

基于混沌和 SVD-DWT 的稳健数字图像水印算法 *

张秋余, 李 凯, 袁占亭

(兰州理工大学 计算机与通信学院, 兰州 730050)

摘 要: 针对现有适用于图像的数字水印对信号处理和几何失真比较敏感的问题, 提出一种稳健的数字图像水印算法。该算法先对整个图像应用三级离散小波变换, 再对低频域运用奇异值分解, 并通过修改奇异值, 嵌入经过混沌置乱的水印图像的奇异值, 在小波变换域的中频系数上嵌入水印信息。水印检测时, 分别在中频区域和低频提取水印并进行比较, 采用效果较好的水印作为检测水印。实验结果表明, 该方法对一般的信号处理操作及几何攻击等均具有较好的鲁棒性。

关键词: 稳健性; 混沌; 离散小波变换; 奇异值分解; 数字水印

中图分类号: TN912.34

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2010)02-0718-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.02.087

Robust digital image watermarking algorithm based on chaos and SVD-DWT

ZHANG Qiu-yu, LI Kai, YUAN Zhan-ting

(College of Computer & Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Many digital watermarks now available for images are sensitive to signal processing and geometric distortions, this paper proposed a robust digital image watermarking algorithm. After decomposing the whole image with 3 level of discrete wavelet transform, then applied the singular value decomposition(SVD) to the low frequency domain, and embedded the singular values of the watermark image that was decomposed with SVD after chaotic scrambling by modifying the singular values, and embedded the watermark data to the middle frequency coefficients of wavelet domain; extracted watermarks in the intermediate frequency and low frequency region and compare them, using the extracted watermark which was better. The examination algorithm of watermark used the double watermark comparison examination. The experimental results demonstrate that this proposed watermarking algorithm is robust against some common signal processing and geometric attacks.

Key words: robust; chaos; discrete wavelet transform; singular value decomposition; digital watermarking

目前对数字水印技术的研究已有十多年的时间, 但与实际应用还有一定的距离, 原因之一就是水印技术在对抗几何攻击^[1,2]和常见的图像信号处理方面还缺乏很好的解决方法^[3]。我们知道现在常见的数字水印图像攻击一般是对水印图像进行一定的信号处理, 基于离散小波变换(DWT)的变换域数字图像水印算法^[4]的研究得到了普遍关注, 而目前许多变换域水印算法在对抗常见的信号处理中能够表现出一定的鲁棒性, 但对一些常见的几何失真处理却失效了^[5]。另外一些抗几何攻击的水印方法虽然能够抵抗不同程度的几何攻击, 但却不能经受一定程度的图像信号处理^[6,7]。例如, 目前一些研究人员提出了利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的方法^[8,9]进行水印嵌入的算法, 在对诸如旋转、缩放等几何攻击方面取得了较好的效果, 但是却不能抵抗常见的图像信号处理。文献[8]对噪声攻击就非常敏感; 文献[10]采用将水印嵌入在每个高频子带中, 并利用多尺度图像登记的方法来检测校正水印图像所经历的几何变换。此算法虽然能抗几何攻击, 但对一些常规的图像处理如压缩却不具有较强的鲁棒性。如何兼顾两者是一个亟待解决的问题。

针对上述问题, 本文结合离散小波变换(DWT)和奇异值分解(SVD)的理论, 提出了一种基于离散小波变换(DWT)和

奇异值分解(SVD)的鲁棒性数字图像水印算法。首先对载体图像进行三级小波分解, 再对小波变换域的低频区域进行奇异值分解, 对经过混沌置乱的水印图像进行奇异值分解, 通过修改奇异值把水印信息嵌入到低频区域, 并且根据人眼视觉系统(HVS)在三级小波分解的中频区域修改小波系数嵌入经过混沌置乱的水印信息。水印检测时, 分别在低频区域和中频区域中提取水印, 对提取出的水印进行比较, 选择效果较好的水印作为检测水印。算法选取有意义的二值黑白图像作为水印信息, 并利用混沌序列进行置乱加密, 增强了水印信息的保密性。

1 原始水印图像的混沌置乱

1.1 混沌系统

混沌函数具有伸大拉长和折回重叠的性质, 它隶属于确定性系统却难以预测, 隐含于复杂系统却又不可分解, 看似混乱无序, 实则非常有规律。混沌序列是一个伪随机序列, 很容易由迭代方程或非线性方程或偏微分方程生成, 具有对初始条件和参数敏感等特点, 因此密钥(混沌模型、参数及初始值)具有惟一性。一个一维离散时间非线性动力系统定义如下:

$$x_{k+1} = f(x_k) \quad (1)$$

收稿日期: 2009-05-23; 修回日期: 2009-09-24 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60572011); 甘肃省自然科学基金资助项目(0803RJZA024)

作者简介: 张秋余(1966-), 男, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为图像理解与识别、信息隐藏与隐写分析; 李凯(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为信息隐藏与隐写分析(conesy@163.com); 袁占亭(1961-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为图像理解与识别、信息隐藏与隐写分析。

其中: $x_k \in V, k=0,1,2,3,\dots$, 称为状态; $f: V \rightarrow V$ 是一个非线性映射; V 是一个紧致度量空间, 将当前状态 x_k 映射到下一个状态 x_{k+1} , 如果从一个初始值 x_0 开始, 根据式(1)就可得到一个序列。

常用的一维混沌映射有 Logistic^[11]、Chebyshev、Kent 映射等。目前广泛研究的一维混沌系统是 Logistic 映射方程, 即

$$x_{k+1} = 1 - \mu x_k^2 \tag{2}$$

其中: $\mu \in [0, 2], x \in (-1, 1)$, 当 $1.401\ 15 < \mu < 2$ 时系统处于混沌状态。该系统具有计算简单, 混沌性好等特点, 给定 μ_0 和 x_0 两个初始参数, 根据式(2)就可以得到一个混沌序列, 并且不同的 μ_0 和 x_0 , 所得到的序列是非周期、不收敛、不相关的。

1.2 水印图像的混沌置乱

水印图像的混沌置乱正是利用了上述理论。设图像的大小为 $A = M \times N$, 用 Logistic 混沌映射序列对图像进行置乱。图像置乱方法如下:

- a) 用 Logistic 混沌映射产生一个长度为 $\{k_1, k_2, \dots, k_{M \times N}\}$ 的混沌序列。
- b) 对产生混沌序列元素进行大小排序, 形成有序序列 $\{k'_1, k'_2, \dots, k'_{M \times N}\}$, 并记下其置换位置 $\text{index}(i)$ 。
- c) 按置换地址 $\text{index}(i)$ 对图像 A 进行置换, 得到的置换图像 B 就是置乱加密后的图像。

水印图像的加密如图 1 所示。解密算法与加密算法相同, 利用置换位置 $\text{index}(i)$, 就可以根据相同的方法对置换后的图 B 像进行逆置乱得到原始图像 A , 实现图像的解密。

2 图像的奇异值分解及小波变换

2.1 图像的奇异值分解

数值分析中的奇异值分解 (SVD) 是一种将矩阵对角化的数值算法, 一幅数字图像可以看成是由一个许多非负标量组成的矩阵。在矩阵的各个元素上, 如果利用矩阵的奇异分解将图像矩阵分解, 就能够把图像的信息集中到奇异阵的少数奇异值上。用 $A \in R^{M \times N}$ 来表示这样一个图像矩阵。其中 R 表示实数数域, 不失一般性, 这里假设 $M \times N$ 。这样 A 就可以表示为

$$A = U \Sigma V^T \tag{3}$$

其中: $U \in R^{M \times N}$ 和 $V \in R^{M \times N}$ 都是正交阵, 上标 T 表示矩阵转置, $\Sigma \in R^{M \times N}$ 是一个非对角线上的项均为 0 的矩阵, 其对角线上的元素满足

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \dots \geq \lambda_r \geq \lambda_{r+1} \geq \lambda_m = 0 \tag{4}$$

其中: r 是 A 的秩, 它等于非零奇异值的个数, 所以有

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & & \\ & \lambda_2 & & & \\ & & \dots & & \\ & & & \lambda_r & \\ & & & & \lambda_{r+1} \\ & & & & & \lambda_m \end{pmatrix} \tag{5}$$

其中: λ_i 是由该分解所惟一确定的, 叫做 A 的奇异值^[12], 它是 AA^T 特征值的平方根; U 的列称为矩阵 A 的左奇异向量, V 的列称为矩阵 A 的右奇异向量, 分解式 $U \Sigma V^T$ 称做 A 的奇异值分解。

2.2 图像的小波变换

小波变换用于图像处理, 是将原图像分解为不同空间、不同频率的子带图像。二维的离散小波变换将一幅图分解后, 产生低频近似子带图像 LL, 水平细节子带图像 HL, 垂直细节子带图像 LH 和斜向细节子带图像 HH 共四个子带图像如图 2 所示。其中 LL 集中了图像的大部分能量, 这个分解过程可重复的用于分解 LL 部分。图像的三级小波分解如图 3 所示。

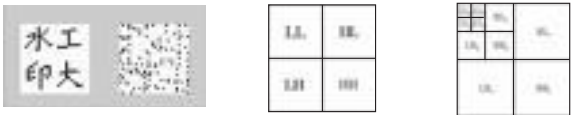


图1 图像的混沌置乱 图2 图像一级小波分解结构图 图3 图像三级小波分解结构图

根据图像小波分解特性, 低频带 LL_3 表示由小波变换分解级数决定的最大尺度、最小分辨率下对原始图像的最佳逼近, 图像的绝大部分能量集中在这个低频带。高频带系列则分别是图像在不同尺度、不同分辨率下的细节信息。

3 水印的嵌入和检测算法

3.1 水印的嵌入算法

- (1) 对载体图像 A 采用 Haar 小波进行三级离散小波变换, 产生 LL_3, HL_3, LH_3, HH_3 等共十个子带。
- (2) 对图像的中频区域 HL_3, LH_3 进行升序排序, 得到序列 C , 并记下排序的对应位置 $\text{ind}(i)$ 。
- (3) 利用乘法法则, 对 C 中绝对值大的系数嵌入经过前面所述的方法混沌置乱的水印信息 W 。

$$c'_i = c_i (1 + \alpha_1 w_i) \tag{6}$$

其中: α_1 的大小决定了水印信号修改图像频率的强度。

- (4) 根据第(2)步中的对应位置序列 $\text{ind}(i)$, 将修改后的中频序列 c'_i 赋值到原始的中频区域 HL_3, LH_3 相应的位置。

- (5) 在子带 LL_3 区域, 运用式(3)进行 SVD: $A = U \Sigma V^T$ 。其中: $\lambda_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为 Σ 的奇异值元素。

- (6) 对经过前面所述的方法混沌置乱的水印信息 W 运用 SVD, $W = U_w \Sigma_w V_w^T$ 。其中: $w_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为 Σ_w 的奇异值元素。

- (7) 修改子带 LL_3 的奇异值, 将(6)得到的水印图像的奇异值 w_i 嵌入到子带 LL_3 的奇异值 λ_i 中。

$$\lambda_i^* = \lambda_i + \alpha_2 \lambda_{w_i} \tag{7}$$

其中: $i=1, \dots, n, \alpha_2$ 为嵌入因子。

- (8) 用修改后的子带 LL_3 的奇异值集, 获得 DWT 子带 LL_3 嵌入水印信息后的系数

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

- (9) 利用(4)和(8)得到修改后的小波系数作离散小波反变换, 最终获得嵌有水印的图像。

3.2 水印的检测算法

- (1) 对已嵌入了水印的水印图像 A^* 运用 DWT, 产生 LL_3, HL_3, LH_3, HH_3 等共十个子带。

- (2) 在 LL_3 子带区域, 运用 SVD, $A^* = U \Sigma^* V^T$ 。
- (3) 提取出置乱水印图像的奇异值

$$\lambda_{w_i}^* = (\lambda_i^* - \lambda_i) / \alpha_2 \tag{8}$$

- (4) 利用 $W_1 = U_w \Sigma_w^* V_w^T$ 构造提取出水印图像, 根据混沌置乱密钥对 W_1 进行混沌逆置乱, 得到提取出的水印图像 W'_1 。

- (5) 根据对应位置序列 $\text{ind}(i)$ 和嵌入水印的序列大小, 确定在水印图像中频区域 HL_3, LH_3 中的嵌入位置, 得到嵌入水印的序列 c'_i 。

- (6) 利用式(9), 得到置乱水印信息 W_2 , 并根据混沌置乱密钥对 W_2 进行混沌逆置乱, 得到提取出的水印图像 W'_2 。

$$W_{2i} = (c'_i / c_i - 1) / \alpha_1 \tag{9}$$

- (7) 根据式(10)分别计算 W'_1, W'_2 与原始水印图像 W 的 NC 值得到两个值 ∂_1, ∂_2 (NC 为 normalized correlation 的缩写, 即归一化相似度, 反映了检测水印与原始水印之间的相似程度)。

$$NC = \frac{\sum_i \sum_j W(i, j) W^*(i, j)}{\sum_i \sum_j W(i, j)^2} \tag{10}$$

按下面的方式选择提取的水印图像

$$W' = \begin{cases} W'_1 & \text{if } \partial_1 \geq \partial_2 \\ W'_2 & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

最终得到提取出的水印图像 W' 。

4 实验结果

仿真实验选用 woman (256 × 256) 的灰度图像作为原始载体图像,汉字工大水印 (32 × 32) 作为嵌入的水印图像进行了一系列的实验。

由水印的不可见性这一特性,从视觉效果的角度,即使与原始图像放在一起比较,也感觉不到水印的存在,因此保证了嵌入过程中水印的不可察觉性的基本要求。客观上采用水印嵌入前后原始载体图像和水印图像的峰值信噪比 (PSNR) 作为客观评价标准评价图像的质量,定义如下:

$$PSNR = 10 \log_{10} (1/MSE) \quad (12)$$

$$MSE = \frac{\sum_i \sum_j [F'(i,j) - F(i,j)]^2}{N^2} \quad (13)$$

其中:MSE 为均方差, F' 为原始图像, F 为水印化的图像,PSNR 越大,图像的不可感知性越好,也就是图像改变较小。在未受攻击前水印的提取效果非常好,如图 4 所示。其中图 4 (a) 和 (c) 的 PSNR = 41.968 9, (b) 和 (d) 的 NC = 0.998 7。



图 4 水印算法结果

对于水印信号被嵌入到宿主信号的变换域系数这一大类方法,几何攻击是最为简单又非常有效的。目前诸多文献中并没有有效的方法解决这个问题。本文结合 SVD,并对提取出的水印进行比较,选择效果较好的水印作为检测水印,较好地解决了这一问题。下面从 SVD 的特性方面加以说明,一般的几何变形对图像的奇异值产生的影响,在文献 [13] 中提供了其理论分析如下:

a) 转置。 M 和它的转置矩阵 M^T 有相同的非零奇异值,即本水印对转置变形是稳健的。

b) 缩放。设 N 是 M 行放大后的图像,它是将 M 的每一行重复 P_1 次得到的,对 M 的每一个非零奇异值, P_1^* 的平方根是 N 的一个非零奇异值,设 O 是 M 列放大后的图像,它是将 M 的每一列重复 P_2 次得到的,对 M 的每一个非零奇异值, P_2^* 的平方根是 O 的一个非零奇异值。

c) 镜像。 M 和 M 的行镜像 M_{ra} 和 M 的列镜像 M_{ca} 都有相同的非零奇异值。

d) 旋转。 M 和 M_r (M_r 是图像 M 旋转任意角度后的图像) 有相同的非零奇异值。假设 $M_r \in R^{M \times N}$ 是图像 $M \in R^{M \times N}$ 旋转任意角度后的图像,那么总存在一个正交阵 $Q \in R^{M \times N}$,使得 $M_r = QM$ 。因此有 $M_r^T M_r = M^T Q^T Q M = M^T M$,故 M_r 与 M 有相同的非零奇异值。

本文给出该算法针对 JPEG 压缩、加高斯噪声、尺寸缩放、剪切、旋转等标准水印攻击的实验结果,如表 1 所示。设定水印提取有效的判断条件是 $NC > 0.5$,对于表 1 中所列的各种攻击,该算法均可抵御,因此本文提出的水印算法具有较强的鲁棒性。为了进一步验证所提方法的可行性,本文将其与一些类似方案进行了相应比较,结果如表 2 所示。

表 1 水印图像抗攻击实验结果

攻击类型	JPEG 压缩因子 80	JPEG 压缩因子 30	JPEG 压缩因子 5	锐化 80
NC	0.992 6	0.981 7	0.927 3	0.713 6
攻击类型	高斯噪声 0.3	3 × 3 中值滤波	高斯模糊 5 × 5	放大为 110%
NC	0.873 5	0.864 4	0.896 0	0.694 8
攻击类型	缩小为 80%	剪切 5%	旋转 90° 的整数倍	旋转 5°
NC	0.671 9	0.598 2	0.996 7	0.673 3

表 2 类似图像水印算法 NC 值对比

算法	高斯噪声 0.3	JPEG 压缩因子 80	3 × 3 中值滤波	旋转 5°
本文	0.873 5	0.992 6	0.864 4	0.673 3
DWT	0.885 7	0.983 7	0.872 5	0.134 1
SVD	0.627 9	0.861 4	0.742 2	0.813 6

5 结束语

本文提出了一种稳健的数字水印算法,在保证水印不可见的前提下,最大限度地提高了嵌入水印的信息量,增强了图像的旋转、缩放等抗几何攻击能力。在图像三级 DWT 变换的中频区域嵌入水印信息,提高了图像对滤波、噪声、压缩干扰的抵抗力。利用混沌映射置乱水印图像,增强了水印系统的安全性。水印检测时,对提取出的水印进行比较,选择效果较好的水印作为检测水印。实验结果表明该方法对一些常见的图像处理及几何攻击等均具有较好的鲁棒性,与直接使用 SVD 分解的水印算法或直接在 DWT 域嵌入水印的算法相比,这种方法具有更好的稳健性和可靠性。算法虽然一定程度上可以抵抗抗几何攻击,但是对尺度攻击的抵抗能力还有待提高。

参考文献:

[1] LICKS V, JORDAN R. Geometric attacks on image watermarking systems[J]. IEEE Multimedia, 2005, 12(3): 68-78.

[2] 楼偶俊,王钺旋. 基于特征点模板的 Contourlet 域抗几何攻击水印算法研究[J]. 计算机学报, 2009, 32(2): 308-317.

[3] 许文丽,李磊,王育民. 抗噪声、几何失真和 JPEG 压缩攻击的鲁棒数字水印方案[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 933-936.

[4] ANUSUDHA K, SANGEETHA A, AYESWARYA S. A robust digital watermarking of satellite image at third level DWT decomposition [C]//Proc of International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications. 2007: 78-82.

[5] 傅德胜,孙文静. 一种基于人眼视觉特性和小波变换域的图像数字水印技术[J]. 计算机科学, 2008, 35(11): 203-206.

[6] 袁大洋,肖俊,王颖. 数字图像水印算法抗几何攻击鲁棒性研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1251-1256.

[7] 李旭东. 抗几何攻击的空间域图像数字水印算法[J]. 自动化学报, 2008, 34(7): 832-837.

[8] 刘瑞桢,谭铁牛. 基于奇异值分解的数字图像水印方法[J]. 电子学报, 2001, 29(2): 168-171.

[9] 周波,陈健. 基于奇异值分解的、抗几何失真的数字水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(4): 507-512.

[10] KAEWKAMNERD N, RAO K R. Wavelet based watermarking detection using multiresolution image registration [C]//Proc of TENCON. 2000: 171-175.

[11] ZHANG Chang-jiang, WANG Jin-shan, WANG Xiao-dong. Digital image watermarking algorithm with double encryption by Arnold transform and logistic[J]. Networked Computing and Advanced Information Management, 2008, 1(9): 329-334.

[12] 陈大新. 矩阵理论[M]. 修订版. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.

[13] KARKARALA R, OGUMBONA P O. Signal analysis using a multi-resolution form of the singular value decomposition[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(5): 724-735.