 块的 DCT 系数允许的最大修改值——视觉掩蔽值

$$\alpha(i, j) = 4(1 + (\sqrt{2} - 1)\delta(i)) \cdot (1 + (\sqrt{2} - 1)\delta(j))\gamma(i, j)t(i, j), \quad (4)$$

这里 $i, j \in \{0, 1, \dots, 7\}$. $t(i, j)$ 为照度掩蔽门限矩阵^[13], $\delta(\cdot)$ 为 Kronecker 函数, $\gamma(i, j) < 1$ 为用来保证视觉透明性的尺度因子矩阵^[8]. 使用步长为 $\Delta(i, j)$ 的抖动量化器^[14]来实现各个 DCT 系数的量化(DC 分量除外), 其中 $\Delta(i, j) = 2 \times \alpha(i, j), i, j \in \{0, 1, \dots, 7\}$. 这样选择步长的目的是避免最大量化误差超过视觉掩蔽值 $\alpha(i, j)$. 水印的嵌入如下:

$$F'_k(i, j) = \begin{cases} \text{round}\left(\frac{F_k(i, j)}{\Delta(i, j)}\right) \cdot \Delta(i, j), & \text{当 } w_s = 0, \\ \text{round}\left(\frac{F_k(i, j) + \Delta(i, j)/2}{\Delta(i, j)}\right) \cdot \Delta(i, j) - \frac{\Delta(i, j)}{2}, & \text{当 } w_s = 1, \end{cases} \quad (5)$$

其中 $\text{round}(\cdot)$ 为取最近的整数. 为了保证水印信号提取的准确性, 对一个分块选择多个显著低频系数来重复嵌入同一水印比特. 若该块 DC 分量和 AC 分量修改不大, 提取水印时可以使用相同的方法获得基本相同的 $\alpha(i, j)$ 值. 需要注意的是选择的系数不能太多(选择最显著的 4 个低频系数), 同时 DC 分量的修改也不能太大, 否则将影响到水印信号提取的准确性.

7) 将量化后的系数替换原来的系数, 并对分块的 DCT 系数进行 IDCT 变换, 再将分块重构即得到嵌水

印图像.

$$f'(x,y) = \bigcup_{k=0}^{K-1} \text{IDCT}\{F'_k(i,j)\}. \quad (6)$$

1.3 水印的提取

1) DC分量上的水印信号提取. 先将嵌有水印的图像分块,利用不同块的局部特性将分块进行分类,并依次将各个分块进行DCT变换. 对各分块变换后的DC分量 $F''_k(0,0)$ 进行分析以提取水印,方法如下:

$$w'_i = \begin{cases} 0, & \text{当 } \text{round}(F''_k(0,0)/\Delta) = \text{偶数}, \\ 1, & \text{当 } \text{round}(F''_k(0,0)/\Delta) = \text{奇数}, \end{cases} \quad (7)$$

式中 $\text{round}(\cdot)$ 为取整函数, Δ 为分块所属分类的对应量化步长. 这样就得到了嵌入到各个分块DC分量的水印比特信息.

2) AC分量上的水印信号提取. 对于第1类的分块,除了提取DC分量上的水印信息外,还要对嵌入水印比特的 n 个AC系数分析以提取水印信息. 首先按照式(4)计算出 $\alpha(i,j)$,然后判断选择系数的水印信号,方法如下:

$$w'_i = \frac{1}{2} [1 - (-1)^{\text{round}(\frac{F''_k(i,j) \times 2}{\Delta(i,j)})}], \quad (8)$$

其中 $\text{round}(\cdot)$ 为取整函数, $\Delta(i,j) = 2 \times \alpha(i,j)$, $i,j \in \{0,1,\dots,7\}$. 在DC分量修改不大和选择的低频系数较少的情况下,可以准确地提取出水印信号.

3) 分块上水印信号的确定:第2、第3类分块的水印信号由DC分量提取的信息直接决定;第1类分块的水印信号由DC分量和 n 个低频系数提取的信息共同决定,这里采用“多数表决”的方法来确定该块的水印信号.

4) 最后将提取的水印信号进行一系列与水印嵌入时相反的逆处理,如逆伪随机排序及升维处理等,从而得到提取水印 W' .

1.4 水印的评价

由于提取出的水印可能与原嵌入水印不完全一样,这就需要一个评价准则来衡量恢复的水印与原始水印的相似程度. 除了可以从主观感觉上来评判提取出的水印的质量外,还可以采用以下归一化相似度计算公式来客观地评判,公式为:

$$NC = \frac{\sum_i \sum_j W'(i,j) \times W(i,j)}{\sum_i \sum_j W(i,j)^2}, \quad (9)$$

式中 $W'(i,j)$ 表示提取出的水印, $W(i,j)$ 表示原始嵌入的水印.

2 实验结果及性能分析

为了仿真笔者的算法,笔者采用经典的Lena图像

(512×512×8)作为测试图像,以64×64的“重庆大学”二值图像作为水印,在Matlab6.5和Windows2003平台上进行仿真实验. 图1为原始Lena图像,图2为水印图像,图3为嵌入水印后的图像,图4为在没有任何攻击下提取出的水印图像. 其峰值信噪比PSNR为43.17 dB(高于文献[7]的42.45 dB),由此可见笔者的方法使水印具有很好的不可见性.



图1 原始图像

重庆
大学

图2 水印图像



图3 嵌水印图像

重庆
大学

图4 无攻击时提取的水印

1) 剪裁攻击实验:对嵌水印后的图像从左上角开始分别剪去的整个图像1/16、9/64、1/4、25/64、1/2和3/4,剪去的部分用白像素代替,然后盲检测,检测的结果如表1所示.

表1 剪裁攻击实验结果

剪裁比例	1/16	9/64	1/4	25/64	1/2	3/4
NC	0.986 5	0.975 3	0.955 4	0.890 5	0.813 7	0.635 1

当剪去整个水印图像的1/2时NC仍高达0.813 7,可见本算法能很好地抗剪裁攻击.

2) 高斯噪声攻击实验:在对加水印图像叠加8%的高斯噪声后,NC=0.872 5,恢复水印的能力强,这

证实了本文的水印算法对高斯噪声有很好的抵抗能力。

3) 缩放攻击实验:对嵌入水印后的图像分别进行先缩小到原来的 1/4 和 1/2 后再利用双三次插值放大到原图像大小;先放大到原图 2 倍和 4 倍后,再缩至原图大小. 实验结果如表 2 所示,从表中结果可知,算法对缩放具有较强的鲁棒性。

表 2 缩放攻击实验结果

缩放比例	1/4	1/2	2	4
NC	0.703 5	0.951 8	0.963 1	0.960 7

4) 滤波攻击实验:对嵌入水印后的图像进行 3×3 的中值滤波处理,盲检测出水印, $NC = 0.835 1$. 对嵌入水印后的图像进行高斯低通滤波后, $NC = 0.854 4$. 可见,本文的算法能较好地抵抗滤波操作。

5) JPEG(Joint Picture Expert Group)压缩实验:先对嵌入水印后的图像进行多种不同质量因子的 JPEG 有损压缩,然后检测出水印,其结果如表 3 所示。

表 3 JPEG 压缩实验结果

质量因子/%	100	90	80	70	60	50	40	30
NC	1	0.992 1	0.967 4	0.936 4	0.904 2	0.880 2	0.781 3	0.654 4

根据表 3 可知,质量因子为 40 时 NC 高达 0.781 3,可见本文的算法能较好地抗 JPEG 压缩。

同时笔者使用文献[7]的方法进行了剪裁和 JPEG 压缩攻击实验并与本文方法进行了比较(见图 5 和图 6),从图中可以看出,在同等条件下,本文方法所提取的水印的 NC 值均高于或等于文献[7]方法的 NC 值. 而且考虑到本文方法具有更好的不可见性,因此,与文献[7]方法相比,本文方法具有更好的性能。

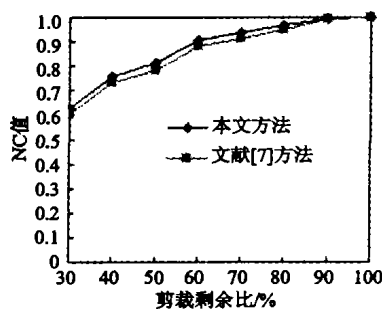


图 5 剪裁实验

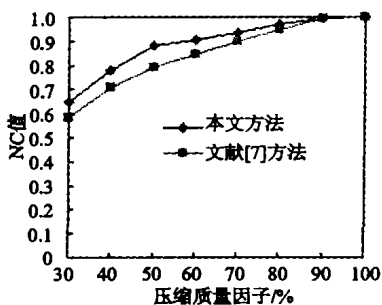


图 6 JPEG 压缩实验

3 结 语

笔者提出了一种新的图像自适应水印算法,其特点主要有:

1) 水印主要被嵌入到 DC 分量从而使水印具有较好的稳健性;

2) 在感知容量较小的分块,部分低频系数被选择用来重复嵌入同一水印信号. 这弥补了在 DC 分量上水印嵌入强度的不足,又避免了为保证水印稳健性增大 DC 分量水印强度而造成引起块效应的危险,从而使水印的稳健性和不可见性之间达到很好的平衡。

3) 通过对 DC 和 AC 分量分别采用不同的量化处理,利用人类视觉系统(HVS)的纹理掩蔽和照度掩蔽特性实现了水印自适应嵌入. 水印检测不需要原始图像。

实验结果表明该算法在保证水印不可见性的同时,对常见信号处理(如 JPEG 压缩、剪裁、低通滤波等)和噪声干扰具有很好的稳健性,与相近的方法相比性能更好。

参考文献:

- [1] SWANSON M D, KOBAYASHI M, TEWFIK A H. Multi-media Data Embedding and Watermarking Technologies[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(6):1 064 - 1 087.
- [2] MILLER M L, COX I J, BLOOM J A. Informed Embedding: Exploiting Image and Detector Information During Watermark Insertion [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C]. Vancouver: IEEE Press, 2000. 1 - 4.
- [3] 钟桦, 焦李成. 基于特征子空间的数字水印技术[J]. 计算机学报, 2003, 26(3): 378 - 383.
- [4] COX I J, KILIAN J, LEIGHTON F T, et al. Secure Spread Spectrum Watermarking for Multimedia[J]. IEEE Trans on Image Processing, 1997, 6(12): 1 673 - 1 686.
- [5] 黄继武, SHI Y Q, 程卫东. DCT 域图像水印: 嵌入对策和算法[J]. 电子学报, 2000, 28(4): 57 - 60.
- [6] 黄继武, SHI Y Q. 一种自适应图像水印算法[J]. 自动化学报, 1999, 25(4): 476 - 483.
- [7] DENG FENGSEN, WANG BINGXI. A Novel Technique for Robust Image Watermarking in the DCT Domain[Z]. IEEE Int Conf Neural Networks & Signal Processing, Nanjing, China, 2003.
- [8] WATSON A B. DCT Quantization Matrices Visually Optimized for Individual Images [A]. ALLEBACH J P. Proc of SPIE on Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV [C]. San Jose: SPIE Press, 1993. 202 - 216.
- [9] JAYANT N, JOHNSTON J, SAFRANEK R. Signal Compres-

- sion Based on Model of Human Perception[J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(10): 1385 - 1421.
- [10] GANZALES R C, WINTZ P. Digital Image Processing[M]. 2nd ed. New York: Addison- Wesley Publishing Co, 1987.
- [11] HSU CHIOUTING, WU JALING. Hidding Digital Watermarks Image[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1999, 8(1): 58 - 68.
- [12] HERMANDS J R, AMADO M, PEREZGONZALES F. DCT-Domain Watermarking Techniques for Still Images: Detector Performance Analysis and a New Structure [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2000, 9(1): 55 - 68.
- [13] AHUMADA A J, PETERSON H A. Luminance-Model-Based DCT Quantization for Color Image Compression[A]. BERNICE E. Proceedings of SPIE on Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III [C]. San Jose: SPIE Press, 1992. 365 - 374.
- [14] CHEN B, WORNELL G W. Preprocessed and Postprocessed Quantization Index Modulation Methods for Digital Watermarking[A]. WONG P W. Proceedings of the SPIE on Security and Watermarking of Multimedia Contents II [C]. San Jose: SPIE Press, 2000. 48 - 59.

Novel Image-adaptive Watermarking Algorithm

HUANG Song, YANG Xiao-fan, PENG Qiu-ming, LI Si-jing

(College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Digital watermarking is an effective method to provide copyright protection for digital media. A blind image-adaptive watermarking algorithm based on DCT domain is presented. The algorithm selects adaptively the step size of quantization to embed the watermark bits by modifying DC components via the human visual system model and local characteristics of image; at the same time some AC components of the blocks with less perceptual capacity are also modified to embed the same watermark bits by using quantization. Thus the relation between robustness and imperceptibility can be well balanced. The algorithm recovers the watermark without any reference to the original image. Compared with the similar algorithm reported in the literature, this method can give better image quality and is better robust against noise and commonly used image processing techniques.

Key words: digital watermarking; quantization; HVS; block classification; image-adaptive

(编辑 张 苹)