

基于视觉显著性和目标置信度的红外车辆检测技术

齐楠楠^{1,3}, 姜鹏飞², 李彦胜², 谭毅华^{1,2}

- (1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471023;
2. 华中科技大学 自动化学院, 湖北 武汉 430074;
3. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471023)

摘要: 提出了一种复杂地面背景下的红外车辆检测算法。首先, 提出一种新的自适应分段线性灰度拉伸方法来增强当图像整体亮度偏低时的目标信息。其次, 利用拉伸后图像的显著性图生成目标潜在的兴趣区。再次, 利用平均梯度法在兴趣区内进行目标的边缘再分割, 完成目标精确分割检测。最后, 利用车辆的红外融合特征计算目标置信度, 对目标进行评估和确认。实验结果表明: 对实际拍摄的红外图像进行检测的算法可有效地检测出地面车辆目标。

关键词: 自动对比度调整; 视觉显著性; 平均梯度; 边缘分割

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0604005

Infrared vehicle detection based on visual saliency and target confidence

Qi Nannan^{1,3}, Jiang Pengfei², Li Yansheng², Tan Yihua^{1,2}

- (1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471023, China;
2. School of Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. Luoyang Institute of Electro-optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang 471023, China)

Abstract: An algorithm of infrared vehicle detection under the complex background was propose. First, a novel self-adaption piecewise linear stretching function was utilized to enhance the targets when the overall intensity of image was low. Second, the saliency map of the enhanced image was used to generate the ROIs of the potential targets. Then, the vehicle targets were able to be detected by the edge-based segmentation in ROIs using average gradient. Finally, multiple features were fused to discriminate the belief of a region belonging to a vehicle target. Experimental results on the real infrared images show that the algorithm can effectively detect the vehicle target on ground.

Key words: auto-contrast ajustment; visual saliency; average gradient; edge segmentation

收稿日期: 2016-10-10; 修订日期: 2016-11-20

基金项目: 航空科学基金(20135179007)

作者简介: 齐楠楠(1982-), 女, 工程师, 主要从事图像信息处理方面的研究。Email: eoei@vip.sina.com

0 引言

红外图像的目标检测与识别是武器系统的关键技术之一,同时也是光学和图像领域的研究热点。特别是在无人机或弹载平台实现侦打一体化功能时,对机动车辆等时敏目标的检测是其中非常关键的技术。当成像设备距离待测目标较远时,目标在成像面呈现为小目标,国内外学者已经在红外图像小目标检测方面做了大量工作^[1-3]。参考文献[4]提出用两个相同类型的结构元素重新组织经典 Top-hat 变换的运算形成新型 Top-hat 变换,新型 Top-hat 变换较经典 Top-hat 变换和其他常用算法能更好地检测复杂背景下的红外弱小目标。参考文献[5]根据人类视觉系统(Human Visual System)的特性,提出了一个基于拉普拉斯尺度空间理论的一个优化方法,通过在拉普拉斯尺度空间上调整和最大化信号杂波比(TM-SCR)来达到增强目标信号和抑制背景杂波的目的。参考文献[6]提出一种基于内核的非参数回归方法,用以背景预测和去除杂波,最终应用于红外目标检测。参考文献[7]的红外目标检测是基于背景抑制的方式来进行的,文中提出了一个谐波和稀疏矩阵的分解模型,将图像分解成代表背景部分的谐波和代表目标部分的稀疏矩阵。参考文献[8]提出了基于费舍尔线性判别非线性子空间检测法,并把含有目标和背景的红外图像转换成二值分类问题来进行红外目标检测。参考文献[9]主要采用时空域融合的方法来对红外场景的杂波进行抑制,文中算法对红外图像序列采用空间双边滤波和时间交叉积(Temporal Cross Product)相结合的策略;参考文献[10]提出了一种基于低阶(Low-rank)和稀疏矩阵模型的红外小目标检测算法,该模型在低阶矩阵表示的基础上利用稀疏表示理论来描述噪声数据的具体结构,所以在红外小目标检测中具有很强的噪声抑制能力。

随着成像设备与待测目标的接近,目标在成像面中已经开始呈现为面目标时,尤其当场景中存在多个目标时,仅仅依靠抑制背景的方法不足以完整检测出目标。使用形态学操作增强图像,进而使用先验信息检测可疑目标^[11]的方法虚警率较高,且当车辆目标和背景反差不大时容易漏检。使用预先训练

好的基于特征的窗口遍历进行检测^[12]的方法需要大量样本进行训练,且复杂度较高。另一方面,在目标检测领域,视觉显著性作为一种重要的人眼视觉机制的模拟计算得到了广泛的应用^[13-14]。文中主要针对复杂地面背景下的红外车辆检测问题展开讨论。车辆目标和背景相比,具有不稳定的红外特性差异,即车辆的部分区域温度可能高于或低于背景温度,对应到图像上,相应区域的亮度亮于或暗于背景区域,而且可能对比较小。实际应用场景中,完整的目标区域指示也非常重要,因此利用视觉显著性获取目标的视觉显著性图,进而在显著性图上检测目标可以克服车辆目标灰度分布明暗不均的缺点,改善在原始灰度图上的提取效果。此外,车辆目标具有一定的先验知识,可以使用相应的特征进行表达,评价检测出的目标为真实车辆目标的置信度。

文中提出使用显著性计算理论以及利用红外车辆目标的先验知识特征实现复杂地面背景下的红外车辆目标的检测。文中所提算法的主要步骤和创新点为:(1)提出自适应分段灰度拉伸算法对红外图像进行拉伸,并在拉伸图像的计算视觉显著性图,增强显著性检测的完整性;(2)在显著性图分割出来的潜在的兴趣区中,利用平均梯度特征实现车辆目标的精确分割;(3)融合目标区域的多种特征,对其是否为车辆目标进行评估确认。

1 基于自适应分段线性灰度拉伸的图像自动对比度调整

很多情况下,目标和背景的反差不大,给目标检测和识别带来了很大困难。显著性计算本质上依赖于全局或局部的对比度^[13-14],即使采用显著性计算突显目标,也会导致显著性不强。如图1中的(a1)、(b1)、(c1)、(d1)分别为从不同视角拍摄的含有静止车辆的红外图像,如图1中包含静止车辆的红外图像所示,目标与背景的对比度较低,不利于后续图像中目标检测及图像分析。另一方面,当目标本身存在强弱对比度不均匀的情况时,在显著性图上可能得不到完整的目标。当目标存在对比度低或对比度欠均匀时,根据灰度直方图统计分析自适应地调整图像对比度,可增强目标弱对比度区域的显著性和目标显著性的一致性。

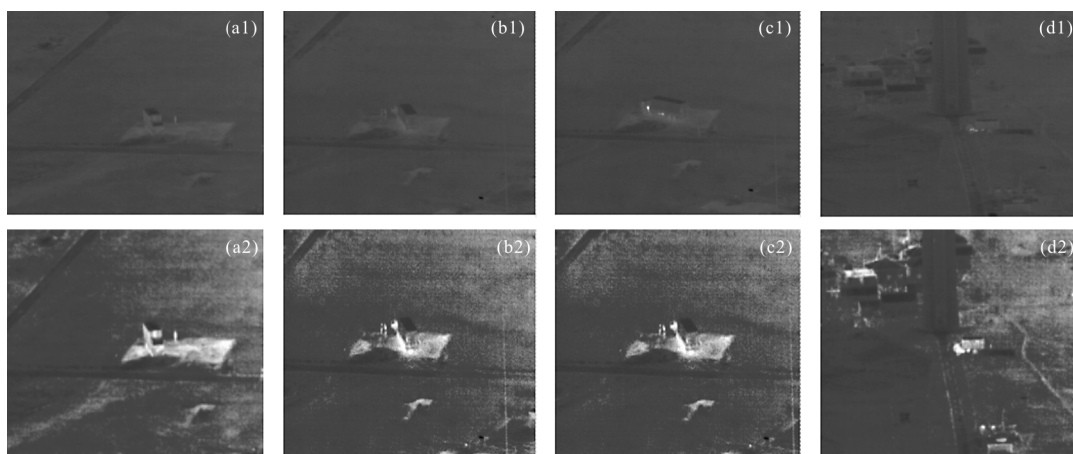


图 1 红外图像自动对比度调整结果

Fig.1 Infrared images of automatic contrast adjustment

在参考文献[15]的红外图像自适应分段线性拉伸算法思想基础上,提出通过不同区间的灰度分布比例给定分段线性拉伸函数不同的权重以实现图像自动对比度调整。文中提出的自适应分段线性灰度拉伸算法可以以较高的效率获得较好的图像对比度调整结果,有效提高图像信噪比。

假设图像的灰度分布直方图为 $Hist$, 图像的累积灰度分布直方图为 $Hist_S$ 。令 M_1 、 M_2 和 M_3 分别为图像的低亮度区、中亮度区和高亮度区的比例,公式(1)给出了各亮度区灰度值出现比例。

$$M_1 = \sum_{i=0}^{85} Hist(i) M_2 = \sum_{i=86}^{170} Hist(i) M_3 = \sum_{i=171}^{255} Hist(i) \quad (1)$$

在灰度拉伸给出映射关系之前,为了更好地分析图像的真实亮度分布,笔者将 R_{min} 、 R_{mid} 和 R_{max} 分别定义为不含噪声的图像灰度最小值,图像灰度中值和图像灰度最大值,公式(2)给出了计算公式:

$$\begin{aligned} R_{min} &= \operatorname{argmin}_i (Hist_S(i) \geq 0.1/100) \\ R_{mid} &= \operatorname{argmin}_i (Hist_S(i) \geq 50/100) \\ R_{max} &= \operatorname{argmin}_i (Hist_S(i) \geq 99.9/100) \end{aligned} \quad (2)$$

公式(3)~(5)分别给出了低亮度区灰度线性拉伸函数,中亮度区灰度线性拉伸函数和高亮度区灰度线性拉伸函数。

$$L_1(r) = \begin{cases} 0, & r < R_{min} \\ r, & R_{min} \leq r < R_{mid} \\ \frac{(225-R_{mid}) \cdot (r-R_{mid})}{R_{max}-R_{mid}} + R_{mid}, & R_{mid} \leq r \leq R_{max} \\ 255, & r > R_{max} \end{cases} \quad (3)$$

$$L_2(r) = \begin{cases} 0, & r < R_{min} \\ \frac{(225-0) \cdot (r-R_{min})}{R_{max}-R_{mid}} + 0, & R_{mid} \leq r \leq R_{max} \\ 255, & r > R_{max} \end{cases} \quad (4)$$

$$L_3(r) = \begin{cases} 0, & r < R_{min} \\ \frac{(R_{mid}-0) \cdot (r-R_{mid})}{R_{mid}-R_{min}} + 0, & R_{min} \leq r \leq R_{mid} \\ r, & R_{mid} \leq r \leq R_{max} \\ 255, & r > R_{max} \end{cases} \quad (5)$$

结合各亮度区灰度分布比例和各亮度区的灰度线性拉伸函数,公式(6)给出了最终的灰度映射关系。

$$Map(r) = M_1 \cdot L_1(r) + M_2 \cdot L_2(r) + M_3 \cdot L_3(r) \quad (6)$$

图 1 给出了文中提出的自适应分段线性拉伸的图像自动对比度调整结果。结果显示,文中提出的自动对比度调整算法可以有效提高目标与背景的对对比度,有助于通过融合获得稳定的目标显著性。图(a1)、(b1)、(c1)、(d1)为原始图像,图(a2)、(b2)、(c2)、(d2)为相应图像的自动对比度拉伸结果。

2 潜在目标兴趣区生成

基于视觉显著性的方法在没有任何先验信息的前提下,就可以给出图像中视觉刺激较强的区域,由于红外图像中待检测的车辆目标往往相对于背景为图像中刺激较强的区域,所以,文中选择用显著性方法进行红外车辆目标的初步检测。经分析图像相谱与高频信息之间的关系,证实了频域相谱对视觉显著性具有很强的预测作用^[16]。在已有的多种显著性计算模型中,相谱显著性具有算法简单、运算效率高

等优点,文中显著性检测部分采用参考文献[16]中的方法。

对于给定的输入图像,其相谱显著性计算的系列表达式为:

$$f(u,v)=F[I(i,j)] \quad (7)$$

$$p(u,v)=P[f(i,j)]=F[f(i,j)]/A(u,v) \quad (8)$$

$$S(i,j)=g(i,j) \times \left| \left| F^{-1} \left[e^{i \cdot p(u,v)} \right] \right| \right|^2 \quad (9)$$

式中: $I(i,j)$ 为输入图像; $F[\cdot]$ 和 $F^{-1}[\cdot]$ 分别为傅里叶变换和反变换; $p[\cdot]$ 为提取相谱信息; $g(i,j)$ 为高斯平滑滤波器(经验上方差参数 σ 取2.5); $S(i,j)$ 为得到的相谱显著图。

然而直接采用显著性方法对原始图像中车辆目标检测会存在一定问题,主要体现在:(1)由于成像原因,可能存在整幅图像亮度偏低的情况,这将影响目标的显著性检测,并不能获得比较完整的目标,如图2(a)、(b)和图3(a)、(b)所示,而通过文中提出的自动对比度拉伸后的图像显著性检测结果更为理想,如图2(c)、(d)和图3(c)、(d)所示;(2)显著性图结合GrabCut分割可以较好地解决当待检测目标与背景有较强对比度时的目标检测问题,如图2(c)和(d)所示,但是,当目标与背景的对比度较弱时,该方法分割出的目标将会粘连部分背景区域,导致分割错误率较高,如图3(c)和(d)所示。



图 2 显著性检测仿真对比结果 1 和潜在目标兴趣区

Fig.2 Emulation comparison result 1 of saliency detection and potential target region of interest

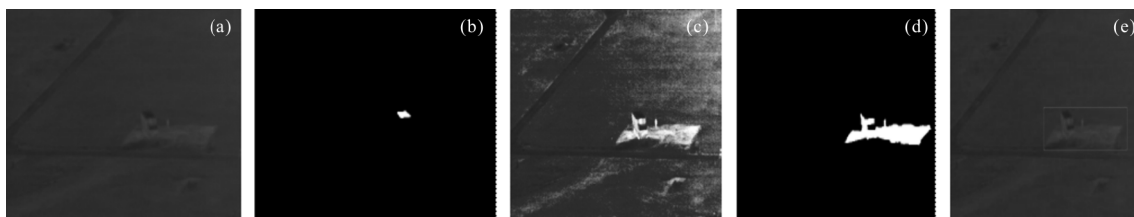


图 3 显著性检测仿真对比结果 2 和潜在目标兴趣区

Fig.3 Emulation comparison result 2 of saliency detection and potential target region of interest

总体而言,拉伸后的图像会改善目标在显著性图上的完整性,因此考虑在拉伸图像上进行视觉显著性检测,可更完整地检测目标,其中对显著性区域

进行二值分割的过程采用最大类间距离求分割阈值法,而二值化后采用简单的“或”运算完成。图4给出了基于显著性的潜在目标兴趣区生成算法流程图。

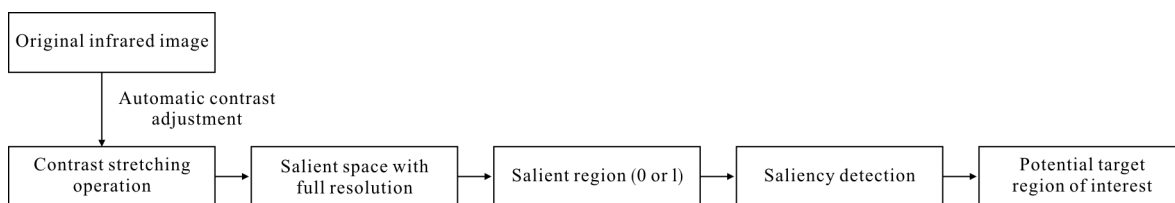


图 4 红外图像潜在目标兴趣区生成流程图

Fig.4 Flowchart of generating potential regions of interest from infrared image

这里需要特别说明的是,在实际应用平台下,由于车辆目标位于平坦狭小区域会导致在提取显著性时扩大其占用的空间范围,如图3(d)所示。因此需要考虑在此局部区域中进一步进行分割,以去除在显著性图分

割中与目标粘连在一起的背景像素。

3 潜在目标兴趣区内目标再分割

当目标与背景的亮度较为接近时,基于显著性

的目标检测方法很容易将背景分割为目标,造成较高的目标分割错误率,如图 5(a)所示。尽管兴趣区内目标与背景亮度比较接近,但是,目标仍然有较显著的边缘信息。为了既可以尽可能多地分割出目标边缘,又可以尽可能少地分割出噪声边缘,文中利用平均梯度进行兴趣区内的目标边缘再分割。当平均梯度图像中目标与背景区域面积相差不大时,平均梯度图像的分割阈值可以用平均梯度图像的均值和二阶矩之和来近似。



(a) 兴趣区红外图像子块

(a) Sub block of interest region of infrared images



(b) 兴趣区平均梯度图像

(b) Average gradient image of interest region



(c) 阈值分割后的二值图像

(c) Binary image after threshold segmentation



(d) 滤除部分背景边缘的目标边缘二值图像

(d) Target edge binary image after filtering out part of the background

图 5 兴趣区内目标边缘再分割结果

Fig.5 Re-segmentation result of target edge in the region of interest

将 $Gr0(i,j), Gr45(i,j), Gr90(i,j), Gr135(i,j)$ 分别定义为图像上任意一点 (i,j) 水平方向, 45° 方向, 90° 方向, 135° 方向梯度, 并设 K 为各个方向上梯度计算长

度, 平均梯度为 $Gr(i,j)$ 。

$$Gr(i,j)=[|Gr0(i,j)|+|Gr45(i,j)|+|Gr90(i,j)|+|Gr135(i,j)|]/4 \quad (10)$$

$$Gr0(i,j)=\left[\sum_{0 \leq n < K} f(i,j+n)-\sum_{0 \leq n < K} f(i,j-n)\right]/K \quad (11)$$

$$Gr45(i,j)=\left[\sum_{0 \leq n < K} f(i+n,j+n)-\sum_{0 \leq n < K} f(i-n,j-n)\right]/K \quad (12)$$

$$Gr90(i,j)=\left[\sum_{0 \leq n < K} f(i+n,j)-\sum_{0 \leq n < K} f(i-n,j)\right]/K \quad (13)$$

$$Gr135(i,j)=\left[\sum_{0 \leq n < K} f(i+n,j-n)-\sum_{0 \leq n < K} f(i-n,j+n)\right]/K \quad (14)$$

基于平均梯度的兴趣区内的目标再分割主要步骤为:(1)计算图像的平均梯度图像,如公式(10)所示;(2)计算平均梯度图像的分割阈值;(3)去除分割出的背景边缘,与目标边缘相比,背景边缘主要呈现出散乱或者长条状,针对背景边缘的这些特性,通过对阈值分割后的图像进行联通量标记,去除小面积连通量对应的散乱边缘和长宽比大于一定比值的联通量对应的长条状边缘。

4 基于车辆红外特征的目标置信度确认

目标检测算法输出的潜在机动车辆目标中包含了大量虚警,这对接下来的目标跟踪等更高层任务需求产生不利影响,所以,对潜在目标进行识别确认具有重要意义。根据机动车辆目标自身的红外辐射特性及形状信息,机动车辆目标的识别确认可以采用的证据主要包括:(1)机动车辆目标所在区域和邻域具有一定亮度差异;(2)机动车辆目标自身形状具有对称性;(3)机动车辆目标区域的纹理分布和邻域背景纹理分布具备较大差异。

(一) 基于目标局部对比度证据的置信度计算

一般来说,车辆目标在局部具有较高的对比度,局部对比度越高,候选目标属于真实车辆目标的可能性就越大,所以,局部对比度可以作为车辆目标置信度计算的评价指标,具体计算公式表示为:

$$P(CT|Obj)=\frac{\left|\frac{1}{M(\Omega)}I(i,j)-\frac{1}{M(\Psi)}\sum_{(i,j)\in\Psi}I(i,j)\right|}{\min\left(\frac{1}{M(\Omega)}\sum_{(i,j)\in\Omega}I(i,j),\frac{1}{M(\Psi)}I(i,j)\right)} \quad (15)$$

式中： CT 为其车辆目标的对比度证据； Obj 为该区域； Ω 和 Ψ 分别表示图 6 的 Center 和 Surround 区域； $M(\Psi)$ 为算子表示区域像素数目。

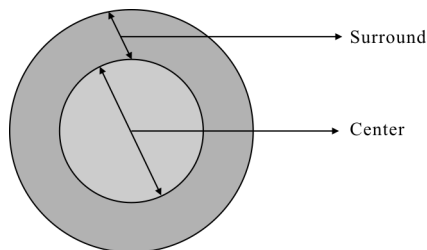


图 6 Center-Surround 结构示意图

Fig.6 Structure diagram of Center-Surround

(二) 基于目标边缘分布对称性证据的置信度计算

由于红外图像中车辆目标的形状一般都是对称的,所以,局部邻域边缘点的对称性可以作为计算目标置信度的依据,具体的计算公式表示为:

$$P(ST|Obj) = \frac{n_e}{n_w} \times \frac{\min(n_i)}{\text{Mean}(n_i)}, \quad i=1,2,3,4 \quad (16)$$

式中： ST 为其车辆目标的分布对称性证据，如图 7 所示； n_i 为第 i 个象限的边缘点数目； $n_e = \sum_i n_i$ ； n_w 为邻域的像素数。

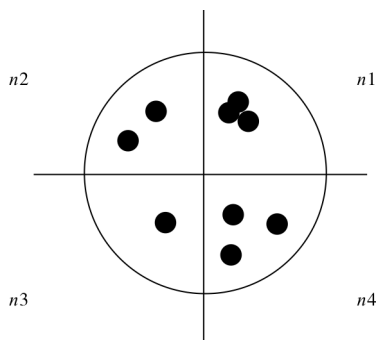


图 7 结构显著性计算示意图

Fig.7 Schematic diagram of calculating structure saliency

(三) 基于目标与背景纹理不相似性证据的置信度计算

一般来说，地面背景的亮度在空间会出现较大起伏变化,而纹理则相对稳定。所以,如果一块背景区域被误检为目标,那么该区域与周围背景邻域图像块的纹理差异度则较小,然而,如果候选结果为真实车辆目标,那么该区域与周围背景邻域图像块的纹理差异度则较大。

所以,可以利用邻域纹理的不相似性 $Non-LH$ 来计算候选目标的置信度,计算公式表示为:

$$P(Non-LH|Obj) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m ||F_{Obj} - F_i||^2 \quad (17)$$

式中： F_{Obj} 为候选目标图像块纹理特征； F_i 为候选目标图像块邻域图像块的纹理特征,邻域图像块集合的选取规则如图 8 所示,中心黑点为候选目标重心坐标,在圆弧上黑点为邻域图像块的重心坐标,为了保证邻域图像块集合均为背景图像块,从邻域图像块集合中去除与候选目标集合有交集的图像块。

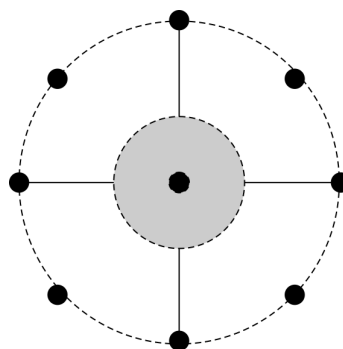


图 8 在线背景样本选取示意图

Fig.8 Diagram of online sampling of background

(四) 融合多证据的目标置信度计算

假定目标置信度计算的几个证据是条件独立的,可以用公式(18)来融合多证据,作为统一的目标置信度。可以选定阈值排除虚假目标,也可使用排序策略,表达车辆目标在当前图像中的可信度。

$$P(CT,ST,Non-LH|Obj) = P(CT|Obj) \times P(ST|Obj) \times P(Non-LH|Obj) \quad (18)$$

5 实验结果及讨论

为了证明文中提出算法的有效性,首先给出几种常用目标检测方法检测结果来与文中方法检测结果进行比较。由于常规方法对于文中中用到的实验数据并不能获得理想的检测结果,为了给出具有可比性的结果,笔者引用别人方法做目标检测时,均基于文中的自动对比度调整的结果基础上。在图 9 中,图(a)为引用了 OTSU 方法,图(b)为 R.Achanta 等人^[14]方法,图(c)为 Ming-ming Cheng 等人^[13]方法,图(d)为文中提出的目标检测方法,并进行了比较。由图 9 各方法对比结果可看出,文中方法可更为准确地分割出目标信息。

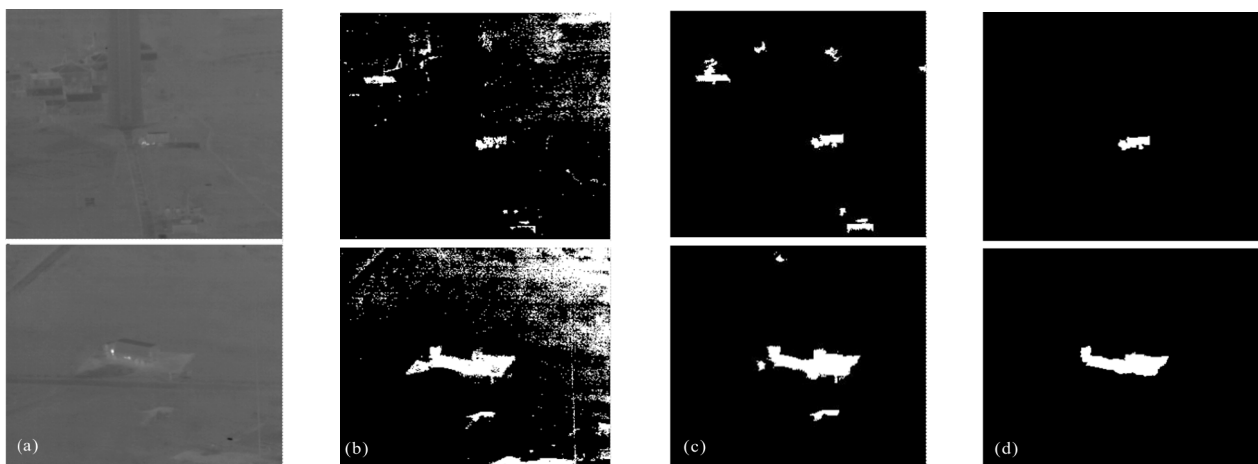


图 9 文中方法与已有方法分割结果对比

Fig.9 Contrast of target segmenting results among the proposed method with the previous methods

由图 10 可以看出，文中用拉伸图像显著性检测结果来生成的兴趣区可以稳定包含潜在目标，并且一定程度上可以避开部分背景对目标检测的干

扰，在潜在目标兴趣区内进行目标的进一步分割，可以有效分割出目标边缘信息，较为准确地进行目标定位。

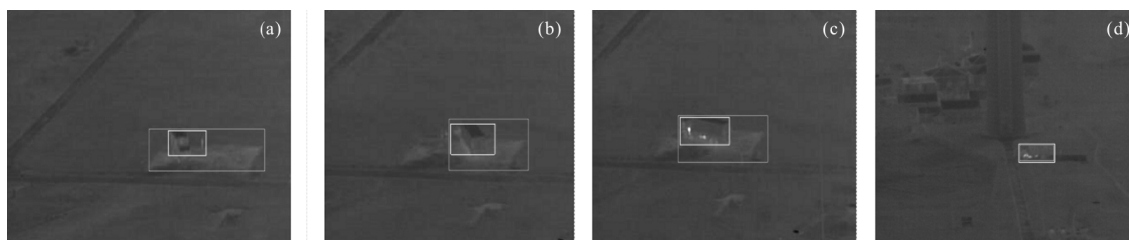


图 10 文中方法的红外图像车辆检测结果,其中灰色框为目标兴趣区,白色框为最终检测结果

Fig.10 Detection vehicles from infrared images, the gray rectangles represent the regions of interest, and the white rectangles are the final results

图 11 所示的实验采用一组公路背景的红外车辆序列,是由文中方法检测得出的结果,从图中可以看到,图 11(a)、(b)中大的白色框是检测到的公路车

辆,而小的白色框则是误检测的虚警,图 11(c)、(d)中图像中央的两个白色框是算法检测到的公路车辆,图像边缘的白色框则是误检测的虚警。

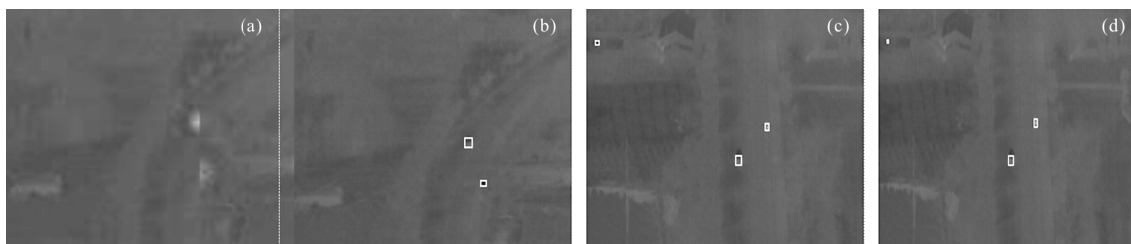


图 11 公路背景下红外图像车辆检测结果

Fig.11 Detection result of vehicles in infrared images of highway background

图 12 和图 13 所示的实验采用的都是野外背景的红外车辆序列，是由文中方法检测得出的结果，从图中实验可以看到，文中算法的检测效果理想，整个序列都能检测到目标并且基本没有虚警。

为了说明目标再确认算法的性能，针对场景中存在多个目标的图像进行测试，如图 14 所示。通过再确认算法一方面对潜在的可能目标进行排序，当选择前面若个数目时，准确地检测到目标的概率大大增加。

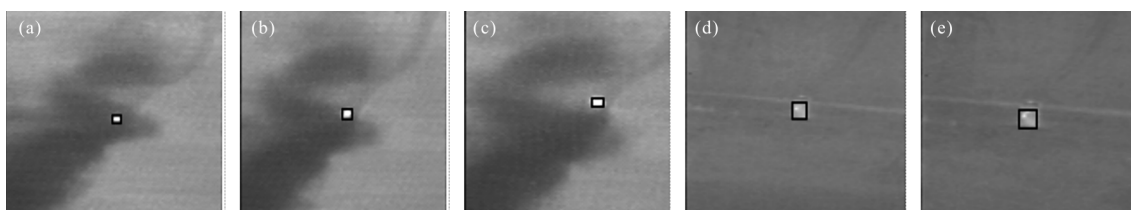


图 12 野外背景红外图像序列 1 车辆检测结果

Fig.12 Detection result of the vehicle in infrared images 1 of field background

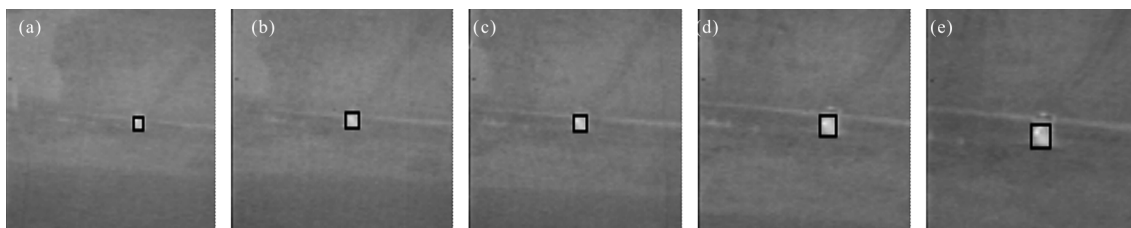


图 13 野外背景红外图像序列 2 车辆检测结果

Fig.13 Detection result of the vehicles in infrared images 2 of field background

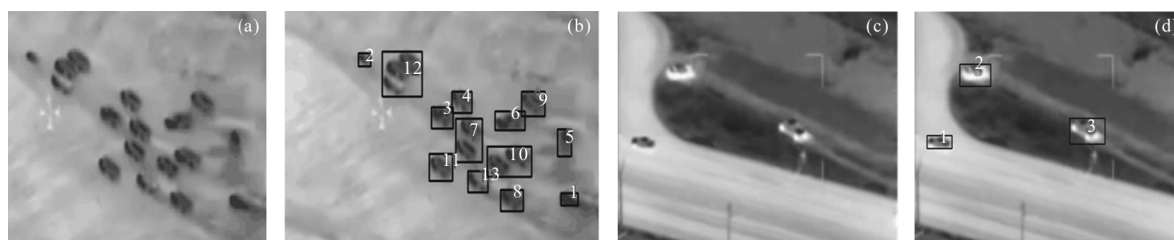


图 14 基于融合特征的目标再确认结果((a)和(c)为原始图像, (b)和(d)分别为确认后排序的结果)

Fig.14 Reconfirmed targets based on the fused features ((a) and (c) are the original images, (b) and (d) are the sort results respectively)

6 结论

文中提出的红外车辆检测算法沿用 bottom-top 方式,仅仅从底层视觉显著性的角度上分割潜在目标,只使用了部分高层知识做进一步判别,实验结果表明算法具有较好的检测效果。当数据量足够充分时,可以使用经训练后的分类器对候选目标进一步进行识别,降低虚警率,这也是论文下一部需要开展的工作。

参考文献:

[1] Soni T, Zeilder R, Ku W H. Performance evaluation of 2-D adaptive prediction filters for detection of small objects in image data [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1993, 2(3): 327-340.

[2] Hu Tun, Zhao Jiajia, Cao Yuan, et al. Infrared small target detection based on saliency and principle component analysis [J]. *Journal of Infrared and Millimeters Waves*, 2010, 29 (4): 303-306. (in Chinese)

胡瞰, 赵佳佳, 曹原, 等. 基于显著性和主成分分析的小目标检测[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(4): 303-306.

[3] Yang L, Yang J, Zheng Z. Detecting infrared small target based on adaptive local energy threshold under sea-sky complex backgrounds[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2006, 25 (1): 41-45.

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

[5] 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

[6] Gu Y, Wang C, Liu B X, et al. A kernel-based nonparametric regression method for clutter removal in infrared small-target detection applications [J]. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2010, 7(3): 469-473.

[7] Zheng C, Li H. Small infrared target detection based on harmonic and sparse matrix decomposition [J]. *Optical*

- Engineering*, 2013, 52(6): 066401.
- [8] Liu R, Zhi H. Infrared point target detection with Fisher linear discriminant and kernel Fisher linear discriminant [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2010, 31(12): 1491–1502.
- [9] Bae T W. Small target detection using bilateral filter and temporal cross product in infrared images [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, 54(5): 403–411.
- [10] He Y J, Li M, Zhang J L, et al. Small infrared target detection based on low-rank and sparse representation [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 68(1): 98–109.
- [11] Jesmin F K, Mohammad S A, Sharif M A B. Automatic target detection in forward-looking infrared imagery via probabilistic neural networks [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(3): 464–476.
- [12] Cao X, Wu C, Lan J, et al. Vehicle detection and motion analysis in low-altitude airborne video under urban environment [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2011, 21(10): 1522–1533.
- [13] Cheng M, Zhang G, Niloy J, et al. Global contrast based salient region detection [C]//CVPR, 2011:409–416.
- [14] Achanta R, Hemami S, Estrada F, et al. Frequency-tuned salient region detection [C]//CVPR, 2009: 1597–1604.
- [15] Li Xiaobing. An adaptive piecewise linear gray scales transformation method for infrared measurement image [J]. *Optoelectronic Technology*, 2011, 31(4): 236–239. (in Chinese)
李晓冰. 一种红外测量图像自适应分段线性灰度变换方法 [J]. *光电子技术*, 2011, 31(4): 236–239.
- [16] Li J, Levine M D, An X, et al. Visual saliency based on scale-space analysis in the frequency domain [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(4): 996–1010.