

doi: 10.7690/bgzd.2023.06.003

一种基于显著性的红外弱小目标检测方法

黄 为, 胡上成, 汪 毅, 张煜昕, 侯亚威
(中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 红外弱小目标检测是目标识别等领域的研究热点。考虑到红外弱小图像中目标信噪比较低, 且成像目标的尺度变化较大, 构建一种同时考虑局部显著性特征和全局显著性特征的红外弱小目标检测框架。构建一种基于多尺度卷积核的显著性目标检测算法, 将该算法与谱残差算法分别进行显著图计算; 在得到局部和全局显著图后, 采用形态学方法进行显著图的融合以及自适应阈值方法进行二值分割。在给定的公开数据集上的实验结果表明, 该方法相对于基准的显著性算法, 在目标检测的准确性和虚警率上均有明显优势。

关键词: 目标检测; 红外弱小目标; 多尺度卷积核; 显著性
中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

An Infrared Dim and Small Target Detection Method Based on Saliency

Huang Wei, Hu Shangcheng, Wang Yi, Zhang Yuxin, Hou Yawei
(China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China)

Abstract: Infrared dim and small target detection is a hot research topic in the field of target recognition. Considering the low signal-to-noise ratio of targets in infrared dim and small images and the large scale variation of imaging targets, constructs an infrared dim and small target detection framework considering both local salient features and global salient features. Constructs a saliency detection algorithm based on multi-scale convolution kernel, and calculates the saliency map of the algorithm and the spectral residual algorithm respectively; after obtaining the local and global saliency map, this paper uses the morphological method to fuse the saliency map, and then uses the adaptive threshold method to perform binary segmentation. Experimental results on a given public data set show that the proposed method has obvious advantages over the benchmark saliency algorithm in terms of target detection accuracy and false alarm rate.

Keywords: target detection; infrared dim small target; multi-scale convolution kernel; saliency

0 引言

随着计算机视觉技术的发展以及远距离红外探测成像技术的进步, 红外目标检测已成为空间目标识别^[1]、航空侦察和探测^[2]等领域的研究热点。红外成像技术利用背景和目标之间的红外辐射差异来进行目标检测, 与可见光成像和合成孔径雷达相比, 具有全天候、抗干扰性强、低功耗、便于隐蔽等优点。相对于计算机视觉领域的自然图像, 红外成像目标距离探测设备较远, 弱小目标通常只有几十个像素, 缺乏形状和纹理信息, 红外弱小目标的信噪比较低, 极易与目标红外特性相似的杂波所干扰; 因此, 红外弱小目标检测的准确性和鲁棒性成为目标识别领域急需解决的难题^[3-5]。

笔者尝试采用计算机视觉领域中显著性的概念来对空天背景下红外弱小目标的检测进行研究^[6-7]。显著性源于人类视觉对所处环境的感知, 是一种独特性、稀缺性, 微观上说, 显著性与图像的颜色、

梯度、边缘等属性相关。在认知心理学^[8]领域, Koch^[9]将人类的视觉注意机制分为 2 种: 1) 全局特征感知的、自上而下的、目标驱动的显著性感知机制; 2) 局部特征感知的、自底向上的、数据驱动的显著性感知机制。通常来说, 基于全局特征的显著性方法易于在全局范围将目标与周围环境进行分离, 而基于局部特征的显著性方法便于在目标轮廓(局部)将显著性特征进行对比度增强。

基于全局特征的显著性检测方法采用自上而下的、目标驱动的感知机制来计算显著性值。Top-Hat 算子是该类方法的典型代表, 它从图像中减去开运算后的图, 使得整个背景的灰度值显著降低, 达到了较好的背景抑制效果。Cheng 等^[10]方法利用图像中各个像素之间的色彩差异来计算像素的显著性值, 得到了一种基于直方图统计对比度的全分辨率显著性图像。Achantat 等^[11]提出了频率调整(frequency-tuned)的显著性区域检测方法, 该方法利用每个像素的亮度和整个图像的平均亮度差值来

收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-03-05

作者简介: 黄 为(1985—), 男, 湖北人, 博士, 工程师, 从事机器学习、目标识别研究。E-mail: weehuang@qq.com。

定义显著性。Liu 等^[12]通过计算原始红外图像每个像素的热强度，得到了全局的红外梯度矢量场 (IGVF)，并通过采用梯度方向来计算全局显著性图像。Hou 等^[13]通过分析图像的“频率-强度”统计特征，采用了一种简单的谱残差方法来构建显著性图 (SR)，该方法具有简单高效的优点。

基于局部特征的显著性检测方法采用自下而上的、数据驱动的感知机制来计算显著性值。通过对人类视觉系统的研究发现，人眼会优先响应图像中局部高对比度的区域，即图像的局部显著性可由该局部区域的显著性决定。基于此，Chen 等^[14]提出了基于局部对比度的方法 (LCM)，该方法计算每个像素块与其邻域像素块的亮度差值，基于亮度差异性来构建显著性图，再通过阈值分割将目标与背景分离。Han 等^[15]提出了一种改进的 LCM 方法 (ILCM)，该方法显著提高了小目标检测的速度。Deng 等^[16]通过在局部区域查找像素亮度差异最大值来增强目标显著性值，构建了一种加权平均的局部差分显著性计算方法 (WLDM)。

考虑到红外弱小目标图像中信噪比较低，且随着目标的运动成像尺度会不断发生变化，构建了一种基于多尺度卷积核的显著性目标检测算法，然后将该算法与谱残差方法分别进行显著图计算，并将得到的显著图进行融合，得到了一种同时考虑局部显著性特征和全局显著性特征的空天背景红外弱小目标检测方法。

1 目标检测算法

笔者构建了一种基于多尺度卷积核的显著性目标检测算法，将该方法与谱残差方法 (spectral residual approach)^[13]进行结合，构建了一种同时考虑局部显著性特征和全局显著性特征的红外弱小目标检测框架。笔者首先对基于多尺度卷积核的显著性目标检测算法进行描述，然后对红外目标检测框架进行介绍。

1.1 基于多尺度卷积核的显著性算法

文中基于多尺度卷积核的显著性算法是一种基于局部对比度的方法，该方法通过卷积计算每个像素块与其邻域像素块的亮度差值，基于亮度的差异性来构建显著性图。

图 1 所示为 3*3 像素的卷积核，中间灰色区域的权值为 8，边缘白色区域的权值为-1。将该卷积核 K 与整个目标图像 I 进行卷积，即得到目标的显

著性图 $C = I \otimes K$ 。

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

图 1 尺寸为 3*3 的卷积核

实际上，红外图像中弱小目标的尺寸变化较大，为了适应这种尺度变化性，采用了多种尺度的卷积核 K_i ，对于每一种尺度的卷积核，通过计算得到显著性图 $C_i = I \otimes K_i$ ；对多个尺度得到的显著性图逐像素选取最大值，作为最终的显著性图。记显著性图 C_i 的像素点为 $C_i(m, n)$ (其中 m 、 n 分别为图像像素矩阵的横、纵坐标)，则最终的显著性图 C 逐像素的显著性值可表示为：

$$C(m, n) = \max_i \{ C_i(m, n) \}.$$

图 2 为文中基于多尺度卷积核的显著性目标检测算法流程图。

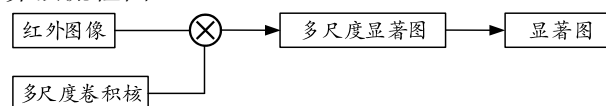


图 2 基于多尺度卷积核的显著性算法流程

根据红外弱小目标的尺寸，基于多尺度卷积核的显著性目标检测算法中卷积核的尺寸分别设置为 9*9、12*12、15*15，这时卷积核中每个区域的像素数量分别为 3*3、4*4、5*5，在多种尺度下，卷积核的中心区域与边缘区域中每个像素的权重保持不变，仍然分别为 8 和-1。通过这种多尺度的方式，使得显著性图具有一定的尺度鲁棒性。

1.2 目标检测框架

基于多尺度卷积核的显著性算法基于局部亮度差异性来构建显著性图，加强了目标与其邻域像素块之间的对比度，具有增强目标、抑制背景的效果；谱残差算法计算整个图像的频谱残差，从整体获取目标的显著性特征。两者分别从局部和全局进行图像显著性特征的计算，具有一定的互补性，考虑到红外弱小目标图像的特性，在本算法中，笔者考虑将两者进行结合，构建了图 3 所示的同时考虑局部显著性特征和全局显著性特征的空天背景红外弱小目标检测框架。

谱残差算法的具体实现步骤如下：

1) 对原图像 I 做快速傅里叶变换，得到幅频响应 $F[I]$ ，并对结果取幅值 $R(\bullet)$ ，得到幅度谱 $A(f)$ ，记为 $A(f) = R(F[I])$ 。

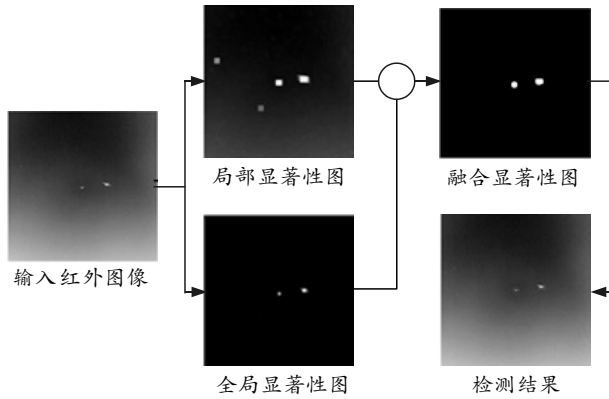


图 3 目标检测框架

2) 对图像的幅频响应 $F[I]$ 取相位值 $S(\bullet)$, 得到相位谱 $P(f)$, 记为 $P(f)=S(F[I])$ 。

3) 对图像的幅度谱取对数坐标变换, 得到图像振幅的 \log 谱 $L(f)$, 记为 $L(f)=\log(A(f))$ 。

4) 用一个均值滤波器 $h_n(f)$ 和图像振幅的 \log 谱 $L(f)$ 做卷积, 用来模拟平均幅频响应, 记为 $h_n(f)*A(f)$ 。

5) 谱残差 $R(f)$ 的表达式为: $R(f)=L(f)-h_n(f)*L(f)$ 。

6) 利用谱残差振幅 $R(f)$ 替代原图像的振幅, 再结合原图像的相位图, 进行傅里叶逆变换 $F^{-1}(\bullet)$, 得到空间域的图像 $S(x)=F^{-1}[\exp(R(f)+P(f))]^2$, $S(x)$ 即为显著性图。

方法的整体流程为:

1) 显著性目标检测。

在算法中, 笔者首先分别对红外图像 I 进行局部和全局的显著性特征计算, 得到的显著性图分别记为 S_L 和 S_G 。基于多尺度卷积核的显著性算法只需要对图像进行多尺度卷积, 谱残差算法只需要对图像进行卷积、傅里叶及傅里叶逆变换等运算, 计算量均较小。

2) 对 2 种显著性图结果进行融合。

2 种显著性图具有一定的互补性, 笔者对这 2 种图进行了融合, 采用了基于形态学的融合方法:

① 以显著性图 S_G 为种子, 对显著性图 S_L 进行腐蚀运算, 得到图像 S_E 。

② 以 S_E 为种子, 在显著性图 S_L 中进行膨胀运算, 得到融合的显著性图 S_F 。

3) 基于显著性图的感兴趣区域提取。

Otsu 算法^[17]是基于最大类间方差构建的自适应的阈值确定方法, 在得到显著性图 S_F 后, 采用该方法进行自动阈值分割得到二值图 $B(x)$, 具体计算方法如下:

$$B(x) = \begin{cases} 1 & S_f(x) > \text{threshold} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

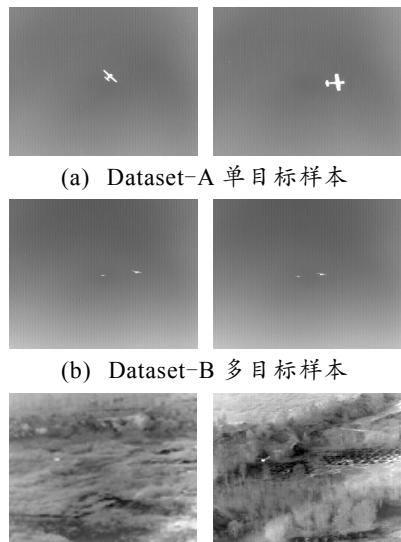
式中 threshold 由 Otsu 算法确定, 得到二值图后, 在此基础上, 进行目标区域矩形框的标注。

2 实验结果

为了验证算法的效果, 笔者将文中算法与基准的谱残差算法进行比较, 同时还给出了文中基于多尺度卷积核的显著性算法的性能, 对文中算法使用的红外图像实验数据集进行介绍, 随后给出文中算法比较结果。

2.1 数据集

实验中所使用的数据集为“红外序列图像中弱小飞机目标检测跟踪数据集”^[18], 该数据采集使用的传感器为制冷型中波红外相机, 采集对象为空中固定翼无人机(燃油动力)目标, 每幅红外图像的分辨率均为 $256*256$ 像素, 8bit 位深。实验中笔者选取了 3 段空天背景下无人机目标的红外视频序列, 并分别记为 Dataset-A、Dataset-B、Dataset-C。图 4 显示了从 3 个不同的数据段中各抽取 2 帧图像的样本示例, 其中图 4(a)、(c)分别为 Dataset-A、Dataset-C 中的单目标样本, 图 4(b)为 Dataset-B 的多目标样本, 可以看到, 相对于 Dataset-A、Dataset-B, Dataset-C 图像序列中的背景较为复杂, 目标的信噪比更低。



(c) Dataset-C 单目标样本

图 4 红外图像样本

2.2 算法比较

“红外序列图像中弱小飞机目标检测跟踪数据集”的标签为目标的目标中心点坐标。笔者以标注点为

中心，上下各扩充 4 个像素，得到 9*9 的标注框。定义算法比较基准：若经过检测能得到所有的标签目标，且目标中心位于标注框以内，则认为是正确检测（多目标时，需同时满足）；若经检测得到的目

标中心位于标注框以外，则认为是虚警。对于谱残差算法，均采用文献[19]中基于 Matlab 的实现。表 1 给出了算法的测试结果，其中准确率、虚警率量纲为%。

表 1 算法性能

算法	Dataset-A		Dataset-B		Dataset-C	
	准确率	虚警率	准确率	虚警率	准确率	虚警率
本文算法框架	98.2	0.5	96.5	1.5	80.4	6.4
基于多尺度卷积核的算法	95.5	1.5	94.3	3.3	73.5	8.3
谱残差算法	96.8	1.8	92.3	2.3	70.7	10.4

可以看到，在 3 组图像序列中，相对于基准的谱残差算法，本文中目标检测算法框架的准确率和虚警率均优于谱残差算法。在给定图像序列 Dataset-A、Dataset-B 中，由于背景较为单一，算法整体的准确率较高。在 Dataset-C 中，由于背景复杂，目标信噪比较低，3 种算法的准确率均下降，虚警率上升。相对于多目标图像序列 Dataset-B，该算法在单目标图像序列 Dataset-A 上有更高的准确率和更低的虚警率；此外，笔者提出的基于多尺度卷积核的目标检测算法在图像序列 Dataset-B、Dataset-C 上相对于谱残差算法具有更好的性能。

3 结束语

针对空天背景下的红外弱小目标检测问题，笔者构建了一种同时考虑局部和全局显著性特征的目标检测框架。首先构建了一种基于多尺度卷积核的显著性目标检测算法，然后将该算法与谱残差方法分别进行显著图计算；在得到 2 种显著性图后，采用形态学方法进行了融合，然后采用了自适应阈值方法进行二值分割。实验结果表明，相对于基准的谱残差算法，本文中算法框架在给定数据集上有更高的检测准确率和更低的虚警率。在该算法中，并未考虑数据集帧间的关联信息，下一步将考虑使用帧间差分等方法进一步提高红外弱小目标检测的精度与效率。

参考文献：

- [1] KIM S, LEE J. Scale invariant small target detection by optimizing signal to clutter ratio in heterogeneous background for infrared search and track[J]. Pattern Recognition, 2012, 45(1): 393-406.
- [2] MALANOWSKI M, KULPA K. Detection of moving targets with continuous-wave noise radar: Theory and measurements[J]. IEEE Transaction on geoscience and remote sensing, 2012, 50(9): 3502-3509.
- [3] 李俊宏, 张萍, 王晓玮, 等. 红外弱小目标检测算法综述[J]. 中国图象图形学报, 2020, 25(9): 1739-1753.

- [4] 王好贤, 董衡, 周志权. 红外单帧图像弱小目标检测技术综述[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 1-14.
- [5] 刘镇毓, 宋贵宝, 刘铁, 等. 基于改进滤波器和图像加权局部熵的红外弱小目标图像处理[J]. 兵工自动化, 2022, 41(1): 63-67.
- [6] 赵斌, 王春平, 付强. 显著性背景感知的多尺度红外行人检测方法[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(10): 2524-2532.
- [7] 蒋国清, 万烂军. 基于最恰对比度显著性分析的红外弱小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(4): 257-264.
- [8] WOLFE M, HOROWITZ S. What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it[J]. Nature Reviews Neuroscience, 2004, 5: 1-7.
- [9] KOCH C, ULLMAN S. Shifts in selective visual attention: towards the underlying neural circuitry[J]. Human Neurobiology, 1985, 4: 219-227.
- [10] CHENG M M, MITRA N J, HUANG X, et al. Global contrast based salient region detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 37(3): 569-582.
- [11] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2009: 1597-1604.
- [12] LIU D P, CAO L, LI Z Z, et al. Infrared small target detection based on flux density and direction diversity in gradient vector field[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(7): 2528-2554.
- [13] HOU X, ZHANG L. Saliency detection: A spectral residual approach[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2007: 1-8.
- [14] CHEN C L P, LI H, WEI Y T, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 52(1): 574-581.
- [15] HAN J, MA Y, ZHOU B, et al. A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2168-2172.