基于三元数极谐 – Fourier 矩和混沌映射的立体图像零水印算法

王春鹏, 王兴元*, 张川, 朱晓强, 夏之秋

大连理工大学电子信息与电气工程学部, 大连 116023

* 通信作者. E-mail: wangxy@dlut.edu.cn

收稿日期: 2017-05-16; 接受日期: 2017-08-01; 网络出版日期: 2017-11-16

国家自然科学基金 (批准号: 61672124, 61370145, 61173183) 和 “十三五” 国家密码发展基金 (批准号: MMJJ20170203) 资助项目

摘要 立体图像因其强烈的沉浸感, 近年来受到广泛关注, 与之对应的立体图像的版权保护问题日趋紧迫. 目前绝大多数用于图像版权保护的水印算法都是针对平面图像的, 用于立体图像的水印算法较少. 即使是立体图像水印算法, 大部分算法未能很好体现和保留左右视角分量内部的特定联系, 因而必然影响算法的鲁棒性. 本文提出面向立体图像的三元数极谐 – Fourier 矩 (ternary polar harmonic Fourier moments, TPHFM), 并基于此和混沌映射, 提出一种鲁棒立体图像零水印算法. 首先使用线性和非线性混合耦合时空混沌系统对原始二值 logo 图像进行混沌化, 然后计算原始立体图像的 TPHFM 并选择适用于零水印算法的精确矩, 然后计算精确矩的幅值来构造二值特征图像并使用 Sine 映射和 Cosine 映射对其进行置乱, 最后将置乱的二值特征图像与二值混沌 logo 图像进行异或操作得到构造的零水印图像. 仿真实验表明, 本文算法对常规图像处理和几何攻击均具有较好的鲁棒性, 并优于三元数圆谐 – Fourier 矩 (ternary radial harmonic Fourier moments, TRHFM) 算法和其他零水印算法.

关键词 三元数, 极谐 – Fourier 矩, 三元数极谐 – Fourier 矩, 立体图像, 零水印, 线性和非线性混合耦合时空混沌系统, Sine 映射, Cosine 映射

1 引言

随着因特网技术的迅猛发展, 图像的版权保护已成为一个亟待解决的问题. 嵌入式水印技术^[1,2]是近年来主要的图像版权保护技术, 主要思想是将水印信息嵌入到宿主图像中来确定图像的版权归属, 目标是图像经过各种变化后, 仍能够提取出嵌入的水印. 然而, 在嵌入式水印算法中由于需要嵌入水印而改变原图像, 故而鲁棒性和不可感知性之间存在互相制约的矛盾. 为解决上述矛盾, 学者提出了一种新的水印算法——零水印算法. 零水印算法利用原始图像的重要特征来构造零水印信息, 而非

引用格式: 王春鹏, 王兴元, 张川, 等. 基于三元数极谐 – Fourier 矩和混沌映射的立体图像零水印算法. 中国科学: 信息科学, 2018, 48: 79–99, doi: 10.1360/N112017-00109
Wang C P, Wang X Y, Zhang C, et al. Stereo image zero-watermarking algorithm based on ternary polar harmonic Fourier moments and chaotic mapping (in Chinese). Sci Sin Inform, 2018, 48: 79–99, doi: 10.1360/N112017-00109

向原始图像中嵌入水印信息, 从而避免了水印算法的鲁棒性与不可感知性之间的矛盾, 提高了水印算法的鲁棒性. 零水印算法与传统嵌入式水印算法有 4 个主要的不同点: (1) 不改变数字作品信息, 即不可感知性好, 从而实现绝对保真度数字产品. (2) 由于未改变数字作品信息, 故而很难发现数字作品是否被零水印保护. (3) 变换域零水印算法不需要变换域到空域的逆过程, 大大降低了算法的运行时间. (4) 由于每幅原始图像构造的零水印信息不尽相同, 故而零水印算法需要版权认证数据库来保存构造零水印信息. 由零水印算法的性质可知, 嵌入式水印技术的实际应用同样适用于零水印, 包括数字媒体版权保护、知识产权认证、身份证身份认证和商标信息安全保护等. 此外, 对于医学图像、军事图像和遥感图像等完整性要求较高的图像, 不适合使用嵌入式水印来保护其版权, 在这种情况下, 零水印可以很好的用来保护这些图像的版权.

自零水印的概念被提出, 许多学者对其进行了研究. 文献 [3] 提出一种基于离散余弦变换 (DCT) 的零水印算法, 可以很好的克服统计方法攻击. 文献 [4] 使用高阶累积量提取图像的特征构造了一种零水印算法, 对加噪、滤波、JPEG 压缩和轻微旋转攻击具有较强的鲁棒性. 文献 [5] 提出一种基于小波域的用于公共版权认证的图像版权保护算法, 该算法能够有效地抵抗解释攻击, 对各种恶意攻击具有很强的鲁棒性. 文献 [6] 提出一种新的图像自适应版权保护算法, 文中使用 Sobel 边缘检测算法检测图像的边缘特征来构造验证信息, 收到了很好的效果. 文献 [7] 基于 α 截尾均值算法和支持向量机 (SVM) 提出一种有效的零水印算法. 算法使用 α 截尾均值算法移除噪声来增强特征选取的精确性, 使用训练好的 SVM 模型来记录特征信息和水印的关系. 在文献 [7] 的基础上, 文献 [8] 基于支持向量机 (SVM) 和粒子群算法 (PSO) 提出一种抗几何攻击的零水印算法. 文献 [9] 基于 Bessel-Fourier 矩提出一种鲁棒可视零水印算法, 可以抵抗各种攻击, 同其他同类可视零水印算法和 Zernike 矩算法的比较也显示出该算法的优越性. 文献 [10] 基于广义 Arnold 变换 (GAT) 提出一种新的零水印算法, 算法中广义 Arnold 变换用于置乱原始水印, 扩频和解扩技术用于嵌入和提取零水印. 文献 [11] 利用了 DWT 和 DCT 变换域中视差的稳定性和超混沌离散系统动力学行为的复杂性, 提出了一种用于版权保护的立体图像零水印算法, 对各类对称/非对称攻击具有较强的鲁棒性. 文献 [12, 13] 利用不变矩理论, 基于四元数指数矩 (QEM) 和极谱复指数变换 (PCET) 提出两种抗几何攻击的鲁棒图像零水印算法, 可以有效抵抗各种几何攻击和常规图像处理.

虽然零水印方法研究取得了较大进展, 但现有绝大多数算法都是针对平面图像的, 适用于立体图像的零水印算法相对较少. 此外现有的立体图像零水印算法未能很好体现和保留左右视角分量内部的特定联系, 因而必然影响算法的鲁棒性. 本文以三元数理论与极谱 - Fourier 矩 (polar harmonic Fourier moments, PHFM) 为基础提出面向立体图像的三元数极谱 - Fourier 矩 (ternary polar harmonic Fourier moments, TPHFM), 并基于此和混沌映射, 提出一种鲁棒立体图像零水印算法. 算法利用了混沌映射的初值敏感性, 利用线性和非线性混合耦合时空混沌系统和 Sine 映射与 Cosine 映射对原始二值 logo 图像和二值特征图像进行置乱以增强算法的安全性. 算法利用具有几何不变性的 TPHFM 幅值来构造零水印以增强算法抗几何攻击的鲁棒性. 仿真实验表明, 本文算法对所有常规图像处理和几何攻击的对称攻击/非对称攻击均具有较好的鲁棒性, 并优于三元数圆谱 - Fourier 矩 (ternary radial harmonic Fourier moments, TRHFM) 算法和其他零水印算法.

2 三元数与极谱 - Fourier 矩

2.1 三元数

同四元数类似^[14, 15], 三元数 (ternary number) 是超复数的一种, 包含一个实部和两个虚部:

$$p = a + bi + cj, \quad (1)$$

其中, a, b, c 为实数, i, j 为复数操作符.

由于三元数的存在与否至今仍有很大的争论, 本文中定义复数操作符 i, j 满足以下特性:

$$i^2 = j^2 = -1, \quad ij = ji = 0. \quad (2)$$

当三元数 p 的幅值 $|p| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$ 为 1 时, p 称为单位三元数. 当 $a = 0$ 时, p 称为纯三元数.

2.2 极谐 - Fourier 矩

极坐标图像 $f(r, \theta)$ 的圆谐 - Fourier 矩 (radial harmonic Fourier moments, RHFM) ^[16,17] 由 Ren 等于 2003 年提出, 定义如下:

$$\phi_{nm} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \theta) T_n(r) \exp(-jm\theta) r dr d\theta, \quad (3)$$

其中 $T_n(r)$ 为径向基函数:

$$T_n(r) = \begin{cases} \sqrt{\frac{1}{r}}, & \text{while } n = 0, \\ \sqrt{\frac{2}{r}} \sin(n+1)\pi r, & \text{while } n \text{ is odd,} \\ \sqrt{\frac{2}{r}} \cos(n)\pi r, & \text{while } n \text{ is even.} \end{cases} \quad (4)$$

需要注意的是, 如图 1 所示, 当 $r \rightarrow 0$ 时, $T_n(r) \rightarrow \infty$, 这会产生数值积分误差, 从而导致高阶矩的数值不稳定性, 使得图像中心区域的重构效果很差 ^[18].

基于上述问题, 本文使用 r^2 代替 r , 定义如下径向基函数

$$A_n(r) = \begin{cases} 1/\sqrt{2}, & \text{while } n = 0, \\ \sin(n+1)\pi r^2, & \text{while } n \text{ is odd,} \\ \cos(n)\pi r^2, & \text{while } n \text{ is even.} \end{cases} \quad (5)$$

该径向基函数 $A_n(r)$ 在区间 $0 \leq r \leq 1$ 是正交的,

$$\int_0^1 A_n(r) A_{n'}(r) r dr = \frac{1}{4} \delta_{nn'}, \quad (6)$$

其中 $\delta_{nn'}$ 为 Kronecker 符号.

可得基函数 $H_{nm}(r, \theta) = A_n(r) \exp(jm\theta)$ 在单位圆内 ($0 \leq r \leq 1, 0 \leq \theta \leq 2\pi$) 是正交的,

$$\int_0^{2\pi} \int_0^1 H_{nm}(r, \theta) \overline{H_{kl}(r, \theta)} r dr d\theta = \frac{\pi}{2} \delta_{nk} \delta_{ml}, \quad (7)$$

其中, $\overline{H_{kl}(r, \theta)}$ 表示 $H_{kl}(r, \theta)$ 的共轭, $\frac{\pi}{2}$ 为标准化因数. 则图像 $f(r, \theta)$ 可分解为如下形式:

$$f(r, \theta) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} P_{nm} A_n(r) \exp(jm\theta), \quad (8)$$

图 1 (网络版彩图) 圆谐 - Fourier 矩的径向基函数 $T_n(r)$ ($n = 0, 1, \dots, 5$)

Figure 1 (Color online) RBF $T_n(r)$ of RHFM with $n = 0, 1, \dots, 5$

图 2 (网络版彩图) 极谐 - Fourier 矩的径向基函数 $A_n(r)$ ($n = 0, 1, \dots, 5$)

Figure 2 (Color online) RBF $A_n(r)$ of PHFM with $n = 0, 1, \dots, 5$

其中,

$$P_{nm} = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \theta) A_n(r) \exp(-jm\theta) r dr d\theta. \quad (9)$$

P_{nm} 定义为图像 $f(r, \theta)$ 阶数为 n ($n \geq 0$) 重复度为 m ($|m| \geq 0$) 的极谐 - Fourier 矩 (polar harmonic Fourier moments, PHFM).

图 2 显示了极谐 - Fourier 矩的径向基函数 $A_n(r)$, 可以看出, 当 $r \rightarrow 0$ 时, $A_n(r) \in [0, 1]$, 这说明使用高阶矩重构图像时, 图像中心区域的重构效果不会变差^[18]. 图 3 为使用极谐 - Fourier 矩和圆谐 - Fourier 矩对大小为 128×128 的 Lena 图像及其二值图像的重构对比图 (最大矩阶数 $n_{\max} = 5, 10, 15, 20, 25, 30$). 可以看出圆谐 - Fourier 矩随着阶数增大, 图像中心区域重构效果变差, 而极谐 - Fourier 矩重构的图像中心区域的重构效果不会变差, 这是由两个矩的径向基函数决定的.

3 三元数极谐 - Fourier 矩

3.1 三元数极谐 - Fourier 矩定义

由三元数形式可知, 一幅两视角立体图像 $f(r, \theta)$ 可以表示为一组纯三元数:

$$f(r, \theta) = f_L(r, \theta)i + f_R(r, \theta)j, \quad (10)$$

其中 $f_L(r, \theta)$ 和 $f_R(r, \theta)$ 分别为立体图像 $f(r, \theta)$ 的左右视角.

由于三元数相乘不满足交换律, 故而立体图像的三元数极谐 - Fourier 矩 (ternary polar harmonic Fourier moments, TPHFM) 有左 TPHFM 和右 TPHFM 两种形式. 若无特殊说明, 本文特指右 TPHFM 形式, 定义如下:

$$P_{nm}^R = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \theta) A_n(r) \exp(-\mu m\theta) r dr d\theta, \quad (11)$$

其中, μ 为单位纯三元数, P_{nm}^R 称为阶数为 n ($n \geq 0$) 重复度为 m ($|m| \geq 0$) 的右 TPHFM. 原始图像 $f(r, \theta)$ 可由有限个 TPHFM 重构:

$$f(r, \theta) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=-m_{\max}}^{m_{\max}} A_n(r) P_{nm}^R \exp(\mu m\theta). \quad (12)$$

图 3 重构图像对比 (最大矩阶数 $n_{\max} = 5, 10, 15, 20, 25, 30$)

Figure 3 Comparison of reconstructed images (max moment order $n_{\max} = 5, 10, 15, 20, 25, 30$). (a) PHFM of Lena; (b) RHF of Lena; (c) PHFM of binary Lena; (d) RHF of binary Lena

3.2 三元数极谱 – Fourier 矩分解

立体图像 $f(r, \theta)$ 的 TPHFM P_{nm}^R 可由左右两视角图像的极谱 – Fourier 矩 (PHFM) 得到, 如下:

$$\begin{aligned}
 P_{nm}^R &= \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \theta) A_n(r) \exp(-\mu m \theta) r dr d\theta \\
 &= \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 [f_L(r, \theta) i + f_R(r, \theta) j] A_n(r) \exp(-\mu m \theta) r dr d\theta \\
 &= i \left[\frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f_L(r, \theta) A_n(r) \exp(-\mu m \theta) r dr d\theta \right] + j \left[\frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f_R(r, \theta) A_n(r) \exp(-\mu m \theta) r dr d\theta \right] \\
 &= i \left[\frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f_L(r, \theta) A_n(r) \cos(m\theta) r dr d\theta - \mu \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f_L(r, \theta) A_n(r) \sin(m\theta) r dr d\theta \right] \\
 &\quad + j \left[\frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f_R(r, \theta) A_n(r) \cos(m\theta) r dr d\theta - \mu \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 f_R(r, \theta) A_n(r) \sin(m\theta) r dr d\theta \right] \\
 &= i \left[\operatorname{Re}(P_{nm}(f_L)) + \frac{(i+j)}{\sqrt{2}} \operatorname{Im}(P_{nm}(f_L)) \right] + j \left[\operatorname{Re}(P_{nm}(f_R)) + \frac{(i+j)}{\sqrt{2}} \operatorname{Im}(P_{nm}(f_R)) \right] \\
 &= A_{nm} + iB_{nm} + jC_{nm},
 \end{aligned} \tag{13}$$

其中,

$$\begin{aligned} A_{nm} &= -\frac{1}{\sqrt{2}}[\text{Im}(P_{nm}(f_L)) + \text{Im}(P_{nm}(f_R))], \\ B_{nm} &= \text{Re}(P_{nm}(f_L)), \\ C_{nm} &= \text{Re}(P_{nm}(f_R)), \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\mu = (i + j)/\sqrt{2}$, f_L 和 f_R 分别为立体图像的左右视点图像, $P_{nm}(f_L)$ 和 $P_{nm}(f_R)$ 为对应的 PHFM, $\text{Re}(p)$ 和 $\text{Im}(p)$ 分别表示复数 p 的实部和虚部.

3.3 三元数极谱 - Fourier 矩重构

类似于 TPHFM 的分解, TPHFM 的重构也由左右视角图像重构得到:

$$\begin{aligned} f'(r, \theta) &= \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=-m_{\max}}^{m_{\max}} A_n(r) P_{nm}^R \exp(\mu m \theta) \\ &= \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=-m_{\max}}^{m_{\max}} A_n(r) (A_{nm} + iB_{nm} + jC_{nm}) \exp(\mu m \theta) \\ &= \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=-m_{\max}}^{m_{\max}} A_n(r) A_{nm} \exp(\mu m \theta) + i \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=-m_{\max}}^{m_{\max}} A_n(r) B_{nm} \exp(\mu m \theta) \\ &\quad + j \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=-m_{\max}}^{m_{\max}} A_n(r) C_{nm} \exp(\mu m \theta) \\ &= f'_A(r, \theta) + i f'_B(r, \theta) + j f'_C(r, \theta), \end{aligned} \quad (15)$$

其中,

$$\begin{aligned} f'_A(r, \theta) &= \text{Re}(A'_{nm}) - \frac{1}{\sqrt{2}}[\text{Im}(B'_{nm}) + \beta \text{Im}(C'_{nm})], \\ f'_B(r, \theta) &= \text{Re}(B'_{nm}) + \frac{1}{\sqrt{2}} \text{Im}(A'_{nm}), \\ f'_C(r, \theta) &= \text{Re}(C'_{nm}) + \frac{1}{\sqrt{2}} \text{Im}(A'_{nm}), \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $f'_A(r, \theta)$ 为趋近于 0 的矩阵, $f'_B(r, \theta)$ 和 $f'_C(r, \theta)$ 为重构的左右视点图像, A'_{nm} , B'_{nm} 和 C'_{nm} 为 A_{nm} , B_{nm} 和 C_{nm} 使用 PHFM 重构的结果.

大小为 128×128 的立体图像 Art 用于测试 TPHFM 的重构性能, 如图 4 所示. 图 5 给出了 Art 的 TPHFM 重构图像 (最大矩阶数 $n_{\max} = 5, 10, 15, 20, 25, 30$).

需要注意的是, 由于本文中定义 $ij = ji = 0$, 故而在 TPHFM 的分解和重构过程中会有信息丢失, 例如在分解过程的项: $\frac{j}{\sqrt{2}} \text{Im}(P_{nm}(f_L))$ 和 $\frac{j}{\sqrt{2}} \text{Im}(P_{nm}(f_R))$ 等. 这说明在图像重构过程中会有产生额外的误差, 但并不影响 TPHFM 良好的重构性能.

3.4 三元数极谱 - Fourier 矩的几何不变性

(1) 旋转不变性. 假定 $f^{\text{Rot}}(r, \theta) = f(r, \theta - \alpha)$ 为图像 $f(r, \theta)$ 旋转 α 度之后的图像, $f^{\text{Rot}}(r, \theta)$ 和 $f(r, \theta)$ 的 TPHFM $P_{nm}^R(f^{\text{Rot}})$ 和 $P_{nm}^R(f)$ 满足关系如下:

$$P_{nm}^R(f^{\text{Rot}}) = P_{nm}^R(f) \exp(-\mu m \alpha). \quad (17)$$

图 4 立体图像 Art 的左右视角图像

Figure 4 Left and right views of stereo image Art. (a) Left view; (b) right view

图 5 立体图像 Art 的 TPHFM 重构图像 (最大矩阶数 $n_{\max} = 5, 10, 15, 20, 25, 30$)Figure 5 Reconstruction images of the stereo image Art using TPHFM (max moment order $n_{\max} = 5, 10, 15, 20, 25, 30$). (a) Left view; (b) right view

上式两侧取绝对值可得

$$|P_{nm}^R(f^{\text{Rot}})| = |P_{nm}^R(f)|. \quad (18)$$

故 TPHFM 的幅值具有旋转不变性.

(2) 缩放不变性. 将大小为 $N \times N$ 的图像 $f(r, \theta)$ 归一化到单位圆内: $(x_q, y_p) \in [-1, 1] \times [-1, 1]$, 其中 $x_q = \frac{2q-N+1}{N}$, $y_p = \frac{N-1-2p}{N}$, $(p, q = 0, 1, \dots, N-1)$. 则所有缩放之后的图像在归一化之后都为同一图像函数, 所以归一化后的 TPHFM 就具有了缩放不变性.

为验证 TPHFM 的几何不变性, 对图 4 中的 Art 立体图像进行了测试. TPHFM 适用于两视角的立体图像, 对具有两个视角的立体图像的攻击有两种: 对称攻击 (symmetric attack) 和非对称攻击 (asymmetric attack)^[11]. 对称攻击是对左右两个视角同时进行同一种攻击, 而非对称攻击是只对其中一个视角进行攻击 (本文特指对左视角图像攻击). 表 1 为 Art 在旋转和缩放攻击下的 TPHFM 幅值. 可以看出受攻击图像和原始图像的 TPHFM 幅值的均值相对误差 (mean relative error, MRE) 均小于 0.04. 这说明 TPHFM 幅值具有很好的几何不变性, 故而非常适用于图像零水印算法.

表 1 TPHFM 幅值的几何不变性
Table 1 Geometric invariance of TPHFM magnitudes

	Attack	$ P_{00}^R $	$ P_{01}^R $	$ P_{02}^R $	$ P_{10}^R $	$ P_{11}^R $	$ P_{12}^R $	$ P_{20}^R $	$ P_{21}^R $	$ P_{22}^R $	MRE(%)
	Original image	146.8593	32.6547	17.2196	12.3628	11.6475	6.7317	20.8998	11.8932	4.2694	–
Rotation 5°	Asymmetrical attack	146.9158	32.7592	17.2662	12.2572	11.6219	6.8192	20.7818	11.9659	3.8423	1.5758
	Symmetrical attack	146.8861	32.5861	17.1113	12.2522	11.6298	6.7887	20.7635	11.8532	3.7080	1.8768
Rotation 45°	Asymmetrical attack	146.7320	31.8293	16.8947	12.4646	10.6857	6.6121	20.8210	12.1691	3.5169	3.9646
	Symmetrical attack	146.7628	32.3142	17.3792	12.4748	9.8521	6.2164	20.9562	11.2425	4.1142	3.9320
Scaling 0.5	Asymmetrical attack	146.9727	32.8202	17.2606	11.8346	11.4131	6.9127	21.4086	12.0291	4.4020	1.8310
	Symmetrical attack	146.8362	32.8453	17.2104	12.0053	11.4653	6.8465	21.9141	12.0517	4.3768	1.7239
Scaling 1.5	Asymmetrical attack	146.9728	32.6034	17.1996	12.5180	11.7028	6.6659	20.7984	11.8422	4.2525	0.4856
	Symmetrical attack	147.1410	32.5901	17.2034	12.4688	11.6817	6.6871	20.7374	11.8309	4.2655	0.4099

表 2 常值 128 的大小为 128×128 的立体图像 TPHFM 幅值
Table 2 TPHFM magnitudes for a 128×128 stereo image with constant value 128

	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$	$m = 6$	$m = 7$	$m = 8$	$m = 9$
$n = 0$	255.5213	0.0000	0.0000	0.0000	0.3637	0.0000	0.0000	0.0000	0.5388	0.0000
$n = 1$	0.0043	0.0000	0.0000	0.0000	0.0108	0.0000	0.0000	0.0000	0.0091	0.0000
$n = 2$	0.6772	0.0000	0.0000	0.0000	0.5144	0.0000	0.0000	0.0000	0.7622	0.0000
$n = 3$	0.0087	0.0000	0.0000	0.0000	0.0217	0.0000	0.0000	0.0000	0.0183	0.0000
$n = 4$	0.6781	0.0000	0.0000	0.0000	0.5149	0.0000	0.0000	0.0000	0.7631	0.0000
$n = 5$	0.0132	0.0000	0.0000	0.0000	0.0327	0.0000	0.0000	0.0000	0.0276	0.0000
$n = 6$	0.6795	0.0000	0.0000	0.0000	0.5157	0.0000	0.0000	0.0000	0.7647	0.0000
$n = 7$	0.0177	0.0000	0.0000	0.0000	0.0438	0.0000	0.0000	0.0000	0.0370	0.0000
$n = 8$	0.6815	0.0000	0.0000	0.0000	0.5169	0.0000	0.0000	0.0000	0.7668	0.0000
$n = 9$	0.0224	0.0000	0.0000	0.0000	0.0551	0.0000	0.0000	0.0000	0.0466	0.0000

4 零水印算法

本文首先讨论精确 TPHFM 的选取, 然后给出零水印构造和零水印验证过程. 零水印构造过程是利用原始立体图像的 TPHFM 构造零水印, 零水印验证过程用于验证待验证图像的版权归属.

4.1 精确 TPHFM 选取

为保证零水印算法的鲁棒性, 本文选取精确的 TPHFM 用于图像零水印算法^[19,20]. 由 TPHFM 的定义可知, 常值立体图像的 TPHFM 幅值除了 $|P_{00}^R|$ 以外其他的都应为 0^[19,20]. 然而在计算过程中, 重复度 $m = 4i$, $i \in \mathbb{Z}$ 的 TPHFM 是非零数, 与上述结果不符. 本文以常值为 128 ($C = 128$) 的大小为 128×128 的立体图像为例计算 TPHFM, 其幅值如表 2 所示, 由结果可知重复度 $m = 4i$, $i \in \mathbb{Z}$ 的 TPHFM 是非零数.

为证明上述结果, 给出平面常值图像计算 PHFM 的引理如下:

图 6 零水印构造过程流程图

Figure 6 Flow chart of zero-watermark construction procedure

引理1 平面常值图像 $f(r, \theta) = C$ 的 PHFM 为

$$P_{nm} = \begin{cases} \sqrt{2}C, & \text{while } n = m = 0, \\ \text{nonzero}, & \text{while } (n, m) \neq (0, 0), m = 4i, i \in \mathbb{Z}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (19)$$

证明见附录 A.

由引理 1, 得出常值立体图像计算 TPHFM 幅值的定理如下:

定理1 常值立体图像 $f(r, \theta) = C(f_L(r, \theta) = f_R(r, \theta) = C)$ 的 TPHFM 幅值为

$$|P_{nm}^R| = \begin{cases} 2C, & \text{while } n = m = 0, \\ \text{nonzero}, & \text{while } (n, m) \neq (0, 0), m = 4i, i \in \mathbb{Z}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (20)$$

证明见附录 B.

由定理 1 可知, 重复度 $m = 4i, i \in \mathbb{Z}$ 的 TPHFM 是不精确的^[19,20], 不适用于图像零水印算法, 所以精确 TPHFM 的集合为 $S = \{P_{nm}^R, m \neq 4i, i \in \mathbb{Z}\}$. 则可得集合 S 中精确矩值的个数 N_{accurate} 与最大矩值阶数的关系如下:

$$N_{\text{accurate}} = \begin{cases} \frac{3n_{\max}^2 + 3n_{\max}}{2}, & n_{\max} = 4i, \\ \frac{3n_{\max}^2 + 4n_{\max} + 1}{2}, & n_{\max} = 4i + 1, \\ \frac{3n_{\max}^2 + 5n_{\max} + 2}{2}, & n_{\max} = 4i + 2, \\ \frac{3n_{\max}^2 + 6n_{\max} + 3}{2}, & n_{\max} = 4i + 3, \end{cases} \quad (21)$$

其中 i 为非负整数.

4.2 零水印构造

假设 $I = \{f(x, y), 1 \leq x, y \leq N\}$ 为原始灰度立体图像, $L = \{l(i, j), 1 \leq i \leq P, 1 \leq j \leq Q\}$ 为原始二值 logo 图像, 零水印构造过程的流程图如图 6 所示, 详细如下.

(1) 混沌矩阵的生成. 由于线性和非线性混合耦合时空混沌系统 (mixed linear-nonlinear coupled map lattice, MLNCML)^[21] 有周期窗口少、混沌状态的参数范围大和混沌状态在空间分布广的特点,

本文使用 MLNCML 系统来生成混沌序列. 由于混沌系统具有初值敏感性, 本文使用密钥 K_1 (包括 ε , η , λ 和 Logistic 映射的初值 x_0) 作为 MLNCML 系统的初值生成长度为 $P \times Q$ 的混沌序列 $H = \{h(i), 1 \leq i \leq P \times Q\}$. MLNCML 系统描述如下:

$$x_{n+1}(i) = (1 - \varepsilon)\tau(x_n(i)) + (1 - \eta)\frac{\varepsilon}{2}[\tau(x_n(i+1)) + \tau(x_n(i-1)))] + \eta\frac{\varepsilon}{2}[\tau(x_n(j)) + \tau(x_n(k))], \quad (22)$$

其中, $0 \leq \varepsilon \leq 1$ 和 $0 \leq \eta \leq 1$ 为两个耦合系统, $n = 1, 2, 3, \dots$ 是时间方向变量, $1 \leq i, j, k \leq \text{Len}$ 为空间方向变量, Len 是耦合点数目, $\tau(x)$ 为 Logistic 映射^[22]: $\tau(x) = \lambda x(1 - x)$, $0 \leq \lambda \leq 4$ 为控制参数, 当 $3.569945672 \leq \lambda \leq 4$ 时映射进入混沌状态. i, j 和 k 之间的关系由 Arnold 映射^[15] 确定:

$$\begin{bmatrix} j \\ k \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} \pmod{\text{Len}} = \begin{bmatrix} 1 & p \\ q & pq + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} \pmod{\text{Len}}, \quad (23)$$

其中 p 和 q 为 Arnold 映射的参数.

对生成的混沌序列 H 按下式进行二值化:

$$H'(i) = \begin{cases} 1, & \text{while } H(i) \geq T_1, \\ 0, & \text{while } H(i) < T_1, \end{cases} \quad (1 \leq i \leq P \times Q), \quad (24)$$

其中阈值 T_1 为 H 的均值. 然后将 H' 升维变为大小为 $P \times Q$ 的二维混沌矩阵 $H'' = \{h''(i, j), 1 \leq i \leq P, 1 \leq j \leq Q\}$.

(2) 二值混沌 logo 图像的生成. 对原始二值 logo 图像 L 与二维混沌矩阵 H'' 进行异或操作得到二值混沌 logo 图像 $L' = \{l'(i, j), 1 \leq i \leq P, 1 \leq j \leq Q\}$:

$$L' = \text{XOR}(L, H''). \quad (25)$$

(3) TPHFM 的计算. 计算原始灰度立体图像 I 的最大阶数为 $n_{\max}$ 的 TPHFM.

(4) 精确 TPHFM 的选取. 使用密钥 K_2 在精确矩集合 S 中随机选取 $P \times Q$ 个精确 TPHFM $P^R = \{p^R(i), 1 \leq i \leq P \times Q\}$.

(5) 二值特征图像的构造. 得到精确 TPHFM P^R 对应的幅值为 $M^R = \{m^R(i), 1 \leq i \leq P \times Q\}$, 然后将幅值序列二值化得到二值特征序列 $B = \{b(i), 1 \leq i \leq P \times Q\}$:

$$b(i) = \begin{cases} 1, & \text{while } m^R(i) \geq T_2, \\ 0, & \text{while } m^R(i) < T_2, \end{cases} \quad (1 \leq i \leq P \times Q), \quad (26)$$

其中阈值 T_2 为 M^R 的均值. 然后将 B 升维变为大小为 $P \times Q$ 的二维特征图像 $L_f = \{l_f(i, j), 1 \leq i \leq P, 1 \leq j \leq Q\}$.

(6) 二值特征图像置乱. 对得到的二值特征图像 L_f 进行置乱得到置乱之后的二值特征图像 $L'_f = \{l'_f(i, j), 1 \leq i \leq P, 1 \leq j \leq Q\}$. 由于 Sine 映射和 Cosine 映射属于混沌映射, 具有初值敏感性、非周期性等特点, 可以增强算法的安全性. 此外它们是一维映射, 结构比较简单, 时间复杂度较低, 同时产生的混沌序列具有较大的 Lyapunov 指数, 即可以产生动态特性复杂的混沌序列. 本文使用 Sine 映射和 Cosine 映射进行置乱, 分别记为映射 g_1 和 g_2 , 公式如下:

$$g_1: x_{n+1} = 0.88 \sin(\pi x_n), \quad (27)$$

$$g_2 : y_{n+1} = 0.98 \cos(\pi |y_n - 0.5|). \quad (28)$$

置乱过程主要分为两个步骤: 首先使用 Sine 映射对图像行方向进行置乱, 然后使用 Cosine 映射对图像列方向进行置乱, 具体如下.

(i) 图像行方向置乱. 使用密钥 K_3 作为初值对 Sine 映射迭代 P 次, 可得 $[0,1]$ 之间的序列 $X = \{x(i), 1 \leq i \leq P\}$, 对其进行如下操作:

$$X' = \text{unique}(\text{floor}(P \times X)), \quad (29)$$

其中, $X' = \{x'(i), 1 \leq i \leq P\}$, $\text{floor}(\cdot)$ 为向下取整函数, $\text{unique}(\cdot)$ 表示删除序列中重复的元素. 设序列 X' 中有 m 个元素, 用 $1 \leq i \leq m$ 代表图像行序号, 则对图像所有列建立从 $L_f(i, \cdot)$ 到 $L_f(x'(i), \cdot)$ 的一一映射, 交换它们的位置. 至此, 图像行方向置乱完成.

(ii) 图像列方向一次置乱. 使用密钥 K_4 作为初值对 Cosine 映射迭代 Q 次, 可得 $[0,1]$ 之间的序列 $Y = \{y(i), 1 \leq i \leq Q\}$, 对其进行如下操作:

$$Y' = \text{unique}(\text{floor}(Q \times Y)), \quad (30)$$

其中 $Y' = \{y'(i), 1 \leq i \leq Q\}$. 设序列 Y' 中有 n 个元素, 用 $1 \leq j \leq n$ 代表图像列序号, 则对图像第一行建立从 $L_f(1, j)$ 到 $L_f(1, y'(j))$ 的一一映射, 交换它们的位置. 至此, 图像列方向一次置乱完成.

(iii) 使用密钥 K_5 作为初值 (包括 $P-1$ 个初值) 对图像所有行都重复步骤 (ii) 进行一次列方向置乱, 共需进行 $P-1$ 次置乱. 至此, 整幅图像置乱完成.

(7) 零水印图像生成. 对置乱的二值特征图像 L'_f 和二值混沌 logo 图像 L' 进行异或操作得到零水印图像:

$$W = \text{XOR}(L'_f, L'). \quad (31)$$

最后将得到的零水印图像 W 和密钥 K_1, K_2, K_3, K_4 和 K_5 等通过下式计算所有信息的 Hash 值 HS, 并存储在版权认证数据库.

$$\text{HS} = F(W || K_1 || K_2 || K_3 || K_4 || K_5), \quad (32)$$

其中 $F(\cdot)$ 表示单项 Hash 函数^[23~25].

4.3 零水印验证

零水印验证过程主要对待验证立体图像 $\hat{I}$ 进行版权验证, 需要首先验证 HS 并检查零水印图像 W 和密钥 K_1, K_2, K_3, K_4 和 K_5 的有效性. 若成功则算法继续, 若失败则算法停止检测. 零水印验证过程的流程图如图 7 所示, 详细如下.

(1) 混沌矩阵的生成. 使用密钥 K_1 作为 MLNCML 系统的初值生成长度为 $P \times Q$ 的混沌序列 $\hat{H} = \{\hat{h}(i), 1 \leq i \leq P \times Q\}$, 并对其二值化得到 $\hat{H}'$, 然后将 $\hat{H}'$ 升维变为大小为 $P \times Q$ 的二维混沌矩阵 $\hat{H}'' = \{\hat{h}''(i, j), 1 \leq i \leq P, 1 \leq j \leq Q\}$.

(2) TPHFM 的计算. 计算待验证灰度立体图像 $\hat{I}$ 的最大阶数为 $n_{\max}$ 的 TPHFM.

(3) 精确 TPHFM 的选取. 使用密钥 K_2 在精确矩集合 S 中随机选取 $P \times Q$ 个精确 TPHFM $\hat{P}^R = \{\hat{p}^R(i), 1 \leq i \leq P \times Q\}$.

图 7 零水印验证过程流程图

Figure 7 Flow chart of zero-watermark verification procedure

(4) 二值特征图像的构造. 得到精确 TPHFM $\hat{P}^R$ 对应的矩幅值向量 $\hat{M}^R$, 并将其二值化得到二值特征序列 $\hat{B} = \{\hat{b}(i), 1 \leq i \leq P \times Q\}$. 然后将 $\hat{B}$ 升维变为大小为 $P \times Q$ 的二维二值特征图像 $\hat{L}_f = \{\hat{l}_f(i, j), 1 \leq i \leq P, 1 \leq j \leq Q\}$.

(5) 二值特征图像的置乱. 对得到的二值特征图像 $\hat{L}_f$ 使用 Sine 映射和 Cosine 映射进行置乱得到置乱的二值特征图像 $\hat{L}'_f = \{\hat{l}'_f(i, j), 1 \leq i \leq P, 1 \leq j \leq Q\}$.

(6) 验证二值 logo 图像的获取. 对置乱的二值特征图像 $\hat{L}'_f$ 和零水印图像 W 进行异或操作得到二值图像 $\hat{L}1$, 然后对二值图像 $\hat{L}1$ 和二维混沌矩阵 $\hat{H}''$ 进行异或操作得到验证的二值 logo 图像 $\hat{L}$:

$$\hat{L}1 = \text{XOR}(\hat{L}'_f, W), \quad (33)$$

$$\hat{L} = \text{XOR}(\hat{L}1, \hat{H}''). \quad (34)$$

5 实验与分析

本文使用数据库 Middlebury Stereo Datasets [26, 27] 中的 20 幅大小为 256×256 的灰度立体图像和一幅大小为 32×32 的二值 logo 图像作为测试图像. 其中 4 幅立体图像 Art, Books, Computer 和 Dolls 如图 8 所示.

5.1 水印容量

水印容量是衡量水印算法性能的一项重要指标. 由于本文算法的零水印是由精确的 TPHFM 构造的, 并且由式 (21) 可知精确矩值的个数是由最大矩值阶数决定的. 故而本算法水印容量是由最大矩值阶数决定的, 如图 9 所示. 本文选取 TPHFM 的最大阶数为 $n_{\max} = 30$.

5.2 时间复杂度

该算法的核心在于使用 TPHFM 构造零水印, 故而算法的运行时间主要取决于 TPHFM 的计算时间. 由于原始立体图像大小为 $N \times N$, 计算最大阶数为 $n_{\max}$ 的 TPHFM 的相乘次数为 $O(N^2(n_{\max} + 1)(2n_{\max} + 1))$, 故而时间复杂度为 $O(N^2 n_{\max}^2)$. 本文中原始立体图像大小为 256×256 , 最大矩阶数为 $n_{\max} = 30$. 则零水印构造和验证过程的运行时间分别为 25.9159 s 和 25.6592 s. 实验所用电脑主频为 2.27 GHz, 内存为 2 GB, 操作系统为 Microsoft Windows 7 旗舰版, MATLAB 为 8.6 版本.

图 8 立体图像 Dolls, Art, Books, Computer

Figure 8 Stereo images Dolls, Art, Books, Computer. (a) Left views; (b) right views

图 9 (网络版彩图) 水印容量与最大矩值阶数的关系

Figure 9 (Color online) The relationship between the watermark capacity and the max order of TPHFM

5.3 鲁棒性测试

本文算法适用于两视角的立体图像, 使用对称攻击 (symmetric attack) 和非对称攻击 (asymmetric attack) 对立体图像进行攻击. 攻击之后的图像质量使用峰值信噪比 (PSNR) 衡量^[28, 29], PSNRL 和 PSNRR 分别代表左右视角攻击之后的 PSNR. 算法的鲁棒性使用原始 logo 图像和验证的 logo 图像之间的误码率 (BER)^[30] 来衡量.

(1) JPEG 压缩测试. 对原始立体图像进行 JPEG 压缩攻击, 压缩质量因子为 $Q = 10, 20, \dots, 90$, 压缩之后的图像质量如图 10(a) 和 (b) 所示, 可以看出当 $Q = 10$ 时, 压缩图像质量最差. 鲁棒测试结果如图 10(c) 和 (d) 所示, 由结果可知, 本文算法在 $Q = 10$ 时仍有很低的 BER, 均小于 0.04, 这说明本算

图 10 (网络版彩图) JPEG 压缩攻击图像的峰值信噪比和压缩攻击的鲁棒性

Figure 10 (Color online) PSNR to JPEG compression and robustness to JPEG compression. (a) PSNRL; (b) PSNRR; (c) asymmetric attack; (d) symmetric attack

法对 JPEG 压缩攻击具有很强的鲁棒性。

(2) 图像旋转测试. 对原始立体图像进行旋转测试, 旋转角度为 $\theta = 5, 10, \dots, 45$, 测试结果如图 11 所示. 可以看出经过旋转攻击之后, BER 均小于 0.08, 表明该算法可以很好的抵抗旋转攻击。

(3) 图像缩放测试. 对原始立体图像进行缩放测试, 此处的缩放指缩放一定倍数然后恢复至原图像大小, 缩放倍数为 $s = 0.5, 0.7, \dots, 1.5$, 测试结果如图 12 所示. 由结果可知经过缩放攻击, BER 均在 0.04 以下, 即本算法对缩放攻击具有很强的鲁棒性。

(4) 其他攻击测试. 表 3 为算法对其他攻击的测试结果, 主要包括中值滤波 (窗口大小为 3×3 和 5×5)、标准差为 0.5 的 Gauss 滤波 (窗口大小为 3×3 和 5×5)、Gauss 噪声 (方差为 0.005 和 0.01)、椒盐噪声 (强度为 0.02 和 0.03) 以及左上角剪切 (剪切比例为 1/16 和 1/8). 由结果可知, 本算法对于以上各种攻击的 BER 均小于 0.06, 表明本算法可以很好的抵抗上述攻击。

5.4 鲁棒性对比

本文算法的性能对比从两个方面进行: (1) 与基于 TRHFM 的算法对比. 首先本文使用同样的方法构造 TRHFM, 然后在本文提出的零水印算法中, 使用 TRHFM 替代 TPHFM 来构造零水印. (2) 与其他零水印算法对比. 主要包括一个立体图像零水印算法^[11]和 3 个优良的平面图像零水印算法^[5, 6, 13]. 实验中立体图像零水印算法的鲁棒性使用对称攻击来衡量, 平面图像零水印算法的鲁棒性使用立体图像的左视角图像来衡量. 主要攻击包括 JPEG 压缩攻击 (压缩质量因子为 $Q = 10, 30, \dots, 90$)、旋转攻击 (旋转角度为 5° 和 45°)、缩放攻击 (缩放倍数为 0.25 和 4)、中值滤波 (窗

图 11 (网络版彩图) 旋转攻击图像的峰值信噪比和旋转攻击的鲁棒性

Figure 11 (Color online) PSNR to image rotation and robustness to image rotation. (a) PSNRL; (b) PSNRR; (c) asymmetric attack; (d) symmetric attack

口大小为 3×3 、标准差为 0.5 的 Gauss 滤波 (窗口大小为 3×3)、Gauss 噪声 (方差为 0.01)、椒盐噪声 (强度为 0.03) 以及左上角剪切 (剪切比例为 1/16 和 1/8). 实验结果采用 20 幅图像的平均 BER 来衡量. 表 4 显示了本文基于 TPHFM 算法与其他 5 种算法的对比实验结果. 从结果可以看出, 同 TRHFM 相比, 本文算法在使用 TPHFM 时表现出了更好的抗攻击性能, 这是由两个矩的径向基函数决定的. 此外, 本文算法比文献 [5, 6, 11, 13] 中算法具有更强的鲁棒性, 只有少数攻击略差于这些算法 [5, 6, 11, 13].

6 结论

现有的立体图像零水印算法未能很好体现和保留左右视角分量内部的特定联系, 因而必然影响算法的鲁棒性. 本文基于三元数理论和极谱 - Fourier 矩提出三元数极谱 - Fourier 矩 (ternary polar harmonic Fourier moments, TPHFM), 并基于此, 提出一种鲁棒立体图像零水印算法. 首先使用 TPHFM 幅值构造二值特征图像, 然后对二值特征图像和原始二值 logo 图像进行异或得到零水印图像. 实验结果显示本文所提零水印算法可以有效的抵抗多种攻击, 并且算法的鲁棒性优于三元数圆谱 - Fourier 矩 (TRHFM) 算法和其他零水印算法. 本文算法具有如下创新点: (1) 首次提出 TPHFM, 并对其分解重构进行了分析. (2) 首次将 TPHFM 应用于立体图像处理算法中, 对对称攻击和非对称攻击具有很强的鲁棒性. (3) 算法使用三种混沌系统: 线性和非线性混合耦合时空混沌系统 (MLNCLM)、Sine 映射和 Cosine 映射, 增强了算法的安全性. (4) 没有对原始立体图像做任何修改, 使立体图像拥有良好的不可感知性. (5) 本算法利用三元数理论, 很好的体现和保留左右视角分量内部的特定联系, 从而会

表 3 其他攻击的鲁棒性
Table 3 Robustness to other attacks

Attack		Art	Books	Computer	Dolls
Median filtering (3×3)	PSNRL (dB)	30.4035	27.3473	27.5332	28.9317
	PSNRR (dB)	30.8843	26.4759	27.6796	29.3416
	Asymmetrical attack	0.0039	0.0078	0.0088	0.0088
	Symmetrical attack	0.0078	0.0195	0.0225	0.0107
Median filtering (5×5)	PSNRL (dB)	25.8941	23.6715	23.7791	24.8816
	PSNRR (dB)	25.9238	22.7944	23.5154	25.1525
	Asymmetrical attack	0.0156	0.0127	0.0215	0.0205
	Symmetrical attack	0.0215	0.0400	0.0371	0.0293
Gaussian filtering (3×3)	PSNRL (dB)	36.9577	34.4840	35.0346	35.5844
	PSNRR (dB)	37.3435	33.8248	34.8005	35.9680
	Asymmetrical attack	0	0.0020	0.0029	0.0029
	Symmetrical attack	0.0020	0.0029	0.0049	0.0049
Gaussian filtering (5×5)	PSNRL (dB)	36.9273	34.4577	35.0088	35.5543
	PSNRR (dB)	37.3123	33.7982	34.7732	35.9377
	Asymmetrical attack	0	0.0020	0.0029	0.0029
	Symmetrical attack	0.0020	0.0029	0.0049	0.0049
Gaussian noise (0.005)	PSNRL (dB)	23.2990	23.1482	23.0811	23.2960
	PSNRR (dB)	23.3135	23.0542	23.0746	23.3485
	Asymmetrical attack	0.0156	0.0166	0.0186	0.0195
	Symmetrical attack	0.0215	0.0264	0.0381	0.0273
Gaussian noise (0.01)	PSNRL (dB)	20.4923	20.1951	20.0748	20.4157
	PSNRR (dB)	20.4772	20.1254	20.1505	20.4921
	Asymmetrical attack	0.0264	0.0215	0.0293	0.0264
	Symmetrical attack	0.0332	0.0361	0.0430	0.0498
Salt and peppers noise (0.02)	PSNRL (dB)	21.6491	21.9930	22.3048	21.7698
	PSNRR (dB)	21.4336	22.1273	22.2937	21.7848
	Asymmetrical attack	0.0215	0.0234	0.0244	0.0225
	Symmetrical attack	0.0254	0.0342	0.0342	0.0371
Salt and peppers noise (0.03)	PSNRL (dB)	19.8839	20.4135	20.5746	19.9893
	PSNRR (dB)	19.8996	20.4051	20.6388	19.9289
	Asymmetrical attack	0.0215	0.0254	0.0273	0.0361
	Symmetrical attack	0.0332	0.0391	0.0410	0.0537
Upper left corner cropping (1/16)	PSNRL (dB)	25.8137	27.2417	26.1823	25.2798
	PSNRR (dB)	25.3407	27.0781	26.4085	26.1656
	Asymmetrical attack	0	0	0	0
	Symmetrical attack	0	0	0	0
Upper left corner cropping (1/8)	PSNRL (dB)	19.9004	21.3112	21.8225	20.9267
	PSNRR (dB)	19.4598	21.2795	21.4054	22.1922
	Asymmetrical attack	0	0	0	0
	Symmetrical attack	0	0	0	0

增强算法的鲁棒性. 故而, 本文算法对立体图像的版权保护具有重要的理论价值.

本文算法虽然具有较强的创新性和重要的理论价值, 但仍需存在些许不足之处. 例如本算法对剪切攻击尤其是图像中间位置的剪切的鲁棒性较差. 在未来的工作中, 我们将会努力克服以上不足, 使

图 12 (网络版彩图) 缩放攻击图像的峰值信噪比和缩放攻击的鲁棒性

Figure 12 (Color online) PSNR to image scaling and robustness to image scaling. (a) PSNRL; (b) PSNRR; (c) asymmetric attack; (d) symmetric attack

表 4 本文算法和其他算法的鲁棒性对比

Table 4 Comparison of the robustness of the proposed algorithm and other algorithms

Attack	Proposed	TRHFM-based	Ref. [5]	Ref. [6]	Ref. [11]	Ref. [13]
JPEG compression (10)	0.0270	0.0293	0.0164	0.0164	0.0952	0.0332
JPEG compression (30)	0.0101	0.0111	0.0109	0.0084	0.0742	0.0059
JPEG compression (50)	0.0062	0.0092	0.0075	0.0056	0.0688	0.0062
JPEG compression (70)	0.0020	0.0062	0.0068	0.0048	0.0573	0.0026
JPEG compression (90)	0	0.0036	0.0034	0.0034	0.0535	0.0013
Rotation with cropping 5°	0.0511	0.0612	0.1825	0.3320	0.5016	0.0059
Rotation with cropping 45°	0.0544	0.0687	0.1706	0.3155	0.4956	0.0052
Scaling 0.25 and resizing to original size	0.0423	0.0560	0.0092	0.0117	0.0301	0.0527
Scaling 4 and resizing to original size	0.0026	0.0042	0.0056	0.0088	0.0315	0.0049
Median filtering (3 × 3)	0.0127	0.0215	0.0164	0.0178	0.0334	0.0147
Gaussian filtering (3 × 3)	0.0033	0.0042	0.0075	0.0092	0.0176	0.0052
Gaussian noise (0.01)	0.0374	0.0449	0.0285	0.0285	0.0793	0.0430
Salt and peppers noise (0.03)	0.0378	0.0488	0.0465	0.0698	0.0818	0.0400
Upper left corner cropping (1/16)	0	0	0.1098	0.1743	0.0415	0
Upper left corner cropping (1/8)	0	0	0.1258	0.2256	0.0378	0

之具有更强的实用价值. 此外, 我们可以将 TPHFM 应用到立体图像处理的其他领域, 如立体图像分割、立体图像识别和立体图像检索等.

参考文献

- 1 Wang X Y, Meng L, Yang H Y. A color image digital watermarking algorithm based on multiscale features. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2009, 39: 966–976 [王向阳, 孟岚, 杨红颖. 一种基于多尺度特征的彩色图像数字水印算法. *中国科学 F 辑: 信息科学*, 2009, 39: 966–976]
- 2 Lu J, Zou Y R, Yang C Y, et al. A robust fractal color image watermarking algorithm. *Math Probl Eng*, 2014, 2014: 26–44
- 3 Wen Q, Sun T F, Wang S X. Based zero-watermark digital watermarking technology. In: *Proceedings of the 3rd National Conference in Information Hiding*. Xi'an: Xidian University Press, 2001. 102–109 [温泉, 孙铁锋, 王树勋. 基于零水印的数字水印技术研究. *全国第三届信息隐藏学术研讨会论文集*. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001. 102–109]
- 4 Wen Q, Sun T F, Wang S X. Concept and application of zero-watermark. *Acta Electron Sin*, 2003, 31: 214–216 [温泉, 孙铁锋, 王树勋. 零水印的概念与应用. *电子学报*, 2003, 31: 214–216]
- 5 Chen T H, Horng G B, Lee W B. A publicly verifiable copyright-proving scheme resistant to malicious attacks. *IEEE Trans Ind Electron*, 2005, 52: 327–334
- 6 Chang C C, Lin P Y. Adaptive watermark mechanism for rightful ownership protection. *J Syst Softw*, 2008, 81: 1118–1129
- 7 Tsai H H, Tseng H C, Lai Y S. Robust lossless image watermarking based on α -trimmed mean algorithm and support vector machine. *J Syst Softw*, 2010, 83: 1015–1028
- 8 Tsai H H, Lai Y S, Lo S C. A zero-watermark scheme with geometrical invariants using SVM and PSO against geometrical attacks for image protection. *J Syst Softw*, 2013, 86: 335–348
- 9 Gao G Y, Jiang G P. Bessel-Fourier moment-based robust image zero-watermarking. *Multimed Tools Appl*, 2013, 74: 841–858
- 10 Sun L, Xu J C, Zhang X X, et al. A novel generalized Arnold transform-based zero-watermarking scheme. *Appl Math Inf Sci*, 2015, 4: 2023–2035
- 11 Zhou W J, Yu M, Yu S M, et al. A zero-watermarking algorithm of stereoscopic image based on hyperchaotic system. *Acta Phys Sin*, 2012, 61: 117–126 [周武杰, 郁梅, 禹思敏, 等. 一种基于超混沌系统的立体图像零水印算法. *物理学报*, 2012, 61: 117–126]
- 12 Wang C P, Wang X Y, Xia Z Q, et al. Geometrically resilient color image zero-watermarking algorithm based on quaternion exponent moments. *J Vis Commun Image Represent*, 2016, 41: 247–259
- 13 Wang C P, Wang X Y, Chen X J, et al. Robust zero-watermarking algorithm based on polar complex exponential transform and logistic mapping. *Multimed Tools Appl*, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11042-016-4130-7>
- 14 Hamilton W R. *Elements of Quaternions*. London: Longmans, Green, and Company, 1899
- 15 Wang X Y, Wang C P, Yang H Y, et al. A robust blind color image watermarking in quaternion Fourier transform domain. *J Syst Softw*, 2013, 86: 255–277
- 16 Ren H P, Ping Z L, Bo W R G, et al. Multidistortion-invariant image recognition with radial harmonic Fourier moments. *J Opt Soc Am Opt Image Sci Vis*, 2003, 20: 631–637
- 17 Wang C P, Wang X Y, Xia Z Q. Geometrically invariant image watermarking based on fast radial harmonic Fourier moments. *Signal Process Image Commun*, 2016, 45: 10–23
- 18 Singh C, Upneja R. Error analysis in the computation of orthogonal rotation invariant moments. *J Math Imaging Vis*, 2014, 49: 251–271
- 19 Xin Y Q, Liao S, Pawlak M. Circularly orthogonal moments for geometrically robust image watermarking. *Pattern Recogn*, 2007, 40: 3740–3752
- 20 Li L D, Li S S, Abraham A, et al. Geometrically invariant image watermarking using polar harmonic transforms. *Inf Sci*, 2012, 199: 1–19
- 21 Zhang Y Q, Wang X Y. Spatiotemporal chaos in mixed linear-nonlinear coupled logistic map lattice. *Phys A*, 2014, 402: 104–118

- 22 Pareek N K, Patidar V, Sud K K. Image encryption using chaotic logistic map. *Image Vis Comput*, 2006, 24: 926–934
- 23 Tang Z J, Zhang X Q, Huang L Y, et al. Robust image hashing using ring-based entropies. *Signal Process*, 2013, 93: 2061–2069
- 24 Tang Z J, Zhang X Q, Zhang S C. Robust perceptual image hashing based on ring partition and NMF. *IEEE Trans Knowl Data Eng*, 2014, 26: 711–724
- 25 Tang Z J, Zhang X Q, Li X X, et al. Robust image hashing with ring partition and invariant vector distance. *IEEE Trans Inf Forensic Secur*, 2016, 11: 200–214
- 26 Scharstein D, Pal C. Learning conditional random fields for stereo. In: *Proceedings of 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, 2007
- 27 Hirschmuller H, Scharstein D. Evaluation of cost functions for stereo matching. In: *Proceedings of 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, 2007
- 28 Lu J, Ye Z X, Zou Y R. Huber fractal image coding based on a fitting plane. *IEEE Trans Image Process*, 2013, 22: 134–145
- 29 Lu J, Shen L X, Xu C, et al. Multiplicative noise removal in imaging: an exp-model and its fixed-point proximity algorithm. *Appl Comput Harmon Anal*, 2015, 41: 518–539
- 30 Gong D F, Liu F L, Luo X Y. An image edge based robust watermarking algorithm. *Sci Sin Inform*, 2013, 43: 1410–1430 [巩道福, 刘粉林, 罗向阳. 一种基于图像边缘的鲁棒水印算法. *中国科学: 信息科学*, 2013, 43: 1410–1430]

附录 A 引理 1 的证明

首先将式 (9) 离散化得到直角坐标系下 PHFM 的计算公式, 本文基于内切圆映射^[17]来计算 PHFM, 如下:

$$P_{nm} = \frac{8}{\pi N^2} \sum_{p=0}^{N-1} \sum_{q=0}^{N-1} f(p, q) T_n(r) \exp(-jm\theta). \quad (\text{A1})$$

由上式很容易得到 $P_{00} = \sqrt{2}C$, 此处主要证明 $(n, m) \neq (0, 0)$ 的情况.

如图 A1 所示, 对于单位圆内任一像素 $A(r, \theta)$, 有另外三个像素与之对应, 即 $B(r, \pi/2 + \theta)$, $C(r, \pi + \theta)$ 和 $D(r, 3\pi/2 + \theta)$. 首先以 (A, B) 和 (C, D) 为例将单位圆内的像素配对, 可得

$$\begin{aligned} P_{nm} &= \frac{8}{\pi N^2} \sum_{\{\text{All pairs}\}} \left[CT_n(r) \exp(-jm\theta) + CT_n(r) \exp\left(-jm\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)\right) \right] \\ &= \frac{8C}{\pi N^2} \sum_{\{\text{All pairs}\}} \left[T_n(r) \exp(-jm\theta) + T_n(r) \exp\left(-jm\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)\right) \right] \\ &= \frac{8C}{\pi N^2} \sum_{\{\text{All pairs}\}} T_n(r) \exp(-jm\theta) \left[1 + \exp\left(-jm\frac{\pi}{2}\right) \right]. \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

则当 m 是 4 的倍数时, $1 + \exp(-jm\frac{\pi}{2}) \neq 0$, 则 $P_{nm} \neq 0$, 即 $P_{nm} \neq 0$ 的集合为 $S_1 = \{m, m = 4i, i \in \mathbb{Z}\}$.

然后以 (A, C) 和 (B, D) 为例将单位圆内的像素配对, 可得

$$\begin{aligned} P_{nm} &= \frac{8}{\pi N^2} \sum_{\{\text{All pairs}\}} [CT_n(r) \exp(-jm\theta) + CT_n(r) \exp(-jm(\pi + \theta))] \\ &= \frac{8C}{\pi N^2} \sum_{\{\text{All pairs}\}} [T_n(r) \exp(-jm\theta) + T_n(r) \exp(-jm(\pi + \theta))] \\ &= \frac{8C}{\pi N^2} \sum_{\{\text{All pairs}\}} T_n(r) \exp(-jm\theta) [1 + \exp(-jm\pi)]. \end{aligned} \quad (\text{A3})$$

则当 m 为偶数时, $1 + \exp(-jm\pi) \neq 0$, 则 $P_{nm} \neq 0$, 即 $P_{nm} \neq 0$ 的集合为 $S_2 = \{m, m \text{ is even}\}$. 取 S_1 和 S_2 的交集可得满足 $P_{nm} \neq 0$ 的集合为 $S = \{m, m = 4i, i \in \mathbb{Z}\}$.

附录 B 定理 1 的证明

由式 (13) 和 (14) 知, P_{nm}^R 的计算是由立体图像的左右视角的 PHFM $P_{nm}(f_L)$ 和 $P_{nm}(f_R)$ 计算得到.

图 A1 单位圆内的像素点

Figure A1 Pixel points in the unit circle

由引理 1 可知, 左右视角图像的 PHFM 满足

$$P_{nm}(f_L) = P_{nm}(f_R) = \begin{cases} \sqrt{2}C, & \text{while } n = m = 0, \\ \text{nonzero}, & \text{while } (n, m) \neq (0, 0), m = 4i, i \in \mathbb{Z}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

当 $n = m = 0$ 时, $B_{nm} = C_{nm} = \sqrt{2}C$, $A_{nm} = 0$, 则 $|P_{nm}^R| = \sqrt{A_{nm}^2 + B_{nm}^2 + C_{nm}^2} = 2C$, 故而可得

$$|P_{nm}^R| = \begin{cases} 2C, & \text{while } n = m = 0, \\ \text{nonzero}, & \text{while } (n, m) \neq (0, 0), m = 4i, i \in \mathbb{Z}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Stereo image zero-watermarking algorithm based on ternary polar harmonic Fourier moments and chaotic mapping

Chunpeng WANG, Xingyuan WANG*, Chuan ZHANG, Xiaoqiang ZHU & Zhiqiu XIA

Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China

* Corresponding author. E-mail: wangxy@dlut.edu.cn

Abstract In recent years, stereo images have attracted extensive attention because of their strong immersion, and the corresponding copyright protection of stereo images is becoming increasingly urgent. At present, most of the watermarking algorithms for image copyright protection are aimed at planar images, and there are few watermarking algorithms for stereo images. Moreover, most of the existing stereo image watermarking algorithms are not very good at reflecting and retaining the specific relationship between the left and right views of the stereo images, which will inevitably affect the robustness of the algorithm. In this paper, ternary polar harmonic Fourier moments (TPHFM) for stereo images is proposed and based on this and chaotic mapping, a robust stereo image zero-watermarking algorithm is presented. First, mixed linear-nonlinear coupled map lattice is used to make the original binary logo image chaotic. Next, the TPHFM of the original stereo image is computed and accurate moments for the zero-watermarking algorithm are selected. Then, the binary feature image is constructed using the accurate moments, and scrambled using Sine mapping and Cosine mapping. Finally, a zero-watermark image is generated using the exclusive-or on the scrambled binary feature image and the chaotic binary logo image. Experimental results show that the proposed zero-watermarking algorithm is excellently robust against common image processing attacks and geometric attacks, and is superior to ternary radial harmonic Fourier moments (TRHFM)-based algorithm and other zero-watermarking algorithms.

Keywords ternary number, polar harmonic Fourier moments, ternary polar harmonic Fourier moments, stereo image, zero-watermarking, mixed linear-nonlinear coupled map lattice, Sine mapping, Cosine mapping

mainly include image watermarking and signal processing.

Chunpeng WANG was born in 1989. He received the B.E. degree in computer science and technology in 2010 from Shandong Jiaotong University, China, and the M.S. degree from the School of Computer and Information Technology, Liaoning Normal University, China, 2013. He is currently pursuing the Ph.D. degree from the Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, China. His research interests

a professor with the School of Computer Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian, China. His research interests include image processing, chaos, fractal, and complex network theory and application research.

Xingyuan WANG was born in 1964. He received the B.S. degree in applied physics from Tianjin University, Tianjin, China, in 1987; the M.S. degree in optics from Tianjin University, in 1992; and the Ph.D. degree in computer software and theory from Northeastern University, Shenyang, China, in 1999. From 1999 to 2001, he was a postdoctoral fellow in automation at Northeastern University. Since 2001, he has been

Chuan ZHANG was born in 1990. He received the B.S. degree in Statistics from Qufu Normal University, China, in 2013. From 2013 to 2015, he was a master at the Nanjing University of Finance and Economics. He is currently working toward the Ph.D. degree with the Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, China. His research interests include systems biology and complex networks.

Xiaoqiang ZHU was born in 1992. He received the M.E. degree from the School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian. He is currently pursuing the B.S. degree from Dalian University of Technology, Dalian. His research interest lies in image encryption.