

一种基于 DWT 和 SVD 的双重水印算法

雍士华, 马小虎

(苏州大学 计算机科学与技术学院, 江苏 苏州 215006)

[摘要] 提出了一种基于离散小波变换 (DWT) 和奇异值分解 (SVD) 的双重水印算法, 其所嵌入的水印是由两幅不同的水印图像组成, 将其中的一幅水印图像嵌入到另一幅水印中得到双重水印图像, 对双重水印图像进行 Arnold 变换, 然后再将其嵌入到宿主图像中. 当数字产品遭到恶意破解后, 水印中仍然有一层水印信息, 可以更好地维护版权信息. 实验结果证明了该方法对于 JPEG 压缩、噪声、旋转、剪切等具有很好的鲁棒性.

[关键词] 双重数字水印, 离散小波变换, 奇异值分解, 置乱变换

[中图分类号] TP 391 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)04-0103-05

An Algorithm of Double-Level Watermarking Based on DWT and SVD

Yong Shihua Ma Xiaohu

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China)

**Abstract** An algorithm of double-level watermarking based on DWT and SVD is proposed in this paper. The embedded watermarking image consists of two different images. Firstly, one image is embedded into another, then Arnold transform is performed on the mixed image, which is later embedded into the host image. If the mixed watermarking information is got viciously, a level of deep-seated watermarking still remains to protect the copyright better. Experimental results at a level of demonstrate that the proposed approach is robust against common signal processing such as JPEG compression, noise, rotation and cropping.

**Key words** double-level watermarking, DWT, SVD, Arnold transform

随着信息化产业的迅速发展, 信息媒体的数字化为信息的存取提供了极大的便利性, 数字产品的传播和复制变得越来越容易, 用户可以方便地下载或拷贝数字作品 (图片、音乐、视频), 由此带来的版权纠纷也越来越尖锐化, 数字水印技术的出现, 则在一定程度上缓解了这一矛盾<sup>[1]</sup>.

不可感知性和鲁棒性是用于版权保护的两个最重要的特性. 同时, 水印嵌入的大小也是衡量水印系统的一个重要指标. 这 3 种特性是数字水印的基本要素, 它们之间的关系是相互制约的. 目前水印的实现主要包括空间域水印算法和变换域水印算法. 空间域算法是通过改变图像的最不重要位来嵌入水印, 而变换域算法则是通过改变图像的变换域系数来嵌入水印. 综合水印的不可见性和鲁棒性, 变换域算法性能更加优越.

小波变换有着良好的能量压缩特性和多分辨率分解特性. 奇异值分解在经受一般攻击后变换不大<sup>[2]</sup>, 本文充分利用 DWT 和 SVD 这些性质, 在兼顾水印的不可感知性和鲁棒性的同时, 提高了水印的嵌入量, 在水印系统中取得了一个很好的折衷.

1 相关技术

1.1 小波变换

小波变换在图像处理中的基本思想是把图像进行多分辨率分解, 生成不同空间和独立频带的子图

收稿日期: 2008-06-18  
基金项目: 江苏省自然科学基金 (BK2007050) 资助项目.  
通讯联系人: 马小虎, 博士, 教授, 研究方向: 计算机图形学和图像处理技术等. E-mail: xhm@suda.edu.cn

像, 然后对子图像的系数进行处理. 图像是二维信号, 需要在行和列上分别进行一维小波变换<sup>[3]</sup>. 对图像进行小波分解, 产生  $HL_j$ ,  $HL_j$ ,  $HH_j$  3 个高频带系数和 1 个  $LL_j$  低频带系数, 其中低频带表示由小波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, 它的统计特征和原图相似, 图像的大部分能量集中在此. 高频带系数则分别是图像在不同尺度、不同分辨率下的细节信息. 分辨率越低, 有用信息的比例就越高, 即经过小波分解把一个图像分成了若干级. 对于同一级图像, 低频子图像  $LL_j$  最重要, 其次是  $HL_j$  与  $HL_j$ , 高频子图像  $HH_j$  相对最不重要<sup>[4]</sup>. 根据人类的视觉特征, 人眼对低频部分的变化比较敏感, 而对高频部分的变化不是很敏感. 如果将水印加在高频部分, 虽然不易被觉察到, 但经过一定的图像处理, 信息容易丢失, 其鲁棒性不够强, 所以应该在人类的视觉特性与水印的不可见性以及鲁棒性之间进行一个权衡.

## 1.2 奇异值分解

奇异值分解是最有效分析矩阵的数值分析工具, 是一种将矩阵对角化的数值分析方法. 对于任意一个  $M \times N$  图像矩阵  $A \in R^{M \times N}$  都可分解成 3 个矩阵之积:

$$A = USV^T, \quad (1)$$

其中,  $U \in R^{M \times M}$ ,  $V \in R^{N \times N}$  是 2 个酉矩阵, 即  $UU^T = E$ ,  $VV^T = E$ .  $S$  表示元素为非负的对角阵, 其对角线上的元素满足:  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_r \geq \lambda_{r+1} = \dots = \lambda_m = 0$  其中  $r$  是  $A$  的秩, 它等于非负奇异值的个数.  $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, m)$  就叫做矩阵  $A$  的奇异值, 是  $AA^T$  特征值的平方根.

从图像处理的角度来看, 奇异值分解有如下特性<sup>[5]</sup>:

- (1) 图像奇异值的稳定性非常好, 当图像被施加小的扰动时, 奇异值不会有很大的变化.
- (2) 奇异值对应于图像的亮度特征, 其向量表征了图像的几何特征, 奇异值所表现的是图像的内蕴特性而非视觉特性, 反应的是图像矩阵元素之间的关系.

图像的奇异值对几何失真具有不变性, 因此在图像的奇异值中嵌入水印对几何攻击具有很好的鲁棒性.

## 1.3 Arnold 变换

置乱技术是随着信息的安全与保密被重视而发展起来的图像加密技术, 近几年来发展很快, 常用的基于空间像素坐标置乱的方法有 Arnold 置乱、幻方置乱、Hilbert 曲线置乱等<sup>[6]</sup>. 合理地选择参数、控制算法的选择、使用随机数技术, 从而可以达到阻止非法使用者获得图像内容的目的. 文中选择 Arnold 变换作为水印图像的预处理方法.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{N}, \quad (2)$$

式中,  $(x, y)^T$ 、 $(x', y')^T$  分别为原图像和变换后图像的像素位置;  $N$  是图像矩阵的阶数. 利用上式逐一对图像的像素坐标做变换, 当遍历图像所有像素点之后, 便产生了原图像置乱后的图像. Arnold 变换具有周期性, 即将一幅图像进行 Arnold 变换若干次以后, 可以得到原图像. 数字水印技术正是利用这个特性, 先将要嵌入到数字产品中的数字水印图像进行置乱, 然后再利用各种算法将其嵌入到数字产品中, 当该数字产品遭到用户的修改或是恶意攻击时, 数字产品的某一部分会遭到损坏或丢失. 若是数字产品中嵌入有水印以后, 虽然也有部分信息遭到损坏或是丢失, 但是当遭到损坏的数字水印提取出来后, 再继续利用 Arnold 变换可以恢复数字水印图像. 由于在恢复的过程中, Arnold 变换将会把原先遭到损坏的比特分散开来, 减少其对人类视觉的影响, 提高了数字水印的鲁棒性.

# 2 水印的嵌入和提取算法

## 2.1 水印的嵌入算法

(1) 将第一层水印图像  $W1(64 \times 64)$  (如图 1(a) 所示) 做小波变换, 得到低频子带  $ca1$ , 将  $ca1$  做奇异值分解得到  $U1, D1, V1$ .

(2) 将第二层水印图像  $W2(32 \times 32)$  (如图 1(b) 所示) 嵌入到第一层水印中  $D1$  中, 得  $D1' = D1 + \alpha W2$  其中  $\alpha$  为嵌入强度因子. 对  $D1'$  做奇异值分解, 再经反变换得到  $ca1'$ , 然后做逆小波变换得到双重水印  $W$ . 如图 2(a) 所示.

(3) 将得到的双重水印图像做 Arnold 变换, 得到  $W'$  如图 2(b) 所示. 置乱次数  $k1$  作为密钥保存.

(4) 将原始图像  $I(Lena 512 \times 512)$  (如图 3(a) 所示) 进行 3 层小波变换得到第三层低频子带  $ca3$  再



图 1 两层水印原始图像  
Fig.1 Two original watermarking images



图 2 双重水印图像及置乱后的双重水印图像  
Fig.2 Double-level watermarking image and chaotic double-level watermarking image

对  $cA3$  做奇异值分解得到  $U3D3V3$   
(5) 将置乱后的双重水印嵌入到  $D3$  中, 得  $D3' = D3 + \alpha W'$ , 其中  $\alpha$  为嵌入强度因子. 对  $D3'$  做奇异值分解得到  $U4D4V4$ , 再做逆变换得到  $cA3'$ , 然后做 3 次小波逆变换得到含有双重水印的图像  $I'(512 \times 512)$ , 如图 3(b) 所示.

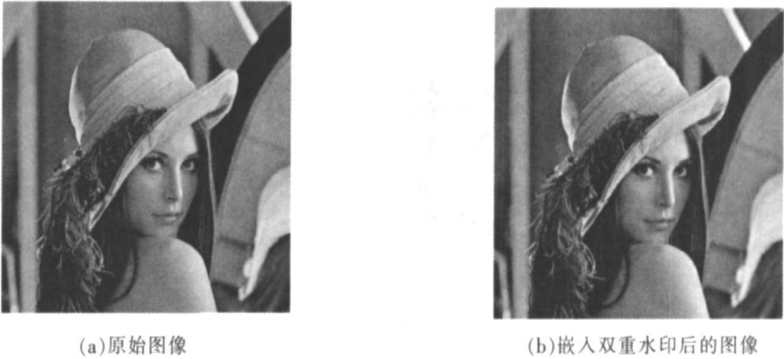


图 3 原始图像和嵌入水印后的图像  
Fig.3 Original image and watermarked image

2.2 水印的提取算法

- (1) 对可能遭到攻击的图像  $I'$  做 3 层小波变换得到第三层低频子带  $CA3$ , 对  $CA3$  做奇异值分解得到  $U5D5V5$
- (2) 根据上面得到的  $U4D4V4$  做  $D5' = U4 \times D5 \times V4^T$ . 再根据  $W' = (D5' - D3) / \alpha$  从而得到嵌入图像中的置乱后的双重水印图像.
- (3) 将得到的置乱后的双重水印图像结合密钥  $k1$  做 Arnold 变换, 恢复双重水印图像.
- (4) 将提取出来的双重水印做一次小波变换, 得到低频子带  $a1$ , 对  $a1$  做奇异值分解得到  $u, d, v$
- (5) 联合  $U2, V2$  做  $DD = U2 \times d \times V2^T$ . 再根据  $W2' = (DD - D1) / \alpha$  最终可以第二层水印图像, 即将第一层和第二层水印图像分开.

表 1 各种攻击下的性能实验数据

Table 1 Performance experimental data of all attacks

攻击方式	PSNR 值	第一层水印	第二层水印
		NC1	NC2
椒盐噪声 (0.5%)	27.730 0	0.998 8	0.922 2
高斯噪声 (0.5%)	22.815 1	0.998 9	0.926 1
旋转	15°	0.991 3	0.835 4
	30°	0.994 5	0.808 2
	1/64	0.997 6	0.894 5
剪切	1/16	0.985 5	0.774 1
	1/4	0.979 1	0.646 1
中值	[3 3]	0.998 7	0.916 1
滤波	[5 5]	0.997 5	0.891 2
JPEG	Q = 70	0.999 0	0.928 2
	Q = 50	0.998 9	0.927 9
压缩	Q = 20	0.998 9	0.926 7

3 实验结果分析

为了验证本文提出的算法, 我们在 Matlab 6.5 环境下进行了仿真实验. 所用的原始图像的灰度级为 256 级, 大小为  $512 \times 512$  的 Lena 图像. 选用  $64 \times 64$  的标志图像作为第一层水印图像, 选用  $32 \times 32$  的标志图像作为第二层水印图像. 然后按照本文提出的水印嵌入算法和提取算法进行实验. 嵌入强度  $\alpha = 0.5$ . 由于论文篇幅有限, 实验结果仅用图 4 ~ 图 7 给出部分实例, 在各种攻击下的性能实验数据如表 1 所示. 除了人眼的主观感觉外, 本文还采用峰值信噪比 PSNR (Peak Signal Noise Ratio) 作为水印

图像的客观评价标准,采用相关系数 NC(Normalized Correlation) 作为提取水印与原始水印相似性的评价标准. 峰值信噪比的公式如下:

$$PSNR = 10\lg\left(\frac{255^2}{MSE}\right),$$

( 3 )

其中,

$$MSE = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (W_{ij} - W'_{ij})^2,$$

( 4 )

$W_{ij}$  为原始水印像素值;  $W'_{ij}$  为提取的水印像素值;  $M, N$  为水印图像的宽度和高度.

$$NC(W, W') = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i, j)W'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W(i, j)^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N W'(i, j)^2}}.$$

( 5 )

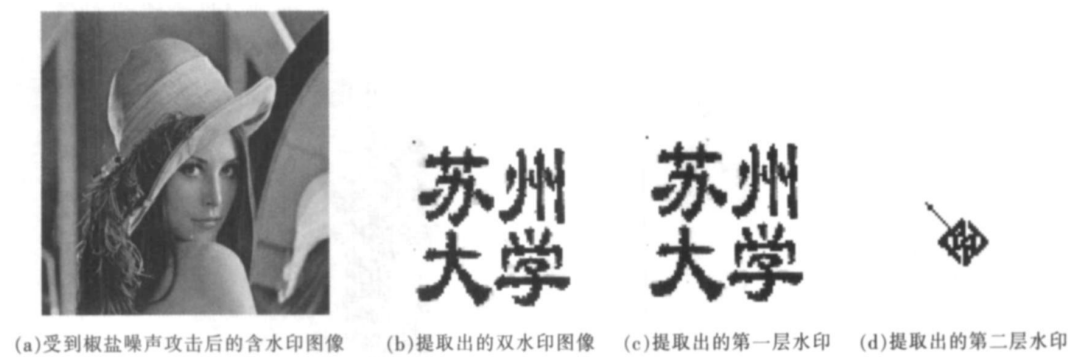


图 4 椒盐噪声(0.5%)攻击  
Fig.4 Salt and pepper(0.5%)attack



图 5 旋转 15°攻击  
Fig.5 Rotate( 15°) attack



图 6 剪切(1/16)攻击  
Fig.6 Crop(1/16)attack



(a)JPEG 压缩后的含水印图像



(b)提取出的双重水印图像



(c)提取出的第一层水印



(d)提取出的第二层水印

图 7 JPEG 压缩(Q=50)攻击

Fig.7 JPEG(Q=50)attack

从以上实验数据可以看出, 本文提出的水印方案对于 JPEG 压缩、噪声、旋转、剪切、中值滤波有很强的鲁棒性. 遭受到攻击以后, 所提取出的水印相似度很高. 本算法对噪声攻击有着很好的鲁棒性, 综合各参数可以看出高斯噪声比椒盐噪声的影响更大; 旋转攻击和剪切攻击对图像的 PSNR 影响较大, 使得图像质量明显下降. 从表 1 中的数据可以看出旋转、剪切对第一层水印造成的影响较小, 即便旋转角度达到  $30^\circ$ 、剪切面积达到  $1/4$  提取出的第一层水印的相似度仍然很高, 但第二层水印的相似度变换就非常迅速, 其原因主要是因为第二层水印的大小仅为  $32 \times 32$  随着旋转的角度增加以及剪切面积的增加, 被破坏的比列也就迅速增加, 故第二层水印受影响较大; 随着中值滤波的窗口变大, 对图像产生的影响越大, 尤其是 PSNR 下降的幅度比较大, 图像质量受影响较大; 对于 JPEG 压缩, 随着品质  $Q$  的降低, 对图像产生的影响也随之增强, 但即便压缩品质降到 20 该算法仍然有着很强的鲁棒性, 其主要原因是因为本算法利用小波变换将水印信息加在低频部分, 再者奇异值分解使得图像遭到攻击以后, 改变较小, 所以对 JPEG 压缩的敏感性较小.

## 4 结语

本文提出了一种基于离散小波变换和奇异值分解的双重水印算法. 该方法主要是利用两幅不同的水印图像, 先将一幅水印图像嵌入到另一幅水印图像中得到双重水印图像, 双重水印图像经过  $AmoH$  变换, 然后再嵌入到宿主图像中. 即便非法使用者截获并破解水印信息, 其所得到的只是含有水印的水印, 仍然可以通过进一步分解双重水印, 得到其中所含的水印信息, 从而可以更好地维护版权所有者的利益. 实验已经证明该方法能够抵抗多种攻击, 对于在静止图像中加入水印信息以保护版权问题有很好的应用前景.

## [参考文献] (References)

- [1] Fabien A P Petitcolas, Ross J Anderson, Markus G Kuhn. Information hiding-A survey [C]. // Proceedings of the IEEE, 1999, 87(7): 1062-1078.
- [2] 刘瑞祯, 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.  
Liu Ruizhen, Tan Tieniu. SVD based digital watermarking method [J]. Chinese Journal of Electronics, 2001, 29(2): 168-171 (in Chinese).
- [3] 杨红颖, 王向阳, 赵岩. 基于纹理子块的小波变换数字水印算法 [J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(7): 106-109.  
Yang Hongying, Wang Xiangyang, Zhao Yan. Digital image watermarking based on streak block in the discrete wavelet domain [J]. Microelectronics and Computer, 2004, 21(7): 106-109. (in Chinese).
- [4] 陈明举, 陈善学. 一种基于小波变换与奇异值分解的图像水印算法 [J]. 信息与电子工程, 2007, 5(1): 57-61.  
Chen Mingju, Chen Shanxue. A digital watermarking technique based on DWT and SVD [J]. Information and Electronic Engineering, 2007, 5(1): 57-61. (in Chinese).
- [5] Liu R, Tan T. An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership [J]. IEEE Transaction on Multimedia, 2002, 4(1): 121-128.
- [6] 张华熊, 仇佩亮. 置乱技术在数字水印中的应用 [J]. 电路与系统学报, 2001, 6(3): 32-36.  
Zhang Huaxiong, Qiu Peiliang. Application of shuffling techniques within watermarking [J]. Journal of Circuits and Systems, 2001, 6(3): 32-36 (in Chinese).

[责任编辑: 刘健]