

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003253

震源车车队跟随控制方法的研究

李建良¹ 杨宁¹ 南忠良¹ 陶知非²

(1. 天津科技大学 电子信息与自动化学院 天津 300222;
2. 中国石油集团 东方地球物理勘探有限责任公司 涿州 072750)

摘要:为实现在野外施工过程中多辆震源车以车队形式跟随行驶,采用领航驾驶模型,采取实时记录领航车行驶的自身状态信息,即时发送给后续车辆进行自动跟随行驶的方法。自动跟随车辆根据获取的速度和航向角等信息进行控制,首先提出了融合PID控制和模型预测控制(MPC)的控制算法,并设计控制器,确定了控制算法的执行规则,以保证车辆间的安全距离。通过Carsim/MATLAB仿真验证,将提出的控制方法与线性二次型控制(LQR)进行对比实验,结果表明控制方法能够在纵向控制上满足加速、匀速、降速等工况的跟随行驶,在横向控制上能够进行180°和90°等弯道跟随行驶,且与领航车保持良好的安全距离。

关键词:自动跟随;横纵向控制;车间通信;仿真实验

中图分类号: TP12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

Study on the following control method of the source vehicle fleet

Li Jianliang¹ Yang Ning¹ Nan Zhongliang¹ Tao Zhifei²

(1. College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China;
2. Bureau of Geophysical Prospecting INC. China National Petroleum Corporation, Zhuozhou 072750, China)

Abstract: In order to realize that multiple seismic source vehicles follow in the form of a fleet during the field construction, this paper adopts a pilot driving model to record the state information of the pilot vehicle in real time and send it to subsequent vehicles for automatic follow-up driving. The auto-following vehicle is controlled according to the acquired speed and heading angle. This paper firstly proposes a control algorithm that combines PID control and model predictive control (MPC), and designs a controller to determine the execution rules of the control algorithm to ensure that the vehicle Safe distance. Through Carsim/Matlab simulation verification, the control method proposed in this paper is compared with linear quadratic control (LQR). The results show that the control method proposed in this paper can meet the following driving conditions in acceleration, uniform speed, and deceleration in the longitudinal control, and can follow the corners such as 180 degrees and 90 degrees in the lateral control, and maintains good performance with the pilot vehicle. safe distance.

Keywords: automatic following; horizontal and vertical control; workshop communication; simulation

0 引言

震源车作为地震勘探领域的特种车辆^[1],常在野外环境下工作,使用多辆震源车协同工作采集地震波信号,为避免损伤工作人员的健康,降低人力资源成本,从而研究一种自动驾驶跟车技术是很有必要的。

自动跟随行驶其中关键问题是控制问题,控制又包括纵向控制和横向控制。随着人工智能的兴起,无人驾驶技术也在迅猛的发展。在车辆的横向控制研究中,广泛关注的问题是转向控制的精确性。刁勤晴等^[2]针对自动驾驶汽车在大曲率转向工况下路径跟踪精度低、且易出现提前转向的问题进行了深入研究,提出一种双点预测式横向模糊控制方法。王家恩等^[3]提出了一种跟踪期

望横摆角速度的车辆横向控制方法,基于7个自由度的车辆动力学模型,设计滑模控制器跟踪期望横摆角速度,使得车辆稳定地跟踪目标路径。Liu等^[4]对现有自动驾驶横向运动控制过程中预瞄点的确定方式进行了介绍,并提出了一种改进的预瞄点确定方法。田涛涛等^[5]提出了一种无模型自适应控制方法控制无人驾驶汽车的横向运动,获得了很好的效果,并且实际应用于清华大学无人驾驶汽车实验平台,在横向控制方面做出了很大的突破。葛媛媛等^[6]针对系统参数的不确定性和外部扰动,提出了一种基于光滑非线性饱和函数的自适应模糊滑模轨迹跟踪控制算法。张炳力等^[7]结合PID和滑模控制进行远近点的预瞄,用模糊控制方法进行方向盘控制,最终建立了预瞄轨迹跟踪系统。以上文献都考虑了车辆的横向控制,可以看出无人车横向控制的研究已经很成熟。

在车辆纵向控制中,主要是车辆速度和间距的控制。Akca等^[8]基于进化的Takagi-Sugeno模糊控制ETS (evolving takagi-sugeno)建立驾驶员模型实现自动驾驶汽车的纵横向综合控制。Nouveliere等^[9]考虑了车辆之间的距离和车辆的速度有关,使用一个二阶滑模技术去控制实验车辆的纵向行驶,使用MATLAB仿真软件和一个配有传感器和执行机构的车辆原型进行仿真验证,可以很好地实现车辆行驶和停止、避障停车以及多车跟随。Li等^[10]使用了反馈控制算法实现了两轮驱动型无人车的纵向跟随行驶,两无人车之间的间距设置为一个固定值,两无人车之间的相对角度也是恒定的。Peters等^[11]考虑了跟随车的行驶不仅和其前面一辆车有关,还与第一辆车有关,实现了具有恒定间隔策略的循环纵向队列保持稳定行驶。李世豪等^[12]设计了基于模型预测控制(MPC)汽车的自适应控制,以车辆动力学模型为基础,提出了模型预测控制为上层,积分分离式PID控制为下层的分层结构,实现了汽车纵向行驶的六种工况。

综上所述可知,模型预测控制善于处理多输入多输出系统问题,能够进行带约束条件的控制优化,具有向前考虑未来时间步的有限时域优化的特点,相较传统PID控制和现代线性二次型控制(LQR)控制在自动驾驶的横向预测控制方向具有良好的表现。

本文提出了基于车辆间通信的方式,将车辆控制所需的速度和位姿信息作为期望,并设计了融合PID和模型预测的控制算法,由于震源车具有质量大,速度慢的特点,采用汽车运动学模型,经过Carsim/MATLAB联合仿真,且与经典的LQR控制进行对比实验,结果表面,本文设计的控制算法能够达到很好的控制效果。

1 领航驾驶模型

本文采用领航驾驶模型方式,如图1所示,前方的领

航车为有人驾驶,通过记录领航车的GPS点以及对应时刻的速度、航向角等信息。通过车间通信的方式传输给主车及后方车辆作为期望值,主车接收到信息且与领航车保持一定的安全距离时,再进行跟随行驶。此模型能够很好的节省经济成本,在跟随效果上也具有良好的实时性。

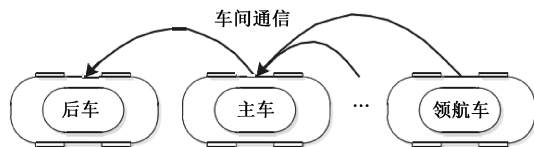


图1 领航驾驶模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of pilot driving model

2 自动跟随行驶纵横向控制算法

车辆自动跟随控制方法的研究主要有两类,一类只研究车辆纵向跟随控制,另一类则是考虑车辆横向运动的车辆横、纵向综合跟随控制^[13]。通常纵向控制只考虑车速及与领航车的距离,常见为ACC自适应巡航算法^[14]。横向控制为考虑航向角或横摆角的车速与方向的综合控制,常见的有模型预测控制,纯跟踪算法控制^[15]和预瞄式控制^[16]。

本文针对震源车车队跟随行驶,综合考虑车辆的纵向和横向运动提出了融合PID控制和模型预测控制的方法,PID控制算法计算量少能快速准确的实现期望的跟随速度,模型预测控制能充分的考虑车辆模型的约束的问题,结合当前的状态信息预测下一时刻的航向角输出。同时,本文采取的是车间通信的方式,领航车记录的GPS值在一段时间后传给主车及后方车辆,已经形成了部分轨迹,符合模型预测控制的轨迹跟踪问题。领航车记录并传输的车辆位置信息与主车车辆当前位置呈现线性误差,构成了控制算法的基础。

2.1 纵向车速控制算法

纵向控制即是不涉及方向盘的车速控制,拟对比领航车的记录数据与主车的车速之间的偏差,通过设计车速反馈控制器来减小车速的偏差,以实现速度跟随行驶的目的。

车速偏差为:

$$E_v = U_f - U \quad (1)$$

式中: U_f 为领航车车速; U 为本车车速。

车速控制采用油门开度与制动踏板不相容的组合控制输入,假设驾驶员不会同时踩下油门与制动踏板^[15]。车速控制器用PID控制算法得到控制量 U_s :

$$U_s = K_p E_v + K_d \dot{E}_v + K_i \int_0^{\tau} E_v d\tau \quad (2)$$

式中: K_p 、 K_d 、 K_i 分别为车速控制的比例、微分、积分系数,车速的加速和减速分别用控制输入 U_s 的正负号表示。

2.2 横向控制算法

基于车辆运动学、动力学模型结合最优化理论的方法如 LQR 和 MPC 在自动驾驶车辆上得到了广泛的应用,模型预测控制是现代控制算法之一,基于预先设定的系统模型,通过滚动优化,解决优化问题以求解出控制输入^[17],根据资料做如下公式推导。

1) 汽车的运动学模型

本文采用的是依据汽车运动学设计轨迹跟踪控制器,汽车的运动学模型如图 2 所示。

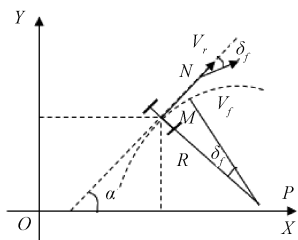


图 2 简化的汽车运动学模型

Fig. 2 Simplified car kinematics model

运动学方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \\ \frac{\tan\delta}{l} \end{bmatrix} v \quad (3)$$

其中, (x, y) 为车辆后轴中心的坐标; α 为车辆的航向角; δ 为车辆的前轮偏角; v 为车辆的后轴速度; l 为车辆的轴距。

系统可被看作一个输入为 $u(v, \delta)$ 和状态量 $\mathbf{X}(x, y, \alpha)$ 为的控制系统。其一般形式为:

$$\dot{\mathbf{X}} = f(u, \delta) \quad (4)$$

通过泰勒展开进行线性化处理得到:

$$\dot{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \dot{x} - \dot{x}_r \\ \dot{y} - \dot{y}_r \\ \dot{\alpha} - \dot{\alpha}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -v_r \sin\alpha_r \\ 0 & 0 & v_r \cos\alpha_r \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - x_r \\ y - y_r \\ \alpha - \alpha_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\alpha_r & 0 \\ \sin\alpha_r & 0 \\ \frac{\tan\delta_r}{l} & \frac{v_r}{l \cos^2\delta_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v - v_r \\ \delta - \delta_r \end{bmatrix} \quad (5)$$

为了应用于模型预测控制器的设计,对式(5)进行离散化处理:

$$\tilde{\mathbf{X}}(k+1) = \mathbf{A}_{k,t} \tilde{\mathbf{X}}(k) + \mathbf{B}_{k,t} \tilde{\mathbf{u}}(k) \quad (6)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A}_{k,t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -v_r \sin\alpha_r T \\ 0 & 1 & v_r \cos\alpha_r T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{k,t} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_r T & 0 \\ \sin\alpha_r T & 0 \\ \frac{\tan\delta_r}{l} T & \frac{v_r}{l \cos^2\delta_r} T \end{bmatrix}, T \text{ 为采样时间。}$$

2) 目标函数设计

为了能够使主车快速且准确的跟踪领航车发过来的轨迹,目标函数需要加入状态量的偏差,同时对控制量进行优化。使用软约束方法^[19],设计如下目标函数:

$$J(k) = \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(k+i|t) - \eta_{ref}(k+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c-1} \|\Delta U(k+i|t)\|_R^2 + \rho \varepsilon^2 \quad (7)$$

式中: N_p 为预测时域; N_c 为控制时域; ρ 为权重系数; ε 为松弛因子; Q 和 R 为权重矩阵。式(7)有 3 项构成,第 1 项为输出量 η 与参考量 η_{ref} 之间的差值,反映了系统对参考轨迹的跟踪准确性;第 2 项用于估计在控制时域 N_c 内的控制量改变的大小和速度,约束系统使其输入量平稳变化;第 3 项是松弛因子项,防止执行过程中没有可行解的情况^[20]。

车辆通过线性偏差预测车辆未来时刻的输出,将式(6)变换如下:

$$\xi(k, t) = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}(k|t) \\ \mathbf{u}(k-1|t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

得到新的状态空间方程:

$$\begin{cases} \xi(k+1|t) = \tilde{\mathbf{A}}_{k,t} \xi(k|t) + \tilde{\mathbf{B}}_{k,t} \Delta \mathbf{U}(k|t) \\ \eta(k|t) = \tilde{\mathbf{C}}_{k,t} \xi(k|t) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\tilde{\mathbf{A}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{k,t} & \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{0}_{m \times n} & \mathbf{I}_m \end{bmatrix}$, $\tilde{\mathbf{B}}_{k,t} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{k,t} \\ \mathbf{I}_m \end{bmatrix}$, n 为状态量维度, m 为控制量维度。

经过推导,可以得到系统的输出预测表达式:

$$\mathbf{Y}(t) = \psi \xi(t|t) + \Theta \Delta \mathbf{U}(t) \quad (10)$$

$$\text{式中: } \mathbf{Y}(t) = \begin{bmatrix} \eta(t+1|t) \\ \eta(t+2|t) \\ \vdots \\ \eta(t+N_c|t) \\ \vdots \\ \eta(t+N_p|t) \end{bmatrix}, \psi = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^1 \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^2 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_c} \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{C}}_{t,t} \tilde{\mathbf{A}}_{t,t}^{N_p} \end{bmatrix},$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \tilde{C}_t \tilde{B}_t & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{B}_t & 0 & 0 \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c-1} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c-2} \tilde{B}_t & \cdots & \tilde{C}_t \tilde{B}_t \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_c-1} \tilde{B}_t & \cdots & \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{B}_t \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-1} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-2} \tilde{B}_t & \cdots & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-N_c-1} \tilde{B}_t \end{bmatrix},$$
$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u(t|t) \\ \Delta u(t+1|t) \\ \cdots \\ \Delta u(t+N_c|t) \end{bmatrix}.$$

将式(10)代入式(7)即可到完整的目标函数。

3) 约束条件

为了防止控制量变化的过大,需要考虑控制量的极限约束和控制增量的约束,形式如下:

$$\begin{cases} u_{\min}(t+k) \leq u(t+k) \leq u_{\max}(t+k) \\ \Delta u_{\min}(t+k) \leq \Delta u(t+k) \leq \Delta u_{\max}(t+k) \\ Y_{\min}(t) \leq Y(t) \leq Y_{\max}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $Y(t)$ 为输出量的约束,防止前轮转角超出车辆的最大行程。

2.3 控制算法的执行规则

本文采用领航车传输自身参数信息给后方车辆的方式进行工作,因此为避免出现主车及后方车辆刚收到领航车的信息就进行跟随行驶,存在车间距离的安全隐患,设置了如下规则,流程如图 3 所示。

- 1) 领航车采取有人驾驶的方式行驶,同时记录领航车的速度和航向角等状态信息;
- 2) 将采集的数据作为期望发送给后方自动跟随的车;
- 3) 主车及后方车辆首先通过测距雷达检测领航车是否在安全距离之外,若小于安全距离,不进行控制;
- 4) 主车及后方车辆检测到领航车距离大于安全距离时,根据接收到的数据信息作为期望值,通过控制器控制车辆行驶。

3 仿真结果及分析

针对震源车具有质量大,速度低的特点,本实验尽量拟合真实的车况进行实验。震源车的参数如表 1 所示。

以表 1 为参照设置了图 4 所示的规划路径,包含直线路段和左右转弯路段。

由图 4 可知, a 、 c 、 e 、 g 、 i 路段为直线, b 为半径 15 m 的 180° 的掉头路段, d 为半径 10 m 的 90° 右转弯路段, f 、

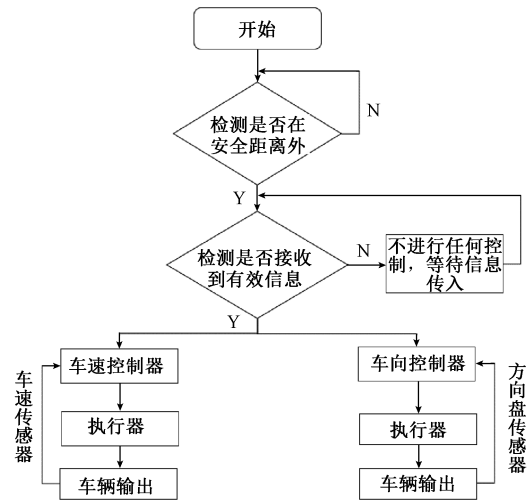


图 3 控制执行流程

Fig. 3 Control execution flow chart

表 1 震源车真实尺寸

Table 1 The true dimensions of the source vehicle

项	尺寸/m
车身长度	11
车身宽度	2.4
前后轮间距	6.7
车轮半径	0.65

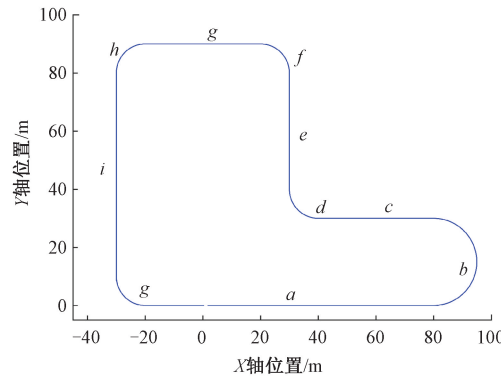


图 4 领航车路径规划

Fig. 4 Path planning of the pilot car

h 、 g 为 90° 左转弯路段。设置此路径,能够有效的反映车辆的纵向和横向控制跟随效果。

如图 5 所示, MPC 横向控制明显比 LQR 的横向控制更加精确,更靠近真实的路径。主要原因就是来自与模型预测控制的预测功能,它能够进行向前时间步的优化,而 LQR 控制则不能;同时在直线的纵向跟随上,融合的控制算法比单独的 LQR 控制具有更好的性能。

如图 6 所示, MPC 在横摆角控制效果上更优于 LQR 控制,正是因为 MPC 的预测功能,使得 LQR 控制滞后于 MPC 控制,且在平稳性上亦不如 MPC 控制的效果。

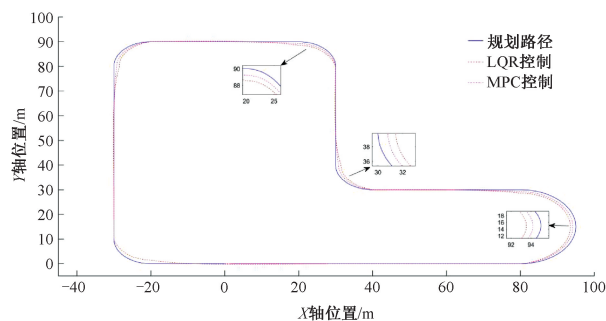


图5 MPC 横向控制和 LQR 横向控制对比

Fig. 5 Comparison of MPC horizontal control and LQR horizontal control

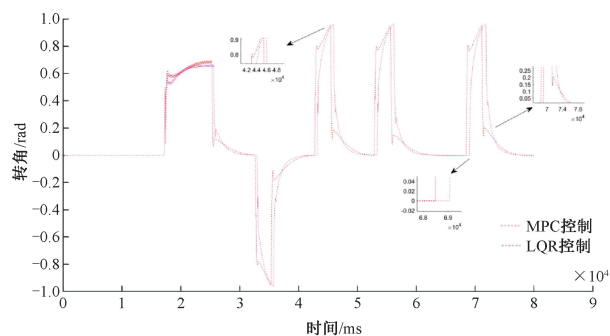


图6 MPC 和 LQR 横摆角控制对比

Fig. 6 Comparison of yaw angle control between MPC and LQR

如图7所示,汽车的纵向速度能够很好的进行跟随行驶,同时包括了加速、匀速、降速等阶段,都表现了非常好的跟随能力。

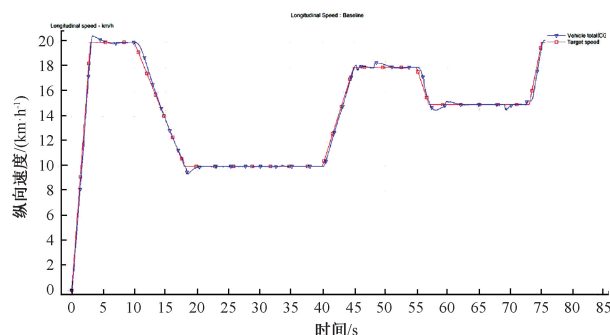


图7 纵向速度控制

Fig. 7 Longitudinal speed control

如图8所示,车辆在跟随行驶过程中,由于弯道的存在,导致激光雷达在检测时候存在盲区,因此检测距离出现上下2 m 的浮动范围,其中与领航车最近的距离为4.75 m,依然属于安全的跟车距离。

4 结 论

本文重点解决自动跟随行驶的横纵向控制问题,

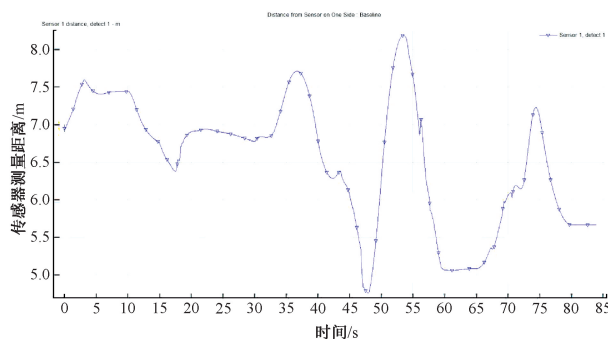


图8 跟随车与领航车之间检测距离

Fig. 8 The detection distance between the following car and the pilot car

提出了融合 PID 控制和模型预测控制的理论方法。采取领航驾驶模型的跟随方式,首先对车辆进行运动学的分析,根据震源车的实际参数,设计了横纵向控制器,使用 Carsim/MATLAB 联合仿真实验,对比了 LQR 与 MPC 在横向控制跟随上的效果,结果表明,在横向跟随上 MPC 明显的优于 LQR,能够更优先更平缓的进入弯道跟随。同时在纵向跟随上,实验包括了加速、匀速、减速阶段,结果表明,本文提出的控制方法能够达到很好的跟随效果,且与领航车保持在要求的安全距离范围。

参考文献

- [1] 李琴,郭亮,黄志强,等. 震源车主动防侧翻预警系统研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(4): 50-56.
LI Q, GUO L, HUANG ZH Q, et al. Study on active anti-rollover warning system for vibrator vehicle [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(4): 50-56.
- [2] 刁勤晴,张雅妮,朱凌云. 双点预瞄式智能车大曲率路径的横向控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2019, 33(4): 32-40.
DIAO Q Q, ZHANG Y N, ZHU L Y. A Lateral fuzzy controller of intelligent vehicles with double look-ahead points for large curvature roads[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2019, 33(4): 32-40.
- [3] 王家恩,陈无畏,王檀彬,等. 基于期望横摆角速度的视觉导航智能车辆横向控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 108-115.
WANG J N, CHEN W W, WANG T B, et al. Vision guided intelligent vehicle lateral control based on desired yaw rate[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(4): 108-115.

- [4] LIU R, DUAN J. A path tracking algorithm of intelligent vehicle by preview strategy [C]. Control Conference, IEEE, 2013.
- [5] 田涛涛, 侯忠生, 刘世达, 等. 基于无模型自适应控制的无人驾驶汽车横向控制方法[J]. 自动化学报, 2017, 43(11): 1931-1940.
TIAN T T, HOU ZH SH, LIU SH D, et al. Model-free adaptive control based lateral control of self-driving car[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43 (11): 1931-1940.
- [6] 葛媛媛, 张宏基. 基于自适应模糊滑模控制的机器人轨迹跟踪算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 746-755.
GE Y Y, ZHANG H J. Trajectory tracking algorithm for robot based on adaptive fuzzy sliding mode control[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5): 746-755.
- [7] 张炳力, 吕敏煜, 程进, 等. 两点预瞄轨迹跟踪横向控制系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(5): 158-163.
ZHANG B L, LV M Y, CHENG J, et al. Track tracking lateral control system with two-point preview[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(5): 158-163.
- [8] AKCA S, ERTUGRUL S. ETS fuzzy driver model for simultaneous longitudinal and lateral vehicle control[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(5): 781-794.
- [9] NOUVELIÈRE L, MAMMAR S D. Experimental vehicle longitudinal control using a second order sliding mode technique. Control Engineering Practice, 2007, 15(8): 943-954.
- [10] LI R M, ZHANG L W, HAN L, et al. Multiple vehicle formation control based on robust adaptive control algorithm. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(2): 41-51.
- [11] PETERS A A, MIDDLETON R H, MASON O. Cyclic interconnection for formation control of 1-D vehicle strings[J]. European Journal of Control, 2016, 27: 36-44.
- [12] 李世豪. 基于 MPC 的汽车自适应巡航控制策略研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
LI SH H. Research on vehicle adaptive cruise control strategy based on MPC [D]. Xi ' an: Chang ' an University, 2019.
- [13] 张立威. 基于领航跟随法的无人车跟随控制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
ZHANG L W. Unmanned cars following control by leader-follower method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [14] 王凯强. 自适应巡航控制算法及策略研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2019.
WANG K Q. Research on adaptive cruise control algorithm and strategy[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2019.
- [15] 段建民, 杨晨, 石慧. 基于 Pure Pursuit 算法的智能车路径跟踪[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(9): 1301-1306.
DUAN J M, YANG CH, SHI H. Path tracking based on pure pursuit algorithm for intelligent vehicles[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42 (9): 1301-1306.
- [16] 赵凯, 朱愿, 冯明月, 等. 基于多点序列预瞄的自动驾驶汽车路径跟踪算法研究[J]. 汽车技术, 2018(11): 1-5.
ZHAO K, ZHU Y, FENG M Y, et al. Research on path tracking algorithm of autonomous vehicles based on multi-point sequence preview [J]. Automobile Technology, 2018(11): 1-5.
- [17] 姜勇, 解晓琳. 汽车自动驾驶的方向与车速控制算法设计[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(34): 10213-10220.
JIANG Y, XIE X L. Design of steering and speed control algorithms for automatic driving of automobiles [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13 (34): 10213-10220.
- [18] 杨大磊, 付伯轩, 付行. 基于模型预测控制的自动驾驶车辆横纵向协调控制[J]. 汽车实用技术, 2019(11): 20-22.
YANG D L, FU B X, FU X. Lateral and longitudinal coordinated control of autonomous vehicles based on model predictive control [J]. Automobile Applied Technology, 2019(11): 20-22.
- [19] 李升波, 王建强, 李克强. 软约束线性模型预测控制系统的稳定性方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(11): 1848-1852.
LI SH B, WANG J Q, LI K Q. Stabilization of linear predictive control systems with softening constraints[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(11): 1848-1852.
- [20] 李家齐. 基于模型预测控制的路径跟踪控制器模型仿真[J]. 汽车实用技术, 2020(1): 42-45.
LI J Q. Modeling and simulation of path tracking controller model based on model predictive control[J]. Automobile Applied Technology, 2020(1): 42-45.

作者简介



李建良, 1996 年于天津大学获得学士学位, 2016 年于河北工业大学获得硕士学位, 现为天津科技大学副教授, 主要研究方向为检测技术及主动隔振。

E-mail: LJL@tust.edu.cn

Li Jianliang received his B. Sc. degree from Tianjin University in 1996 and M. Sc. degree from Hebei University of technology in 2016. Now he is an associate professor at Tianjin University of science and technology. His main

research direction is detection technology and active vibration isolation.



杨宁, 2017 年于天津科技大学获得学士学位, 现为天津科技大学研究生, 主要研究方向为自动驾驶。

E-mail: ning.yang@silict.com

Yang Ning, who obtain his B. Sc. degree from Tianjin University of science and technology in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Tianjin University of Science and Technology. His main research direction is autonomous driving.