

超视界路况下网联汽车的辅助驾驶方法

张洪昌^{1,2} 郭 军^{1,2} 赵 伟^{1,2} 密兴林^{1,2} 曾 娟^{1,2}

1.现代汽车零部件技术湖北省重点实验室(武汉理工大学),武汉,430070

2.汽车零部件技术湖北省协同创新中心,武汉,430070

摘要:针对车辆前方超视界路况不易预测、驾驶员易因路况不明而错误操作车辆导致失稳等危险事故的情况,提出了一种超视界路况下的网联汽车辅助驾驶方法。设计了基于车联网实时通信技术的网联汽车辅助驾驶系统,它主要由云端服务、共享驿站和车载单元组成;研究了行驶车辆的路况信息识别方法,包括路面附着系数识别、道路曲率计算和路面坡度测量;研究了基于多车辆测量数据的路况信息融合与校正方法,建立了基于三自由度车辆的刚体力学的弯道安全车速计算模型。实车实验结果表明,所提方法能够准确测量车辆前方超视界的路况信息,并可使驾驶员提前、准确地获知超视界路况信息,特别是弯道路况信息。

关键词:超视界道路;路况;网联汽车;辅助驾驶

中图分类号:U471.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2020.14.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Assisted Driving Method of Network-connected Vehicle in Out-of-sight Roads

ZHANG Hongchang^{1,2} GUO Jun^{1,2} ZHAO Wei^{1,2} MI Xinglin^{1,2} ZENG Juan^{1,2}

1.Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components
(Wuhan University of Technology), Wuhan, 430070

2.Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology,
Wuhan, 430070

Abstract: A assisted driving method of network-connected vehicle was proposed for solving the problems that out-of-sight road conditions in front of vehicles which were not easy to predict, and the drivers were prone to dangerous accidents such as misoperation of vehicles due to unclear road conditions. A assisted driving system of network-connected vehicle was designed based on real-time communication technology of vehicle networking. The system was mainly composed of cloud service, shared stations and vehicle-mounted units. The methods of road condition information identification was studied based on moving vehicles, including road adhesion coefficient identification, road curvature calculation and pavement slope measurement. Then the fusion and correction method of road condition information was studied based on multi-vehicle measurement data, and a calculation model of the safe driving speed on a bend was established based on three-degree-of-freedom vehicle model. The real vehicleing test results show that the proposed method may accurately measure the road condition information of the roads out of sight, and may enable the driver to obtain the out-of-sight road traffic informations in advance and accurately, especially the road condition information of the bend.

Key words: out-of-sight road; road condition; network-connected vehicle; assisted driving

0 引言

近年来,汽车保有量逐年增加,截至 2018 年底,我国汽车保有量已达 2.4 亿辆。与此同时,由人为因素导致的道路交通事故数量也随之增加,其中相当数量的交通事故是由驾驶员不熟悉路况或对路况判断错误而引发的。根据公安

部道路交通事故统计分析结果,2018 年全国发生道路交通事故 20 万余起,伤亡 6 万余人,其中,由驾驶员错误判断车辆前方超视界路况而引发的交通事故约占 23.8%^[1]。因此,提前准确地获知车辆前方超视界路况,特别是超视界的弯道路况,并将路况信息实时共享传递给驾驶员或车辆主动安全系统,防止车辆发生失稳、碰撞、侧翻等事故^[2],一直是交通安全领域的一项重要研究内容,对汽车安全驾驶具有重要作用。共享超视界路况信息分为两个步骤:①测量路面附

收稿日期:2019-06-17
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目
(191007013)

着系数、坡度和道路曲率等路况信息;②共享传递路况信息。提前测量路况信息并共享传递路况信息是安全辅助驾驶的基础,在此基础上驾驶员才能及时采取有效措施,防止发生交通安全事故^[3]。

目前,面向车辆前方超视界路况的测量及预警研究较少。现有的车辆前碰撞预警、车辆侧翻预警等安全辅助系统是根据已知路况条件预测车辆运动状态的,若超视界路况较差,则会产生较大的预警偏差^[4]。车身电子稳定控制等主动安全系统必须基于已知路况且只有在路面附着系数较大时才能控制车辆恢复稳定状态,若超视界路面与轮胎之间摩擦力不足以稳定控制车辆时,则依然会出现失稳现象,影响交通安全^[5]。道路导航辅助系统主要用来规划行驶路径和共享道路拥堵信息,无法提供超视界道路的路面附着系数、路面坡度及道路曲率等路况信息^[6]。

近年来,车联网技术和 5G 技术发展迅速,使车-车、车-路实时互联互通成为可能,进而可根据车辆前方超视界路况辅助安全驾驶汽车^[7]。我国出台的《车联网发展创新行动计划(2015—2020 年)》为交通安全、车-路-车实时通信提供了良好的基础条件,进一步推动了基于车联网技术的车辆智能控制系统的研发。本文提出了一种超视界路况下的网联汽车辅助驾驶方法。车辆在途经某路段时,可利用该方法提前获得路面附着系数、弯道曲率、路面坡度等路况信息,辅助驾驶系统可辅助驾驶员做出正确驾驶操作。

1 系统设计

超视界路况下的网联汽车辅助驾驶系统由三部分组成,包括 1 个云端服务、若干个共享驿站和每辆车上的 1 个车载单元,如图 1 所示。

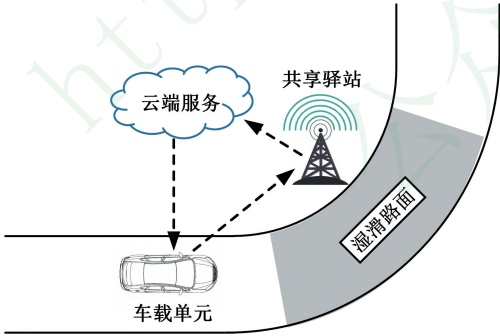


图 1 系统工作原理
Fig.1 Working principle of the system

1.1 云端服务

系统采用云端服务与共享驿站分级管理信息方式,可减少服务器访问量,降低信息管理复杂度,提高信息查询速度。云端服务通过公网接收

和管理所有接入的共享驿站信息,包括共享驿站位置信息、共享驿站网联接口信息等,并为授权网联车转发该信息。

1.2 共享驿站

共享驿站安装在超视界道路附近,为所有通过车辆提供路况信息,包括道路长度、路面附着系数、路面坡度等,并接收车辆实测路况信息,通过多源融合算法校正所存储路况信息。共享驿站初次安装或位置移动后,向云端服务发送所在位置信息,用于网联车载单元与其建立通信,以提前获取路况信息。共享驿站组成原理如图 2 所示。

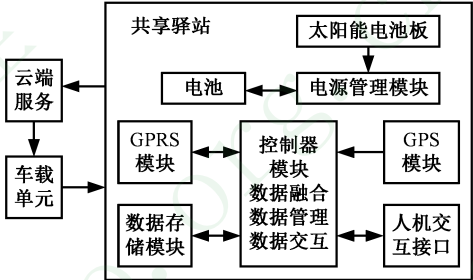


图 2 共享驿站组成原理

Fig.2 The composition principle of shared post station

1.3 车载单元

车载单元为驾驶员实时提供超视界路况信息,并综合车辆行驶状态,实时提供最大弯道行驶速度等辅助驾驶信息。同时,实时测量超视界路况,并发送至共享驿站。车载单元组成原理如图 3 所示。

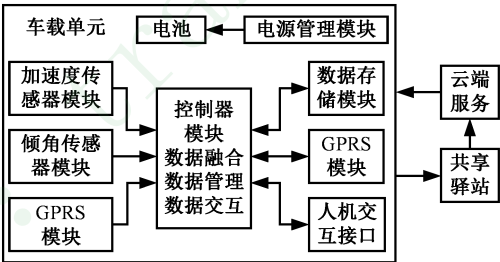


图 3 车载单元组成原理

Fig.3 The composition principle of vehicle-mounted unit

车载单元从云端服务获取共享驿站位置信息和网联接口信息,根据车辆位置实时计算车辆与超视界道路之间距离。当车辆与共享驿站之间距离 s 满足

$$s \geq t_q v (1 + \eta) \tag{1}$$

式中, t_q 为时间提前量,通过实车测试发现,最佳取值范围为 25 ~ 31 s; v 为车辆行驶速度; η 为安全系数,高速路况时取 0.75,城市乡村路况时取 0.1。

时,车载单元与共享驿站建立通信联系,获取并显示超视界路况信息。车载单元根据远程读取的超视界路况信息,实时计算车辆在超视界道路的最大安全行驶速度,为驾驶员提供辅助驾驶信息。车载单元工作原理如图 4 所示。

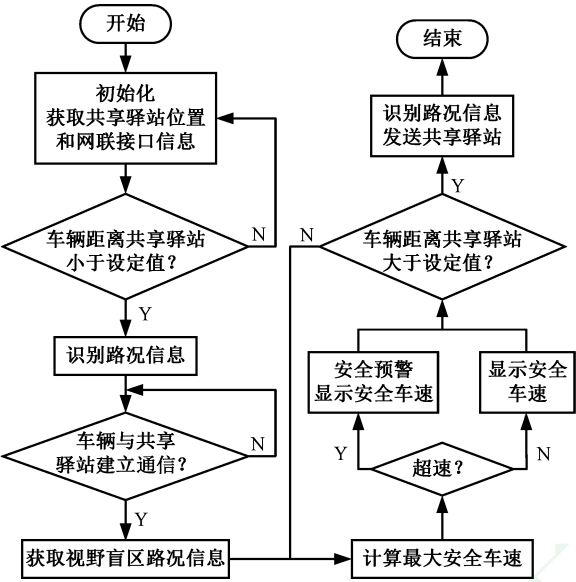


图 4 车载单元工作原理

Fig.4 Working principle of vehicle-mounted unit

2 路况信息识别

当车辆驶入该路段后,车载单元通过车载倾角传感器、加速度传感器、定位模块实时测量车辆俯仰、侧倾、加速度等运动状态信息^[8],以及通过车辆 OBD 接口读取车轮转速、转向盘转角、车辆行驶速度等信息,按设定算法原理计算路面附着系数、弯道曲率、路面坡度等路况信息^[9],并将信息发送至共享驿站。

2.1 路面附着系数识别

路面附着系数采用路面附着系数-滑移率经验曲线方法进行识别^[10-11]。通过车载 GPS 模块实时检测 Δt 时间内车辆行驶距离 Δd ,则车辆行驶速度

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1} \tag{2}$$

式中, d_1 、 d_2 分别为 GPS 模块在 t_1 、 t_2 时刻获得的大地坐标值。

通过车辆 OBD 接口读取车轮的转动角速度 ω_i ,则平均滑移率

$$\bar{s}_r = \frac{1}{n_w} \sum_{i=1}^{n_w} s_{ri} = \frac{1}{n_w} \sum_{i=1}^{n_w} \frac{v - \omega_i r_w}{v} \tag{3}$$

式中, r_w 为轮胎滚动半径; n_w 为车轮数量。

由路面附着系数与滑移率的经验曲线(图 5)可求得路面附着系数 λ 。

2.2 道路曲率识别

道路曲率由车辆行驶速度和前轮转向角度实时计算获得。通过车辆 OBD 接口读取转向盘转角 θ ,根据转向盘转动角度范围 θ_{rng} 与前轮转向角度范围 α_{rng} 的关系,车辆前轮转向角

$$\alpha = \alpha_{\text{rng}} \theta / \theta_{\text{rng}} \tag{4}$$

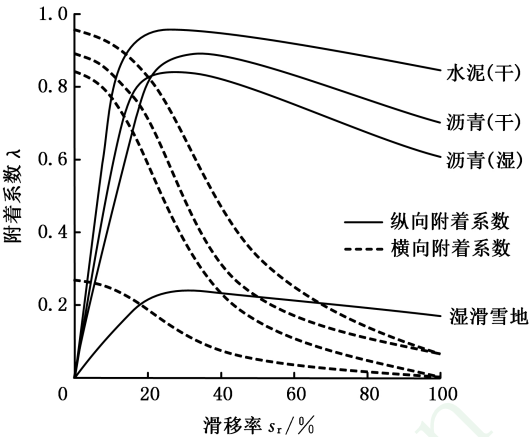


图 5 路面附着系数-滑移率经验曲线

Fig.5 The empirical curve of road adhesion coefficient-slip rate

以转向盘转动较大角度时刻所在位置为起始点,建立极坐标系,绘制车辆行驶轨迹。设 t 时刻车辆所在位置与起始点的距离为 ρ ,相对转动角度为 φ ,则直角坐标系中参数方程为

$$\begin{cases} x = \varphi(\rho, \varphi) = \rho \cos \varphi \\ y = \xi(\rho, \varphi) = \rho \sin \varphi \end{cases} \tag{5}$$

$$y = \pm \sqrt{\rho^2 - x^2} \tag{6}$$

行驶轨迹曲线的曲率

$$k = \frac{|\dot{y}|}{(1 + \dot{y}^2)^{3/2}} \tag{7}$$

根据式(6)中函数求导法则,计算 \dot{y} 、 \ddot{y} 并代入式(7)可得

$$k = \frac{|\dot{\varphi}(\rho, \varphi) \ddot{\xi}(\rho, \varphi) - \ddot{\varphi}(\rho, \varphi) \dot{\xi}(\rho, \varphi)|}{(\dot{\varphi}^2(\rho, \varphi) + \dot{\xi}^2(\rho, \varphi))^{3/2}} \tag{8}$$

行驶轨迹曲线的最大曲率

$$k_{\text{max}} = \max(k) \tag{9}$$

最大曲率处的弯道半径

$$R = 1/k_{\text{max}} \tag{10}$$

2.3 路面坡度识别

路面坡度分为横向坡度和纵向坡度,横向坡度对车辆侧翻、横向滑移等影响较大^[12]。为减少由车辆振动产生的测量偏差,4 个倾角传感器分别安装在车辆底盘的 4 个对称位置,并对 4 个传感器分别获得的倾角值 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 、 γ_4 进行滤波处理,则 t 时刻路面坡度 γ_t 识别模型为

$$\gamma_t = \frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} \gamma_i + \frac{1}{n_s^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n_s} (\gamma_i - \gamma_{t-1})^2} \tag{11}$$

式中, n_s 为倾角传感器数量; γ_{t-1} 为前一时刻路面坡度值。

3 多源路况信息融合与校正

3.1 无效数据剔除

在共享驿站、车载单元、云端服务等数据端分别设计相应的无效数据剔除算法,剔除无效数据,

提高信息数据的准确性。无效数据的剔除采用加权递推滤波和设定动态阈值方式实现^[13]。数据端接收新数据后,根据前一时刻标记的有效数据设定动态阈值,并对新数据进行比对处理。若新数据偏差在设定范围内,则根据已存储有效数据变化趋势进行递推滤波处理并标记为新的有效数据;否则剔除该数据。无效数据剔除模型为

$$\left. \begin{aligned} |D - D_{t-1}| &\leq \Delta_1 D_{t-1} & D_t &= \frac{nD_{t-1} + D}{n+1} \\ |D - D_{t-1}| &> \Delta_1 D_{t-1} & D &\text{无效} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中, D 为信息端接收的新数据; D_{t-1} 为前一时刻标记的有效数据; D_t 为新标记的有效数据; Δ_1 为安全系数,由实车试验得出,良好路况时取0.01~0.03,较差路况时取0.05~0.1; n 为已存储有效数据数量,根据数据波动幅值设定合适值,一般取16。

3.2 有效信息融合与校正

共享驿站将车辆测得的新的有效路况信息与原有路况信息进行融合,校正原有路况信息偏差,为下一辆驶入超视界道路的车辆提供更准确的路况信息。路况信息融合计算模型为

$$D_{r,t} = D_r \Delta_2 + D_{r,t-1} (1 - \Delta_2) \quad (13)$$

式中, $D_{r,t-1}$ 为原有路况信息数据; D_r 为车辆测得的新的有效路况信息数据; $D_{r,t}$ 为融合计算的新的路况信息数据; Δ_2 为加权系数,由实车试验得出,良好路况时取0.01~0.03,较差路况时取0.06~0.1。

4 安全车速计算

车辆行驶速度及路面附着系数、道路曲率、横向坡度等路况信息,是影响车辆侧翻、失稳、追尾等危险运动状态的重要因素。在确定路况下,车辆行驶速度则成为主要影响因素^[14]。分析车辆侧翻、失稳运动状态的车辆三自由度方程为

$$\left. \begin{aligned} m_s(\dot{v}_y + rv_x - \dot{p}h) + m_1(\dot{v}_y + rv_x) &= \sum F_Y \\ I_{sx}\dot{p} - I_{sxz}\dot{r} + I_{1x}\dot{p} - I_{1xz}\dot{r} - m_s h(\dot{v}_y + &rv_x - \dot{p}h) = \sum M_X \\ I_{z}\dot{r} - I_{xz}\dot{p} &= \sum M_Z \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中, m_s 为簧上质量; m_1 为簧下质量; I_x 、 I_z 分别为刚体对 ox 轴、 oz 轴的转动惯量; I_{xz} 为刚体对 ox 与 oz 轴的惯性积; h 为簧上质量质心距离坐标原点 O 的高度; p 、 r 分别为质心绕 X 轴、 Z 轴的角速度; v_x 、 v_y 分别为质心在 X 、 Y 轴方向的速度。

根据 Magic Formula 模型^[15],地面作用于轮胎 X 、 Y 方向力 F_{wXij} 、 F_{wYij} 分别为

$$\left. \begin{aligned} F_{wXij} &= u_x F_{sij} \sin\{C_y \arctan[B_x \lambda_{xij} - E_x (B_x \lambda_{xij} - \arctan B_x \lambda_{xij})]\} + S_{Vx} \\ F_{wYij} &= u_y F_{sij} \sin\{C_y \arctan[B_y \lambda_{yij} - E_y (B_y \lambda_{yij} - \arctan B_y \lambda_{yij})]\} + S_{Vy} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中, u 为轮胎与地面接触点速度; F_{sij} 为悬架力; C 为曲线形状因子; B 为刚度因子; E 为曲线曲率因子; S_V 为曲线垂直方向漂移量; i 代表前轮 f 或后轮 r ; j 代表左轮 L 或右轮 R 。 Y 方向合外力为

$$\sum F_Y = (F_{wXfr} + F_{wXfl}) \sin \alpha + F_{wYrR} + (F_{wYrL} + F_{wYlL}) \cos \alpha + F_{wYrL} \quad (16)$$

绕 X 轴合外力矩为

$$\sum M_X = l_f (F_{sfl} - F_{sfr}) / 2 + l_r (F_{srl} - F_{srr}) / 2 + m_s gh \delta \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{sfl} &= K_{sf} (U_L - \frac{l_f}{2} \delta) + C_{sf} (\dot{U}_L - \frac{l_f}{2} p) + \frac{m_s gb}{2(a+b)} \\ F_{sfr} &= K_{sf} (U_R + \frac{l_f}{2} \delta) + C_{sf} (\dot{U}_R + \frac{l_f}{2} p) + \frac{m_s gb}{2(a+b)} \\ F_{srl} &= K_{sr} (U_L - \frac{l_r}{2} \delta) + C_{sr} (\dot{U}_L - \frac{l_r}{2} p) + \frac{m_s gb}{2(a+b)} \\ F_{srr} &= K_{sr} (U_R + \frac{l_r}{2} \delta) + C_{sr} (\dot{U}_R + \frac{l_r}{2} p) + \frac{m_s gb}{2(a+b)} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式中, U_L 、 U_R 分别为左右侧悬架运动位移; K_{si} 为悬架刚度系数; C_{si} 为悬架阻尼系数; δ 为车身侧倾角度; l_f 、 l_r 分别为前后轮距; a 、 b 分别为坐标原点 O 与前后轴距。

绕 Z 轴合外力矩为

$$\begin{aligned} \sum M_Z &= \frac{l_f}{2} (F_{wXrR} - F_{wXrL}) \cos \alpha + \frac{l_f}{2} (F_{wYlL} - F_{wYrR}) \sin \alpha + a (F_{wXlL} + F_{wXrR}) \sin \alpha + \\ &\quad a (F_{wYlL} + F_{wYrR}) \cos \alpha + \frac{l_r}{2} (F_{wXrR} - F_{wXrL}) - b (F_{wYrL} + F_{wYrR}) \end{aligned} \quad (19)$$

当悬架力 $F_{sij} \leq 0$ 或 $v_x/v_y > \int r$ 时, v_x 为车辆通过此弯道最大曲率处的最大速度,即通过此弯道的安全车速。

5 实验验证

基于上述研究,本文开发了超视界路况下的网联汽车辅助驾驶系统。选取干燥沥青弯道和湿滑雪地弯道为实验路况,如图6所示。



(a) 干燥沥青弯道

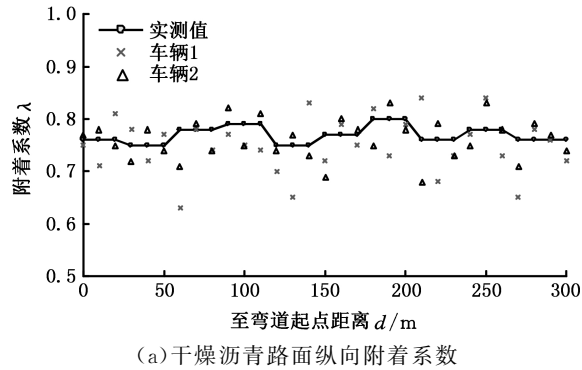
(b) 湿滑雪地弯道

图6 实验弯道

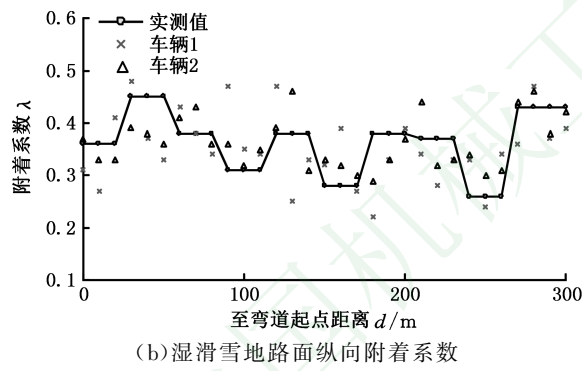
Fig.6 The experimental bend

在车载单元开启和关闭情况下,各选取10名具有相似驾驶习惯人员和2辆实验车,分别测试车辆行驶状态。由图7和图8可以发现,由于受

到车辆运动状态等因素影响,路面附着系数和横向坡度单次实验测量值存在一定误差,通过多次测量并进行数据校正与融合后,可以有效减小误差,提高测量准确度。



(a)干燥沥青路面纵向附着系数



(b)湿滑雪地路面纵向附着系数

图 7 路面附着系数实验测量结果

Fig.7 Experimental measurement result of road adhesion coefficient

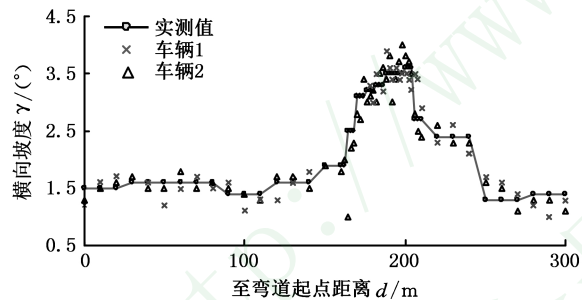


图 8 干燥沥青路面横向坡度实验测量结果

Fig.8 Experimental measurement result of transverse slope of dry asphalt road surface

弯道曲率实验测量结果如图 9 所示,可以发现,由于采用 GPS 方式测量弯道曲率,故精度较高,实验测量误差较小。

干燥沥青弯道(曲率为 0.078)路况下,车辆以 15 m/s 左右速度进入弯道前,10 名驾驶员制动或减速时车辆位置与车载单元告警时车辆位置对比如图 10 所示。辅助驾驶系统可以根据车辆进入弯道前的车速情况提前对驾驶员进行警示预告,并且在车载单元中可设置告警提前时间值。

干燥沥青弯道(曲率为 0.057)路况下,驾驶员预判最大安全车速与辅助驾驶系统理论计算最大

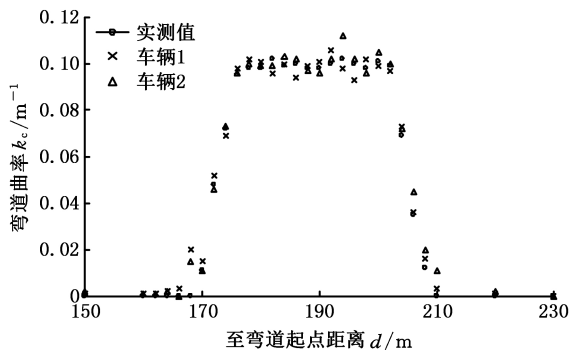


图 9 弯道曲率实验测量结果

Fig.9 Experimental measurement result of road curvature

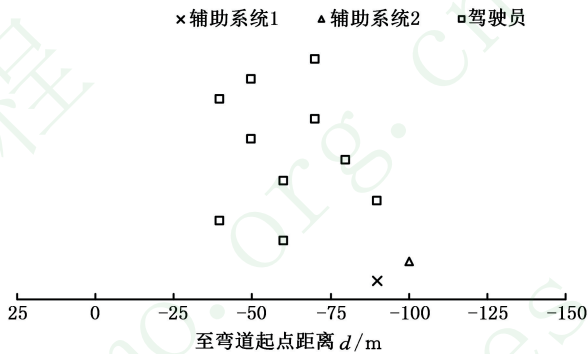


图 10 预警时车辆位置对比

Fig.10 Vehicle location comparison during warning

安全车速对比如图 11 所示。可以发现,不同驾驶员预判车速差别较大,保守型驾驶员预判车速较慢,激进型驾驶员预判车速较快。

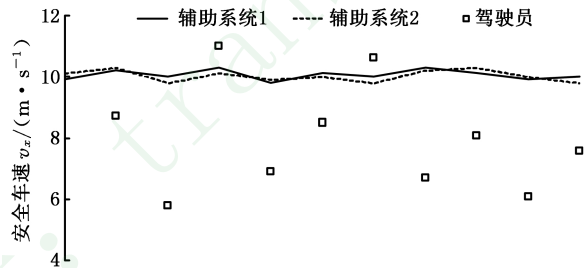


图 11 弯道预判最大安全车速对比

Fig.11 Predicted maximum safe speed comparison on bends

6 结论

超视界路况下的网联汽车辅助驾驶系统可以将超视界路况信息提前准确地共享给驾驶员,防止因路况不明而错误操作车辆发生碰撞、失稳、侧翻等危险事故,保证车辆安全行驶。本文提出的多车辆测量数据的路况信息融合与校正方法,有效剔除了无效信息干扰,提高了路面附着系数、道路曲率、路面坡度测量准确度。建立的弯道安全车速计算模型充分考虑了路面附着系数、道路曲率、路面坡度等因素对车辆行驶速度的影响。

本文的研究基于 4G 通信技术进行实车试验,数据传输延迟较大,故采用降低试验车速的方

式以减少网络通信延迟影响。在 5G 通信技术普及应用后,能够有效缩短数据传输延迟时间,进一步研究较高车速下该方法及系统的应用效果。

参考文献:

[1] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2018)[R]. 北京:公安部交通管理科学研究所, 2019.
The Ministry of Public Security Traffic Management Bureau. Annual Report of Road Traffic Accidents Statistics of the People's Republic of China (2018) [R]. Beijing:Traffic Management Research Institute of the Ministry of Public Security, 2019.

[2] 靳立强, 石冠男, 孔德隽, 等. 基于零力矩点指标和侧翻时间算法的车辆侧翻预警[J]. 汽车工程, 2017, 39(3): 281-287.
JIN Liqiang, SHI Guannan, KONG Dejun, et al. Vehicle Rollover Warning Based on Zero-moment Point Indicator and Time-to-rollover Algorithm [J]. Automotive Engineering, 2017, 39 (3): 281-287.

[3] MCCANN K, FONTAINE M D. Assessing Driver Speed Choice in Fog with the Use of Visibility Data from Road Weather Information Systems [J]. Transportation Research Record, 2016, 2551: 90-99.

[4] 朱冰, 朴奇, 赵健, 等. 基于路面附着系数估计的汽车纵向碰撞预警策略[J]. 汽车工程, 2016, 38(4): 446-452.
ZHU Bing, PARK Qi, ZHAO Jian, et al. Vehicle Longitudinal Collision Warning Strategy Based on Road Adhesive Coefficient Estimation[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(4): 446-452.

[5] KIM W. Adaptive Variable Weights Tuning in an Integrated Chassis Control for Lateral Stability Enhancement[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 2016, 40(1): 103-111.

[6] WANG Y, CAI Y, CHEN L. Design of Intelligent and Connected Vehicle Path Tracking Controller Based on Model Predictive Control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(8): 136-144.

[7] 李国强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
LI Keqiang, DAI Yifan, LI Shengbo, et al. State-of-the-art and Technical Trends of Intelligent and Connected Vehicles[J]. Journal of Automotive Safe-

ty and Energy, 2017, 8 (1): 1-14.

[8] 陈杰, 李亮, 宋健. 基于 LTV-MPC 的车辆稳定性控制研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(3): 308-316.
CHEN Jie, LI Liang, SONG Jian. A Study on Vehicle Stability Control Based on LTV-MPC [J]. Automotive Engineering, 2016, 38 (3): 308-316.

[9] ACOSTA M, KANARACHOS S, BLUNDELL M. Road Friction Virtual Sensing: a Review of Estimation Techniques with Emphasis on Low Excitation Approaches[J]. Applied Sciences-Basel, 2017, 7 (12): 1-47.

[10] KHALEGHIAN S, EMAMI A, TAHERI S. A Technical Survey on Tire-road Friction Estimation [J]. Friction, 2017, 5(2): 123-146.

[11] HAN K, LEE E, CHOI M, et al. Adaptive Scheme for the Real-time Estimation of Tire-road Friction Coefficient and Vehicle Velocity[J]. IEEE ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22 (4): 1508-1518.

[12] MORRIS C M, DONNELL E T. Passenger Car and Truck Operating Speed Models on Multilane Highways with Combinations of Horizontal Curves and Steep Grades[J]. Journal of Transportation Engineering, 2014, 140(1): 1-11.

[13] CVITANIC D, MALJKOVIC B. Operating Speed Models of Two-lane Rural State Roads Developed on Continuous Speed Data[J]. Tehnicki Vjesnik-Technical Gazette, 2017, 24(6): 1915-1921.

[14] 孙川, 吴超仲, 褚端峰, 等. 弯道安全车速计算改进模型研究[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 101-108.
SUN Chuan, WU Chaozhong, CHU Duanfeng, et al. Improved Model Study of Safety Speed Calculation in Curves [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (8): 101-108.

[15] JEONG C H, KIM J Y, JUNG D H. Research on Vehicle Stability Technology Based on Wheel Force [J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 16(3): 435-445.

(编辑 陈 勇)

作者简介:张洪昌,男,1980年生,副教授。研究方向为汽车电控系统研发、车联网技术应用等。E-mail:zhanghc@whut.edu.cn。
曾 娟(通信作者),女,1973年生,副教授。研究方向为汽车主/被动安全技术。E-mail:zhc112@126.com。