

# 基于路径虚拟与自适应预瞄的泊车轨迹跟踪<sup>\*</sup>

刘 平, 潘业伟, 李 杨, 刘明杰, 朴昌浩

(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)

**摘要:**在传统泊车控制中,纯跟踪算法因路径不连续性和前视距离固定而存在一定局限性,尤其在精度与平滑性方面表现不佳。针对泊车场景下纯跟踪方法前视距离不易选择、终点性能差以及前轮转角易发生振荡等问题,提出了一种基于路径虚拟与自适应预瞄的泊车轨迹跟踪方法。首先,分析了纯跟踪下泊车几何关系模型,以此为基础提出泊车轨迹路径末端处理和路径预处理优化策略,通过虚拟延长和模拟跟踪泊车轨迹的方式解决泊车轨迹曲率不连续导致振荡以及接近终点时前轮转角变化引起的抖动问题;进一步,提出自适应弯道预瞄距离策略,以此减少泊车过程中前轮转角值变化幅度从而减少其振荡并提高泊车轨迹的跟踪精度;最后,给出了所提出方法的实现步骤并进行测试验证。仿真和实车测试结果表明,相较于未改进前纯跟踪算法,所提出方法跟踪效果优良、终点性能好,且能有效减少泊车跟踪过程中前轮转角变化引起的抖动现象,以最大横向误差、泊车终点距离误差、累计前轮转角振荡值和差分均值构成的性能评价指标矩阵显示所提出算法平均性能提升分别达54.08%、83.61%、71.34%和48.95%,显示出研究算法的有效性和实际应用价值。

**关键词:**纯跟踪;路径虚拟;自适应预瞄;自动泊车;轨迹跟踪

中图分类号: TP273 TH166 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.80

## A path virtualization and adaptive preview-based method for parking trajectory tracking

Liu Ping, Pan Yewei, Li Yang, Liu Mingjie, Piao Changhao

(College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** In traditional parking control, the pure pursuit algorithm has certain limitations due to discontinuities in the path and a fixed look-ahead distance, particularly in terms of tracking accuracy and smoothness. To address the issues of selecting the lookahead distance, poor endpoint performance, and front wheel angle jitter in the pure pursuit method for parking scenarios, a parking trajectory tracking method based on path virtualization and adaptive preview is proposed. Firstly, the geometric relationship model using the pure pursuit method is analyzed. On this basis, optimization strategies for endpoint handling and preprocessing of the parking trajectory path are introduced. These strategies address the issues of oscillation caused by discontinuous curvature in the parking trajectory and jitter resulting from front wheel angle changes near the endpoint by virtually extending and simulating the tracking of the parking trajectory. Furthermore, an adaptive curve preview distance strategy is proposed to reduce the variation amplitude of the front wheel angle during parking, thereby mitigating oscillations and enhancing the tracking accuracy of the parking trajectory. Finally, the implementation steps of the proposed method are presented. The testing and validation are conducted. Compared with the unmodified pure pursuit algorithm, simulation, and real-vehicle test results show that the proposed method exhibits superior tracking performance and endpoint accuracy, effectively reducing the jitter caused by the front wheel angle during parking tracks. For the proposed algorithm, a performance evaluation index matrix, including maximum lateral error, parking endpoint distance error, and cumulative front wheel angle oscillation value and mean difference, indicates average performance improvements of 54.08%, 83.61%, 71.34%, and 48.95%, respectively. These results highlight its effectiveness and practical application value.

**Keywords:** pure pursuit; path virtualization; adaptive preview; automatic parking; trajectory tracking

## 0 引言

当前,汽车正朝着智能化、无人化、网联化、个性化方向发展<sup>[1-2]</sup>。自动泊车技术作为汽车智能化的一个重要体现,不仅在解决城市交通压力和提升驾驶安全性方面发挥着关键性的作用<sup>[3]</sup>,对于解决自动驾驶的“最后一公里”问题也将发挥决定性作用<sup>[4]</sup>。自动泊车技术目前得到了众多学者与企业的青睐,也被视为在特定场景下最易于商业量产的自动驾驶应用<sup>[5]</sup>。通常来讲,实现自动泊车需要环境感知、路径规划和跟踪控制等核心技术的支持<sup>[6]</sup>,而跟踪控制技术是确保自动泊车车辆从规划泊车起点到终点安全驾驶的核心,其重要性更是不言而喻<sup>[7]</sup>。自动泊车轨迹的跟踪控制主要通过控制方向盘转角和车速,以保证车身角与规划泊车轨迹切线方向一致,从而实现泊车控制<sup>[8]</sup>。经过多年的发展,当前泊车轨迹跟踪控制的方法多样,主要有基于模型预测控制方法、比例积分微分控制、纯跟踪、线性二次调节器、Stanley 等方法<sup>[9-11]</sup>。在这些方法中,Stanley 方法具有鲁棒性好,中低速效果好的优点,其缺点是容易出现转向过度;比例积分微分控制方法的成本低,但是参数整定复杂且鲁棒性不强;线性二次调节器方法高速性能好,但是大转角时控制性能差;模型预测控制方法的精度高、鲁棒性好,但其计算成本高,实时性较差;而纯跟踪算法自提出以来,因其良好的鲁棒性、易实现且与人类驾驶员行为类似的特点得到了广泛应用<sup>[12]</sup>,它通过计算车辆从当前位置到目标点的曲率来控制转向,即使在存在较大的横向偏差和参考路径曲率不连续的情况下也能达到较好的跟踪效果。因此,纯跟踪适用于自动泊车场景这种低速、鲁棒性、精度要求高场景<sup>[13]</sup>,本文也将重点针对纯跟踪算法进行研究。

然而,诸多学者也指出纯跟踪方法容易出现振荡,且受前视距离的影响大,难以选择一个合适的前视距离,一方面过短的前视距离会导致路径点跳变、控制量离散化进而引起控制振荡,另一方面过长的前视距离使得跟踪精度下降,在大曲率工况下会出现切圆现象,同时还存在临近终点时前视距离大于车与终点距离时纯跟踪将不起作用或者方向盘出现剧烈晃动现象<sup>[14]</sup>。为了解决纯跟踪方法前视距离难以选择问题,国内外学者做了很多研究。比如,Wang 等<sup>[15]</sup>提出了基于两个模糊控制器的纯跟踪算法来调节速度和前视距离,提高跟踪性能;Chen 等<sup>[16]</sup>将比例积分控制器加入纯跟踪来选择前视距离;Fu 等<sup>[17]</sup>通过检测偏离规划路径的趋势调整纯跟踪的前视距离;Kim 等<sup>[18]</sup>提出了一种基于模型的前视距离优化方法,以同时保证平滑的路径跟踪性能和跟踪误差;文献[19-20]等使用槽海鞘群算法来寻找纯追踪最优的前

视距离。虽然上述方法可以通过调整前视距离来改善纯跟踪方法误差,但也会导致前视距离频繁变动,前轮转角的输出值频繁变动,引起方向盘振荡,进而影响平滑性和舒适性,同时只调节前视距离改变不了车辆临近终点时前视距离不变导致的纯跟踪方法不起作用问题,且前视距离作为控制律的分母且逐渐减小,仍会导致方向盘出现剧烈晃动现象<sup>[14]</sup>。而为了解决纯跟踪临近终点性能差的问题,文献[14]通过转向稳定调节模型以改善纯跟踪控制器临近终点时的转角突变振荡,但这种方法是临近终点时使前轮输出角固定达到改善转角突变振荡的目的,纯跟踪方法也依然是失效状态,若临近终点时车辆行驶于曲率较大路径,则会导致终点的误差增大;为了解决纯跟踪方法大曲率路径工况下的输出抖动问题,提高泊车过程的平滑性,文献[21]设计了一种带记忆参数的方向盘修正算法,通过设定记忆参数使方向盘输出未达到阈值的不输出或累计一定次数输出,从而减小泊车过程中的抖动现象,但其加入的记忆参数牺牲了系统的稳定性,若出现长时间出现未达到阈值的输出会让系统振荡以及影响其精度。

考虑到自动泊车这种狭窄、曲率大、对到达终点要求精度高的场景,一种能兼顾自适应前视距离同时减少抖动且改善纯跟踪临近终点性能的方法改进将是一个重要方向。而在纯跟踪方法跟踪过程中振荡或者抖动问题是和预瞄距离以及跟踪的路径相关的,纯跟踪方法本质上是找出预瞄距离范围内的最近点,每次寻找的预瞄点都会引起转角输出公式分母的变化,若每次的预瞄点与预瞄距离的差值不同就会引起振荡或抖动。因此,在跟踪之前对路径优化是一种不错的选择。基于此,本文从调整前视距离满足精度、跟踪平滑性、以及到达终点的精确性出发,提出一种基于路径虚拟与自适应预瞄的泊车轨迹跟踪算法研究。本研究的主要贡献为:1)提出轨迹末端虚拟延长方法解决临近终点时纯跟踪方法失效以及方向盘出现抖动问题;2)提出路径虚拟测量优化目标路径,得出符合车辆运动、等间隔、平滑、曲率较连续的期望路径,以此减少跟踪过程振荡发生;3)提出自适应弯道预瞄距离策略,以此避免频繁切换预瞄距离带来的方向盘振荡现象。

## 1 纯跟踪泊车几何关系模型

纯跟踪算法利用期望路径与行驶路径的距离偏差来测量汽车位置信息、前轮转向角数据,进而实现汽车的路径跟踪<sup>[12,22]</sup>,该算法的泊车几何关系示意图如图 1 所示。图 1 中,首先利用阿克曼转向角跟踪参考路径,将车辆简化为运动学两轮车辆模型,基于当前车辆后轮中心位置,在参考路径上向  $L_d$  (单位为 m) 距离匹配一个预瞄点  $C$ ,

并假设车辆后轮中心点的转弯半径为  $R$  (单位为 m), 由图可知  $AB$  垂直  $AO$ , 在  $\Delta AOC$  中,  $OA$  等于  $OC$ , 则  $\angle AOC$  的计算如式(1) 所示。

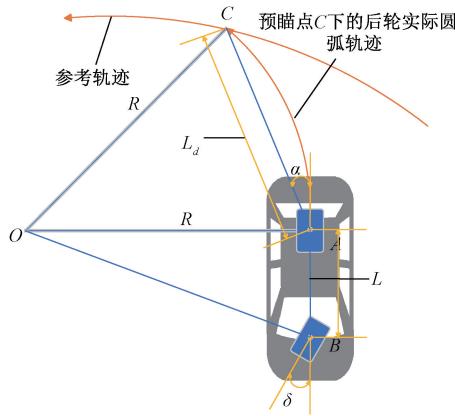


图1 纯跟踪下泊车几何关系示意图

Fig. 1 Diagram of parking geometry of pure tracking

$$\angle AOC = \pi - 2\angle CAO = \pi - 2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha(t)\right) = 2\alpha(t) \quad (1)$$

式中:  $\alpha(t)$  为车辆坐标系下预瞄点的朝向角, 单位为( $^\circ$ )。

为了使车辆后轮跟踪圆弧虚线轨迹倒车到达  $C$  点, 在  $\Delta AOC$  中需要满足的正弦定理关系式如式(2) 所示。

$$L_d / (\sin 2\alpha(t)) = R / \sin(0.5\pi - \alpha(t)) \quad (2)$$

化简式(2) 得到式(3), 即:

$$R = L_d / (2\sin\alpha(t)) \quad (3)$$

为了使车辆泊车过程中一直满足这种关系, 需要在阿克曼转向  $\Delta AOB$  中, 对前轮转角  $\delta(t)$  即阿克曼转角进行计算, 公式如式(4) 所示。

$$\tan \delta(t) = L/R \quad (4)$$

式中:  $L$  表示车辆轴距, 单位为 m。进而, 联立式(3)~(4) 可以得到式(5)。

$$\delta(t) = \arctan(2L \sin(\alpha(t)) / L_d) \quad (5)$$

由上述纯跟踪泊车几何关系可知, 只要确定车辆朝向角  $\alpha(t)$ , 前视距离  $L_d$ , 车辆轴距  $L$ , 即可以得出  $t$  时刻下前轮输出转角  $\delta(t)$ , 从而实现轨迹跟踪。

## 2 路径虚拟与自适应预瞄跟踪算法

### 2.1 路径虚拟预处理

#### 1) 路径末端处理策略

在进行路径跟踪时, 选取预瞄点通常有 2 种方法:

(1) 累计计算当前车辆位置点后的目标点与车辆的距离, 达到或大于  $L_d$  时将其作为预瞄点; (2) 计算当前车辆位置点后的所有目标点与车辆的距离与  $L_d$  的差值, 差值

绝对值最小的点作为预瞄点。方法(1) 计算速度大于方法(2), 但当车辆与终点的距离小于  $L_d$  时, 纯跟踪将不起作用; 方法(2) 虽然当车辆与终点的距离小于  $L_d$  时, 纯跟踪依然起作用, 但由式(5) 可知接近终点时, 车辆与终点的距离小于  $L_d$ , 故式中  $L_d$  会减小直至 0, 导致  $\delta(t)$  变化剧烈进而引起方向盘的剧烈抖动<sup>[14]</sup>。因此, 选取方法(1) 进行预瞄点的计算。然而, 方法(1) 在距离终点太近时纯跟踪方法会失效, 通常原因为无法找到符合前视距离  $L_d$  的预瞄点。为了解决此问题, 提出一种路径末端处理策略, 即在目标路径结束后增加一段虚拟路径, 是车辆在到达目标终点之前都有适合的预瞄点, 该策略的过程见后文。

假设原目标路径(经纬度坐标)包含  $n$  个点, 分别为  $P_1, P_2, \dots, P_{n-1}, P_n$ , 每个点的横纵坐标为  $(Lon_i, Lat_i)$ 。则每一个路径点可以通过如式(6) 所示转换为平面目标路径坐标点  $(x_i, y_i)$  (单位为 m):

$$\begin{cases} x_i = R_e \times (Lon_i - Lon_1) \times \cos(Lat_1) \\ y_i = R_e \times (Lat_i - Lat_1) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $(Lon_i, Lat_i)$  为原目标路径上第  $i$  个点的经度和纬度;  $R_e$  为地球的半径(取 637 100, 单位为 m),  $i$  的取值范围为  $[1, n]$ 。

进而, 由目标路径的最后两个点可以计算单位方向向量, 得到虚拟目标点计算公式如式(7) 所示。

$$\begin{cases} \vec{D} = \frac{(x_n - x_{n-1}, y_n - y_{n-1})}{\|(x_n - x_{n-1}, y_n - y_{n-1})\|} \\ (x_{n+j}, y_{n+j}) = (x_n, y_n) + j \times \vec{D} \times d \\ N = \frac{D_{total}}{d} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\vec{D}$  为方向向量;  $(x_{n+j}, y_{n+j})$  表示第  $j$  个虚拟路径点;  $N$  为生成的虚拟目标点的总个数;  $D_{total}$  为需延长终点的长度;  $d$  为每个虚拟目标点之间的间隔;  $j$  的取值范围为  $[1, N]$ 。

#### 2) 路径预处理优化

对于泊车路径, 通常采用路径采集或者路径规划算法生成<sup>[3]</sup>, 然而由信号波动以及算法不足导致的目标路径波动和曲率不连续仍时有发生, 比如以 Hybrid A\* 为基础的路径规划算法得到的路径曲率存在不连续现象。目标轨迹的曲率不连续、波动和目标点间隔参差不齐会导致跟踪振荡和方向盘抖动进而影响跟踪的平滑性。因此, 提出一种路径预处理优化策略, 即在泊车路径末端处理延长的基础上, 采用模拟跟踪思路, 得到一条模拟跟踪路径, 并以此路径为新的目标路径来消除目标点间隔参差不齐的问题, 并改善目标路径的曲率不连续问题。

在路径预处理优化中, 采用文献[23] 纯跟踪方法进行模拟跟踪。为了减少模拟跟踪到达终点的误差最小, 提出一种虚拟+滑行距离停止策略。根据泊车过程, 车辆

抵达终点时,加速度  $a(t)$  和速度  $v(t)$  均应为 0, 所以根据到达终点后车辆的速度以及加速度如式(8)所示可以计算滑行距离  $S$  为:

$$S = v(t)^2 / (2 |a(t)|) \quad (8)$$

但是,由于路径末端的延长处理,如式(9)所示,故此纯跟踪刹车停止点的距离应为:

$$L_{stop} = D_{total} + S \quad (9)$$

式中:  $L_{stop}$  表示纯跟踪刹车(速度、加速度为 0)点与虚拟延长点终点间的距离,单位为 m。

最终,在设定时间步长  $dt$  的情况下,可以采用纯跟踪采样当前点作为模拟路径点,得到新的路径点集。如图 2 所示,给出了以纯跟踪为基础,采用本文路径末端延长与模拟跟踪策略对 A\* 算法规划路径进行优化处理后的路径点图。对比本文优化后路径和 A\* 算法生成的路径可知,模拟跟踪优化后的路径解决了 A\* 算法生成路径曲率不连续问题,得到的路径更加平滑,避免了折角,对于减少前轮转角输出的抖动性将提供帮助。

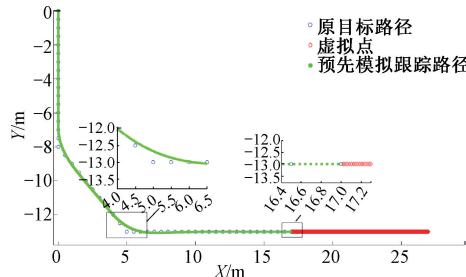


图 2 路径虚拟与模拟跟踪优化示意图

Fig. 2 Diagram of virtual and simulated tracking optimization path

综上,通过此方法可弥补采集路径或规划路径方法带来的前轮转角抖动或振荡,也可解决纯跟踪方法无法到达终点或终点剧烈震荡问题,更可以得出符合车辆运动、平滑、曲率较连续、同时与原路径高契合的新路径。

## 2.2 自适应弯道预瞄距离

在泊车过程中,弯道路径是无法避免的,然而如何针对纯跟踪算法选取合适的预瞄距离一直是众多学者研究的重点<sup>[18]</sup>。根据曲率反比原则:预瞄距离应与道路的曲率成反比,即曲率越大(即道路越弯曲),预瞄距离应越短,曲率越小(即道路越直),预瞄距离应越长。选取合适的预瞄距离来保证车辆跟踪的准确性以及避免方向盘抖动是当前纯跟踪算法需要解决的问题。文献[24]提出了根据车辆速度和路径曲率动态调整前视距来提高精度,但这种方法存在预瞄距离一直在不断变化的问题,这样会引起频繁的输出值变化,方向盘抖

动和车辆振荡仍没有很好避免。为此,提出一种自适应弯道预瞄距离的方法来选取预瞄距离,以此提高准确性并避免抖动。

首先,通过曲率的变化将泊车目标路径分成直道和弯道,即曲率的值超过弯道曲率阈值则表示进入弯道,低于弯道曲率阈值表示退出弯道,这样将路径分为直线和弯道。计算弯道的平均曲率,预瞄距离根据弯道的平均曲率进行加权,平均曲率越大则预瞄距离越小来保证精度,这样预瞄距离在泊车过程中都是一个固定值,既可以调整大小来适应整个弯道保证精度,又不用频繁变换预瞄距离引起方向盘抖动。在连续的曲线中,曲率可以通过切线的变化率来计算,然而在离散目标路径的情形下,由于没有连续的微分特性,必须通过点之间的几何关系来近似曲率。采用三角形曲率的计算方法,利用 3 个连续点形成的几何三角形的性质,通过选取离散曲线上的 3 个相邻点,即  $P_{i-1}$ 、 $P_i$ 、 $P_{i+1}$ ,并以这 3 个点构成的三角形的面积和边长来描述曲线弯曲程度即  $P_i$  点曲率,其计算公式如式(10)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} k_i = \frac{4A_i}{l_{(i-1,i)} \times l_{(i-1,i+1)} \times l_{(i,i+1)}} \\ A_i = \frac{1}{2} |(x_i - x_{i-1})(y_{i+1} - y_{i-1}) - (y_i - y_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1})| \\ l_{(i-1,i)} = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \\ l_{(i-1,i+1)} = \sqrt{(x_{i+1} - x_{i-1})^2 + (y_{i+1} - y_{i-1})^2} \\ l_{(i,i+1)} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2} \end{array} \right. \quad (10)$$

式中:  $(x_{i-1}, y_{i-1})$ 、 $(x_i, y_i)$ 、 $(x_{i+1}, y_{i+1})$  分别为  $P_{i-1}$ 、 $P_i$ 、 $P_{i+1}$  的坐标,这 3 点构成的三角形面积为  $A_i$ ,3 条边长为  $l_{(i-1,i)}$ 、 $l_{(i-1,i+1)}$ 、 $l_{(i,i+1)}$ ;  $k_i$  是第  $i$  个点  $P_i$  的曲率,其中  $i$  的取值范围为  $[2, m - 1]$ ;  $m$  为离散目标轨迹点的总数。

当  $i$  点的曲率  $k_i$  大于弯道阈值  $k_h$  时表示进入弯道,此时  $i$  点为弯道开始点  $curveStart$ ,当  $i$  点的曲率  $k_i$  小于弯道阈值  $k_h$  时表示离开弯道,此时的  $i$  点为弯道结束点  $curveEnd$ ,设定弯道阈值  $k_h$  则可将离散目标轨迹分为弯道和直线两部分,计算弯道部分平均曲率如式(11)所示。

$$k_{avg} = \frac{1}{N_c} \sum_{j=curveStart}^{curveEnd} k_j \quad (11)$$

式中:  $k_j$  是弯道内点  $j$  的曲率,  $j$  的取值范围为  $[curveStart, curveEnd]$ ;  $k_{avg}$  是弯道的平均曲率;  $curveStart$  是弯道开始点;  $curveEnd$  是弯道结束点;  $N_c$  是弯道内的目标轨迹总的点数。

在分析不同弯道曲率阈值对前轮转角振荡影响后发现,  $k_h = 0.02$  时前轮转角振荡最小,故将此作为阈值进行设定。进一步,在直道和弯道划分的基础上,提出的自

适应前视距离根据弯道的平均曲率进行计算, 所采用的公式如式(12)所示。

$$L_{dc} = L_d / (1 + K_c \times k_{avg}) \quad (12)$$

式中:  $K_c$  是曲率增益系数;  $L_d$  是初始前视距离;  $k_{avg}$  是弯道的平均曲率;  $L_{dc}$  是弯道自适应后的前视距离。

分析式(12)可知, 通过设置曲率增益系数  $K_c$ , 即可改变弯道影响前视距离的权重, 弯道部分平均曲率越大则前视距离越小来保证精度, 同时如果目标轨迹是直线或很小, 平均曲率会为 0, 此时的前视距离就为初始前视距离  $L_d$ , 实现自适应弯道前视距离的变化, 进而避免频繁变更前视距离减少方向盘的抖动。

### 2.3 算法步骤

综合提出的路径末端处理与路径优化策略以及自适应弯道预瞄策略, 形成基于路径虚拟与自适应预瞄的泊车轨迹跟踪算法, 该算法实现的伪代码具体如算法 1 所示。

### 算法 1 路径虚拟与自适应预瞄纯跟踪算法

**Input:** 目标路径 Path\_target, 车辆参数, 设定参数

```

1: 虚拟路径 Path_virtual ← 延长路径(Path_target)
2: 模拟路径 Path_simulated ← 模拟纯跟踪(Path_virtual)
3: 实际跟踪路径 Path_extended ← 延长路径(Path_simulated)
4: for 实际跟踪路径上的每个点  $p_i$  do
5:    $k_i$  ← 计算曲率( $p_i$ )
6:   if  $k_i$  > 曲率阈值 then
7:      $p_i$ .type ← 弯道“curve”
8:   else
9:      $p_i$ .type ← 直道“straight”
10:  end if
11: end for
12: 自适应的前视距离  $L_{lookahead\_adaptive}$  ← 调节前视距离( $p_i$ .type, curve)
13: for 每一个时间步长  $t$  do
14:   预瞄点  $p_{ref}$  ← 寻找预瞄点 (Path_extended,  $L_{lookahead\_adaptive}$ )
15:   前轮转角  $\Delta_{values}$  ← 纯跟踪 ( $p_{ref}$ ,  $L_{lookahead\_adaptive}$ )
16:   实际位置  $Pos_{actual}$  ← 更新位置 ( $\Delta_{values}$ )
17: end for
18: if 终点距离 ( $Pos_{actual}$ , Path_extended) < 终点阈值 then
19:   停止跟踪
20: end if

```

**Output:** 实际位置序列  $Pos_{actual}$ , 前轮转角输出序列  $\Delta_{values}$

## 3 仿真测试与实车验证

### 3.1 仿真测试

在 MATLAB R2023a 中对本文所提出方法进行仿真测试, 仿真验证使用的计算机配置如下: 处理器为 i7-14700HX, 基准频率为 2.3 GHz, 系统为 64 位的 Windows 10 操作系统。仿真测试过程中所采用的主要参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真测试主要参数设置

Table 1 Main parameters setting for simulation test

参数	值	参数	值
$D_{total}/m$	5.0	$L/m$	2.90
$K_p$	0.8	$V_{ls}/(m \cdot s^{-1})$	0.55
$L_d/m$	4.0	$dt/s$	0.10
$K_c$	10.0	$k_h$	0.02

表 1 中,  $K_p$  是速度比例控制器系数, 用来调整加速度;  $V_{ls}$  是目标车速;  $L$  是车辆轴距;  $L_d$  是初始前视距离;  $dt$  是时间步长, 表示在纯跟踪控制循环中的每个计算周期的时间间隔;  $k_h$  是弯道阈值;  $K_c$  是曲率增益系数。

为了消除方法的偶然性, 通过 RTK (real time kinematic) 采集了 2 条曲率不同的垂直车位泊车轨迹用于仿真测验, 泊车轨迹采集所用实验设备及场景如图 3 所示。将本文提出的方法与前视距离分别为 2、3、4 m 的纯跟踪 (pure pursuit, PP) 方法<sup>[25]</sup> (分别命名为 PP-2, PP-3, PP-4)、文献 [24] 中提出的反馈纯跟踪方法和文献 [21] 中的带记忆参数纯跟踪方法 (分别命名为 PP-Feedback, PP-Memory, 前视距离基值均为 3 m) 对所采集的 2 条泊车轨迹进行跟踪对比, 各种方法的跟踪效果如图 4 所示, 对应的各种方法前轮转角输出如图 5 所示。此外, 为了进一步对比各种纯跟踪算法的性能, 以最大横向误差、终点距离、累计前轮转角振荡值、和前轮转角差分均值为指标进行了详细的对比, 各种方法的对比结果如表 2 所示。

从图 4 和表 2 可以看出本文方法在泊车轨迹跟踪效果上来看相对于 PP 算法、PP-Feedback 和 PP-Memory 没有出现临近终点方法失效的问题, 结束时终点距离都保持在 0.02 左右。从图 5 和表 2 联合分析可知, 在前视距离 3 m 下, PP-Feedback 对横向误差有所提升, 但是其前视距离根据曲率实时调整会加剧振荡, PP-Memory 对横向误差和减少振荡效果都有所提升, 其中平均减少累计振荡值达 86.74%, 但其并未解决纯跟踪方法终点失效的问题, 本文提出方法相对于前视距离 3、4 m 下的 PP 算



图3 泊车轨迹采集实验设备及场景

Fig. 3 Parking trajectory acquisition experimental equipment and scenarios

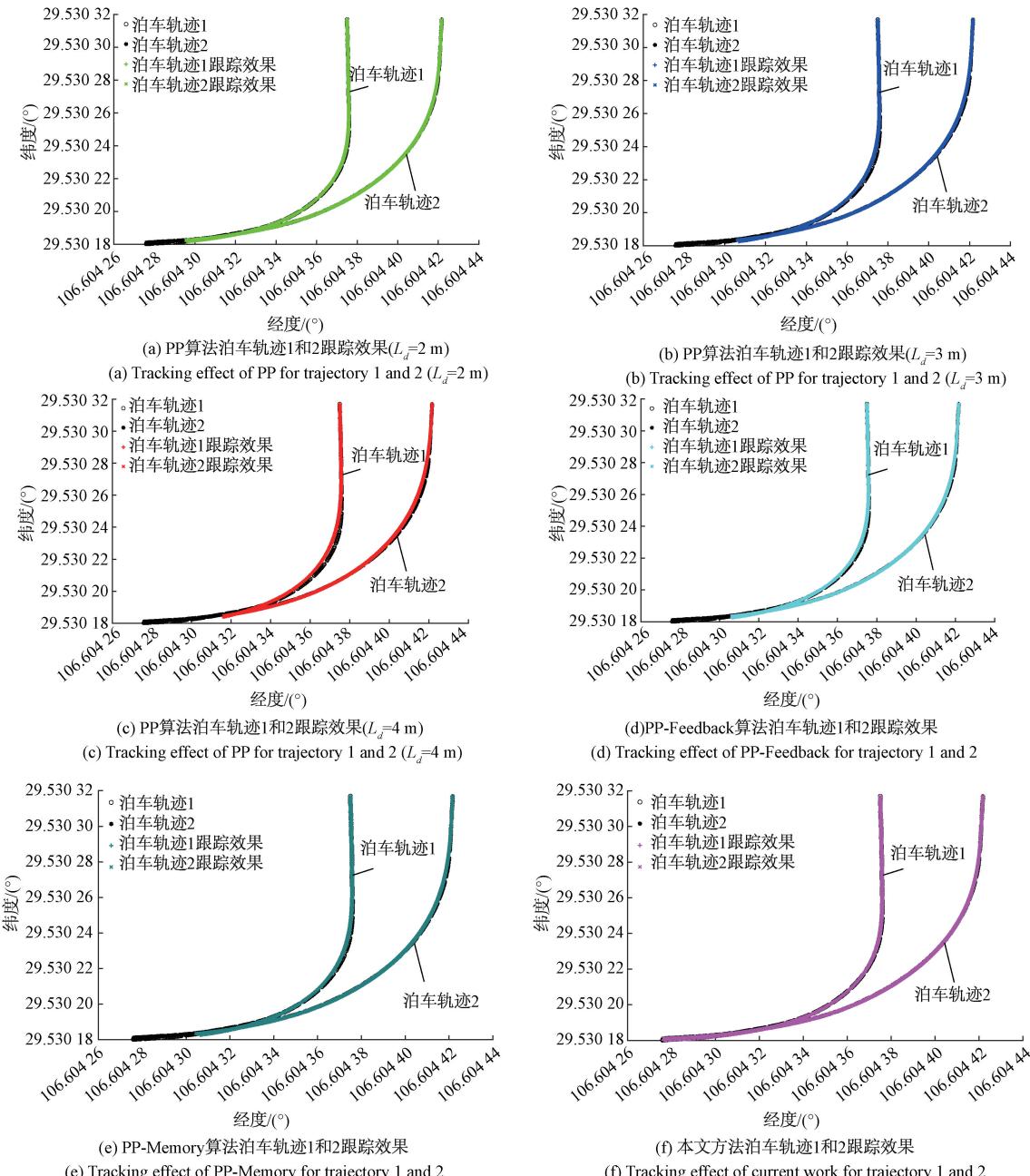


图4 各种PP算法与本文方法泊车轨迹仿真跟踪效果对比

Fig. 4 Comparison of the simulation tracking effect of the PP algorithm and the proposed method for parking trajectory

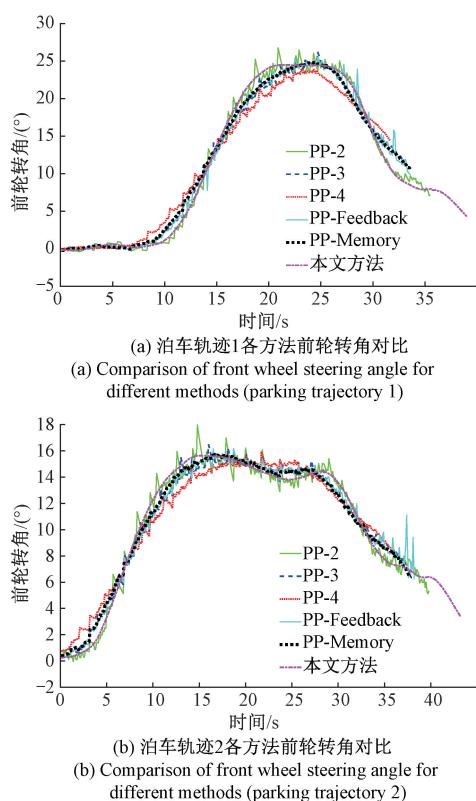


图5 各种PP算法与本文方法泊车轨迹跟踪  
前轮转角输出对比

Fig. 5 Comparison of the front wheel steering angle for parking trajectory tracking between the PP algorithms and the proposed method

法的各项性能指标有明显的提高,显示出本文自适应策略的有效性。

此外,在2条泊车轨迹仿真测试下,本文方法在仿真跟踪过程中减小了传统PP算法输出转角抖动和振荡的问题,整个跟踪过程是较为平滑的,即使临近终点也未发生抖动和振荡现象,对于各项振荡指标的提升本文方法也优于PP-Memory,进一步显示出本改进方法的有效性。此外,为了测试本文引入虚拟延长和模拟跟踪泊车轨迹策略对自动泊车实时性的影响,本文针对泊车轨迹1和2进行了10次虚拟延长与模拟跟踪计算测试,得到计算平均耗时分别为0.043和0.053 s,与相关文献的泊车轨迹规划控制算法计算耗时相比,对于文献[3],本文方法计算耗时较少,能够满足泊车实时性计算要求。

### 3.2 实车测试

为了进一步验证本文方法的有效性,在长安深蓝牌DEEPALSL03纯电动多用途乘用车样车上进行实车测试,该实验车测试车辆配备了高精度GPS定位系统、基于Xavier的TBOX(Telematics BOX)模块、4个摄像头和毫米波雷达。测试车辆的地理位置使用定位和导航设备进行确认。实车测试过程中算法部署在车载TBOX模块上,并将控制指令下发至车辆底层控制器上执行,实验过程中的参数设置见表3。

在仿真实验中,纯跟踪方法到达泊车终点前要么不起作用,要么输出转角剧烈振荡,为保证实验能完整进行,在其不起作用后令目标速度为0并停车。将前视距离 $L_d$ 为2、3、4 m的纯跟踪方法(PP-2、PP-3、PP-4)与本

表2 仿真测试性能指标对比

Table 2 Comparison of simulation testing performance indicators

方法	泊车轨迹	最大横向误差/m	泊车终点距离误差/m	累计前轮转角振荡值/(°)	前轮转角差分均值/(°)
PP-2 <sup>[9]</sup>	轨迹1	0.063	1.956	47.59	0.401
PP-3 <sup>[9]</sup>		0.128	3.015	21.88	0.256
PP-4 <sup>[9]</sup>		0.233	3.920	16.15	0.208
PP-Memory <sup>[21]</sup>		0.122	2.970	2.22	0.131
PP-Feedback <sup>[24]</sup>		0.118	2.974	44.32	0.388
本文方法		<b>0.063</b>	<b>0.014</b>	<b>0.59</b>	<b>0.118</b>
PP-2 <sup>[9]</sup>	轨迹2	0.034	1.891	62.47	0.390
PP-3 <sup>[9]</sup>		0.073	2.922	31.53	0.235
PP-4 <sup>[9]</sup>		0.135	3.937	20.10	0.175
PP-Memory <sup>[21]</sup>		0.066	2.930	5.20	0.093
PP-Feedback <sup>[24]</sup>		0.068	2.765	37.45	0.264
本文方法		<b>0.035</b>	<b>0.026</b>	<b>0.69</b>	<b>0.067</b>

文提出的方法分别部署在TBOX模块上进行测试。为了进一步测试本文方法的实车实时性技术性能,本文同样在TBOX模块上进行了10次虚拟延长与模拟轨迹跟踪计算,结果显示对于泊车轨迹1和2的计算平均耗时分别为0.027和0.033 s,进一步显示出本文方法能够适应

泊车这种低速场景下的实时计算要求。

实车测试中,采用采集到的泊车轨迹进行测试,目标轨迹1和2下纯跟踪算法以及本文提出方法的跟踪效果和前轮转角输出分别如图6和7所示。分析图中结果可知,对于2种目标轨迹下,PP-2、PP-3和PP-4方

表 3 实车测试主要参数设置

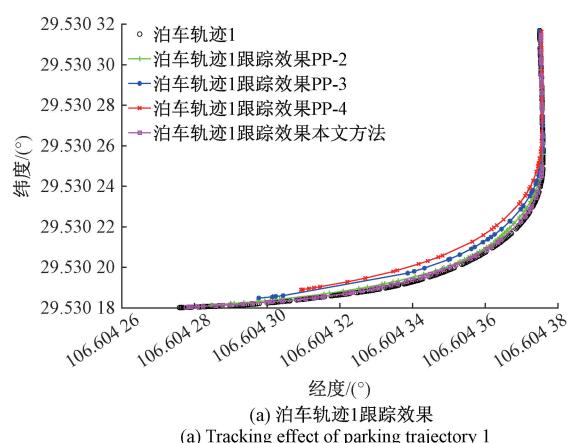
Table 3 Main parameters setting for real vehicle test

参数	值	参数	值
$D_{total}/m$	5.0	$L/m$	2.90
$K_c$	10.0	$V_{ls}/(m \cdot s^{-1})$	0.55
$L_d/m$	4.0	$k_h$	0.02
$S/m$	0.5	$dt/s$	0.05

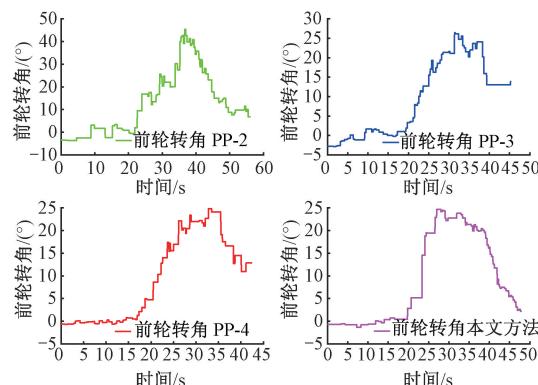
法均没有到达最终的泊车轨迹终点, PP-2 其方向盘输出抖动较为明显。相应地, 采用本文所提出的改进方法后, 2 条泊车轨迹均到达了泊车轨迹的终点, 且相比于 3 种不同前视距离下的 PP 算法, 其前轮转角输出抖动明显减小, 显示出所改进策略的有效性和实用性。

此外, 为了进一步验证本文算法的有效性, 选取泊车

轨迹跟踪的最大横向误差、泊车终点距离误差作为指标进行评判。为了更直观的评估曲线的振荡, 由图 6 和 7 可知每条前轮转角输出曲线是爬升到最大值再减小, 设定累计振荡值为前轮转角到达最大值前下降部分和到达最大值后上升部分的和, 本文采用前轮转角累计振荡值和前轮转角差分均值为指标对 2 种算法的振荡指标进行评价, 表 4 给出了 4 个评价指标下 2 种算法的性能参数比较。分析表 4 可知, 在 2 条泊车目标轨迹下, 本文方法的轨迹跟踪最大横向误差、泊车终点距离误差、累计振荡值指标均优于 PP 算法, 其中最大横向误差平均减少 0.26 m, 性能提升 54.08%, 泊车终点距离误差平均减少 1.80 m, 性能提升 83.61%, 累计前轮转角振荡值平均减少 14.19°, 性能提升 71.34%, 前轮转角差分均值性能提升 48.95%, 显示出所提出方法在减少前轮转角输出振荡上的优越性。



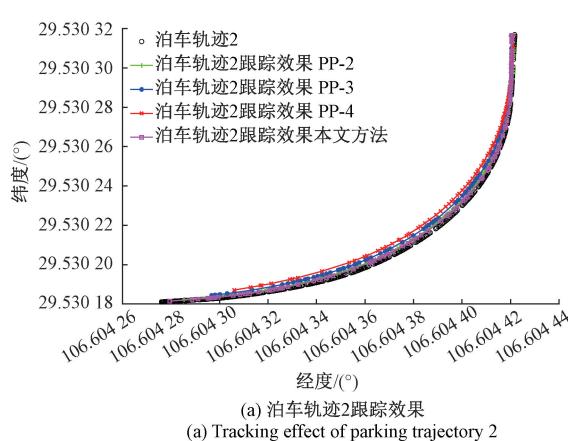
(a) 泊车轨迹1跟踪效果  
(a) Tracking effect of parking trajectory 1



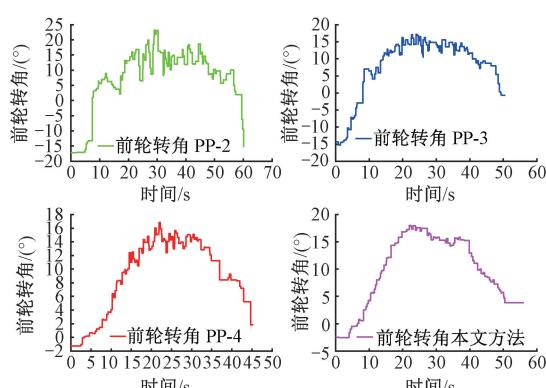
(b) 泊车轨迹1前轮转角输出  
(b) Front wheel steering angle output(parking trajectory 1)

图 6 泊车轨迹 1 实车跟踪效果及前轮转角输出结果

Fig. 6 Real vehicle tracking effect and front wheel steering angle output result of parking trajectory 1



(a) 泊车轨迹2跟踪效果  
(a) Tracking effect of parking trajectory 2



(b) 泊车轨迹2前轮转角输出  
(b) Front wheel steering angle output(parking trajectory 2)

图 7 泊车轨迹 2 实车跟踪效果及前轮转角输出结果

Fig. 7 Real vehicle tracking effect and front wheel steering angle output result of parking trajectory 2

表4 实车测试性能指标对比

Table 4 Comparison of performance indicators in real vehicle testing

方法	泊车轨迹	最大横向误差/m	泊车终点距离误差/m	累计前轮转角振荡值/(°)	前轮转角差分均值/(°)
PP-2 <sup>[9]</sup>	轨迹1	0.22	0.85	49.13	0.165
PP-3 <sup>[9]</sup>		0.47	2.17	14.63	0.078
PP-4 <sup>[9]</sup>		0.74	3.39	16.40	0.083
本文方法		0.15	0.18	7.85	0.066
PP-2 <sup>[9]</sup>	轨迹2	0.24	0.91	86.85	0.210
PP-3 <sup>[9]</sup>		0.38	2.04	48.12	0.144
PP-4 <sup>[9]</sup>		0.55	2.98	21.00	0.083
本文方法		0.18	0.33	6.81	0.043
平均性能提升量		<b>54.08%</b>	<b>83.61%</b>	<b>71.34%</b>	<b>48.95%</b>

## 4 结 论

本研究针对自动泊车下的纯跟踪的前视距离不易选择,纯跟踪方法终点性能差、跟踪轨迹时易出现抖动的问题,提出了一种基于路径虚拟与自适应预瞄的泊车轨迹跟踪方法。本研究的创新工作在于通过延长终点的方法解决了纯跟踪接近终点时的剧烈振荡或不起作用的问题,再通过模拟纯跟踪的方法优化泊车轨迹路径曲率不连续的问题,并最终形成新的泊车跟踪路径,以此提升纯跟踪算法的平顺性并减小跟踪过程中的前轮转角抖动。同时,提出了一种自适应弯道预瞄距离方法,以此来提高泊车过程中跟踪方法的跟踪精度并减少前轮转角输出值的振荡。仿真和实车测试结果表明,改进方法跟踪时精度提高的同时终点性能好,还减少了跟踪路径时的前轮转角引起的抖动,性能评价指标表明泊车终点距离误差平均减少1.80 m、累计前轮转角振荡值减少14.19°,展示出本文方法的实际应用价值。后续,将进一步把所提出的方法扩展到多场景下的倒车轨迹跟踪上,并将其改进用于低速场景下的智能车辆前进以及后退轨迹高精度跟踪。

## 参考文献

- [1] 宋东鉴,朱冰,赵健,等.基于驾驶行为生成机制的智能汽车类人行为决策[J].汽车工程,2022,44(12):1797-1808.
- SONG D J, ZHU B, ZHAO J, et al. Human-like behavior decision-making of intelligent vehicles based on driving behavior generation mechanism[J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(12): 1797-1808.

- [2] 朱浩,倪锐峰.基于点云稀疏语义特征的智能网联汽车协同感知配准算法[J].仪器仪表学报,2023,44(10):314-324.
- ZHU H, NI R F. A cooperative perception registration algorithm for intelligent and connected vehicles based on sparse semantic features[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(10): 314-324.
- [3] 陈晓明,李柏,范丽丽,等.基于半空间约束理论的自动泊车高性能轨迹优化方法[J].机械工程学报,2024,60(10):273-288.
- CHEN X M, LI B, FAN L L, et al. High-performance trajectory optimization for automated parking via half-space constraining theory [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(10): 273-288.
- [4] ZHANG T, ZOU Y, ZHANG X D, et al. Data-driven based cruise control of connected and automated vehicles under cyber-physical system framework[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(10): 6307-6319.
- [5] 田杰,叶青.自动泊车发展现状及运动规划研究进展[J].科学技术与工程,2024,24(21):8825-8836.
- TIAN J, YE Q. Review of automatic parking and research progress of motion planning[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24 (21): 8825-8836.
- [6] PADEN B, CAP M, YONG S Z, et al. A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, 1(1): 33-55.
- [7] 刘小松,魏昌斌,单泽涛,等.基于扩张状态观测器

- 的里程计定位补偿无人车轨迹跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(7): 313-320.
- LIU X S, WEI CH B, SHAN Z T, et al. Trajectory tracking control of unmanned vehicles with odometer positioning compensation based on extended state observer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 313-320.
- [8] 侯忠生, 董航瑞, 金尚泰. 基于坐标补偿的自动泊车系统无模型自适应控制[J]. 自动化学报, 2015, 41(4): 823-831.
- HOU ZH SH, DONG H R, JIN SH T. Model-free adaptive control with coordinates compensation for automatic car parking systems[J]. Journal of Automatica Sinica, 2015, 41(4): 823-831.
- [9] 李松. 智能汽车轨迹跟踪控制算法研究综述[J]. 汽车文摘, 2023(9): 19-27.
- LI S. Review of intelligent vehicle trajectory tracking control algorithm research [J]. Automotive Digest, 2023(9): 19-27.
- [10] ZUO ZH Q, YANG X, LI ZH, et al. MPC-based cooperative control strategy of path planning and trajectory tracking for intelligent vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 6(3): 513-522.
- [11] 刘小松, 朱焕海, 单泽彪, 等. 基于双曲正切视线引导的轮式移动机器人目标跟踪自抗扰控制[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 201-209.
- LIU X S, ZHU H H, SHAN Z B, et al. Active disturbance rejection control for target tracking of wheeled mobile robot based on hyperbolic-tangent line-of-sight guidance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 201-209.
- [12] 潘世举, 李永乐, 李子先, 等. 基于改进纯跟踪的智能车路径跟随方法[J]. 汽车工程, 2023, 45(1): 1-8, 19.
- PAN SH J, LI Y L, LI Z X, et al. Path following method of intelligent vehicles based on improved pure tracking[J]. Automative Engineering, 2023, 45(1): 1-8, 19.
- [13] 胡丹丹, 尹鹏飞, 牛国臣, 等. 基于滚动预瞄模型的纯跟踪算法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3787-3793.
- HU D D, YIN P F, NIU G CH, et al. Rolling preview model based on pure pursuit algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(9): 3787-3793.
- [14] 刘卫东, 张超, 江会华, 等. 基于改进纯跟踪的低速智能汽车路径跟踪控制[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 10983-10992.
- LIU W D, ZHANG CH, JIANG H H, et al. Path tracking control of low-speed intelligent vehicles based on improved pure pursuit [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(25): 10983-10992.
- [15] WANG H, CHEN X, CHEN Y, et al. Trajectory tracking and speed control of cleaning vehicle based on improved pure pursuit algorithm [C]. 2019 Chinese Control Conference, 2019: 4348-4353.
- [16] CHEN Y P, SHAN Y X, CHEN L, et al. Optimization of pure pursuit controller based on PID controller and low-pass filter [C]. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2018: 3294-3299.
- [17] FU Q, LIU X, LIU X Y, et al. An improved pure pursuit algorithm for tractor automatic navigation [C]. 2021 IEEE 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education, 2021: 201-205.
- [18] KIM S, LEE J, HAN K, et al. Vehicle path tracking control using pure pursuit with MPC-based look-ahead distance optimization [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(1): 53-66.
- [19] WANG R, LI Y, FAN J H, et al. A novel pure pursuit algorithm for autonomous vehicles based on salp swarm algorithm and velocity controller [J]. IEEE Access, 2020, 8: 166525-166540.
- [20] 周正阳, 潘树国, 蔚保国, 等. 基于ABMSSA的PP算法分布式自动驾驶轨迹跟踪控制策略[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 50-57.
- ZHOU ZH Y, PAN SH G, WEI B G, et al. Distributed automatic driving trajectory tracking control strategy based on PP algorithm based on ABMSSA [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 50-57.
- [21] 齐志权, 吴世南, 邹波, 等. 自动泊车路径纯跟踪算法应用研究[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(5): 510-516.
- QI ZH Q, WU SH N, ZOU B, et al. Application of pure pursuit algorithm for automatic parking system [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023,

- 43(5): 510-516.
- [22] 侯君怡, 潘子豪, 余雷. 基于二维激光 SLAM 和纯跟踪方法的单舵轮 AGV 高精定位和鲁棒控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(3): 161-169.
- HOU J Y, PAN Z H, YU L, et al. High-precision localization and robust control for single-steering-wheel AGV based on 2D laser SLAM and pure pursuit method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3): 161-169.
- [23] SAMUEL M, HUSSEIN M, MOHAMAD M B. A review of some pure-pursuit based path tracking techniques for control of autonomous vehicle[J]. International Journal of Computer Applications, 2016, 135(1): 35-38.
- [24] 潘世举, 李建市, 李华, 等. 基于反馈纯跟踪的智能车路径跟随方法[J]. 汽车工程, 2023, 45(7): 1134-1144.
- PAN SH J, LI J SH, LI H, et al. Path following method of intelligent vehicles based on feedback pure tracking method[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(7): 1134-1144.
- [25] YANG Y, LI Y K, WEN X, et al. An optimal goal point determination algorithm for automatic navigation of agricultural machinery: Improving the tracking accuracy of the pure pursuit algorithm[J]. Computers Electronics in Agriculture, 2022, 194: 106760.

### 作者简介



刘平(通信作者), 2012 年于华北电力大学获得学士学位, 2017 年于浙江大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学副教授, 主要研究方向为网联汽车轨迹规划决策与控制。

E-mail: liuping\_cqupt@cqupt.edu.cn.

**Liu Ping** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North China Electric Power University in 2012, and received his Ph. D. degree from Zhejiang University in 2017. He is currently an associate professor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include trajectory decision, planning and control of connected vehicles.