

一个新的基于 DCT 的自适应数字水印算法^{*})

黄松¹ 杨华千^{1,2} 张伟^{1,2} 韦鹏程^{1,2}

(重庆教育学院计算机与现代教育技术系 重庆 400067)¹

(重庆大学计算机科学与工程学院 重庆 400044)²

摘要 本文提出了一个利用 DCT 系数的关系来进行水印嵌入和提取的算法。该算法利用人类视觉系统 HVS 的特点,通过巧妙调整 DCT 系数之间的相互关系来嵌入水印,从而使得图像在嵌入一个比较稳健的水印后的视觉失真尽可能最小。水印提取不需要原始图像。实验结果表明本算法的图像保真度较好,并对 JPEG 压缩、剪切等常见的图像处理方法具有较好的稳健性,并优于文献上的相关算法。

关键词 数字水印,版权保护,DCT 系数

A New Adaptive Watermarking Algorithm Based on DCT

HUANG Song¹ YANG Hua-Qian^{1,2} ZHANG Wei^{1,2} WEI Peng-Cheng^{1,2}

(Department of Computer and Modern Education Technology, Chongqing Education College, Chongqing 400067)¹

(Department of Computer Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)²

Abstract In this paper, an adaptive watermarking algorithm using relationships between DCT coefficients is proposed. Utilizing the property of human visual system(HVS), this approach embeds a watermark by modifying the relationship of the selected DCT coefficients skillfully, thus minimizes the perceptual distortion of the original image in which a robust watermark is embedded. The algorithm recovers the watermark without any reference to the original image. Compared with other similar watermarking algorithms reported in the literature, this method can give better image quality and is more robust against JPEG compression, cropping and commonly used image processing techniques.

Keywords Digital watermarking, Copyright protection, DCT coefficient

1 引言

随着 Internet 的飞速发展,数字媒体的传输变得越来越容易,但存在的问题是:一方面,盗用者未经版权所有者同意,非法使用和复制数字媒体。另一方面,用户无法得知某种数字媒体的版权所有者,从而无法获得其授权。因而如何保护版权成为了一个急需解决的问题,数字水印技术为数字媒体的版权保护提供了一种行之有效的方法。

数字水印技术中有关图像的数字水印算法有很多,其中通过值的相互关系来嵌入水印信息就是其中一种。这些值可以是空域上的像素,也可以是频域上的系数。水印的提取是通过对这些值进行比较来获得,再通过提取水印和原始水印的归一化相关值可以判断有无水印。文[1]提出将图像的像素分为两组,一组像素值总和减去另一组像素值总和的差值作为水印的探测统计量,通过将该值与预设的阈值进行比较来判断水印的有无。文[2]提出了一个将每位水印信息隐藏到图像子块的两个 DCT 的相互系数中的方法,通过修改这两个系数之间的大小关系来嵌入水印,水印提取时也是根据两者之间的大小关系来提取。文[3]提出了一个通过修改相邻图像子块的对应中频系数之间的极性来嵌入水印的方法。文[4]也提出了一个利用 DCT 系数来嵌入水印的类似算法。然而这些方法都存在一个问题,即在嵌入水印时未充分考虑嵌入水印后的图像质量,因而容易产生一些可视的人为痕迹。

水印嵌入基本遵循的一个原则是最大限度地利用人类视

觉系统 HVS(Human Visual System)模型,导出 JND(Just Noticeable Distortion)描述来确定图像各个部分所能容忍的数字水印信号的最大强度,从而避免破坏图像的视觉质量^[5]。

2 算法基本思想

本文算法是利用人类视觉系统 HVS 的特点,巧妙调整 DCT 系数之间的相互关系,使得图像在水印嵌入后的视觉失真尽可能最小。在嵌入水印前,需要在 8×8 的图像子块中按照某种顺序选择一定数量的 DCT 系数。考虑到水印的稳健性和不可见性,选择的系数主要为中频系数。具体选择如图 1。

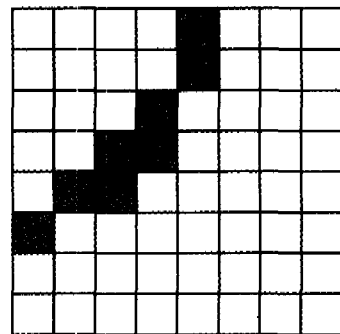


图 1 DCT 系数的选择

水印的嵌入是通过修改这些系数来完成的。如果嵌入的水印比特为“1”,那么修改后第一个选择系数的值在这些系数

^{*}基金项目:国家自然科学基金资助项目(60573047);重庆市科委自然科学基金资助项目(CSTC,2005B2286),重庆市教委资助项目(No. kj051501)。黄松 硕士,主要研究方向:神经网络,数字水印;杨华千 博士研究生,主要研究方向:信息安全,混沌数字水印;张伟 教授,博士后,主要研究方向为信息安全、计算智能与数据挖掘;韦鹏程 博士研究生,主要研究方向为信息安全,混沌理论。

中最大;如果嵌入的水印比特为“0”,那么修改后的第一个系数值变成最小。假设 $c_i, i=1, \dots, n$ 是被选择系数, n 是被选择系数的数量。那么修改后系数满足下列要求:

$$\begin{cases} c'_1 \geq \max(c'_2, c'_3, \dots, c'_n) & \text{if } w_j = 1 \\ c'_1 \leq \min(c'_2, c'_3, \dots, c'_n) & \text{if } w_j = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 c'_i 是修改后的系数, w_j 是嵌入的水印比特。设嵌入水印比特“1”和“0”时的调整值分别为 x , 则嵌入比特“1”需要把 c_1 增大到 $x + \delta, \delta \geq 0$, 把其余大于 x 的系数减小到 x 以下;嵌入比特“0”需要把 c_1 减小到 $x - \delta$, 把其余小于 x 的系数增大到 x 以上。

为了在嵌入水印后使图像峰值信噪比 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)尽可能大,可以采用同时修改多个系数的方法。又由于均方差 MSE(Mean Square Error)与 PSNR 成反比, MSE 越小, PSNR 越大,所以可以通过减小 MSE 来使 PSNR 尽可能最大化。然而单纯使用 PSNR 来衡量水印图像质量不太理想^[6], 这里便引入了 HVS, 水印嵌入时需要参考各个系数的 JND 值^[7]:

$$\omega_i = 4\alpha(1 + (\sqrt{2}-1)\delta(m))(1 + (\sqrt{2}-1)\delta(n))\gamma(m, n)t(n, n) \quad (2)$$

其中 $\omega_i (i=1, \dots, n)$ 为各个系数 c_i 的 JND 值, $m, n \in \{0, 1, \dots, 7\}$ 为系数 c_i 在图像块中的位置, α 为调整因子, $t(m, n)$ 为照度掩蔽门限矩阵^[8], $\delta(\cdot)$ 为 Kronecker 函数, $\gamma(m, n) < 1$ 为用来保证视觉透明性的尺度因子矩阵^[9]。原始系数和修改系数间差异引起的图像视觉失真可由下式确定:

$$SWE(x) = \left(\frac{(x \pm \delta) - c_1}{\omega_1} \right)^2 + \sum_{c_i} \left(\frac{c_i - x}{\omega_i} \right)^2 \quad (3)$$

当嵌入水印比特为“1”时上式选“+”,为“0”时选“-”。因而 x 的优化值可由下式获得:

$$x = \left[\frac{\left(\sum_{c_i > x \omega_i} \frac{c_i}{\omega_i} \right) + \frac{c_1}{\omega_1} \pm \frac{\delta}{\omega_1}}{\frac{1}{\omega_1} + \left(\sum_{c_i > x \omega_i} \frac{1}{\omega_i} \right)} \right] \quad (4)$$

式(4)中当嵌入水印比特为“1”时选“-”,为“0”时选“+”。

3 水印的嵌入与提取

3.1 水印的嵌入

设水印图像 W 大小为 $M_1 \times M_2$, 原始图像 X 大小为 $N_1 \times N_2$ 。则嵌入方案如下:



图2 原始图像



图3 原始水印

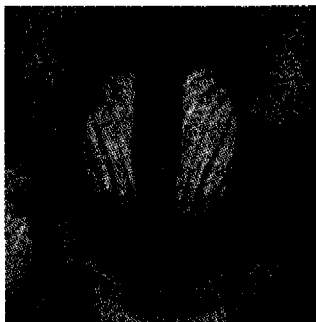


图4 嵌入水印后的图像



图5 提取水印



(a) $NC=0.9987$ (b) $NC_B=0.9784$ (c) $NC_B=0.8647$ (d) $NC=0.7915$ (e) $NC_B=0.8825$ (f) $NC_B=0.8133$ (g) $NC_B=0.9517$

图6 各种攻击下的实验结果

(1)将图像分割为互不重叠的 8×8 的子块,并把每个小块进行 DCT 变换。并根据 JPEG 量化表进行量化。

(2)根据量化后非零系数的数量将子块按降序排序,从这些排好序的子块序列中选出前 $M_1 \times M_2$ 个子块来进行水印嵌入。

(3)选择适量的嵌入系数,本文中系数选择如上文所述。

(4)将二值图像水印降维为一维水印序列 $W_s, s=0, 1, \dots, M_1 \times M_2 - 1$ 。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^[3]。

(5)根据上文算法求出优化的调整值 x ,并根据要嵌入的水印比特对选择系数进行调整来嵌入水印。

(6)对修改后的系数进行 IDCT 变换,再将分块重构即得到嵌水印图像。

3.2 水印的提取

提取水印时首先选出嵌入了水印的系数,然后可以根据判断第一个系数是最大或最小来决定嵌入的水印比特。但是图像可能因受到某种攻击而失真,造成第一个系数不再是最大或最小。因而本文提出的提取算法是将第一个系数和其余系数的最大值、最小值和平均值三者的均值进行比较,如果第一个系数大于其均值,则可以提取出水印比特“1”,否则提取出“0”。提取算法公式如下:

$$w'_j = \begin{cases} 1 & \text{if } c''_1 > \frac{c''_{\max} + c''_{\min} + c''_{\text{average}}}{3} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

其中 $c''_i, i=1, 2, \dots, n$ 是从图像中获取的系数, c''_{\max}, c''_{\min} 和 c''_{average} 分别是系数中除 c_1 外的最大值、最小值和平均值。 w'_j 是提取出的水印比特。最后采用归一化相似度值 NC 来衡量提取水印和原始水印之间的相似程度,并可以根据 NC 值与预设门限值(本文取 0.6)的比较来判断水印存在与否。

4 实验结果

采用经典的“Baboo”图像 (512×512) 作为测试图像,以 64×64 的二值图像作为水印,在 Matlab6.5 和 Windows2003 平台上进行仿真实验。其中 δ 取 0.2,采用文[10]中的方法来改善求取优化值 x 的速度。图 2 为原始 Baboo 图像,图 3 为水印图像,图 4 为嵌入水印后的图像,图 5 为在没有任何攻击下提取出的水印图像。其加权峰值信噪比 WPSNR 为 45.3675dB,由此可见本文方法使水印具有很好的不可见性。

又可以保证收敛的速度。

求解 TAP 问题的算法步骤描述如下：

(1) 初始化

设 $N_c=0$, 迭代次数初值为 0;
 $\tau(r,s)=\tau_0, \Delta\tau(r,s)=0$, 为每条主机间路径 (r,s) 设置一个信息素强度初值, 信息素强度增量初值为 0;
 $tabu_k=\phi$, 将禁忌表置空;
 将 m 只蚂蚁随机地置于 n 台主机节点上;
 将蚂蚁的初始主机加到当前各自的禁忌表中;

(2) For $i=1$ to n

For $k=1$ to m
 if 蚂蚁 k 没有完成指定的任务
 按照公式 (1) 计算 $P_k(r,s)$, 选择下一个将要访问的主机 s ;
 将蚂蚁移到 s , 将 s 加入到它的禁忌表中;
 计算 $\Delta\tau^k(r,s), \Delta\tau(r,s)$ 的值, 根据公式 (2)、(3) 对路径 (r,s) 上的信息素强度进行局部更新;

(3) For $k=1$ to m

根据禁忌表求出本次循环中的最优解和最差的解;
 if 最优解与 N 次迭代前的最优解相等
 由公式 (7) 更新 ρ 值;
 由公式 (5)、(6) 对最优路径与最差路径的信息素强度进行全局更新;
 if 不满足终止条件
 清空所有蚂蚁的禁忌表;
 对每一条路径 (r,s) , 置 $\Delta\tau(r,s)=0$;
 $N_c=N_c+1$;
 返回步骤 (2)
 else 输出最优解

3.5 算法的性能评估

为了验证算法的性能, 我们依照实际网络拓扑结构产生所需要的数据来进行仿真实验。需要的数据包括: 主机数 n , 主机间的移动的时间 $d(i,j)$, 完成任务的概率 p_i , 主机的时延 t_i 等。

实验中需要设置的参数包括 α, β , 蚂蚁的数量等如下:

$\alpha=1, \beta=3$, 我们将蚂蚁的数目取为与主机数目相同, ρ_{min} 分别取 0.1 和 0.01

我们分别对蚁群算法和本文算法进行实验, 每项实验执

行 10 次, 每次执行共运行循环 2000 次, 结果如下:

表 1 实验结果对比

	蚁群算法	本文算法 ($\rho_{min}=0.1$)	本文算法 ($\rho_{min}=0.01$)
最优解	134.1	112.7	108.9
迭代次数	1531	1206	1326

由实验结果可以看出, 相对于传统的蚁群算法, 本文的算法具有更强的全局最优解搜索能力, 而且收敛性更好。而通过调整 ρ_{min} 值的大小, 我们能够在全局最优解和收敛性之间寻求最佳的选择。

小结 蚁群算法作为一种新的生物进化算法, 具有分布计算、信息正反馈和启发式搜索等特点, 在求解一系列优化组合问题时, 在解的质量、收敛速度等方面具有较大的优势。但它也存在一些缺陷, 如需要较长的搜索时间, 当系统规模较大时, 还可能陷入局部最优解, 产生过早收敛的问题。为克服蚁群算法的这些缺陷, 我们通过修改它的全局以及局部更新规则, 并引入自适应的挥发系数来求解 TAP 问题。实验结果表明, 相对于传统蚁群算法, 本文的改进算法不仅收敛速度较快, 而且具有更强的全局最优解搜索能力, 能很好地解决 TAP 问题。

参考文献

- 1 周龙骧, 刘添添. 移动 Agent 综述[J]. 计算机应用与软件, 2003 (11): 19~23
- 2 Brewington B, Gray R, Moizumi K. Mobile agents in distributed information retrieval. In: M Klusch. Intelligence Information Agent, Berlin: Springer Verlag, 1999. 355~395
- 3 Dorigo M, Vittorio M, Alberto C. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents [J]. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1996. 29~41
- 4 Dorigo M, Gambardella L M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem [J]. In: IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997. 53~66
- 5 李士勇. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004
- 6 骆正虎. 移动 agent 系统若干关键技术问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002
- 7 王颖, 谢剑英. 一种自适应蚁群算法及其仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2002. 31~33

(上接第 149 页)

为了检测本文算法的稳健性, 我们对嵌入水印的图像进行以下几种攻击实验: JPEG 压缩、剪切、高斯滤波等。图 6(a)、6(b)、6(c)、6(d) 分别为质量因子 QF 为 90%、70%、50% 和 30% 的 JPEG 压缩后提取出的水印。图 6(e) 为进行四分之一剪切后提取出的水印。图 6(f)、6(g) 分别为中值滤波和高斯滤波攻击后提取出的水印。仿真实验结果表明本文方法嵌入的水印是不可见的, 并对一般图像处理如 JPEG 压缩、剪切和中值滤波等具有较好的稳健性。

我们将本文算法与文[3]中的水印算法通过相同实验条件下的 JPEG 压缩、剪切实验进行比较, 比较结果见表 1。从表中可以看出, 本文方法性能有较大程度的改善。

表 1 本文算法与文[3]算法在性能上的比较

算法	WPSNR	JPEG(QF=30%)	JPEG(QF=50%)	1/4 剪切
本文 NC	45.3675	0.7915	0.8647	0.8825
文[3] NC	41.6645	0.7836	0.8545	0.8718

结论 本文提出了一个新的基于 DCT 的图像自适应水印算法, 其主要特点是巧妙利用 DCT 系数之间的关系来隐藏水印, 并在水印嵌入过程中较为充分地考虑了 WPSNR 和图像的 JND, 因而嵌入的水印具有很好的不可见性和稳健性。水印的提取不需要原始图像。实验结果表明该算法对常见的

信号处理具有良好的稳健性。

参考文献

- 1 Bender W, Gruhl D, Morimoto N, et al. Techniques for data hiding [J]. IBM Systems Journal, 1996, 35(3-4): 313~336
- 2 Koch E, Zhao J. Towards robust and hidden image copyright labeling [A]. In: Proc. of 1995 IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, 1995. 452~455
- 3 Hsu C T, Wu J L. Hidden digital watermarks in image [J]. IEEE Trans. Image Processing, 1999, 8(1): 58~68
- 4 Duan F Y, King I, Chan L L W, et al. Intra-block maxim algorithm for embedding robust digital watermark into images [J]. Multimedia Information Analysis and Retrieval, 1998. 255~264
- 5 张伟, 彭军, 廖晓峰, 等. 一个自适应数字水印嵌入算法[J]. 计算机科学, 2003, 30(6): 151~154
- 6 Cox I J, Miller M L, Bloom J A. Digital Watermarking [M]. New York: Morgan Kaufmann Publishers, 2002
- 7 Hermans 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
- 8 Ahumada A J, Peterson H A. Luminance-Model-Based DCT Quantization for Color Image Compression [A]. In: Bernice E, ed. Proc. of SPIE on Human Vision, Visual Processing, and Digital Display III [C]. San Jose: SPIE Press, 1992. 365~374
- 9 Watson A B. DCT Quantization Matrices Visually Optimized for Individual Images [A]. In: Allebach J P, ed. Proc. of SPIE on Human Vision, Visual Processing, and Digital Display IV [C]. San Jose: SPIE Press, 1993. 202~216
- 10 Chen Y H, Su J M, Fu H C, et al. Adaptive Watermarking Using Relationships between Wavelet Coefficients [A]. In: Proc. of 2005 IEEE Int'l Symposium on Circuits and Systems [C]. Kobe: IEEE Press, 2005. 4979~4982