

# 基于改进贪心算法的工业机器人分拣装配协同控制系统设计

谢雨<sup>1</sup>, 邱伊健<sup>2,3</sup>

(1. 广西工业职业技术学院 装备智造学院, 南宁 530001; 2. 南昌大学 机电工程学院, 南昌 330096;  
3. 江西省科学院 应用物理研究所, 南昌 330096)

**摘要:** 制造业自动化水平的不断提升, 使得工业机器人应用频率随之上升; 工业机器人分拣装配目标众多, 再加之操作环境较为复杂, 导致工业机器人控制难度大幅增加, 故设计基于改进贪心算法的工业机器人分拣装配协同控制系统; 系统硬件单元主要为工业相机设计单元、工业计算机设计单元、霍尔传感器设计单元与协同控制器设计单元组成; 软件模块分为数据通信开发模块、目标工件的识别与定位模块、工业机器人分拣最优路径选择模块与工业机器人装配操作轨迹规划模块 4 个部分; 在工业机器人分拣最优路径选择模块与工业机器人装配操作轨迹规划模块中, 应用改进贪心算法, 通过硬件与软件的共同协作实现了工业机器人分拣装配的协同控制; 实验结果显示: 应用设计系统获得的工业机器人分拣速率为 50 个/min, 分拣出错率最小值为 0.1%, 装配操作轨迹控制结果与最优装配操作轨迹保持一致, 证实了设计系统分拣装配控制性能较佳。

**关键词:** 分拣控制; 工业机器人; 装配控制; 改进贪心算法; 协同控制

## Design of Industrial Robot Sorting and Assembly Collaborative Control System Based on Improved Greedy Algorithm

XIE Yu<sup>1</sup>, QIU Yijian<sup>2,3</sup>

(1. College of Equipment Manufacturing, Guangxi Vocational & Technical Institute of Industry, Nanning 530001, China; 2. Nanchang University, Nanchang 330096, China;  
3. Institute of Applied Physics, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** The automated level in manufacturing industry is continuously promoting, which makes industrial robots increasingly applicable. Industrial robots has the features of multiple sorting and assembly targets and complex operating environments, which makes it difficult to control industrial robots. Therefore, a collaborative control system for industrial robot sorting and assembly based on improved greedy algorithm is designed. The system hardware mainly consists of an industrial camera unit, an industrial computer unit, a Hall sensor unit, and a collaborative controller unit. The software module is divided into four parts: data communication development module, target recognition and positioning module, industrial robot sorting optimal path selection module, and industrial robot assembly operation trajectory planning module. In the latter two modules, an improved greedy algorithm is used to achieve the collaborative control of industrial robot sorting and assembly through the collaboration of hardware and software. Experimental results show by applied this system, the sorting rate for industrial robots is 50 pieces/min, with a minimum sorting error rate of 0.1%. The assembly operation trajectory is consistent with the optimal assembly operation trajectory, confirming that the designed system has excellent sorting assembly performance.

**Keywords:** sorting control; industrial robots; assembly control; improved greedy algorithm; collaborative control

收稿日期: 2024-01-05; 修回日期: 2024-03-11。

基金项目: 2022 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2022KY1292); 江西省科学院包干制基金项目(2023YSBG21016)。

作者简介: 谢雨(1981-), 女, 大学本科, 高级讲师。

通讯作者: 邱伊健(1992-), 男, 硕士, 中级工程师。

引用格式: 谢雨, 邱伊健. 基于改进贪心算法的工业机器人分拣装配协同控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(3): 105-112, 137.

## 0 引言

工业机器人具备高精度、高效率、高可靠性和高安全性等优点,能够极大地提升生产效率和降低生产成本。而随着技术的发展,工业机器人技术也在不断进步,从单一的任务执行向更加智能、协同的方向发展。工业机器人分拣装配协同控制是制造业中重要的领域,研究相关的控制方法可以提高机器人的灵活性、生产效率和质量,推动产业发展。此外,这种研究也可以支撑职业培训体系,提供技术支持和指导,进一步提升培训的质量和效果,从而满足职业教育的需求。

工业机器人分拣装配协同控制是一项技术难度较大的工作,其难点主要集中在机器人之间的协同、人机交互与安全防护、实时通信与信息共享、感知与决策以及系统优化与扩展等方面。为了解决这些难点,需要综合运用机器人技术、人工智能、通信技术等多个领域的知识和技术手段。文献 [1] 针对工业机器人装配效率低、分拣出错率高等问题,基于以太网技术与视觉技术设计了一个新的工业机器人分拣装配控制系统。以以太网为基础,搭建分拣装配控制硬件框架,主要包含 HMI、视觉设备、PLC 等,结合识别算法、PLC 控制优化算法等共同实现工件的正确分拣与高效装配;文献 [2] 以条烟为研究对象,设计了一个新的条烟分拣系统平台。采用 LABVIEW 在传统系统平台基础上二次开发设计系统平台的图像采集模块、图像处理模块、图像模板匹配模块与条烟识别和分拣模块,从而通过模板匹配算法实现了工业机器人的分拣功能;文献 [3] 研究对象为拣研机器人,其分拣性能优劣直接影响着煤的质量。以拣研机器人结构为基础,分析其分拣故障原因,通过演绎法构造分拣故障树,并计算分拣故障树顶事件概率区间参数,以此为依据,对分拣故障树顶事件进行排序,选取拣研机器人分拣最佳策略,实现了拣研机器人的可靠分拣功能。尽管这些方法提供了相应的硬件框架和控制算法,但工业机器人分拣装配控制系统本身具有复杂性。这些方法在设计中可能没有充分考虑多个机器人协同控制、任务分配和路径规划等因素。因此,在实际应用中可能会遇到系统响应速度、稳定性和灵活性等问题,需要更全面地考虑控制系统的复杂性。在该背景下,本文设计基于改进贪心算法的工业机器人分拣装配协同控制系统,希望通过改进贪心算法的应用,提升工业机器人分拣装配的整体性能,为工业自动化发展提供助力。

## 1 工业机器人分拣装配协同控制系统硬件设计

### 1.1 工业相机设计单元

工业相机是工业机器人视觉系统中关键硬件设备,主要承担着图像采集任务。工业相机主要由两部分构成,

分别为摄像机和镜头,在选择过程中,需要考虑焦距、接口、分辨率、景深、光圈等因素。综合上述因素,结合设计系统需求,选取型号 MER-503-36U3M/C 为摄像机,其体积小,搭载了全局曝光的 Sony IMX264 CMOS 感光芯片,使得采集图像质量得以保证。通过 USB3.0 数据接口进行图像数据的传输,确保了图像传输的高效与稳定。MER-503-36U3M/C 不仅具有低噪声、高分辨率、高精度、结构紧凑、高清晰度等优点,还能在各种恶劣环境下正常工作,这使得该摄像机在各种实际应用中都能够表现出色<sup>[4]</sup>。M1224-MPW2 镜头的焦距为 12 mm,采用手动光圈设计,具有低畸变的优点,在分拣和装配任务中,M1224-MPW2 镜头可以精确定位和测量目标对象位置,有效地与摄像机配合,确保图像具有足够的清晰度,帮助设计系统采集到更准确、更清晰的图像<sup>[5]</sup>,使得机器人能够准确地识别目标对象的位置和特征,并执行相应的分拣和装配动作。为此,选择 M1224-MPW2 作为 MER-503-36U3M/C 的配套镜头。

选取摄像机 MER-503-36U3M/C 与镜头 M1224-MPW2 的性能特点和组合方式,使得设计系统在图像数据处理过程能够达到更高的精度和效率。此外,为了满足视觉系统的摄像机安装需求,特别设计加工了一套摄像机安装支架,其整体呈现为框架式结构,具备灵活的移动性能,移动方向为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向,移动范围为  $700\text{ mm} \times 700\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ <sup>[6]</sup>。需要注意的是,为了保证工业机器人机械臂有足够的运动空间,摄像机需要离装配操作台基准面至少 700 mm。

### 1.2 工业计算机设计单元

工业计算机是设计系统的关键硬件装置之一,承担着设计系统的全部运算与存储任务。依据设计系统需求,选取欧姆龙 FH-L550 作为工业计算机,其内部搭载着 Atom 系列 CPU (Intel),利用 Camera Link 接口与 1.1 部分工业相机设计单元直接连接<sup>[7]</sup>。与此同时,FH-L550 内部 IO 板卡直接与协同控制器进行交互,方便工业机器人分拣装配的协同控制。工业计算机 FH-L550 具备丰富的外部接口资源,具体如表 1 所示。

表 1 工业计算机 FH-L550 外部接口资源表

外部接口	接口名称	接口数量/个
协议接口	Ethernet	1
通用输入	I	9
通用输出	O	23
并行输入	I/F	1
串行接口	RS232 9Pin	1
显示器接口	DVI-I	1
高速输出	GO	4
SD Card 接口	SDHC	1
USB 接口	USB2.0host	1
	USB3.0	1

工业计算机外围电路对于整个设计系统的运行和稳定性具有至关重要的影响。外围电路主要包括各种输入输出接口、电源电路、时钟电路等, 其与工业计算机的内部处理器、内存等核心部件相互连接, 共同构成一个完整的体系。为了通过外围电路的布局、连接方式和元件安装位置, 为设计人员提供了指导和参考, 确保外围电路的稳定性和可靠性<sup>[8]</sup>, 设计工业计算机 FH-L550 外围电路, 如图 1 所示。

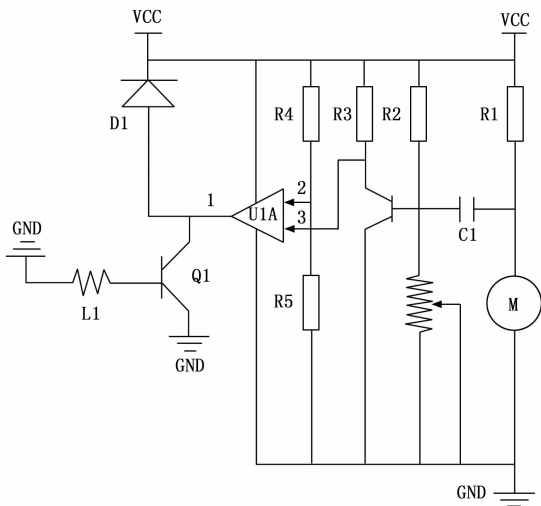


图 1 工业计算机 FH-L550 外围电路设计图

在工业计算机应用前, 多次调试其外围电路 (图 1), 优化系统性能、降低干扰、提高信号完整性, 以此保障工业计算机的稳定运行, 为设计系统分拣装配协同控制提供支撑。

### 1.3 霍尔传感器设计单元

霍尔传感器在工业机器人分拣装配协同控制中发挥着重要的作用, 被用于检测工业机器人机械臂的运动和位置, 以确保工业机器人对于目标工件的精确控制和操作。在分拣机器人中, 霍尔传感器可以检测目标工件的位置和数量<sup>[9-11]</sup>, 帮助工业机器人准确抓取和放置目标工件。为此, 设计霍尔传感器设计单元, 以其高精度、高灵敏度的优势使得工业机器人能够更加精准的实现分拣装配的控制和操作, 从而提高工业生产效率 and 产品质量。

霍尔传感器在安装完毕后, 需要利用示波器对其进行观察与调试, 直至其反馈出连续、稳定的信号为止, 此时才能证明霍尔传感器安装成功, 具体如图 2 所示。

在图 2 的现场, 按照下述流程调整霍尔传感器。

- 1) 初始化连接: 将霍尔传感器与相应的控制器连接, 确保电源供应和数据线正常连接。
- 2) 确定工作模式: 常见的工作模式包括开关模式、线性模式和角度模式。考虑到设计系统需要实现工业机器人分拣装配协同控制, 要对物体位置、角度或位置变

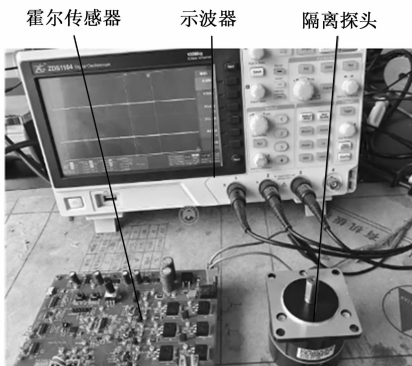


图 2 霍尔传感器安装调试示例图

化精确的控制和测量。因此, 选择的工作模式为线性模式。

3) 位置校准: 通过旋转或移动传感器以调整其零位和灵敏度。

4) 测试信号输出: 通过在图 2 中, 将磁铁靠近和远离传感器生成磁场变化, 观察和记录霍尔传感器的输出信号, 实现对物体位置、角度或位置变化的精确控制。

5) 数据分析和调整: 基于从传感器获得的输出数据, 进行数据分析和评估。确认传感器的响应符合预期, 并根据需要进行进一步的调整。

6) 重复测试和验证: 多次测试和验证传感器的稳定性、重复性和准确性, 确保传感器在实际应用中的可靠性和精确性。

### 1.4 协同控制器设计单元

S7-300 协同控制器具有高性能、模块化设计、强大的通信能力、丰富的输入输出接口、可靠性和安全性、易于编程和维护的优势。协同控制器是设计系统的核心硬件, 因此, 此研究选取 S7-300 作为协同控制设备, 其是德国西门子公司生产的一款可编程控制器, 如图 3 所示。

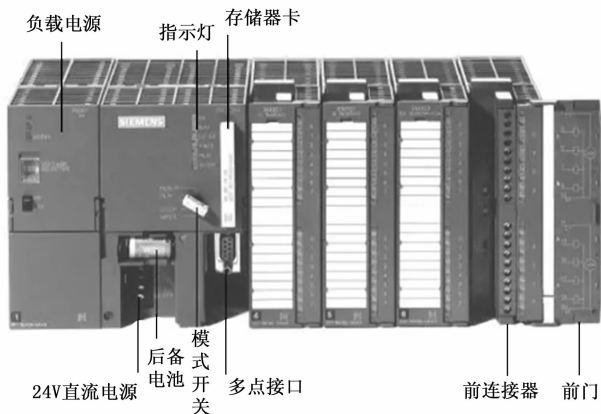


图 3 S7-300 协同控制器结构图

S7-300 协同控制器具有强大的综合性能和广泛的功能，能够满足复杂的控制需求，其稳定可靠的运行性能确保了工业机器人系统的正常运行和高效生产。此外，S7-300 协同控制器具有良好的扩展性，可以根据需要进行扩展和定制<sup>[12]</sup>，以满足不断变化的控制需求。开发和支持社区的活跃度为工程师和开发人员提供了丰富的资源，能够更好地开发、调试和优化工业机器人的协同控制系统。因此，S7-300 协同控制器是实现工业机器人分拣装配协同控制的理想选择，能够提升系统的精确性、稳定性和生产效率。在 S7-300 协同控制器实际应用过程中，需要根据设计系统需求对其引脚进行自定义，具体如表 2 所示。

表 2 S7-300 协同控制器引脚自定义表

代码	引脚自定义	功能描述
DI	数字输入	接收来自传感器等数字信号的数据,实时获取环境和物料信息,触发相应任务执行
DO	数字输出	向执行器发送数字信号命令,控制执行器的启动、停止等操作,控制机器人的动作
AI	模拟输入	接收模拟信号,如温度、压力等模拟量信号,反馈环境参数,如工作区域温度、物料重量等数据
AO	模拟输出	向执行器发送模拟信号控制,如电机转速、阀门开启程度,精准控制机器人的运动和工作过程
Start/Stop	启动/停止	控制整个系统的开关,确保系统便捷开始或结束工作,实现精准的任务控制
Run/Stop	运行/停止	控制系统的运行状态,保证机器人的工作状态顺利进行
MPI/DP	接口	支持 MPI/DP 通讯接口,用于与其他设备或系统数据交换和通信
RS485	接口	支持 RS485 通讯接口,用于与其他设备或系统数据交换和通信

根据上述引脚设定，本文设计了图 4 所示的引脚分布图，以此优化工业机器人分拣装配协同控制效果。

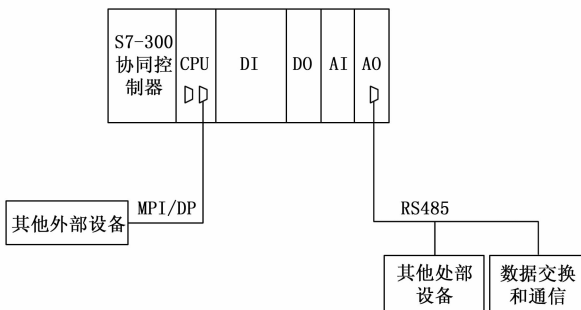


图 4 更新后的引脚分布图

## 2 工业机器人分拣装配协同控制系统软件设计

上述过程完成了系统硬件的基本设计，主要包括工业相机设计单元、工业计算机设计单元、霍尔传感器设计单元与协同控制器设计单元，但是仍然无法实现工业机器人分拣装配的有效控制，故以设计硬件设备为基础，开发系统软件模块。

### 2.1 数据通信开发模块

数据通信开发模块是实现设计系统通信的关键所在。设置 S7-300 协同控制器为数据通信客户端提供数据，分拣装配软件作为数据通信服务器，通过发送 Socket 实现系统数据的相互传输与交互。

数据通信客户端——S7-300 协同控制器的通信编程由下位机实现，需要对工业机器人通信参数进行相应的配置，主要包括 IP Adress、Port、Time Out 与 Access Name。其中，“IP Adress”参数配置时，只需将数据通信服务器端 IP 地址（分拣装配软件所在计算机 IP 地址）填入即可；“Port”参数配置时，只需将 Socket 通讯端口填入即可。但是，需要注意的是，数据通信客户端——协同控制器与数据通信服务器端——分拣装配软件的“Port”参数需与其保持一致；“Time Out”参数是指非阻塞模式背景下，Socket 通讯的延迟时间，在此时间段内，工业机器人协同控制器会对设计系统全部设备进行扫描，以扫描信息为依据，判定是否有数据发送过来，若是存在发送数据，及时对其进行接收<sup>[13]</sup>。若是不存在发送数据，协同控制器会自动执行下一条指令；“Access Name”参数实质上是控制器端 Socket 的 ID，即 Socket 的名称。当上述通信参数配置完成后，需要在工业机器人示教器上完成客户端的编程。

通信打开与关闭指令如下式所示：

$$\begin{cases} \text{SocketOpen} & \text{Str}_1 & \text{Type} = \text{Client} // \text{通信打开} \\ \text{SocketClose} & \text{Str}_1 // \text{通信关闭} \end{cases} \quad (1)$$

式中，Str<sub>1</sub> 为当前时刻打开的 Socket 端口名称，其主要存储在变量（字符串型）S001 中，与“Access Name”参数相同；Type 为协同控制器指定对象——客户端或者服务器端，设计系统选择的是客户端。

数据发送与接收指令如下式所示：

$$\begin{cases} \text{SocketEnd} & \text{Str}_1 & \text{Str}_2 & B_1 // \text{数据发送} \\ \text{SocketRecv} & \text{Str}_1 & \text{Str}_2 & B_1 // \text{数据接收} \end{cases} \quad (2)$$

式（2）中，Str<sub>2</sub> 为变量（字符串型）S002 中存储的字符串，其字节需小于或者等于 255 个；B<sub>1</sub> 为数据发送与接收操作是否超时。

服务器端——分拣装配软件的通信编程由上位机实现，承担着服务器端与客户端之间的通信。在服务器端界面中，若服务器建立完成后，及时对其进行监听，并

在状态栏中显示“等待连接……”;若服务器与协同控制器连接成功,在状态栏中显示“连接成功,可以进行信息的传递”;若服务器与协同控制器断开连接,在状态栏中显示“断开连接”<sup>[14]</sup>。通过上述这种状态栏显示形式,可以清晰地观察到服务器端的通信链路连接情况,以此为基础,即可对其通信过程进行实时的操作与控制。除此之外,服务器端——分拣装配软件界面下方还配备了手动调试区与坐标选择区。其中,可选择坐标系主要为视觉坐标系“VCS”、机器人关节坐标系“ACS”与机器人直角坐标系“KCS”,根据选择坐标系的不同,在手动调试区选择与添加输入信息,从而提升设计系统的协同控制性能。

上述过程完成了设计系统数据通信模块的开发与说明,为设计系统数据传输与交互提供有效地保障。

### 2.2 目标工件的识别与定位模块

以 1.1 节设计的工业相机采集的目标工件实时图像为基础,将其作为目标工件的识别与定位模块的处理对象,通过尺度不变特征转换(SIFT, scale invariant feature transform)算法和仿射变换技术的融合应用,共同完成目标工件的识别及其定位,为后续分拣装配协同控制提供一定的便利。

加载模板图像,提取其与实时图像的特征,通过特征匹配识别目标工件,再建立模板图像与实时图像的点位仿射关联关系,获取目标工件的中心坐标,从而完成目标工件的定位<sup>[15]</sup>。依据上述描述内容,制定目标工件识别与定位程序,具体如图 5 所示。

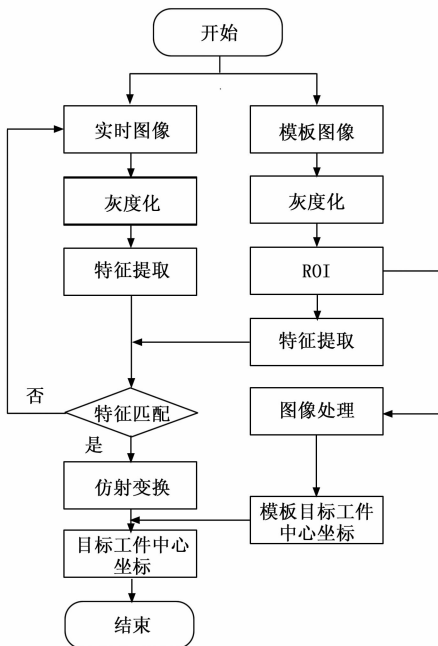


图 5 目标工件识别与定位程序图

如图 5 所示,设置模板图像与实时图像为  $I(x,y)$  与  $f(x,y)$ ,应用 SIFT 算法提取其特征,并以此为基础匹配图像特征<sup>[16]</sup>,完成目标工件的识别。模板图像与实时图像特征提取过程如下所示:

$$\begin{cases} \alpha_I = \frac{I(x,y) * G(x,y,\sigma)}{2\pi\sigma^2} \cdot e^g \\ \alpha_f = \frac{f(x,y) * G(x,y,\sigma)}{2\pi\sigma^2} \cdot e^f \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中,  $\alpha_I$  与  $\alpha_f$  为模板图像与实时图像的特征提取结果;  $G(x,y,\sigma)$  为高斯核函数;  $\sigma$  为尺度坐标;  $e^g$  与  $e^f$  为模板图像与实时图像特征提取的辅助因子。

以式(3)提取的图像特征为基础,计算两者之间的相似程度,以此为基础,识别实时图像中的目标工件,表达式为:

$$\begin{cases} \delta(I,f) = \frac{\alpha_I \cap \alpha_f}{\alpha_I \cup \alpha_f} \\ \delta(I,f) \geq \hat{\beta} \quad f(x,y) \text{ 中存在目标工件} \\ \delta(I,f) < \hat{\beta} \quad f(x,y) \text{ 中未存在目标工件} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中,  $\delta(I,f)$  为模板图像特征  $\alpha_I$  与实时图像特征  $\alpha_f$  之间的相似程度;  $\hat{\beta}$  为目标工件识别的阈值。

在分拣和装配任务中,目标对象的姿态(如旋转角度)可能影响到后续操作的准确性。利用仿射变换可以根据实时图像中目标对象的状态调整模板图像,使其与实际情况更加匹配,并实现精确的姿态校准。因此,以特征匹配后的模板图像与实时图像为依据,应用仿射变换技术建立模板图像与实时图像的点位仿射关联关系,表达式为:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \chi \begin{pmatrix} \cos\varphi & \\ & \sin\varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_y \end{pmatrix} \quad (5)$$

式(5)中,  $\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix}$  为实时图像中的匹配点;  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  为模板图像中的匹配点;  $\chi$  为图像比例缩放因子;  $\varphi$  为图像旋转角度;  $\begin{pmatrix} \eta_x \\ \eta_y \end{pmatrix}$  为图像平移量。

将已知的模板图像目标工件中心坐标  $(x_o, y_o)$  代入公式(5)中,即可获得目标工件的中心坐标  $(x'_o, y'_o)$ ,为后续研究进行提供支撑。

### 2.3 工业机器人分拣最优路径选择模块

以上述获取的目标工件识别与定位结果为依据,应用改进贪心算法选择工业机器人分拣最优路径,并将其输入至协同控制器中,从而实现了工业机器人分拣有效的控制。具体步骤如下。

步骤 1: 定义问题。该步骤需要明确分拣任务的起点和终点、待分拣物品的位置分布等。确定目标函数,即需要优化的标准。

通过工业机器人抓取策略相关探讨结果可知,分拣

工作存在一个优化抓取和放置顺序的问题, 而找到这个最优的顺序是提高机器人分拣效率的关键<sup>[17]</sup>。为了更好地理解和解决这个问题, 将其转化为一个等效函数, 表示为:

$$V_F = \frac{1}{d_{01} + \sum d_{ij} + \sum d_{ji} + d_{n1}} \quad (6)$$

式(6)中,  $V_F$  为工业机器人分拣效率;  $d_{01}$  为工业机器人执行末端位置到第一个目标工件抓取位置的水平距离;  $d_{ij}$  为第  $i$  个目标工件到其第  $j$  个放置点的水平距离;  $d_{ji}$  为第  $j$  个放置点到第  $i$  个目标工件的水平距离;  $d_{n1}$  为第  $n$  个放置点到机器人执行末端位置的水平距离。

以工业机器人分拣效率最大化为目标, 基于公式(6)构建数学模型来描述工业机器人分拣最优路径选择问题, 表达式为:

$$\max V_F = \max \left\{ \frac{1}{d_{01} + \sum d_{ij} + \sum d_{ji} + d_{n1}} \right\} \quad (7)$$

步骤 2: 构建图模型。将分拣场景抽象为一个有向图。每个节点表示待分拣物品的位置, 边表示两个位置之间的移动代价。

步骤 3: 初始化路径。随机选择一个节点作为起点, 并初始化路径为只包含起点的列表。

步骤 4: 选择下一个节点。从当前路径的最后一个节点开始, 根据贪心原则选择下一个可达的节点。

贪心原则为选择距离最短的节点。具体而言为, 在该过程中, 在每一步选择下一个要抓取的目标工件中, 计算出每个目标工件的优先级, 并根据优先级从高到低依次选择目标工件。优先级的计算可以根据目标工件的位置、重量、大小等因素来决定, 表达式为:

$$\lambda_i = \frac{d\{(x'_o, y'_o), (x_a, y_a)\}}{m_i \times v_i} \quad (8)$$

式(8)中,  $\lambda_i$  为第  $i$  个目标工件的优先级;  $d\{(x'_o, y'_o), (x_a, y_a)\}$  为目标工件位置与机器人的距离;  $m_i$  为目标工件的重量;  $v_i$  为目标工件的大小。

步骤 5: 更新路径。将选择的下一个节点添加到路径列表中, 形成更新后的路径。

步骤 6: 检查终止条件。根据机器人的路径和抓取的物品, 应用公式(6)计算出分拣效率。如果分拣效率较高, 则转到步骤 9; 如果分拣效率不高, 转到步骤 4。

步骤 7: 评估路径。根据目标函数对路径进行评估, 计算当前分拣效率。

步骤 8: 更新最优路径。如果当前路径的评估结果优于之前记录的最优路径, 则更新最优路径以记录当前找到的最优解。具体更新过程为通过回溯和剪枝改进贪心算法, 可以在搜索过程中及时发现不合理的路径, 并

避免继续沿着不优的路径进行搜索, 从而提高寻找最优路径的效率。

初始化: 假设给定一个起始节点作为当前节点, 并将其设置为已访问。

1) 回溯和选择: 从当前节点开始, 按照贪心策略选择下一个可行节点。若找到一个可行节点, 则将其添加到当前路径中。如果当前节点的所有邻居节点都被访问过或不存在可行的邻居节点, 则进行回溯操作。

2) 回溯: 回溯是指退回到前一个节点, 以重新选择另一个可行的节点。在回溯过程中, 将当前节点标记为未访问状态, 并将其从当前路径中移除。回溯到前一个节点后, 尝试选择其他可行的节点, 并将其添加到当前路径中。

3) 路径评估: 当回溯操作无法再找到可行节点时, 进行路径评估。计算当前路径的代价(长度)并与之前记录的最优路径进行比较。

路径代价计算公式为:

$$\text{cost} = \text{path}_{\text{length}} + \text{heuristic} \quad (9)$$

式(9)中,  $\text{cost}$  为路径的综合代价;  $\text{path}_{\text{length}}$  为当前路径的总长度, 即工业机器人分拣经过节点的累计距离;  $\text{heuristic}$  为启发函数值。

4) 更新最优路径: 如果当前路径的评估结果优于之前记录的最优路径, 即代价更低和效果更好, 则更新最优路径以记录当前找到的最优解。

5) 剪枝: 在执行回溯后重新选择路径的过程中, 当当前路径的长度已经超过之前记录的最优路径长度时, 认为当前路径无法找到更优的解。在这种情况下, 可以进行剪枝操作, 即放弃继续向下搜索的可能性, 并回退到前一个节点。

步骤 9: 输出结果。将最优路径作为工业机器人分拣的最优路径, 执行对应的分拣操作。

## 2.4 工业机器人装配操作轨迹规划模块

在工业机器人分拣装配协同控制中, 分拣最优路径确定目标工件, 而装配操作轨迹是指完成所有装配任务的一系列行为集合。工业机器人装配操作轨迹规划主要是根据工业机器人当前状态与初始装配策略, 衡量所有装配任务是否存在冲突情况, 在避免冲突前提下, 以装配操作轨迹最短为目标, 选择合适的装配操作轨迹, 以此来实验理想的工业机器人装配要求。

工业机器人装配作业采用四元组表示, 具体如下式所示:

$$L = [S, A, P, R] \quad (10)$$

式(10)中,  $L$  为工业机器人装配作业;  $S$  为机器人装配系统的状态空间;  $A$  为机器人装配行动集合;  $P$  为机器人装配状态转移函数;  $R$  为机器人装配操作的立即

报酬。

将机器人装配系统状态空间到装配行动集合之间的映射称为策略,记为  $\tau_n: S \rightarrow A$ 。在多个装配路径点环境状态下,利用行动值函数寻找贯穿最短装配路径的最优策略,表达式为:

$$\tau^* = \operatorname{argmax}\{R + \gamma P \times V^*\} \quad (11)$$

式(11)中,  $\tau^*$  为最短装配路径对应的最优策略;  $\gamma$  为最优策略寻找因子;  $V^*$  为工业机器人装配行动值函数。

如式(11)所示,装配行动值函数由工业机器人装配路径决定<sup>[18]</sup>,通过贪婪式搜索方式对装配路径进行不断的更新与寻优,表达式为:

$$V^* = \frac{D_{i,i+1} \times E^*}{\zeta} \quad (12)$$

式(12)中,  $D_{i,i+1}$  为相邻装配路径点之间的距离;  $E^*$  为单位装配路径的行动值;  $\zeta$  为装配路径更新系数。

当公式(12)达到最小值时,将其输入至式(11)中即可获得最优策略,从而得到机器人装配操作轨迹的最优规划结果,反馈给协同控制器,即可实现工业机器人装配的有效控制。

综上所述,在改进贪心算法的应用下,实现了工业机器人分拣装配的协同控制,为工业机器人后续发展与应用提供帮助。

### 3 设计系统应用性能测试

设置文献[1]融合视觉和以太网技术的工业机器人分拣装配控制系统、文献[2]视觉引导的机器人条码分拣系统与文献[3]基于故障树的柔索驱动拣研机器人系统为对比系统1、对比系统2与对比系统3,联合设计系统共同进行对比测试,以此来验证设计系统的应用性能。

#### 3.1 实验环境搭建

选取某一型号工业机器人作为实验对象,联合其他硬件设备共同搭建工业机器人分拣装配协同控制实验环境,具体如图6所示。

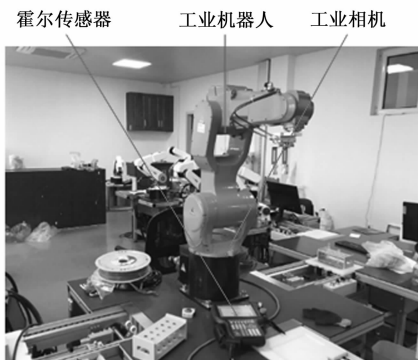


图6 实验环境示意图

如图6所示,实验环境中主要包括工业机器人、传感器、控制器与相应的软件等。需要注意的是,选择的工业机器人必须合适,并对其进行精确的建模和编程。机器人的动作和行为应该能够被精确地控制和调整,以满足分拣和装配的需求。传感器主要是检测和识别物料、零件和工具等物品。这些传感器应该能够准确地检测物品的位置、大小、形状和质量等参数,以便机器人可以准确地抓取和放置物品。此外,还需要使用控制器来协调和控制机器人的行为。控制器应该能够根据当前的任务和环境条件,调整机器人的动作和行为,以确保分拣和装配的准确性和效率。

由于对比系统1、对比系统2与对比系统3应用于不同的领域,其实现方法和目标存在显著差异。因此,在进行对比分析时,只执行其分拣控制时的算法,即对比系统1执行PLC控制优化算法、对比系统2执行模板匹配算法、对比系统3执行故障树算法,将实验对象和环境都统一为图6进行实验。首先以敏感性为指标,评估不同系统的敏感程度。实验结果如图7所示。

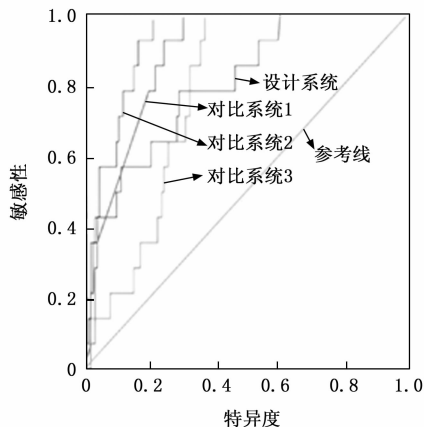


图7 敏感程度分析结果

由图7可知,执行4种系统的对应算法,得到的敏感程度都相对较低,可以满足实验需求。因此,执行不同系统的算法能够根据任务需求和环境条件,调整工业机器人的动作和行为,以确保实验的顺利进行,为后续对比提供了基础。

#### 3.2 工业机器人分拣控制性能分析

工业机器人分拣控制性能主要由工业机器人分拣速率与分拣出错率来反映。其中,工业机器人分拣速率如图8所示。

如图8所示,随着分拣时间的不断增加,目标工件分拣数量也呈现着不断上升的趋势。在相同时间背景下,应用设计系统获得的目标工件分拣数量均大于对比系统1、对比系统2与对比系统3,其工业机器人分拣速率达到了50个/min。

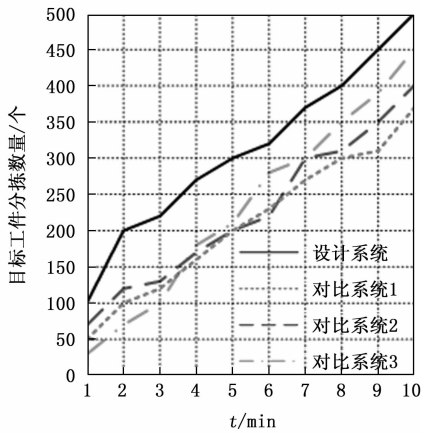


图 8 工业机器人分拣速率示意图

为了保证实验的广泛性，设定不同物体形状、不同物体大小、不同颜色物体、不同重量的物体、不同摆放姿态、不同物体表面特征、不同光照条件、不同速度要求、物体堆叠和长时间运行 10 种工况通过实验获得工业机器人分拣出错率。实验期间部分现场结果如图 9 所示，数据量化结果如表 3 所示。

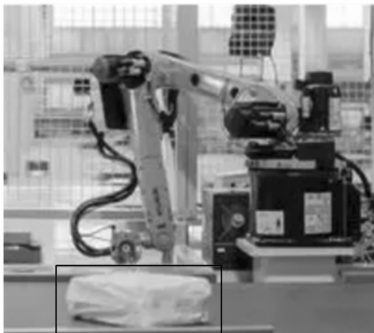


图 9 工业机器人分拣测试

表 3 工业机器人分拣出错率示意表 %

工况	设计系统	对比系统 1	对比系统 2	对比系统 3
1	1.5	3.5	6.9	9.2
2	1.3	4.6	7.4	10.1
3	0.9	6.9	5.1	5.3
4	2.3	5.2	3.6	4.1
5	1.8	4.4	4.8	6.8
6	1.4	3.0	5.5	6.6
7	0.5	3.6	7.7	7.1
8	0.3	4.8	6.0	7.5
9	0.1	5.2	5.3	8.0
10	1.4	5.1	6.1	4.0

如表 3 所示，在不同实验工况背景下，应用设计系统获得的工业机器人分拣出错率均低于对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3，最小值达到了 0.1%。

### 3.3 工业机器人装配控制性能分析

工业机器人装配控制性能主要由工业机器人装配操作轨迹来显示，具体如图 10 所示。

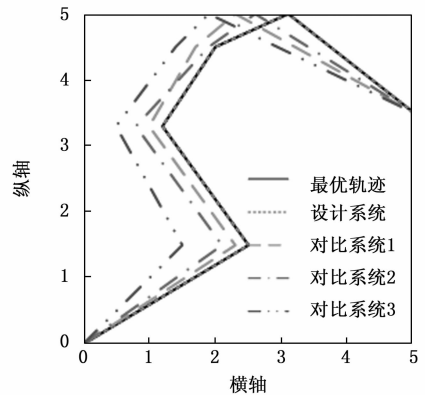


图 10 工业机器人关节装配操作轨迹示意图

如图 10 所示，应用设计系统获得的工业机器人装配操作轨迹与最优装配操作轨迹保持一致，而对比系统 1、对比系统 2 与对比系统 3 应用后获得的工业机器人装配操作轨迹与最优装配操作轨迹存在着一定的偏差，并且装配操作路径长度均大于设计系统，表明设计系统工业机器人装配控制性能更佳。

### 4 结束语

随着工业 4.0 和智能制造的不断发展，工业机器人分拣装配协同控制要求逐渐提升，成为现代制造业中的重要研究课题之一。同时，这种协同控制方式也是促进工业自动化和智能制造快速发展的关键手段，为未来的制造业带来更多的创新和发展机会。因此，设计基于改进贪心算法的工业机器人分拣装配协同控制系统。实验结果表明，设计系统有效提升了工业机器人分拣、装配的控制性能，有助于为工业机器人后续应用提供参考。

#### 参考文献：

[1] 苏建, 李在娟. 融合视觉和以太网技术的工业机器人分拣装配控制系统设计 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (24): 119-123.

[2] 葛新锋, 孙书情, 秦涛, 等. 视觉引导的机器人条烟分拣系统设计与实现 [J]. 包装工程, 2022, 43 (7): 238-243.

[3] 乔心州, 武琛琛, 刘鹏, 等. 基于故障树的柔索驱动拣研机器人系统分拣可靠性研究 [J]. 工矿自动化, 2022, 48 (8): 107-113.

[4] 商德勇, 黄云山, 张天佑, 等. Delta 煤研分拣机器人实验平台设计 [J]. 煤炭技术, 2023, 42 (7): 136-139.

(下转第 137 页)