

基于自适应模糊逻辑的多机械臂 工业机器人分拣控制系统设计

袁名华

(广西生态工程职业技术学院, 广西 柳州 545004)

摘要: 针对现有方法存在的控制偏差较大, 分拣速度较低的问题, 提出基于自适应模糊逻辑的多机械臂工业机器人分拣控制系统研究; 设计机器视觉设备、位姿传感器、数据处理器、分拣执行控制器和伺服驱动器, 通过系统电路的连接, 实现工业机器人分拣控制系统硬件设计; 检测多机械臂工业机器人初始分拣位姿, 通过分拣目标图像预处理、特征提取、特征匹配等步骤, 识别分拣目标, 确定分拣目标位置与几何参数; 根据识别结果, 计算机器人目标位姿与抓取参数作为控制目标, 在空间条件约束下, 利用自适应模糊逻辑算法生成机器人分拣控制指令, 在考虑抓取优先级的情况下, 实现系统的多机械臂工业机器人分拣控制功能; 实验结果表明, 相较于 RBFNN 方法, 设计系统的抓取力控制误差提升了约 9.53%, 相较于虚拟仿真方法提升了约 5.51%; 设计系统相对于 RBFNN 方法在分拣时间上的提升百分比约为 44.44%, 相对于虚拟仿真方法提升百分比约为 26.67%, 说明设计系统的控制误差较低, 通过该控制系统的应用机器人的分拣速度明显提升。

关键词: 自适应模糊逻辑; 多机械臂; 工业机器人; 分拣控制; 特征匹配

Design of Multi Robot Industrial Robot Sorting Control System Based on Adaptive Fuzzy Logic

YUAN Minghua

(Guangxi Eco-Engineering Vocational & Technical College, Liuzhou 545004, China)

Abstract: To solve large control deviation and low sorting speed in existing methods, a multi robotic industrial robot sorting control system based on adaptive fuzzy logic is proposed. Design machine vision equipment, pose sensors, data processors, sorting execution controllers, and servo drivers, achieve hardware design of industrial robot sorting control system through system circuit connections, detect the initial sorting pose of multi robotic arm industrial robots, identify sorting targets through the pre-processing of sorting target images, feature extraction, feature matching, and other steps, and determine the sorting target position and geometric parameters. Based on the recognition results, the robot target pose and grasping parameters are calculated as control targets. Under spatial constraints, an adaptive fuzzy logic algorithm is used to generate robot sorting control instructions. Considering grasping priority, the system achieves multi arm industrial robot sorting control function. Experimental results show that compared with the branched feedforward neural network (RBFNN) method, the designed system improves the grasping force control error by about 9.53%, and compared with the virtual simulation method, it is improved by about 5.51%; The designed system improves the sorting time by about 44.44% compared to the RBFNN method and the percentage improvement compared to the virtual simulation method is about 26.67%, indicating that the designed system is relatively low control error, significantly improving the sorting speed of the robot through the application of the system.

Keywords: adaptive fuzzy logic; multiple robotic arms; industrial robot; sorting control; feature matching

收稿日期:2024-12-09; 修回日期:2025-02-06。

基金项目:国家重点研发计划项目(2019MNY0715300);2021 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2021KY1219);
2023 年度广西职业教育教学改革研究项目(GXGZJG2023B104)。

作者简介:袁名华(1987-),男,大学本科,讲师。

引用格式:袁名华. 基于自适应模糊逻辑的多机械臂工业机器人分拣控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 136-144, 160.

0 引言

在现代制造业快速发展的背景下,制造业正经历着从传统模式向智能化、自动化转型的关键时期,生产效率、产品质量的提升以及生产成本的降低成为企业追求的目标^[1]。在这一背景下,分拣作业作为生产线上的重要环节,其效率与准确性直接关系到整个生产流程的顺畅与高效。然而,面对日益复杂多样的生产任务,传统的单一机械臂分拣系统逐渐暴露出效率低下、灵活性不足等问题^[2]。因此,研发能够协同作业、智能调度、具备高度自适应能力和高可靠性的多机械臂工业机器人分拣控制系统,成为提升制造业生产效率、降低成本、增强市场竞争力的关键所在,也是当前工业自动化领域研究的热点和难点。

当前多机械臂工业机器人分拣控制方法已有一定发展,文献[3]方法将滑模控制、模糊控制和改进蝙蝠算法结合用于分拣机器人轨迹跟踪控制。通过改进蝙蝠算法优化模糊算法带宽,用优化的模糊控制算法调整滑膜控制算法参数以降低跟踪误差。然而,3种算法结合需处理协同与兼容问题,增加了系统复杂性,降低了分拣效率。文献[4]提出基于虚拟仿真的机器人分拣控制系统,利用Unity3D创建虚拟仿真环境,收集虚拟数据集、进行相机及手眼标定。通过目标检测模型识别角点,依据双目视觉原理获取三维坐标实现分拣控制。但该系统分拣控制效果取决于虚拟仿真精度,精度不足则无法保证控制效果。文献[5]方法融合优化的SURF算法与增强的RANSAC算法,用于分拣机器人抓取点精确定位,构建三维抓取模型完成分拣控制。但是若误匹配点过多或分布不均,会影响抓取点定位精度,导致抓取力控制误差大。文献[6]提出基于改进反演控制的机器人分拣控制方法,融合模糊系统、模糊神经网络和逆控制算法。但模糊系统逼近已建模信息时,若模型精度不高,会使控制输出不准确,难以达预期效果。文献[7]方法通过主成分分析方法线性捕捉机器人手指运动的方差,并通过非线性自动编码器实现高方差捕捉,实现方差的均匀分配,以此达到机器人分拣控制的目的。非线性自动编码器虽然能够实现高方差捕捉和方差的均匀分配,但它是一种相对复杂的模型,容易出现过拟合问题,导致抓取力控制误差增大。文献[8]方法通过使用基于径向基函数神经网络(RBFNN)构建的自适应机制,将外部干扰和未知参数考虑在内,在此基础上,基于李雅普诺夫理论实现机器人机械臂非线性滑模控制。但是RBFNN在运行过程中需要进行大量的计算,导致分拣时间较短,即单位时间内能够处理的作品较少。

综上所述,传统机器人分拣控制系统普遍存在控制

效果不佳的问题,为此引入自适应模糊逻辑算法,展开多机械臂工业机器人分拣控制系统研究。自适应模糊逻辑算法是指具有学习算法的模糊逻辑系统,是一个全局逼近器,能够广泛地应用于建模、自动控制等领域。将自适应模糊逻辑算法应用到多机械臂工业机器人分拣控制系统的设计工作中,以期能够提升对工业机器人的控制精度,提高分拣工作效率。

1 多机械臂工业机器人分拣控制系统设计

1.1 分拣控制系统整体架构设计

多机械臂工业机器人分拣控制系统整体架构涵盖硬件和软件两大核心部分。硬件设计包含机器视觉设备、位姿传感器和机械臂分拣执行控制器。机器视觉设备通过改良设计,整合照明与光电技术,减少光线干扰,其内部组件可提供图像处理数据以确定分拣对象位置;位姿传感器融合位置与姿态传感器,采用模块化设计,能快速准确解析复杂位姿信息,并通过滤波和温度补偿提高性能;机械臂分拣执行控制器以西门子S7-1200系列CPU1214C型号PLC为核心,具备丰富I/O资源和多种接口,可应对复杂分拣任务。

软件功能设计基于硬件支持,以自适应模糊逻辑算法为核心,实现多机械臂工业机器人的精准分拣控制。主要包括分拣目标识别、目标位姿与抓取参数计算、控制指令生成和分拣控制功能实现4个模块。分拣目标识别模块通过图像预处理、特征提取、特征匹配和位置参数求解,准确识别分拣目标;目标位姿与抓取参数计算模块根据目标位置和几何参数计算机器人末端执行器的位姿和抓取参数;控制指令生成模块通过设定约束条件,对比实时位姿与执行目标得出控制量,利用自适应模糊逻辑算法生成控制指令;最后,在实际分拣过程中,货物经前置分拣系统初步分类后,系统依据生成的控制指令驱动硬件设备,实现多机械臂工业机器人的精准分拣控制。

多机械臂工业机器人分拣控制系统整体架构如图1所示。

1.2 分拣控制系统硬件设计

该硬件系统主要由机器视觉设备、位姿传感器和机械臂分拣执行控制器3部分构成。机器视觉设备通过整合照明与光电技术进行改良设计,其内部的高分辨率标准工业级CCD镜头、内置滤光片的工业摄像机及图像捕获卡以及图像处理模块等组件协同工作,为分拣目标识别提供准确的图像处理数据,以确定分拣对象位置,同时串行器将并行图像数据转换为串行数据,提高传输准确性和抗干扰能力。位姿传感器融合位置与姿态传感器,采用模块化设计,连接高精度陀螺仪与加速度传感器实现位置和姿态同步感知,通过微处理器中的复合型

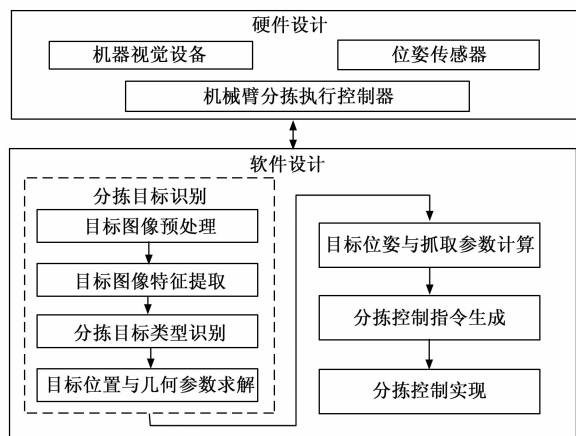


图 1 多机械臂工业机器人分拣控制系统整体架构

Kalman 滤波算法对数据滤波，并添加温度补偿模块，为机器人分拣控制提供准确的实时位姿初始数据。机械臂分拣执行控制器选用西门子 S7-1200 系列的 CPU1214C 型号 PLC 作为核心，具备丰富的 I/O 资源、高速 I/O 接口，支持多种网络连接方式，能够精确执行接收、解析和生成控制指令等任务，确保多机械臂工业机器人按预设程序和指令完成复杂的分拣任务，实现分拣动作的精确同步并减轻对机械结构的冲击。这 3 部分相互协作，共同保障了多机械臂工业机器人分拣控制系统的高效、稳定运行。

1.2.1 机器视觉设备

硬件系统中机器视觉设备安装的目的是为分拣目标的识别提供图像处理数据，从而确定分拣对象位置。为了减少光线干扰对分拣目标识别准确性的不利影响，整合照明与光电技术，对机器视觉装置进行改良设计。优化设计系统中机器视觉设备的内部组成结构如图 2 所示。

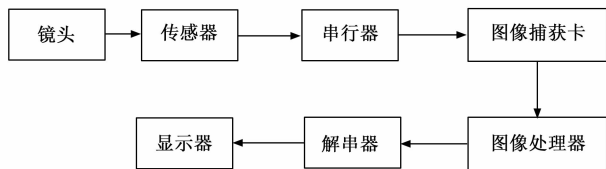


图 2 机器视觉设备内部结构图

从图 2 中可以看出，改良后的机器视觉装置包含镜头、工业摄像机及图像捕获卡等多个组件，其中镜头选用高分辨率的标准工业级 CCD 镜头及固定焦距镜头，依据分拣物品灵活选用合适镜头。摄像机内置了滤光片，以优化镜头捕捉的光学数据，确保图像输出品质。另外，机器视觉系统内嵌了一个关键的图像处理模块，与同步信号协同作业，工业摄像机采用 USB 端口，实现对原始图像数据的初步处理。传感器在工作过程中会产生大量的图像数据，这些数据通常以并行的方式输

出，即多个数据位同时传输，串行器的作用是将这些并行数据按照一定的时序，逐位地转换为串行数据，其能够减少传输线路数量，提高数据传输的准确性和抗干扰能力。

1.2.2 位姿传感器

硬件系统中的位姿传感器主要用来检测多机械臂工业机器人的实时位姿，为机器人的分拣控制提供初始数据。本文设计的位姿传感器融合了位置传感器和姿态传感器两个部分，采用模块化设计方式，使得各个组件之间的连接更为紧凑且稳固，实现对复杂位置与姿态信息的快速解析与准确反馈。位姿传感器的工作原理如图 3 所示。

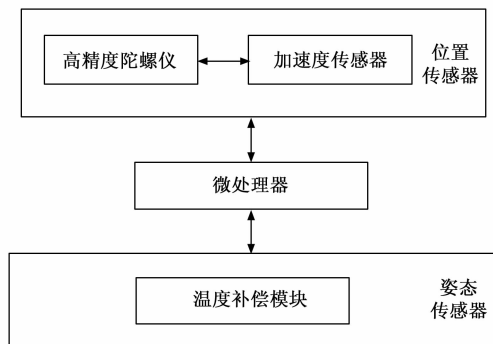


图 3 位姿传感器工作原理图

位姿传感器连接了高精度陀螺仪与加速度传感器，由此实现了位置和姿态的同步感知。在位置和姿态传感元件中安装微处理器，在微处理器运行的软件程序里嵌入复合型 Kalman 滤波算法，对传感器实时感知的数据进行进一步滤波处理。同时，为了降低元件温度变化对传感器性能的负面影响，在位姿传感器中添加一个温度补偿模块，提高传感器在不同温度环境下的稳定性和准确性。

1.2.3 机械臂分拣执行控制器

为保证多机械臂工业机器人能够按照分拣控制功能预设的程序和指令执行分拣任务，设计机械臂分拣执行控制器，要求控制器能够成功执行接收指令、解析指令、控制指令生成等任务。在分拣执行控制器设计中，选用西门子 S7-1200 系列中的 CPU1214C 型号的 PLC 作为核心，它配备了总计 24 个 I/O 点，并具备扩展能力，最多可接入 8 个附加信号模板。该控制器擅长高精度定位控制，能管理多达 76 个实轴和 64 个虚轴，同时兼容 G 代码编程，满足数控需求。在连接伺服驱动器方面，控制器支持脉冲或环网两种方式，便于构建机器人控制系统^[9-10]。此外，它提供了 35 个开关量输入通道和 24 个输出通道，具备高速 I/O 接口，最高脉冲频率可达 500 kHz。此控制器不仅拥有丰富的 I/O 资源以促进与外部设备的交互，还支持高速 HEBUS 及标准

EtherCAT 网络，能够与环网伺服驱动器相连，构建网络化控制系统。同时，它还配备了 2 个 RS-485 接口和 2 个以太网端口。控制器内部集成了多个与控制中心相连的主轴电机，采用 24 V 直流供电，输出类型为晶体管。该控制器扩展灵活，性能稳定可靠^[11-12]。通过该控制器，能够应对复杂的分拣任务挑战，确保分拣动作的精确同步，有效减轻分拣过程中对机械结构的冲击。

2 多机械臂工业机器人分拣控制系统软件功能设计

在硬件系统的支持下，对多机械臂工业机器人的分拣控制功能进行优化设计。多机械臂工业机器人分拣控制系统的总体架构设计包含分拣目标识别、分拣作业下机器人目标位姿与抓取参数计算、利用自适应模糊逻辑算法生成机器人分拣控制指令以及实现系统多机械臂工业机器人分拣控制功能这几个主要模块。各组成模块之间存在紧密的关键信息交互关系，分拣目标识别模块通过对目标图像的处理、特征提取与匹配等操作，确定分拣目标位置与几何参数，并将这些信息传递给目标位姿与抓取参数计算模块；计算模块依据接收到的目标信息，计算出机器人末端执行器的目标位置、抓取方向和抓取力等目标值，然后将这些目标值提供给控制指令生成模块；控制指令生成模块以目标值和机器人实时位姿检测对比得出的控制量为输入，利用自适应模糊逻辑算法生成控制指令，驱动实现分拣控制功能模块；而在实际分拣控制过程中，实现模块会不断将分拣情况等信息反馈给其他模块，辅助它们进行相应调整，以确保整个分拣过程的准确性和高效性。

2.1 多机械臂工业机器人分拣目标识别

为了确保机械臂能够准确、高效地定位和抓取目标物体，从而实现自动化分拣，需要对分拣作业目标进行识别^[13-14]。工业机器人分拣目标的识别原理为：通过集成高精度摄像头和图像传感器，捕获分拣作业区的实时图像，通过特征提取与匹配识别分类各种分拣物品^[15]，最后确定工业机器人分拣目标位置与几何参数，保证分拣目标的识别精度。

2.1.1 工业机器人分拣目标图像预处理

利用上文中设计的多机械臂工业机器人内置机器视觉设备获取分拣目标图像，得到初始分拣目标图像为：

$$I_0(u, v) = \begin{cases} \kappa_{\text{vision}} x_{\text{sorting}} \cos \vartheta \\ \kappa_{\text{vision}} y_{\text{sorting}} \sin \vartheta \end{cases} \quad (1)$$

其中： κ_{vision} 为视觉成像系数， $(x_{\text{sorting}}, y_{\text{sorting}})$ 为分拣目标在世界坐标系中的实际位置坐标值， ϑ 为分拣目标的成像角，也就是工业机器人与分拣成像目标之间的夹角。在多机械臂工业机器人作业环境中，重复执行上述操作，得出所有分拣目标图像的采集结果。

为保证目标图像质量，对初始采集图像进行预处理，首先采用双边滤波与均值滤波相结合的方式，过滤图像中的噪声部分，双边滤波结合了图像的空间域信息和灰度域信息，能够在去除噪声的同时保留边缘细节，双边滤波处理过程可以量化表示为：

$$I_{\text{bilateral}}(u, v) = \frac{\sum I_0(u, v) \cdot \bar{\omega}}{\sum \bar{\omega}} \quad (2)$$

其中： $\bar{\omega}$ 为权重系数，该系数取决于空间域权重和灰度域权重的乘积^[16-17]。空间域权重通常取为高斯函数的形式，用于控制像素间的空间距离关系；灰度域权重也取为高斯函数的形式，用于控制像素间的灰度差异^[18]。均值滤波将一定大小的核窗口内像素点的灰度值取平均值，作为核中心像素点的灰度值，均值滤波结果如下：

$$I_{\text{mean value}}(u, v) = \frac{1}{n_l} \sum I_0(u, v) \quad (3)$$

其中： n_l 为分拣目标图像中包含的像素点数量。将初始采集图像按照公式 (2) 和公式 (3) 进行运算处理，由此得出分拣目标图像的滤波处理结果。

为了进一步增强分拣目标图像的对比度、亮度和颜色等特性，采用伽马校正的方式对图像进行增强处理，即通过调整图像的伽马值来改变其亮度，达到预期的图像预期效果，将处理结果标记为 $I(u, v)$ 。

2.1.2 提取多机械臂工业机器人分拣目标图像特征

以处理完成的分拣目标图像为对象，从颜色、尺寸、形状 3 个方面提取图像特征，颜色特征向量的提取结果为：

$$\tau_{\text{colour}} = c_{\text{hue}} + c_{\text{saturation}} + c_{\text{brightness}} \in I(u, v) \quad (4)$$

其中： c_{hue} 、 $c_{\text{saturation}}$ 和 $c_{\text{brightness}}$ 分别为图像色调、饱和度和亮度值。尺寸特征分量的提取结果如下：

$$\tau_{\text{size}} = (L_x, L_y, L_z), L_x, L_y, L_z \in I(u, v) \quad (5)$$

其中： L_x 、 L_y 和 L_z 分别为分拣目标的长度、宽度和高度。该表达式主要针对的是规则的分拣目标，若分拣目标为不规则形状，需要采用不规则面积计算方式，得出尺寸特征提取结果。另外，形状特征中，矩形度分量的提取结果为：

$$\tau_{\text{shape}} = A_l \cdot A_{\text{rectangle}} \quad (6)$$

其中： A_l 和 $A_{\text{rectangle}}$ 分别为分拣目标面积及其最小外接矩形的面积，计算得出矩形度的值在 0~1 之间，值越接近 1 表示形状越接近矩形^[19]。

由此得出所有分拣目标图像特征分量的提取结果，并采用加权融合的方式对上述特征分量进行融合处理，得出分拣目标综合特征的提取结果为 τ_l 。

2.1.3 根据特征匹配结果识别分拣目标类型

多机械臂工业机器人的分拣目标在颜色、尺寸、形

状等方面存在明显差异, 根据不同类型分拣目标的标准特征, 设定分拣目标识别的比对参考。标准特征可以量化表示为:

$$\beta_{\text{carton}} = \beta_{\text{shape}} + \beta_{\text{colour}} + \beta_{\text{size}} \quad (7)$$

其中: β_{shape} 、 β_{colour} 和 β_{size} 分别为分拣目标在形状、颜色和尺寸 3 个方面的特征分量。

采用特征匹配的方式, 将提取的分拣目标特征与设定的标准特征进行匹配, 得出特征匹配度计算结果为:

$$\lambda = \frac{\beta \cdot \tau}{\|\beta\| \cdot \|\tau\|} \quad (8)$$

通过公式 (8) 即可得出特征匹配度的计算结果, 若计算得出匹配度 λ 高于阈值 λ' , 证明当前图像中存在分拣目标, 并确定 β 对应目标为当前分拣目标类型, 否则认为当前图像中不存在分拣目标。

2.1.4 求解工业机器人分拣目标位置与几何参数

针对判定存在分拣目标的图像, 对其内部目标的位置和几何参数进行求解, 分拣目标定位结果即为工业机器人执行末端的目标位置, 而几何参数的具体取值决定了机器人的抓取姿态、位置以及抓取力。分拣目标定位结果可以量化表示为:

$$\begin{cases} p_x = \kappa_{\text{mapping}} I(x_{\text{sorting}}) \\ p_y = \kappa_{\text{mapping}} I(y_{\text{sorting}}) \end{cases} \quad (9)$$

其中: κ_{mapping} 为分拣目标对象与实际目标位置之间的映射关系系数, $I(x_{\text{sorting}}, y_{\text{sorting}})$ 为目标图像中分拣目标对应的像素信息。另外分拣目标的几何参数包括长度、宽度、高度、体积等, 可根据分拣目标图像尺寸特征的提取结果, 得出几何参数的具体取值。

2.2 分拣作业下机器人目标位姿与抓取参数计算

根据分拣目标位置和几何参数的求解结果, 对多机械臂工业机器人分拣执行末端的位姿和抓取参数的目标值进行计算, 其中末端执行器的目标位置计算结果为:

$$\begin{cases} P_m(x) = p_x + (l + g) \\ P_m(y) = p_y + (l + g) \\ P_m(z) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中: l 和 g 分别为工业机器人机械臂长度和关节长度, 将分拣目标定位结果代入公式 (10) 中, 即可得出机器人末端执行器目标位置的计算结果。机器人的抓取参数具体包括抓取方向、抓取力等, 抓取方向的计算公式如下:

$$\theta_m = h_r \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\pi}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{V} \begin{bmatrix} \frac{|y_{\text{left}} - y_{\text{right}}|}{l_{l-r}} & -\frac{|x_{\text{left}} - x_{\text{right}}|}{l_{l-r}} & 0 \\ \frac{|x_{\text{left}} - x_{\text{right}}|}{l_{l-r}} & \frac{|y_{\text{left}} - y_{\text{right}}|}{l_{l-r}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (11)$$

其中: $\mathbf{V}$ 为机器人坐标系 z 轴的旋转矩阵, $(x_{\text{left}},$

$y_{\text{left}})$ 和 $(x_{\text{right}}, y_{\text{right}})$ 表示作用在分拣目标上的左右两端执行器的位置坐标, l_{l-r} 为两端执行器之间的距离。此外, 机器人在执行分拣任务时, 抓取力的大小和方向取决于目标物体的重量、摩擦系数、抓取点的位置等因素, 且抓取力与目标物体重力以及其他受力之间处于平衡状态, 机器人抓取分拣目标时, 分拣目标的受力分析情况如图 4 所示。

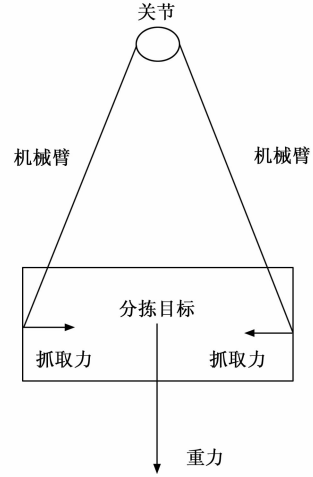


图 4 分拣作业下机器人抓取分拣目标受力示意图

为保证分拣目标的受力平衡, 得出机器人抓取力的计算结果为:

$$F_{\text{grab}} = m_{\text{target}} g + F_{\text{secure}} \theta_m \quad (12)$$

其中: $m_{\text{target}} g$ 为分拣目标自身重力, F_{secure} 为机器人抓取的安全裕度值。

按照上述方式, 即可得出分拣作业过程中, 多机械臂工业机器人运动参数的执行目标值, 也就是系统的控制目标。

2.3 利用自适应模糊逻辑算法生成机器人分拣控制指令

通过设置关节角度、连杆长度、末端执行器位置等约束条件, 可以防止机器人在运动过程中超出其物理极限或与其他物体发生碰撞, 从而避免机器人损坏、操作人员受伤或分拣物品受损等安全问题。分拣作业过程中, 多机械臂工业机器人的关节角度约束条件设定结果如下:

$$\max(\varphi_i) \leq \varphi_i \leq \min(\varphi_i) \quad (13)$$

其中: φ_i 为多机械臂工业机器人第 i 个关节的实际旋转角度, $\max(\varphi_i)$ 和 $\min(\varphi_i)$ 分别为对应关节允许旋转角度的最大值和最小值。按照上述方式可以得出连杆长度、速度以及加速度约束条件的设定结果。

通过多机械臂工业机器人实时位姿检测结果与分拣执行目标的对比, 得出机器人分拣控制量的计算结果, 即:

$$\begin{cases} K_p = P(t) - \varphi_i P_m(t) \\ K_\theta = \theta(t) - \varphi_i \theta_m(t) \end{cases} \quad (14)$$

将机器人位姿检测值与控制目标值的求解结果代入到公式 (14) 中，即可得出位姿控制量的计算结果。除此之外，还可以实现对机器人末端执行器抓取力控制量的计算，将控制量计算结果作为输入值，利用自适应模糊逻辑算法生成相应的控制指令^[20-21]。自适应模糊逻辑算法的工作原理如图 5 所示。

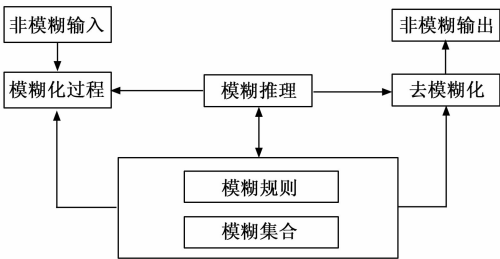


图 5 自适应模糊逻辑算法原理图

在自适应模糊逻辑算法执行过程中，将控制量的计算结果作为输入误差值，将当前误差与上次误差进行比较，得出误差变化率，将其标记为 σ 。在此基础上，利用公式 (15) 对误差和误差变化量进行模糊化：

$$E = \kappa_{\text{vague}} h_{\text{vague}}(j) + \bar{\omega}_g \quad (15)$$

其中： κ_{vague} 和 $h_{\text{vague}}()$ 分别为模糊系数和模糊处理函数， $\bar{\omega}_g$ 为模糊规则权重。通过公式 (15) 的计算将输入值转换为模糊子集。

考虑输入为误差 e 和误差变化率 Δe ，输出为控制指令 u 。误差、误差变化率和控制指令的模糊集都分为“负大 (NB)”、“负中 (NM)”、“负小 (NS)”、“零 (ZO)”、“正小 (PS)”、“正中 (PM)”、“正大 (PB)”共 7 个等级。那么模糊逻辑推理规则如表 1 所示。

表 1 模糊逻辑推理规则

$\Delta e \backslash e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NS	NM	NM	NB	NB

当误差为“负大”且误差变化率为“负大”时，说明系统的实际值远小于目标值，且差距还在快速增大，此时需要给出“正大”的控制指令，大幅度增加控制量，使系统快速趋近目标值。

当误差为“零”且误差变化率为“正小”时，意味着系统当前接近目标值，但有偏离的趋势，所以给出

“负小”的控制指令，稍微减小控制量以维持系统稳定。

当误差为“正大”且误差变化率为“正大”时，表明系统的实际值远大于目标值，且差距还在快速增大，此时需要给出“负大”的控制指令，大幅度减小控制量，让系统尽快回到目标值附近。

根据模糊控制规则表，结合模糊子集进行模糊推理，推理结果以模糊值表示，对其进行去模糊处理，处理结果为：

$$Q = \kappa_{\text{vague}}^{-1} h_{\text{vague}}^{-1} [h_{\text{reasoning}}(E)] \quad (16)$$

其中： $h_{\text{reasoning}}()$ 为模糊推理函数， $\kappa_{\text{vague}}^{-1}$ 和 $h_{\text{vague}}^{-1}()$ 分别为 κ_{vague} 和 $h_{\text{vague}}()$ 的逆运算。将控制量计算结果输入到自适应模糊逻辑算法中，根据生成控制指令组成结构调整隶属函数的参数或模糊规则的权重，由此得出机器人分拣控制指令的生成结果为：

$$\xi = \sum Q(K_p, K_\theta) \quad (17)$$

按照上述方式，在已知模糊规则的情况下，得出多机械臂工业机器人分拣控制指令的生成结果。

2.4 实现系统多机械臂工业机器人分拣控制功能

在实际的多机械臂工业机器人的动态分拣过程中，货物经过前置分拣系统进行初步分类，并被分配到不同的区域，当货物到达分拣卡点时，机器人分拣系统会自动识别货物信息，根据识别结果根据预设路径动态为每个机械臂分配分拣任务，并计算出最优的分拣路径。多个机械臂会协同工作，它们会根据计算出的路径和分拣指令，精确地移动到货物上方，通过抓取等方式将货物拾起，并准确地放置到指定的分拣区域。在整个分拣过程中，机器人分拣系统会不断地进行实时监控和调整，以确保分拣的准确性和效率。

在实际的分拣控制过程中，将生成的分拣控制指令输入到硬件系统的控制器中，并调整机械臂各关节的驱动电机，以实现机械臂的精确移动，直至到达指定姿态。在实际的分拣控制过程中，若检测到环境中的分拣目标不唯一，则需要对分拣目标的抓取优先级进行计算，计算公式如下：

$$\varphi = \varphi_{\text{emergency}} \times \frac{1}{\varphi_{\text{difficulty}}} \times \varphi_{\text{capacity}} \quad (18)$$

其中： $\varphi_{\text{emergency}}$ 、 $\varphi_{\text{difficulty}}$ 和 $\varphi_{\text{capacity}}$ 分别为订单紧急程度、分拣难度和设备能力匹配度。根据公式 (18) 的计算结果，选择抓取优先级取值最大的分拣目标作为初始目标，按照上述方式确定控制目标、控制量以及控制指令，在保证不与分拣作业环境中障碍物发生碰撞的情况下，规划分拣路线，逐步移动多机械臂工业机器人的末端执行器，直至所有目标均分拣完成。

多机械臂工业机器人分拣控制流程如图 6 所示。

3 系统测试

以测试设计基于自适应模糊逻辑的多机械臂工业机

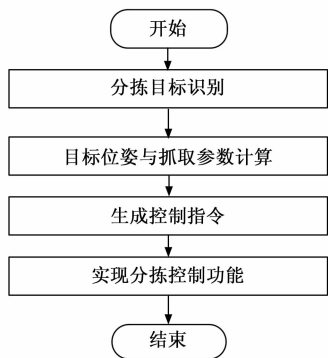


图 6 多机械臂工业机器人分拣控制流程图

机器人分拣控制系统的控制功能及其在分拣工作中的应用效果为目标，设计系统测试实验。根据实验目的将实验分为两个部分，第一部分是对系统的控制功能进行测试，在配置的实验环境中，以多机械臂工业机器人为控制对象，根据分拣任务生成包含控制目标的控制任务，将系统控制作用下的机器人的实际工作数据与设定控制目标进行比对，得出反映控制功能的测试结果。实验的第二部分主要将优化设计系统应用到实际的分拣工作中，通过对分拣速度的测试，得出反映系统应用性能的测试结果。

3.1 选择多机械臂工业机器人控制样机

此次实验选择 MOTOMAN-AR1440 型号的多机械臂工业机器人作为控制对象，该机器人拥有 6 轴垂直多关节设计，负载能力为 12 kg，动态范围为 1 440 mm，可适应多种分拣需求。从组成结构上来看，工业机器人由机械臂、动力以及辅助等模块组成，机械臂包含底座、旋转轴、上臂、下臂、手腕等部分组成，机器人的动力模块为机械臂提供动力，驱动各轴进行旋转和摆动，同时安装减速器，能够通过减速作用，将电机的高速旋转转换为机械臂所需的低速高扭矩运动。选择多机械臂工业机器人最大分拣对象质量为 12 kg，水平臂展最大值为 1 440 m，即最大动作范围为 1 440 m。工业机器人上臂、中臂和手腕的动作范围分别为 $[-80^{\circ}, 80^{\circ}]$ 、 $[-70^{\circ}, 148^{\circ}]$ 和 $[-200^{\circ}, 200^{\circ}]$ ，容许最大力矩为 12.5 N·m，本体和手腕轴的防护等级分别为 IP54 和 IP67。将选择的多机械臂工业机器人控制样机放置到分拣环境中，完成电源线、信号线、通信线的连接，实现控制样机的准备与调试。

3.2 布设分拣环境与分拣目标

选择某物流仓库作为多机械臂工业机器人的分拣环境，要求分拣环境地面平整，且无杂物，在分拣环境地面上设置标识线或地标，以便机器人进行导航和定位。为保证分拣图像的有效采集，为分拣环境提供充足的照明条件。在分拣区域周围设置防护栅栏或其他物理隔离

措施，防止人员误入作业区域。根据物流中心的订单接收情况，准备一定量的分拣目标，将其按照仓库管理规则放置到指定位置上。

此次实验共准备 1 500 件分拣目标，分拣目标类型、形状均存在明显差别。从目标类型来看，涵盖了物流仓库中常见的各类商品，如电子产品类，像手机、平板电脑等；生活用品类，如洗发水、牙膏等；食品类，如饼干、饮料等。在形状方面，有规则形状的物品，如长方体形状的包装盒，正方体形状的货物，圆柱体形状的物品。同时，也存在不规则形状的分拣目标，如外形奇特的工艺品、异形的塑料制品等，以此来全面模拟物流仓库中复杂多样的分拣场景，检验基于自适应模糊逻辑的多机械臂工业机器人分拣控制系统在不同目标类型和形状下的控制功能和应用性能。

3.3 分拣控制硬件系统安装与调试

根据优化设计多机械臂工业机器人分拣控制硬件系统的优化设计结果，将相关设备元件安装到选择的多机械臂工业机器人控制样机上，并对设备元件进行工作参数设置与调试。

将分拣控制器安装到工业机器人控制样机的末端执行臂上，连接机器人本体与控制柜之间的信号线，并根据控制器的电源要求，选择合适的电源线进行连接。逐一测试机械臂的运动功能以及分拣控制作用下末端执行器的动作功能等，确保各项功能正常。分拣控制器的工作电压和频率分别为 220 V 和 60 Hz。另外，工业机器人中安装图像采集器的分辨率为 $1\,280 \times 1\,024$ 像素，其总体视场范围为 64 mm 乘以 48 mm，像素大小达到 $5.2\,\mu\text{m} \times 5.2\,\mu\text{m}$ ，且运行功耗低于 2.25 W。按照上述方式实现所有系统硬件组成元件的安装与调试，保证与工业机器人具有适配度。

3.4 生成工业机器人分拣控制任务

综合考虑分拣目标的布设情况，生成多个工业机器人分拣控制任务，部分任务的生成情况，如表 2 所示。

表 2 工业机器人分拣控制任务生成表

任务编号	控制目标位置/mm	控制目标姿态角		控制目标抓取力/N
		俯仰角/ $^{\circ}$	翻滚角/ $^{\circ}$	
1	(150,220)	15	-5	10
2	(200,180)	-10	12	12
3	(100,250)	25	8	8
4	(230,150)	-20	-15	15
5	(170,200)	5	22	9
6	(210,240)	-5	-8	11
7	(120,190)	30	-12	7
8	(240,160)	-15	18	14

在布设的分拣环境中构建坐标系，得出控制目标位置的具体取值。在实验开始之前，将工业机器人调整至

初始状态，即位置在坐标系的原点位置上，姿态角均为 0° ，抓取力取值为 0 N 。按照上述方式即可得出所有分拣作业任务对应的分拣控制任务生成结果。

3.5 设定自适应模糊逻辑算法运行参数

为保证自适应模糊逻辑算法在多机械臂工业机器人分拣控制系统中的有效运行，对算法的相关运行参数进行设置，设置界面如图 7 所示。

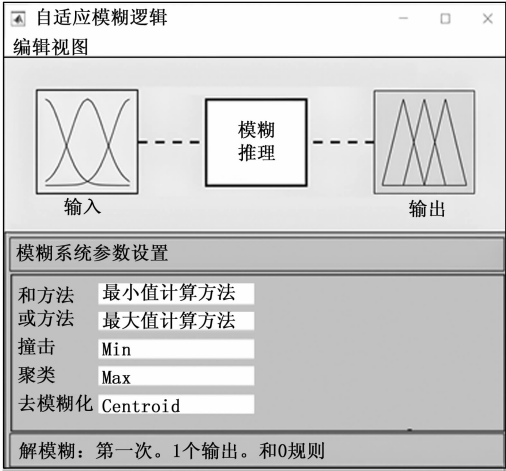


图 7 自适应模糊逻辑算法参数设置界面

借助 Matlab 创建参数设置界面，在界面组件回调函数中，用回调函数把设置参数传递给控制系统。控制系统接收参数后，一旦参数更新，便立即将新参数用于自适应模糊逻辑算法，重新计算控制量并生成控制指令。

3.6 描述系统测试实验过程

使用 Eclipse CDT 开发平台作为基于自适应模糊逻辑的多机械臂工业机器人分拣控制系统软件部分的开发平台，将开发的分拣控制软件接入到选择的多机械臂工业机器人中，并将硬件系统连接到软件运行程序中。通过生成控制任务的输入与系统运行，得出多机械臂工业机器人分拣控制系统的执行结果，如图 8 所示。

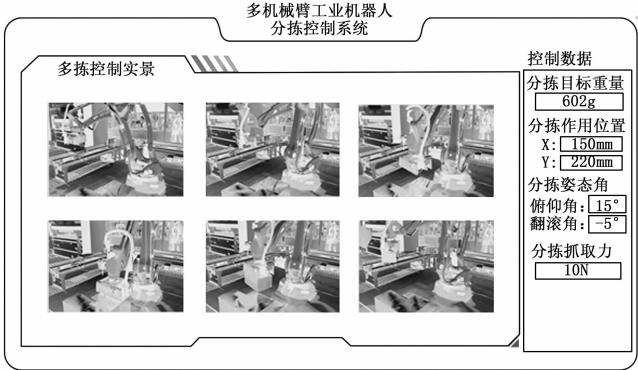


图 8 多机械臂工业机器人分拣控制系统运行界面

按照上述方式完成所有分拣及分拣控制任务，并记录机器人末端执行器与分拣目标的实时状态数据，以此作为反映系统功能的测试结果数据。实验设置文献 [4] 提出的基于虚拟仿真的机器人分拣控制系统和文献 [8] 提出的基于 RBFNN 的机器人分拣控制系统作为对比方法，在相同实验环境下完成系统开发，并作用到机器人中，得出分拣控制任务执行结果。

3.7 设置系统控制效果测试指标

此次实验设置位置控制误差和抓取力控制误差作为系统控制功能的测试指标，位置控制误差的测试结果

$$\epsilon_p = |x_{\text{control}} - x_m| + |y_{\text{control}} - y_m| \tag{19}$$

其中：($x_{\text{control}}, y_{\text{control}}$) 为控制系统作用下工业机器人末端执行机械臂的实际位置坐标。

抓取力控制误差的计算公式为：

$$\epsilon_F = |F_{\text{control}} - F_m| \tag{20}$$

其中： F_{control} 为系统控制下机器人的实际抓取力。最终计算得出位置和抓取力取值越小，证明对应系统的控制功能越优。

另外，系统应用性能的测试指标为分拣速度，该指标的计算公式如下：

$$v = \frac{n_{\text{sorting}}}{t} \tag{21}$$

其中： n_{sorting} 为 t 时段工业机器人的分拣货物数量，计算得出分拣速度越快，证明对应控制系统的应用性能越优。

3.8 系统测试实验结果与分析

3.8.1 系统控制功能测试结果

通过工业机器人实际工作数据的统计与公式 (19) 的计算，得出位置控制误差的测试结果，如图 9 所示。

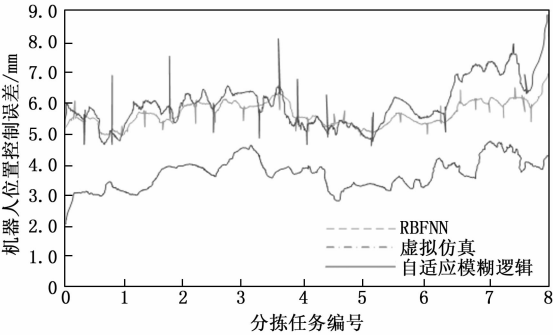


图 9 机器人位置控制误差测试结果

从图 9 中可以直观看出，与两种传统控制系统相比，设计系统的位置控制误差明显降低。说明所设计的系统采用了自适应模糊逻辑算法生成机器人分拣控制指令，该算法在应对复杂的工业环境和多变的工况时，能够更准确地预测和补偿各种干扰因素，从而实现对工业

机器人位置控制的精细调节。这种精细调节不仅提高了系统的稳定性和可靠性，还显著降低了位置控制误差，使得机器人的运动轨迹更加符合预期。

另外，工业机器人抓取力控制误差的测试结果，如表 3 所示。

表 3 工业机器人抓取力控制误差测试数据表

任务编号	RBFNN 方法	虚拟仿真方法	自适应模糊逻辑方法
1	14	14	10
2	12	13	11
3	7	7	8
4	10	12	15
5	12	10	9
6	16	14	10
7	11	8	8
8	12	12	14

由表 3 可知，3 种系统控制下工业机器人的抓取力平均控制误差分别为 11.75、11.25 和 10.63 N，相较于 RBFNN 方法，所提方法的控制误差提升了约 9.53%；相较于虚拟仿真方法，所提方法的控制误差提升了约 5.51%。这表明所设计的系统在抓取力控制精度上明显优于传统系统，显示出其卓越的精确控制能力。

3.8.2 控制系统应用性能测试结果

将 3 个分拣控制系统应用到实际的分拣工作中，通过单位时间内分拣目标数量的统计，得出分拣速度指标的测试对比结果，如图 10 所示。

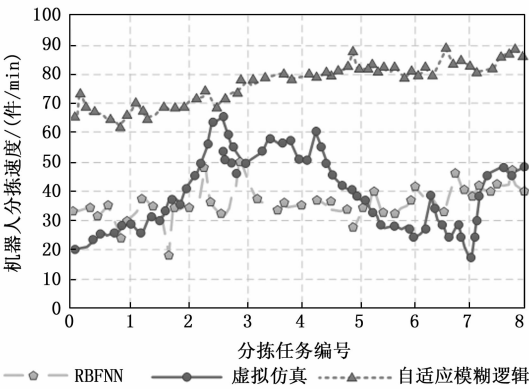


图 10 分拣控制系统应用性能测试对比曲线

从图 10 中可以直观看出，设计系统的分拣速度最高值为 90 min，RBFNN 方法的分拣速度最高值为 50 min，虚拟仿真方法的分拣速度最高值为 66 min，设计系统相对于 RBFNN 方法在分拣时间上的提升百分比约为 44.44%，相对于虚拟仿真方法在分拣时间上的提升百分比约为 26.67%，说明设计系统在单位时间内能够处理更多的物品，从而显著提升整体的生产或配送效率。

4 结束语

多机械臂工业机器人作为一种高效、可靠的自动化机器人系统解决方案，在工业生产中具有广泛的应用前景和重要的应用价值。在分拣领域，通过多机械臂工业机器人的应用，能够大幅提升分拣效率与精确度，尤其适用于处理高速、大批量的分拣任务，有效降低了人工操作的依赖和错误率。在此次研究中，通过自适应模糊逻辑算法的应用优化设计多机械臂工业机器人分拣控制系统，不仅提升了系统的鲁棒性和灵活性，还显著增强了其在面对不同工作环境和分拣需求时的适应能力，具有较高的应用价值。

参考文献：

[1] 王 敏, 蒋金伟, 曹彦陶. 基于改进粒子群的食品分拣机器人动态目标抓取控制方法 [J]. 食品与机械, 2022, 38 (3): 86-91.

[2] 武 毅, 胥 超, 刘力源, 等. 基于多任务转换的冗余度机器人控制算法 [J]. 机械工程学报, 2023, 59 (15): 83-93.

[3] 李云峰, 王 聪, 李玉琴. 多算法融合的并联食品分拣机器人轨迹跟踪控制方法 [J]. 食品与机械, 2024, 40 (4): 72-77.

[4] 丁伟利, 杨 庆, 张 恒. 基于虚拟仿真的龙门机器人板材智能分拣系统及方法 [J]. 高技术通讯, 2023, 33 (6): 630-642.

[5] 肖瑶星, 刘立新, 胡 柳, 等. 基于三维模型的食品分拣机器人抓取控制方法 [J]. 食品与机械, 2023, 39 (4): 77-82.

[6] 韦树成, 莫国志. 基于改进反演控制的食物分拣机器人末端执行器智能控制方法 [J]. 食品与机械, 2022, 38 (12): 73-78.

[7] KHAN S E, DANZIGER Z C. Continuous gesture control of a robot arm: performance is robust to a variety of hand-to-robot maps [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2024, 71 (3): 944-953.

[8] NGUYEN V C, NGUYEN T L, THI H L. A Lyapunov-based model predictive control strategy with a disturbances compensation mechanism for dual-arm manipulators [J]. European Journal of Control, 2024, 75 (1): 1-16.

[9] 迟海波. 选矸机器人手爪机构设计及其分拣功能分析 [J]. 煤炭技术, 2024, 43 (2): 226-230.

[10] 陈东青. 基于 ABB 机器人的柔性分拣系统设计 [J]. 机床与液压, 2024, 52 (5): 101-106.

[11] 苏 建, 慕存强, 任善剑, 等. 基于 NX MCD 的工业机器人视觉分拣数字孪生系统设计 [J]. 机床与液压, 2023, 51 (23): 73-79.

(下转第 160 页)