

基于机器视觉的汽车前照灯照射角度调整算法

杜小芳^{1,2}, 程思宇^{1,2}, 戴福祥³, 徐琳^{1,2}, 石可民^{1,2}

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

3. 武汉理工大学研究生院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 建立了一种基于机器视觉的前照灯照射角度调整算法。利用图像传感器对道路图像进行采集, 随后处理图像信息以提取所需道路的参数信息, 并结合不同场景下前照灯照射角度调整计算模型, 在汽车行驶道路状况即将发生改变时及时调整前照灯照射角度, 实时地为汽车夜间行驶提供合适的照明。在实际道路环境中进行了测试, 结果表明所建立的算法能够有效地解决前照灯偏转迟滞性问题。

关键词: 前照灯; 照射角度; 机器视觉; 图像处理; 车道线

中图分类号: U463. 65⁺¹

文献标志码: A

Algorithm for Illumination Angle Adjustment of Automobile Headlights Based on Machine Vision

DU Xiaofang^{1,2}, CHENG Siyu^{1,2}, DAI Fuxiang³, XU Lin^{1,2}, SHI Kemin^{1,2}

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China; 3. Graduate School, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: An algorithm based on machine vision for adjusting the illumination angle of headlights was established. The image sensor was used to collect road images, and then the image information was processed to extract the parameter information of the required road. Combined with the calculation model for adjusting the illumination angle of headlights in different scenarios, the illumination angle of headlights was adjusted in time to provide suitable lighting in real time for the vehicle driving at night when the road condition was about to change. The algorithm was tested in the actual road environment, and the results show that the algorithm can effectively solve the problem of the hysteresis of headlight deflection.

Key words: headlight; illumination angle; machine vision; image processing; lane line

前照灯作为汽车的“眼睛”, 在保障夜间道路照明方面发挥着重要作用, 自适应前照灯系统(AFS)作为前照灯发展过程中的一个重要成果, 能够根据车辆行驶状态与道路照明要求, 切换不同的照明模式, 以适应不同场景下的照明^[1]。当前各大汽车厂都已推出了各自的AFS产品^[2-4]。通过获取车辆的行驶速度与方向盘转角等信息, 计算并调整前照灯的照射角度, 使车辆在弯道行驶时能获得良好的照明效果。该处理方式在一定程度上解决了车辆在夜间弯道行驶时存在照明盲区的问题, 但此类AFS产品需要驾驶员在转动方向盘之后, 才能触发前照灯照射角度的偏转, 而往往此时车辆已经驶入弯道, 前照灯的照明存在一定的迟滞性^[5]。此外, 由于需要人为操作才能触发前照灯照射角度的偏转, 上述调节方式容易受到驾驶员个人因素的影响, 如注意力集中程度、反应时间以及视觉暂留现象等^[6]。

预测式前照灯系统(P-AFS)能够提前获取车辆未来行驶轨迹参数, 在车辆即将进入弯道时就能调整前照灯照射角度^[7], 可以解决上述AFS存在迟滞性的问题。车辆的转弯半径与斜坡坡度都是常见的道路参数, 通常电子地图包含车辆行驶道路参数, 与GPS相结合能够确定车辆未来的行驶轨迹, 理论上可应用于P-AFS。然而, 这种方法需要依赖通信信号、运营商流量以及地图数据的更新, 在一些通信信号较差的地方并不能持续提供稳定准确的服务^[8-10]。

建立了一种基于机器视觉的汽车前照灯照射角度调整算法。利用图像传感器代替人眼获取道路图像, 通过图像识别技术获取道路参数(如弯道半径),

收稿日期: 2022-07-14

第一作者: 杜小芳(1973—), 女, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为车辆工程。E-mail: duxfang@163.com

通信作者: 戴福祥(1972—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为车辆工程、技术经济。

E-mail: 26679038@qq.com



论文
拓展
介绍

并将道路参数传递给控制单元。通过建立不同状态下前照灯照射角度数学模型,使车辆在道路参数变化时能及时地实现前照灯照射角度的调节,优化照明范围。

1 前照灯安全照明距离

在夜间行车过程中,保证道路安全照明的前提是要确定前照灯的照明距离,这样当道路前方出现障碍物或者遇到紧急情况时,驾驶员能够有足够的反应距离来采取制动操作。将制动过程中制动力上升阶段简化为均匀上升,可得到制动力随时间的变化,如图1所示。将制动过程阶段1中车辆行驶的路程称为反应距离,阶段2和阶段3车辆行驶的路程称为刹车距离。要保证车辆在遇到障碍物或者危险时能够安全减速停车,前照灯照明距离就必须不小于反应距离和刹车距离的总和。其中,反应距离主要由当前车速和驾驶员的反应时间共同决定。停车视距是指在行车中,当发现前方出现障碍物或危险时采取制动措施,使车辆从开始制动到停下来所行驶的最短距离。停车视距由如图2所示的三部分组成,根据《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)^[11]可知,停车视距的计算式为

$$S_{\text{停}} = \frac{v}{3.6}t + \frac{(v/3.6)^2}{2gf_1} \quad (1)$$

式中: f_1 为纵向摩擦系数,由车速及路面状况决定; t 为驾驶员的反应时间,根据规范取2.5 s; v 为汽车行驶速度; g 为重力加速度。

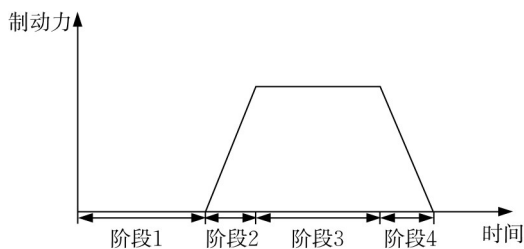


图1 汽车制动过程简化模型

Fig.1 Simplified model of automotive braking process

由式(1)可知,规范^[11]中计算停车视距的模型由两部分组成,即图1中的阶段1和阶段3,忽略了阶段2。因此,为了进一步精确化模型,把阶段2即制动力均匀上升阶段考虑在内。修正后停车视距的计算式为

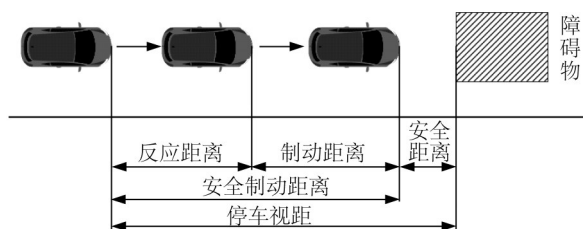


图2 停车视距示意图

Fig.2 Diagram of stopping sight distance

$$S'_{\text{停}} = \frac{v}{3.6} \left(t + \frac{t'}{2} \right) + \frac{v^2}{25.92a_{\text{max}}} \quad (2)$$

式中: t' 为制动力均匀上升阶段时间,一般取0.2 s; a_{max} 为最大制动减速度,根据文献[10]取 $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

为了保证夜间照明的安全距离,相同设计速度下,将式(1)、(2)中的较大计算值作为前照灯在照明过程中应达到的安全照明距离,对应结果如表1所示。

表1 车速与安全照明距离对应关系

Tab.1 Relationship between vehicle speed and safe lighting distance

车速/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	安全照明距离/m
20	20
30	35
40	45
60	75
80	110
100	160
120	210

由表1看出,车速与安全照明距离存在着正相关关系,在Matlab中采用一般多项式拟合函数对上述数据进行拟合。采用二次函数拟合得到的曲线效果最好,将其作为前照灯安全照明距离与车速的对应关系,因此汽车前照灯安全照明距离计算式为

$$S = 0.0093v^2 + 0.5776v + 6.6725 \quad (3)$$

2 前照灯弯道照明数学模型

由阿克曼几何转向原理可知,当方向盘转角保持为一个恒定值时,车辆的行驶轨迹为转弯半径所对应的圆。当前照灯弯道照明时,系统控制步进电机对前照灯的照射角度进行调整,车灯对应弯道方向调整照射角度 θ ,如图3所示。汽车在夜间行驶过程中,前照灯光束的初始照射方向为 \overrightarrow{AB} ,当驶入弯道时,AFS起作用,使前照灯照射方向调整为 \overrightarrow{AC} , \overrightarrow{AC} 与车辆未来一段时间内行驶的轨迹相割,将上述相割形成的圆弧 \widehat{AC} 作为前照灯须达到的安全照明

距离。

如图3所示, S 为车辆行驶轨迹与前照灯光束相交点距离车辆前端的长度, S' 为前照灯在弯道照明中所需要的安全照射距离, R 为车轮的转弯半径, θ 为前照灯的照射调整角度,可得

$$\begin{aligned} S &= 2R \sin \theta \\ S' &= R\theta \frac{\pi}{90} \\ \theta &= \frac{90S'}{\pi R} = \frac{90(0.0093v^2 + 0.5776v + 6.6725)}{\pi R} \end{aligned}$$

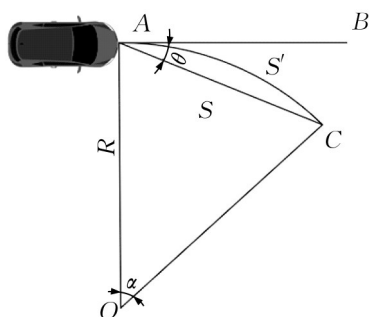


图3 前照灯水平照射角度调整示意图

Fig.3 Diagram for adjusting horizontal illumination angle of the headlamp

实际行驶过程中,为了防止弯道外侧照明强度降低,前照灯照射角度调整不应过大,因此在弯道照明过程中对前照灯照射角度的调整存在极限值,这样既能够保证弯道内侧的照明效果,减少视野盲区,又可以保证弯道外侧的照明不至于太差,弯道前照灯照射角度的限制条件分别为弯道外侧最低宽度要求、道路法规要求以及极限半径要求。

2.1 弯道外侧最低宽度要求

前照灯除了需要保证所行驶车道的照明外,还需要保证相邻车道的照明强度。以H7卤素车灯为例,5 lx等照度曲线在大约0~40 m范围内呈轴对称分布,单侧宽度为7.5 m^[8]。弯道外侧的照明宽度除了需覆盖本车道一侧的宽度外,还应当覆盖相邻车道的宽度,即1.5倍的车道宽度。根据《公路工程技术标准》规定,城市公路设计车速为60 km·h⁻¹时,车道宽度至少为3.5 m^[12],因此弯道外侧的照明距离至少为5.25 m。根据如图4所示的几何关系可得出弯道照明前照灯照射的调整角度 θ ,计算式如下所示:

$$\cos \theta = \frac{R-h}{R}$$

式中: h 为前照灯光轴与未来行驶轨迹之间的最大距离, $h=7.5-5.25=2.25$ 。

前照灯在弯道外侧照明要求下的极限照射角度

计算式如下所示:

$$\theta_{\max} = \frac{180}{\pi} \cos^{-1} \frac{R-2.25}{R}$$

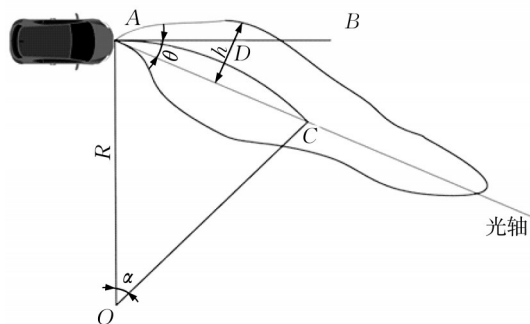


图4 前照灯极限照射角度示意图

Fig.4 Diagram for the limit illumination angle of the headlamp

2.2 道路法规要求

前照灯角度调整必须同时满足相关法律法规的要求。ECE R48规定,在前照灯安装高度为 H 的条件下,式(3)中 S 的最大值应不大于 $100H$,此处 H 暂取0.7 m,即:

$$\theta_{\max} = \frac{180}{\pi} \sin^{-1} \frac{100H}{2R}$$

同时ECE R48规定,AFS开始工作的最大转弯半径为500 m,由我国《公路路线设计规范》(JTGD20-2017)^[11]可知,道路的圆曲线半径为500 m时,对应的道路设计速度为100 km·h⁻¹,即AFS仅在转弯半径小于500 m的范围内工作,因此只考虑车速100 km·h⁻¹以下的情况。

2.3 极限半径要求

国家《公路工程技术标准》(JTGB01-2014)规定^[12],当道路的规定设计速度为20 km·h⁻¹时,道路转弯处的圆曲线最小设计半径应为30 m。当车辆的转弯半径越小时,相应的设计车速也越低,当车辆的转弯半径 ≤ 30 m时,车辆的行驶速度已经非常低,此时再增大前照灯在弯道内侧的照射范围对于实际情况来说,意义不是很大。因此,当车辆弯道行驶过程中转弯半径小于30 m时,汽车前照灯的照射角度不再调整,保持当前的参数不改变。

综上,汽车前照灯在水平方向上照射角度调整的表达式如下所示:

$$\theta_{\max} = \begin{cases} 22.33^\circ, & R \leq 30 \text{ m} \\ \frac{180}{\pi} \arccos \frac{R-2.25}{R}, & 30 \text{ m} < R \leq 273 \text{ m} \\ \frac{180}{\pi} \arcsin \frac{100H}{2R}, & 273 \text{ m} < R \leq 500 \text{ m} \end{cases}$$

在Matlab中对汽车前照灯在弯道照明过程中水平照射角度进行数值仿真,可得前照灯照射角度的极限调整值,如图5所示。当转弯半径小于30 m时,前照灯照射角度的极限值受最小极限半径的影响,保持 22.33° 不变;当转弯半径大于30 m小于等于273 m时,前照灯照射角度的极限值受弯道外侧最小照明宽度要求的影响,最大值不能超过 $(180/\pi)\arccos((R-2.25)/R)$;当转弯半径大于273 m小于等于500 m时,前照灯照射角度的极限值受ECE R48条款的影响,最大值不能超过 $(180/\pi)\arcsin(100H/2R)$ 。

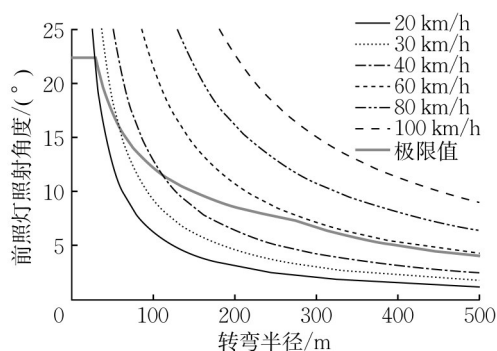


图5 限定要求下前照灯照射角度与车速、转弯半径对应关系
Fig.5 Relationship between headlamp illumination angle and speed and between headlamp illumination angle and turning radius under limited requirements

2.4 基于机器视觉的弯道照明算法

基于机器视觉的车辆转弯半径计算方法使用电荷耦合元件(CCD)图像传感器代替人眼获取车辆未来行驶轨迹的道路图像,然后通过图像处理算法获

取前方路段的弯道半径 R 。假设车辆靠车道中心行驶,通过车道宽度 D 、弯道半径 R 便可计算出车辆通过弯道时所需的转弯半径,即 $R+0.5D$ 。将数据信息通过控制器局域网(CAN)总线传递至电子控制单元(ECU)进行算法分析,由建立的前照灯水平照射角度调整数学模型得到此时前照灯应该调整的照射角度,从而引导步进电机驱动前照灯进行调整。

传统的可行驶区域分割与车道线检测一般通过边缘检测滤波等方式分割出车道线区域,然后结合霍夫变换、随机采样一致性(RANSAC)等算法进行车道线检测。这类算法速度快,但应用场景有限。在现实情况中,尤其是夜间,车道线状态具有不确定性,如被遮挡、磨损、道路变化时本身的不连续性、天气影响(雨、雪)等,当车道线状态出现明显变化时,车道线检测效果将严重下降。

采用基于深度学习的YOLOP算法作为可行驶区域分割与车道线检测方法,该算法具有较高的精度和较强的鲁棒性,采用高低层次特征融合来同时获取全局的空间结构关系和细节处的定位精度,对不同的车道线情况有较强的泛化能力^[13]。YOLOP的共享编码器由一个骨干网络和一个颈部网络组成。骨干网络选择CSPDarknet^[14],用于提取输入图像的特征;颈部网络由空间金字塔池化(SPP)模块^[15]和特征金字塔网络(FPN)模块^[16]组成,用于融合骨干网络中多尺度特征。

在武汉市多个道路上采集图像,并用YOLOP进行测试,在夜间照明条件不理想的情况下,可行驶区域分割和车道线检测均有较好的效果。如图6所示,白色曲线内标记为1的区域是车辆可行驶区域,白色曲线是车道线。



图6 可行驶区域分割与车道线识别实际检测效果

Fig.6 Test effect of driveable area segmentation and lane recognition

在城市等复杂交通环境中,由图像获取的车道线识别结果会返回包含当前行驶道路、非行驶道路

以及错误识别在内的多条车道线,所以需要进一步判断车辆当前行驶道路的边界线。由于可行驶区域

分割结果包含丰富的道路识别信息,并且在YOLOP的可行使区域分割和车道线识别任务中两者独立,因此可以采用可行使区域的识别信息来判断行驶边界线。本研究采取的判断策略是包含最大可行使区域面积的车道线为行驶边界线,如图7所示,白色曲线显示的即为当前道路的行驶边界线。

此时获取的行驶边界线在像素空间中,需要将其转换到真实世界坐标系下。将行驶边界线的像素转换成真实世界坐标后,采用最小二乘法对边界线进行拟合。

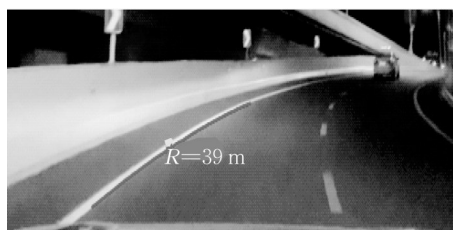
在武汉市内的多个路段对实际道路图像进行采集,包含立交、高架等场景,采集的4个地点如图8所示。地点一为武汉市洪山区尤李村立交桥往二环线



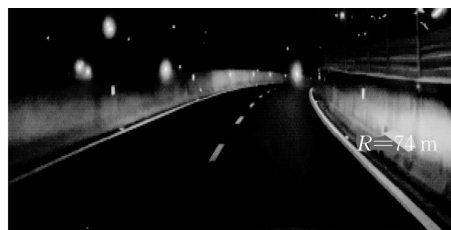
图7 行驶边界线判断示例

Fig.7 Driving boundary judgment

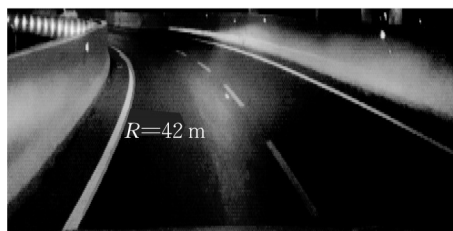
方向路段,地点二为洪山区白沙洲大道高架桥往杨泗港快速通道方向路段,地点三为汉阳区国博立交桥路段,地点四为汉阳区米粮山立交往三环线方向路段。



a 地点一



b 地点二



c 地点三



d 地点四

图8 图像处理结果

Fig.8 Image processing results

将提出的基于机器视觉的车辆转弯半径计算算法应用于这些实际道路,得到地点一弯道的理论等效半径为39 m,地点二前方弯道的理论等效半径为74 m,地点三前方弯道的理论等效半径为42 m,地点四弯道的理论等效半径为44 m。

将通过算法计算得出的弯道理论等效半径与弯道实际等效半径对比,验证算法的准确性,结果如表2所示。

3 前照灯坡道照明数学模型

3.1 前照灯坡道照明原则

车辆在夜间行驶过程中,如果前方出现上坡路段,驾驶员的视野就会由于坡道的存在而受到阻碍,获取道路信息受限,从而在遇到紧急状况时不能及

表2 基于机器视觉的弯道半径理论计算值与真实值对比

Tab.2 Comparison of curve radius between theoretical calculation values based on machine vision and real values

路段	理论计算半径/m	实际路段半径/m	相对误差/%
地点一	39	40.1	2.7
地点二	74	75.6	2.1
地点三	42	42.5	1.2
地点四	44	44.8	1.8

时做出应急响应。因此,需要重新确定前照灯在垂直方向上的照射角度,从而给驾驶员提供足够的视野范围。需要指出的是,对于上坡时前照灯照射角度的研究不是针对车辆正在上坡的情况。当车辆已经行驶到了坡道上,此时再依据车载传感器传递的参数确定前照灯的照射角度会存在一定的滞后性,因此本研究针对的是车辆沿直线道路行驶、前方出

现坡道的情况。此时前照灯系统能够提前根据斜坡坡度的大小,调整好照射角度,保证安全的照明距离,使驾驶员获得足够清晰的视野,提高驾驶的安全性。

车辆在上坡路面由于视野被坡道阻挡,前照灯照射距离缩短,因此需要在垂直方向上调整前照灯的照射角度。一般来说,坡度越大,被阻挡的视野就越多。假设存在一个特殊的临界坡道值,当坡道坡度大于该临界值时,前照灯才需要调整,坡度小于临界值时,则不需要调整。建立的临界坡度示意图如

图9所示。假设车辆刚好行驶到坡底时,前照灯的照射距离能够达到前照灯的安全照明距离,那么此时对应的道路坡度值,就是临界坡度值,设为 γ_0 。

在图9中,设前照灯的安装高度为 H ,初始照射角度为 α ,前照灯的安全照明距离 l_{AB} 为 S ,此时的坡度为 γ_0 ,根据图9中的几何关系可得

$$\gamma_0 = \arcsin \frac{H \cos \alpha}{0.0093v^2 + 0.5776v + 6.6725} - 0.6 \quad (4)$$

由式(4)可知,临界坡度与前照灯的安装高度 H 、前照灯的初始照射角度 α 、车辆的行驶速度 v 有关。

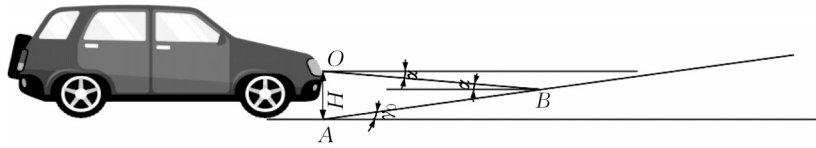


图9 临界坡度示意图

Fig.9 Diagram for critical slope

根据《汽车用灯丝灯泡前照灯》(GB 4599—2007)规定^[17],汽车前照灯在距离25 m远处的配光屏上形成的2条明暗截止线在垂直方向上位于光心水平面25 cm上下,车灯光线照射到上、下明暗截止线的水平角度为 α, α' ,计算式如下所示:

$$\alpha = \alpha' = \tan^{-1} \frac{25}{2500} = 0.6^\circ$$

α, α' 是前照灯的初始照射角度极限值,前照灯的照射角度在此基础上根据不同场景下的要求进行调整。由式(4)可知,前照灯在垂直方向上的照射角度调整极限不能超过 0.6° ,因此垂直方向上的初始照射角度为水平向下 0.6° 。

当斜坡坡度 γ 大于临界坡度 γ_0 ,即 $\gamma > \gamma_0$ 时,前

照灯需要在垂直方向上向上调整 β ,照射方向由 \overrightarrow{OC} 变为 \overrightarrow{OD} ,对应的数学模型如图10所示。

在 $\triangle BEC$ 中,因为 $\sin(\alpha + \beta) > \sin \alpha$,所以 $l_{BC} > l_{BE}$ 。由图10可以得到,前照灯在坡道上的照射距离 l_{BE} 相对平坦路面 l_{BC} 来说确实减少了一部分,为了保证安全照明距离,需要将前照灯的照射距离向上调整 β 角度,使前照灯在坡道上的照明距离为 l_{BF} 。由图10中的数学关系在 $\triangle OCD$ 中可得

$$\frac{l_{OC}}{\sin(\alpha - \beta)} = \frac{l_{CD}}{\sin \beta}$$

$$\beta = \arctan \frac{l_{AC} - H \cot \alpha}{H + l_{AC} \cot \alpha - H / \sin^2 \alpha}$$

l_{AC} 为前照灯安全照明距离,可得

$$\beta = \arctan \frac{0.0093v^2 + 0.5776v + 6.6725 - H \cot \alpha}{H + (0.0093v^2 + 0.5776v + 6.6725) \cot \alpha - H / \sin^2 \alpha} \quad (5)$$

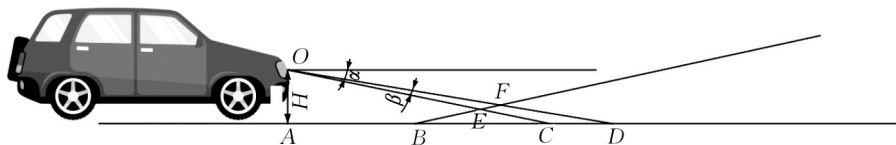


图10 前照灯照射角度斜坡路况调整示意图

Fig.10 Headlamp illumination angle adjustment for slope road

由式(5)可知,在上坡路况下,前照灯垂直方向上的照射角度调整由车速 v 、前照灯的安装高度 H 、前照灯的初始照射角度 α 决定。车速 v 可由速度传感器得到,前照灯的安装高度 H 与初始照射角度 α 都是车辆固定参数,车辆行驶过程中的坡度通常由

车载红外探测器检测得到。

取前照灯安装高度为0.7 m,前照灯的初始照射角度为 0.6° ,在Matlab中进行计算并可视化,结果如图11所示。

由图11可知,前照灯照射角度的调整值不随车

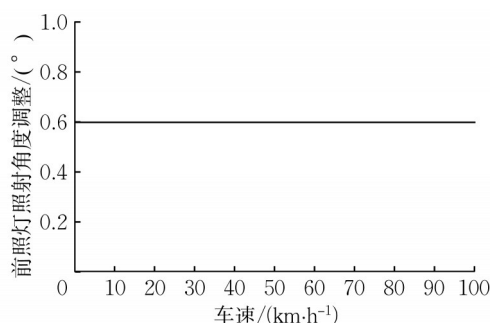


图11 前照灯坡道照射角度调整与车速关系

Fig.11 Relationship between headlamp slope illumination angle adjustment and speed

速发生变化,保持在 0.6° ,即汽车在斜坡路况行驶时,当斜坡坡度小于当前车速对应的临界坡度时,前照灯的照射角度不需要调整;当斜坡坡度大于当前车速对应的临界坡度时,前照灯的照射角度需要调整,调整值为 0.6° 。前照灯的初始照射角度为 0.6° ,调整后前照灯的照射角度为 0° 。

3.2 基于机器视觉的坡道照明算法

车辆上坡时,算法的关键在于斜坡坡度的获取。对于斜坡坡度的获取,传统做法是通过车辆车高位置传感器传递的信号求出斜坡坡度,同样是属于传

感器触发式调节方式,存在一定的迟滞性。一般做法是通过与车灯等高的红外探测器测得斜坡的坡度,虽然能够实现前照灯照射角度的调整并降低系统的迟滞性,但仪器本身成本较高,而且需要对车灯附近结构进行重新布局,外加上红外探测器存在温度稳定性差的缺点,在极端天气条件下难以保持稳定的工作状态,存在一定的局限性。

为了解决上述问题,采用机器视觉技术获取道路参数信息,即通过图像传感器采集道路图像,通过图像分析处理得到车辆行驶过程中前方坡道的坡度,从而实现前照灯照射角度在垂直方向上的调整。

如图12所示,当车辆在直线路段上行驶即将驶入坡道时,车载相机采集到道路前方坡道的图像,通过算法分析,得到此时前照灯应当调整的照射角度,使前照灯的照射方向从 \overrightarrow{OA} 转变为 \overrightarrow{OB} 。车辆下坡则可以看作是以坡道为水平面的上坡过程。

车道线在水平方向上的弯曲程度能够反映车辆需要通过的弯道半径的大小,而当在车辆行驶的前方出现坡道时,车道线趋势的变化同样可以反映出道路坡度的变化。本节将对车载相机采集到的道路图像中车道线变化反映出的坡道信息进行分析,得到两者之间的关系。

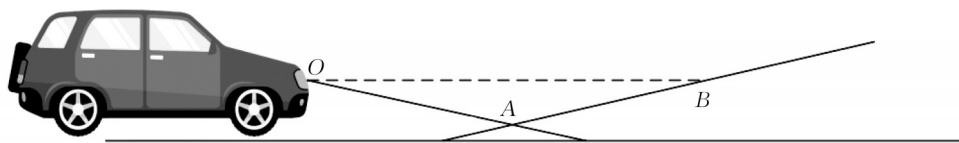


图12 前照灯坡道照射角度调整示意图

Fig.12 Diagram for slope illumination angle adjustment of the headlamp

直线路段与斜坡路段车道线的相交点为坡底点E。以相机光心为原点O,根据小孔成像原理,建立如图13所示的斜坡坡度数学模型。

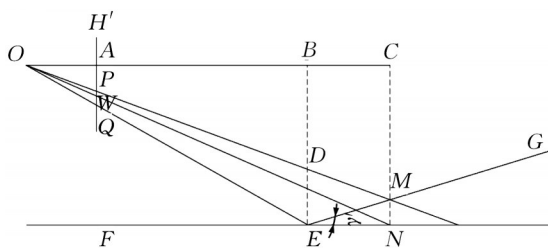


图13 斜坡坡度几何模型

Fig.13 Geometric model of slope

图13中, H' 为成像平面, \overline{EF} 为直线路段, \overline{EG} 为斜坡路段,在斜坡上取一点M,M处斜坡的高度为 l_{MN} , \overline{MN} 投影到成像平面对应的线段为 \overline{PW} ,M处斜

坡水平长度为 l_{EN} ,因此斜坡坡度的表达式为

$$\gamma' = \tan \frac{l_{MN}}{l_{EN}}$$

l_{CN} 为相机安装位置高度, $l_{CN}=l_{BE}=h'$, \overline{CM} 在成像平面的投影为 \overline{AP} , \overline{BE} 在成像平面的投影为 \overline{AQ} , \overline{CN} 在成像平面的投影为 \overline{AW} , l_{OA} 为相机焦距 f 。

在 $\triangle OBE$ 和 $\triangle OAQ$ 以及 $\triangle OCN$ 和 $\triangle OAW$ 中,根据相似定理可得

$$l_{OB} = \frac{l_{BE}}{l_{AQ}} f$$

$$l_{OC} = \frac{l_{CN}}{l_{AW}} f$$

由于在像素坐标系中坐标原点位于图像左上角,因此 l_{AQ} 的值为斜坡底点E在像素坐标中纵坐标的大小, l_{AW} 的值为点M投影到直线路段 \overline{EF} 延长线

上的交点 N 在像素坐标中纵坐标的大小,由此可得以下计算式:

$$l_{EN} = l_{BC} = l_{OC} - l_{OB} = \left(\frac{l_{CN}}{l_{AW}} - \frac{l_{BE}}{l_{AQ}} \right) f$$

在 $\triangle OCM$ 和 $\triangle OAP$ 中,根据相似定理可得

$$l_{CM} = \frac{l_{OC}}{l_{OA}} l_{AP}$$

l_{AP} 为点 M 在像素坐标系中纵坐标的值,则

$$l_{MN} = l_{CN} - l_{CM} = l_{CN} - \frac{l_{OC}}{l_{OA}} l_{AP}$$

坡度计算式化简可得

$$\gamma' = \frac{(l_{AW} - l_{AP}) l_{AQ}}{l_{AQ} - l_{AW}} h' f$$

为了提取车道线的轮廓,在 Pycharm 平台中通过 OpenCV 库对车载相机采集的道路图像进行一系列滤波、二值化、形态学操作,如图 14 所示。

由于在真实交通场景中,斜坡坡度不是一个固定的值,但是大多数坡度变化基本较平缓,没有较大的起伏,因此在斜坡坡度计算中选用求平均值来拟

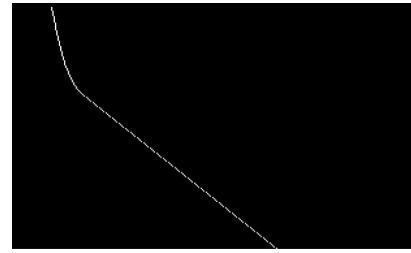


图 14 斜坡车道线提取结果

Fig.14 Extraction results of slope lane line

合斜坡上不同点之间的坡度值,从而得到斜坡的坡度。

同样在武汉市内对实际道路图像进行采集,地点一和地点二分别是武汉理工大学马房山校区东院与西院校内两段斜坡路段,地点三是武汉市洪山区白沙洲大道高架往杨泗港方向斜坡路段。将提出的基于机器视觉的斜坡坡度计算算法应用于实际路段进行测试计算,得到地点一斜坡坡度的理论计算值为 3° ,地点二斜坡坡度的理论计算值为 5° ,地点三斜坡坡度的理论计算值为 2.5° ,如图 15 所示。



图 15 斜坡图像处理结果

Fig.15 Image processing results for slope

将通过算法计算得出的坡道理论坡度与斜坡的实际坡度作对比,验证算法的准确性。实际坡度由水平仪测试,结果如表 3 所示。

表 3 基于机器视觉的斜坡理论计算值与真实值对比

Tab.3 Comparison of slope between theoretical calculation values based on machine vision and real values

路段	计算值/ $^\circ$	实际值/ $^\circ$	相对误差/%
地点一	3.0	2.92	2.7
地点二	5.0	4.91	1.8
地点三	2.5	2.58	3.1

4 实验验证

Prescan 作为无人车测试平台,可以与 Matlab/Simulink 进行联合仿真,通过设置不同的实验条件来完成车辆的功能测试。由于弯道照明与坡道照明

调整逻辑大致相同,因此仅就算法在弯道照明的应用进行仿真验证。在 Prescan 软件环境中搭建如图 16 所示的虚拟夜间道路模型。直线路段长 50 m,弯道半径为 40 m,在弯道处设置一自行车骑手作为目标物,在车辆模型车灯位置处设置一传感器,可由本研究算法模拟车灯感知行人,并且保证车灯照射角度调整后前照灯仍然保持对相邻车道的照明。为了对比分析,在相同位置设置一不受算法控制的传感器,即模拟在弯道路段行驶不调整前照灯的照射角度;在相同位置设置受传统 AFS 算法控制的传感器,模拟车灯感知行人,即前照灯在进入弯道后,再基于方向盘转角调整前照灯的照射角度。

将提出的机器视觉算法导入软件环境中,车辆行驶速度保持在 $36 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 不变,仿真动画如图 17 所示。

由图 17 可以看出,在车辆即将进入弯道时,提

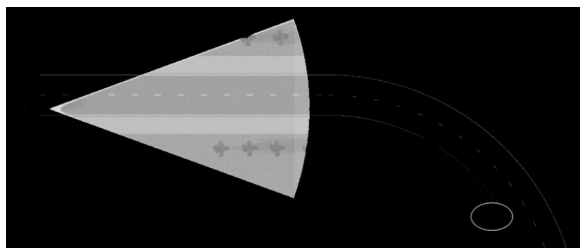


图 16 道路模拟场景

Fig.16 Road simulation scenarios

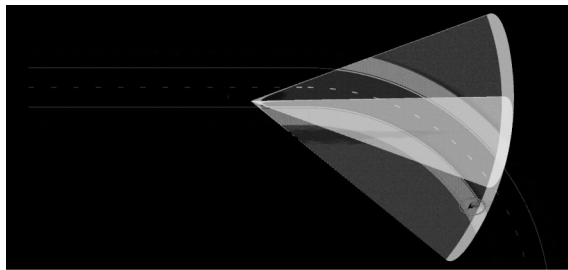


图 17 前照灯照射角度调整示意图

Fig.17 Diagram of illumination angle adjustment of the headlamp

出的基于机器视觉的前照灯照射角度调整算法能够计算出前照灯应该调整的角度,使控制机构引导前照灯向弯道内侧偏转,从而发现弯道内的行人。

读取 Matlab/Simulink 中传感器感知波形,如图 18 所示。

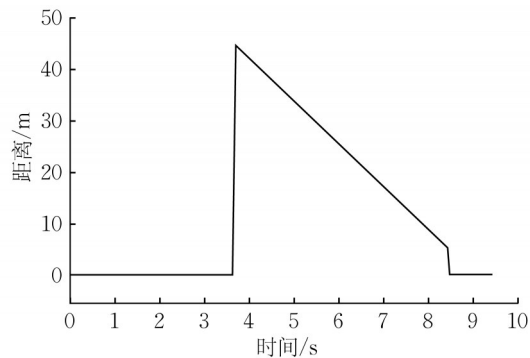
车辆以 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度通过 50 m 的直线路段进入弯道需要 5 s。由图 18a 可知,基于本研究提出的算法,前照灯在约 3.8 s,即车辆即将进入弯道时便可感知到行人的存在,从而引导驾驶员采取制动措施,此时车辆与行人距离大于 40 m,而当前车速下车辆安全制动的距离为 39.5 m,说明车辆能够安全制动停下。

对于传统 AFS 弯道照明算法,如图 18b 所示,由于需要方向盘转角输入后前照灯照射角度才能响应调整,因此前照灯的照射角度在车辆大约行驶 5 s 后,即驶入弯道后才能够进行调整并感知到行人,此时车辆距离行人的距离不足 35 m,不满足安全制动的距离。

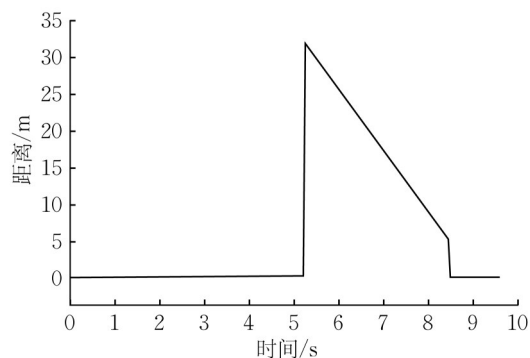
如果前照灯的照射角度始终不发生调整,如图 18c 所示,车辆在驶入弯道后就感知不到行人的存在,假使行人、汽车横穿马路,将会造成严重的后果。

在同样的实验条件下,采用本研究提出的算法,前照灯在约 3.8 s 时即能感知到行人的存在并及时作出处理;采用传统的 AFS 算法,前照灯在约 5.0 s 时才能感知到行人并作出处理,此时留给驾驶员的

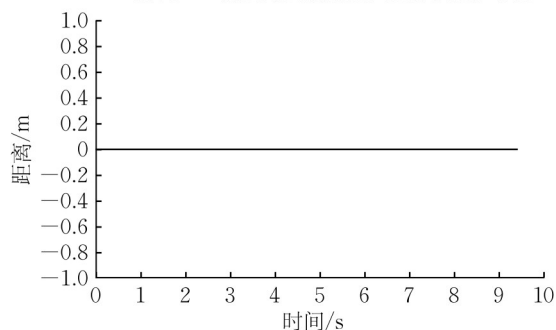
安全制动距离就减少了至少 5 m。结果表明,如果采用本研究提出的算法,则前照灯的调整时间提高了 1.2 s,反应速度提高了 $5.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,有效解决了弯道照明前照灯照射角度偏转迟滞性的问题。



a 基于机器视觉的前照灯照射角度调整算法感知波形



b 传统AFS前照灯照射角度调整算法感知波形



c 前照灯照射角度不调整感知波形

图 18 感知波形图

Fig.18 Sensing waveform

5 结语

以前照灯的照射角度为研究对象,针对当前触发式自适应前照灯系统存在的一些不足,分别对前照灯在不同行驶状况下的照射角度进行了研究。引入机器视觉中的图像处理算法,计算所建立前照灯照射角度数学模型中所需的车辆转弯半径和道路斜坡坡度。最后,在 Prescan 环境中搭建虚拟道路模型,结合 Simulink 对所提出的基于机器视觉的前照

灯照射角度调整算法进行仿真分析。结果表明,相较于传统AFS算法,所提出的算法能够较为有效地解决AFS照明容易受到驾驶员自身和车辆状态参数影响以及迟滞性问题。

作者贡献声明:

杜小芳:提出研究主题,构建研究框架,确定行文思路和研究方法,针对研究问题提出对策建议,论文撰写与修改。

程思宇:研究方法完善,理论模型推导,数据采集,数据处理和仿真分析,论文撰写。

戴福祥:提供实验条件,分析数据。

徐琳:参与研究框架和逻辑结构设计、整理与修正。

石可民:算法研究,数据处理,图表绘制,论文修订。

参考文献:

- [1] MAGAR S G. Adaptive front light systems of vehicle for road safety [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Computing, Communication, Control and Automation, ICCUBE 2015. Pune: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015: 551-554.
- [2] SZYMKOWSKI S. Improved optional headlights net Volvo XC40, XC60 top safety pick awards, the car connection[EB/OL]. [2022-05-20]. <https://bit.ly/2R7406q>.
- [3] SZYMKOWSKI S. 2021 Subaru forester prices rise a bit, but SUV gets more safety kit, roadshow [EB/OL]. [2022-05-20]. <https://cnet.co/3wKM0MP>.
- [4] BMW adaptive headlight malfunction [EB/OL]. [2022-06-23]. <https://bit.ly/2R9rc47>.
- [5] DAHOU H, GOURI R E, ALAREQI M, *et al.* Design and implementation intelligent adaptive front-lighting system of automobile using digital technology on Arduino Board [J]. International Journal of Electrical & Computer Engineering, 2018, 8(1): 521.
- [6] 袁飞扬. 基于机器视觉的自适应前照灯算法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
YUAN Feiyang. Research on adaptive headlamp algorithm based on machine vision [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [7] 巨江山. 基于GPS/INS的P-AFS算法研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
JU Jiangshan. P-AFS algorithmic research based on GPS/INS [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.
- [8] 张兴. 基于规划路径的智能前照灯偏转控制研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021.
ZHANG Xing. Research on deflection control of intelligent headlamp based on planned path [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021.
- [9] ZHENG T. Research on adaptive front-lighting system algorithm based on machine vision [C]//Proceedings of the AICScnf'20: 2020 Artificial Intelligence and Complex Systems Conference. New York: ACM, 2020: 21-26.
- [10] GARCIA A, PASTOR-SERRANO D. Determination of minimum horizontal curve radius for safe stopping sight distance of vehicles overpassing truck platoons [J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(5): 539.
- [11] 公路路线设计规范: JTG D20—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
Design specification for highway route: JTG D20—2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [12] 公路工程技术标准: JTG B01—2014 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
Technical standard of highway engineering: JTG B01—2014 [S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [13] WU D, LIAO M W, ZHANG W T, *et al.* YOLOP: you only look once for panoptic driving perception [J]. Machine Intelligence Research, 2022, 19(6): 550.
- [14] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. Scaled-YOLOv4: scaling cross stage partial network [C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2021: 13024-13033.
- [15] HE K, ZHANG X, REN S, *et al.* Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1904.
- [16] LIN T Y, DOLLAR P, GIRSHICK R, *et al.* Feature pyramid networks for object detection [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE, 2017: 2117-2125.
- [17] 中国国家标准化管理委员会. 汽车用灯丝灯泡前照灯: GB 4599—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Motor vehicle headlamps equipped with filament lamps: GB 4599—2007 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.