

城市轨道交通信号灯显示识别系统实验研究

刘昊旻

(上海电气泰雷兹交通自动化系统有限公司, 上海 201206)

摘要: 对城市轨道交通信号灯显示状态的准确识别是保障城市轨道交通系统安全运营的重要措施。现有城市轨道交通信号灯状态的识别依赖于列车驾驶员目视观察, 在恶劣天气与驾驶员身心疲惫等主客观因素共同作用下, 易出现信号灯状态识别问题进而导致安全事故。为此设计构建了一套基于机器视觉原理, 可有效识别5~200 m轨旁信号灯显示状态的识别系统, 并在此系统上实现了一种基于图像处理技术的轨旁信号灯识别方法。通过现场实验结合多场景虚拟检测, 结果表明: 该方法可以有效识别城市轨道交通轨旁信号灯的显示状态, 识别准确率最高可达95.4%, 可满足城市轨道交通对信号灯状态识别性能与安全性的要求。

关键词: 城市轨道交通; 机器视觉; 信号灯识别

中图分类号: U231.7

文献标识码: A

Experimental Research on Signal Light Display Recognition System for Urban Railway Transportation

LIU Haomin

(Thales SEC Transportation System Limited Company, Shanghai 201206, China)

Abstract: Accurate recognition for urban rail transit signal light display status is an important safeguard measure to ensure the safe operation of urban rail transit system. Recognition of signal status in existing urban rail transit relies on visual observation by train operators. The combination of subjective and objective factors, such as bad weather and driver fatigue, can lead to safety accidents due to signal status recognition problems. In this paper, a set of machine vision based on the principle of effectively recognizing 5~200 m trackside signal light display status recognition system has been designed and constructed. A trackside signal recognition method based on image processing technology is realized on this system. The field experiments combined with multi-scene virtual detection experimental results show that the method can effectively recognize the display state of trackside signals of urban rail transit. The recognition result accuracy can reach up to 95.4%, which can meet the requirements of urban rail transit on the performance and safety of signal status recognition.

Key words: urban rail transit; machine vision; signal light recognition

城市轨道交通信号灯是保障轨道交通系统安全运行的重要基础设施, 对于轨道交通信号灯状态的准确识别至关重要。列车驾驶员通过信号的显示状态做出决策, 保证轨道交通系统的正常运转。目前, 轨道交通信号灯主要是通过列车驾驶员目视观察判断, 在恶劣天气等环境因素与驾驶员身心疲惫等主观因素共同作用下, 易导致无法

及时识别甚至未发现位于轨旁的信号灯, 产生安全隐患乃至诱发安全事故。

机器视觉技术一般是指使用非接触式光学设备和传感器自动接收并处理真实场景的图像以获得人们所需要的信息^[1]。近年来, 图像处理等技术的迅猛发展, 促进了机器视觉技术在城市轨道交通领域的积极应用。徐瑞丰^[2]针对传统基于

收稿日期: 2023-11-07

作者简介: 刘昊旻, 助理工程师, 硕士, 研究方向为城市轨道交通领域新技术研究

RFID 技术的车号识别系统所需安装的标签易脱落损坏、设备成本高、维护流程复杂等缺点,结合地铁维保部门的系统需求,设计构建了以工业相机为核心的图像采集系统。李宁^[3]基于机器视觉技术,研究了钢轨表面缺陷智能检测系统,实现钢轨表面缺陷的智能识别。王慧敏等^[4]针对列车之间的安全测距问题,提出了一种基于机器视觉技术对在轨运行列车的弯道测距方法,利用单目相机对轨道进行图像采集,并对采集到的图片进行分析处理与提取特征点,推算优化了列车之间的测距公式。

本文主要基于机器视觉技术原理,结合城市轨道交通应用场景设计搭建了轨旁信号灯识别系统,并在此系统的基础上设计了一种信号灯显示状态识别算法。现场与仿真实验表明该算法可以准确、稳定、有效地识别信号灯的状态,为列车司机提供前方信号灯的颜色等信息,对于为线路运输提供一定的安全保障,降低列车安全事故的发生概率具有重要意义。

1 检测系统选型设计

机器视觉检测系统主要由三部分组成:①图像采集装置;②图像处理系统;③现场执行设备。为实现城市轨道交通轨旁信号灯的检测需求和检测系统的相关功能,本文使用广角与长焦组合的一组工业相机作为视频图像的采集设备,以工业处理器作为视频图像的处理终端。检测系统整体设计如图 1 所示。

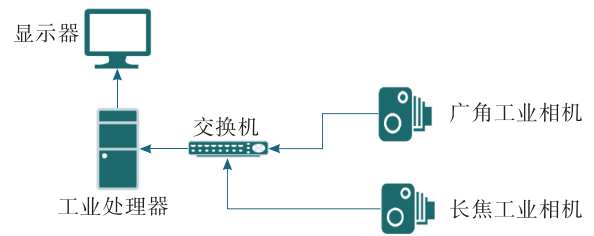


图 1 信号灯状态检测系统

1.1 工业相机选型

工业相机是机器视觉系统中的关键组件之一,其本质是将光信号转变为有序的电信号。工业相机的选择决定所采集到的图像分辨率与图像质量,选择合适的工业相机是机器视觉检测系统设计的重要环节。

(1) 芯片类型。CCD 工业相机主要应用在运动物体的图像提取,在视觉自动检查方案或行业中应用较多。在原理上 CMOS 芯片对图像信息

的读取速度远远高于 CCD 芯片,其各项对比如表 1 所示。考虑到城市轨道交通的使用场景特征,系统设计选择搭载 CMOS 芯片的工业相机。

表 1 工业相机 CCD 与 CMOS 芯片对比

比较项	CCD 芯片	新型 CMOS 芯片
快门	全局快门	全局快门或滚动快门
同一分辨率的相机/芯片的成本	非常高	与快门方式有关,相对便宜
帧率	≤20 FPS	非常高
电耗	高	低
发热情况	非常高	低
成像质量:动态范围	高	低~非常高
成像质量:灵敏度	高	低~非常高

(2) 分辨率。分辨率是指芯片上每行和每列上像素点的个数,分辨率的选择主要根据待观察或者待测量物体精度。计算分辨率可参考式(1):

分辨率 = 视野范围/像素精度 (1)

视野范围应比检测对象略大,且要符合 4:3 的比例,因此根据系统检测精度的需求,本次选取 2464 × 2056 (像素) 分辨率。

(3) 快门方式。快门方式主要分为滚动快门与全局快门两种,由于需要在列车运动过程中实时检测,因此选用全局快门的方式进行曝光,可使整个感光元件在同一时间全部进行曝光,不受焦平面失真或闪光带的影响。表 2 所示为所选工业相机的参数信息。

表 2 工业相机参数

性能指标	相机参数
感光芯片	Sony IMX264
感光芯片类型	CMOS
快门方式	全局快门
水平/垂直分辨率	2464 × 2056
帧速率	23.7 fps
像素位深	12 bits
接口	C-mount

1.2 工业镜头选型

镜头是工业相机区别于普通相机的重要部件,工业镜头是由透镜组、光圈与焦距调节机构,固定零件、连接机构组成的。

(1) 最小像素数。需要考虑信号机发光面在相机上的成像面积,典型城市轨道交通轨旁信号灯的尺寸如图 2 所示。系统要求在水平方向靶面上成像最低 10 个像素点。

(2) 焦距。选择焦距正确的镜头是采集到清

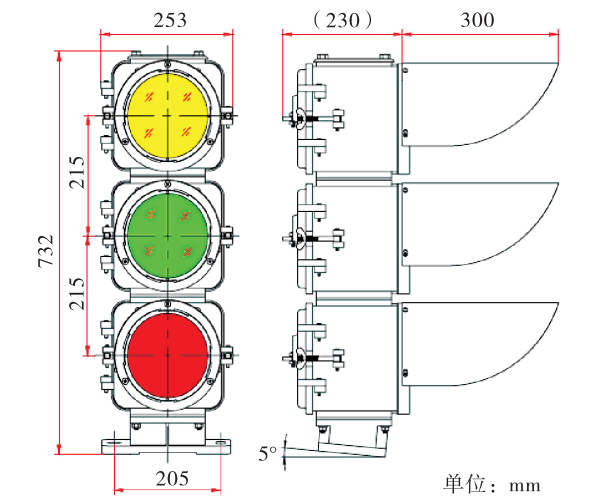


图2 典型城市轨道交通信号灯尺寸示意图

晰图像的前提，选择焦距时必须考虑传感器的尺寸、需要捕捉的视野范围以及镜头与被摄对象之间的工作距离，如式（2）所示。

镜头
焦距

=

传感器芯片尺寸(对应长度)

×

工作距离

÷

视野范围(对应长度)

(2)

考虑5~200 m 的系统应用场景，需要用到两个不同焦距镜头组合使用，综上系统选择如表3所示的一组镜头参数。

表3 工业镜头参数		
性能指标	镜头参数1	镜头参数2
镜头焦距/mm	8	75
镜头接口	C-mount	C-mount
光圈	F1.4 – F16	F1.8 – F16
光圈类型	manual	manual
芯片尺寸	2/3	2/3
红外截止滤光片	no	no

2 检测系统算法设计

检测系统所提出的算法结合 Python 开发语言与 OpenCV 视觉库进行设计开发，软件平台为 Pycharm。硬件工业处理器 [配置：Intel（R）Core（TM）i7- 8700T CPU @ 2.40 GHz，内存 32.00 GB，64 位 WIN10 操作系统]。

2.1 信号灯颜色提取

对信号灯颜色进行提取，首先要选择合适的颜色空间。目前，常用的颜色空间主要有 RGB、Lab、HIS 以及 HSV 四种^[5]。本文选用 HSV 颜色空间进行信号灯颜色的提取，通过式（3）~（5）实现 RGB 颜色空间到 HSV 颜色空间的转换。

$H =$
$$\begin{cases} 0^{\circ}, & \text{if } H_{\max} = H_{\min} \\ 60^{\circ} \times \frac{G - B}{H_{\max} - H_{\min}} + 0^{\circ}, & \text{if } H_{\max} = R \text{ and } G \geq B \\ 60^{\circ} \times \frac{G - B}{H_{\max} - H_{\min}} + 360^{\circ}, & \text{if } H_{\max} = R \text{ and } G < B \\ 60^{\circ} \times \frac{B - R}{H_{\max} - H_{\min}} + 120^{\circ}, & \text{if } H_{\max} = G \\ 60^{\circ} \times \frac{R - G}{H_{\max} - H_{\min}} + 240^{\circ}, & \text{if } H_{\max} = B \end{cases}$$

(3)

$S =$
$$\begin{cases} 0, & \text{if } S_{\max} = 0 \\ \frac{S_{\max} - S_{\min}}{S_{\max}} = 1 - \frac{S_{\min}}{S_{\max}}, & \text{其他} \end{cases}$$

(4)

$V = V_{\max}$

(5)

目前，城市轨道交通信号系统采用的信号灯显示状态，其采用的基本色为红色、绿色、黄色3种，蓝色和白色作为辅助色。不同的颜色表示不同的行车信息，用于指挥列车的运行。因此根据信号灯的颜色类型对各颜色的 HSV 分量范围进行计算，如表4所示。

表4 HSV 颜色空间颜色分量范围						
颜色	$H_{\min}$	$H_{\max}$	$S_{\min}$	$S_{\max}$	$V_{\min}$	$V_{\max}$
红	0	10	95	255	70	255
	170	180				
绿	55	77	65	230	70	255
黄	27	31	55	255	90	255
蓝	100	110	43	255	46	255
白	0	180	0	30	221	255

经过颜色空间转换以后，由于受到背景与光照强度的变化等因素的影响，图像中还存在不同程度的背景噪声。通过图像掩膜技术提高图像对比度，实现提取感兴趣区域，屏蔽背景噪声区域目的，图像掩膜原理见图3。根据表4的 HSV 颜色分量的阈值范围进行设置，将需要的颜色范围改成白色，不需要的颜色范围全部变为黑色，效果见图4。

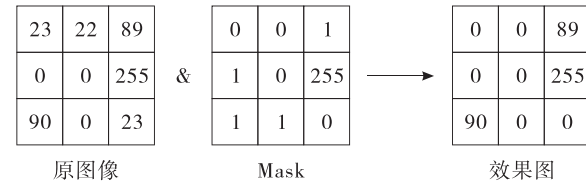




图4 图像掩膜效果图

2.2 信号灯轮廓提取

由于城市轨道交通信号灯所处的环境场景复杂多变,通常信号灯占据检测图像面积的比例较小,轨旁信号灯特征表现并不明显。解决这一问题需要利用边缘检测技术进行图像边缘特征提取。目前,常用边缘检测局部算子法主要有 Sobel 算子、Roberts 算子、Prewitt 算子等,虽然实施起来方便,但应用效果均存在一定的局限性。Sobel 算子检测出的边缘容易出现多像素宽度。Roberts 算子容易丢失一部分边缘,且不具备抑制噪声的能力;虽然对有陡峭边缘且含噪声少的图像效果较好,但定位准确率较差。Prewitt 算子经常不考虑相邻点的距离远近对当前像素点的影响。Canny 算子检测方法是一种机器视觉技术中良好可靠的边缘检测算子方法,不容易受噪声干扰,能够检测到真正的弱边缘。因此,本算法采用 Canny 算子进行信号灯区域的轮廓检测。Canny 算子检测方法主要分为4个步骤^[6]:

Step1: 采用二维零均值高斯函数 $G(x,y)$ 对原图像 $f(x,y)$ 矩阵进行卷积运算,实现图像的消除噪声和平滑处理。

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

σ 为高斯函数的标准差,平滑后的图像表达式 $I(x,y)$ 为:

$$I(x,y) = G(x,y) \times f(x,y) \quad (7)$$

Step2: 计算图像梯度的幅值和方向。

$$S_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}, S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由此可得 x 方向的图像梯度为:

$$g_x = f(x,y) \times S_x(x,y) \quad (9)$$

y 方向的图像梯度为:

$$g_y = f(x,y) \times S_y(x,y) \quad (10)$$

则梯度幅值 $M(x,y)$ 和梯度方向 $H(x,y)$:

$$M(x,y) = \sqrt{g_x^2(x,y) + g_y^2(x,y)} \quad (11)$$

$$H(x,y) = \text{actan}\left(\frac{g_y}{g_x}\right) \quad (12)$$

Step3: 进行图像梯度幅值非极大值的抑制操作。通过 Step2 获取图像梯度的幅值与方向后,进行非极大值的抑制操作,过滤绝大多数的非边缘点。

Step4: 确定双阈值,检测出信号灯的边缘。利用 Canny 算子对采集到的信号灯图像进行边缘检测,需要确定最大与最小阈值参数,最大阈值和最小阈值的比例一般推荐在 2:1 至 3:1 之间不断地优化调整,直至得到最清晰准确的边缘图像。

在成功获取出信号灯图像边缘之后,基于 OpenCV 中的霍夫圆检测函数 cv2.HoughCircles 检测确定信号灯轮廓^[7],最后根据该轮廓范围内颜色像素数量确定输出识别出的信号灯颜色状态。

3 现场与仿真实验

3.1 实验准备

为了验证本文所设计的检测系统可行性,设计可用于模拟城市轨道交通列车搭载检测系统的走行小车。检测实验小车结构是整个检测设备的基础框架,主要分为车架部分、导向部分、走行轮部分。测试时,在保证小车能安全走行的基础上,可以给实验小车的图像采集系统部分加装稳定云台进行测试,如图5所示。

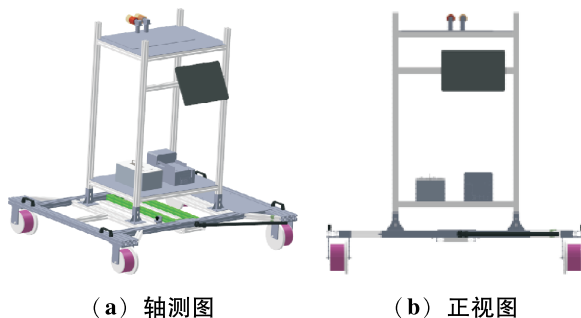


图5 现场实验小车

3.2 仿真模型

评估检测算法的可行性与有效性,不仅需要验证列车在正常气象条件下的检测效果,更需要在恶劣环境情况下依旧可准确识别出轨旁信号灯显示状态。由于特殊环境条件下的轨旁信号灯图像数据不易获取,因此需要模拟特殊天气的信号

灯图像。本文搭建了复杂天气状态下的虚拟检测实验环境^[8]，用于生成多场景图像数据库，进行算法有效性的验证。首先需要搭建的就是现场实验的环境，包括道岔区、信号灯、道床、周边环境等，使用虚拟建模可以仿真还原出钢轨、道岔、高矮柱信号灯等，然后使用渲染功能加材质模拟出周边环境，见图6。

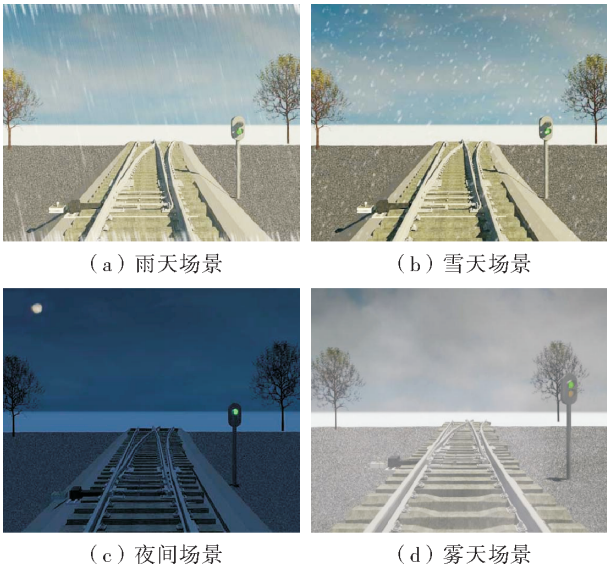


图6 虚拟检测样本库

3.3 结果验证

本文为验证算法的有效性准备了两类图像数据：一是通过搭载检测系统进行现场走行实验，拍摄不同角度、不同类别的现场信号灯图像，从中整理出127张图像数据。二是从虚拟检测库中导出图像数据共114张，利用这些图像数据来充实算法测试数据集。将这些图像数据组合抽样进行系统算法识别试验，最后对结果进行数据校准，实验结果如表5所示。

表5 信号灯状态算法识别实验结果

信号灯颜色	检测图像总数/个	准确检测总数/个	准确率/%
红色	41	37	90.2
绿色	52	48	92.3
黄色	30	27	90
蓝色	22	21	95.4
白色	27	25	92.6
红色+白色	16	14	87.5
绿色+绿色	15	11	73.3
绿色+黄色	28	25	89.2
黄色+黄色	10	9	90
合计	241	217	—

本研究设计的城市轨道交通信号灯显示状态识别算法，可实现存在雨、雪、雾及夜间等不同环境因素干扰情况下的信号灯显示状态有效识别。算法对于单一颜色信号灯显示状态检测准确率最高可达95.4%，对于颜色组合显示状态的信号灯检测准确率稍有下降。为了满足更高检测效率的要求，将进一步优化系统硬件（调整镜头等）和软件（阈值选取等）参数，以提高检测准确性。

4 结论

本文设计搭建了一套轨旁信号灯机器视觉检测识别系统，利用两个不同焦距镜头的有效组合，可准确识别采集5~200 m城市轨道交通信号灯图像，同时在此系统硬件的基础上设计了一种能够有效识别信号灯显示状态的算法，通过现场和多场景虚拟检测实验验证了检测系统可行性与有效性，检测准确率最高可达95.4%，具有较好的工程应用价值，为城市轨道交通信号灯状态智能识别提供了新的思路。

参考文献：

[1] MALAMAS E N, PETRAKIS EG M, ZERVAKIS M, et al. A survey on industrial vision systems, applications and tools[J]. Image and Vision Computing, 2003, 21(2): 171-188.

[2] 徐瑞丰. 基于机器视觉的城轨车辆车号识别算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.

[3] 李宁. 基于机器视觉的钢轨表面缺陷检测系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.

[4] 王慧敏, 毕嘉桢, 沈拓, 等. 机器视觉技术在轨道交通中弯道测距的应用研究[J]. 电子科技, 2023, 36(06): 34-40.

[5] 巨志勇, 翟春宇, 张文馨. 基于SVM与区域生长的彩色商品标签图像分割方法[J]. 电子科技, 2021, 34(10): 69-74.

[6] HORNUNG A, KOBELT L. Hierarchical volumetric multi-view stereo reconstruction of manifold surfaces based on dual graph embedding[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2006: 503-510.

[7] 冯振, 陈亚萌. OpenCV4 详解: 基于Python[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2021: 189-226.

[8] 路宏遥, 石嵘. 虚实结合的道岔检测实验平台设计与应用[J]. 土木建筑工程信息技术, 2023, 15(6): 123-127.