

基于 DWT-SVD 和 Fibonacci 变换的彩色图像盲水印算法*

蔡宜嘉, 牛玉刚[†], 苏庆堂

(华东理工大学 化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 为提高水印鲁棒性, 将离散小波变换(DWT)、奇异值分解(SVD)和斐波纳契(Fibonacci)变换结合, 提出一种新的算法。首先, 用 Fibonacci 变换对拟嵌入的水印进行置乱处理; 然后, 对宿主彩色图像 R, G, B 三个分量进行二级小波变换和基于 4×4 分块的奇异值分解, 并用混沌序列选择若干对子块; 最后, 根据人类视觉系统(HVS)特性对三个分量分配嵌入量、确定嵌入强度, 并通过修改每对子块最大奇异值来实现水印嵌入。实验结果表明本方案具有良好的水印不可见性和鲁棒性。

关键词: 彩色图像; 数字水印; 离散小波变换; 奇异值分解; 人类视觉系统特性; 斐波纳契变换

中图分类号: TP393.04

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)08-3025-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.08.057

Blind watermarking algorithm for color images based on DWT-SVD and Fibonacci transformation

CAI Yi-jia, NIU Yu-gang[†], SU Qing-tang

(Key Laboratory of Advanced Control & Optimization for Chemical Processes, Ministry of Education, East China University of Science & Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: To improve the robustness of digital watermark, this paper proposed a novel robust watermarking algorithm for color images based on discrete wavelet transformation (DWT), SVD and Fibonacci transformation. Firstly, this algorithm adopted the Fibonacci transformation to scramble the original watermark before embedded. Then, it decomposed the R, G, B components of the host color image by 2-level-DWT, and partitioned the obtained sub-bands into non-overlapping blocks of 4×4 pixels and then applied SVD to the blocks. Meanwhile it used the chaotic sequence to select several couples of blocks. Finally, it determined the embedding capacity and the intensity of each component according to the characteristics of human vision system to meet the requirements of invisibility and embedded one bit of watermark by modifying the relative size of the first singular values of one couple blocks. Experimental results show that the proposed algorithm has a good performance in imperceptibility and robustness of watermark.

Key words: color image; digital watermark; discrete wavelet transformation; singular value decomposition(SVD); human visual system characteristics; Fibonacci transformation

0 引言

随着计算机网络和数字多媒体技术的迅猛发展, 数字作品被非法使用的情况日益严重, 因此, 近年来利用数字水印技术实现版权保护的问题日益受到人们关注, 并得到了广泛应用。

图像数字水印的实现方法大致可以分为空间域法和变换域法两类, 前者直接在数字图像的空间域上嵌入信息, 后者则先将图像由空间域变换到其他域, 在其他域上嵌入信息后再恢复到原始空间域。由于变换域嵌入算法具有抗攻击能力强的特点, 因而成为目前较为流行的算法。目前已有的变换域数字水印技术, 主要包括离散傅里叶变换(DFT)、离散余弦变换(DCT)、离散小波变换(DWT)、哈达马变换(Hadamard transformation)、Fresnel 变换、矢量变换、KLT 变换、Gabor 变换、Zernike

变换等, 其中 DFT、DCT 和 DWT 比较常用。

离散小波变换具有能较好匹配 HVS 的特性, 并且与 JPEG2000 和 MPEG-4 等压缩标准兼容, 因此, 利用小波变换产生的水印具有良好的视觉效果和抵抗多种攻击的能力。师晶等人^[1]提出了一种基于离散小波变换和奇异值分解的水印算法。该算法首先将载体图像进行小波变换, 然后分块后进行奇异值分解, 对水印图像做一定的预处理之后也进行奇异值分解, 选取奇异值嵌入到载体图像中, 算法具有较强的鲁棒性。然而, 值得注意的是, 由于文献[1]算法仅将水印图像的奇异值嵌入载体图像中, 有可能会产生虚警率高的问题。该缺陷同样也存在于文献[2,3]的算法中。另外, 周鹏颖等人^[4]提出的算法对原始图像进行多级小波分解后的部分子带作奇异值分解, 并将水印置乱后再进行分块离散余弦变换, 然后将它嵌

收稿日期: 2011-12-18; 修回日期: 2012-02-14 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61074041); 山东省科技发展计划资助项目(2011GGB01203)

作者简介: 蔡宜嘉(1988-), 女, 湖北襄阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为数字水印和图像处理; 牛玉刚(1964-), 男(通信作者), 辽宁营口人, 教授, 博导, 主要研究方向为非线性控制、随机系统、鲁棒控制和智能信息处理等(acniuyg@ecust.edu.cn); 苏庆堂, 男(1971-), 山东烟台人, 讲师, 博士, 主要研究方向为数字水印、计算机网络与通信。

入到中间奇异值及其周围的部分矩阵块中,这样就不存在虚警率高的问题,但文献[4]算法未能实现盲提取,并且实现比较复杂。由于离散小波变换具有与 HVS 特征良好匹配的优良特性以及矩阵奇异值非常稳定的特点,本文提出一种基于 DWT-SVD 的鲁棒性数字水印新算法。

1 基于 DWT-SVD 的水印算法思想

水印的不可见性和鲁棒性是对水印算法的两个基本要求,然而两者是相互制约的。

1.1 Fibonacci 变换

给定 N 为 ≥ 2 的整数,下列变换称为 Fibonacci 变换:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = Q \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \pmod{N} \quad (1)$$

其中: (x, y) 为图像矩阵像素的行列坐标; (x', y') 为映射以后的坐标; N 为图像矩阵的阶数。Fibonacci 变换具有周期性,当 $N \geq 2$ 且阶数相同时, Fibonacci 变换的周期是 Arnold 变换周期的 2 倍^[5],从而为水印算法提供了更大的密钥空间,增强了水印的安全性。此外,由于 Fibonacci 变换具有均匀性^[6],水印图像经过较少次变换后即可均匀地分散在原始图像中,一方面,降低了水印嵌入对载体图像的影响;另一方面,当含水印图像受攻击后,损坏的水印比特也均匀地分散在图像中,降低了攻击对图像视觉效果的影响,从而提高了水印的鲁棒性。

基于以上特性,本文考虑在水印嵌入前,采用 Fibonacci 变换对水印图像进行预处理,并将变换次数作为密钥保存,以便提取水印时使用。

1.2 图像的奇异值分解

从线性代数的角度来看,图像 $f(x, y)$ 可以看成是由许多非负标量组成的矩阵。设 $A \in R^{n \times n}$ 表示这样一个图像矩阵,对矩阵 A 进行奇异值分解:

$$A = U \Sigma V^T \quad (2)$$

其中: U 和 V 是正交矩阵; Σ 为对角矩阵,其对角线上的元素 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ 称为矩阵 A 的奇异值,且满足: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r \geq \sigma_{r+1} = \dots = \sigma_n = 0$ 。 r 是 A 的秩,其为非负奇异值的个数。

在数字图像处理中,运用奇异值分解技术主要有以下几个方面的优势:a) 图像奇异值的稳定性非常好,即当图像被施加小的扰动时,图像的奇异值不会有大的变化,周波等人^[7]已经证明图像的奇异值对转置、镜像、旋转、放大和平移等失真稳健的;b) 奇异值反映的是图像内蕴特性而不是视觉特性,即奇异值反映的是图像矩阵元素之间的关系,水印算法通过改变奇异值而实现水印信息的嵌入,不会影响到原始图像的视觉效果,保证水印具有良好的透明性^[8]。本文算法正是利用了 SVD 特征,对图像进行分块奇异值分解,通过修改一对像素块的最大奇异值的相对大小关系来实现水印的嵌入。

1.3 嵌入位置的选择

合理选择水印嵌入位置,在保证不可见性的前提下使含水印作品具有更高的鲁棒性,成为水印算法研究的重点和难点。

二维数字图像经一级小波分解后得到四个子图像 LL、LH、HL、HH。根据 HVS 特性,人眼对不同方向不同层次的中高频子带图像的噪声、失真不是非常敏感。本文提出的算法中选择二级小波变换的子带 HL2 和 LH2 作为水印的嵌入区域,然后采用 Logistic 映射生成混沌序列,利用其伪随机性对水印

的嵌入位置进行定位,增强了水印的安全性。

1.4 嵌入强度和嵌入容量的确定

与水印嵌入位置一样,嵌入强度也是影响水印不可见性和鲁棒性的关键因素。根据 HVS 的光谱特性,人眼对不同颜色的敏感度不同^[9]。一个像素点的亮度 Y 表示为

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.144B \quad (3)$$

由式(3)可以看出,人眼对绿色最敏感,对蓝色最不敏感。针对这个特点,在 R, G, B 三层中嵌入时采用不同的嵌强度,且满足: $\alpha_R : \alpha_G : \alpha_B = \frac{1}{0.299} : \frac{1}{0.587} : \frac{1}{0.144}$ 。

此外,根据 HVS 亮度掩蔽特点,人眼对亮度强区域的失真不敏感。本文中对于彩色载体图像,分别统计其 R, G, B 三层像素平均值,三层的水印容量正比于三层灰度图像的像素平均值。

2 DWT-SVD 水印算法方案

2.1 水印嵌入过程

本算法中原始彩色载体图像记为 I , 采用 RGB 模型, 大小为 $N \times N$ 。二值水印图像记为 W , 大小为 $M \times M$ 。具体嵌入步骤如下:

a) 对水印图像 W 进行 Fibonacci 置乱, 置乱次数为 K , 且作为密钥保存。置乱后的水印图像记为 $\hat{W}$ 。

b) 将载体图像 I 分解为 R, G, B 三个分量。统计原始图像 R, G, B 三个分量的像素平均值, 分别记为 aR, aG, aB , 水印在三个分量中的嵌入量记为 W_i , 其中 $i \in \{R, G, B\}$, 且满足关系: $W_R : W_G : W_B = aR : aG : aB$ 。

c) 对 R, G, B 三个分量分别进行二级离散小波变换, 得到 HL2 _{i} 和 LH2 _{i} , 每一个子带大小为 $(M \times M) / (4 \times 4)$ 。分别对 HL2 _{i} 和 LH2 _{i} 进行 4×4 分块, 每一个分块分别记为 DHL2 _{i} ^{k} 和 DLH2 _{i} ^{k} , 其中 $i \in \{R, G, B\}$, $k \in \{1, 2, \dots, (M \times M) / (4 \times 4)^2\}$ 。

d) 用 Logistic 映射产生混沌序列^[10], 对水印嵌入块进行选择。选定分叉参数 $\mu \in (3.5699456, 4]$ 和初值 $x_0 \in (0, 1)$, 生成混沌序列 S_R, S_G, S_B 。对 R, G, B 三个分量, 根据每一层的嵌入容量, 混沌序列的长度分别为 W_R, W_G, W_B 。以 R 层为例, 定位方法为: 对于第 K 个水印位, 选择第 $x_k \times (M \times M) / (4 \times 4)^2$ 个 DHL2 _{R} 和 DLH2 _{R} 子块进行下一步的操作。本步骤中的分叉参数和初值皆作为密钥保存, 以便提取水印时使用。

e) 对 d) 中选定的子块进行 SVD 分解, $DHL2_R^k = UH_R^k \times SH_R^k \times VH_R^k$, $DLH2_R^k = UV_R^k \times SV_R^k \times VV_R^k$ 。通过调整对应的 $SH_i^k(1, 1)$ 与 $SV_i^k(1, 1)$ 的大小关系来实现水印的嵌入, $i \in \{R, G, B\}$ 。具体嵌入方法如下:

$$\text{if } \hat{W}_i(k) = 0, \begin{cases} SHW_i^k(1, 1) = \frac{SH_i^k(1, 1) + SV_i^k(1, 1)}{2} + \alpha_i, \\ SVW_i^k(1, 1) = \frac{SH_i^k(1, 1) + SV_i^k(1, 1)}{2} - \alpha_i \end{cases}$$

$$\text{else, } \begin{cases} SHW_i^k(1, 1) = \frac{SH_i^k(1, 1) + SV_i^k(1, 1)}{2} - \alpha_i \\ SVW_i^k(1, 1) = \frac{SH_i^k(1, 1) + SV_i^k(1, 1)}{2} + \alpha_i \end{cases} \quad (4)$$

其中: α_i 为嵌入强度; $i \in \{R, G, B\}$; $k \in \{1, 2, \dots, w_i\}$; $\alpha_R = Q / 0.299$; $\alpha_G = Q / 0.587$; $\alpha_B = Q / 0.144$, Q 定义为强度因子; SHW_i 和 SVW_i 分别为修改后的奇异值矩阵。

f) 利用修改后的奇异值矩阵 SHW 和 SVW 以及原始的

UH, VH^T, UV, VV^T 进行逆奇异值分解, 再进行二级 IDWT, 重构得到嵌入水印后的图像 I_w 。

2.2 水印提取过程

水印的提取过程为嵌入过程的逆过程。

a) 首先统计待检测图像 R, G, B 三个分量的像素平均值, 得到三个分量中嵌入的水印量。分别对三个分量进行二级 DWT, 取 HL2 和 LH2 进行 4×4 分块, 子块记为 $DHL2W_i^k, DLH2W_i^k$ 。

b) 利用分叉参数和初值生成和嵌入过程中相同的三个混沌序列, 确定嵌入了水印的子块, 对这些子块进行 SVD 分解, 奇异值矩阵记为 shw_i^k, svw_i^k 。

c) 比较对应的 shw_i^k, svw_i^k 中第一个奇异值的大小关系来提取水印:

$$\hat{w} = \begin{cases} 0 & \text{if } shw(1,1) > svw(1,1) \\ 1 & \text{if } svw(1,1) > shw(1,1) \end{cases} \quad (5)$$

d) 对 $\hat{w}$ 进行 Fibonacci 反变换, 即可得到提取出的水印。

3 实验结果

本文实验分别采用了三幅 512×512 的彩色图像作为载体图像, 如图 1 所示。水印图像为 32×32 的二值图像, Fibonacci 置乱次数 $k = 20$ 。原始水印图像和置乱后的水印图像如图 2 所示。混沌序列分叉参数 $\mu_R = \mu_G = \mu_B = 3.6233$, 初值 $x_{0R} = x_{0G} = x_{0B} = 0.5$ 。强度因子 $Q = 11.7$ 。

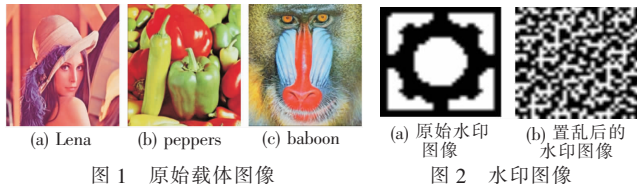


图1 原始载体图像

图2 水印图像

本文采用峰值信噪比 PSNR 来对水印的不可见性进行评价, 并采用归一化相关系数 NC 值来衡量提取出的水印与原始水印的相似性。含水印图像未经受攻击时, 相应的 PSNR 值、NC 值如表 1 所示。

表1 含水印的图像以及未受攻击时所提取的水印

宿主图像	嵌入水印后的图像	PSNR/dB	提出的水印	NC
Lena		40.585 9		1.000 0
Peppers		40.505 8		0.996 2
Baboon		41.135 0		0.981 6

根据人类视觉模型理论知, 当 $PSNR \geq 37.5$ 时, 人眼对图像所做的修改是不可识别的。因此, 本算法水印具有良好的不可见性。当含有水印的图像未经受攻击时, 采用本文算法从三幅彩色载体图像中均能正确地提取出水印。

为了验证本文所提出算法的有效性, 分别对三幅含水印图像进行 JPEG2000 压缩、椒盐噪声攻击、高斯噪声攻击、滤波、缩放、旋转和剪切攻击后提取出水印, 并与文献[11]算法的实验结果进行了比较, 表 2~8 给出了相应的比较结果。其中, 表 2 是对含有水印的图像进行 JPEG2000 压缩后提取出水印的相关系数, 当压缩比达到 60 时, 提取出水印的 NC 值仍然在 0.6

以上, 说明本文提出的算法对 JPEG2000 压缩有很强的鲁棒性。表 3 和 4 分别是对含水印图像加椒盐噪声和高斯噪声后提取出的水印与原水印的相关系数, 可见本文提出的算法抵抗这两种攻击的性能较好。表 5 是对含水印图像进行巴特沃斯低通滤波和中值滤波得到的结果。表 6 是对含水印图像进行缩放攻击后再提取出水印的相关系数, 由表中数据可见采用本文算法对缩放攻击也具有较强的鲁棒性。采用本文算法得到的含水印图像对旋转攻击的鲁棒性较差, 如表 7 所示。以含水印的 Lena 图像为例, 对含水印图像进行剪切攻击的实验结果如表 8 所示。可见, 采用本文算法嵌入水印后, 当剪切掉含水印图像的大部分像素时, 仍然能较好地提取出水印, 表明本文提出的算法对剪切攻击具有较强的鲁棒性。

表2 JPEG2000 压缩

压缩比		10	20	40	60
本文	Lena	0.990 8	0.958 5	0.896 3	0.816 0
	peppers	0.977 0	0.914 7	0.885 7	0.714 3
	baboon	0.963 1	0.856 4	0.729 0	0.653 0
文献[11]	Lena	0.963 1	0.854 8	0.592 2	0.516 1
	peppers	0.950 3	0.902 4	0.589 9	0.504 3
	baboon	0.948 6	0.807 4	0.570 6	0.513 3

表3 椒盐噪声攻击

椒盐噪声密度		0.2%	1%	2%	5%
本文	Lena	0.983 9	0.924 0	0.868 7	0.771 9
	peppers	0.972 4	0.933 2	0.924 0	0.728 8
	baboon	0.974 7	0.937 8	0.896 3	0.827 2
文献[11]	Lena	0.942 4	0.705 1	0.571 4	0.530 0
	peppers	0.950 7	0.716 2	0.583 7	0.539 1
	baboon	0.947 8	0.709 8	0.576 7	0.528 7

表4 高斯噪声攻击

高斯噪声方差		0.001	0.005	0.01	0.02
本文	Lena	0.981 6	0.880 3	0.818 0	0.716 6
	peppers	0.981 6	0.871 0	0.806 5	0.686 6
	baboon	0.979 3	0.921 7	0.857 1	0.760 4
文献[11]	Lena	0.926 3	0.878 3	0.7369	0.618 4
	peppers	0.901 2	0.860 5	0.729 9	0.604 3
	baboon	0.917 8	0.870 6	0.733 6	0.612 5

表5 滤波攻击

滤波器类型参数		低通滤波		中值滤波	
		$n = 2$	$n = 5$	3×3	5×5
本文	Lena	0.983 9	0.970 0	0.972 4	0.850 3
	peppers	0.944 7	0.930 9	0.917 1	0.741 9
	baboon	0.960 8	0.956 2	0.924 0	0.728 1
文献[11]	Lena	0.914 7	0.850 3	0.953 9	0.826 7
	peppers	0.906 5	0.886 4	0.907 3	0.765 3
	baboon	0.890 4	0.847 6	0.919 8	0.732 8

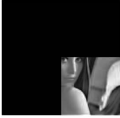
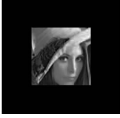
表6 缩放攻击

缩放尺度		0.6	0.8	1.2	1.4
本文	Lena	0.913 2	0.979 5	0.981 5	0.993 7
	peppers	0.815 7	0.940 1	0.949 3	0.974 7
	baboon	0.755 8	0.951 6	0.971 6	0.972 4
文献[11]	Lena	0.879 4	0.931 6	0.957 8	0.977 3
	peppers	0.772 8	0.895 1	0.940 3	0.976 8
	baboon	0.753 1	0.913 4	0.958 2	0.961 6

表7 旋转攻击

旋转角度		0.5°	1°	10°	45°
本文	Lena	0.842 9	0.776 5	0.679 4	0.594 5
	peppers	0.695 9	0.693 5	0.559 9	0.606 0
	baboon	0.808 8	0.657 6	0.477 6	0.587 6
文献[11]	Lena	0.726 1	0.695 4	0.573 6	0.593 9
	peppers	0.733 8	0.629 6	0.518 1	0.501 7
	baboon	0.701 2	0.605 3	0.407 5	0.506 2

表 8 剪切攻击

	剪切方式	本文	文献[11]
剪掉左上角 1/4			
剪掉左上角 9/16			
保留右下角 1/4			
保留中心 1/4			

4 结束语

本文提出了一种基于 DWT-SVD 的数字水印新算法,充分利用了 HVS 的光谱特性和亮度掩蔽特性来对彩色载体图像的 R 、 G 、 B 三个分量进行嵌入容量的分配和嵌入强度的确定,在保证水印不可见性的前提下尽可能地提高了水印的鲁棒性。算法通过调整一对奇异值的大小关系进行调整来实现水印的嵌入,突破了加性算法、乘性算法等传统的水印嵌入方法,解决了被提取水印中含有原始图像频率系数从而影响水印检测准确性的问题,同时实现了水印的盲提取。此外,在水印嵌入前,用 Fibonacci 变换对水印进行了预处理,为算法提供了更大的密钥空间,进一步增强了水印安全性。本文算法的不足之处在

于水印容量不够大,今后需进一步改进以增加水印容量。

参考文献:

- [1] 师晶,林克正,秦丽萍.基于 DWT 和 SVD 的改进分块图像水印算法[J].哈尔滨理工大学学报,2009,14(5):35-38.
- [2] BHATNAGAR G, WU Q M J. A new robust reference watermarking framework in gyrator domain[C]//Proc of the 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. [S. l.]: IEEE Press, 2011:648-651.
- [3] ABDALLAH E E, BHATTACHARYA P, HAMZA A B. An image watermarking scheme using fast Hadamard transform and singular value decomposition[C]//Proc of the 18th International Conference on Pattern Recognition. 2006:673-676.
- [4] 周鹏颖,沈磊,田小林,等.基于小波—奇异值分解的数字水印新算法[J].计算机应用研究,2010,27(5):1896-1898.
- [5] 李用江,张辰光,李昌利,等.猫映射周期性与 Fibonacci 模数列周期性的内在联系[J].计算机应用,2010,30(4):1029-1032.
- [6] ZOU Jian-cheng, WARD R K, QI Dong-xu. A new digital image scrambling method based on Fibonacci numbers[C]//Proc of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. [S. l.]: IEEE Press, 2004:965-968.
- [7] 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):506-512.
- [8] RUN R S, HORNG S J, LAI J L, et al. An improved SVD-based watermarking technique for copyright protection[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(1): 673-689.
- [9] 王丽娜,郭迟,李鹏.信息隐藏技术[M].1版.武汉:武汉大学出版社,2004:268-271.
- [10] 黄润生,黄浩.混沌及其应用[M].2版.武汉:武汉大学出版社,2005:134-146.
- [11] WANG Hui-qin, ZHAO Min. A blind watermarking algorithm for color image based on singular value quantization[C]//Proc of the 6th International Conference on Digital Content, Multimedia Technology and its Applications. 2010:59-62.