

基于 OMRON 视觉的工业机器人 分拣控制系统设计

梁倍源¹, 陈路²

(1. 广西工业职业技术学院, 南宁 530001;

2. 河北建筑工程学院, 河南 南阳 075000)

摘要: 工业机器人在分拣过程中, 目标物体可能存在各种形状、尺寸和外观变化, 同时还可能受到遮挡和光照条件的影响, 使得目标的检测和识别复杂, 导致分拣控制功能和应用性能差; 为此, 设计了基于 OMRON 视觉的工业机器人分拣控制系统; 采用 OMRON 视觉传感器、机器人分拣控制器和驱动器, 完成分拣控制硬件系统设计; 利用 OMRON 视觉, 采集工业机器人分拣目标图像, 通过直方图均衡化和滤波去噪, 完成初始分拣目标图像的预处理; 提取工业机器人分拣目标的轮廓特征, 通过特征匹配确定分拣目标类型, 得出位置、几何结构等空间参数的检测结果; 最终通过控制参数计算、工业机器人位姿识别以及控制量求解等步骤, 实现系统的分拣控制功能; 通过系统测试实验表明, 设计系统的抓取位置控制误差和分拣目标位置控制误差分别为 0.8 mm 和 0.7 mm, 分拣对象表面磨损量较小, 具有较好的分拣控制功能和应用性能。

关键词: OMRON 视觉; 工业机器人; 分拣控制系统

Design of Industrial Robot Sorting Control System Based on OMRON Vision

Liang Beiyuan¹, Chen Lu²

(1. Guangxi Vocational & Technical Institute of Industry, Nanning 530001, China;

2. Hebei University of Architecture, Nanyang 075000, China)

Abstract: During the sorting process of industrial robots, target objects perhaps have various shapes, sizes, and appearance changes, which are affected by occlusion and lighting conditions, making target detection and recognition complex, and resulting in poor sorting control functions and application performance. For this purpose, an industrial robot sorting control system based on OMRON vision was designed. The sorting control hardware system was achieved by using the OMRON visual sensors, robotic sorting controllers, and drivers. The OMRON vision was used to collect the sorting target images of the industrial robot, the sorting target images were preprocessed through the histogram equalization and filtering denoising. The contour features of the industrial robot's sorting targets were extracted, and the type of sorting target was determined through the feature matching, the detection results of spatial parameters such as position and geometric structure were obtained. Finally, the sorting control function of the system was achieved through the steps such as control parameter calculation, recognition of the industrial robot's pose, and calculation of control quantities. The testing experimental results show that the grab position control error and sorting target position control error of the designed system are 0.8mm and 0.7mm, respectively. The surface wear of sorting objects is relatively small, and it has good sorting control function and application performance.

Keywords: OMRON vision; industrial robot; sorting control system

0 引言

工业机器人是专用于工业生产线上执行重复性、高精度和高效率任务的机器人系统。它们通常由机械臂、传感器、控制系统和执行器等组成, 能够进行各种操作, 在制造业中得到了广泛应用。工业机器人能够提高生产效率、质量和一致性, 减少人力成本和人员受伤风险, 为企业带来可观的经济效益和竞争优势。分拣是工业机器人的重要

工作内容之一, 分拣是将货物按种类、出入库的先后次序分类堆放。分拣作业是一项完善物流服务、支持物流服务的储备工作, 也是物流企业中各物流企业之间进行竞争、提高自身经济效益的一种必然发展。然而, 在工业机器人的分拣作业中, 由于目标对象的形状、大小、外观等会发生改变, 且易受遮挡、光线等因素的干扰, 造成了分拣作业的复杂性, 从而降低了分拣作业的有效性和实用性。因此, 对工业机器人分拣控制进行研究具有重要意义。

收稿日期: 2023-06-29; 修回日期: 2023-08-09。

基金项目: 2020 年度广西高校中青年骨干教师科研基础能力提升项目(2020KY39012)。

作者简介: 梁倍源(1980-), 男, 大学本科, 工程师。

引用格式: 梁倍源, 陈路. 基于 OMRON 视觉的工业机器人分拣控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(7): 105-111.

文献 [1] 提出了基于贪心策略的直角坐标机器人动态分拣规划与控制方法。通过构建直角坐标下的机器人运动学模型,设计时间窗口,将输送带上连续运动的目标物进行区域划分,并运用贪婪策略,对相同时间窗口中的目标物进行分类,从而产生对应的控制指令,完成分拣操作。文献 [2] 提出了基于 PLCopen 标准的工业机器人运动控制方法。以 PLCopen 为基础,构建适用于各种类型工业机器人的通用运动控制系统,实现多关节机器人的正反运动学求解、直线、圆弧插值,最大限度地保障了机器人的分类作业连续性。然而,上述分拣控制系统无法准确抓取分拣对象,分拣目标位置与实际位置的误差较大,并且会对分拣对象造成磨损,控制效果差。

OMRON 视觉技术是一种新型的机器视觉技术,利用 OMRON 视觉技术对工业机器人分拣控制系统进行设计,以期能够提升工业机器人的分拣控制效果。

1 工业机器人分拣控制硬件系统设计

此次工业机器人分拣控制系统由硬件系统和软件系统两个部分组成,其中,硬件系统主要为软件功能的实现提供支持,而软件功能主要是生成控制程序,从而完成系统的分拣控制任务。在此次硬件系统的设计中,采用视觉传感器作为 OMRON 视觉技术的执行元件,利用分拣控制器和驱动器设备,在保证硬件设备之间适配性的同时,提高系统的运行效率。

1.1 OMRON 视觉传感器

为保证 OMRON 视觉技术在工业机器人分拣控制系统中能够成功运行,选择 OMRON 视觉传感器作为硬件支持,其内部结构如图 1 所示。

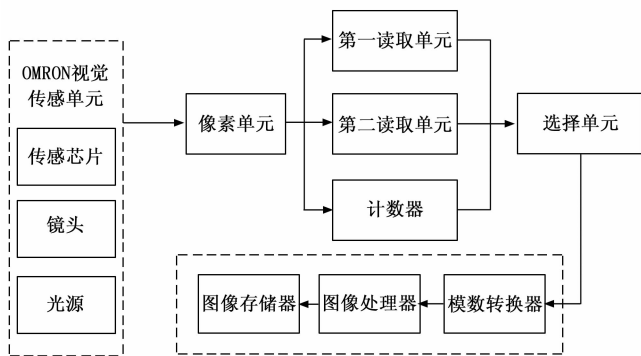


图 1 OMRON 视觉传感器内部结构图

从图 1 中可以看出,设计的 OMRON 视觉传感器由相机、镜头、光源等部分组成,其中相机的作用是将输入的光信号转换成电信号输出,在设计工作中,为保证 OMRON 视觉传感器能够更好地处理镜头采集的光学信息,额外添加一个滤光镜,将其与传感器内部镜头相连。在机器视觉系统中,光学透镜的主要功能是利用光束调制将目标光线折射到照相机感光传感器的光敏表面,并由传感器将光信号转化为电信号,经过进一步的处理后,输出数字图

像。与传统镜头相比,OMRON 视觉传感器中使用的镜头具有图像采集精度高、分辨率高、畸变小等特点,选择镜头时需考虑到的参数主要有接口类型、焦距、光圈、靶面尺寸等。在分拣控制系统中,通过选择特殊的照射角度、适度的光照强度、合适的光照波长或特定的形状的照射光源进行照射,其目的是使所拍摄物料需要检测的特征部分与不重要的特征部分之间有最大的差异。为降低环境光对视觉成像结果质量产生的影响,选择 LED 光源,并以背光方式将其安装在 OMRON 视觉传感器中,采用电源为 24V 的电压供电,灯光为淡蓝色,可有效防止因外部光照不足而导致的拍摄效果^[3]。两盏灯分别装在输送机两边,与垂直方向成 30 度角,保证了足够的照明。除基本组成元件外,为保证 OMRON 视觉传感器与其他系统硬件设备之间的连接度,需调整 OMRON 视觉传感器的输出线路,调整结果如图 2 所示。

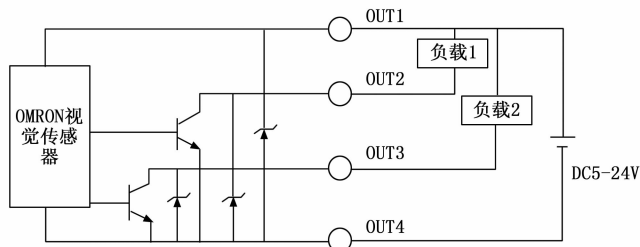


图 2 OMRON 视觉传感器输出电路图

在 OMRON 视觉传感器实际运行过程中,采用连续触发方式,即传感器可以连续采集图像,输出图像格式与大小均相同。

1.2 机器人分拣控制器

机器人分拣控制器是工业机器人分拣控制系统控制指令的执行元件,分拣控制器的目的是保证控制器能够直接处理 OMRON 视觉传感器的输出数据,且控制器输出的控制指令能够直接作用在工业机器人的末端执行器上。在设计控制器中设置采用两种不同的通信通道,一种是以以太网通讯方式,另一种是 RS-232 通讯方式。为进一步减少自动分选的难度,在分拣控制器上增加 4 MFLASH EEPROM 存储器,可将系统在工作时所生成的各种参数数据、变量数据等保存起来^[4]。在控制器内部添加了多个不同轴电机,分别用来控制工业机器人各个关节的位置与执行速度。将设计的机器人分拣控制器连接到硬件系统中,机器人分拣控制器连接如图 3 所示。

对工业机器人分拣任务的控制可从速度、转矩以及位置 3 个方向,实现最终的输出运动。位置控制是用脉冲来控制的,用脉冲的数量来决定转动的角度。采用位置模式可以将位置信号直接通过负载传递到控制器,只需要提供电机运转速度,这样就减少了从电机传递到负载的中间环节,从而有效地降低了误差的产生^[5]。在实际的运行过程中,OMRON 视觉传感器将图像采集结果输入到系统软件程序中,通过对图像内容的分析,确定机器人的分拣任务,

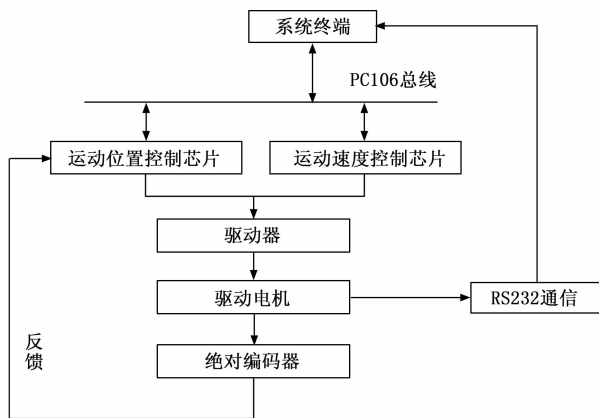


图 3 机器人分拣控制器连接框图

并确定机器人各个关节的操作位置与速度, 将控制参数输入到设计的控制器中, 生成能够直接作用在机器人上的控制指令。

1.3 驱动器

驱动器是工业机器人分拣控制器的启动设备, 该设备的驱动条件为分拣目标识别结果, 驱动器的运行速度直接决定了系统分拣控制的时效性。设计控制系统中使用的驱动器末端都装有 17 位绝对式旋转编码器和增量式编码器, 增量式编码器的位置信号是用不断叠加脉冲计数获得的, 用计数装置对每次获得的位置进行记录并保存, 尽管在每次计数过程中, 可以用参考信号来消除累计误差, 但是在断电之后, 位置信号必须进行重新定位。绝对型编码器通过对光电码盘上的每一道刻线进行测量, 得到的位置信息也是唯一的, 而且一次不会重复, 旋转一次后, 就会恢复到原来的位置, 既不会存储, 也不会累积误差^[6]。通过绝对式旋转编码器和增量式编码器的串联使用, 在保证使用安全的同时, 提高驱动器的响应速度与工作精度。

2 工业机器人分拣控制功能设计

工业机器人的分拣过程是将各种种类的材料随机放置到推料模块中, 利用推料设备将材料推进到传送带上, 机器人从传送带的一端将材料夹取出来, 放在视觉检测工作台, 对材料进行检测, 最终由视觉控制器指定存储位置, 并将材料送到对应仓库中。在设计硬件系统下, 利用 OMRON 视觉技术分析当前区域是否存在分拣目标, 确定分拣目标类型和存储位置, 结合当前工业机器人的位姿状态, 生成控制任务与指令, 完成分拣及控制任务。

2.1 利用 OMRON 视觉采集工业机器人分拣目标图像

利用硬件系统中的 OMRON 视觉技术, 收集工业机器人的分拣目标图像, 为分拣目标的识别与定位提供数据基础。在分拣目标图像采集前, 需要对 OMRON 视觉传感器进行标定处理^[7]。第一步是对 OMRON 传感器进行保定, 得到传感器内置相机的内外参数, 并建立传感器坐标系和外部坐标系的联系。在此基础上进行工业机器人的手眼标定, 建立基准坐标系和传感器坐标系的对应关系。OMRON

视觉传感器的标定过程可以量化表示为:

$$\begin{cases} u = \frac{\gamma_1 x + \gamma_2 y + \gamma_3 z + \gamma_4}{\gamma_9 x + \gamma_{10} y + \gamma_{11} z + 1} \\ v = \frac{\gamma_5 x + \gamma_6 y + \gamma_7 z + \gamma_8}{\gamma_9 x + \gamma_{10} y + \gamma_{11} z + 1} \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y, z) 和 (u, v) 分别表示工业机器人分拣目标点在世界坐标系和图像坐标系中的坐标, γ_i 表示的是视觉成像过程中坐标系之间的转换关系系数^[8]。利用标定的 OMRON 视觉传感器, 按照 OMRON 视觉成像原理, 获取工业机器人在执行分拣任务过程中采集的目标图像, OMRON 视觉成像原理如图 4 所示。

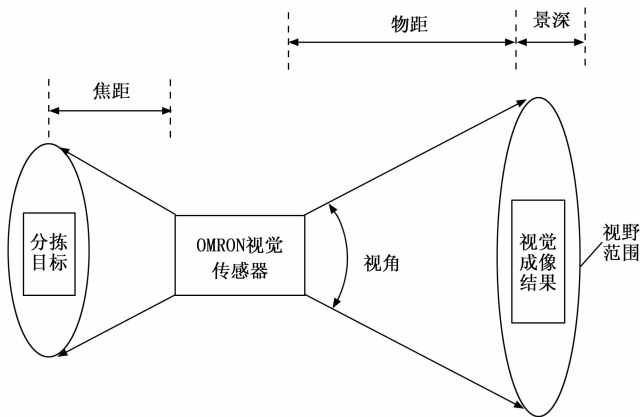


图 4 OMRON 视觉成像原理图

在 OMRON 视觉成像过程中, 设置成像焦距与采集频率分别为:

$$\begin{cases} f = \frac{hd_{\text{object}}}{L} \\ \omega = \frac{n_{\text{image}}}{t_{\text{gather}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, h 为成像芯片和传感器镜头之间的垂直高度, d_{object} 和 L 分别为物距和分拣目标的长度值, 另外, n_{image} 和 t_{gather} 分别表示工业机器人在执行分拣任务过程中需要采集的图像数量以及采集时间间隔。最终得出工业机器人分拣目标图像的生成结果为:

$$\begin{cases} x_{\text{sorting}} = \omega(x \cdot f + z \sin \vartheta \pm u) \\ y_{\text{sorting}} = \omega(y \cdot f + z \cos \vartheta \pm v) \end{cases} \quad (3)$$

其中: ϑ 为 OMRON 视觉传感器的成像角。在采集频率的驱动下, 得出工业机器人分拣过程中所有分拣目标图像的采集结果。

2.2 工业机器人分拣目标初始图像预处理

OMRON 视觉传感器虽能够通过提高分拣目标图像的分辨率提高图像质量, 但在实际成像过程中, 工业机器人的其他组成部分可能会对分拣目标的成像结果产生阴影遮挡, 同时由于工业机器人处于工作状态, 还可能引入新的图像噪声, 因此需要对初始采集的分拣目标图像进行预处理^[9]。采用图像直方图均衡化的方式, 解决分拣目标图像阴影遮挡的问题, 直方图均衡化是通过某种变换使图像

的灰度值直方图分布均匀的方法，定义初始采集分拣目标图像的灰度级为 $g(x_{\text{sorting}}, y_{\text{sorting}})$ ，统计初始图像中各灰度级的像素数，则初始图像的直方图可以表示为：

$$p(g(x_{\text{sorting}}, y_{\text{sorting}})) = \frac{n_{\text{pixel}}}{n_{\text{total}}} \quad (4)$$

其中： n_{pixel} 和 n_{total} 分别对应的是图像中具有灰度值的像素个数和像素总数。初始图像直方图的均衡化处理过程如下：

$$(x_j, y_j) = \sum_{i=0}^{n_{\text{gray scale}}} p_i(g(x_{\text{sorting}}, y_{\text{sorting}})) \quad (5)$$

式中， $n_{\text{gray scale}}$ 为灰度级别数量，将公式 (4) 的计算结果代入到公式 (5) 中，即可得出直方图的均衡化处理结果。在此基础上，采用高斯滤波与均值滤波相结合的方式，对分拣目标图像进行处理，其目的是降低图像中的噪声量^[10]。高斯滤波用于实现图像的平滑，其原理是以离散后的高斯函数作为权重，对各像素点附近区域的灰度值进行加权平均。均值滤波原理是将一个已知的图像点的每一个点取一个图像点的平均数，并将其替换为一个图像点的中心点。图像滤波去噪结果如下：

$$\begin{cases} I_{\text{Gaussian}}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-x_j^2 + y_j^2 / 2\sigma^2} \\ I_{\text{mean value}}(x, y) = \frac{1}{n_{\text{total}}} \sum f(x_j, y_j) \end{cases} \quad (6)$$

式中， σ 为高斯函数标准差。另外，为了降低工业机器人分拣控制过程中的数据计算量，需要对图像进行灰度变换处理，处理结果为：

$$I_{\text{pretreatment}}(x, y) = R \cdot 0.299 + G \cdot 0.587 + B \cdot 0.114 \quad (7)$$

其中： R 、 G 和 B 分别为分拣目标初始图像红、绿和蓝 3 种颜色分量^[11]。按照上述流程对初始分拣目标采集图像中的所有像素点进行处理，完成工业机器人分拣目标初始图像的预处理结果。

2.3 提取工业机器人分拣目标特征

工业机器人分拣目标特征提取的目的是判断当前图像中是否存在分拣目标，并为分拣目标的识别提供参考。设计分拣控制系统中，需要提取的分拣目标特征为目标轮廓特征，假设 $\tau_{\text{edge}}(I)$ 是分拣目标图像 I 的边界特征，可以通过内核 W 对图像 I 进行侵蚀，图像 I 与其腐蚀结果之差，即为工业机器人分拣目标轮廓特征的提取结果，即：

$$\tau_{\text{edge}}(I) = I_{\text{pretreatment}}(x, y) - (I \odot W) \quad (8)$$

将相关数据代入到公式 (8) 中，即可得出工业机器人分拣目标轮廓特征的提取结果。

2.4 采用特征匹配法检测分拣目标类型与空间参数

根据工业机器人分拣目标轮廓的提取结果，判断当前图像区域是否存在分拣目标，并确定分拣目标类型以及空间参数^[12]。利用公式 (9) 计算当前分拣目标图像提取轮廓特征与第 i 类分拣目标标准特征 $\tau_{\text{standard}}(i)$ 之间的特征匹配度。

$$s(i) = \tau_{\text{edge}}(i) \cdot \tau_{\text{standard}}(i) \quad (9)$$

若公式 (9) 的计算结果高于阈值 $s(i)$ ，说明当前分拣区域中存在分拣目标，且分拣目标类型为 i ，否则认为当前分拣区域不存在 i 类分拣目标，若经过多种分拣目标类型的

匹配，计算的特征匹配度 $s(i)$ 结果均不满足阈值条件，认为当前区域不存在分拣目标^[13]。将分拣目标的检测结果作为工业机器人分拣控制程序的启动条件，若检测发现区域存在分拣目标，则启动控制程序，否则无须启动控制程序。针对存在分拣目标的图像，需要进一步确定分拣目标的空间参数，具体包括：目标位置、目标角度、目标长度和宽度。其中目标位置的检测结果为：

$$\begin{cases} x_{\text{target}} = s(i)\kappa_{\text{imaging}}x \\ y_{\text{target}} = s(i)\kappa_{\text{imaging}}y \\ z_{\text{target}} = s(i)\kappa_{\text{imaging}}(x+y)\tan\theta \end{cases} \quad (10)$$

其中： κ_{imaging} 表示图像坐标系与世界坐标系之间的映射系数，公式 (10) 计算得出的目标位置检测结果表示的是分拣目标中心点的位置坐标^[14]。分拣目标的角度信息检测结果为：

$$\theta = f_{\text{fastAtan2}}\left(\frac{2x_{\text{target}}}{y_{\text{target}} - z_{\text{target}}}\right) \quad (11)$$

式中， $f_{\text{fastAtan2}}()$ 为方向求解函数。另外目标长度和宽度的检测结果为：

$$\begin{cases} l_{\text{target}} = \theta(x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) \\ R_{\text{target}} = \theta(y_{\text{max}} - y_{\text{min}}) \end{cases} \quad (12)$$

式中， $(x_{\text{max}}, y_{\text{max}})$ 和 $(x_{\text{min}}, y_{\text{min}})$ 分别表示分拣目标最远端和最近端的位置坐标，同理可以得出分拣目标厚度的检测结果。

2.5 实现工业机器人分拣控制系统软件功能

以分拣目标类型为驱动条件，以 OMRON 视觉得出的分拣目标采集图像为处理对象，综合考虑分拣目标参数的求解结果。

2.5.1 根据分拣目标空间信息计算工业机器人控制参数

根据当前分拣目标的位置信息，确定机器人的控制目标，具体包括末端执行器开度、分拣位置与角度等^[15]。工业机器人对分拣目标的抓取高度与 z_{target} 一致，抓取位置为 $(x_{\text{target}}, y_{\text{target}})$ ，抓取角度为：

$$\theta_{\text{grab}} = |R_{\text{target}}| + \frac{l_{\text{target}}}{2} \quad (13)$$

另外，工业机器人在执行抓取任务时，末端执行器的开度可以表示为：

$$\varphi = \tan(\theta_{\text{grab}}) \quad (14)$$

将分拣目标空间参数的检测结果代入到公式 (13) 和公式 (14) 中，即可得出抓取状态下工业机器人的控制参数^[16]。根据分拣目标的类型检测结果，确定该分拣物品的放置位置，由此生成机器人的分拣路线，得出工业机器人的实时控制参数。

2.5.2 识别工业机器人实时位姿

利用工业机器人内置的位置与姿态角传感器设备，识别任意时刻工业机器人的位姿信息，识别结果为：

$$\begin{cases} x_{\text{robot}} = x_0 + L_{\text{robot}} \cdot (1 - \mu)\varphi \times \sin\left(\frac{(1 - \mu)\varphi}{2L_{\text{robot}}}\right) \times \sin\varphi_{\text{robot}} \\ y_{\text{robot}} = y_0 + L_{\text{robot}} \cdot (1 - \mu)\varphi \times \sin\left(\frac{(1 - \mu)\varphi}{2L_{\text{robot}}}\right) \times \cos\varphi_{\text{robot}} \\ \varphi_{\text{robot}} = \frac{\pi}{2} + \frac{(1 - \mu)\varphi}{L_{\text{robot}}} \end{cases} \quad (15)$$

式中, μ 和 v 分别为工业机器人的滑移率和移动速度, L_{robot} 为工业机器人末端执行器长度, (x_0, y_0) 为工业机器人的初始位置^[17]。 $(x_{\text{robot}}, y_{\text{robot}})$ 和 φ_{robot} 即为工业机器人在任意时刻位置与姿态角的识别结果。

2.5.3 考虑当前位姿和控制参数求解机器人分拣控制量

通过当前位姿识别结果与控制参数的计算结果, 得出分拣任务执行状态下, 工业机器人控制量的计算结果, 其中工业机器人位置控制量的求解公式为:

$$\begin{cases} \Delta x = \varphi_{\text{robot}}(x_{\text{target}} - x_{\text{robot}}) \\ \Delta y = \varphi_{\text{robot}}(y_{\text{target}} - y_{\text{robot}}) \end{cases} \quad (16)$$

将控制参数计算结果和位姿识别结果代入到公式 (16) 中, 即可得出位置控制量的求解结果, 根据 Δx 和 Δy 的求解结果, 确定工业机器人的位置控制方向^[18]。同理, 可以得出工业机器人分拣姿态角控制量的求解结果。

2.5.4 实现工业机器人分拣控制

将计算得出的机器人分拣控制量输入到硬件系统的控制器中, 生成相应的控制指令, 并作用在工业机器人上。由于工业机器人在执行分拣任务过程中处于动态运行状态, 因此其基本运动参数会随之发生变化, 在控制过程中, 通过使用 OMRON 视觉技术, 实时监测工业机器人的位置变化。采用精密的相机和传感器, 对工业机器人进行实时跟踪, 并通过算法分析和计算, 获取机器人当前的位置和姿态信息, 及时调整控制指令来适应机器人在动态运行过程中的位置变化, 确保分拣操作的准确性。实时更新的工业机器人状态如公式 (17) 所示^[19]。

$$\begin{cases} x_{\text{target}} = x_{\text{appoint}}\Delta x \\ y_{\text{target}} = y_{\text{appoint}}\Delta y \end{cases} \quad (17)$$

式中, $(x_{\text{appoint}}, y_{\text{appoint}})$ 代表物品的分拣存储位置。若公式 (17) 成立, 则表示分拣物品已经到达指定位置, 并完成分拣任务, 否则需更新工业机器人位置以及控制量, 直至公式 (17) 条件成立为止。

3 系统测试

为了测试设计的基于 OMRON 视觉的工业机器人分拣控制系统的功能和性能, 进行系统测试实验, 通过系统测试实验可以验证设计系统是否能够达到预期效果, 并满足实际应用中的控制要求。设计系统测试实验采用白盒测试与对比测试相结合的测试方式, 其中, 白盒测试是在已知运行结果的情况下, 测试设计系统的输出结果是否与预期效果一致, 而对比测试则是将设计系统的功能和性能与现有系统对比, 其目的是验证设计系统的运行优势。

3.1 选择工业机器人控制对象

设计系统测试实验选择 Delta 工业机器人作为执行分拣任务的机械设备, 同时也是分拣控制系统的控制对象, Delta 工业机器人由末端执行器、气动模块等部分组成, 其中, 末端执行器选择二指夹持器, 气动模块选用的是 OTS-550 无油空气压缩机, 空压机能够为工业机器人的工作提供气压动力, 通过气路循环, 实现对目标对象的抓取。系统测

试实验中使用工业机器人 1~6 轴关节的角度范围分别为: $\pm 160^\circ$ 、 $\pm 80^\circ$ 、 $\pm 70^\circ$ 、 $\pm 150^\circ$ 、 $\pm 110^\circ$ 和 $\pm 280^\circ$, 最大负载重量为 8 kg, 即能够抓取 8 kg 以下的所有物品, 工业机器人的定位精度和循环精度分别为 0.05 mm 和 0.1 mm, 满足工业分拣要求^[20]。另外, 在工业机器人的移动区域内布设无线网络, 并将工业机器人设备接入到通信网络中, 保证工业机器人能够成功接收控制器传输的控制指令。最终将其与 380 V 电源相连, 完成工业机器人的配置。

3.2 安装并调试系统硬件设备

将设计工业机器人分拣控制系统中的 OMRON 视觉传感器安装到选择的工业机器人上, OMRON 视觉传感器的实际安装情况如图 5 所示。

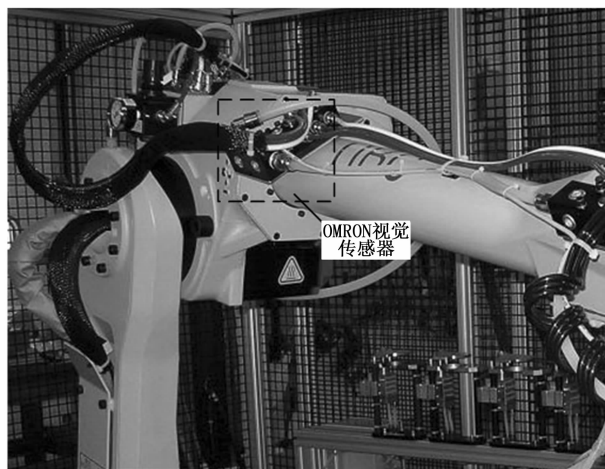


图 5 OMRON 视觉传感器实际安装情况

安装 OMRON 视觉传感器的分辨率为 $1\ 280\ \text{px} \times 640\ \text{px}$, 帧速率为 8 fps, 像素尺寸为 $1.67\ \mu\text{m} \times 1.67\ \mu\text{m}$, 曝光时间能够达到 10 s 左右。在光源安装时, 需要考虑视觉传感器与分拣工作台之间的垂直距离, 保证视觉传感器的成像区域能够覆盖工作台, 光照充足且无遮挡。在系统测试过程中, 将光源放置在工作台垂直方向上方 35 cm 处。在安装 OMRON 视觉传感器时, 应尽量使传感器视场的 X 轴方向与工作台的运动方向平行。当被分拣物体随着传感器视场中的同步皮带一起移动时, 其 Y 向不变, 仅 X 向发生改变, 即工作台的运动方向必须与传感器视场的 X 向平行。系统测试实验中, OMRON 视觉传感器通过可移动支架固定在工作台中间的正上方位置。在实验开始前, 需要对安装的所有硬件设备进行调整, 判断视觉传感器是否能够采集包含分拣目标对象的图像, 并将其传输到控制终端。若调试结果显示所有硬件设备均可在实验环境中正常运行, 则执行实验的下一步操作。

3.3 生成工业机器人分拣控制任务

制作电子芯片、螺母、螺栓、轴承等类型零件作为工业机器人的分拣对象, 设置其初始位置, 并根据分拣对象类型确定分拣目标位置, 由此生成系统的多个分拣控制任务, 部分任务的生成结果如表 1 所示。

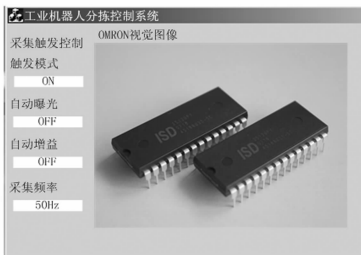
表 1 工业机器人分拣控制任务表

控制任务编号	分拣对象类型	分拣对象初始位置	分拣目标位置	角度/°	长度/mm
1	电子芯片	(100,223)	(80,252)	1.1	340
2	电子芯片	(150,233)	(80,252)	1.6	340
3	螺母	(200,114)	(10,20)	-1.2	60
4	螺栓	(250,152)	(40,30)	-0.8	120
5	轴承	(300,317)	(60,50)	0.7	200
6	轴承	(350,304)	(60,50)	0.9200	

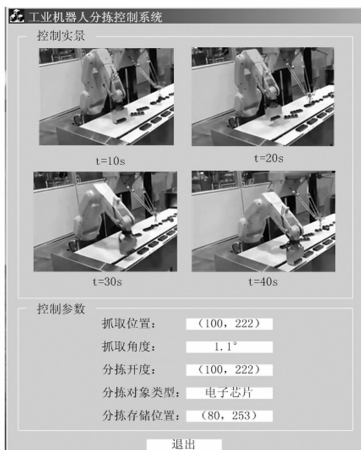
表 1 中表示的分拣对象初始位置也是工业机器人开始分拣的抓取位置，而分拣目标位置是分拣对象最终的存储位置。由于设计系统测试实验在平整的工作台上进行，因此分拣对象的初始位置与目标位置忽略 z 轴方向。

3.4 描述系统测试过程

设计系统测试实验主要分为两个部分，分别为控制功能测试和应用性能测试，其中，控制功能测试是测试设计系统是否能够在目标位置实现分拣对象的抓取，并将其放置到目标存储位置上，而应用性能测试则是判断在控制系统作用下，工业机器人的分拣过程是否会对分拣对象表面造成磨损。根据上述实验目的，在配置好的系统测试环境中，利用编程工具实现基于 OMRON 视觉的工业机器人分拣控制系统软件程序的开发，并导入到工业机器人控制对象设备中。经过分拣目标检测、控制量计算等步骤，得出工业机器人分拣控制系统的输出结果。设计工业机器人分拣控制系统的运行界面如图 6 所示。



(a) OMRON 视觉显示界面



(b) 分拣控制指令执行界面

图 6 工业机器人分拣控制系统运行界面

图 6 为工业机器人在执行 1 号控制任务时的输出结果，按照上述流程可以得出所有控制任务的执行结果。为验证设计系统在控制功能与应用性能方面的优势，设置基于贪心策略的直角坐标机器人动态分拣控制系统（文献 [1] 系统）和基于 ADT8940A1 运动控制器的食品分拣控制系统（文献 [2] 系统）作为实验的两个对比系统，分别即为对比系统一和对比系统二，重复上述操作实现两种对比系统的开发，并记录相应的运行数据。

3.5 设置系统测试指标

设置工业机器人抓取位置控制误差和分拣目标位置控制误差作为系统控制功能的量化测试指标，其中，抓取位置控制误差的数值结果为：

$$\epsilon_{\text{grab}} = |x_{\text{control-grab}} - x_{\text{grab}}| + |y_{\text{control-grab}} - y_{\text{grab}}| \quad (18)$$

其中： $(x_{\text{control-grab}}, y_{\text{control-grab}})$ 和 $(x_{\text{grab}}, y_{\text{grab}})$ 分别表示控制系统作用下工业机器人的实际抓取位置与设置的分拣对象初始位置。分拣目标位置控制误差指标的测试结果为：

$$\epsilon_{\text{storage}} = |x_{\text{control-storage}} - x_{\text{storage}}| + |y_{\text{control-storage}} - y_{\text{storage}}| \quad (19)$$

式中， $(x_{\text{control-storage}}, y_{\text{control-storage}})$ 和 $(x_{\text{storage}}, y_{\text{storage}})$ 分别为控制系统下分拣对象的实际存储位置和预期存储位置。计算得出抓取位置控制误差和分拣目标位置控制误差越小，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对象表面磨损量，测试结果如下：

$$S_m = \lambda_m \times \delta_m \quad (20)$$

式中， λ_m 和 δ_m 分别表示磨损区域的长度和宽度。最终求解得出分拣对象表面磨损量取值越小，说明对应系统的应用性能越好。

3.6 系统测试结果与分析

3.6.1 系统分拣控制功能测试结果

通过 3 种系统的控制，得出反映系统分拣控制功能的测试结果，如表 2 所示。

表 2 系统分拣控制功能测试数据表

控制任务编号	对比系统一		对比系统二		设计系统	
	分拣对象初始位置	分拣目标位置	分拣对象初始位置	分拣目标位置	分拣对象初始位置	分拣目标位置
1	(106,227)	(83,257)	(105,221)	(82,255)	(100,222)	(80,253)
2	(158,237)	(83,254)	(152,236)	(84,253)	(150,234)	(80,251)
3	(203,119)	(16,22)	(204,116)	(14,21)	(200,113)	(10,20)
4	(254,156)	(45,38)	(258,155)	(43,31)	(250,151)	(40,31)
5	(308,315)	(66,56)	(302,313)	(66,54)	(300,317)	(60,50)
6	(352,308)	(63,57)	(351,307)	(65,52)	(350,303)	(59,50)

将表 1 和表 2 中的数据分别代入到公式 (18) 中，计算得出 3 个系统控制下，抓取位置控制误差的平均值分别为 9.0 mm、6.5 mm 和 0.8 mm，通过公式 (19) 的计算，得出平均分拣目标位置控制误差的测试结果分别为 11.3 mm、6.0 mm 和 0.7 mm。

3.6.2 系统应用性能测试结果

工业机器人分拣任务执行完成后，检测分拣对象表面磨损量，得出系统应用性能的测试结果，如图 7 所示。

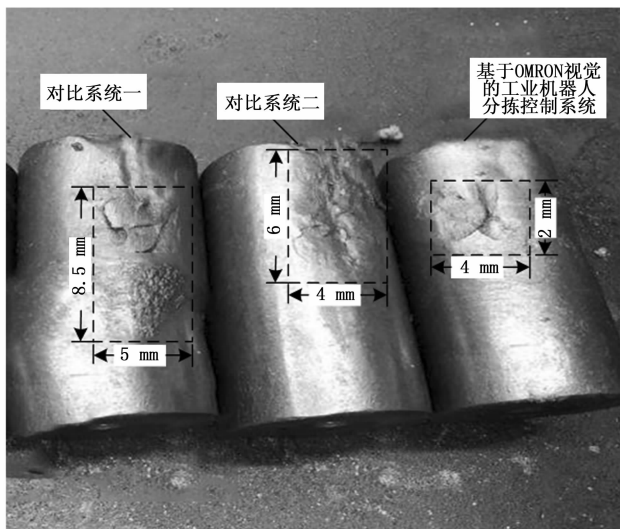


图 7 工业机器人分拣控制系统应用性能测试结果

从图 7 中可以看出, 与两种对比控制系统相比, 设计系统作用下得出分拣对象的磨损区域更小, 通过公式 (20) 的计算, 得出 3 种系统控制下, 分拣对象的磨损量分别为 42.5 mm^2 、 24 mm^2 和 8 mm^2 。

4 结束语

随着计算机技术的不断发展, 中国已经逐渐步入了工业自动化的时代, 而工业机器人自动分拣系统能够有效地减少企业中的人力损耗, 同时还能提升对工件进行分类的效率, 所以它被广泛地应用于工业生产的各个领域。在此次研究中, 通过 OMRON 视觉技术的应用, 实现工业机器人分拣控制, 从系统测试结果中可以看出, 设计系统具有更高的控制功能与应用性能, 验证了设计系统的有效性。

参考文献:

- [1] 陈林, 毕树生, 李大寨, 等. 基于贪心策略的直角坐标机器人动态分拣规划 [J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48 (5): 805-815.
- [2] 梁艳阳, 吴伟, 姚超智, 等. 基于 PLCopen 标准的工业机器人运动控制器的设计与实现 [J]. 现代制造工程, 2021 (12): 35-40.
- [3] 顾涵, 付瑞玲, 张磊, 等. 基于 ADT8940A1 运动控制器的食品分拣控制系统设计 [J]. 包装工程, 2021, 42 (21): 207-212.
- [15] 石峰, 李志宇, 高艳辉, 等. 基于 STM32 的靶机安控器自动检测系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (7): 49-56.
- [16] 鹿国培. 基于以太网的 STM32 数据采集与传输系统设计 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [17] 史先传, 殷帅, 许议元. 基于 LwIP 和 Modbus TCP 协议的网络控制器设计 [J]. 自动化与仪表, 2023, 38 (2): 19-24.

- [4] 王少锋, 夏广远, 吉春生, 等. 基于嵌入式的单目视觉工业机器人定位系统设计 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (1): 100-106.
- [5] 张新星, 王辉, 张元祥. 基于位姿约束的工业机器人快速标定系统研究 [J]. 机械设计与制造, 2021 (8): 291-294.
- [6] 王成军, 韦志文, 严晨. 基于机器视觉技术分拣机器人研究综述 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (3): 893-902.
- [7] 田志程, 古华光, 宋汉文. 基于视觉测量与神经网络的工业机器人位姿补偿 [J]. 力学季刊, 2022, 43 (2): 281-288.
- [8] 王震, 许恒硕, 廉哲. 映射关系约束下双目视觉测量误差调整仿真 [J]. 计算机仿真, 2022, 39 (4): 189-192.
- [9] 米西峰, 尚展全, 范媛媛, 等. 基于双目视觉的食品分拣 Delta 机器人定位抓取技术 [J]. 食品与机械, 2022, 38 (6): 112-116.
- [10] 余晓兰, 万云, 陈靖照. 基于改进 BP 神经网络的食品分拣机器人视觉伺服控制方法 [J]. 食品与机械, 2021, 37 (8): 126-131.
- [11] 梅志敏, 陈艳, 胡杭, 等. 机器人与机器视觉的垃圾分拣系统设计 [J]. 机械设计与制造, 2022 (4): 275-278.
- [12] 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.
- [13] 张卉, 朱永飞, 刘雪飞, 等. 基于模糊迭代 Q-学习的冶金工业机器人轨迹跟踪控制研究 [J]. 工程设计学报, 2022, 29 (5): 564-571.
- [14] 潘海鸿, 马忠睿, 七聘广, 等. 工业机器人原点误差分析与补偿 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022 (11): 33-37.
- [15] 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.
- [16] 唐媛红, 刘月云. 基于机器视觉的采摘机器人分拣控制研究 [J]. 农机化研究, 2021, 43 (11): 216-220.
- [17] 罗宝佳, 吴震宇, 詹明儒. 工业机器人关节振动的鲁棒扰动观测器双环补偿控制 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (4): 530-536.
- [18] 梁云飞, 张德权, 彭周源. 一种高效的概率-证据混合工业机器人定位精度可靠性分析方法 [J]. 燕山大学学报, 2022, 46 (4): 309-318.
- [19] 张俊鑫, 陈威, 黄斯凯, 等. 基于力位混合导向的工业机器人顺槽运动控制策略 [J]. 中国机械工程, 2023, 34 (6): 712-719.
- [20] 寇斌, 郭士杰, 任东城. 改进粒子群算法的工业机器人几何参数标定 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (1): 9-13.
- [18] 黄克亚. 基于 FSMC 总线的嵌入式系统多显示终端驱动设计 [J]. 液晶与显示, 2023, 37 (6): 718-725.
- [19] 邢晨茹, 韩建宁, 蔺红彦, 等. 面向 CMUT 的多通道数据采集系统 [J]. 现代信息科技, 2023, 7 (14): 48-53.
- [20] 董振良. 一种高精度选相控制装置设计 [J]. 电气技术, 2020, 21 (12): 36-39.
- [21] 白世军, 曾林翠, 孔庆霞, 等. 一种具有选相控制功能的智能终端研究与实现 [J]. 电气技术, 2017 (8): 74-79.