

一种新的彩色图像变换域全息水印算法

李晨璐, 孙刘杰

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: 提出了一种变换域中改善全息水印抗几何攻击和滤波攻击性能的彩色图像全息水印算法。取彩色 RGB 载体图像的蓝色通道, 分块后做一级小波分解转换到变换域, 取低频子带, 然后进行奇异值分解嵌入数字全息水印。实验结果表明: 该算法水印隐蔽性好, 重建的水印与原始水印相似度高; 算法鲁棒性强, 可以抵抗常见的各种攻击, 尤其改善了全息水印的抗几何攻击和滤波攻击性能, 满足了数字防伪、版权保护的需要。

关键词: 傅里叶全息; 离散小波变换; 奇异值分解

中图分类号: TP309.1; TS853*.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)09-0084-05

New Color Image Holographic Watermarking Algorithm in Transform Domain

LI Chen-lu, SUN Liu-jie

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A new color image holographic watermarking algorithm was proposed, which improve the robustness for geometric and filtering attacks. The blue channel of RGB mode host image was extracted; after blocking, the low frequency sub-band was achieved through DWT; then both SVD and Fourier hologram were applied to embed the watermark. Simulation results showed that the watermark has a good disguised ability, and the correlation of reconstructed watermark and the original watermark is high. Attacks results showed that the watermarking algorithm has high robustness and is able to resist common attacks, especially for geometric attacks and filtering attacks, which meets the need of digital anti-counterfeiting and copyright protection.

Key words: Fourier hologram; DWT; SVD

随着数字信息化时代的到来,通过互联网和多媒体技术,人们可以轻易地制造、传播、获取数字媒体信息。然而目前网络盗版活动异常猖獗,如何有效保护数字作品的版权安全已成为迫在眉睫且十分棘手的现实问题。数字水印技术已广泛应用于版权保护的领域,成功的数字水印技术必须具备安全性强、水印鲁棒性强、成本低廉、可以灵活多变等特点。目前主流的数字水印技术集中在变换域中,包括 DWT 变换, DFT 变换, DCT 变换, Hough 变换等。然而数字水印发展至今,仍然没有一种算法,可以抵抗所有的常见攻击,包括:裁切、加噪、旋转、滤波、缩放攻击等。

日本学者 Nobukatsu Takai 和 Yuto Mifune 最早将

光全息概念应用到数字水印领域中,光全息技术能够同时记录物体的幅值和相位信息,这使得含全息水印的图像遭到攻击后仍然可以提取出高度相似的水印^[1-3]。文献[1-3]中提到的全息水印具有不足之处,即水印抗几何攻击效果差,尤其对于旋转攻击,含水印图像旋转极小角度后,便不能取出有效地水印信息,同时全息水印抗滤波性能也并不理想。文献[6]中提到的水印技术抗几何攻击效果较好,但是对于裁切攻击,水印没有强鲁棒性。文中提出了一种新的将傅里叶全息技术与 SVD、DWT 技术相结合变换域水印算法。实验证明,这一算法在二维彩体图像中嵌入全息水印,水印的隐蔽性好;水印算法鲁棒性强,显著

收稿日期: 2013-01-08

基金项目: 新闻出版总署“数字印刷工程研究中心”开放印刷品防伪标识技术研究(10-00-309-000)

作者简介: 李晨璐(1989-),女,江苏人,上海理工大学硕士生,主攻数字水印、图文处理。

通讯作者: 孙刘杰(1965-),男,博士,上海理工大学教授,主要研究方向为数字水印、印刷技术。

改善了水印抗滤波的能力与抗小角度旋转、缩放等几何攻击的能力,具有良好的抗几何攻击能力,同时保留了全息水印有效抵抗大幅度裁切、噪声攻击的优点。

1 算法分析

1.1 傅里叶全息

从光学角度出发,用平行的相干光照射在物体上,经过傅里叶变换后,在频谱面上和另一束平行的参考光进行叠加,光强敏感设备记录干涉场光的强度信息,利用这一原理,就能形成了傅里叶变换全息图^[4-5]。产生原理数学表示如下:

$$R(x, y) = R_0(x, y) \cdot \exp[j\phi_r(x, y)]$$

$$O(x, y) = O_0(x, y) \cdot \exp[j\phi_o(x, y)]$$

$$U(x, y) = O(x, y) + R(x, y)$$

$$I(x, y) = U(x, y) \cdot U^*(x, y)$$

$$U'(x, y) = R(x, y) \cdot I(x, y) = R_0(O_0^2 + R_0^2) \cdot$$

$$\exp[-j\phi_r] + R_0^2 O_0 \exp[-j(\phi_o - 2\phi_r)] + R_0^2 O_0 \exp[-j(\phi_o)]$$

上面各式中, $R(x, y)$ 和 $O(x, y)$ 分别表示参考光和物光,其中 $R_0(x, y)$ 和 $O_0(x, y)$ 分别为两者的振幅信息, $\phi_r(x, y)$ 和 $\phi_o(x, y)$ 为两者的相位信息。 $I(x, y)$ 表示全息记录板上的光强信息, $U'(x, y)$ 表示再现的像。生成的傅里叶全息图像应包含原始像、共轭像、自相关项和零频像,但其中零频像自相关项和自相关项对重建水印没有意义,且会影响水印的再现效果,应将它们除去。全息水印生成流程见图 1。

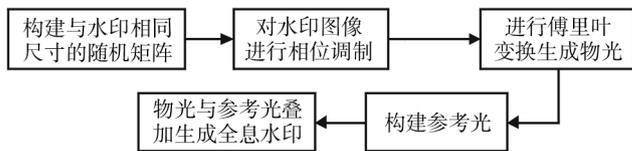


图 1 全息水印生成流程

Fig. 1 The flow chart of building hologram watermark

全息水印最大的优点在于其不可撕毁性,一般的水印只能记录幅值信息,全息水印还记录其相位信息,因此即使含水印图像遭遇很大幅度裁切攻击,仍能重建高度相似的水印图像。全息水印生成时进行相位调制,这也加强了水印的安全性,即全息水印另一优点是其天然的自加密能力。

1.2 DWT 变换与 SVD 分解

1.2.1 DWT 变换

与 DCT 相比, DWT 域水印更加灵活多变,它具有以下优点:(1)有丰富的空间和频率尺度特性,有助于定位水印,以提高水印的鲁棒性能;(2)DWT 的多分辨率特性,可以较好地与 HVS(人眼视觉系统)特性相匹配,有助于水印的隐蔽性;(3)DWT 有快速算法,对滤波和压缩处理等外界干扰也有较好的抵御能力,在计算速度上有优势。但是小波技术本身不具有旋转不变性,这里将它与 SVD 技术结合起来,增强抗几何攻击的能力^[4-5]。

图像每进行一级小波分解,便可以得到 4 个频率子带,分别为低频子带 LL1 和高频子带 LH1, HL1 和 HH1,且得到的每个子图像大小为原图像大小的 1/4。采用 Haar 小波, Haar 小波是最简单也最实用的一种,满足数字水印快速性的要求。对一幅二维图像进行一级小波分解,各频率子带见图 2。

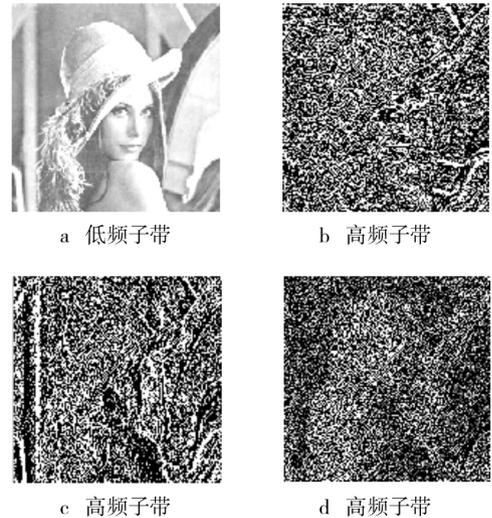


图 2 DWT 各频率子带

Fig. 2 Sub-bands of each frequency in DWT

1.2.2 SVD 分解

从线性代数的角度出发,奇异值分解(SVD)是一个特殊的矩阵变换方法^[5-6]。每一幅数字图像 M 都可以表示成非负向量组成的矩阵,设图像 M 的尺寸为 $m \times n$,奇异值分解后图像 M 可以表示成:

$$M = U\sigma V^T$$

其中: T 为转置符号,矩阵 U 和 V 均为 $m \times n$ 的正交阵; $\sigma \in R_{m \times n}$, 对角线元素为图像奇异值,非对角线上的元素都为零; σ 代表的图像的本质特性,与视觉

特性无关。因此奇异值具有较好的稳定性,对图像施加简单攻击,尤其是几何攻击,奇异值不会发生很大变化,这里将奇异值分解与傅里叶全息、离散小波变换结合起来,以增强水印的鲁棒性能,尤其是全息水印抗几何攻击的性能。

2 水印的嵌入与提取

实验采用的 RGB 标准彩色图像 Lena 作为载体图像,水印尺寸为。利用上述的技术,对 RGB 颜色空间的彩色载体图像嵌入全息水印信息。水印嵌入的流程见图 3。

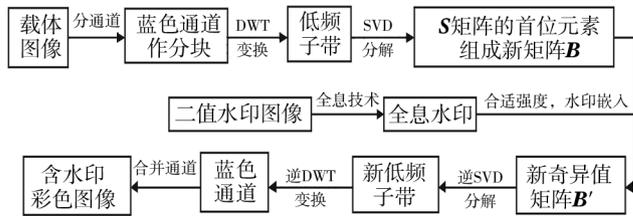


图 3 水印嵌入算法流程

Fig. 3 The flow chart of embedding watermark algorithm

第 1 步。对彩色 RGB 载体图像分离三通道,根据人眼视觉系统特性可知,人眼对蓝色信息最不敏感,因此取蓝色 B 通道作为嵌入水印通道^[8]。

第 2 步。把蓝色通道 B 分成 4×4 互不重叠的小分块,对各分块进行一级 Haar 小波 DWT 变换,转换到变换域中,选取低频子带得到矩阵 A_i 。

第 3 步。各矩阵 A_i 进行 SVD 分解,得到矩阵 U_i, S_i, V_i ,且大小均为 128×128 。奇异值矩阵 S_i 对角线元素从大到小排列,体现在图像能量上前面的奇异值意义更大,为了增强水印的鲁棒性能,这里选取各奇异值矩阵 S_i 的首位元素组成新的矩阵 B 作为嵌水印区域,这样水印可以分布整幅图像,鲁棒性可以得到保证,这里矩阵 B 与全息水印尺寸相同。

第 4 步。根据全息水印的原理,由二值水印图像构建全息水印,使得版权信息安全性更强,且具有不可撕毁性,生成的全息水印尺寸同样为 128×128 。根据全息原理构建全息水印见图 4。

第 5 步。嵌入水印环节:选择加性法则,综合考虑水印的鲁棒性与隐蔽性,设定水印嵌入强度为 0.5,将生成的全息水印加权嵌入到矩阵 B 中,然后按照行



a 水印图像

b 全息水印

图 4 水印图像与全息图像

Fig. 4 The watermark and hologram image

列顺序逐个还原各奇异值矩阵 S_i 的首位元素得到新的奇异值矩阵 S_i' 。

第 6 步。采用新的奇异值矩阵 S_i' 与原 U_i, V_i 还原各个小分块,然后对每一分块进行逆 DWT 变换,最后合并 RGB 通道就可以得到含水印的彩色图像。

提取水印的过程相当于嵌入水印的逆向过程。提取水印的流程见图 5。

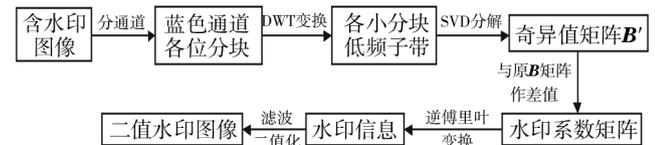


图 5 水印提取算法流程

Fig. 5 The flow chart of extracting watermark algorithm

提取水印时,首先对彩色含水印图像通道分离,选取含水印通道蓝色通道 B。对蓝色通道进行 4×4 的分块,对各分块作 DWT 变换,然后进行 SVD 分解,将各 S 矩阵的首位元素组成新的矩阵 B' ,与矩阵 B 进行对比再通过逆傅里叶变换重建水印。若要获得清晰的二值水印图像,还需对重建的水印进行滤波、二值化处理。

3 仿真结果与分析

3.1 评价指标和水印的隐蔽性

关于水印算法的评价指标很多,最常用的水印评价指标是相似度 NC 和峰值信噪比 PSNR 等。选取合适的评价指标对于衡量水印算法极为重要。实验采用相似度 NC 以及峰值信噪比衡量原始水印与重建水印的相关程度,采用 2 个评价指标,使得客观评价更加全面、准确^[4,9]。通过大量实验后,选取最佳的全息水印嵌入强度为 0.5,重建水印二值化阈值为 0.2。

实验效果见图6。



图6 原始彩色载体图像、原始水印
以及含水印图像、重建水印

Fig. 6 The original host image with watermark and
the watermarked image with extracted watermark

没有遭遇任何形式攻击前,原始图像与含水印图像的 PSNR 值为 38.22 dB(大于人眼视觉系统的阈值 28 dB),相似度 NC 值为 1,表明水印具有良好的隐蔽性,单靠肉眼无法察觉载体图像与含水印图像的细微差别;原始二值水印与重建水印 PSNR 值为 74.15,相似度为 0.96,表明两者具有高度的相似性,可以作为数字防伪的依据。

3.2 水印的鲁棒性

3.2.1 裁切攻击

裁切攻击是常见攻击中对图像破坏性很强的一种攻击,含水印图像遭遇裁切攻击会损失大量的信息,因此很难重建有效的水印。但是全息水印同时记录物体的幅值和相位信息,较一般的水印有很大的优势。各种幅度的裁切攻击实验结果见表1。

表1 裁切攻击实验结果

Tab.1 The results of cutting attack

评价指标	裁切掉含水印图像					
	1/16	1/8	1/6	1/4	1/2	3/5
原始水印与提取水印的 峰值信噪比 PSNR/db	51.28	51.33	51.29	51.38	51.28	51.29
原始水印与提取水印 的相似度 NC	0.96	0.94	0.94	0.96	0.95	0.94

依次对含水印图像进行各种幅度的裁切攻击,即使含水印图像裁切掉 3/5,裁切后的含水印图像与原始彩色载体图像 PSNR 值仅为 7.24 时,重建的水印与原始水印相似度仍可高达 0.94, PSNR 值仍为 51.29,表明该全息水印算法抗裁切性能很好。

3.2.2 几何攻击和滤波攻击

几何攻击包括旋转、缩放攻击等,含水印图像遭遇几何攻击后图像各像素点在空间位置上有所变化,

这给重建水印带来很大的困难。变换域的水印算法往往对于信噪攻击有较好的抵抗能力,但是抗几何攻击能力差,同时全息水印对滤波攻击性能也较差。水印算法着重改善抗几何攻击和滤波攻击的性能,这里对含水印图像进行缩放、旋转和滤波攻击,检验重建水印的效果。各种几何攻击水印重建图见图7。

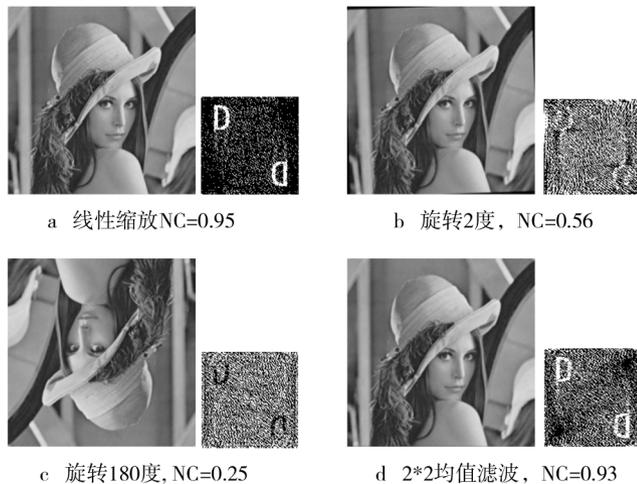


图7 几何攻击和滤波攻击效果

Fig. 7 The results of geometric and filtering attacks

由实验结果可见,在不对受攻击的含水印图像做任何补偿、旋转矫正时,已经可以重建出较清晰的水印图像;对于线性缩放这类几何攻击,提取出的水印的相似度已达 0.95,表明该算法已大幅提升了全息水印抗几何攻击的能力;此外对滤波攻击,本算法也改善了传统全息水印抗滤波性能差的缺点,表明本算法将 SVD 分解与 DWT 技术结合起来,嵌入全息水印有一定的优越性。

3.2.3 其他攻击

对含水印图像进行了其他形式的攻击,包括椒盐噪声、高斯噪声、JPEG 有损压缩等攻击,测量受攻击后的提取出水印与原始水印的 NC 值。椒盐噪声、高斯噪声等攻击重建水印效果见图8。



图8 噪声攻击效果

Fig. 8 The results of noise attacks

JPEG 有损压缩实验结果见表 2。

表 2 JPEG 压缩实验数据

Tab.2 The results of JPEG compression

评价指标	有损压缩质量因子						
	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%
原始水印与							
提取水印的	0.94	0.97	0.98	0.98	0.97	0.97	0.95
相似度 NC							

由表 1 和 2, 图 7 和 8 可知, 含水印图像遭遇各种攻击后, 该算法均能重建清晰完整的二值水印信息。由于全息水印具有不可撕毁性, 含水印图像能够抵抗大幅度裁切攻击, 重建高度相似的水印图像。对于几何攻击, 该算法明显改善了全息水印的性能, 在缩放攻击和小角度旋转、翻转后都可重建完整的水印信息, 全息水印抗滤波攻击的性能也大大提高, 同时具备了抗噪声攻击和 JPEG 压缩的强鲁棒性。

4 结论

在傅里叶全息技术、奇异值分解、离散小波变换的基础上, 针对全息水印抗几何攻击和滤波攻击差的特点, 设计了一种新的彩色图像变换域全息水印算法。实验表明, 该算法在二维彩色载体图像中嵌入水印信息, 水印的隐蔽性好, 同时利用奇异值的稳定性和全息水印的不可撕毁性能, 该算法可以抵抗常见的各种攻击, 尤其提升了全息水印抗几何攻击和滤波攻击的性能, 重建的水印与原始水印相似度很高, 满足现实中数字版权保护的需要, 有一定的研究意义。

参考文献:

- [1] 刘晓珂, 苏显渝. 基于图像部分加入的数字全息水印技术[J]. 光子学报, 2008(4): 740-744.
LIU Xiao-ke, SU Xian-yu. An Hologram Watermark Technique Based on Image Partly Embedding[J]. Photon Journal, 2008(4): 740-744.
- [2] 孙刘杰, 庄松林. 双随机相位加密同轴傅里叶全息水印防伪技术[J]. 光学学报, 2007, 27(4): 6218-6224.
SUN Liu-jie, ZHUANG Song-lin. Forgery Prevention Based on In-line Fourier Holographic Watermark with Double Random Phase Encryption[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 6218-6224.
- [3] 陈大庆, 顾济华, 周皓. 基于相位恢复的傅里叶变换全息图像数字水印[J]. 光学学报, 2009(12): 3310-3316.
CHEN Da-qing, GU Ji-hua, ZHOU Ha. An Image Digital Watermarking with Phase Retrieval Algorithm and Fourier Transformation Hologram[J]. Acta Optica Sinica, 2009(12): 3310-3316.
- [4] 张雷洪, 孙刘杰, 郑继红. 傅里叶变换全息加密数字水印解密实验研究[J]. 包装工程, 2011, 32(17): 8-12.
ZHANG Lei-hong, SUN Liu-jie, ZHENG Ji-hong. Experiment Study on Decryption of Fourier Transform Holography Encrypted Watermark[J]. Packing Engineering, 2011, 32(17): 8-12.
- [5] 李孟涛, 孙刘杰, 李晨璐. 基于小波变换的傅里叶加密印刷水印算法研究[J]. 包装工程, 2012, 33(1): 108-112.
LI Meng-tao, SUN Liu-jie, LI Chen-lu. Research on Fourier Encryption Printing Watermarking Algorithm Based on Wavelet Transform[J]. Packing Engineering, 2012, 33(1): 108-112.
- [6] 石磊, 钟铭, 洪帆. 抵抗几何变换的基于量化的水印技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004(6): 850-855.
SHI Lei, ZHONG Ming, HONG Fan. Quantization Based Watermarking Robust to Geometric Transformations[J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2004(6): 850-855.
- [7] NISHCHAL N K, JOSEPH J, SINGH K. Fully Phase Encryption Using Digital Holography[J]. Optical Engineering, 2004.
- [8] 李华, 朱光喜, 朱耀庭. 一种基于人眼视觉感知模型的数字水印隐藏方法[J]. 电子学报, 2000(10): 111-113.
LI Hua, ZHU Guang-xi, ZHU Yao-ting. A Visual Model Weighted Cosine Transform for Hiding Watermark in Images[J]. Acta Electronica Sinica, 2000(10): 111-113.
- [9] TAKAI N, MIFUNE Y. Digital Watermarking by a Holographic Technique[J]. Applied Optics, 2002.