

郭辉, 王翔, 武天伦, 等. 基于ROS-QT的红花采摘机器人多线程传感器数据预处理系统[J]. 沈阳农业大学学报, 2025, 56(1): 117-127.

GUO H, WANG X, WU T L, et al. The ROS-QT-based multithreaded sensor data preprocessing system for safflower picking robots[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2025, 56(1): 117-127.

基于ROS-QT的红花采摘机器人多线程传感器数据预处理系统

郭辉^{1,2}, 王翔¹, 武天伦¹, 杨春天¹

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘要: [目的]针对红花采摘机器人在复杂农田环境中面临的实时感知与控制挑战,特别是多源异构传感器数据处理和对环境变化的快速响应问题,设计一种基于ROS和Qt的多线程并行控制系统。[方法]数据处理引入生产者-消费者模型,实现多源异构传感器数据的实时并行处理,提高系统数据处理效率和鲁棒性,并在新疆吉木萨尔县红旗农场红花田现场试验。[结果]多线程架构在复杂场景中显著优化资源利用率,减少端到端延迟约19.3%~25%。通过任务分解与并行处理,多线程配置在高负载条件下将CPU使用率从单线程的90%降低至75%~80%,并显著平滑内存曲线,提升系统稳定性。[结论]该项目与新疆35家农户、合作社签订技术服务合作协议,对推动红花采摘机械化发展具有重要的理论和实践意义。

关键词: 红花采摘机器人; 多线程控制系统; 并行数据处理; 并行控制

中图分类号: TP242; S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1700(2025)01-0117-11

The ROS-QT-based Multithreaded Sensor Data Preprocessing System for Safflower Picking Robots

GUO Hui^{1,2}, WANG Xiang¹, WU Tianlun¹, YANG Chuntian¹

((1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi Xinjiang 830052, China,

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi Xinjiang 830052, China)

Abstract: [Objective]The paper addresses the challenges of real-time perception and control faced by safflower harvesting robots in complex farmland environments, particularly focusing on multi-source heterogeneous sensor data processing and rapid response to environmental changes. [Methods]A multithreaded parallel control system based on ROS and Qt is designed to tackle these issues. The data processing utilizes a producer-consumer model to achieve real-time parallel processing of multi-source heterogeneous sensor data, enhancing the efficiency and robustness of the system. Field experiments were conducted in a safflower field at Hongqi Farm, Jimusar County, Xinjiang. [Results]The results showed that the multithreaded architecture significantly optimized resource utilization and reduced end-to-end latency by approximately 19.3% to 25% in complex scenarios. By task decomposition and parallel processing, the multithreaded configuration reduced CPU usage from 90% (in single-threaded mode) to 75% - 80% under high load conditions and significantly smoothed the memory usage curve, improving system stability. The project has signed technical service cooperation agreements with 35 farmers and cooperatives in Xinjiang. [Conclusion]The research findings have significant theoretical and practical value for promoting the mechanization of safflower harvesting.

Key words: safflower picking robot; multithreaded control system; parallel data processing; parallel control

收稿日期: 2024-11-21 修回日期: 2025-01-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01A117)

第一作者: 郭辉(1979-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 从事特色作物采收关键技术与装备研究, E-mail: gh97026@126.com

随精准农业的发展,农业机器人在提高生产效率方面发挥着重要作用。农田环境的复杂多变对机器人的实时性和数据处理效率提出了挑战^[1]。研究表明机械采收红花效率远高于人工收获效率,可提高工效3~5倍,为农户节省至少2/3的雇工采收费^[2]。红花采摘机器人是精准农业中机械采收的重要应用,红花素为红花的提取产物,并在医药领域得到广泛应用^[3]。新疆作为红花主产地之一,红花田以非结构化环境和作物分布的随机性对机器人的感知、控制与交互能力提出了更高要求^[4]。近年来,国内外学者在红花机械化采收方面开展了大量研究。国外研究人员主要关注采摘机械的结构创新和性能评估。RAEISI等^[5]基于气吸切割原理设计了红花采摘机,通过气动装置实现红花的定向牵引,有效降低了采摘过程中的花丝损伤。SAFARI等^[6]通过对比研究了人工、背负式和车载式机械化采摘方法,发现背负式采摘机和车载式采摘机均能显著降低采收成本和掉落损失率,为红花机械化采摘提供了可靠的技术方案。国内研究主要集中在采摘机构、智能控制和系统集成等方面。在采摘机构研究方面,曹卫彬等^[7]基于红花生长特性设计了梳夹式采摘装置,通过梳齿与限位杆的协同作用实现花丝定向采摘,并利用ANSYS/LS-DYNA对采摘过程进行动态模拟分析,优化了关键结构参数;张振国等^[8]研制的手持式旋转切割采摘头,采用倾斜旋转刀片解决了定点采摘难题,并对切割机理和动力学特性进行了深入研究。在智能化控制方面,CHEN等通过引入改进的特征提取机制和角度诱导因子,显著提升了YOLOv8s算法在复杂农田环境下的红花识别性能^[9];路径规划中,张海等人基于改进蚁群算法的采摘路径优化方法有效解决了多点采摘时序问题^[10]。

项目前期研究已在红花机械化采摘关键技术方面取得了系列进展:在路径规划方面,采用改进的蚁群算法使采摘工作时间缩短14.7%~23%^[11];在采摘机构设计上,剪切式采摘方案实现了94.63%的采净率^[12];在目标识别方面,基于深度学习的算法在田间实际作业中达到90%以上的采摘成功率^[13]。但在复杂农田环境下,多源传感器数据的实时处理效率仍需进一步提升。传统单线程数据处理方法已难以满足系统的实时性和计算效率需求^[14]。在此背景下,ROS (Robot Operating System)以其模块化设计和多线程管理,已成为开发农业机器人的关键工具^[15]。

农业机器人研究涉及多个领域,包括系统架构、多传感器数据处理等方面^[16]。BECHAR等^[17]综述对这些关键技术提供全面概览,奠定后续研究基础。在系统架构方面,POST等^[18]提出的低成本的农业机器人系统实现了自主导航和地图构建;而BECHTSIS等^[19]提出的模块化、分布式ROS架构,将感知、规划、控制等功能解耦为松耦合节点。本研究在此基础上,引入QT (Qt Toolkit)框架优化数据管理和人机交互,以提升系统的实时性能和可用性。VELAMALA等^[20]基于ROS和Qt的多传感器数据集成与监控界面,验证了异构数据集成的可行性。然而,该研究主要聚焦于数据可视化,对于复杂农田环境下多传感器数据的并行处理缺乏深入探讨。本研究提出一种面向红花采摘机器人的ROS-Qt多层并行控制系统,该系统采用基于ROS通信和Qt异步连接的多层架构^[21-22],以期能够满足红花采摘的特殊需求,实现系统各模块间的紧密协作,显著提升整体性能,为红花采摘机器人实时感知与智能化控制提供新思路。

1 系统总体设计

本研究提出一种基于ROS和Qt的多线程控制系统,采用5层架构设计,旨在应对红花采摘机器人在复杂农田环境中的挑战。由图1可知,该架构自底向上依次为:数据采集层、ROS通信层、数据处理层、多线程协调层和用户交互层,分层设计实现了功能模块的有效解耦^[23]。

1.1 红花采摘场景特征分析

红花采摘机器人在农田环境中面临多源异构数据处理的挑战,要求对多样化田间数据进行高效处理且具备实时响应能力。其中双目视觉传感器数据量大($>1 \text{ GB} \cdot \text{min}^{-1}$),对环境感知和作物识别至关重要,需快速处理以保证精度;高频IMU数据($>200 \text{ Hz}$)用于实时姿态估计,保证机器人稳定移动。田间环境因素如振动和粉尘会引入明显噪声,增加数据处理的难度。此外,农田非结构化环境的复杂性,如自然光照的多变性、红花分布的随机性,对机器人的感知和控制系统提出更高要求。特别是在红花识别和定位过程中,需要对视觉数据进行实时处理,同时还要保证位置估计的准确性。由于车载计算资源有限,需要优化资源分配策略以维持操作的可靠性。为应对这些挑战,系统架构的设计需要重点考虑数据处理的实时性、计算资源的高效利用以及系统的稳定性。

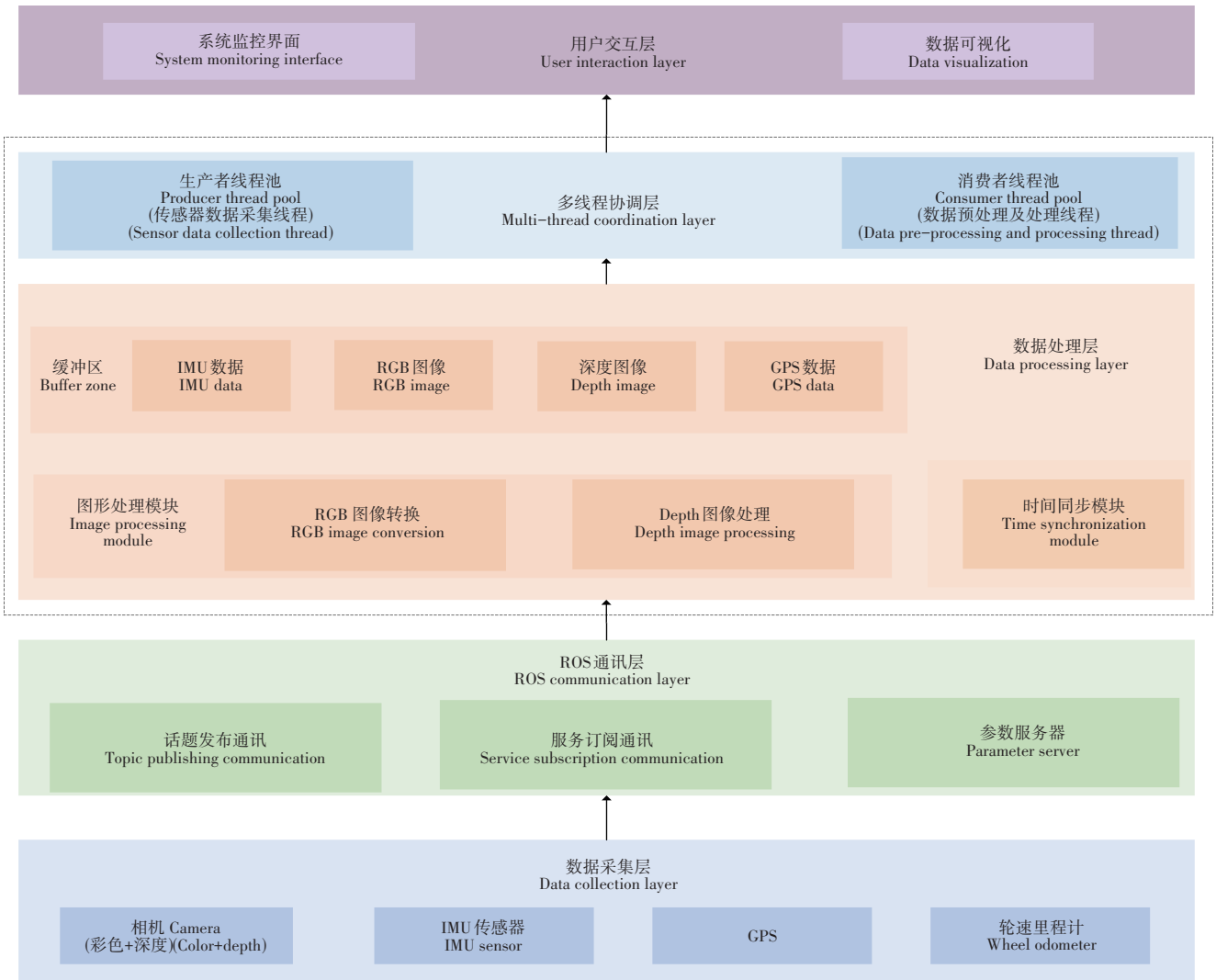


图1 5层架构图

Figure 1 Five-layer architecture diagram

1.2 ROS-Qt框架集成与实现

Qt作为跨平台应用开发框架,具有信号槽机制、多线程支持、事件驱动等特点^[24]。其信号槽机制实现对象间的松耦合通信,为异构数据处理提供了灵活的框架。多线程支持简化了并发编程,线程间通信机制降低了开发复杂度。Qt的事件循环机制确保系统对外部事件的及时响应。这些特性使Qt框架适合于开发实时性要求高的机器人控制系统。针对红花采摘场景的特征与挑战,本研究设计基于ROS和Qt的多线程并行控制系统。系统采用5层架构设计,实现了功能模块的有效解耦。

(1)数据采集层:负责多源传感器原始数据的并行采集。系统配备相机模块(RGB+深度)、IMU传感器、GPS和轮速编码器进行基础数据采集,满足系统对环境感知的需求。

(2)ROS通信层:基于ROS的发布-订阅机制,通过话题和消息队列实现可靠的数据传输,利用ROS的分布式特性实现模块之间的松耦合设计。与传统ROS订阅处理方式不同,本系统采用多线程协调机制对订阅数据进行并行处理。通过将订阅线程的创建和管理集成到Qt框架中,利用Qt的信号槽机制实现订阅数据的异步处理,有效避免了传统单线程订阅处理中的数据堵塞问题。

(3)数据处理层:作为系统的核心模块,主要执行图像预处理和时间同步处理等任务。采用生产者-消费者模型对原始异构传感器数据进行并行预处理,主线程作为消费者,并行地从各缓冲区读取数据,执行时间同步等处理任务。特别是在数据订阅处理方面,系统为不同类型的传感器数据配置独立的处理线程。

(4)多线程协调层:通过多线程机制实现高效的并行处理,管理线程的生命周期。生产者线程负责数据采

集,消费者线程执行数据预处理任务。通过 ROS 的回调机制和 Qt 的信号槽机制实现线程同步,将生产者和消费者线程池的创建和管理集成到 Qt 框架中,确保订阅数据的实时处理和系统稳定性。

(5)用户交互层:基于 Qt 框架构建图形界面,实现系统监控、参数配置和数据可视化功能。

该5层架构通过模块化设计将复杂的数据处理任务进行合理划分,各层独立运行且相互协作^[25]。引入生产者-消费者模型解决了数据处理的实时性问题,多线程协调机制则提供了必要的并行处理能力^[26]。系统采用异步处理方式,避免了层间阻塞。由图2可知,本研究提出的 ROS 和 Qt 的多线程控制系统将生产者和消费者线程池的创建和管理集成到 Qt 框架中,充分利用 Qt 框架的高效线程管理能力和 ROS 的分布式通信特性进一步提升了系统的并行处理能力,同时保持与 ROS 节点的并行运行。

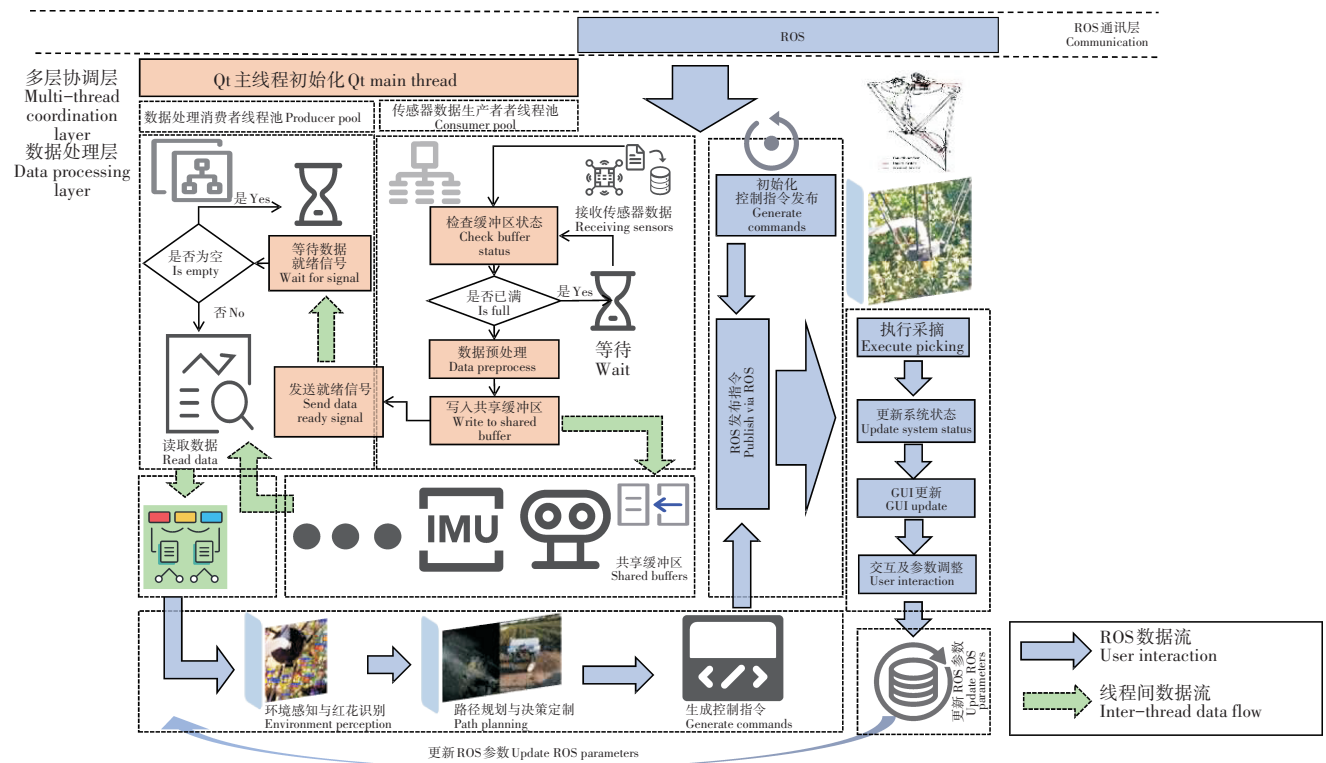


图2 ROS和Qt的多线程控制系统

Figure 2 Multithreaded control system of ROS and Qt

Qt 主线程负责初始化系统并创建线程池管理器,线程池管理器负责创建和管理生产者和消费者线程池。ROS 节点独立初始化,负责话题的订阅和发布,保持了与其他 ROS 组件的兼容性。通过 Qt 的信号槽机制实现线程间的通信,特别是在数据就绪通知方面。利用 ROS 发布机制将处理后的数据和状态更新传递给其他 ROS 节点。架构的优势在于处理来自多个传感器的高频率数据时,利用 Qt 的线程管理机制,简化复杂的线程同步问题。保持与 ROS 生态系统的兼容性,便于集成其他 ROS 包和工具,同时提高了系统的模块化程度。该架构不仅满足了红花采摘机器人在复杂农田环境下的工作需求,也为类似场景下的机器人控制系统提供了有益的参考。

2 多线程数据处理

本节深入探讨生产者-消费者模型的多线程并行处理架构,利用 Qt 的信号槽机制在线程间传递数据和通知,展示其如何有效解决传统单线程系统在面对复杂农业环境时的局限性^[27]。

2.1 线程模型及管理

由图3可知,本研究设计一种基于生产者-消费者模型的多传感器并行预处理架构,为每个关键传感器配备独立的生产者线程。这些线程通过并行机制同时从不同传感器采集数据,实现数据获取的最优效率。在数

据预处理阶段,执行时间戳对齐和噪声滤波等操作,并将处理结果写入专门设计的共享缓冲区,为后续处理提供高质量的数据基础。而具体实现中,RGB 图像处理线程采用 OpenCV 的 `cv::cvtColor(CV_BGRA2RGB)` 实现单步格式转换,避免了传统 `BGRA→BGR→RGB` 多步转换带来的额外内存拷贝和 CPU 开销。深度图像处理采用 `normalize` 函数(NORM_MINMAX)将 32 位浮点深度数据线性映射至 8 位灰度值范围,在保证深度信息质量。基于上述设计各处理线程能够并行执行数据预处理任务,执行时间戳对齐和噪声滤波等操作,并将处理结果存入共享缓冲区。这种基于并行处理的架构设计不仅优化了数据采集效率,同时通过高效的预处理机制提升了后续处理环节的数据质量。

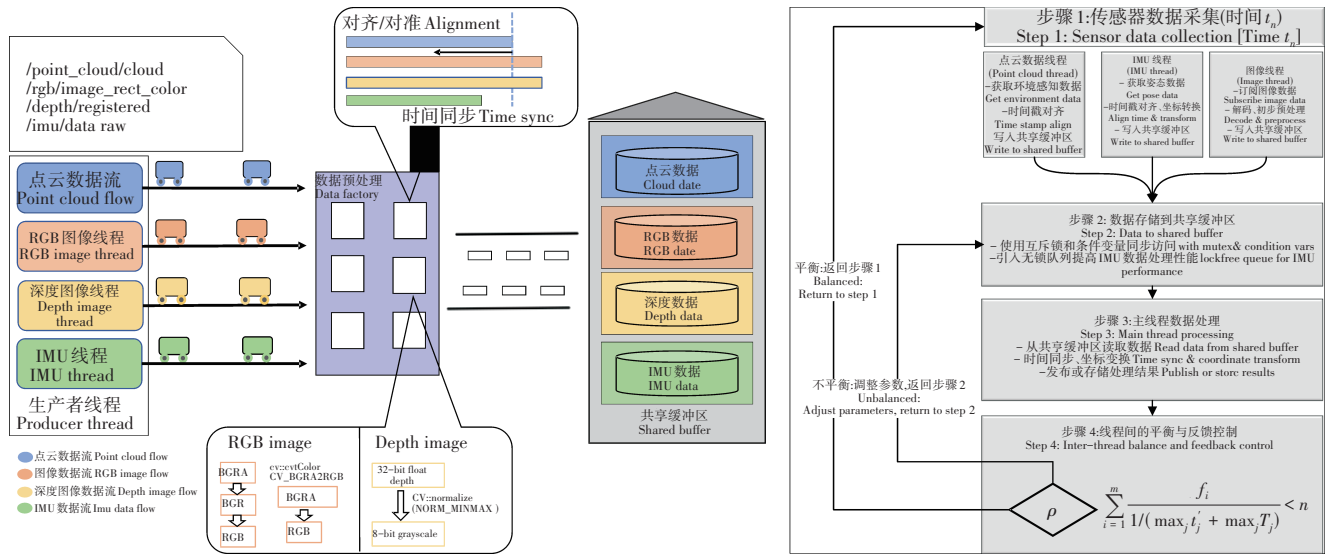


图3 基于生产者-消费者模型的并行处理架构

Figure 3 Parallel processing architecture based on the producer-consumer model

主线程作为消费者,并行读取预处理后的数据,并为复杂的后续处理做准备。在本研究红花采摘场景中,能有效处理来自多个传感器的高频率数据流,确保不遗漏关键环境信息。以并行处理提高系统响应速度,使机器人能够快速适应红花田间的动态变化。生产者-消费者模型的并行处理架构不仅提高了数据处理的效率,还增强了系统的可扩展性,为未来采摘结构更新集成(如专门的红花检测传感器)提供了灵活的框架。

2.2 线程划分策略

系统多线程设计主要集中在 QNode 类中,通过继承 QThread 并在主函数中开启独立线程实现 ROS 消息的周期性处理^[28]。系统按照传感器数据类型进行线程划分:通过相应的订阅线程分别处理 RGB 图像数据、点云数据、IMU 数据和系统状态信息。图像处理线程负责目标检测所需的视觉数据处理;点云处理线程完成空间定位数据的预处理;IMU 处理线程在回调函数中完成姿态数据的时间戳对齐与预处理;状态监控线程则负责采摘机器人运动状态的实时监测。

这种“一个数据流一个线程”的策略实现了更细粒度的负载均衡,避免单个线程超载,从而确保关键数据(如红花图像识别)的实时处理。同时,该策略允许根据具体采摘阶段与环境条件调整不同传感器数据的处理优先级。

(1)线程间通信机制。在 QNode 中,通过 Qt 的信号槽机制实现了线程间的通信。这种方法适合处理来自多个传感器的异构数据流。各数据处理线程在完成数据处理后,通过信号机制通知主线程。例如,当 IMU 数据处理完毕时,回调函数 `imuCallback` 会发射信号通知主线程。主线程中的对应槽函数 `IMUBufferProcess` 负责将处理后的数据写入共享缓冲区。这种设计避免了显式加锁^[29]带来的复杂性和性能问题,尤其适合处理高频率传感器数据(如 IMU 和摄像头数据)。确保了关键数据(如红花位置信息)能够及时传递给决策模块,提高采摘精度。

(2)共享缓冲区。共享缓冲区是生产者和消费者线程间的数据交换枢纽。由图 4 可知,系统采用互斥锁和条件变量实现线程同步访问控制,有效避免了线程竞争和无效等待。为适应不同传感器的数据特性,系统根

据数据频率动态调整缓冲区大小:点云和RGB图像数据(30 Hz)配置对应3帧缓存,高频IMU数据(200 Hz)配置对应20帧缓存,保证数据的实时性,又为多源数据的时间同步预留处理空间。

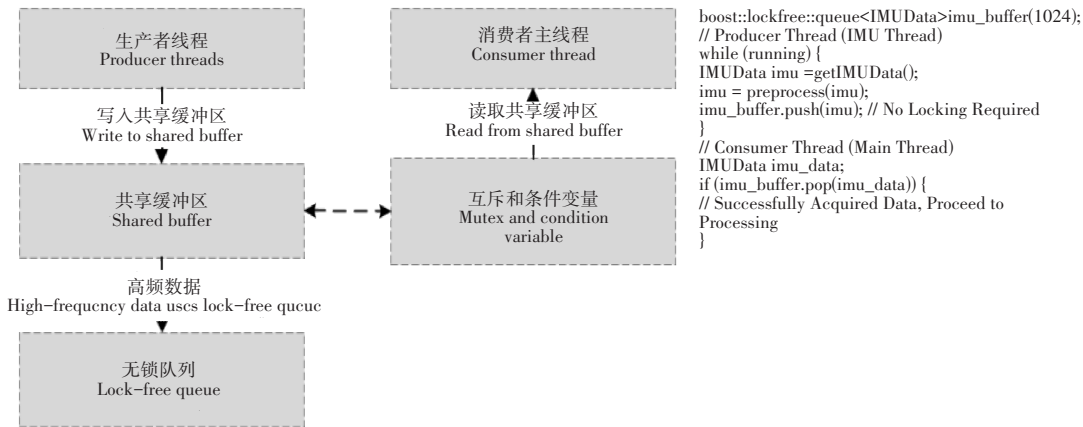


图4 互斥锁和条件变量

Figure 4 Mutex lock and condition variable

系统采用Qt信号槽机制实现线程间的异步通知,并引入无锁队列进行数据交互,有效降低传统显式加锁带来的性能开销。在多传感器数据对齐方面,针对ZED相机点云数据(30 Hz,帧周期33.3 ms)与IMU数据(200 Hz)的采样频率差异,系统设计了±10 ms的滑动同步窗口机制。该机制在确保数据时间一致性的同时,避免了过严的同步条件导致的数据丢失,提高了系统的数据利用效率。

生产者线程将采集的传感器数据写入缓冲区,消费者线程则以点云数据的时间戳为基准进行对齐。点云数据提供空间定位所需的三维信息,RGB图像数据用于目标识别和特征提取,IMU数据提供系统姿态估计的支持。这种基于时间窗口的多源数据同步策略,显著降低了数据时延不一致带来的误差,为系统的目标检测和位姿估计提供了可靠的数据基础。

2.3 数据处理流程

传感器数据通过ROS的Topic机制发布,QNode中的相应Subscriber收到数据后,进行预处理写入缓冲区。随后,通过信号槽机制传递给主线程进行进一步融合处理。该流程参考WEI等^[30]提出的多传感器并行处理框架。其整个过程可抽象为生产者-消费者模型^[31],每个传感器线程将预处理后的数据写入缓冲区,主线程则作为消费者并行读取并处理这些数据,实现了模块间的数据解耦与流动,极大增强系统的并行处理能力^[32]。

将并行预处理模型抽象为一个4元组(P,C,B,S):其中 $P=\{p_1,p_2,\dots,p_m\}$:m个并发的生产者线程,每个从一个传感器收集数据。 $C=\{c_1,c_2,\dots,c_n\}$:n个并发的消费者线程,处理来自生产者的数据。 B :有限缓冲区。 S :访问缓冲区的同步策略。每个传感器都对应一个生产者线程,以频率 f_i 生产数据并写入缓冲区 b_i 。消费者线程以固定频率 F 从各个缓冲区中提取数据进行处理,总时延 τ 分为3个阶段。(1)生产者预处理时间取决于所有生产者线程处理时间的上限,即 $\max_i t_i$ 。(2)缓冲区最大等待时间由缓冲区容量 $|b_i|$ 和消费者提取频率 F 决定,表示为 $\max_i \frac{|b_i|}{F}$ 。(3)消费者处理时间总时延取决于数据获取时间和处理时间的最大值之和,即 $\max_j t'_j + \max_j T_j$ 。理论表达式为:

$$\tau = \max_i t_i + \max_i \frac{|b_i|}{F} + \max_j t'_j + \max_j T_j \quad (1)$$

式中: t_i 为生产者线程的数据预处理时间; t'_j 和 T_j 分别为消费者数据获取和融合时间。由此看出,时延不仅取决于计算时间,还受数据生产/消费速率失横时缓冲区积压时间的影响。因此通过调整缓冲区大小 $|b_i|$ 和消费者频率 F ,可以使生产速率 f_i 与消费者速率 $\frac{1}{\max_j (t'_j + T_j)}$ 之间实现平衡可得到系统稳定运行条件为:

$$\rho = \sum_{i=1}^m \frac{f_i}{1/(\max_j t'_j + \max_j T_j)} < n \quad (2)$$

式中: ρ 表示系统的总负载率; n 为消费者线程的数量; $\rho < 1$ 时,系统稳定;当 $\rho \geq 1$ 时,可能导致数据堆积。

这种分析方法与LIN等^[33]和WANG等^[34]的研究一致。MOYAL等^[35]的稳定性分析支持了本研究的稳定性条件。理论分析表明,该架构能有效降低数据处理时延,提高系统实时性。

3 试验设计

3.1 试验环境与配置

本节对红花采摘机器人控制系统的性能评估方法和结果进行分析。侧重于整体系统的实时性和资源利用效率,确保机器人在复杂农田环境中高效作业

为全面评估系统性能,在新疆吉木萨尔县红旗农场(88°30'~89°30' E、43°30'~45° E)红花田间选取3个典型作业区域进行试验(图5)。道路临近区域:代表相对简单的环境,机器人直线行驶。跨行区域:机器人需完成转向和跨行操作。田间环境:代表复杂作业环境,要求田间保持高效的路径规划和障碍物避让能力。



图5 田间作业区域

Figure 5 Field operation area

本研究基于Linux系统(Ubuntu 20.04.6 LTS操作系统)ROS Noetic版本、Qt 5.9.9开发框架;硬件平台为: Intel® Core™ i5-11300H处理器(4核8线程);16 GB DDR4内存;NVIDIA GeForce MX450显卡。该硬件配置通过Ubuntu官方认证,确保其系统稳定性和硬件性能的充分发挥。处理器的多核特性和充足的内存空间为多传感器数据的并行处理提供保障。

基于上述配置,选择CPU利用率和内存占用作为系统性能的评估指标:CPU利用率直观反映并行处理的效率提升;内存占用表征系统数据处理能力,两项指标结合可全面评估多线程优化效果。采用Linux原生性能监控工具记录系统资源使用情况,结合rosviz工具记录试验数据,确保评估可重复性。

3.2 性能评估与分析

3.2.1 评估指标和线程配置 基于前文系统架构和多线程数据处理机制选择以下关键指标进行评估。实时性反映系统对环境变化的响应速度。资源利用效率衡量系统对计算资源的管理能力。通过对比单线程配置与多线程配置(1P1C、2P1C、2P2C、4P2C),其中P代表生产者线程,C代表消费者线程,以评估生产者-消费者模型的效果。线程配置如表1所示:

3.2.2 数据处理实时性能分析 比较上述线程配置在3种不同复杂度环境下的端到端时延。图6为不同线程配置在3种环境下的端到端时延以及四分位分布。四分位数包含3个关键指标。(1)多线程配置在所有场景中均优于单线程配置,表现为更低的处理延迟。(2)4P2C配置在复杂场景中表现最为突出,展示了最低的中位数延迟,同时保持了较小的波动范围。(3)多线程配置展现出更好的性能稳定性,这体现在较小的四分位范围(IQR)上,说明其处理时间更加集中和可预测。特别是4P-2C配置,在维持高性能的同时确保了处理时间的一致性。

3.2.3 资源利用效率评估 由图7~图9可知,在场景A中,单线程配置的CPU使用率维持在约40%水平,存在±5%的波动。同场景下的多线程配置则表现出更为平稳的资源使用模式,CPU使用率略微上升到45%,波动幅

表1 线程配置及其用途
Table 1 Thread configuration and its usage

线程配置 Thread configuration	用途 Purpose	描述 Description
1P1C	基线测试, 衡量系统基本性能 Baseline testing, measuring system basic performance	单生产者单消费者线程, 测试系统最基本情况下性能表现 Single producer single consumer thread, testing system performance under the most basic conditions
2P1C	评估单消费者线程在增加数据来源情况下的处理瓶颈 Evaluate processing bottlenecks of single consumer thread with increased data sources	增加一个生产者线程, 保持单个消费者线程, 评估数据来源增加, 单消费者线程处理能力是否成为瓶颈 Add one producer thread while maintaining a single consumer thread to evaluate if the processing capacity of the single consumer thread becomes a bottleneck when data sources increase
2P2C	模拟均衡的生产与消费关系, 观察并行度提升后的性能 Simulate balanced producer-consumer relationship and observe performance after increased parallelism	生产者和消费者线程数量相等, 模拟生产与消费均衡状态, 观察系统在增加并行度后性能情况 Equal number of producer and consumer threads, simulating balanced production and consumption state, observing system performance after increasing parallelism
4P2C	评估复杂环境下系统多传感器并行处理性能 Evaluate parallel processing performance of multiple sensors in complex environments	红花采摘机器人在田间多传感器并行采集数据的实际情况, 评估系统在复杂环境下多传感器并行处理性能 Real-world scenario of safflower harvesting robot collecting data from multiple sensors in the field, evaluating system performance in parallel processing of multiple sensors in complex environments

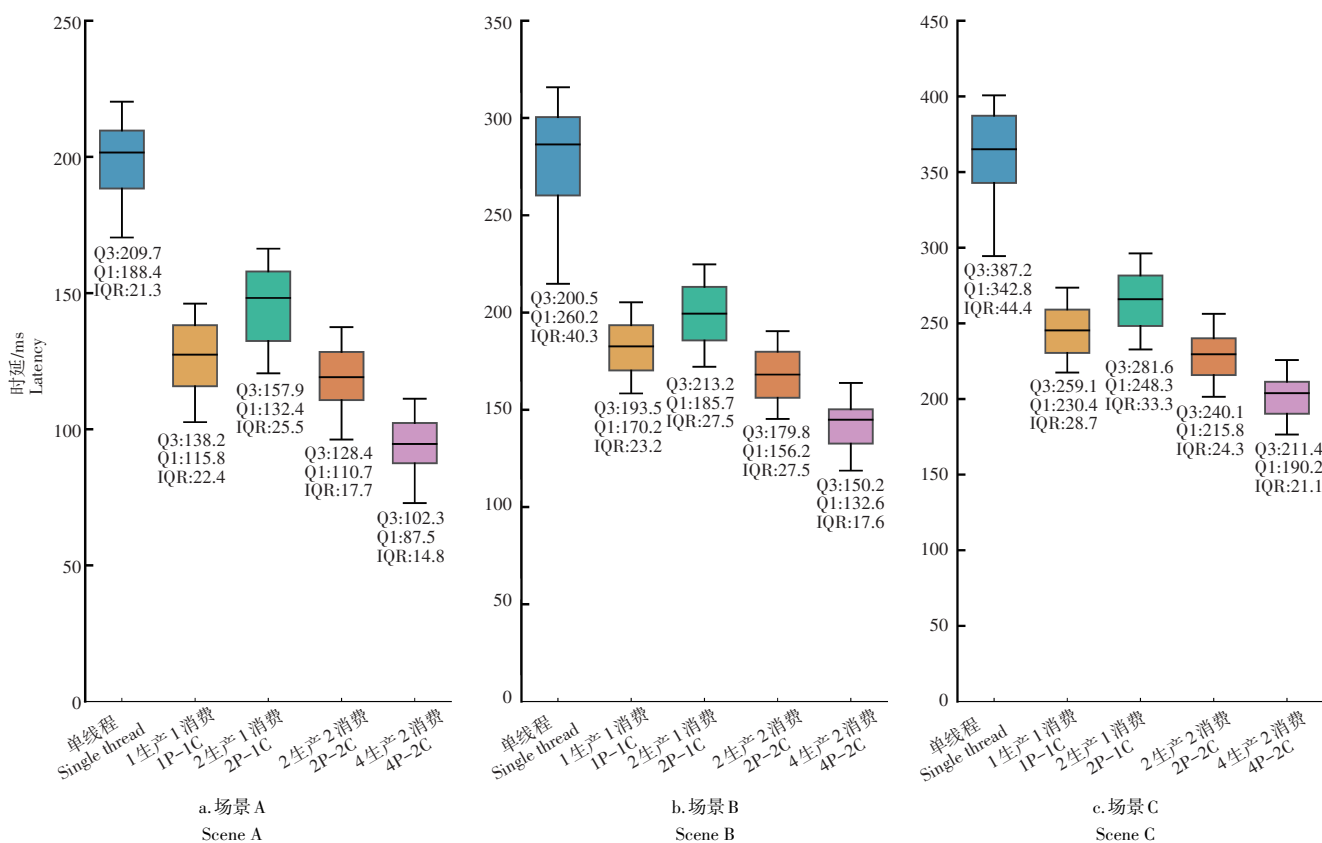


图6 不同作业区域和线程配置下的数据处理时延盒图

Figure 6 Box plot of data processing latency under different operation areas and thread configurations

度显著降低至±2%。这表明即使在基础场景下,多线程配置已经展现出更好的资源使用稳定性。当场景复杂度提升至场景B时,单线程配置的CPU使用率急剧上升至75%~80%,波动幅度明显增大。相比之下,多线程配置将CPU使用率控制在65%~70%范围内,保持了相对稳定的波动水平。这种差异充分说明了多线程配置在处理增加的计算负载时具有明显优势。在最复杂的场景C中,差异更为显著,单线程配置的CPU使用率已接近饱和(85%~90%),表现出明显的性能瓶颈,而多线程配置仍然保持在75%~80%的适中水平。重要的是,多线程配

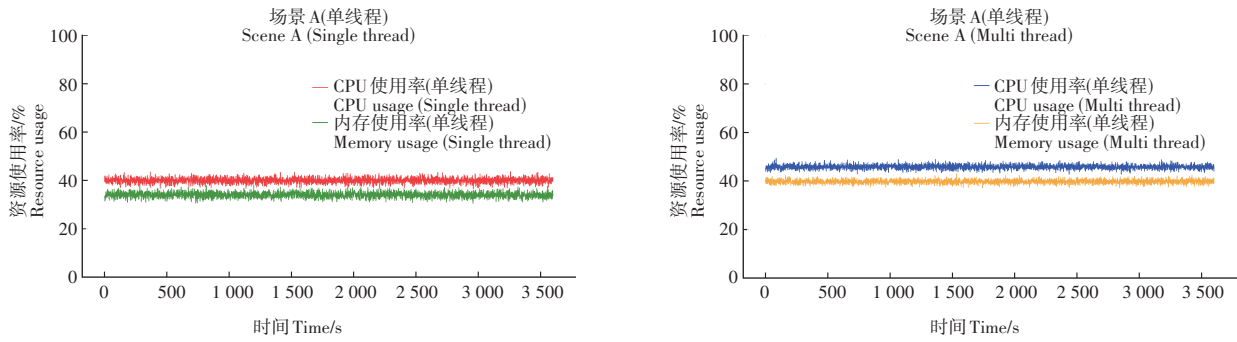


图7 场景A中的表现

Figure 7 Performance in scene A

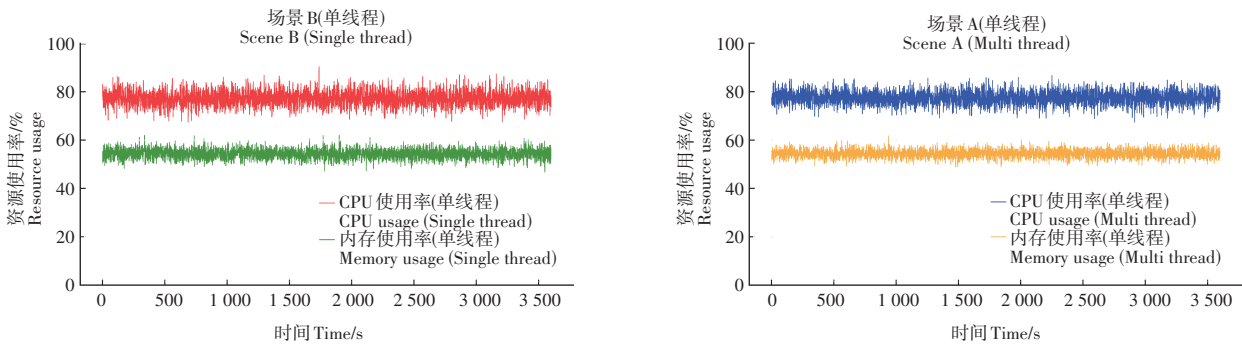


图8 场景B中的表现

Figure 8 Performance in scene B

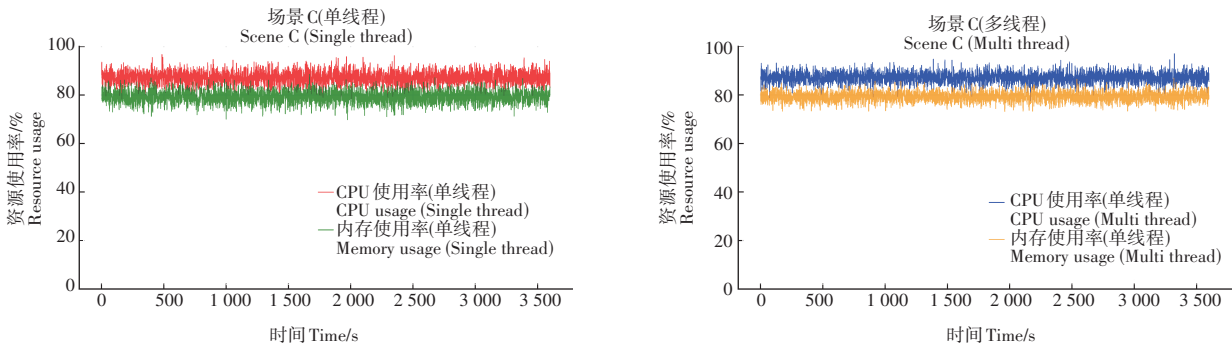


图9 场景C中的表现

Figure 9 Performance in scene C

置的资源使用曲线波动明显小于单线程模式。多线程配置在所有场景下都表现出较为平滑的资源使用曲线。这种平滑特性不仅体现在CPU使用上,在内存资源使用方面同样明显。特别是在场景切换时,多线程配置表现出较好的过渡特性,避免了单线程配置中常见的资源使用急剧波动。

试验结果表明,在单线程配置下,随着场景复杂度增加CPU使用率急剧攀升并趋于饱和,在复杂环境中接近90%。多线程配置在各复杂度场景中表现出更为稳定的CPU占用状态。波动幅度显著减小。两种模式下的内存使用率均随环境复杂度的增加而上升,但增幅不及CPU明显。多线程配置波动更小。多线程配置通过将复杂任务分解为多个并行处理的子任务,缓解了单线程配置中的计算瓶颈,实现了计算资源的均衡利用。随着场景复杂度增加,所有配置的资源占用总体上升。多线程配置在复杂场景下的优势尤为明显。

4 讨论与结论

本研究设计一种基于 ROS-Qt 的多线程传感器数据预处理系统,引入生产者-消费者模型在多传感器并行

处理中的应用,显著提升了系统的数据处理效率和环境适应性。实现了模块间的紧密协同。通过系统的设计和试验验证,得到以下主要结论:多线程处理架构显著降低了数据处理时延,尤其在复杂环境下效果明显,平均降低19.3%~25%;在复杂环境中,4P-2C配置相比单线程处理的端到端延迟降低最多,达到25%。多线程配置通过任务分解和并行处理,显著改善了系统资源利用效率;CPU使用率在高负载场景下从单线程的90%降至75%~80%;内存使用曲线更加平滑,波动幅度明显减少,表明系统运行更加稳定。生产者-消费者模型实现了多源异构传感器数据的高效并行处理,有效缓解了传统单线程系统在复杂环境下的计算瓶颈;模块化的设计使系统具备良好的可扩展性,便于后续集成新的传感器和处理模块。

本研究为农业机器人在复杂环境下的智能化控制提供了新思路,研究成果对推动红花采摘机械化发展具有重要的理论和实践意义。项目已与新疆35家农户、合作社签订技术服务合作协议,验证了系统在实际应用中的可行性。未来将继续优化资源管理策略,进一步提升系统性能。

参考文献:

- [1] 郭胜君.智能机器人在农业领域的应用与发展[J].河北农机,2024(10):42-44.
GUO S J.Application and development of intelligent robots in agriculture[J].Hebei Agricultural Machinery,2024(10):42-44.
- [2] 杨会锋.新疆红花丝机械化采收研究现状[J].新疆农机化,2020(5):34-37.
YANG H F.Research status of mechanized harvesting of Xinjiang safflower silk[J].Xinjiang Agricultural Mechanization,2020(5):34-37.
- [3] 张淑倩,王 玥,吕文豪,等.西红花主要活性成分的抗炎机制研究进展[J].杭州师范大学学报(自然科学版),2024,23(5):504-511.
ZHANG S Q,WANG Y,LÜ W H,et al.Research progress on anti inflammatory mechanism of main active components of crocus sativus[J].Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition),2024,23(5):504-511.
- [4] 路 昊,郭 辉,高国民,等.红花采摘机器人移动平台设计与分析[J].中国农机化学报,2024,45(6):242-249.
LU H,GUO H,GAO G M,et al.Design and analysis of safflower picking robot mobile platform[J].Journal of China Agricultural and Machanization,2024,45(6):242-249.
- [5] RAEISI N,BEHESHTI B,SHARIFNASAB H.Design,construction and evaluation of a picking safflower harvesting machine[J].Agricultural Mechanization and Systems Research,2020,21(74):237-250.
- [6] SAFARI M,SHARIFNASAB H.Semi-mechanized harvesting of the safflower petals in comparison with conventional method[J].Journal of Agricultural Machinery,2021,11(2):465-475.
- [7] 曹卫彬,孙胃岭,牛 驰,等.基于ANSYS/LS-DYNA的梳夹式红花采摘装置研究[J].农业机械学报,2018,49(11):123-131.
CAO W B,SUN W L,NIU C,et al.Research on comb clip safflower picking device based on ANSYS/LS-DYNA[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11):123-131.
- [8] 张振国,吕全贵,任杰宇,等.旋转剪切式红花花丝采摘机械关件部件设计[J].中国农机化学报,2019,40(7):1-6.
ZHANG Z,LÜ Q,REN J.Design of critical components for safflower harvesting machinery by rotary shear[J].Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(7):1-6.
- [9] CHEN B,MA B,LIU X,et al.Research on the detection of safflower filaments in natural scenarios based on deep learning algorithms[C]//International Conference on Automation and Intelligent Technology (ICAIT 2024).SPIE,2024,13401:39-46.
- [10] ZHANG H,GE Y,SUN C,et al.Picking path planning method of dual rollers type safflower picking robot based on improved ant colony algorithm[J].Processes,2022,10(6):1213.
- [11] GUO H,QIU Z,GAO G,et al.Safflower picking trajectory planning strategy based on an ant colony genetic fusion algorithm [J].Agriculture,2024,14(4):622.
- [12] 罗 丹,郭 辉,高国民,等.剪切式红花采摘装置的设计与试验[J].农机化研究,2023,45(10):166-170,176.
LUO D,GUO H,GAO G M,et al.Design and experiment of shearing safflower picking device[J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(10):166-170,176.
- [13] 郭 辉,陈海洋,高国民,等.基于YOLO v5m的红花花冠目标检测与空间定位方法[J].农业机械学报,2023,54(7):272-281.
GUO H,CHEN H Y,GAO G M,et al.Safflower corolla target detection and spatial positioning method based on Yolo v5m[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(7):272-281.
- [14] 张淮声,余 莉,陈翔翔.基于样板的GPU线程快速构造方法[J].集成电路应用,2024,41(5):18-21.
ZHANG H S,YU L,CHEN X X.A template based method for rapid construction of GPU threads[J].Applications of IC,2024,

- 41(5):18-21.
- [15] 李海芸,曹亚磊,董焜焜,等.农业机器人试验平台构建与探索[J].中国农机化学报,2019,40(1):210-214.
LI H Y,CAO Y L,DONG L H,et al.Construction and exploration of agricultural robot experimental platform[J].Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2019,40(1):210-214.
- [16] 赵春江,范贝贝,李 瑾,等.农业机器人技术进展、挑战与趋势[J].智慧农业(中英文),2023,5(4):1-15.
ZHAO C J,FAN B B,LI J,et al.Progress,challenges and trends of agricultural robot technology[J].Smart Agriculture,2023,5(4):1-15.
- [17] BECHAR A,VIGNEAULT C.Agricultural robots for field operations.Part2:Operations and systems[J].Biosystems Engineering,2017,153:110-128.
- [18] POST M A,BIANCO A,YAN X T,et al.Autonomous navigation with ROS for a mobile robot in agricultural fields[C]//14th International Conference on Informatics in Control,Automation and Robotics(ICINCO),2017:256-261.
- [19] TSOLAKIS N,BECHTIS D,BOCHTIS D.Agros:A robot operating system based emulation tool for agricultural robotics[J].Agronomy,2019,9(7):403.
- [20] VELAMALA S S,PATIL D,MING X.Development of ROS-based GUI for control of an autonomous surface vehicle[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO).IEEE,2017:628-633.
- [21] 何 威,王建春,曾奕雄,等.QT、ROS下实现导航与自动避障功能小车[J].机械工程师,2020(4):92-94.
HE W,WANG J C,ZENG Y X,et al.Vehicle with navigation and automatic obstacle avoidance function under QT and ROS[J].Mechanical Engineer,2020(4):92-94.
- [22] 郑忠楷,蒋学程,罗志灶.基于QT的串口通信程序设计[J].电子技术与软件工程,2019(24):236-238.
ZHENG Z K,JIANG X C,LUO Z Z.Serial communication program design based on QT[J].Electronic Technology & Software Engineering,2019(24):236-238.
- [23] MARTIN J,CASQUERO O,FORTES B,et al.A generic multi-layer architecture based on ROS-JADE integration for autonomous transport vehicles[J].Sensors,2018,19(1):69.
- [24] SHEN G,LI H,WANG S.Design of multi-robot interaction interface based on pyqt[C]//2022 First International Conference on Cyber-Energy Systems and Intelligent Energy (ICCSIE).IEEE,2023:1-5.
- [25] 薛秀云,洪添胜,宋淑然,等.基于无线通信技术的程序编程器[J].沈阳农业大学学报,2013,44(3):315-320.
XUE X Y,HONG T S,SONG S R,et al.A programmer based on wireless communication technology[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2013,44(3):315-320.
- [26] 廖春蓝.基于激光雷达的ROS服务机器人自动避障系统设计与实现[J].信息化研究,2023,49(3):63-66.
LIAO C L.Design and implementation of automatic obstacle avoidance system for ROS service robot based on LiDAR[J].Informatization Research,2023,49(3):63-66.
- [27] ÜNAL İ,KABAŞ Ö,ECEOĞLU O,et al.Adaptive multi-robot communication system and collision avoidance algorithm for precision agriculture[J].Applied Sciences,2023,13(15):8602.
- [28] KRASOWSKI P,SMOŁKA J.Performance testing of STL and Qt library elements in multi-threaded processing[J].Journal of Computer Sciences Institute,2020,16:247-251.
- [29] 周 谦,江 燕,董宜丰.多通道接收设备数据并行处理方法[J].计算机与网络,2021,47(16):36-37.
ZHOU Q,JIANG Y,DONG Y F.Data parallel processing method for multichannel receiving equipment[J].Computer and Network,2021,47(16):36-37.
- [30] WEI P,CAGLE L,REZA T,et al.LiDAR and camera detection fusion in a real-time industrial multi-sensor collision avoidance system[J].Electronics,2018,7(6):84.
- [31] WANG L,WANG C.Producer-consumer model based thread pool design[C]//Journal of Physics: Conference Series.IOP Publishing,2020,1616(1):012073.
- [32] SHAHIAN J B,TULABANDHULA T,CETIN S.Real-time hybrid multi-sensor fusion framework for perception in autonomous vehicles[J].Sensors,2019,19(20):4357.
- [33] LIN C C,LIU W Y,CHEN Y H.Considering stockers in reentrant hybrid flow shop scheduling with limited buffer capacity [J].Computers & Industrial Engineering,2020,139:106154.
- [34] WANG Y,LI K,CHEN H,et al.Energy-aware data allocation and task scheduling on heterogeneous multiprocessor systems with time constraints[J].IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing,2014,2(2):134-148.
- [35] MOYAL P,PERRY O.Stability of parallel server systems[J].Operations Research,2022,70(4):2456-2476.