

基于模糊自适应PID的无人驾驶车辆路径跟踪控制

张佳奇, 张 涛, 杨佳龙, 葛平淑, 肖 鹏
(大连民族大学 机电工程学院, 辽宁 大连 116605)

摘 要:在无人驾驶车辆路径跟踪控制过程中,针对控制对象发生变化时传统PID控制器难以对其控制参数进行实时调整的问题,提出一种以预瞄理论为基础的模糊自适应PID控制方法。以前轮转角作为控制系统的输入,设计基于横向偏差和航向偏差的模糊自适应PID路径跟踪控制器。分析量化因子和比例因子的选取原则,利用模糊理论对PID参数进行自适应调整;基于Carsim与Simulink对所提算法进行联合仿真实验。仿真结果表明:模糊自适应PID较传统PID改善了控制器的动态性能且具有较好的自适应能力。

关键词:无人驾驶车辆;路径跟踪;预瞄理论;模糊自适应PID

中图分类号:U471.15 **文献标志码:**A

Path Tracking Control of Unmanned Vehicle Based on Fuzzy Adaptive PID

ZHANG Jia - qi, ZHANG Tao, YANG Jia - long, GE Ping - shu, XIAO Peng

(School of Electromechanical Engineering, Dalian Minzu University, Dalian Liaoning 116605, China)

Abstract:In the process of unmanned vehicle path tracking control, the traditional PID controller is difficult to adjust its control parameters in real time when the control object changes. This paper proposes a fuzzy adaptive PID control method based on preview follower theory. The fuzzy adaptive PID path tracking controller based on the lateral deviation and course deviation is designed which takes the front wheel rotation angle as the input of the controller. The selection principle of quantization factor and proportion factor is analyzed, and the fuzzy theory is used to adjust PID parameters. The proposed algorithm is simulated based on CarSim and Simulink. The simulation results show that the fuzzy adaptive PID improves the dynamic performance of the controller and has better adaptive ability than traditional PID.

Key words:unmanned vehicle; path tracking; preview follower theory; fuzzy adaptive PID

路径跟踪控制问题是无人驾驶车辆领域中的重要研究内容之一,有利于降低交通事故,提高车辆主动安全性能。目前,路径跟踪控制模型主要分为预瞄跟随模型和智能控制模型两大类^[1]。预瞄跟随模型的基本原理是在路径前方设立预瞄

点,使车辆获取预瞄点所处位置信息,即未来路径曲率及行驶偏差,并根据这些信息控制无人驾驶车辆,以实现对目标道路的有效跟踪。控制算法大多采用PID控制、模糊控制、滑模控制及最优控制等^[2-4],其优点在于鲁棒性强且参数易调节,但

收稿日期:2021-01-14;最后修回日期:2021-03-12

基金项目:中国博士后科学基金项目(2018M641688);辽宁省教育厅科学研究经费项目(LJYT201915)。

作者简介:张佳奇(1996-),女,蒙古族,辽宁阜新人,大连民族大学机电工程学院硕士研究生,主要从事无人驾驶车辆路径跟踪控制研究。

通讯作者:葛平淑(1983-),女,山东五莲人,副教授,博士,主要从事智能车辆、汽车安全辅助驾驶研究,E-mail: gps@dlmu.edu.cn。

较少考虑车辆动力学和驾驶环境约束的影响。智能控制模型将智能控制算法引入驾驶员模型,目前主要有基于模糊逻辑^[5]、神经网络^[6]、模型预测^[7]和深度强化学习等算法^[8]。智能控制模型模拟人的思维能力,使系统更加智能化,但需要较大计算量,现阶段实时性不易达到。

综上,本文基于预瞄理论建立考虑纵向车速的运动学模型,以前轮转角作为控制系统的输入,设计基于横向偏差和航向偏差的模糊自适应PID路径跟踪控制算法。分析量化因子和比例因子的选取原则,利用模糊理论对PID参数进行自适应调整,基于Carsim与Simulink对所提算法进行联合仿真实验。

1 考虑纵向车速的车辆预瞄运动学建模

1.1 惯性坐标系下车体运动学模型

车辆与道路的相对运动关系如图1。

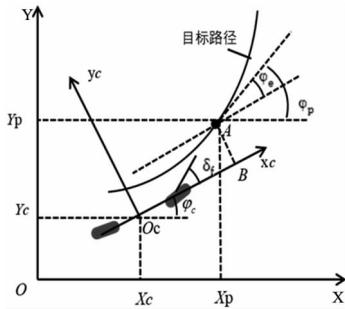


图1 车辆和道路的相对运动关系

在车辆坐标系中,假设车辆质心坐标为 (x_c, y_c) ,横坐标与X轴夹角为 φ_c ,则得到车辆的运动学模型如式(1)。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_c \\ \dot{Y}_c \\ \dot{\varphi}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_c & 0 \\ \sin\varphi_c & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ω_c 为车辆质心处的横摆角速度; v_c 为质心处的纵向速度。由公式(1)能够进一步推导出车辆下一时刻的行驶轨迹,设车辆目标道路上的预瞄点为A,坐标为 (X_p, Y_p) ,切线方向与X轴形成的夹角为 φ_p ,从而得出车辆的运动学模型如下:

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ \varphi_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_c & \sin\varphi_c & 0 \\ -\sin\varphi_c & \cos\varphi_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_p - X_c \\ Y_p - Y_c \\ \varphi_p - \varphi_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: x_e 为车辆前方预瞄距离; y_e 为车辆质心处与预瞄点之间的横向偏差; φ_e 为车辆质心处与预瞄点之间的航向偏差。

1.2 基于预瞄的转向角生成器

预瞄点 (X_p, Y_p) 处的道路曲率半径 R 与预瞄距离 x_e 和航向偏差 φ_e 之间的关系可以表示为

$$R = \frac{x_e}{2\sin\varphi_e} \quad (3)$$

车辆期望前轮转角:

$$\delta_f = \tan^{-1}(L/R) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)中得到:

$$\delta_f = \tan^{-1}(2L\sin\varphi_e/x_e) \quad (5)$$

航向误差 φ_e 可根据预瞄距离 x_e 和预瞄点处横向轨迹误差 y_e 表示:

$$\sin\varphi_e = y_e/x_e \quad (6)$$

预瞄距离 x_e 的大小与纵向车速 v_c 有关:

$$x_e = kv_c \quad (7)$$

式中, k 为调整比例系数。

将式(6)和式(7)代入式(5)中,可得前轮期望转角:

$$\delta_f = \tan^{-1}\left(\frac{2Ly_e}{k^2v_c^2}\right) \quad (8)$$

1.3 航向误差生成器

车辆当前质心点 O_c 加上预瞄距离 x_e 得到点B,点B在目标路径上的投影即为预瞄点A,从而得到当前目标方向 φ_p :

$$\varphi_p = \overline{O_cA} \quad (9)$$

车辆当前质心位置 O_c ,坐标为 (x_c, y_c) ,预瞄点A处坐标为 (X_p, Y_p) ,从而得到:

$$\varphi_p = \tan^{-1}\left(\frac{X_p - x_c}{Y_p - y_c}\right) \quad (10)$$

由(6)式和(8)式进一步得出航向偏差:

$$\varphi_e = \varphi_p - \delta_f \quad (11)$$

2 路径跟踪控制器设计

模糊自适应PID是在传统PID的基础上增加模糊控制规则库,根据建立好的规则对PID参数进行自适应调整。模糊控制在解决非线性及不确定问题上具有较好的控制效果。本文设计模糊自适应PID从而实现自动驾驶车辆的路径跟踪控制。控制框图如图2。

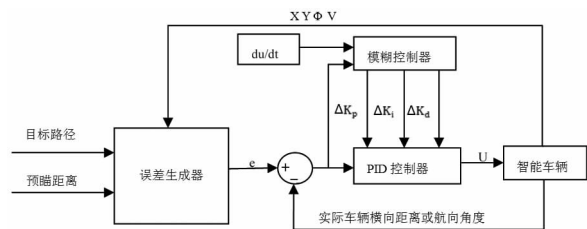


图2 模糊自适应PID路径跟踪控制框图

控制器输入分别为横向偏差 y_e 、横向偏差变化率 y_{ec} 、航向偏差 φ_e 及航向偏差变化率 φ_{ec} 。输出为 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 。将控制输入、输出的基本论域规划

为 13 个等级,控制输入输出采用三角形隶属度函数,中间隶属度函数较为陡直的区域分辨率高,控制灵敏度也比较高,输入、输出变量隶属度函数如图 3。

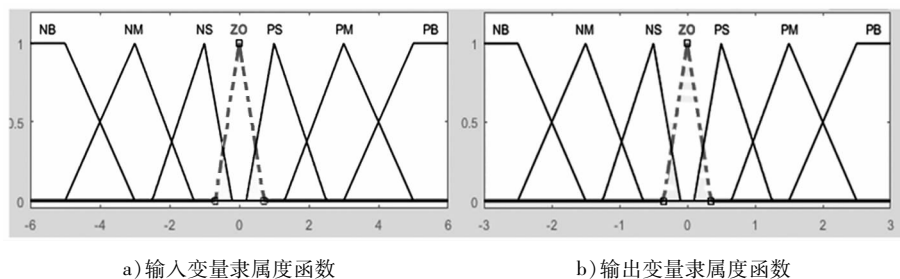


图3 输入、输出变量的隶属度函数

从汽车驾驶的经验角度制定出一套模糊控制规则。采用 if - then 语句进行模糊规则库的建立,具体可表示如下:

if y_e is NB and y_{ec} is NB

then ΔK_p is PB and ΔK_i is NB ΔK_d is PS

模糊自适应 PID 控制器计算自适应调整参数:

$$\begin{cases} k_p = K_p + k_1 \Delta K_p; \\ k_i = K_i + k_2 \Delta K_i; \\ k_d = K_d + k_3 \Delta K_d. \end{cases} \quad (12)$$

式中: K_p 、 K_i 、 K_d 为初始 PID 参数; k_1 、 k_2 、 k_3 为比例因子; ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 是经模糊规则调整得到的参数。

模糊自适应 PID 最终输出参数:

$$u(k) = (K_p + \Delta K_p) \times e(k) + (K_i + \Delta K_i) \times \sum_{i=0}^k e(k) + (K_d + \Delta K_d) \times [e(k) - e(k-1)] \quad (13)$$

式中, $e(k)$ 表示第 k 个采样时刻输入的偏差。

利用 Mamdani 的模糊推理方法,根据极大值极小值法得到模糊控制量的输出矢量,解模糊选取重心法,模型输出曲面如图 4。

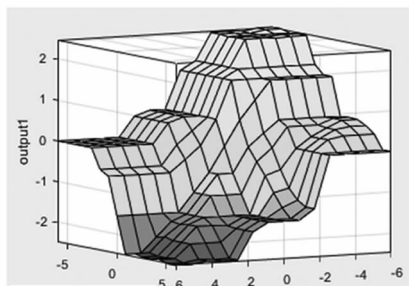


图4 模型输出曲面

在建立模糊规则库的基础上,对量化因子和比例因子的选取也做了相应的仿真分析。利用设定不同的航向误差范围,通过设定阈值,整定出车辆偏航误差大与误差小两种情况的比例因子与量

化因子。实验结果表明:

(1) 当路径跟踪偏差比较大时,此时应增加横向偏差对控制输出的影响,量化因子起主导作用,应加大横向偏差比例因子与航向误差比例因子的比值。控制偏差在阈值 45° 的仿真结果如图 5。

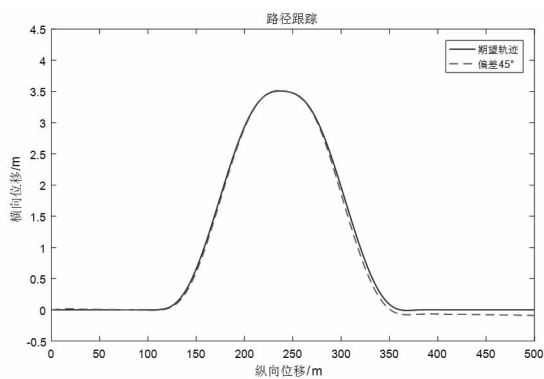


图5 偏差阈值 45° 时路径跟踪效果

(2) 当路径跟踪偏差较小时,控制量应着重考虑超调给系统带来的影响,要以系统稳定性为主要出发点,这时应加航向偏差相对横向偏差的控制权重,加大航向偏差的量化因子,减小横向偏差的量化因子,控制输出量的比例因子也应减小。控制偏差在阈值 12° 的仿真结果如图 6。

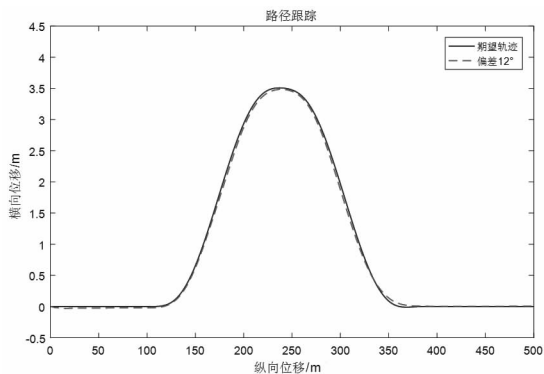


图6 偏差阈值 12° 时路径跟踪效果

3 基于 Carsim 与 Simulink 联合仿真的路径跟踪控制仿真

基于 CarSim 软件建立车辆模型,设置各子系统和行驶工况的参数。在 MATLAB/Simulink 中构建系统路径跟踪控制策略。在 CarSim 中设置控制变量的输入与输出,获取车辆实时动态响应。

CarSim 的输入接口为前轮转角,输出接口为航向角、质心纵向速度、质心坐标位置、车辆与目标道路的前视距离、前方道路目标点的位置等。在 Simulink 中建立转角生成器及路径跟踪控制器。联合仿真流程如图 7,控制策略如图 8。

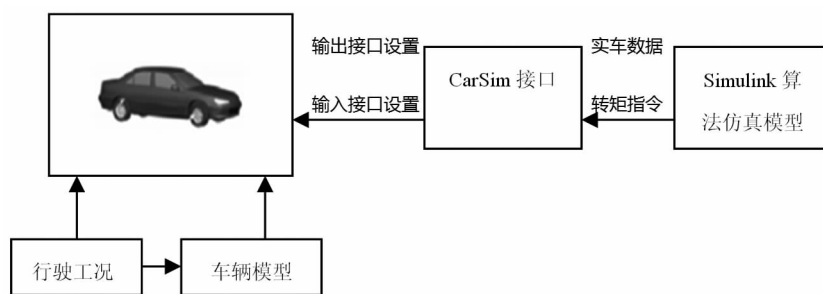


图7 CarSim/Simulink 联合仿真流程

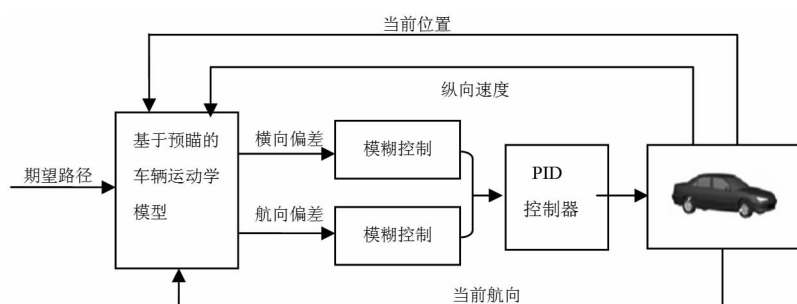


图8 路径跟踪控制策略

选取路径较为复杂的 U 型线、伯努利双纽线两种工况进行仿真分析。

(1)U 型线工况。选取 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的车速,基于 U 型道路,对 PID 控制器和模糊自适应 PID 控制器进行仿真,路径跟踪效果如图 9。从仿真结果来看,模糊自适应 PID

较传统 PID 控制算法,具有较好的车辆路径跟踪性能,使目标车辆更能可靠稳定地跟踪期望轨迹。表明模糊自适应 PID 较传统 PID,具有较好的路径跟踪性能,随着速度的增大,系统的非线性明显,传统 PID 控制效果逐渐变差,模糊自适应 PID 依旧能够较好地跟踪路径。

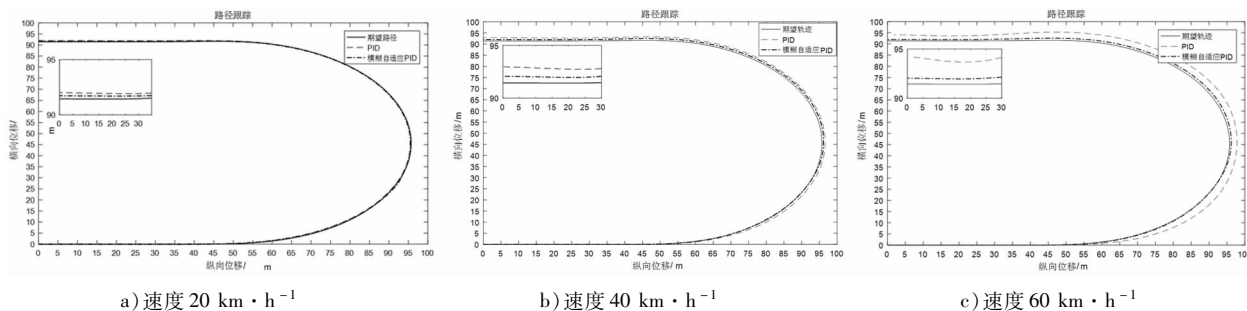


图9 不同速度下的 U 型线路径跟踪效果图

(2)伯努利双纽线工况。伯努利双纽线工况较为复杂,能更好地体现测试车辆的各项驾驶性能。本文选取 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的车速,基于伯努利双纽线,对 PID 控制器和

模糊自适应 PID 控制器进行仿真,仿真结果如图 10。在直线路段或者速度较低时,两种控制方法都能较好地跟踪路径。但随着车速的增加,在曲线路段,常规 PID 控制器参数由于不能及时调整,

误差逐渐增大。模糊自适应 PID 控制由于能及时调整控制器参数,跟踪效果较 PID 更优。在车速较高的曲线路段,模糊自适应 PID 的跟踪效果还

可以进一步提高。分析原因,一方面车速提高,车辆动力学特性明显;另一方面,弯曲路段时,基于预瞄的车辆运动学模型有待进一步优化。

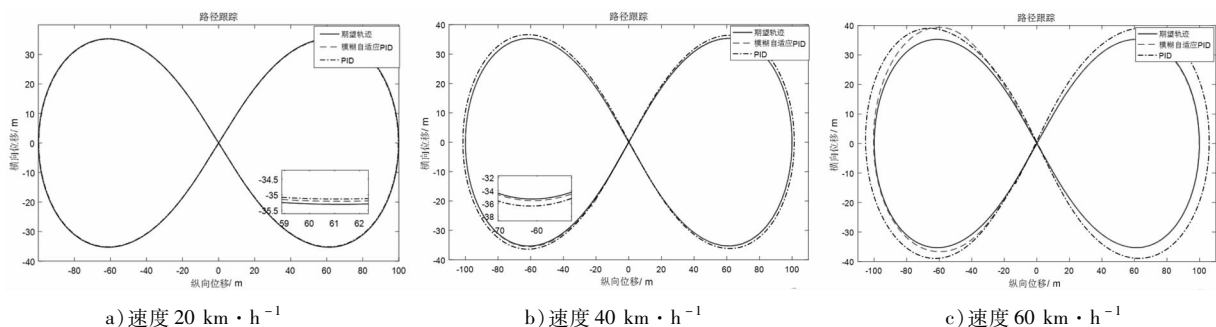


图 10 不同速度下伯努力双扭线路径跟踪效果图

4 结 语

本文基于车辆运动学预瞄及误差模型设计了基于模糊自适应 PID 的路径跟踪控制器,基于 CarSim/Simulink 联合仿真进行实验验证。仿真结果表明,本文所设计的模糊自适应 PID 控制器在直线路段或速度较低的曲线路段能够精确可靠地跟踪期望路径。下一步将基于本文研究基础,重点探讨高速且曲率较大的道路上的路径跟踪控制模型。

参考文献:

- [1] 杨浩. 智能车路径跟踪控制算法的简述[J]. 汽车实用技术, 2020(1):49-50.
- [2] 赵熙俊, 陈慧岩. 智能车辆路径跟踪横向控制方法的研究[J]. 汽车工程, 2011(5):18-23.
- [3] 葛平淑, 王荣本, 郭烈. 基于模糊逻辑的六轮月球车路径跟踪控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(2): 503-508.
- [4] MASHADI B, MAHMOUDI - KALEYBAR M, AH-

MADIZADEH P, et al. A path - following driver/vehicle model with optimized lateral dynamic controller[J]. Latin American Journal of Solids & Structures, 2013, 11(4):613-630.

- [5] CUI D, WANG G Q, ZHAO H Y, et al. Research on a path - tracking control system for articulated tracked vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 66(5): 311-324.
- [6] KUN Z, SHENG M C, WANG J F. Path tracking control of intelligent vehicle based on fuzzy neural network[J]. Automotive Engineer, 2015, 37: 38-42.
- [7] JI J, KHAJEPOUR A, MELEK W W, et al. Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multi - constraints [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(2):952-964.
- [8] LI J, XING Z, ZHANG W, et al. Vehicle tracking in wireless sensor networks via deep reinforcement learning [J]. IEEE Sensors Letters, 2020, 4(3): 1-4.

(责任编辑 赵环宇)