

基于 LIG 的红外视频小目标检测方法

田栋^{1,2},刘坤¹,郝博¹(1. 中国船舶重工集团有限公司 第七一七研究所,湖北 武汉 430223;
2. 湖北工业大学,湖北 武汉 430000)

摘要:准确检测远程红外视频中的小目标具有一定难度,提出一种面向远距离红外视频小目标的高性能检测方法,设计一个灵活的模块化处理流程,包括视频超分辨率模块、无监督目标检测器、连通区域分析模块和轨迹关联模块。该方法由视频分辨率增强、局部梯度小目标检测、多帧检测轨迹关联构成,并采用远距离红外视频样本进行了实验验证。对 3 种视频超分辨率算法进行了研究,结果表明:目标关联算法具有较好的提升效果,证明了所提方法的有效性。

关键词:红外视频;小目标检测;低强度与梯度算法;实时跟踪

中图分类号:TN21 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)06-0226-05

LIG-based Infrared Video Small Target Detection Method

TIAN Dong^{1,2}, LIU Kun¹, HAO Bo¹(1. 717th Institution, China Shipbuilding Industry Cooperation, Wuhan 430223, China;
2. Hubei University of Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: To overcome the difficulty in determining small targets with accuracy on a remote ingrained video, a small-target high-resolution detection method of remote intra-video is proposed. And a flexible modularized processing flow, which includes video super-resolution module, unsupervised target detector, connected area analysis module and track correlation module, is established. The proposed method, composed of video resolution increase, local gradient small together detection and multi frame detection track correlation, is experimentally verified by adapting remote infrared video samples. Research comparison is made among the three super-resolution algorithms with the results indicating that the target correlation algorithm has favourable improvement, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Keywords: infrared video; small target detection; LIG; real-time tracking

0 引言

红外视频包含大量背景杂波和空气流动等引起的噪点,因此从远距离检测红外小目标具有一定难度。目前,红外图像的小目标检测已成为视觉检测领域的研究热点。文献[1]利用局部对比度检测红外小目标的方法耗时且有时会增强目标和杂波。为了提高性能,文献[2]引入了多尺度对比度量方法。文献[3-4]引入红外拼接图像模型,将小目标检测转化为优化问题,通过非凸秩近似最小化可改进模型的性能。

此外,不少研究者提出了一些使用深度学习算法(you only look once, YOLO)对短距离红外视频中的较大物体进行目标检测和分类的方案。由于 YOLO 算法使用纹理信息来帮助检测,所以对于目标太小而没有任何可识别纹理远程视频的处理效果不够理想。

针对以上问题,本文提出了一种提高远程红外视频中小目标检测性能的综合方法。该方法由几个部分构成:首先,利用成熟的视频超分辨率增强算法来提高视频的空间分辨率。通过比较 3 种算法,证明了其中一种方法可提高

目标检测性能。其次,引入了低强度与梯度(low intensity and gradient, LIG)目标检测方法,LIG 算法表现出了良好的性能和计算速度^[5],并且引入连通分量分析与扩张方法,从而降低了误检。最后,为了进一步提高整体检测性能,在本文的框架中加入了简单在线和实时跟踪(simple online and realtime tracking, SORT)目标关联算法,进一步增强了目标检测性能。

1 实现方法

本文提出的方法由几个部分构成。由于远程视频的分辨率较低,本文首先应用视频超分辨率算法来提高视频分辨率。目的是研究视频超分辨率可以获得多少性能增益。其次,对单帧图像应用低强度梯度(LIG)算法进行无监督小目标检测。然后,针对 LIG 检测结果可能出现的假阳性结果,采用连通分量分析将相邻像素分组成簇。最后,提出了一种快速的目标关联算法,称为简单在线和实时跟踪(SORT)^[6],以进一步提高检测结果,基本原理图如图 1 所示。

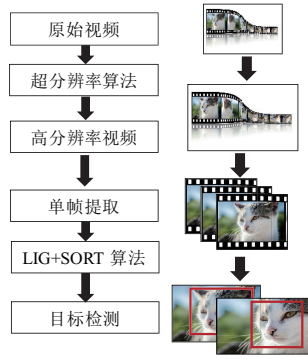


图1 基本原理流程图

1.1 视频超分辨率算法

由于远距离视频中的目标过小,提高视频分辨率有助于提高目标检测性能,因此本研究中为了提高小目标检测精度,将通过3种视频超分辨率算法对原始视频进行分辨率提升,即双三次插值、动态上采样滤波和超分辨率变焦慢动作算法。

1) 双三次插值(bicubic interpolation):该算法是一种单帧超分辨率方法,对原始帧中的像素使用16个相邻像素进行插值^[7-8]。

2) 视频超分辨率的动态上采样滤波(dynamic upsampling filter, DUF)算法:该算法能够结合时间信息生成高分辨率帧图像。例如,为了生成单个的超分辨率帧,VSR-DUF使用当前帧之前和之后的帧,通过相关帧来提取信息,可获得更好的效果^[9-10]。

3) 视频超分辨率变焦慢动作(zoom slow-motion, ZSM)算法:该算法是一种最新的深度学习视频超分辨率方法,不仅提高了视频中帧的分辨率,还提高了输入视频的帧速率^[11-13]。

文献[14-17]通过对各种超分辨率方法的视觉性能比较分析后得出,ZSM方法比双三次插值法和DUF的结果更好。

1.2 LIG原理及其改进

本文针对红外图像提出一种基于局部强度梯度算法(LIG)的目标检测方法。LIG算法比其他算法的速度快,且对背景杂波处理具有良好的鲁棒性。该算法使用滑动窗口扫描输入图像,窗口大小取决于输入图像的分辨率。对于每个窗口,分别计算局部强度和梯度值,然后将这些值相乘得到强度梯度图,并使用自适应阈值分割算法,以二值化图像展示处理效果。

LIG算法主要步骤如下。

1) 计算 $n \times n$ 区域内的像素均值 \bar{f} :

$$\bar{f} = \frac{1}{1 - N_m} (f_0 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij}) \quad (1)$$

式中: f_0 为中心像素的值; N_m 为图像区域内的像素数量。

2) 计算局部强度值 I :

$$I = \max(0, f_0 - \bar{f}) \quad (2)$$

3) 计算区域内的各处梯度值 G_i :

$$G_i = \frac{1}{N_j} \sum_{j=1}^{N_j} \|g_\varphi^j\|^2 \quad (3)$$

式中: g_φ^j 为梯度元素; N_j 为梯度元素的数量。

4) 计算区域内的梯度值 G :

$$G = \begin{cases} \sum_{i=1}^{N_j} G_i & \frac{G_{\min}}{G_{\max}} > k \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中 k 为经验阈值参数。

本文对LIG算法进行了优化,使其更适合红外视频:对不同分辨率的帧使用不同的窗口大小,对于原始分辨率的帧图像使用 7×7 窗口;对于2倍分辨率的上采样帧,为了兼顾识别精度和计算效率,采用 19×19 的更大窗口。其次,为了降低误报,对LIG方法的非零像素平均值进行改进,使用像素强度最大的前0.01%像素的平均值作为适应性阈值,更高的阈值可有效消除虚假目标。

1.3 连通区域分析

阈值处理后,对分割的二值化图像执行连通区域分析(connected component analysis),连通区域是相同像素值的相邻像素组成的集合。本文采用两次遍历(Two-Pass)算法:第一遍扫描时赋予每个像素位置一个标签,扫描过程中同一个连通区域内的像素集合中可能会被赋予一个或多个不同标签,因此需要将这些属于同一个连通区域但具有不同值的标签合并,记录它们之间的相等关系;第二遍扫描就是将具有相等关系标记的像素归为一个连通区域,并赋予一个相同的标签,完成连通区域分析。

文中为了找到帧间移动像素,需先对二值化图像进行扩张,将目标附近的像素合并在一起。此外,连通区域被馈送到“规则分析”块,检查确定连通区域是否为有效检测,包括检查面积大小是否合理,并比较连通区域之间的最大像素强度。如果面积在1~100像素间则有效。最终从剩余的连通区域中,选择信号最强像素区域作为目标。

1.4 SORT目标关联

本文使用一种快速的目标关联算法,称为简单在线和实时跟踪算法SORT,对目标进行跟踪关联。SORT算法主要是面向在线和实时应用,其只需使用最基础的卡尔曼过滤器和匈牙利算法,便可以达到相当的精度。SORT算法通过运动信息与过去帧记忆将目标从一帧关联到另一帧,其原理流程如图2所示。

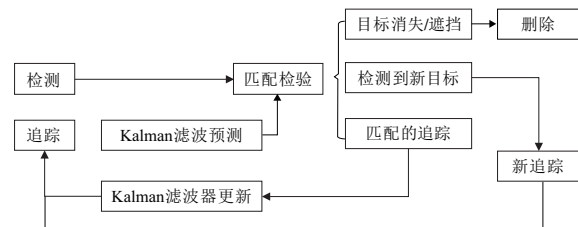


图2 SORT算法原理流程图

SORT算法对帧内每个检测到的对象建模如下:

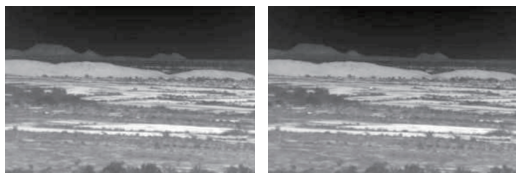
$$\mathbf{x} = [u, v, s, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{s}]^T \quad (5)$$

式中: u 和 v 分别表示对象中心的水平和垂直像素位置; s 和 r 分别表示对象的尺寸和比例。然后跨帧比较这些对象状态,以确定此状态是否与先前状态相关。

2 实验结果

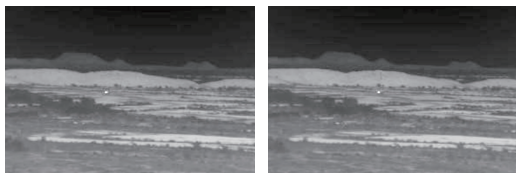
2.1 视频数据集

实验测试选用的 SENSIAAC 数据集中包含白天和夜间的 4 个远距离红外视频,距离跨度为 1 000~5 000 m,增量为 500 m。本文测试数据中选择了 3 500 m、4 000 m、4 500 m 和 5 000 m 的 4 个视频。图 3-图 6 显示了各视频不同场景的帧图像,可以看出视频中的车辆(小亮点)较小且很难发现。



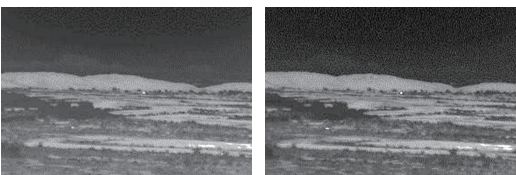
(a) 3 500 m 视频场景 (b) 第 900 帧图像

图 3 3 500 m 视频场景及第 900 帧图像



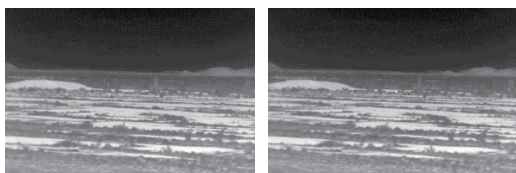
(a) 4 000 m 视频场景 (b) 第 900 帧图像

图 4 4 000 m 视频场景及第 900 帧图像



(a) 4 500 m 视频场景 (b) 第 900 帧图像

图 5 4 500 m 视频场景及第 900 帧图像



(a) 5 000 m 视频场景 (b) 第 900 帧图像

图 6 5 000 m 视频场景及第 900 帧图像

2.2 评估指标

本研究中设定,如果二值化结果在地面真实边界框质

心的给定阈值(本研究中设为 2 个像素)内,则检测为真(TP),否则为假(FP)。基于正确的检测和误报计数(missed detections, MD),可计算准确率 P 、召回率 R 及准确率和精确率的调及平均值 $F1$,定义分别为:

$$P = \frac{T_P}{T_P + F_P} \quad (6)$$

$$R = \frac{T_P}{T_P + M_D} \quad (7)$$

$$F1 = \frac{2 \times P \times R}{P + R} \quad (8)$$

2.3 不使用 SORT 的检测效果

结合 ZSM 和 LIG 算法的处理流程如图 7 所示,其没有使用 SORT 算法,连通区域分析包括几个步骤:首先,用自适应阈值对 LIG 图进行二值化,即低于阈值的区域为 0,高于阈值的区域为 1。然后,对获得的二值化图像进行扩张处理,扩张运算所使用的结构元素是正方形,其大小取决于图像的分辨率。在原始比例下,使用长度为 5 的正方形,对于高分辨率视频,为了兼顾检测精度和计算效率,使用长度为 10 的正方形。

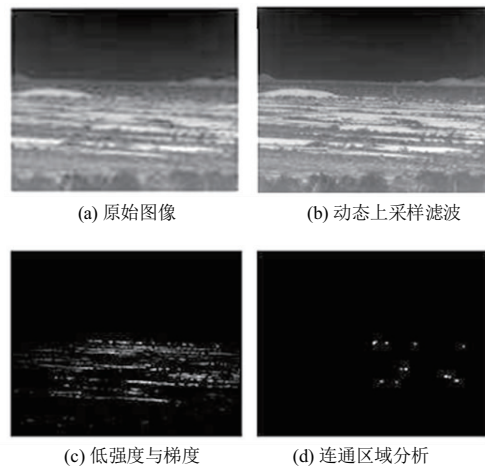


图 7 结合 ZSM 和 LIG 的工作流程图

本研究中,使用了 DUF 和 ZSM 的预训练模型。ZSM 是在大型 Vimeo-Septuplet 数据集上训练的,该数据集包括 Vimeo 上各种视频中约 90 000 个短视频文件,每个视频文件包括 7 帧图片序列。采用 ZSM 算法的结果如表 1 所示。

从表 1 可知,ZSM 在准确率和召回率方面都属于最优或并列最优。在 4 000 m 的情况下,就使用超分辨率图像实现高性能而言,ZSM×2 和 ZSM×4 的表现都略好于所有其他算法。对于 4 500 m、5 000 m 远距离而言,双三次×2 和 DUF×2 算法已表现出了较好的效果,因此 ZSM 算法没有太大的改进空间,但是其效果仍然可以与性能最好的方法相比。虽然 ZSM 算法结果比原始分辨率的视频有所提高,但 $F1$ 值提高并不显著。因此,在实际的目标检测应用中,VSR 方法的效果增益是有限的。

表 1 采用 ZSM 算法对不同分辨率的视频进行检测的性能

检测方法	3 500 m 距离视频			4 000 m 距离视频			4 500 m 距离视频			5 000 m 距离视频		
	P	R	F1	P	R	F1	P	R	F1	P	R	F1
原始	0.941	0.950	0.945	0.943	0.943	0.943	0.953	0.957	0.955	0.928	0.943	0.936
双三次×2	0.947	0.953	0.950	0.940	0.940	0.940	0.957	0.960	0.958	0.928	0.950	0.939
DUF ×2	0.944	0.950	0.947	0.940	0.937	0.938	0.960	0.957	0.958	0.928	0.947	0.937
ZSM ×2	0.957	0.957	0.957	0.960	0.963	0.962	0.960	0.963	0.962	0.932	0.953	0.942
ZSM ×4	0.950	0.953	0.952	0.970	0.973	0.972	0.953	0.957	0.955	0.922	0.950	0.936

2.4 使用 SORT 进行轨迹关联的改进

本节研究使用 SORT 算法后对整体检测性能的影响,图 8 为完整流程。结果表明,使用 ZSM 算法的超解析处理提高了检测性能,但效果有限,因此,本文不采用超解析处理过程。

在实验中,SORT 算法是在连通区域分析步骤之后实现的。每个连通区域的边界框信息作为输入,然后使用 SORT 算法关联跨帧的边界框。由于在工作流程的早期阶段检测率相对较高,跟踪关联将有助于消除大多数误报。表 2 的测试结果证明,在 3 500 m 视频的 300 帧中,SORT 算法消除了所有的误报,同时,在其他距离视频中的效果也有所提高,可见,SORT 算法有助于进一步区分背景异常目标和实际目标。

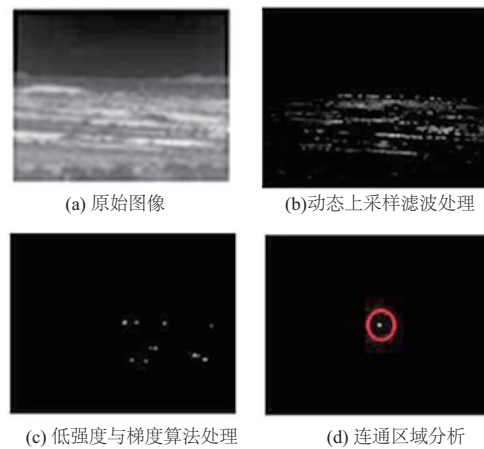


图 8 结合 LIG、CC 和 SORT 的工作流程图

表 2 SORT 算法目标检测性能对比

项目	3 500 m 距离视频			4 000 m 距离视频			4 500 m 距离视频			5 000 m 距离视频		
	P	R	F1	P	R	F1	P	R	F1	P	R	F1
不使用 SORT	0.941	0.950	0.945	0.943	0.943	0.943	0.953	0.957	0.955	0.928	0.943	0.936
使用 SORT	—	0.950	0.974	0.990	0.953	0.971	0.990	0.943	0.966	0.997	0.957	0.977

2.5 计算复杂度

由于本文使用 LIG 算法,因此导致计算速度较慢,即使使用 LIG Parallel 并行计算,处理一帧也需要大约 75 s 左右,如表 3 所示。

表 3 建议的目标检测框架计算时间

方法	计算平台	300 帧处理时间/s
LIG	MATLAB	63 000
LIG Parallel	MATLAB	22 000

2.6 效果评估

对比有、无 SORT 算法的处理流程的结果如图 9-图 12 所示。可以看出,在某些帧中,采用 SORT 算法有助于消除误报。

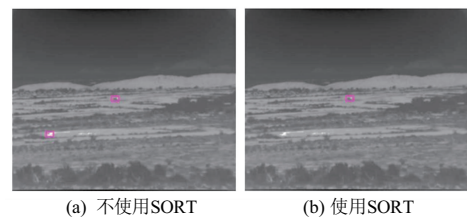


图 9 3 500 m 距离视频对比

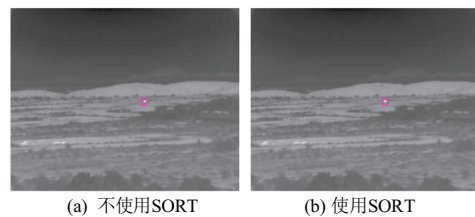


图 10 4 000 m 距离视频对比

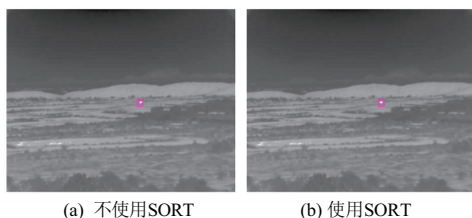


图 11 4 500 m 距离视频对比

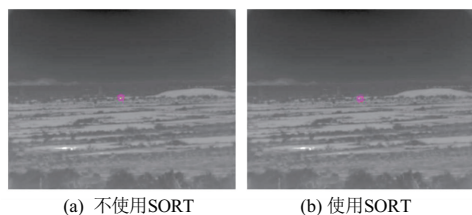


图 12 5 000 m 距离视频对比

3 结语

本研究主要针对远程红外视频中的小目标检测,结论如下。

1) 提出了一个集成的、灵活的、模块化的框架,包括视频超分辨率、小目标检测、连通域分析和目标轨迹关联。

2) 所提出的无监督目标检测方法对于目标尺寸非常小的远距离视频(3 500 m 及以上)具有良好的检测能力。

3) 使用了 SORT 算法后,通过对 3 500 m~5 000 m 远距离视频数据集的测试,证明了所提检测框架的有效性。

参考文献:

- [1] CHEN C L P, LI H, WEI Y T, et al. A local contrast method for small infrared target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 574-581.
- [2] 杨其利,周炳红,郑伟,等. 基于全卷积网络的红外弱小目标检测算法[J]. 红外技术, 2021, 43(4): 349-356.
- [3] 娄新雨,王海,蔡英凤,等. 采用 64 线激光雷达的实时道路障碍物检测与分类算法的研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(7): 779-784.
- [4] 王维,梁汝军,黄涛. 地铁列车障碍物视频识别系统设计[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(6): 166-169.
- [5] 彭锐. 单目摄像头的车辆前方障碍物检测研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20(4): 43-45.
- [6] 袁朝春,王桐,何友国,等. 传感器感知盲区条件下智能汽车主动制动系统控制研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 363-373.
- [7] 宗长富,文龙,何磊. 基于欧几里得聚类算法的三维激光雷达障碍物检测技术[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(1): 107-113.
- [8] 王灿,孔斌,杨静,等. 基于三维激光雷达的道路边界提取和障碍物检测算法[J]. 模式识别与人工智能, 2020, 33(4): 353-362.
- [9] 龚鹏,林京鹏,胡为,等. 暗夜下基于激光辅助的路面障碍物视觉识别方法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 225-229.
- [10] 熊沂斌,王栋. 基于蚁群算法的车辆路径问题研究[J]. 信息技术, 2019, 43(7): 15-17, 23.
- [11] 吕恩利,阮清松,刘妍华,等. 基于动态识别区和 B 样条曲线

- [3] ZHANG H, ZHANG L, YUAN D, et al. Infrared small target detection based on local intensity and gradient properties [J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 89: 88-96.
- [4] 韩金辉,董兴浩,蒋亚伟,等. 基于局部对比度机制的红外弱小目标检测算法[J]. 红外技术, 2021, 43(4): 357-366.
- [5] 蒋维娜. 基于多特征的行人计数算法研究[D]. 广州: 中山大学, 2013.
- [6] BEWLEY A, GE Z Y, OTT L, et al. Simple online and realtime tracking [C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2016: 3464-3468.
- [7] LOHIT S, KULKARNI K, TURAGA P. Direct inference on compressive measurements using convolutional neural networks [C]//2016 IEEE International Conference on Image Processing. Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2016: 1913-1917.
- [8] 刘杨帆,曹立华,李宁,等. 基于 YOLOv4 的空间红外弱小目标检测[J]. 液晶与显示, 2021, 36(4): 615-623.
- [9] 刘法龙. 面向图像融合应用的红外/SAR 图像仿真、采集、传输技术研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2014.
- [10] LATORRE-CARMONA P, TRAVER V J, SÁNCHEZ J S, et al. Online reconstruction-free single-pixel image classification [J]. Image and Vision Computing, 2019, 86: 28-37.
- [11] 卜德飞,孙韶媛,黄荣,等. 基于改进 SSD 的无人驾驶夜间目标检测[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(1): 63-69.
- [12] 蒋光友. 红外视频运动点目标识别关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [13] 尹丹艳. 基于核模糊聚类多模型 LS-SVM 背景预测的红外弱小目标检测[J]. 物联网技术, 2021, 11(3): 24-27, 30.
- [14] 朱硕雅,杨德振,贾鹏,等. 时空联合红外弱小目标检测算法的设计与实现[J]. 激光与红外, 2021, 51(3): 388-392.
- [15] 陈青华,董锋,谢晓方,等. 基于低码率传输的红外视频编码方法研究[J]. 红外, 2013, 34(8): 16-20.
- [16] 李维鹏,杨小冈,李传祥,等. 红外目标检测网络改进半监督迁移学习方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 243-250.
- [17] GAO C Q, MENG D Y, YANG Y, et al. Infrared patch-image model for small target detection in a single image [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(12): 4996-5009.

收稿日期: 2021-07-07

(上接第 214 页)

- [2] 的智能叉车避障路径规划[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 359-366.
- [11] 边玉亮,李淑静,严晓龙. 基于 STC¹²C5A60S2 的汽车侧向盲区探测系统[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(10): 133-136.
- [12] 韩正新,乔耀华,吕守国,等. 基于 HC 显著算法与 BP 神经网络的机器视觉系统[J]. 信息技术, 2020, 44(3): 54-58.
- [13] 罗晋楠,张济民. 基于扩展 Haar 特征和 DBSCAN 的钢轨识别算法[J]. 计算机科学, 2020, 47(增刊 1): 153-156.
- [14] 郭碧,丁春平. 基于帧间差分累积的铁路限界异物检测提取算法[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(9): 153-158.
- [15] 张袅娜,鲍旋旋,李昊林. 基于激光雷达和摄像机融合的智能车障碍物识别方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1461-1466.
- [16] 张春辉. 车辆位置数据处理及动态出行路径诱导技术[J]. 信息技术, 2020, 44(12): 129-133, 138.

收稿日期: 2022-03-15