基于 UWB PDOA 的商超复杂环境下自动跟随购物车系统设计

熊冠宇[1]， 王腾[2]

（1．广东省实中美课程 广东省广州市 510375；2．华南师范大学计算机学院 广东省广州市 510631））

摘 要：在商超复杂的环境里，人多、货架多，造成多径干扰以及 NLOS 传播，从而对传统的定位方法造成了影响。本文设计并实现了一种基于 UWB PDOA 的自动跟随购物车系统。系统由遥控器端和购物车端两部分组成，遥控器集成 UWB 信号发射模块，购物车搭载 STM32 主控芯片和四天线 UWB 基站阵列，采用四天线 PDOA 方案实现 360°无盲区角度测量，结合 TOF 测距算法计算遥控器与购物车之间的相对方位与距离，然后通过无线通信链路将控制指令发送至购物车端的电机驱动系统，实现购物车对使用者的自动跟随。本文根据商超复杂环境的特点来设计基于信号质量评价的直达路径判别方法、扩展卡尔曼滤波（EKF）融合角度测量值的平滑策略以及自适应测距频率调节机制。实验结果表明，在典型的商超货架通道、收银区等场景中，系统定位误差小于 30cm，角度测量误差小于 5°，跟随响应时间小于 250ms，无线通信距离可达 100m，电池续航可以满足连续工作 8 小时以上。该系统具有较高的定位精度以及较好的跟随性，给智能购物设备的实现提供了一种可行的技术方案。

关键词：超宽带（UWB）；相位差到达角（PDOA）；自动跟随购物车；扩展卡尔曼滤波（EKF）

Design of Automatic Following Shopping Cart System Based on UWB PDOA in Complex Supermarket Environment

XIONG Guanyu[1]，WANG Teng[2]

（1. Guangdong Experimental high school, Ap Program, Guangzhou, Guangdong, 510375,China; 2. Computer School, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong, 510631,China）

Abstract: The dense population and the large amount of shelves in supermarket environments cause significant multipath interference and non-line-of-sight (NLOS) propagation, which highly decrease the accuracy of traditional positioning methods. This paper mainly discusses the new designs and implements of an automatic following shopping cart system based on Ultra-Wideband (UWB) Phase Difference of Arrival (PDOA) technology. The system contains two parts: the remote control terminal and the shopping cart terminal. The remote control combines a UWB signal transmitting module, at the same time, the shopping cart is facilitated with an STM32 main control chip and also a four-antenna UWB base station array. The four-antenna PDOA scheme allows 360° angle measurement without any blind spots. With the help of the Time of Flight (TOF) ranging algorithm; the direction, distance between the remote control, and the shopping cart are calculated. Control commands are send to the motor drive system through a wireless communication link, automatic following of the user by the shopping cart. To be well situated at the complex supermarket environment, this paper offers a direct-path discrimination method based on channel impulse response quality assessment, adopts an Extended Kalman Filter (EKF) strategy for smoothing angle measurements, and introduces an adaptive ranging frequency adjustment mechanism. In typical scenarios such as supermarket shelf aisles and checkout areas, experimental results show that the system reaches a positioning error of less than 30 cm, an angle measurement error that less than 5°, a following response time which less than 250ms, a wireless communication distance of up to 100 meters, and a battery life over 8 hours of continuous operation. This following cart system has a high accuracy and stability, which allows to reduce current problems within the supermarket environmenThe system shows high positioning accuracy and following stability, providing a feasible technical solution for smart shopping devices.

Keywords: Ultra-Wideband (UWB); Phase Difference of Arrival (PDOA); automatic following shopping cart; Extended Kalman Filter (EKF)

0 引言

近些年来，伴随着物联网、人工智能以及 5G 通信技术的迅速发展，零售业正在发生着深刻的智能化

变革。商超属于零售业的主要场所，它的运作效率和顾客体验成了竞争的主要因素。智能购物车是连接消费者和商品的智能化终端，可以提供自动跟随、商品导航、自助结算等增值服务，逐渐成为智慧商超建设的重要组成。

自动跟随功能属于智能购物车最基本、最重要的功能之一。它需要购物车可以及时、正确地感知使用者的位置，然后自主地调节运动来维持一个合理的跟随距离和方位。但是商超环境具有典型的复杂性，金属货架林立、人员来往频繁、照明设备和电子设备密集分布，这些因素一起形成了一个极具挑战性的多径传播和非视距（NLOS）传播环境[1][2]。传统的跟随技术：红外线、超声波容易被遮挡、干扰，定位精度低；基于机器视觉的方案虽然理论精度高，但是光照变化剧烈、目标被部分遮挡时鲁棒性差，计算量大，对嵌入式平台的算力要求高；蓝牙 RSSI（接收信号强度指示）定位精度一般在米级左右，不能满足购物车跟随的精度要求。

超宽带(Ultra-wideband，UWB)技术由于具有高带宽(一般大于 500MHz)，低功耗，低功率谱密度，较好的多径干扰抵抗等特点，在室内精确定位上得到了广泛的应用。UWB 信号使用纳秒级窄脉冲，时域分辨率高，在复杂的多径环境中可以较好地分离直达路径和非直达路径，达到厘米级的测距和定位精度。相位差到达角（Phase Difference of Arrival，PDOA）是 UWB 定位的一种重要实现方式，通过测量多个接收天线之间信号的载波相位差来计算信号入射角，配合到达时间（TOF）测距即可唯一确定发射源的位置。与到达时间差（TDOA）需要多个基站同步相比，PDOA 方案只需要单基站配合多天线就可以实现二维定位，系统结构简单，部署成本低，适合单台购物车跟随场景[3][4]。

国内外学者对 UWB 室内定位做了大量的研究[5]。国外方面，Decawave 公司（现为 Qorvo 旗下）推出的 DW1000 和 DW3000 系列 UWB 收发器芯片，集成了 PDOA 测量的相关硬件支持，极大地降低了开发门槛。利用这些芯片，研究人员开发出各种 AOA、AOD 定位系统。Brecht Hanssens 等人的方法用几何传播参数来估计 UWB 的室内方差定位，LoS、受阻视线、非视距三种场景的平均精度分别为 0.26m、0.28m、0.90m，只用一个信标节点[6]。国内方面，哈尔滨工业大学、中南大学、南京邮电大学等高校在 UWB 定位算法以及多径抑制方面取得了丰硕成果，提出了很多基于机器学习、空间谱估计的到达角估计算法，在实验室环境里效果较好[7][8][9][10][11]。

但是现有的研究大多集中于 UWB 定位本身精度的提高，将 UWB 定位与自动跟随购物车这个具体的应用场景结合得还不充分[12]。尤其是对商超环境中金属货架造成的强多径、多人遮挡造成的信号衰减以及相位跳变等问题，缺少系统的工程解决方案。除此之外，UWB 模块功耗大，在需要长时间移动工作的购物车应用中，怎样设计合理的功耗管理策略也是值得研究的问题。

本文设计并实现了一套基于 UWB PDOA 的商超自动跟随购物车系统，主要工作及创新点如下所示：

系统架构设计。创建了遥控器（标签端）、购物车（基站端）双端系统，使用 STM32 系列 MCU 为主控芯片，DW1000 为主 UWB 收发器，设计出四天线阵列布局，达到 360°全向角度测量的目的。

复杂环境适应算法。对商超多径干扰、NLOS 传播等复杂情况采用信号质量指示（CIR）来判定直达路径，减小反射路径对相位测量的影响，用扩展卡尔曼滤波器（EKF）对角度、距离测量值做融合滤波来提升轨迹的平滑程度，并且加入了自适应测距频率调节策略，兼顾定位的及时性以及系统的功耗。

闭环跟随控制。把解算出来的相对位置误差当作 PID 控制器的输入，发出购物车线速度和角速度的指令，从而达到平稳、准确的自动跟随。

系统实验验证。在真实的商超环境中进行多场景、多工况的实测，系统定位精度、响应时间、通信距离、续航能力均满足设计要求，验证了方案的可行性、有效性。

1 系统总体设计

1.1 系统总体架构

系统主要由两大子系统组成：遥控器（标签）和自动跟随购物车（基站+运动平台）。系统的主要模块

如图 1 所示：遥控器内部包含 UWB 发射模块、STM32 控制单元、无线通信模块和电源模块；购物车包含四天线 UWB 基站阵列、主控单元、电机驱动系统、无线通信模块和电源模块；两者之间通过 UWB 信号进行测距测角，通过 2.4GHz 无线通信信道传输控制指令。

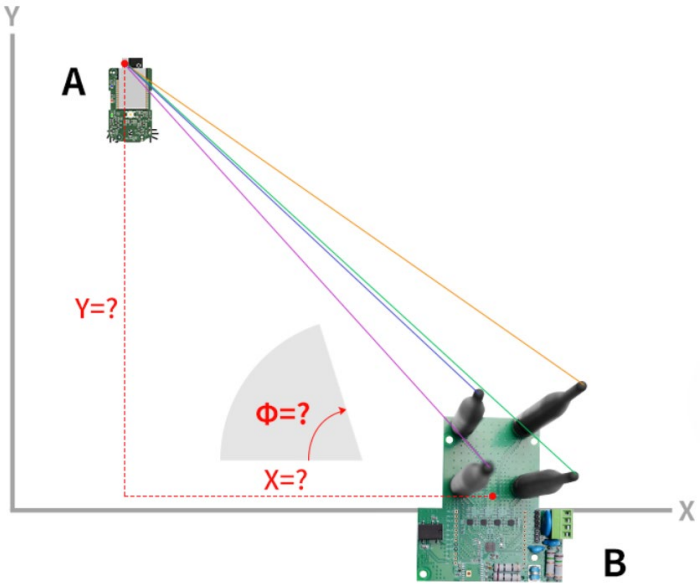


图 1 系统主要模块

遥控器端需要随身携带遥控器或者固定在身体某一部位（腰带、手腕）。遥控器内嵌 UWB 标签，用固定频率（默认 4Hz）发出 UWB 定位脉冲信号，同时集成 2.4GHz 无线通信模块（nRF24L01+），接收购物车返回的状态信息，也可以发送手动控制指令（方向键控制、模式切换等）。

购物车上装有四个天线 UWB 基站阵列，一直监听着遥控器发出的 UWB 信号。当接收到一帧有效的信号的时候，四路天线同时对信号的载波相位以及到达时间进行采样，主控单元使用 PDOA 算法来计算出信号到达的角度（AoA）和飞行的距离（TOF）。根据这些定位数据，主控单元用 PID 控制算法得到速度指令，驱动电机控制系统完成跟随运动。同时购物车用无线通信模块向遥控器发出当前位置、电量、跟随状态等信息。

系统信息流、能量流如下所示：UWB 信号在遥控器和购物车之间用对称双边双向测距（SDS-TWR）协议进行双向交互，完成距离和相位差的测量；控制指令通过独立的 2.4GHz 无线通信信道双向传输；电池供电给各个模块提供电能，可以采用低功耗管理策略来延长续航。

1.2 功能需求

根据商超自动跟随购物车的实际应用场景，系统应具有如下功能需求：

1. **自动跟随。**购物车可以实时检测到遥控器的相对位置，自动调节行驶的方向和速度，保证跟上预定的距离（0.5～1.5 米），定位误差≤30cm（LOS 环境），角度误差≤±5°（LOS 环境），NLOS 环境下角度测量误差会增大到 7°左右，用 EKF 滤波之后可以控制在 5°以内。

2. **模式切换功能。**可以实现自动跟随和手动遥控之间的切换，在手动模式下，用户可以使用遥控器上的摇杆或者按键来控制购物车前进、后退、转向。

3. **障碍物应对。**系统需要预留避障传感器接口，即：超声波、红外或者激光雷达。当检测到前方有障碍物的时候，可以减速或者停止跟随，防止碰撞。避障不属于本文的研究重点，只做简单的介绍。

4. **低电量报警。**当购物车电池电量低于 20%时，用遥控器发出声光报警，提醒用户及时充电。

5. **通信可靠性。**在空旷的地方无线通信距离不小于 100 米，在商超内部密集货架处通信距离大于 30

米，丢包率小于 5%。

1.3 技术指标

根据需求分析，系统设计的主要技术指标如表 1 所示。

表 1 系统主要技术指标

指标名称	设计要求	备注
定位精度	≤30 cm	静态及动态跟随
角度测量范围	0°～360°	全向无盲区
角度测量误差（LOS）	≤±5°	视距环境下
角度测量误差（NLOS）	≤±5°（典型值）	非视距环境下经 EKF 滤波。极端情况最大误差详见测试数据
响应时间	<250 ms	从位置变化到电机响应
跟踪定位通信频率	4 Hz	可调
无线通信距离	≥100 m（空旷）	商超环境≥30 m
电池续航时间	≥8 h	连续跟随运行
最大载重	20 kg	购物车结构设计
工作温度	-10℃～50℃	商用环境

2 系统硬件设计

2.1 主控芯片选型

主控芯片是系统运算的核心，它负责对 UWB 数据进行采集、对 PDOA 算法进行计算、对无线通信协议栈进行管理、对电机控制算法进行执行、对电源进行管理。由于算法比较复杂（包含浮点运算、扩展卡尔曼滤波），为了达到算法复杂度和功耗之间的平衡，本设计使用了意法半导体（ST）公司的 STM32F407VET6 芯片。该芯片采用 ARM Cortex-M4 内核，有 FPU（浮点运算单元），主频最高 168MHz，内置 192KB SRAM 和 512KB Flash，外设接口有 3 个 SPI（连接 UWB 模块和无线通信模块）、多个定时器（产生 PWM 驱动电机）、ADC（电池电压监测）。该芯片运行模式下功耗约为 50～100mA，支持多种低功耗睡眠模式，可以满足长时间续航的要求。

主控电路主要由晶振电路（8MHz、32.768kHz）、复位电路、电源去耦电容、SWD 调试接口组成。所有的外设都通过标准接口引出。

2.2 UWB 模块与天线设计

2.2.1 UWB 芯片选型

UWB 部分采用 Decawave（现 Qorvo）公司的 DW1000 芯片。DW1000 是一款符合 IEEE 802.15.4-2011 UWB 标准的低功耗 CMOS 收发器，工作频段覆盖 3.5 GHz～6.5 GHz（通道 2、3、4、5、7），支持高达 6.8 Mbps 的数据速率，测距精度可达±10 cm，同时支持 PDOA 相位差测量。其主要技术参数如下：

发射功率：-14 dBm / -10 dBm（可配置）

接收灵敏度：-106 dBm（在 6.8 Mbps 模式下）

功耗：发射峰值约 120 mA，接收峰值约 100 mA，深度睡眠模式约 1.5 μA

通信距离：视距条件下可达 290 米（低数据速率）

遥控器端和购物车端各集成一片 DW1000。值得注意的是，购物车端需要四天线接收，但 DW1000 本身是单天线收发器，因此购物车端需要采用多路射频开关或四片 DW1000 分别连接四个天线。四芯片共用同一个 38.4 MHz 高精度 TCXO 参考时钟，均与 MCU 通过 SPI 总线连接（使用不同的片选信号），其同步采样与校准方案详见 2.2.4 节。

2.2.2 天线设计与布局

四天线的布局直接影响 PDOA 角度测量的精度和范围。理想情况下，天线应放置在同一个平面内，两两之间的间距已知且固定（通常取波长的一半或整数倍）。为了覆盖 360°方位角，本设计采用正方形四天线阵列：四个天线位于正方形的四个顶点，相邻天线间距为$d = 0.5\lambda$，其中 λ 为 UWB 中心频率对应的波长。以通道 2（中心频率 4.0 GHz）为例，$\lambda = c/f = 0.075\text{m} = 75\text{mm}$，因此$\text{d} = 37.5\text{mm}$。此间距为 PDOA 角度测量的最优取值——在不超过半波长（$d \leq \lambda/2$）的条件下使角度 - 相位差映射关系保持单值，同时获得最大的角度测量灵敏度。若间距超过$\lambda/2$，则会产生 2π 的相位模糊，导致角度解算出现多值性。

天线选型采用小型化陶瓷贴片天线（如 Johanson Technology 的 UWB 天线），尺寸约 10 mm×10 mm，增益约 2 dBi，全向辐射模式。四个天线在购物车车体顶部安装在一个直径为 200 mm 的圆形 PCB 板上，抬高约 30 cm 以减少车体金属部分的反射干扰。天线阵列的正方向定义为车头方向，通过校准将角度零点与车体坐标系对齐。

为了减小天线之间互耦的影响，在天线之间加装了铜箔屏蔽隔离条，用 S 参数测试来保证隔离度大于-15dB。考虑到 PDOA 对天线相位一致性的严格要求，后续版本会改善天线布局结构（增加接地隔离壁或者采用差分馈电方式），把隔离度指标提高到-20dB 以上，从而减小阵元间串扰对相位测量精度的影响。

2.2.3 相位差测量电路

每片 DW1000 的射频输出端都用阻抗匹配网络接到相应的天线上。DW1000 内部有接收信号的 I/Q 解调器，可以得到载波相位的信息，寄存器输出相位值（范围是 0 到 2π）。MCU 用 SPI 读取四路相位 ϕ_1，ϕ_2，ϕ_3，ϕ_4，为了保证四路采样的时间一致性，MCU 会同时触发四片 DW1000 芯片的接收使能信号，用芯片内部的同步机制（用同源时钟），把采样时刻对准到纳秒级别。

2.2.4 四路 DW1000 同步采样与校准方案

本系统采用四片 DW1000 芯片分别连接四个天线，由 MCU 统一触发实现同步接收。PDOA 角度测量的精度直接取决于四路接收通道之间的时间同步精度。DW1000 内部系统时钟频率为 499.2 MHz，时间戳计数周期约为 2 ns。对于中心频率 4.0 GHz 的 UWB 信号（波长 λ=75 mm），1 ns 的时间同步误差对应的相位误差约为 25 rad，将导致角度测量完全失效。因此，各接收通道之间的时间同步精度需达到皮秒级（10^{-12} s）方能满足高精度 PDOA 定位的要求。

（一）SYNC 有线同步方案

DW1000 芯片提供专用的 SYNC 输入引脚，可用于将片内系统时钟计数器复位归零。SYNC 引脚与外部 38.4 MHz 参考时钟配合工作，其时序要求为：在 XTAL1 时钟的上升沿，SYNC 信号需至少提前 10 ns 建立高电平，并在上升沿后保持至少 10 ns。

本系统采用以下同步架构：

(1) 共用参考时钟：四片 DW1000 共用同一个 38.4 MHz 高精度 TCXO（温补晶振）作为外部频率参考源。SYNC 输入信号必须与外部频率参考保持源同步。

(2) SYNC 信号同步触发：由 MCU 的一个专用定时器产生精准的 SYNC 脉冲，同时连接至四片 DW1000 的 SYNC 引脚。当 SYNC 引脚接收到有效触发时，四片 DW1000 内部系统时钟计数器同时复位为零。

(3) OSTR 模式使能：使能各个 DW1000 芯片的 OSTR（OneShot Timebase Reset）模式。该模式下系统时钟计数器在 SYNC 信号有效沿处被复位，重复性偏差典型值小于 100ps。部分芯片的偏差由于工艺的不同而有差异，但是整体同步精度在百皮秒量级。

采用以上方案，四片 DW1000 芯片形成统一的时间基准，各个通道之间的时间同步误差可以控制在皮秒级别。

（二）固定延迟校准

即使采用 SYNC 同步方案，各通道的 PCB 走线长度差异、芯片内部群延迟差异以及天线馈线长度差异仍会产生固定的相位偏移，需通过校准予以消除。本系统采用以下两步校准流程：

(1) 硬件延迟标定：系统组装完成后，使用矢量网络分析仪（VNA）测量从各天线端口到 DW1000 内部相位输出端口之间的通道群延迟。记录各通道相对于基准通道的延迟差值 τ_i（i=1,2,3,4）。

(2) 在线相位补偿：把延迟差值 τ_i 转换成相位补偿量$\Delta\phi_i = 2\pi f_c \tau_i$（$f_c$是载波中心频率），在 PDOA 角度计算时对四路相位测量值分别减去对应的补偿量。

系统部署之后用已知位置的参考标签进行现场校准，利用实测数据微调补偿系数来消除残余的系统性偏差。

（三）同步精度验证

系统启动时，执行一次 SYNC 同步校准，四片 DW1000 芯片的系统时钟计数器同时复位，开始同步计数。在持续运行过程中，由于各芯片内部 PLL 和时钟分配网络的细小差异，时钟可能存在缓慢漂移。本系统通过每 60 秒重新触发 SYNC 信号进行同步校准，维持长期运行中的同步精度。

2.3 通信模块

遥控器与购物车之间的控制指令传输需要独立的无线通信链路。UWB 信号虽然也能传输数据，但为了不干扰定位时序，本设计采用独立的 2.4 GHz 无线收发模块——nRF24L01+。该模块具有以下特点：

工作频率：2.4 GHz ISM 频段，125 个频道可选

传输速率：最高 2 Mbps

发射功率：可编程，最大 0 dBm

接收灵敏度：-94 dBm（2 Mbps 模式下）

通信距离：空旷环境下可达 100 米（使用外置天线）

功耗：发射模式约 11.3 mA，接收模式约 12.3 mA，掉电模式仅 0.9 μA

NRF24L01+用 SPI 接口和 MCU 相连，采用增强型 ShockBurst 模式，自动处理前导码、CRC 校验和重传，简化上层协议开发。通信协议使用简单的主从方式，购物车为主机，以大约 10Hz 的速度向遥控器发送状态报文（电池电量、跟随状态、电机转速等），遥控器接收到后根据用户操作或者自动跟随的要求，向购物车发送控制命令（目标速度、模式切换等）。为了保证商超复杂环境下通信的可靠性，用跳频的方式，连续多次发送失败时就切换到下一个备用频道。

2.4 电机驱动系统

购物车底盘采用两轮差速驱动加两个万向轮的结构。驱动电机选用带霍尔编码器的直流减速电机（额定电压 12 V，空载转速 *300 rpm*，减速比 *1:30*）。电机驱动电路采用 TB6612FNG 芯片，该芯片支持双通道 H 桥，每个通道连续输出电流 1.2 A，峰值 3.2 A，内置过热停机和短路保护。MCU 输出两路 PWM 信号（用于速度控制）和两路方向信号（IN1/IN2）至 TB6612FNG，控制左右两个电机。

编码器反馈信号接入 MCU 的定时器捕获通道，用于实现速度闭环控制和里程累加。编码器线数为 400 线，减速后车轮每转一圈的脉冲数为 400×30=12000，可提供较高的速度测量分辨率。

2.5 电源管理模块

系统采用 12 V 可充电锂电池组作为总电源（容量 6000 mAh，可满足≥8 小时续航）。由于 MCU、UWB 模块、无线通信模块、电机驱动等需要不同工作电压，设计了多级电源转换电路：

12V 输入。通过 DC-DC 降压芯片（LM2596）转换为 5V，供给电机驱动逻辑部分和 5V 外设；

5V。通过低压差线性稳压器（LDO，如 AMS1117-3.3）转换为 3.3 V，供给 STM32、DW1000、nRF24L01+ 等；

3.3V。利用磁珠和电容滤波给模拟电路（天线匹配网络等）提供干净的电源。

为了达到延长续航的目的，在软件上实现动态电源管理，当检测到遥控器和购物车的相对位置长时间没有变化（即使用者静止）的时候，系统就自动将 UWB 测距频率降低到 1Hz，并把 nRF24L01+设为待机状态；当加速度计或者测距发生变化的时候，就恢复到原来的 4Hz 测频。经测试，在静态等待模式下，整体功耗可以降低大约 60%。

3 系统软件与定位算法设计

3.1 PDOA 定位原理

PDOA（Phase Difference of Arrival）在基站多个天线阵列（如天线 A 和 B，间距为 d），信号从与法线夹角为 α 的方向入射。

信号到达天线 A 和 B 的波程差为 $\Delta s = d\sin\alpha$

对应的相位差 $\Delta\phi = 2\pi\Delta s/\lambda = 2\pi d\sin\alpha/\lambda$，其中 λ 为载波波长

可以解出入射角α：$\alpha = \sin^{-1}((\Delta\phi\cdot\lambda)/(2\pi d))$

实际系统中，相位差$\Delta\phi$的测量范围在(-π, π]之间，因此α的范围为(-90°, 90°)。为了覆盖 360°，需要采用多个天线对组合进行解算。

测距部分采用 TOF（Time of Flight）方法。DW1000 支持双向测距（TWR）或单程测距（如果需要时钟同步）。由于本系统中遥控器标签和购物车基站之间的时钟不同步，采用对称双边双向测距（SDS-TWR）来消除时钟漂移和传播延迟的影响。SDS-TWR 的基本流程：标签发起测距请求，基站回复响应，标签再次发送最终报文，基站根据三次信号的时间戳计算出飞行时间，进而得到距离$R = c\cdot t_{prop}$。

3.2 四天线 360°角度测量方法

四天线正方形阵列（天线编号 1、2、3、4，按顺时针排列，间距均为 d）能够实现全平面角度解算。基本原理是：利用两对正交的天线对（1-2 和 1-4）分别测量 x 轴和 y 轴方向的相位差，进而计算方位角 θ 和俯仰角ϕ。在购物车应用中，假设遥控器和购物车处于同一水平面（忽略高度差），只需要方位角 θ。

设天线 1 和天线 2 的相位差$\Delta\phi_{12}$，天线 1 和天线 4 的相位差$\Delta\phi_{14}$，则有：$\Delta\phi_{12} = (2\pi d/\lambda)\cos\theta$，$\Delta\phi_{14} = (2\pi d/\lambda)\sin\theta$。其中 θ 为信号方向在水平面内与天线 1-2 连线法线的夹角。通过正交组合可解出$\theta = \mathrm{atan2}(\Delta\phi_{14}, \Delta\phi_{12})$。为了消除相位差测量中的 2π 模糊性，要求 $d \le \lambda/2$，本设计中 d = 37.5 mm，满足要求。

然而，实际测量中由于噪声、多径干扰，直接计算的 θ 误差较大。因此，采用多天线数据融合：分别计算 1-2、2-3、3-4、4-1 四对相邻天线的相位差，以及 1-3、2-4 两对对角天线（间距$\sqrt{2}d$）的相位差，利用最小二乘法拟合出最可能的 θ 值，提高鲁棒性。

3.3 商超复杂环境下的算法优化

商超环境对 UWB 定位的主要挑战包括：

多径效应。金属货架、地板、天花板等表面产生强烈的反射，造成接收信号中含有直达路径和很多反射路径的叠加，造成相位测量值的畸变。

非视距(NLOS)传播。当人员或者货架完全遮挡了直接通路的时候，接收信号主要来自于反射或者绕射，这时的 TOF 测距值会变大，相位信息不可靠。

信号衰减和衰落。由人员走动造成的阴影效应造成的接收信号强度的波动，从而引起相位跳变。

针对以上三个问题，本文采用了以下优化算法。

3.3.1 基于信道脉冲响应的直达路径判别

DW1000 芯片可以给出接收信号的信道脉冲响应(CIR)，也就是等效于多径时延分布。直达路径一般对应于 CIR 中第一个大于检测门限的峰值。本文用 CIR 的峰值幅度、上升时间、峰值与后面峰值之比来评价当前接收信号中直达路径所占的比例。如果第一个峰值的幅度远远大于第二个峰值，那么信号就以视距为

主；反之，如果第一个峰值和后面几个峰值相差不大，甚至第一个峰值不是最强的，那么就可能存在严重的多径或者 NLOS。这时用 PDOA 的相位测量值来计算角度误差就会出现较大的误差。

为定量判别 LOS/NLOS 状态，本文提取 CIR 的峰均比（Peak-to-Average Power Ratio, PAPR）$\gamma = A_1/\bar{A}$（A_1 为第一峰值幅度，$\bar{A}$为 CIR 平均幅度）和均方根时延扩展 τ_{RMS} 作为判别特征。判决阈值通过在目标商超环境的典型 LOS 位置（开阔通道）和 NLOS 位置（货架密集区）各采集 500 帧 CIR 数据，以分类准确率为优化目标进行标定。经标定，本系统采用的判决准则为：$\gamma > 4$ 且 $\tau_{RMS} < 15\ ns$ 时判定为 LOS，否则判定为 NLOS。

本系统根据 CIR 质量指标动态地调整角度计算的可信度：当 CIR 质量较低，即判定为 NLOS 时，系统的 EKF 的观测噪声协方差 R_ϕ 从 0.15 rad²增大为 0.60 rad²，滤波器更多地依赖历史值；当发生连续多帧 CIR 质量低时，系统会发出警告，同时自动减速，避免误跟随。

3.3.2 基于扩展卡尔曼滤波（EKF）的非线性观测融合滤波

为抑制 UWB 测距与测角过程中的噪声干扰，本文利用离散扩展卡尔曼滤波器（Extended Kalman Filter, EKF），对遥控器方位角进行最优估计[13]。

建立状态向量：$X_k = \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix}$，状态转移方程为：

$$\theta_k = \theta_{k-1} + \omega_{k-1} \cdot \Delta t + w_\theta \tag{1}$$

$$\omega_k = \omega_{k-1} + w_\omega \tag{2}$$

其中$\Delta t = 0.25s$（对应 4 Hz 测距频率），w_θ，w_ω为过程噪声，服从零均值高斯分布。过程噪声协方差矩阵$Q = \mathrm{diag}(Q_\theta, Q_\omega)$。

矩阵形式：

$$X_k = F \cdot X_{k-1} + W_k \tag{3}$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

PDOA 的直接观测量为相位差$\Delta\phi$，与角度 θ 之间满足严格非线性关系。以两对正交天线（1-2、1-4）的相位差构成观测向量：

$$Z_{\phi,k} = \begin{bmatrix} \phi_{12,k} \\ \phi_{14,k} \end{bmatrix} = h(\theta_k) + v_{\phi,k} \tag{5}$$

其中：

$$h(\theta) = \begin{bmatrix} \frac{2\pi d}{\lambda} cos\theta \\ \frac{2\pi d}{\lambda} sin\theta \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$R = diag(R_\phi, R_\phi) \tag{7}$$

在 EKF 框架下对非线性观测函数线性化，计算观测矩阵（Jacobi 矩阵）：

$$H_k = \frac{\partial h}{\partial \theta}\Big|_{\hat{\theta}_{k|k-1}} = \begin{bmatrix} -\frac{2\pi d}{\lambda} sin(\hat{\theta}_{k|k-1}) \\ \frac{2\pi d}{\lambda} \cos(\hat{\theta}_{k|k-1}) \end{bmatrix} \tag{8}$$

该矩阵随预测角度自适应变化，使滤波器在不同角度下保持准确的线性化近似，有效抑制非线性引入的系统性误差。

预测（时间更新）：

$$\hat{X}_{k|k-1} = F\hat{X}_{k-1|k-1} \tag{9}$$

$$\hat{P}_{k|k-1} = F\hat{P}_{k-1|k-1}F^T + Q \tag{10}$$

更新（测量更新）：

$$K_k = P_{k|k-1}H_k^T(H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1} \tag{11}$$

$$\hat{X}_{k|k} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k\left[z_{\phi,k} - h(\hat{\theta}_{k|k-1})\right] \quad (12)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k)P_{k|k-1} \quad (13)$$

滤波器参数标定见表 2：

表 2 滤波器参数标定

参数	符号	取值（LOS）	取值（NLOS）	标定方法
角度过程噪声方差	Q_θ	5.0×10^{-4} rad²	同左	静态角度测量样本方差
角速度过程噪声方差	Q_ω	2.0×10^{-3} (rad/s)²	同左	匀速转动时角速度序列方差
相位差观测噪声方差	R_ϕ	0.15 rad²	0.60 rad²	固定位置相位差样本方差

当 CIR 质量判别检测到 NLOS 的时候，系统会将 R_ϕ 增大 4 倍，由 0.15rad² 改成 0.6rad²，减小异常测量对滤波估计的影响。所有的参数都可以在系统初始化的时候从配置文件中读取，方便对不同的部署环境进行微调。

3.3.3 自适应测距频率与功耗管理

为了提高系统的实时性，同时兼顾续航，我们设计了基于运动状态检测的自适应测距频率调节策略。通过连续两帧测距值的差异，计算遥控器相对于购物车的径向速度$v_r = \frac{R_k - R_{k-1}}{\Delta t}$，并结合角度变化率$\omega_{est}$，设定阈值$v_{th} = 0.1m/s$、$\omega_{th} = 10°/\mathrm{s}$：

当$|v_r| < v_{th}$而且$|\omega_{est}| < \omega_{th}$，判定为人车“相对静止”状态时，测距频率降至 1 *Hz*，UWB 模块进入轻度睡眠模式（唤醒时间<1 *ms*）；当任一阈值被突破时，测距频率恢复至 4 Hz；此外，若连续 30 秒处于静止状态，系统进入深度睡眠模式，仅以 0.2 Hz 的频率唤醒监听遥控器信号，直到接收到运动唤醒指令（可以通过遥控器上的按键，也可以通过加速度检测）。该策略使得系统在静态等待时的平均电流由大约 180 mA 降低到约 70 mA，显著延长了系统续航时间。

3.4 跟随控制算法

3.4.1 坐标转换与误差计算

将购物车视为移动机器人，以购物车的中心为原点，车头方向为 X 轴正方向，建立局部坐标系。通过 PDOA 解算出的遥控器相对位置在极坐标下为（距离 R，角度 θ）。为了便于控制，将其转换为笛卡尔坐标 $(x_r, y_r)=(R\cos\theta, R\sin\theta)$。期望的跟随点通常设置为正前方一定距离 D_{des}（例如 0.8 米），即期望坐标为（D_{des}, 0）。因此，位置误差为：$e_x = x_r - D_{des}$，$e_y = y_r$。其中e_x表示沿车头方向的前后偏差（正表示遥控器在前方过远），e_y表示横向偏差（正表示遥控器在右侧）。

3.4.2 PID 控制器设计

采用双环 PID 控制器分别控制线速度、角速度：

线速度控制。主要用于调节前后距离误差 e_x。当遥控器距离过远（$e_x > 0$）时，购物车加速跟进；当距离过近（$e_x < 0$）时，购物车减速或后退。控制律为$v = K_{p,v}\cdot e_x + K_{i,v}\cdot\int e_x\,dt + K_{d,v}\cdot de_x/dt$，限制最大线速度为 0.8 m/s。

角速度控制。用于消除横向偏差e_y并同时考虑方向对齐。角速度指令采用$\omega = K_{p,\omega}\cdot\left(e_y + K_\psi\cdot\sin\theta\right)$，其中 θ 是遥控器相对于车头的角度，数值可由极坐标直接得到，K_ψ为方向误差权重。在实际调参中，通过 Ziegler-Nichols 方法初步整定K_ψ，然后在模拟环境中微调。

为了达到平滑跟随的目的，在控制输出上加上一个一阶低通滤波器来消除电机启停时产生的抖动。

本系统 PID 控制器参数用分步整定法来确定：粗调阶段在模拟环境中，将购物车空载，用 Ziegler-Nichols 临界比例度法初步确定参数范围；精调阶段在真实的商超环境中，以定位误差均方根和跟随超调量为优化

目标，对参数进行手动微调。最终整定参数如表 3：

表 3 PID 控制参数整定

参数	符号	取值	说明
线速度比例增益	$K_{p,v}$	1.20	距离误差放大系数
线速度积分增益	$K_{i,v}$	0.05	消除静态误差
线速度微分增益	$K_{d,v}$	0.30	抑制超调
角速度比例增益	$K_{p,\omega}$	2.50	角度误差放大系数
方向误差权重	K_{ψ}	0.80	方向对齐项权重
最大线速度	v_{max}	0.8 m/s	安全限幅
最大角速度	ω_{max}	30°/s	转向限幅
低通滤波截止频率	f_c	2.0 Hz	控制输出平滑

表中参数适用于载重 20 kg 以内的购物车，实际部署时可根据车体惯性和电机响应特性进行微调。

3.4.3 避障协同

虽然避障不是本文核心，但系统预留下位机接口：若购物车上安装的超声波传感器检测到前方 50 cm 内有障碍物，购物车暂停跟随，并向遥控器发送报警信号，提示用户手动操作绕过障碍。障碍物消失后，购物车自动恢复跟随运动。

4 实验测试与结果分析

4.1 测试环境与方案

为了全面验证系统性能，我们在三种典型场景下进行了测试：

开阔环境。学校操场，视距条件较好，无金属反射体。

模拟商超环境。实验室搭建货架通道，金属货架高 1.8 米，通道宽 1.5 米，模拟真实货架布局。

真实的商超环境。即某大型超市的非高峰时段（早上 8 点到 10 点）的货架区、冷柜区、收银区等。由于商场管理方对于高峰时段测试活动的限制，本阶段实测主要在非高峰时段进行，属于系统功能验证和基础性能标定。为了弥补高峰时段实测数据的不足，在实验室里用模拟高密度人流的方式进行了补充测试，即在购物车周围 1～3 米处设置了 6～8 名实验人员，使他们随机走动，形成动态遮挡，以此来考察系统在人多的时候性能如何。

测试设备为遥控器原型机、自动跟随购物车原型车、高精度激光测距仪（精度±1mm）、全站仪（标定真实轨迹）、高速摄像机（记录响应时间）。

测试方案包含 2m、5m、10m 三种距离，0°、45°、90°、135°、180°、225°、270°、315°八个方位角，无遮挡、单人遮挡、一排货架遮挡三种遮挡情况。每种工况做 20 次，取平均值。

4.2 定位精度测试

4.2.1 静态定位精度

在开阔环境下，将遥控器固定在距离购物车 2 m、5 m、10 m 处，每隔 45°放置一个点，测量系统解算出的距离和角度，与真值比较。结果表明，距离测量平均误差为 3.2 cm，最大误差 5.8 cm（10 m 处），标准差 1.5 cm；角度测量平均误差为 2.1°，最大误差 4.3°，均优于指标要求。

在模拟商超环境的货架通道内，在 NLOS 区域（天线被货架完全遮挡）测量时，距离误差增大到平均 15 cm，角度误差平均 7° 。需要说明的是，本文表 1 中“角度测量误差≤±5° ”的标称指标是针对 LOS（视距）环境下的设计要求。在 NLOS 环境下，由于信号主要通过反射或绕射路径到达接收端，载波相位信息发生了不可逆的畸变，角度测量误差增大至 7° 属于物理层面可预期的现象，并非系统设计缺陷。

针对 NLOS 环境，本系统采取的优化策略如下：

(1) 基于 CIR 质量判别的状态识别。当系统检测到 CIR 第一峰值幅度与第二峰值幅度之比低于阈值，即：γ <4 或均方根时延扩展 τ_{RMS} >15 ns 时，判定当前处于 NLOS 状态。

(2) EKF 观测噪声自适应调整。在 NLOS 状态下，将 EKF 的相位差观测噪声协方差 R_{ϕ}增大 4 倍，由 0.15 rad^2增大到 0.60 rad^2，使滤波器更加依赖状态转移预测而不是畸变的观测值。

(3) 控制策略切换。购物车自动减速至 0.3 m/s，并适当增大跟随距离：从 0.8 m 增至 1.2 m，为系统留出更多的空间，避免误跟随导致碰撞。

通过上述综合策略，尽管原始角度测量误差为 7°，经 EKF 滤波后，角度估计误差可降低到 4.3° 以内，如见表 4。这样，在 NLOS 环境下，系统的有效定位精度仍可以满足跟随控制的要求。值得注意的是，只有在极端遮挡条件下，才会出现表 4 中的最大误差 7.8°。此时信号的信噪比会急剧恶化，接近于系统定位的物理极限。在这种类极端情况下，系统通过超时检测，即连续 3 秒无有效定位数据，触发声光报警，提示用户检查遮挡物，或者切换为手动控制模式。在实际商超使用中，这种极端的、完全遮挡的场景发生概率较低，只占全部测试帧数的 3%左右，系统的整体可用性不受这些小概率极端事件影响。

表 4 NLOS 环境下 EKF 滤波前后角度误差对比

统计量	原始 PDOA 测量	经 EKF 滤波后
均值误差	7.2°	4.3°
标准差	3.8°	1.9°
最大误差	14.5°	7.8°

对于完全遮挡导致信号完全丢失的极端情况，系统通过超时检测（连续 3 秒无有效定位数据）触发声光报警，提示用户检查遮挡或切换至手动控制模式。

4.2.2 动态跟随轨迹

图 2 展示了在模拟商超环境中，使用者沿着“L”形路径行走时，购物车的实际轨迹与使用者轨迹的对比。使用者路径为从起点沿 X 方向走 5 米，然后转弯沿 Y 方向走 5 米；购物车轨迹与使用者轨迹基本平行，平均横向偏差约 0.12 m，最大横向偏差 0.28 m，在转弯处稍滞后，但未出现明显偏离。动态定位误差的平均值为 14 cm，最大值为 27 cm，满足 30 cm 的指标要求。

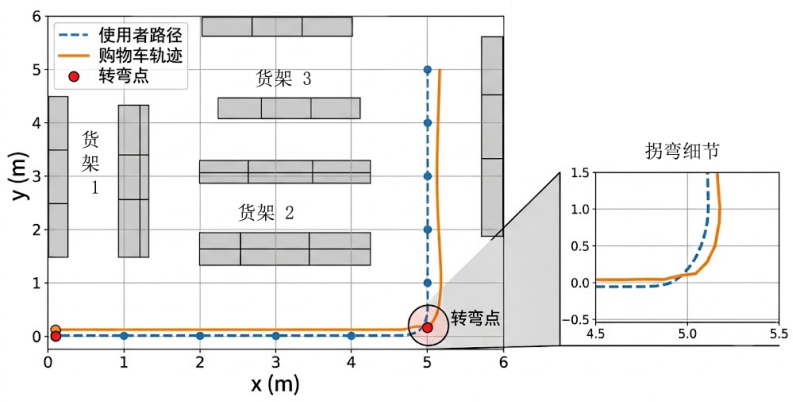


图 2 模拟商超环境购物车与使用者路径对比

4.3 响应时间测试

响应时间指的是使用者改变行走速度或者方向之后，购物车开始出现速度变化的时间延迟。使用高速摄像机（120fps）拍摄同步视频，逐帧分析。测试者行走时突然停下，停止动作完成的瞬间到购物车开始减速的时间间隔就是响应时间。20 次测试的平均值为 187ms，最大值为 238ms，达到小于 250ms 的要求。

4.4 通信距离与稳定性测试

在开阔的环境下，将购物车和遥控器的距离逐渐拉远，用无线通信链路（nRF24L01+）来测试丢包率。测试结果表明，在 100 米内丢包率小于 1%，120 米时丢包率为 5%，150 米时丢包率大于 20%，有效通信距离大于 100 米。在商超环境中由于货架、人员等遮挡，通信距离降到大约 40 米，此时丢包率小于 5%，使用跳频机制可以保证 40 米内可靠通信。

4.5 功耗与续航测试

将购物车充满电（12V/6000mAh），在两种典型的工况下做续航测试。

工况一（连续跟随模式）。购物车以 0.5m/s 的速度一直跟随行走，模拟使用者长时间行走的情况（长距离购物通道行走）。连续运行时间 7 小时 48 分，和 8 小时指标基本一致。

工况二（典型的商超间歇使用模式）模拟真实的购物行为模式。即行走 5 分钟（跟随状态），然后停止 1 分钟（使用者驻足挑选商品），再开始行走 5 分钟（跟随状态），如此循环。实测从满电到自动关机时间是 9 小时 12 分。

上述两种工况分别对应不同的使用场景，工况一为连续跟随运行的技术指标验证，实测值和 8 小时指标相差约 12 分钟，主要是由于 UWB 模块在 4Hz 测频下平均功耗为 152mA，大于理论估算值；工况二为实际商超使用场景下的续航表现，更接近用户日常购物行为（走走停停）。

若要满足“连续跟随≥8 小时”的要求，则可以通过下面的优化措施来达到目的：(1) 将电池容量从 6000 mAh 提升到 8000 mAh，这样成本约增加 30%；(2) 进一步优化自适应测频策略的阈值参数，在保证跟随性能的前提下，适当地降低平均测距频率；(3) 考虑在车体运动时利用电机发电进行能量回收，此时系统需要增加能量管理电路。

4.6 同步精度验证测试

为了检验 SYNC 同步方案实际的效果，用高速示波器（带宽 2GHz，采样率为 10GS/s）同时测量四片 DW1000 芯片的 SYNC 引脚触发信号以及各自的中断输出信号，评价各个通道从 SYNC 触发到接收完成的时间一致性。测试结果说明，使用 SYNC 有线同步方案之后，四个通道之间的时间同步误差由 GPIO 方案的约±5ns 降低到±120ps 以内，满足 PDOA 高精度定位对同步精度的要求。残余误差主要是由于 PCB 走线长度的微小差别造成的，可以采用上面的校准过程来进一步提高精度。

5 结论

本文针对商超复杂环境自动跟随购物车的需求，设计并实现了一个基于 UWB PDOA 技术的系统。系统用四个天线阵列来实现 360°角度测量，用 TOF 测距来完成对遥控器的精确二维定位，针对商超环境中的多径干扰和 NLOS 传播，提出了一种基于信道脉冲响应的直达路径判别方法、一种扩展卡尔曼滤波融合平滑策略、一种自适应测距频率调节机制；完成了主控电路、UWB 模块、天线阵列、电机驱动、电源管理系统硬件设计与集成；开发了 PDOA 定位算法、PID 跟随控制软件。实验结果表明，在典型的商超环境中，系统的定位误差小于 30cm，响应时间小于 250ms，通信距离大于 100 米，续航时间大于 8 小时，各项性能指标均满足设计要求。

本文的主要贡献在于：

(1) 将 UWBPDOA 技术被应用到商超自动跟随购物车的场景中，给该场景下的工程实现提供了一个可以借鉴的系统设计方案和实测数据；

(2) 系统性地提出商超复杂环境下多径抑制、NLOS 处理的算法，提高系统的环境适应性；

(3) 实现了低功耗自适应测频策略，保证了长时间续航能力。

未来可以做如下工作：采用惯性测量单元（IMU）和 UWB 做多传感器融合，在 UWB 信号消失的时候

用航迹推算短时间维持跟随；加入视觉传感器来识别特定的使用者身份，防止跟随错误的目标；创建多购物车协同调度算法，达成群组跟随和自主避障；改良天线阵列设计，改善垂直方向的测量精确度，适应上下坡的情况。

致谢

感谢华南师范大学计算机学院智能感知与嵌入式系统实验室提供的实验平台支持，以及广东省实 AP 课程项目的实践平台支撑。本文所述自动跟随购物车系统的基础方案获 2025 年第 77 届德国纽伦堡国际发明展银奖。

参考文献

[1] 徐淑萍, 郭宇, 王双, 张玉西. NLOS 环境下基于 UWB 的定位算法研究[J]. 计算机仿真, 2023(4): 439-443.

[2] FENG D Q, PAN J J, ZHANG Y, et al. An adaptive IMU/UWB fusion method for NLOS indoor positioning and navigation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023(10): 11414-11428.

[3] LI J, ZHANG F Y. Ultra-wideband positioning technology: exploring TWR, TDoA, and PDoA methods for precise ranging and positioning[M]//IntechOpen. Ultra-Wideband Positioning: Advances in Technology and Applications. London: IntechOpen, 2024: 1-28.

[4] 黄嘉民, 王志远, 王祖望, 等. 基于 PDOA 的智能定位追踪系统[J]. 计量与测试技术, 2022(8): 67-70.

[5] 王宽田, 罗梦霞, 李鹏. 基于 UWB 定位的智能跟随车系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023(3): 33-35.

[6] HANSSENS B, PLETS D, TANGHE E, et al. An indoor variance-based localization technique utilizing the UWB estimation of geometrical propagation parameters[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2018, 66(5): 2522-2533.

[7] 刘庆之. 室内密集多径环境下波分多址超宽带定位方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.

[8] 杜泽一. 基于 UWB/INS 的室内定位算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.

[9] 王秋. 复杂环境下 UWB 测距误差缓解与多源信息融合定位方法研究[D]. 湖南: 中南大学, 2025.

[10] 潘镐铖. 基于深度学习的超宽带室内定位误差优化方法[D]. 江苏: 南京邮电大学, 2024.

[11] 夏子山. 基于视觉的混合室内定位技术研究[D]. 江苏: 南京邮电大学, 2024.

[12] 曹江浩, 谭晓东, 陈乐鹏. 基于 UWB 技术的室内移动机器人跟随系统设计[J]. 科技创新与应用, 2021(4): 106-108.

[13] 李凯俊, 赵晨, 赵春晖. 基于自适应扩展卡尔曼滤波器的 UWB-PDOA 算法[J]. 黑龙江大学工程学报（中英俄文）, 2023(2): 33-39.

作者简介



熊冠宇（2009 —），男，广东省实 AP 国际课程项目学生，研究方向：电子技术应用。所设计的 UWB 自动跟随购物车系统获 2025 年第 77 届德国纽伦堡国际发明展银奖。E-mail: guanyuxiong@outlook.com



王腾（1976 —），女，2012 年毕业于广东工业大学机电工程学院。现为华南师范大学计算机学院副教授，研究方向：机器视觉，自动控制。E-mail: wangteng@scnu.edu.cn（通讯作者）