

基于萤火虫最优偏差的红外目标检测算法

于 雷

(闽南理工学院电子与电气工程学院,福建 石狮 362700)

摘 要:为了提高红外目标检测的性能,借鉴萤火虫算法,提出了一种基于萤火虫最优偏差的红外目标检测算法。算法首先建立红外目标检测模型,通过红外拍摄系统对目标像点定位,将检测目标的光强分布看成高斯分布函数,利用质心窗口采集图像;以红外点目标成像的艾里斑能量分布做为萤火虫适应度函数,利用差分迭代对红外目标进行检测寻优;通过控制最优偏差估计的检测误差来优化检测目标。最后实验仿真显示本文算法能够检测出红外目标区域,相比其他算法边缘定位更准确,同时检测效率较高。

关键词:萤火虫算法;最优偏差;红外目标;适应度函数;目标检测

中图分类号:TP319;TN216 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.022

Infrared target detection algorithm based on optimal deviation of firefly method

YU Lei

(School of Electronics and Electrical Engineering, Minnan University of Science and Technology, Shishi 362700, China)

Abstract: In order to improve the detection performance of infrared target, a new algorithm of infrared target detection based on optimal deviation of firefly method is proposed. Firstly, the infrared target detection model was established, and the target image points were located by infrared camera system, and the intensity distribution of the detected object was regarded as the Gauss distribution function, the algorithm uses the centroid window to collect the image. The Airy spot energy distribution in infrared point target imaging was used as the fitness function of firefly method, and the difference iteration was used to detect the infrared target. The detection targets were optimized by controlling detection error of optimal deviation estimation. Finally, the simulation results show that the algorithm can effectively detect the infrared target area, which is more accurate than other algorithms, and the detection efficiency is higher.

Key words: firefly algorithm; optimal deviation; infrared target; fitness function; object detection

1 引 言

红外目标检测是目标识别、红外预警、精确制导等应用中的关键技术,其检测技术已在军用、民用领域中得到广泛应用。但红外目标检测的精度易受电子器件分辨率和成像系统等物理因素的影响。如何提高目标检测精度和效率成为红外检测领域的研究热点。

目前,经典的红外目标检测算法有 Sobel 边缘检测算法、数学形态学检测算法、小波变换检测算法、像素分析检测算法、全局搜索检测算法等。但由于红外热像仪的成像机理以及成像系统的特性, Sobel 边缘检测算法在对目标区域进行提取时,容易造成锯齿或边界模糊等情况^[1-2];数学形态学检测算法虽然能很容易地检测出低信噪比及快速运动的点

基金项目:福建省中青年教育科研项目(JA13351)资助。

作者简介:于 雷(1982-),男,讲师,硕士,主要研究方向为目标检测与图像处理。E-mail:yulei_82@sina.cn

收稿日期:2016-01-27; **修订日期:**2016-03-03

目标,但需要根据目标的几何结构来检测目标形状和大小^[3-5];小波变换检测算法通过多尺度的小波变换可以检测红外弱小目标,但需要选择小波基和核空间尺度^[6-8];像素分析检测算法实现简单,计算量较小,但在目标检测时会出现检测出目标不完整等问题^[9];全局搜索检测算法,能检测出低信噪比条件下的目标,但是时间复杂度和空间复杂度较高^[10]。萤火虫算法是模仿自然界萤火虫捕食求偶行为的智能优化算法,在优化问题领域得到了广泛应用。为了提高边缘定位的准确率,在有限的时间复杂度和空间复杂度下,提升红外目标检测的性能,本文借鉴萤火虫算法,提出了一种基于萤火虫最优偏差的红外目标检测算法。

算法通过红外拍摄系统对目标像点定位,将检测目标的光强分布看成高斯分布函数,利用质心窗口采集图像,以红外目标能量分布作为萤火虫算法的适应度函数,利用差分迭代对红外目标进行检测寻优,通过控制最优偏差估计的检测误差来优化检测目标。

2 红外目标检测模型

2.1 目标像点定位

红外焦平面阵列的整个像面是由纵横方向二维有序排列的多个红外敏感元件组成^[11-12],设 g 为 2 个拍摄器的焦距, l 为像素长度,设点目标 A 在测量坐标系中的坐标为 $A(x, y, z)$, 在 2 个像平面坐标系中的坐标分别为 $A(x_1, y_1)$ 、 $A(x_2, y_2)$, 由小孔成像得:

$$\begin{cases} \frac{x_1 l}{g} = \frac{x + d}{z} \\ \frac{y_1 l}{g} = \frac{y}{z} \\ \frac{x_2 l}{g} = \frac{x - d}{z} \\ \frac{y_2 l}{g} = \frac{y}{z} \end{cases} \quad (1)$$

式中, d 为像平面的中心 O_1 和 O_2 到坐标原点 O 的距离,因此可得:

$$\begin{cases} x = z \frac{x_1 l}{g} - d = z \frac{x_2 l}{g} + d \\ y = z \frac{y_1 l}{g} \\ y_1 = y_2 \end{cases} \quad (2)$$

在测量坐标系中直线 $O_1 A$ 的方向向量为:

$$(x, y, z) - (d, 0, 0)$$

$$\begin{aligned} &= (z \frac{x_1 l}{g} + d, z \frac{y_1 l}{g}, z) - (d, 0, 0) \\ &= (z \frac{x_1 l}{g}, z \frac{y_1 l}{g}, z) \\ &= (x_1 l, y_1 l, g) \end{aligned} \quad (3)$$

同理可得直线 $O_2 A$ 的方向向量 $(x_2 l, y_2 l, g)$ 。

直线 $O_1 A$ 和直线 $O_2 A$ 的方程为:

$$\begin{cases} \frac{x + d}{x_1 l} = \frac{y}{y_1 l} = \frac{z}{g} \\ \frac{x - d}{x_2 l} = \frac{y}{y_2 l} = \frac{z}{g} \end{cases} \quad (4)$$

把光点目标的光强分布看成高斯分布函数:

$$f(x, y) = \frac{E_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中, E_0 为目标像点在拍摄器上的总能量; (x_0, y_0) 是光斑的实际位置; σ 为高斯半径。

经光学系统离散化处理后,满足高斯分布的目标像点将覆盖在相邻的几个像元上,为了获得目标像点的确切位置,首先采用质心窗口采集点图像,然后利用定位算法计算出目标像点的坐标。假设每个像元的占空系数为 100%,质心窗口包含 n 个像元,则质心窗口内第 k 个像元的灰度值为:

$$G_k = \frac{E_0}{2\pi\sigma^2} \int_{x_k-0.5}^{x_k+0.5} \exp\left(-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2}\right) dx \cdot \int_{y_k-0.5}^{y_k+0.5} \exp\left(-\frac{(y - y_0)^2}{2\sigma^2}\right) dy \quad (6)$$

式中, (x_k, y_k) 为质心窗口内第 k 个像元的中心位置。根据质心窗口内各像元的灰度值和像元中心位置来计算目标像点的位置:

$$\hat{x}_c = \frac{\sum_{k=1}^n x_k G_k}{\sum_{k=1}^n G_k} \quad \hat{y}_c = \frac{\sum_{k=1}^n y_k G_k}{\sum_{k=1}^n G_k} \quad (7)$$

2.2 目标灰度值偏差估计模型

根据上节的坐标计算公式,在确定坐标后,红外拍摄电子设备就会获得 2 幅红外目标图像,对 2 幅红外目标图像进行图像融合即可确定目标像点在测量坐标系中的坐标^[13-14]。但是由于输入输出数据存在不同的量纲,需要对每个输入和输出的变量做归一化处理:

$$x'_i(j) = \frac{x_i(j) - x(j)_{min}}{x(j)_{max} - x(j)_{min}} \quad (8)$$

式中, $j \leq 2$, $x_i(j)$ 为第 j 个拍摄电子设备第 i 次拍摄结果; $x'_i(j)$ 为 $x_i(j)$ 的归一化值。使用归一化值建立灰度偏差估计的支持向量机模型,设样本数据为

$\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$, 其中 $x_i \in \mathbb{R}^m$, $y_i \in \mathbb{R}^m$ 。

首先支持向量机通过非线性映射 $\rho(\cdot)$ 把样本输入部分 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 映射到高维特征空间 T 上, 然后进行线性回归:

$$f(x) = z^T \rho(x) + \beta \tag{9}$$

式中, $z \in T$; β 为偏置; $z^T \rho(x)$ 为 z 和 $\rho(x)$ 向量的点积。未知量 (z, β) 为:

$$C \sum_{i=1}^n E_\varepsilon(f(x_i) - y) + \frac{1}{2} \|z\|^2 \tag{10}$$

式中, $\|\cdot\|$ 表示欧式距离; C 为正则化系数; $E_\varepsilon(\cdot)$ 为损失函数; 选择 ε 不敏感损失函数为:

$$E_\varepsilon(f(x_n) - y) = \begin{cases} 0 & |f(x_n) - y| \leq \varepsilon \\ |f(x_n) - y - \varepsilon| & \text{other} \end{cases} \tag{11}$$

2.3 最优偏差控制

在测量中由于各红外传感器不仅含有随机测量误差, 还有动态系统偏差, 为了对预测偏差进行有效控制, 需要对偏差进行最优偏差控制。本文采用几何投影方法将 2 个像平面坐标系转换到同一平面坐标中。图 1 是偏差估计几何关系示意图。

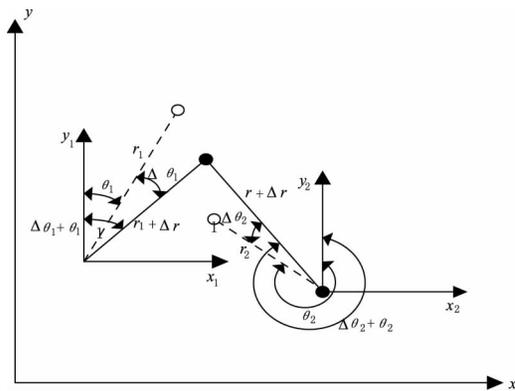


图 1 偏差估计几何关系示意图

Fig. 1 The estimation of deviation diagram geometry

图中 $r_1, \theta_1, r_2, \theta_2$ 分别为两个红外传感器测量的结果; $\Delta r_1, \Delta \theta_1, \Delta r_2, \Delta \theta_2$ 为动态系统偏差值; $r'_1, \theta'_1, r'_2, \theta'_2$ 为斜距和角度测量随机误差。设均为高斯分布的随机变量。设系统的动态模型表示如下:

$$\delta_k = F_{k-1} \delta_{k-1} + H_{k-1} \tag{12}$$

系统动态偏差的动态模型表示如下:

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \Phi_{k-1} \alpha_{k-1} + \mu_{k-1} \\ X_k &= A_{k-1} X_{k-1} + U_{k-1} \end{aligned} \tag{13}$$

$$Z_k = h(X_k) + V_k$$

式中, $\delta_k = (x, \dot{x}, y, \dot{y})^T, \alpha_k = (\Delta r_1, \Delta \theta_1, \Delta r_2, \Delta \theta_2)^T$,

$X_k = (\delta_k^T, \alpha_k^T)^T, A_k = \text{diag}(F_k, \Phi_k), U_k = (H_k^T, \mu_k^T)^T, Z_k = (r_1, \theta_1, r_2, \theta_2)^T$ 表示 k 时刻红外传感器测量值向量, F_k 为状态转移矩阵, Φ_k 为偏差状态转移矩阵。 $H_k, \mu_k, V_k = (r'_1, \theta'_1, r'_2, \theta'_2)$ 分别表示系统过程噪声、偏差噪声以及测量噪声, 都服从高斯分布。 $h(X_k)$ 为系统的非线性测量函数。

$$h(X_k) = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_k - x_1)^2 + (y_k - y_1)^2} + \Delta r_1 \\ \arctan\left(\frac{y_k - y_1}{x_k - x_1}\right) + \Delta \theta_1 \\ \sqrt{(x_k - x_2)^2 + (y_k - y_2)^2} + \Delta r_2 \\ \arctan\left(\frac{y_k - y_2}{x_k - x_2}\right) + \Delta \theta_2 \end{bmatrix} \tag{14}$$

设萤火虫在 t 时刻的第 i 个预测偏差向量为:

$$\gamma_i^t = Z_t - h(X_{t-1}^i) \tag{15}$$

由式(15)计算得到的协方差矩阵不能真实反映系统动态扰动, 滤波增益将使偏差量测过大, 降低滤波精度, 本文利用预测残差构造调节因子:

$$f_{adjust} = \begin{cases} 1 & \|\lambda\| \leq \phi \\ \frac{\|\lambda\|}{\phi} & \|\lambda\| > \phi \end{cases} \tag{16}$$

其中, $\|\cdot\|$ 表示向量的欧几里得范数, 根据 3σ 法则, 选取 $\phi \in (1, 3\sigma)$ 为常数, $\sigma = \sqrt{\max(R)}$ 。其中 R 为测量误差方差阵。当检测误差超出一定限值时, 其相应的协方差阵膨胀; 反之协方差阵保持不变, 从而进一步控制滤波增益的大小, 实现对最优偏差的控制。

3 基于萤火虫算法的红外检测寻优

3.1 萤火虫算法描述

萤火虫算法是模仿萤火虫发光行为构造出的仿生物智能优化算法, 根据 2008 年剑桥学者 Yang 提出的, 萤火虫算法包括相对荧光亮度和吸引力两个要素^[15]。荧光虫相对亮度计算公式为:

$$I = I_0 \times e^{-\gamma r_{ij}^2} \tag{17}$$

式中, r_{ij} 为萤火虫 i 与 j 间的距离; I_0 表示萤火虫在 $r_{ij} = 0$ 处的最大萤光亮度, 其与适应度函数有关; γ 为光强吸收系数, 亮度体现了萤火虫所处位置的优劣并决定其移动的方向。萤火虫吸引度的计算公式为:

$$\beta = \beta_0 \times e^{-\gamma r_{ij}^2} \tag{18}$$

式中, β_0 为光源处的最大吸引力, 吸引力决定了萤火虫移动的距离。

萤火虫 i 被吸引向萤火虫 j 移动的位置更新公

式为:

$$x'_i = x_i + \beta \times (x_j - x_i) + \alpha \times (\text{rand} - 0.5) \quad (19)$$

式中, x_i, x_j 为萤火虫 i 和 j 所处的空间位置; x'_i 为更新后位置; $\alpha \in [0, 1]$ 为步长因子, $\text{rand} \in [0, 1]$ 为服从均匀分布的随机因子, $\alpha \times (\text{rand} - 0.5)$ 为扰动项, 用于加大萤火虫的搜索范围, 避免算法陷入局部最优。

3.2 基于差分的迭代策略

在每一轮的迭代后, 根据萤火虫的适应度函数进行排序, 得到当前最优解, 然后依据前半部分萤火虫的位置差分操作对排序后半部分的萤火虫位置进行更新, 这样通过多次移动后, 所有萤火虫个体都将聚集在亮度最高的萤火虫的位置上, 从而实现位置寻优。荧光亮度更新计算公式如下:

$$I_i(t) = \omega I_i(t-1) + \zeta A(x_i(t)) \quad (20)$$

式中, $A(x_i(t))$ 表示萤火虫 i 在 t 次迭代位置 $x_i(t)$ 对应的适应度函数值; $I_i(t)$ 示萤火虫 i 在 t 次迭代的荧光亮度值; ζ 为适应度提取比例, 荧光挥发因子 $\omega \in [0, 1]$ 。

每个萤火虫在其可搜索的范围内选择荧光亮度比自己高的个体组成其邻域集合, 设 $p_{ij}(t)$ 表示经 t 次迭代萤火虫 i 向集合 $Q_i(t)$ 内萤火虫 j 移动的概率:

$$p_{ij}(t) = \frac{I_j(t) - I_i(t)}{\sum_{k \in Q_i(t)} (I_k(t) - I_i(t))} \quad (21)$$

上式中集合为:

$$Q_i(t) = \{j: d_{ij}(t) < r_d^i(t); I_i(t) < I_j(t)\}$$

$r_d^i(t)$ 表示萤火虫 i 在 t 次迭代的决策范围, $0 < r_d^i(t) \leq r_{max}$, r_{max} 表示萤火虫感知的最大半径, $d_{ij}(t)$ 为萤火虫 i 和 j 之间 t 次迭代的距离。位置更新的计算公式如下:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + s \left(\frac{x_j(t) - x_i(t)}{\|x_j(t) - x_i(t)\|} \right) \quad (22)$$

式中, s 为移动步长。动态决策域半径更新的计算公式如下:

$$\min\{r_{max}, \max\{0, r_d^i(t) + \psi(q_i(t) - |Q_i(t)|)\}\} \quad (23)$$

式中, 动态决策域更新率 $\psi \in [0, 1]$, $q_i(t)$ 为 t 次迭代萤火虫个体 i 邻域集内包含的萤火虫数目阈值。

差分操作可减少算法寻优过程中的盲目性, 加

快算法寻优速度。差分操作更新计算公式如下:

$$\hat{x}_i(t) = x_i(t) + [\xi(x_{best}(t) - x_i(t)) + (x_m(t) - x_n(t))] \quad (24)$$

式中, $x_{best}(t)$ 为当前种群中最优个体; $x_m(t)$ 、 $x_n(t)$ 分别为种群中任意的两个个体; ξ 为变异因子。

3.3 萤火虫适应度函数

由于受光学系统点扩散函数的影响, 被检测目标的入射能量呈中心高、向外逐渐减弱的二维近似高斯分布, 设 (x, y) 为红外目标空间位置, (x', y') 为衍射斑能量中心, δ_x, δ_y 为衍射斑能量分布的横坐、纵坐标轴, E_{max} 能量分布最大值为, 红外点目标成像的艾里斑能量高斯分布为:

$$E(x, y) = E_{max} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{2\delta_x^2} - \frac{(y-y')^2}{2\delta_y^2}\right] \quad (25)$$

要想获得红外目标图像, 需要建立入射能量与图像灰度图像之间的关系, 设 E_{ij} 为探测像元在 i, j 区域的能量, E_{ij} 与 $E(x, y)$ 关系:

$$E_{ij} = \iint_{j,i} E(x, y) dx dy \quad (26)$$

设探测像元的灰度数值为 G_{ij} , 则探测像元在 i, j 区域的能量 E_{ij} 与 G_{ij} 的关系为:

$$G_{ij} = \chi E_{ij} + \vartheta \quad (27)$$

式中, χ 和 ϑ 为探测元的增益系统和偏移量。以灰度数值 G_{ij} 为萤火虫适应度函数, 建立能量分布与成像灰度之间的对应关系, 从而将检测优化转化为萤火虫寻优过程, 设定红外目标区域的灰度均值为 \hat{G}_{ij} , 判定大于灰度均值 \hat{G}_{ij} 的区域则为红外目标区域。

本文算法的流程:

(1) 输入需要目标检测的红外图像, 初始化萤火虫最优偏差算法的参数;

(2) 计算每个萤火虫所对应的红外像元的成像灰度值, 将适应度函数值做为其灰度值, 并排序, 得到亮度最大的萤火虫位置;

(3) 判断是否满足最优偏差因子, 满足则转(4), 否则转(5);

(4) 将得到的灰度均值做为阈值对图像进行分割, 输出图像。

(5) 更新萤火虫的位置, 对萤火虫进行差分操作, 搜索次数增加 1, 转(2), 进行下一次搜索。

4 实验仿真与结果分析

仿真实验的硬件采用 XenlCs 中波红外相机中

的 Onca - 3.7, 探测波段范围为 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 获得图像大小均为 640×512 , 采用 Matlab7.0 在 PC 上 (Intel(R) Core i3 - 3240 CPU@ 3.4GHz 4G 内存) 运行实现。

4.1 结果分析

本文选取 3 幅不同的红外图像进行目标检测, 并将本文算法与其他算法做对比分析, 实验结果如图 2、3、4 所示。

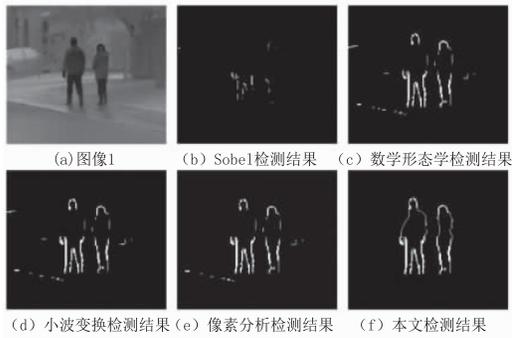


图 2 图像 1 不同算法的检测结果

Fig. 2 The detection results of different algorithms of image 1

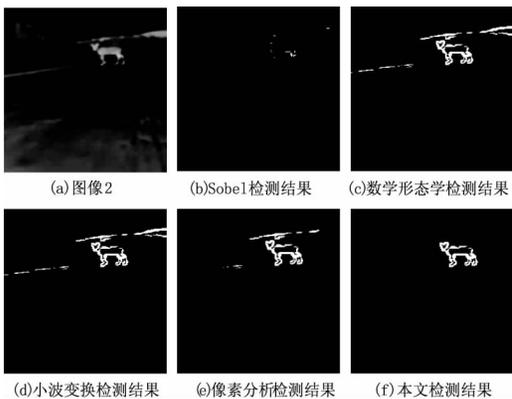


图 3 图像 2 不同算法的检测结果

Fig. 3 The detection results of different algorithms of image 2

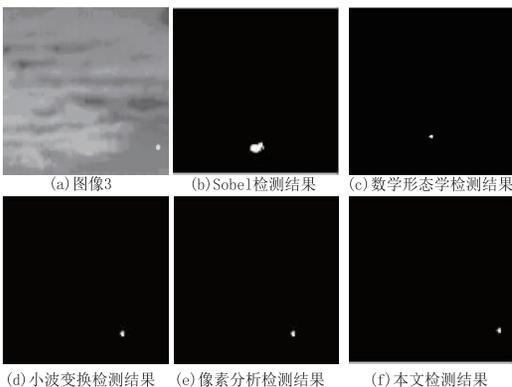


图 4 图像 3 不同算法的检测结果

Fig. 4 The detection results of different algorithms of image 3

图 2、图 3 中的目标与地面干扰的灰度差异较小, 且边缘干扰强度较大, 数学形态学、小波变换

和像素分析检测算法虽能大体上检测出目标, 但也或多或少将背景信息夹杂其中, 目标的边缘定位不够准确, 而本文算法能够检测到红外图像中的目标区域, 不仅去除了光照、背景等信息, 提取红外图像边缘信息片段, 且边缘定位准确; 由于图 4 中红外图像 3 的背景复杂较为复杂, 信噪比较高, 待检测目标的轮廓不够明显。其他算法没有考虑区域目标的合并, 在能量值高于目标的孤立噪声点处, 容易造成误检, 最终造成检测误差较大。而本文算法能将目标合并后有效地提取出来, 有效地检测出目标。

4.2 检测效率

在 Matlab 平台上对不同的算法进行检测效率分析, 对待检测图像 1、图像 2 和图像 3 各进行 150 次蒙特卡罗仿真后, 取各个图像的检测均值结果如图 5 所示。

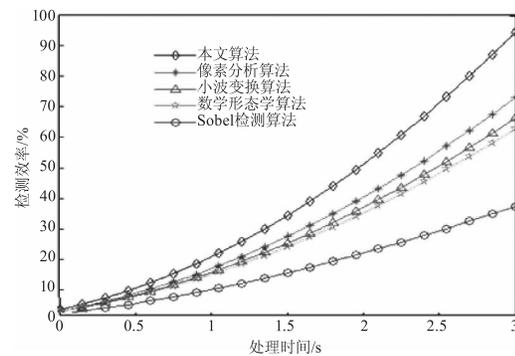


图 5 对比检测效率

Fig. 5 Comparison of the detection efficiency

从图 5 可以看出, 本文检测算法在不到 3 s 的时间内, 检测效率达到 98% 以上, 这是因为本算法在红外目标检测中对像元灰度值偏差进行最优估计, 减少数据误差的出现, 同时萤火虫在寻优过程中萤火虫在其动态决策域半径内选择荧光亮度值比自己高的个体组成其邻域集合, 减少算法寻优过程的盲目性。

5 总结

本文借鉴萤火虫算法, 建立了红外目标检测的模型算法。算法通过红外拍摄系统对目标像点定位, 将检测目标的光强分布看成高斯分布函数, 利用质心窗口采集图像, 以红外点目标成像的艾里斑能量分布做为萤火虫适应度函数, 利用差分迭代对红外目标进行检测寻优, 通过控制最优偏差估计的检测误差来优化检测目标。仿真实验显示本文算法对红外图像的边缘定位准确, 检测效率较高, 具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] XIA Qing, ZHANG Zhenxin, WANG Tingting, et al. Edge extraction algorithm of infrared thermal image based on improved sobel operator [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43 (10): 1158 - 1163. (in Chinese)
夏清, 张振鑫, 王婷婷, 等. 基于改进 Sobel 算子的红外图像边缘提取算法 [J]. *激光与红外*, 2013, 43 (10): 1158 - 1163.
- [2] YAO Min, LIU Bang. A method for infrared images pre-processing based on image fusion [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(4): 326 - 332. (in Chinese)
姚敏, 刘邦. 一种基于图像融合的红外图像预处理算法 [J]. *红外技术*, 2014, 36(4): 326 - 332.
- [3] PENG Zhihao, YANG Fengba, WANG Zhishe, et al. Infrared target extraction based on mathematical morphology and automatic region growing [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(1): 47 - 52. (in Chinese)
彭智浩, 杨风暴, 王志社, 等. 基于数学形态学和自动区域生长的红外目标提取 [J]. *红外技术*, 2014, 36(1): 47 - 52.
- [4] ZHANG Xiangyu, YANG Yuxiao. Infrared image processing method based on C - V model and mathematical morphology [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(1): 31 - 37. (in Chinese)
张翔宇, 杨玉孝. C - V 模型和数学形态学的红外图像处理方法 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(1): 31 - 37.
- [5] LIU Chang, LI Junwei. Hyperspectral subpixel target detection based on extended mathematical morphology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44 (10): 3141 - 3147. (in Chinese)
刘畅, 李军伟. 基于扩展数学形态学的高光谱亚像元目标检测 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44 (10): 3141 - 3147.
- [6] KONG Dezhao, SHEN Xueju, LIN Chao, et al. Multi-image encryption based on wavelet transform and fractional fourier transform [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 091002. (in Chinese)
孔德照, 沈学举, 林超, 等. 基于小波变换的分数阶傅里叶变换多图加密技术研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 091002.
- [7] LIU Gang, LIANG Xiaogeng. Detection of aerial small target in infrared image based on wavelet transform and pipeline filter [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(30): 198 - 203. (in Chinese)
刘刚, 梁晓庚. 基于小波变换和管道滤波的红外空中小目标检测 [J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(30): 198 - 203.
- [8] LUO Xiaoqing, WU Xiaojun. Detection algorithm for infrared small and weak targets based on wavelet transform and Gabor filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1818 - 1824. (in Chinese)
罗晓清, 吴小俊. 利用小波变换与 Gabor 滤波检测红外小目标 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1818 - 1824.
- [9] Guan Xu, Xiaotao Li, Jian Su, et al. A positioning method for the feature points of a target board image adopting singular value decomposition [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 14(7): 1692 - 1695.
- [10] V B Nascimento, E W Plummer. Differential evolution: Global search problem in LEED-IV surface structural analysis [J]. *Materials Characterization*, 2015, 100(2): 143 - 151.
- [11] AN Kai. Space debris positioning technology based on stereo vision [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(9): 1841 - 1845. (in Chinese)
安凯. 基于立体视觉的空间碎片定位技术 [J]. *系统工程与电子技术*, 2013, 35(9): 1841 - 1845.
- [12] Guan Xu, Xiaotao Li, Jian Su, et al. A positioning method for the feature points of a target board image adopting singular value decomposition [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 14(7): 1692 - 1695.
- [13] Z Tabor. Anisotropic resolution biases estimation of fabric from 3D gray-level images [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2010, 32(1): 39 - 48.
- [14] WANG Xinzhe, HAN Min, YANG Xilin, et al. Calculating lime input quantity by alkalinity deviation estimation based on support-vector-machines [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(12): 1415 - 1418. (in Chinese)
王心哲, 韩敏, 杨溪林, 等. 基于支持向量机碱度偏差估计的石灰加入量模型 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(12): 1415 - 1418.
- [15] Yang X S. *Nature-Inspired metaheuristic algorithms* [M]. Luniv Press, 2008.