

基于人工智能技术的全地形智能物流机器人的性价比简易实现

石爽然 林艺 杜宏秀

大连理工大学城市学院

DOI:10.32629/acair.v4i3.21366

[摘要] 针对物流自动化成本高部署难的问题,提出基于国产化硬件的低成本全地形视觉物流搬运机器人。上位机Rock5C运行ROS2与YOLOv8实现物料识别和SLAM导航;下位机ESP32S3与ESP32C3通过定制UART协议完成实时控制。实验表明,方案满足仓储需求,硬件成本较传统方案降低60%以上,为国产化低成本物流自动化提供参考范式。

[关键词] 物流机器人; 低成本; 实时通信; YOLOv8; ROS 2

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

The Simple Realization of Cost-effective All-terrain Intelligent Logistics Robots Based on Artificial Intelligence Technology

Shuangran Shi Yi Lin Hongxiu Du

Dalian University of Technology City College

[Abstract] To address the high cost and difficult deployment issues of logistics automation, a low-cost all-terrain visual logistics handling robot based on domestic hardware is proposed. The upper computer Rock5C runs ROS2 and YOLOv8 to achieve material recognition and SLAM navigation; the lower computer ESP32S3 and ESP32C3 complete real-time control through a customized UART protocol. The experiment shows that the scheme meets the warehouse requirements, and the hardware cost is reduced by more than 60% compared to the traditional scheme, providing a reference model for domestic low-cost logistics automation.

[Key words] Logistics robot; Low cost; Real-time communication; YOLOv8; ROS 2

1 引言

随着智慧物流深度融合使移动机器人市场快速增长^[1],但传统工控机+运动控制器架构成本高昂。利用国产硬件降本增效成为迫切需求。低成本平台如树莓派算力不足,Jetson Nano成本仍偏高^[2]。视觉方面,YOLOv8检测精度可达mAP0.979^[3],为物料识别提供成熟基础。导航方面,ROS2结合Nav2与SLAM Toolbox^[4]已形成标准技术栈,并在瑞芯微平台完成验证。底层控制方面,ESP32与FreeRTOS可构建确定性闭环系统。然而,国产瑞芯微平台与ESP32的异构实时协同机制缺乏系统探讨。

为此,本文提出基于国产化硬件的低成本物流搬运机器人方案。上位机采用Rock5C,实现视觉识别与SLAM导航;下位机使用双ESP32执行实时控制,通过定制UART协议协同。主要贡献:(1)提出Rock5C+双ESP32双层异构架构,解决AI计算与确定性控制协同难题;(2)提供全国产、低成本的硬件参考范式,有效降低中小仓储自动化改造门槛。

2 系统总体架构设计

2.1系统总体架构。系统面向中小仓储场景,需满足全向移动、实时视觉识别、SLAM导航与抓取搬运等功能。为兼顾高性能AI推理与确定性实时控制,系统采用“高性能ARM Linux+实时MCU”双层异构架构。上位机选用瑞芯微Rock5C开发板,部署YOLOv8视觉识别、激光SLAM建图、自主导航及串口桥接节点。底盘ESP32S3负责解析速度指令、解算麦克纳姆轮逆运动学并控制步进电机,同时采集传感器数据;机械臂ESP32C3负责解析关指指令,控制抓取动作。系统总体架构如图1所示。

能AI推理与确定性实时控制,系统采用“高性能ARM Linux+实时MCU”双层异构架构。上位机选用瑞芯微Rock5C开发板,部署YOLOv8视觉识别、激光SLAM建图、自主导航及串口桥接节点。底盘ESP32S3负责解析速度指令、解算麦克纳姆轮逆运动学并控制步进电机,同时采集传感器数据;机械臂ESP32C3负责解析关指指令,控制抓取动作。系统总体架构如图1所示。

2.2异构系统通信架构。在Rock5C(Linux/ROS2)与ESP32(FreeRTOS)间的实时通信是系统协同关键。为此,本文设计了两路独立UART的串行通信架构,波特率115200bps。物理层:一路连接底盘ESP32S3,双向传输速度指令与里程计/状态数据;另一路连接机械臂ESP32C3,双向传输关节角度指令与位置/抓取状态。数据链路层:设计了定长二进制帧协议以保障可靠性,帧格式如表1所示。每帧包含帧头、地址、命令码、长度、有效载荷(最大16字节)和CRC8校验。

表1 异构通信协议帧格式

字节0-1	字节2	字节3	字节4	字节5-10	字节11
帧头(0x5A, Len)	设备地址	命令码	数据长度	有效载荷	CRC8

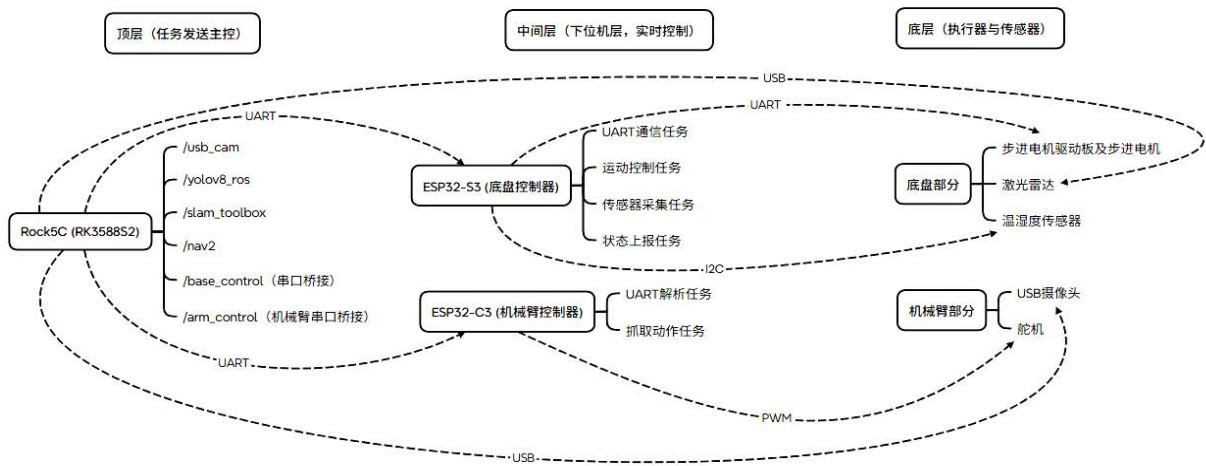


图 1 总体架构图

3 硬件系统设计与选型

3.1 硬件选型。上位机Rock 5C起售价约216元, 提供近工控机算力。底盘控制器ESP32-S3通过UART向张大头驱动板发送指令, 控制四台步进电机, 并采集温湿度; 机械臂控制器ESP32-C3执行动作序列。底盘采用四轮独立驱动麦克纳姆轮, 实现全向移动。环境感知使用YDLIDAR X2激光雷达和1080pUSB摄像头, 辅

以1℃温湿度传感器。

3.2 硬件成本分析。低成本是本方案的核心设计目标核心元器件成本明细如表2所示:

表2 异构通信协议帧格式

序号	元器件名称	型号/规格	数量	单价(元)	小计(元)
1	上位机开发板	Rock 5C (4GB RAM)	1	280	280
2	底盘控制器	ESP32-S3-DevKitC-1	1	45	45
3	机械臂控制器	ESP32-C3-DevKitM-1	1	25	25
4	步进电机驱动板	张大头 4 轴驱动板	1	120	120
5	步进电机	42 步进电机(1.8°)	4	35	140
6	麦克纳姆轮	4 寸铝合金麦克纳姆轮	4	80	320
7	2D 激光雷达	YDLIDAR X2	1	380	380
8	USB 摄像头	1080P 免驱摄像头	1	60	60
9	温湿度传感器	AHT10 模块(I2C)	2	8	16
10	机械臂套件	4 自由度机械臂(含舵机)	1	150	150
11	电源模块	24V/10Ah 锂电池+降压模块	1	200	200
总计					1736
序号	元器件名称	型号/规格	数量	单价(元)	小计(元)

上位机Rock5C的4GB版仅280元底盘与机械臂控制器采用ESP32S3和ESP32C3合计70元, 四只42步进电机与配套驱动板共260元, 麦克纳姆轮320元, YDLIDARX2激光雷达380元是成本最高的单一传感器但因其测距范围0. 12至8m且ROS驱动成熟, 而选用其余摄像头温湿度模块机械臂套件及电源等合计426元, 整机核

心元器件成本总计仅1736元, 核心元器件成本分布清晰选型均以高性价比为原则, 上位机采用Rock5C的4GB版单价280元底盘控制器选用ESP32S3单价45元机械臂控制器选用ESP32C3单价25元两者合计仅70元运动执行部分包含一块张大头4轴步进电机驱动板120元和四只42步进电机单价35元共140元四只4寸铝合金麦克纳姆轮单价80元共计320元感知系统主要成本集中在YDLIDARX2激光雷达单价380元USB摄像头60元AHT10温湿度传感器模块两个共16元此外还包括四自由度机械臂套件150元以及24V10Ah锂电池加降压模块组成的电源模块200元整机上述11类核心元器件成本总计仅1736元其中YDLIDARX2激光雷达是成本最高的单一传感器但其测距范围达0. 12至8m且ROS驱动成熟可靠性高因此在低成本约束下仍被优选上位机Rock5C以约216元起售的价位提供了接近工控机的AI算力双ESP32控制器以70元实现底盘与机械臂的双路实时协同麦克纳姆轮和步进电机系统以460元构建了全向移动底盘其余摄像头环境感知与供电模块均控制在较低成本充分体现了国产化硬件在中小仓储自动化改造中显著的成本优势整机硬件成本较传统方案降低百分之六十以上。

4 软件系统设计与核心算法

4.1 上位机ROS 2软件架构。上位机软件基于ROS2Humble采用节点化设计解耦各功能模块核心节点与通信关系如图2所示, 图2ROS2软件架构图底盘通信节点base_control是连接上下层的桥梁通过自定义循环队列和100Hz定时器处理定长帧协议将解析后的里程计等数据发布到相应话题并订阅cmd_vel话题将速度指令封装成12字节控制帧下发为防止总线冲突采用了软件标志位保护串口临界区视觉感知流水线由usb_cam话题节点采集图像yolov8_ros节点调用NPU推理并发布检测结果SLAM与导航系统集成slam_toolbox与Nav2导航栈slam_toolbox订阅scan与odom完成建图与定位Nav2利用全局与局部代价地图进行路径规划和动态避障最终输出cmd_vel话题指令此外initial_pose_publisher节点负责系统启动时发布初始位姿并在定位收敛后自动停止以加速AMCL初始化。

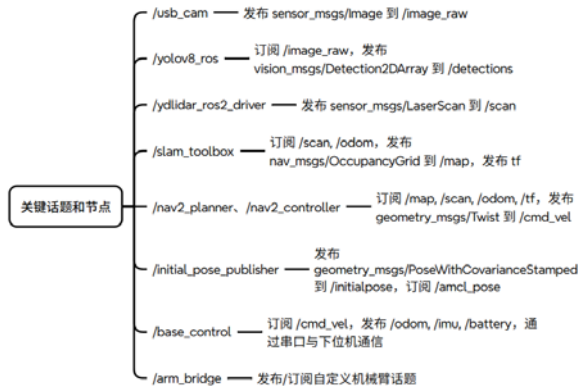


图2 ROS 2软件架构图

4.2 YOLOv8视觉物料识别。物料识别任务需实时分类目标的形状颜色及尺寸。本系统选用YOLOv8n模型通过RKNNToolkit转换后部署至Rock5C的NPU推理帧率约40FPS，检测流程为usb_cam节点以640乘480分辨率采集图像，yolov8_ros节点基于NCNN框架订阅并推理输出目标边界框与类别推理参数设置为置信度阈值0.25NMS，阈值0.45检测结果经后处理解析出物料属性与估算尺寸发布至detected_materials话题供抓取决策使用。

4.3 激光雷达SLAM建图与自主导航。物料识别任务需实时分类目标的形状、颜色及尺寸。本系统选用YOLOv8n模型，通过RKNNToolkit转换后部署至Rock5C的NPU，推理帧率约40FPS。检测流程为：usb_cam节点以640×480分辨率采集图像，yolov8_ros节点基于NCNN框架订阅并推理，输出目标边界框与类别。推理参数设置为置信度阈值0.25，NMS阈值0.45。检测结果经后处理解析出物料属性与估算尺寸，发布至detected_materials话题，供抓取决策使用。

4.4 下位机固件设计。底盘控制器ESP32S3固件创建多个FreeRTOS任务：UART通信任务负责指令解析与状态组帧回传；高优先级的运动控制任务负责逆运动学解算，并通过UART向驱动板发送四轮转速；传感器采集任务周期性读取温湿度等数据；状态上报任务将数据编码后发送。任务间通过队列通信，避免冲突。机械臂控制器ESP32C3固件主要包括UART命令解析任务和机械臂动作执行任务，根据指令控制舵机和电机完成动作序列。其通信帧格式与底盘一致，以降低集成复杂度。

5 实验与性能评估

5.1 实验环境与设置。实验在约6m×8m的模拟仓储环境中进行，布置有货架、纸箱等障碍物。测试物料包含三种形状与三种颜色的组合。Rock5C运行Ubuntu 22.04与ROS2 Humble，下位机基于ESP-IDF v5.1，系统由12V锂电池供电。

5.2 物料视觉识别功能。在正常500lux、低照度100lux和强光2000lux三种光照条件下共采集600张图像测试。正常光照下，红色圆形物料mAP0.5为0.98，延迟24.5ms；绿色方形mAP0.5为0.96，延迟24.8ms；蓝色矩形mAP0.5为0.95，延迟25.1ms。低照度下，红色圆形、绿色方形和蓝色矩形mAP0.5分别降至0.91、0.88和0.87，延迟稳定在25.0至25.3ms；强光下mAP0.5分别为

0.93、0.90和0.89，延迟24.7至25.0ms。全部样本平均mAP0.5为0.919，平均延迟24.9ms(约40FPS)。结果表明，系统在常规光照下可实现高精度实时识别，低光照下精度略降，后续可通过数据增强或补光优化。

5.3 sLAM建图与导航功能。机器人遍历模拟仓储区域完成SLAM建图，生成分辨率0.05m/像素的栅格地图。以5个预置标记点的SLAM估计坐标与全站仪真实坐标比对评估定位精度。标记点1真实坐标(1.20m, 0.80m)，估计(1.17m, 0.83m)，误差0.042m；点2真实(3.50m, 1.10m)，估计(3.46m, 1.15m)，误差0.064m；点3真实(5.60m, 2.40m)，估计(5.65m, 2.33m)，误差0.086m；点4真实(2.10m, 4.20m)，估计(2.05m, 4.15m)，误差0.071m；点5真实(4.80m, 5.50m)，估计(4.74m, 5.46m)，误差0.072m。五点平均绝对定位误差0.067m，满足仓储物流场景自主导航需求。

5.4 整机搬运任务综合测试。定义标准搬运任务：机器人从初始位置自主导航至指定物料区，利用YOLOv8识别并锁定目标物料，调用机械臂抓取，随后导航至投放区完成放置。20次独立测试记录各阶段平均耗时与成功率。视觉识别阶段平均耗时0.21s；机械臂抓取(含接近、抓取、抬起)2.5s；自主导航去程8.6s，回程9.2s；投放动作2.8s。单次任务总耗时平均23.3s，成功完成18次，总成功率百分之九十。失败案例分别为1次机械臂抓取失败和1次物料识别错误，表明系统在模拟仓储环境中具备较稳定可靠的端到端搬运能力。

6 总结

本文提出基于国产化硬件的低成本物流搬运机器人方案，以Rock5C为上位机集成视觉与导航，双ESP32为下位机实现实时控制，通过定制UART协议协同。实验表明，该方案在识别精度、导航定位和搬运成功率上均满足需求，整机成本较传统方案降低百分之六十以上。主要贡献为双层异构架构解决了AI与实时控制协同难题，并提供了全国产低成本参考范式。未来将聚焦多机协同、多传感器融合及力控优化，提升复杂场景的自动化能力。

[基金项目]

大学生创新创业训练计划(ID202412031029086608)。

[参考文献]

[1]中商产业研究院.2025-2030年中国工业应用移动机器人(AGV/AMR)行业市场前景及投资机会研究报告[R].深圳:中商产业研究院,2025.

[2]张伟,刘洋.基于Jetson Nano与RK3568的低成本边缘计算平台对比分析[J].电子技术应用,2024,50(2):45-50.

[3]李华,张强,王磊.基于YOLOv8的仓储物料自动识别与分拣系统[J].计算机工程与应用,2024,60(3):156-163.

[4]Macenski,Jambrecic I.sLAM Toolbox:sLAM for the dynamic world[J].Journal of Opensourcesoftware,2021,6(61):2783.

作者简介:

石爽然(2004--),男,壮族,广西桂林人,本科,研究方向:计算机科学与技术。