

基于小波系数块能量和 HVS 的 FCM 水印算法

张 民¹, 郭玉彬², 张德伟¹

(1 聊城大学 计算机学院, 山东 聊城 252059; 2 华南农业大学 信息学院, 广东 广州 510640)

摘 要: 为增强水印的鲁棒性, 提出一种基于小波变换的改进数字水印算法. 该算法将原始图像小波变换后的细节子图分割成互不重叠的系数块. 通过对各系数块能量特征分析, 并结合人类视觉系统特征(HVS)对特征值进行模糊 c-均值聚类(FCM)分析取得更适合嵌入水印的块, 在适合嵌入块上应用隶属度值进行自适应的水印嵌入. 实验表明该算法有更好的鲁棒性和不可见性.

关键词: 数字水印; 人类视觉系统特征; 块能量; 小波变换; 模糊 c-均值聚类

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)05-0139-04

A FCM Watermarking Algorithm Based on Energy of Wavelet Coefficients Block and HVS

ZHANG Min¹, GUO Yu-bin², ZHANG De-wei¹

(1 School of Computer Science, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

2 School of Information Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To enhance the robustness of watermark, an improved watermarking algorithm based on wavelet transform was proposed. The level detail sub-image decomposed the original image using three levels discrete wavelet transform (DWT) were divided into non-overlap blocks. The blocks which were more adaptable to embed watermark, were selected by FCM on the block energy and HVS properties, and the cluster were used as the strength of watermarking on the adaptable blocks. The experimental results show that the embedded watermark is invisible, and also very robust.

Key words: digital watermarking; HVS; block energy; wavelet transform; FCM

1 引言

由于数字媒体易于复制和篡改, 对数字媒体的保护日益引起人们的关注. 鲁棒性水印作为数字产品版权保护新技术, 需要满足两个最基本的要求: 不可见性和鲁棒性. 数字水印算法根据水印嵌入域不同, 可分为空间域水印和变换域水印. 变换域水印又可分为离散余弦域水印(DCT)、离散傅立叶变换域水印(DFT)、离散小波变换域水印(DWT)等^[1].

文献[2]在对标准 Lena 图像三级小波分解后的各个子图系数幅值进行统计分析的基础上, 指出人类视觉系统感觉上最重要的分量是第三级细节子图

中的大系数, 进而将水印嵌入到这三个子图的分块最大系数上, 较好地实现了水印不可见性和鲁棒性的统一. 文献[3]对文献[2]提出的方法又作了改进, 通过对块能量统计分析的方法去除了文献[3]中的对角线子图和另外两个子图中的部分块. 但载体图像可嵌入块的逐步缩小, 又减小了水印嵌入范围, 从而降低了水印的鲁棒性. 文中针对原始图像的小波系数分块能量特征及对 HVS 视觉特征通过模糊 c-均值(FCM)聚类方法, 找到更适合嵌入水印的系数块完成水印的嵌入, 提出一种基于小波系数块能量分析和 HVS 结合的 FCM 水印算法, 进一步提高水印算法的鲁棒性.

收稿日期: 2009-03-24; 修回日期: 2009-06-25

基金项目: 山东省科技攻关计划项目(GG3WZ04015)

2 基于块能量特征及 HVS 特征的 FCM 聚类水印算法

2.1 原始图像的小波多分辨率分解

由二维 Mallat 算法, 假设要分解的图像为 $f(x, y)$, 即 $C_0^0 = f(x, y)$, 则图像的分解过程为:

$$\begin{aligned} C_{j+1}^0(m_1, m_2) &= \sum \sum h(k_1 - 2m_1)h(k_2 - 2m_2)C_j^0(k_1, k_2) \\ C_{j+1}^1(m_1, m_2) &= \sum \sum h(k_1 - 2m_1)g(k_2 - 2m_2)C_j^0(k_1, k_2) \\ C_{j+1}^2(m_1, m_2) &= \sum \sum g(k_1 - 2m_1)h(k_2 - 2m_2)C_j^0(k_1, k_2) \\ C_{j+1}^3(m_1, m_2) &= \sum \sum g(k_1 - 2m_1)g(k_2 - 2m_2)C_j^0(k_1, k_2) \end{aligned} \quad (1)$$

对于正交小波, $g(n) = (-1)^nh(1-n)$; 对于双正交小波, $h(n)$ 应满足双正交条件. 图像经过小波变换后, 分解成尺寸为原低频逼近子图 $1/4$ 的四个子图: 其中 $D_{j+1}^1, D_{j+1}^2, D_{j+1}^3$ 分别为第 $j+1$ 级水平方向、垂直方向、对角线方向的中高频细节子图, C_{j+1}^0 为第 $j+1$ 级低频逼近子图, 这样图像分解为不同分辨率级和不同方向上的多个子图. 三级小波分解示意图如图 1 所示.

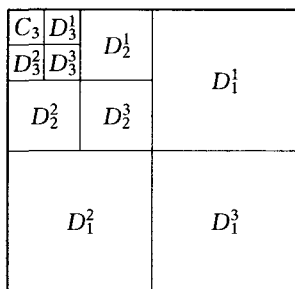


图 1 三级小波分解示意图

2.2 块能量及块小波系数的分析

Cox^[1] 等认为水印应放在对视觉感觉上最重要的分量上, 其理由是感觉重要的分量携带了更多的信号能量. 根据文献[2], 从表 1 可以看出 D_3^1, D_3^2, D_3^3 子图中的大系数相对较多, 视觉系统感觉上重要的分量是 D_3^1, D_3^2, D_3^3 子图中的大系数, 把水印信息嵌入这些能代表图像的复杂纹理和边缘信息的块中, 也符合纹理掩蔽理论. 文献[3] 改进了文献[2] 的方法, 对 D_3^1, D_3^2, D_3^3 的系数根据块能量分析, 认为 D_3^3 与其他两块的能量相比明显偏小, 这些块的系数很可能在图像压缩中被认为是视觉不重要系数而去除掉, 所以进行水印嵌入时, 这一块也被去除在

外^[4]. 改进的水印算法只考虑了块系数和块能量对水印的影响, 根据表 1 各细节子图中都具有更适合嵌入水印的块, 采用硬划分的方式势必会造成嵌入范围的缩小, 细节子块范围的缩小也会对添加的水印信息容量产生影响, 进而影响数字水印的鲁棒性. 文中在文献[2]和文献[3]提出的算法基础上提出利用 FCM 模糊聚类理论, 对所有细节子块根据其能量特征和 HVS 的视觉系统特征进行 FCM 聚类分析, 选取聚类中心偏大的类作为细节子块中更适合嵌入水印信息的块, 根据文献[3]在可嵌入块中查找最小小波系数位置, 利用 FCM 中的隶属度值自适应的决定嵌入水印的强度. 与文献[2]和文献[3]相比, FCM 方式对数据的比例变化具有更强的鲁棒性^[5], 进而提高了水印的鲁棒性, 同时水印的不可见性也没有明显的降低^[6].

表 1 Lena 图像各个细节子图中绝对值小于 10 的系数所占的比例

细节子图	D_3^1	D_3^2	D_3^3	D_2^1	D_2^2
比例	0.3154	0.5380	0.5664	0.6459	0.7944
细节子图	D_2^3	D_1^1	D_1^2	D_1^3	
比例	0.8081	0.8745	0.9279	0.9401	

2.3 HVS 的视觉系统特征

在 HVS 中, 许多特性可以用于数字水印方案中^[7]. HVS 可以从 4 个方面来描述: 设像素 (i, j) 周围 3×3 邻域为 $N(i, j)$, 可以用下面的公式描述这 4 个特征:

- (1) 亮度: $B_{ij} = \frac{1}{9} \sum_{N_{ij}} g_{kt}$;
- (2) 纹理: $T_{ij} = \sum_{N_{ij}} |g_{kt} - B_{ij}|$;
- (3) 对比度: $C_{ij} = \max_{N_{ij}}(g_{kt}) - \min_{N_{ij}}(g_{kt})$;
- (4) 熵: $EN = - \sum_{N_{ij}} p_{kt} \log p_{kt}$.

其中 g_{kt} 为 (k, t) 处的灰度值, $p_{kt} = g_{kt} / \sum_{N_{ij}} g_{kt}$. 上述 4 个特征越大, 可嵌入的信号就越多.

2.4 基于块能量特征和 HVS 特征的 FCM 聚类水印嵌入方法

(1) 设载体图像大小为 $2^M \times 2^M$, 水印序列 W 由具有更高鲁棒性的 Gaussian 分布 $N(0, 1)$ 长度为 L 的随机序列构成, $L = \frac{2^{M-3} \times 2^{M-3}}{4 \times 4} = 2^{M-5} \times 2^{M-5}$, $W = \{w_i | i = 1, 2, \dots, L\}$.

(2) 对要嵌入水印的载体图像 $f(x, y)$ 进行三

级小波分解,得到不同的分辨率的细节子图 $D_i^j(x, y)$ ($i = 1, 2, 3$) 和一个逼近子图 $C_3^0(x, y)$, 其中 $j = 1, 2, 3$ 代表水平方向、垂直方向和对角线方向的细节子图. 把所有的细节子图分割成互不重叠的 3×3 的系数块, 记为 B_i^k , 其中 $(i, j = 1, 2, 3), (k = 0, 1, 2, \dots, N)$.

(3) 采用如下公式计算每个系数块的分块能量值:

$$E_{\text{block}} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{\text{block}}^2(i, j) \quad (2)$$

其中 m, n 是块的大小(文中 $m = n = 3$); C_{block} 是各个块中的小波系数值.

(4) 在细节子图上采用文献[7]所提出的 HVS 的 4 个特征和文中的分块能量特征共 5 个特征值进行模糊聚类, 在所有细节子图的系数块中选择适合嵌入水印的特征块. 可将 (i, j) 处小波系数看成 (i, j) 处的灰度值 g_{ij} . 因此每个块对应了一个 5 维的特征值向量 $X(B, T, C, EN, E)$. 对该特征向量进行 FCM 聚类, 选取聚类中心偏大的作为适合嵌入的类, 可以将特征块分为两类: 一类适合嵌入水印信息, 一类不适合嵌入. 然后利用文献[5]的方法, 在适合嵌入的块中查找最小小波系数值, 记下其位置 (x, y) , 作为选中块的嵌入位置. 把 FCM 得到的隶属度值作为水印嵌入强度, 实现自适应水印嵌入.

(5) 最后采用公式 $f^* = f(1 + \alpha u w)$ 来实现水印嵌入. 其中 f^* 为嵌入水印后的小波系数, f 为小波系数, α 为拉伸因子, u 为对应位置的隶属度, w 为水印值.

(6) 将嵌入水印的细节子图与逼近子图进行三级小波重建, 得到含水印的图像 $f^*(x, y)$.

2.5 水印的检测

水印检测采用如下假设检验:

$$H_0: E = F^* - F = N \text{ (无水印)}$$

$$H_1: E = F^* - F = W^* + N \text{ (有水印)}$$

其中, F 和 F^* 分别代表原始图像和待检测图像, W^* 为待检测的水印序列, N 为噪声, 待检测序列检验步骤可参见文献[3].

检测到的水印与原始水印间的相关系数定义为:

$$NC(W, W^*) = \frac{\sum_{i=1}^L w(i)w^*(i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^L w^2(i)} \sqrt{\sum_{i=1}^L w^{*2}(i)}} \quad (3)$$

水印存在与否的判定标准定义为: 若 $NC > T$, 则判定含有水印, 否则没有. 阈值 T 的选取要考虑虚警概率和漏警概率. 其值增大, 虚警概率减小而漏警概率增大; 反之则虚警概率增大而漏警概率减小. 由于采用归一化相似度对算法实现的水印性能进行客观评估, 因此水印长度不同不会影响最终的实验比较.

3 仿真实验结果

为验证算法有效性, 对水印的不可见性和鲁棒性进行了仿真. 文中采用选用 515×512 的 Lena 灰度图像作为仿真实验的原始图像.

3.1 不可见性测试实验

图 2 为嵌入水印前后的图像, 不含水印的图像和嵌入水印的解码图像在视觉上几乎分辨不出差别.

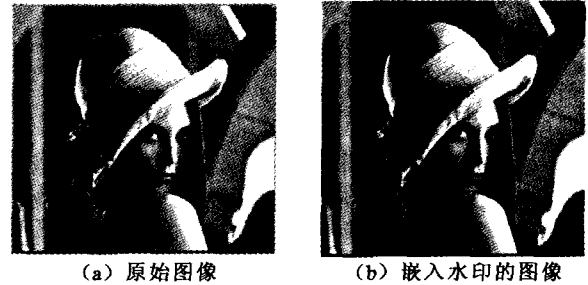


图 2 水印嵌入前后图像的比较效果图

除直观地用图像来衡量不可见性外, 还可采用峰值信噪比 (PSNR) 来作为重构图像质量的客观评价指标^[7], 本算法嵌入后的 $PSNR = 54.1614\text{dB}$. 当 $PSNR$ 超过 30dB 时, 人的视觉很难分辨出原始图像和重构图像的差异, 因此本算法完全满足水印信息的不可见性. 同时利用本算法与文献[3]比较, 峰值信噪比 (PSNR) 明显的高于它的值 52.224dB , 并且视觉质量有明显的改善.

3.2 鲁棒性测试实验

为检测算法的鲁棒性, 实验采用多种常见的攻击方式来进行测试. 主要包括噪声、JPEG 图像压缩、几何变换等. 表 2 数据取自文献[3]以便于与其进行横向比较, 反映了算法在主要几种攻击下与文献[2]和文献[3]的性能优劣.

由图 3 可以看出, 对于 JPEG 压缩, 文中算法与文献[2]和文献[3]相比, 有明显的优越性. 表 2 显示了文中算法在 JPEG 压缩 10% 时, 提取水印比文献[2]和[3]的 NC 和 $PSNR$ 值明显提高, 说明算法抵抗压缩能力更强. 文中算法所实现的水印图像在遭

受同样的攻击后,图像主观质量明显退化,退化质量与文献[2]和文献[3]类似,但文中算法有更高的 NC 和 PSNR 值.尤其对常见的几何操作,文中算法效果更加优于文献[2]和文献[3].

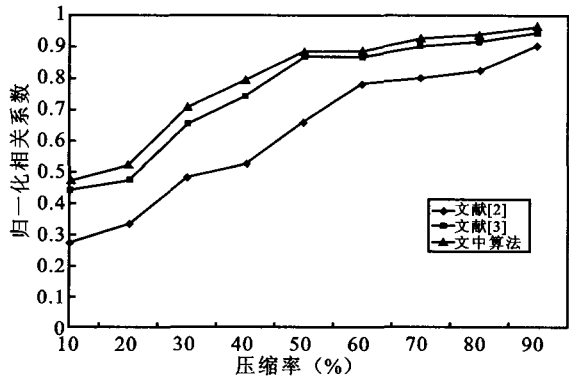


图3 JPEG 压缩性能比较

表2 对水印各种攻击的性能比较

攻击类型	文献[2]算法		文献[3]算法		文中算法	
	PSNR	NC	PSNR	NC	PSNR	NC
JPEG 压缩 10%	30.030	0.2735	30.036	0.4459	31.052	0.4721
中值滤波 3×3	35.002	0.6668	35.031	0.8185	36.041	0.8253
中值滤波 5×5	30.871	0.2231	30.875	0.3858	31.860	0.4523
维纳滤波 3×3	37.127	0.7435	37.182	0.8823	32.282	0.8965
维纳滤波 5×5	34.221	0.3703	34.245	0.5378	35.678	0.6128
高斯加噪(0.01)	19.686	0.2442	19.689	0.2903	22.689	0.4329
高斯加噪(0.02)	22.121	0.2801	22.063	0.3199	25.063	0.4498
比例缩放(25%)	32.372	0.5098	32.387	0.7179	35.387	0.7229
旋转 10°	17.065	0.1938	17.063	0.2375	32.128	0.4928

4 结束语

文中基于对 HVS 特征和块能量特征 FCM 模

糊聚类基础上,提出了一种改进的小波域水印方法.算法充分考虑了各细节子图的分块能量特征,采用模糊聚类 FCM 的方式进行可嵌入块的选取,改变了采用硬性划分方式区分嵌入块和非嵌入块的方法.FCM 划分方式不仅保证了视觉质量,而且满足了水印的不可见性和鲁棒性的统一.能够有效地经受噪声,压缩和剪切等的攻击.

参考文献:

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

[2] 练秋生, 卢耀斌, 王成儒, 等. 基于小波分析的自适应数字水印算法[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(6): 617-619.

[3] 宋兴利, 张家树. 基于小波系数块能量分析的自适应数字水印算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(4): 830-832.

[4] 刘铁柱, 张建伟, 刘红岩. 数字水印的鲁棒性和易脆性相结合的研究[J]. 微电子学与计算机, 2009, 26(1): 155-158.

[5] 张敏, 于剑. 基于划分的模糊聚类算法[J]. 软件学报, 2004, 15(6): 858-868.

[6] Podilbuk C I, Delp E J. Digital watermarking algorithms and application [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2001, 18(4): 33-46.

[7] 赵华, 王志坚, 袁盾韬. 基于小波系数关系的半脆弱水印方案[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(7): 53-55.

作者简介:

张 民 女, (1972-), 硕士, 讲师. 研究方向为信息安全、图像处理.

郭玉彬 女, (1973-), 博士. 研究方向为网络安全、计算机应用技术.

(上接第 138 页)

[6] Josang A, Pope S. Semantic constraints for trust transitivity [C]// Proceedings of the 2nd Asia-Pacific Conference on Conceptual Modelling (APCCM2005). Newcastle, NSW, Australia, Australian Computer Society, 2005: 59-68.

作者简介:

马国富 男, (1974-), 硕士, 讲师. 研究方向为信息安全.

王子贤 男, (1980-), 硕士, 讲师. 研究方向为网络安全.

董彦军 男, (1974-), 硕士, 讲师. 研究方向为网络安全.