

基于果蝇优化算法的小波域数字水印算法

肖振久^{1,2}, 孙健^{1*}, 王永滨², 姜正涛²

(1. 辽宁工程技术大学 软件学院, 辽宁 葫芦岛 125105; 2. 中国传媒大学 计算机学院, 北京 100024)

(* 通信作者电子邮箱 sunjian1990sj@163.com)

摘要: 为了平衡水印的透明性和鲁棒性, 提出了基于果蝇优化算法 (FOA) 的小波域数字水印算法。该算法利用果蝇优化算法将离散小波变换 (DWT) 应用到水印技术中, 通过群体智能算法解决水印的透明性和鲁棒性之间的矛盾。为了保护数字图像的版权信息, 将所选择的原始图像通过二维离散小波变换分解, 然后将经过 Arnold 变换后的水印图像较好地嵌入到小波的垂直子带系数中, 这样可以保证图像的质量。在优化过程中, 缩放因子是通过 FOA 不断地被训练和更新的。此外, 还提出一个新的算法框架, 通过 DWT 域预测可行性来评估参数。实验结果表明, 所提算法具有较高的透明性和鲁棒性, 水印相似度在 0.95 以上, 与现有的一些基于群智能算法的水印方法相比, 在对抗旋转和剪切等几何攻击提高了 10%。

关键词: 果蝇优化算法; 离散小波变换; 缩放因子; Arnold 变换; 透明性; 鲁棒性

中图分类号: TP309.2 **文献标志码:** A

Wavelet domain digital watermarking method based on fruit fly optimization algorithm

XIAO Zhenjiu^{1,2}, SUN Jian^{1*}, WANG Yongbin², JIANG Zhengtao²

(1. College of software, Liaoning Technical University, Liaoning Huludao 125105, China;

2. School of Computer, Communication University of China, Beijing 100024, China)

Abstract: For balancing transparency and robustness of watermark, this paper proposed wavelet-domain digital watermarking method based on Fruit Fly Optimization Algorithm (FOA). The algorithm used Discrete Wavelet Transform (DWT) by FOA to watermarking technology and solved the contradiction between transparency and robustness in the watermark by swarm intelligence algorithm. In order to protect the copyright information of digital image, the selected original image was decomposed through a two-dimensional discrete wavelet transform, and watermark image through Arnold transformation was better embedded into wavelet coefficients of vertical sub-band, which guaranteed image quality. In the optimization process, the scaling factor was continuously being trained and updated by FOA. In addition, a new algorithm framework was proposed, which evaluated the scaling factor by prediction feasibility of DWT domain. The experimental results show that, the proposed algorithm has higher transparency and robustness against attacks, with watermarking similarity above 0.95, and 10% higher under geometric attacks such as rotation and shearing compared to some existing watermarking methods based on swarm intelligence.

Key words: Fruit Fly Optimization Algorithm (FOA); Discrete Wavelet Transform (DWT); scaling factor; Arnold transformation; transparency; robustness

0 引言

近年来, 数字水印作为一种新兴的数字作品版权保护技术受到国内外研究人员的关注。目前, 图像数字水印主要通过空域或者变换域^[1]来嵌入水印信息。嵌入水印的好坏程度主要看水印的鲁棒性和透明性, 这两者之间是相互矛盾的。鲁棒性指含有水印的载体图像经过各种有意或无意的攻击后, 依然能够正确提取或鉴别水印; 透明性指水印的加入不会引起载体图像的明显降质。而变换域水印技术具有良好的鲁棒性和透明性, 赢得了广大科研学者们的青睐。针对传统地变换域水印技术鲁棒性较差的问题, 文献[2]提出了基于离散余弦变换 (Discrete Cosine Transform, DCT) 和奇异值分解

(Singular Value Decomposition, SVD) 变换的盲数字水印算法, 但是该算法不能够有效地抵抗 JPEG 压缩攻击, 水印的容量相对也比较低; 文献[3]提出一种基于数字全息和奇异值分解的鲁棒性数字水印方案, 对 JPEG 压缩攻击以及噪声攻击有较好鲁棒性, 但抗剪切攻击能力很弱; 文献[4]引入自嵌入技术提出一种离散小波变换 (Discrete Wavelet Transform, DWT)-SVD 域全盲鲁棒量化水印算法, 在抵抗噪声、滤波、剪切、JPEG 压缩和混合攻击方面都表现出一定的鲁棒性, 但是提高效果不显著; Ali 等^[5-6]提出了利用布谷鸟搜索算法找到最佳的缩放因子来提高水印的鲁棒性, 该方法借鉴布谷鸟搜索算法确定较优的水印嵌入系数能够较好地提高水印的鲁棒性, 并且能均衡地抵抗各种常见的攻击。

收稿日期: 2015-04-07; **修回日期:** 2015-05-17。 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (61103199); 国家 863 计划项目 (2011AA01A107-0), 教育部-中国移动科研基金资助项目 (MCM20130411)。

作者简介: 肖振久 (1968-), 男, 内蒙古赤峰人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向: 网络与信息安全、数字版权管理; 孙健 (1990-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 主要研究方向: 网络信息安全、数字水印; 王永滨 (1963-), 男, 北京人, 教授, 博士, 主要研究方向: 形式化建模与仿真、分布式计算; 姜正涛 (1976-), 男, 北京人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 密码学与信息安全。

果蝇优化算法(Fruit Fly Optimization Algorithm, FOA)^[7]是一类新的全局优化算法。该算法源于对果蝇觅食行为的模拟,具有实现简单、全局寻优能力更强等特点。

本文借鉴果蝇优化算法的特点,从水印的透明性和鲁棒性两个方面出发,设计相应的嵌入水印的适应度,提出了一种基于果蝇优化算法的小波域数字水印算法。该算法主要利用果蝇算法择优选择水印的缩放因子,然后通过 DWT 域预测可行性评估这个参数,进而可以有效地平衡水印鲁棒性与透明性的矛盾。

1 果蝇优化算法

果蝇算法的原理是:果蝇本身在感官知觉上优于其他物种,尤其是在嗅觉与视觉上。果蝇的嗅觉器官能很好地搜集飘浮在空气中的各种气味,然后飞近食物位置后亦可使用敏锐的视觉发现食物与同伴聚集的位置,并且往该方向飞去。

依据果蝇搜寻食物的特性,将果蝇优化算法主要归纳为以下几个步骤^[8]:

1) 令种群规模 $Sizepop$, 最大迭代次数 $Maxgen$, 随机初始花果蝇群体位置 (X_axis, Y_axis) 。

2) 赋予果蝇个体利用嗅觉搜寻食物的随机方向与距离, $Random$ 为搜寻距离:

$$\begin{cases} X_i = X_axis + Random \\ Y_i = Y_axis + Random \end{cases} \quad (1)$$

3) 由于无法得知食物位置,因此先估计与原点的距离 D , 再计算味道浓度判定值 S , 此值为距离之倒数:

$$S_i = 1/D_i; D_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \quad (2)$$

4) 将味道浓度判定值 S_i 代入味道浓度判定函数(或称为适应度函数 fitness function), 用来求出果蝇个体位置的味道浓度 $Smell_i$:

$$Smell_i = function(S_i) \quad (3)$$

5) 找出该果蝇群体中味道浓度最低的果蝇(最优个体): $[bestsmell, bestindex] = \min(Smell_i)$ (4)

6) 记录并保留最佳味道浓度值 $bestSmell$ 与其 X 、 Y 坐标, 此时果蝇群体利用视觉向该位置飞去:

$$\begin{cases} Smellbest = bestSmell \\ X_axis = X(bestindex) \\ Y_axis = Y(bestindex) \end{cases} \quad (5)$$

7) 进行迭代寻优, 重复执行步骤 2) ~ 5), 并判断味道浓度是否优于前一迭代味道浓度, 若是则执行步骤 6)。

2 基于果蝇优化算法的数字水印方法

目前,许多学者将解决水印问题作为一个优化问题。在数字水印中,适应度函数应该由影响水印方案的各种因素(如鲁棒性、透明性和容量等)来确定。在水印技术中,缩放因子的好坏影响着水印的透明性和鲁棒性:使用较小的缩放因子有利于水印的透明性,但水印图像不能很好地抵抗几种常见的攻击;反之,较大的缩放因子有利于水印的鲁棒性,但影响透明性。在现有的数字水印中,缩放因子一般都是定义为常量,这样不能很好地适用于每一组图像,因此,缩放因子的选择成为了一个需要解决的难题。针对这个问题,本文应用果蝇优化算法的全局优化的特点自动确定对于每组图像的

较优缩放因子(具体流程如图 1)。图 1 中, PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) 为峰值信噪比, NC (Normalized Correlation) 为归一化相关系数。

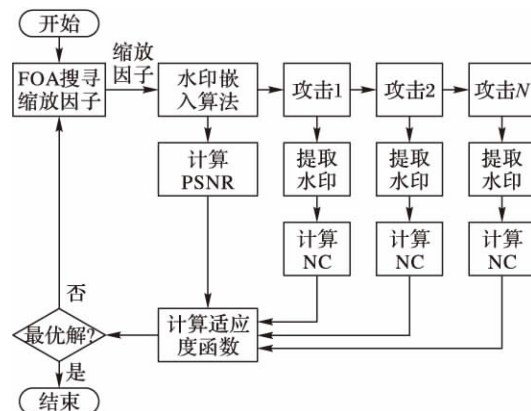


图 1 果蝇优化算法搜寻较优缩放因子流程

2.1 适应度函数

适应度函数是用来评价在每种情况下每个候选解决方案的适当性,对于该算法中适应度函数的选择,本文同时考虑水印的透明性和鲁棒性。为了评价水印的透明性和鲁棒性,本文用图像通用性质量指标(Universal Quality Indicator, UQI)和相关性系数 NC 作为评估目标函数性能指标。具体适应度函数如下:

$$\text{Minimize } f = UQI \times \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N NC_i \quad (6)$$

其中:通用性质量指标 UQI 是指计算原始图像与嵌入水印图像之间的数值。 NC_i 为受到第 i 次攻击时提出到水印的相关系数,公式如下:

$$UQI = \frac{4\sigma_{xy} \overline{xy}}{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) [\bar{x}^2 + \bar{y}^2]} \quad (7)$$

其中: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$, $\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$, $\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$ 和 $\sigma_{xy}^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ 。

2.2 水印的嵌入

本节主要是水印的嵌入过程。选取 $N \times N$ 大小的灰度图片 I 为载体图像和 $K \times K$ 大小的二值图像 W 为水印图像,对原始图像进行三级离散小波变换,可以得到子带 $HL_i, LH_i, HH_i (i = 1, 2, 3)$ 和子带 LL_3 。为了增强视觉质量并且较好地保持鲁棒性,该算法建议将二值水印图像嵌入到子图 HL_3 中,具体的步骤如下:

1) 对图像 I 进行三级离散小波变换(DWT)^[9],得到子带 HL_3 。将子带 HL_3 被分成不重叠的大小为 2×2 的块 $M_k (k = 1, 2, \dots, K \times K)$ 。

2) 对水印图像 W 进行 Arnold 变换进行置乱加密处理。

3) 在子带 HL_3 中,嵌入水印信息到每个块 M_k 的各个位中。在每个块中,计算 $\max\{HL_3(i, j), HL_3(i+1, j), HL_3(i, j+1), HL_3(i+1, j+1)\}$, $\min\{HL_3(i, j), HL_3(i+1, j), HL_3(i, j+1), HL_3(i+1, j+1)\}$, 加入水印信息的子带系数由下面方程决定。

$$HL_3'(i, j) = \begin{cases} \max\{HL_3(i, j), HL(i+1, j), HL(i, j+1), \\ HL_3(i+1, j+1)\} + S^* w', & w' = 1 \\ \min\{HL_3(i, j), HL(i+1, j), HL(i, j+1), \\ HL_3(i+1, j+1)\} + S^* w', & w' = -1 \end{cases} \quad (8)$$

4) 对嵌入水印信息的原始图像进行三级离散逆小波变换, 得到嵌入水印后的图像 I' 。

2.3 水印的提取

1) 对嵌入水印后的图像进行三级离散小波变换, 得到一系列的高频子带和一个高能子带。

2) 把子图 HL_3 分量分解成非重叠的大小为 2×2 的块 $M_k (k = 1, 2, \dots, K \times K)$, 在每个块中, 计算

$$\begin{cases} x = \max\{HL_3'(i, j), HL'(i+1, j), HL'(i, j+1), \\ HL_3'(i+1, j+1)\} \\ y = \min\{HL_3'(i, j), HL'(i+1, j), HL'(i, j+1), \\ HL_3'(i+1, j+1)\} \end{cases} \quad (9)$$

然后有:

$$Average(i, j) = 0.5 * (x + y) \quad (10)$$

$$w^* = \begin{cases} 1, & Average(i, j) \leq HL_3'(i, j) \\ 0, & Average(i, j) > HL_3'(i, j) \end{cases} \quad (11)$$

3) 对提取到的水印信息 W^* 进行逆 Arnold 变换解密, 即可以得到水印图像 W' 。

3 实验结果与分析

为检验本文方法的有效性, 从国际通用的数字水印标准测试图像库中选择 512×512 的灰度图像 Lena、peppers 和 baboon 作为原始载体图像, 水印是大小为 64×64 的二值图像, 如图 2 所示。实验环境为 Matlab 2012b。

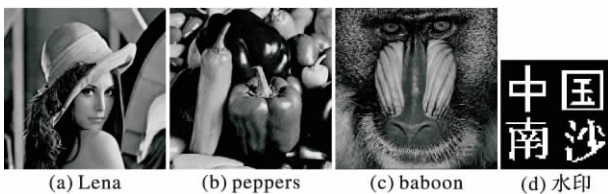


图 2 原始载体图像和水印

实验结果分析如下。

1) 鲁棒性分析。

在本实验果蝇优化算法中, 种群规模设定为 20, 迭代次数为 100 次, 用于水印加密操作的 Arnold 变换的置乱次数设定为 30 次。对含水印的载体图像进行几种常见的攻击以及混合攻击如表 1 所示。而嵌入水印后图像通用性质量指标 UQI 如图 3 所示。



图 3 嵌入水印后图像以及相关的 UQI 值

表 1 为使用多个不同测试图像作为原始载体图像的实验结果。可以看到各组图像在受到攻击时相关系数 NC 都在

0.95 以上, 很好地保证了水印的鲁棒性, 同时 UQI 也能够保证在 0.97 以上使得水印具有良好的透明性。同时, 在本算法中果蝇优化算法的平均迭代次数为 36 次^[10]。

表 1 本算法的实验结果(提取水印信息和 NC 值)

攻击类型	图 3(a)		图 3(b)		图 3(c)	
	水印	NC 值	水印	NC 值	水印	NC 值
未受到攻击		1.0000		1.0000		1.0000
JPEG 压缩, 质量因子为 70		0.9976		0.9988		0.9993
高斯噪声, 均值为 0, 方差为 0.001		0.9819		0.9812		0.9833
椒盐噪声, 噪声密度为 0.01		0.9871		0.9897		0.9901
中值滤波, 模板大小为 3×3		0.9912		0.9965		0.9933
旋转攻击, 向左旋转 10°		0.9704		0.9667		0.9634
剪切攻击, 左上角 $1/4$		0.9985		0.9964		0.9960
JPEG30 + 高斯噪声 方差为 0.001		0.9592		0.9568		0.9623
JPEG30 + 中值滤波 模板大小为 3×3		0.9832		0.9801		0.9885

2) 对比实验分析。

为了更好地检测本文方法的性能, 选择图 2(a) 为载体图像和图 2(d) 为水印, 与文献 [11] 以及经典算法文献 [12] 进行一组对比参照。在文献 [11] 中, 令最大种群数量为 200, 种群大小为 20; 文献 [12] 中, 令最大进化代数 350 次, 种群大小为 80。表 2 为文献 [11] 和文献 [12] 的实验结果。

表 2 文献 [11]、文献 [12] 和本文方法的实验结果

攻击类型代号	攻击类型描述	相关性系数 NC 值		
		文献 [11]	文献 [12]	本文算法
x1	JPEG 压缩, 质量因子为 70	0.9793	0.8536	0.9976
x2	高斯噪声, 均值为 0, 方差为 0.001	0.8748	0.7851	0.9819
x3	椒盐噪声, 噪声密度为 0.01	0.8992	0.8014	0.9871
x4	中值滤波, 模板大小为 3×3	0.8662	0.7443	0.9912
x5	旋转攻击, 向左旋转 10°	0.7830	0.8105	0.9704
x6	剪切攻击, 左上角 $1/4$	0.8106	0.8040	0.9985
x7	JPEG30 + 高斯噪声 方差为 0.001	0.8702	0.7798	0.9592
x8	JPEG30 + 中值滤波 模板大小为 3×3	0.8865	0.7956	0.9832
UQI		0.9603	0.9551	0.9823

图 4 为本文算法与文献 [11] 和文献 [12] 分别在某些攻击下提取的水印与原始水印的相关系数曲线对比, 其中, 用 x1 ~ x8 表示上述的攻击类型。

由于本文在选取缩放因子时采用了迭代算法优化选取,

参数的评估上采用了DWT域预测参数可行性,同时在给出较好的适应度函数筛选缩放因子,更好地提高了鲁棒性。从表2就可以看出本文算法明显优于文献[11]和文献[12],特别是在旋转和剪切等几何攻击上,效果更加突出,NC值提高了大约12%。文献[12]的平均NC值只有0.79以上,文献[11]的平均NC也才到0.87,而本文算法的平均NC值达到了0.98以上,比文献[11]和文献[12]平均NC值提高了10%以上。因此可见,本文算法整体上优于文献[11]和[12]。同时,本文的UQI值也比上述方法提高了1到2个百分点,透明性也好于它们。

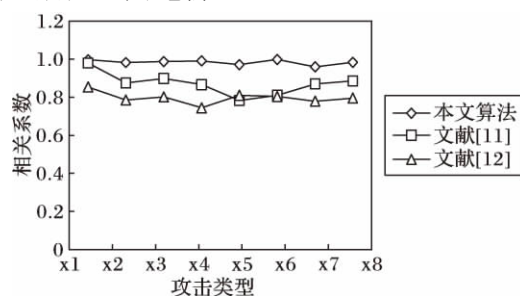


图4 相关系数曲线对比

4 结语

本文将果蝇优化算法引入到数字水印技术中,同时结合DWT域预测可行性来评估参数,这样既利用果蝇优化算法全局寻优的特点,又可以有效地结合离散小波变换,搜寻并确定嵌入水印的较优缩放因子,有效地提高了水印的鲁棒性和透明性。实验结果证明,嵌入的水印可以以更高的精度被提取出来,水印相似度检测均在95%以上,具有较强的鲁棒性,特别是针对旋转和剪切等几何攻击时;同时,嵌入水印的图像很难被人类视觉所观察,UQI在0.98左右,具有良好的透明性。此外,水印在嵌入前经过预处理加密,有效地保障了水印的安全性。

参考文献:

- [1] ZHANG T, MU D J, REN S. Information Hiding (IH) algorithm based on Gaussian pyramid and GHM (Geronimo Hardin Massopust) multi-wavelet transformation [J]. International Journal of Digital Content Technology and its Applications, 2011, 5(3): 210–218.
- [2] WANG Y, SHEN X, LYU Y, et al. Blind digital watermarking algorithm based on DCT and SVD transform [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(21): 157–161. (王友卫, 申铨京, 吕颖达, 等. 基于DCT和SVD变换的盲数字水印算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(21): 157–161.)
- [3] WANG Z, MAO L, HU H. Robust digital watermarking scheme based on digital holography and singular value decomposition [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(8): 1789–1793. (王祖喜, 毛刘刚, 胡汉平. 基于数字全息和奇异值分解的鲁棒性数字水印方案[J]. 小型微计算机系统, 2014, 35(8): 1789–1793.)
- [4] YE T. Perfectly blind self-embedding robust quantization-based watermarking scheme in DWT-SVD domain [J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(6): 15–18. (叶天语. DWT-SVD域全盲自嵌入鲁棒量化水印算法[J]. 中国图象图形学报, 2012, 17(6): 15–18.)
- [5] ALI M, CHANG W A. An optimal image watermarking approach through cuckoo search algorithm in wavelet domain [EB/OL]. [2015-01-02]. <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13198-014-0288-4.pdf>.
- [6] ALI M, CHANG W A, PANT M. Cuckoo search algorithm for the selection of optimal scaling factors in image watermarking [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Soft Computing for Problem Solving, Advances in Intelligent Systems and Computing. Berlin: Springer, 2014: 413–425.
- [7] PAN W T. A new fruit fly optimization algorithm: taking the financial distress model as an example [J]. Knowledge-based Systems, 2012, 26(7): 69–74.
- [8] HAN J, LIU C. Fruit fly optimization algorithm with adaptive mutation [J]. Application Research of Computers, 2013, 30(9): 2641–2644. (韩俊英, 刘成忠. 自适应变异的果蝇优化算法[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9): 2641–2644.)
- [9] QIANG Y, WANG Y. A survey of wavelet domain based digital image watermarking algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(11): 46–49. (强英, 王颖. 基于小波域的数字图像水印算法综述[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(11): 46–49.)
- [10] NING J, WANG B, LI H, et al. Research on and application of diminishing step fruit fly optimization algorithm [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2014, 31(4): 367–373. (宁剑平, 王冰, 李洪儒, 等. 递减步长果蝇优化算法及应用[J]. 深圳大学学报理工版, 2014, 31(4): 367–373.)
- [11] TAO H, ZAIN J M, AHMED M M, et al. A wavelet-based particle swarm optimization algorithm for digital image watermarking [J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2012, 19(10): 81–91.
- [12] KUMSAWAT P, ATTAKITMONGCOL K, SRIKAEW A. A new approach for optimization in image watermarking by using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(12): 4707–4719.
- [13] XING G, YU S. Vector quantization watermarking based on improved ant colony algorithm [J]. Journal of Computer Applications, 2007, 27(12): 2934–2936. (邢桂华, 于盛林. 基于蚁群算法的矢量量化水印[J]. 计算机应用, 2007, 27(12): 2934–2936.)
- [14] LI J. An optimized watermarking scheme using an encrypted gyrator transform computer generated hologram based on particle swarm optimization [J]. Optics Express, 2014, 22(8): 10002–10016.
- [15] ZENG Q, MA M, ZHOU T, et al. Cuckoo search based watermarking method in wavelet domain [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2014, 35(5): 1155–1159. (曾晴, 马苗, 周涛, 等. 基于布谷鸟搜索算法的小波域数字水印方法[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 35(5): 1155–1159.)
- [16] SHAN S, YANG T, LI F. Multi-wavelet image watermarking algorithm based on genetic algorithms [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(7): 1625–1628. (单树民, 阳婷婷, 李峰. 基于遗传算法的多小波数字图像水印算法[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(7): 1625–1628.)
- [17] PAN W. Fruit fly optimization algorithm [M]. Taipei: Tsang Hai Book Publishing, 2011. (潘文超. 果蝇最佳化演算法[M]. 台北: 沧海书局, 2011.)
- [18] PAPAKOSTAS G A, TSOUGENIS E D, KOULOURIOTIS D E. Moment-based local image watermarking via genetic optimization [J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 227(11): 222–236.