

基于视觉的车道跑偏检测方法研究及仿真

吴沫 安向京 贺汉根

(国防科学技术大学自动化所, 长沙 410073)

摘要 为了保证辅助驾驶技术行车的安全,在分析了基于视觉的车道跑偏检测方法的具体步骤的基础上,首先提出了利用由计算机视觉获得的车道标志线来进一步获得车-路关系的方法,并推导了几种车道跑偏判据 TLC (time to lane crossing) 的计算公式;然后利用“预瞄最优曲率模型”来仿真真人-车-路的关系,并验证了当人的状态发生变化时,TLC 判据可以有效地提供报警的效果;最后在红旗自主驾驶样车的视觉导航系统中进行了实验,实验结果表明,上述分析和仿真是可行的。

关键词 车道跑偏 TLC 驾驶员建模 触界时间

中图分类号: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)01-0110-06

On Vision-based Lane Departure Detection Approach

WU Mo, AN Xiang-jing, HE Han-gen

(Automation Institute, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract This paper analyzes the process of lane departure detection approach. In our vision-based Lane Departure Detection system, we use a single camera as input. In this paper, we discuss how to detect the lanes marking on the road and get the relationship between vehicle and road. Some measurements are derived to calculate TLC (time to lane crossing), for measuring the position of the vehicle relative to the lanes. Besides, the forward-looking predicting mode is introduced to establish the relationship among driver, vehicle, and road. Further more, the criterion can be got to tell whether the vehicle is going to depart the lane without conscious. Simulations show that our vision-based lane departure approach does provide an effective alarm when the state of driver goes wrong. Experiments are taken on vision navigation system for HONGQI prototype, using lane change rather than lane departure. Images obtained from forward looking camera are preprocessed to gain lane markers, and TLC curve is then gained from the alteration of the lane markers position. The results prove that the analysis and simulation above can be feasible. The hazard of lane departure can be forecasted through the alteration of vehicle-road relationship and TLC parameter.

Keywords lane departure detection, time to lane crossing(TLC), driver modeling, active safety system

1 引言

近年来,国际上汽车自动驾驶技术飞速发展,并逐渐取得进步,各个研究机构研制的自动驾驶系统已经可以在结构化道路上(高速公路)高速自动驾驶,并具备了各种智能化功能。在庞大而复杂的现代交通系统中,保证行车安全是首要目标,汽车主动安全技术就是通过对车辆运行的各种参数进行监

测、调节与控制来达到辅助驾驶的目的,而车道跑偏告警系统正是其中主要技术之一。

采用车道跑偏告警系统的目的是对车辆即将驶出车道的危险情况给出警报,这种危险状况大多都是由于驾驶员精神不够集中或困倦、疲劳等原因引起的,属于无意识的偏离车道,因此,车道跑偏告警系统从根本上说是对驾驶员的不良驾驶状态给出警告。目前对驾驶员状态的判断有基于生理特征测量和基于计算机视觉两种研究方向。前者主要是通过

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60234030)

收稿日期:2005-04-28; **改回日期**:2005-12-20

第一作者简介:吴沫(1982~),女,2005年获国防科学技术大学工学硕士学位,研究方向为实时计算机视觉。现为中国人民解放军61081部队助理工程师。E-mail: wu_mo@sohu.com

生理测量手段直接监控驾驶员的生理状态;后者则融合了人、车、路3个系统,利用三者的关系来判断车路关系,进而反推得到人的状态。本文所做的工作就是基于计算机视觉的研究。

基于计算机视觉的车道跑偏告警系统具有提前预警的功能,该系统是依靠对汽车测向运动的分析来预测汽车何时出道,以提前报警。文章第3节分析了3种检测车道跑偏的方法,并推导了TLC(time to lane crossing)方法的几种计算公式,进而利用郭孔辉的“预瞄最优曲率模型”^[11]仿真了人、车、路的关系,同时验证了当人的状态发生变化时,TLC判据可以有效地提供报警。

车道跑偏告警系统涉及人、车、路3个系统,它是利用三者的关系来判断车路关系,进而反推得到人的状态。进行车道跑偏检测时,首先,系统通过计算机视觉获得车路状态信息,同时,车道跑偏检测方法通过分析车路关系来判断车辆是否即将偏离车道;然后根据郭孔辉的“预瞄最优曲率模型”建立起能够仿真人、车、路三者关系的模型;最终找出当人的状态发生改变时车路关系如何改变。

本文的研究工作是基于图1(a)所示的红旗自主样车,立足于为红旗样车开发一套主动安全系统。红旗样车通过安装在挡风玻璃左上方的单目摄像机来获得视觉信息,图1(b)为摄像机拍摄的前视图。



(a) 红旗样车 (b) 红旗样车上摄像机拍摄的前视图

图1 红旗样车及其上摄像机拍摄的前视图

Fig. 1 HONGQI prototype and the front view shot by its vidicon

2 车道跑偏检测方法

检测车道跑偏时,首先要从车-路系统入手,通过由视觉获得的信息以及车辆运行过程中的动态参数来得到车路状态,再通过分析车路状态关系来检测当前时刻车辆是否偏离车道。

衡量一种车道跑偏检测方法的好坏主要有留给驾驶员的反应时间和误报率^[2]两个指标。理想情况下,系统在 t 时刻产生警报,应满足以下两个条

件:①根据警报,驾驶员可以成功避免碰撞;② t 时刻之后产生警报会导致碰撞。前者保证了驾驶员的反应时间,而后者则可限制误报情况。通常,人们都能够在保证误报率足够低的情况下,尽量增加系统留给驾驶员的反应时间。本节从原理和性能上分析了以下几种检测车道跑偏的方法:

2.1 RRS方法

RRS(roadside rumble strips)方法又称电子隔离带法,这种方法当汽车前胎外沿触碰道路边界时即触发警报,该方法完全不考虑时间、道路结构和车辆运行轨迹,由于有些驾驶员习惯靠车道线范围内的道路边界(简称道路边界)行驶或占用整个车道,且很多情况下汽车沿道路边界行驶并不意味着存在出道危险(这与个体驾驶员的习惯有关),因此RRS方法的误报率很高,而且由于RRS方法只要汽车触碰道路边界即产生警报,且留给驾驶员的反应时间也很短,故该方法很少使用。

2.2 TLC方法

TLC方法^[3]首次由Godthelp提出,目前是大部分研究车道跑偏告警的机构所采用的方法。TLC方法的思想是通过度量车辆在既测轨迹上距触碰车道边界所剩余的时间来进行测偏,它涉及到对道路信息以及车辆运动轨迹的估计和预测,其根据对道路结构和车辆运动的假设可分为以下3个层次算法:

(1) 若 $\frac{d}{v_l} < T$,则触发警报,其中, d 为前胎外沿距道路边界的距离; v_l (下角l代表lateral)为汽车的侧向速度, T 为反应时间阈值。该算子假设车辆的侧向速度和方位角为常值,即汽车沿侧向作匀速直线运动,这一假设虽基本上能够反映汽车和道路之间的位置关系,但在道路曲率较大和转向输入较明显时,结果会产生一定偏差。

(2) 加入对汽车侧向加速度 a_l (下角l代表lateral)的考虑, t_c (下角c代表crossing)为前胎外沿触界时间,假设 a_l 为常值,此时

$$d = v_l t_c + \frac{1}{2} a_l t_c^2 \quad (1)$$

可得

$$t_c = \frac{-v_l + \sqrt{v_l^2 + 2a_l d}}{a_l} \quad (2)$$

由于该算法当 $t_c < T$ 时即触发警报,因此比算法(1)更精确,但侧向加速度的获得需要历史数据,这就增加了算法的执行时间,并易放大误差。

(3) 从车辆运动学模型及道路模型出发,通过加入对车辆侧偏角、横摆角速度和前向车速的考虑来预测车辆触界时间。设 C_R (下角 R 代表 road)、 C_V (下角 V 代表 vehicle) 分别为道路曲率和车辆运行轨迹曲率, V 为前向车速, ω 为车辆的横摆角速度, 车辆与道路关系如图 2 所示, θ 为车辆侧偏角。由式(1)得

$$d = V \tan \theta \cdot t_c + \frac{1}{2} a_1 t_c^2 \quad (3)$$

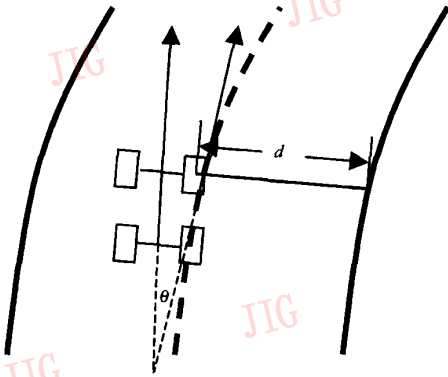


图 2 车辆与道路关系示意

Fig. 2 The relationship between vehicle and road

而

$$a_1 = \frac{V^2}{R_{re}} \quad (4)$$

R_{re} 为车辆相对道路的曲率半径, 即

$$R_{re} = \frac{1}{C_R - C_V} \quad (5)$$

$$C_V = \frac{V}{\omega} \quad (6)$$

将式(4)、式(5)、式(6)代入式(3)即可求出 t_c , 得

$$t_c = \frac{-V \tan \theta + \sqrt{V^2 \tan^2 \theta + 2V^2 d \left(C_R - \frac{\omega}{V} \right)}}{V^2 \left(C_R - \frac{\omega}{V} \right)} \quad (7)$$

当 $t_c < T$ 时, 系统就触发警报。该算法假设前方道路曲率和汽车运动轨迹曲率均不变, 由于这样的假设在弯道入口处的过渡线形(回旋曲线)或驾驶员转动方向盘时不成立, 因此该算法虽不是运动学上最复杂的, 但它对传感器的要求已经很高, 而且这种方法对侧偏角和横摆角速度进行测量十分困难, 不但采用前视摄像机很难达到精度要求, 并且对传感器误差很敏感。

2.3 FOD 方法

FOD (future offset distance) 方法^[4]是从实际的车

道边界向外扩展一个虚拟车道边界, 其原理同 TLC 方法, 目的在于降低误报率。对于那些习惯紧靠车道边界线驾驶的驾驶员而言, 则可以通过加宽虚拟车道边界, 并相应增加反应时间阈值, 以降低误报率。

3 驾驶员-汽车闭环系统

由于车道跑偏告警系统的目的是检测驾驶员的驾驶状态, 因而在得到车-路状态关系后, 还需要加入人的因素的影响, 即考虑人、车、路 3 个系统的关系如何建模, 才能合理地表达驾驶员的状态对车路关系的作用效果。

关于驾驶员建模, 郭孔辉的“预瞄最优曲率模型^[1]”是一种较为成熟的方法。该方法是设汽车在一个预定的路线上行驶, 轨道中心线方程为 $f(t)$, 在瞬时刻 t , 汽车具有即时状态 $y = y(t)$, “单点预瞄”假设驾驶员的目光集中于前方一点处(这一假设通常与实际经验相符合), 当驾驶员向前预视距离为 d_f (下角 f 代表 forward) 时, 则相应的前视时间 $t_1 = \frac{d_f}{V}$, 驾驶员前视点的横坐标为 $f(t + t_1)$ 。由于驾驶员

总是希望选择一个最优的轨迹曲率 $\frac{1}{R^{best}}$, 以便使得汽车在走过距离 D 后, 其横向位置 $y(t + t_1)$ 与该处的预期轨道坐标 $f(t + t_1)$ 一致。又由于汽车在低速情况下的运动轨迹曲率与转向盘转角成正比, 即

$$\frac{1}{R} = \frac{\delta_{sw}}{iL} \quad (8)$$

其中, δ_{sw} (下角 SW 代表 steering wheel) 为转向盘转角; i 为转向系传动比; L 为轴距。此时设驾驶员的反应滞后时间为 t_d (下角 d 代表 delay), 这时最优转向盘转角 δ_{sw}^{best} 与 δ_{sw} 之间存在延迟环节 e^{-t_d} , 文献[1]给出了此时的最优转向盘转角 δ_{sw}^{best} 与驾驶员-汽车闭环系统的方框图(图 3)。

$$\delta_{sw}^{best} = \frac{2iL}{D^2} [f(t + t_1) - y(t) - t_1 y'(t)] \quad (9)$$

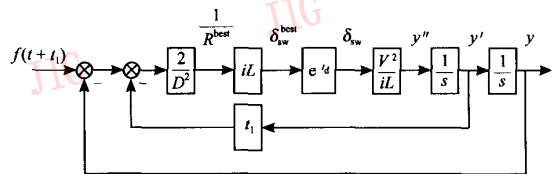


图 3 驾驶员-汽车闭环系统方框图

Fig. 3 The block diagram of the driver-vehicle closed loop system

文献[1]中指出,对于一个高速行驶的汽车而言,只要目标轨道函数 $f(t)$ 的变化比较缓和,即系统输入信号中没有多少高频成份,系统只在低频域工作,那么,它与理想环节就没什么区别。因此上述结论同样适用于结构化道路(目标轨道函数变化缓和)上高速行驶的汽车。

4 人-车-路系统分析

4.1 仿真

建立起人、车、路 3 个系统之间的关系模型之后,即可通过仿真对这一关系进行分析,并力求找出驾驶员状态的改变对车-路状态产生的影响,以验证前述车

道跑偏判据在驾驶员状态改变情况下的有效性。根据若干研究者的工作,在正常状态下,驾驶员的反应滞后时间通常在 0.2 ~ 0.3s 左右^[5],这里取 t_d 为 0.2s。另外,前视时间的选择应兼顾轨道误差、转向盘角速度和侧向加速度,这里前视时间取 1s。用 Simulink 对驾驶员-汽车闭环系统进行仿真时,如果汽车在曲率半径为 500m 的弯道上行驶,设车道宽为 3.8m,车速为 30m/s,则从仿真汽车的行驶轨迹(图 4 中虚线)可以看出,车辆跟踪车道中心线的性能很好,相当于一个熟练驾驶员的驾车运行轨迹。若驾驶员的当前状态不理想,比如困倦、疲劳或醉酒(此时驾驶员的反应滞后时间应增长,可取 t_d 为 0.45s),则汽车行驶轨迹明显左右摇摆(所谓“画龙”)(如图 4 中实线所示)。

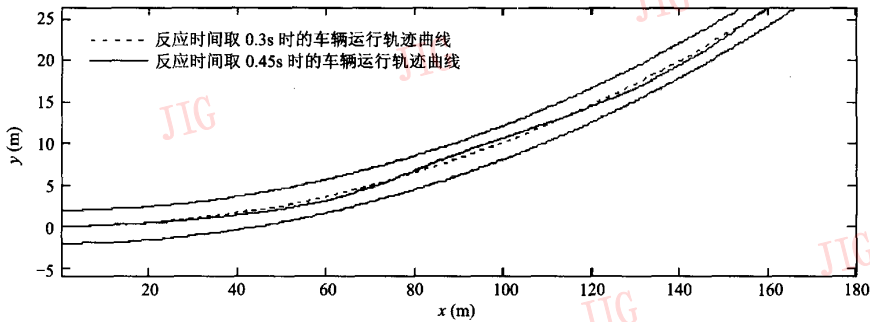


图 4 车辆仿真实行驶轨迹

Fig.4 The simulation of the vehicle trace

这一对比说明,在已建立的人-车-路模型下,若改变人的状态,则车-路关系随之改变,并且这一改变符合通常驾驶的实际经验。因此可以通过由计算机视觉获得的车路关系的改变来反推出人的驾驶状态,至此便完整地印证了本文思路。

由车路关系的改变反推人的驾驶状态需要用到车道跑偏检测方法的具体算子。对上述两种反应滞后时间不同的情况进行车道跑偏检测,如采用 TLC 判据,以左前轮为例进行车道跑偏检测,则使用 TLC 算子(即 2.2 节算法(1))计算触界时间,即可得到驾驶员滞后反应时间分别为 0.3s 和 0.45s 情况下的车道跑偏判据(TLC)曲线(图 5)。由图 5 可以看出,正常状态下 TLC 曲线较平缓,而在驾驶员反应滞后时间增长时,TLC 曲线均值虽然与正常状态下相当,但方差明显增大。因此除设定阈值作为车道跑偏的判据外,还可以利用 TLC 曲线的方差作为驾驶员驾驶状态的判据之一。

例如图 5 中两种情况下的 TLC 曲线,可采用如下判据加以区分:

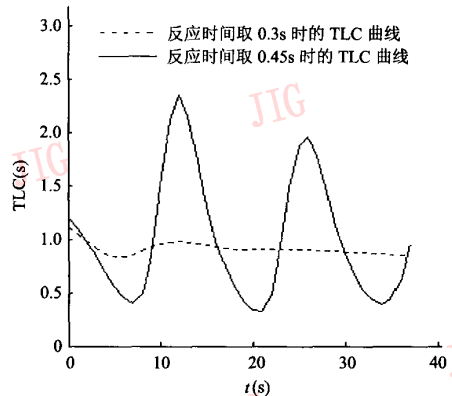


图 5 反应时间取 0.3s 和 0.45s 时的 TLC 曲线

Fig.5 The TLC curves when reaction time takes 0.3s and 0.45s

(1) 设定触界时间阈值,当触界时间小于该阈值时,就产生警报,但这种方法只能够识别出单次的触界危险,不能判断驾驶员状态;

(2) 计算一段时间内 TLC 曲线的方差,并设定方差阈值,若曲线方差小于该阈值说明驾驶员反应滞后时间过长,则当前状态不适合驾驶;

(3) 设定触界时间阈值,并计算触界时间小于该阈值的部分曲线峰值频率,若频率较高,并且各段时间内均匀,说明驾驶员反应滞后时间过长,则当前状态不适合驾驶。

其中,第 1 个判据与后面判据同时使用,既可避免当前车道跑偏的危险,又可及时发现驾驶员状态欠佳的潜在危险。

4.2 实验

基于上述分析,在红旗自动驾驶样车的视觉导航系统中进行了实验,由于换道与无意识车道跑偏在行为上较为接近(真正无意识的车道跑偏数据很难获得,并具有危险性),实验时,首先用换道来代替所要研究的车道跑偏,然后将前视摄像机采入的道路序列图像进行预处理,以提取车道标志线,最后根据车路关系的变化得到侧向速度和前轮胎外沿距道路边界距离,进而得到 TLC 曲线。

边缘检测是图像处理领域中一种应用广泛的前处理,本文使用 Sobel 算子实现。边缘检测后的二值化阈值可根据图像中像素的平均值来调整。为消除检测结果中车道线具有双边缘产生的影响,可将卷积后的结果负值置零,以得到单边缘。Sobel 算子的模板如图 6(a) 所示,Sobel 算子得到的检测结果最强烈处应是水平和垂直边缘,针对本文的应用背景,将算子模板改为图 6(b) 所示的模板,该模板主要检测斜率为 $\pm 45^\circ$ 方向的边缘,其适用于具有透视效果的车道标志线的检测,两种模板的卷积结果对比如图 7 所示,由图 7 可以看出,用改进模板检测出的边缘不仅冗余信息少,且干扰少,其既突出了车道标志线,又便于后续处理。

若使用局部 Hough 变换提取当前车道的车道线,则在前视摄像机获取的具有强烈透视效果的图像中,车道标志线具有如下特点和约束:

(1) 由斜率分别为 $\pm 45^\circ$ 的两条具有一定宽度的直线或近似直线组成;

(2) 在摄像机位置和俯仰角一定的情况下,两条直线相交处(灭点)在固定位置的小范围内变化;

从原理上考虑,对带有约束和具体特征明确的物体检测可以采用模板匹配的方法,由于模板匹配涉及到角度旋转,便变得很复杂,因此受 Hough 变换的启发,加入对车道线特征的考虑,取灭点附近一

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

(a) Sobel 算子模板

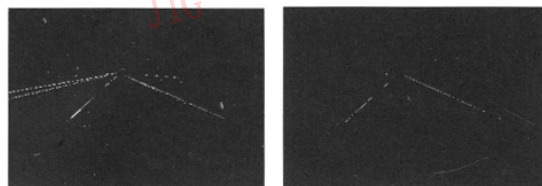
0	-1	-3	3
-2	-4	4	2
-3	3	1	0

-3	3	1	0
-2	-4	4	2
0	-1	-3	3

(b) 改进后 Sobel 算子模板

图 6 原 Sobel 算子模板与改进后 Sobel 算子模板

Fig. 6 The templates of the Sobel operator and the improved Sobel operator



(a) 原始 Sobel 算子检测到的边缘 (b) 改进后 Sobel 算子检测到的边缘

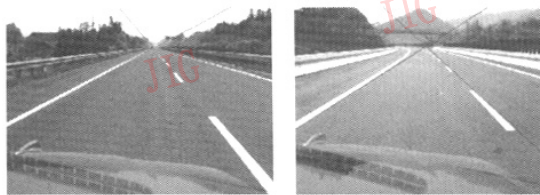
图 7 两种模板检测结果对比

Fig. 7 The contrast of the detection results using two templates

定范围的区域(与图像分辨率有关,可通过实验确定)作为灭点取值空间,并取角度为 $\pm 45^\circ$ 附近的一定范围(约 $\pm 15^\circ$)作为车道线的斜率空间来进行搜索,这样就大大减少了 Hough 变换空间的取值范围,若分别找出两个方向的最大值,则其对应的便是当前车道的车道线。图 8 显示了进行车道检测后的重构图像,其边缘检测采用的是左边缘。

关于灭点大致位置的初始化,可以利用文献[6]给出的方法,在俯仰角改变的情况下,对图像内存缓冲区坐标系中的道路曲线方程进行计算。由于在摄像机侧倾和俯仰一定(由于算法将在估算出的灭点附近小范围内搜索,故因车体颠簸引起的摄像机侧倾和俯仰变化可暂不考虑)的情况下,灭点位置也是确定的,因此估算灭点并不需要大量重复的计算。

虽然估算灭点只用到道路曲线为直线的情况,但这并不意味着此方法不适用于曲线道路情况,在道路弯曲的情况下,可将车道线看作是直线检测,其得到的结果应是距摄像机较近处道路的切线,由于公路路线设计规范要求高速公路与一级公路等汽车专用公路中圆曲线的一般最小半径为 $700\text{m}^{[7]}$,因此



(a) 直道车道检测后的
重构图像 (b) 弯道车道检测后的
重构图像

图 8 直道和弯道情况下车道检测后的重构图像

Fig. 8 The reconfiguration images of the straight and curved road after lane detection

该切线与 30m 内的道路基本相符合。

根据换道过程中序列图像的车道线特征变化(表 1)即可得到由 2.2 节中 TCL 方法算子(1)计算出的 TLC 曲线(图 9)。

表 1 换道过程中的各组参数列表(示意)

Tab.1 The parameter list during lane changing

参数	图像序号				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
左车道线斜率	0.67	0.70	0.75	0.75	0.78
右车道线斜率	-0.65	-0.62	-0.60	-0.60	-0.58
左车道线与纵轴交点	98.4	80.6	58.0	49.0	33.1
右车道线与纵轴交点	879.1	864.8	852.8	856.8	848.1

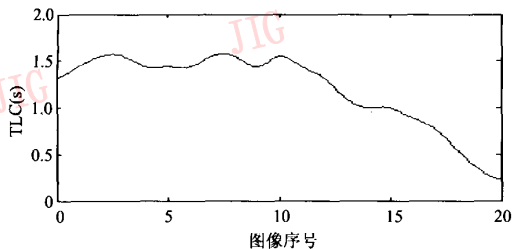


图 9 某次换道过程中的 TLC 曲线

Fig.9 The TLC curve of a certain lane changing

从以上实验分析可以看出,在驾驶员无意识偏离车道的过程中,车路关系和 TLC 参数也随之改变,这符合本文关于人-车-路关系的分析。实验结果表明,可以通过车路关系和 TLC 参数的改变来判断车道跑偏的潜在危险并报警。

5 结论与展望

应用车道跑偏告警系统的目的在于预报车辆即

将驶出车道的潜在危险,尽管系统涉及人、车、路 3 个系统,但通过计算机视觉获得的信息能够将三者融合在一起。本文首先分析了车道跑偏检测方法的步骤,然后提出了利用由计算机视觉获得的车道标志线来进一步获得车-路关系的方法,同时利用郭孔辉的“预瞄最优曲率模型”^[1]仿真了人、车、路的关系,并利用车道跑偏判据,验证了当人的状态发生变化时,判据仍可以有效地提供报警。

针对人-车-路关系的分析,本文还在红旗自主驾驶样车的视觉导航系统中进行了实验,即用换道代替车道跑偏,首先对前视摄像机采入的道路序列图像进行预处理,然后提取车道标志线,再根据车路关系的变化得到 TLC 曲线。实验结果表明,本文关于人-车-路系统的分析结果是可行的,即能够通过车路关系和 TLC 参数的改变来判断车道跑偏的潜在危险并报警。

今后的工作将侧重于验证车道跑偏检测方法的性能,包括控制误报率、增加留给驾驶员的反应时间以及算法和系统的抗干扰能力等。

参考文献 (References)

- 1 Guo Kong-hui, Vehicle Handling Dynamics [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1991,12. [郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春:吉林科学技术出版社, 1991,12.]
- 2 Dean Pomerleau, Todd Jochem, Charles Thorpe, et al. Run-off-road collision avoidance using IVHS countermeasures [R]. DOT HS 809 170, U. S. Department of Transportation NHTSA Final Report, 1999,12.
- 3 Godthelp Hans, Milgram Paul, Blaauw Gerard J. The development of a time-related measure to describe driver strategy [J]. Human Factors, 1984, 26(3):257 ~ 268.
- 4 Parag H Batavia, driver-adaptive Lane Departure Warning Systems [D]. PhD thesis, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Penn. U. S. , 1999,9.
- 5 MacAdam C C. Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1981, 11(6):393 ~ 399.
- 6 An Xiang-jing. Research on Vision Navigation System for Autonomous Highway Vehicle-theories, Methods and Implementations [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2001,4. [安向京. 自动驾驶汽车视觉导航系统研究——理论、方法与实现[D]. 长沙:国防科学技术大学博士学位论文,2001,4.]
- 7 China Communication First Highway Survey Design and Research Institute. Road Route Design Specification (JTJ011-94) [S]. Beijing: China Communications Press, 1994,7. [交通部第一公路勘察设计院. 公路路线设计规范(JTJ011-94) [S]. 北京:人民交通出版社,1994,7.]