



改进萤火虫优化算法的Renyi熵油污图像分割

贾鹤鸣, 彭晓旭, 邢致恺, 李金夺, 康立飞

引用本文:

贾鹤鸣, 彭晓旭, 邢致恺, 等. 改进萤火虫优化算法的Renyi熵油污图像分割[J]. 智能系统学报, 2020, 15(2): 367–373.

JIA Heming, PENG Xiaoxu, XING Zhikai, et al. Renyi entropy based on improved firefly optimization algorithm for image segmentation of waste oil[J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2020, 15(2): 367–373.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201809002>

您可能感兴趣的其他文章

一种快速鲁棒核空间图形模糊聚类分割算法

A fast and robust clustering segmentation algorithm for kernel space graphics

智能系统学报. 2019, 14(4): 804–811 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201806045>

直线截距直方图城区遥感图像多阈值分割

Multi-level thresholding for remote sensing image of urban area based on line intercept histogram

智能系统学报. 2018, 13(2): 227–235 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201609012>

利用混沌布谷鸟优化的二维Renyi灰度熵图像阈值选取

Two-dimensional Renyi-gray-entropy image threshold selection based on chaotic cuckoo search optimization

智能系统学报. 2018, 13(1): 152–158 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201607004>

一种精英反向学习的萤火虫优化算法

Firefly optimization algorithm utilizing elite opposition-based learning

智能系统学报. 2017, 12(5): 710–716 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201706014>

萤火虫算法的电动汽车综合成本运行优化研究

Optimizing the composite cost of electric vehicles based on the firefly optimization model

智能系统学报. 2017, 12(2): 166–171 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.200603024>

知识迁移的极大熵聚类算法及其在纹理图像分割中的应用

A maximum entropy clustering algorithm based on knowledge transfer and its application to texture image segmentation

智能系统学报. 2017, 12(2): 179–187 <https://dx.doi.org/10.11992/tis.201603005>

微信公众平台



关注微信公众号, 获取更多资讯信息

DOI: 10.11992/tis.201809002

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20190513.1714.004.html>

改进萤火虫优化算法的 Renyi 熵污油图像分割

贾鹤鸣¹, 彭晓旭¹, 邢致恺^{1,2}, 李金夺¹, 康立飞¹

(1. 东北林业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 大庆油田有限责任公司采油二厂, 黑龙江 大庆 163000)

摘 要: 针对传统 Renyi 熵方法在分割污油图像时存在图片差距大、无法根据不同图片进行最优分割的问题, 提出改进萤火虫算法对二维 Renyi 熵分割算法中的 α 值进行寻优来解决上述问题。分析了采集的污油图片特点以及对污油图片进行分割的必要性; 针对多目标寻优精度不高和后期收敛速度较慢的问题, 对萤火虫算法进行了改进, 并对初始萤火虫位置进行混沌优化处理, 使结果达到全局最优; 利用基于改进萤火虫算法的 Renyi 熵图像分割算法对采集的污油图片进行阈值分割实验, 并与二维 Renyi 熵分割、粒子群算法 (PSO) Renyi 熵分割方法进行比较。实验结果表明: 本文提出的算法可以有效地对污油区域进行分割, 能够快速地完成复杂图像的精确处理。

关键词: 污油图像处理; 阈值分割; 萤火虫算法; 二维 Renyi 熵; 混沌优化; 多目标寻优; 适应度学习; 全局优化
中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2020)02-0367-07

中文引用格式: 贾鹤鸣, 彭晓旭, 邢致恺, 等. 改进萤火虫优化算法的 Renyi 熵污油图像分割 [J]. 智能系统学报, 2020, 15(2): 367-373.

英文引用格式: JIA Heming, PENG Xiaoxu, XING Zhikai, et al. Renyi entropy based on improved firefly optimization algorithm for image segmentation of waste oil [J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2020, 15(2): 367-373.

Renyi entropy based on improved firefly optimization algorithm for image segmentation of waste oil

JIA Heming¹, PENG Xiaoxu¹, XING Zhikai^{1,2}, LI Jinduo¹, KANG Lifei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Daqing Oil Field Co. Oil Production Plant Two, Daqing 163000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional Renyi entropy method has large image gaps and cannot be optimized according to different images when dividing dirty oil images, an improved firefly algorithm is proposed to solve the above problem by optimizing the alpha value of two-dimensional Renyi entropy segmentation algorithm. First, we analyze the characteristics of an acquired oil image and the necessity of segmenting a dirty oil picture; second, aiming at the problems of low optimization precision and slow convergence speed in the later stage, the firefly algorithm is improved to make the initial position of the firefly chaos optimization processing results reach the global optimum, and then Renyi entropy image segmentation algorithm based on the improvement of the firefly algorithm is applied to the experiments of threshold value segmentation of the waste oil image. Finally, the algorithm proposed in this paper is used to collect oil image segmentation in experiments, and the results are compared with the 2D Renyi entropy segmentation and the particle swarm optimization (PSO) Renyi entropy segmentation method. The experimental results illustrate that the proposed algorithm can effectively segment the waste oil area and quickly achieve accurate processing of complex images.

Keywords: image processing of waste oil; threshold segmentation; firefly algorithm; two-dimensional Renyi entropy; chaos optimization; multi-objective optimization; fitness learning; global optimization

收稿日期: 2018-09-01. 网络出版日期: 2019-05-14.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2572019BF04);
国家自然科学基金项目 (31470714, 51609048); 黑龙江
省研究生教育创新工程项目 (JGXM_HLJ_2016014).

通信作者: 贾鹤鸣. E-mail: jiaheminglucky99@126.com.

油田运输管线属于油田的生命线, 地下管线错综复杂, 容易存在渗漏等情况对环境造成污染。近年来许多学者对管线油污泄漏问题进行了相关研究, 王翔宇^[1]提出长距管线无人机总体设

计方案,详细论述了无人机巡线高效、灵活、不受地形限制等优势,能够有效解决人为盗油案件。张彪等^[2]提出基于物联网技术的油田管线智能巡检系统,此系统论述了物联网技术在油田管线中使用智能巡检,并且阐述了油田管线巡检的必要性以及应用价值。目前管线巡检应用无人机、物联网等技术能够提高管线巡检效率,但是对油污区域的识别精度不高,无法真正地实现自动识别油污^[3]。从上面的分析中不难看出利用无人机平台对地面管线进行巡检是监测石油泄漏和污染的有效手段,但无人机在每执行一次巡检任务时会随机采集几千张图像,由人工进行筛选油污区域会增加人工成本以及搜索时间,所以对无人机采集的图片进行自动阈值分割就显得十分重要和迫切,这项工作能够使油污区域更直观地显现出来,及时发现油污区域,处理油污渗漏情况,保护环境。

二维 Renyi 熵分割方法无法根据图像的改变进行变量调整,导致对部分图像进行分割时未能达到最优分割效果,并且计算时间长。针对上述问题,许多学者利用智能优化算法对二维熵中的变量进行全局寻优,本文则通过改进的萤火虫寻优实现对复杂图像的分割。马英辉等^[4]利用混沌布谷鸟算法优化二维 Renyi 灰度熵的阈值选取,从而降低 Renyi 熵算法的算法复杂度。陈超等^[5]利用狼群算法对二维最大熵进行优化,可以快速准确地对图像中感性目标进行分割。2008年, Yang xin-she^[6]提出了一种多模式的萤火虫优化算法,通过在预期的优化空间中使用点来模拟自然界中的萤火虫个体。萤火虫具有趋光性,模仿此特性,使算法具备全局搜索能力。算法本身的改进主要针对萤火虫的位移、亮度参数和运动策略。对于萤火虫算法,算法的收敛速度和最终得到的最优解的精度直接由萤火虫的飞行步长决定。因此,许多学者对萤火虫步长的更新进行了相关的改进研究。刘家昆等^[7]提出了具有最大和最小荧光值的萤火虫算法,限制荧光素变化的范围,以避免算法后期收敛速度和局部最小值等问题。Coelho L D S 等^[8]在萤火虫算法中应用了混沌思想,将混沌序列映射到参数 a 和 r ,便于产生局部最优解。通过以上分析,萤火虫算法具有鲁棒性强、整体结构简单、易于实现、全局寻优能力强等优点^[9-11],为解决油污图像分割问题提供有效可行的寻优策略。

鉴于萤火虫算法的快速全局搜索能力和二

维 Renyi 熵阈值分割方法的较好分割效果,本文采用萤火虫算法对二维 Renyi 熵函数中的变量进行优化。并利用混沌非周期性、遍历性、随机性的特点优化初始值,用 Kent 混沌初始化二维 Renyi 熵中变量,使得变量能够更加接近真实状态。在混沌中细搜索优秀的萤火虫,随机再生相对较差的萤火虫,因此在一定程度上保持了多样性,更好地寻找最优解,即油污图像的分割阈值,快速、高效及精准地对油污图像进行分割,获得清晰的油污区域,从而更好地解决管线渗漏等工程问题。

1 改进的萤火虫优化算法

1.1 萤火虫算法

萤火虫算法利用萤火虫的向光的特性,通过寻找具有最大亮度的萤火虫^[12]来求解问题的目标函数。通过迭代和位置更新,找到亮度最强的萤火虫个体,从而进行全局优化。

1) 萤火虫相对亮度为

$$I = I_0 \times e^{-\gamma r_{ij}}$$

式中: I_0 为最大的荧光亮度; γ 为吸光能力系数; r_{ij} 为两个萤火虫之间的空间距离。

2) 萤火虫的吸引度为

$$\beta = \beta_0 \times e^{-\gamma r_{ij}}$$

式中 β_0 为萤火虫间的最大的相互吸引的强度。

3) 萤火虫 i 向萤火虫 j 移动的位置更新公式为

$$x_i = x_j + \beta(x_i - x_j) + \alpha_1 \times (\text{rand} - 0.5)$$

式中: x_i, x_j 为萤火虫位置; α_1 为步长因子; rand 为 [0, 1] 上服从均匀分布的随机因子; $\alpha_1 \times (\text{rand} - 0.5)$ 为扰动项,避免算法过早进入最优。

1.2 混沌优化策略

本文采用 Kent 混沌映射^[13],该映射在区间 (0, 1) 服从均匀分布,具有更加均匀的搜索效果,其数学表达式为

$$x_{n+1} = \begin{cases} \frac{x_n}{\beta}, & 0 < x_n < \beta \\ \frac{(1-x_n)}{(1-\beta)}, & \beta < x_n < 1 \end{cases} \quad (1)$$

其中,控制参数 $\beta \in (0, 1)$, Kent 映射的 Lyapunov 指数大于 0,映射在区间 (0, 1) 中分布较为均匀,有很好的遍历性。由于受到计算机有限字长和有限精度的影响,参数 $\beta = 0.4$,并且数值计算采用浮点双精度。

在混沌空间 (0, 1) 中映射出优化值,代入式 (1) 得到混沌序列,然后根据比例变换将混沌序列恢复到解空间,求得适应度函数的值,并将最优

值更新原始值。利用式(2)采用动态收缩搜索区域能够有效地加强搜索的速度。

$$\begin{cases} x_{\min,j} = \max\{x_{\min,j}, x_{g,j} - \rho(x_{\max,j} - x_{\min,j})\} \\ x_{\max,j} = \min\{x_{\max,j}, x_{g,j} + \rho(x_{\max,j} - x_{\min,j})\} \end{cases} \quad (2)$$

在此设定第 j 维变量的搜索范围为 $[x_{\min,j}, x_{\max,j}]$, 当前的最优值为 $x_{g,j}$, 搜索因子为 ρ 。

1.3 基于改进萤火虫的 α 选取算法

一般实验中二维 Renyi 熵的参数 α 取值 0.7α , 不适用于一些复杂图像, 使得参数熵失去原本具有的优势。本文提出对 α 使用仿生智能搜索算法在其限定空间寻找最优值, 将均匀性测度函数 U_l 作为目标函数对参数 α 进行评测, 自动获得最佳参数 α 和阈值 t 。

均匀性测度是通过计算分割结果图像的特征参数来评测分割效果, 不需要理想图。设在阈值 t 处进行图像分割, 其均匀性测度可按如式(3)~(5)进行计算:

$$\bar{f}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i \in R_k} f_i \quad (3)$$

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{N_k} \sum_{i \in R_k} (f_i - \bar{f}_k)^2 \quad (4)$$

$$U_l = 1 - \frac{2}{N} \sum_{R_k \in l} \frac{\sum_{i \in R_k} (f_i - \frac{1}{N_k} \sum_{i \in R_k} f_i)^2}{(\max_{i \in R_k} f_i - \min_{i \in R_k} f_i)^2} \quad (5)$$

式中: N_k 为区域 R_k 的像素总和, i 为 R_k 中的像素, f_i 为像素 i 的灰度值, j 为像素 i 包含在 R_k 中的邻域像素。最优的 α 取值为

$$\hat{\alpha} = \text{Arg max } U_l(t(\alpha)), \alpha > 0 \quad (6)$$

以式(6)作为改进萤火虫算法的目标函数, 用以复杂图像的分割, 通过寻优函数自动获得 α 的取值, 可以快速地获得复杂图像的分割阈值。对于二维 Renyi 熵而言, 参数的位数为 $D=1$ 。一般来说参数 $\alpha \in (0, 1)$ 时分割效果最佳, 减少算法寻优限定空间。通过实验验证发现参数 α 限定空间增加时, 影响分割的结果不大, 但是增加搜索空间给算法的运算时间增加负担。因此, 在 $\alpha \in (0, 1)$ 内寻找最优值。

2 基于改进萤火虫算法的二维 Renyi 熵阈值分割方法

本文算法对图像采用二维 Renyi 熵方法进行图像分割, 二维 Renyi 熵中 α 变量的初始化使用了 Kent 混沌, 在实际解的区间里把初始粒子更加均匀更加随机的排布。通过引入萤火虫优化机

制, 将粒子吸引到最优运动中, 在混沌中搜索最优的萤火虫, 随机地再生出相对较差的萤火虫。传统的萤火虫算法在滤波的算法复杂度和滤波时间上会受到位置更新时需要各粒子间交互作用的影响。为了解决上述问题, 本文以粒子群智能算法的思想进行参考, 迭代更新, 并替换 j 和 i 萤火虫进行信息交互。具体方法如下:

1) 萤火虫吸引度修正公式:

$$\beta = \beta_0 \times e^{-\gamma r_i} \quad (7)$$

式中: r_i 是粒子 i 与全局最优值 g_{bestk} 间的欧式距离。

2) 萤火虫位置修正公式:

$$x_k^i = x_k^i + \beta(g_{\text{bestk}} - x_k^i) + \alpha_1 \times (\text{rand} - 0.5) \quad (8)$$

图像的 α 阶二维 Renyi 熵定义为

$$\begin{aligned} H(1) &= \frac{1}{1-\alpha} \ln \sum_{i=0}^s \sum_{j=0}^t \left(\frac{P_{ij}}{P_1(s,t)} \right)^\alpha \\ H(2) &= \frac{1}{1-\alpha} \ln \sum_{i=s+1}^{L-1} \sum_{j=s+1}^{L-1} \left(\frac{P_{ij}}{P_2(s,t)} \right)^\alpha \end{aligned} \quad (9)$$

式中: L 为图像灰度级; p_{ij} 表示原始图的像素灰度值 i 和其邻域平均灰度图像像素灰度值 j 的联合概率密度; p_1 、 p_2 分别为背景和目标区域的概率。

阈值 (s, t) 对应图像的二维熵定义为

$$H(s, t) = H(1) + H(2) \quad (10)$$

二维熵阈值法的最好的分割阈值向量为

$$(s^*, t^*) = \arg \max_{1 \leq s, t \leq L-1} \{H(s, t)\}$$

算法实现步骤如下:

1) 产生一个 $(0, 1)$ 之间的随机数, 代入式(2)应用混沌优化策略获得初始萤火虫。

2) 对每个萤火虫的适应度值进行计算。为了求出图像的最优阈值 t , 利用式(9)、(10)计算第 i 个萤火虫的 Renyi 熵 ($\alpha = x_i$); 运用式(5)求出其适应度值。通过以上的的方法, 经过多次运算, 求出全部适应度值。

3) 模拟萤火虫优化过程并更新萤火虫的位置。根据式(7)计算所有萤火虫的适应度值与全局最优值之间的吸引度; 根据式(8)更新萤火虫位置。

4) 具有最初 10% 亮度的萤火虫被优化为用于混沌搜索的优异粒子, 具有最后 10% 亮度的萤火虫被随机产生的新萤火虫取代。

5) 若迭代到终止阈值 T 或者最大迭代次数 M , 则停止进行迭代; 否则, 转入步骤 2)。

算法实现的整体流程图如图 1 所示。

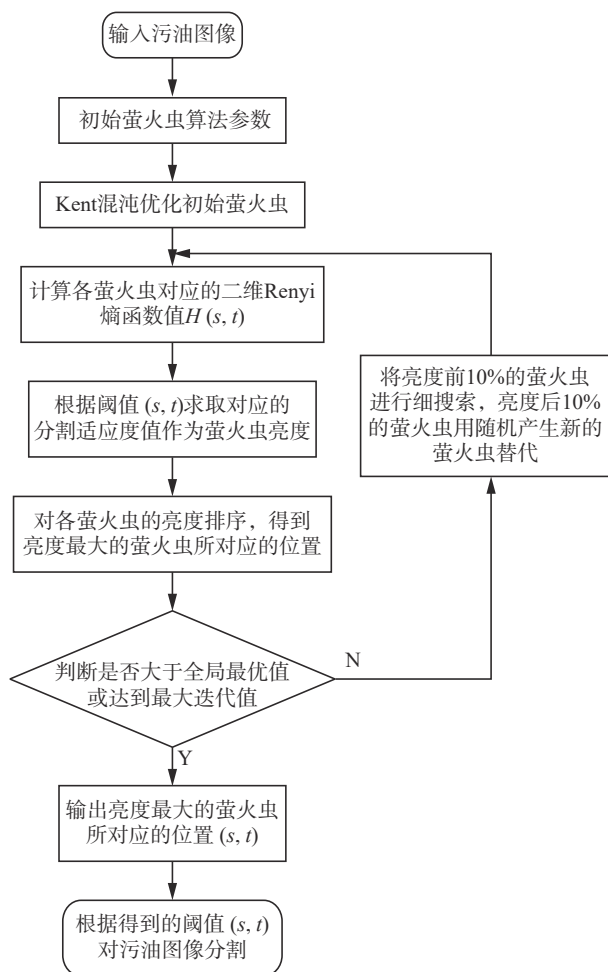


图1 改进萤火虫算法的二维 Renyi 熵阈值分割算法流程图

Fig. 1 The flow chart of the two-dimensional Renyi entropy threshold segmentation algorithm is improved

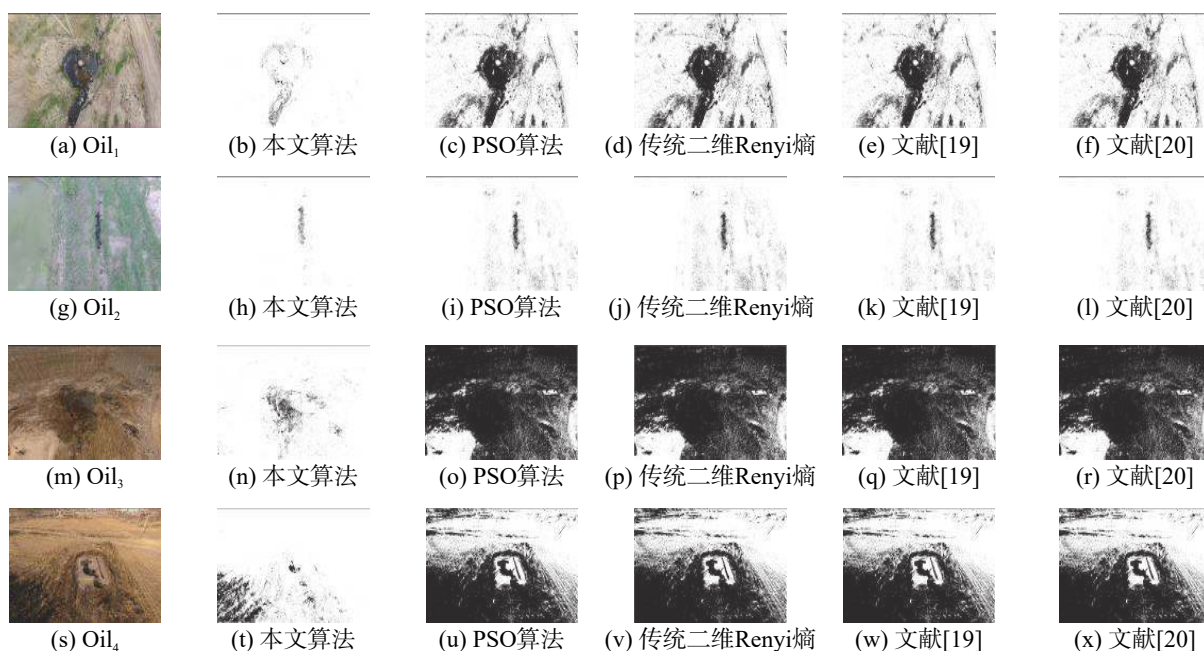


图2 图像分割对比处理结果

Fig. 2 Image segmentation and comparison processing results

3 油污图像分割实验与分析

为验证本文算法在实际中的应用效果, 将其与二维 Renyi 熵阈值分割算法、粒子群 (PSO) 二维 Renyi 熵分割算法、文献 [14-15] 进行对比仿真实验, 并且给出每种算法的实验结果以及相关数据。为解决油污图像分割的实际问题, 选取的油污图像是通过大疆精灵 4 对大庆油田采油二厂地区进行巡检实地拍摄采集的油污图片, 作为本次实验数据样本。首先对采集图像进行预处理, 使用自适应霍夫曼方法对可用的图片进行压缩, 使图像样本由原来的 4000×2250 压缩到 400×225 , 并且进行归一化处理, 对图像采用中值平均滤波的方法进行优化, 提高样本的图像质量。实验表明, 本方法对不同的油污图像进行分割都十分有效, 可以根据不同的图像寻找合适的参数, 从而得到满意的分割后的油污图像。限于篇幅, 给出 4 幅典型的油污图像, 实验处理结果如图 2 所示。

粒子群 (PSO) Renyi 熵分割方法是以 PSO 为优化函数的二维 Renyi 熵阈值分割算法。其中, PSO 算法用于通过迭代获得最优值, 并找到全局最优解, 其初始种群 $s = 10$; 最大迭代次数 $T = 10$; 学习因子 $c_1 = 1.4995$, $c_2 = 1.4995$; 惯性权重学习因子 $\omega = 1.2$; 粒子速度学习因子 $v \in (0, 1)$ 。

根据图 3 可以清晰地看到 4 幅油污图像的灰度直方图, Oil_1 和 Oil_2 两张图片的灰度值对比度较大, 常规分割方法可以较好地对应像进行分割; 而 Oil_3 和 Oil_4 两张图片的灰度值对比度较小, 给传统分割算法带来了较大的困难, 下面会根据每张图片的分割效果, 对 3 种算法进行详细分析。

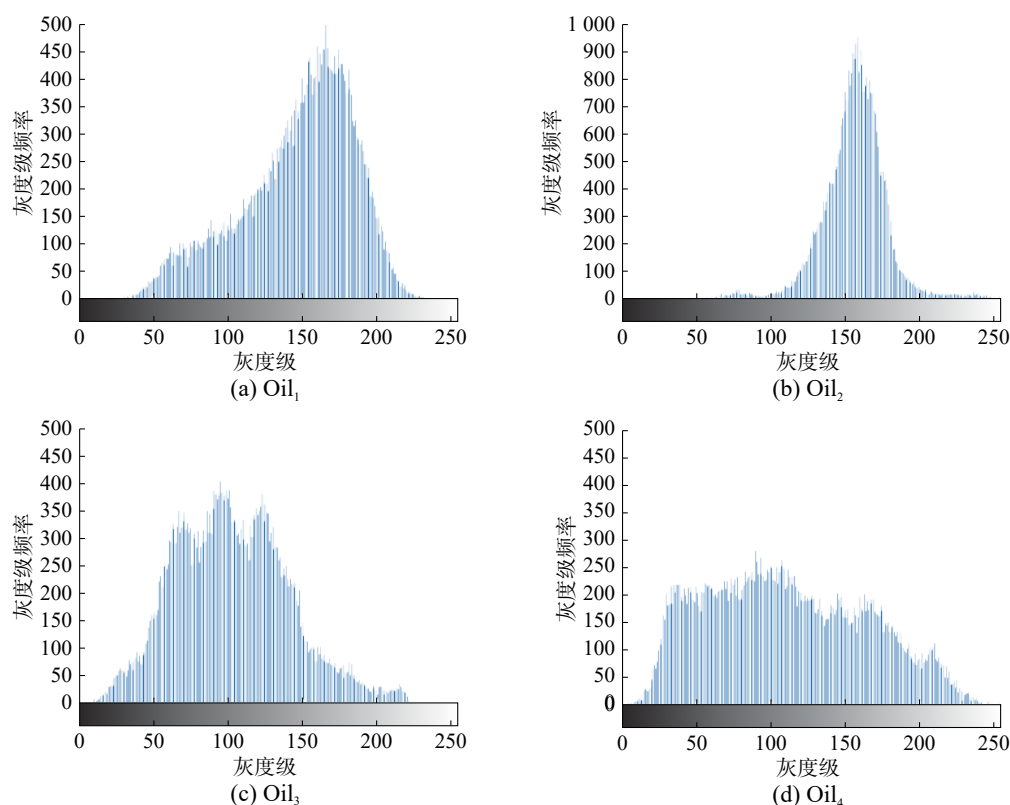


图 3 4 幅原始图像的灰度直方图

Fig. 3 The grayscale histogram of the four original images

从图 3 所示的 Oil₁ 和 Oil₂ 图像可以看出, 油污与其背景具有较大的差异, 3 种算法对油污区域进行有效的分割。本文算法分割效果最优, 文献 [14-15], PSO 二维 Renyi 熵分割方法效果次之, 二维 Renyi 熵分割方法效果最差。后两种方法对 2 张图像分割后的图像都存在其他不相干区域, 分割的精确度不高, 可能将错误的区域判别为油污图像, 无法解决实际油污图像分割的问题。其中的 Oil₃ 和 Oil₄ 两幅油污图像, 由于目标区域与所拍摄背景的对比度较低导致后两种方法无法精

确地找到分割阈值, 从而造成过分割, 无法生成有效地分割图像, 不能有效地提高算法的适应性, 无法适应拍摄的油污图像的各种情况。而本文提出的方法能够有效地将油污的轮廓区域提取出来, 能够适应无人机拍摄的复杂图像, 因此本文方法要优于其他两种分割方法。

为了更加直观地对算法进行评价, 将 PSNR 准则作为定量分析算法性能的指标, 计算出各算法的运算时间, 如表 1 所示。

表 1 算法的运行时间和信噪比值

Table 1 Algorithm running time and PSNR value

图像	萤火虫		PSO		Renyi熵		文献[19]		文献[20]	
	时间/s	PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB	时间/s	PSNR/dB
Oil ₁	2.91	120.426 0	2.98	120.414 7	1.65	120.414 2	3.01	120.415 0	3.11	120.381 4
Oil ₂	2.77	119.924 5	2.68	119.924 1	1.49	119.823 4	3.12	118.555 4	3.15	118.954 1
Oil ₃	2.88	126.847 6	3.06	126.734 7	1.51	126.734 5	3.55	125.999 1	3.21	125.584 1
Oil ₄	2.27	124.618 3	2.31	124.568 0	0.61	124.567 8	4.01	124.568 4	3.33	123.555 4

PSNR 准则的相关表达式为

$$\text{PSNR} = 20 \log \left(\frac{255}{\text{RMSE}} \right) (\text{dB}) \quad (11)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - \hat{I}(i, j))^2}{MN}} \quad (12)$$

其中, $I(i, j)$ 是大小为 $M \times N$ 的原图像; $\hat{I}(i, j)$ 是大小为 $M \times N$ 的分割后的图像。

对4幅油污图像运用了以下几种算法进行分割处理, 表1显示了其运算时间及PSNR值。通过对数据的观察分析可知, 虽然在时间上本文的方法不比传统 Renyi 熵分割速度快, 但是在优化算法中比 PSO 算法时间快。本文方法的 PSNR

值总体比其他两种方法的值高, 说明本文方法能够更加精准地进行油污图像分割。同时, 为了观察本文改进的萤火虫算法寻优效果, 图4给出了该算法每次迭代时最优的适应度函数曲线, 发现该算法对4幅油污图片的寻优效果都较快, 改进的萤火虫算法能够快速寻找到全局最优适应度值。

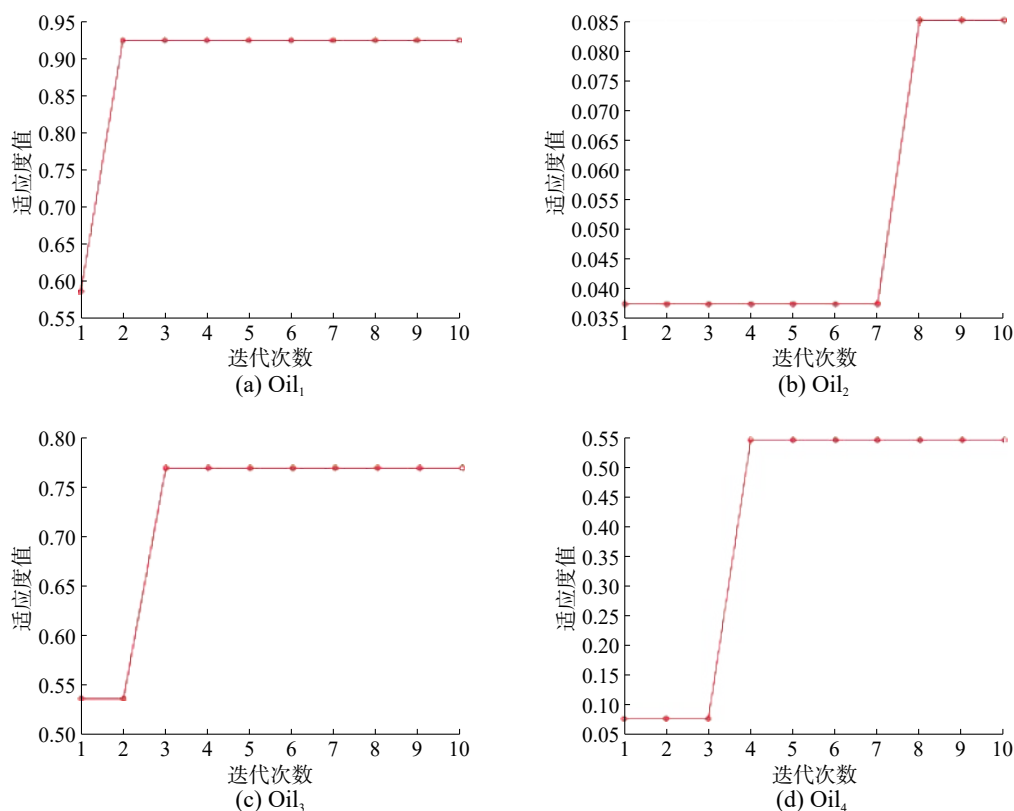


图4 适应度函数迭代优化学习曲线

Fig. 4 The fitness function iteratively optimizes the learning curve

综上所述, 基于改进萤火虫算法的二维 Renyi 熵分割方法较传统的优化算法时间快, 能够实现对不同的油污图片有效的区域分割。

4 结束语

本文提出一种改进萤火虫的二维 Renyi 熵阈值分割算法, 该算法在基于二维 Renyi 熵分割算法的基础上增加了对变量 α 进行寻优算法, 不仅改进优化传统的萤火虫算法, 并且对萤火虫的初始种群运用混沌进行初始化。针对实际工况下采集的油污图像进行准确地分割, 无需调整算法的参数, 也不需要判别图片的分割效果好坏, 此算法尤其适用于分割实际环境中采集的复杂图像, 能够准确、高效地完成油污区域分割。经过本文改进的算法, 其运算时间及分割精度均有所提高, 优于 PSO 优化算法, 分割图像的准确度大大

提高, 即目标与背景区域差别较小的情况下能够有效地进行阈值分割。实验结果表明本文算法可适用于复杂环境中的油污图像分割, 能快速处理不同大小、不同噪声等各种情形。

参考文献:

- [1] 王翔宇, 王跃, 鲍蕊, 等. 基于巡检方案事件检出概率的长距管线无人机总体设计 [J]. 航空学报, 2016, 37(1): 193–206.
WANG Xiangyu, WANG Yue, BAO Rui, et al. Conceptual design for long-distance pipeline patrolling UAV based on detection probability of patrolling scheme [J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2016, 37(1): 193–206.
- [2] 张彪, 杜景涛, 许海银. 基于物联网技术的数字油田三维管线智能巡检系统 [J]. 智慧建筑与城市, 2017(9): 50–53.
ZHANG Biao, DU Jingtao, XU Haiyin. Intelligent patrol inspection system of digital oilfield based on IOT techno-

- logy[J]. *Intelligent building and city*, 2017(9): 50–53.
- [3] 陈雨, 蒋连江. 石油管线智能巡检系统应用与研究 [J]. *石油石化管线与技术*, 2009, 3(3): 120–123.
- [4] 马英辉, 吴一全. 利用混沌布谷鸟优化的二维 Renyi 灰度熵图像阈值选取 [J]. *智能系统学报*, 2018, 13(1): 152–158.
- MA Yinghui, WU Yiquan. Two-dimensional Renyi-gray-entropy image threshold selection based on chaotic cuckoo search optimization[J]. *CAAL transactions on intelligent systems*, 2018, 13(1): 152–158.
- [5] 陈超, 宣士斌, 雷红轩. 基于狼群算法与二维最大熵的图像分割 [J]. *计算机工程*, 2018, 44(1): 233–237.
- CHEN Chao, XUAN Shibin, LEI Hongxuan. Image segmentation based on wolf pack algorithm and 2D maximum entropy[J]. *Computer engineering*, 2018, 44(1): 233–237.
- [6] YANG Xinshe. Nature-inspired metaheuristic algorithms[M]. Frome, UK: Luniver Press, 2008: 180–186.
- [7] 刘佳昆, 周永权. 一种最大最小萤光素值人工萤火虫算法 [J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(10): 3662–3664.
- LIU Jiakun, ZHOU Yongquan. Glowworm swarm optimization algorithm based on max-min luciferin[J]. *Application research of computers*, 2011, 28(10): 3662–3664.
- [8] DOS SANTOS COELHO L, DE ANDRADE BERNERT D L, MARIANI V C. A chaotic firefly algorithm applied to reliability-redundancy optimization[C]//Proceedings of 2011 IEEE Congress of Evolutionary Computation. New Orleans, LA, USA, 2011: 517–521.
- [9] 冯艳红, 刘建芹, 贺毅朝. 基于混沌理论的动态种群萤火虫算法 [J]. *计算机应用*, 2013, 33(3): 796–799, 805.
- FENG Yanhong, LIU Jianqin, HE Yichao. Chaos-based dynamic population firefly algorithm[J]. *Journal of computer applications*, 2013, 33(3): 796–799, 805.
- [10] KULKARNI R V, VENAYAGAMOORTHY G K. Bio-inspired algorithms for autonomous deployment and localization of sensor nodes[J]. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part C (applications and reviews)*, 2010, 40(6): 663–675.
- [11] 刘毅, 黄兵, 孙怀江, 等. 利用视觉显著性与图割的图像分割算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(3): 402–409.
- LIU Yi, HUANG Bing, SUN Huaijiang, et al. Image segmentation based on visual saliency and graph cuts[J]. *Journal of computer-aided design & computer graphics*, 2013, 25(3): 402–409.
- [12] 刘洪彬, 常发亮. 权重系数自适应光流法运动目标检测 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 460–468.
- LIU Hongbin, CHANG Faliang. Moving object detection by optical flow method based on adaptive weight coefficient[J]. *Optics and precision engineering*, 2016, 24(2): 460–468.
- [13] HORNG M H. Vector quantization using the firefly algorithm for image compression[J]. *Expert systems with applications*, 2012, 39(1): 1078–1091.
- [14] 马英辉, 吴一全. 基于改进的指数交叉熵和萤火虫群优化的工业 CT 图像分割 [J]. *图学学报*, 2017, 38(1): 57–62.
- MA Yinghui, WU Yiquan. Segmentation of industrial CT image based on improved exponential cross entropy and glow-worm swarm optimization[J]. *Journal of graphics*, 2017, 38(1): 57–62.
- [15] 周晨航, 田力威, 赵宏伟. 基于改进萤火虫算法的二维 Otsu 图像分割法 [J]. *沈阳大学学报 (自然科学版)*, 2016, 28(1): 45–50.
- ZHOU Chenhang, TIAN Liwei, ZHAO Hongwei. Image thresholding segmentation with 2-D Otsu based on improved firefly algorithm[J]. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2016, 28(1): 45–50.

作者简介:



贾鹤鸣, 副教授, 博士, 主要研究方向为图像处理与信息检测技术。



彭晓旭, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制与信息处理技术。



邢致恺, 硕士研究生, 主要研究方向为智能控制与信息处理技术。