

基于仿真工业场景的智能物流小车设计与实现

杨玉燕, 高洪

厦门理工学院, 福建 厦门 361021

DOI: 10.61369/TACS.2025090014

摘 要 : 本文仿真模拟工业制造车间的物料搬运需求, 设计一个智能物流搬运小车, 采用全向移动底盘结构, 搭载二自由度机械臂, 通过相机视觉识别并抓取和放置目标物料。本文对智能物流小车底盘、机械臂结构和电子控制等硬件部分进行了分析和设计, 在此基础上并进行了小车运动控制方案的设计与实现。实验结果表明所设计制造的智能物流小车能较好满足模拟工业车间物料搬运任务, 为相关工程实践提供有益借鉴。

关 键 词 : 智能物流小车; 嵌入式; 运动控制; 全向移动; 视觉识别

Design and Implementation of Intelligent Logistics Vehicles Based on Simulated Industrial Scenarios

Yang Yuyan , Gao Hong

Xiamen University of Technology, XiaMen, Fujian 361021

Abstract : This paper simulates the material handling requirements in an industrial manufacturing workshop and designs an intelligent logistics cart. An omnidirectional mobile chassis structure were adopted and equipped with a two-degree-of-freedom robotic arm, which identifies, grasps, and places target materials through camera vision. The study analyzes and designs the hardware components of the intelligent logistics cart, including the chassis, robotic arm structure, and electronic control system. Based on these, a motion control scheme for the cart is designed and implemented. Experimental results demonstrate that the designed and manufactured intelligent logistics cart can effectively meet the simulated material handling tasks in an industrial workshop, providing valuable insights for related engineering practices

Keywords : intelligent logistics cart; embedded system; motion control; omnidirectional mobility; visual recognition

引言

智能制造是建设制造强国, 推进产业优化升级和生产力整体提升的重要抓手。越来越多智能制造的工业场景将人工智能与物流相结合^[1], 开展柔性制造生产并大量使用智能物流机器人进行物料转场搬运, 提高生产效率。目前大多数机器人在物料搬运方面还存在一定不足, 如智能化程度、搬运效率、安全等问题^[2,3], 因此开展工业场景下物流小车研究具有现实意义。本文以2024中国大学生工程实践能力与创新大赛的智能物流搬运赛项需求为参考, 设计智能物流小车, 为相关工程领域实践提供参考。

一、仿真工业制造场景的物流搬运设计需求

如图1, 来源于中国大学生工程实践能力与创新大赛的模拟工业制造物流搬运场景^[4], 需要设计一个智能物流小车, 沿着灰色区域运行, 依次经过出发区, 扫描读取二维码任务, 根据任务码信息, 到达旋转的原料区依次动态抓取红、绿、蓝三种回转体形状的物料^[4], 然后转运物料摆放至粗加工区, 接着抓取物料并运转放置到暂存区。然后物流小车回到原料区抓取第二批物料并依次循环如上任务, 把第二批物料堆叠到暂存区上并回到启停区, 该场景高度仿真实际工业制造场景。

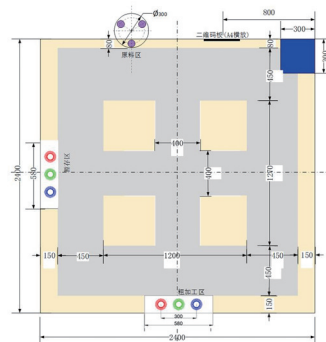


图1 工业模拟物料搬运场地图

项目信息: 厦门理工学院教研教改项目 (JG202354)

作者简介: 杨玉燕 (1984—), 女, 硕士, 实验师, 主要从事电工电子实训教学工作。

二、智能小车结构设计与实现

(一) 底盘结构

因物料搬运过程是全自动且有时间效率的要求，因此底盘结构设计上不仅要满足全向移动，还要满足重心较低以保证底盘稳定。全向移动设计可以减少多次转弯，低重心设计满足小车速度且车身不容易抖动。据此，所设计轮子采用麦克纳姆轮，此外机械臂、物料仓库和电池和微型计算机等的进行平衡布置，使整车重心落在中间，如图2所示。其中物料仓库为了快速适应物料更换，其料盘通过螺丝螺母与电机底座配合，因此只需旋转螺丝螺母即可拆装更换料盘。

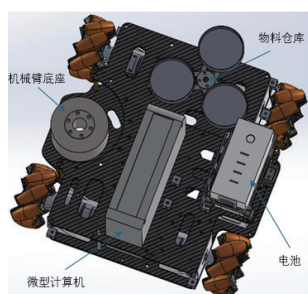


图2 智能物流小车底盘结构设计模型

(二) 机械臂结构

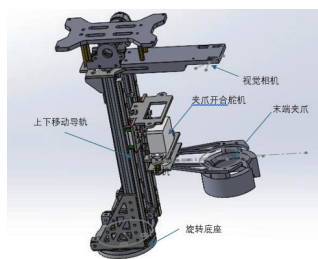


图3 机械臂的3D模型

机械臂如图3所示，具有底座旋转和上下移动移动2个自由度。旋转轴需要较高的精度，采用达妙的6220云台电机用来提供扭矩。上下移动自由度选用2GT 环形闭口同步带实现，具有移动速度快、轻便、易更换等特点。其中自适应夹爪设计选用成本较低精度较高的舵机为动力，通过舵机转动实现夹取功能。其夹取部分为两个圆弧形件，能紧紧贴合物料表面，同时可实现回转体物料抓取的自动定中，有利于扩大夹取范围并增大位置容错率。

三、智能小车电控硬件设计及选型实现

智能小车电控硬件图如图4所示。

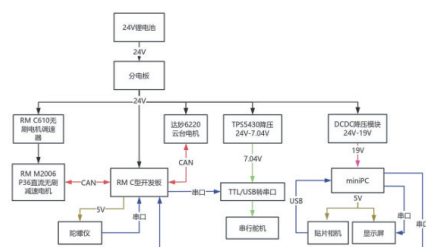
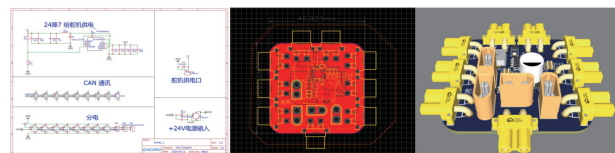


图4 智能物流小车电控硬件图

主要电控硬件选择：采用 RoboMaste C 型开发板作为主控板，动力系统由 RoboMaster M2006 P36 直流无刷减速电机和 RoboMaster C610 无刷电机调速器组成，达妙6220云台电机用来提供扭矩，物料识别相机则采用 USB 工业模块相机摄像头 GF100，串行舵机采用 PWM 总线舵机，视觉处理选择海塔微型主机13代酷睿 i7-1370P 微型计算机。



(a) 分电板原理图 (b) 分电板 PCB (c) 分电板 3D 图

图5 自制分电板原理图以及 PCB 以及 3D 图

物流小车上需要的电机较多以及舵机也需要降压供电，且 CAN 总线上需要挂载多个电机，若全分开供电则会使线路较复杂，因此独立设计了适用于本小车的分电板。自制的分电板集成了分电、CAN 信号传输、降压等功能，同时有 TVS 管保护舵机，如图5所示。

四、物流小车功能控制方案

整体的系统功能控制方案基于 STM32架构采用 Freertos 操作系统^[5]，将任务分为运动任务、抓取任务与放置任务。

运动任务负责整体运动逻辑，是本系统的主要线程，通过电机编码器传回的电机参数，来对电机转过总圈数进行闭环控制，从而实现固定的路径长度。同时，该任务还包括在粗加工区以及暂存区的车辆位置校准，根据陀螺仪以及上位机坐标数据进行闭环控制，从而消除在行驶过程中由于电机编码器产生的累计误差。

抓取与放置任务中，MCU 主要使用 Can 通信及串口通信对电机和舵机进行控制。微机通过串行总线以固定的频率进行数据包发送，主要数据有舵机的角度、速度、加速度值，进行相应调用和修改以实现对舵机的实时控制。

最后通过采用优先级较高的 Can 中断、串口中断以及定时器中断进行实时任务处理，从而保证闭环控制的准确与高效。

(一) 车盘底轮运动学控制

车盘底轮为麦克纳姆轮，为简便控制对四个轮子电机的速度进行统一解算，拆分成前进速度 V_x 、横移速度 V_y 和自旋速度 V_z 。根据麦克纳姆轮原理^[6,7]，相应四个轮子速度运动学解算为：

$$\begin{aligned} \text{Spd1}[0] &= V_y + V_x + V_z; \text{spd1}[1] = -V_y + V_x + V_z; \\ \text{spd1}[2] &= V_y - V_x + V_z; \text{spd1}[3] = -V_y - V_x + V_z; \end{aligned}$$

因任务场景弯道较多，车体容易超出边界，故利用麦克纳姆轮的特性可以内外侧轮子差速来实现绕一个圆心做圆周运动。内外圈轮子转速计算公式分别为：

$$V_{\text{外}} = V + \frac{V * L}{2 * R}, V_{\text{内}} = V - \frac{V * L}{2 * R},$$

其中 V 为小车整体前进速度、 L 为小车宽度、 R 为旋转半径

利用相关公式能较方便基于 SMT32 芯片控制编程实现控制车体在各个转角实现丝滑过弯。

（二）路径闭环控制算法

路径闭环采用 PID 控制^[8]，算法如图6所示。通过编码器传回的总圈数让电机旋转指定圈数；将期望转过的圈数加上当前记录的总圈数，得到目标总圈数；并在圈数 PID 控制循环中实时计算当前圈数与目标圈数的差值，再将其差值代入到速度环 PID 控制中，作为速度的目标值来驱动电机进行运动。再根据麦克纳姆轮的运动学解算，从而控制 X 轴、Y 轴的移动距离以及 Z 轴（自旋角度）。

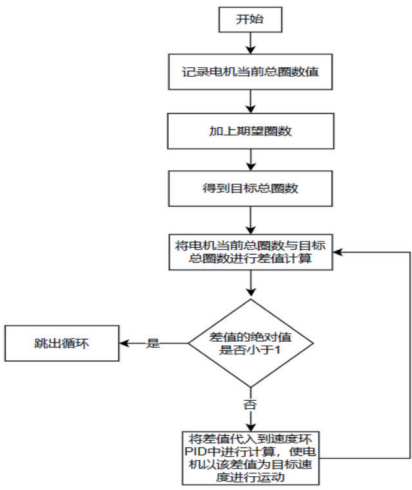


图6 路径闭环算法流程图

（三）小车姿态校准算法

在小车执行物流任务时，由于机械误差，编码器误差等会影响到小车姿态（旋转位移）。因此在小车执行所有任务时，需进行姿态校准控制。主要通过外置陀螺仪在串口中断中获取数据，利用总角度和目标角度做 PID 计算，接着在定时器中断中利用角速度和总角度环的输出计算目标值并进行姿态矫正，再换算为麦克纳姆轮运动学解算代码的 V_z 进行控制四个轮子，从而实现自旋姿态实时控制，保持姿态稳定。

在修正完小车旋转角度误差后，还需修正小车在 X 轴方向与 Y 轴方向上的误差。通过依靠相机 OpenCV 识别物料放置圆环的实时坐标数据与目标数据进行对比和矫正 Y 轴与 X 轴位移，当误差达到理想值时则跳出循环。

五、视觉识别方案

视觉识别方案包括粗加工区和暂存区放置物料定位的色环识别以及物料颜色识别。其中色环识别通过摄像头实时捕获视频画面，利用 YoloV8^[9] 目标检测模型和 OpenVINO 加速技术，实现目标的检测、跟踪与坐标输出，满足多场景实时视觉需求。

物料颜色识别通过摄像头实时捕获视频画面，利用 OpenCV^[10] 软件包基于 HSV 颜色空间的阈值范围进行红色、绿色、蓝色物料目标检测，并结合物料的轮廓分析技术，实现目标的检测、跟踪与坐标输出。

六、实验结果与分析

根据相关设计制造了智能物流小车，并在上述仿真工业物流搬运任务地图中进行测试，如图7所示。经多次实验测试，智能物流小车能在3分钟内完成物料搬运任务，且搬运过程中物料识别准确、运行轨迹精准、机械臂能成功抓取物料并准确放置在色环上。所实现的小车参加2024年福建省大学生工程实践与创新能力竞赛的初赛环节获得第2名。相关实验表明，所设计实现的智能物流小车能较好实现仿真工业制造任务场景下的物料搬运工作。

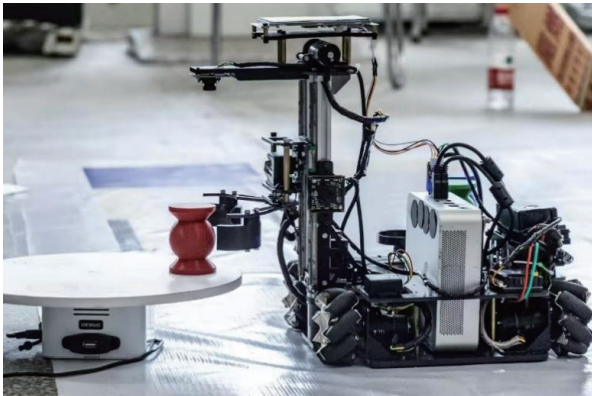


图7 智能物流小车搬运实验

七、结论

本文设计并实现了一套基于仿真工业场景用途的智能物流小车系统。该系统集成全向移动底盘搭配二自由机械臂，搭载工业相机并引入嵌入式控制系统，较好实现了模拟加工物料的自动识别抓取、搬运和准确放置。

参考文献

- [1] 翟玲. 基于人工智能的物流系统优化[J]. 山西财经大学学报, 2024, 46(202): 77-79.
- [2] 耿冬妮, 赵定坤, 周颖婷, 等. 智能物流机器人设计与测试[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(12): 156-161.
- [3] 吴岳峰, 张海若, 白雪松, 等. 智能物流搬运小车[J]. 电子测试, 2022, 36(21): 105-107.
- [4] 教育部工程训练教学指导委员会(2024), 关于举办2025年中国大学生工程实践与创新能力大赛的预通知[网页], <http://www.gcxl.edu.cn/>.
- [5] 刘火良, 杨森编著. FreeRTOS 内核实现与应用开发实战指南[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [6] 王凯强. 基于麦克纳姆轮全向移动分析与仿真研究[J]. 内燃机与配件, 2023, (1): 14-16.
- [7] 黄晓宇, 孙勇智, 李津蓉, 等. 基于 MPC 的麦克纳姆轮移动平台轨迹跟踪控制[J]. 机械传动, 2023, 47(11): 22-29.
- [8] (美) 尾形克彦著. 现代控制工程 第5版[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [9] YOLOv8 user manual, <https://yolov8.org/>.
- [10] opencv user manual, <https://opencv.org/>.