

文章编号 1004-924X(2012)01-0171-08

红外弱小目标的分割预检测

靳永亮^{1,2}, 王延杰^{1*}, 刘艳滢¹, 黄继鹏^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:提出了一种目标分割预检测方法来提高检测红外弱小目标的准确性和实时性。针对红外图像的特点,利用改进的自适应背景感知算法抑制目标图像的背景以提高目标检测概率;根据已有的先验知识构造属性集,把灰度直方图限定在感兴趣区域,减少背景的影响;然后,利用属性直方图的最大熵进行图像分割以检测目标。为了提高分割算法运算速度,应用了快速递推算法。实验结果表明,本文提出的背景抑制算法能更好地抑制背景,提高图像的整体信噪比;分割算法具有更好的分割检测效果,候选目标点分割准确、虚警目标点较少,运算速度提高了91%。对分割图像进行后续处理,剔除了大部分虚警目标点,为后续目标准确检测提供了有力保障。

关键词:红外弱小目标检测;自适应背景感知算法;二维属性直方图;图像分割;分割后处理

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122001.0171

Pre-detection method for small infrared target

JIN Yong-liang^{1,2}, WANG Yan-jie^{1*}, LIU Yan-ying¹, HUANG Ji-peng^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: wangyj@ciomp.ac.cn*

Abstract: A segmentation and detection method for small infrared targets is proposed to improve the accuracy of target detection. Aiming at the characters of an infrared image, an improved background perception algorithm is used to suppress backgrounds for increasing the target detection probability, and the bound set is constructed to limit the gray level histogram into a Region of Interest (ROI) to reduce the interference of background. Then, target detection is achieved through image segmentation using the maximum entropy of a 2D bound histogram. Furthermore, the fast recurring algorithm is applied to the proposed algorithm for accelerating the running speed of the segmentation algorithm. Experiment results show that proposed background suppression algorithm has the better performance in background suppression and can improve the signal to Noise Ratio (SNR) of the image. Moreover, the segmentation algorithm shows a better effectiveness in target segmentation and detection, and its candidate target is separated more accurate with less false alarm points and running speed has im-

收稿日期:2011-05-23;修订日期:2011-06-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60902067)

proved by 91%. Through post-process for the image, most of the false alarm points are eliminated, which provides powerful guarantee for the subsequent accurate detection.

Key words: infrared small target detection; adaptive background perception algorithm; 2D bound histogram; image segmentation; image segmentation post-process

1 引言

红外弱小目标检测一直是红外搜索与跟踪、红外预警等系统的核心技术,为了尽早发现目标使系统有足够的反应时间,要求目标在很远处就能被检测到。这时目标成像面积很小,同时由于大气辐射对红外传感器的影响,图像中包含有严重的起伏背景。由于目标信号较弱小,缺乏形状、纹理等特征信息,而噪声和背景干扰较大,使得目标信号淹没其中难于分辨,表现为低信噪比弱小目标。对于此类目标,在进行目标检测之前,若能对单帧弱小目标场景图像进行有效的预处理,将会提高系统的目标检测性能和探测能力。

针对复杂背景下红外弱小目标检测面临的问题,许多学者进行了研究并提出了许多不同的解决方案。文献[1]提出了先利用三阶中心矩统计信息确定目标区域,然后基于 NSCT 变换确定小目标位置的红外图像小目标检测算法。文献[2]提出使用自适应形态学 Top-Hat 算子进行背景抑制,利用改进的自适应门限算法进行分割检测目标。文献[3]针对红外云层的特点提出使用模糊聚类的方法准确判别出图像的类别以实现弱小目标的检测。文献[4]验证了形态学滤波算法对背景的感知能力最强并对自适应背景感知算法进行了改进,简化了形态变换关系,优化了结构元构型,促进了滤波质量和运算速度的双向提高。文献[5]提出了修正 Top-Hat 算子,文献[6]使用修正的 Top-Hat 算子并利用神经元训练优化形态滤波结构元素进行红外弱小目标检测。经实验验证,修正的 Top-Hat 算子比经典 Top-Hat 算子滤波性能更好,然而使用神经网络算法优化结构元素选取虽然可以取得较好的实验结果,但算法复杂较难应用于实时系统。

由于红外场景的复杂度直接影响目标检测的难度,所以针对红外弱小目标检测,在考虑目标特性的同时还要注重背景的抑制。目前常用的背景

抑制方法有背景帧间对消处理和自适应背景估计。利用相邻帧间图像数据进行差分对消处理,往往对于静态视场的目标检测颇为有效,而在快速运动目标检测过程中,由于相邻帧间背景的动态变化很大,使用背景帧间对消的处理方法不能有效突出目标抑制背景。自适应背景估计可以对单帧图像进行背景估计以达到抑制背景提高目标检测准确度的目的,因此对于动态视场的目标检测也是有效的。

本文把改进的自适应背景感知算法和基于二维属性直方图的最大熵分割算法相结合对序列动态场景中的单帧图像进行目标预检测,为后续目标准确检测奠定了基础。

2 改进的自适应背景感知算法

自适应背景估计主要是针对图像中目标和背景的空间特性,使用空间滤波算法估计图像背景的起伏特性,利用背景估计图像和原图像进行差分对消处理,能有效抑制背景杂波提高图像信噪比,从而提高目标检测率。

数学形态学是图像分析中应用比较广泛的方法,灰度形态学是二值形态学的扩展,开运算用于去除较小的明亮细节,而相对的保持整体的灰度级和较大的明亮区域不变。闭运算经常用于去除图像中的暗细节部分,而相对的保持明亮细节不受影响。利用形态学理论的基本运算关系,通过一系列的变换组合,可形成背景感知的应用处理算法。

形态学背景感知方法的优劣取决于形态学变换规则和结构元选取,形态学变换规则一旦确定结构元的选取就成为关键的因素,由于圆形是在平面域上唯一具有各向同一性的结构,圆形结构元具有旋转不变性,无需多个单向结构元进行组合滤波,可兼顾多向性结构要求,然而使用单一尺度的结构元进行背景杂波抑制,形态滤波器输出存在统计的偏倚的问题,滤波效果不是很理想。

本文对形态滤波算法进行改进,形态学滤波器结构元素由两部分嵌套而成:内部结构元素 B_i (大小为 $n \times n$) 和外部结构元素 B_o (大小为 $m \times m$), 即 $B_i \subseteq B_o$ 。定义边缘结构元素为 $A = B_o - B_i$, 如图 1 所示。

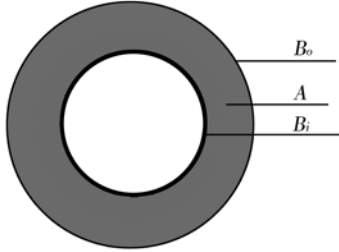


图 1 结构元形状

Fig. 1 Shape of structure element

设输入图像为 $F = \{(x, f(x))\}$, 其中 x 为图像平面的坐标点, $f(x)$ 为该坐标点的灰度值, 结构元素 $B = \{(x, b(x))\}$, $b(x)$ 为 x 坐标点的结构函数值。利用灰度形态学基本运算中的开、闭滤波操作对图像背景 $z(x)$ 的感知处理和目标特性 d_{tag} (亮度反差) 的获取可描述如下:

暗背景(亮目标):

$$\begin{cases} z_{dak}(x) = \min\{[(f \circ A) \cdot B_i](x), f(x)\} \\ d_{tag}(x) = f(x) - z_{dak}(x) \end{cases}, (1)$$

亮背景(暗目标):

$$\begin{cases} z_{brt}(x) = \max\{[(f \cdot A) \circ B_i](x), f(x)\} \\ d_{tag}(x) = z_{brt}(x) - f(x) \end{cases}, (2)$$

对于明暗背景交织的混合景物图像, 其目标特性 $d_{tag}(x)$ 可以综合表示为:

$$d_{tag}(x) = \max\{f(x) - z_{dak}(x), z_{brt}(x) - f(x)\}, (3)$$

其中 \circ 表示为形态开运算, \cdot 表示为形态闭运算。

3 二维属性直方图

设大小为 $M \times N$, 灰度等级为 L 的图像, 所有像素视为论域 $I = \{(x, y) | 0 \leq x \leq M-1, 0 \leq y \leq N-1\}$, 其中 (x, y) 表示像素。设 Q 为论域上具有某种属性的集合, $(x, y) \in Q$ 表示像素具有某种属性。仿照传统二维直方图的建立方法, 二维属性直方图定义为 $p_Q(i, j) - i, j$ (或 $N_Q(i, j) - i, j$) 形成的离散曲线, $P_Q(i, j)$ 表示具有属性 Q 且灰度为 i , 邻域灰度为 j 的点出现的概率。设定

图像 I 中具有某种属性的像素的个数为 N_Q , $n_Q(i, j)$ 表示具有某种属性且灰度值为 i , 邻域灰度值为 j 的像素对出现的频次。则^[7]

$$p_Q(i, j) = n_Q(i, j) / N_Q, (4)$$

设定 L_1, L_3 为属性集限定范围内灰度值的最小和最大值, L_2, L_4 为属性集限定范围内邻域灰度均值的最小和最大值。通常有 $0 \leq L_1, L_2, L_3, L_4 \leq L-1$, 则相应的属性直方图为 $(L_3 - L_1 + 1) \times (L_4 - L_2 + 1)$ 的矩阵, 如图 1 所示, 并由式(4)可得到^[7]:

$$\sum_{L_1 \leq i \leq L_3} \sum_{L_2 \leq j \leq L_4} p_Q(i, j) = 1, (5)$$

从某种意义上讲二维属性直方图是一种残缺的直方图, 它仅仅考虑了图像中具有某种属性的像素, 针对具体问题利用已有的先验知识舍弃了传统二维直方图中一些干扰成分或具体问题不关心的成分, 这在一定程度上降低了算法复杂性, 使计算量大大减少。对于同一幅图像, 不同的属性集对应不同的二维属性直方图, 使用时可以根据具体问题通过构造不同属性集得到不同的属性直方图, 使用更灵活。

4 二维属性直方图的最大熵阈值法及快速递推算法

对任意图像 I 假设目标亮度较高背景亮度相对较低, 如图 2 所示, 区域 A 对应背景区域, 区域

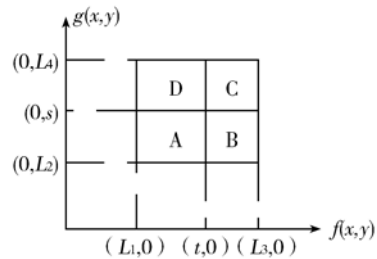


图 2 属性直方图示意

Fig. 2 Bound histogram

C 对应目标区域, 区域 B 和 D 的概率分布为 0, 图像二维属性直方图上分割阈值向量为 (t, s) , 背景和 target 出现的概率分别为

$$\omega_b(t, s) = \sum_{L_1 \leq i \leq t} \sum_{L_2 \leq j \leq s} p_Q(i, j), (6)$$

$$\omega_o(t, s) = \sum_{t \leq i \leq L_3} \sum_{s \leq j \leq L_4} p_Q(i, j) \approx 1 - \omega_b(t, s), (7)$$

相应的背景和目标的二维熵分别为

$$H_b(t, s) = \log \omega_b(t, s) + \frac{h_b(t, s)}{\omega_b(t, s)}, \quad (8)$$

$$H_o(t, s) = \log \omega_o(t, s) + \frac{h_o(t, s)}{\omega_o(t, s)}, \quad (9)$$

其中

$$h_b(t, s) = - \sum_{l_1 \leq i \leq t} \sum_{l_2 \leq j \leq s} p_Q(i, j) * \log(P_Q(i, j)), \quad (10)$$

$$h_o(t, s) = - \sum_{l_1 \leq i \leq t} \sum_{l_2 \leq j \leq s} p_Q(i, j) * \log(P_Q(i, j)) = h_T - h_b(t, s), \quad (11)$$

$$h_T = - \sum_{l_1 \leq i \leq t} \sum_{l_2 \leq j \leq s} p_Q(i, j) * \log(P_Q(i, j)), \quad (12)$$

图像总体熵为

$$H(t, s) = H_o(t, s) + H_b(t, s). \quad (13)$$

使用图像的熵作为分离性度量,选择使 $H(t, s)$ 达到最大的阈值向量 (t^*, s^*) 作为最佳阈值即:

$$(t^*, s^*) = \max_{l_1 \leq i \leq t, l_2 \leq j \leq s} H(t, s), \quad (14)$$

由上面的计算式可以看出每次计算 $H(t, s)$ 都需要重新计算 $\omega_b(t, s)$ 、 $h_b(t, s)$, 如果每次计算判别函数 $H(t, s)$ 都重新从 $i=0, j=0$ 开始计算各参数势必造成大量的重复计算, 计算复杂度为 $O(L^4)$ 。本文对文献[8]提出的快速递推算法进行推广应用。

$$\begin{aligned} \omega_b(t, s) &= \sum_{i=l_1}^t \sum_{j=l_2}^{s-1} p_Q(i, j) + \sum_{i=l_1}^t p_Q(i, s) = \\ \omega_b(t, s-1) &+ \sum_{i=l_1}^{t-1} p_Q(i, s) + p_Q(t, s) = \\ \omega_b(t, s-1) &+ \omega_b(t-1, s) - \omega_b(t-1, s-1) + p_Q(t, s), \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} h_b(t, s) &= \sum_{i=l_1}^t \sum_{j=l_2}^{s-1} (-p_Q(i, j) * \log p_Q(i, j)) + \\ &\sum_{i=l_1}^t (-p_Q(i, s) * \log p_Q(i, s)) = h_b(t, s-1) + \\ &\sum_{i=l_1}^{t-1} (-p_Q(i, s) * \log(p_Q(i, s))) + (-p_Q(t, s) * \\ &\log(p_Q(t, s))) = h_b(t, s-1) + h_b(t-1, s) - \\ &h_b(t-1, s-1) + (-p_Q(t, s) * \log(p_Q(t, s))), \end{aligned} \quad (16)$$

其他参数可以使用以上两个参数进行近似计算, 使用速递推算法使参数的计算大大简化, 复杂度降低为 $O(L^2)$, 算法的实时性大大提高。

5 实验结果

为了验证本文方法的有效性, 实验选取 1 幅包含多个弱小目标的红外图像 (350×258) 如图 3。二维直方图邻域窗口大小选择为 3×3 , 形态学滤波结构元尺度应比目标尺寸稍大, 大量实验验证内部和外部结构元尺寸相差较大时滤波效果较差, 实验中改进的背景感知算法的参数选择为 $B_i=2, B_o=3$, 传统单尺度自适应背景感知算法的结构元半径选取为 $B=2$ 。

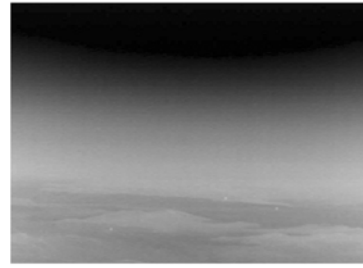


图 3 多目标图像

Fig. 3 Multi-target image

通常一幅包含目标的红外场景图像 $f(x, y)$ 可以描述为:

$$f(x, y) = t(x, y) + b(x, y) + n(x, y), \quad (17)$$

式中 $f(x, y)$ 表示红外场景图像, $t(x, y)$ 表示目标图像, $b(x, y)$ 表示背景图像, $n(x, y)$ 表示噪声图像。红外图像背景主要是大片灰度变化缓慢的区域, 像素点之间通常具有较大的相关性。目标的辐射特性和背景无关, 亮度较周围背景高, 呈现为孤立的亮点。噪声具有和目标点相似的特性, 但是空间上随机分布, 时域上不具有连续性。

红外弱小目标图像中目标区域很小在直方图上不能形成任何波峰, 而传统的直方图的分割算法对目标大小很敏感, 当目标和背景在图像中占的比例相差较大时, 分割图像背景泄露现象严重, 为后续的目标检测带来了较大困难。构造属性集的目的是利用已有的对红外图像的先验知识, 设定属性划分条件把直方图限定在真正感兴趣的区域以最大程度的减少背景的影响。对原始图像进行背景抑制后, 图像目标/背景对比度和信噪比提高, 占据图像绝大多数的背景区域被削弱灰度值很小, 目标区域的灰度值相对较高, 图像中感兴趣的目标区域主要分布在灰度值相对较高的区域,

构造属性集时保留灰度值相对较高的区域,属性集表示为:

$$Q = \{(x, y) | th \leq f(x, y) \leq L-1, th \leq g(x, y) \leq L-1, 0 \leq x \leq M-1, 0 \leq y \leq N-1, 0 \leq th \leq L-1\}, (18)$$

其中 $f(x, y)$ 表示 (x, y) 处的像素灰度值, $g(x, y)$ 表示像素 (x, y) 处的邻域平均灰度均值, th 表示二维直方图的属性划分条件。由于红外图像中目标区域的面积远小于背景区域面积,目标灰度相对较高,占据图像的绝大部分的背景区域灰度相对较小,目标灰度值远大于图像的平均灰度,使用属性划分条件削减参与运算的背景像素数量可有效提高分割算法性能,改善背景泄露的现象,为后续目标检测提供有力保障。基于对背景抑制后红外图像的特性分析,选取 $th = m + k\sigma$, 其中 m 表示图像的灰度均值, k 为调节系数, σ 表示图像的标准差,调节系数根据图像的信噪比确定。实验表明该方法比传统直方图方法更加灵活,分割效果更理想。对分割后图像利用文献[9]提出的双分析模板目标检测方法计算候选目标区域在原始图像中的复杂度,使用不同模板计算的复杂度在非目标区域变化不大,而在目标区域有较大变化,由此可剔除部分虚假的候选目标点减少后续目标检测的难度,而对于和目标特性很相近的强边缘和噪声点,需要通过时域方法进一步判别。

图 4 为原始图像的空间分布图,图 5(a)、(b) 为分别使用原始背景感知算法(算法 1)和改进的背景感知算法(算法 2)进行背景抑制的结果,算法的性能比较见表 1,使用全局信噪比增益 (ISNR),局部信噪比增益 (LSNR),和背景抑制因子 (BSF) 3 个评价指标来衡量滤波的性能 $ISNR = SNR_o / SNR_i$, $LSNR = LSNR_o / LSNR_i$, $BSF = \sigma_{in} / \sigma_{out}$ 其中 SNR_i , SNR_o 分别表示输入输出图像

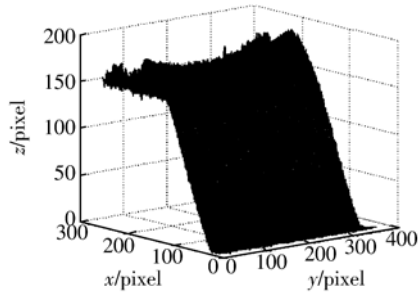


图 4 空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution plot

的全局信噪比。 $LSNR_i$, $LSNR_o$ 分别表示目标周围局部区域的信噪比,实验中局部区域大小为 20×20 ,测试原始图像目标的局部信噪比在 1.4~2.0 之间,全局信噪比在 0.9~1.5 之间。 σ_{in} , σ_{out} 分别表示滤波前后图像的标准差。图 6 为图 5 (b)的直方图及空间分布图,其中二维直方图描述了图像灰度的统计分布,空间分布图描述了图像灰度的空间分布。属性直方图和空间分布图描述了属性划分之后灰度的统计特性和空间分布特性,通过比较发现进行属性划分后参与分割检测运算的像素点明显减少,使运算量大幅下降,背景像素参与数量的削减使目标和背景的比例差减小,有利于减少背景的泄露,改善图像的分割效果。图 7(a)、(b)分别为使用基于传统直方图的快速递推最大熵分割算法(分割算法 1)和本文分割算法(分割算法 2)对图 5(b)进行分割的结果,不同算法的分割阈值及运算时间见表 2。分割后处理结果如图 8 所示,本文的分割检测和分割后处理时间之和与基于传统直方图算法的分割检测时间相当,预检测性能明显提高。

表 1 背景抑制性能比较

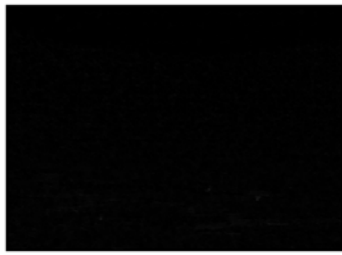
Tab.1 Comparison of background suppression performance

图像	评价指标	背景抑制算法 1	背景抑制算法 2	
多目标红外图像	整体	BSF	34.68	38.50
	目标 1	LSNR	3.68	3.81
		ISNR	9.13	10.15
	目标 2	LSNR	4.34	5.54
		ISNR	7.14	7.93
	目标 3	LSNR	3.28	4.01
	ISNR	9.40	9.83	

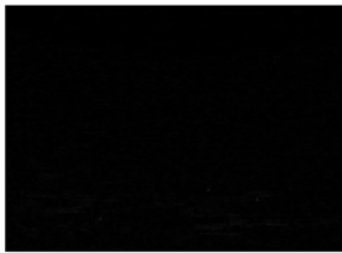
表 2 图像分割阈值及运算时间

Tab.2 Image segmentation threshold and process time

图像	分割算法	分割阈值	分割运算时间/ms
改进的背景感知算法处理后多目标红外图像	分割算法 1	(8,6)	11.12
	分割算法 2	(11,9)	5.82



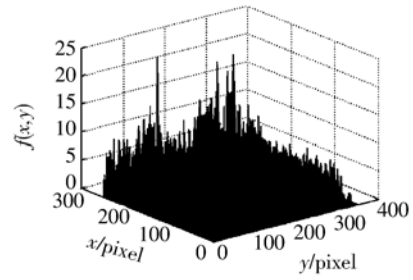
(a) 算法 1
(a) Algorithm 1



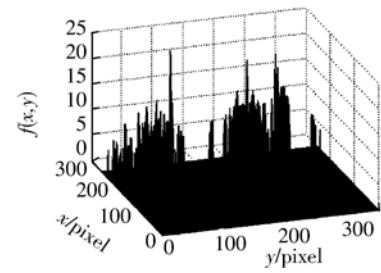
(b) 算法 2
(b) Algorithm 2

图 5 背景抑制结果

Fig. 5 Results of background suppression



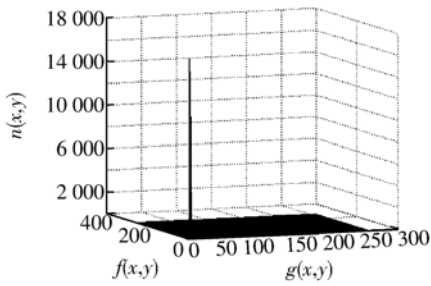
(c) 空间分布图
(c) Spatial distribution plot



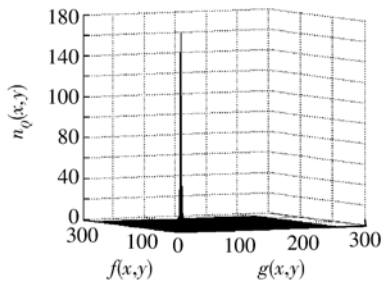
(d) 属性空间分布图
(d) Bound spatial distribution plot

图 6 背景抑制后图像直方图及空间分布图

Fig. 6 Histogram and spatial distribution plot of image after background suppression



(a) 二维直方图
(a) Two dimensional histogram



(b) 二维属性直方图
(b) Two dimensional bound histogram



(a) 分割算法 1
(a) Segmentation algorithm 1



(b) 分割算法 2
(b) Segmentation algorithm 2

图 7 图像分割结果

Fig. 7 Results of image segmentation



图 8 分割图像后处理结果

Fig. 8 Post-process result of segmentation image

改进的自适应背景感知算法具有更好的滤波性能,滤波后图像整体信噪比提高;另外由于根据红外图像的信噪比灵活选取属性划分条件,分割算法的分割效果较理想,能较好地分割出候选目标点。虚警目标点及背景杂散噪声点较少,对分割后图像进行后处理剔除了大部分虚警目标点为后续的目标准确检测提供了有力保障。从运算时间分析,由于使用了快速递推算法且属性直方图大幅削减了算法运算量,运算速度较基于传统直方图算法提高了 91%,算法的实时性更好。

参考文献:

- [1] 刘兴森,王仕成,赵静. 结合统计分布和非下采样 Contourlet 变换的红外弱小目标检测[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 908-915.
- LIU X M, WANG SH CH, ZHAO J. Infrared small target detection based on nonsubsampling Contourlet transform and statistical distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 908-915. (in Chinese)
- [2] 曾明,李建勋. 基于自适应形态学 Top-Hat 滤波器的红外弱小目标检测方法[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(1): 90-93.
- ZENG M, LI J X. The small target detection in infrared image based on adaptive morphological Top-Hat filter [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(1): 90-93. (in Chinese)
- [3] 李欣,赵亦工. 基于模糊分类的弱小目标检测方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2312-2320.
- LI X, ZHAO Y G. Approach to dim and small target detection based on fuzzy classification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2312-2320. (in Chinese)
- [4] 余农,吴常泳,汤心溢,等. 红外目标检测的自适应

6 结 论

本文首先利用改进的自适应背景感知算法对单帧图像进行滤波抑制背景和噪声,然后利用二维属性直方图的最大熵进行图像分割检测出候选目标点。实验表明改进的自适应背景感知算法能够更好地滤除背景杂波,提高图像的整体信噪比,为目标分割预检测提供了有利条件。根据背景抑制后红外图像的特性构造属性集将二维直方图限定在感兴趣区域,然后利用二维属性直方图的最大熵进行图像分割,可有效分割检测出候选目标点,背景泄露现象得到极大改善,虚警目标点明显减少,分割后利用双分析模板法剔除了大部分虚警目标点,后续可使用流水线管道结构^[10]检测出真正的目标点,经验证本文算法具有较好的预检测性能和实时性,适用于较复杂背景下实时进行红外弱小目标的检测。

- 背景感知算法[J]. 电子学报, 2005, 33(2): 200-204.
- YU N, WU CH Y, TANG X Y, *et al.*. Adaptive background perception algorithm for infrared target detection[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 2(1): 201-204. (in Chinese)
- [5] JACKWAY P T. Improved morphological Top-Hat [J]. *IEEE Electronic Letters*, 2000, 14(6): 1194-1195.
- [6] 周洪武,朱兆达,吴一全,等. 基于 TOP-HAT 算子滤波器算子的红外弱小目标检测算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(2): 213-216.
- ZHOU H W, ZHU ZH D, WU Y Q, *et al.*. Optimized design of improved TOP-HAT filter based on genetic algorithms of neural network [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2007, 39(2): 213-216. (in Chinese)
- [7] 郭海涛,田坦. 利用二维属性直方图的最大熵的图像分割方法[J]. 光学学报, 2006, 26(4): 506-509.
- GUO H T, TIAN T. Image segmentation using the maximum entropy of the two-dimensional bound histogram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(4): 506-509. (in Chinese)
- [8] 汪海洋,潘德炉. 二维 Otsu 自适应阈值选取的快速实现[J]. 自动化学报, 2007, 33(9): 968-971.

- WANG H Y, PAN D L. A fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 33(9):968-971. (in Chinese)
- [9] 李欣, 赵亦工, 郭伟. 基于复杂度的自适应门限弱小目标检测[J]. *光子学报*, 2009, 38(8): 2144-2149.
- LI X, ZHAO Y G, GUO W. Adaptive threshold detection method for dim and small target based on image complex degree[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(8): 2144-2149. (in Chinese)
- [10] 彭嘉雄, 周文琳. 红外背景抑制与小目标分割检测[J]. *电子学报*, 1999, 27(12): 47-51.
- PENG J X, ZHOU W L. Infrared background suppression for segmenting and detecting small target [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(12): 47-51. (in Chinese)

作者简介:



靳永亮(1984—),男,河南濮阳人,博士研究生,2007年于东北师范大学获得学士学位,主要从事数字图像处理、虚拟场景设计方面的研究。E-mail: guangjisuojin@163.com



黄继鹏(1984—),男,吉林磐石人,博士研究生,2007年于东北师范大学获得学士学位,主要从事数字图像处理,高速图像存储、显示及传输方面的研究。E-mail: huangjp2007@sina.com



刘艳滢(1965—),女,辽宁营口人,研究员,硕士生导师,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: liuyy@ciomp.ac.cn



王延杰(1963—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: wangyj@ciomp.ac.cn

● 下期预告

高精度无导轨位移平台误差分析

曹佃生^{1,2}, 高云国¹

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

直线度和耦合位移量是高精度无导轨位移平台的重要指标。为了分析基于补偿式柔性平行四杆机构的高精度位移平台的运动精度,对变形板尺寸误差、比例杆球心距误差和内外变形板装配夹角误差等误差源进行了分析计算。采用半梁模型对变形板进行了分析,得到变形板行程与耦合位移量的关系,列出了平台直线度误差和耦合位移量误差关于平台位移和变形板尺寸的表达式。使用自准直仪和高精度微分测量头对平台直线度和耦合位移量进行了测量,实验表明:该补偿式结构的高精度无导轨位移平台在大行程(≤ 5 mm)时,仍具有较高的运动精度,直线度小于 $1.5''$,耦合位移量小于 $13.7 \mu\text{m}$,与理论分析吻合。