

基于车载图像传感器的汽车跑偏自动测试研究*

周 灿^{1,2}, 王 萌³, 何耀华^{1,2}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院 武汉, 430070) (2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室 武汉, 430070)

(3. 上海通用汽车有限公司武汉分公司 武汉, 430070)

摘要 为了满足企业准确判定下线车辆的跑偏量是否符合相关标准要求,设计了一套基于车载图像传感器的汽车行驶跑偏自动测试系统。利用 Matlab 图像处理平台,对图像进行预处理、车道中心线边缘检测及道路拟合,提取车道线特征点的位置坐标,基于坐标转换和跑偏模型,确定被试车辆在测试区域的行驶跑偏量。实际应用表明,该系统安装调试方便,自动化程度高,测量精度高,实时性强,同时也达到了模块化的要求,方便集成,系统运行平稳,更能满足企业测试要求。

关键词 跑偏测试;车载图像传感器;图像处理;模型搭建;坐标转换
中图分类号 TH72; U467.5

引 言

车辆行驶跑偏是指车辆在干燥平直的路面上直线行驶时,驾驶员不对方向盘做任何干预,车辆发生向左或向右偏转的现象。车辆在直线行驶中发生跑偏不仅会造成零部件及轮胎等的磨损,甚至可能导致车辆失控,威胁到用户的生命财产安全。为避免存在行驶跑偏的问题车辆流入市场,研究开发出高精度高效率及便捷性的汽车行驶跑偏测试系统至关重要。

国内现有的基于龙门架式图像传感器的车辆行驶跑偏系统需要预先在场地搭设龙门架,设备结构相对复杂,安装、调试、标定和维护困难,成本也较高,且每次测试都需要在车上安装反光标识,测试操作相对复杂。基于激光测距的车辆行驶跑偏测试系统测试精确度较前者高,不需要搭设龙门架,但需长期在测试场地布置激光测距传感器、数据采集卡、无线交换机及其他配套设施,在高温或长期阴雨天气下极易受损,设备需要经常维护、重新标定,维护代价较大。基于 GPS 记录汽车行驶轨迹的测试法方案简单,不需要经常维护设备,能弥补上述缺点,但此方法测试结果易收到 GPS 信号延迟、多径效应、卫星时钟与接收机时钟误差的影响^[1],实时性不强,精度太低,不能满足高精度跑偏量测试的需求。

鉴于上述问题及机器视觉和图像处理技术的发展^[2],笔者提出一套基于车载图像传感器的车辆跑偏自动测试系统,应用于对新下线目标行驶车辆跑

偏量的高效率高精度测量。

1 跑偏测试系统总体设计

基于车载图像传感器的汽车行驶跑偏自动测试系统的总体流程图设计如图 1 所示。

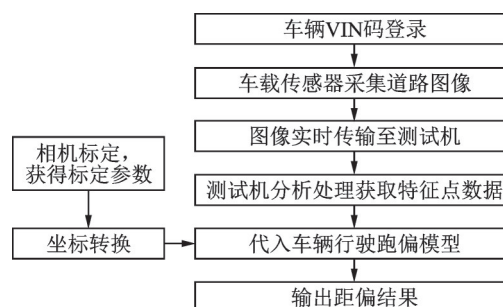


图1 系统总体设计流程图

Fig.1 Overview flow chart

在试验场地测试区域的起始测点和终止测点处分别布置一对对射式光电开关,起始测试点用于确定目标车辆初始驶入测试区域时的驶入坐标及驶入角,终止测试点用于确定目标车辆驶出测试区域时的驶出坐标及驶出角。当车辆经过时,以光电开关外触发方式触发图像传感器采集道路图像。采集到的图像实时传输至测试主机,测试主机对道路图像进行处理并提取出道路中心线与图像边缘交点的像素坐标,经坐标转换处理算法将此像素坐标转换为

* 武汉理工大学校企合作科研基金资助项目(20162h0057)

收稿日期:2019-02-04;修回日期:2019-07-13

特征点空间坐标,其中坐标转换所需参数可通过相机标定获得。最后基于搭建的行驶跑偏系统模型,经数据融合处理即可确定目标车辆在测试区域内的实际行驶跑偏量。

2 跑偏模型搭建及算法设计

获得目标车辆的实际行驶跑偏量的关键点在于分析跑偏过程,结合数据处理算法,将车辆跑偏问题转化为采集到图像的特征点的像素偏移问题。通过模拟目标车辆的实际行驶轨迹,建立车辆行驶跑偏模型。因为道路中心线有一定宽度,为确保像素偏移的计算准确性,这里选取的特征点为道路中心线左右两条线与图像边缘交点的中间坐标。

建立俯视平面下的二维地面坐标系,在测点位置处采集到的图像有各自的坐标系,像素坐标系坐标原点位于图像左上角,其 x, y 轴分别与图像的边缘线重合。简化车辆为质点 M ,选取图像中心点为地面坐标系原点,分别平行于图像边缘做地面坐标系的 X_w, Y_w 轴。车辆驶至测点起始位置时采集到的为1号图像,在该位置时的地面坐标系为 $O_1-X_{w1}Y_{w1}$,测点终止位置时采集到的为2号图像,该位置时的地面坐标系为 $O_2-X_{w2}Y_{w2}$,如图2所示。

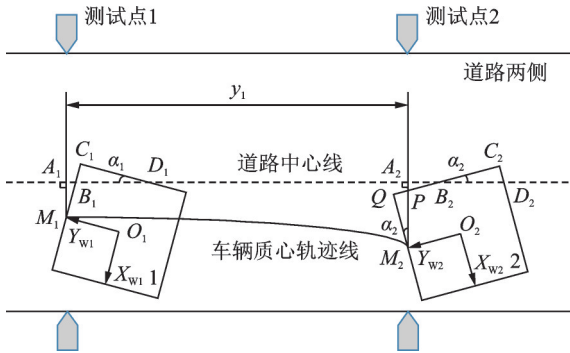


图2 跑偏系统模型搭建

Fig.2 Model building of wandering system

车辆由 $M_1 \rightarrow M_2$ 向前行驶时,图像传感器随之有旋转和平移运动^[3],采集到的图像即从1号图像 \rightarrow 2号图像(图示情况即为极限跑偏)。在车辆驶入测试起点时,驶入方向无法完全与车道中心线方向一致,即总具有一定的起始跑偏量,此跑偏量在整个测试过程中不容忽视,所以,在车辆驶出时,测得的跑偏量应为驶入跑偏量与行驶过程中实际跑偏量叠加而成。

设传感器像素范围为 $m \times n$,采集到的图像所对应的视场范围为 $x_m \times y_n$,则车辆质心点地面坐标为 $M(0, y_n/2)$ 。分析可知,在地面坐标系下,计算跑偏

量可分为以下2种。

1) 如图2中的1号图像(图示均为极限跑偏情况,一般情况下的 $\triangle BCD$ 仍可通过构造获得,算法一致),当满足 $y_{B_1} = y_{C_1} = y_n/2, x_{C_1} = x_{D_1} = -x_m/2$ 条件时

$$\sin \alpha_1 = \frac{|B_1 C_1|}{|B_1 D_1|} = \frac{|x_{B_1} - x_{C_1}|}{\sqrt{(x_{B_1} - x_{D_1})^2 + (y_{B_1} - y_{D_1})^2}} \quad (1)$$

$$\cos \alpha_1 = \frac{|A_1 M_1|}{|B_1 M_1|} = \frac{|C_1 D_1|}{|B_1 D_1|} = \frac{|y_{C_1} - y_{D_1}|}{\sqrt{(x_{B_1} - x_{D_1})^2 + (y_{B_1} - y_{D_1})^2}} \quad (2)$$

车辆在驶入测点位置处的跑偏角为

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{|x_{B_1} - x_{C_1}|}{\sqrt{(x_{B_1} - x_{D_1})^2 + (y_{B_1} - y_{D_1})^2}} \quad (3)$$

在驶入测点位置处的跑偏量为

$$|A_1 M_1| = |B_1 M_1| \cos \alpha_1 = |x_{B_1}| \frac{|y_{C_1} - y_{D_1}|}{\sqrt{(x_{B_1} - x_{D_1})^2 + (y_{B_1} - y_{D_1})^2}} \quad (4)$$

2) 如图2中的2号图像,当满足 $x_{B_2} = x_{C_2} = -x_m/2, y_{C_2} = y_{D_2} = -y_n/2$ 条件时

$$\sin \alpha_2 = \frac{|C_2 D_2|}{|B_2 D_2|} = \frac{|x_{D_2} - x_{C_2}|}{\sqrt{(x_{B_2} - x_{D_2})^2 + (y_{B_2} - y_{D_2})^2}} \quad (5)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{|B_2 C_2|}{|B_2 D_2|} = \frac{|y_{B_2} - y_{C_2}|}{\sqrt{(x_{B_2} - x_{D_2})^2 + (y_{B_2} - y_{D_2})^2}} \quad (6)$$

车辆在驶出测点位置处的跑偏角为

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{|x_{D_2} - x_{C_2}|}{\sqrt{(x_{B_2} - x_{D_2})^2 + (y_{B_2} - y_{D_2})^2}} \quad (7)$$

在驶出测点位置处的跑偏量为

$$|A_2 M_2| = |M_2 P| + |B_2 P| \sin \alpha_2 = \frac{x_m/2}{\cos \alpha_2} + (y_n/2 - y_{B_2} - x_m/2 \cdot \tan \alpha_2) \sin \alpha_2 \quad (8)$$

当 $x_B < 0$ 时, $AM < 0$,车辆质点位于车道中心线右侧;当 $x_B > 0$ 时, $AM > 0$,车辆质点位于车道中心线左侧。

综上,车辆实际的行驶跑偏量 x_0 为

$$x_0 = A_2 M_2 - A_1 M_1 \quad (9)$$

其中: B_1, C_1, D_1 分别为1号图像中道路中心线拟合后得到的特征点,其坐标分别为 $B_1(x_{B_1}, y_{B_1}), C_1(x_{C_1}, y_{C_1}), D_1(x_{D_1}, y_{D_1})$; B_2, C_2, D_2 分别为2号图像中道路中心线拟合后得到的特征点,其坐标分别为

$B_2(x_{B_2}, y_{B_2}), C_2(x_{C_2}, y_{C_2}), D_2(x_{D_2}, y_{D_2})$; A_1, A_2 分别为车辆质心到道路中心线所做垂线的垂足; P 点为跑偏线 A_2M_2 与图像边框 QC_2 交点。

3 图像处理程序设计

3.1 预处理

在车辆向前行驶的过程中,图像传感器一方面会受到周围光线、环境影响,同时也会随着车辆抖动,容易产生噪声和失真,造成图像模糊,对道路中心线的检测提取产生很大的干扰。所以对图像信息进行正式提取前,有必要采取一定的预处理措施以降低影响^[4]。

预处理是要根据项目需要对图像进行针对性的去除、削弱或增强,最大程度地减少图像的冗余信息,使图像特征更加简练^[5]。预处理应尽可能地减少步骤,避免因较大的运算量而降低了处理速度,同时也可避免目标特征量受到过多处理而损失。

高斯滤波能较好地降低环境噪声影响,削减冗余信息,提高道路线提取的成功率。其基本原理是以高斯函数结果为模板,对图像进行滑窗卷积,在不改变特征分布的前提下,平滑地处理原始图像^[6]。高斯函数表达式为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

其中: x, y 为图像点坐标; σ 为标准差。

常用的 3×3 卷积模板如下

$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

同时,在阴雨天气时,地面的反光或光线不足等易导致道路线与沥青路面间对比不清晰,针对这一问题主要采取的措施是增强处理,以提高图像对比度。原始图像与预处理后图像对比效果见图3。



(a) 原始图像 (b) 预处理图像
(a) The original image (b) Preprocessed images

图3 预处理效果对比

Fig.3 Image contrast

3.2 边缘检测

道路线边缘检测是获得跑偏量的关键一步,也是图像处理与机器视觉中的关键性问题。边缘特征是亮度变化明显,表现为边缘灰度值发生突变^[7],所以,检测出突变就有可能检测到边缘,关键是选择合适的边缘检测算法。

Canny算子是一种多级检测算子,有3项严格的判定标准,保证了算子较强的鲁棒性,通过调节参数实现特定条件下的边缘特性^[8]: ①最优检测准则,即较高的信噪比; ②最优定位准则,即位于真实边缘中心; ③单边响应准则,要求每检测出的边缘点应仅有一个响应,最大限度地抑制虚假边缘。

主要通过以下步骤进行: ①高斯模糊,平滑图像,降低伪边缘的识别,模糊半径的选择尤为重要; ②计算各像素点的梯度幅值和方向; ③应用非极大值抑制,消除上述过程的杂散效应,保留局部最大梯度,细化边缘; ④应用Double-Threshold高低阈值区分强弱边缘,并抑制过低阈值的边缘; ⑤抑制孤立的弱边缘完成检测。

图4为Canny算子用于边缘检测效果图,可以看出该算子对道路线的检测较为完整,对周围环境及噪声的过滤效果较为明显。



图4 道路图像边缘检测

Fig.4 Edge detection of road image

3.3 基于Hough变换的道路线拟合

在汽车行驶跑偏测试系统中,要测量试车员在不对车辆方向盘有所干预的情况下,汽车在平直的路面上驶过特定的距离后向左或向右的偏移量^[9],所以基于车载图像传感器的跑偏检测系统所设计的道路中心线也应为一条平直的直线。通过图像处理得到道路线相对于车辆质心的偏移量,进而得到汽车的跑偏量。因此,从采集的图像中准确高效地拟合出直线模型至关重要,在提高准确度的同时提升试验实时性。

Hough变换是一种典型的道路线识别方法,在有物体遮挡直线导致间隙时,能利用其他直线段参数填充数据,抗干扰能力较强。其原理是Hough变换利用不同类别坐标系之间的相互变换关系,将某一坐标系下的直线或曲线模型通过变换映射到另一坐标系的点上,即每一个点代表一条直线或曲线模型^[10]。统计所有点的个数,同一个点个数越多,代表该直线越长。就道路中心线而言,设道路中心线直线模型为

$$y = kx + b \quad (11)$$

将 x - y 坐标系转换成 ρ - θ 极坐标系

$$\rho = x \cos\theta + y \sin\theta \quad (12)$$

其中: x, y 为像素点坐标; k 为直线斜率; b 为截距; ρ 为原点到直线间距离; θ 为原点到直线所做垂线与 x 轴间夹角。

转化过程如图5所示,道路中心线上的所有点都可在 ρ - θ 极坐标系上过一点的三角函数表示^[11]。

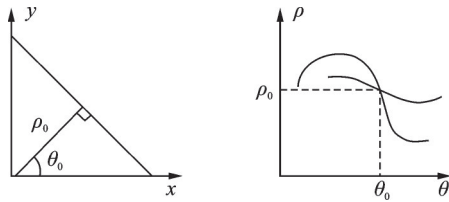


图5 坐标转换

Fig.5 Coordinate transformation

拟合过程不免受到周围环境其他直线干扰,通过建立合适的约束就能达到理想的拟合效果,如图6所示。其中,图6中Hough变换的横坐标为 ρ ,单位为像素;纵坐标为 θ ,单位为度数。

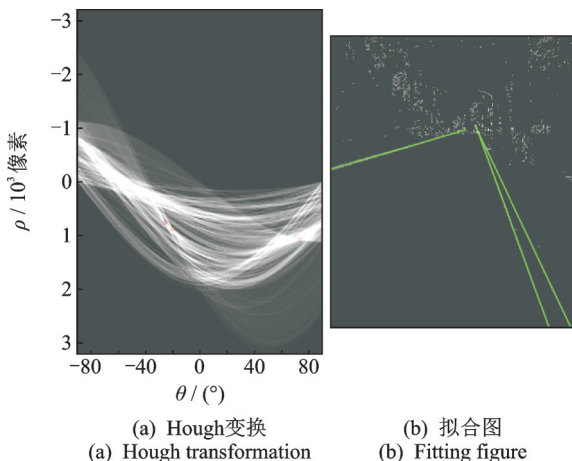


图6 道路线拟合

Fig.6 Road route fitting

4 测试及结果分析

4.1 坐标转换

在带入模型进行计算时还有关键一步,即将上

述图像处理获得的特征点像素坐标转换为地面坐标系坐标,这样才能最终得到车辆在地面坐标系中的实际跑偏量。在摄像机模型中,普遍存在4种坐标系^[12],从最初图像处理得到像素坐标的像素坐标系 $o-uv$,到位于同一平面的图像坐标系 $o-xy$,再到代表相机位置的相机坐标系 $S-X_c Y_c Z_c$,最后到现场为描述物体空间形状或状态而定义的地面坐标系 $O-X_w Y_w Z_w$ 。4大坐标系对应关系如图7所示。

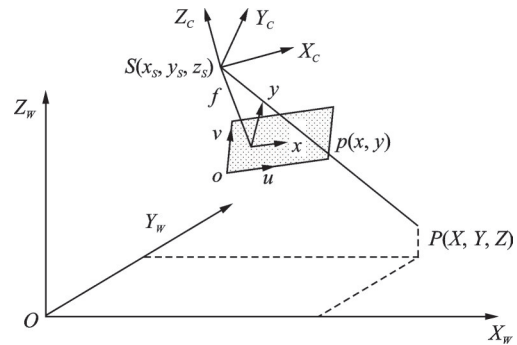


图7 4大坐标系对应位置关系

Fig.7 Relations among four coordinate systems

像素坐标系中的点 $p(x, y)$ 至地面坐标系中点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 的转换公式为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中: f_x, f_y 分别为相机的 x, y 轴焦距; u_0, v_0 分别为相机主点的横纵坐标,单位均为像素,其所在矩阵表示相机的内部参数; R, T 分别为地面坐标系的 3×3 的旋转矩阵和 3×1 的平移矩阵,其所在矩阵表示相机的外部参数^[13];相机本身的径、切向畸变由 k_1, k_2, k_3, k_4 表示。

上述参数可通过 Matlab 的标定工具箱获得,标定工具箱 camera calibration toolbox 可实现标定操作,通过工具箱的 add images from file 添加不同角度道路图像,点击 Calibrate 开始对图像进行标定,整个过程由 Matlab 自动识别并显示角点,最后输出标定结果,如表1所示。

4.2 试验验证

本试验以新下线车辆为目标,车载图像传感器选用互补式金属氧化物半导体图像传感器组件。传感器的布置应注意测点起始位置所采集的图像中道路中心线应尽可能位于图像中间,为保证精度,图像传感器应垂直地面进行拍摄,同时图像传感器距地面为1 m,在此位置采集的图像具有适中的视场范围,且图像清晰,为后续软件进行图像处理提供了便

表 1 标定结果

Tab.1 Calibration results

参 数	标定结果
焦距 f_x	2 414.2
焦距 f_y	2 414.7
主点横坐标 u_0 /像素	1 211.3
主点纵坐标 v_0 /像素	1 134.9
径向畸变 k_1	-0.035 8
径向畸变 k_2	0.078 2
切向畸变 k_3	0
切向畸变 k_4	0

利,提升处理实时性。

在试验区域选取几个测点进行试验,传感器每采集到一张图像都会输出特征点的位置坐标,也即是道路中心线与图像边框边缘处的交点坐标,如图 8 所示。

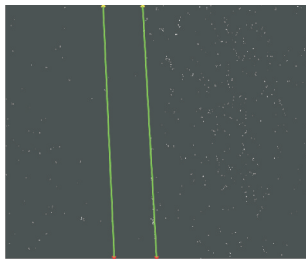


图 8 试验采集图像拟合

Fig.8 Collected images fitting

图像处理后获得的测点 B, D 的像素坐标和地面坐标如表 2 所示。

4.3 误差对比与分析

将上述坐标传输至车辆行驶跑偏模型进行处理,可测得跑偏量,即理论偏移量。为寻找参照验证试验精度,在测点位置分别用马克笔做相应标记,并用卷尺测量特征点的实际位置,计算该测点位置处车辆的跑偏量,即实际偏移量。同时在测试点分别成对布置激光测距传感器,利用传感器数据获得偏移量,激光测距原理如图 9 所示。

为避免激光测距传感器的安装位置不规范,对测点进行静态标定,测量出测点距道路中心线的实际距离,即 L_1, L_2 。当被测车辆经过测点时,触发激光传感器自动测量测点到车身位置的距离,得 S_1, S_2 。以被测车辆中心线为基准,计算偏移量

$$L_A = (L_1 + L_2 - S_1 - S_2) / 2 + S_2 - L_2 \quad (14)$$

在相同测点位置处的理论偏移量(见图 9 模型中的跑偏量)、实际偏移量及激光测距偏移量测量结果(见图 9 激光测距原理中的 L_A)如图 10 所示,相对误差如表 3 所示(仅列举部分数据,单位均为 mm)。

表 2 测试点 B, D 坐标

Tab.2 Coordinates of test points B, D

试验次数	像素坐标/像素	地面坐标/mm
1	(1 104, 1 948)	(54.304, 372.544)
	(159, 8)	(-478.609, -409.276)
2	(0, 1 621)	(-550.000, 240.763)
	(357, 4)	(-389.707, -410.888)
3	(815, 1 892)	(-184.065, 349.976)
	(654, 13)	(-256.354, -407.261)
4	(2 257, 1 635)	(463.393, 246.405)
	(1 825, 0)	(269.425, -412.500)
5	(1 155, 2 035)	(-31.405, 407.605)
	(678, 15)	(-245.578, -406.455)
6	(1 202, 1 985)	(-10.302, 387.455)
	(977, 5)	(-111.327, -410.485)
7	(1 820, 2 048)	(267.180, 412.844)
	(1 343, 17)	(53.007, -405.649)
8	(1 072, 1 936)	(-68.672, 367.708)
	(849, 6)	(-168.799, -410.082)

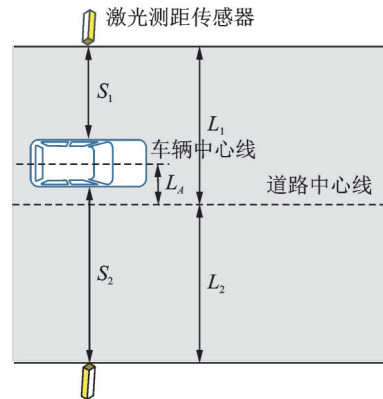


图 9 激光测距原理

Fig.9 Principle of laser ranging

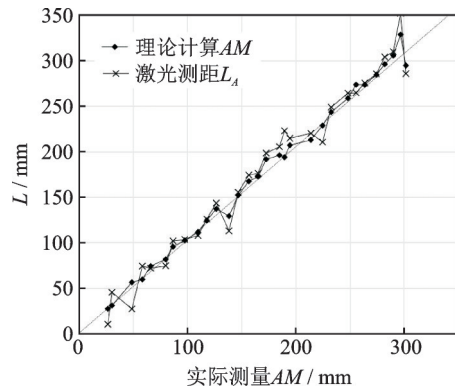


图 10 测量结果

Fig.10 Measuring result

表3 相对误差
Tab.3 Relative error

实验次数	理论计算/mm	实际测量/mm	相对误差/%
1	59.517	60.3	1.34
2	172.314	170.2	1.24
3	193.675	195.3	0.85
4	124.324	121.5	2.32
5	30.816	31.5	2.10
6	27.326	27.6	0.87
7	258.478	255.5	1.16
8	81.590	82.5	1.07

5 结 论

1) 检测精度高,高帧频相机的像元尺寸为微米级别,该精度可以满足企业检测要求。由以上数据对比,运用系统理论计算所得跑偏量与实际场景测得跑偏量存在一定误差。但与实际跑偏量相比,相对误差均控制在5.0%左右,符合目标车辆的测试要求。

2) 自动化程度高,实时性强,待测车辆经过测试区域时直接外部触发相机工作,实时将图像传输至测试主机,并自动完成图像的识别处理。基于Matlab图像处理平台,无需搭建龙门架,结构简单,安装调试方便,对采集到的图像数据具有快速的分析处理能力,满足系统实时性的需求,同时也达到了模块化的要求,方便集成。

3) 检测效率高,在初始触发时即可确定车辆驶入角,无需其他触发点,测试现场布局简单方便。较同项目的激光测距测试系统精度(8%~10%)更高,巧妙地将车辆跑偏问题转化为像素点的偏移问题,通过数学模型的搭建使得系统布局更方便,稳定性好,更能满足企业测试要求。

参 考 文 献

- [1] 宋朋举.基于激光测距的汽车行驶跑偏自动测试系统研究[D].武汉:武汉理工大学,2017.
- [2] Md.HAZRAT A, AIZAT K, YERKHAN K, et al. Vision-based robot manipulator for industrial applications[J].Procedia Computer Science, 2018(7): 205-212.
- [3] 钱枫元.非接触汽车运行轨迹测试系统开发研究[D].武汉:武汉理工大学,2016.
- [4] JIA P P. Application of image processing technology based on matlab[C]//2018 International Conference on Data Processing, Artificial Intelligence, and Communications. Shenzhen, China: [s. n.], 2018: 13-16.
- [5] CHEN H X, DING X Y. Research on license plate recognition based on template matching method [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 6: 1106-1109.
- [6] WANG S Y, WANG W L, DUAN S K, et al. Bayesian random Fourier filters for Gaussian noises[J]. Science China(Information Sciences), 2018, 61(12): 214-216.
- [7] 马真.基于边缘检测的高速铁路设备识别方法研究[D].南京:南京邮电大学,2018.
- [8] CHAI Y, WEI S J, LI X C. The multi-scale Hough transform lane detection method based on the algorithm of Otsu and Canny[J]. Advanced Materials Research, 2014, 42: 126-130.
- [9] 刘渊博,何耀华.基于虚拟仪器技术的激光测距系统的设计与实现[J].自动化与仪表,2017,32(10): 16-21.
LIU Yuanbo, HE Yaohua. Design and implement of laser ranging system based on virtual instrument technology[J].Automation and Instrumentation, 2017,32(10): 16-21. (in Chinese)
- [10] 孙雪琪,宋小春.一种新的改进的Hough变换直线提取算法[J].计算机与数字工程,2015,43(8): 1501-1503.
SUN Xueqi, SONG Xiaochun. A new and improved Hough transform algorithm for line extraction[J]. Computer and Digital Engineering, 2015, 43(8): 1501-1503. (in Chinese)
- [11] AMOL B, MONSON H, MARK T S. Polar randomized hough transform for lane detection using loose constraints of parallel lines[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Florence, Italy: [s.n.], 2011.
- [12] 刘山洪,邓彩群.坐标转换与坐标变换研究[J].吉林建筑大学学报,2016,33(1): 43-47.
LIU Shanhong, DENG Caiqun. Research on coordinate transformation and coordinate transformation [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2016, 33(1): 43-47. (in Chinese)
- [13] GAO Y, LIN J R, YANG L H. Development and calibration of an accurate 6-degree-of-freedom measurement system with total station[J]. Measurement Science and Technology, 2016(10): 953-957.



第一作者简介:周灿,女,1995年6月生,硕士生。主要研究方向为汽车试验系统和测试方法。

E-mail: acan.zhou@foxmail.com