

基于局部对比度测量的红外弱小目标恒虚警检测

姚朝霞¹, 谢 涛²

(1. 台州职业技术学院 机电工程学院, 浙江 台州 318000; 2. 西安交通大学 电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 鲁棒有效的弱小目标检测算法是光电跟踪系统成功的关键。本文针对空中远距离红外弱小目标检测的实际问题, 在人类视觉对比机制基础上提出了一种检测率高、误报率低、处理时间短的红外小目标检测方法。首先, 利用基于恒虚警率的 Top-hat 滤波和自适应阈值操作对原始图像进行预处理, 得到疑似目标区域, 该步骤可大大减少计算时间, 同时保持恒定的虚警概率和可预测的检测概率; 然后, 定义了一种新颖有效的局部对比度测量算子, 并引入图像局部的自相似性计算局部显著图, 该过程不仅可以增强图像目标的视觉显著性, 同时还可以抑制噪声, 提高区域目标的信噪比; 最后, 在显著图基础上, 利用简单的阈值操作就可以获得真实目标。定性定量实验结果表明, 本文提出的方法与 4 种现有检测算法相比, 具有更高的检测率、更低的虚警率和更少的检测时间, 是复杂背景下红外弱小目标检测的有效方法。

关键词: 目标检测; 弱小目标; 恒虚警率; 自适应阈值; 局部对比度增强; 视觉显著图

中图分类号: TN219 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2017)10-0940-06

Robust Small Dim Object CFA Detection Algorithm Based on Local Contrast Measure in Aerial Complex Background

YAO Zhaoxia¹, XIE Tao²

(1. School of Electrical & Mechanical Engineering, Taizhou Vocational & Technical College, Taizhou 318000, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A robust and effective small dim object detection algorithm is the key to the success of an infrared tracking system. To help solve practical tracking problems, we propose a small dim infrared object detection algorithm with a high detection rate, a low false alarm rate, and a short processing time. First, using Top-hat filter and adaptive threshold operation based on a constant false alarm rate, original images are pre-processed to obtain the suspected object area, greatly reducing computation time and detection probability, while maintaining a constant false alarm probability. Second, we define a novel and effective local contrast measurement operator, and introduce a local self-similarity measure of a local saliency map, enhancing not only visual saliency, but also improving signal-to-noise ratio. Finally, a simple threshold operation in the saliency map can be used to detect the real object. Many simulation results show that our proposed algorithm is superior to existing detection algorithms in a complex background.

Key words: object detection, infrared small object, constant false alarm rate, adaptive threshold, local contrast enhancement, visual saliency map

0 引言

众所周知, 红外成像技术具有抗干扰、隐蔽性好、全天时、全天候等优点, 广泛运用在军事领域和民用领域中, 如防空探测、红外制导、广域监控等^[1]。然而, 由于成像距离远, 成像面积小, 目标在图像中多

以小目标的形式存在, 而且受到噪声和背景杂波的影响, 增加了目标检测和跟踪的难度^[2]。在红外搜索跟踪系统中, 如何在复杂背景条件下实现对红外弱小目标稳健的检测与跟踪具有重要的研究意义^[3]。

一般来说, 大多数情况下的弱小目标和背景的灰度分布具有差异性, 明显区别于其所在局部区域, 因

收稿日期: 2017-05-02; 修订日期: 2017-10-11.

作者简介: 姚朝霞 (1979-), 男, 湖南岳阳人, 博士, 台州职业技术学院讲师, 主要研究方向是智能控制应用, 模式识别, 光机电一体化设计等。
基金项目: 民航联合研究基金 (U13331017); 浙江省科技厅基础研究项目 (016C21045); 高等学校访问学者专业发展项目 (FX2012121)。

此大多数红外弱小目标检测算法都是基于这一策略进行, 采用阈值分割法将小目标分割出来, 其经典的方法有最大类间方差法(OTSU)^[4]、最大熵法和迭代法^[5]等。由于目标容易受噪声、云层等背景干扰, 传统的常规算法容易出现漏检, 大大影响检测的效率。红外弱小目标经过多年的发展, 已经取得了长足的进展, 如小波变换, 匹配滤波, 高通滤波器, 贝叶斯目标估计等^[5-6]。这些方法无疑都是为了增强目标与背景的差异性, 提升检测性能。

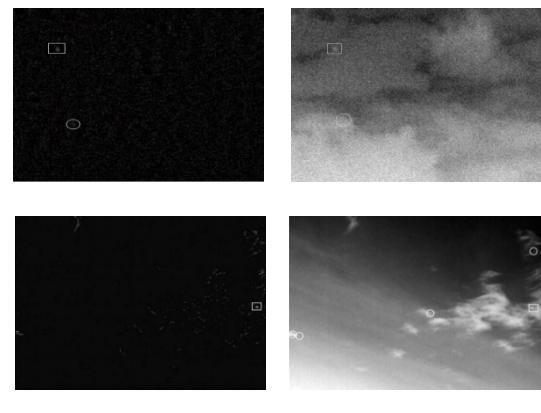
近年来, 人类视觉系统(HVS)已被引入到红外小目标检测应用中, 获得了非常好的检测效果。根据人眼的视觉特性, 在复杂背景区域中存在目标的显著区域往往能引起人眼的迅速注意, 即可以快速准确地识别视觉场中的显著区域, 其显著性特征包括对比度, 大小, 尖锐性等, 现有许多显著区域检测算法通过计算每个图像子区域同其一定范围内的相邻区域的对比度来度量该图像子区域的显著性。在HVS原理的基础上, 国内外学者提出了一系列改进方法。Kim等人在HVS特性基础上, 通过调整和最大化拉普拉斯尺度空间中的信噪比实现目标信号的增强和背景杂波抑制^[7]。Wang等人引入高斯滤波器差分信息提取目标显著区域, 再利用具有高检测精度和效率的视觉注意算法选择出真正目标^[8]。文献[9]提出了一种结合视觉注意理论的显著性检测算法, 并在红外目标检测中表现出了良好的性能和鲁棒性。陈民浩等人提出了一种新的对比度测量算法的LCM检测算法, 提高了目标显著性, 改善了图像信噪比^[10]。仿真实验结果显示此类显著性目标检测算法比传统检测方法更有效。然而, 当图像的噪声和杂波较强时, 大多数算法并不能得到满意的检测效果, 且计算复杂性在某些方法中不能忽略^[11-17]。

本文源于“国内某机场对空弱小目标监控系统项目”, 对闯入禁飞区的消费级无人机等小目标进行检测跟踪。由于探测器所获得的红外图像信杂比低、对比度差, 目标尺寸小, 缺乏形状、纹理等信息, 背景也比较复杂, 这使得红外弱小目标很难被有效地检测出来。本文致力于提供一种检测率高、误报率低、处理时间短的红外小目标检测方法, 并在机场对空监控项目中取得不错的检测效果。

1 红外图像预处理

为了有效抑制红外噪声干扰, 同时减少算法处理的时间复杂度, 本文在微弱小目标识别前对原始图像进行预处理。首先引入传统的Top-hat形态学滤波对原始图像进行处理, 有效增强图像的信噪比。结合红

外图像的性质, 本文结构元素设置为3×7, 图1展示了形态学滤波后的结果, 其中真实目标用矩形标注, 假目标则用小圆圈标注。



(a) 形态学处理图像 (b) 预处理结果

图1 疑似目标预处理结果

Fig.1 Preprocessing results for suspected object

在复杂背景中微弱小目标检测系统中, 本文致力于获取最优目标检测概率, 实现恒虚警, 我们采用了基于恒虚警率的自适应阈值操作。最终, 我们能够获取一些潜在的目标像素。基于恒虚警率的自适应阈值定义如下:

$$T = \mu - \phi^{-1}(p)\sigma \quad (1)$$

式中: T 是自适应阈值; p 是虚警概率; ϕ 是标准正态分布函数; μ 、 σ 是预处理图像的均值与标准方差。给定预处理图像大小 $W \times H$, 其中 $f(i, j)$ 表示坐标 (i, j) 的灰度值, 因此 μ 、 σ 的计算公式如下:

$$\mu = \frac{1}{W \times H} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H f(i, j) \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{W \times H} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H [f(i, j) - \mu]^2 \quad (3)$$

在实际应用中, 阈值可以修改如下:

$$T = \mu - \alpha \phi^{-1}(p)\sigma \quad (4)$$

式中: α 是可控调节系数。若大于该阈值的像素灰度则考虑为疑似目标。实际应用过程中, 可以采用重叠分块处理的方式, 提升精度, 但会增加算法的时间复杂度。仿真实验可以看出, 利用本文提出的自适应阈值分割, 可以找到一些疑似目标, 并排除大量的背景噪声的干扰。接下来, 将在获取的疑似目标区域进行局部对比度增强, 获取相应的局部显著图。

2 弱小目标检测

在低层次视觉注意力机制中, 对比度是非常重要的影响因素。现有的显著区域检测算法通过计算每个图像子区域同其一定范围内的相邻区域的对比度来度量该图像子区域的显著性。人类视觉对比机制意味

着它是目标强度和背景强度之间的对比，但并不是依据目标的亮度，该机制在人类视觉注意力和整个目标探测过程起着非常重要的作用^[18]。为了突出目标与背景的差异，我们需要做的是定义一种有效的局部对比度的度量方式，以便有效鲁棒的获取显著图。由于在预处理阶段，已经选择出多个像素作为疑似目标。因此，本章只需处理这些已被选择的像素区域，大大减少时间复杂度。接下来，我们将详细描述本文的算法和阈值的计算操作。

2.1 局部显著图

基于视觉对比机制，受对比度度量检测算法的启发，我们提出了一个计算显著图的有效算法。图 1(b)展示了所选的候选目标，如矩形框所示。假定所选目标像素的大小为 N ，所选目标像素设定为 $p_k(k=1, 2, \dots, N)$ ，以 p_k 为中心的区域表示为 V_0 。大量的实验仿真测试发现真实的弱小目标的大小不超过 80，其目标块的大小不大于 9×9 。假定 $I(i, j)$ 是像素 (i, j) 的灰度值，且 L_{p_k} 是疑似目标区域 V_0 中最大灰度值，其表达式如下：

$$L_{p_k} = \max(I(i, j)), \quad I(i, j) \in V_0 \quad (5)$$

以 V_0 为中心定义一个图像块 V ，其边长是 V_0 的 3 倍。因此，绕着 V_0 可以获得 8 个不重叠的图像块 $V_n(n=1, \dots, 8)$ ，其大小与 V_0 相同。在 V 中， V_0 的各个邻域块可以分别获得其相应的中值 m_n ，即：

$$m_n = \text{median}(I_n(i, j)) \quad I_n \in I, n=1, \dots, 8 \quad (6)$$

假设 M_{p_k} 是这些中值的平均值，能够表示为：

$$M_{p_k} = \frac{1}{N_v} \sum_{n=1}^{N_v} m_n \quad (7)$$

式中： N_v 是中值的数量，本文设置为 8。不同于传统 LCM 算法，LCM 采用邻域块最大平均强度，而本文采用的是平均中值强度。周围邻域具有较高亮度的孤立背景噪声的影响将被减弱，同时也将降低虚警率。同时，被检测为真实目标的概率被表示为显著值。局部对比值定义为：

$$C_{p_k} = W_{p_k} \frac{L_{p_k}^2}{M_{p_k}} \quad (8)$$

式中： W_{p_k} 是与疑似目标可信度相关的权值，被用来使目标区域更加显著。这里我们将引入局部相似度作为权值，两图像块的相似度可以很容易采用均方差的平方和来表示。以像素 p 为中心的图像块 V_0 和其邻域之间的局部相似度可以定义如下：

$$\text{SSD}_{p_k}(n) = \sum_{i,j} |V_0(i, j) - V_n(i, j)|^2, (n=1, 2, \dots, 8) \quad (9)$$

式中： (i, j) 是图像块 V 中的像素位置坐标。以 p_k 为中心的区域是目标的概率可以通过如下公式进行计算：

$$w_{p_k} = \frac{1}{8} \sum_{n=1}^8 \text{SSD}_{p_k}(n) \quad (10)$$

式中： $w_{p_k} (k=1, 2, \dots, N)$ 是目标可信的度量值，将 w_{p_k} 归一化到 [0, 1]，其归一化形式如下：

$$W_{p_k} = \frac{w_{p_k} - w_{\min}}{w_{\max} - w_{\min}} \quad (11)$$

式中： w_{\max} 与 w_{\min} 分别表示 w_{p_k} 中的最大值与最小值。由于目标具有与周围背景不连续的特征，且与背景几乎没有相似之处，也就是说真实目标区域的像素权值比其他非目标区域的权值大。可以看出，一旦计算出所有像素点的局部对比度值 C_{p_k} ，就可以获得图像的显著图。

2.2 阈值分割

一旦获得所选择像素的局部 LCM，就可以在图像中提出最显着的目标区域。为了消除噪声的影响并准确地提取目标，我们对 LCM 进行简单的阈值操作，其阈值如下：

$$T = g \times \text{max(LSM)} \quad (12)$$

式中：max(LSM) 表示局部显著区域的最大值； g 是相应的阈值调节参数。在实际应用中 g 的范围是 [0.5, 0.9]。如果像素点 p_k 的局部对比值 C_{p_k} 大于阈值 T ，则认为该像素为目标点。

3 实验结果及其分析

试验采用某机场红外监控系统作为采集平台，其探测器是采用高德红外的 C615M 碲镉汞中波红外焦平面探测器。仿真平台采用 MATLAB(R2010a)，CPU 为 Core 2 处理器：主频 2.94 GHZ，内存 4G；操作系统：WINDOWS 10 上运行。

3.1 参数设置

为了评估本文提出的算法性能，本文采用了 3 段红外视频进行处理，图像大小为 640×512 的分辨率，帧频 50 Hz。实验中，虚警 P 设置为 10^{-4} ， $\alpha=2.5$ ， $g=0.6$ 。图 2(a)是原始红外图像；图 2(b)展示了可能的目标像素；图 2(c)则是检测的结果。从图 2 可以看出，本文提出的算法在测试序列上检测到的目标没有虚警。

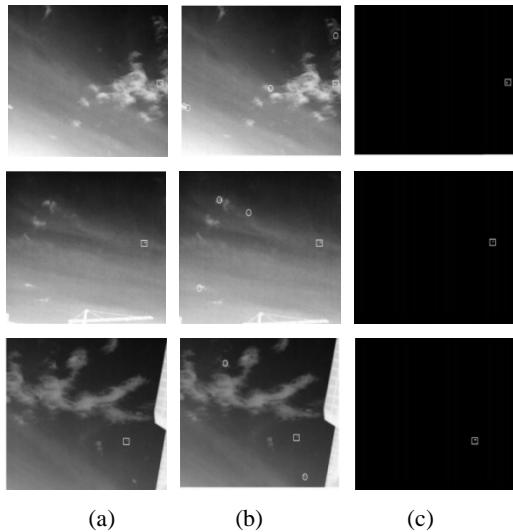


图2 红外小目标预处理结果: (a)原始红外目标; (b)预处理后的疑似目标区域; (c)本文处理后的检测结果

Fig.2 Preprocessing results: (a) Original infrared image;
(b) Suspected object area; (c) Detection results

3.2 性能对比

本文采用统计所有红外序列中检测率(DR)和虚警率(FR)的平均概率,以验证我们所提出的方法的有效性,其结果如表1,表2所示。检测率与虚警率分别定义如下:

$$DR = \frac{\text{检测到的目标个数}}{\text{真实目标个数}} \times 100\%$$

$$FR = \frac{\text{虚假目标个数}}{\text{总目标个数}} \times 100\%$$

从表2中各算法虚警率和检测检测率对比可以看

出,我们提出的算法时效果最好的。

图3则展示了本文所提出算法在不同场景检测流程效果图。定性对比可以看出,在恒虚警检测算法的基础上可以完全检测出所需目标,虽然第二行检测出了虚假目标,对于红外监控系统来说,只要不漏检,虚假目标完全可以通过后续场的检测进行消除。同时,由于系统没有目标识别的功能,即便检测出孤立的云朵等干扰点目标,也是正常合理的,满足弱小目标检测的应用需求。

为了测试本文提出算法的有效性和实用性,Top-hat算法,最大均值滤波算法,DoG算法^[17]以及LCM算法^[10]被采用作为对比算法,其最终分割结果如图4所示(由于所检测目标的对比度很微弱,难以在原图中区分。为了便于分析,我们仅仅在最终的分割结果上进行算法对比)。为了直观地对比各算法的性能,约定矩形标注的目标为真实目标,而圆圈标注的则是虚假目标。

为了准确客观地分析各算法的有效性,实验结果定性描述如下:Top-Hat算法由于采用全局的灰度变换,虽然能够准确找到小目标的位置,但是当信噪比较低时,则无法有效地检测出弱小目标。同时,从实验结果可以看到,即便背景比较平缓,目标和背景的对比度较高,但是直接分割的效果并不好,主要是因为背景中也有很多高亮区域,使得检测结果出现较大的虚假目标。最大均值滤波都是一种非线性平滑技术,通过将每一像素点的灰度值设置为该点某邻域窗口内沿不同方向的均值的最大值,其可以很好地保护

表1 不同红外视频上不同检测算法的对应目标检测率

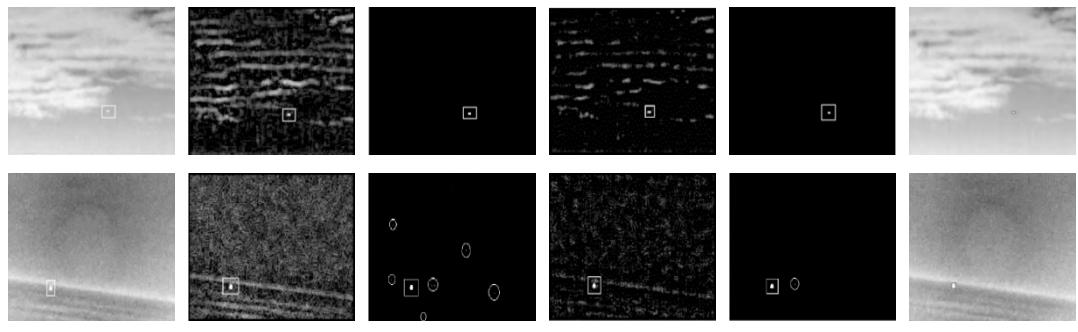
Table 1 Detection rates for different infrared video

序号	Top-hat 算法	MAX-Mean	DoG 算法	LCM 算法	本文算法
1	50.34	30.67	57.21	90.64	97.54
2	65.77	45.55	77.92	90.31	100
3	45.91	32.54	60、10	85.66	96.99

表2 不同红外视频上不同检测算法的对应目标虚警率

Table 2 False alarm rate for different infrared video

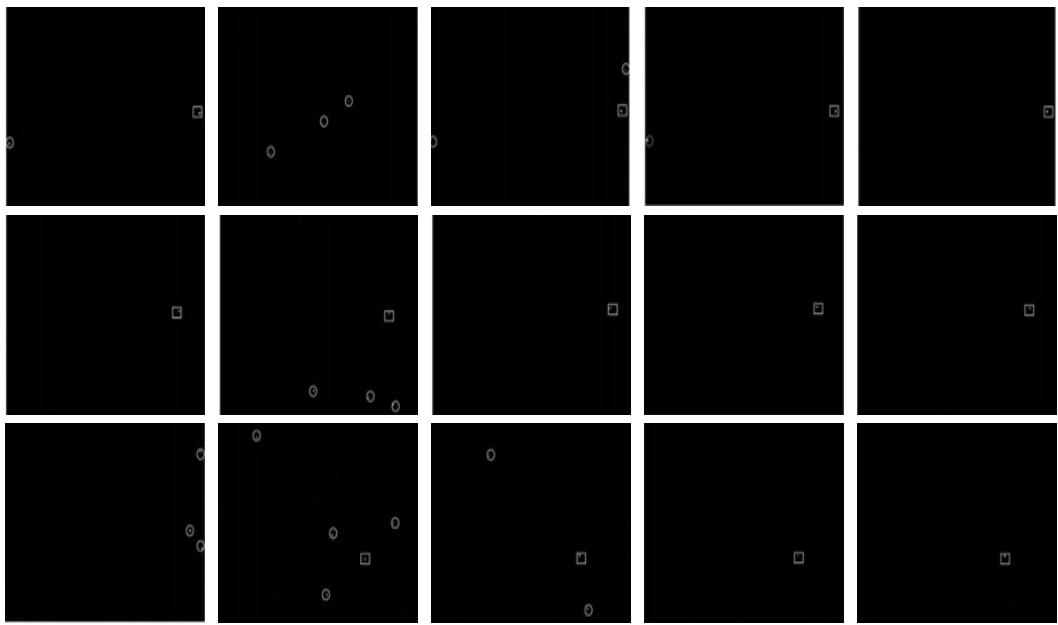
序号	Top-hat 算法	MAX-Mean	DoG 算法	LCM 算法	本文算法
1	77.73	90.76	70.13	13.01	2.74
2	50.01	84.43	68.54	11.85	0.57
3	74.79	80.45	89.14	12.94	1.12



(a) 原始图像 (b) 预处理 (c) 恒虚警阈值 (d) 局部显著图 (e) 阈值分割 (f) 目标关联

图3 不同场景本文检测算法检测流程效果图

Fig.3 Detection diagram for different scene



(a) Top-hat 算法 (b) MAX-Mean (c) DoG 算法 (d) LCM 算法 (e) 本文算法

图4 各算法的定性检测结果对比

Fig.4 Qualitative comparison for all algorithms

细节信息，是经典的显著性增强弱小目标并平滑噪声的方法。从实验结果可以看出该算法的虚警主要出现在图像的边缘部分或云层区域，表明该算法对于边缘确实很敏感；由于 DoG 算子对图像中的背景边缘和角点的响应与对图像中的亮点响应截然不同，这一特点非常有利于运用尺度空间算法检测点状的红外小目标，然而 DoG 算法对于局部噪声和边缘响应比较敏感，所以给出的候选点中虚假目标较多，同时该算法对复杂背景图像的检测效果不理想。LCM 算法在局部信息上进行了目标的增强和背景的抑制，因此 LCM 算法对简单背景红外小目标图像能够得到较好的检测效果，但是随着图像复杂度的增加，目标的检测概率和虚警概率会严重增大。从定性定量结果可以看出本文提出的检测算法比 LCM 算法具有更高的检测性能，对简单背景图像和复杂背景图像都具有更高

的检测概率和更低的虚警概率，大大地拓展了 LCM 算法在复杂背景下的适应性。通过以上分析可以看出本文提出的算法在不同场景下目标检测的效果都优于现有其他算法，统计数据定量的表明本文算法在处理复杂场景下微小目标检测的性能，为后续目标跟踪奠定了良好的基础。

3.3 真实场景仿真对比

针对禁飞区内小型飞行器的目标识别技术的需求日趋强烈，消费级无人机具有低、慢、小的特点，必须针对小型飞行器的红外成像特点，对典型的消费级无人机识别分类技术进行研究，以充分发挥系统在复杂空域环境下的独特作用。本文对大疆无人机（PHANTOM 3）进行了检测跟踪，其结果如图 5 所示。

图 5(b)和(c)中无人机在云中飞行，从图中可以看出此时无人机的对比度较弱，极易淹没在背景中，从

实验过程表明本算法可以稳定地检测出复杂背景下的旋转翼消费级无人机。图5(d)左上角是闯入视场的飞鸟，本算法也能将其检测出来，这是由于系统没有



图5 系统对大疆无人机检测效果

目标识别的功能，检测出飞鸟是正常的状态。本文算法全过程能检测出目标，没有出现漏检，足以说明本文算法适用于机场弱小目标检测。

4 结论

本文在人类视觉对比机制基础上提出了一个有效的红外弱小目标检测算法。利用基于恒虚警率的Top-hat 滤波和自适应阈值操作对原始图像进行预处理，得到疑似目标区域，该步骤可大大减少计算时间，同时保持恒定的虚警概率的期望和可预测的检测概率。定义了一种新颖有效的局部对比度测量算子，并引入图像局部的自相似性计算局部显著图，该过程不仅可以增强图像目标的视觉显著性，同时还可以抑制噪声，提高区域目标的信噪比；最后，在显著图基础上，利用简单的阈值操作就可以获得真实目标。试验结果表明，本文提出的复杂空中背景下弱小目标检测算法在检测率、虚警率以及检测时间上都优于现有常用检测算法。

参考文献：

- [1] 张风超, 杨杰. 红外图像序列的目标增强和检测[J]. 红外与激光工程, 2014, **33**(4): 380-384.
ZHANG Fengchao, YANG Jie. Object enhancement and detection of infrared image sequences [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 380-384.
- [2] 邹江威, 陈曾平. 应用形态学与图像流法的空间小目标提取方法[J]. 光电工程, 2005, **32**(4): 13-15.
ZOU J W, CHEN Z P. Application of morphology and image flow in spatial small object extraction[J]. *Photoelectric Engineering*, 2005, **32**(4): 13-15.
- [3] 杨万海. 多传感器数据融合及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 52-56.
YANG Wanhai. *Multi-sensor Data Fusion and Its Application*[M]. Xidian University Press, 2004: 52-56.
- [4] Deshpande M, Er H, Ronda V, et al. Max-mean and max-median filters for detection of small-targets[C]//Proc. SPIE, 1999, **3809**: 74-83.
- [5] XU Y. Small moving target detection in infrared image sequences[J]. *Infrared Technology*, 2004, **24**(6): 27-30.
- [6] Matthews K E, Namazi N M. A Bayes decision test for detection uncovered background and moving pixels in image sequences[J]. *IEEE Trans. Image Process*, 1998, **7**(5): 720-728.
- [7] KIM Y, YANG Y, LEE J, et al. Small target detection utilizing robust methods of the human visual system for IRST[J]. *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, 2009, **30**(9): 994-1011.
- [8] WANG X, LV G, XU L. Infrared dim target detection based on visual attention[J]. *Infrared Phys. Technology*, 2012, **55**(6): 513-521.
- [9] MA Qi, TAO C, YANG C C, et al. A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds[J]. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2013, **10**(3): 495-499.
- [10] CHEN C L P, LI H, WEI Y, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2014, **52**(1): 574-581.
- [11] Chatfield K, Philbin J, Zisserman A. Efficient retrieval of deformable shape classes using local self-similarities[C]//Proc. IEEE ICCV Workshops, 2009: 264-271.
- [12] Shechtman E, Irani M. Matching local self-similarities across images and videos[C]//Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recog., 2007: 1-8.
- [13] GAO C, ZHANG T, LI Q. Small infrared target detection using sparse ring representation[J]. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.*, 2012, **27**(3): 21-30.
- [14] ZENG M, LI J, PENG Z. The design of top-hat morphological filter and application to infrared target detection[J]. *Infrared Phys. Technol.*, 2006, **48**(1): 67-76.
- [15] HOU J C, DONG S. P. Research of adaptive threshold of constant false alarm detection[J]. *Syst. Eng. Electron., Res. Inst.*, 1994(7): 8-12.
- [16] Sevg L. Hypothesis testing and decision making: constant-false-alarm rate detection[J]. *IEEE Antennas Propag. Mag.*, 2009, **51**(3): 218-224.
- [17] Nilufar S, Ray N, ZHANG H. Object detection with DoG scalespace: a multiple kernel learning approach[J]. *IEEE Trans. Image Process*, 2012, **21**(8): 3744-3756.