

地铁车辆障碍物检测技术应用研究

王维华

(陕西交通职业技术学院 轨道交通学院, 西安 710018)

摘要: 障碍物检测是确保地铁车辆运行安全的一个重要措施, 但是目前地铁运行障碍物检测存在场站环境下单一传感器检测速度慢、准确性差、范围小的问题, 为实现对其的有效弥补, 在可见光与近红外结合的双目视觉技术迅速发展的支持下, 基于红外成像系统与可见光成像系统, 设计地铁障碍物检测系统; 基于对系统功能需求与运行平台的分析, 明确系统功能模块及其硬件构成; 由于红外与可见光图像传感器的成像机理不同, 拍摄的图像也存在差异, 利用 BEEMD 算法对图像进行融合之后, 执行 YOLO 障碍物类别检测任务; 最后分析系统应用, 结果表明可以实现列车运行中前方列车 80~500 m 安全限界范围内的障碍物识别。

关键词: BEEMD 算法; 红外成像系统; 可见光成像系统

Application of Subway Obstacle Detection Technology

WANG Weihua

(Academy of Rail Transportation, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China)

Abstract: Obstacle detection is an important measure to ensure the safety of subway vehicles. However, at present, the detection of obstacles in subway operation has the problems of slow detection speed, poor accuracy and small range by a single sensor in the station environment. In order to make up for it effectively, with the rapid development support of the binocular vision technology, which combines visible light with near-infrared, a subway obstacle detection system is designed based on the infrared imaging system and visible light imaging system. Based on the analysis of the functional requirements and operating platform, the system functional modules and hardware composition are defined. Due to the different imaging mechanism of infrared and visible image sensors, the captured images also have some differences. The images are fused by using the Bi-dimensional ensemble empirical mode decomposition (BEEMD) algorithm, the category detection with the YOLO obstacle is implemented. Finally, the application of the system is analyzed. The results show that the obstacle recognition in front of the train safety limit can be realized between 80~500 m.

Keywords: BEEMD algorithm; infrared imaging system; visible imaging system

0 引言

地铁在运行中可能出现的障碍物包括掉落的混凝土、轨旁设备、意外跌落的行人等, 在地铁行驶中, 障碍物的出现危险系数很高, 因此, 应该加强障碍物的检测。障碍物检测是地铁研究中的一个必不可少的研究方向, 在地铁列车运行过程中, 通过对接触式障碍物检测系统的应用, 虽然可以及时发现前方障碍

物, 但只能在与障碍物碰撞之后才能使地铁紧急制动, 这样一来, 地铁可能受到较大的冲击力, 无法保证地铁与乘客的安全^[1], 因此, 需要改进这种障碍物的检测方法。关于障碍物的非接触检测很多学者进行了研究, 如张磊等人^[2]利用自上而下扫描图像得到像素分布情况, 之后提取出障碍物的区域目标, 但是这种方法存在应用局限, 只能对那些比地面要高的障碍物进行检测; 刘威等人基于单目视觉相机的支持执行

收稿日期: 2021-08-03; 修回日期: 2021-12-29。

基金项目: 陕西交通职业技术学院 2020 年校级科研项目(YJ20002)。

作者简介: 王维华(1987-), 男, 甘肃天水人, 硕士, 讲师, 主要从事城市轨道交通车辆技术方向的研究。

引用格式: 王维华. 地铁车辆障碍物检测技术应用研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(2): 110-116.

对障碍物的检测任务，发现这种方法精度并不高，外界因素容易对其形成干扰^[3]；徐进等人对以传感器融合技术为基础的算法进行研究及分析，在一定程度上实现了对视觉传感器数据检测准确性的提升^[4]。杨洁等人对全局背景运动补偿参数估计方法加以运用检测障碍物，提高了检测的速度^[5]。当前，非接触式的障碍物检测主要应用激光雷达、超声波、红外测距传感器、可见光成像系统等，激光雷达虽然具有不受恶劣天气影响的优点，但其分辨率与精度都很低，无法实现对自主检测小障碍物要求的满足^[6]，超声波通过主动发射与接收脉冲检测障碍物，如果存在多传感器工作的情况，会有相互之间的干扰产生，对最终检测结果产生较为明显的不利影响^[7]。在可见光成像中，包含的信息十分丰富，对于图像细节类信息的获取同样非常多，这是可见光成像技术的明显优势，如果光照条件比较理想，通过对可见光成像技术的运用，能够达到将障碍物检测精度提高的目的。另一方面，红外光所具有的优点更加得突出，在该技术的支持下，基于对物体自身红外辐射的探测，经由光电转换以及信号处理等多个环节的转换处理，物体表面的热分布情况会以相对应的视频图像的形式被输出出来，整体而言，该技术可以进行全天候的应用，周围的环境光照等因素不会对其产生较大的影响，亦可满足远距离探测的要求，对于夜晚等光照条件不理想的环境探测而言，同样表现出很好的适用性。所以，对可见光与近红外两种技术进行结合的双目视觉技术在短时间内便得到了很快的发展，基于两种技术的成像系统之间能够达到优劣势充分互补的目的，对于图像采集模块对环境适应性的提升具有明显的积极意义^[8-10]。由于在场站环境下，单一传感器检测速度慢、准确性差、范围小^[11]，为了弥补单一传感器检测中存在的缺陷，本文设计了基于红外成像系统和可见光成像系统的地铁障碍物检测系统。

1 系统功能需求与运行平台分析

1.1 系统功能需求分析

地铁的运行速度一般在 80~100 km/h，设定的地铁制动距离为 400 m，地铁车辆障碍物检测系统应该具备的功能如下：1) 由于地铁车辆大部分线路在地下运行，光线条件比较昏暗，因此，系统的运行需要保证能够在光线不太好的环境下获得地铁前方的障碍物

信息；2) 可以及时检测地铁前方的障碍物，并且进行不同级别的预警；3) 建立地铁运行中的障碍物数据库，实时记录相关信息，便于后期的调查研究。

1.2 系统运行平台选择

系统运行的平台包括以 DSP 技术^[12]为核心的平台、基于嵌入式 ARM 的平台、以工控机 (IPC, industrial personal computer)^[13]为基础的平台，由于以 DSP 技术为核心的平台系统开发周期长，基于嵌入式 ARM 的平台不能满足大量图像的处理要求，因此选择工控机为地铁车辆障碍物检测系统的运行平台。本文使用的工控机配置具体如下：CPU 为 Intel Core i5-4590, 3.30 GHz；内存为 8 GB。相机视场角为 51.46°，芯片尺寸为 6.4 mm×6.4 mm，感光度为 ISO100，镜头焦距为 15 mm，拍摄的图片大小为 1280×720，处理的图片的分辨率为 640×480，两个摄像机的光轴相互平行。

2 系统架构与硬件设计

2.1 系统架构与功能模块

综合而言，可见光系统在对丰富图像信息的获取之上具有较为明显的优势，而红外成像系统则不会受到光照等因素的过多影响，出于对这些优点的把握，选择对红外与可见光两种成像系统进行结合的方式，达到获取地铁车辆运行过程中障碍物信息的目的，基于车载方式的支持进行单个红外成像系统以及单个可见光系统的安装。作为地铁车辆运行过程中的图像识别装置，障碍物视觉检测系统的功能体现为对整个地铁车辆运行环节的障碍物进行检测，图 1 为系统的设计方案。概括而言，障碍物视觉检测系统主要由图像采集模块、信息处理模块、行为分析模块、用户接口模块、地铁列车接口模块以及全局服务模块构成。

图像采集模块主要包括红外成像系统和可见光成像系统，通过上位工控机完成两类成像系统的并行工作方式设置，保证采集的图像在检测结果上具有互补性。为了更好地对障碍物图像信息进行采集，通过双目校正获得红外成像系统和可见光成像系统的相对位置关系，消除两个系统的图像畸变，令它们的成像坐标原点一致，校正通过 MatLab 标定得到的内外参数导出到 XML 文件，调用 OpenCV 库函数^[14]校正红外成像系统和可见光成像系统的相机内外参数，以此对采集的障碍物图像进行校正^[15-16]。

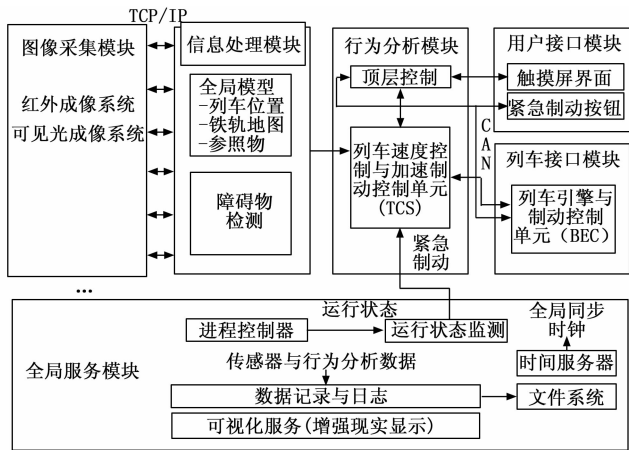


图 1 地铁障碍物检测系统设计方案

信息处理模块的主要功能在于完成障碍物的检测，是系统的核心部分。图像采集之后进行二值化预处理，之后采用 BEEMD 算法^[17]进行红外图像和可见光图像的融合，最后采用 YOLO^[18]障碍物类别检测。

行为分析模块主要是根据障碍物的检测信息实现地铁列车的减速控制、加速控制等。

用户接口模块主要是连接显示器，在显示器中显示地铁运行的基本信息、前方的障碍物信息、参照物信息等，同时设置一个紧急的刹车制动按钮，方便地铁的调试运行。

列车接口模块主要由牵引与制动控制单元构成，亦即车辆牵引动力单元以及列车制动停车控制单元。障碍物检测系统的上位工控机对全局服务模块进行管理，同时，进行障碍物检测等相关信息的存储^[19-20]。

2.2 系统硬件设计

从具体的硬件构成上来看，地铁障碍物检测系统主要有系统主机、红外成像系统、可见光成像系统几大模块，其中，系统主机的功能在于对红外成像系统、可见光成像系统采集的图像信息进行接收，并执行对信息的分析任务，一旦检查到障碍物，由继电器做出相应的动作，达到紧急制动地铁的目的。图 2 所示为地铁障碍物检测系统的硬件平台示意图。根据该图可知，系统主机中进行工控机、红外传感器控制板、可见光 CCD 传感器控制板、数据存储硬盘以及散热风扇几个重要模块的安装。待工控机完成对图像数据的分析工作之后，若是发现有障碍物出现，则在第一时间经由主控板将继电器断开，以此实现对地铁的紧急制动。图 3 为地铁障碍物检测系统中主控板的

设计示意图。

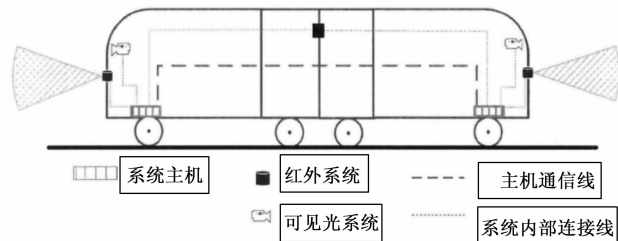


图 2 硬件平台

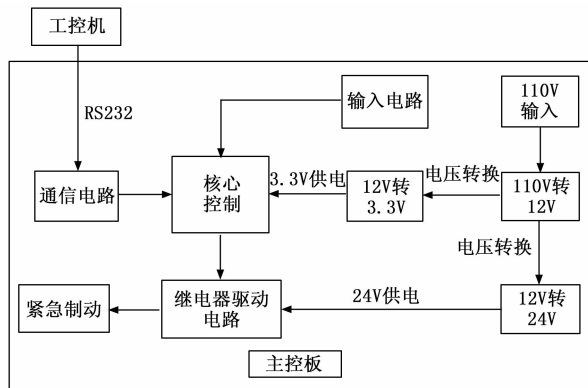


图 3 主控板的设计图

3 系统软件实现方法

地铁障碍物检测系统的软件工作流程见图 4。启动系统后，初始化红外系统和可见光系统，开始图像采集；图像采集模块在地铁运行中实时检测轨道线路中的障碍物信息；利用 YOLO 障碍物检测技术进行轨道、障碍物检测，一旦发现障碍物及时进行预警；收到警报信息后，地铁司机进行列车的速度控制，检测的障碍物信息和列车的运行信息、报警信息等可以存储在上位工控机中。

4 图像处理实现

4.1 图像预处理

对于红外成像系统与可见光成像系统而言，在具体的图像采集过程中，两个成像系统都有可能受到外部环境因素的影响，这会一定程度上造成对采集图像信息的干扰，导致图像误判现象的发生，所以需要采用相应的技术或手段执行对采集图像的预处理任务。此处对最大类间方差法 (Otsu) 加以采用，针对图像作相应的二值化预处理，在 Otsu 的支持下对图像作背景与目标的有效分割。

图像分割是基于对数理统计、模糊理论以及区域

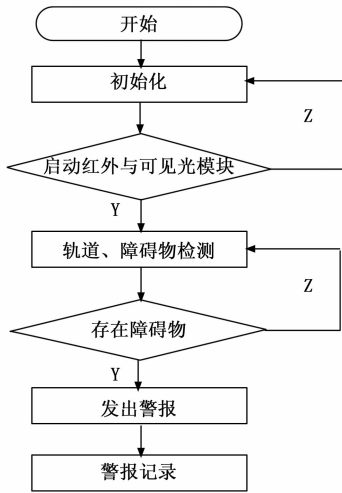


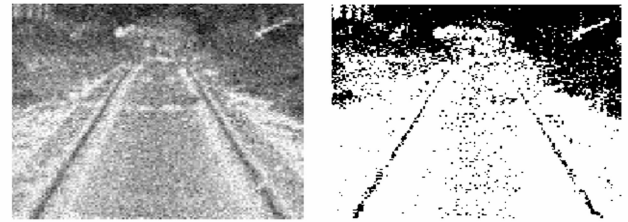
图 4 软件实现流程

相似等相关具体标准的参照，在物理意义层面之上对图像作相应描述，亦即使其表示为一些连通区域的集合。分析图像分割的目的，在于对图像进行若干区域的划分，以此为人们观察与理解提供便利。被划分的区域之间不能够重叠，相互之间应表现出各自的独立性，在不同的区域，部分特征会有明显不同的表现，而在另一区域之内，则有一致性或相似性体现出来。在一定意义上可以说，图像分割的准确性会对后续图像处理工作开展的顺利程度产生直接影响。OTSU 算法在提出以来便得到了研究人员的较多关注，究其原因，在于该方法有着简单易懂的原理，计算效率也较高，可以在较多领域应用，并达到很好的分割效果。作为一种无须进行实时监督，且没有参数调控、可以自动寻优的图像分割方法，OTSU 将一维直方图作为算法基础，通过类间方差最大化的实现来选择具体的阈值。在 OTSU 算法的具体应用下，对于图像 $I(x, y)$ ，目标和背景的分割阈值记作 T ，有：

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{N_0}{M} \times N \\ \omega_1 = \frac{N_1}{M} \times N \\ N_0 + N_1 = M \times N \\ \omega_0 + \omega_1 = 1 \\ \mu = \omega_0 \mu_0 + \omega_1 \mu_1 \\ g = \omega_0 (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu)^2 \\ T = \text{Arg max}\{g(t)\}, 0 \leq t \leq L - 1 \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中， ω_0 、 ω_1 分别代表目标像素点数占整

幅图像的比例、像素点数占整幅图像的比例； μ_0 、 μ_1 、 μ 代表图像原灰度灰度、图像平均灰度、图像的总平均灰度； g 代表类间方差； $M \times N$ 代表背景较暗时的图像大小； N_0 、 N_1 分别代表像素的灰度值小于阈值 T 的像素个数、像素灰度值大于阈值 T 的像素个数。对公式 (1) 简化之后，得出公式 $g = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2$ ；进一步地，采用遍历的方法，得出最佳阈值 T 为 178。图像的处理效果如图 5 所示（其中，图 5 (a) 为处理之前的原始图像，图 5 (b) 为二值化处理之后的图像）。



(a) 原始图像

(b) 二值化之后的图像

图 5 图像处理效果

4.2 红外与可见光图像融合

红外与可见光图像传感器在成像上有不同的机理，这决定它们拍摄的图像同样有较大差异呈现出来。所以，需要借助于相应的算法融合两种特征并不相同的图像，获取有着丰富场景信息的图像。BEEMD 算法主要在高斯白噪声辅助分析能力的支持下，通过对集成均值方式的采用，获取准确度比较高的特征分量和残差分量^[21-22]。详细而言，BEEMD 算法的主要思想为基于高斯白噪声辅助分析能力的支持，以提出的噪声模型为依据获取几个含有不同幅值的噪声图像，并借助于优化的 BEMD 对图像进行分解，通过对集成均值方式的采用，得到可以满足较高准确度要求的特征分量以及残差分量。模态混叠主要由信号间歇而引起，其存在会导致分解之后的内蕴分量频率出现严重混合的问题，并由此而丧失本有的物理意义。针对 BEMD 算法，进行一定量的高斯白噪声的添加反而对于图像的分解具有很好的促进作用。其原因主要如下：在进行包络面的构造之时，对于图像数据极值点的分布所提要求比较严格，对于一些有着明显纹理变化的细节区域，其区域极值点的数量比较多，纹理变化速度也相对缓慢，而与之相对应的，细节并不明显的区域却存在缺少必要区域极值点的问

题，这对于 BEMD 算法包络面的构造又具有不利影响。通过将一定量的高斯白噪声引入其中，可以相应地增加图像局部区域极值点的数量，对于包络面的构造具有积极影响，可以很好地发挥出对算法的驱动作用。具体地，图像融合需要经历以下几个步骤：

1) 将满足一定比例要求的高斯白噪声引入其中，让其可以均匀地填充在整个图像空间之中；

2) 将对称延拓的方法加以采用，以配准之后等待融合的图像为对象，执行对其的延拓处理任务，基于这一操作得到含有高斯白噪声的图像，数量一共为 n 个；

3) 基于 BEMD 算法的支持对得到的上述含有高斯白噪声的 n 个图像进行分解处理，进一步得到每层 n 个内蕴模分量 IMF；

4) 针对各层 n 个内蕴模分量 IMF，将它们的平均值求解出来，由此可以得到等待融合的图像的特征分量 EIMF，之后，采用求解均值的方法得到参残差分量 Res ；

5) 进行初始化处理，设定分解层数 $i=1$ ，对最大的分解层数进行限定，一共为 I 层（即 $i < I$ ）；

6) 针对等待分解的图像，将其视作残差分量 $R_{i-1,n} = A_n$ ，执行对每张图像第 i 层内蕴模分量 IMF_i 的计算任务；

7) 在完成具体的计算之后，可以获取各层 n 个图像的内蕴模分量和残差分量 R ，在此基础之上，对第 i 层的 IMF_i 分量求均值，可进一步获取等待融合的图像各层的特征分量 $EIMF_i$ ；

8) 对 IMF 筛选的停止条件进行设置，以具体的 Cauchy - type 收敛条件为参照依据，当 $SD < \zeta$ 时，停职筛选作业的进行，设定 ζ 的数值为 0.2。

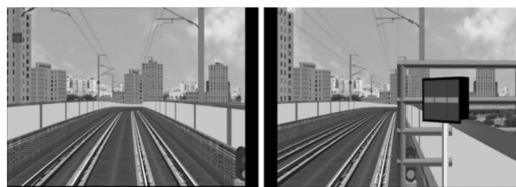
9) 执行对等待融合的红外图像 a 与可见光图像 b 的分解任务，通过该操作分别获取各自图像的内蕴模分量 $EIMF_i^a$ 、 Res_i^a ， $EIMF_i^b$ 、 Res_i^b ；

10) 采用局部区域能量，选择加权的融合策略对 $EIMF_i^a$ 、 $EIMF_i^b$ 进行融合，得到融合后的 $EIMF_i^c$ ；

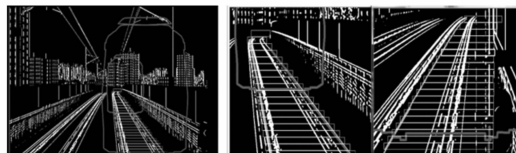
11) 采用模糊逻辑融合规则融合 Res_i^a 、 Res_i^b 得到 Res^c ，将 $EIMF_i^c$ 、 Res^c 叠加，获得融合之后的图像。融合前后如图 6 所示。

5 障碍物检测的实现

在借助红外系统和可见光成像系统采集地铁前方



(a) 融合前的图像



(b) 融合之后的图像

图 6 融合前后的图像

的障碍物目标图像，并对图像进行预处理和图像融合之后，进一步执行 YOLO 障碍物类别检测^[23-25]，实现地铁的障碍物检测功能。图 7 为障碍物检测信息处理流程图。

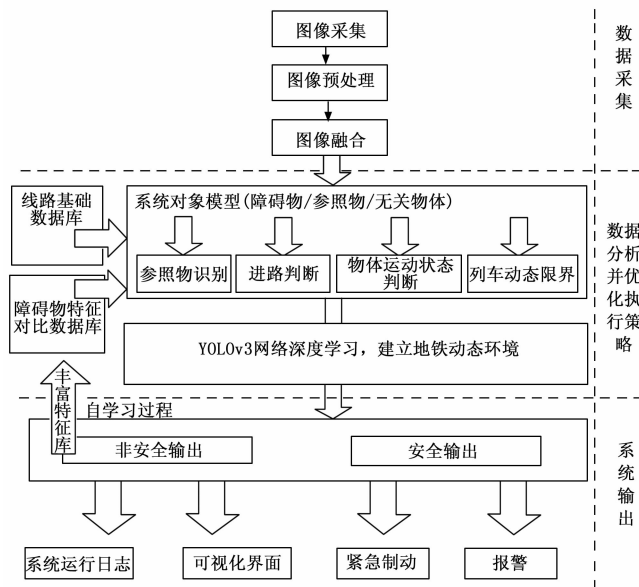


图 7 障碍物检测信息处理流程图

YOLO 障碍物类别检测所用的是一种新型的网络结构，包括 53 个卷积层的 Darknet53，采用金字塔思想，对第 1 个预测层前的特征图进行上采样处理，在第 2 个、第 3 个预测层前添加卷积层，使图像的特征更加细腻。根据图 8 可知，当一副包含目标信息的原始图片输入之后，网络会先对其进行多个网格的分解，之后经由迭代卷积逐一对各网格内是否包含目标物体进行检测，如果检测到某网格内有目标物体存在，则将其作为初始网格，针对网格中心位置与边

界范围作微调处理，以此将目标物体精准位置确定下来。在进行识别的整个过程中，卷积神经网络会基于某一特定顺序的卷积与池化，执行对图像的编码任务，以此将固定特征信息提取出来，之后经由上采样将采集到的含有特征的编码信息还原为初始图片，最终，经全连接层将其输出。在整个识别过程中，特征图越小，可识别的目标也会越小。YOLOv3 网络中，如果输入像素为 256×256 的图片，能够提取的特征最小尺寸像素为 8×8 ，可以满足在途列车障碍物检测场景中对远距离目标的检测。

迭代次数	类型	过滤器	规模	输出	
1×	卷积层	32	3×3	256×256	
	卷积层	64	$3 \times 3/2$	128×128	
	卷积层	32	1×1	128×128	
	卷积层	64	3×3		
	残差层				
	卷积层	128	$3 \times 3/2$	64×64	
	2×	卷积层	64	1×1	64×64
		卷积层	128	3×3	
		残差层			
		卷积层	256	$3 \times 3/2$	
8×	卷积层	128	1×1	32×32	
	卷积层	256	3×3		
	残差层				
	卷积层	512	$3 \times 3/2$		
8×	卷积层	256	1×1	16×16	
	卷积层	512	3×3		
	残差层				
	卷积层	1 024	$3 \times 3/2$		
4×	卷积层	512	1×1	8×8	
	卷积层	1 024	3×3		
	残差层				
损失计算			1 000		
全连接层					

图 8 YOLOv3 网络结构

6 试验分析

根据本文研究的监测方法，进行一个用于功能检测的实验平台的搭建，平台宽度相同于地铁列车两车轮之间的间距，具体数值为 1 435 mm，车载机箱所处的位置在底层板上，照相机则位于地面上方 1.6 m 的位置。借助于内外参数矩阵，照相机可将图像上铁轨和实际铁轨之间的关系确定下来。结合城规列车运行过程中表现出来的相应特点，本文提出了一种对外

参数进行计算的模型，基于对相机镜头平面和水平面之间夹角的确定，可以参照内参数矩阵将外参数矩阵求解出来。在完成对实验平台的搭建任务之后，保持照相机固定状态，对其镜头平面和水平面之间的夹角进行测量，为 5° 。在系统的各个设备之间，借助于电缆将它们之间的相互连接建立起来，平台的下端，位于两端位置处的轮轨能够沿着铁轨的方向，以一个相对而言比较慢的速度对试验平台进行推进。针对列车处于静态状态之下系统的功能，此试验平台可以进行模拟，虽然无法做到对列车动态状态之下系统功能的模拟，但是可以发挥出推动试验平台的作用，执行对铁轨边界特定障碍物的扫描任务，并在此基础上，通过对数据处理时间的具体计算，又可达到估算列车实际运行状态的目的，这同样意味着系统可以在列车运行状态之下发挥出对障碍物的检测功能。

为了将系统对障碍物的检测应用效果确定下来，在实际的地铁运行过程中，通过具体操作将障碍物识别程序启动，红外成像系统与可见光成像系统均在地铁上安装，它们同时进行地铁运行图像信息的采集，并由此而生成相应的障碍物检测数据库，在列车的行驶过程中，如果发现存在障碍物，则将相应的警报信息发出，若是没有发现障碍物，列车保持原状态正常运行。

将试验平台放置于铁轨上，平台静止不动，设定人站在铁轨正前方作为障碍物，已知轨道长度为 11.8m，根据障碍物直线检测的要求，照像机识别出铁轨为直线。

识别结果见图 9。根据图 9 可知，识别结果较为理想，可以实现列车运行中前方列车 80~500 m 安全限界范围内的障碍物识别，在 500 m 内能够识别出行人等障碍物，识别的障碍物大小为 $40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ ；300 m 内可以识别更小的物体，如掉落在轨道上的石块等。这样的识别能力已足够满足安全要求。



图 9 障碍物识别效果

7 结束语

本文基于红外成像系统与可见光成像系统设计地铁障碍物检测系统,先对红外成像系统与可见光成像系统进行校正,之后采集相关的图像信息,由于红外与可见光图像传感器的成像机理不同,所拍摄的图像也存在有较大的差异。利用 BEEMD 算法对图像进行融合之后进行 YOLO 障碍物类别检测,最后对系统的应用进行分析,结果表明该系统的障碍物识别能力满足地铁列车的安全运行需求。

参考文献:

- [1] 邓远志,林 森. 基于改进的 LeNet-5 轨道交通障碍物识别方法 [J]. 工业控制计算机, 2020, 33 (1): 63-66.
- [2] 张 磊,王书茂,陈兵旗,等. 基于双目视觉的农田障碍物检测 [J]. 中国农业大学学报, 2007, 12 (4): 70-74.
- [3] 刘 威,张丛磊,于红绯,等. 基于单目视觉的横穿障碍物检测 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34 (2): 170-173.
- [4] 徐 进,帅立国. 激光传感器和视觉传感器的机器人障碍物检测 [J]. 激光杂志, 2016, 37 (5): 56-59.
- [5] 杨 洁,刘海民,叶晶晶. 基于改进 SIFT 算子的动态障碍物检测方法 [J]. 机械设计与制造, 2017 (11): 270-272.
- [6] 雒娟花. 基于图像处理的障碍物检测系统研究 [D]. 西安:西安科技大学, 2009.
- [7] 孙永丽. 基于图像的铁路障碍物自动检测算法研究 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
- [8] 荣传振,贾永兴,吴 城,等. 红外与可见光图像分解与融合方法研究 [J]. 数据采集与处理, 2019, 34 (1): 146-156.
- [9] 蒋 萌,王尧尧,陈 柏. 基于双目视觉的目标识别与定位研究 [J]. 机电工程, 2018, 35 (4): 414-419.
- [10] 邓茜文,冯子亮,邱晨鹏. 基于近红外与可见光双目视觉的活体人脸检测方法 [J]. 计算机应用, 2020, 40 (7): 2096-2103.
- [11] KE Q F, KANADE T. Transforming camera geometry to a virtual downward-looking camera robust ego-motion estimation and ground-layer detection [J]. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2013, 1 (1): 390-397.
- [12] 庞 潇. 基于 PC104 与 DSP 的载机发控系统综合检查仪设计 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (9): 143-147.
- [13] 赵洪利,陈 飞,谢亚伟,等. S1000D 规范下交互式 IPC 发布技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (1): 152-155.
- [14] 汪成龙,林浩斌,马秋立,等. 基于 OpenCV 的实验室监控预警系统 [J]. 电子测量技术, 2018, 41 (12): 119-123.
- [15] 王才东,董祥升,陈志宏,等. 基于双目视觉的机械零件位姿检测系统研究 [J]. 机电工程, 2019, 36 (12): 1337-1341.
- [16] 孙 悦. 基于单目视觉的车道边缘检测及中心线提取算法研究 [J]. 汽车实用技术, 2019 (1): 47-48
- [17] 李广安,曹 岩,岳晓新. 基于 BEEMD 分解的红外与可见光图像融合 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (14): 237-244.
- [18] 马永杰,马芸婷,程时升,等. 基于改进 YOLO v3 模型与 Deep-SORT 算法的道路车辆检测方法 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21 (2): 222-231.
- [19] 鲁永杰. 基于机器视觉的列车前方障碍物检测方法研究 [D]. 兰州:兰州交通大学, 2015.
- [20] 宋怀波,何东健,辛湘俊. 基于机器视觉的非结构化道路检测与障碍物识别方法 [J]. 农业工程学报, 2011, 27 (6): 225-230.
- [21] 李广安,曹 岩,岳晓新. 基于 BEEMD 分解的红外与可见光图像融合 [J]. 计算机工程与应用, 2021, 57 (14): 237-244.
- [22] 孙 伟,杨一涵,王 野,等. 基于 BEEMD 的单目测距图像区间阈值降噪算法 [J]. 电子科技大学学报, 2020, 49 (4): 563-568.
- [23] 王玲玲,焦双健. 基于深度学习的恶劣环境中路面障碍物检测 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21 (8): 48-50, 54.
- [24] 王钊文,王 磊,黄仁欢,等. 基于 YOLOv3 算法的中低速列车在途障碍物检测方法 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2021, 18 (7): 86-89.
- [25] 王思雨. TANVIR AHMAD. 一种基于 YOLO 的交通目标实时检测方法 [J]. 计算机与数字工程, 2020, 48 (9): 2162-2167.