

基于奇异值分解的彩色图像数字水印算法*

王林, 田启川

(太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 提出了一种基于奇异值分解的彩色图像数字水印算法, 嵌入和提取水印均在 RGB 分量的空间域内进行。仿真结果表明, 该算法不仅对几何失真具有很强的抵抗能力, 而且对添加噪声、滤波及 JPEG 压缩也具有良好的鲁棒性。

关键词: 彩色图像; 数字水印; 奇异值分解

中图分类号: TP309

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)22-0038-04

Digital watermarking algorithm for color image based on SVD

Wang Lin, Tian Qichuan

(College of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: This paper proposes a digital color image watermarking algorithm based on singular value decomposition (SVD). The embedding and extracting of watermarking are finished in RGB spatial domain. Experimental results show that the watermarking method performs well in robustness, and the embedded watermark can be detected reliably, following these geometric distortions, usual processing or JPEG compression.

Key words: color image; digital watermarking; SVD

随着计算机技术与网络技术的飞速发展, 数字作品被非法使用的情况非常普遍, 严重侵犯了作品所有者的版权。如何在网络环境中实施有效的版权保护和信息安全手段成为一个迫在眉睫的现实问题。数字水印的出现为解决这一问题提供了有效方法^[1]。

数字图像水印算法一般分为空域水印和变换域水印两大类。空域水印是直接在水印添加到数字作品中。变换域水印算法先将原始载体作某种变换, 然后把水印嵌入到载体的变换域中。相对于直接加载在原始载体产品数据上的空域技术, 这种方法具有较好的鲁棒性, 已经成为一种主流的研究方向。

现有的大多数彩色图像数字水印算法是基于变换域的, 只有少数是在空域嵌入水印的, 而且也只在彩色图像的亮度分量中嵌入^[2-3]。尽管有学者提出在彩色图像的 RGB 分量的 G 分量中嵌入水印^[4-5], 但这样也只是嵌入一个二值水印, 嵌入的信息量也是非常小的, 不能满足大容量的嵌入水印信息的要求。

刘瑞桢^[6-7]等较早提出了一种基于奇异值分解(SVD)的灰度图像水印算法, 随后一些针对该算法的改进算法相继提出^[8-11], 但是通过分析发现, 该算法存在严重的缺

陷, 即从不含水印的图像中也可能提取出水印。

本文针对参考文献[7]存在的缺陷, 提出一种改进的 SVD 数字水印算法, 并把载体图像推广至彩色图像。奇异值分解与人类视觉系统(HVS)没有必然的联系, 它体现的是图像的内蕴特性。本文采用一个二值水印图像同时向 RGB 三个通道嵌入水印。仿真结果表明, 该算法具有良好的不可见性和鲁棒性。

1 SVD 分解及其原算法的回顾

1.1 数字图像的 SVD 分解及性质

从线性代数的角度看, 数字图像可看作一个矩阵, 据矩阵理论可知, 一个 $N \times N$ 大小的矩阵 A 必存在 SVD 分解:

$$A = USV^H \quad (1)$$

其中, $U \in R^{N \times N}$ 和 $V \in R^{N \times N}$ 均为正交矩阵, $S \in R^{N \times N}$ 为对角阵, H 表示矩阵的转置。

从图像处理的角度来看, 奇异值分解应具有以下主要特性: (1) 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; (2) 奇异值能够表现出图像内在的代数特性。

根据矩阵理论, 一个矩阵的奇异值是确定的, 但不

《微型机与应用》2011年 第30卷 第22期

* 基金项目: 山西省自然科学基金(2008011030)

图形、图像与多媒体

同矩阵可以有相同的奇异值,这是矩阵与奇异值之间的多对一性质。

矩阵的奇异值分解(SVD)的一个优点是,它不仅能处理方阵,还能处理长矩阵。本文将利用这一优点进行奇异值分解算法的嵌入,现在很多流行的水印算法都不能直接处理长矩阵。

1.2 算法的回顾

刘瑞桢等人提出了一种利用SVD来嵌入水印的算法,其基本流程如下:

(1) 嵌入过程。设 A 为载体图像, W 为水印, a 为嵌入水印强度因子,按如下方法构造水印图像 A_w :

$$A \Rightarrow USV^H$$

$$S + aW \Rightarrow S^*$$

$$US_1V_1^H = A_w$$

(2) 提取过程。假设 A_w^* 为可能损坏的含水印图像,

嵌入过程 U_1, V_1, a, S 作为密钥,提取步骤如下:

$$A_w^* \Rightarrow U_p S_p V_p^H$$

$$U_1 S_1 V_1^H \Rightarrow S^*$$

$$(S^* - S) / a \Rightarrow W^*$$

最后,通过计算 W 与 W^* 的相关度来评判水印存在与否。该算法采用盲检测,不需要原图像。然而该算法却存在严重缺陷,即在提取水印的过程中,待检测图像唯一被用到的信息只有其奇异值对角阵 S ,当待检测图像与含水印图像 A_w 的奇异值相同时,水印即可以被成功提取。但是,根据SVD分解的多对一性质,可以看到存在许多随机选取的图像的奇异值与 A_w 的奇异值相同或类似,而图像本身却完全不同的情况。

2 改进的新算法

通过以上分析可以看出,已有算法的主要问题是没考虑到不同图像的奇异值可能接近甚至相同的问题,提取水印时用到的信息又并未与提取图像本身保持一定程度的一一对应,导致对随机选取的图像和原始载体图像误检测率较高。这不但降低了算法本身的可信度,而且当算法应用于通过版权认证进行某种授权等应用环境时,已有算法对随机选取的图像和伪造图像的误识别将使算法安全性大大下降。因此,本文提出一种新的基于SVD的彩色图像的RGB域水印算法来解决以上问题。

3 SVD 彩色图像数字水印算法

3.1 矩阵转换(三维矩阵转二维矩阵)

一幅大小为 $M \times M$ 的RGB彩色载体图像 A ,它有红色分量 A_R 、绿色分量 A_G 、蓝色分量 A_B 三个分量,假设水印信号是一个大小为 $M \times M$ 的二值图像 M_1 ,另取两个大小也为 $M \times M$ 的零矩阵 M_2, M_3 ,这样,载体图像和水印分别为三个二维矩阵。首先,把每一个矩阵所有对应的行组成一个大的向量,载体和水印分别得到三个大小为 $1 \times M$ 的块矩阵,即载体 $[X_R, X_G, X_B]$,水印 $[W_1, W_2, W_3]$,最后把

得到的 $[X_R, X_G, X_B]$ 组成一个新的大小为 $3 \times M$ 的块矩阵 X ,同理得到水印块矩阵 W ,实现了三维空间向二维的转换。转换过程如式(2)、式(3)所示:

$$A \Rightarrow \begin{cases} A_R \rightarrow X_R \\ A_G \rightarrow X_G \\ A_B \rightarrow X_B \end{cases} \Rightarrow X = \begin{bmatrix} X_R \\ X_G \\ X_B \end{bmatrix} \quad (2)$$

(三维) (矩阵 \rightarrow 行) (二维)

$$\begin{cases} M_1 \rightarrow W_1 \\ M_2 \rightarrow W_2 \\ M_3 \rightarrow W_3 \end{cases} \Rightarrow W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(矩阵 \rightarrow 行) (二维)

3.2 水印的嵌入与提取

本文采用大小为 $256 \times 256 \times 3$ 的彩色图像 A 作为载体,水印采用大小为 128×128 的二值图像,同时在彩色图像的RGB域内嵌入水印。

3.2.1 水印的嵌入算法步骤

(1) 将原始彩色载体图像 A 的RGB 3个分量取出,得到 A_R, A_G, A_B ,为使水印图像与载体图像匹配,把二值水印图像放大4倍,得到和载体图像一样大的水印图像 M_1 ,并同时生成两个大小和 M_1 一样大的矩阵 M_2, M_3 ,得到新的水印矩阵 M_1, M_2, M_3 。

(2) 按照3.1描述的方法得到载体图像块矩阵 X ,大小为 3×256 ;水印块矩阵 W ,大小也为 3×256 。

(3) 对 X 进行奇异值分解, $X \Rightarrow USV^H$,对每一块矩阵进行同样的分解,直到所有的都进行完为止。然后按照以下的嵌入规则把水印信号依次嵌入每一块分解的 S 矩阵中。

$$U(S + aW)V^H \Rightarrow X_w$$

其中, H 表示矩阵的共轭转置, a 是嵌入水印强度因子。

(4) 将得到的修改后的块矩阵 X_w ,取出其新的红色分量 X_{wr} ,绿色分量 X_{wg} ,蓝色分量 X_{wb} ,重构原始图像得到 A_w 。

$$X_w = \begin{bmatrix} X_{wr} \\ X_{wg} \\ X_{wb} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} X_{wr} \rightarrow A_{wr} \\ X_{wg} \rightarrow A_{wg} \\ X_{wb} \rightarrow A_{wb} \end{cases} \Rightarrow A_w \quad (4)$$

(二维) (三维)

由水印的透明性可知,嵌入水印的强度不应过大,否则将影响载体图像的质量,所以 a 的值要尽量小。文中取 $a=0.03$,在奇异值分解的过程中,矩阵 U, V 和 S 作为用户的密钥,不包含任何的水印信息。

嵌入水印后得到含水印的块矩阵 X_w ,最后,通过重构得到含水印的彩色图像 A_w 。

3.2.2 水印的提取步骤

水印的提取是嵌入的逆过程,假设接收端收到可能受到损坏的图像为 A_w^* ,用上面的同样的方法对 A_w^* 处理可得到 X_w^* ,按以下步骤提取二值水印:

(1) 由用户密钥求得原始图像的转换矩阵 $X, USV^H \Rightarrow X$ 。

(2) 由下式求得水印块矩阵 w^* :

$$\frac{1}{a} [U^H(X_w^* - X)V] \Rightarrow w^*$$

(3) 重构水印, 得到水印信号 M_1^* 。

$$W^* = \begin{bmatrix} W_1^* \\ W_2^* \\ W_3^* \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} W_1^* \rightarrow M_1^* \\ W_2^* \rightarrow M_2^* \\ W_3^* \rightarrow M_3^* \end{cases} \quad (5)$$

(二维) (行→矩阵)

3.3 可靠性分析

刘瑞楨的算法只在灰度载体图像奇异值中含有水印信息, 传输过来的图像只要其奇异值和原载体图像的奇异值相同或相近便可成功提取出水印。但是, 本文的算法只有原始载体彩色图像含有密钥信息, 接收端必须得到真实的含水印的图像才能够恢复出原始水印。攻击者即使得到 X_w , 对其进行 SVD 分解, $X_w \Rightarrow U^* S_w^* V^{*H}$, S_w^* 是一对角阵, 并且不包含任何水印信息, 因此, 即使 U^* 和 V^* 与 U 和 V 相似, 攻击者也提取不出正确的水印, 因此, 本文提出的算法具有一定的安全性, 能更好地保护版权所有者的合法权益。

4 实验仿真

为了验证本算法的性能, 仿真实验采用 $256 \times 256 \times 3$ 大小的 baboon.org.bmp 图像作为载体图像, 水印采用大小为 128×128 的写有“太原科大”的二值图像。用 Matlab R2010a 进行实验仿真, 然后按照本文所提的水印嵌入算法和水印检测算法进行实验。为了验证算法的鲁棒性, 又对利用该算法嵌入水印后的原始图像用高斯低通滤波、加入高斯噪声、椒盐噪声、JPEG 压缩等方式进行攻击, 然后用本文所提的水印检测算法进行检测。

本文将视觉上可直观认知的二值图像作为水印, 所以人眼的主观评价可以作为水印算法的一个评价标准。除此之外, 本文还以峰值信噪比 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio) 作为水印嵌入后图像失真量的度量指针, 并以归一化相关系数 NC 作为另一个评价水印提取算法的客观标准。

峰值信噪比 (PSNR) 表示信号最大可能功率和影响它的表示精度的破坏性噪声功率的比值。对于一幅 $M \times N$ 的图像, PSNR 定义如下:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{MN \max[\max(I^2)]}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - I'(i,j)]^2} \quad (6)$$

归一化相关系数 NC 用于度量提取出来的水印与原始水印的相似度。本文使用的定义如下:

$$NC = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W(i,j) W'(i,j)}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M W(i,j)^2} \quad (7)$$

水印嵌入前后的结果分别如图 1 和图 2 所示。从图中可以看出, 从视觉上, 水印的嵌入并不能使人觉察到图像质量的下降, 可见该算法有较好的不可感知性。



图 1 嵌入前的载体图像和水印图像



PSNR=40.9343 NC=0.9974

图 2 嵌入后载体图像和提取出的水印图像

经不同压缩因子的压缩后, 所提取出来的水印图像如图 3 所示。

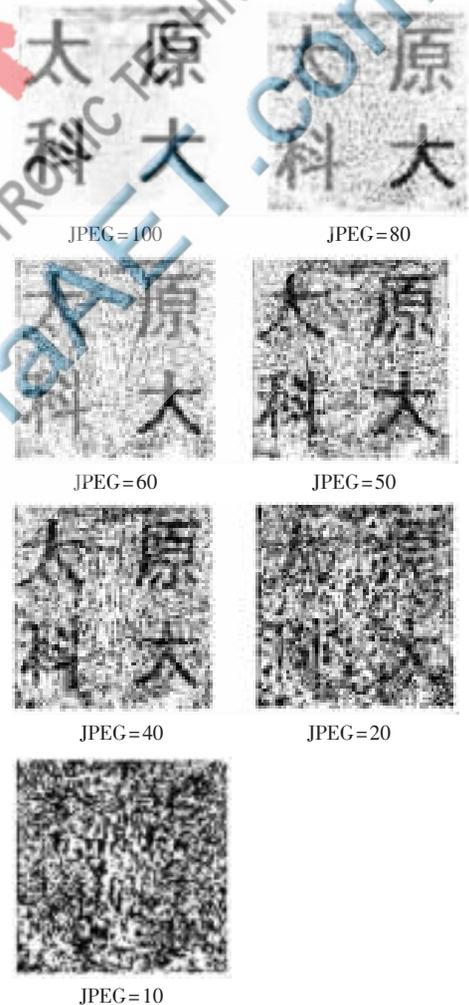


图 3 JPEG 压缩后提取出的水印图像

对含水印图像进行不同压缩因子的压缩后, 得到的 PSNR 和 NC 值如表 1 所示。

从表 1 和图 3 可以看出, 该算法有很好的抗 JPEG 压缩性, 提取出的水印在视觉上并没有严重的质量下降, 《微型机与应用》2011 年第 30 卷第 22 期

表 1 对含水印图像进行不同压缩因子压缩后,得到的 PSNR 和 NC 值

JPEG 压缩因子	PSNR	NC
100	36.073 5	0.990 1
80	32.624 0	0.951 3
60	30.911 1	0.905 2
50	30.396 9	0.881 4
40	29.871 9	0.855 3
20	28.451 9	0.768 9
10	26.977 1	0.711 2

可以很容易地识别。

对没有嵌入水印的原始载体图像提取水印图像,利用本算法是提取不出任何水印信息的,如图 4 和图 5 所示,这说明了本算法的安全性。



(a) 没有嵌入水印的原始载体图像 (b) 提取出的水印

图 4 没有嵌入水印的原始图像及提取的水印



(a) 不含水印的 lena 图像 (b) 没有提取出水印

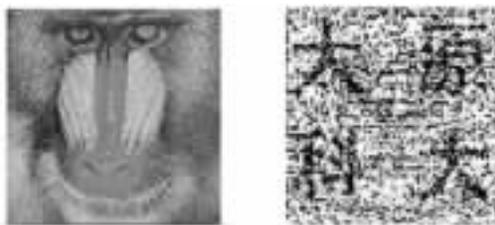
图 5 不含水印的图像及提取水印的结果

图 6 是对含水印图像进行高斯低通滤波、高斯噪声、椒盐噪声和剪切等常见的图像攻击所提取出的水印图像。

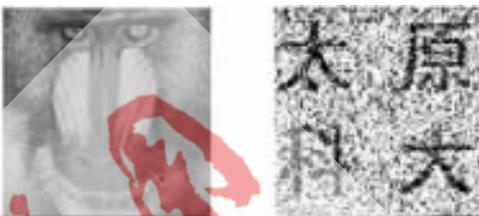
从图 6 可看出,本算法对高斯低通滤波、高斯噪声、椒盐噪声等常见的图像攻击具有较好的鲁棒性。

本文提出了一种基于奇异值分解的彩色图像水印算法。与已有的算法相比,该算法在彩色图像的 RGB 空间域嵌入一个二值水印。此外,在接收端只需要三个密钥就可以提取出水印。由于这些密钥不含有任何水印信息,从任意图像是提取不出正确的水印的,可见该算法具有一定的安全性。

另外,实验结果表明,该算法不仅具有较好的安全性和不可见性,而且对于常见噪声、裁剪以及 JPEG 图像压缩处理等攻击手段具有较强的鲁棒性,特别是对 JPEG 压缩和裁剪表现出较好的鲁棒性。该算法对几何攻击等的鲁棒性还有待增强,同时其自身的安全性也有



(a) 经过椒盐噪声攻击的图像和提取出来的水印

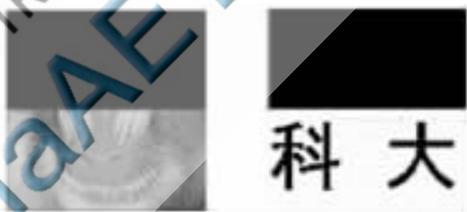


(b) 经过高斯噪声攻击后的图像和提取出的水印



PSNR=16.719 3 NC=0.844 7

(c) 经 1/4 剪切攻击后的图像和提取出的水印



PSNR=13.359 4 NC=0.712 5

(d) 经 1/2 剪切后的图像和提取出的水印



(e) 经高斯低通滤波后的图像和提取出的水印

图 6 图像进行各种常见处理后提取水印图像的实验结果

待提高,这些都是需要进一步研究和解决的问题。

参考文献

- [1] 金聪.数字水印理论与技术[M].北京:清华大学出版,2008.
- [2] 程卫东,刘红梅.利用亮度分量的彩色图像信息隐藏算法[J].中山大学学报(自然科学版),2001,40(5):47-51.
- [3] VOYATZIS G, PITAS I. Chaotic watermarks for embedding in the spatial digital image domain[J]. Proceedings of ICIP'98, 1998,10.
- [4] 刘连山,李人厚,高琦.一种基于彩色图像绿色分量的数字水印嵌入方法[J].西安交通大学学报,2004,38(12):

- 1256-1259.
- [5] NIKOLAIDIS N, PITAS I. Robust image watermarking in the spatial domain[J]. Signal Processing, 1998, 66(3):385-403.
- [6] Liu Ruizhen, Tan Tienniu. An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership[J]. IEEE Transactions on Multimedia, 2002, 4(1): 121-128.
- [7] 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).
- [8] HUANG F J, GUAN Z H. A hybrid SVD-DCT watermarking method based on LPSNR[J]. Pattern Recognition Letters, 2004, 25: 1769-1775.
- [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): 506-512.
- [10] 孙锐, 孙洪, 姚天任. 基于奇异值分解的半脆弱水印技术算法[J]. 电路与系统学报, 2002, 7(3): 62-65.
- [11] CHANG C C, TSAI P Y, LIN C C. SVD-based digital image watermarking scheme[J]. Pattern Recognition Letters, 2005, 26: 1577-1586.

(收稿日期: 2011-08-23)

作者简介:

王林, 男, 1982年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 信号处理。

田启川, 男, 1971年生, 博士后, 副教授, 主要研究方向: 图像处理与模式识别。

