

基于改进 LCM 的红外小目标检测算法

张祥越^{1,2,3}, 丁庆海⁴, 罗海波^{1,2}, 惠斌^{1,2}, 常铮^{1,2}, 张俊超^{1,2,3}

- (1. 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;
2. 中国科学院光电信息处理实验室, 辽宁 沈阳 110016;
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 航天恒星科技有限公司, 北京 100086)

摘要:如何在复杂背景和低信杂比条件下准确检测到小目标对于精确制导武器的发展和红外预警等具有重要意义。为了在复杂背景条件下提高图像信杂比并有效地检测出小目标,提出一种基于中心域与邻域灰度对比度的红外小目标检测方法。通过计算输入图像的对比度图和显著度图,提高了目标对比度同时抑制背景杂波;在此基础上自适应设定阈值分离出小目标。实验结果表明:与传统 LCM (Local Contrast Measure)方法相比,所提出的方法能够取得更高的检测率和较低的虚警率,尤其是对于复杂背景下的弱小目标检测,相对于对比算法,优势更明显。

关键词:小目标检测; 红外图像; 检测算法; 局部对比度

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0726002

Infrared dim target detection algorithm based on improved LCM

Zhang Xiangyue^{1,2,3}, Ding Qinghai⁴, Luo Haibo^{1,2}, Hui Bin^{1,2}, Chang Zheng^{1,2}, Zhang Junchao^{1,2,3}

- (1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Key Laboratory of Opt-Electronic Information Processing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Space Star Technology Co, LTD, Beijing 100086, China)

Abstract: How to detect infrared dim targets accurately under complex background and low SCR condition is of great significance for the development of precision guided weapons and infrared warning. In order to improve the SCR and detect the dim targets effectively, a new method for infrared dim target detection based on the gray contrast between the central region and its neighborhood was proposed. The contrast of the target was improved by calculating the contrast map and saliency map of the input image while suppressing the background clutter. The adaptive threshold was set on this basis to separate the dim targets. Experimental results show that the proposed method can achieve higher detection rate and lower false alarm rate compared with conventional LCM (Local Contrast Measure) method. The proposed method has an outperformance compared with other algorithms, especially in the case of complex background.

Key words: dim target detection; infrared image; detection algorithm; local contrast

收稿日期: 2016-11-10; 修订日期: 2016-12-20

作者简介: 张祥越(1991-), 男, 博士生, 主要从事小目标检测、图像处理、模式识别等方面的研究。Email: zhangxiangyue@sia.cn

导师简介: 丁庆海(1969-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像、光电跟踪、目标识别等方面的研究。

Email: l3693689880@163.com;

罗海波(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像、图像处理、目标识别、目标跟踪等方面的研究。

Email: luohb@sia.cn

0 引言

随着红外成像技术的发展,红外图像处理系统已被应用到军事和民用等诸多领域,红外小目标检测作为其中的一项关键技术,近年得到了快速发展。目标在远距离所呈现出小目标特性,在图像中所占比例很小;同时在复杂背景和低信杂比条件下,小目标极容易被噪声湮没。因此,复杂背景下的红外小目标检测仍然是一个具有极大挑战的研究课题。

传统的红外小目标检测方法包括数学形态学的方法^[1],通过将 Top-Hat 算子^[2]作用于红外图像上,可以有效地抑制背景杂波和噪音,进而检测出小目标。该类方法检测小目标的关键因素在于对不同种类的红外图像要确定合适的结构元素并选择恰当的结构元素尺寸,因此检测方法存在一定的局限性。Wang 等人^[3]首先通过高斯差分(DOG)滤波来提高图像对比度,然后将图像分为若干块,找出块亮度高于阈值的区域作为疑似目标区再进行分割。此方法的不足在于当背景亮度高于目标区的亮度时就会造成误检和虚警。Qi 等人^[4]提出了基于方向显著性检测(DSBM)方法,该方法首先基于小面(facet)模型求出图像的二阶方向导数(SODD),在此基础上经过傅里叶变换,运用相位谱的显著性检测分离出小目标。Chen 等人^[5]提出了一种基于目标局部对比度(LCM)的检测方法。该方法在多个不同尺度下通过寻找中心与局部邻域的对比度最大值来检测小目标。传统 LCM 算法通过计算局部对比度能增强图像信杂比,提高了检测率。但对于具有复杂背景的图像,算法的背景抑制效果并不明显。并且对于图像中存在的一些灰度较大的噪声,算法也提高了它们的对比度,这对于检测性能有很大的影响,例如提高了检测的虚警率。另外,不同尺度下的重复计算虽能提高图像信杂比,但提升效果不明显,与此同时却大大增加了检测所需时间。

文中在充分利用目标与其邻域灰度对比度差异的基础上提出了一种改进 LCM 的红外小目标检测方法。算法通过计算输入图像的对比度图与显著度图,提高了目标对比度并抑制背景杂波,随后自适应设定阈值,分离出小目标。与传统 LCM 算法相比,

文中提出的算法在一些复杂背景且信杂比较低的红外图像中取得了更高的检测率和较低的虚警率,同时解决了传统 LCM 算法的定位误差问题。

1 改进的 LCM 红外小目标检测算法

1.1 红外图像的预处理

小目标检测前是红外图像的预处理阶段,与传统 LCM 算法类似,首先把一个窗口从左至右、从上至下滑动遍历整幅图像,将图像分为若干块。如图 1 所示,每个块包含 3×3 共 9 个子块,每个子块包含 3×3 共 9 个像素。传统 LCM 算法中,为了求得响应最大值而重复在多尺度下运算,单独一子块像素个数最多达到 9×9 共 81 个。根据 SPIE 的建议,小目标的尺寸一般不超过图像总面积的 0.15%^[6],因此,几乎很少有红外图像的小目标面积会达到 9×9 个像素。如果存在面积这么大的“小”目标,那么其自身一定可以包含诸如边缘、角点等图像信息,从而可以利用其他的检测方法来检测。因此,在提出的算法中,每一个子块只包含 3×3 个像素。

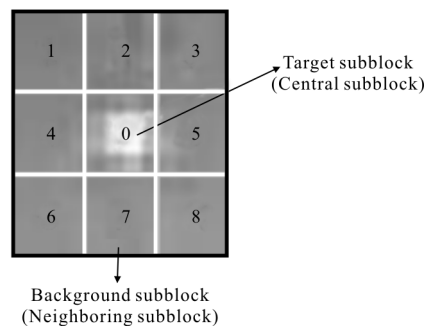


图 1 在图像上滑动窗口所获得的图像块包含 9 个子块

Fig.1 Image block gained by sliding window which contains 9 subblocks

每一个子块的响应值用它的均值来代表,如下式所示:

$$m(\text{sub block}(p,q)) = \frac{1}{9} \sum_{i=p-1}^{p+1} \sum_{j=q-1}^{q+1} \text{Pix}(i,j) \quad (1)$$

式中: p, q 为子块的中心,则对于图像块中的任意一个子块 m_i (表示子块的序号),其响应值表示为:

$$m_i = m(\text{sub block}(p_i, q_i)) \quad (2)$$

式中: p_i, q_i 为第 i 个子块的中心坐标。因此,对于一个图像块的中心块,其响应值表示为 m_0 ,邻域块整体的响应值表示为:

$$m_{\Delta} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 m_i \quad (3)$$

用均值来代表其响应值可以很好地消除背景杂波所带来的表达不充分的影响,同时还可以抑制高亮度的噪音。

1.2 红外小目标的检测

为了准确检测出小目标、提高小目标检测率并降低虚警率,需要提升目标区对比度同时抑制背景区的对比度。因此,当窗口滑过图像某一位置时,找出此图像块中心块的亮度最大值 L_n , 其中 n 表示窗口滑动到第 n 个像素时所得到的第 n 个图像块。则此图像块最终的响应值定义为:

$$C_n = \frac{L_n \times m_0}{m_{\Delta}} \quad (4)$$

C_n 值越大,表示此处为小目标的可能性越大。滑动

窗口遍历图像所有的像素点后,将每一个像素点用 C_n 替换得到图像的对比度图 C 。

为了进一步提高图像的信杂比,在得到原有对比度图的基础上,通过下式求得原图像的显著度图 S :

$$S(x,y) = C(x,y) - I(x,y) \quad (5)$$

式中: $I(x,y)$ 代表原图像。图 2 展示了 4 幅不同场景下的红外图像,其中图 2(a)是以云为背景的红外图像,图 2(b)是以海天交际为背景的红外图像,图 2(c)是弱小目标的红外图像,图 2(d)是以机场跑道天空为背景的红外图像。图 3 展示了图 2 所对应的 4 幅图像的显著度图 S ,由图 3 可以清晰地看出,与原图像相比,显著度图 S 大幅度提高了原图像的信杂比,增强了目标的同时也较好地抑制了图像背景杂波。

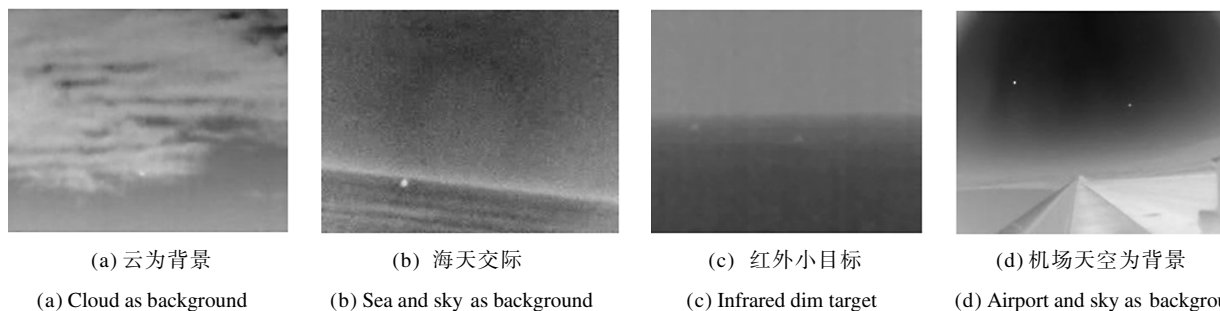


图 2 4 幅不同场景下的红外图像

Fig.2 Infrared images of four different scenes

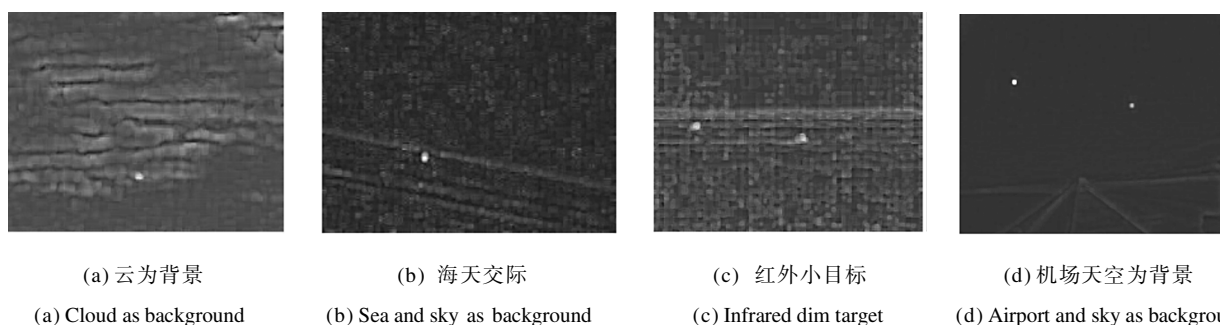


图 3 图 2 中红外图像所对应的显著度图

Fig.3 Saliency maps corresponding to infrared image in Fig.2

1.3 红外小目标的提取

由获取到的图像显著度图 S 可以清晰地看出:图像的信杂比得到了明显提升,充分提高了目标区亮度并抑制了背景。因此在显著度图 S 中,亮度越高说明此处为小目标的可能性越大。借鉴统计学中的 3σ 准则^[7],算法采用下式计算目标检测阈值:

$$Th = \mu_s + k \times \sigma_s \quad (6)$$

式中: μ_s 为显著度图的均值; σ_s 为显著度图 S 的标准差; k 作为分割系数,一般取 7~12。

对于一些目标尺寸较大的红外图像,所提出方法仍能准确检测出目标位置。为了将目标完整地从小目标中提取出来,可以在算法基础上做进一步处理。比如,可以在

已检测出目标位置的一定区域范围内采用主动轮廓模型^[9]、分水岭^[9]等分割算法分离出目标;或者可以采用 mean-shift^[10]等聚类方法最终分离出完整的目标。

2 实验结果与分析

2.1 信杂比提高结果比较

基于传统 LCM 算法的思想,改进得到了文中方法。为了充分体现文中提出算法在提升信杂比方面的优势,首先直观地给出经算法处理后图像的三维

响应图,如图 4 所示。图 4(a)为图 2 中的 4 种不同场景下的红外图像,图 4(b)~(d)分别对应为 4 幅图像的原始灰度响应图、经传统 LCM 算法处理后所得响应图和文中算法处理后所得响应图。由图中可以清晰地看出,经过文中算法处理后所得图像的响应图无论是与原图像相比还是和经传统 LCM 算法处理后得到的响应图相比,信杂比都得到了明显提升。对于背景较为复杂的红外图像和弱小目标的红外图像(例如第 1 幅和第 3 幅图像)来说,信杂比提升量尤为明显。

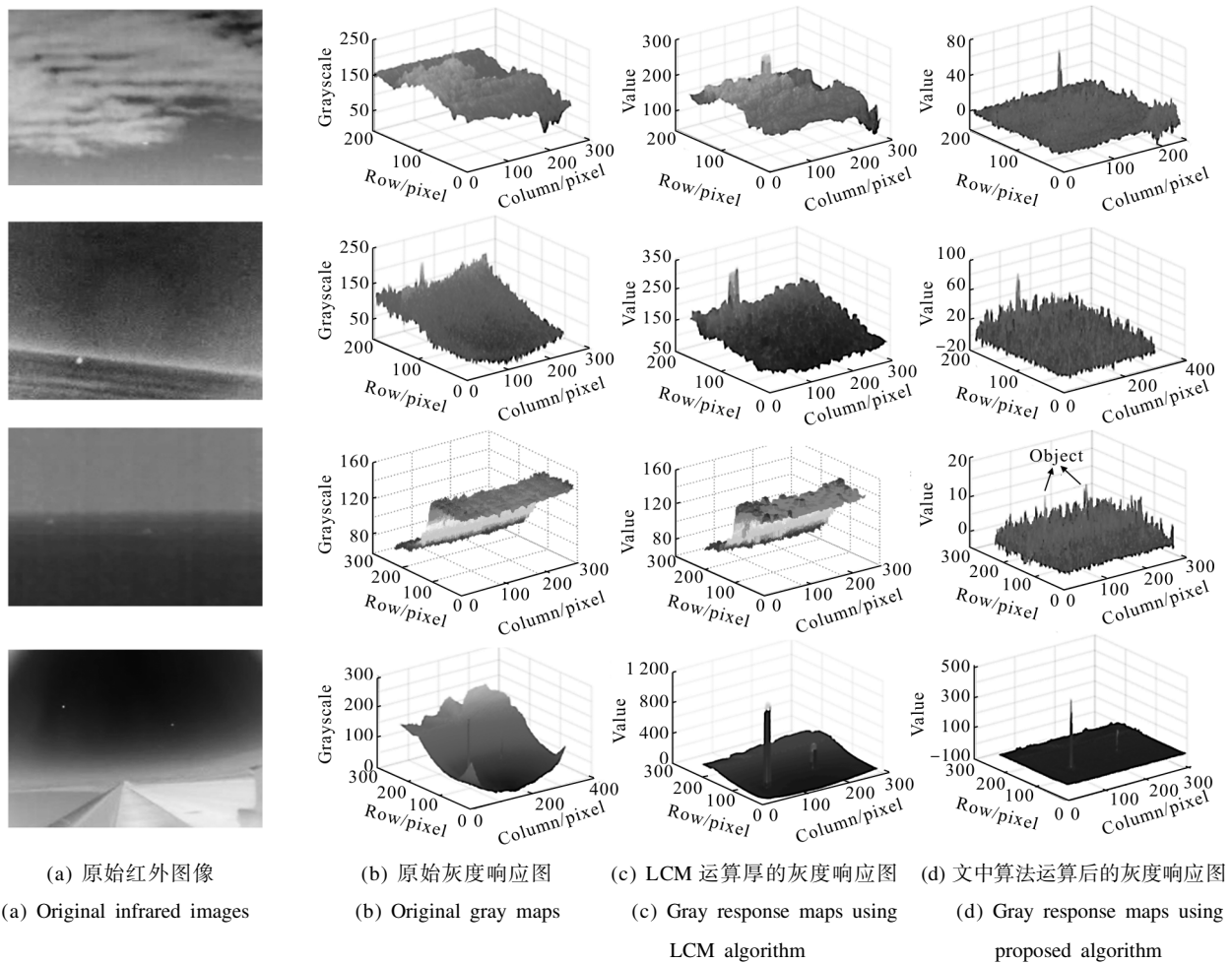


图 4 响应图实验结果

Fig.4 Experimental results of response maps

与此同时,为了客观地证明文中算法在提高图像信杂比和背景抑制方面的优势,文中采用信杂比(SCR)和背景抑制因子(BSF)^[11]两项指标对文中算法进行评估,两项指标的定义如公式(7)所示:

$$SCR = \frac{|I_t - \mu_b|}{\sigma_c} \quad BSF = \frac{\sigma_{in}}{\sigma_{out}} \quad (7)$$

式中: I_t 为目标信号的强度; μ_b 和 σ_c 分别为目标某一尺度邻域内背景的均值和标准差; σ_{in} 为原始图像的灰度标准差; σ_{out} 为经过算法处理后图像的灰度标准差。 SCR 越大,说明目标信杂比越高,目标越易检测。 BSF 越大,说明背景抑制的效果越好。由表 1 可以看出:文中提出算法无论是在哪种场景下,信杂比和背景抑制因子都是最高的。

表 1 3 幅不同场景图片的 SCR 与 BSF
Tab.1 SCR and BSF of three different scenes

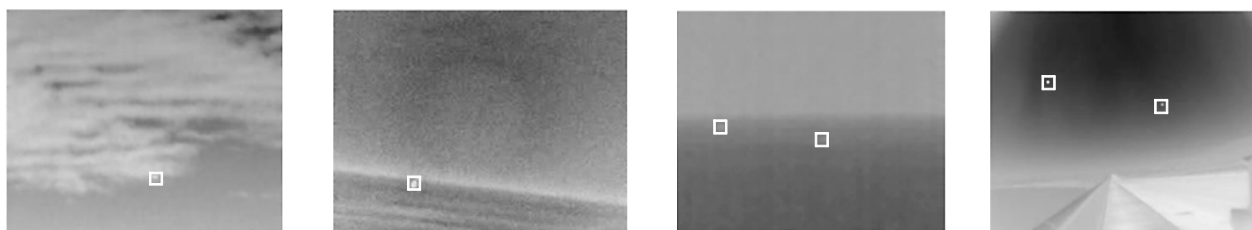
Algorithm	Cloud as background		Sea and sky as background		Infrared dim target image		Airport and sky as background	
	SCR	BSF	SCR	BSF	SCR	BSF	SCR	BSF
Proposed	8.578 1	5.059 4	5.032 1	3.664 9	5.181 8	18.623 2	13.715 0	9.364 9
LCM	5.031 0	0.924 8	3.814 5	0.837 6	3.332 4	1.031 7	4.686 7	0.802 1

在获取图像最终响应图的阶段，文中方法除了在图像块的中心块里提取出亮度最大值外，还选取了中心块的均值参与运算。选取均值的优势在于其有助于滤除噪音。在传统 LCM 算法中，通过 L_n^2 与 $\max(m_i)$ 的比值来提升目标区的对比度。一旦中心块中存在幅度较大的脉冲噪声时，平方运算会放大噪声，从而造成误检或者虚警。另外，文中算法选取图像块外围 8 个子块的整体均值 m_{Δ} 来代表背景。由于采用的是整体均值，进而顾及到了图像块的整体信息，因此对于复杂背景图像的检测效果会得到提升，

检测鲁棒性好。而在传统 LCM 算法中，背景只是单纯地用外围子块中某一块的均值 m_i 来表示，那么当检测复杂背景图像或者强噪声图像中的小目标时，单一子块均值不能完整地体现目标背景，从而会造成误检或虚警。

2.2 小目标检测结果对比

图 5 首先给出了 4 幅红外图像的检测结果。由图 5 可以看出：算法无论是对背景复杂的图像(见图 5(a))还是信杂比极低的弱目标图像(见图 5(c))，检测的精准度都很高。



(a) 云为背景 (a) Cloud as background
(b) 海天交际 (b) Sea and sky as background
(c) 红外小目标 (c) Infrared dim target
(d) 机场天空为背景 (d) Airport and sky as background

图 5 4 幅不同场景下的小目标检测结果

Fig.5 Dim target detection results of four different scenes

为了进一步验证文中算法在小目标检测方面的优越性，选择传统 LCM 算法^[5]和 Wang 的算法^[3]进行对比。图 6 展示出复杂云背景图像(图 2(a))的小目标检测结果。其中图 6(a)为文中算法的检测结果，

图 6(b)为传统 LCM 算法检测结果，图 6(c)为 Wang 的算法检测结果。传统 LCM 算法存在检测偏差；Wang 的算法在阈值适当的前提下虽能准确检测到小目标，但会伴随很多虚警。

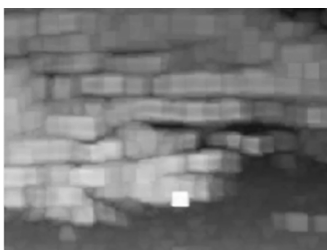


(a) 文中算法 (a) Proposed algorithm
(b) LCM 算法 (b) LCM algorithm
(c) Wang 的算法 (c) Wang's algorithm

图 6 3 种算法在云背景图像下的检测结果

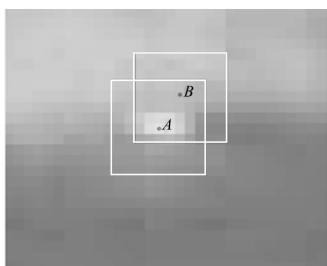
Fig.6 Detection results of three algorithms under cloud background

传统 LCM 算法在云背景图像下检测结果之所以存在检测偏差,是因为算法生成的对比图存在块效应,如图 7(a)所示。而导致块效应的根本原因是算法中的 C_n 最大值是在大尺度下出现的。例如在图 7(b)中,当算法运行到目标中心位置 A 和邻域位置 B 时,由于小目标包含若干像素,因此在以像素 A 和 B 为中心的 C_n 最大值均是在较大尺度下出现的。图中矩形框分别表示目标像素 A 和 B 的 0 区域,这两个 0 区域亮度最大值相同。此外,像素 A 的 8 邻域块中均值最大值要大于像素 B 的均值最大值。因此, A 处的响应值就会小于 B 处的响应值,进而算法认为响应值最大处为目标的可能性最高,误把像素 B 判断为小目标的中心,检测结果出现了偏差。



(a) 块效应

(a) Blocking artifact



(b) 目标 A 和其邻域像素 B 的中心块

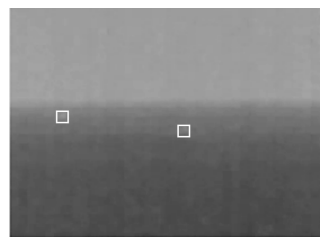
(b) Central subblocks of targets A and its neighboring pixel B

图 7 检测偏差原因

Fig.7 Cause of detecting deviation

对于图 2(c)所示的背景亮度较高的红外图像,传统 LCM 算法和 Wang 的算法无论如何调节阈值,都无法准确检测出小目标。如图 8 所示,图 8(a)为文中算法的检测结果,图 8(b)为传统 LCM 算法检测结果,图 8(c)为 Wang 的算法检测结果。

传统 LCM 算法不适用于背景亮度高于目标的红外图像的原因在于传统 LCM 算法不能充分抑制亮背景(如图 4(c)第 3 行图像所示),算法处理后的图像中背景亮度依然高于目标,从而导致无法检测出小目标。



(a) 文中算法

(a) Proposed algorithm



(b) LCM 算法

(b) LCM algorithm



(c) Wang 的算法

(c) Wang's algorithm

图 8 3 种算法在背景亮度高的低对比度图像下的检测结果

Fig.8 Detection results of three algorithms for infrared image

under high gray background and low contrast

为了进一步对算法性能进行评估,采用 313 幅图像共 449 个目标对 3 种方法分别进行测试,画出如图 9 所示的 3 种算法的 ROC 曲线。从图 9 中可以清晰地看出,与其他两种方法相比,文中提出的

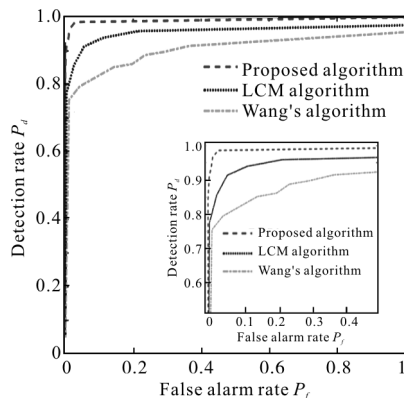


图 9 小目标检测的 ROC 曲线

Fig.9 ROC curves of dim target detection

方法在相同虚警率下的检测率是最高的,证明在红外小目标检测方面,文中提出的方法要优于其他两种方法。

3 结 论

文中提出了一种改进的 LCM 红外小目标检测算法,既增强了目标区对比度又有效抑制了背景杂波,从而提高了小目标的检测精度。实验结果表明:文中算法在提高图像信杂比和检测率的基础上,能很好地降低虚警率,同时在弱小目标检测能力等方面有着明显的优势。文中的不足之处在于当目标尺寸随着距离的变化而变大时,不能将小目标完整地分割提取出来。因此在未来的工作中,如何完整地提取出小目标是研究的重点。

参考文献:

- [1] Tom V T, Peli T, Leung M, et al. Morphology-based algorithm for point target detection in infrared backgrounds [C]//SPIE, 1993, 1954: 2-11.
- [2] Wang Weihua, Niu Zhaodong, Chen Zengping. Temporal-spatial fusion filtering algorithm for small infrared moving target detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(6): 714-718. (in Chinese)
王卫华, 牛照东, 陈曾平. 基于时空域融合滤波的红外运动小目标检测算法 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(6): 714-718.
- [3] Wang X, Lv G, Xu L. Infrared dim target detection based on visual attention [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(6): 513-521.
- [4] Qi S, Ma J, Tao C, et al. A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 495-499.
- [5] Chen C L P, Li H, Wei Y, et al. A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 574-581.
- [6] Liu Yunlong, Xue Yuli, Yuan Suzhen, et al. Infrared small targets detection using local mean [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 815-822. (in Chinese)
刘运龙, 薛雨丽, 袁素真, 等. 基于局部均值的红外小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 815-822.
- [7] Huang Min, Bao Susu, Qiu Wenchao. Study and simulation of surgical navigation based on binocular vision under visible light[J]. *Robot*, 2014, 36(4): 461-468, 476. (in Chinese)
黄敏, 鲍苏苏, 邱文超. 基于可见光下双目视觉的手术导航研究与仿真[J]. 机器人, 2014, 36(4): 461-468, 476.
- [8] Song Xin, Luo Jun, Wang Luping, et al. Motion target tracking based on GVF Snake [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(2): 226-228. (in Chinese)
宋新, 罗军, 王鲁平, 等. 基于 GVF Snake 的运动目标跟踪方法[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 226-228.
- [9] Sun Wei, Wang Hongfei, Shao Xijun. Infrared target segmentation method based on improved watershed algorithms [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S4): 31-37. (in Chinese)
孙伟, 王宏飞, 邵锡军. 基于改进分水岭算法的红外图像分割[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S4): 31-37.
- [10] Yang Yifan, Tian Yan, Yang Fan, et al. Tracking of infrared small-target based on improved Mean-Shift algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2164-2169. (in Chinese)
杨一帆, 田雁, 杨帆, 等. 基于改进 Mean-Shift 算法的红外小目标跟踪[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2164-2169.
- [11] Lu Ruitao, Huang Xinsheng, Xu Wanying. Method of infrared small target detection based on Contourlet transform and Facet model[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2281-2287. (in Chinese)
卢瑞涛, 黄新生, 徐婉莹. 基于 Contourlet 变换和 Facet 模型的红外小目标检测方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2281-2287.