

文章编号:1007-2780(2016)08-0793-08

结合形态学和 Canny 算法的红外弱小目标检测

丁 鹏^{1,2*}, 张 叶¹, 刘 让^{1,2}, 贾 平¹
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中科院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了解决红外弱小目标精确自适应检测的问题,本文提出了一种基于 Canny 算法、top-hat 算法和中值滤波算法结合的红外弱小目标检测方法。该方法不同于传统的 Canny 弱小目标检测方法,本方法先选定合适的窗口对图像进行中值滤波处理,在去除噪声的同时有效保持图像的边缘信息;再用形态学处理中的 top-hat 算法抑制复杂背景,去除云层;最后使用自适应 Canny 算法提取红外小目标的边缘信息精确定位目标的位置。实验结果证明了该方法的有效性和优越性,本文设计的组合算法能够精确定位小目标的位置,信噪比增益达到 10 倍以上,排除噪声以及云层的干扰作用较强,具有一定的自适应性。

关 键 词:红外小目标;Canny 算法;中值滤波;形态学处理
中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163108.0793

Infrared small target detection based on adaptive Canny algorithm and morphology

DING Peng^{1,2*}, ZHANG Ye¹, LIU Rang^{1,2}, JIA Ping¹
(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: In order to solve the problem of accurate and adaptive detection of infrared dim small targets, this paper proposes a new method based on median filter which combines top-hat algorithm and Canny algorithm. This method is different from the infrared dim target detection using traditional Canny algorithm. First, this method selected suitable window for image processing, using median filter to remove noise effectively and keep the image edge information at the same time. Then this method eliminates the effect of complex dynamic background by using top-hat algorithm. Finally, this method adopts adaptive Canny algorithm to extract the edge of infrared small target. Experimental results demonstrate the effectiveness and superiority of the proposed method, this design method which is self-adaptive can accurately locate the position of the small target, the SNR gain reaches more than 10

收稿日期:2016-03-28;修订日期:2016-05-11.
基金项目:吉林省重大科技攻关专项(No.11ZDGG001)
Supported by Major Scientific and Technological Research Projects in Jilin Province(No.11ZDGG001)
* 通信联系人, E-mail: dingpeng14@mails.ucas.ac.cn

times. Besides, this method can eliminate noise and the effect of clouds. Moreover, this method has a certain degree of adaptability.

Key words: infrared small target; Canny algorithm; median filtering; morphology

1 引言

现代战争中精确制导武器能够有效摧毁敌人的中坚力量,节约战争成本,减少无辜平民伤亡。目前大多数国家意识到了这一点,所以精确打击被广泛应用于现代信息战。同时,红外预警系统以被动的工作方式,通过感受目标和背景的辐射差异来探测和识别目标,其具有灵敏度高,穿透烟雾效果强,探测距离远等优点。作用距离足够远是红外预警系统一直追求的目标,往往远距离探测到的目标,呈小目标形式存在且信号比较弱即红外弱小目标^[1]。红外弱小目标在图像中所占像素非常少,一般占几个或者十几个像素^[2]。另外弱小目标在图像中不仅缺少尺寸、形状、纹理等信息,而且缺乏目标和背景的先验信息可以利用。单帧图像检测中弱小目标强度很弱,容易淹没在复杂云层等干扰信号中,噪声、云层等因素的干扰对探测结果有较大的影响^[3]。红外弱小目标检测往往应用于军事领域,对自适应性和精确性要求非常高。为精确且自适应检测红外小目标的位置,除了在硬件上改进,算法上的改进也是至关重要的。鉴于红外弱小目标的特性,通过有效地背景抑制以及降噪处理是比较有效的手段。目前常用的弱小目标检测方法主要有高通滤波的方法^[4]、双边滤波的方法^[5]、形态学方法^[6]、边缘检测法^[7]、帧间差分法^[8]等。这些方法具有运算量少,时间复杂度低的特点,但是当目标处于复杂背景或噪声显著时,处理后的图像会产生背景泄露,即在检测到目标的同时也检测到噪声、云层等干扰项,检测结果信噪比依旧较低^[2, 4, 7, 8]。

针对天空背景下的弱小目标图像,本文提出了一种结合中值滤波、形态学处理以及改进型自适应 Canny 算法的红外弱小目标检测方法。首先选定合适的窗口对图像进行中值滤波处理,其次用形态学处理中的顶帽(top-hat)算法抑制复杂背景,再利用顶帽和底帽算法配合增强目标的

对比度,最后利用自适应 Canny 算法提取红外小目标的边缘信息,精确定位小目标的位置。实验结果表明,该检测算法快速而且准确,并且具有一定的自适应性。

2 算法原理

2.1 中值滤波

中值滤波是一种非线性滤波的方式,它可以有效地削减图像中的椒盐噪声、脉冲噪声,其在去除噪声的同时也可以有效保持图像的边缘信息,因此在被广泛应用^[9]。中值滤波的基本原理是:选定一定大小的窗口在图像上滑动,通常选择奇数大小的窗口进行处理,窗口中心的点为待处理点,将窗口内所有的点按像素值从大到小排序后,选定排序处于中间的像素值,用该像素值代替窗口中心位置(待处理点)的像素值^[9-10]。根据小目标所占像素很少这一特点,本文选取 3×3 大小的窗口。图 1 为图像中值滤波以后的结果。

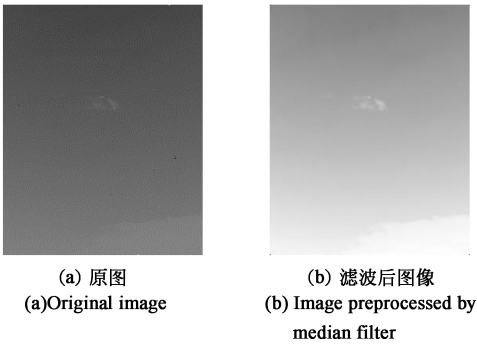


图 1 中值滤波处理结果
Fig.1 Image preprocessed by median filter

从图 1 处理的结果可以看出,经过中值滤波后的图像较为有效地去除了噪声,保留了绝大多数边缘信息。

2.2 形态学处理

腐蚀和膨胀是形态学最基础的内容,膨胀操作是目标向外扩张变粗的过程;腐蚀操作是目标向内收缩变细的过程。如 A 被 B 膨胀,定义为:

$$A \oplus B = \{z \mid (B)_z \cap A \neq \emptyset\}, \tag{1}$$

如 A 被 B 腐蚀定义为:

$$A \ominus B = \{z \mid (B)_z \subseteq A\}, \tag{2}$$

其中: $\emptyset$ 表示空集, $\hat{B}$ 表示 B 的反射, $(B)_z$ 表示点 z 对集合 B 的平移; B 表示为结构元。在形态学操作中,先膨胀再腐蚀被定义为闭操作,反之则定义为开操作:

$$g \cdot b = (g \oplus b) \ominus b, \tag{3}$$

$$g \circ b = (g \ominus b) \oplus b, \tag{4}$$

其中, b 是结构元, g 是原图。顶帽算法用公式表示是:

$$g - g \circ b = g - ((g \ominus b) \oplus b), \tag{5}$$

而底帽算法是:

$$g - (g \cdot b) = g - ((g \oplus b) \ominus b). \tag{6}$$

图像经过顶帽算法处理后,可以有效抑制背景,去除云层的干扰^[11]。因为小目标所占像素极少这一特点,本文选取的结构元半径为 1 或 2 个像素。图像经过顶帽(top-hat)算法处理以后结果如图 2 所示。

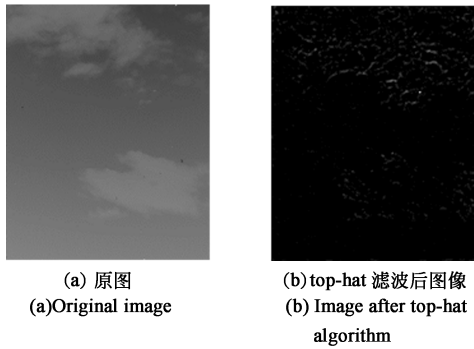


图 2 顶帽算法处理结果

Fig.2 Image preprocessed by top-hat algorithm

图 2 表明,顶帽算法在去除背景是起到一定的作用,但依然无法直接得到目标的准确信息。

2.3 Canny 算法

边缘是是图像最重要的特征之一,常用于目标检测。目前主要有: sobel、prewitt、log、canny 等算法进行边缘检测。其中,Canny 的检测效果较好,能很好地检测到边缘且具备一定的抗噪性^[12]。Canny 算法由 John Canny 在 1986 年提出的一种边缘检测算法,在求取边缘的过程中有如下 3 个原则:(1)最大信噪比:探测真实边缘的可能性应该最大化,而错误的探测到

非边缘的可能性应该最小化;(2)定位原则:检测到的边缘应该尽可能的是真实的边缘;(3)单边响应原则:一个真实的边缘不应该产生多个探测到的边缘^[13]。Canny 算法的主要流程包括:

步骤 1:滤波,主要用于平滑图像,去除图像的噪声,传统的 Canny 算法选择高斯滤波;

步骤 2:计算滤波后图像的梯度幅值和梯度方向,得到粗略的边缘;

步骤 3:非极大值抑制,用于边缘精确定位和细化;

步骤 4:双阈值设定以及边缘链接,当像素值高于高阈值则认为是强边界点即真实的边缘,低于低阈值则认为是非边界点,介于两者之间的认为是潜在边缘,当潜在边缘与强边界点相连接时就认为潜在边缘也是真实的边界点否则不是,这是因为潜在边缘要么是真实边缘产生要么是噪声产生,但是噪声大多是散乱的位于图像中,只有少部分处于真实边缘附近,所以当潜在边缘附近有强边缘时基本可以认定是真实的边缘^[13-14]。

原始 Canny 算法需要人为设定阈值,每幅图像都需要人为调整阈值,这样的方式效率非常低下且错误率较高。传统的 Canny 算法检测结果如图 3 所示。

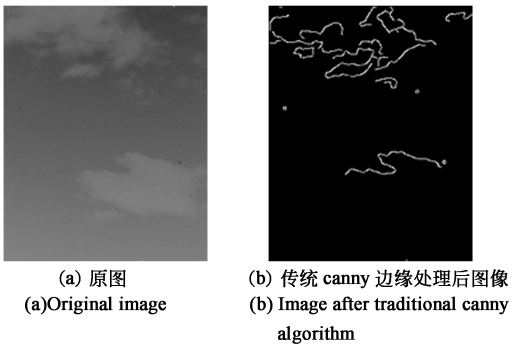


图 3 传统 Canny 算法处理结果

Fig.3 Image preprocessed by traditional Canny algorithm

从图 3 的检测结果来看,Canny 此时检测到正确的目标的同时带入了虚假目标和云层的边缘信息,造成这样结果的原因主要是:(1)奇异点的干扰;(2)云层的干扰;(3)阈值设定不当。所以去噪、去除奇异点、排除云层的干扰以及自适应的设

定 Canny 算法的阈值是必然的选择。

3 本文设计的算法

本文结合中值滤波在去噪同时可以保持边缘信息,顶帽(top-hat)算法有效去除云层干扰以及 Canny 算法检测边缘的优势提出新的红外小目标精确检测算法。具体流程如图 4 所示。

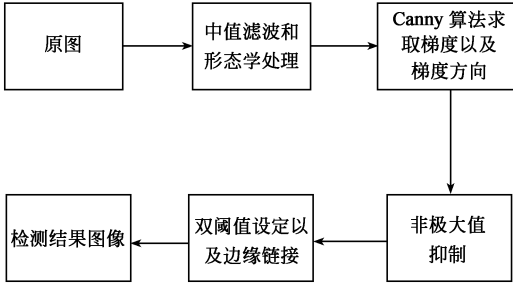


图 4 算法流程

Fig.4 Procedure of the algorithm

第一步:首先选择 3×3 窗口大小的中值滤波对原始图像 $f_1(x, y)$ 进行平滑处理,在有效去噪的同时保证了目标的细节信息得到 $f_2(x, y)$,其次用结构元半径为 1 个像素的顶帽算法处理图像 $f_2(x, y)$ 以抑制云层的干扰,初步得到目标所在的区域,再使用顶帽算法和底帽算法配合增强图像中目标的对比度得到图像 $f_3(x, y)$ 。所得结果如图 5 所示。

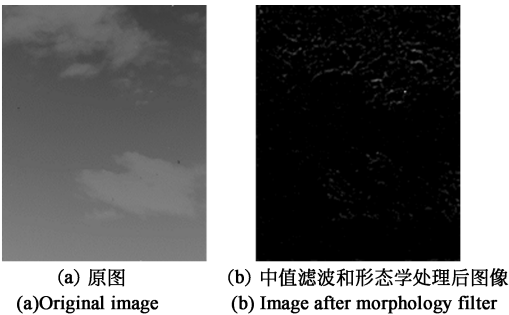


图 5 形态学处理结果

Fig.5 Image preprocessed by morphology filter

图 5 可看出,结合中值滤波和形态学处理图像以后,有效去除了奇异点噪声和削弱了云层的干扰,但是,此时依然无法精确定位小目标位置。

第二步:因为上述处理过程已经有中值滤波,为避免二次滤波带来边缘信息的损失,所以直接对 $f_3(x, y)$ 求梯度和梯度方向得到梯度图像 $f_4(x, y)$,求取梯度以及梯度方向时使用八邻域的方式;

$$d_x(i, j) = 2 \times f_3(i, j+1) - 2 \times f_3(i, j-1) + f_3(i-1, j+1) - f_3(i-1, j-1) + f_3(i+1, j+1) - f_3(i+1, j-1), \quad (7)$$

$$d_y(i, j) = 2 \times f_3(i+1, j) - 2 \times f_3(i-1, j) + f_3(i+1, j-1) - f_3(i-1, j-1) + f_3(i+1, j+1) - f_3(i-1, j+1). \quad (8)$$

则由上式得到梯度幅值为:

$$f_4(i, j) = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}. \quad (9)$$

梯度方向为:

$$\theta(i, j) = \arctan\left(\frac{d_x}{d_y}\right). \quad (10)$$

第三步:对图像 $f_4(x, y)$ 进行非极大值抑制得到细化后的图像 $f_5(x, y)$;在得到梯度幅值的图像后,其边缘不够精确,噪声干扰依旧非常严重。为满足单边响应原则并得到细化的边缘,利用边缘的方向信息对其进行非极大值抑制从而得到精细的边缘图像。具体过程为:如果像素点的梯度幅值比沿着梯度方向的邻近梯度幅值小,则视为非边界点否则定义为边界点。

第四步:对图像 $f_5(x, y)$ 设定双阈值以及边缘链接,得到最后的处理结果。针对原始算法求取阈值需要人为设定阈值,严重阻碍算法的实用性。本文采用 OTSU 算法自动求取阈值^[14-15]。假设一幅灰度图像的直方图成分可表示为:

$$P_q = \frac{n_q}{n}, \quad q = 0, 1, 2, 3, \dots, L-1, \quad (11)$$

其中: n 是图像的总的像素数, n_q 是灰度级为 q 的像素的总数量, L 为所有可能的灰度级数。设阈值 k 选定, C_1 是灰度级 $[0, 1, \dots, k-1]$ 的像素集合, C_2 是灰度级 $[k, k+1, \dots, L-1]$ 的像素集合,定义最大类间方差 δ_B^2 为:

$$\delta_B^2 = P_1(k) [m_1(k) - m_G]^2 + P_2(k) [m_2(k) - m_G]^2, \quad (12)$$

其中: $P_1(k)$ 是集合 C_1 发生的概率:

$$P_1(k) = \sum_{i=0}^k P_i, \quad (13)$$

$P_2(k)$ 是集合 C_2 发生的概率且

$$P_2(k) = 1 - P_1(k), \quad (14)$$

m_G 为整个图像的平均灰度:

$$m_G = \sum_{i=0}^{L-1} P_i .$$

(15)

OTSU(最大类间方差)^[16]最佳分割算法即选取适当的 k ,使得 δ_B^2 取得最大值的算法,若使 δ_B^2 取得最大值的 k 不止一个则取 k 的均值。通过 OTSU 算法自动求得高阈值 T_h ,低阈值取高阈值的一半。最终得到的结果如图 6 所示。

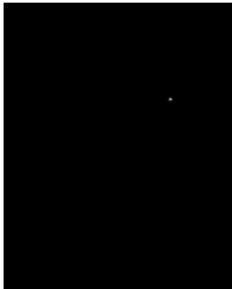


图 6 最终的检测结果

Fig.6 Result of detection

4 实验结果及分析

本文利用形态学、中值滤波和 Canny 算法相结合的算法进行红外小目标检测,使用的是0~255 像素值的灰度图,所有图像均由工程实际拍摄所得,并且图中存在一定的云层,以及噪声。对多幅不同的图像分别进行目标检测,处理结果如图 7 所示。

为了定量描述算法的性能,本文使用信噪比 SNR 和信噪比增益 G_{SNR} 作为检测结果的评价标准^[17],两者的定义分别如下:

$$SNR = \frac{g_1 - g_2}{\delta} ,$$

(16)

$$G_{SNR} = \frac{SNR_2}{SNR_1} ,$$

(17)

其中 g_1 和 g_2 分别为选取窗口内目标的最大灰度值和窗口内所有像素点的均值, δ 为均方差;



7(a)

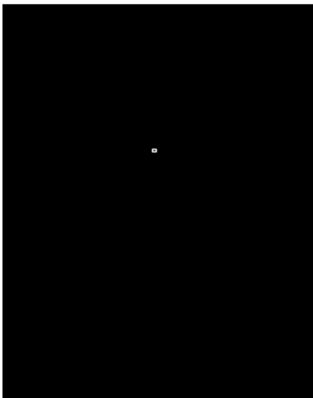
原图

Original image



传统 Canny 算法检测结果

Result of traditional Canny algorithm



本文算法检测结果

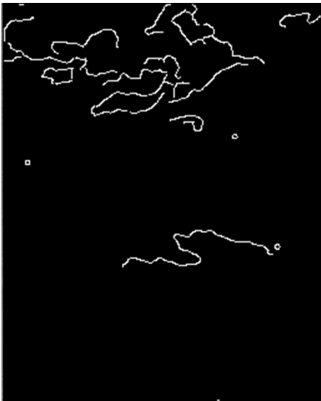
Result of our algorithm



7(b)

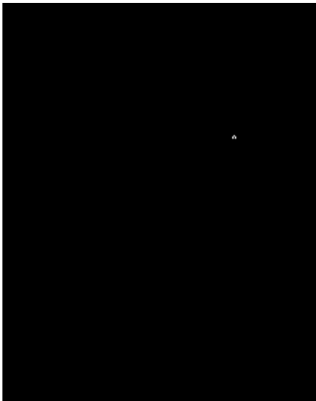
原图

Original image



传统 Canny 算法检测结果

Result of traditional Canny algorithm



本文算法检测结果

Result of our algorithm

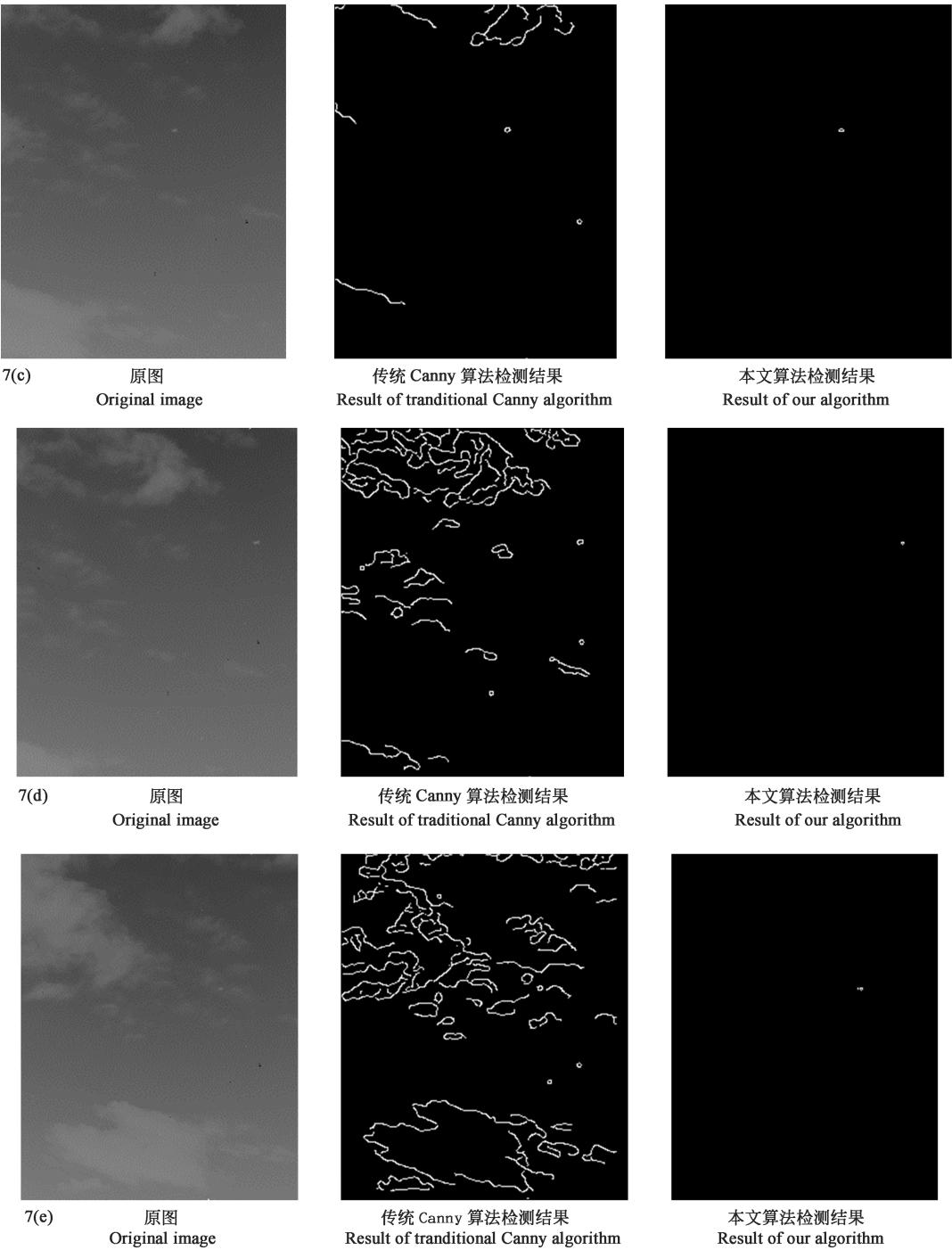


图 7 不同情形下的结果

Fig.7 Results of different cases detection

SNR_1 、 SNR_2 、 SNR_3 为原始图像信噪比, 原始 Canny 算法检测结果信噪比以及本文设计方法信噪比, G_{SNR} 为检测结果图像的信噪比与原图信噪比的比值。信噪比结果如下:

从图像结果可以看出检测结果较为理想, 均可以较为精确地检测到目标, 在云层影响较少或

者较多时都能够对其进行很好地抑制, 对于奇异噪点处理情况较为完好。基本实现了目标的精确定位。从信噪比定量分析来看, 处理后的信噪比明显高于原图以及原始 Canny 算法处理的结果, 其中图 7(a)、(c)、(d) 信噪比提高较少是因为原图中目标相对较为明显, 图 7(b)、(e) 中信噪比提

表 1 信噪比结果
Tab.1 Result of SNR

对象	信噪比 SNR ₁ /SNR ₂ /SNR ₃	原始 Canny 算法信噪比 增益 G_{SNR}	本文算法信噪比增益 G_{SNR}
原图 7(a)	2.516/6.207/26.402	2.467	10.490
原图 7(b)	2.229/7.793/26.402	3.496	19.732
原图 7(c)	2.257/19.935/26.402	8.832	11.290
原图 7(d)	2.585/10.894/25.591	4.213	9.897
原图 7(e)	1.277/4.901/29.230	3.836	22.879

高很多,是因为云层对目标的影响很大,几乎很难在原图中直接发现目标。综上,本文设计的算法具有一定的有效性和优越性。本文对 100 幅图像进行实验分析,所有图像均为 256×256 大小,平均每幅图像检测时间为 0.16 s,基本满足实时性要求。

5 结 论

为了更加有效精确定位红外弱小目标,本文提出了一种改进的 Canny 自适应目标检测算法,利用中值滤波、形态学处理以及 Canny 算法相结

合进行弱小目标检测。
在本文中,为了去除奇异点以及噪声先对图像进行中值滤波处理,得到滤波后的图像。其次,再用顶帽算法抑制背景以及配合底帽算法增强目标对比度,提高信噪比,基本确定目标可能存在的区域。最后使用自适应的 Canny 算法提取红外小目标的边缘信息实现自适应的目标定位。
实验的结果证明本文提出的方法能够精确定位小目标的位置,提取的目标信噪比较高,信噪比增益基本达到 10 以上。能够排除噪声以及云层的干扰,具有一定的自适应性。

参 考 文 献:

[1] CAO J, GAO C Q, XIAO Y X, *et al.* Infrared small target detection based on the tensor model [C]. *Proceedings of the 2014 7th International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*, Dalian: IEEE, 2014: 169-173.

[2] 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):814-822.

LIU Y L, XUE Y L, YUAN S Z, *et al.* Infrared small targets detection using local mean [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 814-822. (in Chinese)

[3] ZHANG W J, WANG X Q. Design of infrared small target detection software based on energy minimization constraints [C]. *Proceedings of the 2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA)*, Hunan: IEEE, 2014: 360-363..

[4] 侯洁,辛云宏.基于高通滤波和图像增强的红外小目标检测方法[J].*红外技术*,2013,35(5):279-284.

HOU J, XIN Y H. A method for infrared small target detection with high-pass filter and image enhancement technology [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(5): 279-284. (in Chinese)

[5] BAE T W, SOHNG K I. Small target detection using bilateral filter based on edge component [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, 31(6): 735-743.

[6] BAI X Z, ZHOU F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(6): 2145-2156.

[7] 连洁,韩传久,潘路.基于 Canny 算法的红外小目标边缘检测方法[J].*微计算机信息*,2007,23(18):308-310.

LIAN J, HAN C J, PAN L. Infrared target edge detection algorithm based on Canny algorithm [J]. *Microcomputer Information*, 2007, 23(18): 308-310. (in Chinese)

[8] 徐航,张喜涛,张军鹏.基于局部均值差分的红外小目标图像背景抑制算法[J].*航空学报*,2015,36(9):2869-2873.

- XU H, ZHANG X T, ZHANG J P. Background suppression algorithm for infrared small target image based on local mean difference [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica sinica*, 2015, 36(9): 2869-2873. (in Chinese)
- [9] DENG X Q, XIONGY, PENG H. A new kind of weighted median filtering algorithm used for image processing [C]. *Proceedings of the 2008 International Symposium on Information Science and Engineering*, Shanghai: IEEE, 2008, 2: 738-743.
- [10] WANG C Y, LI L L, YANG F P, *et al.* A new kind of adaptive weighted median filter algorithm [C]. *Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM)*, Taiyuan: IEEE, 2010, 11: 667-671.
- [11] PRASERTSAKUL P, KONDO T. A fingertip detection method based on the top-hat transform [C]. *Proceedings of the 2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Nakhon Ratchasima: IEEE, 2014: 1-5.
- [12] JOSHI S R, KOJU R. Study and comparison of edge detection algorithms [C]. *Proceedings of the 2012 Third Asian Himalayas International Conference on Internet (AH-ICI)*, Kathmandu: IEEE, 2012: 1-5.
- [13] CANNY J. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1986, PAMI-8(6): 679-698.
- [14] LI E S, ZHU S L, ZHU B S, *et al.* An adaptive edge-detection method based on the canny operator [C]. *Proceedings of the ESIAT 2009. International Conference on Environmental Science and Information Application Technology*, Wuhan: IEEE, 2009, 1: 465-469.
- [15] HUO Y K, WEI G, ZHANG Y D, *et al.* An adaptive threshold for the Canny Operator of edge detection [C]. *Proceedings of the 2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, Zhejiang: IEEE, 2010: 371-374.
- [16] 冈萨雷斯, 伍兹, 艾丁斯. 数字图像处理的 MATLAB 实现 [M]. 阮秋琦, 译. 北京: 清华大学出版社, 2013.
GONZALEZ R C, WOODS R E, EDDINS S L. *Digital Image Processing Using MATLAB* [M]. RUAN Q Q, Trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [17] 刘兴森, 王仕成, 赵静. 结合统计分布和非下采样 Contourlet 变换的红外小目标检测 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 908-915.
LIU X M, WANG S C, ZHAO J. Infrared small target detection based on nonsubsampling contourlet transform and statistical distribution [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(4): 908-915. (in Chinese)

作者简介: 丁鹏(1992—), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 主要从事图像处理方面的研究 E-mail: dingpeng14@mails.ucas.ac.cn

贾平(1964—), 男, 吉林延吉人, 博士, 研究员, 主要从事光学动态成像控制和图像处理技术方面的研究。E-mail: jiap@ciomp.ac.cn