

基于 CT-SVD 彩色图像盲水印方案*

罗可,冯乔生,章秀君

(云南师范大学 计算机科学与技术学院,云南 昆明 650092)

摘要: 介绍了采用 Contourlet 变换的多尺度性、多方向性和 SVD 分解的稳定性特征对彩色图像嵌入数字水印的方法。先将 RGB 空间彩色图像转换为 YUV 空间,对明亮度分量 Y 进行 Contourlet 变换得到不同尺度不同方向上的系数,然后为了满足水印的不可见性和稳健性,对低频系数进行分块 SVD 分解,根据二值水印值修改左奇异矩阵 U 。

关键词: Contourlet 变换;奇异值分解;盲水印;置乱技术

中图分类号: TP393.08

文献标识码: A

Watermarking algorithm of colored images based on CT-SVD transform

LUO Ke, FENG Qiao Sheng, ZHANG Xiu Jun

(School of Computer Science and Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650092, China)

Abstract: This paper introduced the color image digital watermarking which is implemented based on the multi-scale, multi-direction of the contourlet transform and stability of singular value decomposition. The given RGB color image is split into its three components in the YUV color space first, then the luminance component Y is chosen and decomposed by Contourlet transform and get scale factors of different directions. In order to meet the watermark invisibility and robustness, make low-frequency coefficients decompose blocks by SVD, and embedding the watermark data by modifying values of the left singular matrix U .

Key words: Contourlet transform(CT); singular value decomposition(SVD); blind watermarking; image scrambling

随着多媒体技术和计算机网络技术的发展、普及,许多多媒体产品,如图片、音频、视频及三维模型越来越易受非法拥有、复制和传播。因此,如何有效保护版权和内容完整的多媒体信息已被越来越多的研究人员所重视。数字水印技术是一种有效解决这些问题的方法,已成为图像处理和多媒体信息安全的一个热门话题。

根据水印嵌入位置,可以把水印分为两大类:空间域和变换域。在数字水印的鲁棒性方面变换域比空间域水印更好。变换域一般包括:离散余弦变换(DCT)、离散傅里叶变换(DFT)和离散小波变换(DWT)等。图像矩阵奇异值分解(SVD)不仅能反映内部图像特征,而且具有良好的稳定性。因此,提出了 DCT-SVD^[1]、DFT-SVD^[2]和 DWT-SVD^[3]域水印算法。基于 SVD 和不同变换域相结合的算法可以不同程度地提高水印技术。目前基于 DWT 的水印算法较基于 DCT 和 DFT 变换的方法要好,

因为小波变换对于含“点奇异”的一维信号,能达到“最优”的非线性逼近阶。然而,对二维图像而言,其奇异点往往不是孤立点,而是聚合成具有某些几何特征的轮廓。目前常用的乘积型二维小波是一维小波的简单扩展,各向同性的性质导致方向选择性差,一般不能有效地捕捉轮廓信息,这样小波不再是表示图像的最优基函数。

本文提出一种混合 Contourlet 域和 SVD 新颖水印算法。Contourlet 变换是新的多尺度几何变换,不仅具有 DWT 的多分辨率和时频局部性,而且提供了多方向性和各向异性,从而可以更全面地表示图像本身的几何特性。本方案是通过水印进行分块置乱,把载体彩色图像的 RGB 空间转换为 YUV 空间,对明亮度 Y 矩阵进行 Contourlet 变换,选择低通子带 Contourlet 域图像进行分块,对子块进行 SVD 变换,修改其矩阵 U 相关系数来嵌入水印。不但保证了透明度,而且提高了鲁棒性。

* 基金项目:云南省科技厅科研基金资助项目(07Z40092)

1 相关理论

1.1 Contourlet 变换

一种“真正”的图像二维表示法——Contourlet 变换, 具有比 DWT 更灵活的对图像多尺度描述特性, 所以近年来基于 Contourlet 的图像水印算法受到重视。这些算法大都将水印嵌入到能量较大的 Contourlet 变换方向子带中, 较好地利用了方向子带的纹理特性。因为在 Contourlet 变换中, 能量较大的方向子带代表这个方向图像纹理, 边缘信息丰富, 并且意味着这部分的数据比较重要, 选择用来嵌入水印, 较好地协调了鲁棒性与透明性。

Contourlet 变换使用双滤波器结构来获取图像的稀疏表示, 特别是具有光滑轮廓的图像: 首先用拉普拉斯金字塔 LP(Laplacian Pyramid)变换对图像进行多尺度分解以捕获奇异点, 接着由方向滤波器组 DFB(Directional Filter Bank)将分布在同一方向上的奇异点合成 1 个系数, 如图 1 所示。Contourlet 变换的最终结果是用类似于线段(contour segment)的基结构来逼近原始图像。在频域中, Contourlet 变换提供了图像的多分辨率、局部的方向的分解。图 1 展示了 Contourlet 变换对“Lena”图像进行两层的树状结构分解, 在每一层将频域分解成 4 个和 8 个方向子带, 每个子带呈楔型。

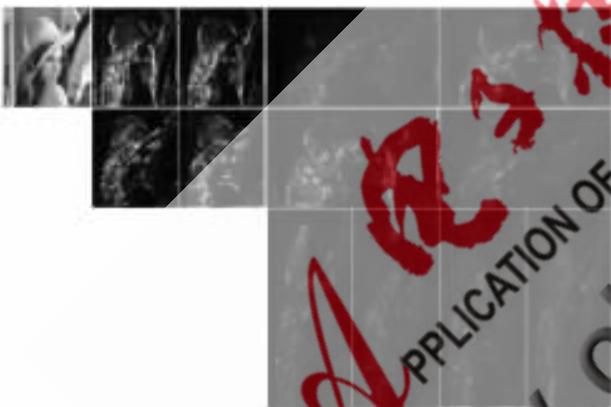


图 1 “Lena”图像两层 Contourlet 分解

与小波变换相比, Contourlet 变换具有以下更好的特性^[4-5]: (1) 对图像更加灵活的多尺度描述; (2) 图像进行 Contourlet 分解后, 系数之间是近似去相关的; (3) 由于 LP 的冗余性, Contourlet 变换具有 4/3 的冗余度。冗余度意味着有更多的可嵌入空间。

1.2 奇异值分解(SVD)

从图像处理的角度, 奇异值分解^[6-7]具有以下主要特性: 图像的奇异值具有相当好的稳定性, 即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。

奇异值分解是一种线性代数的工具, 在图像压缩、信噪分离等方面有着广泛的应用。大小为 $m \times n$ 的矩阵 $A \in C^{m \times n}$ 的奇异值分解为:

$$A = UDV^T = \sum_{i=1}^r \lambda_i u_i v_i^T \quad (1)$$

式中, $U \in C^{m \times m}$ 、 $V \in C^{n \times n}$ 是 2 个酉矩阵, 即 $U^T U = E$, $V^T V = E$; D 表示元素为非负数的对角阵; $r \leq \min\{m, n\}$ 是矩阵 A 的秩; 其中, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_n \geq 0$, 这里 σ_i 称为 A 的奇异值; u_i 、 v_i 分别为相应于奇异值 σ_i 的左右奇异向量, 且满足:

$$Av_i = \sigma_i u_i \quad Au_i = \sigma_i v_i \quad (i=1, 2, \dots, r) \quad (2)$$

因此 U 和 V 的列分别是 AA^T 和 $A^T A$ 的特征向量, 式(1)即称为 A 的奇异值分解(SVD)式。

1.3 YUV 空间

采用 YUV 色彩空间的重要性是它的亮度信号 Y 和色度信号 U 、 V 是分离的。目前提出的彩色图像信息隐藏算法是利用人类视觉系统对蓝光的不敏感特性, 将秘密信息隐藏在彩色图像的蓝色分量中。但经过实验发现, 提取水印的效果不好(特别对 JPEG 压缩)。考虑到上述原因, 本文提出一种基于 YUV 彩色空间, 是在 Y 亮度分量中嵌入水印信息的算法, 从 RGB 到 YUV 空间的变换采用的是 JPEG2000 推荐的可逆彩色变换。

YUV 与 RGB 相互转换的公式如下(RGB 取值范围为 0~255):

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3)$$

1.4 新型变换矩阵 W ^[8]

新型变换矩阵 W 与 Arnold 矩阵^[9]类似, 但在同阶情况下, 前者比后者的周期长, 如表 1 所示。因为周期越长, 安全性就越好, 所以新型变换矩阵 W 在图像置乱应用中更加有优势。本文用到的二阶新型变换矩阵 W 考虑到数字图像的需要, 基于位置的图像置乱的 W 变换可以改写为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \pmod{N} \quad (4)$$

式中, $x, y \in (0, 1, 2, \dots, N-1)$ 表示某一像素点的坐标, 而 N 是图像矩阵的阶数。

表 1 二阶 W -矩阵和 Arnold 矩阵周期对比

N	8	16	32	64
W 矩阵周期/次	12	24	48	96
Arnold 矩阵周期/次	6	12	24	48
N /次	128	200	256	512
W 矩阵周期/次	192	60	384	768
Arnold 矩阵周期/次	96	150	192	384

一般 W 矩阵变换的周期都比 Arnold 矩阵变换的周期要大, 这样就增强了非法破解的难度。本文提出基于块置乱, 先对水印图像进行分块置乱, 再对图像子块置乱。这种双重置乱方法可以大大提高算法的速度和破解的难度。

2 算法

2.1 水印嵌入算法

本文以大小为 512×512 的原始彩色图像 I 和大小为 32×32 的二值水印图像 W 作为实验数据,其水印嵌入算法描述如下:

(1)对原始水印 W_1 进行分块置乱,再对每个小子块进行置乱,通过双重置乱得到待嵌入的水印 W_2 ,保存密钥 key_1 和 key_2 。

(2)对原始载体彩色图像 RGB 空间转换为 YUV 空间,对明亮度分量 Y 采用 Contourlet 变换进行拉普拉斯金字塔 LP 变换和最精细子带方向分解,提取其低频逼近子图 LL_1 ,对低频子带 LL_1 划分为 8×8 互不相交的子块,对每块进行置乱,再进行 SVD 变换,修改矩阵 U 第 1 列的第 2 行和第 3 行系数值来嵌入水印。如果嵌入的水印 bit 为 1 时,判断: $|u_{21}| - |u_{31}| \geq T$ (T 是阈值),如果满足这个关系,那么系数 u_{21} 、 u_{31} 保持不变;否则,改变系数 u_{21} 、 u_{31} 的值来维持这种关系。如果嵌入的水印 bit 值为 0 时,判断: $|u_{31}| - |u_{21}| \geq T$,如果满足这个关系,那么系数 u_{31} 、 u_{21} 保持不变;否则,改变系数 u_{31} 、 u_{21} 的值来维持这种关系。

(3)对每块进行反置乱,再进行奇异值反变换,得到新的 LL_1' 子带,再通过 Contourlet 变换重组得到新的明亮度 Y' ,将彩色图像的 YUV 空间转换为 RGB 空间,得到含水印的图像 I' 。

2.2 水印的提取算法

水印的提取是水印嵌入的逆过程:

(1)对待测试图像 I' 转换为 YUV 空间,并提取明亮度 Y 进行 Contourlet 变换,选取低频逼近子图,对其再划分为 8×8 互不相交的子块,然后对每个子块置乱再进行 SVD 变换。

(2)判断:如果 $|u_{21}| - |u_{31}| \geq 0$,则提取水印的 bit 为 1;否则为 0。

(3)根据密钥 key_1 、 key_2 通过 W 矩阵反变换得到二值水印。

3 实验结果分析

3.1 实验数据

本文通过 Matlab 对嵌入算法和提取算法进行实验,以大小为 $512 \times 512 \times 24$ 的彩色图像作为载体,如图 2 (a1)~(a3)所示,以 32×32 的二值图像作为水印,如图 2 (a4)所示。然后按照本文的嵌入算法和提取算法进行实验。Contourlet 变换的 LP 滤波器采用“9/7”滤波器,因为这类滤波器是线性相位并且近似满足正交性的特点更适合于图像信号的处理。Contourlet 变换的 DFB 滤波器采用“pkva”方向滤波器。对输入的图像明亮度 Y 矩阵进行一级 LP 分解,得到 1 个近似图像和 2 个带通子图像,通过 DFB 对带通子图像进行 8 个方向的分解。本文选择对低频逼近子图嵌入水印。实验中阈值 T 的大小决定

了修改图像频谱的强度及影响提取水印图像的清晰程度,因而阈值 T 大小的选择要兼顾到这两个方面。通过实验分析,本文选取 T 为 0.01。

对于 RGB 彩色图像的视觉质量的定量描述,本文使用基于像素的差分失真度量方法 PSNR。

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{x,y} (I(x,y) - I'(x,y))^2 \quad (5)$$

$$PSNR = 10 \lg(3 \times 255^2 / MSE) \quad (6)$$

式中, MSE 表示两幅图像之间的均方误差, $I(x,y)$ 、 $I'(x,y)$ 分别表示在不同通道(RGB)的 (x,y) 处的像素值。

$$NC = \frac{\sum_{x,y} P(x,y)}{\sum_{x,y} I(x,y)I'(x,y)} \quad (7)$$

NC 表示两幅图像之间的相似度。

本文引用含水印图像和原宿主图像的峰值信噪比(PSNR)和均方差(MSE)来定量地描述算法的不易察觉性,PSNR 越大,MSE 越小,不易察觉性越高。引用提取的水印信息与嵌入的水印信息之间的归一化互相关系数(NC)来客观定量地描述算法的鲁棒性,NC 越大,鲁棒性越强。在无任何攻击情况下,提取水印的归一化相关系数(NC)都为 1,如图 2(b)所示。可见该算法的透明性和水印识别性都比较好。

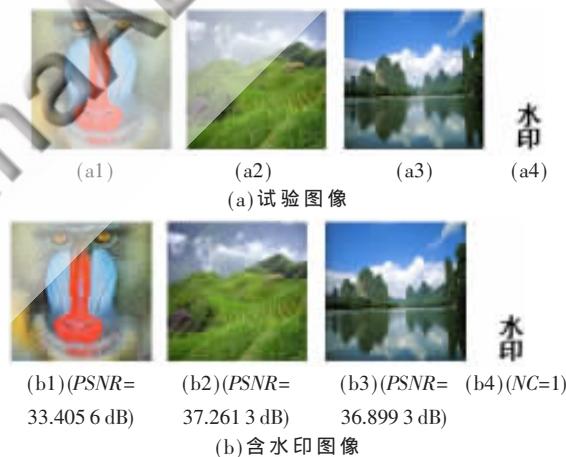


图 2 原始图像和含水印图像

3.2 抗攻击测试

为了验证算法的实用性,本文选取 3 幅彩色图像作为测试数据,表 2 为在各种攻击下水印图像提取效果。

表 2 算法的鲁棒性测试结果

攻击方式	图 2(a1)	图 2(a2)	图 2(a3)
剪切右下角 1/2	0.966 9	0.962 2	0.970 5
剪切右下角 1/4	0.979 9	0.988 2	0.974 0
高斯过滤(方差为 0.1)	1.000 0	1.000 0	1.000 0
椒盐噪声(系数为 0.01)	0.954 0	0.948 1	0.903 2
中值过滤	0.864 2	0.898 5	0.911 5
尺度缩放(70%)	0.832 3	0.881 9	0.911 5

这些攻击包括低通滤波攻击、噪声攻击、尺度缩放攻击、剪切攻击等。然后,采用不同的质量因素(QF)的 JPEG 压缩测试图像抗攻击效果。对 JPEG 压缩攻击的 NC 值如表 3 所示。可见,本文算法可以保证在有损压缩(如 JPEG 压缩)过程中,这些水印信号可以有效地提取出来。

表 3 JPEG 压缩实验结果比较

JPEG 压缩攻击方式	图 2(a1)	图 2(a2)	图 2(a3)
压缩比为 80	1.000 0	1.000 0	0.990 6
压缩比为 60	0.998 8	0.996 5	0.977 6
压缩比为 50	0.995 3	0.994 1	0.955 1
压缩比为 40	0.990 6	0.985 8	0.847 7
压缩比为 30	0.971 7	0.949 2	0.748 5
压缩比为 20	0.907 9	0.860 7	0.642 3

本文提出了一种 CT-SVD 方法相结合新颖的鲁棒性较高的彩色图像数字水印方案。此方案中,将彩色图像 RGB 空间转换为 YUV 空间,选取明亮度分量 Y 作为图像,通过 Contourlet 变换对其分解后,选取低通逼近子图对其分块,应用 SVD 技术嵌入水印。该算法在进行水印检测时不需要原始图像,实验结果表明,本文提出的方案不仅感知质量高,而且可以抵抗各种攻击。

参考文献

- [1] HUANG F, GUAN Z H. A hybrid SVD-DCT watermarking method based on LPSNR [J]. Pattern Recognition Letters, 2004, 25(15):1769-1775.
- [2] ZHANG X H, YANG Y T. A geometric distortion resilient image watermark algorithm based on DFT-SVD[J]. Computer Engineering 2006, 32(18):120-122.
- [3] GANIC E, ESKICIOGLU A M. Robust DWT-SVD domain

image watermarking: embedding data in all frequencies[C]. Proc.2004ACM Multimedia and Security Workshop, Magdeburg, Germany, 2004:166-174.

- [4] DO M N, VETTERLI M. The Contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14(12):2091-2106.
- [5] SONG Hao Hao, YU Song Yu, YANG Xiao Kang. Contourlet-based image adaptive watermarking [J]. IEEE Trans on Image Processing, 2008, 23(3):162-178.
- [6] CHANG Chin-Chen, TSAI Pi Yu, LIN Chia Chen. SVD-based digital image watermarking scheme[J]. Pattern Recognition Letters.2005, 10(26):1577-1586.
- [7] LIU Rui Zhen, TAN Tie Niu. SVD based digital watermarking method[J]. Acta Electronica Sinica.2001, 29(2):168-171.
- [8] 吴亚丽.一种可用于图像置乱的新型变换矩阵[J].电子科技, 2008, 21(3):69-72.
- [9] 董梅,高康.矩阵奇异值分解和 Arnold 置乱技术在图像隐藏中的应用[J].山东大学学报:理学版, 2005, 40(3): 71-75.

(收稿日期:2009-09-04)

作者简介:

罗可,男,1980年生,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、信息安全。

冯乔生,男,1961年生,教授,主要研究方向:虚拟现实技术、计算机视觉、机器人学。

章秀君,女,1984年生,硕士研究生,主要研究方向:图像加密、信息安全。