

自动驾驶微客模型预测的多点预瞄轨迹跟踪控制算法研究

张 勇, 彭之川, 王文明, 朱 田, 周艳辉

(长沙中车智驭新能源科技有限公司, 长沙 410083)

摘 要:为提高自动驾驶微客轨迹跟踪精度,对原纯追踪算法进行改进及验证;再根据模型预测控制理论,提出模型预测多点预瞄控制算法。实车验证表明,该算法能更进一步改善轨迹跟踪效果。

关键词:自动驾驶微客; 多点预瞄控制; 轨迹跟踪; 模型预测控制

中图分类号:U462.3⁺5

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2023)01-0001-05

Research on Control Algorithm about Multi-point Preview Trajectory Tracking for Automatic Driving Microbus Model Prediction

ZHANG Yong, PENG Zhichuan, WANG Wenming, ZHU Tian, ZHOU Yanhui

(Changsha CRRC Intelligent Control and New Energy Technology Co., Ltd., Changsha 410083, China)

Abstract:To enhance the trajectory tracking accuracy of the automatic driving microbus, this paper improves and verifies the original pure tracking algorithm, then proposes the control algorithm of model predictive multi-point preview according to the model predictive control theory. The real vehicle verification shows that the algorithm can further improve the trajectory tracking effect.

Key words:automatic driving microbus; multi-point preview control; trajectory tracking; model predictive control

自动驾驶车辆轨迹跟踪算法中,常用的有纯追踪算法、多点预瞄控制算法、模型预测控制(MPC)算法等。某自动驾驶微客采用了纯追踪算法^[1-2]进行轨迹跟踪控制,随着自动驾驶里程和控制信息数据的积累,发现该自动驾驶微客在道路曲率产生较大变化的情况下(如进入直角转弯、自动掉头等场景),其轨迹跟踪偏差大。基于当时车速和控制数据分析,车辆线控方向盘反应滞后是次要原因;主要原因是在车辆入弯时,由于控制算法的不足导致补偿输出的最终转角偏小。因此本文首先结合考虑车速偏差的反馈控制,对原有的纯追踪算法进行优化改进,虽然提升了直线路段的轨迹跟踪效果,但在道路曲率突变的情况下,轨迹跟踪效果依然较差;因而进一步基于MPC方法^[3],提出轨迹跟踪的多点预瞄控制算法;最后在该智能驾驶微客上进行实车验证。

1 原纯跟踪控制算法

1.1 微客自动驾驶系统架构

某微客自动驾驶系统架构如图1所示,主要包括四大系统。其中环境感知系统主要由激光雷达、毫米波雷达、超声波雷达以及多种智能摄像头等组成,实时获取车辆周围环境信息;高精度定位系统主要依靠组合惯导提供高精度定位信息。决策控制系统收到上述两个系统的信息后,进行全局和局部路径规划,然后解算出轨迹跟踪控制的方向盘转角、车速等控制信息。最终由线控底盘系统执行决策系统指令,使车辆进行自动驾驶。

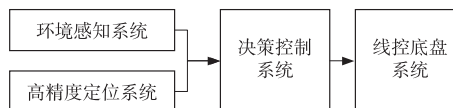


图1 微客自动驾驶系统架构图

收稿日期:2022-08-01。

第一作者:张 勇(1995—),男,硕士;工程师;主要从事智能驾驶控制、决策算法研究工作。E-mail:zygzhangyong@163.com。

1.2 原纯追踪控制算法及效果

1.2.1 原纯追踪控制算法及理论分析

该自动驾驶微客一开始采用的轨迹跟踪控制算法是纯追踪控制算法,其对期望轨迹跟踪效果主要取决于预瞄距离选取。偏大的预瞄距离,适用于直线和小曲率轨迹,对车辆航向角控制敏感,对位移偏差控制较弱,轨迹的跟踪效果较差;偏小的预瞄距离,适用于大曲率弯道,对横向位移偏差敏感,但易产生控制超调,方向盘抖动,其收敛速度慢。因此自适应的预瞄距离调节就尤为重要,将其转换成车速的函数,跟踪效果较好。但因车速变化引起预瞄距离的跳变,难以调节控制,因而导致方向盘抖动并产生较大的轨迹跟踪偏差。

将该 5.3 m 自动驾驶微客简化为二自由度预瞄跟踪模型,如图 2 所示。其最高车速不超过 40 km/h,属于低速运行。假设车辆在平面运行,无滑移,只有前轮可以转向。

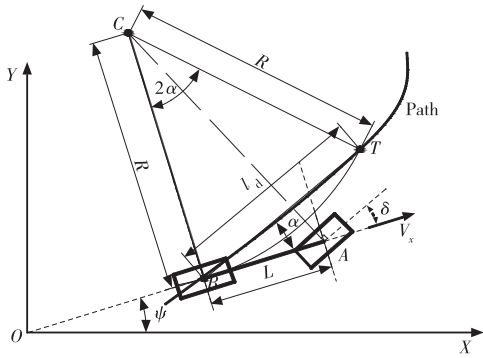


图2 微客车辆预瞄跟踪模型

微客转向角 δ_1 可以用轴距 L 和转弯半径 R 来计算:

$$\delta_1 = \tan^{-1}(L/R) \quad (1)$$

以在路径上的目标点 T 为预瞄点,由正弦定理得:

$$l_d / \sin(2\alpha) = R / \sin(\pi/2 - \alpha) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可推导出式(3):

$$\delta_1 = \tan^{-1}[2L \sin(\alpha) / l_d] \quad (3)$$

其中转向角 δ_1 、车身轴线和目标点 T 的夹角 α ,都是关于时间 t 的函数, l_d 是从车辆后轴中心至预瞄点的距离, 2α 是预瞄距离 l_d 在 $\triangle TBC$ 中的对角。

从式(3)可以看出,预瞄距离值 l_d 对转向角值 δ_1 影响很大。通常在直线路段选取的 l_{d1} 值大于弯道选取的 l_{d2} 值。在车速较低(如小于 20 km/h)时, l_{d1} 的跟踪效果较好,当车速较高(如提高至 30 km/h)时,车辆会出现左右晃动,这是 l_{d1} 的选取偏小导致的。还有在车辆由直线转入弯道时, l_{d1} 突变至 l_{d2} ,预瞄值的突变会导致转角值突变,从而导致方向盘突然抖动。

1.2.2 原纯追踪控制算法效果

对采用纯追踪控制算法的自动驾驶微客进行直线和弯道行驶轨迹跟踪测试, l_{d1} 为 12 m, l_{d2} 为 7 m,车速分别为 30 km/h 和 10 km/h,其测试结果如图 3 所示。直线路段的纯追踪算法横向位置偏差绝对平均值是 0.13 m,最大值是 0.32 m;弯道路段的纯追踪算法横向位置偏差绝对平均值是 0.19 m,最大值是 0.51 m。

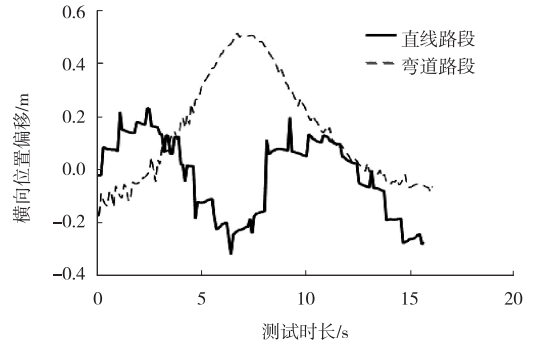


图3 纯追踪控制算法横向位置跟踪偏差

实际结果也表明,微客在直线路段的轨迹跟踪偏差较大,在弯道路段的轨迹跟踪偏差更大。其主要原因是纯追踪轨迹跟踪控制对预瞄距离选取要求高,车速变化和道路曲率变化需要适配不同的预瞄距离。

2 原纯追踪算法的改进及效果

2.1 在弯道路段和直线路段的改进及效果

为解决上述弯道路段和直线路段的轨迹跟踪偏差大的问题,均考虑引入偏差反馈控制来改善其收敛效果。引入的偏差反馈控制中的偏差是指横向位移偏差和航向角偏差。下面结合实时车速对这两种偏差进行反馈控制改进。

2.1.1 弯道路段

弯道的车身坐标系控制偏差示意图如图4所示。在车身坐标系 XOY 下, 对目标轨迹点进行3次多项式拟合, 得到以下轨迹曲线方程:

$$y = A_3 x^3 + A_2 x^2 + A_1 x + A_0 \quad (4)$$

式中: y 是车身横向位移, 向左为正; x 是车身纵向位移, 向前为正; A_0 是自车惯导位置与拟合轨迹的位移偏差; A_1 是自车航向与拟合轨迹的切线方向的偏差斜率; A_2 是拟合轨迹的曲率; A_3 是曲率的变化率^[4]。

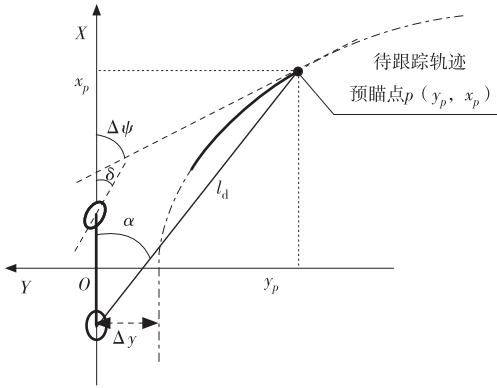


图4 弯道的车身坐标系控制偏差示意图

在预瞄点处, 自车的斜率偏差为 Δk :

$$\Delta k = 3A_3 x^2 + 2A_2 x + A_1 \quad (5)$$

车辆航向角 $\psi = \tan^{-1}(k)$, 基于航向角偏差角 $\Delta\psi$ 的补偿角 $\delta_2(t_1, \Delta\psi)$ 为

$$\delta_2(t_1, \Delta\psi) = [\tan^{-1}(\Delta k)] / (vt_1) \quad (6)$$

式中 t_1 是航向偏差补偿的设定时间, 设定时间越短, 补偿值越大, 偏差可快速趋于零; 反之, 补偿值越小, 偏差较慢趋于零。

$$R = s^2 / (2\Delta y) = (vt_d)^2 / (2\Delta y) \quad (7)$$

式中: R 是转弯半径; s 是纵向 (X 向) 位移距离, 等于自车车速 v 与行驶时间 t_d 的乘积。

由式(7)结合式(1)可得, 基于最近点的横向位移偏差 Δy 进行补偿的 $\delta_3(t_2, \Delta y)$ 为

$$\delta_3(t_2, \Delta y) = \tan^{-1}[2\Delta y L / (vt_2)^2] \quad (8)$$

式中 t_2 是横向位移偏差补偿的设定时间, 与 t_1 的含义相同。

因此改进控制后的输出车轮转角 δ 为

$$\delta = \lambda_1 \delta_1(t) + \lambda_2 \delta_2(t_1, \Delta\psi) + \lambda_3 \delta_3(t_2, \Delta y) \quad (9)$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 是对应转角的权重系数, 三者的和为1。

在该自动驾驶微客上, 采用改进纯追踪算法进行弯道跟踪测试, 弯道路段车速 10 km/h, 其测试结果如图5中虚线所示, 跟踪偏差的绝对平均值是 0.11 m, 最大值是 0.30 m, 轨迹跟踪效果有明显提升, 但跟踪偏差仍然偏大, 偏差变化趋势也不理想, 仍需进一步优化。

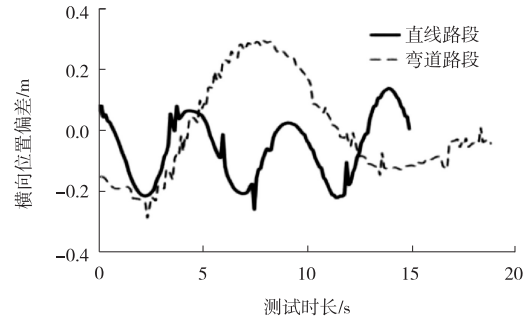


图5 改进纯追踪控制算法横向位置跟踪偏差

2.1.2 直线路段

直线路段和弯道路段改进方法相同, 区别仅是式(4)、式(5)中 A_2, A_3 系数趋近于零。直线路段最终输出转角 δ 同式(9)。式中两项偏差补偿 $\delta_2(t_1, \Delta\psi)$ 、 $\delta_3(t_2, \Delta y)$ 都基于当前自车车速, 自车车速增大时, 两个补偿值都会减小, 因此不易超调。

试验测试的直线路段车速为 30 km/h, 测试结果如图5中实线所示。直线路段改进纯追踪控制算法的横向跟踪位置偏差绝对平均值是 0.08 m, 最大值是 0.21 m。直线路段中车速较高情况下, 改进纯追踪算法的跟踪偏差小于原纯追踪算法的偏差, 轨迹跟踪效果较好。

改进纯追踪控制算法在直线路段对目标轨迹的跟踪效果好, 对轨迹跟踪偏差敏感, 可及时修正车辆位置。且当车辆速度提高时, 由于考虑了自车车速因素, 其偏差反馈补偿值适中, 车辆横向控制稳定, 抑制车辆出现走蛇形现象。

2.2 直线入弯时的抖动问题解决及效果

针对直线入弯时方向盘突然抖动问题, 通过采用控制预瞄距离变化的方法, 进行初步改进。一般直线路段的预瞄距离 l_{d1} 要大于弯道路段的预瞄距离 l_{d2} ,

通过增加预瞄距离 l_d 的单调递减控制函数来改进:

$$l_d = ql_{d1} + (1-q)l_{d2} \quad (10)$$

其中 q 是随时间变化,由 1 逐渐衰减至 0。因而将直线预瞄值缓慢渐变至弯道预瞄值,消除预瞄值的突变。

经过试验发现方向盘仍然会有抖动,原因分析如下:实际上预瞄点是由车辆所处位置和预瞄距离值共同决定,只控制预瞄距离变化是不完整的。当预瞄距离变小时,预瞄点后退;车辆向前行驶,预瞄点会随之前移。因此当车辆前进距离大于预瞄距离时,预瞄点前移;反之,预瞄点后移。通常车辆在入弯前会进行适当地减速,车辆前进距离在变小,当预瞄距离以固定速率减小,就会出现预瞄点前移或后退反复切换,计算出的转角值反复跳动。

为保证预瞄点实时向前移动,需限制预瞄值下降率,改进后的预瞄距离 l_d 如式(11):

$$l_d = ql_{d1} + (1-q)l_{d2} - qk \int v dt \quad (11)$$

其中 q 同式(10), v 是自车车速,预瞄点位移控制系数 k 应小于 1,建议取 0.9 左右,可确保 l_d 减小值小于车辆前进距离,实现预瞄点实时前移。最终,通过式(11), l_d 可实现由直线预瞄距离 l_{d1} 平稳渐变至弯道预瞄距离 l_{d2} ,大幅抑制方向盘的抖动。实车测试效果如图 6 所示,直线入弯时,方向盘转角连续变化,无抖动现象。

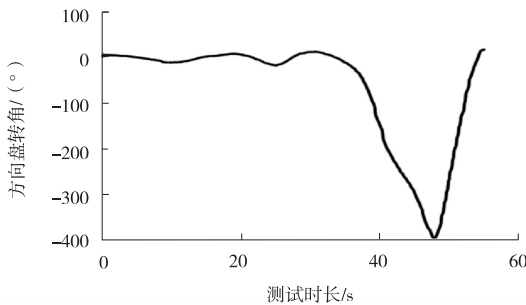


图 6 改进后车辆直线入弯的方向盘转角

3 应用 MPC 对控制算法在弯道上的改进及效果

为进一步减小改进纯追踪算法在弯道的轨迹跟踪偏差,对多点预瞄控制算法和 MPC 算法进行研究。

现有的多点预瞄控制研究,一部分预瞄点用于检测车辆轨迹偏差,进行反馈控制;另一部分获取目标轨迹的曲率信息,以确定前馈控制中方向盘转角^[5-6],能较好地跟踪目标轨迹。不同研究表明^[7-12],MPC 的自动驾驶车辆横向路径跟踪控制器,在车速较高或低附着且变速条件等不同工况下,该控制器在保证车辆跟踪精度基础上可有效提高行驶稳定性,具有较强的鲁棒性。因此应用 MPC 算法对多点预瞄算法进行改进。

应用 MPC 改进多点预瞄算法在目标跟踪轨迹上,依据不同的预瞄距离选取 3 个预瞄点,由改进纯追踪算法解算出车轮转角,结合实时车速,输入到二自由度车辆运动学模型,由模型预测出自车未来轨迹,对比目标轨迹,得到预测的横向位置偏差,再依据偏差值进行前馈补偿,以提高前馈控制的精度。

3.1 二自由度车辆运动学模型

如图 2 所示,在惯性坐标系 XOY 下, R 是车辆后轮转向半径, C 是瞬时转动中心, ψ 是车辆的航向角。假设转向过程中车辆质心侧偏角保持不变,即车辆瞬时转向半径与道路曲率半径相同。车辆横摆角速度 ω 为

$$\omega = V_x \tan \delta / L \quad (12)$$

式中: V_x 是车辆后轴中心朝正前方速度; δ 是前轮转角; L 是自车轴距。

然后可得:

$$R = V_x / \omega \quad (13)$$

整理式(1)、(12)、(13)得到以下车辆模型^[13]:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_m \\ \dot{Y}_m \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \\ \sin \psi \\ \tan \delta / L \end{bmatrix} V_x \quad (14)$$

式中: $\dot{X}_m$ 是车辆在 X 轴方向的速度; $\dot{Y}_m$ 是车辆在 Y 轴方向的速度。

3.2 多点预瞄算法的 MPC 改进

改进多点预瞄控制算法中,3 个预瞄点由实际车速和预测时长确定,此次时长分别确定为 0.5 s、1.0 s、1.5 s,对应的横向位移偏差为 Δy_1 、 Δy_2 、 Δy_3 。

$$\Delta y_1 = y_1 - y_{m1} \quad (15)$$

式中: y_1 是在目标路径第一个预瞄点处的车辆横向位移; y_{m1} 是在此预瞄点处模型预测的车辆横向位移, 可通过式(14)求得。 Δy_2 、 Δy_3 的计算类似于 Δy_1 。

将3处横向位移偏差结合式(8)得到:

$$\delta_4(t_2, \Delta y) = \lambda_4 \delta_3(t_2, \Delta y_1) + \lambda_5 \delta_3(t_2, \Delta y_2) + \lambda_6 \delta_3(t_2, \Delta y_3) + \lambda_7 \delta_3(t_2, \Delta y) \quad (16)$$

式中, λ_4 、 λ_5 、 λ_6 、 λ_7 是对应转角的权重系数, 四者的和为1。

在弯道工况下, 结合式(9)和式(16)可得到改进多点预瞄控制输出的车轮转角 δ :

$$\delta = \lambda_1 \delta_1(t) + \lambda_2 \delta_2(t_1, \Delta \psi) + \lambda_3 \delta_4(t_2, \Delta y) \quad (17)$$

3.3 MPC改进多点预瞄算法在弯道工况的效果

在该自动驾驶微客上, 采用改进多点预瞄算法进行变曲率弯道测试, 车速是10 km/h, 其测试结果如图7所示。

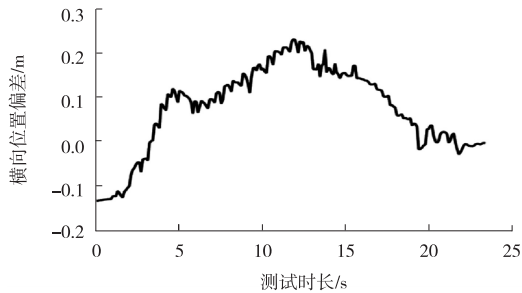


图7 改进多点预瞄算法横向位置跟踪偏差

模型预测多点预瞄算法在弯道横向位置跟踪偏差的绝对平均值是0.10 m, 最大值是0.23 m。与改进纯追踪算法对比, 跟踪偏差最大值减小了0.07 m。试验结果表明, 改进多点预瞄算法的弯道跟踪偏差小于改进纯追踪算法的偏差, 且控制稳定性好。

4 结束语

本文基于自动驾驶微客跟踪轨迹偏差较大的问题进行归纳分析, 考虑车速因素, 对纯追踪算法进行优化改进。然后参考MPC方法提出了模型预测多点

预瞄控制算法, 预测自车横向位移误差进行轨迹跟踪研究。试验结果表明, 该控制算法有良好的目标轨迹跟踪效果。

参考文献:

- [1] 彭之川, 朱田, 易慧斌. 基于改进的 Pure Pursuit 智能客车轨迹跟踪算法研究[J]. 客车技术与研究, 2019(5): 21-24.
- [2] SNIDER JM. Automatic steering methods for autonomous automobile path tracking[D]. Pittsburgh: Robotics Institute, University of Carnegie Mellon, 2009.
- [3] 席裕庚, 许晓鸣, 张钟俊. 预测控制的研究现状和多层智能预测控制[J]. 控制理论与应用, 1989(2): 5-11.
- [4] 袁希文, 冯江华, 胡云卿, 等. 智轨电车自动循迹感知与控制系统[J]. 控制与信息技术, 2020(1): 19-26.
- [5] 罗峰, 曾侠. 基于多点预瞄的自动驾驶汽车轨迹跟踪算法[J]. 机电一体化, 2018(6): 17-22.
- [6] 黄海洋, 张建, 王宇, 等. 基于多点预瞄最优控制的智能车辆路径跟踪[J]. 汽车技术, 2018(10): 6-9.
- [7] 陈威, 廖文浩, 刘明春. 基于MPC的自动驾驶车辆横向路径跟踪控制[J]. 南昌大学学报(工科版), 42(3): 279-288.
- [8] 宋晓华, 邵毅明, 屈治华, 等. 基于模型预测控制的车辆轨迹跟踪稳定性研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2020, 34(8): 1-8.
- [9] 严国军, 贲能军, 顾建华, 等. 基于MPC的无人驾驶拖拉机轨迹跟踪控制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(9): 1-6.
- [10] 王银, 张灏琦, 孙前来, 等. 基于自适应MPC算法的轨迹跟踪控制研究[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(14): 251-258.
- [11] 李程, 张征方, 沈子扬. 基于预测控制的货运机车自动驾驶技术研究[J]. 控制与信息技术, 2020(6): 8-13.
- [12] 路宏广, 赵树恩. 基于鲁棒模型预测的智能汽车轨迹跟踪控制研究[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(1): 153-162.
- [13] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 18-20.