

多特征级联的低能见度环境红外行人检测方法

刘 峰^{1,2}, 王思博^{1,2}, 王向军^{1,2}, 赵广伟^{1,2}, 霍文甲^{1,2}

- (1. 天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 天津大学 微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要: 针对低能见度环境中人员的监测和保护问题, 提出了一种基于多特征级联的红外行人检测方法, 利用感兴趣区域长宽比特征和头部 Haar 特征组成初级分类器, 改进的 HOG-SVM 完成最终行人识别。所提出的改进的 HOG 特征提取算法和自适应缩放因子获取算法, 在保证检测率的基础上, 有效地减少了帧间处理时间, 针对目标被遮挡情况, 提出了遮挡情况判断和局部特征识别功能, 由此进一步提高了算法应用于复杂工况下的鲁棒性。实验表明: 该检测方法能够达到 91% 的检测率, 较现有算法性能得到提升, 同时也满足了系统实时监测要求, 适用于低能见度、粉尘的工况作业环境。

关键词: 行人检测; ROIs; 方向梯度直方图; 头部特征; 遮挡判断

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0604001

Infrared pedestrian detection method in low visibility environment based on multi feature association

Liu Feng^{1,2}, Wang Sibo^{1,2}, Wang Xiangjun^{1,2}, Zhao GuangWei^{1,2}, Huo Wenjia^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. MOEMS Education Ministry Key Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the problem of personnel monitoring and protection in low visibility environment, an infrared pedestrian detection method based on multi feature association was proposed, the primary classifier was constructed by using the aspect ratio of interest region and the Haar feature of head, and the improved HOG-SVM was used to complete the final pedestrian recognition. An improved HOG feature extraction algorithm and an adaptive scaling factor acquisition algorithm were proposed, and the interframe time was effectively reduced on the basis of guaranteeing the detection accuracy. In view of the occlusion of the target, the occlusion detection and local feature recognition were proposed, which further improved the robustness of the detection system under complicated circumstances. The experimental results show the detection method can achieve the detection rate of 91%, which is better than the existing algorithms, and also meets the real-time monitoring requirements of the system. It is suitable for low visibility and dust working environment.

Key words: pedestrian detection; ROIs; HOG; head features; occlusion judgment

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51575388)

作者简介: 刘峰(1978-), 男, 博士, 主要从事图像分析与计算机视觉、光电传感与探测方面的研究。Email: tjuliufeng@tju.edu.cn

通讯作者: 王思博(1992-), 男, 硕士, 主要从事计算机视觉检测与识别方面的研究。Email: wangsibo@tju.edu.cn

0 引言

采煤机在掘进过程中,后部的输送机经常会摆动,若此时有人员进入,则极易发生人员安全事故,在该种低能见度、粉尘环境下对人员的有效检测和预警不可或缺。通过对煤矿的大量前期调研和实验发现,长波红外在该环境下具有较好成像特性,研究其红外行人检测方法是解决问题的有效途径。目前,有关红外行人检测方法的研究成果较多,但由于具体情况复杂多样,长波红外行人检测方法的鲁棒性和实时性仍极具挑战性。Sun 等^[2]采用特征点结合滑动窗口法获取行人感兴趣区域,再对局部二值模式进行改进,采取金字塔二值模式(PBP)对行人特征进行表征,其准确率较高,但计算量大,实时性无法得到保障。刘琼等^[3]利用红外图像行人边缘轮廓较明显的特点,采用基于加权 Sobel 算子的图像分割方法获取行人 ROI 区域,然后利用头部特征^[4]级联 HOG-SVM 对行人目标进行识别,在检测精度和速度方面均取得了较好的结果,但其对于一些垂直边缘较强的干扰物很容易造成虚警,且无法处理行人被遮挡的情况。参考文献[5-7]利用梯度方向直方

图 HOG 或其改进形式构造行人特征描述子,且训练多种分类器进行 ROI 目标识别,均获得了较高的检测率,但计算量大,无法用于实时系统中。Olmeda 等^[8]获取行人头肩 ROI,并构造两种头肩概率模板对行人进行检测,虽然降低了计算量,但无法应对行人头肩姿势多样的情况以及无法实现对远景小尺度^[9]行人的检测。文中重点针对煤矿井下巷道低能见度、重粉尘的环境,提出了基于多特征级联的红外行人检测方法,先利用初级分类器滤出部分伪目标,后采用改进 HOG 特征和遮挡推理方法完成最终识别。实验表明:基于多特征级联的红外行人检测方法具有较好的检测率和实时性,且能够应用于煤矿生产实践中。

1 感兴趣区域提取

1.1 系统检测方案

文中提出的检测方法主要由三个部分组成,包括 ROIs 获取、ROIs 初级分类以及基于改进 HOG 的特征识别和行人分类,同时对未成功分类的情况进行遮挡情况处理和局部特征识别,提高检测系统的鲁棒性和实时性,具体框架如图 1 所示。

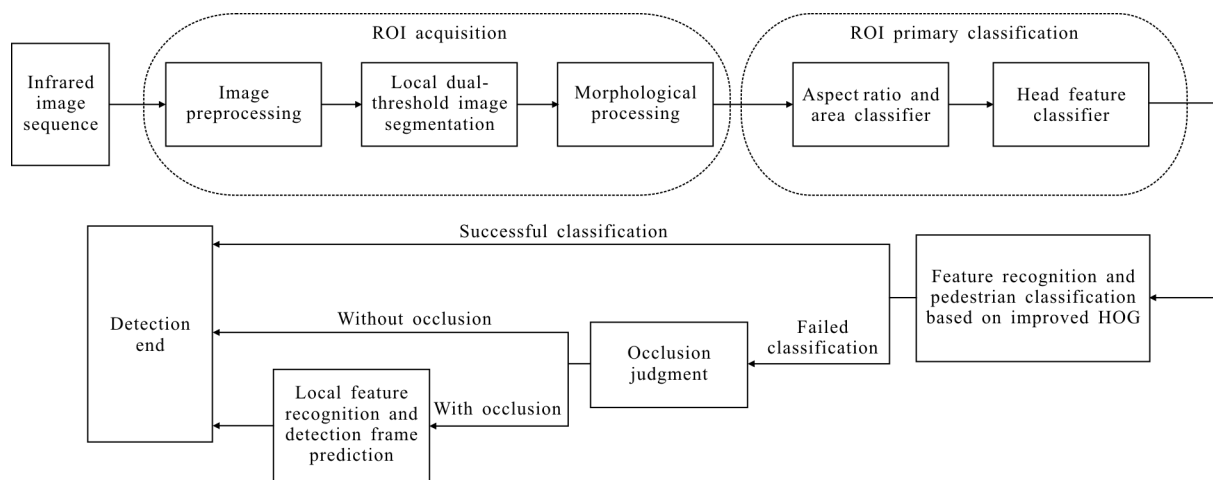


图 1 行人检测系统框架

Fig.1 Pedestrian detection system framework

1.2 ROIs 选取和分类

由于行人所处环境比较复杂,如梭车头灯、车轮以及车辆底盘等热源仍会对实际检测结果造成干扰和影响^[10]。文中设计一系列特征分类器来滤除非行人区域,对行人与非行人进行初级分类,争取尽可能

地将包含行人目标的区域送入至后续复杂特征提取和检测模块,不仅可以有效减少复杂特征提取过程中的计算量,还能够一定程度上降低系统误检率。

ROI 长宽比特征分类器。经过图像分割、形态学处理和连通域标记等处理后,获得的感兴趣区域各

各式各样, 根据行人区域最小外接矩形的长宽比和面积阈值来滤除大多数非行人区域, 实验过程中, 对采集视频中各种情况的行人进行长宽比和面积的统计, 在统计过程中发现, 实际行人运动基本分为单人行走和双人并排行走两种情况, 如图 2 所示。因此, 在实际的检测过程中并不能只考虑单人区域长宽比和面积的限定阈值, 对各种身高和体型的行人进行统计分析, 最终得出, 单人区域长宽比为 1.4~3.8, 双人区域长宽比为 1.25~2.6, 此外, 行人局部被遮挡的情况, 其长宽比统计为 1~1.8, 取三者并集, 保证所有情况的行人 ROI 均能通过初级分类, 当 ROI 的长宽比在 1~3.8 的阈值范围内, 同时满足面积阈值大于 1 000 个像素, 则送入后续的检测分类当中。图 3 为行人区域长宽比分布图。



图 2 部分行人模板图像

Fig.2 Partial pedestrian template image

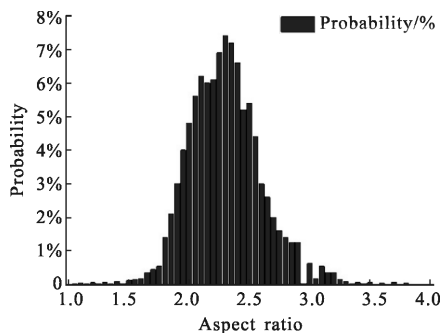
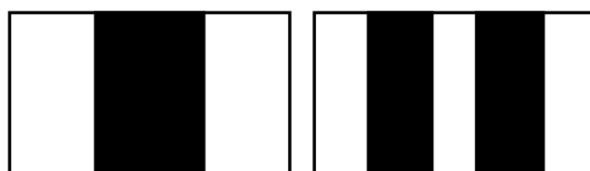


图 3 行人长宽比分布图

Fig.3 Pedestrian aspect ratio distribution

头部分类器。通过观察实验视频可以发现, 由于人的头部一般会暴露在外面, 没有衣服等物体的遮挡, 相对于周围环境背景亮度更高, 根据红外行人头部这一特征, 文中选取一维 Haar-like 特征作为行人头部特征提取分类器, Haar-like 特征模板如图 4 所示: 分为单人模型和双人模型。



(a) 单人模型

(b) 双人模型

(a) Single person model

(b) Double man model

图 4 Haar-like 头部特征模板

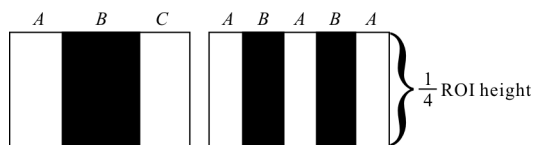
Fig.4 Haar-like head feature template

如图 5 所示, 对于被判别为行人的 ROI, 截取 ROI 上部四分之一的位置, 通过感兴趣区域长宽比大小来判断选择上述两种 Haar-like 头部特征模板的一种, 若判断为单人目标, 可将待检测区域分为



(a) 不同姿态的行人

(a) Pedestrians with different postures



(b) 头部区域划分

(b) Division of head region

图 5 行人头部区域划分示意图

Fig.5 Sketch map of pedestrian head area division

图 5(b)所示的 A、B、C 三个区域, 且由于行人姿态复杂多变, 充分考虑其头部可能位于 A、B、C 三个位置处, 为减少漏检, 按公式(4)进行阈值计算, 其中 S_a 、 S_b 、 S_c 分别代表图 5(b)中 A、B、C 三个区域中的灰度平均值, 当待检测 ROI 中存在目标时, A、B、C 三个

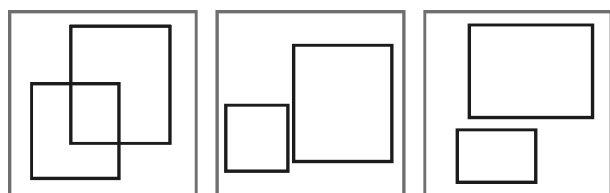
位置之一的亮度会明显高于其余两处,从而会求得一个较大的 F_1 值,而非行人 ROI 则没有这种特点;若判断为双人目标,则将待检测区域分为如图 5(b)所示的 A 、 B 两处,按公式(5)计算出阈值 F_2 ,与给定阈值进行比较,进一步筛选出行人区域。

$$F_1 = \max(|S_b - S_a|, |S_b - S_c|) \quad (4)$$

$$F_2 = S_b - S_a \quad (5)$$

头部特征识别的阈值选取是通过对大量正负样本计算得到的,在对检测率和虚警率的综合考虑最终确定检测阈值为 40。

将通过上述初级特征分类器得到的 ROI 区域进行外扩和融合处理,融合原则如下:(1)若 ROI 区域 A 完全包含 ROI 区域 B ,则只保留区域 A ;(2)若 ROI 区域 A 和区域 B 存在部分重叠,则取 $A \cup B$ 最外侧的边界,如图 6(a);(3)若 ROI 区域 A 和区域 B 不存在重叠,且 A 、 B 间距小于 5 个像素时,则也取 $A \cup B$ 最外侧的边界,如图 6(b)、(c)所示,否则,将区域 A 、 B 当作两个区域进行处理。



(a) 区域部分重叠 (b) 区域左右接近 (c) 区域上下接近
(a) Regional overlap (b) Close proximity to region (c) Area up and down

图 6 ROI 融合规则示意图

Fig.6 ROI schematic diagram of fusion rules

由于具体作业环境的复杂性,上述初级特征分类器并不能完全提取出行人目标区域,为了保证在前期 ROI 提取过程中不遗漏任何行人目标,文中对得到的 ROI 区域进行外扩处理,即由区域中心向四周扩充 10 个像素,并重复上述的区域融合步骤,将得到的区域作为最终 ROI 输出。

2 基于改进 HOG 算法的行人检测和识别

由参考文献[5]提出的 HOG 特征,能够很好地表征图像边缘或梯度的方向分布,利用该特点可全面表征红外行人的边缘轮廓特征,进而达到进一步滤除虚警和准确识别行人目的。文中将 HOG 检测算

子分为三类,样本大小分别为 48×96 、 24×64 、 32×32 。根据初级分类器得到的感兴趣区域外接矩形大小将其分为中近景和远景两类。将区域外接矩形高度超过 72 个像素的称为中近景目标,其样本和检测窗口大小为 48×96 ,外接矩形高度不超过 72 个像素的称为远景目标,其样本和检测窗口大小为 24×64 。针对部分遮挡情况,设计人体头肩 HOG 检测算子,其样本大小为 32×32 。

2.1 基于改进 HOG 的快速行人检测

将适用于中近景目标检测的 HOG 描述子设定如下:训练样本大小与检测窗口大小均为 48×96 ,每个 cell 大小为 8×8 ,块 block 大小为 16×16 ,块 block 移动步长和检测窗口移动步长均为 8 个像素,因此一个 48×96 分辨率大小的检测窗口需要计算 55 个 block 的特征向量。而对于分辨率为 384×288 的待检测图像,则需要计算 1 075 个检测窗口,因此需要在 59 125 个 block 内进行梯度计算和归一化处理,计算量非常大,同时检测窗口移动步长小于窗口尺寸大小,导致相邻检测窗口间存在大量重叠区域,block 内 HOG 特征出现多次重复计算。文中改进了传统的 HOG 特征向量计算方法,直接以块为单位计算 HOG 特征向量,具体检测步骤如下:

(1) 将筛选得到的 ROIs 图像分辨率扩充至扫描步长 8 的整数倍,扩充原则为上下左右四个边界均进行像素填充,扩充像素灰度值取邻域像素的灰度均值。

(2) 对每一个尺度下图像 HOG 特征的计算均动态初始化一个二维数组,数组大小为 $A \times B$ 。其中 $A = ((Y-16)/8+1)$, $B = ((X-16)/8+1)$ 。 X, Y 为当前图像的分辨率大小。

(3) 对当前尺度下的图像,以大小 16×16 的像素窗口进行遍历,计算整幅图像 block 内的 HOG 特征,并依次存入步骤(2)创建的二维数组中,数组中的每一个元素均指向一个 block 块的 36 维特征向量。

(4) 以检测窗口大小,步长为 8 个像素对当前尺度图像进行遍历,此时每个检测窗口包含的 HOG 特征实际上都已经计算过,直接对步骤(3)得到的数据进行读取,就能够统计出整幅图像的 HOG 特征。

(5) 采用下文提到的自适应缩放因子获取的方法,对 ROI 图像进行多分辨率分析,采用双线性插

值的方法对图像进行尺度缩放,重复(2)~(4)的步骤,直到待检测图像缩放到检测窗口尺寸大小,最后利用线下训练的 SVM 分类器对待检测图像进行判别。

2.2 自适应缩放因子获取

上文所述算法都是在图像的当前尺度下进行计算的,实际上的判定结果是在多尺度下融合得到的。对于参考文献[3]的红外行人检测方法,得到感兴趣区域后直接将其缩放到 HOG 训练样本大小,在 ROI 区域提取不理想的情况下,例如在行人目标附近连接有其他不规则发热伪目标,双人乃至多人目标,如图 7 所示,即提取出的感兴趣区域并不单纯包含单一人,则会造成一定程度上的误检和漏检。文中采用对图像进行多分辨率分析,构造图像金字塔,不断对原始图像以一定缩放比例进行缩放,直至训练样本尺寸大小,同时又避免像 Dalal 文章提出的对待检测图像进行穷尽搜索,以免将时间耗费到大量的冗余信息计算上,影响系统的实时性。文中提出了一种自适应缩放因子获取算法。

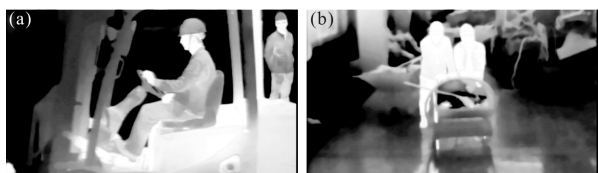


图 7 部分特殊情况行人图像
Fig.7 Pedestrian images in some special cases

根据感兴趣区域的面积大小以及高度,确定图像金字塔层数和缩放因子,设 $imgsize$ 表示待检测图像大小, $winsize$ 表示检测窗口大小, $scale$ 表示缩放因子(即每次缩放比例),则图像金字塔层数为 $[\log_{scale}(imgsize/winsize)]$,由于该系统的红外传感器在检测过程中处于缓慢运动的状态,即可看作是摄像机一直处于相对静止,故可以根据先验知识有效减少缩放图像的个数。文中对视频中不同尺度的行人进行处理和统计,得到适应于距离相机不同位置的待检测区域的金字塔缩放层数。如图 8 所示,横轴为待检测图像的缩放因子,纵轴为目标检测率,三条曲线分别表示感兴趣区域高度位于 70 像素附近、150 像素附近、230 像素附近,其中每段像素范围各取测试样本 600。实验设置为在进行图像分割后直

接对三个像素范围的 ROI 进行不同缩放因子下的检测。得到如下统计结果,在感兴趣区域高度范围分别在 70 像素、150 像素、230 像素附近时,选取缩放因子分别为 1.15、1.3、1.4 时,其检测率均能达到 87%左右,实现了在保证检测率的基础上,提高检测时间。同时对于其他像素高度处的待检测图像,采取线性插值的方法,即

$$\frac{y-y_0}{y_1-y_0} = \frac{x-x_0}{x_1-x_0} \quad (6)$$

通过已知的像素高度 x_0 和 x_1 , 缩放因子 y_0 和 y_1 以及实际待检测图像的像素高度 x , 依据上式,可计算出对应的缩放因子,实现不同尺度下待检测图像自适应缩放因子的获取。

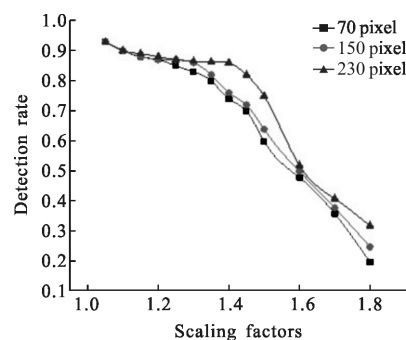


图 8 不同缩放因子检测率变化统计图
Fig.8 Statistical chart of detection rate change with different scaling factors

2.3 遮挡情况处理及局部特征识别

上述行人检测方法均是针对行人整体目标而设计,但是当待检测行人出现部分遮挡时,其检测性能受限,原因是被遮挡的部分经过检测器分类后会导导致错误的分类结果。在实验过程中发现,行人头肩特征较明显,且基本不会被其他物体所遮挡,故文中选择行人头肩特征对遮挡情况进行处理以及对目标的再识别,基本方案是对于一帧待检测图像,计算 HOG 特征后,先对其进行整体分类器判别,得到分类结果,若得分为正,则说明检测窗口中包含行人,若得分为负,则说明检测窗口中不包含行人。文中设定若整体分类器的判定阈值处于 $(-2, 0.5)$ 之间,则图像中的行人可能存在部分遮挡,对其进行遮挡判断,遮挡推理的原则是基于块 block 特征对待判断区域进行局部分析,统计该区域所有 block 特征得分,若部分得分较高的 block 区域相对集中,而得分为负的

block 区域存在相似趋势,则判断该行人区域存在部分遮挡,且遮挡位置即得分为负的 block 区域。若所有区域的 block 得分不存在明显的变化趋势,则判断不存在遮挡。对判断存在遮挡的检测窗口调用头肩检测器进行目标的再判别,头肩 HOG 检测算子样本大小为 32×32 , 构造头肩模型正样本和相应负样本训练 SVM 分类器,对被遮挡目标进行头肩局部特征识别。获取头肩检测结果并对重叠窗口进行去除和合并,结合行人头部与地面的距离,预测目标整体位置,外扩头肩检测窗口完成对行人整体的窗口检测。如图 9(a)所示,在不使用遮挡处理和局部特征识别则会造成漏检。而文中的局部检测如图 9(b)所示,经过上述 2.3 节提出的包围框外扩方法,最终检测效果如图 9(c)所示。



图 9 局部检测效果图

Fig.9 Local detection effect diagram

3 实验与结果分析

3.1 系统构建

构建的监测系统如图 10 所示,其作用距离 3~10 m,监测视场大于 5 m ,红外传感器的数据采集速率为 25 帧/s,自清洁除尘。为验证方法的有效性,文中根据煤矿实际工况,构建了专用红外行人数据库,其测试训练集如表 1 所示,与现有的 OCTBVS 红外数据库相比,环境背景更复杂,干扰源更多,更符合煤矿实际需求。

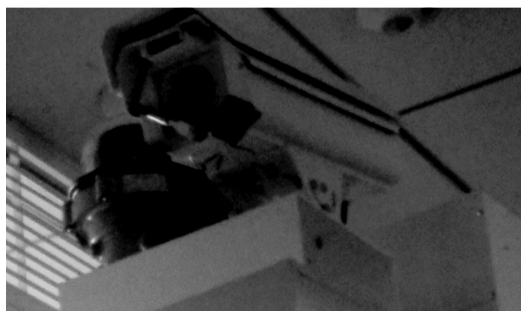


图 10 监测系统实物图

Fig.10 Physical picture of monitoring system

表 1 测试视频相关信息

Tab.1 Test video related information

Name	Frame	Number	Application
Sample_1	2 245	3 124	Positive training sample
Background	1 838	-	Negative training sample
Test_1	1 746	1 481	Test single person sample
Test_2	1 100	2 048	Test multiperson sample
Test_3	1 438	986	Test partially shielded sample
Test_4	2 574	2 089	Test function
Test_5	2 843	1 596	Validation

3.2 性能评价指标

为验证文中行人检测方法的鲁棒性和实时性,选择如下性能评价指标:检测率 R_{TP} ,即检测系统正确识别的行人数与实际标记的行人数之比;误检率 R_{FP} ,即检测系统错误识别的行人数与测试视频帧数之比;检测速度 V ,即每秒处理的视频帧数。

3.3 行人检测方法性能比较

将文中检测方法 with 目前应用比较广泛的红外行人检测方法进行了对比,侧重于分类器在具备相对较小误检率的情况下,所达到的准确率程度。

具体方法分别为 HOG^[5]、HOG-LBP^[11]、PBP^[21],在对比实验中,均使用局部双阈值方法对图像进行分割,保证相同的分类器结构参数和 SVM 学习算法,对相同的视频图像分别进行检测,统计 4 种方法的 ROC 曲线如图 11 所示。可以看出:原始的 HOG 检测方法和 PBP 检测方法效果较差,其中 PBP 即金字

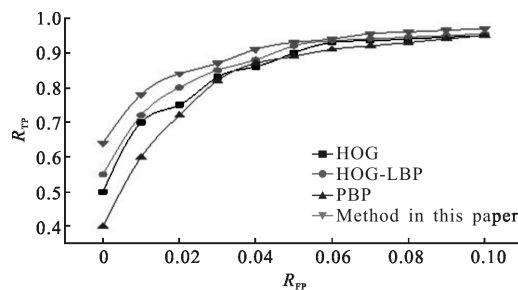


图 11 不同检测方法 ROC 比较

Fig.11 Comparison of different detection methods by ROC

塔二值模式对近景目标还能有较好的表达效果,但对于远景行人以及一些纹理特性欠缺的目标,其检测效果很不理想。而 HOG-LBP 检测方法结合了图像的边缘特征和纹理特征,一定程度上提高了检测

率,但其特征描述子维数很高,实时性较差。而文中提出的多特征检测方法,在误检率 2%的情况下能达到 85%的检测率,相比上述三种方法,在检测性能上有了较大程度的提升。

3.4 行人检测系统的性能评估

为了进一步验证文中的改进 HOG 检测算子对实际检测效果和检测时间的影响,进行了三组对比实验。实验过程中,控制的变量分别为是否使用改进的 HOG 特征提取算法和自适应缩放因子获取算法、是否进行遮挡情况处理和局部特征识别,同时保证检测过程中其他处理均一致,具体实验结果如表 2 所示。

表 2 不同方法的检测性能比较

Tab.2 Comparison of detection performance of different methods

Method	Number	R_{TP}	R_{FP}	$V/frame \cdot s^{-1}$
Unused improved feature extraction and adaptive scaling	3 644	89.85%	2.12%	13
No local processing	3 644	79.66%	8.94%	21
This method in the paper	3 644	91.25%	1.69%	20

由表 2 可知,文中提出的改进 HOG 特征提取算法和自适应缩放因子获取算法在不明显降低检测率的情况下,能有效地缩短系统检测时间,说明改进的方法对系统的检测性能有明显的改善。图 12 展示了部分行人检测结果,同时包括煤矿井下实际检测示例,结果表明:文中检测方法对于复杂环境的行人探测具有很好的实时性和鲁棒性。与现有算法相比,文中算法性能突显优势,但仍有 9%检测率提升空间,主要分布在以下情况,如当多人目标之间存在较强的相互遮挡、重叠等,检测系统普遍只会检测出单一人,造成部分漏检。其次对于相对复杂的伪目标和干扰源,严重时会造成目标与背景差异性很小,发生误检。若在以下方面进行改进,预计检测率将会进一步提高。考虑加入多摄像机和其他传感器,获取更加丰富的图像信息,将有助于解决相互遮挡问题。保证学习样本的多样性和持续性,考虑在线学习等算法,让系统在特定环境的检测过程中通过自学习和更新提高检测性能。



图 12 部分检测结果示例

Fig.12 Examples of partial detection results

4 结束语

为实现对煤矿井下作业人员实时准确的监测和保护,文中提出了一种基于多特征级联的红外行人检测方法,先利用初级特征分类器对 ROI 进行提取和分类,不仅减少了后续复杂特征提取的计算量,还很大程度上降低了系统的虚警率,相比单独使用复杂特征检测分类器,对检测性能有了较大程度的提升。提出的改进 HOG 特征提取算法和自适应缩放因子获取算法,在保证检测率的基础上,提高了检测系统实时性,同时文中针对目标被遮挡情况,提出了遮挡情况推理和局部特征识别,进一步提高了检测系统对于特殊情况的鲁棒性。实验结果表明:该方法具备较好的检测率和实时性,能够实现在煤矿等低能见度粉尘环境下对行人目标的有效检测。

参考文献:

[1] Cui Hao, Li Biao, Shen Zhenkang. Combining shape and texture features for infrared pedestrian detection [C]// Proceedings of the International Conference on multispectral image processing and pattern recognition, 2011: 1-7.

[2] Sun H, Wang C, Wang B, et al. Pyramid binary pattern features for real-time pedestrian detection from infrared videos[J]. *Neurocomputing*, 2011, 74(5): 797-804.

[3] Liu Qiong, Wang Guohua, Shen Minmin. Pedestrian detection with vehicle-mounted far-infrared monocular sensor based on edge segmentation [J]. *Huanan Ligong Daxue Xuebao/ Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition)*, 2015, 43(1): 87-91, 98. (in Chinese)
刘琼, 王国华, 申旻旻. 基于边缘分割的车载单目远红外行人检测方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 87-91, 98.

[4] Zheng J, Zhang W, Li B. Pedestrian detection based on background modeling and head-shoulder recognition [C]//

- International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, 2012:227-232.
- [5] Dalal N, Triggs B. Histograms of oriented gradients for human detection [C]//Computer Vision and Pattern Recognition, 2005, IEEE Computer Society Conference on. IEEE, 2005, 1(12): 886-893.
- [6] Zhou Hongzhi, Liu Qi. A far infrared detection recognition description method based on improved gradient histogram [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2016, 53(5): 1018-1026. (in Chinese)
周红志, 刘祺. 一种改进的梯度直方图远红外行人检测方法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2016, 53(5): 1018-1026.
- [7] Kim D S, Kim M, Kim B S, et al. Histograms of local intensity differences for pedestrian classification in far-infrared images[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(4): 258-260.
- [8] Olmeda D, Escalera A D L, Armingol J M. Far infrared pedestrian detection and tracking for night driving [J]. *Robotica*, 2011, 29(4): 495-505.
- [9] Xie Zhihua, Liu Guodong. Infrared face recognition based on co-occurrence histogram of multi-scale local binary patterns [J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2015, 44 (1): 391-397. (in Chinese)
谢志华, 刘国栋. 基于多尺度局部二元模式共生直方图的红外人脸识别[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 391-397.
- [10] Xia Qing, Hu Zhenqi, Wei Beilei, et al. New edge detection method for images of infrared thermal imager[J]. *Infrared & Laser Engineering*, 2014, 43(1): 318-322. (in Chinese)
夏清, 胡振琪, 位蓓蕾, 等. 一种新的红外热像仪图像边缘检测方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 318-322.