

·测试、试验与仿真·

## 尺度空间理论在红外小目标检测中的应用研究

王 铎

(92941 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

**摘要:** 红外制导在现代战争中占据独特的技术地位, 作为其关键技术之一, 红外小目标检测一直是理论研究的热点, 但是由于多种因素的影响, 红外小目标容易淹没在背景中, 日趋复杂的背景以及隐身技术的应用, 给红外小目标的检测带来极大的困难。结合尺度空间理论, 分析红外小目标图像的能领域特征, 采用多步长能量差异进行目标中心点及尺寸的确定, 最后根据噪声和目标点的特征, 对检测结果中的孤立噪声点进行剔除, 最终检测出小目标。实验结果表明, 该算法计算简单方便, 运行时间短, 能够有效地检测出目标。

**关键词:** 尺度空间; 小目标; 多步长; 能量域

**中图分类号:** TP391

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2017)-02-0073-04

## Application Research on Infrared Small Target Detection Based on Scale-space Theory

WANG Duo

(92941 Army Unit, Huludao 125001, China)

**Abstract:** IR small target detection is always one of the topic difficulties, and it is easy to be covered by the background due to many factors. The IR small target detection is very difficult for the complicated background and stealthy technology application. With scale-space theory, the characteristics of IR images of the IR small target in the energy field are analyzed. Multi-step energy difference is used to determine the center point and the size of the target. Based on the characteristics of noise and target point, the isolated noise points in the results are rejected to inspect the small target finally. Experimental results show that the algorithm has simple calculation, short running time and can inspect the target effectively.

**Key words:** scale-space; small target; multi-step; energy field

红外制导技术因其独特的优势<sup>[1]</sup>在现代战争中占据一席之地, 制导过程一般包括<sup>[2]</sup>目标检测、目标捕获、目标跟踪等几个步骤。红外目标检测是从红外图像中检测并提取出目标的过程<sup>[3]</sup>, 目标检测是系统最前端、最重要的部分。由于多种因素的影响<sup>[4]</sup>, 红外制导所成图像通常信噪比低, 对比度差, 人们所关注的小目标检测问题<sup>[5]</sup>, 是在成像视场中目标总像素数不大于30个<sup>[6-7]</sup>, 形状和面积信息均不明显。

根据侧重的信息不同, 红外图像处理包括多种处理算法, 例如频域法、空域法、聚类算法<sup>[8]</sup>、形态学算法<sup>[9]</sup>、神经网络法等。频域法一般概念较为抽象, 是从频率域对图像进行处理, 常用的方法有小波变换<sup>[10]</sup>、滤波法、剪切波法<sup>[11]</sup>等, 这类算法在提取目标的过程中, 往往容易受到孤立的高频噪声的影响, 产生虚警, 使得小目标的检测出现多个虚假目标点; 空间阈算法依赖于各像素点及其之间的关系, 通常算法较为简单, 常见的有梯度处理<sup>[12]</sup>、灰度均值

收稿日期: 2017-03-21

作者简介: 王铎(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为制导与信号处理。

处理等,由于仅仅依靠像素点的空间域信息,在处理图像时,容易形成过分割或者错误地将目标部分归为背景,通常需要组合不同的算法;形态学算法和神经网络法作为新兴起的图像处理算法,由于其独特的优势被广泛使用,然而形态学算法过分依赖结构元的选择,使得其在图像处理中带来一定的困难,神经网络法需要累计大量的数据作为训练样本,其处理问题有一定的局限性。结合尺度空间理论,从能量域对红外小目标图像进行分析,在抑制背景的基础上,采用多步长能量差异进行目标中心点及尺寸的确定,进行可疑目标分割,然后根据噪声和目标点的特征,对检测结果中的孤立噪声点进行剔除,最终检测出小目标。

## 1 尺度空间理论

尺度空间的基本思想是在视觉信息(图像信息)处理模型中引入一个尺度因子,通过对视觉信息进行尺度变换并连续变化尺度因子,获得多尺度下的尺度空间视觉信息表示序列,综合序列信息以深入地挖掘视觉信息的本质特征,其在立体匹配、目标识别、基于视觉的移动机器人定位等相关问题上有着重要的应用价值。

以  $I(x,y)$  代表原始图像,  $G(x,y,\sigma)$  表示尺度  $\sigma$  可变的二维高斯函数,见式(1)。图像的高斯尺度空间  $L(x,y,\sigma)$  可以表示为原始图像与高斯函数进行卷积,如式(2)所示。

$$G(x,y,\sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$L(x,y,\sigma) = G(x,y,\sigma) \otimes I(x,y) \quad (2)$$

高斯卷积核是实现尺度变换的唯一线性核,高斯尺度空间图像序列不能提供任何的结构信息,但其导数在多尺度结构分析中却有着重要的作用。高斯核的二阶导数,即拉普拉斯高斯(LoG)核能提取图像内圆斑结构的某些信息,且其空间导数的幅度随着尺度的不断增大而减小。

$$\text{LoG}(x,y,\sigma) = \frac{1}{\pi\sigma^4} \left[ 1 - \frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2} \right] e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

尺度规范化的 LoG 算子具有真正的尺度不变性,尺度规范化后的拉普拉斯尺度空间(LSS)如式(4)所示

$$\text{LSS}(x,y) = \{F(x,y,\sigma) | \sigma = \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N\} \quad (4)$$

式中,  $F(x,y,\sigma)$  为尺度因子为  $\sigma$  时的尺度规范化后的拉普拉斯图像;  $\sigma^2$  为规范化因子。

$$F(x,y,\sigma) = \sigma^2 |\text{LoG}(x,y,\sigma) I(x,y)| \quad (5)$$

## 2 目标提取算法

### 2.1 目标成像模型

红外小目标辐射在到达探测器之前,受大气传输的影响作用,存在不同程度的衰减,同时由于探测系统的光学离焦、透镜像差等原因,使得其在图像中呈现出斑点状结构,通常表现为对比度低、成像所占像素少,在遇到极强背景干扰时往往呈现出成像模糊且无明显形状特征。图1为远距离拍摄到的红外目标局部放大图像及其三维直方图。图2为采用高斯分布仿真生成的目标图像及其三维直方图,两者在灰度分布上基本一致。

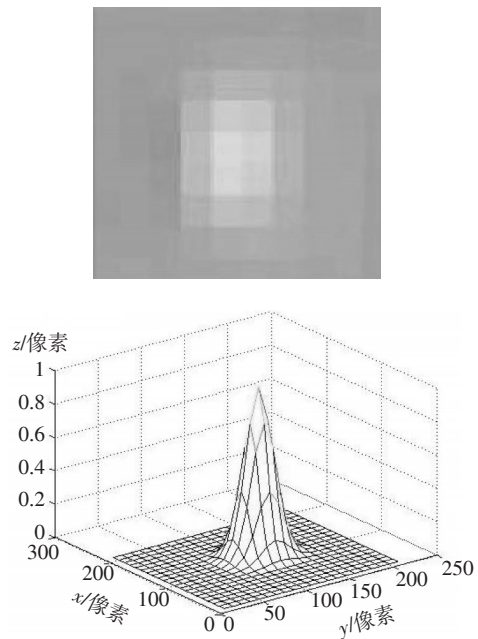
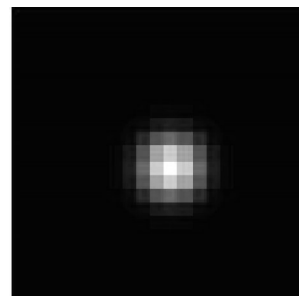


图1 目标图像及其直方图



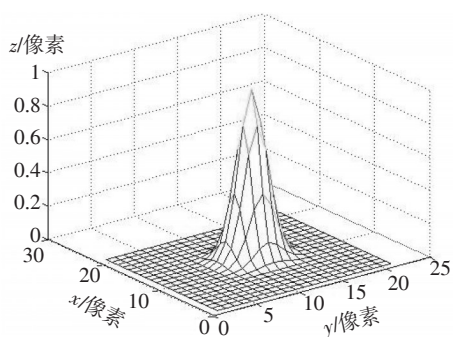


图2 仿真目标图像及其直方图

根据以上特点,采用点扩散函数模型来描述红外小目标,如式(6)所示

$$T(x,y|x_i,y_i,\sigma) = \frac{I_p}{d} e^{-\frac{(x-x_i)^2+(y-y_i)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

其中,  $(x_i, y_i)$  为目标中心位置;  $d$  为目标大小直径;  $I_p$  代表目标峰值强度;  $\sigma$  是尺度因子。据此,小目标的检测可以归结为目标中心位置及大小直径的确定。

### 2.2 能量域多步长目标分割

图像中的斑点状结构元素通常是小目标的潜在区域,对于此类元素,尺度规范化后的拉普拉斯尺度空间对其滤波响应与图像云层边缘和图像角点滤波响应截然不同,如图3所示。

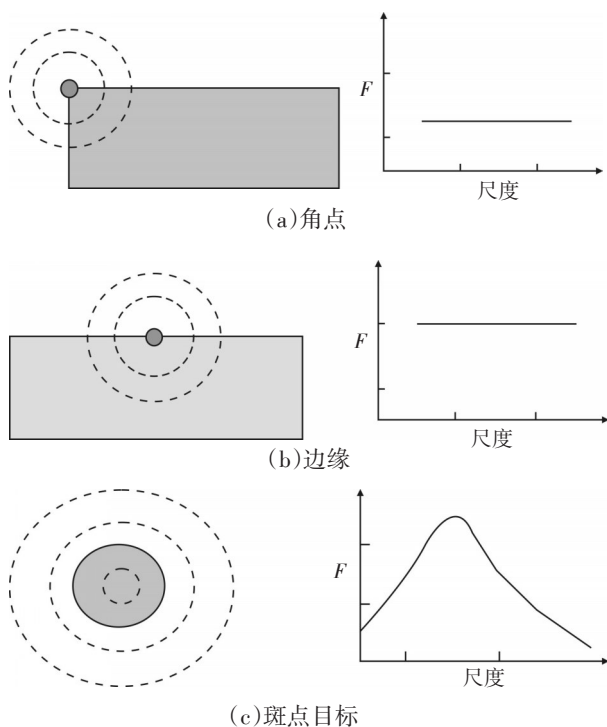


图3 不同部位结构元素拉普拉斯滤波响应

可以看出,对于图像角点或者边缘,规范化后的拉普拉斯尺度空间对其滤波响应保持不变,而对于斑点状目标,滤波响应随着尺度变大而不断变大,并在某一特定尺度达到峰值后随着尺度变大而变小。

红外图像背景是缓慢变化的大部区域,相关性强,且其能量值相对于目标而言要低,虽然在强背景下目标可能被淹没在噪声中,但是在局部区域,目标能量仍比周围像素要高。图像灰度表征像素点的能量,而梯度可表征能量差异,据此在垂直及水平方向上,分别求取  $L$  步长 ( $L=1, 2, \dots$ ) 梯度值,若梯度均大于零且4个方向平均梯度大于某一阈值  $T$ ,记录该点坐标  $(x, y)$ ,标记该点为可疑目标点的一个组成像素,且当各向梯度变化小于某一特定值  $\varepsilon_1$  时,记录此时梯度步长  $L_1$ ,找出具有平均梯度最大的像素点  $(x_m, y_m)$ ,将图像与拉普拉斯高斯核进行卷积,以  $(x_m, y_m)$  为中心,窗口  $w$  大小为  $L_1 \times L_1$ ,若像素点  $(x_i, y_i)$  满足下式

$$F(x_i, y_i, s) > F(x_w, y_w, s) \quad (7)$$

那么可确立  $(x_i, y_i)$  为目标中心位置,中心像素各向梯度变化小于某一特定值  $\varepsilon_2$  时的步长  $L_2$  即为目标尺寸大小。

### 2.3 噪声剔除

确定中心点及尺寸大小,对于分割出的小目标,往往也占据一定的像素数,噪声是孤立的点,据此对检测结果进行进一步检验,若目标点像素8邻域均为背景像素,则判定该点为噪声予以剔除。

## 3 实验与结果分析

为评价文中方法在目标检测中的表现,利用实际拍摄的包含小目标红外图像进行实验,同时采用聚类属性集算法及一维最大熵算法进行处理,将不同算法处理结果进行对比分析。为便于评价定义正确检测率(CP)与虚警率(FA)作为评判标准。

$$CP = \frac{\text{正确检测到的真实目标数}}{\text{真实目标数目}} \times 100\%$$

$$FA = \frac{\text{虚警目标数}}{\text{检测出的目标总数}} \times 100\%$$

其中,假若目标的真实位置和检测出来的目标位置相差在一定范围内(通常为2~3个像素),则认为目标检测结果正确。目标检测结果如图4所示。

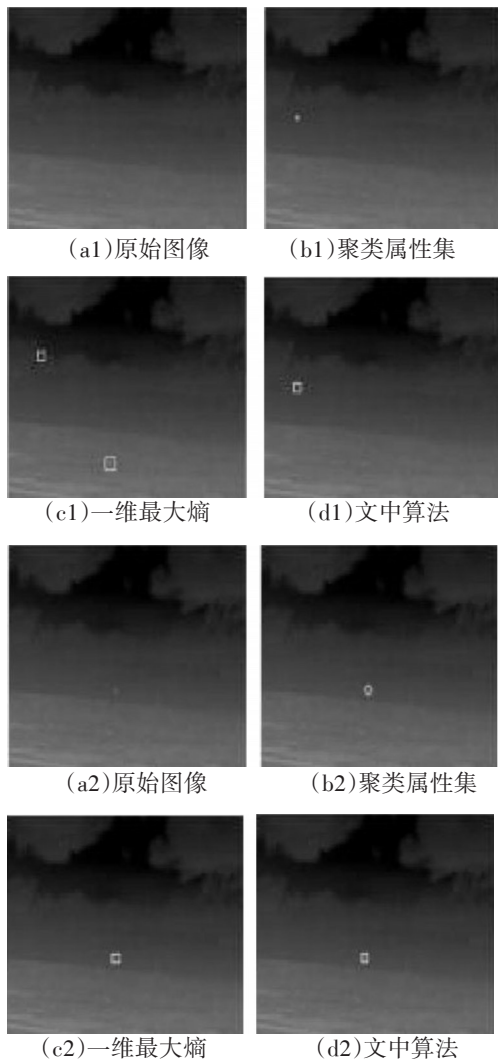


图4 小目标检测结果

其中图4a为原始红外图像;图4b为聚类属性直方图处理结果;图4c为一维最大熵检测结果;图4d为文中算法最终结果。

在检测过程中,聚类属性集采用图像直方图信息,对像素灰度做出一定的评价,但是运行需要一定的时间;一维最大熵算法由于考虑图像像素信息相对较少,对图像之间的相关性信息没有充分运用,检测出目标不完整或出现虚假目标;文中算法计算简单,在检测出目标的前提下缩短运行时间。不同算法的正确检测率与虚警率如表1,运行时间如表2所示。

表1 不同算法检测率及虚警率

算法	CP/%	FA/%
聚类属性集	88	11.3
一维最大熵	83	17.6
文中算法	93	8.6

表2 不同算法运算时间

算法	a1	a2	平均运算时间/s
聚类属性集	1.722 s	1.974 s	1.848
一维最大熵	1.496 s	1.576 s	1.536
文中算法	0.709 s	0.717 s	0.713

## 4 结 论

由于多种因素的影响,红外成像制导的小目标的检测极为困难。从能量域出发,分析红外小目标在能量域的特点,结合尺度空间理论,采用多步长能量差异进行目标中心点及尺寸的确定,根据噪声和目标点的特征,对检测结果中的孤立噪声点进行剔除,检测出小目标。通过实验对含有小目标的图像进行检测,并与传统算法相比,该算法能够较为有效地检测出小目标,运行时间短。

## 参考文献

- [1] 侯洁,辛云宏.基于小波变换与图像增强技术的红外小目标检测[J].激光与红外,2013,43(6):683-688.
- [2] 毛春晓.复杂背景下运动弱小目标检测方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [3] 王莹莹,何苹,魏彤,等.二维信息熵的红外图像分割算法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2015,16(1):77-80.
- [4] 胡宏伟,赵建,曾明.一种改进型图像降噪方法[J].光电技术应用,2012,27(5):60-63.
- [5] 杨树谦.精确制导技术发展现状与展望[J].航天控制,2009,22(4).
- [6] 吴文怡,罗子娟.基于最小一乘和遗传算法的红外弱小目标检测[J].系统工程与电子技术,2009,31(3):575-578.
- [7] 吴一全,尹丹艳.基于FLS-SVM背景预测的红外弱小目标检测[J].光学学报,2010(10):2806-2811.
- [8] 姜斌,石峰,崔东旭,等.改进的K均值聚类红外目标检测方法[J].应用光学,2012,33(4):766-769.
- [9] 蔡阳,林再平,周一宇.基于形态学滤波的红外弱小目标背景抑制[J].电子信息对抗技术,2012,27(6):38-42.
- [10] 罗中良,李昕.基于小波变换的红外弱小目标检测新方法[J].红外技术,2006,28(8):456-459.
- [11] 邹瑞滨,史彩成,毛二可.基于剪切波变换的复杂海面红外目标检测算法[J].仪器仪表学报,2011,32(1):1103-1108.
- [12] 王田,刘伟宁,孙海江,等.基于复杂度和方向梯度的红外弱小目标检测方法[J].液晶与显示,2012,27(5):692-396.