

基于UWB融合定位的室内自动泊车系统设计与国产化验证

吴琼^{1,2}, 吴屹昂², 秦东¹, 樊平毅³, 宋书林², 陈赞⁴

(1. 先进信号处理与智能通信江西省重点实验室(南昌大学), 江西 南昌 330031;

2. 江南大学自动化与智能科学学院(物联网学院), 江苏 无锡 214122;

3. 清华大学北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084; 4. 珠海复旦创新研究院, 广东 珠海 519031)

摘要: 针对室内停车场定位精度低及停车难问题, 设计了一套基于超宽带(UWB, ultra-wideband)协同定位的物联网自动泊车系统。该系统采用基于机器人操作系统2(ROS2, robot operating system 2)的“场端-车端”分布式架构, 实现多车管理与路径下发。为提高UWB在非视距(NLOS, non-line-of-sight)与多径条件下的稳定性, 提出由测距预处理、球面定位及改进自适应扩展卡尔曼滤波(IAEKF, improved adaptive extended Kalman filter)构成的融合方法。在规划与控制方面, 结合改进A*与平滑曲线生成可行轨迹, 并引入基于定位可信度的自适应模型预测控制(MPC, model predictive control), 增强定位波动下的跟踪稳定性。实验结果表明, 在复杂环境中, 与其他5种定位方法相比, 所提系统具有较高的定位精度与控制鲁棒性。此外, 在国产UWB芯片MK8000硬件支持下, 利用本文提出的融合算法, 其系统性能接近基于DW1000的硬件支撑系统, 验证了低成本自动泊车方案的可行性。

关键词: UWB; 自动泊车; 室内定位; 非视距; 路径跟踪

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2026.00558

Indoor autonomous parking via UWB fusion positioning: system design and domestic chip validation

Wu Qiong^{1,2}, Wu Yiang², Qin Dong¹, Fan Pingyi³, Song Shulin², Chen Yun⁴

1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Advanced Signal Processing and Intelligent Communications, Nanchang University, Nanchang 330031, China

2. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

3. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

4. Zhuhai Fudan Innovation Institute, Zhuhai 519031, China

Abstract: To address the problems of low positioning accuracy and difficult parking in indoor parking garages, an IoT-based autonomous parking system enabled by ultra-wideband (UWB) cooperative localization was developed. The system adopted a “infrastructure-vehicle” distributed architecture built on robot operating system 2 (ROS2), supporting multi-vehicle management and global trajectory distribution. To improve UWB stability under non-line-of-sight (NLOS) and multipath conditions, a multi-stage fusion method was proposed, consisting of ranging preprocessing, spherical position-

收稿日期: 2025-12-05; 修回日期: 2026-02-15

通信作者: 吴琼, qiongwu@jiangnan.edu.cn

基金项目: 江西省科技发展计划项目(No. 20242BCC32016); 国家自然科学基金资助项目(No. 61701197); 国家重点研发计划项目(No. 2021YFA1000500(4)); 111计划(No. B23008); 江苏省基础研究计划项目(No. BK20252084); 智能网联汽车创新技术联合实验室开放项目

Foundation Items: The Jiangxi Province Science and Technology Development Programme (No. 20242BCC32016), The National Natural Science Foundation of China (No. 61701197), The National Key Research & Development Program of China (No. 2021YFA1000500(4)), The 111 Project (No. B23008), The Basic Research Program of Jiangsu (No. BK20252084), The Open Project of the Joint Laboratory for Intelligent Connected Vehicle Innovative Technologies

ing, and an improved adaptive extended Kalman filter (IAEKF). For planning and control, feasible trajectories were generated by integrating an improved A* algorithm with smooth curve refinement, and a credibility-aware model predictive control (MPC) strategy was introduced to enhance tracking robustness under fluctuating localization quality. Experimental results showed that the proposed system outperforms five localization methods in both positioning accuracy and control robustness in complex environments. Moreover, with the proposed fusion algorithm applied to the domestic UWB chip MK8000, the overall performance approached that of systems based on the DW1000 chip, demonstrating the feasibility of a low-cost and domestically deployable autonomous parking solution.

Key words: UWB, automatic parking, indoor localization, non-line-of-sight, trajectory tracking

0 引言

随着自动驾驶与智慧城市技术的快速发展,智能交通系统正深刻地改变着人们的出行方式。作为智能交通“最后一公里”的关键环节,自动泊车技术不仅显著提升了停车效率、缓解了城市“停车难”问题,还能减少人为操作引发的刮蹭事故,对于提升用户体验和保障交通安全具有重要意义^[1-2]。近年来,车-场-云协同的物联网(IoT, Internet of things)技术不断成熟,使得停车场具备部署基础设施定位、边缘计算与车辆调度等能力,从而为自动泊车提供了一条更加工程化、低成本、可规模化的实现路径^[3-4]。

一个典型的自动泊车系统通常包括:环境感知、定位与地图构建、路径规划、轨迹跟踪控制以及车-场信息交互等模块^[5]。现有自动泊车技术大体可分为三条路线:(1)基于摄像头或多传感器的环境感知式泊车;(2)依赖激光雷达^[6]或视觉^[7]的同步定位与地图构建(SLAM, simultaneous localization and mapping)自主泊车导航;(3)利用场端基础设施辅助定位并下发全局规划的IoT协同泊车模式^[8]。前两类方案依赖密集的环境感知或高算力,对光照变化、遮挡物、多回波等因素较为敏感,且成本与部署复杂度较高。相比之下,IoT协同方案通过场端提供稳定的定位与导航信息,能够显著降低车端感知负担,具备更适用于大规模停车场的应用潜力。然而,要实现此类系统的真正落地部署,仍面临多项挑战,具体表现如下。

第一,定位连续性与姿态稳定性不足。在结构复杂、遮挡频繁且金属反射强的室内停车场内,依赖视觉或激光的SLAM容易受到光照变化、多路径干扰和动态遮挡的影响^[9];毫米波雷达与超声波虽适用于近距离避障,但无法提供全局位姿信息,难以支撑完整的泊车流程。因此,越来越多的研究采

用超宽带(UWB, ultra-wideband)作为室内定位基础设施。尽管UWB具备厘米级精度与较强的抗多径能力,但在立柱密集、车辆遮挡或强反射场景下仍会出现因非视距(NLOS, non-line-of-sight)与多径效应引起的测距群、跳变及短时定位失稳等问题^[10-11]。对于低速倒车、细粒度姿态调整的泊车过程,这类跳变将直接影响轨迹可控性与最终泊入精度。第二,路径规划需要兼顾运动学可行性与轨迹平滑性。泊车运动具有低速、倒车、小转弯半径与空间严格受限等特点,传统基于栅格搜索的A*等算法通常只能生成可行路径,却难以同时满足曲率连续性和平滑性的要求,必须引入曲线优化才能用于实际车辆控制。第三,定位质量随时间变化,控制器须具备自适应能力。在实际泊车过程中,定位精度会随着LOS/NLOS切换、动态遮挡与多径条件而发生波动。固定参数的控制器往往无法在定位跳变发生时保持轨迹收敛,容易导致姿态偏移或最终泊车精度不达标。因而,控制策略必须能够对定位可信度进行实时、自适应的调整。第四,UWB芯片国产化的迫切需求。当前大多数研究仍依赖国外UWB芯片(如DW1000),而国内公开可用于学术实验的国产芯片与系统平台相对有限,不利于推动本土化研究与产业化落地。同时,根据最新发布的《超宽带(UWB)设备无线电管理暂行规定》^[12],DW1000所使用的部分频段将逐步不再满足中国境内的监管要求,意味着该类进口芯片未来将无法在本土市场继续部署。因此,基于国产UWB芯片的定位与算法验证具有重要的现实意义,可有效降低成本、提升自主可控水平,并推动UWB技术在室内泊车等场景中的规模化应用。

围绕上述关键挑战,已有研究在多个模块上取得进展。在定位领域,学界已提出大量基于多传感器融合与鲁棒滤波的方案来提升定位稳定性,主要包括:基于扩展卡尔曼滤波(EKF, extended Kalman

filter) 的UWB/里程计融合^[13]、基于误差状态卡尔曼滤波(ESKF, error-state Kalman filter)与模糊自适应改进交互式多模型的UWB与惯性测量单元(IMU, inertial measurement unit)紧耦合方法^[14],以及UWB与视觉融合导航^[15]。在广域定位中,还有利用加权卡尔曼滤波实现全球定位系统(GPS, global positioning system)与UWB互补的方案^[16]。在鲁棒性提升方面,研究者提出了基于支持向量机(SVM, support vector machine)的NLOS检测^[17]、基于归一化新息比的异常观测抑制^[18]。文献[19]在EKF框架下引入鲁棒估计与噪声自适应机制,通过Huber损失函数抑制异常UWB观测,并基于残差统计动态调整观测噪声协方差,以提升融合定位的稳定性与精度。文献[20]利用EKF预测状态对UWB测距进行一致性检验,在数据预处理阶段剔除由NLOS条件引起的异常观测,从而避免错误信息传播至主滤波器。除了高斯假设下的滤波方法外,粒子滤波(PF, particle filter)因其对非线性和非高斯噪声的良好适应性,也被引入UWB融合定位领域。文献[21]提出了一种融合UWB与自运动信息的轻量级粒子滤波方法,通过移动地平线策略抑制累积漂移,实现了鲁棒的室内位姿估计。同时,多项工作将UWB与机器学习驱动的NLOS判别相结合,实现观测可信度的自适应调整,进一步增强了复杂环境下的定位稳定性^[22-23]。在路径规划层面,为满足泊车的运动学与可控性需求,文献[24]将改进的A算法与贪婪搜索结合,实现多目标路径的平滑规划;文献[25]融合A*算法与分段贝塞尔曲线,生成满足运动学约束的连续路径。在控制层面,模型预测控制(MPC, model predictive control)因其对系统动态与约束的显式建模而成为主流方式,并可通过代价函数或权重自适应机制应对感知不确定性^[26-27]。此外,机器人操作系统2(ROS2, robot operating system 2)作为一种具备分布式通信与实时特性的中间件,已被多项工作用于车-场协同系统的框架搭建,为IoT场景下的自动泊车系统提供了实现基础^[28-30]。

尽管现有研究在定位、规划与控制等单一模块均取得了显著进展,但仍缺乏一种能够同时兼顾定位鲁棒性、轨迹可控性、车场端协同部署能力以及UWB芯片国产化需求的系统化解决方案。特别是在结构化停车场环境中,只要保证定位连续且姿态稳定,车辆即可依托高精度地图避开静态障碍

物,并完成包括路迹跟踪与库位调整在内的完整泊车流程。因此,提升定位在NLOS、多径效应与测量噪声波动条件下的连续性与可靠性,并使控制策略能够根据定位可信度进行自适应调整,是支撑IoT自动泊车系统走向工程落地的关键。

基于上述问题,本文提出并实现了一套面向室内停车场的U-Parking物联网自动泊车系统。该系统通过UWB定位、改进路径规划与自适应控制的协同优化,在不需要复杂近距环境感知的条件下,实现了全流程的可靠泊车导航。本文的主要贡献如下。

(1) 提出面向IoT停车场的“场端-车端”分布式协同架构。基于ROS2实现了多车注册、车位管理与全局路径下发等功能,通过解耦结构设计提升了系统的可扩展性与部署便利性。

(2) 提出多层次的UWB/IMU融合定位方法。采用测距预处理、球面定位初解^[31]与改进自适应扩展卡尔曼滤波(IAEKF, improved adaptive extended Kalman filter)三级融合框架,与基础UWB定位、无迹卡尔曼滤波(UKF, unscented Kalman filter)融合等基线方法相比,该方法在LOS/NLOS切换与多径干扰场景中显著降低了定位跳变与异常偏差,平均误差降低约40%,有效提升了定位连续性与鲁棒性。

(3) 提出面向泊车任务的改进路径规划与自适应控制方法。通过改进A*搜索代价,并结合B样条与分段贝塞尔曲线,生成满足车辆运动学特性的平滑轨迹;同时设计了一种基于定位可信度的MPC策略。相较于固定参数MPC,该方法在定位波动场景下能显著减少姿态漂移与轨迹发散,跟踪误差下降约20%,有效提升了控制稳定性与泊车成功率。

(4) 开展国产UWB芯片的工程化验证。在统一软硬件平台下,对国产MK8000与进口DW1000进行了对比测试。实验结果表明,采用本文提出的融合定位与自适应控制框架后,国产MK8000的系统表现接近DW1000,定位精度与跟踪性能差异大幅缩小,验证了国产芯片在IoT协同泊车系统中的可行性,并体现出其在低成本、可替代性方面的优势。

1 系统的总体设计与架构

1.1 系统架构

本文设计了一套名为U-Parking的自动泊车系统,其总体架构与工作流程如图1所示。系统基于ROS2框架构建,采用分布式节点架构,通过话题与服务

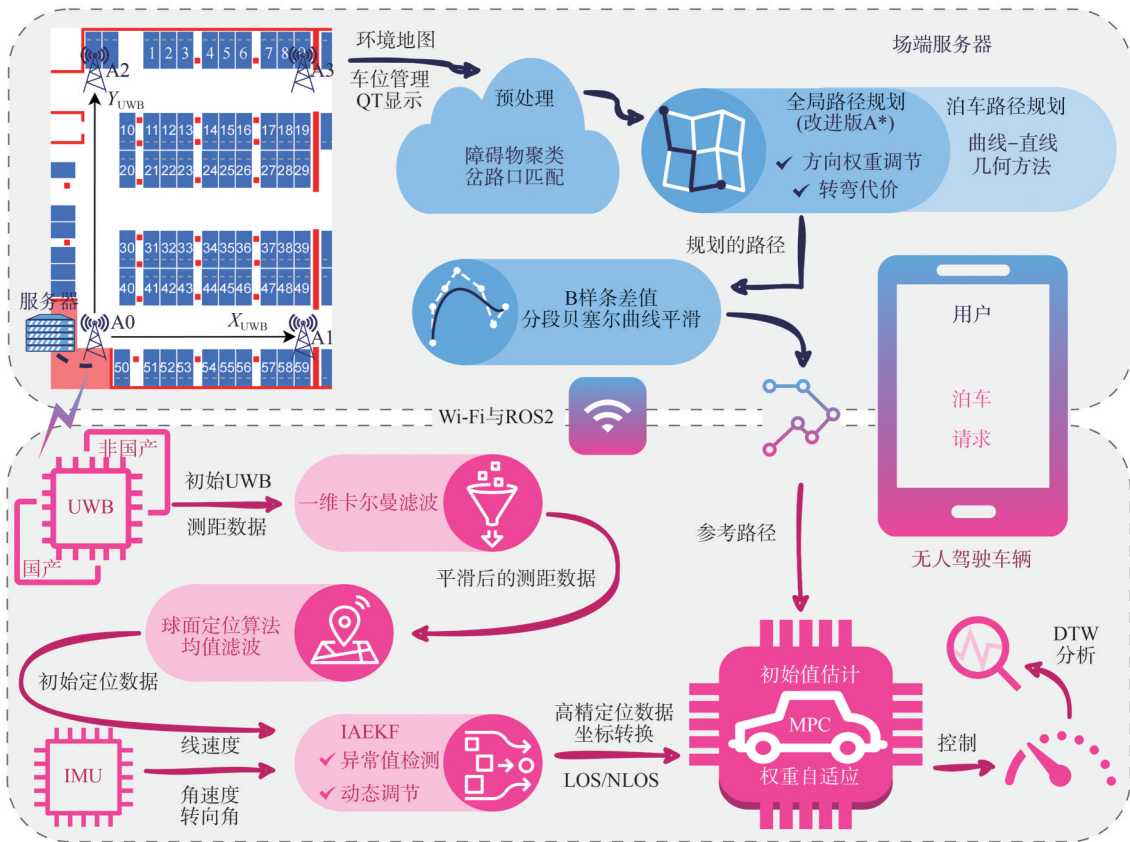


图1 U-Parking 系统架构与工作流程

机制实现多节点间的数据交互与功能协同。系统主要包括轨迹下发、高精度定位、鲁棒跟踪及国产替代4个核心模块。

(1) 轨迹下发：用户在同一局域网中向车辆发送泊车请求，车辆在接收到泊车请求后完成自动注册，服务器负责车位管理、多车调度并生成全局参考轨迹。系统采用改进的搜索与曲线优化方法，为寻车与泊车过程提供连续、可跟踪的参考路径，最终由服务器将参考轨迹下发至车辆端。

(2) 高精度定位：车端UWB标签与场端锚点协同实现实时定位，并采用分层融合策略，以提升在LOS/NLOS、多径干扰下的定位连续性与稳定性。定位结果通过ROS2发布，实现车端与场端的实时共享。

(3) 鲁棒跟踪：车辆基于参考轨迹与定位信息执行MPC跟踪，并结合自适应调节机制提升在定位波动情况下的跟踪性能。实验采用动态时间规整(DTW, dynamic time warping)^[32]指标验证了系统在复杂环境中的跟踪精度。

(4) 国产替代：在完成基于DW1000芯片的系

统测试后，引入国产芯片MK8000进行替代验证。结合IAEKF融合方案与软硬件调优策略，在复杂环境中实现了较高的定位稳定性，验证了国产芯片在自动泊车系统中的可行性。

1.2 基于ROS2的分布式节点设计

ROS2具备良好的跨平台特性、实时通信能力与分布式支持，适用于高并发、分布式控制的智能泊车系统。为提升系统在复杂场景下的通信效率、模块扩展性与运行稳定性，系统遵循模块化与分布式协同设计，将定位、路径规划、控制执行与可视化等功能划分为独立节点，并通过ROS2的话题与服务机制实现数据交互与任务协作。系统的节点通信结构如图2所示。

(1) 用户节点：通过“/car1/SetParking”服务向车辆节点发送泊车请求，并订阅“/car1/parking”话题以获取车辆实时定位信息。

(2) 车辆节点：订阅“/uwb_data”与“/imu_data”话题获取UWB与IMU测量数据，在节点内完成数据融合与姿态解算；发布“/cmd_vel”话题以实现运动控制；通过“/RegisterCar”服务向停车场节点

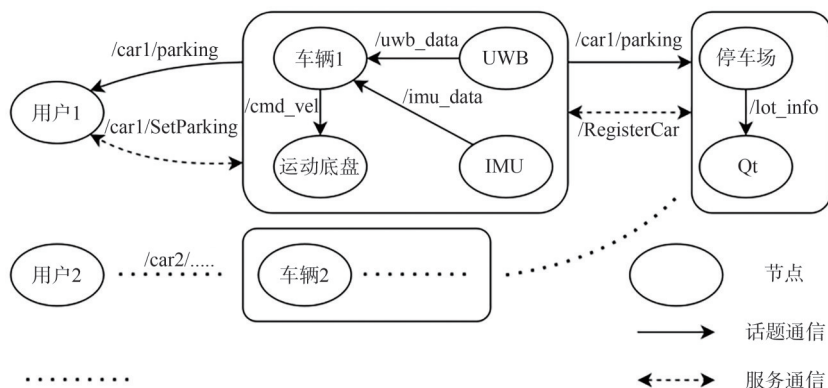


图2 ROS2节点通信结构

提交注册请求与初始位姿，接收由服务器规划的全局参考路径。

(3) 停车场节点：响应车辆节点的注册请求后，执行多车管理与全局路径规划，并将规划结果发布至对应车辆节点；同时通过“/lot_info”话题向Qt可视化界面发布实时车位状态信息，并订阅“/car1/parking”话题以获取车辆实时位姿，实现全局状态监控与集中调度。

2 关键算法与技术实现

2.1 场端全局路径规划

在本文提出的自动泊车系统中，路径规划过程按照任务需求被划分为全局导航阶段与末端几何泊车阶段两个层次，以兼顾环境适应性与泊车可执行性。

在车辆驶入停车区域之前，系统首先在全局地图上完成从当前车辆位置到入库前导航终点（即靠近车位入口的安全过渡点）的路径规划。该阶段所采用的路径规划模块基于经典A*搜索算法框架实现，并在原有启发式评价的基础上，引入转向代价估计和方向偏好权重，使规划出的路径更倾向于方向变化平缓的平滑路径，同时优先朝目标方向扩展，以提高寻路效率。改进后的启发函数 $F(n)$ 表示如下：

$$F(n) = G(n) + H'(n) + E(n) \quad (1)$$

其中， $E(n)$ 表示将节点 n 加入当前路径后所引入的方向变化的代价调整项，若前一节点、当前节点与目标节点三者的运动趋势一致，则代价为0；否则代价为1。 $H'(n) = w \cdot H(n)$ ，权重系数 w 用于在搜索早期与搜索后期之间动态平衡搜索效率与路径最优性。当节点到目标的预估距离大于阈值 d_{th} （取起点与终点欧几里得距离的1/3）时，增大权重系数

以强化启发函数的引导作用，加快搜索向目标区域收敛；当节点接近目标区域时，减小权重系数，避免过强启发导致陷入局部最优。该阈值的设定基于对不同阈值下搜索节点数量与路径质量的统计分析结果。在实验场景中，该比例设置能够在保证搜索效率的同时，维持路径的全局可行性与连续性。

在自动泊车、室内导航等应用中，传统的路径规划算法（如A*）生成的路径通常存在折线状、方向突变大等问题，难以直接用于控制器执行，尤其是在狭窄或曲折的环境中。为此，本文对改进A*规划得到的离散路径进行平滑优化：首先，基于局部几何形状检测路径中的大曲率点，并在其前后设置若干控制点；随后，采用B样条插值与分段贝塞尔曲线相结合的方法，对局部路径段进行连续化、曲率可控的重构，生成满足车辆运动学特性的平滑轨迹。

当车辆到达上述入库前导航终点、进入车位附近区域后，路径规划任务由全局避障导航转变为末端泊车操作。在该阶段，本文不再依赖基于搜索的路径规划算法，而是根据车辆当前位置与车位入库点之间的几何关系，采用一种基于最小转弯半径约束的几何可解析泊车路径生成方法。具体而言，泊入过程被分解为“直线-双圆弧-直线”的组合路径。其中两段圆弧对应车辆倒车入库过程中的两次连续转向，其圆心位置与半径由车辆最小转弯半径约束及车位入口几何关系共同确定。通过在给定角度范围内搜索转向角 φ ，并解析求解对应的圆弧半径 R_1 、 R_2 ，可获得满足几何连续性与运动学约束的可行泊车路径。为保证路径可执行性，所生成圆弧均满足 R_1 、 $R_2 \geq R_{min}$ ，并在路径切换点处保持位置与切向连续。最终路径由直线段与圆弧段拼接而成。

2.2 车端高精定位融合策略

针对UWB在车库环境中易受多径效应与NLOS干扰导致定位结果跳变的问题，本文构建了一种分层协同的UWB/IMU融合定位框架。该框架的核心思想是由低层抑制随机噪声、中层约束几何解、高层融合运动先验，实现对定位精度与连续性的协同优化。

第一层：测距预处理层。原始UWB测距在复杂环境下波动较大，直接用于定位易引入随机误差。为提高测距稳定性，本文首先对各基站测距数据引入卡尔曼滤波进行时序平滑，以降低高斯噪声对后续几何解算的影响，为定位模块提供更稳定的输入。

第二层：几何定位层。基于滤波后的测距结果，采用球面定位算法快速求解车辆在全局坐标系下的二维位置。该层通过引入几何精度因子(GDOP, geometric dilution of precision)评估基站构型质量，并结合容差扩张策略筛选可行解，从而在保证计算效率的同时获得满足物理约束的位置估计。该层输出提供了具有明确几何意义的瞬时位置观测，但由于仍可能受到NLOS条件下测距畸变的影响，因此仅作为状态融合层的观测输入，而非最终定位结果。

第三层：状态融合层。在LOS与NLOS快速切换的复杂环境中，单一UWB定位易产生坐标跳变，而IMU能提供短时高连续性的运动状态估计。为有效融合二者优势，本文提出并构建了IAEKF算法，其框架如图3所示。该算法将IMU提供的线

速度、角速度及航向角信息作为预测输入，对定位结果进行动态修正，并通过自适应残差判别、协方差在线调整与非线性状态预测机制实现对异常观测的实时抑制。与传统EKF或固定参数滤波相比，IAEKF能在LOS/NLOS切换时保持更高的定位连续性与鲁棒性，显著降低跳变误差，从而实现对车辆位姿的稳健跟踪。

具体而言，根据当前航向角与时间步长构造控制输入矩阵 B ：

$$B = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cdot \Delta t & 0 \\ \sin(\theta) \cdot \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \quad (2)$$

然后计算预测状态：

$$\hat{x}_t = A \cdot x_{t-1} + B \cdot u_{t-1} \quad (3)$$

其中， A 为状态转移矩阵， x_{t-1} 和 u_{t-1} 分别为 $t-1$ 时刻的状态与IMU提供的线速度与角速度输入。

由于定位数据在LOS与NLOS场景跳变过程中会发生较大的偏移现象，直接采用固定观测噪声协方差矩阵 R 容易导致滤波结果发散或产生较大定位偏差。为此，本文在观测更新阶段引入基于残差模长的自适应协方差调节机制。定义观测残差向量为

$$D = z_t - H \cdot \hat{x}_t \quad (4)$$

其模长 $\|D\|$ 反映了当前观测 z_t 与预测状态 $H \cdot \hat{x}_t$ 之间的一致性。通过多组静态标定实验与实际车库环境采集数据统计分析发现：在LOS条件下，残差模长主要集中于0.3 m以内；而在轻度遮挡或部

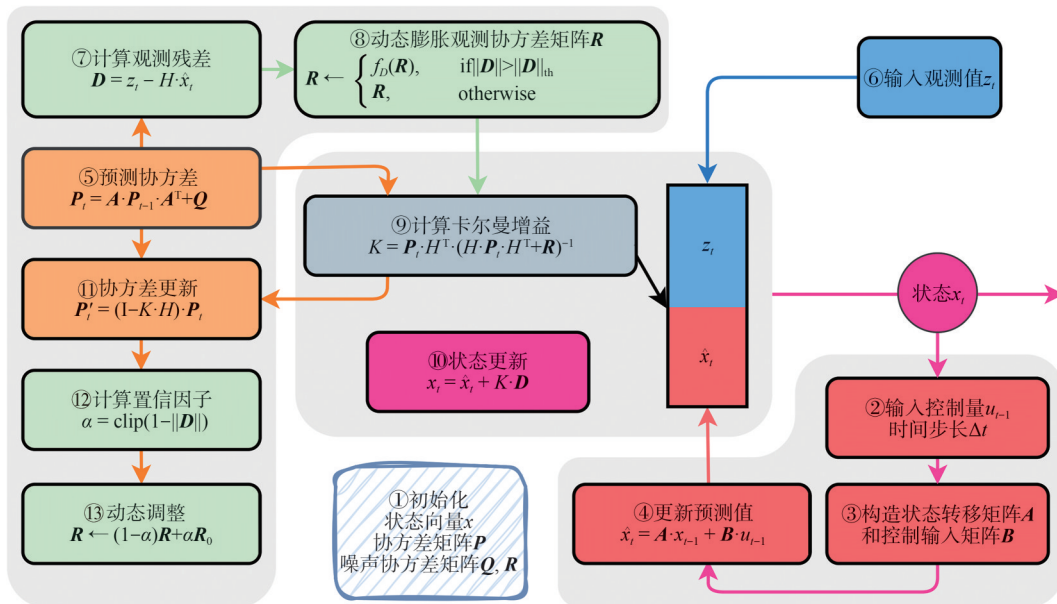


图3 IAEKF算法框架

分NLOS情况下，残差多分布于0.3~0.5 m；当发生严重NLOS时，残差通常显著大于0.5 m。基于上述统计结果，本文设置两级残差阈值： $\|D\|_{th1}=0.3$ m， $\|D\|_{th2}=0.5$ m。当残差位于[0.3,0.5] m区间时，认为观测存在轻微异常，通过适度增大观测噪声协方差矩阵 R 可以降低其影响；当残差大于0.5 m时，判定为NLOS状态，显著膨胀 R 能够抑制异常观测对状态估计的干扰：

$$R' \leftarrow \begin{cases} f_D(R), & \|D\| > \|D\|_{th} \\ R, & \|D\| \leq \|D\|_{th} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_D(R) = \begin{cases} R + I, & \|D\|_{th1} < \|D\| \leq \|D\|_{th2} \\ R \cdot 20, & \|D\| > \|D\|_{th2} \end{cases} \quad (6)$$

卡尔曼增益计算为

$$K = P_t \cdot H^T \cdot (H \cdot P_t \cdot H^T + R')^{-1} \quad (7)$$

状态更新为

$$x_t = \hat{x}_t + K \cdot D \quad (8)$$

根据观测残差范数计算置信因子 α ，利用该因子自适应恢复观测协方差矩阵 R ：

$$R \leftarrow (1 - \alpha)R + \alpha R_0 \quad (9)$$

其中， $\alpha = \text{clip}(1 - \|D\|, 0.01, 0.99)$ ，以增强滤波器对不确定性环境的适应能力。 R_0 为初始观测噪声协方差矩阵。

同时，为避免协方差矩阵无限增大导致滤波数值不稳定，引入上限约束： $R = \min(R, R_{max})$ ， $R_{max} = 500 \cdot R_0$ 。该策略在保证滤波稳定性的同时，提高了系统在室内停车场环境下对NLOS干扰的鲁棒性。

该分层融合定位策略结合了信号层降噪、几何层定位、状态层动态优化的优势，实现了从底层测距到高层运动状态的全面建模，是应对UWB在复杂场景中出现跳变问题的系统性解决方案。各层可独立替换或改进，如引入更高级滤波算法或融合视觉里程计，便于系统调试与性能优化。在面对多种定位异常（如短时信号丢失、IMU漂移等）时，分层结构能够动态调整各层的置信权重，实现更加智能的数据处理。

2.3 车端鲁棒轨迹跟踪

本文采用MPC作为核心运动控制方法，通过状态预测与代价优化实现平稳精准的轨迹跟踪。同时，提出一种基于定位可信度的自适应MPC策略。该策略能够根据定位质量动态调整控制权重，使车辆在定位波动下仍能保持稳定跟踪，并顺利完成泊车任务。

根据移动机器人的运动学模型，可得系统的状态方程如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \cos(\delta) \\ v \cdot \sin(\delta) \\ \omega \end{bmatrix} \quad (10)$$

选取状态量 $\chi = [x, y, \delta]^T$ ，控制量 $u = [v, \omega]^T$ 。

根据车辆的运动学模型，构建以下目标函数：

$$J = \left[u_k^T M u_k + (z_k - z_k^{\text{ref}})^T S (z_k - z_k^{\text{ref}}) + (u_{k+1} - u_k)^T M_d (u_{k+1} - u_k) \right] + J_{\text{init}} \quad (11)$$

其中， u_k 为控制量，表示线速度与角速度； z_k 为车辆当前状态； z_k^{ref} 为轨迹参考点； S 为状态成本矩阵； M 为输入成本矩阵； M_d 为输入差异成本矩阵。使用 J_{init} 作为帧控制变化惩罚项：

$$J_{\text{init}} = (u_0 - u_{\text{prev}})^T R_p (u_0 - u_{\text{prev}}) \quad (12)$$

其中， u_0 为初始帧的控制输入， u_{prev} 为前一帧的控制输出， R_p 为首帧控制变化惩罚矩阵。

系统通过获取定位模块的状态，判断当前定位状态为LOS或NLOS，动态调整MPC中代价函数的加权矩阵，实现对感知不确定性下控制策略的实时自适应调节。

同时，本文引入初始值估计，通过车辆当前姿态与目标路径的几何关系，生成合理的初始控制序列作为优化器的初始解，以减少优化迭代次数，提升计算效率。线速度初始决策 v_p 可表示为

$$v_p = \text{low} \cdot \text{dir} \cdot \min(\text{dist}, 0.5) \quad (13)$$

其中，low为速度系数，全速时为1；dir为方向系数，前进时值为1，后退时为-1；dist为距离目标点的距离。

角速度初始值 ω_p 表示为

$$\omega_p = \begin{cases} \text{clip}(\Delta\theta, -30^\circ, 30^\circ), & \text{前进} \\ \text{clip}(\pi - |\Delta\theta|, 0, 30^\circ) \cdot \text{sign}(\Delta\theta), & \text{后退} \end{cases} \quad (14)$$

其中， $\Delta\theta$ 为当前航向角与目标点的差值。

3 实验与结果分析

实验在Ubuntu 22.04环境下进行，采用ROS2 Humble作为系统主要框架。定位硬件方面，非国产方案采用浩如科技HR-RTLS1系列（包括ULM1标签、LD150基站，基于DWM1000芯片），国产方案采用硅传MK8000TR7.9-GC（基于国产MK8000芯片，符合最新UWB无线电管理规定）。IMU使

用 WHEELTEC N100 模块，移动平台为松灵机器人 SCOUT 2.0 四轮差速底盘。实验参数设置见表 1。

表 1 实验参数设置

参数名称	参数数值
状态噪声协方差 Q_{KF}	0.018 m
观测噪声协方差 R_{KF}	0.542 m
容差扩张半径 r_{err}	0.1 m
状态代价矩阵 S_{IAEKF}	diag(0.7, 0.7)
输入代价矩阵 M_{IAEKF}	diag(0.01, 0.01)
输入变化代价矩阵 M_{IAEKF}^d	diag(0.1, 10.0)
首帧控制变化惩罚矩阵 M_{IAEKF}^p	NLOS LOS
线速度约束 $[v_{min}, v_{max}]$	[-1.0, 1.0] m/s
角速度约束 $[\omega_{min}, \omega_{max}]$	[-0.53, 0.53] rad/s
UWB 定位周期 T_{UWB}	0.1 s
IAEKF 更新周期 T_{IAEKF}	0.2 s
MPC 控制周期 T_{MPC}	0.2 s
MPC 预测窗口 N_{MPC}	5 frames

真实停车场与 UWB 基站布局分别如图 4、图 5 所示。

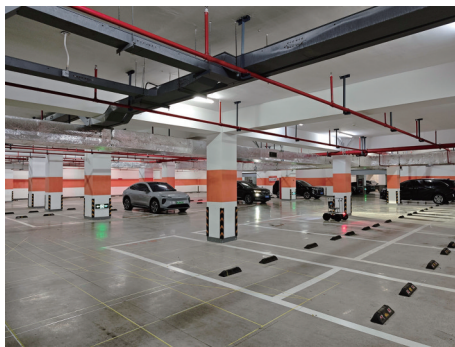


图 4 真实停车场

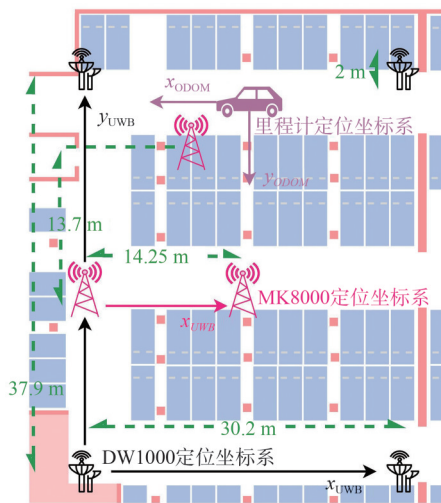


图 5 UWB 基站布局

在定位算法对比中，将所提出的分层融合算法与 5 种定位方法进行比较。第一种基线方法是里程计 (ODOM, odometry)，仅依赖车辆的车载数据 (如速度和航向角)，不使用 UWB 测量值。第二种方法是为纯 UWB 定位，直接基于 UWB 测距解算位置。第三和第四种方法在分层框架的第三层分别采用传统的 EKF 和 UKF 进行 UWB 与运动信息融合。第五种对比方法为 PF，其通过基于采样的贝叶斯推断实现 UWB 与自运动信息的非线性、非高斯融合，被广泛用于复杂环境下的室内定位。最后，本文所提出的方法采用 IAEKF，以进一步提升定位的鲁棒性和精度。

实验过程中同步记录了 UWB 测距数据和车辆状态，并对各定位方法进行了对比分析。基于 DW1000 的定位算法对比如图 6 所示，基于 MK8000 的定位算法对比如图 7 所示。实验结果表明，ODOM 在转弯或速度变化后会出现漂移累积；纯 UWB 定位虽能部分反映运动趋势，但在 LOS/NLOS 切换时会出现跳变；传统 EKF 缺乏对突变情况的适应性，而 UKF 虽能更好地处理非线性问题，但在复杂环境中仍存在局限性；PF 由于依赖有限数量的粒子近似后验分布，在异常测距占比较高或粒子退化情

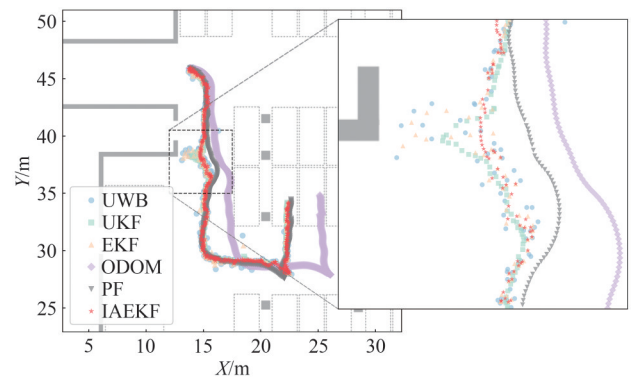


图 6 基于 DW1000 的定位算法对比

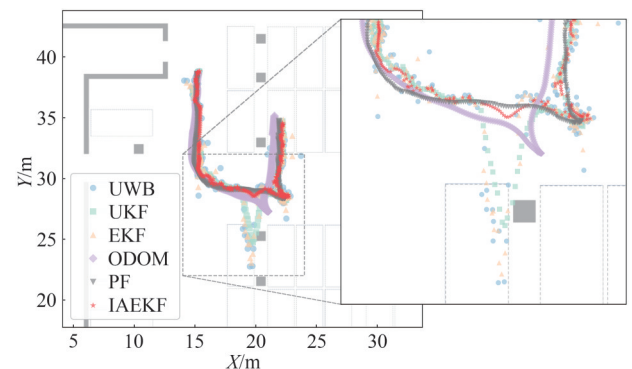


图 7 基于 MK8000 的定位算法对比

况下，其定位结果仍会出现离散性增强和计算开销上升的问题。相比之下，本文所提出的IAEKF算法通过引入残差筛查与动态协方差调节机制，在保证计算效率的同时有效抑制了异常观测与漂移累积，从而实现了更为稳定和精确的定位结果。

以泊入车位“22”的20次试验平均值为统计依据，系统的轨迹跟踪误差统计见表2。表2显示，不同UWB芯片与融合策略在定位与跟踪性能上存在显著差异。以非国产DW1000芯片为例，基础UWB定位在多径与NLOS条件下的平均误差为0.240 m、最大误差达2.354 m，反映了复杂室内停车场环境中单一UWB定位对瞬时异常测距的敏感性。引入EKF后，平均误差下降至0.190 m，归一化DTW指标由0.284 m减至0.212 m。采用本文提出的IAEKF后，平均误差进一步降至0.138 m，归一化DTW压缩至0.169 m，说明动态协方差调整与残差筛查机制能够有效抑制异常测距带来的估计波动。需要指出的是，实验中观测到的较大最大误差主要集中于个别时间步，持续时间极短，属于典型NLOS条件下的瞬时异常值，并未对整体轨迹连续性与最终泊车成功率造成实质性影响。为避免单点定位偏差对评价结果产生误导，本文进一步引入DTW指标，并通过多次重复实验，从轨迹整体形态与时间一致性的角度对系统性能进行评估，从而更客观地反映不同融合策略在实际自动泊车任务中的相对优劣。结合自适应MPC的综合优化方案，使平均误差进一步降低至0.118 m（相较基础定位整体提升约50%），归一化DTW值仅为0.133 m，轨迹形状更接近参考路径。该结果体现了融合定位与自适应控制协同设计在复杂室内停车场环境中的有效性与工程实用价值。

表2 轨迹跟踪误差统计

芯片类别	方法	欧几里得误差/m		DTW/m	
		最大值	平均值	距离值	归一化
非国产DW1000	UWB	2.354	0.240	147.520	0.284
	UWB+EKF	1.692	0.190	108.905	0.212
	UWB+IAEKF	0.653	0.138	85.053	0.169
国产MK8000	UWB+综合改进	0.517	0.118	67.842	0.133
	UWB	4.621	0.502	225.221	0.724
	UWB+EKF	3.115	0.263	146.990	0.478
	UWB+IAEKF	1.087	0.199	88.219	0.241
	UWB+综合改进	0.740	0.150	61.868	0.176

在国产MK8000平台上亦呈现一致的性能改善趋势：基础平均误差为0.502 m，采用EKF与IAEKF

后分别下降至0.263 m和0.199 m；最终综合改进方案将误差压缩至0.150 m（总体提升约70%），归一化DTW下降至0.176 m，验证了本文方法在国产硬件平台上的通用性与稳健性。

总体而言，IAEKF能显著削弱多径、NLOS条件下的测距畸变，自适应MPC能够根据定位可信度动态调整代价权重，从而提升控制输出的稳定性；两者协同构成自底向上的分层抑制与动态补偿机制。得益于该多层融合定位与自适应控制架构，系统即便在国产UWB芯片平台上仍保持与DW1000芯片接近的性能，充分体现了本文方法在室内协同泊车场景中的创新性与工程应用价值。图8~图11对上述结论提供了直观支持。图8与图10展示了纯UWB定位模式下的跟踪热力图。由图可见，在非视距遮挡严重的区域，UWB定位出现了明显的漂移现象，导致车辆产生了错误的转向控制指令。相比之下，图9与图11展示了采用本文所提综合改进方法后的实验结果。结果显示，该方法有效抑制了定位漂移，车辆能够平滑且准确地跟踪参考轨迹，实现了精准泊车。

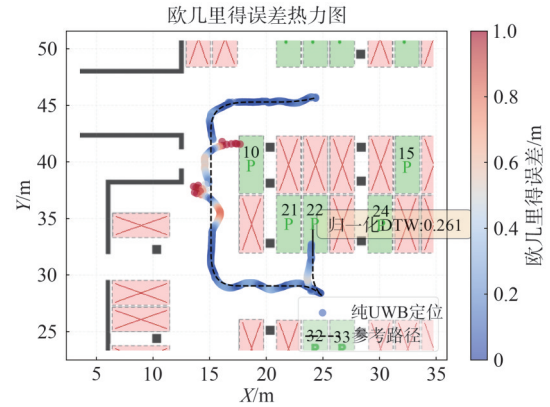


图8 基于DW1000综合改进前的跟踪精度

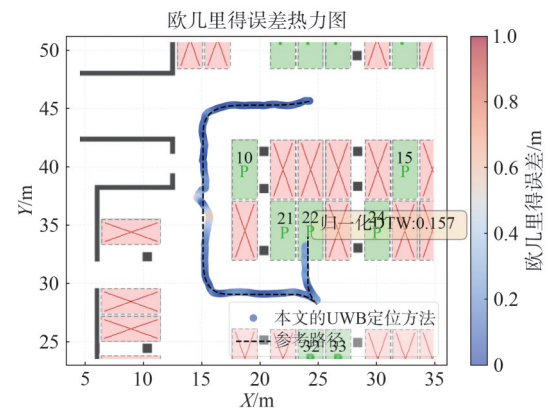


图9 基于DW1000综合改进后的跟踪精度

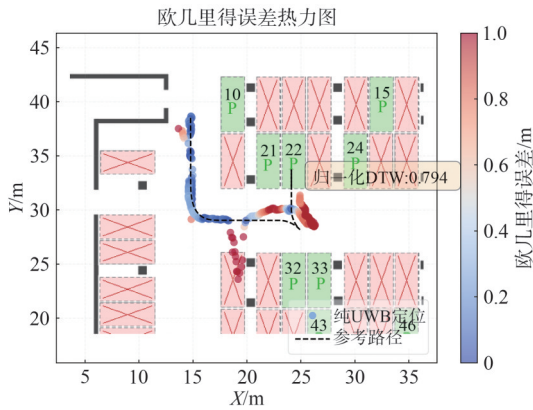


图 10 基于MK8000综合改进前的跟踪精度

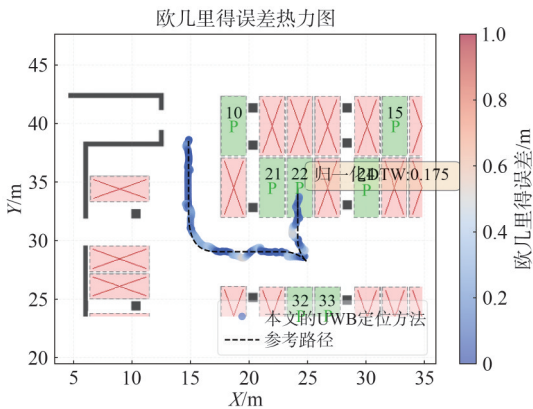


图 11 基于MK8000综合改进后的跟踪精度

4 结束语

本文围绕室内自动泊车中定位易受NLOS、多径干扰、轨迹平滑性不足及控制对定位波动敏感等问题，构建了基于车-场协同的U-Parking自动泊车系统。该系统依托ROS2实现分布式管理，在规划层结合改进A*算法与平滑曲线生成方法，获得满足运动学约束的可行轨迹；在定位层提出由测距预处理、球面定位和IAEKF组成的多层融合策略；在控制层引入基于定位可信度的自适应MPC，以增强定位波动条件下的跟踪稳定性。相较于基础UWB定位、UKF等基线定位方法以及常规MPC方案，该协同优化框架的整体轨迹跟踪误差降低约60%，在非理想环境中表现出优秀的精度与鲁棒性优势。实验结果进一步表明，国产UWB芯片MK8000在融合算法支持下性能接近DW1000，同时芯片成本约降低70%，验证了低成本国产化IoT协同泊车系统的工程可行性与应用潜力。未来将继续面向泊入阶段的安全性与极端场景适应性开展深入研究。

附录：

在github官网搜索UWB-Auto-Parking可见本文算法代码。

参考文献：

- [1] de Visser E J, Phillips E, Tenhundfeld N, et al. Trust in automated parking systems: a mixed-methods evaluation[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2023, 96:185-199.
- [2] Scheck K, Pfeffer P E, Schick B. Detailed analysis and characterization of subjective assessment indicators of manual and automated parking maneuvers[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2022, 236(12):2557-2571.
- [3] 朱洪波,尹浩. 智能化时代的物联网科技与产业发展分析及策略[J]. *物联网学报*, 2025, 9(3):1-16.
Zhu H B, Yin H. Analysis and strategies of IoT technology and industrial development in the intelligent era[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2025, 9(3):1-16.
- [4] Nanwatkar R, Dome V. A comprehensive review of smart parking systems: technologies, challenges, and future directions[J]. *International Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2025, 11(1):1-12.
- [5] Olmos Medina J S, Maradey Lázaro J G, Rassölkin A, et al. An overview of autonomous parking systems: strategies, challenges, and future directions[J]. *Sensors*, 2025, 25(14): 4328.
- [6] Li Y, Yang W, Lin D, et al. AVM-SLAM: semantic visual SLAM with multi-sensor fusion in a bird's eye view for automated valet parking[C]//*Proceedings of the 2024 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Piscataway: IEEE Press, 2024: 7937-7943.
- [7] 周苏,李伟嘉,郭军华. 基于激光雷达的停车场车辆定位算法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(7):1029-1038
Zhou S, Li W J, Guo J H. Lidar-based localization algorithm of vehicle in parking lot[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(7): 1029-1038.
- [8] 张成龙,张毅. 面向协作式自动泊车的场端单目视觉测距系统[J]. *计算机与现代化*, 2021(11):112-117.
Zhang C L, Zhang Y. Monocular visual distance measurement system used at park for collaborative automatic parking[J]. *Computer and Modernization*, 2021(11): 112-117.
- [9] 曾贵萍,唐阳. 多传感器融合无人驾驶同时定位与建图技术发展研究[J]. *汽车文摘*, 2025 (8):14-24.
Zeng G P, Tang Y. Analysis of the research status of multi-sensor fusion unmanned SLAM [J]. *Automotive Digest*, 2025(8):14-24.
- [10] Al-Okby M F R, Junginger S, Roddelkopf T, et al. UWB-based real-time indoor positioning systems: a comprehensive review[J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(23):11005.

- [11] Wang F, Tang H, Chen J L. Survey on NLOS identification and error mitigation for UWB indoor positioning[J]. *Electronics*, 2023, 12(7):1678.
- [12] 中华人民共和国工业和信息化部. 超宽带(UWB)设备无线电管理暂行规定[Z]. 2024.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Interim regulations on radio management of ultra-wideband (UWB) devices [Z]. 2024.
- [13] Oğuz-Ekim P, Bostanci B, Tekkök S Ç, et al. The EKF-based localization and initialization algorithms with UWB and odometry for indoor applications and ROS ecosystem[C]//Proceedings of the 2020 28th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU). Piscataway: IEEE Press, 2020:1-4.
- [14] 高旺, 何少鹏, 王澄非, 等. 顾及视觉地图点协方差的VIO/UWB融合室内定位算法[J]. *中国惯性技术学报*, 2025, 33(3):239-248.
Gao W, He S P, Wang C F, et al. Indoor localization algorithm of VIO/UWB fusion considering visual map point covariance[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2025, 33(3):239-248.
- [15] 郑航, 叶云翔, 薛向磊, 等. 基于UWB和视觉组合导航的设施植保机器人叶菜垄作跟踪控制[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(4):144-152.
Zheng H, Ye Y X, Xue X L, et al. Facility plant protection robot based on UWB and visual integrated navigation for leafy vegetable ridge tracking control[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(4):144-152.
- [16] Shao Y, Xiang Q. Intelligent vehicle positioning method based on UWB and GPS fusion[C]//Proceedings of the 2024 4th International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Communication (EIECC). Piscataway: IEEE Press, 2024:447-450.
- [17] Wang S D, Ahmad N S. Improved UWB-based indoor positioning system via NLOS classification and error mitigation[J]. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2025, 63:101979.
- [18] Nadeem T, Ali K, Tahir M. NIR-EKF: normalized innovation ratio-based EKF for robust state estimation[J]. *IEEE Sensors Letters*, 2024, 8(10):7004804.
- [19] Liu L L, Fan L. Adaptive and robust kalman filter-based fusion of IMU and UWB for high-accuracy localization[C]//Proceedings of the 2025 4th International Conference on Electronic Electrical Engineering and Automatic Control (EEEAC). Piscataway: IEEE Press, 2025:325-330.
- [20] Veselov G E, Vakhrushev D E. Improving UWB localization accuracy through integration via extended Kalman filter[C]//Proceedings of the 2025 VI International Conference on Control in Technical Systems (CTS). Piscataway: IEEE Press, 2025:181-184.
- [21] Durodié Y, Decoster T, Van Herbruggen B, et al. A UWB-ego-motion particle filter for indoor pose estimation of a ground robot using a moving horizon hypothesis[J]. *Sensors*, 2024, 24(7):2164.
- [22] Gao H, Li X, Song X. A fusion strategy for vehicle positioning at intersections utilizing UWB and onboard sensors[J]. *Sensors*, 2024, 24(2):476.
- [23] Xu Q M, Li X, Chan C Y. Enhancing localization accuracy of MEMS-INS/GPS/Invehicle sensors integration during GPS out-ages[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2018, 67(8):1966-1978.
- [24] Xiang D, Lin H X, Ouyang J, et al. Combined improved A* and greedy algorithm for path planning of multi-objective mobile robot[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12:13273.
- [25] Lai R S, Wu Z Y, Liu X G, et al. Fusion algorithm of the improved A* algorithm and segmented Bézier curves for the path planning of mobile robots[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3):2483.
- [26] Pang F L, Luo M Z, Xu X B, et al. Path tracking control of an omni-directional service robot based on model predictive control of adaptive neural-fuzzy inference system[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(2):838.
- [27] Villalba-Aguilera E, Blesa J, Ponsa P. Model-based predictive control for position and orientation tracking in a multilayer architecture for a three-wheeled omnidirectional mobile robot[J]. *Robotics*, 2025, 14(6):72.
- [28] Hong D, Moon C. Autonomous driving system architecture with integrated ROS2 and adaptive AUTOSAR[J]. *Electronics*, 2024, 13(7):1303.
- [29] Carreira R, Costa N, Ramos J, et al. A ROS2-based gateway for modular hardware usage in heterogeneous environments[J]. *Sensors*, 2024, 24(19):6341.
- [30] Sasaki R, Takefusa A, Nakada H, et al. Communication performance of ROS and ROS 2-based IoT systems for smart home applications[J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2025, E108.D(8):895-905.
- [31] Bonnin-Pascual F, Ortiz A. UWB-based self-localization strategies: a novel ICP-based method and a comparative assessment for noisy-ranges-prone environments[J]. *Sensors*, 2020, 20(19):5613.
- [32] Wongvichayakul K, Mitsantisuk C, Prompol K. Development of high-precision ultra-wideband (UWB) path following using kalman filter for automatic guide vehicles[C]//Proceedings of the IECON 2023-49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Press, 2023:1-6.

[作者简介]



吴琼(1986-), 男, 博士, 江南大学自动化与智能科学学院(物联网学院)副教授, 主要研究方向为车联网、边缘计算、机器学习、无人驾驶。



吴屹昂(2001-), 男, 江南大学自动化与智能科学学院(物联网学院)硕士生, 主要研究方向为车联网、无人驾驶。



秦东(1987-), 男, 博士, 南昌大学先进信号处理与智能通信江西省重点实验室副教授, 主要研究方向为无线通信。



宋书林(1980-), 男, 江南大学自动化与智能科学学院(物联网学院)讲师, 主要研究方向为无线通信。



樊平毅(1966-), 男, 博士, 清华大学北京信息科学与技术国家研究中心教授, 主要研究方向为无线通信。



陈贇(1978-), 女, 珠海复旦创新研究院教授, 主要研究方向为芯片设计。