基于混沌特性和视觉模型的小波数字水印算法研究

欧珊瑚　张　珩
(中国科学院力学研究所, 北京　100080)

摘　要　为了提高水印信息的隐蔽性和安全性, 基于混沌序列的优良特性和人眼视觉系统模型, 提出了一种用于图像数字水印嵌入和检测的算法。首先利用小波变换对图像进行多级分解, 然后结合混沌序列的白噪声统计特性和人眼视觉对比度敏感性函数(CSF), 将混沌水印信号嵌入到从低分辨率到高分辨率的高频子带中对图像视觉影响较大的小波系数中, 最后通过逆小波变换产生嵌入水印的图像。由于混沌序列对初值具有敏感性, 攻击者很难从一段有限长度的序列推断出整个混沌序列的初始条件, 因此可保证水印信息的安全性。同时算法结合了人眼视觉模型, 有效地保护了图像的低频部分和强边缘部分, 从而确保了加密图像的视觉效果。实验结果表明, 嵌入水印后的图像具有很好的不可见性, 同时对常见的信号处理和噪声干扰具有较好的鲁棒性。

关键词　数字水印　混沌特性　HSV 模型　小波变换　版权保护
中图法分类号: TP309.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1006-8961(2004)03-0345-08

Research on Wavelet Digital Watermarking Algorithm Based on Chaotic Property and Visual Model

OU Shan-hu, ZHANG Heng
(*Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

Abstract　A wavelet watermarking algorithm based on the excellent property of chaotic sequence and some characteristics of the human visual model is proposed in this paper. Firstly, the multilevel wavelet decomposition of digital image is involved, and then combined with the white noise statistical characteristics of chaotic sequence and the contrast sensitive function of human visual, chaotic sequence is added to the wavelet coefficients of the high-pass bands from the low-resolution to the high-resolution which are important to the human visual. Finally, watermarked image is obtained by using reverse wavelet transform. Because the chaotic sequence is very sensitive to the initial value, the attackers cannot deduce the whole sequence from the finite sequence and the security of watermark information is ensured. At the same time, combined with the human visual model, our algorithm guarantees the visual impression and protects the low-frequency part of image efficiently. Experimental results show that the proposed scheme has good robustness and imperceptibility to common information processing operations and noise attack.

Keywords　digital watermarking, chaotic property, HVS model, wavelet transform, copyright protection

1　引　言

随着信息数字化技术的逐步成熟以及电子出版业的不断发展, 越来越多的数字化作品走进了人们的生活, Internet 的迅猛发展更为数字化作品的广泛传播创造了条件, 数字化技术的精确、廉价及大规模的复制功能和 Internet 的全球传播能力给现代版权制度带来了前所未有的震撼, 防止网上侵权行为及资源所有人的身份确认等安全问题成为困扰各国政府、法律界、艺术界和计算机科学家们的难题。面对数字化和 Internet 的挑战, 用于数字作品版权保护的数字水印(digital watermarking)技术应运而生, 它的出现, 为资源所有权的确认提供了有力的保

基金项目: 863 计划航天航空领域空间实验及其应用技术主题资助项目(2003AA 742030)
收稿日期: 2003-06-10; **改回日期**: 2003-10-10

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

障, 已成为近年来信息安全领域新的研究热点。

数字水印技术是指用信号处理的方法在多媒体数据中嵌入隐蔽的标记, 这种标记通常是不可见或不可察的, 只有通过专用的检测器或阅读器才能检测和提取。由于水印信息并不影响数字化作品的宏观内容, 因而可以永久地保存在数字化作品当中, 任何人若企图从作品中剔除水印都不得不大幅度地破坏原作品, 这样就达到了保护作者合法版权的目的。近年来, 专家学者们提出了许多不同的水印模式, 例如, Horvatic 等人提出的基于安全波谱和听觉感知模型的鲁棒语音水印算法[1]; Lutoboski 等人提出使用图像小波系数矩阵的单值分解法来生成水印[2]; Swanson 等人提出基于小波分解的多分辨率视频水印算法[3]等。虽然这些研究对数字信息版权保护都做出了重要贡献, 但是, 这些算法在嵌入数字水印时, 都是以个人信息作为种子, 然后采用一般的随机数生成方法来产生随机数, 由于这不具备随机序列对初值敏感的特性, 因此有可能会产生通过伪造原创作者个人信息来伪造水印的现象。

混沌(Chaos)现象是非线性动力系统中出现的确定性的、类似随机的过程, 且利用其对初值的敏感依赖性, 可以提供数量众多、非相关、类似随机而又确定可再生的信号, 因此, 利用混沌序列作为水印信号不仅具有易于生成、数量极多以及对初始条件敏感等优势, 而且将混沌序列的初始值作为嵌入、检测和提取信号的密钥更为简单实用[4]。

数字水印的隐藏应在满足一定的被隐藏图像质量以及水印图像提取质量的基础上进行。一直以来, 重构图像的质量主要是以峰值信噪比 $PSNR$ 和均方根误差 $RMSE$ 等数值来度量。然而人眼的视觉感观与 $RMSE$ 并不一致, $RMSE$ 并不能完全反映视觉感知的好坏。其主要原因是: 人眼视觉对不同时空分布特征的响应是不同的, 影响视觉响应的一些因素包括特征的空间频率、时间频率、特征方向、对比度、亮度等等。一般来说, 人眼对高频信息(如复杂、变化剧烈的区域)的敏感度低于对低频信息(如平滑区域)的敏感度, 所以人眼对于高频区域存在的噪声或失真也不太敏感, 而对低频较平滑区域的噪声或失真却比较敏感。这个特性可以被很好地利用来隐藏水印信息, 即如果将水印隐藏于越高频的区域, 对原始图像的影响越小, 水印越不易被人眼察觉; 但同时为了满足图像经有损压缩编码后水印不被丢失, 又希望将水印隐藏于越低频的区域越好。这样一来, 如何恰当选择被隐藏区域就成为一个难题。

本文以混沌序列作为水印信息, 对图像进行小波多级变换, 同时根据人眼视觉对图像感知的特点, 将视觉模型参数引入到数字水印的嵌入过程。实验表明, 该算法在很好地保证水印信号不可见性的前提下, 对诸如噪声干扰以及低通滤波、缩放重采样、旋转、剪切等常见的图像处理操作具有很好的鲁棒性。

2 混沌动力系统与混沌序列

混沌现象是在非线性动力系统中出现的类似随机的过程, 这种过程既非周期, 又不收敛。一维多参数非线性动力系统定义如下:

$$x_{n+1} = f(x_n, \mu_i)$$

其中, μ_i ($i = 0, 1, 2, \cdots$) 为参数。如果对每个 i 选取适当的 μ_i 值, 就可以得到混沌序列 $\{x_n\}$, 由于 $\{x_n\}$ 对初值非常敏感, 且初始条件的任意小(如 10^{-6})的改变, 都会引起完全不同的行为, 其迭代轨迹也会大相径庭, 加上迭代方程本身的特点, 因此初值就成为得到迭代序列的关键因素。

如果从一个初始值 x_0 开始, 则根据非线性动力系统的定义式, 就可以得到一个序列。由初始条件敏感性可知, 当初始条件 x_0 稍微出现一些偏差 δ_{x_0}, 则经过 n 次迭代后, 结果就会呈指数分离, 故 n 次迭代后的误差为

$$\delta_{x_n} \left| f^{(n)}(x_0 + \delta_{x_0}) - f^{(n)}(x_0) \right| = \frac{\mathrm{d}f^{(n)}(x_0)}{\mathrm{d}x} \delta_{x_0} = \mathrm{e}^{L \cdot n} \delta_{x_0}$$

其中, $L = \frac{1}{n} \ln \frac{\delta_{x_n}}{\delta_{x_0}} = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{\mathrm{d}f^{(n)}(x_n)}{\mathrm{d}x} \right|$ 称为 Lyapunov 特征指数(Lyapunov exponent), 它描述了一个映射在平均意义上导数的渐进特性, 即相邻两点之间的平均指数幅散率。

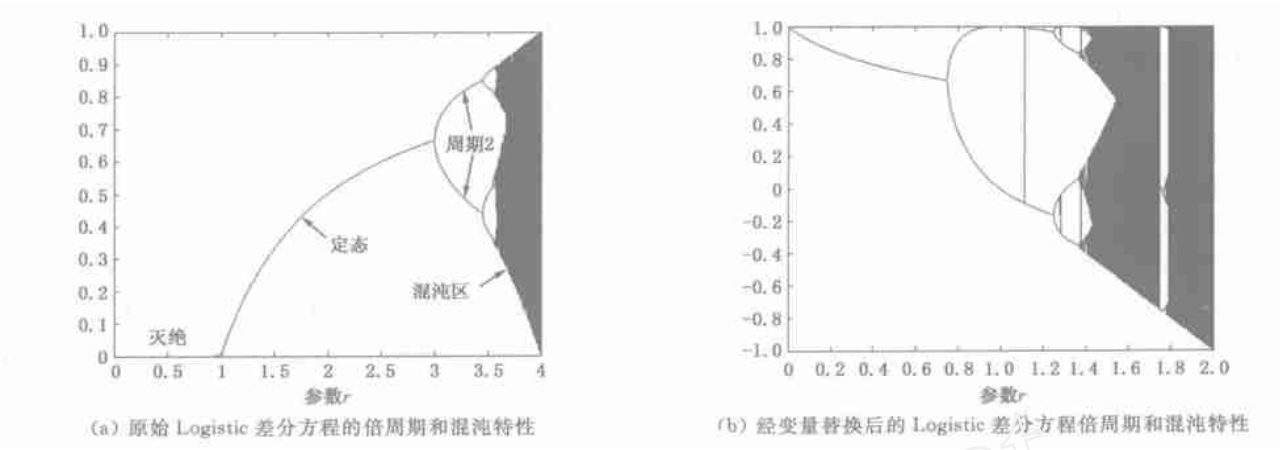
混沌区是一个特殊的区域, 当 μ_i 在混沌区域内取值时, 迭代轨迹将以指数级发散, 若将这些特点应用到数字水印领域, 则能形成良好的数字水印算法。其中一类非常简单却被广泛研究的动力系统是 Logistic 差分方程, 其定义如下

$$x_{n+1} = r x_n (1 - x_n)$$

其中, $0 \le r \le 4$, 称为分支参数, $x_n \in (0, 1)$。

当 r 从 0 变化到 3.569 945 时, 该动力系统则因从稳定状态到分叉而产生倍周期; 当 $3.569\,945 < r \le 4$ 时, 该动力系统进入混沌状态, 如图 1(a) 所示。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 原始 Logistic 差分方程的倍周期和混沌特性　　(b) 经变量替换后的 Logistic 差分方程倍周期和混沌特性

图 1　Logistic 差分方程的倍周期和混沌特性

由图 1(a) 可以看出, 由混沌序列不同的初始状态 x_0 所产生的两个序列是非周期、不收敛和不相关的。

另一类简单的映射是以阶数为参数的 Chebyshev 映射。k 阶 Chebyshev 映射定义如下:

$$x_{n+1} = \cos(k(\arccos x_n))$$

其中, $x_n \in (-1, 1)$。

通过简单的变换替换, Logistic 映射同样可以在 $(-1, 1)$ 区间定义, 形式如下

$$x_{n+1} = 1 - rx_n^2$$

其中, $r \in (0, 2)$。此时, Logistic 差分方程的倍周期和混沌特性如图 1(b) 所示。

在 $r = 2$ 的满射条件下, Logistic 映射和 Chebyshev 映射是拓扑共轭的, 即它们不仅可被视为动力状态相同的系统, 而且其生成序列的概率密度函数 (probability density function) 也相同:

$$\rho(x) = \begin{cases} \dfrac{1}{\sqrt{\pi(1 - x^2)}} & -1 < x < 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

通过 $\rho(x)$, 可以很容易地得到 Logistic 映射产生的混沌序列的一些有意义的统计特性。

性质 1　对于任意初值产生的混沌序列, 其均值为

$$\bar{x} = \lim_{N \to \infty} \sum_{i=0}^{N-1} x_i = \int_{-1}^{1} x \rho(x) \mathrm{d}x = 0$$

性质 2　若独立选取两个初始值 x_0 和 y_0, 则产生的混沌序列互相关函数为

$$\begin{aligned} R_{\mathrm{corr}}(x_0, y_0) &= \frac{1}{N} \lim_{N \to \infty} \left(\sum_{i=0}^{N-1} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right) \\ &= \int_{-1}^{1} \int_{-1}^{1} \rho(x) \rho(y) \rho(x - \bar{x}) \rho(y - \bar{y}) \mathrm{d}x \mathrm{d}y \\ &= \delta(x_0 - y_0) \end{aligned}$$

Logistic 序列的上述特性表明, 由于混沌动力系统具有确定性, 其统计特性等同于白噪声, 因而被应用于数字通讯和多媒体数据安全等领域的噪声调制。该系统具有如下优点:

(1) 只需混沌映射参数和初始条件就可方便地通过迭代方程、非线性方程或偏微分方程生成混沌序列, 而不必浪费空间来存储整个序列;

(2) 利用初始条件可获得数量极多的混沌序列, 而在一般情况下, 则很难从一段有限长度序列推断出整个混沌序列的初始条件, 从安全角度考虑, 这是非常重要的;

(3) 由于该系统具有白噪声的统计特性, 因此可以用于需要噪声调制的众多应用场合。

由此可见, 利用混沌序列作为水印信号具有简单易行、安全可靠的特点。

3　人眼视觉及小波分解系数分析

3.1　人眼视觉频率响应函数

在现代信息社会中, 由于对数字水印的一个基本要求是要同时满足人眼视觉上的不可察觉性和水印的鲁棒性, 即抗干扰能力, 因此必须在能量高的频带中嵌入高的水印能量, 但由于水印不可察觉性的要求限制了所嵌入水印的能量, 为此, 可以考虑结合人眼视觉特性 (HVS), 在鲁棒性和不可察觉性之间作最优的选择。

大家知道, 人眼对图像信息的处理并不是逐点来进行的, 而是通过抽取空间、频率或色彩的特征来进行神经编码, 但由于人的视觉感知特点与统计意义上的信息分布并不一致, 即统计上需要更多信息

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量才能表达的特征, 其可能对视觉感知并不重要, 而从感知的角度来讲, 则无须详细表述这部分特征。为此, 文献[5]中提出了一种人眼视觉系统模型, 并给出了如下视觉系统的频率响应函数

$$H(\omega) = (a + b\omega)e^{-c\omega}$$

其中, ω 为与视角正对的径向频率, 单位为周/度(cycle/degree), a, b, c 为决定 HVS 曲线形状的常数。本文算法主要应用了 HVS 中对比度敏感性函数 $C(\omega)$, 其表达式为

$$C(\omega) = 2.6(0.192 + 0.114\omega)e^{-(0.114\omega)^{1.1}}$$

图 2 给出了对比度敏感性函数 $C(\omega)$ 曲线。

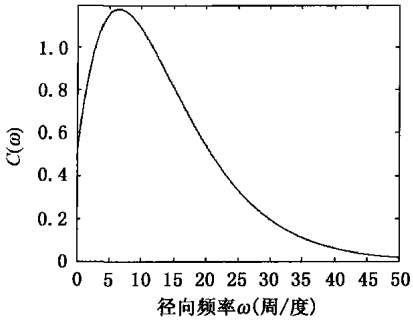


图 2 人眼视觉频率响应函数曲线

3.2 小波分解系数分析

一个二维信号 X 的离散小波变换(DWT)可以看作是一个分级的 4 通道滤波运算, 即通过分别对行和列进行高通和低通滤波的不同组合来得到 X 在子带LL、LH、HL 和HH 上的变换系数; 然后对子带LL 继续进行分解, 直到达到需要的级数为止。若用 λ 表示小波分解的级数, 用方位 $\theta \in \{1, 2, 3, 4\}$ 表示低通和高通滤波的 4 种不同组合{LL、LH、HL、HH}, 则 λ 和 θ 就规定了小波变换的一个子带 $S(\lambda, \theta)$。根据人眼视觉特性, 人眼对图像中平滑区域的变化比较敏感, 而对纹理和边缘区域的微小变化则不太敏感。在小波变换后, 纹理和边缘特征一般都集中在高频子带 HH、HL 和LH 中, 若将水印信息嵌入到这些子带幅值较大的系数上, 则不仅人眼不易察觉, 而且可以增大水印的嵌入能量。

设图像大小为 $N \times N$, 小波分解级数为 λ, 则根据小波高频子带系数个数生成的相应长度的混沌序列水印信号为

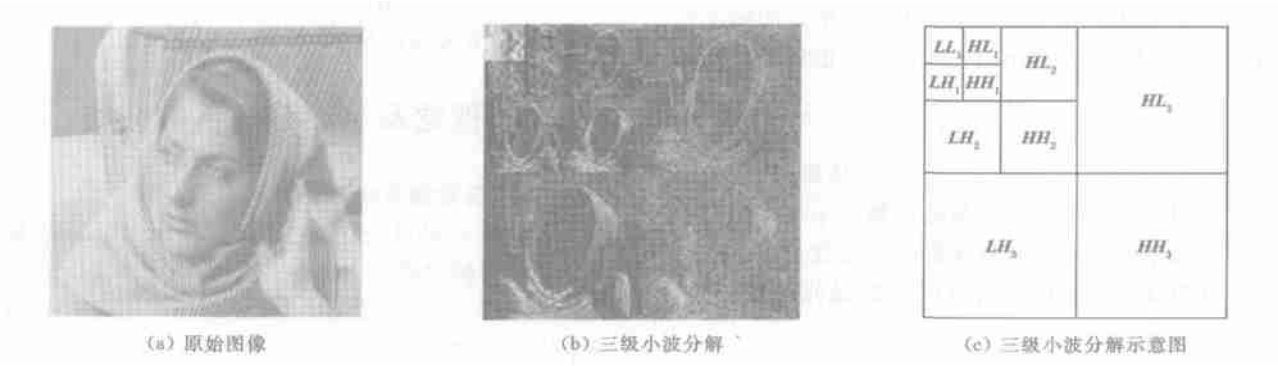
$$X = \{x_1, \cdots, x_{n_1}, \cdots, x_{n_2}, \cdots, x_{n_k}\}$$

其在多分辨率检测时, 对应于分辨率 $l(1 \le l \le \lambda)$ 的水印信号及排列次序为

$$X_l = \{x_1, \cdots, x_{n_l}\}$$

$$n_l = N^2/2^{2(\lambda-1)} - N^2/2^{2\lambda}$$

显然, 不同分辨率的水印信号 X_l 是相互嵌套的, 即有 $X_l \subset X_2 \subset \cdots \subset X$。图 3 为二维图像的三级小波分解结果及示意图。对于 3 级分解, 对应于 3 个不同分辨率的水印信号的排列次序为: $X_1 = \{X_{HL_1}, X_{LH_1}, X_{HH_1}\}$, $X_2 = \{X_1, X_{HL_2}, X_{LH_2}, X_{HH_2}\}$, $X_3 = \{X_2, X_{HL_3}, X_{LH_3}, X_{HH_3}\}$, 其中 HL、LH、HH 内的排列次序为光栅扫描次序。



(a) 原始图像 (b) 三级小波分解 (c) 三级小波分解示意图

图 3 小波三级分解示意图

小波变换与傅里叶变换的一个区别是小波变换的变换基不唯一, 而且选择小波函数时, 通常需要考虑小波的正交性、紧支集和消失矩。其中, 高阶消失矩可以使变换快速衰减, 而且小波的消失矩越高, 其支集越长。本文算法采用的小波基函数为具有高阶消失矩的近似对称的紧支撑双正交小波函数。

4 水印的嵌入、检测及提取算法

4.1 数字水印的嵌入算法

(1) 水印信号的产生

水印序列的长度 n 决定了水印分布到图像中的

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

程度。一般来说, 在频域中修改的分量增加, 意味着在空域中修改的部分减少, 从理论上来说, n 越大, 则水印对于图像的保护越好, 特别是可以更好地防止人为对水印的攻击(attack), 但是实验表明, 较大的 n 并没有起到这样的效果, 因为若 n 增大, 则水印可能嵌入到图像频率较微弱的分量中, 且这些分量在图像失真中很容易损失, 所以对于水印信息的保存没有作用, 相反可能会使水印的检测响应减小, 可见, 较大的 n 不但是没有意义的, 相反会增加系统的时间复杂度。目前, 对于大小不同的图像还没有得出一个定量的公式来确定 n 的取值, 只能根据经验来确定。一般对于大小为 256×256 像素的图像, n 取 1 000较为适宜, 一般来说, n 的确定和图像的大小是相关的, 即它的取值依赖于具体的图像大小[6]。

(2) 水印信号的嵌入

算法的基本框图如图 4 所示。为了使算法描述简单, 本文采用 256 级灰度图像作为原始图像。算法的基本思想是将水印信号的比特流转化成类似于噪声的信号加入图像中, 即对每个像素点的灰度值作轻微扰动, 使其携带水印信息。

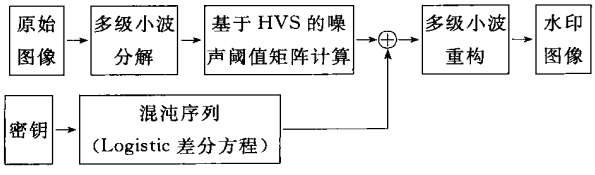


图 4　水印嵌入算法示意图

为了将水印信号嵌入到与 HVS 模型一致的高频小波系数中, 首先必须定义和计算可感知噪声阈值矩阵 JND (just noticeable distortion, 或称为恰可察觉失真矩阵)。设 $B_\theta^{(\lambda)}$ 表示 θ 方向上第 λ 层子带图像的带宽, $C(\omega)$ 为 HVS 中对比度敏感性函数, 则定义可感知噪声阈值矩阵如下

$$T_\theta^{(\lambda)} = \frac{\iint_{B_\theta^{(\lambda)}} \mathrm{d}\omega}{\iint_{B_\theta^{(\lambda)}} C(\omega)\,\mathrm{d}\omega}$$

其中, $\iint_{B_\theta^{(\lambda)}} \mathrm{d}\omega$ 表征了观测者可以感知的最小信号幅度, 即亮度阈值; $\iint_{B_\theta^{(\lambda)}} C(\omega)\,\mathrm{d}\omega$ 则表征了子带{λ, θ}上修改单位量引起的亮度误差。

三级小波变换高频子带上的可感知噪声阈值矩阵如表 1 所示。

这样一来, 就可以依据 $T_\theta^{(\lambda)}$ 来决定在哪些小波系数嵌入水印序列。大于 $T_\theta^{(\lambda)}$ 的系数对图像重要, 因为水印嵌入到这些系数中有利于保证水印的鲁棒性。从低分辨率到高分辨率, 按 $X_{\{l,1\}}$, $X_{\{l,2\}}$, $X_{\{l,3\}}$ $(1 \le l \le \lambda)$ 依次检测子带小波系数, 由大于 $X_{\{l,1\}}$ 的小波系数组成 $Y = \{y_1, y_2, \cdots, y_\lambda\}$, 向量 Y 的长度决定数字水印的长度 $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_\lambda\}$。嵌入水印时, 首先根据著名的 Cox's 水印叠加公式

表 1　可感知噪声阈值矩阵

λ	θ		
	1	2	3
1	23.03	58.76	23.03
2	14.68	28.41	14.68
3	12.71	19.54	12.71

$$\hat{y}_i = y_i(1 + \alpha x_i)$$

将数字水印 X 叠加到向量 Y 中得到 $\hat{Y}$, 然后通过逆小波变换来得到嵌入水印后的图像, 而通过改变 α 可以折衷嵌入水印图像的视觉效果和数字水印的鲁棒性。

4.2　数字水印的检测和提取算法

水印的检测和提取需要原始图像 I 和原始水印序列 X。检测水印时, 首先对原始图像 I 进行多级小波分解, 并从中提取出细节分量, 然后依据可感知噪声阈值矩阵检测到的可以嵌入水印的小波系数来得到向量 Y, 再依据待测图像 I 以及与 I 对应的小波系数来得到向量 $\hat{X}$。相应的解码公式为

$$\hat{x}_i = \frac{\hat{y}_i - y_i}{\alpha y_i}$$

当然, 水印图像在经历一些处理、变换或侵权人的恶意攻击后, 再提取出的水印可能不会与嵌入的水印完全相同。这时, 需要给出一个判决标准来判定版权水印信息的存在与否。本文采用提取水印与原始水印的相关性作为衡量标准来进行判别, 公式如下

$$R_{\mathrm{corr}}(\hat{W}, W) = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{W}_i - \overline{\hat{W}_i}\right)(W_i - \overline{W})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}\left(\hat{W}_i - \overline{\hat{W}_i}\right)^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N}(W_i - \overline{W})^2}}$$

其中, $\hat{W}$ 和 W 分别为待判决水印和正确的水印, $\overline{W}$ 是向量 W 的均值。

5　实验结果与分析

5.1　阈值选择实验

为了确定水印检测中相关测试的阈值, 可首先进行阈值确定实验。方法是首先随机生成2 000个长度为1 000bit 的水印信号, 其中第1 000个水印信号

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

为正确的水印信号, 然后分别与原始的水印信号作相关检测, 结果如图 5 所示。实验结果表明, 随机生成的水印信号与正确的水印信号的最大相关值在 0.102 7左右, 因此, 可以将检测阈值定为 0.2。为了准确起见, 也可以将检测阈值放大, 以降低系统发生虚检(false positive)的概率。所谓虚检, 就是将没有水印信号的图像误认为含有水印信号的图像, 这样将会提高漏检(false negative)的概率, 即未能从含有水印信号的图像中检测到水印信号[7]。

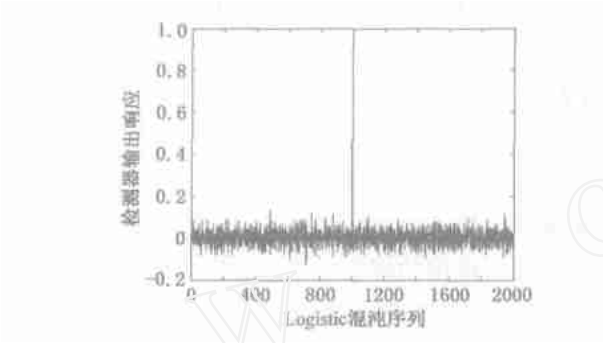


图 5 水印判决阈值的确定

5.2 水印的存在唯一性检测实验

实验中选用的测试图像为图 3(a)所示的 256×256×8 的Woman 标准图像。利用上述算法在测试图像中嵌入水印, 即首先对图像进行三级小波分解, 其采用的小波滤波器为 10 阶紧支撑双正交小波; 然后随机选取(0, 1)间的 500 个数作为初始值, 产生 500 个Logistic 混沌序列 X_m (m = 1, 2, …, 500), 用来检测水印检测器对被测图像的响应, 其中 X_{250}为嵌入图像的水印; 最后, 模拟各种失真处理, 以检测水印嵌入的有效性和鲁棒性。实验结果分别如图 6～图 7 所示。

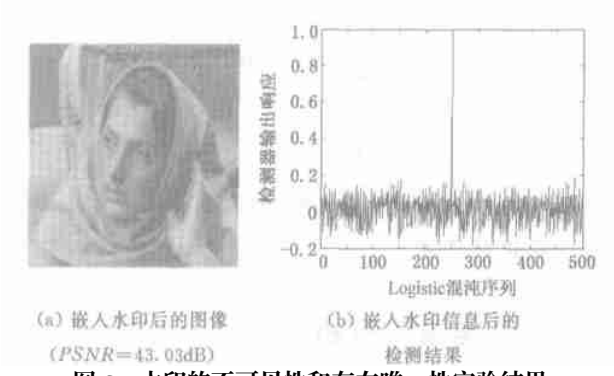


图 6 水印的不可见性和存在唯一性实验结果

图 6 证实了应用本文算法实现的水印的不可见性和存在唯一性。其中, 图 6(a)为嵌入水印后的图像。由该图可见, 从视觉效果的角度来看, 即使与原始图像放在一起进行比较, 也很难感觉到水印的存在, 而客观计算出的峰值噪声比($PSNR$ = 43.03dB)也进一步说明水印具有很好的不可见性。图 6(b)则证实了检测出的水印的存在唯一性, 水印所在处的相似度测量值要远远大于其他混沌序列的相似度测量值, 因此, 可以确定, 嵌入的水印信号不仅能可靠地被检测到, 而且是唯一存在的。

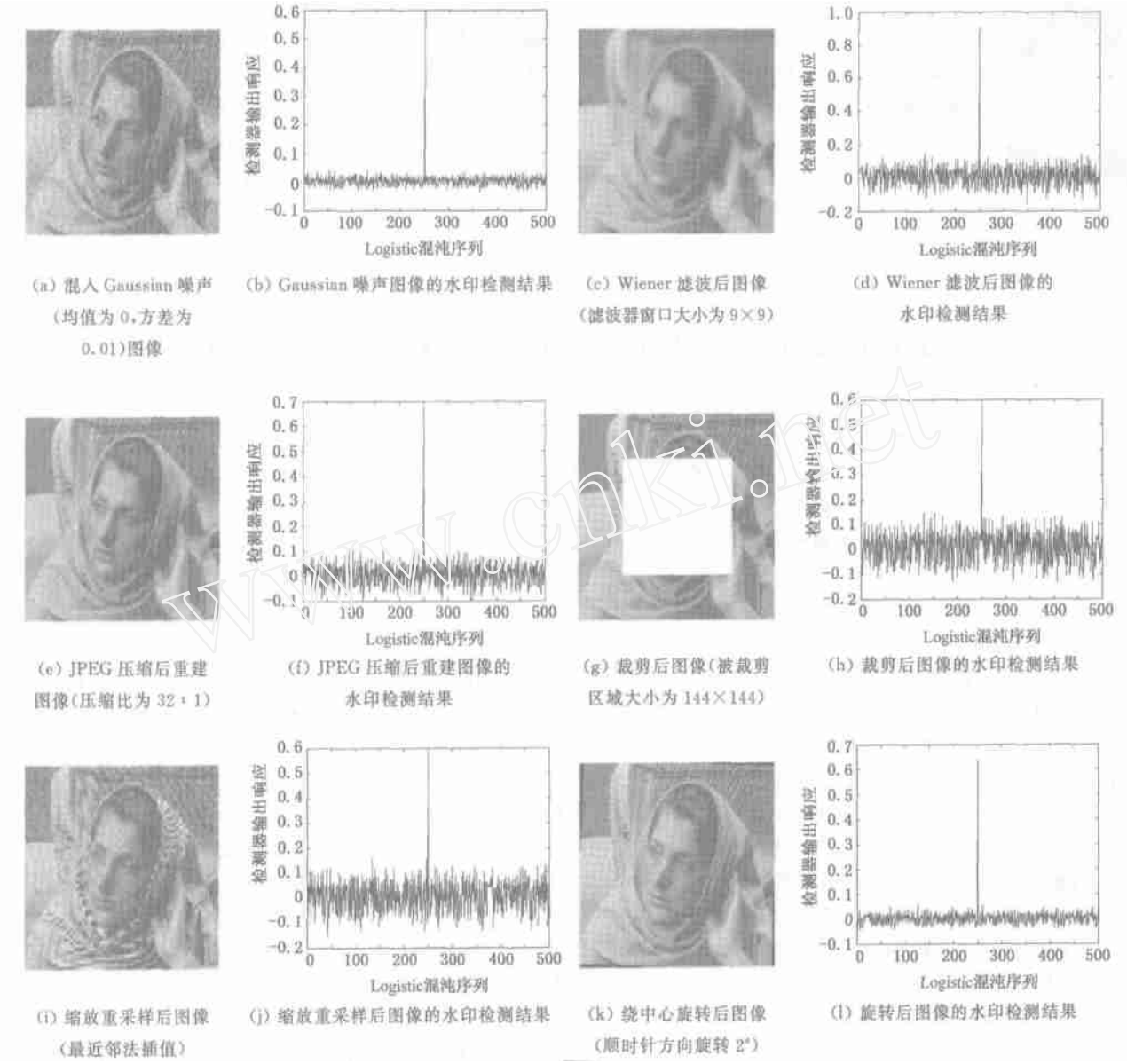
5.3 水印鲁棒性实验

数字水印算法的另外一个重要性能指标就是水印的抗干扰能力, 即当被保护的信息经过某种改动(如混入噪声、过滤、重采样、有损压缩等)后, 嵌入的信息应能保持其完整性, 即不能轻易地被去除, 并能够以一定的正确概率被检测到。为此, 本文对嵌入水印后的图像进行了各种鲁棒性实验, 其结果如图 7 所示。图 7(a)为混入了均值为 0、方差为 0.01 的 Gaussian 噪声后的图像, 该图像已经明显失真。图 7(b)为相似度测量结果, 由该图可以看出, 正确位置处的水印相似度值要大于本文所选定的判决阈值, 这说明水印能被可靠地检测到。图 7(c)为Wiener 滤波后的图像, 滤波器模板尺寸为 9×9, 滤波后的图像虽变得模糊平滑, 但图 7(d)所示的相似度测量结果表明, 水印对Wiener 滤波操作仍具有很好的鲁棒性。图 7(e)为水印图像经过 JPEG 有损压缩后的图像, 压缩比 32∶1, 若不作平滑处理, 则此时图像已有明显的方块效应, 从图 7(f)可以看出, 正确位置处的相似度检测结果要远大于判决阈值。图 7(g)为经中心裁剪后的图像, 裁剪区域尺寸为 144×144 像素, 水印依然被可靠地检测到。图 7(i)为缩放重采样后图像, 具体操作是先将水印图像缩小 4 倍, 然后再放大 4 倍, 缩放过程中, 像素插值方法采用最近邻法, 图 7(j)所示的相似度检测结果说明, 水印仍可在正确位置被检测到, 图 7(k)为水印图像绕中心顺时针旋转 2°后的结果, 其插值方法也采用最近邻法, 由图 7(k)可以看出, 正确位置处的水印相似度同样要高于其他混沌序列相似度检测的响应。

6 结 语

本文提出了一种基于混沌特性和视觉模型的小波数字水印算法, 该算法的优点是: ①由于利用了混沌序列的白噪声统计特征, 故可使得水印算法具有很好的鲁棒性和安全性; ②综合考虑了人眼视觉模型, 并利用小波多级分解将混沌序列嵌入到从低分

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 混入 Gaussian 噪声(均值为 0,方差为 0.01)图像
(b) Gaussian 噪声图像的水印检测结果
(c) Wiener 滤波后图像(滤波器窗口大小为 9×9)
(d) Wiener 滤波后图像的水印检测结果
(e) JPEG 压缩后重建图像(压缩比为 32∶1)
(f) JPEG 压缩后重建图像的水印检测结果
(g) 裁剪后图像(被裁剪区域大小为 144×144)
(h) 裁剪后图像的水印检测结果
(i) 缩放重采样后图像(最近邻法插值)
(j) 缩放重采样后图像的水印检测结果
(k) 绕中心旋转后图像(顺时针方向旋转 2°)
(l) 旋转后图像的水印检测结果

图 7　水印对噪声干扰和常见图像处理操作的鲁棒性实验结果

辨率到高分辨率的高频子带中的对视觉影响较大的小波系数中,从而有效地保护了图像的低频部分和强边缘部分,不仅使得嵌入水印信号后的图像具有较好的透明性,而且保证了加密图像的视觉质量。实验结果也表明,应用本文算法嵌入水印后的加密图像具有很好的不可见性,同时,在通常的信号失真情况下,仍能保持较好的鲁棒性。

参 考 文 献

1 Horvatic P, Zhao J, Thorwirth N. Robust audio watermarking based on secure spread spectrum and auditory perception model [A]. In: Proceeding of 16th Annual Working Conference [C], Beijing China, 2000, **8**: 181～190.

2 Lutoborski A, Baldoza A, Vergis J. On wavelet based method of watermarking digital images [R]. Deptment of Mathematics, Syracuse University, Multi Sensor Exploitation Branch, Air Force Research Lab., 1998: 9～10.

3 Swanson M D, Zhu B, Chau B, *et al*. Object-based transparent video watermarking [A]. IEEE Signal Processing Society 1997 Workshop on Multimedia Signal Processing [C]. Princeton, NJ: IEEE, 1997: 369～374.

4 武拴虎, 谈正. 基于混沌序列的视频图像数字水印隐藏与多分辨率检测[J]. 西安交通大学学报, 2000, **34**(6): 35～39.

5 Nill N B. A visual model weighted cosine transform for image compression and quality assessment [J]. IEEE Transactions on Communication, 1985, **33**(6): 551～557.

6 刘兵, 梁勇, 李海燕, 等. 基于空间视觉掩蔽效应的图像水印频域技术[J]. 云南大学学报, 1999, 21(5): 399～402.

7 尹康康, 石教英, 潘志庚. 一种鲁棒性好的图像水印算法[J]. 软件学报, 2001, **12**(5): 668～676.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net