

图 3 不同缩放系数下：显著性区域对行人目标的覆盖率（上）、显著性区域面积（下）

Fig. 3 Coverage rates (top) and areas (bottom) of saliency regions depended on various scale rates

不同缩放系数下感兴趣区域图如图 4 所示。可以看出，更小的缩放系数（0.1）下感兴趣区域图也更复杂，较大的缩放系数（0.7）无法保证行人目标区域的完整性，甚至丢失部分目标区域，而上文中确定的图像缩放系数（0.2）在确保显著性区域完全覆盖行人目标的同时能够最小化显著性区域面积，从而实现在保证算法准确率。

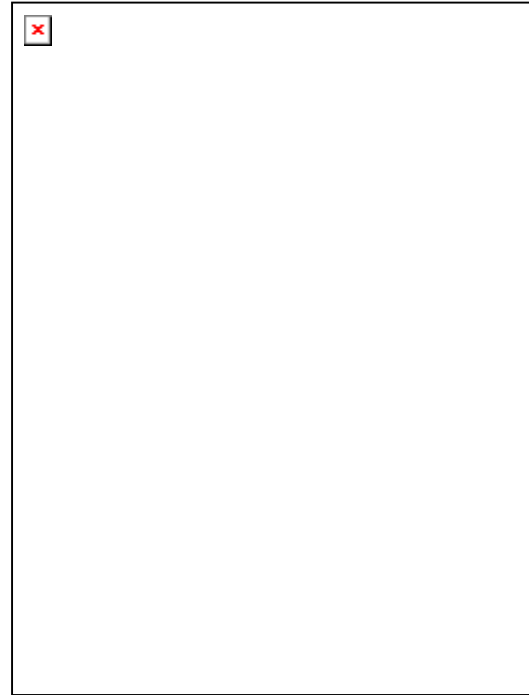
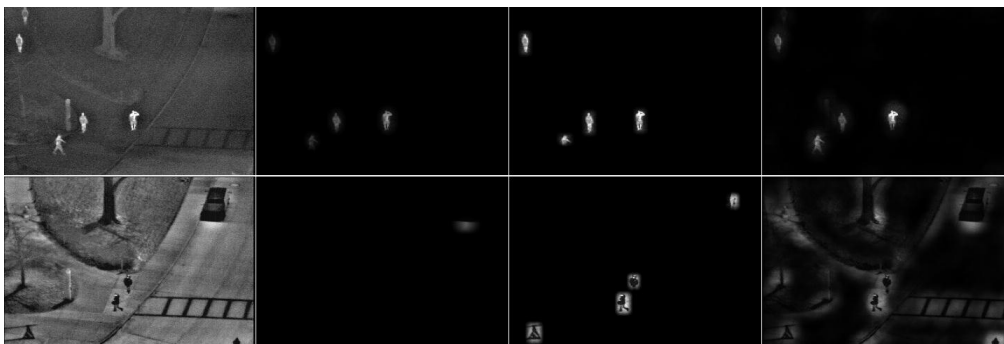


图 4 不同缩放系数下感兴趣区域图

Fig. 4 ROI maps depended on various scale rates

为验证本文所采用的感兴趣区域图生成方法对灰度值反转问题的有效性，采用不同方法所得到的感兴趣区域图对比如图 5 所示。在以往算法系统中，第一步操作多为截取感兴趣区块而非生成感兴趣区域图。为能够与本文算法相比较，将不同算法生成的感兴趣区块显示于原图，视作感兴趣区域图。



(a)原图 (b)文献[9]生成 ROI 图 (c)文献[11]生成 ROI 图 (d)本文生成 ROI 图

图 5 各种算法的感兴趣区域图比较

Fig. 5 ROI maps of various algorithms

((a)original; (b)ROI maps in [9]; (c)ROI maps in [11] (d)ROI maps in ours)

在对比图中，第二列为文献[9]中 Ostovar 算法所采用的基于热红外图像像素灰度值，通过向垂直方向和水平方向投影的感兴趣区域图生成方法。从结果图分析，在行人目标灰度值高于背景的一般情况下，该算法基本能够正常工作（如图 5（b）上图所

示），但是当行人目标灰度值低于背景即发生灰度值反转情况时，该算法无法正常工作（如图 5（b）下图所示）。第三列为 Zhao^[11]算法所得感兴趣区域图，算法首先生成轮廓图，再采用最小外接矩形包围轮廓图的各个连通区域，将最小外接矩形作为感

兴趣区块。从结果图可以看出，该算法在一般情况下同样能够正常工作，相较于前一种算法，Zhao 算法同样对灰度值反转情况有所应对，但对一些轮廓较弱的行人目标存在丢失的情况（如图 5（c）中，两幅图中左上角行人目标区域未被视为感兴趣区域，上图左下角与下图中央部分对感兴趣区域均未能完整覆盖行人目标）。最后一列为本文算法所得感兴趣区域图，可以看出其对全部行人目标均有完整覆盖，对灰度反转情况具有较强鲁棒性。

3.2 热红外场景行人检测性能测试

OSU 热红外行人数据库中总计 284 帧热红外图像，图像分辨率为 360x240。从中随机抽取 60% 组成训练样本集，并通过水平翻转在不影响行人目标的情况下扩大训练集的样本容量，以提高训练效果。其余热红外图像组成测试样本集以测试行人目标检测算法性能。

本文将所提出算法与多种现有算法进行对比实验，除了传统的未采用深度学习的热红外行人检测算法（文献[5][6][10][11]），基于深度学习的 R-CNN 目标检测算法^[23]同样作为对照算法。本文采

用行人目标检测性能评价中常用的丢失率 (Miss Rate) 与假阳率 (False Positive) 曲线作为各个算法性能对照依据。其中，假阳率反应非行人目标被错判定为行人目标的情况，一般来说，假阳率越低代表对目标的检测越准，但是会导致目标漏检情况即丢失率的增加。各种算法的性能曲线如图 6 所示，且各算法的平均丢失率如图例所示。

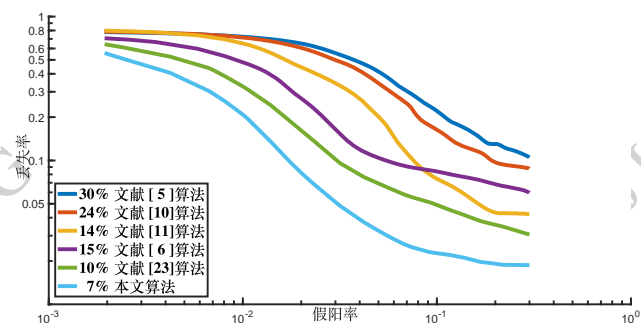


图 6 各热红外行人检测算法对比

Fig. 6 Evaluation of thermal pedestrian detection algorithms

几种热红外行人目标检测的结果图如图 7 所示。其中第二列为文献[5]算法的结果，第三列为文献[11]算法的结果，最后一列为本文提出的算法结果。



(a) 原图 (b) 文献[5]检测结果 (c) 文献[11]检测结果 (d) 本文检测结果

图 7 各热红外行人检测算法结果图

Fig. 7 Some examples of the comparison results

((a)original; (b)detection results in [5]; (c) detection results in [11]; (d) ours)

对比图的第一、二行为行人目标灰度值高于周围环境的一般情况，算法结果对比相差不大。当行人目标头部与身体的灰度值相差很大时（图7第一行），文献[5]算法与文献[11]算法由于过滤掉较小连通区域或者感兴趣区块无法覆盖整个行人目标，导致最终检测失败或不完整。而本文算法的感兴趣区域图能够保证对行人目标的全覆盖，因此能够正确检测出灰度差较大的行人目标。图7第二行中的误检多由热红外图像中其他干扰性热源，如路灯、车辆余温所引起。而在第三、四行中，由于环境温度升高而产生灰度值反转问题，导致部分行人目标灰度值较低。在对比算法中，一些独立存在的行人目标由于其边缘保持完整，因此较容易检出，但当行人目标与环境相接时，行人目标轮廓边缘无法保持完整，导致感兴趣区块提取失败进而行人目标无法被检出。灰度值较高的独立目标更容易被误检为行人目标，如路灯、树干的向阳面、车辆的向阳面等。而在本文算法中，感兴趣区域图可以完全包含所有疑似区域，再借助全卷积网络对行人目标的描述与概率生成，不仅可以有效移除不包含行人目标的区域，同时能够检测出最完全的行人目标，特别是针对复杂环境背景情况（发生灰度值反转）以及存在其他热源（汽车，路灯）在环境中时。

4 结论

本文提出一种新的针对复杂红外监控场景对行人目标检测算法。首先采用显著性检测算法生成感兴趣区域图，利用基于频域的显著性检测原理，有效提高了对复杂环境（如晴天时热红外图像发生灰度值反转的情况）的鲁棒性。然后利用全卷积网络由感兴趣区域图直接生成行人目标概率图，避免了传统算法中候选区域子块的截取以及再处理，加强了算法流程的整体性，减少冗余计算量。实验表明相比于其他算法，本文算法具有更好的性能、对复杂恶劣环境更具鲁棒性。

参考文献(References)

- [1] Ma Y, Wu X, Yu G, et al. Pedestrian detection and tracking from low-resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery[J]. *Sensors*, 2016, 16(4).
- [2] Ji H L, Choi J S, Jeon E S, et al. Robust pedestrian detection by combining visible and thermal infrared cameras[J]. *Sensors*, 2015, 15(5):10580-10615.
- [3] Zhang L, Wu B, Nevatia R. Pedestrian detection in infrared images based on local shape features[C]// *Computer Vision and Pattern Recognition, 2007. CVPR '07. IEEE Conference on. IEEE, 2007:1-8.*
- [4] Biswas S K, Milanfar P. Linear support tensor machine with lsk channels: pedestrian detection in thermal infrared images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, 26(9):4229-4242.
- [5] Li J, Gong W, Li W, et al. Robust pedestrian detection in thermal infrared imagery using the wavelet transform[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, 53(4):267-273.
- [6] Qi B, John V, Liu Z, et al. Pedestrian detection from thermal images: a sparse representation based approach[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76:157-167.
- [7] Wang J T, Chen D B, Chen H Y, et al. On pedestrian detection and tracking in infrared videos[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(6):775-785.
- [8] Lin C F, Chen C S, Hwang W J, et al. Novel outline features for pedestrian detection system with thermal images[J]. *Pattern Recognition*, 2015, 48(11):3440-3450.
- [9] Ostovar A, Hellstrom T, Ringdahl O. Human detection based on infrared images in forestry environments[M]// *Image Analysis and Recognition. Springer International Publishing, 2016.*
- [10] Lakshmi A, Faheema A G J, Deodhare D. Pedestrian detection in thermal images: an automated scale based region extraction with curvelet space validation[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76:421-438.
- [11] Zhao X, He Z, Zhang S, et al. Robust pedestrian detection in thermal infrared imagery using a shape distribution

- histogram feature and modified sparse representation classification[J]. Pattern Recognition, 2015, 48(6):1947-1960.
- [12] Budzan S. Human detection in low resolution thermal images based on Combined HOG Classifier[C]// International Conference on Computer Vision and Graphics. Springer, Cham, 2016:304-315.
- [13] Cai Y, Liu Z, Wang H, et al. Saliency-based pedestrian detection in far infrared images[J]. IEEE Access, 2017, 5(99):5013-5019.
- [14] Hou X, Zhang L. Saliency detection: a spectral residual approach[J]. CVPR, 2007:1-8.
- [15] Guo C, Ma Q, Zhang L. Spatio-temporal saliency detection using phase spectrum of quaternion fourier transform[C]// Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on. IEEE, 2008:1-8.
- [16] Johnson J, Karpathy A, Li F F. DenseCap: Fully Convolutional Localization Networks for Dense Captioning[C]// Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2016:4565-4574.
- [17] Long J, Shelhamer E, Darrell T. Fully convolutional networks for semantic segmentation[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2015:3431-3440.
- [18] Gatys L A, Ecker A S, Bethge M. Image style transfer using Convolutional Neural Networks[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2016:2414-2423.
- [19] Johnson J, Alahi A, Li F F. Perceptual Losses for Real-Time Style Transfer and Super-Resolution[C]// European Conference on Computer Vision. Springer, Cham, 2016:694-711.
- [20] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[C]// International Conference on Neural Information Processing Systems. Curran Associates Inc. 2012:1097-1105.
- [21] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. Computer Science, 2014.
- [22] Davis J W, Keck M A. A two-stage template approach to person detection in thermal imagery[C]// Application of Computer Vision, 2005. WACV/MOTIONS '05 Volume 1. Seventh IEEE Workshops on. IEEE, 2005:364-369.
- [23] Girshick R, Donahue J, Darrell T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[J]. Computer Science, 2013:580-587.
- [24] Girshick R. Fast R-CNN[C]// IEEE International Conference on Computer Vision. IEEE Computer Society, 2015:1440-1448.