

多工况环境下的自主搬运机器人设计与测试研究

王 勇, 郭 凯

上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093

摘 要:目的 针对在自动化搬运领域,传统机器人常面对复杂地形适应性和货物限定位置的问题,提出了一种适应多样复杂地形的自主搬运机器人。方法 首先根据月球车的特点,采用全向移动底盘和五自由度搬运平台的整合,有效提升了在多变地形中的适应性和货物搬运能力;其次对搬运平台整体进行设计,包括平台升降结构设计、搬运平台结构设计以及夹具设计,并根据货物搬运结构工作原理进行搬运实验。然后控制系统采用了分层的硬件架构,上位机利用 Robot Operating System 作为开发框架,搭配应用同步定位与建图(SLAM)技术,优化导航和搬运策略,下位机根据从串口接收的上位机指令进行任务分配和执行,利用自调整的蒙特卡洛导航技术进行导航算法设计,确定关键工作参数,充分展示机器人操作效率和适应性。结果 为了保证机器人的工作性能以及参数的准确性,利用 Gazebo 模拟程序进行仿真实验,预测机器人在真实环境中的性能表现,实验验证了机器人在多种环境下高效导航的能力。结论 研究结果表明:该机器人具有显著的搬运效率提升和减少人工干预的优势,为自动化搬运系统提供了重要技术支持。

关键词:自主搬运机器人;复杂地形适应性;全向移动底盘;同步定位与建图(SLAM);动态环境

中图分类号:TP242 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0006.003

Design and Testing Research of Autonomous Handling Robots in Multi-condition Environments

WANG Yong, GUO Kai

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Objective Aiming at the problems of complex terrain adaptability and limited position of goods often faced by traditional robots in the field of automatic handling, an autonomous handling robot adapted to diverse and complex terrain was proposed. **Methods** Firstly, according to the characteristics of the lunar rover, an omnidirectional mobile chassis and a five-degree-freedom handling platform were integrated to effectively improve the adaptability and cargo handling ability in variable terrains. Secondly, the overall design of the handling platform was carried out, including the design of the lifting structure, the handling platform structure, and the clamp design, followed by handling experiments based on the working principle of the cargo handling structure. The control system employed a layered hardware architecture. The upper computer used the Robot Operating System(ROS) as the development framework, combined with Simultaneous Localization and Mapping(SLAM) technology to optimize navigation and handling strategies. The lower computer allocated and executed tasks based on the instructions received from the upper computer through the serial port. The self-adjusting Monte Carlo navigation technology was used to design navigation algorithms, determine key working parameters, and fully demonstrate

收稿日期:2023-12-12 **修回日期:**2024-01-30 **文章编号:**1672-058X(2025)06-0017-09

作者简介:王勇(1999—),男,安徽宣城人,硕士研究生,从事非线性系统与机器人控制研究。

通信作者:郭凯(1997—),男,河北张家口人,硕士研究生,从事非线性系统与机器人控制研究。Email:usstguokai@163.com.

引用格式:王勇,郭凯.多工况环境下的自主搬运机器人设计与测试研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(6):17-25.

WANG Yong, GUO Kai. Design and testing research of autonomous handling robots in multi-condition environments[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(6): 17-25.

the efficiency and adaptability of the robot operation. **Results** Finally, to ensure the robot's working performance and the accuracy of parameters, simulation experiments were conducted using the Gazebo simulation program to predict the performance of the robot in real environments. The experiments verified the robot's efficient navigation ability in various environments. **Conclusion** The research results indicate that the robot has significant advantages in improving handling efficiency and reducing manual intervention, providing important technical support for automatic handling systems.

Keywords: autonomous handling robot; adaptability to complex terrains; omnidirectional mobile chassis; simultaneous localization and mapping(SLAM); dynamic environment

1 引言

在物流自动化领域,有两类自动辅助系统显著提高了操作效率。首先是自动导引车辆(AGV)系统,这类系统遵循预设路线进行导航;其次是多功能移动机器人(AMR)系统,这些系统具备独立导航能力。AGV系统主要依赖于预定路径或标记进行导航,通常应用于结构化环境,如仓库和工厂。AMR系统则配备了更高级的传感器和计算平台,使其能够在更加动态和不确定的环境中实现自主导航和操作。

在物流自动化领域,搬运设备主要分为路径依赖型自动导引车辆(AGV)和多功能移动机器人平台(AMR)^[1]。郑金松^[2]对物流领域机器人技术进行了系统性评述,研究了定位系统、任务分配策略、导航路线优化以及障碍规避技术,同时提出了潜在的研究方向;茆中国等^[3]则专注于满足低温LNG装卸需求的复合移动机器人,该机器人结合了全向移动平台和协作机械臂;王韩^[4]研究致力于制造环境中零部件传输问题,设计了一款集成全方位轮系统和三维操作臂的多功能机器人。这些研究展示了在不同物流场景中运输机器人的多样化应用以及它们在未来物流自动化中的重要性。尽管前人研究在推动物流自动化领域取得了显著进展,然而,如何进一步提高机器人的搬运效率仍然是当前研究的热点问题。

作为运输机器人的核心组成部分,控制系统显著影响整个系统的搬运效率以及性能的可靠性。曹奇^[5]的研究关注四轮自立式机动装置的开发,通过分析操控系统,进行了人工操作测试,以验证在多变环境下的灵活性和稳定性;郑魁松及其研究团队^[6]专注于使用集成电路系统和航迹设计方法来增强物流自动机的作业能力;赵铖钊团队^[7]则采用光学雷达和成像技术为物流自动化设备开发了高精度的位置识别与跟随系统;吕川等^[8]通过集成电路控制方案,成功开发了具

备高级定位、路径规划和障碍规避能力的物流辅助机器人。这些研究凸显了物流自动化机器人的操控技术在增强作业速度、提高准确性和智能化水平方面的进步,同时突显了其在物流行业内的广泛应用前景,然而,对于提高机器人搬运效率的进一步探讨仍然亟待深入。为应对这一挑战,本文提出了一种创新设计,结合了月球车越障底盘和五自由度搬运平台,旨在优化机器人的运动能力和操作灵活性。研究还集成了同步定位与建图(SLAM)等先进技术,构建了一个高效且自主的控制系统。该控制系统的设计不仅提高了搬运任务的自动化程度,还显著降低了对人工干预的依赖,从而提升了整体操作效率并降低了人力成本。通过集成这些技术,运输机器人能够在更复杂、更多变的工作环境中实现更为精准和高效的搬运。

本研究的先进性体现在对搬运机器人的综合性改进,旨在克服传统结构对人工干预的依赖,提高机器人在复杂环境中的自主性。创新性体现在将月球车越障底盘和五自由度搬运平台相结合,构建了更具灵活性和适应性的搬运机器人。此外,通过整合SLAM等先进技术,设计了高效的控制系统,进一步提升了搬运机器人的自主导航和操作能力。本文研究成果不仅为解决物流自动化中的搬运效率问题提供了新的思路和方法,也对未来智能搬运解决方案的发展具有重要的参考意义。

2 机械结构设计

2.1 坐标系定义

搬运机器人在休息模式中坐标配置的概况如图1所示。该系统基于右手定律的直角坐标系确定其空间方位,以四轮中心的对角线交汇点作为原点。图1中还详述了X、Y、Z三轴方向的设定以及机器人姿态控制的角度,包括旋转、倾斜和航向偏转的界定。

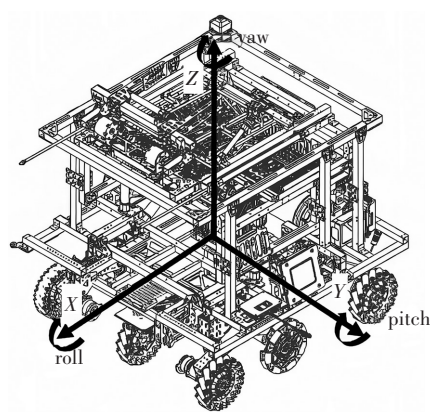


图 1 非活动状态下的搬运机器人坐标布局

Fig. 1 Coordinate layout of the handling robot in an inactive state

2.2 底盘构造设计

为了适应多样化复杂地形,本研究中设计的搬运机器人底盘灵感来自于模仿月球车的理念。如图 2 所示,该底盘采用了前后轮麦克纳姆轮配置,以增强横向移动和旋转的灵活性。同时,中轮采用全向轮设计,支持全方位移动。为进一步提升地形适应性,前轮与中轮之间通过两根围绕中心轴旋转的方形铝管构成的刚性连接结构相连。底盘还装备了主动式悬挂系统,通过气缸控制,可以实现轮系的形变,使前轮升起而中轮下沉,有效应对不均匀地面或其他障碍。

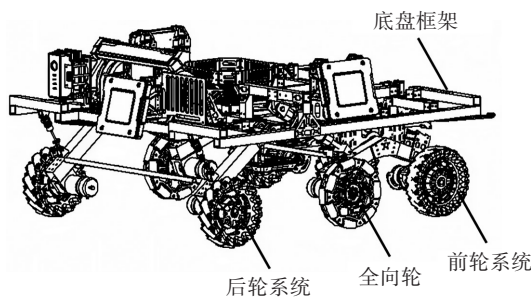


图 2 底盘结构

Fig. 2 Chassis structure

在攀爬台阶的过程中,底盘前方的传感器在接近台阶时触发气缸,以提升前轮。当底盘下方的传感器检测到前轮已成功越过台阶,气缸继续作用,将中轮抬升到所需高度。一旦前轮和中轮都越过台阶,气缸释放压力,恢复到自由伸缩状态,此时前轮和中轮共同协作,将后轮拉上台阶。该底盘设计融合了先进的传感技术和动态悬挂调节机制,极大地增强了机器人在各种地形中的搬运性能。特别是在攀爬高度差异较大的台阶时,它展现出了卓越的适应能力。机器人的运动过程如图 3 所示。

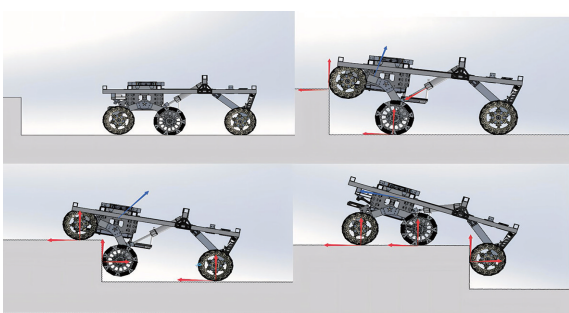


图 3 底盘越障过程

Fig. 3 Chassis obstacle crossing process

2.3 搬运平台及夹爪结构设计

本研究推出一款五自由度搬运机械臂,它由多个关键部分组成,包括平台升降机构、搬运平台机构和夹爪等组件。这一搬运机械臂的独特设计允许搬运平台在非激活状态下折叠并隐藏在机器人主体内部,以最小化机器人的尺寸,以适应空间受限的环境。当切换到工作模式时,搬运平台能够从机体内部伸展并执行任务。动态简图详细展示了搬运平台从储存到工作状态的转换过程以及其机械结构的运动范围。通过这一独特的可变形设计,搬运机械臂不仅优化了空间利用效率,而且通过其五自由度的动态运动,实现了高度复杂和精细的搬运操作,这对于自动化搬运系统的灵活性和多功能性至关重要。

2.3.1 平台升降结构

如图 4 所示,升降平台采用了四根竖直导柱的结构设计,这些导柱都均匀分布在底盘的四个角落。导柱与滑块相套合,构成了平台的垂直导向机构。升降平台的垂直移动是通过滑块与导柱之间的精密协作实现的。动力输出由四根同步工作的气缸提供,这些气缸的设计和布置确保了升降平台可以相对于底盘平稳地进行升降运动。这一升降机构不仅提升了整个系统的运动控制精度,还通过优化结构设计,实现了高效和稳定的载荷搬运能力,对于提高自动化设备的操作效率至关重要。此外,气缸的采用保障了机械系统的力学特性和长期运行的可靠性,同时也为未来的系统升级和维护提供了便利。

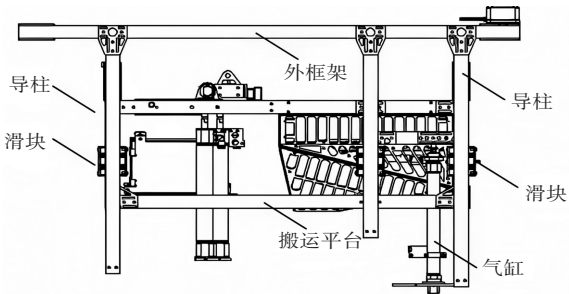


图 4 平台升降结构

Fig. 4 Platform lifting structure

2.3.2 搬运平台结构

搬运平台的设计采用了三维平移机构,包括垂直、横向和纵向平移子系统,以实现搬运空间的全方位覆盖。如图 5 所示,垂直平移机构赋予搬运机器人在高度维度上的运动能力,从而拓展其操作范围至多层环境。横向平移机构增加了机器人在横轴方向的活动自由度,使其能够覆盖更广阔的工作区域。而纵向平移机构则扩展了机器人在纵轴上的运动范围,允许其在更深的空间进行物体搬运。这种三维平移机构的设计使搬运机器人能够灵活适应不同工作场景,提高了其多功能性和操作的适应性。

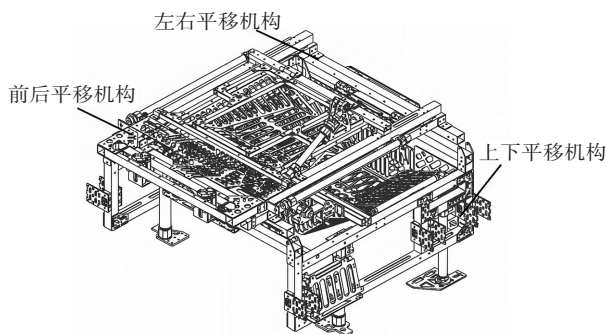


图 5 搬运平台结构

Fig. 5 Handling platform structure

这三个平移机构均采用气缸作为驱动力源,由于气缸具有快速响应特性和高度操作便捷性,因此大大提升了搬运效率。气缸的动力输出精确可控,使得平台能够进行微小的调整,以适应各种精密搬运任务。此外,气缸系统的集成还充分考虑了能源效率和长期稳定性,确保在重复的搬运操作中保持可靠性和经济性。综合考虑这些设计特点,搬运平台的三维平移机构不仅提高了操作的灵活性和适应性,还通过优化动力传输和控制策略,显著增强了机器人的搬运性能。

2.3.3 夹爪结构

本研究中设计的夹爪机构配备了双向自由度,由旋转和直线气缸、夹持装置以及线性滑轨系统组成。如图 6 所示,旋转气缸负责驱动夹爪的旋转动作,允许其沿预定轴线进行角度调整。直线气缸则推动夹爪沿线性轨道进行开闭运动,以夹持和释放物体。夹爪机构的设计允许自动调整气缸行程,响应不同体积的货物,实现尺寸的自适应夹取。

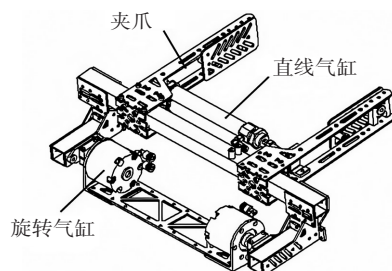


图 6 夹爪结构

Fig. 6 Gripper structure

夹爪系统的运动控制策略优化了夹取过程中的力度分配和精度控制,确保了在操作不同质量和尺寸货物时的高效性与可靠性。此外,气缸的使用提供了快速反应和高重复精度的优势,对于提升自动化搬运过程中的操作效率和减少人为错误至关重要。综上所述,夹爪的机械设计和控制逻辑展现了系统在执行复杂任务时的灵活性和适应性,为自动化搬运系统的发展贡献了创新的技术解决方案。

2.3.4 货物搬运结构工作原理

如图 7 所示,机器人运动到货物所在平台,通过前方的光电传感器及激光雷达等确定好目前位置,搬运平台进行抬升,上层搬运机构通过左右和前后的平移运动,以及夹爪的翻转及夹紧,对货物进行搬运。图 8 为机器人搬运货物的实验现场。

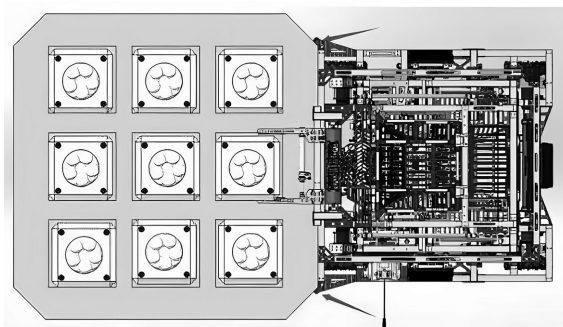


图 7 搬运平台运行

Fig. 7 Operation of the handling platform

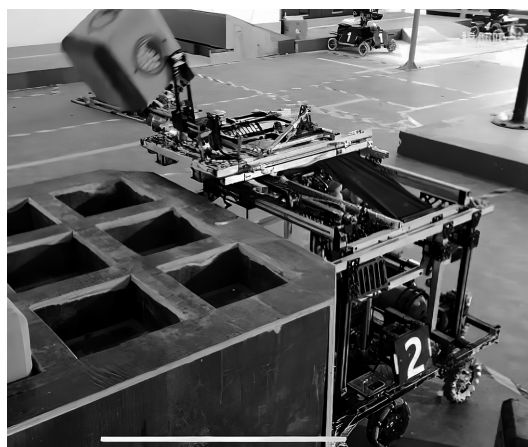


图 8 搬运货物实验现场

Fig. 8 Test site of cargo handling

3 控制系统设计

3.1 控制系统硬件构建与设计

运输机器人控制系统的设计理念是以高度集成和模块化为基础。该系统采用了分层的硬件架构,以

NVIDIA 的 AGX Xavier 开发板为计算核心,结合 STM32 微控制器作为下位机,形成了强大的数据处理和设备控制中心。硬件架构的细节及组件间的互联关系在图 9 的硬件拓扑图中得以清晰表示,涵盖了包括激光雷达、电机驱动器以及电磁阀等在内的关键传感器和执行器。系统内部的通信依赖于控制器局域网(CAN)协议,该协议因其高可靠性和实时性在工业控制系统中得到了广泛应用。同时,串行端口和通用串行总线(USB)接口也被用于硬件单元间的数据交换,这不仅增加了系统的通信灵活性,而且也简化了硬件接口的复杂性。为了实现精确地控制输出,系统利用通用输入/输出(GPIO)端口对电磁阀进行精细操控,这种设计使得动作执行既快速又准确。此外,该控制系统的设计还充分考虑了扩展性和兼容性,以适应未来技术的升级和跨平台的集成。通过这种先进的硬件配置和通信协议,运输机器人的控制系统不仅能够处理复杂的数据分析任务,还能够精确执行机械运动,从而显著提高了自主运输任务的效率和可靠性。

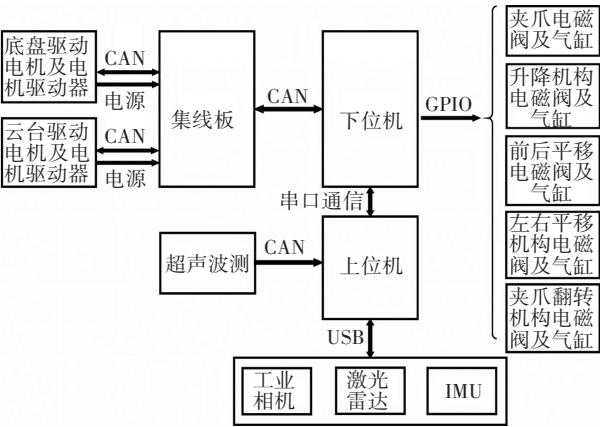


图 9 硬件拓扑结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the hardware topology

3.2 控制系统软件构建与设计

3.2.1 软件架构在系统中的应用

图 10 呈现了物流自动机器人的程序结构,这一结构被分为 4 个相辅相成的部分:与用户的互动、检测、策略制定及实施。在人机交互模块中,操作员可以实时监控机器人状态并在关键时刻进行远程干预。感知模块则负责综合处理来自机器人传感器阵列的数据流。决策模块利用感知数据执行复杂的算法,包括同步定位与地图构建(SLAM)^[9]、路径规划和货物操作,进而生成详细的操作指令。这些指令随后由执行模块解读,其指挥电机和气缸精确执行预定动作,以达成任务目标。该分模块的

软件设计不仅提升了运输机器人系统的响应能力和可靠性,还为未来技术集成提供了灵活性。

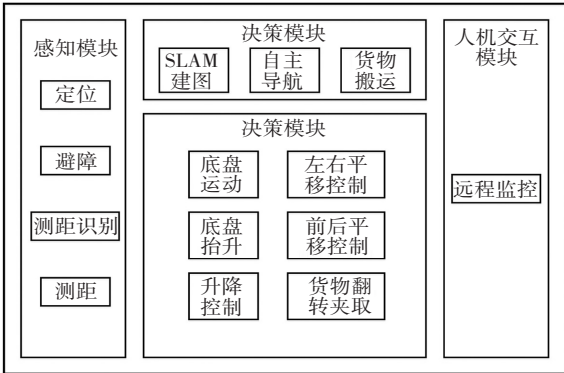


图 10 控制系统软件框图

Fig. 10 Block diagram of the control system software

3.2.2 控制系统下位机软件设计

在系统通电后,下位机的操作流程启动。该流程首先包括对外围设备的初始化操作,紧接着是 FreeRTOS 实时操作系统的加载,以确保任务调度的实时性。下位机根据从串口接收的上位机指令进行任务分配和执行。此外,系统具备通过 CAN 中断来实时上传电机驱动器状态的功能。为保障操作的安全性,一旦发现串口通信超时,系统将立即中断所有动作。这种预防性控制措施是为了防止在通信故障时产生机器人操作失误,从而确保了整个系统的可靠性与安全性。

利用 CAN 接口,系统实现了对电机的高效驱动控制,通过 HAL_CAN_RxFifo0MsgPendingCallback 函数实时捕捉 CAN 反馈的电机相关数据。在这一控制架构中,采用了精细的串级 PID 控制策略,将角速度调整定位于控制环路的核心内层,而将角度调节放置在外层,确保了根据预设目标角速度的精确调控。具体到外层控制,输入参数是由目标角度与当前测量角度之间的偏差构成,即角度误差,该误差计算出了所需的角速度目标值。对于内层控制而言,它接收外层计算的角速度目标,并将其与当前测量的角速度对比,得到必要的角速度误差值,以便进行精确的速度调节。为了增强系统的控制效果,本设计引入了包括抗积分饱和、梯形积分、变化积分策略,以及不完全微分和死区控制技术在的一系列高级控制策略。这些策略的融合不仅提高了 PID 控制器的性能,也为控制系统带来了更好的适应性和鲁棒性。控制器采用的是增量式和位置式两种实现方式,为不同的控制需求和场景提供了选择。最终,控制命令通过 CAN 协议传输至电调,精确调节电

机的运转。这一整体方案不仅提升了电机的控制精度和响应速度,也保证了在各种工作条件下的稳定运行,满足了对搬运机器人的严格要求。采用扩展互补滤波算法(ECF)进行机器人姿态的精确测量与分析,该算法通过计算四元数来全面描述机器人的姿态,然后利用四元数的逆变换算法精确求解出机器人的 Yaw、Pitch 和 Roll 三个轴向的角度。此外,为了提高角度测量的准确性和稳定性,系统在 Yaw 和 Pitch 方向上应用了卡尔曼滤波技术对陀螺仪的角度数据进行优化处理,同时对加速度计数据实施低通滤波,以滤除高频噪声和偶发性干扰,保证角度和加速度的数据稳定可靠。通过这种方法,不仅能有效克服单一传感器的局限,提高姿态估计的准确度和鲁棒性,还能实时反映机器人在复杂环境中的动态变化,为后续的动态控制和路径规划提供了坚实的数据支撑。进一步地,这种高效的姿态解算策略为机器人的高级任务执行,如自动导航、环境交互和复杂任务处理等奠定了基础。在实际应用中,通过不断收集和分析姿态数据,还可以用于机器人的自学习和行为优化,持续提升其性能和智能化水平。

3.2.3 控制系统上位机软件设计

上位机软件架构,利用 Robot Operating System (ROS)^[10]作为开发框架,致力于实现复杂的规划与决策功能。其 SLAM 建图模块,如图 11 所示,启动时配合手动遥控操作以初始化机器人的运行参数。SLAM 技术实现了同时定位与地图构建,通过集成了多种感测器的数据,包括光学雷达、车辆行驶距离计数器和动态测量单元(IMU),确保了高精度的位置确认,并依此信息绘制出详细地图。导航与定位数据为行进路线制定奠定了基石。在此阶段,控制系统根据输入的目的地数据,运用特定算法以识别出最理想的行进路线,并对移动平台发出相应的操控指示。

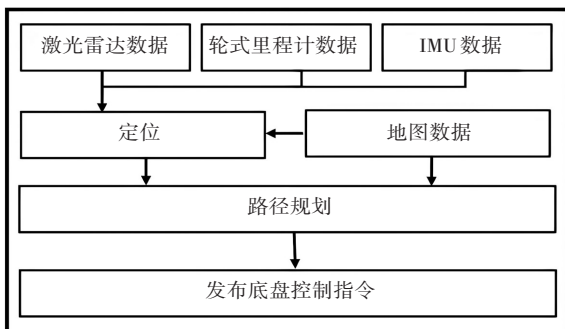


图 11 独立导航结构设计

Fig. 11 Structure design of the independent navigation

另外,主控系统中的货品管理决策单元是基于 ROS 动作信号架构而开发的,这一架构为持续进行的作业提供途中回馈,使得监控进程成为可能并在需求出现时打断任务。如图 12 所示,此决策单元利用视频影像分析来识别物品与自动机之间的相对定位。它融合了抓取装置的位置信息和车轮行程计数数据,从而发出对移动平台或操作机械臂的操纵信号,确保货物的精确转移。这种多模块、多数据源的整合方式体现了系统设计的深度和对操作精度的追求,确保了任务执行的高效性和可靠性。

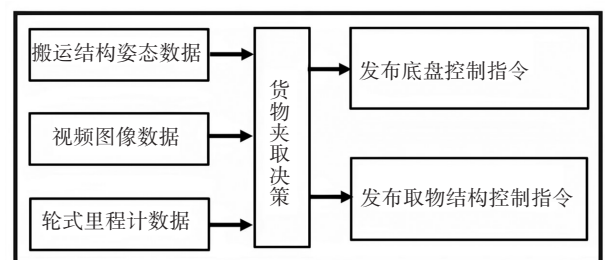


图 12 货物夹取决策功能框图

Fig. 12 Block diagram of cargo gripping decision

3.2.4 导航算法设计

物流自动机器人的航向系统主要由两部分组成：定位和航线设计。定位环节应用了自调整的蒙特卡洛导航技术^[11],这种方法整合了蒙特卡洛导航技术的多种形式,并通过粒子滤波器在既定地图中对自动机的位置进行估算。它有效解决了自动机在不同环境中出现的位置快速变动问题,这通常被称为“自动机定位错乱”情况^[12]。

路径规划分为全局和局部两个层面。全局路径规划采用 A* 算法^[13],该算法通过评估到达目标的最低成本路径实现最优路径的规划。而局部路径规划则依靠动态窗口方法(Dynamic Window Approaches, DWA)^[14],该方法在即时动态环境中调整机器人的轨迹,以响应环境变化和避免障碍物。这一分层的规划结构确保了在维持高效路径规划的同时,机器人能够在复杂环境中进行灵活导航。此外,该导航系统通过持续整合环境反馈和实时调整运动策略,进一步提高了机器人在各种环境条件下的适应能力和任务执行的可靠性。

4 仿真实验与结果分析

4.1 自主移动仿真

在本研究中,为了确保运输机器人的运行性能,对

关键参数进行了精确调校,模拟真实世界物理环境中的各项条件。利用 Gazebo 模拟程序,该研究对机器人的独立行进技能实施了实证检验。Gazebo 作为一款先进的开源自动机模拟平台,它支持多种物理处理器,如 ODE (Open Dynamics Engine)、Bullet、DART 以及 Simbody,允许精细化模拟机器人的动力学和运动学行为^[15]。

Gazebo 平台搭载了丰富的预制机器人模型和环境场景库,使得用户能够在近似现实的环境下测试机器人行为。此外,该软件还允许用户自定义机器人模型及其操作环境,提供了一个灵活且功能全面的测试平台。这些特性使 Gazebo 成为评估和优化运输机器人运行参数的理想工具,特别是在预先的概念验证和设计迭代阶段。通过在 Gazebo 中进行仿真实验,研究人员能够有效地预测机器人在真实环境中的性能表现,并据此调整设计以满足实际应用需求。

4.1.1 实验准备

在本项研究中,运输机器人的底盘动力系统经过精心设计,配备了麦克纳姆轮和全向轮,以及抬升气缸,以确保机器人能够在多维空间内进行灵活且准确的运动。这些全向移动机构赋予机器人在水平面上的无约束移动能力,而抬升气缸则提供了在垂直方向上的调整潜力,从而保障了运动的全向性和完整性。这种多元化的动力系统配置,不仅提高了机器人适应复杂地形的能力,还增强了其在执行特定搬运任务时的操作灵活性和效率。通过在 Gazebo 仿真平台上的精确模拟,研究团队得以在风险可控的虚拟环境中对机器人的动力系统进行评估和优化,进一步确保了在实际应用中的高性能表现。如图 13 所示。

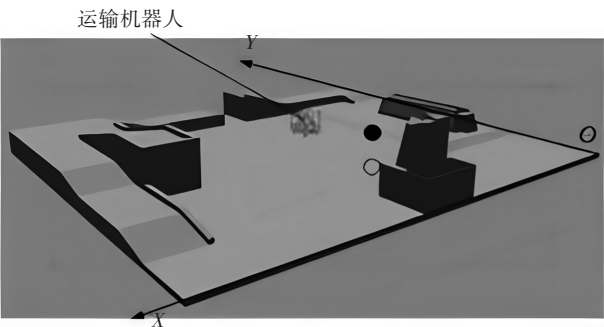


图 13 搬运机器人在 Gazebo 软件中的运行场地

Fig. 13 Handling robot’s operating site in the Gazebo software

4.1.2 建图实验

在此项研究工作中,使用了 Gmapping、Hector 及 Cartographer 这三种不同的 SLAM 技术以制作地图。经过对这些技术的 ROS 包进行编程和设置,通过调整相关参数文档并接入对应 ROS 主题,成功完成了地图的创建。实验过程中,为保证各算法输入数据的一致性,采取录制 ROS 话题包的方法控制仿真变量。实验所使用的主要参数如表 1 所示。在完成 ROS 话题包的录制后,分别运行 SLAM 建图节点,并依次使用 Gmapping、Hector 和 Cartographer 算法进行地图构建,如图 13 所示,实验结果展示在图 14 中。

表 1 建图实验参数

Table 1 Mapping experimental parameters

参 数	值
地图更新频率/Hz	10
地图发布频率/Hz	2
坐标变换发布频率/Hz	100
检测最大可用范围/m	10
检测最小可用范围/m	0.2
传感器最大范围/m	12

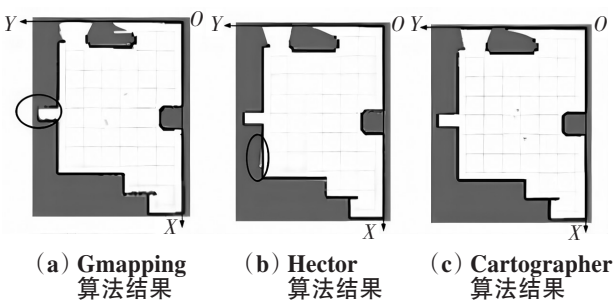


图 14 建图实验结果

Fig. 14 Mapping experimental results

通过比较实验所得数据与现实环境地图,以下结论显现:在图 14(a)中,Gmapping 技术构建的地图在边缘处理上显现瑕疵,边缘区域出现粗糙现象,且边缘连接处不够精准。在图 14(b)中,由于 Hector 技术未融合里程记录信息,其定位准确性受损,造成地图绘制上的偏差。相对而言,图 14(c)中的 Cartographer 技术在地图制作上表现最佳,与真实场景的一致性最高。这些比较结果不仅展示了不同 SLAM 算法在地图构建方面的优势和局限,也为未来在类似应用场景中算法选

择提供了重要参考。

4.1.3 独立导航试验

在地图构建完毕后,本研究通过导航模块对物流自动机的独立导航能力进行了实验验证。激活并调整此模块,使得机器人利用由 Cartographer 方法生成的地图启动 move_base 节点,进而执行自行导航的任务。

仿真环境中加入了模拟障碍物,以测试机器人在遇到障碍时的导航策略。提取点与投递点作为导航的初始与终结站。图 15 试验数据揭示:物流自动化机器人能够沿着既定轨迹顺畅行进,在穿行过程中有效绕开障碍,并最终精确抵达设定的目的地。这一结果证明了自主导航系统在复杂环境中的有效性,并展示了其在实际应用中的潜力。此项实验不仅验证了导航算法的实用性,也为机器人在真实世界环境中的部署提供了重要的参考数据。

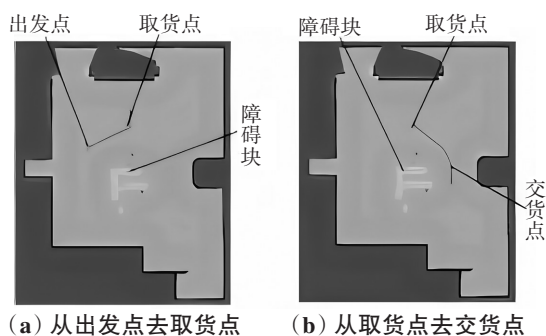


图 15 独立导航试验成果

Fig. 15 Results of independent navigation experiments

4.2 结果分析

通过对仿真实验的结果进行分析,可以得出底盘动力系统设计优势:机器人底盘动力系统采用麦克纳姆轮和全向轮配备抬升气缸的设计,使其在仿真环境中表现出色。这种多元化的动力系统配置赋予机器人在水平和垂直方向上的灵活性,有效提高了其适应复杂地形和执行搬运任务的能力。

(1) SLAM 算法比较。通过对 Gmapping、Hector 和 Cartographer 三种 SLAM 算法的比较,发现 Cartographer 技术在地图制作上表现最佳,与真实场景的一致性最高。这为未来选择 SLAM 算法提供了有力的参考,尤其是在要求高精度地图的物流自动化应用中。

(2) 自主导航系统有效性。通过独立导航试验,验证了机器人在仿真环境中沿着既定轨迹顺畅行进、

绕开障碍并精确抵达目的地的能力。这表明自主导航系统在复杂环境中的实用性,为未来物流自动化机器人部署提供了参考。

总体而言,仿真实验结果验证了本研究所提出机器人设计的性能和有效性,为实际应用提供了有力的支持。在未来工作中,可以基于这些仿真实验结果进一步优化机器人设计,并考虑在真实环境中的实地测试,以进一步验证其可行性和稳定性。

5 结论与展望

本文所研发的搬运机器人适用于多样环境,具备全方位行进能力,搭载的五维度操作台能够广泛而高效地抓取物品,完成物品搬运任务。通过在 Gazebo 仿真平台上进行的实验,本研究验证了运输机器人自主移动功能的可行性。在模拟的室内环境中,机器人成功实现了地图构建和导航任务。此过程中进行的参数调整为未来实物机器人的调试和优化提供了宝贵数据,从而显著提高了开发流程的效率。使用 Gazebo 软件进行预先验证和调试,不仅加快了迭代过程,还有效地降低了研发成本。这一方法强调了仿真技术在降低实际测试风险和成本方面的重要性,同时展示了仿真平台在加速智能运输机器人开发中的关键作用。

尽管本研究取得了积极的结果,但仍有多个方向值得深入研究。首先,进一步优化机器人的感知系统,引入更先进的感知技术,如深度学习视觉系统,以提高在复杂环境中的感知和认知能力。其次,研究机器人的任务规划和协同能力,实现更灵活的适应不同工作场景,包括智能路径规划、任务分配和协同工作。第三,进行实地测试以验证机器人在真实环境中的性能,全面评估其适应性和稳定性,并进行性能优化。最后,考虑机器人的可持续性和能源效率,采用更先进的能源管理技术和材料,以提高运行效率并延长工作时间。

参考文献(References):

- [1] 张广才,张俊杰,蔡彦伦,等.复合机器人的应用和发展综述[J].机械工程与自动化,2020,218(1):218-220.
ZHANG Guang-cai, ZHANG Jun-jie, CAI Yan-lun, et al. Overview of the application and development of composite robots[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2020, 218(1): 218-220.

- [2] 郑金松. 仓储物流搬运机器人控制系统设计与应用[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(3): 59-64.
ZHENG Jin-song. Design and application of control system for warehouse logistics handling robot [J]. Packaging and Food Machinery, 2023, 41(3): 59-64.
- [3] 茆中国, 刘明芹, 宋吕明, 等. 低温 LNG 装卸撬全向移动平台运动学分析与仿真[J]. 机械研究与应用, 2023, 36(5): 15-19.
MAO Zhong-gou, LIU Ming-qin, SONG Lyu-ming, et al. Kinematic analysis and simulation of the omnidirectional mobile platform for low-temperature LNG loading and unloading[J]. Mechanical Research and Application, 2023, 36(5): 15-19.
- [4] 王韩. 全向移动底盘的自主导航技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
WANG Han. Research on autonomous navigation technology of omni-directional mobile chassis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [5] 曹奇. RoboMaster 步兵机器人控制系统设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
CAO Qi. RoboMaster infantry robot control system design[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.
- [6] 郑魁松. 复杂动态环境下室内运输机器人导航系统关键技术的研究与实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
ZHENG Kui-song. Research and implementation of key technologies of indoor transportation robot navigation system in complex dynamic environment[D]. Hefei: China University of Science and Technology, 2022.
- [7] 赵铨钥, 马伟, 苏道毕力格, 等. 激光雷达与视觉融合的跟随运输机器人设计[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(6): 176-181.
ZHAO Cheng-yin, MA Wei, SU Dao-bilige, et al. Design of following transport robot with laser radar and vision integration[J]. China Journal of Agricultural Chemistry, 2023, 44(6): 176-181.
- [8] 吕川, 钱钧, 胡桐, 等. 全向移动机器人控制系统设计与实验研究[J]. 现代制造工程, 2016(1): 39-43, 60.
LYU Chuan, QIAN Jun, HU Tong, et al. Design and experimental study of control system for omni-directional mobile robot [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2016 (1): 39-43, 60.
- [9] 李维刚, 余楚翔, 王永强, 等. 基于分布优化配准的实时激光 SLAM 算法[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(11): 2566-2577.
LI Wei-gang, YU Chu-xiang, WANG Yong-qiang et al. Real-time laser SLAM algorithm based on distributed optimization registration[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(11): 2566-2577.
- [10] 谭浩, 阳清, 李江婷, 等. 基于 ROS 平台的巡逻车自主导航设计[J]. 自动化与仪表, 2023, 38(11): 105-108.
TAN Hao, YANG Qing, LI Jiang-ting, et al. Autonomous navigation design of patrol car based on ROS platform[J]. Automation and Instrument, 2023, 38(11): 105-108.
- [11] DELLAERT F, FOX D, BURGARD W, et al. Monte Carlo localization for mobile robots [C]//Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Detroit, USA: IEEE, 1999: 1322-1328.
- [12] 塞巴斯蒂安 特龙, 沃尔弗拉姆 比加尔, 迪特尔 福克斯. 概率机器人[M]. 曹红玉, 谭志, 史晓霞, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2017: 99-104.
THRUN S, BURGARD W, FOX D. Probabilistic Robot[M]. Translated by CAO Hongyu, TAN Zhi, SHI Xiaoxia, et al. Beijing: Machinery Industry Press, 2017: 99-104.
- [13] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.
- [14] FOX D, BURGARD W, THRUN S. The dynamic window approach to collision avoidance [J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 1997, 4(1): 23-33.
- [15] FARLEY A, WANG J, MARSHALL J A. How to pick a mobile robot simulator: A quantitative comparison of CoppeliaSim, Gazebo, MORSE and Webots with a focus on accuracy of motion[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022, 120(4): 1-16.

责任编辑:代小红