

基于奇异值分解的、抗几何失真的数字水印算法

周 波 陈 健

(上海交通大学电子工程系, 上海 200030)

摘 要 许多现有的适用于图像的数字水印对几何失真都是很敏感的。尤其是此类失真会严重妨碍对水印的盲提取。为此,提出了一种基于奇异值分解的数字水印算法,它对常见的几何失真是稳健的。此水印是被嵌入到图像分解后的奇异值之中。根据奇异值分解的代数性质,严格证明了嵌入了水印的图像在受到转置、镜像、旋转、放大和平移等几何失真后,其奇异值是不变的。在经过了上述的几何失真、一般的信号处理操作或 JPEG 压缩以后,嵌入的水印能够被可靠地提取和检测。实验结果表明本算法具有很好的稳健性。

关键词 数字水印 奇异值分解 几何失真 版权保护

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)04-0506-07

A Geometric Distortion Resilient Image Watermarking Algorithm Based on SVD

ZHOU Bo, CHEN Jian

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract Many digital watermarks now available for images are sensitive to geometric distortions, which particularly prevent blind detection of a public watermark. In this paper, a watermarking algorithm based on singular value decomposition (SVD) is proposed, which is robust to common geometric distortions. The watermark is embedded into image's singular values. By the algebraic properties of SVD, it is proved rigorously that singular values of the watermarked image are invariant when it goes through the geometric distortions of transpose, mirror reflection, rotation, scale, and translation. Experimental results show that the watermarking algorithm performs well in robustness. The embedded watermark can be detected reliably, following these geometric distortions, usual signal processing, or JPEG compression.

Keywords watermarking, SVD, geometric distortion, copyright protection

1 引 言

随着近年来电子出版业快速而广泛的发展,数字图像能够被越来越迅捷和方便地传播。这就迫切需要一种强制方案来保护合法版权。对这个问题的一个潜在的解决方法就是数字水印。也就是向图像中嵌入信息,而这些信息是不可见的,并且能够抵抗图像改动对其的影响。

虽然已经出现了许多对常见的信号处理稳健的水印算法,但是非常微小的几何失真都能够使这些水

印失效。这个问题在不需要原始图像参与的水印盲提取中尤为突出,因为水印盲提取过程中不能借助于标记来逆转几何失真^[1]。最近,文献[2]中指出一幅嵌入水印的图像存在多个有价值的变体,而这些变体在任意感知加权的度量标准下都不可能接近于原来的嵌入水印的图像。举例来讲,在很多情况下以 90°、180°或 270°旋转一幅图像不会影响它的价值(如:显微图像),然而这些操作却会轻易地挫败水印提取。显然,所有这些有价值的变体也都应该受到保护。

本文中,我们感兴趣的是在水印提取之前遭受了未知几何失真的图像。这些可能的几何失真包括:

转置、镜像、旋转、放大和/或平移。通常,人们所关心的是嵌入水印的图像被打印输出,然后经裁减或者填充,最后经过扫描成为数字形式后,水印是否能够被正确检测与提取。这里假设提取端没有关于几何失真参数的任何信息。

现有的众多数字水印方案都是对图像进行所有可能的逆转,以试图抵消几何失真的影响,并在这些逆转图像中尝试提取水印^[3]。但不难发现,如果没有一种有效的方法来搜索逆转图像,这些方案将会因巨大的运算复杂性而变得难以操作^[2]。基于 Fourier-Mellin 变换的水印算法^[4],利用了 Fourier-Mellin 变换域中旋转、比例缩放和平移不变量的性质,然而,它却不能抵御纵横比的改变和裁减。

基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的图像数字水印算法,对转置、镜像、旋转、放大和平移等的几何失真是稳健的。实验结果表明此水印在经受了上述的几何失真和常见的信号处理操作后仍然能够被有效地检出。

2 基于奇异值分解的数字水印算法

从图像处理的角度来看,奇异值分解具有以下主要特性^[5]:一幅图像的奇异值具有相当好的稳定性,也就是说,当图像受到轻微的扰动时,它的奇异值不会发生剧烈的改变;奇异值能够表现出图像内在的代数特性。

2.1 数字图像的奇异值分解

从线性代数的角度来看,一幅数字图像可以看成是由一个许多非负标量项组成的矩阵。用 $A \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 来表示这样一个图像矩阵,其中 \mathbf{R} 表示实数数域,不失一般性,这里假设 $M \times N$ 。这样 A 就可以表示成^[6]

$$A = U\Sigma V^T \quad (1)$$

其中, $U \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 和 $V \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 都是正交阵, $\Sigma \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 是一个非对角线上的项都是 0 的矩阵,其对角线上的元素满足

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_M = 0 \quad (2)$$

其中, r 是 A 的秩,它等于非零奇异值的个数,所以有

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_M \end{bmatrix} \quad (3)$$

σ_i 是由该分解所唯一确定的,叫做 A 的奇异值。它是 AA^T 特征值的平方根。分解式 $U\Sigma V^T$ 称作 A 的奇异值分解。因

$$AA^T = U\Sigma V^T V \Sigma^T U^T = U\Sigma \Sigma^T U^T \quad (4)$$

$$A^T A = V \Sigma^T U^T U \Sigma V^T = V \Sigma^T \Sigma V^T$$

所以 U 的列向量是 AA^T 的特征向量, V 的列向量是 $A^T A$ 的特征向量,并且它们所对应的特征值都是 A 的奇异值的平方。

如果将 U 和 V 写成

$$U = [u_1 u_2 \dots u_M] \quad (5)$$

$$V = [v_1 v_2 \dots v_N]$$

式中, u_i 和 v_i 分别是组成 U 和 V 的列向量。那么式可以用向量外积的形式表示为^[7]

$$A = \sum_{i=1}^R \sigma_i u_i v_i^T \quad (6)$$

式(6)可以被认为 r 个秩为 1 的特征图 $u_i v_i^T$ 以各自奇异值 σ_i 为权相加的总和。

2.2 水印的嵌入与提取

在嵌入水印时,对图像 A 进行奇异值分解得到正交阵 U 和 V 以及对角阵 Σ 。实现中,水印是由一个实数序列 $W = \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ 组成,其中 ω_i 相互独立且服从标准正态分布, n 为水印的长度。挑选出除了 σ_1 以外的 n 个数值最大的奇异值组成单调递减序列 $S = \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_{n+1}$ 。这里将最大的奇异值 σ_1 排除在外是因为它远远大于其他奇异值^[7],对它轻微的改变将会导致图像视觉质量的严重下降。根据

$$\sigma'_{i+1} = \sigma_{i+1}(1 + \alpha \omega_i) \quad (7)$$

将 W 嵌入到 S 中,得到一个调整后的奇异值序列 $S' = \sigma_2, \sigma'_3, \dots, \sigma'_{n+1}$ 。其中 α 是一个比例参数,用来调节 W 改变 S 的程度,从而控制嵌入水印后图像的质量。将 S' 回代入 Σ ,替代原先的 S ,生成 Σ' ,然后将 U, Σ' 和 V^T 相乘就可以得到嵌入水印的图像 A' 。由于调整后的奇异值序列 S' 可能不符合单调递减的顺序,而在奇异值分解后奇异值总是递减排列的,所以根据 σ'_i 的递减顺序对 S 中对应的 σ_i 排序,生成序列 S^+ ,用它来标明 A 的奇异值及其原始顺序。

在提取水印时需要:接收到的嵌入水印的图像 A^* (可能已经遭受到攻击)、参考水印 W 、调整后的原始奇异值序列 S^+ 和比例参数 α 。根据以下与嵌入相反的步骤,从 A^* 中提取出可能已遭到破坏的水印 W^* 并进行检测:

(1) 对 A^* 进行奇异值分解,得到按递减顺序排列的奇异值向量 D^* ;

(2) 将 S^+ 按单调递减顺序排列, 还原成 S ;

(3) 根据 S 和 S^+ , 使 D^* 中的奇异值与 S 的相应元素对齐, 并从 D^* 中提取出奇异值序列 $S^* = \sigma_2^*, \sigma_3^*, \dots, \sigma_{n+1}^*$;

(4) 由 S^* 和 S 提取出水印 $W^* = \omega_1^*, \omega_2^*, \dots, \omega_{n+1}^*$, 即:

$$\omega_i^* = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\sigma'_{i+1}}{\sigma_{i+1}} - 1 \right) \quad (8)$$

(5) 计算参考水印 W 与提取出的水印 W^* 之间的标准相关系数

$$\text{corr}(W, W^*) = \frac{\sum_{i=1}^n (\omega_i - \bar{\omega})(\omega_i^* - \bar{\omega}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\omega_i - \bar{\omega})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\omega_i^* - \bar{\omega}^*)^2}} \quad (9)$$

其中

$$\bar{\omega} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i, \quad \bar{\omega}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \omega_i^* \quad (10)$$

利用 $\text{corr}(W, W^*)$ 来测量 W 与 W^* 的相似程度, 如果大于门限 T , 表明图像 A^* 包含了水印 W , 否则表明未包含水印。

因提取水印时并不需要原始图像, 所以本水印算法是盲的。

3 对几何失真不变性的分析

设图像均已经过数模转换, 被抽象化为矩阵, 与图像的分辨率(取样率)无关。几何失真包括: 转置、镜像、旋转、放大、平移。

3.1 转置

如果 A^T 是 A 的转置, 那么

$$(A^T)(A^T)^T = A^T A \quad (11)$$

根据式(4), A^T 和 A 具有相同的非零奇异值, 即本水印对转置失真是稳健的。

3.2 镜像

令 $P_M = \begin{bmatrix} 0 & & 1 \\ & \ddots & \\ 1 & & 0 \end{bmatrix}_{M \times M}$, 显然它是正交对称

的, 故有: $P_M^{-1} = P_M^T = P_M$ 。那么 A 的行镜像 A_{rm} 和列镜像 A_{cm} 可以表示成

$$A_{rm} = P_M A, \quad A_{cm} = A P_N \quad (12)$$

所以有

$$A_{rm}^T + A_{rm} = A^T P_M^T P_M A = A^T A$$

$$A_{cm} + A_{cm}^T = A P_N P_N^T A^T = A A^T \quad (13)$$

因此, A_{rm} 、 A_{cm} 和 A 具有相同的非零奇异值, 表明本水印对镜像失真是稳健的。

3.3 旋转

3.3.1 以 90° 的整数倍旋转

首先考虑图像顺时针旋转 90° 的情况。这个操作可以仅由转置和镜像的级联来实现。设 $A_{90^\circ} \in \mathbf{R}^{N \times M}$ 为旋转后的图像, 则

$$A_{90^\circ} = A^T P_M \quad (14)$$

因为图像以 90° 的整数倍旋转都可以通过重复顺时针旋转 90° 来实现, 所以结合转置和镜像的结论可以得到: 若将一幅图像以 90° 的整数倍旋转将不会改变它的非零奇异值。

3.3.2 以任意角度旋转

假设 $A_r \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 是图像 $A \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 旋转任意角度后的图像, 那么总是存在一个正交阵 $Q \in \mathbf{R}^{M \times M}$, 使得 $A_r = Q A^{[8]}$ 。因此有

$$A_r^T A_r = A^T Q^T Q A = A^T A \quad (15)$$

故 A_r 与 A 有相同的非零奇异值。

综上所述, 本水印具有旋转不变性。

3.4 放大

3.4.1 纵向(行)放大

设 $B \in \mathbf{R}^{L_1 M \times N}$ 是图像 $A \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 纵向放大后的图像, 它是将 A 的每一行重复 L_1 次得到的。用矩阵形式表达就是

$$B = S_r A \quad (16)$$

其中

$$S_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & & \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \\ \vdots & & & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{L_1 M \times M} \quad (17)$$

令

$$A A^T = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{M1} & \cdots & a_{MM} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{M \times M} \quad (18)$$

则

$$B B^T = S_r A A^T S_r^T$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & & \vdots \\ 1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{M1} & \cdots & a_{MM} \end{bmatrix} \times \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & 0 & \cdots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} [a_{11}]_{L_1, L_1} & \cdots & [a_{1M}]_{L_1, L_1} \\ \vdots & & \vdots \\ [a_{M1}]_{L_1, L_1} & \cdots & [a_{MM}]_{L_1, L_1} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{L_1 M \times L_1 M} \quad (19)
 \end{aligned}$$

其中 $[x]_{M,N} = \begin{bmatrix} x & \cdots & x \\ \vdots & & \vdots \\ x & \cdots & x \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 。

设 λ 为 AA^T 的任意一个特征值, $\alpha = [\alpha_1 \ \alpha_2 \ \cdots \ \alpha_M]^T$ 是其对应的特征向量, 则

$$AA^T \alpha = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1M} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{M1} & \cdots & a_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^M \alpha_i a_i \\ \cdots \\ \sum_{i=1}^M \alpha_M a_i \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_M \end{bmatrix} \quad (20)$$

于是就有

$$\begin{aligned}
 BB^T \begin{bmatrix} [\alpha_1]_{L_1, 1} \\ \vdots \\ [\alpha_M]_{L_1, 1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [a_{11}]_{L_1, L_1} & \cdots & [a_{1M}]_{L_1, L_1} \\ \vdots & & \vdots \\ [a_{M1}]_{L_1, L_1} & \cdots & [a_{MM}]_{L_1, L_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\alpha_1]_{L_1, 1} \\ \vdots \\ [\alpha_M]_{L_1, 1} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} [L_1 \sum_{i=1}^M a_{1i} \alpha_i]_{L_1, 1} \\ \vdots \\ [L_1 \sum_{i=1}^M a_{Mi} \alpha_i]_{L_1, 1} \end{bmatrix} = L_1 \lambda \begin{bmatrix} [\alpha_1]_{L_1, 1} \\ \vdots \\ [\alpha_M]_{L_1, 1} \end{bmatrix} \quad (21)
 \end{aligned}$$

从而 $L_1 \lambda$ 是 BB^T 的特征值。又由于 B 是将 A 的每一行重复 L_1 次得到的, B 的秩等于的 A 秩。所以 B 与

A 的非零奇异值的数量相等, 并且对于 A 的每一个非零奇异值 $\sigma = \sqrt{\lambda}$, $\sqrt{L_1} \sigma = \sqrt{L_1} \lambda$ 是 B 的一个非零奇异值。

3.4.2 横向(列)放大

与纵向(行)放大相仿, 设 $C \in \mathbf{R}^{M \times L_2 N}$ 是图像 $A \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 横向放大后的图像, 它是将 A 的每一列重复 L_2 次得到的, 即

$$C = AS_c \quad (22)$$

其中

$$S_c = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & 0 & \cdots & 0 & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{N \times L_2 N} \quad (23)$$

令

$$A^T A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{N1} & \cdots & a_{NN} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{N \times N} \quad (24)$$

因此

$$C^T C = S_c^T A^T A S_c = \begin{bmatrix} [a_{11}]_{L_2, L_2} & \cdots & [a_{1N}]_{L_2, L_2} \\ \vdots & & \vdots \\ [a_{N1}]_{L_2, L_2} & \cdots & [a_{NN}]_{L_2, L_2} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{L_2 N \times L_2 N} \quad (25)$$

同理可得, C 与 A 的非零奇异值的数量相等, 并且对于 A 的每一个非零奇异值 $\sigma = \sqrt{\lambda}$, $\sqrt{L_2} \sigma = \sqrt{L_2} \lambda$ 是 C 的一个非零奇异值。

综合起来, 若将 A 同时纵向和横向分别放大 L_1 倍和 L_2 倍, 那么对于 A 的每一个非零奇异值 σ , $\sqrt{L_1 L_2} \sigma$ 是放大后图像的一个非零奇异值, 且放大前后非零奇异值的数量相同。因利用式(8)提取水印, 并以标准相关系数 $\text{corr}(W, W^*)$ 来测量 W 与 W^* 的相似程度, 它的值与系数 $\sqrt{L_1 L_2}$ 无关, 所以图像经过放大以后, $\text{corr}(W, W^*)$ 不会改变。

3.5 平移

平移通常发生在四周填充了黑色像素(亮度值为 0)的延伸图像中, 并且在延伸图像中进行平移等同于在延伸图像的一边填充黑色像素, 同时在另一边裁剪黑色像素, 因此只须研究填充(裁剪)对于奇异值的影响。

不失一般性, 设 $A_c = [A \quad 0]_{M \times N'} \in \mathbf{R}^{M \times (N+N')}$

是图像 $A \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 填充后的延伸图像, 于是

$$A_c A_c^T = \begin{bmatrix} A & [0]_{M, N'} \\ [0]_{N', M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^T \\ [0]_{N', M} \end{bmatrix} = A A^T \quad (26)$$

故 A_c 与 A 具有相同的非零奇异值。根据旋转不变性, 在任意一边填充或裁剪黑色像素不会改变非零奇异值。因此, 本水印具有平移不变性。

4 实验

使用 256 级灰度图像来测试本水印算法对各种几何失真的稳健程度, 这些图像包括: Lena、Pepper、Tiffany 和 Truck, 大小均为 512×512 。水印

长度 $n=256$, 比例参数 $\alpha=0.1$ 。以 Lena 图像为例, 为了便于显示, 像素值都放大了 10 倍。表 1 中列出了各图像嵌入水印后与原始图像相比的峰值信噪比 (PSNR), 它们都达到了相当高的数值。可见嵌入水印对图像质量的影响是相当小的, 即水印是不可见的。



(a) Lena 原始图像 (b) 嵌入水印后的图像 (c) 绝对差图像

图 1 嵌入数字水印

表 1 嵌入水印后图像的峰值信噪比 (PSNR) 和受到攻击前后的相关系数

图像	PSNR(dB)	相关系数					
		未受攻击	3×3 中值滤波	按比例缩小一半再恢复原尺寸	裁剪四周 3/4 图像	裁剪上半幅图像	裁减左半幅图像
Lena	37.8896	0.9930	0.5827	0.3996	0.3399	0.4890	0.3933
Peppers	34.6554	0.9931	0.4673	0.4455	0.4282	0.7379	0.6861
Tiffany	41.9480	0.9934	0.4344	0.4450	0.3741	0.4864	0.5911
Truck	41.8683	0.9930	0.4188	0.4670	0.3328	0.7146	0.5455

根据文献 [9] 中所述, 如果水印序列长度为 n , 门限 T 与虚警概率 P_{fd} 的关系为

$$P_{fd}(T) = P\{\text{corr}(W, W^*) > T\} = \frac{\int_0^{\cos^{-2}(T)} \sin^{n-2}(u) du}{2 \int_0^{\pi/2} \sin^{n-2}(u) du} \quad (27)$$

当 $n=256$ 时, 关系曲线如图 2 所示。具体的门限值可以根据不同应用场合所要求的性能指标来决定。

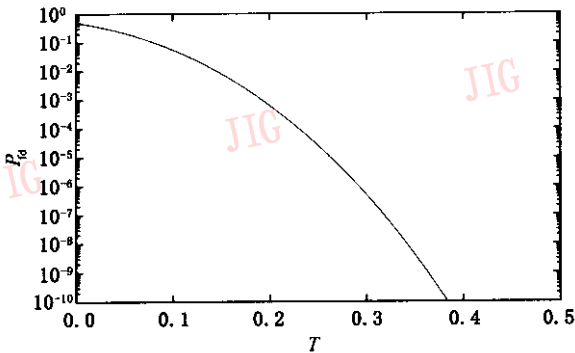


图 2 不同门限下的虚警概率 (水印长度为 256)

图 3 中列出了对嵌入水印后的 Lena 图像进行的各种几何失真处理以及一些常见的图像处理, 根据对几何失真不变形的分析, 转置、镜像、放大和平移后相关系数不发生改变。各种失真操作前后水印的相关系数见表 1。图 4 为旋转失真对相关系数影

响的曲线, 由于是以 90° 为周期, 故只画出了 0° 至 90° 的部分。因为旋转时需要图像进行内插和裁剪, 使得等效的旋转变换矩阵 Q 并不是严格的正交阵, 所以非零奇异值发生变化, 从而导致相关系数有不同程度的下降。但是结合图 2 可以看出, 其数值仍然能够使虚警概率 P_{fd} 保持在一个相当低的水平上。

对嵌入水印后的图像进行有损压缩。图 5 为采用 JPEG 标准压缩时, 压缩质量系数从 1% 变化到 100% 的过程中相关系数的变化曲线。从图中可以看到, 即使经过深度有损压缩, 水印仍然能够被可靠地提取, 这表明该水印能够经得起图像压缩。

最后, 测试打印和扫描对水印提取的影响。图 6 中为两幅先由 HP LaserJet 1000 打印机输出再由 AGFA SnapScan Touch 扫描仪扫描后得到的 Lena 图像。显然, 这些图像不同程度地受到了伴随着打印和扫描过程的各种失真, 例如: 旋转、填充和平移。表 2 列出了这些扫描得到的嵌入水印后图像的相关系数。

表 2 扫描得到的嵌入水印后的图像相关系数 (分辨率为 100dip)

图像	相关系数	
	扫描时放置得近似正直	扫描时旋转了未知角度
Lena	0.5916	0.5277
Peppers	0.8722	0.9155
Tiffany	0.7795	0.6360
Truck	0.8885	0.6639

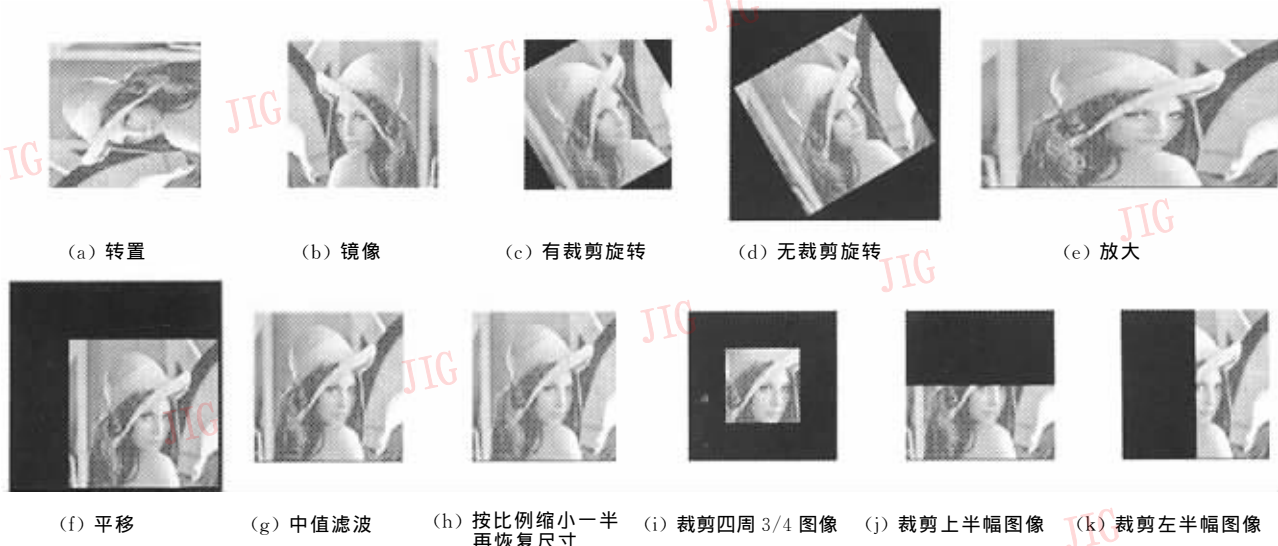
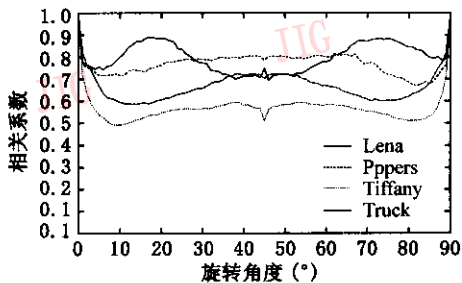
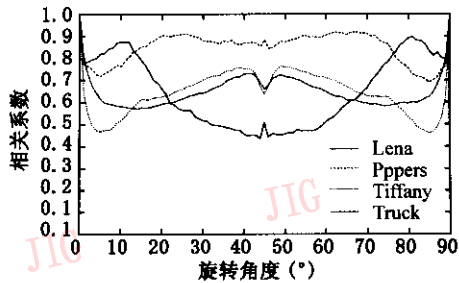


图 3 对嵌入水印后的 Lena 图像进行的各种几何失真处理以及一些常见的图像处理



(a) 有裁剪



(b) 无裁剪

图 4 嵌入水印后的图像旋转不同角度时的相关系数

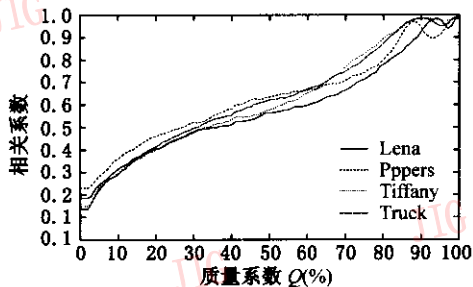
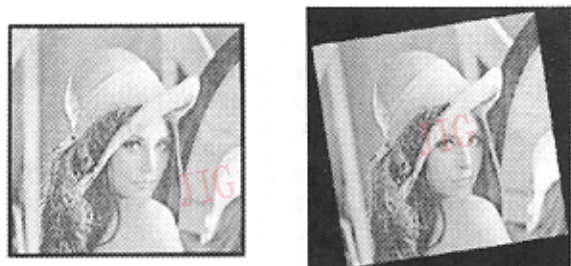


图 5 嵌入水印后的图像以不同的质量系数进行 JPEG 压缩时的相关系数



(a) 放置得近似正直 (b) 旋转了未知角度

图 6 嵌入水印后的图像经过扫描后得到的图像

从以上的实验结果可知,即使是在嵌入了水印的图像经受了未知的几何失真后,本算法仍旧能够提取出正确的水印并检测出它的存在。而且我们发现,本水印算法对需要打印输出的数字图像起到了保护合法版权的作用,与此同时,它放宽了扫描时对各种参数条件的苛刻要求,消除了扫描后对图像进行所有可能逆转的运算量。

5 结 论

本文提出了一种能够抵抗典型的几何失真的数字水印算法,由服从标准正态分布的随机数组成的水印被嵌入到数字图像的奇异值之上。并通过严格的数学推导证明了该水印对转置、镜像、旋转、放大、平移等几何失真具有不变性。实验结果表明本水印算法不仅对这些几何失真具有很好的稳健性,而且在经过常见的图像处理和压缩操作后仍然可以很好地提取出水印,并且在提取过程中的虚警概率非常低。

本水印算法抵御几何失真的特性使之在印刷和

打印输出领域具有广泛的应用前景。通过在要被模拟输出的数字图像中嵌入水印,使得后续的模数转换所引入的几何失真仅对提取出的水印产生很小的影响,确保水印仍能可靠地被检测出来,从而达到保护版权的目的。在随后的模数转换中引入的几何失真对提取出的水印仅仅产生很小的影响。

参 考 文 献

- 1 Petitcolas F A P, Anderson R J, Kuhn M G. Attacks on copyright marking systems[A]. In: Proceedings of Workshop Information Hiding[C]. Portland, OR, USA, 1998: 218~238.
- 2 Herley C. Why watermarking is nonsense[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(5): 10~11.
- 3 Braudaway G W, Minter F. Automatic recovery of invisible image watermarks from geometrically distorted image[A]. In: Proceedings of SPIE Security and Watermarking of Multimedia Contents II [C]. San Jose, CA, USA, 2000:74~81.
- 4 Ruanaidh J J. K. O., Pun T. Rotation, scale and translation invariant spread spectrum digital image watermarking[J]. Signal Processing, 1998, 66(3): 303~317.
- 5 Andrews H, Patterson C. Singular value decomposition (SVD) image coding[J]. IEEE Transactions on Communications, 1976, 24(4): 425~432.
- 6 Liu R, Tan T. An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership [J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2002, 4(1): 121~128.

- 7 Leon S J. Linear Algebra with Applications[M]. New York: Macmillan, 1986: 343~356.
- 8 Horn R A, Johnson C R. Matrix Analysis[M]. Cambridge: Cambridge University, 1985: 431~432.
- 9 Miller M L, Bloom J A. Computing the probability of false watermark detection[A]. In: Proceedings of 3rd International Workshop Information Hiding[C], Dresden, Germany, 1999: 146~158.



周波 1978年生,2001年获上海交通大学通信工程专业学士学位,现为上海交通大学信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向为数字水印技术和数字视频处理。



陈健 1935年生,教授,博士生导师,1960年毕业于北京理工大学无线电系,同年进上海交通大学无线电系任教,曾主持国家和上海市重大科研攻关项目10余项,获省部级科技进步奖4项,发表论文100余篇。主要研究方向为多媒体信号处理、DSP应用和数字通信。