图文信息技术

基于 FFST 和 Hessenberg 分解的立体图像零水印算法

韩绍程^{1a},张鹏^{1b},李鹏程²

(1.中国民航大学 a.工程技术训练中心 b.电子信息与自动化学院,天津 300300; 2.成都宇飞信息工程有限公司,成都 610041)

摘要:目的 为提高立体图像零水印方案抗几何攻击性能,提出一种基于快速有限剪切波变换(FFST) 和 Hessenberg 分解的立体图像零水印算法。方法 首先分别对原始立体图像在 YCbCr 颜色空间下的左右 视点亮度分量进行 FFST, 然后在得到的 2 个低频子带中,基于随机子块选择策略和 Hessenberg 联合分 解来构造鲁棒特征矩阵,最后与预处理后的二值水印执行异或运算生成认证零水印。此外,零水印检测 前先采用傅里叶-梅林变换方法对待认证的立体图像进行几何校正。结果 与相关算法相比,文中算法对 常见非几何和几何攻击提取水印的平均 NC 值为 0.984 1,表现出更优的抗攻击性能。结论 所提算法具 有无损性和较强的安全性,可为立体图像版权保护提供可行的解决方案。 关键词:立体图像;零水印;快速有限剪切波变换; Hessenberg 分解;几何攻击

中图分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)09-0197-10 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.09.027

Stereo Image Zero Watermarking Algorithm Based on FFST and Hessenberg Decomposition

HAN Shao-cheng^{1a}, ZHANG Peng^{1b}, LI Peng-cheng²

(1. a. Engineering Techniques Training Center b. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Chengdu Yufei Information Engineering Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

ABSTRACT: To improve the capability of stereo image zero watermarking scheme anti-geometric attacks, this work a stereo image zero watermarking algorithm based on Fast Finite Shearlet Transform (FFST) and Hessenberg decomposition is proposed. Firstly, the FFST is applied to the luminance components on the left and right viewpoint respectively of the original stereo image in the YCbCr color space to obtain the two low-frequency subbands. Then the robust feature matrix is constructed based on the random sub-block selecting strategy and Hessenberg joint decomposition from the above subbands. Finally, the certified zero watermark is produced by executing exclusive OR on the robust matrix and the preprocessed binary watermark. Furthermore, the Fourier-Mellin Transform is used to correct the stereo image to be certified before zero watermarking detection. Compared with related algorithms, the algorithm in this paper has an average NC value of 0.984 1 for common non-geometric attacks, showing better anti-attack capability. The proposed algorithm has lossless and strong security, and can provide a feasible solution for stereo image copyright protection.

KEY WORDS: stereo image; zero watermarking; fast finite shearlet transform (FFST); Hessenberg decomposition; geometric attack

基金项目:国家自然科学基金 (62172418);天津市教委科研计划 (2018KJ246);中央高校基本科研业务费项目中国民航 大学专项 (3122018S008)

作者简介:韩绍程(1981—),男,高级实验师,主要研究方向为数字水印和信息隐藏。

收稿日期: 2021-09-06

近年来,多媒体数据的盗版、侵权现象屡见不鲜。 数字图像水印技术作为一种有效的解决手段,可以将 用户的版权信息作为水印事先隐藏到载体图像中,并 在载体受到一定程度的攻击破坏后,通过从中提取水 印来证明其版权归属,但水印的嵌入会对载体图像的 视觉质量造成一定的破坏^[1]。零水印技术的出现^[2], 可以有效避免以上问题。图像零水印技术是从原始图 像中提取出鲁棒特征,进而构造出零水印,这一过程 不会对载体图像造成任何破坏,避免了传统水印方法 中鲁棒性和透明性之间的矛盾。

图像零水印算法一直受到众多研究者的关注。熊 祥光[3]针对灰度图像,在空域中利用载体图像分块整 体均值与分块均值间的大小稳定关系来构造二值零水 印。曲长波等^[4]直接利用原始彩色图像 R、G、B 三分 量之间的关系构造彩色零水印。以上空域零水印算法, 运行效率较高,但鲁棒性欠佳。Xia等^[5]将3幅CT灰 度图像作为一个整体,利用四元数极谐-Fourier 矩生 成零水印信息,达到同时保护3幅医学图像版权的 目的。Yang 等^[6]基于快速四元数广义极复指数变换, 从原始彩色图像中提取出鲁棒的混合低阶矩特征,用 于构造鲁棒零水印。文献[5]和[6]由于均利用了四元 数不变矩特征,算法可以抵抗常规几何攻击,但算法 复杂度较高且不能很好地抵抗剪切和平移攻击。 Wang 等^[7]是在非下采样金字塔分解和 DCT 混合变换 域内,利用中频系数的极性特征构造零水印信息,同 时提出了一种新颖的图像旋转校正方法。

以上均是针对单视点图像(平面图像)的零水印 方法,而随着多媒体技术的飞速发展,立体图像因比 传统的单视点图像更具逼真感,近年来已在生活、科 技、军事等领域得到了广泛应用。相较二维图像而言, 立体图像系统一般由左右2个视点图像组成,因此在 设计水印算法时,往往需要考虑立体图像左右视点图 像之间的内在相关性。Wang 等^[8]以三元数理论为基 础,提出三元数圆谐--Fourier矩,并利用其幅值的稳 定性来构造立体图像二值零水印。同理, Yamni 等^[9] 将彩色立体图像左右视点图像的 R、G、B 通道共 6 个分量,视为八元数的 6 个虚部,利用八元数径向 Tchebichef 矩构造鲁棒零水印。以上2种算法整体较 优,但均较难抵抗图像平移攻击。为解决立体图像版 权保护和提高抗几何攻击性能问题,文中提出一种基 于 FFST 和 Hessenberg 分解的立体图像鲁棒零水印新 算法。经实验证明,该算法对非几何攻击和一定程度 的几何失真均表现出较为优越的鲁棒性。

1 基本原理

1.1 线性反馈移位寄存器

线性反馈移位寄存器(LFSR)作为一种基本的 密钥流生成器,其能够生成最长周期为2ⁿ-1(n 为 LFSR 的位数)的伪随机序列。LFSR 序列具有良好 的伪随机特性,这使其在图像置乱技术中获得良好应 用^[10]。综合考虑水印算法的安全性和运行速度,文中 拟采用如图 1 所示的 8 位 LFSR 对原始水印图像进行 置乱。由图 1 可知,该 8 位 LFSR 的反馈函数表达式 为: $f = a_8 \oplus a_7 \oplus a_5 \oplus a_3 \oplus a_1$,其中 a_i (i = 1, 2, ..., 8)为 二元存储器。



Fig.1 8-bit linear feedback shift register

1.2 分数阶 Arneodo 混沌系统

与常见混沌加密系统相比^[11],分数阶 Arneodo 混沌系统的密钥空间较大,且拥有独特的记忆特性, 使其产生的混沌序列更具复杂度和安全性^[12],非常适 合用于图像加密。该混沌系统数学模型见式(1)。

$$\frac{d^{q_1}x}{dt^{q_1}} = y$$

$$\frac{d^{q_2}y}{dt^{q_2}} = z$$

$$\frac{d^{q_3}z}{dt^{q_3}} = -b_1x - b_2y - b_3z + b_4x^3$$
(1)

式中: b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为系统控制参数; q_1 、 q_2 、 q_3 为阶数。通过设定迭代初值 x_0 、 y_0 、 z_0 ,该系统可 以产生一个三维的混沌序列。

1.3 快速有限剪切波变换

作为一种优良的多尺度分析方法,剪切波变换可 用来表示二维以及高维空间上曲线的特性,克服了小 波变换方向表达能力受限的缺陷^[13]。离散剪切波的时 域和频域表达式^[14]见式(2)和式(3)。

$$\hat{\psi}_{j,k,m}(x) = \psi[A_{a_j}^{-1}S_{s_{j,k}}^{-1}(x-t_m)]$$

$$\hat{\psi}_{j,k,m}(\omega) = \hat{\psi}[A_{a_j}^{\mathrm{T}}S_{s_{j,k}}^{\mathrm{T}}\omega]\exp(-2\pi i \langle \omega, t_m \rangle) =$$

$$\hat{\psi}_1(4^{-j}\omega_1)\hat{\psi}_2(2^j\frac{\omega_2}{\omega_1}+k)\exp(-\frac{2\pi i}{N}\langle \omega, t_m \rangle)$$
(3)

式中: A_a 为膨胀矩阵; S_s 为剪切矩阵; N 为图 像维数; a_j 、 $s_{j,k}$ 和 t_m 分别为离散化后的尺度、剪切 和平移参数, j、k 和m 为相应的控制参数。 a_j 、 $s_{j,k}$ 和 t_m 表达式见式(4)。

$$\begin{cases} a_{j} = 2^{-2j} = \frac{1}{4^{j}} \quad j = 0, \dots, j_{0} - 1 \\ s_{j,k} = k2^{-j} \quad -2^{j} \leq k \leq 2^{j} \\ t_{m} = \frac{m}{N} \quad m \in \mathcal{G} \end{cases}$$

$$(4)$$

为得到整个频域上的剪切波,在锥面交叉处定义 $|k|=2^{j}$,则剪切波和的计算见式(5)。

$$\hat{\psi}_{j,k,m}^{h \times v} = \hat{\psi}_{j,k,m}^{h} + \hat{\psi}_{j,k,m}^{v} + \hat{\psi}_{j,k,m}^{\times}$$
(5)

式中: $\hat{\psi}_{j,k,m}^{h}$ 为水平锥处的剪切波; $\hat{\psi}_{j,k,m}^{v}$ 为垂直 锥处的剪切波; $\hat{\psi}_{ikm}^{x}$ 为锥面交叉线处的剪切波。

故离散剪切波见式(6)。

$$S(f)(j,k,m) = \begin{cases} \langle f, \phi_m \rangle & \tau = 0 \\ \langle f, \hat{\psi}_{j,k,m}^{\tau} \rangle & \tau \in \{h,v\} \\ \langle f, \hat{\psi}_{j,k,m}^{h \times v} \rangle & \tau = \times, |k| = 2^j \end{cases}$$
(6)

式中: $j = 0, 1, \dots, j_0 - 1$; $-2^j \leq k \leq 2^j$; $m \in \mathcal{G}$; ×表示锥面交叉线。

使用 FFT 可以快速有效地实现式(6) 中的离散 剪切波,即为快速有限剪切波变换(FFST)。与传 统小波变换不同的是, FFST 得到的所有子带图像与 原图像具有相同大小的尺寸,这有助于提高水印的嵌 入量。

1.4 Hessenberg 分解

对于单个 n 阶方阵 A,其 Hessenberg 分解形式见 式 (7)。

$$\boldsymbol{A} = \boldsymbol{Q} \boldsymbol{H} \boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

相似地,对于2个n阶方阵B和C,可以将它们 组合在一起进行分解,这里简称为 Hessenberg 联合分 解,见式(8)。

$$[\boldsymbol{B}_{\mathrm{h}}, \boldsymbol{C}_{\mathrm{h}}, \boldsymbol{V}, \boldsymbol{Z}] = hess(\boldsymbol{B}, \boldsymbol{C})$$
(8)

式中: B_h 为上 Hessenberg 矩阵; C_h 为上三角矩 阵; V 和 Z 为酉矩阵, 且满足 $B_h = V * B * Z$ 和

 $C_{\rm h} = V * C * Z$ 。利用 Hessenberg 联合分解,可以将 立体图像的左右视点图像视为一组图像同时进行处理, 有效保留左右视点图像间的相关性,进而提高水印算法 的鲁棒性。此外,与2个方阵分别进行单独 Hessenberg 分解相比, Hessenberg 联合分解具有更好的时效性, 上述 2 种分解方式在图像块大小(4×4)相同的情况 下,依次分解若干图像块所需的总时间,见表1。

表 1 2 种分解方式所需总时间 Tab.1 Total time of the two decomposition methods 10^{-4} s								
图像块数目	联合分解	单独分解						
2^{6}	10.23	11.34						
2^{8}	17.39	19.58						
2^{10}	45.92	53.73						
2^{12}	165.52	198.34						

经过大量实验发现,对立体图像左右视点图像经 FFST 后的低频子带进行分块 Hessenberg 联合分解 后,得到的2个系数矩阵中第1行元素绝对值均较大, 这表明第1 行元素分别聚集了左右视点图像的大部 分能量。假设L和R是分别来自左右视点图像经FFST 后的某一对 4×4 大小的低频图像块,见图 2a—b。对 L 和 R 按照式(8)进行 Hessenberg 联合分解后可得 到一个上 Hessenberg 矩阵 L_h 和一个上三角矩阵 R_h , 以及 2 个酉矩阵 V 和 Z, 见图 2c-f。由图 2c 和图 2d 可以看出, Hessenberg 联合分解后得到的2个系数 矩阵 L_h 和 R_h 中的第1行元素绝对值明显大于其余元 素,即其分别代表了 L 和 R 的主要能量。实验中发 现的这一稳定特性可作为后续构造原始立体图像鲁 棒零水印特征的依据。

167.59	167.89	168.22	168.58	147.76	145.84	143.97	142.16
167.25	167.62	168.02	168.45	148.51	146.55	144.65	142.79
166.85	167.29	167.76	168.25	149.24	147.26	145.32	143.43
166.37	166.89	167.42	167.98	149.96	147.95	145.98	144.06
a 图像块 <i>L</i>					b 图值	象块 R	

-334.03	-77.16	-206.38	-538.14	-297.75
2.74	0.63	1.69	3.83	0
0	5×10 ⁻⁷	2×10 ⁻⁵	-0.009 7	0
0	0	1×10 ⁻⁶	3×10^{-4}	0

297.75	-68.78	-183.84	-462.39
0	2×10 ⁻⁶	-0.005 3	0.18
0	0	2×10^{-5}	0.01
0	0	0	-3×10^{-4}

d 上三角矩阵 R_h

c 上 Hessenberg 矩阵 L_h

-0.49 -0.49-0.50-0.500 0 0 1 0.66 0.23 -0.21-0.670 0.67 0.26 0.68 -0.510.52 -0.480.48 0 -0.680.49 0.53 0.21 -0.65-0.23 0.22 0.68 0 -0.540.80 e 酉矩阵 V f 西矩阵Z



· 200 ·

2 零水印算法

2.1 原始二值水印预处理

假设原始二值水印 W 的大小为 n×n, 对其先后 进行置乱和加密的预处理步骤如下所述。

将 8 位 LFSR 的初始状态设置为密钥 K₁,根据 K₁成长度为 n²的 LFSR 序列,将其转化成二值矩阵后与原始水印 W 执行异或运算,再将异或后的图像 W₁通过 Z 字形扫描成行向量 W₂。

2) 将分数阶 Arneodo 混沌系统的相关参数设置 为密钥 K_2 ,根据 K_2 利用该混沌系统生成一个长度同 为 n^2 的三维混沌序列 { $P_k | k = X, Y, Z$ },从中随机选择 一个序列并对其进行升序排序,进而获得排序后的位 置指示向量 G_o

3) 使用位置指示向量 G 对行向量 W₂进行重排 序,再将重排序后的结果进行 Z 字形逆扫描得到最终 加密后的二值水印 W₃。

2.2 零水印生成算法

假设原始立体图像 I 的大小为 N×N, 零水印生成具体步骤如下所述。

1)将原始立体图像 I 的左右视点图像 $I_L 和 I_R$ 分别转换到 YCbCr 颜色空间,并分别对该颜色空 间下的 2 个亮度分量 $Y_L 和 Y_R$ 进行 $l \in FFST$,获 得 2 个低频子带 $Y_{LL} 和 Y_{RL}$ 。

2) 对低频子带 Y_{LL} 和 Y_{RL} 进行 $m \times m$ 大小的非 重叠分块,再利用式 (9) 所示的随机子块选择函 数从 2 个低频子带中分别随机挑选出 $n \times n$ 个图像 块,并记作 $E_{i,i}^{L}$ 和 $E_{i,i}^{R}$ (1 $\leq i, j \leq n$)。

 $[D_{\text{row}}, D_{\text{col}}] = \text{Random_selection}(J_{\text{range}}, J_{\text{count}}, K_3)$ (9)

式中: Random_selection()为随机子块选择函数; J_{range} 为每个非重叠图像块坐标的取值范围; J_{count} 为要选择的图像块总数目; K_3 为密钥(随机种子); D_{row} 和 D_{col} 分别为所选图像块在 Y_{LL} 和 Y_{RL} 中的行号和列号。

3)将从低频子带 Y_{LL} 和 Y_{RL} 中同一位置选出的 2 个图像块 $E_{i,j}^{L}$ 和 $E_{i,j}^{R}$ 视作一组,按照式(10) 对其进行 Hessenberg 联合分解。

$$\left[\boldsymbol{L}_{i,j}^{\mathrm{h}}, \boldsymbol{R}_{i,j}^{\mathrm{h}}, \boldsymbol{V}_{i,j}, \boldsymbol{Z}_{i,j}\right] = \operatorname{hess}(\boldsymbol{E}_{i,j}^{\mathrm{L}}, \boldsymbol{E}_{i,j}^{\mathrm{R}})$$
(10)

4)通过比较步骤 3 中所有分组 Hessenberg 联 合分解后 2 个系数矩阵 $L_{i,j}^{h}$ 和 $R_{i,j}^{h}$ 各自第 1 行元素 l_{1} 范数的大小关系,构造原始立体图像的鲁棒特征矩 阵 T,见式(11)。

$$\boldsymbol{T}(i,j) = \begin{cases} 1 & \sum_{k=1}^{m} \left| \boldsymbol{L}_{i,j}^{h}(1,k) \right| \ge \sum_{k=1}^{m} \left| \boldsymbol{R}_{i,j}^{h}(1,k) \right| \\ 0 & \text{Tr} [\boldsymbol{y}] \end{cases}$$
(11)

5) 对加密水印 W₃和特征矩阵 T 执行异或运算, 得到最终的认证零水印 W_z,见式(12),最后将认证 零水印保存到水印注册中心的水印数据库中,即完成 零水印的生成过程。

$$\boldsymbol{W}_{\rm Z} = \operatorname{XOR}(\boldsymbol{W}_3, \boldsymbol{T}) \tag{12}$$

零水印生成过程见图 3。



图 3 零水印生成过程 Fig. 3 Zero watermark generating process

2.3 零水印检测算法

零水印检测过程与零水印生成过程相似,仅在零水印检测前增加了使用傅里叶-梅林变换(FMT)对待认证立体图像进行几何攻击校正的环节。FMT 作为一种成熟的图像几何校正技术^[15],能够对 2 幅经历旋转、缩放和平移(RST)失真的图像进行几何配准,故文中拟采用 FMT 来改善所提出零水印算法的抗 RST 攻击能力。零水印检测过程的具体步骤如下所述。

1)将待认证立体图像 *I*'的左右视点图像分别记 作 *I*′_L和 *I*′_R,并采用基于 FMT 的图像配准方法分别 对 *I*′_L和 *I*′_R进行 RST 几何攻击校正。

2)将校正后的左右视点图像执行零水印生成过

程中的步骤 1—4,构造出待认证立体图像 I'的鲁棒特 征矩阵 T'。

3)从水印注册中心取出保存的认证零水印 W_z, 并对其与上述步骤中的特征矩阵 T'执行异或运算,提 取出加密水印 W_s,见式(13)。

$$W_{\rm s} = {\rm XOR}(W_{\rm Z}, T') \tag{13}$$

4)最后使用水印预处理过程中相同的密钥 K₁和 K₂依次对加密水印 W_s进行解密,即可检测出最终的 水印信息 W'。

3 实验结果与分析

实验仿真在 Matlab 2020b 环境下进行,测试图像 为 25 组来自 Middlebury Stereo Datasets 数据库的标 准双目立体图像。数据库中的 Art、Dwarves、 Flowerpots、Hoops 4 组立体图像见图 4, 其大小均为 512×512。原始二值水印采用大小 64×64 的含有 "CAUC"字样的版权 Logo 图像,见图 5a;对原始水 印进行置乱和加密后的结果见图 5b。实验中,其他 相关参数的设置: 8 位 LFSR 的初始状态设置为 10101010; 分数阶 Arneodo 混沌系统的控制参数 $(b_1, b_2, b_3, b_4) = (-5.5, 3.5, 0.8, -1.0), \ intermode in the conductive of th$ z_0)=(-0.2, 0.5, 0.2), 阶数(q_1, q_2, q_3)=(0.97, 0.97, 0.96); 左右视点图像 FFST 时选择层数 1=3; 图像非重叠分 块大小 m=4。文中采用相关系数(NC)来衡量原始 水印 W 和被检测水印 W'之间的相似度^[16],其 NC 值 为[0,1]。当 NC 值越接近于 1 时, 表示 W 和 W 之间 相似度越高,即算法的鲁棒性越强。NC 值计算公式 见式(14)。

$$NC(\boldsymbol{W}, \boldsymbol{W}') = \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \boldsymbol{W}(i, j) \boldsymbol{W}'(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \boldsymbol{W}^{2}(i, j)} \sqrt{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \boldsymbol{W}'^{2}(i, j)}}$$
(14)



a 左视点图像



b 右视点图像

图 4 立体图像 Art、Dwarves、Flowerpots、Hoops Fig.4 Stereo images Art, Dwarves, Flowerpots, Hoops





a 原始水印

图 5 水印图像预处理 Fig.5 Watermarking preprocessing

3.1 零水印唯一性与安全性测试

为验证不同原始立体图像之间零水印的唯一性, 分别计算由图4中的4组立体图像所构造的零水印之间的 NC 值,并对比其相似度,具体结果见表2。

表 2 零水印相似度测试 Tab.2 Similarity test of zero watermark

测试图像	Art	Dwarves	Flowerpots	Hoops
Art	1.000 0	0.507 1	0.570 8	0.640 0
Dwarves	0.507 1	1.000 0	0.567 8	0.579 3
Flowerpots	0.570 8	0.567 8	1.000 0	0.594 0
Hoops	0.640 0	0.579 3	0.594 0	1.000 0

从表 2 可以看出, 4 组不同立体图像构造的零水 印之间相似度均小于 0.64。由此可以认为, 不同立体 图像构造的零水印之间有明显差异, 即表明该算法构 造的零水印具有唯一性。

为了说明文中算法的安全性,利用随机生成的 [0,1]二值矩阵分别对上述4组立体图像进行安全性测 试。将随机生成的 100 个二值矩阵视为鲁棒特征矩 阵,用于提取加密后的水印信息,并使用 NC 值来衡 量其与不同立体图像构造的零水印之间的相似度,具 体测试结果见图 6。对于图 6 中的每个子图,第 50 个随机矩阵被分别替换为不同立体图像对应构造的 鲁棒特征矩阵。

由图 6 可以看出,利用随机生成的 100 个[0,1] 矩阵提取到的水印信息与不同立体图像构造的零水 印之间的相似度明显小于 1,均在 0.5 上下波动,此 时提取到的水印中已经无法辨识出有意义的二值信 息,即无法判断其版权归属。如果使用对应原始立体 图像构造的鲁棒特征二值矩阵去提取水印信息时,得 到的 NC 值为 1 (图 6 中第 50 个随机矩阵对应的 NC 值),故表明该算法具有很好的安全性。

3.2 鲁棒性测试

文中算法适用于双目视觉模型的立体图像,攻击 方式包括非对称攻击(Asymmetric Attack)和对称攻 击(Symmetric Attack)2种,其中非对称攻击指只攻 击立体图像的某一视点图像(文中为攻击右视点图 像),对称攻击指使用相同的参数同时攻击立体图像的左右视点图像。算法的鲁棒性使用原始水印和被检测水印之间的 NC 值来衡量,这里用 ANC 值和 SNC 值分别表示非对称攻击和对称攻击时的 NC 值。

3.2.1 非几何攻击

非几何攻击是一类能改变图像像素值的常见水 印攻击。为了测试文中算法在该类攻击下的鲁棒性, 分别选取6种较大强度攻击对上述4组立体图像进行 测试,测试结果见表3。

由表 3 可看出,4 组立体图像经过高斯、椒盐 2 种噪声攻击后,在非对称和对称攻击方式下所有提取 水印的 NC 值的平均值为 0.990,表明该算法有很强 的抗噪声性能。在滤波攻击方面,提取水印的 NC 值 均在 0.990 2 以上,有效证明该算法能够有效地抵抗 中值滤波和维纳滤波攻击。针对图像压缩攻击,选取 了 JPEG 和 JPEG2000 2 种不同压缩方式,最终的平 均 NC 值为 0.996 4;即使在图像经历压缩因子=10 的 JPEG 压缩后,提取水印的 NC 值仍在 0.992 4 以上, 说明该算法抗图像压缩攻击性能优越。由于 FFST 具有良好的图像降噪性能,同时左右视点图像经过 FFST 的低频子带进行 Hessenberg 联合分解后,得到 的 2 个系数矩阵中的第 1 行元素对外界干扰表现得 十分稳定,从而使得文中算法能够有效抵抗非几何 攻击。

3.2.2 几何攻击

为了测试文中算法在抵抗几何攻击方面的性能, 分别对上述 4 组立体图像进行不同程度的几何攻击 测试,具体结果见图 7a—d。



图 6 零水印安全性测试 Fig.6 Zero watermarking security test

表 3 非几何攻击测试结果 Tab.3 Test results of non-geometric attack

团協	高斯噪	吉(0.03)	椒盐噪	声(0.05)	中值滤	波(9×9)	维纳滤	波(9×9)	JPEG 归	玉缩(10)	JPEG2000	压缩(90)
E W	ANC 值	SNC 值	ANC 值	SNC 值	ANC 值	SNC 值	ANC 值	SNC 值	ANC 值	SNC 值	ANC 值	SNC 值
Art	0.984 8	0.994 3	0.983 2	0.997 4	0.990 2	0.990 9	0.996 1	0.998 2	0.997 2	0.996 4	0.998 2	0.997 7
Dwarves	0.974 5	0.991 4	0.978 4	0.996 8	0.992 8	0.995 0	0.995 9	0.998 5	0.992 4	0.992 5	0.997 2	0.997 9
Flowerpots	0.992 4	0.996 8	0.993 7	0.998 2	0.994 3	0.995 3	0.998 9	0.999	0.994 6	0.994 3	0.999 4	0.998 9
Hoops	0.983 7	0.994 1	0.983 9	0.997 4	0.993 2	0.992 0	0.997 2	0.997 9	0.997 6	0.995 6	0.996 6	0.995 5



图 7 几何攻击测试结果 Fig.7 Test results of geometric attack

由图 7 中数据可以看出, 文中算法在各种攻击 下,提取水印的 NC 值均大于 0.93, 这充分说明了该 算法抵抗几何攻击的有效性。对于缩放攻击,提取水 印 NC 值均接近于 1, 表现出十分理想的抵抗性能。 针对平移和剪切攻击,不同图像提取水印 NC 值均在 0.96 以上。面对旋转攻击,即便旋转角度达到 50°时, 提取水印 NC 值也都大于 0.93 (Art 图像略差),这足 以保证提取出的水印信息清晰可见。该算法之所以 能有效抵抗几何攻击,是因为在零水印检测前,采 用了基于 FMT 的图像配准方法对待认证立体图像 的左右视点图像分别进行了 RST 攻击校正。同时, 相对复杂的原始水印预处理步骤以及零水印生成和 检测时采用的随机子块选择策略,在一定程度上也 保证了文中算法抵抗剪切攻击的能力。此外,由图 7 中数据不难发现,针对平移、剪切和旋转等几何攻 击, 文中算法抵抗对称攻击的能力要略优于非对称 攻击。

3.2.3 组合攻击

为了进一步测试文中算法的鲁棒性,文中对立体

图像 Art 进行了 6 组组合攻击测试,攻击参数分别为: ①高斯噪声(0.03)+右移(10列); ②椒盐噪声(0.05)+ 剪切(左上角 1/64); ③维纳滤波(5×5)+旋转(10°); ④中值滤波(5×5)+JPEG2000 压缩(压缩率=90); ⑤JPEG 压缩(压缩因子=10)+剪切(中心 1/64); ⑥剪切(右下角 1/64)+上移(10 行)。具体测试结 果见表 4。

由表4中数据可以看出,在上述6组组合攻击下, 从攻击后的立体图像Art中均能正确检测到有意义的 二值水印信息,即使在载体立体图像已经受到严重破 坏的情况下(如序号为①、②、③和⑥,攻击后的左 右视点图像的峰值信噪比 PSNR^[16]值均小于 20 dB, 即此时的图像质量严重受损),文中算法仍可以很好 地从中检测出水印信息,并判断其版权归属。

3.3 鲁棒性对比测试

由于现有的立体图像零水印相关文献相对较少, 在此选取 2 篇立体图像零水印算法^[8,17]与 2 篇较新的 平面图像零水印算法^[18-19]进行对比测试。测试中,对 文中提出算法和文献[8]、[17]中的方法使用对称攻

		Tab.+ Test results of	combined attack	
	非对称环	女击	对称	攻击
序号	攻击后的右视点图像	检测到的水印图像	攻击后的左视点图像	检测到的水印图像
	(PSNR 值)	(ANC值)	(PSNR 值)	(SNC值)
	(13.291 3 dB)	CAUC CAUC (0.969 4)	(13.052 5 dB)	CAUC CAUC (0.991 2)
2	(17.794 1 dB)	CAUC CAUC (0.978 7)	(17.642 9 dB)	CAUC CAUC (0.993 3)
3	(13.487 5 dB)	CAUG CAUC (0.957 6)	(13.182 4 dB)	CAUC CAUC (0.986 1)
4	(29.8869 dB)	CAUC CAUC (0.996 9)	(29.563 7 dB)	CAUC CAUC (0.995 6)
5	(25.086 8 dB)	CAUC CAUC (0.991 4)	(24.784 1 dB)	CAUC CAUC (0.992 8)
6	(16.447 6 dB)	CAUC CAUC (0.967 3)	(16.134 6 dB)	CAUC CAUC (0.985 8)

表 4 组合攻击测试结果 Tab.4 Test results of combined attack

击;而对文献[18]、[19]中的方法仅使用立体图像的 左视点图像来进行测试。此外,由于文献[17]、[19] 中的算法本身均不具备抵抗 RST 几何攻击能力,因 此为了对比算法的公平性,上述2种算法在水印检测 前先采用文中的 FMT 图像配准方法对待认证图像进 行几何校正。具体测试结果见表5(针对某一种攻击, 表5中的NC值为25组立体图像测试结果的平均值)。

由表 5 可知, 文中算法的非几何攻击测试结果 要明显高于 4 种对比算法。针对旋转攻击, 文中算 法要略差于文献[8]和[18], 原因在于文献[8]中构造 的三元数圆谐-Fourier 矩幅值具有很好的旋转不变 性, 而文献[18]则在原始图像的抗旋转不变区域中来 构造零水印, 并通过 SIFT 特征点匹配进行几何校 正,因此其算法能够抵抗任意角度的旋转攻击,但 对较大面积剪切攻击特别是中心剪切的抗攻击性能 不佳。对于缩放攻击性能方面,文中算法与4种对 比算法表现相当。在平移和剪切攻击上,文中算法 表现出更强的稳健性,尤其是平移攻击,相较于其 他算法分别提高了11.79%、11.63%、16.42%和 1.87%。总的来说,文中算法对 RST 和剪切几何攻 击性能上均有一定提升,与4种对比算法相比,平 均性能分别提升了4.08%、11.89%、4.13%和2.99% (其中文献[17]和[19]在检测水印前先采用文中的 FMT 进行几何攻击校正)。

综上所述,对于表 5 中的 20 种不同攻击,文中 算法的鲁棒性要整体优于 4 种对比算法。

rab.s Comparison results of ive values of unferent algorithms							
序号	攻击方式	文中算法	文献[8]	文献[17]+FMT	文献[18]	文献[19]+FMT	
1	高斯噪声 0.1	0.988 4	0.932 6	0.913 0	0.965 6	0.966 7	
2	椒盐噪声 0.1	0.993 4	0.963 9	0.935 6	0.980 0	0.978 4	
3	中值滤波 9×9	0.989 3	0.967 8	0.968 1	0.986 0	0.983 9	
4	维纳滤波 9×9	0.998 1	0.978 4	0.978 9	0.991 1	0.989 8	
5	JPEG 压缩 10	0.991 7	0.985 1	0.971 3	0.989 3	0.982 0	
6	JPEG2000 压缩 90	0.995 7	0.970 8	0.971 7	0.988 6	0.990 9	
7	旋转 5°	0.984 0	0.958 8	0.883 3	0.997 4	0.963 0	
8	旋转 20°	0.960 9	0.965 2	0.817 3	0.997 9	0.896 5	
9	旋转 40°	0.945 5	0.965 0	0.818 6	0.997 7	0.861 4	
10	缩小 0.5 倍	0.999 9	0.997 2	0.997 1	0.998 0	0.998 2	
11	放大 2.0 倍	0.999 9	0.999 5	0.999 1	0.999 7	0.999 5	
12	上移 20 行	0.991 0	0.879 6	0.884 8	0.871 2	0.966 8	
13	下移 20 行	0.984 1	0.880 3	0.883 8	0.870 7	0.966 1	
14	左移 20 列	0.986 8	0.885 1	0.883 0	0.822 0	0.970 1	
15	右移 20 列	0.985 8	0.886 5	0.884 8	0.827 0	0.969 8	
16	中心剪切 1/16	0.976 4	0.953 7	0.843 8	0.874 3	0.945 8	
17	左上角剪切 1/16	0.978 9	0.953 1	0.841 9	0.981 5	0.947 2	
18	右上角剪切 1/16	0.981 9	0.952 7	0.842 4	0.980 8	0.945 0	
19	左下角剪切 1/16	0.977 1	0.955 0	0.843 2	0.980 8	0.945 7	
20	右下角剪切 1/16	0.973 8	0.956 1	0.844 4	0.982 9	0.952 6	
	平均值	0.984 1	0.949 3	0.900 3	0.954 1	0.960 9	

表 5 不同算法 NC 值的对比结果

4 结语

文中以多尺度变换 FFST 和 Hessenberg 联合分解 为理论基础,提出一种适用于双目立体图像的抗几何 攻击零水印方案。在立体图像左右视点图像经 FFST 后的低频子带中,结合图像随机子块选择和 Hessenberg 联合分解思想来构造鲁棒特征矩阵。同 时,对原始水印先后采用 LFSR 和分数阶 Arneodo 混 沌系统进行预处理,增强了算法的安全性。大量实验 结果表明,文中算法对常见非几何、几何攻击和一定 程度的组合攻击等均表现出良好的鲁棒性。

参考文献:

 XIA Zhi-qiu, WANG Xing-yuan, ZHOU Wen-jie, et al. Color Medical Image Lossless Watermarking Using Chaotic System and Accurate Quaternion Polar Harmonic Transforms[J]. Signal Processing, 2019, 157: 108-118.

- [2] 温泉,孙锬锋,王树勋. 零水印的概念与应用[J]. 电子学报,2003,31(2):214-216.
 WEN Quan, SUN Tan-feng, WANG Shu-xun. Concept and Application of Zero-Watermark[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 214-216.
- [3] 熊祥光. 空域强鲁棒零水印方案[J]. 自动化学报, 2018, 44(1): 160-175.
 XIONG Xiang-guang. A Zero Watermarking Scheme with Strong Robustness in Spatial Domain[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(1): 160-175.
- [4] 曲长波, 吴德阳, 肖成龙, 等. RGB 空间彩色零水印 算法[J]. 计算机科学与探索, 2019, 13(4): 666-680.
 QU Chang-bo, WU De-yang, XIAO Cheng-long, et al. Color Zero Watermarking Algorithm in RGB Spatial[J].
 Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2019, 13(4): 666-680.
- [5] XIA Zhi-qiu, WANG Xing-yuan, LI Xiao-xiao, et al. Efficient Copyright Protection for Three CT Images Based on Quaternion Polar Harmonic Fourier Moments[J]. Signal Processing, 2019, 164: 368-379.
- [6] YANG Hong-ying, QI Shu-ren, NIU Pan-pan, et al.

Color Image Zero-Watermarking Based on Fast Quaternion Generic Polar Complex Exponential Transform[J]. Signal Processing: Image Communication, 2020, 82: 115747.

- [7] WANG Rui, HAN Shao-cheng, ZHANG Peng, et al. A Novel Zero-Watermarking Scheme Based on Variable Parameter Chaotic Mapping in NSPD-DCT Domain[J]. IEEE Access, 2020, 8(6): 182391-182411.
- [8] WANG Chun-peng, WANG Xing-yuan, XIA Zhi-qiu, et al. Ternary Radial Harmonic Fourier Moments Based Robust Stereo Image Zero-Watermarking Algorithm[J]. Information Sciences, 2018, 470: 109-120.
- [9] YAMNI M, KARMOUNI H, SAYYOURI M, et al. Novel Octonion Moments for Color Stereo Image Analysis[J]. Digital Signal Processing, 2020, 108: 102878.
- [10] ROHITH S, BHAT K N H, SHARMA A N. Image Encryption and Decryption Using Chaotic Key Sequence Generated by Sequence of Logistic Map and Sequence of States of Linear Feedback Shift Register[C]// 2014 International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications, Bangalore, 2014: 1-6.
- [11] ZHOU Wu-jie, YU Mei, YU Si-min, et al. A Zero-Watermarking Algorithm of Stereoscopic Image Based on Hyperchaotic System[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 117-126.
- [12] HAJIPOUR A, AMINABADI S S. Synchronization of Chaotic Arneodo System of Incommensurate Fractional Order with Unknown Parameters Using Adaptive Method[J]. Optik, 2016, 127(19): 7704-7709.
- [13] HÄUSER S, STEIDL G. Convex Multiclass Segmentation with Shearlet Regularization[J]. International Jour-

nal of Computer Mathematics, 2013, 90(1): 62-81.

- [14] TAN Ling, YU Xin. Medical Image Fusion Based on Fast Finite Shearlet Transform and Sparse Representation[J]. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2019, 2019: 3503267.
- [15] Tong Xiao-hua, YE Zhen, XU Yu-sheng, et al. Image Registration with Fourier-Based Image Correlation: A Comprehensive Review of Developments and Applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2019, 12(10): 4062-4081.
- [16] CHEN Yong, JIA Zhi-gang, PENG Yan, et al. A New Structure-Preserving Quaternion QR Decomposition Method for Color Image Blind Watermarking[J]. Signal Processing, 2021, 185(3): 108088-108100.
- [17] CHEN Hui, LUO Ting, YU Mei, et al. A Zero-Watermark Method Based on Texture Characteristic of Image Blocks for Stereo Images[C]// 2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, Xi'an, 2012: 490-493.
- [18] 刘万军,孙思宇,曲海成,等.一种抗几何旋转攻击 零水印算法[J]. 计算机应用研究, 2019, 36(9): 2803-2808.
 LIU Wan-jun, SUN Si-yu, QU Hai-cheng, et al. Anti-Geometric Rotation Attack Zero Watermarking Algorithm[J]. Application Research of Computers, 2019, 36(9): 2803-2808.
- [19] KANG Xiao-bing, LIN Guang-feng, CHEN Ya-jun, et al. Robust and Secure Zero-Watermarking Algorithm for Color Images Based on Majority Voting Pattern and Hyper-Chaotic Encryption[J]. Multimedia Tools and Applications, 2020, 79(1): 1169-1202.

责任编辑:曾钰婵