

基于重同步的高容量鲁棒图像水印算法

章无用^{1,2}, 陈建华², 胡耀垓¹

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430072; 2. 云南大学信息学院, 云南昆明 650500)

摘要: 如何有效地抵抗组合几何攻击, 并且提高水印的嵌入容量, 一直是数字水印领域一个具有挑战性的课题. 针对此种状况, 本文提出了一种抗组合几何攻击, 且嵌入容量较大的水印算法. 首先利用 SURF 算法从受攻击的图像提取特征点, 并与原图像中的少量鲁棒性较强的特征点匹配, 根据特征点对间的坐标关系准确估计出仿射矩阵; 然后根据仿射矩阵对失真的图像进行几何校正, 恢复水印的重同步. 由于几何攻击与还原过程中的像素插值仍会导致变换域水印的位置发生细微的误差, 本文在空间域嵌入一层定位水印以便精准地同步; 最后, 考虑到 LT 码具有良好的纠删性能, 因而先将变换域水印信息进行 LT 码编码, 以尽量提高算法的抗剪切性能. 实验结果表明, 该算法不仅实现了较高容量的嵌入, 而且对于剪切、组合几何攻击具有较好的鲁棒性.

关键词: 数字水印; 几何攻击; 高容量; 仿射矩阵估计; 精准同步; LT 码

中图分类号: TP309 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)04-0862-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.04.014

Resynchronization Based High Capacity Robust Image Watermarking Algorithm

ZHANG Wu-yong^{1,2}, CHEN Jian-hua², HU Yao-gai¹

(1. School of Electronic and Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

2. School of Information, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: How to resist combined geometric attacks effectively and improve the embedded capacity of the watermark has always been a challenging topic in the field of digital watermarking. In view of this situation, a watermarking algorithm that resists combined geometric attacks and has a larger embedded capacity is proposed in this paper. Firstly, feature points from the attacked image are extracted with SURF algorithm, then they are matched with a small amount of feature points of strong robustness, which are extracted from the original image. The matching point pairs are used to estimate the affine matrix accurately and then the geometric attacks are corrected to resynchronize the embedded watermarks. Due to positioning errors introduced during the attacking/correction process, some positioning watermarks are embedded in the spatial domain to improve the accuracy of the resynchronization. Considering the excellent erasure correcting performance of LT codes, the watermark bit sequence is encoded by LT-code such that the anti-cropping performance of the algorithm can be improved. The experimental results show that the proposed algorithm not only has a larger embedding capacity, but also is resistant to the cropping and combined attacks.

Key words: digital watermarking; geometric attacks; high capacity; affine matrix estimation; precise resynchronization; LT-code

1 引言

数字水印技术作为多媒体信息隐藏^[1]与取证分析领域的一个重要分支, 在多媒体数据管理、版权保护^[2]等方面扮演着重要的角色, 因而受到越来越多研究者

的关注. 本文研究的是鲁棒图像水印. 现有的大多数鲁棒水印算法能够抵抗滤波、压缩和加噪等常规图像攻击; 对于几何攻击, 已有很多算法在抵抗旋转(R)、缩放(S)、平移(T)等攻击中表现出较好的性能, 但对于系数不规则仿射变换(称为一般仿射变换)、组合几何攻击

等攻击性能稍差. 一般仿射变换、组合几何攻击是一类强大的使水印提取失效的攻击,且此类攻击在图像的传播过程中比较常见,许多水印方案不能有效地抵抗此类攻击. 此外,在实际的应用中,数字水印技术要求嵌入水印能够提供尽可能多的信息,比如作者、创作时间、出版商等,这就需要水印方案的嵌入容量应该足够大,而不是只能嵌入几十比特的类似序列号的标识信息. 如何有效地抵抗各类几何攻击,并且保持较大的嵌入容量,仍是一个具有挑战性的任务;许多研究者为此做了大量的努力,提出了很多鲁棒水印算法. 这些算法大致可以分为以下三类.

(1) 将水印信息嵌入到对几何攻击具有不变性的域. 此类算法主要分为两种:一种是基于图像的矩变换,将水印嵌入到矩的不变系数上,比较流行的有 Zernike 矩/伪 Zernike 矩^[3]、Krawtchouk 矩^[4]、Tchebichef 矩^[5]、radial 矩^[6]等,基于不变矩的算法对常规攻击和简单的几何攻击有一定的鲁棒性,而对不等比例缩放、剪切、联合几何攻击等鲁棒性较差;另一种是把图像经过某种变换,将水印嵌入到此变换的不变参数上,比较常见的有 Fourier-Mellin 变换^[7]、Radon 变换^[8]、直方图变换^[9]、Polar Harmonic 变换^[10]、还有 Tian 最近提出来的 Local daisy features 变换^[11],一般情况下,此类算法鲁棒性较强,但是运算比较复杂,且嵌入水印容量较小.

(2) 基于图像特征^[12-15]的方法. 从图像中提取出特征点,然后利用特征点构造某种不受几何形变影响的局部区域,水印的嵌入与检测通过这些局部区域实现,此类算法抗攻击种类较多,缺点是嵌入容量有限. 此外,将水印嵌入到每个特征点周围的局部区域,水印的能量都集中在了图像的特征点周围,当嵌入容量增大时,这些局部区域内的像素改变就会比较明显,从而降低这些区域的视觉透明性.

(3) 基于模板校正的算法^[16-26]. 利用模板估计几何形变的参数,然后实施逆变换,重同步并提取水印. 此类算法一般具有嵌入容量高,抗简单几何攻击的性能,如果没有准确的估计仿射矩阵或几何攻击参数,则不能有效地抵抗仿射变换、组合几何攻击等. 此外,剪切攻击对基于模板校正算法一直是一个棘手的难题.

表 1 列出了以上三类算法中部分有代表性文献的嵌入容量,能否抗剪切、一般仿射变换的性能. 水印的载体图像都是 512×512 的标准灰度图像.

从表 1 可以得知大部分文献或是嵌入容量小,或有抗剪切、抗一般仿射变换性能不足的缺陷. 鉴于此,本文算法尽量提高嵌入容量且改善抗剪切、一般仿射变换的性能,同时提高抗组合几何攻击的性能.

本文在第(3)类基于模板校正的算法的基础上,对几何攻击的仿射矩阵做了进一步的探索并进行了准确

的估计,对受攻击图像进行了较为准确的还原. 同时,利用空间域水印对变换块的边界进行了精确的定位. 即便如此,由于攻击与还原过程的插值对图像的像素仍会造成偏差,所以本文将版权水印嵌在图像的 DWT-DCT 的混合域以抵抗此类偏差. 因此,本文算法实现了水印较高容量的嵌入,可以更完善地呈现版权所有者的信息,同时也具有较好的抗仿射变换、组合几何攻击的性能. 此外,先将版权水印信息进行 LT 码^[27]编码,利用 LT 码良好的纠错性能以抵抗剪切攻击.

表 1 部分文献的实验参数与性能

作者	嵌入容量	抗剪切	抗一般仿射变换	参考文献
Xin CY, Liao S, Pawlak M. (2007)	64b (Stirmark test 3.1)	√	√	[3]
Simitopoulos D, Koutsouanos DE, Strintzis MG. (2003)	64b	×	√	[8]
Li LD, Li SS, Abraham A, Pan JS. (2012)	128/160/512b	×	×	[10]
Wang XY, Wu J, Hou LM. (2007)	32b	√	√	[12]
Su PC, Chang YC, Wu CY. (2013)	每个特征点嵌入 8b, 随不同图像提取有效特征点的数目变化	√	√	[14]
Wang CT, Ni JQ, Zhuo HS, Huang JW. (2011)	60b	×	√	[21]
Wang XY, Liu YN, Li S, Yang HY. (2016)	4096b	√	×	[25]

2 系统方案简介

本文算法的基本原理如图 1 所示. 先将原水印信息进行 LT 码编码,同时添加 CRC 校验码进行检错,然后利用失真补偿量化索引调制(DCQIM)算法^[28]将编码水印 W1 嵌在原始图像的 DWT-DCT 混合域,得到载体图像. 利用 SURF 算法^[29]从载体图像中提取出特征点并从中挑选出少量鲁棒性强的特征点作为模板,该模板可以当做边信息通过加密后提交到公共数据库,比如 WIPO Lex 数据库,需要时则从公共数据库提取,与受攻击的图像提取出的特征点进行匹配,对匹配的特征点利用最近邻次邻近比值法(RNS)^[30]、RANSAC 算法^[23,24]进行挑选,剔除误匹配的特征点对,然后利用最小二乘法估计出仿射矩阵,对受攻击的图像直接进行仿射逆变换,得到校正的载体图像. 由于几何攻击与还原过程中的插值误差与像素偏移,破坏了 DWT-DCT 域水印 W1 的嵌入起点,因此本文算法还利用奇偶量化法^[10,13]在空域嵌入定位水印 W2,精确定位 DWT-DCT 域版权水印 W1 的嵌入起点,在定位出

W1 的嵌入起点后,提取出水印 W1',利用 CRC 码检错,丢弃有错误的编码数据包,然后利用保留的数据包进行

LT 码译码,恢复原水印信息.

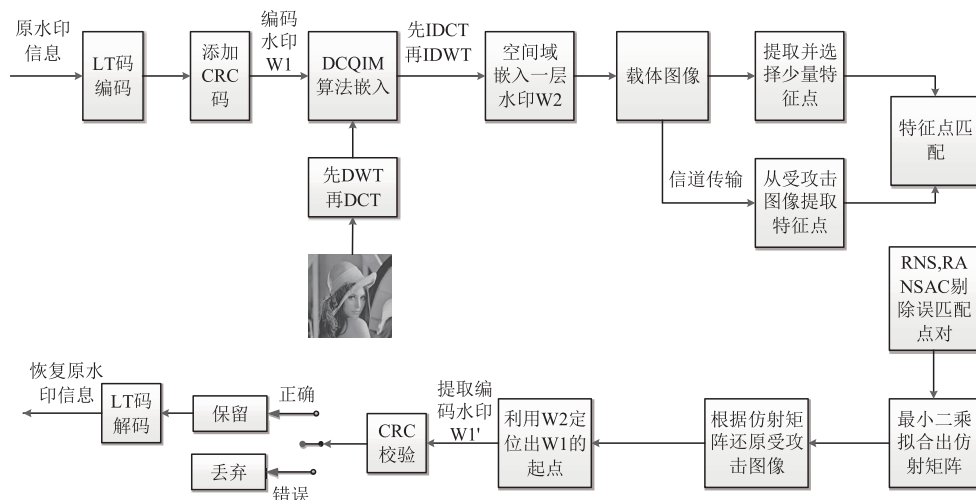


图1 系统原理框图

3 基于 SURF 的特征点挑选

本文采用 Bay 提出的 SURF 算法,即使图像亮度和形状在不同信号处理和几何攻击下发生一定的改变,也能较好地提取特征点,且尺度不变性较 Harris、Harris-laplace 更好,时间运算复杂度比 SIFT 更低^[31]. 典型地,一幅 512×512 图像, SURF 算法可以提取几百至上千个特征点,但提取的这些特征点并不都适于水印同步,大尺度和小尺度的特征点在受到几何攻击容易丢失. 因此,对从载体图像中检测到的特征点,首先去除尺度太大和太小的点,选择中间尺度范围的特征点^[10,14,23],如图 2 所示(以图像 Lena 为例).

接着,根据特征点对应的 $|\det(H_{\text{approx}})|$ 值^[29]大小,选出其中 $|\det(H_{\text{approx}})|$ 值最大的特征点,以其坐标 (C_1, C_2) 为圆心,对应的尺度为 σ ,生成的圆形特征区域如式(1):

$$(x - c_1)^2 + (y - c_2)^2 = (p\sigma)^2 \quad (1)$$

p 是调整圆形区域直径的因子,然后从剩下的特征点中选出 $|\det(H_{\text{approx}})|$ 值最大,且由式(1)确定的圆形区域与之前的区域不重叠的特征点^[12,13,23],重复上述操作. 由于这些特征点需要通过加密后以边信息的形式提交到公共数据库,太多则需要保存或传输的信息量太大,太少则不能准确地估计仿射矩阵,通过测试多幅 512×512 的灰度图像的实验结果,跟据纹理丰富程度的不同,选取 15 个左右的特征点比较合适,如图 3 所示.

4 几何攻击校正与水印重同步

4.1 仿射矩阵及其估计

通常情况,仿射变换前后的坐标关系如式(2)所示.

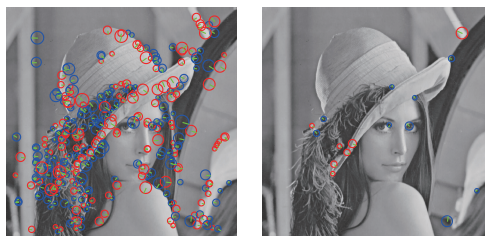


图2 中间尺度范围的特征点 图3 最终保留的特征点

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

点 (u, v) 为原始坐标, (x, y) 为变换后的坐标,其中仿射矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

几何攻击顺序不同则仿射矩阵相异,本文算法采用准确估计仿射矩阵 \mathbf{A} , 然后直接根据 \mathbf{A} 对受攻击的图像实施仿射逆变换,弥补了大多数鲁棒水印算法不能抗组和几何攻击的缺陷. 估计仿射矩阵 \mathbf{A} 的原理大致如本节下文所述.

在水印的检测端,首先利用 SURF 算法从受攻击的载体图像中提取特征矢量 $\boldsymbol{\Omega}_i (i = 1, 2, \dots, n_1)$, 与作为边信息的模板中的特征矢量 $\boldsymbol{Q}_j (j = 1, 2, \dots, n_2)$ 进行匹配,从而避免使用原图像. $\boldsymbol{\Omega}_i$ 、 \boldsymbol{Q}_j 中特征点的相似度可以用它们相应的描述矢量之间的欧氏距离表示,为减小因误匹配而导致的仿射矩阵估计的误差,本文先采用最近邻次近邻比值法对匹配的特征点进行挑选、

再用 RANSAC 算法筛选,以提高特征点的正确匹配率.实际操作过程如下.

(1) 对 Q_i 中的点在 Ω_i 中寻找最近和次近距离的点,设 d_1 为最近距离, d_2 为次近距离, α 是设定的阈值 ($0 < \alpha \leq 1$), 匹配的特征点对筛选条件如式(4)所示.

$$\begin{cases} d_1/d_2 < \alpha, & \text{保留} \\ d_1/d_2 \geq \alpha, & \text{剔除} \end{cases} \quad (4)$$

(2) 从最近邻次近邻比值法挑选得到的匹配点对中随机选取 3 组匹配的特征点,求得仿射矩阵 A_2 .

(3) 计算其余各点经过 A_2 变换后的坐标,并求出该结果和对应的受攻击图像真实坐标的差值.

(4) 计算结果和对应的真实坐标的差值小于给定阈值 T_{em} 的点则归为符合条件的点,否则为不符合条件的点.

(5) 统计这轮符合条件的点的个数 n .

(6) 重新随机选择另外 3 组匹配的特征点,再一次执行步骤(2)~(5),如果重新统计到的符合条件的点的个数大于以前计算得到的符合条件的点的最大个数,则保存新的 A_2 和 n .

经过最近邻次近邻比值法、RANSAC 算法的挑选,基本剔除了误匹配的点.然而,剩下的匹配特征点可能本身就存在误差,为了使仿射矩阵 A 的误差最小化,本文采用最小二乘法拟合出仿射矩阵 A .在求出仿射矩阵 A 后,对受攻击的图像进行逆仿射变换,校正图像的几何形变.

4.2 变换域水印的精准同步

4.2.1 精准同步模板

水印 W_2 的嵌入算法采用奇偶量化法,嵌入思路详见 5.2 节、6.1 节.本文将水印信息 W_2 嵌入到如图 4 所示载体图像特定位置块中,一个大方块由若干个小方块组成,一个小方块由若干像素构成,每个小方块嵌入 1bit 信息.并且每个小方块嵌入的水印信息与它周围的小方块是相异的,以增强定位的精准性.

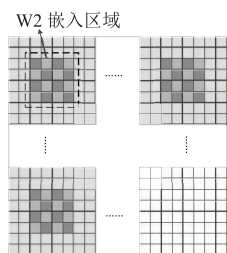


图4 W2嵌入区域

4.2.2 定位变换域水印嵌入起点

假设 W_1 原始的嵌入起点为 (x_{11}, y_{11}) , W_2 的 3 个特定位置水印嵌入起点为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) , 受攻击的载体图像在通过仿射矩阵校正后,对这三个

坐标进行重新搜索、定位,过程如下:在校正后的图像中找到上述 3 个特定位置的坐标,然后沿着以 (x, y) 为中心,高为 $2r$ 、宽为 $2r$ 的正方形区域(如图 5 所示)所含像素为搜索起点、以大方块为搜索单位,提取该区域的水印 W_2' ,并与原始的水印信息 W_2 相比较,记录归一化相关值 NC ^[13] 及相应的搜索块起点坐标,利用一个预先设定的检测阈值 ε 与每个单位大方块的归一化相关值 NC 进行比较,可以判断出该区域是否嵌入了水印信息.如文献[12,32]所述,水印的检测问题可以当作是一个假设检验过程.

H_0 : 如果 $NC \geq \varepsilon$, 则单位大方块区域中嵌入了水印;

H_1 : 如果 $NC < \varepsilon$, 则单位大方块区域中没有嵌入水印.

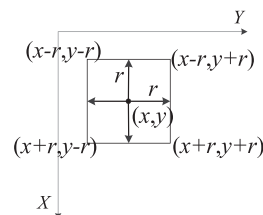


图5 搜索范围

根据文献[12,32]所描述的原理,结合本文算法中原始水印的长度 ($N=16$), ε 取 0.85 左右.假设符合条件的 NC 值对应的坐标分别为 (x_{1a}, y_{1a}) 、 (x_{2a}, y_{2a}) 、 \dots 、 (x_{na}, y_{na}) , 然后将相应的坐标进行加权平均,加权过程如式(5)所示, (x_r, y_r) 表示加权后得到的坐标.

$$\begin{cases} x_r = \frac{\sum_{m=1}^n [x_{ma} * (NC_m - \varepsilon)]}{\sum_{m=1}^n (NC_m - \varepsilon)} \\ y_r = \frac{\sum_{m=1}^n [y_{ma} * (NC_m - \varepsilon)]}{\sum_{m=1}^n (NC_m - \varepsilon)} \end{cases} \quad (5)$$

假设重新获得的 W_2 的 3 个嵌入位置起点分别为 (x_{r1}, y_{r1}) 、 (x_{r2}, y_{r2}) 、 (x_{r3}, y_{r3}) , 根据式(6)精准定位出几何校正后 W_1 的嵌入起点 (x'_{11}, y'_{11}) .

$$\begin{cases} x'_{11} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 (x_{11} + x_{rm} - x_m) \\ y'_{11} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 (y_{11} + y_{rm} - y_{2m-1}) \end{cases} \quad (6)$$

5 水印的嵌入与提取过程

5.1 变换域水印 W_1 的实现

针对现有的一些水印算法,比如常见的基于不变域、模板校正的水印算法抗剪切性能较差的现象,本文先将原水印信息 W_1 进行 LT 码编码,其过程为:①将水印信息分成 K 个待编码数据比特 Y_1, Y_2, \dots, Y_k , 设定编码冗余度为 R ;②根据 LT 码设计的度分布 $D(x)$, 随机地选取数据比特的度 d ;③从 K 个待编码的数据比特中,以等概率的方式选取 d 个不同的待编码数据比特;④将这 d 个待编码的数据比特进行异或运算,得到一

个已编码数据比特;⑤重复步骤②~④,可得 M 个已编码数据比特 Z_1, Z_2, \dots, Z_M 成为 W1 编码比特流 $W1(b)$, $b = 1, 2, 3, \dots$, 其中 $M = K \times (1 + R)$.

LT 码具有良好的纠删性能,但不能检错. 本文使用检错功能较强的 CRC 码进行检错,在 6/8 个 LT 编码数据比特后面加入 6/8 比特的 CRC 码构成一个 CRC 编码包. 变换域版权水印 W1 经 LT 码编码,添加 CRC 码的大致流程图如图 6 所示.

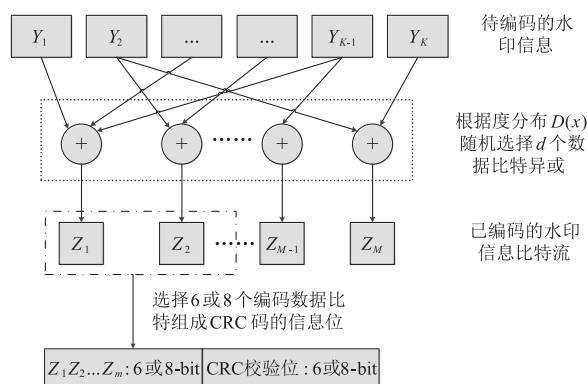


图6 W1的编码示意图

由于几何攻击和校正过程破坏了数字图像的边缘,像素的插值误差导致图像增加或减少了一些行和列,为了降低水印 W1 的误码率, W1 不嵌到整幅图像,而是嵌在离边缘还有一定距离的图像块中. 因此,先对水印 W1 嵌入区域进行一层/二层 DWT 变换,由于低频子带 LL_1/LL_2 集中了主要能量,将水印嵌入到该子带中将具有很好的鲁棒性. 然后,对低频子带 LL_1/LL_2 进行 8×8 的 DCT 变换,再利用 DCQIM 算法将水印嵌入到 DCT 变换块的中低频系数中,具体操作流程如下.

(1) 在需要嵌入 W1 编码比特流的 DCT 变换块 i 中选取 8 个备选嵌入点,其位置记为 $j, j = 1, 2, 3, \dots, 8$,并将嵌入点的 DCT 系数^[33]记为 $f_i(j)$.

(2) 在 8 个备选嵌入点中按不同要求选择 $c (1 \leq c \leq 8)$ 个点,作为嵌入的位置.

(3) 按照式(7)进行 W1 编码比特流的嵌入

$$f'_i(j) = (1 - \gamma) * \text{sign}(f_i(j)) * a_j * Q_m\left(\frac{|f_i(j)|}{a_j}\right) + \gamma * f_i(j) \quad (7)$$

其中, $Q_m(x) = \begin{cases} 2 * \lfloor x/2 + 0.5 \rfloor, & W1(b) = 0 \\ 2 * \lfloor x/2 \rfloor + 1, & W1(b) = 1 \end{cases}$

γ 为量化补偿参数^[28],取值在 $0 \sim 0.25$ 之间, a_j 为量化步长,是 JPEG 标准量化表中与位置为 j 的嵌入点对应的量化系数.

(4) 编码水印信息嵌入后,再进行 IDCT、IDWT,得到嵌入编码水印 W1 的载体图像.

版权保护水印 W1 的提取过程如下.

(1) 利用空间域 W2 的水印信息搜索重同步的图像,定位 W1 嵌入起点,同时截取含有水印 W1 的部分.

(2) 将嵌入水印 W1 的部分图像进行一层/二层 DWT,取出低频子带 LL_1/LL_2 ,再进行 8×8 的 DCT 变换,然后到相应的 DCT 变换块系数,按式(8)提取水印比特流 $W1(b)'$.

$$W1(b)' = g(\text{round}(f'_i(j)/a_j)) \quad (8)$$

其中, $g(x) = \begin{cases} 0, & \text{若 } x \text{ 为偶数} \\ 1, & \text{否则} \end{cases}$

(3) 利用 CRC 码对 $W1(b)'$ 进行检错,若错误则丢弃此数据包,利用剩余的数据包进行 LT 码译码,LT 码译码原理详见文献[27],恢复原水印 W1'.

5.2 空间域水印 W2 的实现

水印 W2 是在空间域的特定位置利用奇偶量化算法嵌入,如图 4 所示,具体嵌入步骤如下.

(1) 对所嵌入区域的每个像素 $I(x, y)$ 计算量化函数值 $Q(x, y)$,其中 Δ 表示量化步长

$$Q(x, y) = \begin{cases} 0, & k\Delta \leq I(x, y) < (k+1)\Delta, k=0, 2, 4, \dots \\ 1, & k\Delta \leq I(x, y) < (k+1)\Delta, k=1, 3, 5, \dots \end{cases} \quad (9)$$

(2) 求出每个像素的量化噪声 $\delta(x, y)$

$$\delta(x, y) = I(x, y) - \left\lfloor \frac{I(x, y)}{\Delta} \right\rfloor \Delta \quad (10)$$

(3) 确定像素的修改量 $m(x, y)$,使修改后的像素值处于量化区间的中点

$$m(x, y) = \begin{cases} -\delta(x, y) + 0.5\Delta, & \text{若 } Q(x, y) = W2(i) \\ -\delta(x, y) + 1.5\Delta, & \text{若 } Q(x, y) \neq W2(i) \\ & \text{且 } \delta(x, y) > 0.5\Delta \\ -\delta(x, y) - 0.5\Delta, & \text{若 } Q(x, y) \neq W2(i) \\ & \text{且 } \delta(x, y) \leq 0.5\Delta \end{cases} \quad (11)$$

(4) 修改后的像素值为 $I^*(x, y) = I(x, y) + m(x, y)$,对区域内的每个像素进行上述操作,得到嵌入水印 W2 的载体图像.

W2 的提取方法如下:受几何攻击图像在经过校正之后,对图像进行与嵌入过程相同的方块分割,然后对每个小方块内的像素利用式(9)计算量化函数值,并记函数值为 0 的像素个数为 $CNT_{i,0}$,函数值为 1 的像素个数为 $CNT_{i,1}$,通过式(12)提取水印 W2'.

$$W2'(i) = \begin{cases} 0, & \text{若 } CNT_{i,0} > CNT_{i,1} \\ 1, & \text{若 } CNT_{i,1} > CNT_{i,0} \end{cases} \quad (12)$$

6 实验结果与分析

为了验证本文算法的嵌入容量、透明性、鲁棒性,本文选取了两组图像进行测试,第一组包含三幅 512×512

的标准灰度图像(Lena、Peppers、Airplane),如图7所示。

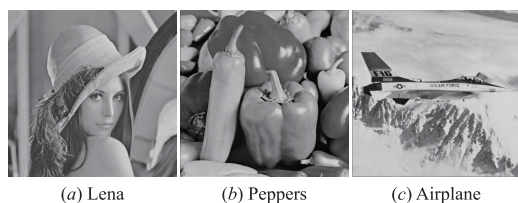


图7 第一组原始测试图像

第二组测试图像则是从 USC-SIPI 图像数据库^[25] 选取含“Barbara”、“Couple”、“Fishing boat”、“Clock”、“Bridge”等 100 幅不同纹理且尺寸为 512×512 的标准灰度图像。原始水印 W1 分别是长度为 480bits、128bits 的 0、1 二值序列。在图像中的嵌入区域(以图像的左上角为坐标原点)的起点为 (17, 17), 宽度和高度都是 480, 一些参数设置如表 2 所示。

表 2 部分实验参数

原始水印 W1 (bit)	480	128
CRC 信息位 (bit)	6	8
CRC 校验位 (bit)	6	8
编码后总长度 (bit)	5 400	1 800
冗余度	4. 625	6. 031
嵌入区域	LL ₁	LL ₂
单位混合变换块嵌入 (bit)	6	8

以表 2 的第二列为例,即原始水印 W1 的长度是 480bits,加入的 CRC 码,信息位与校验位长度都是 6bits,W1 经编码后的总长度是 5400bits,编码冗余度为 4. 625,每个 8×8 的 DWT-DCT 混合变换块嵌入 6bits,将水印嵌在进行一层 DWT 后低频子带 LL₁ 的 DCT 域,并且是混合变换块的前 6 个中低频系数上。

6.1 水印透明性

水印的透明性可用原始图像与嵌入水印的载体图像之间误差的峰值信噪比 PSNR^[10,11] 来表示。在进行 DWT-DCT 混合变换域水印的嵌入时,对于第一组测试图像,原始水印 W1 的长度为 480、128bits 时对应的量化步长 a_j 分别为 JPEG 量化表对应系数的 2.5 倍、3.2 倍。W2 为 16bits,重复嵌入到图像空间域的三个特定位置,这三个特定位置应尽量选有一定的纹理和边缘等视觉不易感知的区域,并且这三个特征位置的距离须尽量远些。在本文测试的第一组图像中,W2 的三个嵌入起点分别为 (25, 25)、(25, 463)、(463, 25),奇偶量化步长 Δ 需考虑到视觉隐蔽性、鲁棒性,根据所嵌区域纹理的不同, Δ 取 10 ~ 12 之间的值,每个大方块嵌入 16bits,一个大方块由 16 个小方块组成,每个小方块含 36 个像素,在嵌入两重水印后,当原始水印 W1 的长度为 480bits,三幅图像的 PSNR 分别为 41. 196dB、41. 281dB、41. 057dB;当 W1 的长度为 128bits,PSNR 分别为 43. 687dB、43. 781dB、43. 496dB;总体来说,三幅图像的 PSNR 比较高,水印的透明性较好。

对于第二组测试图像,当嵌入 480bits 水印信息时,它们的 PSNR 基本都在 40dB 以上;当嵌入 128bits 时,PSNR 基本都控制在 43dB 以上,水印的透明性都比较好。

6.2 水印鲁棒性

实验测试了本文算法抗常见几何攻击、组合几何攻击等攻击的性能,并与文献[9]、文献[11]中的算法进行了对比。水印的鲁棒性用还原的水印 W1 的误码率 BER 来描述。

6.2.1 抗常见几何攻击

表 3、表 4 列出了本文算法抗旋转、缩放、剪切、错切、系数不规则仿射变换等常见几何攻击的性能。

表 3 抗几何攻击的性能

攻击	Lena			Peppers			Airplane			100 幅图像		
	本文算法		文献[11]	本文算法		文献[11]	本文算法		文献[11]	本文算法		文献[11]
	480b	128b	64b	480b	128b	64b	480b	128b	64b	480b	128b	64b
旋转(0.25°)	0.139	0.033	0	0.134	0.029	0	0.125	0.027	0	0.133	0.031	0.029
缩放(0.8,0.8)	0.178	0.105	0.109	0.169	0.124	0.188	0.153	0.112	0.109	0.171	0.113	0.106
缩放(1.3,1.3)	0.124	0.029	0	0.128	0.034	0	0.115	0.028	0	0.126	0.033	0.052
错切(1%,1%)	0.186	0.037	0.016	0.182	0.039	0.047	0.172	0.053	0.078	0.181	0.042	0.049
仿射变换 (1.007,0.01;0.01,1.012)	0.189	0.088	0.078	0.184	0.046	0.031	0.135	0.053	0.063	0.182	0.062	0.054
仿射变换 (1.010,0.013;0.009,1.011)	0.201	0.093	0.094	0.182	0.055	0.047	0.198	0.058	0.063	0.193	0.065	0.056
仿射变换 (1.013,0.008;0.011,1.008)	0.248	0.109	0.094	0.228	0.075	0.063	0.206	0.063	0.047	0.234	0.076	0.061

由表 3 可知,本文算法在嵌入 128bits 的情况下,BER 与文献[11]的实验结果相近,在某些攻击下甚至更低。但本文算法的嵌入容量是它的 1 倍,在保证 BER 较低的情况下,本文算法的嵌入容量有很大的提升,并且在本文算法在嵌入容量为 480bits 时,依然能保持较

低的 BER,抗常见几何攻击的性能稳定。

对于剪切攻击,本文算法性能优异,实验结果为第一组与第二组测试图像的 BER 平均值,与文献[9]嵌入算法的实验结果对比如表 4 所示。文献[9]的实验参数是 LW = LG,平均嵌入容量为 30bits。只有在剪切尺度

超过 50%, LT 码的冗余度过小导致解码不成功才会使本文算法的误码率迅速增加。

表 4 抗剪切攻击的性能

攻击	本文算法		文献[9]		
	480b	128b	30b		
			$\beta=0$	$\beta=0.1$	$\beta=0.2$
剪切 10%	0	0	0.029	0.013	0.004
剪切 20%	0	0	0.036	0.017	0.005
剪切 30%	0	0	0.048	0.024	0.010
剪切 50%	0	0	-	-	-

在检验本文算法抗几何攻击的过程中,对 Stir-mark4.0^[34]中的 RotCrop、RotScale 攻击进行了测试,这类攻击失真很小却难以抵抗。RotCrop 是先将图像小角度旋转然后将图像的空白部分裁剪掉, RotScale 是将图像先旋转、再裁剪去空白部分、后放大到原图大小。在此类攻击下,本文算法的 BER 基本在 0.25 以下,如图 8 所示。当 RotScale (0.25, 0.5) 两个失真参数很小时, BER 才稍微增大。

6.2.2 抗组合几何攻击

图像在传播过程中所遭受的攻击是多样的,组合攻击就是比较常见的一种,其中几何攻击与 JPEG 压缩混合在一起更为常见。表 5 列出了本文算法在各种不同组合几何攻击下参数 BER 的变化情况。从表 5 可知本文算法对各种不同的组合几何攻击亦有较好的鲁棒性。

综合实验结果可得知:本文算法不但有较强的抗常规几何攻击的能力,而且抗组合几何攻击的性能也比较好。因为本文算法对几何攻击的仿射矩阵进行了精确的估计。同时,版权水印信息嵌在整幅图像中,因而本文算法还有嵌入容量较大的优点。更进一步,本文

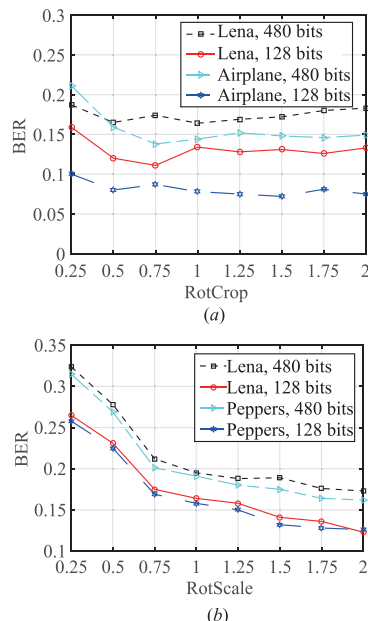


图 8 在 RotCrop, RotScale 攻击下的误码率

算法将版权水印信息先进行 LT 码编码,从而抗剪切性能优异。因为本文算法是基于整幅图像的全局重同步,因此对于过多的去除图像的行或列、图像随机扭曲等局部攻击效果稍差。另外,水印的检测过程中需要用到少量与载体图像特征点相关的边信息,没有完全实现水印的盲提取,这也是本文算法将来需要改进的地方。此外,由于水印信息进行了 LT 码编码,加了 CRC 校验码,导致信息冗余度大,水印嵌入强度降低,这是信道编码引入水印系统的普遍弱点—信道编码的冗余度将降低水印嵌入强度,也是本文算法需要进一步研究、完善的地方。

表 5 组合几何攻击下的误码率

攻击	Lena		Peppers		Airplane		100 幅图像	
	480b	128b	480b	128b	480b	128b	480b	128b
旋转 10° + 缩放(0.8, 0.8) + JPEG 90	0.335	0.228	0.319	0.231	0.346	0.238	0.342	0.235
平移(-13, -10) + 旋转 10° + 缩放(1.3, 1.3) + JPEG 80	0.267	0.187	0.258	0.181	0.269	0.183	0.262	0.183
旋转 5° + 缩放(0.8, 0.9) + JPEG 90	0.295	0.202	0.279	0.192	0.285	0.193	0.293	0.195
缩放(1.3, 1.1) + 旋转 15° + 平移(12, 15) + JPEG 80	0.271	0.189	0.258	0.182	0.264	0.181	0.265	0.183
错切(0%, %5) + 旋转 5°	0.246	0.178	0.228	0.168	0.215	0.153	0.233	0.162
错切(5%, %5) + 缩放(0.9, 0.9)	0.268	0.189	0.275	0.191	0.256	0.175	0.271	0.182
仿射变换(1.007) + 旋转 20°	0.253	0.187	0.258	0.183	0.248	0.171	0.249	0.175
仿射变换(1.010) + 缩放(1.2, 1.1)	0.271	0.185	0.260	0.181	0.251	0.173	0.264	0.182

7 结论

模板校正水印重同步的算法大多具有嵌入容量不够大或只能抗 RST 攻击而不能抵抗一般仿射变换和组合几何攻击的不足,鉴于此,本文尝试采用提高水印重同步精度从而可以将水印嵌入在整个图像中的思路加以改进。本文算法的创新点与贡献主要体现在以下几个方面:

(1) 本文在常见的基于模板校正、图像特征点的水印算法的基础上,通过精确估计仿射矩阵,弥补了许多水印算法抗一般仿射变换、组合几何攻击脆弱的缺陷。

(2) 在空间域嵌入一层水印对变换域水印的起点进行准确地定位,提高了水印重同步的精度,降低了提取水印的误码率,增大了嵌入容量,从而使本文算法具有更强的实用性。

(3) 将水印信息进行 LT 码编码后嵌入到载体图像

中,充分发挥 LT 码抗删除的优点,使本文算法抗剪切攻击性能良好.

参考文献

- [1] 黄殿中,张静飞,张茹,等. 基于大数据环境的多模态信息隐藏新体系[J]. 电子学报,2017,45(2):477-484.
HUANG Dian-zhong, ZHANG Jing-fei, ZHANG Ru, et al. New system of multi-modal information hiding based on big data environment[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(2):477-484. (in Chinese)
- [2] 付剑晶,王珂,徐建军. 一种面向多波段数字遥感影像的版权保护方案[J]. 电子学报,2016,44(3):732-739.
FU Jian-jing, WANG Ke, XU Jian-jun. A copyright protection scheme for multiband digital remote sensing imagery [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(3):732-739. (in Chinese)
- [3] XIN Y, LIAO S, PAWLAK M. Circularly orthogonal moments for geometrically robust image watermarking [J]. Pattern Recognition, 2007, 40(12):3740-3752.
- [4] ZHANG L, XIAO W-W, JI Z. Local affine transform invariant image watermarking by Krawtchouk moment invariants [J]. IET Information Security, 2007, 1(3):97-105.
- [5] ZHANG L, XIAO W-W, JI Z. Geometric invariant blind image watermarking by invariant Tchebichef moments[J]. Optics Express, 2007, 15(5):2251-2261.
- [6] GOLABI S, HELFROUSH M S, DANYALI H, MEHRI O. Robust watermarking against geometric attacks using partial calculation of radial moments and interval phase modulation[J]. Information Sciences, 2014, 269(11):94-105.
- [7] LIN CY, WU M, BLOOM JA, et al. Rotation, scale, and translation resilient watermarking for images [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(5):767-782.
- [8] SIMITOPOULOS D, KOUTSONANOS D E, STRINTZIS M G. Robust image watermarking based on generalized Radon transformations [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2003, 13(8):732-745.
- [9] ZONG T, XIANG Y, NATGUNANATHAN I, et al. Robust histogram shape-based method for image watermarking [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2015, 25(5):717-729.
- [10] LI L-D, LI S-S, ABRAHAM A, PAN J-S. Geometrically invariant image watermarking using polar harmonic transforms[J]. Information Sciences, 2012, 199(16):1-19.
- [11] TIAN H-W, ZHAO Y, NI R-R, et al. LDFT-based watermarking resilient to local desynchronization attacks [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(6):2190-2201.
- [12] 王向阳, 郭俊, 侯丽敏. 一种基于图像特征点的数字水印嵌入方法[J]. 电子学报, 2007, 35(7):1318-1322.
WANG Xiang-yang, WU Jun, HOU Li-min. A feature-based digital image watermarking algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(7):1318-1322. (in Chinese)
- [13] 李雷达, 郭宝龙, 表金峰. 基于奇偶量化的空域抗几何攻击图像水印算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1):134-138.
LI L-D, GUO B-L, BIAO J-F. Spatial domain image watermarking scheme robust to geometric attacks based on odd-even quantization [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(1):134-138. (in Chinese)
- [14] SU P-C, CHANG Y-C, WU C-Y. Geometrically resilient digital image watermarking by using interest point extraction and extended pilot signals [J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2013, 8(12):1897-1908.
- [15] NIU P-P, WANG X-Y, LIU Y-N, et al. A robust color image watermarking using local invariant significant bitplane histogram [J]. Multimedia Tools & Applications, 2017, 76(3):3403-3433.
- [16] PEREIRA S, PUN T. Robust template matching for affine resistant image watermarks [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(6):1123-1129.
- [17] KANG X-G, HUANG J-W, SHI Y-Q, LIN Y. A DWT-DFT composite watermarking scheme robust to both affine transform and JPEG compression [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2003, 13(8):776-786.
- [18] BARNI M. Effectiveness of exhaustive search and template matching against watermark desynchronization [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2005, 12(2):158-161.
- [19] 张力, 钱恭斌, 肖薇薇. 基于 Tchebichef 矩的几何攻击不变性第二代水印算法 [J]. 软件学报, 2007, 18(9):2283-2294.
ZHANG L, QIAN G-B, XIAO W-W. Geometric distortions invariant blind second generation watermarking technique based on Tchebichef moment of original image [J]. Journal of Software, 2007, 18(9):2283-2294. (in Chinese)
- [20] 楼偶俊, 王钰旋. 基于特征点模板的 Contourlet 域抗几何攻击水印算法研究 [J]. 计算机学报, 2009, 32(2):308-317.
LOU O-J, WANG Z-X. A contourlet-domain watermarking algorithm against geometric attacks based on feature template [J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(2):308-317. (in Chinese)
- [21] 王春桃, 倪江群, 卓华硕, 等. 基于可变形多尺度变换的

- 几何不变鲁棒图像水印算法[J]. 自动化学报, 2011, 37(11):1368-1380.
- WANG C-T, NI J-Q, ZHUO H-S, et al. A geometrically invariant robust image watermarking based on deformable multi-scale transform[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(11):1368-1380. (in Chinese)
- [22] ZHANG H, SHU H, COATRIEUX G, et al. Affine Legendre moment invariants for image watermarking robust to geometric distortions [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(8):2189-2199.
- [23] JI F, DENG C, AN L-L, HUANG D-Y. Desynchronization attacks resilient image watermarking scheme based on global restoration and local embedding[J]. Neurocomputing, 2013, 106(6):42-50.
- [24] RYU S J, KIRCHNER M J, LEE M J, LEE H K. Rotation invariant localization of duplicated image regions based on zernike moments[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2013, 8(8):1355-1370.
- [25] WANG X-Y, LIU Y-N, LI S, YANG H-Y, NIU P-P. Robust image watermarking approach using polar harmonic transforms based geometric correction[J]. Neurocomputing, 2016, 174:627-642.
- [26] WANG C, WANG X, ZHANG C, et al. Geometric correction based color image watermarking using fuzzy least squares support vector machine and Bessel K form distribution[J]. Signal Processing, 2017, 134(5):197-208.
- [27] MACKAY D J C. Fountain codes [J]. IEE Proceedings Communications, 2005, 152(6):1062-1068.
- [28] KORUS P, BIAŁAS J, DZIECH A. A new approach to high-capacity annotation watermarking based on digital fountain codes [J]. Multimedia Tools & Applications, 2014, 68(1):59-77.
- [29] BAY H, ESS A, TUYTELAARS T, LUC V G. Speeded-up robust features[J]. Computer Vision & Image Understanding, 2008, 110(3):346-359.
- [30] 张志斌, 赵帅领, 罗锡文, 等. 基于 SURF 算法的绿色作物特征提取与图像匹配方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14):172-178.
- ZHANG Z-B, ZHAO S-L, LUO X-W, et al. Matching method of green crops based on SURF feature extraction [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14):172-178. (in Chinese)
- [31] LUO J, GWUN O. A comparison of SIFT, PCA-SIFT and SURF [J]. International Journal of Image Processing, 2009, 3(4):143-152.
- [32] COX I J, MILLER M L, BLOOM J A, et al. Digital Watermarking and Steganography (Second Edition) [M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2008.
- [33] 苏娜. 基于 DCT 域的数字图像水印算法的研究与应用 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- SU Nan. Research and Application of Digital Watermarking Algorithm Based on DCT Transform Domain [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- [34] PETITCOLAS F A P. Watermarking schemes evaluation [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2000, 17(5):58-64.

作者简介



章无用 男. 1987 年 10 月出生, 湖北咸宁人. 2017 年毕业于云南大学通信与信息系统专业, 获工学硕士学位. 现为武汉大学电子信息学院博士研究生. 主要研究方向为数字水印、信道编码、图像处理.

E-mail: zwy819144856@sina.com



陈建华 (通信作者) 男. 1964 年生, 云南昆明人. 教授、博士生导师. 1984 年进入云南大学电子工程系任教. 分别于 1984 年、1990 年在华中科技大学获工学学士、工学硕士学位, 1998 年于香港中文大学获 Ph. D. 主要研究方向为数据压缩、数字水印、信号处理.

E-mail: chenjh@ynu.edu.cn



胡耀垓 (通信作者) 男. 1972 年生. 武汉大学电子信息学院教授、博士生导师. 主要研究方向为空间探测与信息处理技术.

E-mail: yaogaihu@whu.edu.cn