

基于 HVS 特性的数字图像水印研究

陶 锋

(广州大学 华软软件学院, 广东 广州 510990)

摘 要: 提出了一种基于小波变换低频系数的数字水印嵌入和检测算法。其中使用了有意义的二值图像水印来替代随机序列, 先将水印通过 Arnold 置乱加密后再全部嵌入到低频子带系数中。该算法利用了人眼视觉系统(HVS)特性对水印嵌入强度做自适应调节以增强水印的鲁棒性和保证水印的不可感知性。实验结果表明, 使用该算法嵌入的数字水印具有很好的隐蔽性, 并且嵌入水印的图像对有损压缩、滤波、加入随机噪声和旋转等操作具有较强的抵御攻击能力。

关键词: 水印置乱; 离散小波变换; 人眼视觉系统; 鲁棒性; 信息安全

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Research of digital image watermarking based on HVS

TAO Feng

(South China Institute of Software Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510990, China)

Abstract: A new watermarking algorithm is proposed in the paper and watermarks were embedded and extracted in the low-frequency sub-band after multiresolution decomposition. Instead of using a random sequence, a visually meaningful gray scale logo is used as watermark which is scrambled by Arnold transform. The method uses the characteristic of human visual system (HVS) to enhance the robustness of the watermark and avoids the perceptibility of human eyes. Experimental results show that the embedded digital watermarking is invisible and robust enough against common image processing such as JPEG compression, filter, adding the stochastic noises and rotation.

Key words: watermarking scrambling; Discrete Wavelet Transform (DWT); Human Visual System (HVS); robustness; information security

随着多媒体技术和网络技术的飞速发展和广泛应用, 数字化媒体的存储、复制与传播变得非常方便。对于数字产品的版权保护成了一个很重要的问题。作为数字产品版权保护的有效手段, 数字水印技术近年来得到了迅速发展, 它把特定的水印信息嵌入到数字产品中, 以证实数字产品的版权归属或保证数据的真实可靠。对于数字水印技术, 一般要求具有以下特性^[1]:

(1) 不可感知性: 原始数据在加入数字水印后应该尽量保持原有的感知效果, 水印在通常的感知条件下应不能被感觉到, 这是数字水印技术最基本的特点。

(2) 鲁棒性: 指添加的水印信息能抵抗应用过程中的各种有意或无意破坏的能力, 在某种程度上, 鲁棒性可以反映水印技术的抗干扰能力。

(3) 安全性: 数字水印技术应该使用 1 个或多个密

钥来确保自身的安全, 未经授权, 用户不能检测出隐藏在原始数据中的水印信息。

目前, 水印的嵌入算法有很多, 从实现角度可分为二类: 空域法和变换域法。与空域法相比, 变换域法具有诸多优点, 因此, 变换域的水印算法是本研究的主流, 它主要包括离散傅里叶变换(DFT)、离散余弦变换(DCT)、小波变换(DWT)方法等^[2]。由于离散小波变换(DWT)与 JPEG2000 压缩标准兼容, 具有良好的能量压缩能力, 而且在小波变换域内的图像处理可以充分利用人眼视觉系统(HVS)特性, 从计算量来说又比通常使用离散余弦变换(DCT)要小, 从而利用小波变换来嵌入水印具有很好的研究和应用价值。

基于小波变换提出的水印算法中, 最著名的一种就是 Cox's 水印嵌入算法。在这种算法中, 水印信号要

求被嵌入到源数据中对人感觉最重要的部分,然而这类算法并没考虑到人类视觉效果。一种性能好的水印算法要考虑到鲁棒性、不可见性以及算法的简便性。为了达到这种效果,其中关键的一个因素就是嵌入强度的问题。因此本文提出了一种小波域的图像自适应水印嵌入方法。先用 Arnold 变换对水印进行置乱加密,再选择在稳定性强的小波分解后的低频子带中嵌入水印,并根据低频和高频系数的特点和树结构关系,综合人类视觉系统的亮度和纹理掩蔽特性来调节水印强度,以此保证在低频系数中嵌入水印的同时水印的鲁棒性和透明性。

1 水印算法策略

1.1 图像置乱

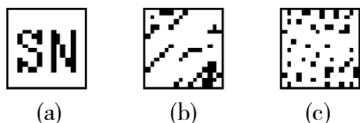
所谓“置乱”,就是利用某种算法将一幅图像各像素的次序打乱,但像素的总个数不变,直方图也不变。置乱实际上就是图像的加密,与加密保证安全性不同的是:将置乱的图像作为秘密信息再进行隐藏,可以很大限度地提高隐蔽载体的鲁棒性。人们用得较多的置乱技术是基于 Arnold 变换、幻方变换、分形 Hilbert 曲线、IFS 模型、Conway 游戏和 Gray 码变换等方法。Arnold 变换算法简单直观且具有周期性,因此本文选取 Arnold 变换对水印图像进行预处理。

Arnold 变换是 ARNOLD V L 在研究环面上的自同态时提出的,后来被应用到数字图像上。从采样原理的角度来看,数字图像可看作是在二维连续曲面上,按照某一间隔和某种策略进行采样所得到的一个二维离散点的阵列,即一个图像矩阵。对于一幅大小 $N \times N$ 的图像,用公式(1)进行 Arnold 变换:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ k & k+1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (1)$$

$$(x, y \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\})$$

式中, (x, y) 是原图像的像素点, (x', y') 是变换后新图像的像素点, N 是图像阶数,即图像的大小,一般考虑正方形图像, k 是属于 $[1, N]$ 的一个整数。通过公式(1),逐一对待图像的像素点做变换,当遍布了所有像素点,便产生了置乱后的图像。另外,对该图像还可以做反复迭代,以产生不同的效果,其迭代次数及 k 可作为隐藏系统的密钥,从而提高了系统的安全性和保密性。水印置乱后的结果如图 1 所示。



注: (a)原始水印; (b)一次变换; (c)多次变换

图 1 水印置换的结果

1.2 HVS 特性

长期以来,通过对人眼某些视觉现象的观察,并结合视觉生理、心理学等方面研究成果,发现了各种视觉掩蔽特性,如果能够在水印嵌入过程中利用人眼视觉掩蔽特性,则可以在满足透明性前提下,合理分配数字水印信号能量,以尽可能地提高局部嵌入水印信息的强度。研究表明人眼具有如下视觉特性^[3]:

- (1) 人眼对高频和具有 45° 方向的子带内的噪声不敏感。
- (2) 在图像高亮度区域,人眼对噪声相对不敏感。
- (3) 对图像纹理和边缘区域的噪声不敏感。

由于小波分解的多分辨率分解具有良好的空间方向性,与人眼的视觉特性十分吻合,因而对每一个小系数能建立人眼较精确的临界可见误差门限。假设对图像作 L 层小波分解,令每个小波系数为 $I_l^\theta(i, j)$, 其中 $l = 0, 1, 2, \dots$, 为分解层数, θ 为分量方向, (i, j) 表示小波系数在子带中的位置,则通过公式(2)可以计算出误差门限 $q_l^\theta(i, j)$, 并通过该误差门限计算出嵌入水印的权值因子 ω 。具体算法可参照 Lewis 和 Knowles 提出的模型公式:

$$q_l^\theta(i, j) = \Theta(l, \theta) \Lambda(l, i, j) \Xi(l, i, j)^{0.2} \quad (2)$$

$$\Theta(l, \theta) = \begin{cases} \sqrt{2} & \text{if } \theta = 1 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \begin{cases} 1.00 & \text{if } l = 0 \\ 0.32 & \text{if } l = 1 \\ 0.16 & \text{if } l = 2 \\ 0.10 & \text{if } l = 3 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Lambda(l, i, j) = 1 + L(l, i, j) \quad (4)$$

$$K(l, i, j) = \frac{1}{256} I_l^\theta \left(1 + \frac{i}{2^{3-l}}, 1 + \frac{j}{2^{3-l}} \right) \quad (5)$$

$$L(l, i, j) = \begin{cases} 1 - K(l, i, j) & \text{if } K(l, i, j) < 0.5 \\ K(l, i, j) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Xi(l, i, j) = \sum_{k=0}^{3-l} \frac{1}{16^k} \sum_{\theta=0}^2 \sum_{x=0}^1 \sum_{y=0}^1 \left[I_{k+l}^\theta \left(y + \frac{i}{2^k}, x + \frac{j}{2^k} \right) \right]^2 \times \text{Var} \left\{ I_3^3 \left(1 + y + \frac{i}{2^{3-l}}, 1 + x + \frac{j}{2^{3-l}} \right) \right\}_{x=0,1}^{y=0,1} \quad (7)$$

式中, $\Theta(l, \theta)$ 表示不同子带及方向对噪声变换的敏感度; $\Lambda(l, i, j)$ 表示是低通部分的局部亮度估计,由公式(4)、(5)、(6)实现; $\Xi(l, i, j)$ 给出了像素点 2×2 邻域内的纹理敏感性的测度。当嵌入深度小于误差门限的一半时,水印是不可感知的,则权值函数 ω 用公式(8)给出了在 DWT 系数量化后可嵌入的最大的深度:

$$\omega^\theta(i, j) = \frac{q_0^\theta(i, j)}{2} \quad (8)$$

1.3 水印嵌入算法

假设待嵌水印的原始图像大小为 $I_i \times I_j$ ，水印图像大小为 $x_i \times x_j$ ，图像做三层小波分解，如图 2 所示，令分解的小波子带为 I_l^θ ，其中 $\theta \in \{LL, LH, HL, HH\}$ ， $l \in \{0, 1, 2\}$ ，嵌入的二值灰度水印算法如下：

(1) 对原始图像进行 L 级小波分解，得到不同分辨率级下的细节子图 HL_i 、 LH_i 、 HH_i ($i=1, 2, 3$) 和 1 个逼近子图 LL_3 。

(2) 使用 Arnold 变换对水印图像进行置乱，将置乱后图像水印 $\{0, 1\}$ 值转换为 $\{-1, 1\}$ 系列，以增强嵌入水印后图像的统计不可觉察性，其转换方法如下：

$$m_i = \begin{cases} -1 & \text{if 像素值} = 0 \\ 1 & \text{if 像素值} \neq 0 \end{cases} \quad (9)$$

对转换后的 m_i ，通过二值伪随机序列 p_i ， $p_i \in \{-1, 1\}$ 进行调制，得到水印序列 $x_i = m_i \cdot p_i$ ($0 \leq i < X_i \times X_j$)。

(3) 在分解后的低频子带 LL_1 系数中嵌入水印掩蔽信息。选择系数的方法首先将低频子带 LL_1 系数分块，然后在每小块中按系数最大绝对值选取。其嵌入公式为：

$$I_l^{\theta'}(i, j) = I_l^\theta(i, j) + \alpha \omega^\theta(i, j) x_i \quad (10)$$

式中， $I_l^\theta(i, j)$ 是选定的小波变换系数， x_i 是灰度水印序列， $\omega^\theta(i, j)$ 是通过 HVS 掩蔽特性计算出的权值因子函数， α 是拉伸因子，用以控制水印添加强度。 α 值越大，鲁棒性就越好，不可感知性就差；反之，鲁棒性差，不可感知性好。

(4) 重复上述步骤，即得到嵌入水印后的系数。通过对嵌入水印后的系数进行小波反变换，即可获得加水印后的图像。

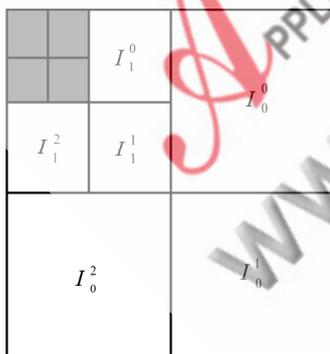


图 2 三层小波分解

1.4 水印提取及评估

本文使用的是有意义的水印图像，提取出的水印很容易辨认出来，不需要进行检测。这也是本研究使用有意义水印图像的一个优点之一。

(1) 对原始图像和水印图像进行 L 层小波逆变换。

(2) 按照嵌入的方法选择小波低频系数，并根据公式(11)来重构水印图像序列。

$$x_i = (I_l^{\theta'}(i, j) - I_l^\theta(i, j)) / \alpha \omega^\theta(i, j) \quad (11)$$

(3) 得出水印图像序列 x_i 后，通过解调，再进行 Arnold 反变换，即得到最终的水印图像。

在数字水印的性能评价中，水印的不可感知性是十分重要的一个评价方面。对于嵌入水印后的图像质量一般分为主观评价与客观评价两种。在衡量水印的不可感知性上，一般要求使用客观的评价方法，因为主观评价通常会受到评价者的情绪、知识背景等因素而有失公允。对于客观评价，通常采用均方差 MSE (Mean Square Error)、峰值信噪比 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) 等。本文采用 PSNR 来进行客观评价：

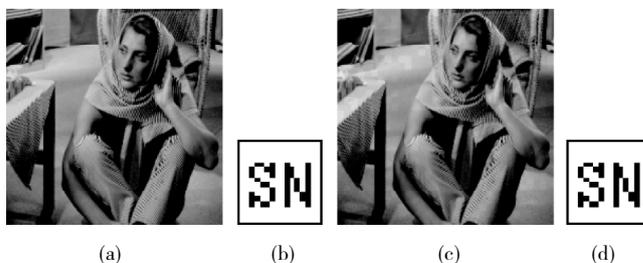
$$PSNR = 10 \lg \left(\frac{IJ \max_{i,j} I_{i,j}^2}{\sum_{i,j} (I_{i,j} - I'_{i,j})^2} \right) \quad (12)$$

水印图像遭受攻击后，为了评估提取出来的水印与原始水印的差异，本文采用相关性指标来评价有意义灰度水印图像被破坏的程度：

$$NC = \sum_{i,j} x_{i,j} x'_{i,j} / \sum_{i,j} x_{i,j}^2 \quad (13)$$

2 实验结果

为了验证本文所给小波域数字水印算法的高效性，下面将给出试验结果。试验中原始图像选用标准灰度图像 Barb ($256 \times 256 \times 8$)，水印图像为自制的 16×16 二值图像，分别如图 3(a) 和 (b) 所示，小波变换采用滤波器长度分别为 9 和 7 的 Daubechies 小波基。原始图像通过 3 层小波分解后，低频子带 LL_3 有 64×64 个系数，选取的二值水印图像有 1024 个灰度值，因此可将 LL_3 分解为 1024 个 2×2 的块，将 x_n 嵌入到第 n 个块的某个系数中，每一块系数的选取按照系数绝对值最大的规则进行嵌入，经过试验测试，选取嵌入强度系数 $a = 5$ 。图 3(c) 和 (d) 分别显示嵌入水印后的 Barb 图像 ($PSNR = 38.8\text{dB}$) 和未受到任何攻击而提取出的水印图像 ($NC = 1$)。图 4 显示了原始图像与水印图像扩大 8 倍的绝对差，从该图可以发现水印信息相对集中在 HVS 不敏感的边缘和纹理区域。对各种水印 Barb 图像作攻击测试，结果如下：



注：(a)原始图像；(b)原始水印；(c)嵌入水印的图像 ($PSNR=38.8$)；(d)提取出的水印 ($NC=1$)

图 3 小波域数字水印算法试验结果



图4 原始图像与嵌入水印后图像的8倍绝对差

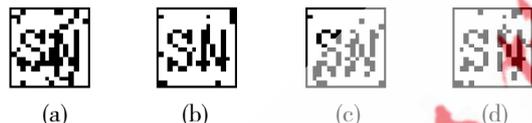
为了检验提出算法的鲁棒性,本文对水印图像图3(c)采取了均值和维纳滤波,加噪攻击, JPEG 压缩,明亮度处理,缩放以及旋转攻击,并与一些典型的水印算法进行了比较。

(1) 中值和维纳滤波

对图3(c)使用 3×3 方差的中值和维纳滤波,提取出的水印图像分别如图5(a)、5(b)所示。

(2) 加噪攻击

对图3(c)分别增加参数为0.004的高斯和参数为0.02椒盐噪声,提取出的水印如图5(c)、5(d)所示。



注: (a)中值滤波($NC=0.838\ 9$); (b)维纳滤波($NC=0.928\ 9$); (c)高斯噪音($NC=0.924\ 2$); (d)椒盐噪音($NC=0.919\ 4$)

图5 提取出的水印图像

(3) JPEG 压缩

对图3(c)使用了不同的品质因子(QF)进行 JPEG 压缩攻击测试,图6分别显示了 $QF=90、80、50、30、20$ 攻击后提取出的水印。试验后的 $PSNR$ 和 NC 值如表1所示。

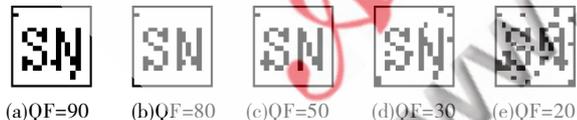


图6 抗 JPEG 压缩攻击后取出的水印

表1 抗 JPEG 压缩攻击的 $PSNR$ 和 NC 值

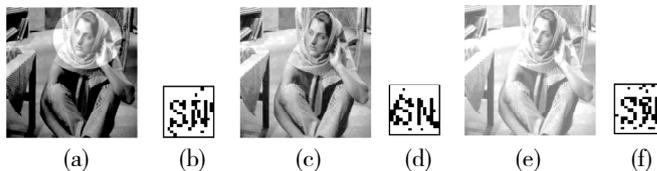
QF/%	90	80	50	30	20
$PSNR / dB$	35.28	32.41	27.97	25.95	24.65
NC	0.981	0.991	0.986	0.948	0.891

(4) 光亮度处理

对图3(c)用 photoshop 工具分别进行了3种不同程度的光亮度修改,显示结果如图7所示。

(5) 缩放攻击

图3(c)按85%的比例进行缩放,如图8(a)所示,提取后的水印为图8(b)。

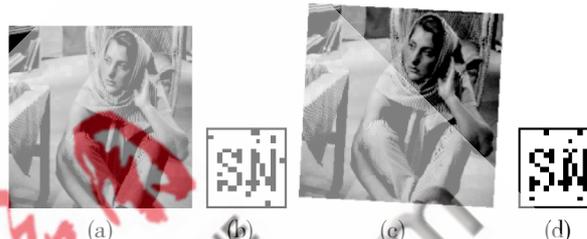


注: (b)、(d)、(f)分别是(a)、(c)、(e)中提取出的水印

图7 光亮度处理结果

(6) 旋转攻击

对图3(c)按顺时针旋转,旋转后的水印图像及提取后的水印分别如图8(c)、8(d)所示。



注: (a)、(c)分别是缩放和旋转的水印图像; (b)、(d)是提取出的水印

图8 缩放攻击结果

(7) 算法鲁棒性对比

图像水印的攻击测试方法有很多种,但是上述攻击测试的结果已经可以证明本文提出的算法具有较好的鲁棒性。对于数字图像的测试攻击, JPEG 压缩是比较普遍的一种攻击方法,为了比较提出算法的性能,分别对 Barb、Peppers 和 Baboon 标准灰度图像进行 JPEG 压缩攻击。表2显示了提出的算法在相同的视觉条件下与 Cox's(1997)^[4]和 Zeng's(1998)^[5]的算法比较。在不同的压缩品质下通过这3幅 $256 \times 256 \times 8$ 的标准灰度图像进行攻击测试,试验结果可以看出,本文算法的鲁棒性比其他两种算法性能要好。

表2 抗 JPEG 压缩攻击提取水印的 NC 值

图 像	QF	Cox's 算法 ^[4]	Zeng's算法 ^[5]	本文算法
Barb	60	0.932 3	0.910 2	0.985 8
	40	0.911 1	0.831 2	0.938 4
	10	0.678 6	0.422 4	0.748 8
Peppers	60	0.944 7	0.835 6	0.975 2
	40	0.883 2	0.737 9	0.930 5
	10	0.725 4	0.572 1	0.736 2
Baboon	60	0.965 0	0.972 2	0.976 3
	40	0.921 0	0.911 9	0.981 0
	10	0.685 0	0.652 8	0.758 3

本文基于人眼的 HVS 特性,通过计算权值因子的方法确定鲁棒系数;嵌入水印时,首先用 Arnold 进行水印置乱,再通过将低频小波系数分块,选取系数绝对值最

大的方法来代替单个小波系数进行估计和量化，实现嵌入强度与区域特性的自适应，以致边缘和纹理越强的区域嵌入越大的水印信息，边缘和纹理越弱的区域嵌入越小的水印信息，从而使得该算法具有较强的鲁棒性和不可见性。实验结果表明，此方法安全可靠、简单易实现、能抗各种图像处理攻击，是一种值得推广的图像鉴定方法。

参考文献

[1] LI C T. Reversible watermarking scheme with image-independent embedding capacity [J]. IEE Proceedings - Vision, Image, and Signal Processing, 2005,152(6): 779-786.

[2] COX I J, KILIAN J, LEIGHTON T, et al. Secure spread spectrum watermarking for multimedia [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(12): 1673-1680.

[3] PODILCHUK C, I, and ZENG W. Image adaptive watermarking using visual models [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998,16(4): 525-539.

[4] WANG X Y, YANG Y. A daptive 2D color image watermarking based DCT [J]. Journal of Computer-A ided Design & Computer Graphics, 2004, 16(2): 243-247.

[5] 王向阳, 杨红颖. DCT域自适应彩色图像二维数字水印算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(2): 243-247.

(收稿日期: 2008-12-10)

(上接第56页)



图7 监控客户端模块结构图

Internet 网络上进行视频实时传送，需要进行 QoS 服务质量控制，否则传输质量满足不了要求，效果也很差。本系统由于采用 RTP/RTCP 协议进行传输质量控制，在 Internet 网络上实现的效果也非常好，在家里、网吧等也可以实时看到机房的情况，满足了机房实时视频监视的需要^[11]。

针对机房的安全以及机房使用的管理情况设计了机房实时监视系统。该系统通过在局域网和 Internet 网络上的多次实验，表明在局域网环境下，网络通信较为简单，传输质量较好，在 Internet 网络环境下，跳帧现象明显，通过有效的传输质量控制，传输帧率一般保持在每秒 15~30 帧，图像效果很好，当视频背景快速移动时，运算复杂度增大，传输帧率会降低，须即时调整，确保传输质量的稳定。

参考文献

[1] SEHULZRINE H. RTP Profile for Audio and Video Conferences with Minimal Control. RFC1890, IETF, 1996.2-10.

[2] BASTURK E, BIRMAN A. Design and Implement of A QoS Ca-

vable Switch-router. Computer Networks and ISDN Systems, 1999, 31(1/2):19-32.

[3] DAVID J, KrL-GLINSKI. K L. Inside Visual C++. Waslling ton: Microsoft Press, 1997; 206-223.

[4] Anthony Jones, Jimohlund. Windows 网络编程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[5] SEHULZRINNE.H. RTP Profile for Audio and Video Conference switch Minimal Control[S].Internet RFC1890.1996-01

[6] SEN S, CAO L, Rexford J, et al. Optimal Patching scheme for efficient multimedia Streaming .Proe.Int.Conf.011 Network and Operating System Support for Digital Audio and Video, 1999, (6): 1024-1032.

[7] 王飞. MPEG-4 标准及多媒体应用.电子技术, 2001(3):17-22.

[8] 吴国勇, 邱学刚. 网络视频: 流媒体技术与应用. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.

[9] 徐京, 鲁士文. TCP/IP 网络环境下的视频图像传输. 计算机工程与应用, 1999(12):98-100.

[10] 冻坚, 陈伟. Visual C++ 网络高级编程. 北京: 人民邮电出版社, 2002.7-95.

[11] 冯 晔, 冯忠义, 曹宁. 基于 socket 网络编程接口实现局域网上视频传输的应用研究. 微计算机信息, 1998, 14(5).

(收稿日期: 2008-12-03)