DOI:10.19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2023. 04. 011

https://xuebao. xaut. edu. cn

引文格式:鲁晓锋,李思训,柏晓飞,黑新宏.基于区域生长与区域覆盖比的红外弱小目标检测[J].西安理工大学学报,2023, 39(4):547-556.

LU Xiaofeng, LI Sixun, Bai Xiaofei, HEI Xinhong. Infrared small target detection based on region growth and region coverage ratio[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023,39(4): 547-556.

基于区域生长与区域覆盖比的红外弱小目标检测

鲁晓锋,李思训,柏晓飞,黑新宏

(西安理工大学 计算机科学与工程学院,陕西西安 710048)

摘要:为了提高复杂背景下红外弱小目标的检测能力,提出了一种基于区域生长与区域覆盖比的 新方法。本文中主要针对目标的三个特征:1)目标的最大灰度值与邻域背景之间存在较为明显的 灰度间隙;2)目标在局部范围内具有较高的灰度值;3)目标像素分布较为紧凑,建立了一种新的小 目标检测算法。首先,对原始图像计算局部对比度并筛选出候选种子点。其次,对每个候选种子点 在原始图像上进行阈值区域生长算法并计算得到区域覆盖比(RCR)。然后,使用自适应尺寸的三 层窗口计算得到自适应灰度差(AGVD)。最后,采用阈值分割方法分离出真实目标。通过在真实 测试数据集上的实验表明,与现有算法相比,所提出的算法具有较高的检测精度和较低的虚警率。 关键词:红外图像;小目标检测;复杂背景;区域生长

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2023)04-0547-10

Infrared small target detection based on region growth and region coverage ratio

LU Xiaofeng, LI Sixun, Bai Xiaofei, HEI Xinhong

(Faculty of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China) Abstract: To improve the detection ability of infrared small targets in complex backgrounds, this paper proposes a novel method at the region growth and region coverage ratio. This paper focuses mainly on the following three characteristics of the target: 1) there being an obvious gray gap between the maximum gray value of the target and the neighborhood background; 2) the targets having high gray values in the local range; 3) the target pixel distribution being compact. A new small target detection algorithm is established in this paper. Firstly, the local contrast of the original image and screen out the candidate seed points is calculate. Secondly, the threshold region growth algorithm is performed on the original image for each candidate seed point, with the region coverage ratio (RCR) calculated. Then, the adaptive gray value difference (AGVD) is calculated using the three-layer window in an adaptive size. Finally, the threshold segmentation method is used to obtain the real targets. Experiments on real test data sets show that the proposed algorithm has a higher detection accuracy and a lower false alarm rate than the existing algorithms. **Key words:** infrared image; small target detection; complex background; region growing

红外搜索与跟踪(infrared search and tracking system, IRST)系统由于具有全天候成像,不受电磁干扰和探测距离较远等优点,因此在遥感和监测

领域具有广泛的应用^[1]。但在实际应用中由于红外 探测系统与目标的距离较远,红外弱小目标缺少具 体的形状和纹理信息^[2]。此外,红外小目标容易受

收稿日期: 2022-08-05; 网络首发日期: 2022-12-13

网络首发地址: http://kns. cnki. net/kcms/detail/61. 1294. N. 20221212. 1815. 004. html

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62076201,U1934222)

通信作者:鲁晓锋,男,博士,副教授,主要研究方向为智能交通系统、目标检测与跟踪、计算机视觉等。E-mail: luxiaofeng@xaut.edu.cn

到背景杂波和噪声的干扰,因此复杂情况下的红外 弱小目标检测是一项具有挑战的任务。

在过去的几十年里,为了解决上述问题,人们提出了各种有效的红外小目标检测算法^[3-4]。这些算法一般可以分为两类:跟踪前检测算法(detect before track, DBT)^[5-6]和检测前跟踪算法(track before detect, TBD)^[7-8]。通常情况下 TBD 类检测的 算法在具有较高精度的同时也具有更高的时间复杂度,并且只能对移动的目标和固定的背景具有较好的检测性能,检测范围具有一定的局限性。本文只关注基于单帧的检测算法。

基于滤波的检测方法是最早应用于红外弱小目标检测领域的方法。主要通过设计滤波器来达到抑制背景的效果。Wang等^[9]基于传统频域滤波对高低频的目标与背景分离的检测方法提出了 NVMD (nonnegativity-constrained variational mode decomposition)算法,该算法能够自适应地对输入图像进行分解,去除背景部分,达到实现目标检测的目的。总体上,这类方法的计算量较小,但是检测效果较差。

随着深度学习的发展,许多研究人员将神经网 络运用在了红外弱小目标探测领域中,并取得了令 人满意的效果^[10]。Dai 等^[11]设计了一种新的注意 力局部对比网络(attentional local contrast networks, ALCNet), 它将基于分割网络的模型与传 统的 LCM 机制相结合,并取得了良好的检测效果。 但其未充分考虑目标与背景像素的内在关联,难以 在复杂背景下准确地检测到目标。为此, Wang 等[12]提出了一种由粗到细的内部注意力感知网络 (interior attention-aware network, IAANet),利用 变压器解码器对粗目标区域中像素之间的注意力进 行建模,输出注意力感知特征,并取得良好的检测效 果。然而,当背景变化较大时,这类算法的精度将会 大大降低。此外基于深度学习检测算法的性能依赖 于大量的训练样本。在实际情况中由于背景的复杂 性和真实数据集的稀缺性,使得该类方法目前难以 得到广泛的应用。

传统的红外弱小目标检测算法认为红外图像主要由目标、背景和噪声组成。通过设计不同的方法 来增强目标和抑制背景和噪声来分离出真实目标。 基于图像数据结构的方法认为红外图像中的目标是 稀疏的,背景是低秩的。根据目标和背景的不同特 征,可以将目标从图像中分离出来。Zhang 等^[13]提 出了一种非凸秩逼近最小化与加权 L1 范数的检测 算法(non-convex rank approximation minimization, NRAM),该方法很好地抑制了背景,并在一 定程度上降低了虚警率。Kong等^[14]提出了一种新 的 IPT(infrared patch-tensor)模型,该模型提高了 对背景秩的精确表达和对背景噪声干扰的鲁棒性。 但是这类算法对于簇状云雾和水纹等场景会产生较 高的虚警率,同时由于需要多次迭代,导致算法难以 满足实时的要求。

近些年来,基于人类视觉系统(human visual system, HVS)机制在红外小目标检测方面的应用 十分广泛并取得了优异的效果。针对目标和周围之 间的较大差异,研究者们提出了许多基于局部对比 度的方法来分离目标和背景。Chen 等^[15]首先提出 了局部对比度测量(local contrast measure, LCM) 算法,该算法主要关注图像中对比度最明显的区域, 而不是最亮的区域。在 LCM 的基础上,研究者们 提出了大量的改进算法。Wei 等^[16]提出基于多尺 度块的对比度测量(multiscale patch-based contrast measure, MPCM),利用目标与对称单邻域的信息 差异实现了亮暗目标的快速检测。Han 等^[17]提出 了一种加权强化 LCM 方法(weighted strengthened local contrast measure, WSLCM),该方法将高斯滤 波和背景估计相结合,生成显著性映射,再将显著性 映射与加权函数相融合,测量图像的对比度差。 Chen 等^[18] 提出了一种 FAMSIS (fast adaptive masking and scaling with iterative segmentation) 目 标检测算法,通过设计了一种迭代分割算法来提取 真实目标。He 等^[19]通过测量原始图像的多尺度熵 差和局部灰度差来检测小目标。Wu 等[20] 提出了 一种三层滑动窗口方法来获得图像的双向边界梯 度,然后根据得到的梯度测量小目标与背景的对 比度。

上述许多基于 HVS 的方法都被证明检测效果 优于传统的检测算法。然而,这些方法仍然存在几 个问题。①由于实际情况中目标的尺寸是不确定的 (一般在 2×2 到 9×9 个像素之间),许多算法的检 测性能很大程度上受制于对目标的估计的经验值, 尤其是对目标尺寸的估计。当目标尺寸与背景发生 较大变化时,其检测性能往往达不到预期结果。② 一些基于多尺度的检测方法,能够在不同尺度下的 目标序列集上保持良好的检测效果,但是这类方法 可能会增强一些复杂红外图像中的背景簇,导致最 终检测结果的虚警率较高。③这类算法的检测精度 与算法所需消耗的时间往往成正比,难以同时兼顾 检测精度与时间复杂度。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于区域

生长与区域覆盖比的红外弱小目标检测算法。本算 法主要关注目标的三个特征:目标在局部区域具有 较高的灰度值;目标与背景之间存在明显的灰度间 隙;目标的灰度分布相对紧凑。本算法利用目标的 第一个特征计算局部对比度来增强目标与抑制背 景,通过第二个特征利用区域生长算法来自适应调 整目标的尺寸和生长轨迹,最后通过目标的灰度分 布结构和目标的灰度值特征来分离出真实目标。

本文主要贡献可以总结如下。

 提出了一种阈值区域增长算法。由于目标 和背景的分布不同,它们的生长轨迹明显不同。通 过此方法在获得目标尺寸和形状的同时扩大了目标 和背景之间的差异。

2) 不仅考虑了目标的高灰度值和小尺寸,还考 虑了目标的紧凑分布,根据生长轨迹设计了区域覆 盖比(RCR)这一特征。

3)设计了一个具有自适应尺寸的三层窗口。 窗口的大小可以根据不同大小的目标进行调整,然 后计算自适应灰度差(AGVD)来抑制背景边缘。

通过在真实红外数据集上的实验结果表明,本 文所提出的算法与现有的算法相比,在具有更好检 测性能的同时还有良好的鲁棒性。

1 筛选候选种子点

由于区域生长算法需要对种子点进行生长,然 而对红外图像中每个像素都进行区域生长会产生大 量的时间消耗。因此,我们首先对原始红外图像计 算局部强度灰度差来增强目标与抑制背景。在处理 后的图像中根据灰度信息来筛选出可能是目标的候 选种子点来进行进一步的操作。

1.1 筛选候选种子点

为了增强目标与抑制高亮背景,对原始图像进行处理。给定一个 *n*×*n* 大小的图像补丁,其局部区域的平均值计算方法如下:

$$\overline{M} = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} I_{(i,j)} - I_{0} \right)$$
(1)

式中: N 为补丁中像素的总个数; I₀ 表示补丁中心 像素点的灰度值; I_(i,j) 表示补丁中(i,j)位置处所 对应的灰度值。中心像素的局部强度灰度差为:

$$P = \begin{cases} (I_0 - \overline{M})^2, & I_0 > \overline{M} \\ 0, & I_0 \leqslant \overline{M} \end{cases}$$
(2)

在计算出图像中各像素的局部强度灰度差后, 得到了处理后的图像 Imap。从图 1 可以观察到,通 过计算局部强度灰度差可以有效地增强目标,抑制 高亮背景区域。但是这种方法也可能会保留一些高 亮边缘或强干扰背景区域,因此需要对每个候选点 计算本文所设计的两个特征来实现将真实目标与背 景分割。



Fig. 1 The image being preprocessed

在得到处理后的图像之后,选择 Imap 中灰度 最大值:

$$(x,y)_i = \arg \max_{x,y \in \operatorname{Imap}} (P(x,y))$$
(3)

式中:(x,y)_i表示第i个种子点的坐标;P(x,y)表示预处理图像中点(x,y)的灰度值;Imap表示预处理后的图像。为防止种子点聚集所导致的将一个目标误检为多个目标和漏检实际目标的结果,以每个种子点为中心设置一个 15×15 大小的保护区域,区域内的像素点不参与下一次种子点的筛选。重复这个过程直到获得 n_p 个候选种子点,将 n_p 个种子点映射到原始图像中相应的坐标位置。

1.2 区域覆盖比

红外弱小目标一般符合二维高斯分布,目标像 素点的最大灰度值与周围背景之间具有明显的灰度 间隙。此外,目标分布相对集中,而背景像素的灰度 值分布一般比较均匀、平缓。在本文中针对目标的 这一特性设计了一种新的特征"区域覆盖比"来更好 地分离目标与背景区域。将 Imap 中得到的各个候 选种子点的位置信息映射到原始图像中,以方便进 行下一步的操作。

本文设计了一种阈值区域生长算法来计算区域 覆盖比。我们使用 Aⁱ 表示第 i 个种子点在第 l 次生 长过后的区域,用 Dⁱ 表示满足生长条件的 Aⁱ 的候 选区域,则有:

$$D_l^i = \{(x,y) \mid (x,y) \notin A_l^i, (x,y) \in N_l^i,$$

 $I(s_i) - k_{th} \leq I(x,y) \leq I(s_i) + k_{th}$ (4) 式中: k_{th} 为阈值参数; N_i^i 表示 A_i^i 中像素点的邻域 区域; $I(s_i)$ 表示第 i 个种子点的灰度值。每一次值 最大的点作为种子点。从 D_i^i 中选取灰度值最大的 像素作为生长点并入到生长区域中:

$$(x^*, y^*) = \arg \max_{(x, y) \in D_l^i} I(x, y)$$
(5)

将生长点并入到生长区域中:

$$A_{l+1}^{i} = A_{l}^{i} \bigcup \{ (x^{*}, y^{*}) \}$$
(6)

根据国际光学工程学会(Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, SPIE)对红外弱小目标的定义,对于 256 pixel×256 pixel 的图像,目标的 总像素数小于图像总像素数的 0.12%(即小于 81 个像素),所以本论文中规定 A_i^i 中像素个数最多不 超过图像总像素的 0.12%个像素。

通过对每个候选种子点的区域生长,能够得到 每个候选种子点的尺寸信息。

见图 2,为了便于观察每个种子点的生长轨迹, 将生长轨迹的灰度值设置为最大灰度值,而将其他背 景的灰度值设置为零。从图 2 中可以看出,真实目标 的生长轨迹相对集中,而背景杂波的生长轨迹相对混 乱。根据每个生长区域内像素的个数在生长区域中心 位置生成一个矩形区域,由于目标的生长轨迹较为集 中,因此所生成的矩形区域基本可以完全覆盖目标。 而背景的生长区域较为杂乱,所生成的矩形区域通常 仅能覆盖生长区域的一部分。通过计算矩形区域覆盖 生长区域像素的比例来达到区分目标与背景的目的。



(a) 原始图像



(b)每个候选种子点的 生长轨迹图像

图 2 原始图像及生长轨迹图像 Fig. 2 Original image and growth trajectory image

在得到每个种子点的生长区域后,用C_i表示Aⁱ中 像素点的个数。由于种子点可能并不是生长区域的中 心点坐标,因此需要计算每个生长区域的中心坐标 位置:

$$x_{\rm mid}^{i} = \frac{\max x + \min x}{2}$$
(7)

$$y_{\text{mid}}^{i} = \frac{\max_{(x,y) \in A^{i}} y + \min_{(x,y) \in A^{i}} y}{2}$$
(8)

以 $(x_{mid}^{i}, y_{mid}^{i})$ 为中心以 a_i 为边长生成一个矩形区域 Z_i ,其中边长定义为:

$$a_i = \left[\sqrt{C_i}\right] \tag{9}$$

式中 C_i 表示第i个生长区域中像素点的个数。用 $h_i(x)$ 表示矩形区域与生长区域相交的像素点:

$$h_i(x) = \{ x \mid x \in Z_i \cap A^i \}$$
(10)

式中 Z_i 表示第 i 个种子点所对应的矩形覆盖区域。 为了方便计算区域覆盖比,用 m_i 表示 h_i(x) 中像素 点的个数。第 i 个种子点的区域覆盖比的计算方式 如下:

$$R_i = \frac{m_i}{C_i} \tag{11}$$

通过区域覆盖比这一特征能够很好地区分目标 和背景杂波。

1.3 自适应灰度差

对于一些复杂的背景,仅依靠区域覆盖比可能 会产生少量的虚警点。为了进一步提升检测精度, 本文根据红外弱小目标的灰度特征设计了"自适应 灰度差"来进一步分离真实目标。

见图 1,经过处理后的 Imap 图像上保留了一些 高亮背景边缘,这是因为这些背景边缘在局部范围 内也具有较高的对比度。但是相较于目标的点状分 布,高亮背景边缘一般呈现出线状分布的特点,因此 采用三层窗口计算自适应灰度差来达到抑制背景的 效果。

将上一节得到的矩形覆盖区域映射到 Imap 上。(x_{mid}^{i} , y_{mid}^{i})为三层窗口的中心坐标。由第二部 分得到的第 i个种子点的内层窗口的尺寸为 $a_i \times a_i$,它表示目标所在的区域。中间窗口的尺寸为 ($a_i + u$)×($a_i + u$),对于一些形状不规则的真实目 标,中间窗口在计算自适应灰度差时能起到保护作 用。外层窗口的尺寸为($a_i + v$)×($a_i + v$),它表示 背景区域自适应灰度差的计算方法如下:

$$D_{i} = \max_{(x,y)\in Z_{i}} P(x,y) - \max_{(x,y)\in E_{i}} P(x,y)$$
(12)

式中: Z_i 表示内部窗口区域; E_i 表示外部窗口区 域; P(x,y) 表示预处理图像中点(x,y) 处的灰度 值。借助于区域生长得到了每个候选种子点确切的 形状和大小信息。见图 3,由于真实目标呈点状分 布,内层窗口基本能够完全覆盖目标,即使目标的形 状不规则,部分目标像素也会位于中间窗口,不会影 响到自适应灰度差的计算。而背景的生长轨迹一般 呈线性分布,内层窗口仅能覆盖其生长轨迹的一部 分,还有一部分会位于外层窗口区域,因此非目标候选 种子点的自适应灰度差的值会远小于真实目标的值。



图 3 真实目标和背景边缘的三层窗口 Fig. 3 Three-layer window diagram of the real target and the background clutter

1.4 阈值分割

在判别阶段,通过阈值分割的方法从 n_p 个种子 点中筛选出真实目标。由于目标的自适应灰度差与 区域覆盖比两个特征显著高于背景杂波,因此每个 种子点置信度的计算方法如下:

$$C_i = R_i \times D_i \tag{13}$$

式中: *R_i* 表示第*i* 种子点区域覆盖比的值; *D_i* 表示 第*i* 种子点自适应灰度差的值。目标的*C_i* 值应该显 著地高于背景杂波的*C_i* 值。 阈值的定义为:

$$T = \mu + k\sigma \tag{14}$$

式中: μ 和 σ 分别表示 n_{p} 个候选种子点置信度的均 值和标准差; k 根据经验所设定。通过实验发现当 k 的值设定为 2 时,本文所提算法能够适用于不同 的场景(天空,建筑,海洋等)。

2 实验结果与分析

为了验证所提算法的有效性,本节对三个真实数据集进行了实验。所有的实验都是在具有 16 GB 内存和 2.69 GHz Intel i5 处理器的个人电脑上进行,代码是在 MATLAB 2016b 上运行实现。

在本文中需要设置五个重要的参数:种子点的 个数 n_p ,最大灰度区域生长的像素个数 l,阈值生 长参数 k_{th} ,保护窗口和背景窗口的尺寸,以及阈值 分割的参数 k_o .通过红外小目标的特点以及实验结 果,将 n_p 设置为 20,将 n_k 设置为 10,将保护窗口的 尺寸设置为 $a_i + 2$,将背景窗口的尺寸设置 $a_i + 4$, 根据实验经验将 k 设置为 2。这些参数在后续不同 数据集的实验中都不需要改变,体现出所提算法对 于不同背景下的图像具有良好的鲁棒性。

在不同背景和目标大小的数据集上进行了实验。三个数据集的信息见表 1,背景涵盖了天空、海洋和陆地。

表 1 数据集详细信息 Tab.1 Details of datasets

数据集	帧数	图像分辨率	背景	目标尺寸					
数据集1	250	256×256 , 640×512	云雾、天空和建筑	3×3 到 7×9					
数据集 2	260	640 imes 512	云雾、岩石和树木	3×3					
数据集 3	260	256 imes 256	天空和海洋	5×3 到 7×7					

首先,为了验证所提算法对不同强度弱小目标 的有效性,本文选择一张目标周围背景是纯色的红 外图片,并对该图片中的目标进行不同程度的削弱, 由此形成一个数据集。图4是不同对比度下算法对 图像的检测效果。对比度 CR 的定义为:

$$r_{\rm C} = \frac{\mu_{\rm t}}{\mu_{\rm b}} \tag{15}$$

式中 µ_t 和 µ_b 分别表示目标的灰度均值和背景的灰 度均值。通过实验我们可以观察到,当对比度高于 1.083 3 时,所提算法取得了良好的检测效果,这表 明我们所提出的算法有助于对弱小目标的检测。当 对比度低于 1.080 4 时所提出的算法失效。这一方 面是因为目标的强度较弱导致漏检,另一方面是因 为生长阈值参数是依据经验值所设定的,当目标中 心的灰度值与背景灰度值的差值小于阈值参数时, 所提出的算法的检测效果显著下降。

其次,为了检验所提算法的抗噪声能力,本文对 一张红外图像添加不同水平的高斯噪声,形成一个 数据集。图 5 是不同信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)下算法对图像的检测效果。SNR 的定义为:

$$r_{\rm sn} = \frac{\mu_{\rm t} - \mu_{\rm b}}{\sigma_{\rm b}} \tag{16}$$

式中 μ_t , μ_b 和 σ_b 分别表示目标的灰度均值,背景的 灰度均值和方差。在实验中,当信噪比大于 1.143 时, 算法取得了良好的检测效果;当信噪比小于 1.083 时, 所提出的算法没能检测到目标。因此这表明本文所提 出的算法能够处理信噪比的下限在 1.14 左右。这表 明我们所提出算法具有一定的抗干扰能力。



(b) 检测结果





图 5 不同级别噪声图像的检测结果 Fig. 5 Detection results of different levels of noisy images

图 6 展示了所提算法对一些具有代表性的红外 图像的检测结果。具体来说,(a)和(d)表示原始图 像,从图中可以看出,红外图像的成像背景是比较复 杂的。当目标位于天空和海洋背景中时,目标有时 会淹没在云层中,导致目标具有较低的信噪比,给检 测带来了一定的困难。此外,云雾的边缘和簇状云 也会增加错误检测的概率。当目标位于地面背景 时,裸露的岩石和道路等可能被误检为目标。

图 6(b)和(e)表示每个图像的 AGVD-RCR 空间图,其中水平坐标表示每个候选种子点的 RCR 值,垂直坐标表示每个候选种子点的 AGVD 值,真 实目标用红色框标记。从图中可以看出,真实目标 的 AGVD 值和 RCR 值明显高于其他候选种子点。 根据这两个特征,可以将目标从背景中分离出来。 验证所提出特征的有效性。 图 6 中(c)和(f)表示最终将目标与背景分离的 效果图,其中图像上的蓝色圆圈标记候选目标,而红 色圆圈标记检测到的真实目标。在不同背景的红外 图像中可以准确地检测到目标。

为了进一步验证所提算法的有效性,我们选取 了四种比较先进的算法进行比较,它们包括 LIG^[1]、 PSTNN^[2]、RLCM^[21]、Top-hat^[22].这些算法所有的 参数数值的设置都与作者所建议的参数一致。图 7 的每一行代表一个测试场景和相应的五种检测方法 的检测结果,每张原始图像中的目标用红色矩形标 记。真实场景一由于既包含高亮背景边缘又包含簇 状云雾,因此是一张十分具有挑战性的图像。Tophat、RLCM、PSTNN 和 LIG 的检测结果均出现大 量的虚警点,此外 Top-hat、PSTNN 和 LIG 对目标 的增强效果也有限。真实场景二存在大量的云雾边 缘,Top-hat 和 RLCM 的检测效果有限。对于真实 场景三和四,RLCM 和 PSTNN 均出现明显的虚警点。

对于以上四种真实场景图像,本文所提出的检测方法均能够准确地将目标与背景分离,具有良好的鲁棒性。



(1) 冠末图像 图 6 所提算法在一些具有代表性图片上的实验结果。

Fig. 6 Experimental results of the algorithm from some representative samples

采用 ROC(receiver operation characteristic)曲 线和 PR(precision-recall)曲线对检测结果的性能进 行评价。ROC 曲线能够同时兼顾目标和虚警点,能 够体现检测算法的整体性能。相对而言,PR 曲线 则更加聚焦于目标,更能反应检测算法对于目标检 测性能的差异性。不同数据集的 ROC 曲线和 PR 曲线见图 8。根据 TPR(true positive rate)和 FPR (false positive rate)绘制 ROC 曲线,其中 FPR 和

TPR 定义如下:

$$r_{\rm tp} = n_{\rm d}/n_{\rm a} \tag{17}$$

式中 n_d 和 n_a 分别表示检测到正确目标的个数和真目标的总个数。

$$r_{fp} = p_{\rm f}/p \tag{18}$$

式中 *p*_f 和 *p* 分别表示检测到非目标的像素数和像素总数。

PR曲线根据Recall和Precision所绘制,Recall



图 7 五种检测方法对四个真实场景的检测效果图 Fig. 7 Detection results of five detective methods on four real scenes



和 Precision 定义如下所示:

对于 ROC 曲线和 PR 曲线,曲线包围的面积越 大,表明该算法的检测效果越好。从图 8 中我们可 以观察到,ROC 曲线与 PR 曲线的评价结果相似。 本文所提出算法在 ROC 和 PR 曲线上均表现出良 好的检测性能,体现出本算法较高的检测精度和较 低的虚警率。

最后,验证了算法的实时性能,并测试和记录了 各种算法每帧消耗的平均时间。如表2所示,该算 法不仅具有更高的检测精度,而且具有较快的检测 速度。

表 2	不同算法处理-	→张图片(512→	* 640)的半均消耗时间

Tab. 2 Average processing time of one frame (512 * 640) by different a	algorithms
--	------------

算法	Top-hat	PSTNN	LIG	RLCM	Ours
时间/s	0.022	0.688	4.29	41.5	0.124

3 讨 论

随着科学技术的发展,红外探测技术已广泛应 用于制导和预警。世界上一些先进的探测系统也使 用红外探测技术。然而,目前的红外探测技术仍有 很大的改进空间。虽然基于滤波器的方法检测速度 快,但其检测精度也相对较低。基于深度学习类的 方法在红外检测领域显示出良好的检测精度。然 而,由于真实数据集的稀缺性和背景的复杂性,此类 算法很难在实践中应用。基于 HVS 的方法在红外 小目标检测中显示出巨大的潜力。但当背景复杂多 变时,检测效果并不理想。

为了解决这些问题,我们提出了这个模型。首 先,为了避免计算红外图像中的所有像素,我们过滤 出一些可能是目标的候选点。此操作大大减少了算 法所消耗的时间。与基于滤波器的算法相比,整个 算法仅要稍多的时间。其次,根据红外目标的特点 和生长区域的分布,设计了RCR特征。根据生长区 域的大小自适应生成覆盖区域,覆盖区域基本可以 完全覆盖目标。对于背景,覆盖区域只能覆盖部分 区域。目标的RCR值远大于背景的RCR值。此 外,还设计了AGVD特征来辅助分离背景与真实目 标。三层窗口可以根据不同大小的目标自适应生 成。实验结果表明,该算法具有良好的鲁棒性。

本文认为,目标的最大灰度值与邻域背景之间 存在明显的灰度差。并根据经验将灰度阈值设置为 k_{th}。然而,当目标和邻域背景的最大灰度值之间的 差值小于该值时,本文提出的方法可能会失败。因 此,如果可以自适应地选择灰度阈值,则该算法的性 能将进一步提高,这也是我们今后研究的一个主要 方向。

4 结 论

本文提出了一种基于阈值区域增长和自适应灰 度差的单帧红外小目标检测算法。该算法对不同背 景下不同大小的目标具有良好的检测性能。在真实数据集上的实验结果表明,该算法具有良好的检测 性能和较高的检测效率。

参考文献:

- [1] ZHANG Hong, ZHANG Lei, YUAN Ding, et al. Infrared small target detection based on local intensity and gradient properties[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 89: 88-96.
- [2] ZHANG Landan, PENG Zhenming. Infrared small target detection based on partial sum of the tensor nuclear norm[J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 382.
- [3] GAO Chenqiang, MENG Deyu, YANG Yi, et al. Infrared patch-image model for small target detection in a single image[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 4996-5009.
- [4] HAN Jinhui, MA Yong, HUANG Jun, et al. An infrared small target detecting algorithm based on human visual system[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(3): 452-456.
- [5] DENG He, SUN Xianping, LIU Maili, et al. Entropy-based window selection for detecting dim and small infrared targets[J]. Pattern Recognition, 2017, 61: 66-77.
- [6] DENG Lizhen, ZHANG Jieke, XU Guoxia, et al. Infrared small target detection via adaptive M-estimator ring top-hat transformation[J]. Pattern Recognition, 2021, 112: 107729.
- [7] GAO Chenqiang, WANG Lan, XIAO Yongxing, et al. Infrared small-dim target detection based on Markov random field guided noise modeling [J]. Pattern Recognition, 2018, 76: 463-475.
- [8] HU Yuxin, MA Yapeng, PAN Zongxu, et al. Infrared dim and small target detection from complex scenes via multi-frame spatial-temporal patch-tensor model [J]. Remote Sensing, 2022, 14(9): 2234.
- [9] WANG Xiaoyang, PENG Zhenming, ZHANG Ping, et al. Infrared small target detection via nonnegativity-

constrained variational mode decomposition[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14 (10): 1700-1704.

- [10] DAI Yimian, WU Yiquan, ZHOU Fei, et al. Asymmetric contextual modulation for infrared small target detection[C]// 2021 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, IEEE, 2021: 950-959.
- [11] DAI Yimian, WU Yiquan, ZHOU Fei, et al. Attentional local contrast networks for infrared small target detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 59(11): 9813-9824.
- [12] WANG Kewei, DU Shuaiyuan, LIU Chengxin, et al. Interior attention-aware network for infrared small target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 5002013.
- [13] ZHANG Landan, PENG Lingbing, ZHANG Tianfang, et al. Infrared small target detection via nonconvex rank approximation minimization joint l_{2.1} norm
 [J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1821.
- [14] KONG Xuan, YANG Chunping, CAO Siying, et al. Infrared small target detection via nonconvex tensor fibered rank approximation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021, 60: 5000321.
- [15] CHEN C L P, LI Hong, WEI Yantao, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J].
 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1):574-581.
- [16] WEI Yantao, YOU Xinge, LI Hong. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target

detection[J]. Pattern Recognition, 2016, 58:216-226.

- [17] HAN Jinhui, MORADI S, FARAMARZI I, et al. Infrared small target detection based on the weighted strengthened local contrast measure[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 18(9): 1670-1674.
- [18] CHEN Yaohong, ZHANG Gaopeng, MA Yingjun, et al. Small infrared target detection based on fast adaptive masking and scaling with iterative segmentation
 [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19: 7000605.
- [19] HE Yifan, ZHANG Chunmin, MU Tingkui, et al. Multiscale local gray dynamic range method for infrared small-target detection [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 18(10): 1846-1850.
- [20] WU Lang, MA Yong, FAN Fan, et al. A doubleneighborhood gradient method for infrared small target detection[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 18(8): 1476-1480.
- [21] HAN Jinhui, LIANG Kun, ZHOU Bo, et al. Infrared small target detection utilizing the multiscale relative local contrast measure[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018; 15(4): 612-616.
- [22] ZENG Ming, LI Jianxun, PENG Zhang. The design of Top-Hat morphological filter and application to infrared target detection[J]. Infrared Physics & Technology, 2006, 48(1):67-76.

(责任编辑 王绪迪)