

文章编号: 1674—8247(2023)01—0048—06

DOI: 10.12098/j.issn.1674-8247.2023.01.009

基于激光雷达与视频结合的铁路异物探测技术研究

余 博 杨 森 王 珣 裴起帆 潘兆马

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:本文提出一种基于激光雷达与视频结合的铁路异物探测系统,该系统利用 RANSAC 算法和欧氏距离聚类获取轨道平面及异物,基于 TBD 策略、Kalman 和匈牙利算法实现多目标跟踪与状态识别,通过联合标定实现雷达和视频联动并获取清晰的异物图像,最后采用 YOLOv4 模型识别异物。铁路场景验证结果表明:(1)该系统将能检测到最小目标(投影长度为 20 cm)的极限距离延长至 75 m,比市场同类系统提升 66%;(2)实现了仅由 10 组数据即可完成的激光雷达与摄像球机的快速标定;(3)采用 YOLOv4 对图像分类,该系统的 mAP 指标达到 90.2%,大幅度降低误报的可能性。研究成果可在灾害频发地段的铁路运营安全保障中发挥重要作用。

关键词:异物入侵探测;激光雷达;TBD 策略;联合标定;YOLOv4

中图分类号:U298

文献标识码:A

A Study on Railway Foreign Object Detection Technology Based on Combination of LIDAR and Video

YU Bo YANG Sen WANG Xun PEI Qifan PAN Zhaoma

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: This paper proposes a railway foreign object detection system based on the combination of LIDAR and video, in which the track plane and foreign objects are identified with the RANSAC algorithm and Euclidean distance clustering, TBD strategy, Kalman and Hungary algorithms are employed for multi-target tracking and status recognition, LIDAR and video linkage are realized through joint calibration to obtains the clear images of the foreign objects, and finally the YOLOv4 model is used to identify the foreign objects. The verification results of railway scenarios show that: (1) The system extends the limit distance for detecting smallest targets (with a projection length of 20 cm) to 75 m, which is 66% higher than that of similar systems in the market. (2) The system realizes the rapid calibration of LIDAR and dome camera that can be completed by only 10 sets of data. (3) By using YOLOv4 to classify images, the mAP index of the system reaches 90.2%, which greatly reduces the possibility of false alarms. This system can play a vital role in the safety assurance of railway operation in disaster-prone areas.

Key words: foreign object intrusion detection; LIDAR; TBD strategy; joint calibration; YOLOv4

在西南山区,铁路极易受泥石流、危岩崩塌等地 质灾害诱发的异物侵入限界影响。2020 年 8 月 2 日,

收稿日期:2022-12-08

作者简介:余博(1993-),男,工程师。

引文格式:余博,杨森,王珣,等. 基于激光雷达与视频结合的铁路异物探测技术研究[J]. 高速铁路技术,2023,14(1):48-53.

YU Bo, YANG Sen, WANG Xun, et al. A Study on Railway Foreign Object Detection Technology Based on Combination of LIDAR and Video[J]. High Speed Railway Technology, 2023,14(1):48-53.

成昆铁路汉源至关村坝站区段岩体发生高位崩塌、落石上道,造成区段封锁^[1];2020年3月30日,济南开往广州的T179次客运列车行经京广铁路湖南省郴州市永兴县路段时,山体突发滑坡,列车撞上塌方体脱轨^[2];2019年8月16日,四川省凉山州甘洛县境内成昆铁路凉红至埃岱站间数万方的高位山体边坡发生崩塌,线路中断,17名工人失联^[3]。除地质灾害外,行人或动物闯入限界也会严重影响铁路安全。频发的铁路异物侵限事故对铁路运营安全产生了严重影响,稍有不慎就会造成列车脱轨或重大人员伤亡。及时准确地发现异物入侵事件并发出报警信息,对于铁路运营安全具有极其重要的作用。

目前,铁路异物入侵监测系统主要以双电网^[4]、光纤振动^[5]、视频监控^[6]与激光扫描^[7]等手段为主。中国铁路北京局集团有限公司采用基于深度学习的视频监控系统^[8],将摄像机安装在容易发生落石的隧道洞口,实时采集轨道区域画面并以深度学习图像识别的方式检测画面中的入侵异物;该系统得益于深度学习算法的识别能力,提高了在正常环境下的异物识别准确率;然而,该系统仍然无法解决在夜晚、雨雾天气下误报偏高的问题。中国铁路成都局集团有限公司采用的线路安全防护系统以二维平面扫描模式的激光雷达为核心^[9],通过不间断地扫描高于钢轨一定距离的平面以探测防区内的异物;该检测手段得益于平面激光雷达的扫描方式,能稳定检测超出轨道顶面一定距离的物体,但受限于分类样本空间和分类方式的制约,仍不能较好解决系统误报的问题。

近年来,三维激光雷达因其优异的距离探测能力和环境适应性,不仅在非接触式桥梁检测^[10]和铁路隧道病害检测领域得以广泛应用^[11],也在异物探测领域也逐渐普及。激光雷达能充分获取目标的三维信息,弥补传统传感器在异物尺寸、深度、位置等信息获取能力的不足,极大降低系统的误报率和漏报率。

本文在结合激光雷达与视频两者自身优势的基础上,开展铁路线路异物入侵探测技术研究,依托研究成果开发一套高效、稳定、成本低廉的异物入侵探测系统,旨在提高铁路线路异物入侵探测的准确性,保障铁路运营安全。

1 系统方案设计

系统整体设计思路是将两款传感器集成,充分发挥激光雷达与视频的技术优势。通过激光雷达对区域内目标的探测与追踪实现对其运动状态的精准判断。根据铁总科技〔2015〕184号《线路障碍自动监测

报警系统暂行技术条件》^[12],当目标在限制区域停滞时间超过规定时间(15 s)后,利用下位机控制球机变焦实现对目标的准确抓拍,将获取到的图像上传至数据中心服务器,中心服务器采用深度学习模型对照片中的目标进行分类,并将分类结果推送至客户端,从而实现探测-识别-报警推送的功能。系统具体业务流程如图1所示。

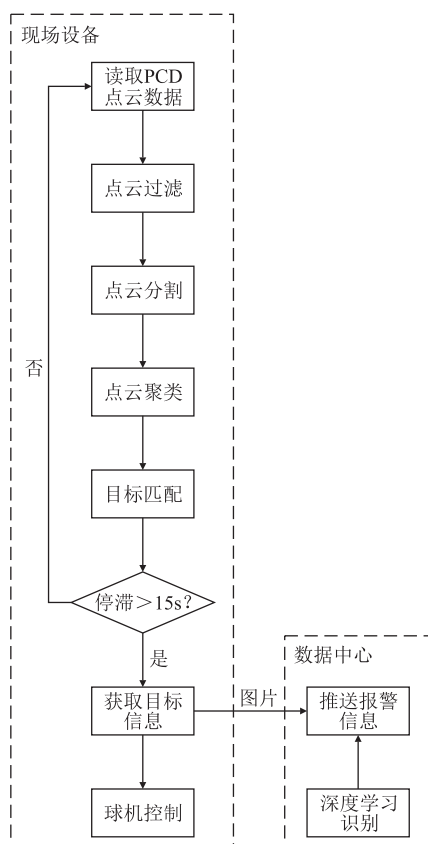


图1 系统业务流程图

2 激光雷达目标探测与跟踪

多目标跟踪算法多采用TBD(Tracking-by-Detection)策略。为实现侵限异物运动状态的准确判断,通过算法实现激光雷达点云的有效分割、聚类和目标提取,进而基于TBD策略实现多目标实时跟踪与状态识别。

2.1 快速目标检测

激光雷达生成的三维点云数量大,其点云的离散型特点以及点与点之间无拓扑关系决定了无法利用点云进行目标的语义有效表达。本节将构建一种快速准确的计算流程,实现将非轨面点云组织成具有一定空间拓扑结构的三维点云语义目标,为目标的跟踪和状态识别提供条件。具体步骤为:

(1)对三维点云数据进行降噪处理,进而对 x 与 y

方向进行降采样,降低点云密度。

(2) 对点云数据采用 RANSAC (Random Sample Consensus, 随机抽样一致)^[13-14] 算法进行分割, 获取轨道平面及上方一定区域内的点云数据。

(3) 对非轨面点云数据采用欧式距离聚类, 获取聚类后目标。

2.2 运动模型

根据 TBD 策略, 在对目标匹配前需对前帧目标运动状态进行最优估计, 本文采用 Kalman^[15] 法实现对目标运动状态的估计。具体计算步骤为:

时间更新(预测):

$$x_k^- = Ax_{k-1} + w \quad (1)$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \quad (2)$$

测量更新(校正):

$$K_k = P_{k-1}H^T(HP_{k-1}H^T + R)^{-1} \quad (3)$$

$$x_k = x_k^- + K_k(Z_k - H_kx_k^-) \quad (4)$$

$$P_k = (I - K_kH)P_k^- \quad (5)$$

式中: x_k ——状态值, 包括目标中心坐标 (X, Y, Z)、速度 (V_X, V_Y, V_Z) 与宽、高、长的尺寸信息 ($w, h, 1$), 即系统状态向量为 $[X, Y, Z, V_X, V_Y, V_Z, w, h, 1]^T$;

z_k ——观测值, 包括目标中心点坐标与尺寸信息, 即系统观测向量为 $[x, y, z, w, h, l]^T$;

A ——状态转移矩阵;

H ——观测矩阵;

w_k ——过程噪声矩阵;

Q ——观测噪声矩阵。

上标 $-$ ——表示该值为状态估计值。

考虑到目标在轨道上的运动特征以及遮挡可能引起的目标尺寸变化, 本文对目标位置与速度选用匀加速运动模型, 对目标尺寸采用了恒定模型。

状态方程与观测方程见如式(6)和式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} x_k^- \\ \dot{x}_k^- \\ y_k^- \\ \dot{y}_k^- \\ z_k^- \\ \dot{z}_k^- \\ w_k^- \\ h_k^- \\ l_k^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{k-1}^- \\ \dot{x}_{k-1}^- \\ y_{k-1}^- \\ \dot{y}_{k-1}^- \\ z_{k-1}^- \\ \dot{z}_{k-1}^- \\ w_{k-1}^- \\ h_{k-1}^- \\ l_{k-1}^- \end{bmatrix} \quad (6)$$

观测方程为:

$$\begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ w_k \\ h_k \\ l_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_k^- \\ \dot{x}_k^- \\ y_k^- \\ \dot{y}_k^- \\ z_k^- \\ \dot{z}_k^- \\ w_k^- \\ h_k^- \\ l_k^- \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.3 多目标跟踪与状态识别

在激光雷达点云数据分割与采用匀加速模型的卡尔曼滤波开展位置预测的基础上, 本节通过匈牙利算法^[16-17]实现对探测目标邻帧的稳定匹配。

假设当前帧探测得到的目标位置标记为 $Detect = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, 从上一帧通过卡尔曼预测得到的目标位置标记为 $Track = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$, 此时目标匹配的可用性存在 $m \times n$ 种可能, 引入三维目标的 $IOU = (A \cap B) / (A \cup B)$ (Intersection-Over-Union) 作为权重指标, 采用匈牙利算法求解指派问题, 从而得到最优匹配结果。具体步骤为:

(1) 处理第一帧时, 以检测到的目标初始化并创建新的跟踪器, 标记 id 编号。

(2) 处理后续帧时, 先从卡尔曼滤波器中获取到由前帧 box 产生的状态预测和协方差预测。求解跟踪器所有目标状态预测与本帧检测的 box 的 IOU, 通过匈牙利指派算法得到 IOU 最大的唯一匹配(数据关联部分), 再去掉匹配值小于 IOU 阈值的匹配对。

(3) 用本帧中匹配到的目标检测 box 去更新卡尔曼跟踪器, 计算卡尔曼增益、状态更新和协方差更新, 将状态更新值输出作为本帧的跟踪 box。对于本帧中没有匹配到的目标重新初始化跟踪器。

3 激光雷达与视频联动标定

为实现激光雷达与摄像球机的联动控制, 捕捉清晰的目标图像, 需先通过标定将二者的坐标系统一^[18-19]。

假定摄像球机捕获的二维图像坐标点由 (U, V) 表示, 激光雷达生成的三维点云坐标用 (X, Y, Z) 表示, 标定则是求解转换矩阵 K , 将三维坐标转换为二维坐标, 如式(8)所示。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_u & 0 & u_0 \\ 0 & f_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

式中: (f_u, f_v, U_0, V_0) ——摄像球机的内部参数,由焦距(x方向上的焦距 f_u 、y方向上的焦距 f_v)、像平面中心点坐标 (U_0, V_0) 等组成;

R ——旋转矩阵;

t ——平移矢量。

具体步骤为:

(1) 利用 A4 的方格标定板的图像求解摄像球机的内参。

(2) 使用 $1.8 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 的标定板的 4 个角点作为目标物。标定场景选择桥上较为空旷的环境,便于识别标定板。此外,需保证雷达到标定板有 3 m 以上,需要选取至少 10 个左右不同的角度和距离来摆放标定板,左右位置和不同的偏向角度最好都有采集数据。

(3) 标定板在每个位置时都分别用雷达和摄像球机记录,雷达录制一段 10 s 左右的 rosbag 文件,摄像球机拍摄一张照片(确保标定板在雷达和球机的视野当中)。

(4) 将雷达的 rosbag 文件转换成 pcd 文件,并记录下每个 pcd 文件中标定板 4 个角点的三维坐标,顺序习惯按照从左上角的角点开始,顺时针方向记录坐标,并将结果保存在 txt 文件中。

(5) 利用 OpenCV 记录每张照片中标定板 4 个角点的二维坐标,注意应与雷达文件采用相同的角点顺序,并将结果保存在 txt 文件中。

(6) 利用球机内参、雷达角点坐标、球机角点坐标共同解算球机与雷达的外参。

通过上述步骤,可成功求解内参与外参,式(9)和式(10)分别为球机的内参矩阵和畸变系数,式(11)为外参矩阵。

$$\begin{pmatrix} 700.217 & 126 & 0 & 341.456 & 737 \\ 0 & 1020.593 & 218 & 320.691 & 413 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} -0.283 & 109 & 0.732 & 526 & 0.000 & 526 & 0.002 & 278 & -2.365 & 977 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} 0.342 & 966 & -0.923 & 431 & 0.172 & 191 & 25.488 & 721 \\ 0.012 & 077 & -0.178 & 958 & -0.983 & 783 & 7.592 & 293 \\ 0.939 & 273 & 0.339 & 484 & -0.050 & 224 & 43.387 & 461 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

通过内部参数和外部参数可将激光雷达三维坐标转换成摄像球机相平面坐标,从而控制摄像球机聚焦并拍摄清晰的目标图像。摄像头在无任何异物目标时的初始预置位如图 2(a)所示。当雷达检测到有异物目标在轨道区域内停留超过阈值时会通过目标三维坐标和标定参数计算出二维平面的坐标,并给摄像头发送相应转动指令,精准定位到异物目标位置,如图 2(b)所示。

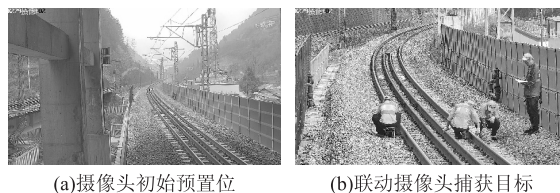


图2 雷达与摄像头联动效果示意图

4 基于 YOLOv4 的物体分类技术

YOLOv4 是由 Bochkovskiy 等人于 2020 年在 YOLOv3 的基础上提出的一种深度学习模型,主要使用了全卷积网络(Fully Convolutional Network, FCN),并融合了残差网络 ResNet 中的跳跃连接和特征金字塔网络(Feature Pyramid Networks, FPN)等算法思想。与其他常用目标检测算法对比,发现 YOLOv4 能够在检测精度和速度上取得较好的平衡,如表 1 所示。因此,本文选择 YOLOv4 作为深度学习图像识别模型,以满足对铁路异物目标的实时、高准确率检测的需求。

表1 不同网络框架的性能对比表

网络框架	mAP-50/%	Time/ms
R-FCN	51.9	85
SSD513	50.4	125
FPN FRCN	53.3	156
RetinaNet-101-500	53.1	90
YOLOv4-416	55.3	29

为验证本文采用的深度学习模型的有效性与鲁棒性,通过自建的训练集开展 YOLOv4 网络模型训练。训练集由 COCO 训练集与布设在铁路沿线高清摄像球机采集的图像共同组成,类型包括火车、人、石头等共 11 种,共计 119 245 张。

训练完成后选择 mAP(Mean Average Precision)

指标对YOLOv4网络模型的精度开展评测,具体11类目标的mAP值如图3所示。火车、人、落石的精度分别为90%、95%、99%,11类目标的均值平均精度为90.22%。采用YOLOv4网络的深度学习框架具有较为良好的目标分类能力。

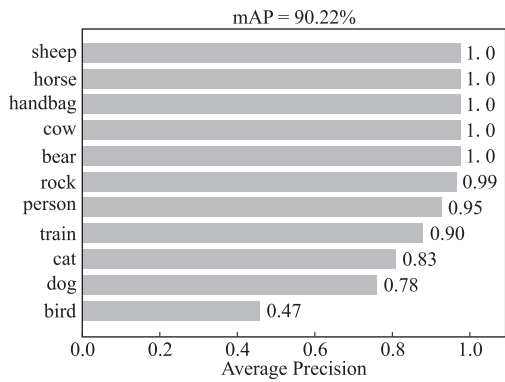


图3 各类目标识别效果图

5 工程应用

为进一步研究系统适应性及稳定性,选择大临铁路三家村隧道出口段开展工程验证测试。该隧道洞口仰坡陡峻,岩体节理裂隙发育,存在落石崩塌上道的风险。经过对雷达自身覆盖范围、盲区的计算,本次测试将异物探测系统布设于隧道内距离隧道洞口20 m,距轨面3 m高处,如图4所示。



图4 异物入侵系统隧道内布设图

测试均在夜晚开展,选择人、石头(20 cm×20 cm×20 cm)等多种目标分别放置于距离雷达45 m、65 m、75 m和85 m的位置进行测试,测试内容包括点云数与物体跟踪的稳定性,如表2所示。

表2 激光雷达探测性试验表(个)

类别	45 m		65 m		75 m		85 m	
	点云数	跟踪稳定	点云数	跟踪稳定	点云数	跟踪稳定	点云数	跟踪稳定
行人	371	是	265	是	217	是	170	是
石头	53	是	30	是	21	是	9	否

由测试结果可知,系统在距离洞口50 m(距离雷达75 m)以内对于小目标物体可实现稳定探测与跟踪,单帧点云计算时间小于0.05 s,满足实时计算要求。摄像头联动捕捉目标准确、图像清晰。深度学习图像分类功能也具有较高的准确性。测试数据表明,所有功能满足设计要求。

6 结论

本文将激光雷达与视频两种不同传感器的技术优势结合,研发的新一代异物探测系统具有以下特点:

(1)构建三维点云数据并对其进行降噪、RANSAC算法轨面分割、欧式距离目标聚类这一流程,较好地实现了轨面以上目标的分割。

(2)采用TBD策略,引入IOU作为权重,通过匈牙利算法将Kalman预测与激光雷达探测得到的目标信息进行匹配,很好地解决邻帧点云目标跟踪与状态信息获取。系统将能检测到最小目标(投影长度为20 cm)的极限距离延长至75 m,比市场同类系统提升了66%。

(3)实现了仅由10组数据即可完成的激光雷达与摄像球机的快速标定,将激光雷达三维目标坐标转换成摄像球机相平面坐标,控制摄像球机聚焦并拍摄出更清晰、更准确的目标图像。

(4)通过采用YOLOv4深度学习框架可对获取的图像进行分类,mAP指标达到90.2%,大幅度降低误报的可能性。

综上所述,本文提出的新一代异物检测系统较好地弥补了传统铁路异物检测系统存在的误报、漏报等问题,具有高效、稳定、成本低廉等特点。随着未来规模化的推广使用以及采集样本增加,系统的分类能力将进一步提高。提出的系统可在保障地质灾害频发地段的铁路运营安全发挥重要作用。

参考文献:

[1] 郝晓平,刘兵,李永安,等. 周界入侵探测系统应用探索[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(S2): 16-19.
HAO Xiaoping, LIU Bing, LI Yongan, et al. Application of Perimeter Intrusion Detection System [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(S2): 16-19.

[2] 刘子畅,王军锋,吕大勇. 基于微波阵列技术的高铁周界安防系统应用研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(2): 37-41, 59.
LIU Zichang, WANG Junfeng, LV Dayong. Application of High Speed Railway Perimeter Security System Based on Microwave Array Technology [J]. Railway Signalling & Communication Engineering,

- 2019, 16(2): 37–41, 59.
- [3] 王瑞,李霄峰,史天运,等. 基于视频深度学习的铁路周界入侵检测算法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(2): 61–68.
- WANG Rui, LI Xiaofeng, SHI Tianyun, et al. Railway Perimeter Intrusion Detection Algorithms Based on Video Deep Learning [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(2): 61–68.
- [4] 刘桂卫,李国和,陈则连,等. 多源遥感技术在艰险山区铁路地质勘察中应用[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(8): 4–8.
- LIU Guiwei, LI Guohe, CHEN Zelian, et al. Application of Remote Sensing Technology for Geological Investigation in Mountain Railways [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(8): 4–8.
- [5] 张利伟,谭中伟,丁志超,等. 基于光纤光栅振动传感的快速检测系统[J]. 量子光学学报, 2020, 26(3): 250–257.
- ZHANG Liwei, TAN Zhongwei, DING Zhichao, et al. Fast Detection System Based on FBG Vibration Sensor [J]. Journal of Quantum Optics, 2020, 26(3): 250–257.
- [6] 刘峰,朱强,干宗良. 一种低复杂度的监控视频异物入侵检测算法[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 1–8.
- LIU Feng, ZHU Qiang, GAN Zongliang. A Low-Complexity Algorithm for Foreign Object Intrusion Detection in Surveillance Videos [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 1–8.
- [7] 杜程达,熊启源. 基于多维感知技术的铁路沿线雷达视频融合分析系统[J]. 中国铁路, 2021(7): 134–140.
- DU Chengda, XIONG Qiyuan. Radar Video Fusion Analysis System along Railway Lines Based on Multi-Dimensional Perception Technology [J]. China Railway, 2021(7): 134–140.
- [8] 张景利. 线路障碍自动监测报警系统及其应用[J]. 中国铁路, 2019(3): 95–99.
- ZHANG Jingli. Automatic Track Monitoring and Alarming System and Its Application [J]. China Railway, 2019(3): 95–99.
- [9] 郑亚宏,何家玉. 铁路线路障碍监测报警系统研究[J]. 中国铁路, 2019(9): 111–117.
- ZHENG Yahong, HE Jiayu. Research on Obstacle Monitoring and Alarm System on Railway Lines [J]. China Railway, 2019(9): 111–117.
- [10] 王翔,汪正兴. 高速铁路桥梁雷达非接触测试技术研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(1): 50–54, 84.
- WANG Xiang, WANG Zhengxing. Research on the Radar Non-Contact Testing Technology of High-Speed Railway Bridges [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(1): 50–54, 84.
- [11] 李星,王树栋,牟元存. 铁路隧道衬砌致灾病害的综合检测方法探讨[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 74–79.
- LI Xing, WANG Shudong, MOU Yuancun. Discussion on Comprehensive Detection Method of Disaster-Causing Diseases of Railway Tunnel Lining [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 74–79.
- [12] 王张飞,刘春阳,隋新,等. 基于深度投影的三维点云目标分割和碰撞检测[J]. 光学精密工程, 2020, 28(7): 1600–1608.
- WANG Zhangfei, LIU Chunyang, SUI Xin, et al. Three-Dimensional Point Cloud Object Segmentation and Collision Detection Based on Depth Projection [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(7): 1600–1608.
- [13] 陈伟标,郑子文. 视频监控及激光雷达技术在地铁曲线站台异物检测中的应用[J]. 广东科技, 2021, 30(7): 72–74.
- CHEN Weibiao, ZHENG Ziwen. Application of Video Monitoring and Lidar Technology in Foreign Body Detection of Curved Subway Platform [J]. Guangdong Science & Technology, 2021, 30(7): 72–74.
- [14] 任珈民,宫宁生,韩镇阳. 基于YOLOv3与卡尔曼滤波的多目标跟踪算法[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(5): 169–176.
- REN Jiamin, GONG Ningsheng, HAN Zhenyang. Multi-Target Tracking Algorithm Based on YOLOV3 and Kalman Filter [J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(5): 169–176.
- [15] 张子恒,于昊,祝磊. 基于毫米波雷达的机场跑道异物检测方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(4): 493–498.
- ZHANG Ziheng, YU Hao, ZHU Lei. Research on Detection Method of Foreign Object Debris on Airport Runways Based on Millimeter Wave Radar [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2020, 43(4): 493–498.
- [16] 王泉东,杨岳,罗意平,等. 铁路侵限异物检测方法综述[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(12): 3152–3159.
- WANG Quandong, YANG Yue, LUO Yiping, et al. Review on Railway Intrusion Detection Methods [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(12): 3152–3159.
- [17] 祁森,陈安柱,杨晓芳,等. 车载相机自动标定和快速标定技术研究[J]. 机械设计与制造, 2020(12): 221–223, 227.
- QI Miao, CHEN Anzhu, YANG Xiaofang, et al. Research on Automatic Calibration and Rapid Calibration Technology of Vehicle Mounted Camera [J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(12): 221–223, 227.
- [18] 袁德宝,蔡量力,王成. 单目相机-轮式里程计的自动内外参标定算法[J]. 测绘通报, 2021(5): 54–58.
- YUAN Debao, CAI Liangli, WANG Cheng. Automatic Intrinsic and Extrinsic Calibration for a Monocular Camera-Odometry System [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(5): 54–58.
- [19] 罗晖,贾晨,李健. 基于改进YOLOv4的公路路面病害检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(14): 336–344.
- LUO Hui, JIA Chen, LI Jian. Road Surface Disease Detection Algorithm Based on Improved YOLOv4 [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(14): 336–344.