

一种基于超混沌系统的立体图像零水印算法*

周武杰¹⁾²⁾ 郁梅^{2)†} 禹思敏³⁾ 蒋刚毅²⁾ 葛丁飞¹⁾

1) (浙江科技学院信息与电子工程学院, 杭州 310023)

2) (宁波大学信息科学与工程学院, 宁波 315211)

3) (广东工业大学自动化学院, 广州 510006)

(2011年6月16日收到; 2011年10月31日收到修改稿)

为了在不改变立体图像质量的前提下对立体图像实施版权保护, 提出了一种基于超混沌离散系统的立体图像零水印算法. 该算法利用立体图像左右视点小波变换域低频子带视差的稳定性以及离散余弦变换直流系数稳定的特点构造了一种视差零水印. 在水印构造过程中, 利用了超混沌离散系统的初始值敏感性、参数密钥空间大和动力学行为复杂等特性映射视差零水印的位置信息, 从而增强了水印算法的安全性. 此外, 还分析了水印安全性与水印容量之间的关系. 实验结果表明, 该立体图像视差零水印算法对加噪、滤波、压缩、剪切、图像放大和缩小等各种对称和非对称攻击表现出了较强的鲁棒性.

关键词: 立体图像, 视差零水印, 超混沌系统, 鲁棒性

PACS: 07.05.Pj, 05.45.Gg

1 引言

立体图像是基于人眼的双目视差原理, 即双目独立地接收来自同一场景的两幅具有细微差别的图像来形成双目视差以获得立体感. 双目视差的存在使人脑感受到图像的深度信息, 从而增强图像的真实性, 给人们以身临其境的感觉^[1,2]. 随着数字媒体和计算机网络技术的不断发展和日益普及, 立体图像处理技术作为当前的一个研究热点, 已引起学术界的广泛关注, 其研究成果在各个领域逐步得到了应用^[3,4]. 立体图像易于复制和修改, 这会侵犯作者的版权, 而关于立体图像的版权保护报道相对于平面图像的版权保护较为少见^[5,6]. 因此, 立体图像的版权保护是一个亟待解决的问题.

数字水印技术是近年发展起来的一种可有效地应用于数字产品版权保护和认证的新兴技术^[7-9]. 人们已对平面图像的版权保护和认证进行

深入研究, 提出了一些有效的数字水印算法^[10-17]. 零水印算法能较好地解决水印的鲁棒性和透明性之间的矛盾, 已成为水印技术的一个研究热点. 其主要思想是利用图像的特征构造可以唯一识别的水印, 在水印的嵌入过程中不改变原始图像的任何信息, 可以有更好的透明性^[10]. 为了增加算法的安全性, 一些学者对混沌系统的随机性展开了研究^[18-20], 并将该特性应用于数字水印技术^[11-16]. 此外, 一些学者通过对三维网格模型的几何特征提取, 提出了基于几何特征的三维网格模型零水印算法^[17]. 因此, 在平面图像和三维模型数字水印技术已有成果^[10-17]的基础上, 结合立体图像的特性, 是开展立体图像数字水印技术研究的关键.

本文通过研究超混沌离散系统、立体图像小波变换域的视差以及零水印的特性, 提出一种基于超混沌离散系统的立体图像视差零水印算法. 该算法利用了离散小波变换低频子带的稳定性和离散

* 国家自然科学基金 (批准号: 60872094, 60832003, 61071120)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 200816460003)、浙江省自然科学基金 (批准号: Y1100219)、浙江省研究生创新科研基金 (批准号: YK2009044) 和宁波大学优秀学位论文培育基金 (批准号: PY20110002) 资助的课题.

† E-mail: yumei2@126.com

余弦变换直流系数稳定的特点构造零水印, 在水印的构造过程中没有改变立体图像的质量, 零水印的检测无需原始立体图像, 零水印构造和检测的位置利用了超混沌系统随机性进行映射, 从而满足了立体图像数字水印技术对透明性, 鲁棒性和安全性的三大基本要求.

2 基于超混沌系统的立体图像零水印算法

2.1 超混沌离散系统

一维离散系统 (如 Logistic 映射) 模型简单, 产生伪随机序列的速度快, 因此可广泛应用于加密和数字水印技术. 但由于低维混沌系统存在动力学行为相对比较简单、确定序列的参数相对较少 (密钥空间少)、安全性能相对较低等缺陷, 故本文采用二维超混沌系统. 大量的研究表明, 超混沌离散系统具有以下两类基本特征: 一是可确定再生且密钥数量多、密钥空间大. 二是由于具有两个或两个以上的 Lyapunov 指数, 其动力学行为更为复杂. 正的 Lyapunov 指数越多, 系统轨道不稳定的方向就越多, 系统的随机性越强, 其抗破译能力就越高.

常用的二维超混沌离散系统表示为

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= m_1 + m_2x_n + m_3x_n^2 \\ &\quad + m_4y_n + m_5y_n^2 + m_6x_ny_n, \\ y_{n+1} &= m_7 + m_8x_n + m_9x_n^2 \\ &\quad + m_{10}y_n + m_{11}y_n^2 + m_{12}x_ny_n, \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $m_i (i = 1, 2, \dots, 12)$ 为待定常数; x_n 和 y_n 为超混沌迭代序列. 采用高维系统产生超混沌序列较一维混沌序列计算更复杂, 随机性更强, 在实际应用中通常采用系统状态变量参数尽可能少的超混沌离散系统来减少计算复杂度. 按照此准则, 可以得到简单二维超混沌离散系统

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= m_4y_n + m_5y_n^2, \\ y_{n+1} &= m_8x_n + m_{10}y_n. \end{aligned} \quad (2)$$

当 $m_4 = 1.66, m_5 = 1.30, m_8 = -1.10, m_{10} = 0.10$ 时, 该系统进入超混沌状态. 图 1 所示为采用超混沌离散系统生成 400 个点随机序列散点图.

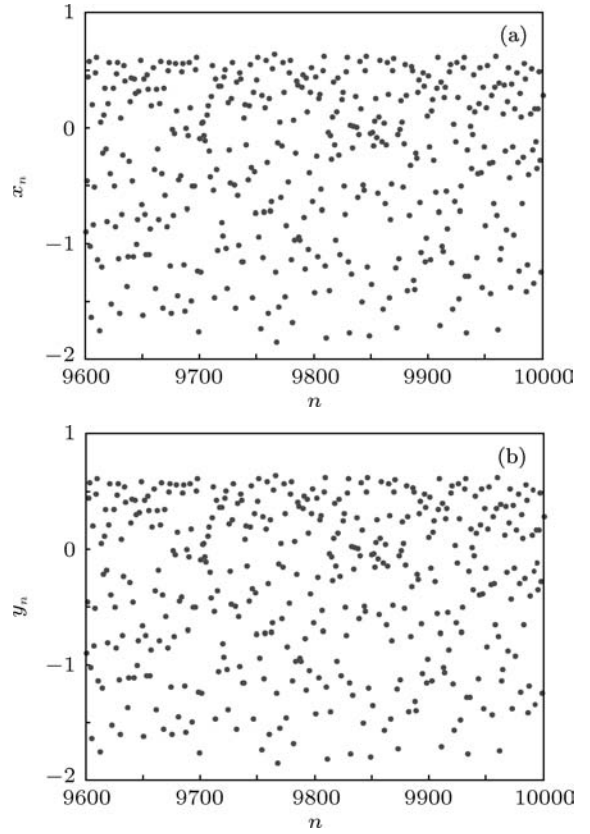


图 1 二维超混沌系统随机序列散点图 (a) 超混沌系统 x_n 的随机序列散点; (b) 超混沌系统 y_n 的随机序列散点

2.2 立体图像零水印构造算法

下面给出基于超混沌系统的立体图像零水印构造算法步骤.

步骤1 先将原始立体图像左右视点分别进行离散小波变换, 并得到左右视点低频子带 LL(L) 和 LL(R).

步骤2 采用左右视点块匹配算法和视差域滤波相结合的方法求取低频子带的像素视差, 该方法充分考虑了左右视点低频子带的空间相关性和视差的空間相关性. 块匹配算法利用左右视点图像的相关性来加强视差搜索过程中的匹配程度, 在块匹配算法中, 把当前要搜索视差的像素和其邻域的像素结合在一起得到更加精确的像素视差图, 利用块匹配法得到立体图像视差的方法如图 2 所示. 视差域滤波方法是在块匹配算法的基础上, 利用了视差的空間相关性使求得的视差图像更加平滑. 视差域滤波方法中所使用的公式如下:

$$\begin{aligned} E(x_d, y_d, d_v) &= E_{\text{data}}(x_d, y_d, d_v) \\ &\quad + \lambda E_{\text{reg}}(x_d, y_d, d_v), \end{aligned} \quad (3)$$

$$E_{\text{data}}(x_d, y_d, d) = \sum_{i=-u}^u \sum_{j=-u}^u |I_L(x_d + j, y_d + i) - I_R(x_d + i + d_v, y_d + i)|, \quad (4)$$

$$E_{\text{reg}}(x_d, y_d, d_v) = \lambda(|d_{v0}(x_d - 1, y_d) - d_v| + |d_{v1}(x_d - 1, y_d - 1) - d_v| + |d_{v2}(x_d, y_d - 1) - d_v| + |d_{v3}(x_d + 1, y_d - 1) - d_v|). \quad (5)$$

这里, E 称为相似性度量, 选择 E 最小时的视差 d_v 为当前像素的视差; E_{data} 为相似性能量, 用于衡量给定视差 d_v 时立体图像左右视点的差异程度; u 是用于确定匹配块大小的参数, 当 $u = 1$ 时, 匹配块的大小为 3×3 ; E_{reg} 为邻域能量归整; 参数 λ 用于控制视差图的平滑程度; x_d 和 y_d 表示当前像素的位置. 如图 3 所示, d_v 为当前所要求取的视差, $d_{v1}, d_{v2}, d_{v3}, d_{v4}$ 为待求视差 d_v 的四邻域视差.

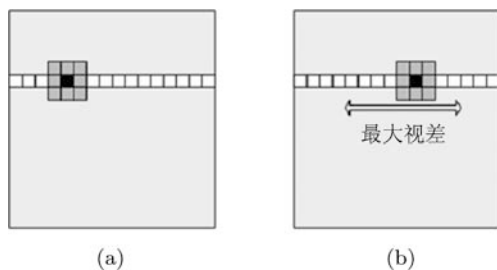


图 2 利用块匹配法得到立体图像视差方法 (a) 立体图像左视点; (b) 立体图像右视点

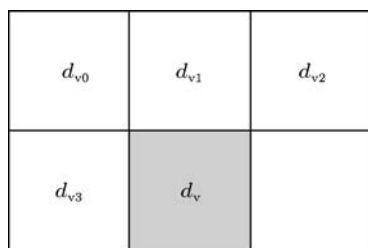


图 3 邻域视差示意图

步骤3 将变换域的视差图分成不重叠的 $k \times k$ 子块.

步骤4 对每个视差图的子块进行离散余弦变换, 得到直流系数矩阵 M , 零水印索引位置采用了超混沌系统映射视差块索引位置, 具体包括下面几个过程. 首先给定密钥 x_k 和 y_k 作为超混沌离散系统的初始值, 得到输出的二维序列的向量为 $\mathbf{x}(n) = [x(1), x(2), \dots, x(N)]$ 和 $\mathbf{y}(n) = [y(1), y(2), \dots, y(N)]$. 其次, 采用一维

向量排序函数 $\text{sort}(\cdot)$ 可对 $\mathbf{x}(n)$ 和 $\mathbf{y}(n)$ 向量进行排序, 其表达式分别为 $[\mathbf{x}'(n), p] = \text{sort}(\mathbf{x}(n))$ 和 $[\mathbf{y}'(n), q] = \text{sort}(\mathbf{y}(n))$, 其中, $\mathbf{x}'(n)$ 和 $\mathbf{y}'(n)$ 为已排序的向量, p 和 q 分别是向量 $\mathbf{x}'(n)$ 和 $\mathbf{y}'(n)$ 中对待排序向量 $\mathbf{x}(n)$ 和 $\mathbf{y}(n)$ 的索引, 该排序为默认升序排序法. 其后, 用 p 和 q 分别作为索引直流系数矩阵 M 的横坐标和纵坐标, 建立直流系数矩阵 M 的索引位置矩阵 $M(p, q)$, 不同的初始值将有不同的索引方法.

步骤50 通过判断索引后的直流系数矩阵 $M(p, q)$ 中的直流系数最高位数的奇偶性, 构造零水印 w . 如果 $M(p, q)$ 的最高位数字是奇数, 则 $w = 1$; 否则, $w = 0$.

2.3 立体图像零水印检测算法

立体图像零水印的检测算法与零水印的构造算法相似, 下面给出零水印检测算法的 5 个步骤.

步骤1 将待检测的立体图像进行离散小波变换, 得到左右视点低频子带 $LL'(L)$ 和 $LL'(R)$.

步骤2 利用块匹配和视差滤波的方法求得左右视点低频子带的像素视差图.

步骤3 将变换域的视差图分成不重叠的 $k \times k$ 子块.

步骤4 对每个子块进行离散余弦变换, 得到的直流系数矩阵为 M' . 并用超混沌系统相同初始值和参数得到的 p 和 q 分别作为索引直流系数矩阵 M' 的横坐标和纵坐标, 建立直流系数矩阵 M' 的索引位置矩阵 $M'(p, q)$.

步骤5 通过判断索引后的直流系数矩阵 $M'(p, q)$ 中的直流系数最高位数的奇偶性, 构造零水印 w' . 如果 $M'(p, q)$ 的最高位数是奇数, 则 $w' = 1$; 否则, $w' = 0$.

3 实验结果及分析

为了验证所提出算法的鲁棒性、安全性, 测试过程中选取大小为 512×512 (采用 Photoshop 软件对测试图像进行处理) 的各种类型的灰度立体图像作为测试图像, 这些水印测试立体图像分别为艺术立体图像、石头立体图像、纸艺立体图像、洗衣房立体图像、婴儿 1 立体图像、婴儿 2 立体图像, 图 4 给出了这些立体图像的右视点图像. 通过大量



图4 不同测试立体图像的右视点图像 (a) 艺术立体图像; (b) 石头立体图像; (c) 纸艺立体图像; (d) 洗衣房立体图像; (e) 婴儿1立体图像; (f) 婴儿2立体图像

的实验, 对算法中相关参数 N , u , λ 和 k 分别取值为 32, 1, 0.25 和 4.

3.1 立体图像零水印算法的相似性和均衡性测试

构造的视差零水印与立体图像左右视点的内容有关, 因此不同的立体图像零水印应该是相互独立的. 为了测试不同立体图像零水印相关性, 定义相似度 S 为^[9,13]

$$S = 1 - \frac{\sum_{b=1}^B w_b \oplus w'_b}{B}, \quad (6)$$

式中, \oplus 表示异或运算, B 为水印的长度. 如果保存的原始零水印 w 与 w' 间的相似度接近 0.5 表示两幅立体图像不相关; 如果相似度为 1 则说明是相关立体图像. 不同立体图像零水印相似特性测试的结果如表 1 所列. 从表 1 可知, 相同立体图像由于其完全匹配, 零水印的相似度为 1, 而与其他立体图像的水印相似度进行检测时, 得到的相似度为 0.5 左右.

构造的立体图像零水印要满足均衡性, 就是指零水印中的信号 1 和信号 0 的个数基本相同. 均衡性采用下列公式计算^[16]:

$$e = \frac{|N_1 - N_0|}{N_{\text{all}}}, \quad (7)$$

表 1 测试得到不同立体图像零水印的相似度

| | 艺术图像 | 石头图像 | 纸艺图像 | 洗衣房图像 | 婴儿 1 图像 | 婴儿 2 图像 |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 艺术图像 | 1.0000 | 0.5342 | 0.5176 | 0.5234 | 0.5123 | 0.5203 |
| 石头图像 | 0.5342 | 1.0000 | 0.4932 | 0.5088 | 0.5234 | 0.5048 |
| 纸艺图像 | 0.5176 | 0.4932 | 1.0000 | 0.5195 | 0.5048 | 0.5332 |
| 洗衣房图像 | 0.5234 | 0.5088 | 0.5195 | 1.0000 | 0.5166 | 0.5234 |
| 婴儿 1 图像 | 0.5123 | 0.5234 | 0.5048 | 0.5166 | 1.0000 | 0.5380 |
| 婴儿 2 图像 | 0.5203 | 0.5048 | 0.5332 | 0.5234 | 0.5380 | 1.0000 |

式中, N_1 , N_0 和 N_{all} 分别表示零水印中信号 1 的个数、0 的个数和信号总数, e 的值越小表示零水印的均衡性越好, 表 2 所列为不同立体图像零水印均衡性测试结果. 从表 2 可知, 零水印中信号 1 和信号 0 的个数近视相等, 即水印图像的均衡性近视为零.

3.2 立体图像零水印算法的普适性测试

立体图像至少包括两个视点图像, 本文采用两个视点的立体图像进行测试, 所以攻击类型可以分为非对称攻击和对称攻击. 非对称攻击是对立体图像的其中一个视点进行攻击 (测试以对右视点进行攻击为例), 攻击后右视点的图像质量可用峰值信噪比 $R_{\text{SNP,R}}$ 表示; 而对称攻击是在右视点被攻击的情况下采用同样的攻击方法和同样的强度继续对另一个视点 (左视点) 进行攻击, 攻击后左视点的图像质量用峰值信噪比 $R_{\text{SNP,L}}$ 表示. 测试过程中采用

原始视差零水印与攻击后立体图像检测得到的视差零水印的相似度来衡量抗攻击的鲁棒性.

3.2.1 添加高斯噪声和椒盐噪声测试

对原始立体图像添加高斯噪声, 高斯噪声方差 V_{NG} 分别为 0.005 和 0.01, 原始立体图像零水印与攻击后立体图像零水印间的相似度 S 和原始立体图像的视点与攻击后视点的峰值信噪比 R_{SNP} 如表 3 所列, 其中 $R_{\text{SNP,R}}$ 表示非对称攻击时右视点的图像质量, $R_{\text{SNP,L}}$ 表示对称攻击后左视点的图像质量.

对原始立体图像添加椒盐噪声, 椒盐噪声强度 I_{NSP} 分别为 0.02 和 0.03, 非对称攻击和对称攻击的测试结果如表 4 所列.

从表 3 和表 4 可知, 在添加高斯噪声和椒盐噪声攻击导致立体图像 R_{SNP} 较低的情况下, 检测出的 S 都在 0.83 以上, 表明该算法对加噪声类立体图像的处理具有较强的鲁棒性.

表 2 不同立体图像零水印的均衡性测试结果

| | 艺术图像 | 石头图像 | 纸艺图像 | 洗衣房图像 | 婴儿 1 图像 | 婴儿 2 图像 |
|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| N_1 | 513 | 530 | 505 | 501 | 514 | 539 |
| N_0 | 511 | 494 | 519 | 523 | 510 | 485 |
| e | 0.0019 | 0.0352 | 0.0137 | 0.0215 | 0.0039 | 0.0527 |

表 3 添加高斯噪声后的测试结果

| | 艺术图像 | 石头图像 | 纸艺图像 | 洗衣房图像 | 婴儿 1 图像 | 婴儿 2 图像 |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 非对称攻击 | | | | | | |
| $S(V_{\text{NG}} = 0.005)$ | 0.9503 | 0.9250 | 0.9139 | 0.9499 | 0.9197 | 0.8603 |
| $R_{\text{SNP,R}}(V_{\text{NG}} = 0.005)$ | 22.6415 | 21.7718 | 22.2933 | 23.0243 | 19.0599 | 20.2333 |
| $S(V_{\text{NG}} = 0.01)$ | 0.9311 | 0.9127 | 0.9061 | 0.9281 | 0.8862 | 0.8351 |
| $R_{\text{SNP,R}}(V_{\text{NG}} = 0.01)$ | 19.7531 | 18.7991 | 19.3243 | 20.0587 | 16.1946 | 17.3021 |
| 对称攻击 | | | | | | |
| $S(V_{\text{NG}} = 0.005)$ | 0.9309 | 0.9226 | 0.9087 | 0.9497 | 0.9134 | 0.8518 |
| $R_{\text{SNP,L}}(V_{\text{NG}} = 0.005)$ | 22.7873 | 21.7331 | 22.7227 | 23.0527 | 19.0910 | 20.2666 |
| $S(V_{\text{NG}} = 0.01)$ | 0.9260 | 0.9126 | 0.9028 | 0.9278 | 0.8789 | 0.8319 |
| $R_{\text{SNP,L}}(V_{\text{NG}} = 0.01)$ | 19.8723 | 18.7613 | 19.7678 | 20.0807 | 16.2241 | 17.3073 |

3.2.2 中值滤波和高斯低通滤波测试

对原始立体图像进行中值滤波, 中值滤波窗口 W_{FM} 大小分别为 3×3 和 5×5 , 非对称攻击和对称攻击的测试结果如表 5 所列.

对原始立体图像进行标准差为 0.5 的高斯低通滤波, 高斯低通滤波窗口 W_{FPLG} 大小分别为 2×2

和 3×3 , 非对称攻击和对称攻击的测试结果如表 6 所列.

从表 5 和表 6 可知, 在对立体图像经中值滤波和高斯低通滤波后, 检测出 S 都在 0.89 以上, 表明该算法对滤波类立体图像的处理较噪声类立体图像的处理具有更强的鲁棒性.

表 4 添加椒盐噪声后的测试结果

| | 艺术图像 | 石头图像 | 纸艺图像 | 洗衣房图像 | 婴儿 1 图像 | 婴儿 2 图像 |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 非对称攻击 | | | | | | |
| $S(I_{NSP} = 0.02)$ | 0.9542 | 0.9399 | 0.9059 | 0.9503 | 0.9230 | 0.9152 |
| $R_{SNP,R}(I_{NSP} = 0.02)$ | 21.8072 | 21.1185 | 21.6842 | 22.4994 | 17.7193 | 19.5096 |
| $S(I_{NSP} = 0.03)$ | 0.9398 | 0.9230 | 0.9046 | 0.9268 | 0.9097 | 0.9018 |
| $R_{SNP,R}(I_{NSP} = 0.03)$ | 20.0582 | 19.4604 | 19.9013 | 20.6987 | 16.0498 | 17.7985 |
| 对称攻击 | | | | | | |
| $S(I_{NSP} = 0.02)$ | 0.9474 | 0.9247 | 0.9042 | 0.9452 | 0.9152 | 0.9041 |
| $R_{SNP,L}(I_{NSP} = 0.02)$ | 21.8872 | 21.2160 | 22.0856 | 22.5037 | 17.6649 | 19.5724 |
| $S(I_{NSP} = 0.03)$ | 0.9354 | 0.9177 | 0.9014 | 0.9211 | 0.8644 | 0.8917 |
| $R_{SNP,L}(I_{NSP} = 0.03)$ | 20.2227 | 19.4139 | 20.4812 | 20.6992 | 16.0419 | 17.8287 |

表 5 中值滤波后的测试结果

| | 艺术图像 | 石头图像 | 纸艺图像 | 洗衣房图像 | 婴儿 1 图像 | 婴儿 2 图像 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 非对称攻击 | | | | | | |
| $S(W_{FM} = 3 \times 3)$ | 0.9833 | 0.9697 | 0.9774 | 0.9756 | 0.9680 | 0.9586 |
| $R_{SNP,R}(W_{FM} = 3 \times 3)$ | 33.8847 | 32.5010 | 33.1921 | 31.0389 | 35.4804 | 34.4387 |
| $S(W_{FM} = 5 \times 5)$ | 0.9697 | 0.9614 | 0.9541 | 0.9581 | 0.9524 | 0.9253 |
| $R_{SNP,R}(W_{FM} = 5 \times 5)$ | 29.8232 | 28.4693 | 29.3590 | 28.9018 | 30.7536 | 29.4972 |
| 对称攻击 | | | | | | |
| $S(W_{FM} = 3 \times 3)$ | 0.9735 | 0.9625 | 0.9637 | 0.9711 | 0.9461 | 0.9272 |
| $R_{SNP,L}(W_{FM} = 3 \times 3)$ | 35.0055 | 31.5393 | 34.5722 | 30.9884 | 35.5240 | 34.3061 |
| $S(W_{FM} = 5 \times 5)$ | 0.9653 | 0.9614 | 0.9483 | 0.9528 | 0.9374 | 0.9201 |
| $R_{SNP,L}(W_{FM} = 5 \times 5)$ | 30.2719 | 28.0466 | 30.1382 | 28.8310 | 30.8134 | 29.3613 |

表 6 高斯低通滤波后的测试结果

| | 艺术图像 | 石头图像 | 纸艺图像 | 洗衣房图像 | 婴儿 1 图像 | 婴儿 2 图像 |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 非对称攻击 | | | | | | |
| $S(W_{FPLG} = 2 \times 2)$ | 0.9555 | 0.9296 | 0.9196 | 0.9130 | 0.9593 | 0.9068 |
| $R_{SNP,R}(W_{FPLG} = 2 \times 2)$ | 28.8954 | 28.9293 | 29.3349 | 28.1618 | 30.8927 | 29.9886 |
| $S(W_{FPLG} = 3 \times 3)$ | 0.9887 | 0.9805 | 0.9779 | 0.9772 | 0.9730 | 0.9767 |
| $R_{SNP,R}(W_{FPLG} = 3 \times 3)$ | 39.5086 | 39.2663 | 39.2920 | 38.3521 | 41.7704 | 40.8713 |
| 对称攻击 | | | | | | |
| $S(W_{FPLG} = 2 \times 2)$ | 0.9553 | 0.9278 | 0.9156 | 0.9078 | 0.9312 | 0.8957 |
| $R_{SNP,L}(W_{FPLG} = 2 \times 2)$ | 29.3061 | 28.5595 | 30.0033 | 28.0488 | 30.9563 | 29.9161 |
| $S(W_{FPLG} = 3 \times 3)$ | 0.9751 | 0.9675 | 0.9631 | 0.9675 | 0.9401 | 0.9117 |
| $R_{SNP,L}(W_{FPLG} = 3 \times 3)$ | 40.4204 | 38.3688 | 40.3761 | 38.2203 | 41.8063 | 40.7266 |

3.2.3 压缩测试

应用联合图像专家组 (JPEG) 方法对原始立体图像进行非对称压缩和对称压缩, 压缩质量因子用 Q 表示, Q 的值越小, 说明压缩图像质量越差. 非对称压缩只对右视点进行压缩, 而对称压缩则是

在非对称压缩的基础上采用同样的压缩质量因子对另一个视点 (左视点) 进行压缩, 测试结果如图 5 和图 6 所示. 从测试结果可知, 当 $Q = 10$ 时, 压缩比已经很大, 本文零水印算法还能检测出较高的相似度 ($S = 0.84$), 表明该算法对应用 JPEG 方法压

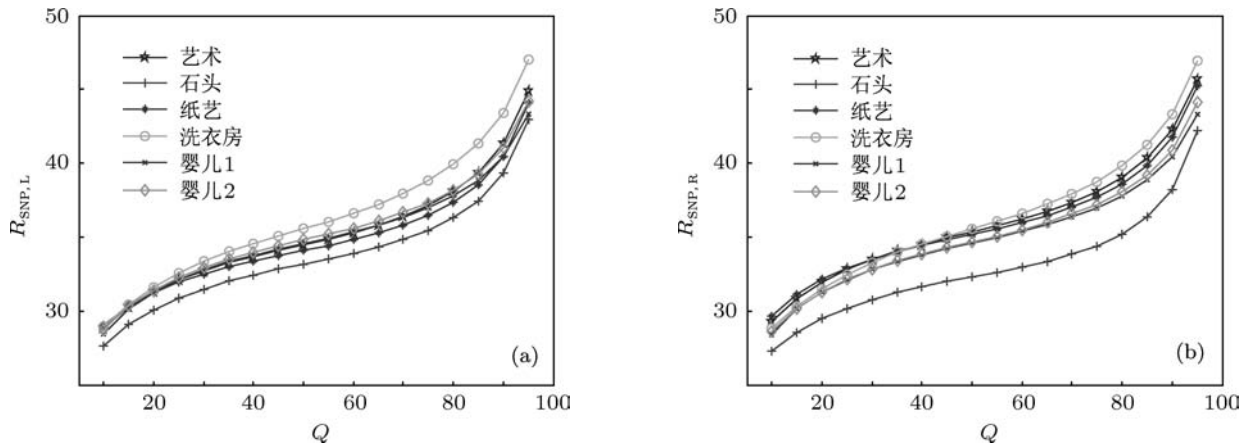


图5 左视点和右视点图像随 Q 变化的峰值信噪比 R_{SNP} (a) 右视点图像的 $R_{SNP,R}$; (b) 左视点图像的 $R_{SNP,L}$

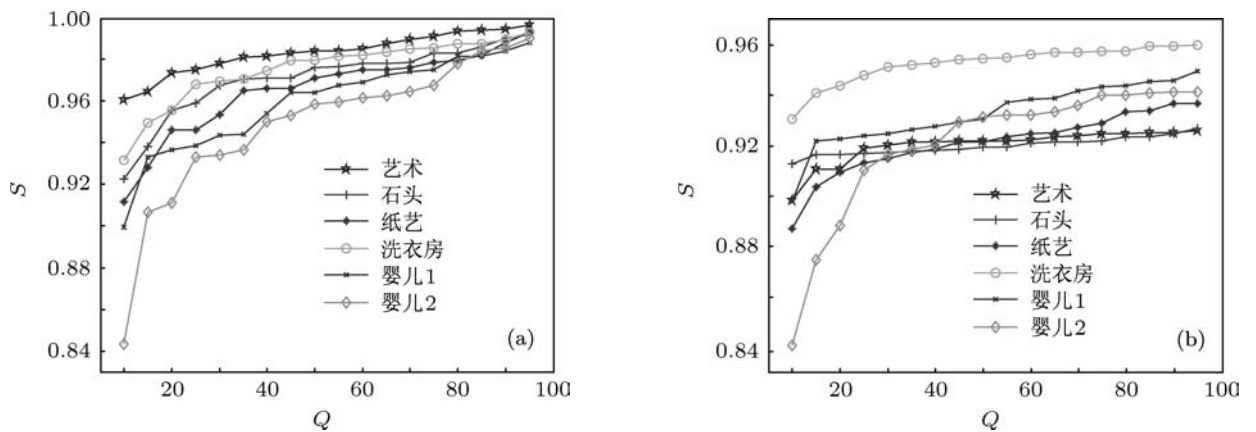


图6 非对称压缩和对称压缩的立体图像零水印鲁棒性测试 (a)非对称压缩; (b)对称压缩

缩立体图像的处理具有较强的鲁棒性.

3.2.4 剪切测试

对原始立体图像进行非对称剪切和对称剪切, 测试以左上角剪切面积为整幅立体图像的 1/8

和 1/16 为例 ($A_{CUL} = 1/8, A_{CUL} = 1/16$). 非对称攻击和对称攻击的测试结果如表 7 所列.

从表 7 可知, 在对立体图像经剪切处理后, 检测出 S 都在 0.90 以上, 表明该算法对剪切类立体图像的处理具有较强的鲁棒性.

表7 剪切后的测试结果

| | 艺术图像 | 石头图像 | 纸艺图像 | 洗衣房图像 | 婴儿 1 图像 | 婴儿 2 图像 |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 非对称攻击 | | | | | | |
| $S(A_{CUL} = 1/8)$ | 0.9952 | 0.9924 | 0.9908 | 0.9967 | 0.9906 | 0.9906 |
| $R_{SNP,R}(A_{CUL} = 1/8)$ | 27.3116 | 23.1705 | 22.3794 | 22.5266 | 26.4009 | 24.2487 |
| $S(A_{CUL} = 1/16)$ | 0.9892 | 0.9864 | 0.9843 | 0.9895 | 0.9851 | 0.9778 |
| $R_{SNP,R}(A_{CUL} = 1/16)$ | 18.9840 | 17.3440 | 17.4312 | 16.1503 | 20.6332 | 18.3391 |
| 对称攻击 | | | | | | |
| $S(A_{CUL} = 1/8)$ | 0.9746 | 0.9618 | 0.9501 | 0.9732 | 0.9372 | 0.9067 |
| $R_{SNP,L}(A_{CUL} = 1/8)$ | 27.1017 | 23.0715 | 22.7964 | 23.3101 | 26.6085 | 24.0588 |
| $S(A_{CUL} = 1/16)$ | 0.9708 | 0.9573 | 0.9473 | 0.9664 | 0.9312 | 0.8933 |
| $R_{SNP,L}(A_{CUL} = 1/16)$ | 19.7730 | 17.1840 | 17.8064 | 15.9473 | 20.9589 | 18.2839 |

3.2.5 偏移行列测试

对原始立体图像进行偏移行列攻击. 向右偏移列 L_{MR} 指整幅图像右移后, 左边相应的列补全黑色, 移出的列丢失; 向下偏移行 R_{MD} 同理. 实验分别以向右偏移 2 列 ($L_{MR} = 2$) 和向下偏移 2 行 ($R_{MD} = 2$) 为例, 非对称攻击和对称攻击的测试结果如表 8 所列.

从表 8 可知, 在对立体图像经行列偏移后, 检测出 S 都在 0.84 以上, 表明该算法对行列偏移类立体图像的处理具有较强的鲁棒性.

3.2.6 尺寸缩放测试

对原始立体图像进行尺寸缩放, 一种方法是将原始立体图像先放大后缩小, 另一种方法是将原始立体图像先缩小后放大, 经变换后的尺寸和原

立体图像的尺寸相同. 实验分别以先放大 4 倍后缩小 0.25 倍 ($R_{R,A} = 4$) 和先缩小 0.25 倍后放大 4 倍 ($R_{A,R} = 0.25$) 为例, 非对称攻击和对称攻击的测试结果如表 9 所列.

从表 9 可知, 在对立体图像经尺寸缩放后, 检测出 S 都在 0.9 以上, 表明该算法对尺寸缩放类立体图像的处理具有较强的鲁棒性.

立体图像经攻击后视点的质量明显下降, 从表 3—表 9 和图 6 可知, 立体图像零水印算法对不同纹理立体图像具有很强的鲁棒性, 抗攻击能力强、普适性好.

当相似度 S 大于阈值 S_{th} , 则可以认为版权申诉者拥有该作品的版权. 根据以上实验结果并经过反复验证后, 可以将 $S = 0.83$ 作为阈值 S_{th} .

表 8 偏移行列后的测试结果

| | 艺术图像 | 石头图像 | 纸艺图像 | 洗衣房图像 | 婴儿 1 图像 | 婴儿 2 图像 |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 非对称攻击 | | | | | | |
| $S(L_{MR} = 2)$ | 0.9305 | 0.9568 | 0.9539 | 0.9255 | 0.9491 | 0.9909 |
| $R_{SNP,R}(L_{MR} = 2)$ | 21.2884 | 22.0938 | 21.7859 | 19.8428 | 24.3484 | 23.6506 |
| $S(R_{MD} = 2)$ | 0.9031 | 0.9204 | 0.9134 | 0.9286 | 0.9013 | 0.8496 |
| $R_{SNP,R}(R_{MD} = 2)$ | 23.1609 | 21.1440 | 23.1847 | 22.4735 | 24.5701 | 23.9105 |
| 对称攻击 | | | | | | |
| $S(L_{MR} = 2)$ | 0.9249 | 0.9542 | 0.9517 | 0.9278 | 0.9497 | 0.8951 |
| $R_{SNP,L}(L_{MR} = 2)$ | 21.4185 | 21.8804 | 22.1016 | 19.8017 | 24.4604 | 23.4215 |
| $S(R_{MD} = 2)$ | 0.9001 | 0.9188 | 0.9046 | 0.9227 | 0.9041 | 0.8326 |
| $R_{SNP,L}(R_{MD} = 2)$ | 23.4269 | 21.0196 | 23.7374 | 22.3926 | 24.6043 | 23.8216 |

表 9 尺寸缩放后的测试结果

| | 艺术图像 | 石头图像 | 纸艺图像 | 洗衣房图像 | 婴儿 1 图像 | 婴儿 2 图像 |
|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 非对称攻击 | | | | | | |
| $S(R_{R,A} = 4)$ | 0.9962 | 0.9919 | 0.9914 | 0.9912 | 0.9884 | 0.9889 |
| $R_{SNP,R}(R_{R,A} = 4)$ | 42.4441 | 43.4463 | 42.4787 | 40.8368 | 46.2749 | 45.7261 |
| $S(R_{A,R} = 0.25)$ | 0.9962 | 0.9913 | 0.9866 | 0.9867 | 0.9780 | 0.9802 |
| $R_{SNP,R}(R_{A,R} = 0.25)$ | 35.6861 | 36.5179 | 35.8921 | 34.0122 | 39.0643 | 38.5121 |
| 对称攻击 | | | | | | |
| $S(R_{R,A} = 4)$ | 0.9779 | 0.9691 | 0.9586 | 0.9709 | 0.9436 | 0.9068 |
| $R_{SNP,L}(R_{R,A} = 4)$ | 44.3542 | 41.5271 | 44.6815 | 40.6843 | 46.3197 | 45.5554 |
| $S(R_{A,R} = 0.25)$ | 0.9779 | 0.9686 | 0.9631 | 0.9732 | 0.9390 | 0.9013 |
| $R_{SNP,L}(R_{A,R} = 0.25)$ | 37.3598 | 34.9359 | 37.7949 | 34.0291 | 39.1533 | 38.3804 |

3.3 立体图像零水印算法安全性测试和水印容量分析

算法是建立在超混沌离散系统的基础之上, 采用超混沌映射确定零水印索引位置, 其安全性依赖于超混沌离散系统的初始值及参数, 而算法可完全公开, 满足了 Kerckhoff 准则. 选取艺术立体图像进行测试, 图 7(a) 为采用 100 个互不相同初始值映射

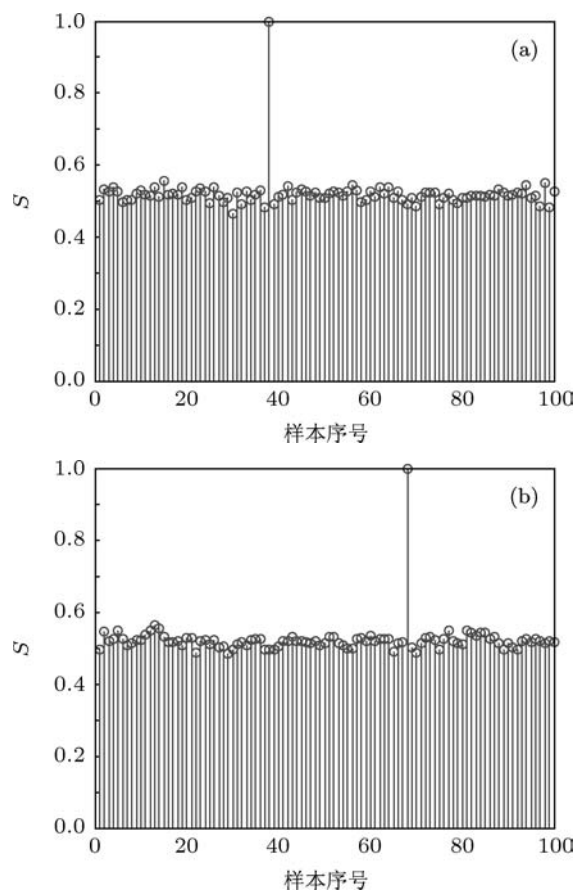


图 7 算法安全性能的测试结果 (a) 初始值对算法安全性能的影响; (b) 参数对算法安全性能的影响

得到的艺术图像零水印之间的相关性, 图 7(b) 为采用 100 个互不相同参数得到的艺术图像零水印之

间的相关性, 其中横坐标为样本序号, 纵坐标为相似度 S . 从图 7 可知: 与原始零水印具有不同初始值及不同参数密钥所构造的零水印和原始零水印的相似度为 0.5 左右; 只有与原始零水印具有相同初始值及相同参数密钥所提取的零水印和原始零水印的相似度为 1, 如图 7(a) 第 38 个样本和图 7(b) 第 68 个样本为与原始零水印具有相同初始值及参数密钥而得到的相似度.

从图 7 可知, 由于采用了超混沌系统对水印信息的位置进行索引, 不同的初始值及不同参数得到立体图像零水印的相似度均为 0.5 左右, 表明水印容量取决于超混沌系统的初始值及参数. 而超混沌系统的参数多 (密钥空间大), 也可以采用不同的初始值, 从而保证了水印的容量, 同时也保证了算法的安全性.

4 结论

本文利用了变换域中视差的稳定性和超混沌系统动力学行为的复杂性, 提出了一种不改变立体图像内容的零水印算法, 从而可对立体图像实施版权保护. 研究表明, 该算法具有以下特点: (1) 没有对原始载体立体图像做任何修改, 使立体图像具有良好的透明性; (2) 利用小波变换域低频子带的稳定性求取视差, 并进一步利用了离散余弦变换的直流系数稳定的特点, 从而增加了算法的鲁棒性; (3) 采用超混沌系统对零水印信息的位置进行了索引, 增强了算法的安全性; (4) 可采用不同的初始值及参数对零水印的信息进行索引, 极大地增加了零水印的容量; (5) 水印在检测的过程中无需原始立体图像, 实现了零水印的盲检. 实验结果表明, 该算法对各类对称和非对称攻击表现出了较强的鲁棒性.

- [1] Fan Y C, Chiou J C, Jiang Y H 2011 *IEEE Trans. Magn.* **47** 679
- [2] Shen L Q, Liu Z, Yan T, Zhang Z Y, An P 2011 *IEEE Trans. Circ. Syst. Video Techn.* **20** 925
- [3] Shao F, Jiang G Y, Wang X, Yu M, Chen K 2010 *IEEE Trans. Consume Electron.* **56** 2460
- [4] Fan Y C, Kung Y T, Lin B L 2011 *IEEE Trans. Magn.* **47** 683
- [5] Zhu Z J, Wang Y E, Jiang G Y, Liang F 2007 *J. Image Graph.* **12** 68 (in Chinese) [朱仲杰, 王玉儿, 蒋刚毅, 梁丰 2007 中国图象

图形学报 **12** 68]

- [6] Lin Y H, Wu J L 2011 *IEEE Trans. Broadcas.* **57** 602
- [7] Alattar A M, Digimarc C, Tualatin O 2004 *IEEE Trans. Image Proces.* **13** 1147
- [8] Zhang X P, Wang S Z, Qian Z X, Feng G R 2011 *IEEE Trans. Image Proces.* **20** 485
- [9] Zeng G R, Qiu Z D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5870 (in Chinese) [曾高荣, 裘正定 2010 物理学报 **59** 5870]

- [10] Wen Q, Sun T F, Wang S X 2003 *Acta Electron. Sin.* **31** 214 (in Chinese) [温泉, 孙铁锋, 王树勋 2003 电子学报 **31** 214]
- [11] Wu X Y, Guan Z H 2007 *Phys. Lett. A* **365** 403
- [12] Mooney A, Keating J G 2009 *Chaos Solitons Fract.* **42** 560
- [13] Song W, Hou J J, Li Z H, Huang L 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4449 (in Chinese) [宋伟, 侯建军, 李赵红, 黄亮 2009 物理学报 **58** 4449]
- [14] Hu Y F, Zhu S A 2008 *J. Zhejiang Univ. (Eng. Sci.)* **42** 593 (in Chinese) [胡裕峰, 朱善安 2008 浙江大学学报 (工学版) **42** 593]
- [15] He H J, Zhang J S 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3092 (in Chinese) [和红杰, 张家树 2007 物理学报 **56** 3092]
- [16] Zou L J, Wang B, Feng J C 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2750 (in Chinese) [邹露娟, 汪波, 冯久超 2008 物理学报 **57** 2750]
- [17] Xu T, Zhang Y N, Sun J Q, Zheng J B, Ling Z G 2009 *J. Image Graph.* **14** 1819 (in Chinese) [徐涛, 张艳宁, 孙瑾秋, 郑江滨, 林增刚 2009 中国图象图形学报 **14** 1819]
- [18] Jin J X, Qiu S S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 792 (in Chinese) [晋建秀, 邱水生 2010 物理学报 **59** 792]
- [19] Zhang C X, Yu S M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3017 (in Chinese) [张朝霞, 禹思敏 2010 物理学报 **59** 3017]
- [20] Sun K H, He S B, Sheng L Y 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020505 (in Chinese) [孙克辉, 贺少波, 盛利元 2011 物理学报 **60** 020505]

A zero-watermarking algorithm of stereoscopic image based on hyperchaotic system*

Zhou Wu-Jie¹⁾²⁾ Yu Mei^{2)†} Yu Si-Min³⁾ Jiang Gang-Yi²⁾ Ge Ding-Fei¹⁾

1) (School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China)

2) (Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

3) (College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

(Received 16 June 2011; revised manuscript received 31 October 2011)

Abstract

In order to protect the copyright of stereoscopic images in the condition of the image quality, a zero-watermarking stereoscopic image algorithm is presented based on hyperchaotic system. In the proposed algorithm, disparity zero-watermark is constructed according to the stability of disparity between low frequency bands of wavelet decomposition of the left and the right views and direct coefficients of discrete cosine transform; in the process of zero-watermark construction, the zero-watermark position mapping according to the features of the sensitivity of hyperchaotic discrete system initial value, ampleness of parameter key space and complexity of dynamic behavior, enhances the security of algorithm. The relationship between security and watermark capacity is also analyzed. Experimental results show that the proposed algorithm is strong robust to noise, filtering, compression, and the shearing of asymmetrical and symmetrical attacks.

Keywords: stereoscopic image, disparity zero-watermarking, hyperchaotic system, robustness

PACS: 07.05.Pj, 05.45.Gg

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60872094, 60832003, 61071120), the Specialized Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 200816460003), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant No. Y1100219), the Scientific Research Foundation for the Graduate Students of Zhejiang Province, China (Grant No. YK2009044), and the Outstanding Dissertation Cultivation Foundation of Ningbo University, China (Grant No. PY20110002).

† E-mail: yumei2@126.com