

一种误差补偿的多因耦合定位与轨迹规划方法

吴宏涛¹, 王耀², 马宇鹏¹

(1. 山西省智慧交通研究院有限公司, 山西太原 030032; 2. 太原科技大学 电子信息工程学院, 山西太原 030024)

摘要: 随着智能网联车辆的快速发展, 车辆在复杂环境下的精准定位和轨迹规划成为亟待解决的问题。针对车辆在GPS信号弱或失效情况下定位精度低, 以及传统轨迹规划方法在复杂路况下适应性差的问题, 本文提出了一种误差补偿的多因耦合定位与轨迹规划方法。通过分析多源融合数据, 本文设计了横向定位算法与偏转角确认算法, 并构建了基于误差预测补偿的智能融合模型。结合车辆行为、驾驶模式与感知数据, 设计了车辆在高速行驶状态下的多因耦合轨迹规划器, 并提出了超车轨迹优化策略。实验结果表明, 该方法在GPS有效的情况下, 横向定位精度比GPS提高了3.94 dm, 速度定位误差减小了0.22 m/s; 在GPS失效的情况下, 通过误差补偿, 定位精度显著提升。此外, 与MPC控制器相比, 本文设计的轨迹规划器在变道超车过程中展现出更高的稳定性和安全性, 特别是在湿滑路面附着系数为0.4时, 最大横向偏差减少了0.93 m, 横摆角速度跟踪最大偏差减小了0.03 rad/s。本文所提方法有效提高了车辆在高精度定位与轨迹规划方面的性能, 为智能网联车辆的安全行驶提供了重要保障。

关键词: 网联车辆; 定位算法; 多尺度定位; 多源数据融合; 轨迹规划

中图分类号: U491.8 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.07.0013

引用格式: 吴宏涛, 王耀, 马宇鹏. 一种误差补偿的多因耦合定位与轨迹规划方法[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 693-702.

WU Hongtao, WANG Yao, MA Yupeng. A multifactor coupled localization and trajectory planning approach with error compensation[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(6): 693-702.

A Multifactor Coupled Localization and Trajectory Planning Approach with Error Compensation

WU Hongtao¹, WANG Yao², MA Yupeng¹

(1. Shanxi Intelligent Transportation Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030032, China;

2. School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: With the rapid development of intelligent connected vehicles, precise localization and trajectory planning of vehicles in complex environments have become urgent problems to be solved. Aiming at the issues of low localization accuracy under weak or failed GPS signals and the poor adaptability of traditional trajectory planning methods in complex road conditions, this paper proposed an error-compensated multi-factor coupled localization and trajectory planning approach. By analyzing multi-source fusion data, this paper designed a lateral positioning algorithm and a deflection angle confirmation algorithm, and constructed an intelligent fusion model based on error prediction and compensation. Combined with vehicle behavior, driving mode and perception data, a multi-factor coupled trajectory planner for vehicles in high-speed driving conditions was designed, and an optimization strategy for overtaking trajectories was proposed. Experimental results show

收稿日期: 2024-07-19

基金项目: 山西省重点研发计划项目(202102070301019); 山西省基础研究计划项目(202103021223464); 山西交通控股集团有限公司科技研发项目(23-JKKJ-20)

作者简介: 吴宏涛(1988-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事车路协同与计算机视觉研究。E-mail: wht_ustb_doc2014@163.com。

that under effective GPS conditions, the lateral positioning accuracy of this method is improved by 3.94 dm and the speed positioning error is reduced by 0.22 m/s compared to GPS. In the case of GPS failure, the localization accuracy is significantly enhanced through error compensation. Furthermore, compared with the Model Predictive Control (MPC) controller, the trajectory planner designed in this paper exhibits higher stability and safety during lane-changing and overtaking, especially on wet roads with a coefficient of friction of 0.4, where the maximum lateral deviation is reduced by 0.93 meters and the maximum yaw rate tracking deviation is decreased by 0.03 radians per second. The proposed method effectively improves the performance of vehicles in terms of high-precision localization and trajectory planning, providing important guarantees for the safe driving of intelligent and connected vehicles.

Key words: connected vehicles; localization algorithm; multi-scale localization; multi-source data fusion; trajectory planning

0 引言

在智能网联车辆系统中,车辆精准定位和路径规划对于提高系统运行效率、减少交通安全风险具有重要意义^[1]。随着车辆数目增加,网联车辆的控制难度也随之递增,保持复杂道路环境中车辆行驶状态的稳定和动态路径优化^[2-3]是推动智能网联汽车规模化产业化应用的关键。车辆精准定位和路径规划除了涉及车辆间通信协调,还需要依靠高精度定位系统和智能算法来实现^[4-5]。相关研究有助于推动智能网联技术的发展,可为未来智能交通系统提供重要的理论支撑和技术借鉴。

目前,路径优化跟踪主要使用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)^[6-7]。然而GPS存在定位精度受限、更新频率较低的问题,并且城市高楼场景下会出现信号丢失现象,这些因素使得GPS难以满足智能交通对高精度定位的需求^[8-9]。涂远泯等^[10]提出了一种多传感数据结合粒子滤波的融合方法,通过分析车辆行驶时位置与速度、行驶角度、转向角度等物理量随时间变化的关系,根据车辆提供的信息变化规律可以提高自身定位精度。随着车联网技术的发展,车辆可以通过V2X(Vehicle-to-Everything)和其他传感器交换信息,产生了许多协作式的车辆定位方法^[11]。这些方法利用多个车辆之间的通信和协作,提高了车辆定位的精度和可靠性。一些常见的协作式车辆定位方法包括:车辆协作式定位、多智能体联合定位、基于信道信息的定位、分布式定位^[12]。

在多个智能体的车辆轨迹规划方面,崔立堃等^[13]将人工势场法与虚拟结构法进行结合来克服虚拟结构法在避障时结构缺乏灵活性的问题。陈

骏岭^[14]通过改进人工势场法优化障碍物的避障能力,提出多编队避障算法,解决了人工势场法容易产生局部极小值点的问题,提高了机器人编队避障的精度和效率。李古月^[15]提出一种基于改进人工势场的确定性算法,通过将最优路径划分为多个子目标点,形成子目标点序列,通过切换目标点帮助其脱离局部最小值,有效降低了无人水面航行器落入局部最小值的概率。本文方法与目前定位和轨迹规划方法的对比结果如表1所示。

表1 不同定位与轨迹规划方法对比
Tab. 1 Comparison of different methods of localization and trajectory planning

方法	对比
GPS定位与路径规划 ^[6-9]	GPS是当前主要的车辆定位技术,但存在精度受限、更新频率低以及城市环境中信号丢失等问题,难以满足智能交通高精度需求。
多传感器融合定位 ^[10]	多传感器融合方法结合粒子滤波,通过分析车辆行驶参数的动态变化规律,可以显著提高定位精度,适用于复杂道路环境。
协作式车辆定位 ^[11-12]	基于V2X通信的协作式方法,通过车辆间的信息交换,提高了定位精度和可靠性,包括车辆协作式定位和分布式定位等。
人工势场法轨迹规划 ^[13]	通过将人工势场法与虚拟结构法相结合,提升了避障能力并克服了虚拟结构法在动态避障中的灵活性不足。
改进人工势场法 ^[14]	改进人工势场法,优化了传统人工势场法的障碍物避障能力,提出多编队避障算法,有效避免了局部极小值问题,提高了路径规划效率。
确定性轨迹规划算法 ^[15]	确定性轨迹规划算法通过将路径分解为子目标点序列,减少了局部极小值的影响,增强了轨迹规划的稳定性。
基于信道信息的定位 ^[12]	通过分析车辆通信信道的特性进行定位,不依赖单一的外部信号,提高了抗干扰能力和定位精度。
本文方法	通过耦合多个影响因子(如环境干扰、车辆参数变化等),结合误差补偿策略,实现更高的定位精度与动态轨迹规划能力,适应复杂道路和通信环境。

现阶段,网联车辆的精准定位与路径规划领域的研究取得了很大进展,但仍面临着一些挑战,如:当GPS失效,通信信号干扰时,定位精度

不理想；车辆避障超车时，不能合理规划最优路径，影响车辆稳定性行驶等。本文提出了一种误差补偿的多因耦合定位与轨迹规划方法。通过分析多源融合数据，设计了横向定位算法与偏转角确认算法，并构建了基于误差预测补偿的智能融合模型。结合车辆行为、驾驶模式与感知数据，设计了车辆在高速行驶状态下的多因耦合轨迹规划器，并提出了超车轨迹优化策略。

1 误差预测补偿约束的多传感器融合定位技术

智能网联车辆高精度定位主要通过从传感层面融入新的传感辅助方法，或是在系统融合层面提出智能融合算法^[16]。从成本角度来看，前者虽能取得较高的定位精度，但应用限制多，代价大。后者由于成本低、易安装、信息易获取等优点受到了重视。

车速传感器通过车辆的里程测量单元获取速度和距离信息，综合考虑这些信息可以有效减少GPS失效时由微型惯性导航系统(Micro-electromechanical System-Inertial Navigation System, MEMS-INS)推算所产生的累积误差，特别是沿道路方向的纵向定位误差。

在典型场景中，卫星信号在沿道路方向上未被遮挡，GPS的测量值可用于减小纵向定位误差，但在垂直于道路方向(横向)上因尺度较小、遮挡严重

等问题，会造成横向定位误差远大于纵向定位误差；车辆的偏转角与车辆行驶状态和路段线形有着密切的关系，且其尺度相较于横向定位更小，单纯依靠卫星信号不足以实现准确判别。因此，研究横向定位算法与偏转角确认算法是提高车辆全局定位性能的重要突破点。本文提出利用智能网联车辆所配备的前置摄像头配合路侧感知系统，通过将GPS与其他多种传感器进行融合，开展误差预测补偿约束的多传感器融合定位技术研究。

1.1 局部遮挡下的横向与偏转角可靠估计方法

从时序角度来观察车载图像中道路区域的变化，当车辆变道或转弯时，道路区域向图像的某一侧转移，横向位置的变化往往暗示车辆偏转角也发生改变。若能获取当前时刻的道路方向信息，二者加权即可实现偏转角估计。道路方向可通过道路地图来获取，因此偏转角估计的核心是利用道路区域估计车辆偏转角。

根据上述分析，本文提出了偏转角横向定位网络来模仿该自定位过程，引入卷积神经网络(CNN)、生成对抗网络(GAN)和长短期记忆网络(LSTM)，然后将其相互耦合级联以构建最终模型，命名为CGLNet。CGLNet由3个模块组成：道路区域检测和遮挡目标分割模块、道路区域重构模块、横向位置和偏转角估计模块。CGLNet的整体架构如图1所示。

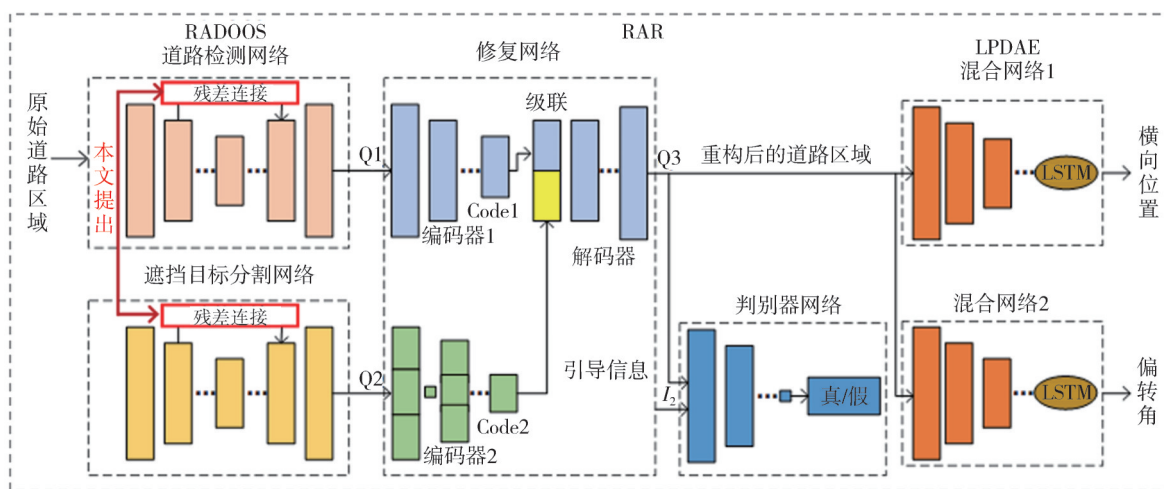


图1 CGLNet网络架构

Fig. 1 CGLNet network architecture

U-Net是一种对称的卷积神经网络，SegNet是一种用于语义分割的深度全卷积神经网络结构，基于U-Net和SegNet的结构，本文构建了道路区域检测网络(RADNet)，利用残差连接来替代传统连接

方式，以降低计算负担并提高特征图的丰富程度。

1.2 车辆多传感器全局融合定位策略

对横向位置和方位角的研究，并未涉及全局

融合定位,需要进一步在系统融合层面开展复杂交通环境下多传感器融合定位方法的研究。针对多传感器信息,本文提出了增强观测信息的融合定位方法;针对GPS失效时系统因缺少绝对位置信息更新而导致定位性能下降的问题,以横向位置和方位角观测信息为基础,构建基于误差预测补偿的智能融合定位模型,以进一步提升车辆在GPS失效期间的定位精度。

1.2.1 信息增强的直接融合技术

本文提出的对观测信息增强的直接融合定位方法,以GPS的测量值为主观测量,视觉传感器感知的横向位置和方位角为辅助观测量,以最常用的扩展卡尔曼滤波(EKF)为框架,实现多传感器信息融合。与基于EKF的GPS和MEMS-INS相比,该方案融入了对定位性能有重要影响的辅助观测信息,无论GPS是否失效,该方案均能提高车辆定位精度。直接融合定位方案如图2所示。

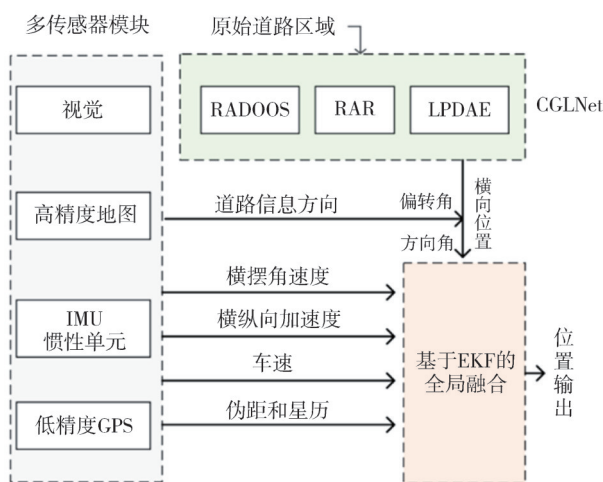


图2 直接融合定位方案图

Fig. 2 Direct fusion positioning diagram

1.2.2 误差预测补偿的智能融合定位

考虑到复杂交通环境下参与定位解算的GPS卫星数量可能低于4颗,紧耦合是最佳选择^[17]。尽管GPS失效时仍能利用辅助观测信息来提高车辆定位精度,但由于缺少绝对位置信息修正,随着GPS失效时间的延长,传感辅助层面带来的性能提升逐步减小,难以满足智能辅助驾驶车辆的车道级定位需求^[18-19]。针对这一问题,本文构建了弱定位信号环境下基于误差预测补偿的智能融合定位模型。当GPS可用时,方案主要涉及3个模块:惯性测量单元(IMU)数据去噪、多观测量差异化融合和位置误差预测,其中,前两个模块

是核心。多观测量差异化融合是根据GPS观测信息是否有效,从伪距、横向位置和方位角中选择不同的观测量与惯性定向定位导航系统(INS)融合的一种策略,其目的是获得不同观测信息增强下的融合定位输出。GPS可用方案工作原理图如图3所示。

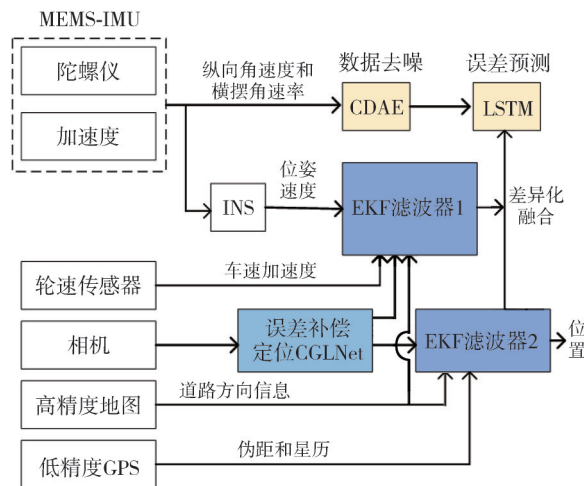


图3 GPS可用方案工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of GPS usable programme

当GPS失效时,这种智能融合定位模型利用位置误差预测模块,建立了IMU测量数据和滤波后各个状态量之间的关系,通过预测修正定位输出,以提高GPS失效时的定位精度。综合考虑IMU测量数据之间存在的时间相关性,使用LSTM进行时间序列建模^[20],技术原理如图4所示。

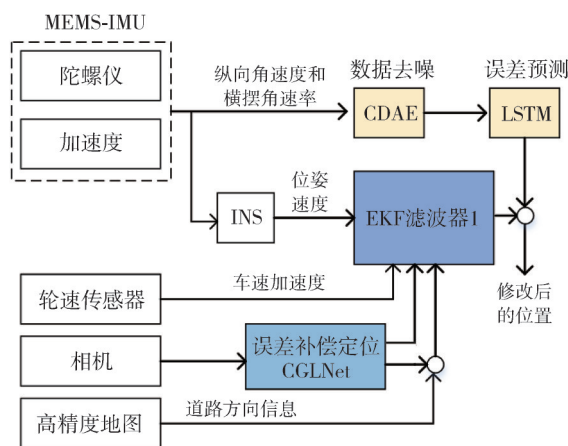


图4 弱定位信号环境下的定位技术原理图

Fig. 4 Schematic diagram of positioning technique in weak positioning signal environment

为了充分利用GPS观测信息同时又避免滤波器退化,需要搭建两个滤波器:融入GPS观测量的滤波器和对GPS失效免疫的滤波器。当GPS可用时,基于EKF的滤波器2融合了GPS伪距、

横向位置和方位角这 3 个有效观测量。当 GPS 失效时, 基于 EKF 的滤波器 1 融合了横向位置和方位角观测量。

位置误差预测模型的任务是输出准确的系统位置误差, 进而利用该误差对原始定位输出进行修正。基于 LSTM 的位置误差预测模型结合了卷积去噪自编码器(CDAE)提取到的特征作为输入。具体而言, 该模型将 CDAE 的编码器与 LSTM 结合在一起, 用于位置误差的预测。在这个组合模型中, 编码器的初始化权重是由无监督预训练获得的, 然后使用这些权重对组合模型进行微调。这种方法允许模型从无监督学习中学习到数据的特征表示, 然后在位置误差预测任务中通过有监督微调进一步提高性能。通过这样的组合, 模型可以更好地捕捉输入数据的特征, 并在位置误差预测方面取得更理想的效果。

2 多因耦合的车辆行驶轨迹规划技术

车辆驾驶模式与当前行驶工况对车辆轨迹规划判别有重大影响, 在自动驾驶及车辆行驶过程

中, 针对前方路况的异常、前车行驶状态的变化, 车辆都需在极短时间内做出相应的路径规划以保证车辆的正常行驶。依托路域、车载感知设备所获取的路域知识, 车辆可实现对行驶环境的动态精准感知, 并作为先验知识输入轨迹决策算法, 指导车辆做出精准、合理的轨迹规划^[21]。

本文设计的车辆轨迹规划器融合了模型预测控制(MPC)和人工势场(APF)方法, 以及一套专为超车场景优化的策略。采用基于车辆动力学的点质量模型描述车辆运动状态, 简化了车辆结构, 提高了数据传递的实时性, 将车辆感知数据转化为目标函数项, 使得道路环境中各种因素的影响以目标函数形式量化, 符合了车辆运动学的条件约束。通过这种方式, 车辆轨迹规划问题被转化为优化求解问题, 可以有效地权衡各种环境因素对轨迹的影响。该轨迹规划器原理图如图 5 所示。

轨迹规划器可以及时感知车辆状态和路况的变化, 并利用这些信息在线求解目标函数, 生成最优局部轨迹。这种综合考虑实时信息的方法显著提高了车辆行驶的稳定性, 可以为安全驾驶提供重要理论支持。

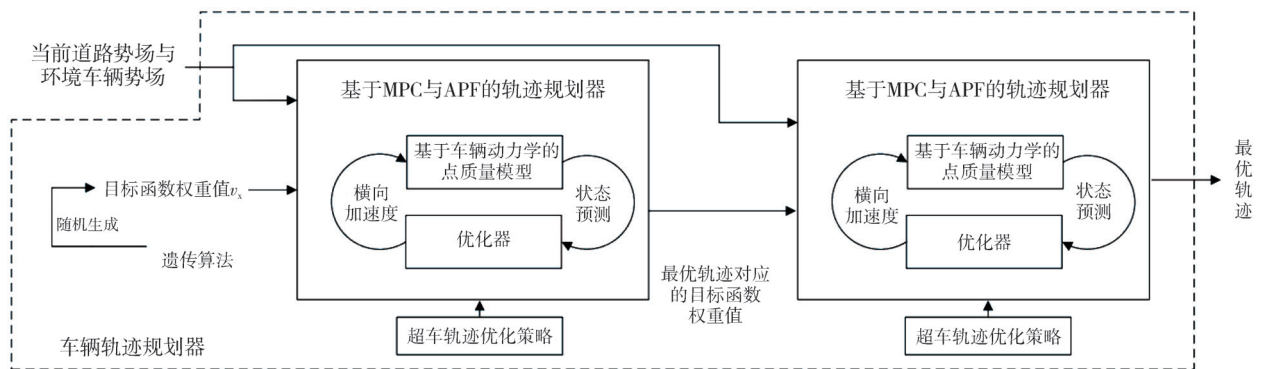


图 5 轨迹规划器原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the trajectory planner

2.1 基于车辆动力学的点质量模型

模型预测控制(MPC)是一种控制模型, 具有预测、优化和反馈校正的功能。确保轨迹规划符合车辆动力学约束, 有助于实现跟踪控制^[22]。MPC的滚动优化提高了路径规划的实时性, 但也增加了处理器的计算量, 不能满足车辆的实时性要求。因此, 在选择车辆模型时需要平衡计算复杂度和处理时间。

本文采用基于车辆动力学的点质量模型, 这种模型计算量相对较小^[23-24], 同时也满足了数据

传递的实时性要求。根据车辆动力学的约束条件, 设计的点质量模型的运动表达式为

$$\begin{aligned}
 ma_y &= F_y, \quad ma_x = F_x - F_d, \\
 X &= V_x \cos \varphi - V_y \sin \varphi, \\
 Y &= V_x \sin \varphi + V_y \cos \varphi,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

式中: x 、 y 、 a_x 和 a_y 分别为车辆的横向与纵向位置坐标、横向与纵向加速度的测量值; φ 为车辆的横摆角; X 和 Y 分别为横向与纵向距离的变化; V_x 、 V_y 分别为车体坐标系下质心的横向速度、纵向速度; F_x 、 F_y 分别为车辆前后轴上轮胎横向力合力、纵向力合力; m 为车辆质量; F_d 为车辆在横向上受

到阻力的合力。

2.2 目标函数优化

为了确保车辆行驶的安全性和稳定性,轨迹规划器在生成行驶轨迹时必须考虑横向加速度的控制,以避免横向加速度过大带来的不稳定情况。为了实现这一目标,本文引入一种轨迹陡峭目标项,该目标项旨在评估轨迹的曲率程度和平滑性,从而帮助优化车辆的横向加速度控制^[25]。通过在轨迹规划器中加入这种轨迹陡峭目标项,可以更好地控制车辆的横向运动,提高车辆行驶的稳定性 and 舒适性。同时,这也有助于减少车辆在转弯或变道时可能出现的侧滑情况,从而提升整体行驶安全性。其表达式为

$$J_S = \sum_{i=1}^{N_p} \Delta S(t+i|t)^T v_S \Delta S(t+i|t), \quad (2)$$

式中, ΔS 为单个步长内的轨迹曲率惩罚值,通过 A_k 与 A_{\max} 的值可以计算出 ΔS 值的大小。 A_k 代表的是单位步长内的车辆轨迹偏移度, A_{\max} 为车辆轨迹偏移角的最大约束角度。预测角度单位预测步长内的轨迹曲率惩罚值 S 的计算式为

$$\Delta S = \begin{cases} |A_k - A_{\max}|^2, & A_k > A_{\max}, \\ 0, & A_k < A_{\max}. \end{cases} \quad (3)$$

当 $A_k < A_{\max}$ 时,意味着生成的轨迹较为平滑,惩罚值为0;当 $A_k > A_{\max}$ 时,表示当前时刻到下一时刻车辆产生的预测角度 A_k 超出了最大约束角度 A_{\max} ,此时轨迹曲率惩罚值的大小为 $|A_k - A_{\max}|^2$ 。

2.3 超车轨迹优化策略

在车辆进行换道避障时,如果车辆从跟踪右侧车道中心线突然切换到跟踪左侧车道中心线,

可能会导致轨迹规划器生成的优化轨迹不稳定。这种突然切换会使惩罚值急剧增加,导致车辆轨迹出现明显波动,从而降低行驶稳定性,增加其与周围车辆碰撞的风险。因此,在换道避障过程中,平滑过渡和调整道路中心线跟踪目标项的切换非常重要,这会直接影响轨迹规划器生成稳定且安全的最优轨迹。通过合理的过渡和调整,可以减少突然切换带来的波动,提高车辆行驶的稳定性 and 安全性。针对上述问题,本文设计了一种车辆超车时轨迹优化的策略。计算公式为

$$\begin{aligned} P_{\text{center}} &= \kappa_l P_{\text{center},l} + \kappa_r P_{\text{center},r}, \\ P_{\text{center},l} &= (Y_{\text{predict}} - Y_{\text{center},l})^2, \\ P_{\text{center},r} &= (Y_{\text{predict}} - Y_{\text{center},r})^2, \\ \kappa_l, \kappa_r &\in (0, 1], \end{aligned} \quad (4)$$

式中: P_{center} 为车道中心线左、右两边惩罚值, l 和 r 表示对左、右两边权重的大小,取值范围为 $(0, 1]$ 。在车辆换道避障过程中,可以通过将车道中心线左右两边的惩罚值 P_{center} 分解,并根据左右两边的权重 l 和 r 进行加权计算,实现车道中心线的平滑转换。通过设计横向权重分配区域,结合车辆横向位置和权重分配区域的长度,实时计算和调整 l 和 r 的数值。

3 实验与分析

3.1 车辆多维观测量融合的定位技术实验

为全面评估上述方法的横向位置与方向角的估计性能,分别在GPS信号有效和信号缺失两种情况下仿真。对上文提到的GPS可用方案和在GPS信号失效时提出的误差预测补偿的智能融合方案性能进行验证。通过表2仿真数据分析得出,两种情况下加入横向位置与偏转角估计融合均比传统方法定位精度更好。

表2 GPS、MEMS-INS和本文方法定位偏差的对比

Tab. 2 Comparison of GPS, MEMS-INS and the method of this paper for positioning deviations

方法	位置误差/dm			速度误差/(m·s ⁻¹)			姿态误差/(°)		
	纵向	横向	垂向	纵向	横向	垂向	横滚角	俯仰角	航向角
GPS	8.62	10.16	2.71	0.67	0.91	0.13	0.22	0.17	0.81
MEMS-INS	6.33	9.14	2.12	0.67	0.82	0.12	0.19	0.14	0.56
本文所提方法	5.14	6.22	1.94	0.62	0.69	0.10	0.16	0.12	0.35

3.1.1 不同数据输入条件下的定位精度实验

在GPS有效的情况下,本文采用了以GPS的测量值为主观测量,以视觉传感器感知的横向位置和方位角为辅助观测量,用扩展卡尔曼滤波(EKF)作为信息融合的框架,实现多传感器信息

融合的方法。通过测试数据可以看出,与基于EKF的GPS和MEMS-INS定位系统相比,本方案融入了对定位性能有重要影响的辅助观测信息,提高了车辆定位精度。从表2数据分析中得出,本方案在位置误差上横向位置误差的改善最

大,比GPS定位精度偏差减小了3.94 dm,比MEMS-INS精度偏差减小了2.92 dm;车辆速度定位误差在横向上提升最为明显,比GPS横向速度误差减小了0.22 m/s;车辆姿态误差方面航向角提升较为明显,比GPS提升了0.46°,比MEMS-INS方案提升了0.21°。该结果主要是因为本文方法通过道路区域重构这一方式消除了遮挡目标对横向位置估计的不利影响,因此横向位置更准确。

3.1.2 弱信号环境下的定位技术实验

在弱信号环境下,对扩展卡尔曼滤波器(EKF)、基于EKF加入偏转角横向定位网络(EKF/CGLNet)、基于误差预测补偿的智能融合模型(EKF/CGLNet/LSTM)以及智能融合模型加入去噪处理(EKF/CGLNet/CDAE-LSTM)四种方式进行定位测试对比。

GPS失效时,4种对比方法的定位结果如图6所示。

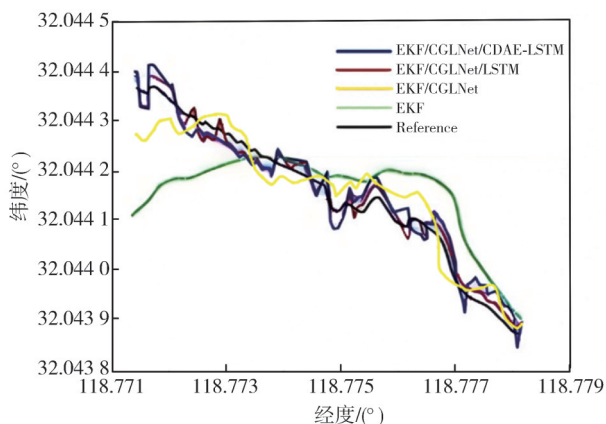


图6 4种对比方法在GPS失效时的定位结果

Fig.6 Positioning results of the four compared methods during the GPS missing

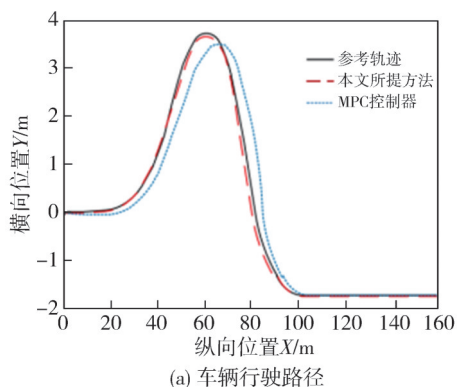
由图6可以看出,EKF的结果最差,甚至会在测试后期出现滤波发散现象。这是因为EKF缺

少绝对位置信息更新,累积误差会随着时间的推移而逐渐增大,定位性能迅速下降。同样,EKF/CGLNet也出现了性能衰退。即便如此,在横向位置和方位角观测信息增强的条件下,定位性能依然会比EKF好很多,再次验证了这两个观测量的实用性。EKF/CGLNet/CDAE-LSTM及EKF/CGLNet/LSTM的性能优于其它方法,呈现出良好的车道跟踪性能,原因是二者具有误差预测补偿能力。通过对融入了横向位置和方位角观测量的方案进行误差补偿,进一步提高了定位精度,同时也验证了基于LSTM的位置误差预测模型的效力。

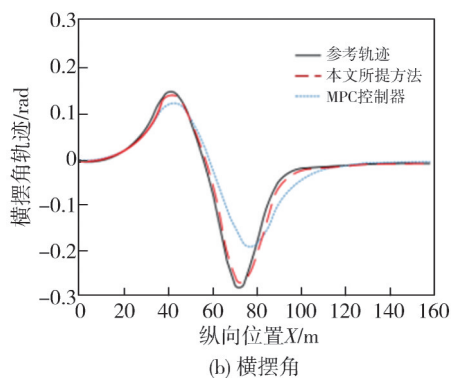
3.2 网联车辆轨迹规划技术测试

对比本文设计的轨迹规划器和MPC控制器,分别在干燥路面附着系数0.8和湿滑路面附着系数0.4两种路况下测试两种控制器在变道情况下的性能。将车辆的行驶路径、横摆角、横摆角速度、前轮转角的数据变化作为控制器的评价指标。

图7是在干燥路面附着系数为0.8时,变道跟踪过程中两种控制器的仿真结果图,变道前车速为40 km/h。通过分析可以发现:在干燥路面变道跟踪过程中,两种控制器控制的车辆都能够较为精确地跟踪参考路径,但在超车过程中,MPC控制器的最大横向偏差约为0.45 m,而轨迹控制器的最大横向偏差约为0.18 m,最大横向偏差减少59.64%,显然本文设计的轨迹规划器展现出比MPC控制器更理想的稳定性。在横摆角速度和前轮转角图中,轨迹控制器的最大横摆角速度和前轮转角都比控制器的最大值要小,保证了车辆行驶的安全性,同时其在整个轨迹跟踪过程中变化平缓,且都处于约束范围内,说明此时车辆轨迹规划器的稳定性良好。



(a) 车辆行驶路径



(b) 横摆角

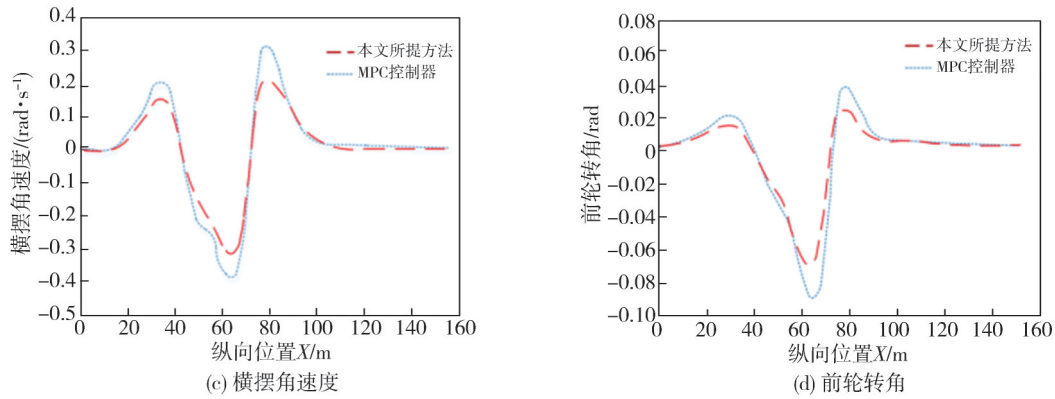


图7 路面附着系数为0.8时,变道跟踪过程中两种控制器跟踪结果的对比

Fig. 7 Comparison of the tracking results of two controllers during lane change tracking with the road surface attachment coefficient of 0.8

图8是在湿滑路面附着系数为0.4时,变道跟踪过程中两种控制器的仿真结果图,变道前车速为40 km/h。可以看出,由于轮胎与地面摩擦力的下降,MPC路径跟踪控制器和本文设计的跟踪控制器的轨迹跟随都存在一定的滞后。在超车过程中,MPC控制器的最大横向偏差为1.13 m,本文优化后的轨迹控制器的最大横向偏差为0.2 m,相比较减少了0.93 m。MPC控制器的横摆角轨

迹跟踪最大偏差为0.05 rad,优化后的轨迹控制器的最大偏差为0.02 rad。由此可以看出优化后的轨迹控制器的轨迹跟踪精度更高。从横摆角速度和前轮转角仿真图可以看出,本文设计的轨迹控制器路径跟踪的横摆角速度与前轮转角变化范围都因地面附着系数的减小而变大了一些,但都比MPC控制器效果好,曲线变化始终平顺光滑,车辆行驶稳定性良好。

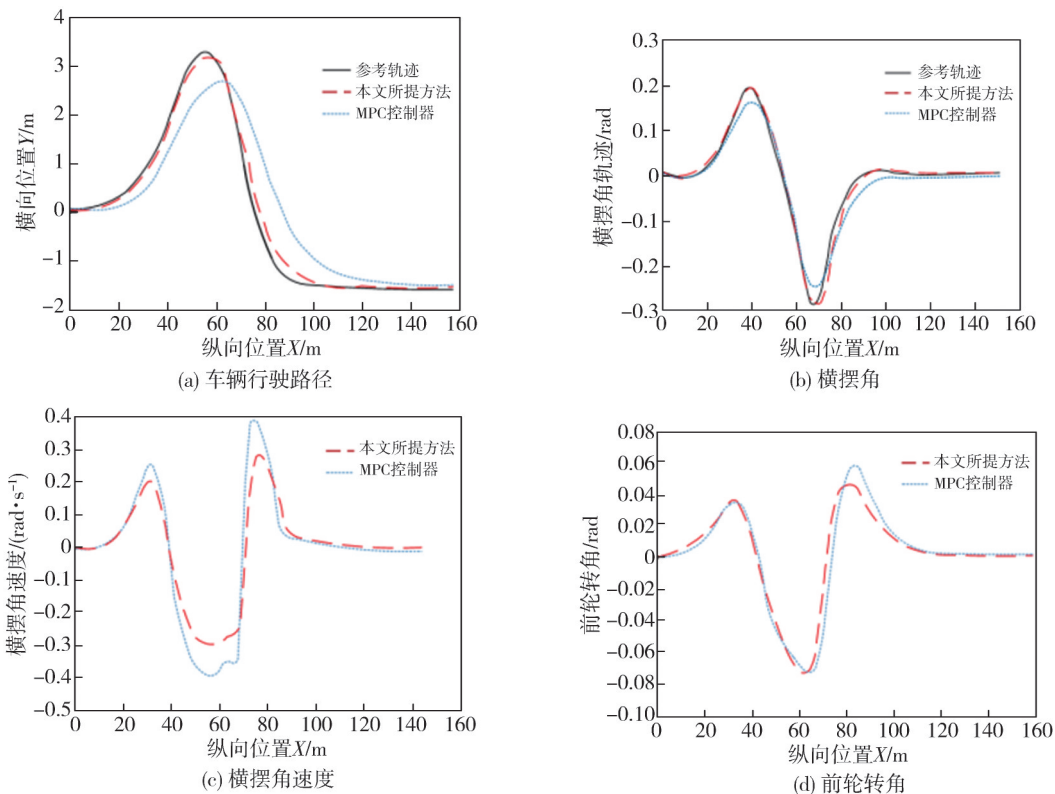


图8 路面附着系数为0.4时,变道跟踪过程中两种控制器跟踪结果的对比

Fig. 8 Comparison of the tracking results of two controllers during lane change tracking with the road surface attachment coefficient of 0.4

4 结论

本文通过研究车辆的路径规划问题,提出多

源数据融合的高精度定位方法,实现了在复杂环境下的多尺度匹配高精度定位。通过融合车辆和道路两端的多种传感器异构数据,提高了车辆定

位精度,突破了传统单一数据来源情况下的定位精度限制。利用多源数据融合的方法,可以综合利用不同传感器的信息,提高车辆定位的准确性和稳定性,适应各种复杂环境下的定位需求。同时,结合车辆行为、驾驶模式与感知数据,实现了行驶路径的精准规划,提升了车辆在变道跟踪过程中的稳定性。

参考文献:

- [1] JANG C, KIM Y K. Drift compensation of monovisual odometry and vehicle localization using public road sign database [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2019, 20(6): 1245-1254.
- [2] BRANDT A, JACOBSON B, SEBEN S. High speed driving stability of road vehicles under crosswinds: an aerodynamic and vehicle dynamic parametric sensitivity analysis [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2022, 60(7): 2334-2357.
- [3] DENG Z, WEI X, LI X, et al. Design and multi-objective optimization of magnetorheological damper considering vehicle riding comfort and operation stability [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2022, 33(9): 1215-1228.
- [4] HASEGAWA S, YAMAGUCHI F, TAKAHASHI Y, et al. Vehicle control system and vehicle control method: US202117382878[P]. 2022-01-27.
- [5] LAI F, HUANG C, YE X. Analysis of vehicle driving stability based on longitudinal-lateral and vertical unified dynamics model [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2022, 23(1): 73-87.
- [6] LIU G, ZHENG Q, NIU S, et al. Research and application of the global positioning system (GPS) clustering algorithm based on multilevel functions [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2024, 24(1): 357-368.
- [7] 李乐, 刘美芳, 陈荣, 等. 基于边缘智能的车辆编队协同控制方法研究 [J]. *计算机科学*, 2024, 51(6): 384-390.
LI Le, LIU Meifang, CHEN Rong, et al. Study on collaborative control method of vehicle platooning based on edge intelligence [J]. *Computer Science*, 2024, 51(6): 384-390. (in Chinese)
- [8] JANGJOO M A, ALLAHBAKHSI M, MIRZAEI H R. Ultra-high frequency sensors positioning on the power transformer to mitigate the negative effects on the partial discharge localization accuracy [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2024, 18(3): 585-595.
- [9] ZHAO G, GAO S, JIANG Z. A method for detecting faults in integrated navigation system based on improved SPRT adaptive filtering [J]. *Advances in Space Research*, 2024, 74(4): 1967-1977.
- [10] 涂远泯, 刘飞飞, 曾波华, 等. 基于多传感器融合技术的移动机器人位姿估计方法研究 [J]. *制造业自动化*, 2023, 45(11): 137-141.
TU Yuanmin, LIU Feifei, ZENG Bohua, et al. Research on pose estimation method of mobile robot based on multi-sensor fusion technology [J]. *Manufacturing Automation*, 2023, 45(11): 137-141. (in Chinese)
- [11] 杜俊峰, 郁汉琪, 刘义亭, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的传感器融合 SLAM 研究 [J]. *无线互联科技*, 2023, 20(21): 133-137.
DU Junfeng, YU Hanqi, LIU Yiting, et al. Research on sensor fusion SLAM based on extended Kalman filter [J]. *Wireless Internet Science and Technology*, 2023, 20(21): 133-137. (in Chinese)
- [12] 段续庭, 田大新, 王云鹏. 基于 V2X 通信网络的车辆协同定位增强方法 [J]. *汽车工程*, 2018, 40(8): 947-951.
DUAN Xuting, TIAN Daxin, WANG Yunpeng. Vehicle cooperative positioning enhancement method based on V2X communication networks [J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40(8): 947-951. (in Chinese)
- [13] 崔立堃, 冯绪永, 王承祥. 人工势场和虚拟结构结合的无人车编队及避障研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(9): 304-308.
CUI Likun, FENG Xuyong, WANG Chengxiang. Research of unmanned vehicle formation and obstacle avoidance combining artificial potential field and virtual structure [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(9): 304-308. (in Chinese)
- [14] 陈骏岭. 基于人工势场法的多机器人协同避障技术 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- [15] 李古月. 基于改进人工势场的自动驾驶路径规划与跟踪控制 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [16] 颜俊杰, 蔡芸, 蒋林, 等. 基于 EKF 的多传感器融合定位算法研究 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2024, 62(3): 91-95.
YAN Junjie, CAI Yun, JIANG Lin, et al. Research on multi-sensor fusion localization algorithm based on EKF [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2024, 62(3): 91-95. (in Chinese)
- [17] 蒲文浩, 刘锡祥, 陈昊, 等. 多传感器融合的激光雷

- 达点云矫正与定位方法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(24): 2428003.
- PU Wenhao, LIU Xixiang, CHEN Hao, et al. LiDAR point cloud correction and location based on multisensor fusion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(24): 2428003. (in Chinese)
- [18] CAMMI A, RIVA S, INTROINI C, et al. Data-driven model order reduction for sensor positioning and indirect reconstruction with noisy data: Application to a Circulating Fuel Reactor [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2024, 421: 113105.
- [19] BARUA A, JIANG X, FULLER D. The effectiveness of simple heuristic features in sensor orientation and placement problems in human activity recognition using a single smartphone accelerometer[J]. *BioMedical Engineering OnLine*, 2024, 23(1): 21.
- [20] 尹艺杰, 李宁, 王超. 基于多传感器融合的同步定位与建图方法研究[J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(8): 54-57.
- YIN Yijie, LI Ning, WANG Chao. Research on SLAM method based on multi-sensor fusion [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2023, 42(8): 54-57. (in Chinese)
- [21] 魏文辉, 赵祥模, 葛振振. 考虑动力学模型系统误差补偿的智能车GNSS/IMU组合定位算法[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(9): 185-194.
- WEI Wenhui, ZHAO Xiangmo, GE Zhenzhen. An algorithm considering kinematic model systematic error compensation for intelligent vehicle GNSS/IMU integrated positioning [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(9): 185-194. (in Chinese)
- [22] 熊凯. 面向交通出行的车联网资源调度策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
- [23] 庞子桐. 网联环境下混合动力物流卡车车队的能量管理控制策略[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- [24] 孟金, 李聪, 景晖, 等. 基于模型预测控制的电动车辆队列控制研究[J]. *动力学与控制学报*, 2023, 21(11): 44-53.
- MENG Jin, LI Cong, JING Hui, et al. Longitudinal platoon control of electric vehicle based on model predictive control [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2023, 21(11): 44-53. (in Chinese)
- [25] 牛传虎. 城市工况下智能网联汽车轨迹规划与控制方法研究[D]. 济南: 山东交通学院, 2023.