

基于 RBF-BP 算法的机械臂多自由度 分拣控制系统设计

孔陶茹, 齐峰, 李晚春

(西安思源学院文商学院, 西安 710038)

摘要: 为提升机械臂设备的准确分拣能力, 设计基于 RBF-BP 算法的机械臂多自由度分拣控制系统; 利用 RBF-BP 前馈神经网络, 规划机械臂设备的运动轨迹路线, 实现基于 RBF-BP 算法的机械臂运动轨迹建模; 确定工业相机在总功能框架中所处连接位置, 根据机械臂选型情况, 确定可编程逻辑控制器、变频控制器对于所选机械臂元件的调节能力, 完成对系统功能模块的开发; 借助传输信道, 将 Sorting 分拣指令、ToolControl 控制指令反馈回核心控制主机, 建立完整的指令执行回路, 再联合相关硬件设备结构, 实现基于 RBF-BP 算法的机械臂多自由度分拣控制系统设计; 实验结果表明, 在抓取能力相同的情况下, 应用 RBF-BP 算法控制系统机械臂成功分拣的工件数量为 19 件, 机械臂抓取成功率为 95%, 说明所设计系统满足提升机械臂准确分拣能力的设计初衷。

关键词: RBF-BP 算法; 机械臂; 多自由度; 分拣控制; 轨迹路线; 变频控制器

Design of Multi-Degree of Freedom Sorting Control System for Manipulator Based on RBF-BP Algorithm

KONG Taoru, QI Feng, LI Wanchun

(School of Arts and Business, Xi'an Siyuan University, Xi'an 710038, China)

Abstract: In order to improve the accurate sorting capability of the robotic arm equipment, a robotic arm multi-degree of freedom sorting control system based on the RBF-BP algorithm is designed. The RBF-BP feedforward neural network is used to plan the motion trajectory of the manipulator equipment, and the motion trajectory modeling of the manipulator based on the RBF-BP algorithm is realized. Determine the connection position of the industrial camera in the overall functional framework. According to the selection of the manipulator, determine the adjustment capability of the programmable logic controller and the variable frequency controller for the selected manipulator components, and complete the development of the system function module. With the help of the transmission channel, the Sorting order and ToolControl control order are fed back to the core control host, and a complete order execution loop is established, and then combined with the relevant hardware equipment structure to realize the design of the robotic arm multi-degree of freedom sorting control system based on the RBF-BP algorithm. The experimental results show that, under the condition of the same grasping ability, the number of workpieces successfully sorted by the robotic arm controlled by the RBF-BP algorithm reaches 19, and the grasping success rate of the robotic arm is 95%, indicating that the designed system meets the requirements of lifting the robotic arm, which achieves the original intention of the design of accurate sorting capabilities.

Keywords: RBF-BP algorithm; mechanical arm; multi-degree of freedom; sorting control; track route; frequency conversion controller

0 引言

机械臂是一个复杂的系统, 具有精度高、输入输出特性灵活、非线性度高、耦合能力强等多项应用特性, 然而受到未建模动态、参数摄动等外界干扰条件的影响, 机械臂元件建模模型存在着明显的不确定性, 所以如何在保证机械臂旋转自由度的同时, 对其运动行为进行有效控制, 成为了一项亟待解决的难题^[1]。与人工神经网络相比, RBF-BP 算法在对函数节点进行逼近处理时, 要求权重指

标的排列必须满足负梯度下降原则, 即在同一函数区间内, 权重值指标排列必须保持从左至右依次减小的规律。单从函数性能的角度来看, RBF-BP 算法可以理解一种连续型的非线性函数, RBF 指数节点、BP 指数节点分别对应两个不相等的赋值指标, 随着参量指标取值范围的不断扩大, 两类指数节点中数据信息的累积量也会不断增大^[2]。在计算机集成网络、机械设计制造等特定应用环境下, RBF-BP 算法还可以直接约束主机元件对于数据信息参量的处理能力。如果将网络系统看作一个独立个体, 则可将 RBF-BP

收稿日期: 2022-07-21; 修回日期: 2022-08-29。

作者简介: 孔陶茹(1977-), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 讲师, 主要从事人工智能、机器学习、深度学习方向的研究。

引用格式: 孔陶茹, 齐峰, 李晚春. 基于 RBF-BP 算法的机械臂多自由度分拣控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(11): 98-103, 110.

算法近似看作具有数据处理能力的执行语句, 在这种语句命令的作用下, 数据信息文件可以直接被转存至数据库主机中, 且随着网络系统运行时间的延长, 信息文本的累积量虽然会不断增大, 但其存储状态却始终与信息参量的初始转存形式保持一致^[3]。

为提升机械臂多自由度分拣控制准确性, 相关领域研究者对机械臂多自由度分拣控制系统做出了研究。基于稳态视觉诱发电位的控制系统根据电信号差值预测条件, 建立伪密钥代码文本, 再通过自适应调节的处理方式, 实现对机械臂运动行为的控制^[4]。然而随着抓取货物总量的增大, 该系统在分拣精确性方面的能力会出现一定幅度的下降。

针对上述问题, 引入 RBF-BP 算法应用理论, 并以此为基础, 设计一种新型的机械臂多自由度分拣控制系统。

1 系统硬件设计

机械臂多自由度分拣控制系统的功能模块包含总体框架、工业相机、机械臂设备、可编程逻辑控制器、变频控制器五类组成结构, 其具体设计方法将在如下内容中进行深入研究。

1.1 总体框架

机械臂多自由度分拣控制系统接受 RBF-BP 前馈神经网络的直接调度, 由相机单元、主设备单元、控制器单元、电路单元四部分共同组成。相机单元负责监控机械臂设备的实时运动轨迹, 包含工业相机、轨迹传感器、转弯传感器、转向传感器、变频传感器五类组成结构, 其中工业相机元件的接入数量最多, 每一个机械臂连接关节处都至少配备一个工业相机元件; 轨迹传感器、转弯传感器、转向传感器、变频传感器同属于行为控制型的相机结构, 能够在特定运行状态下, 记录机械臂设备所表现出的运动行为。主设备单元包含主机机械臂、压力控制器、动力输出装置等多个连接元件, 作为机械臂多自由度分拣控制系统中的核心应用结构, 这些设备元件可以在 RBF-BP 前馈神经网络的作用下, 建立数据信息互通关系^[11-12]。控制器单元的连接行为受到电路单元的直接影响, 一般来说, 电流输出量越大, 可编程逻辑控制器对于主机机械臂元件的控制作用能力也就越强。完整的控制系统连接框架如图 1 所示。

建立机械臂多自由度分拣控制系统时, 要求逻辑电源电路输出的电量信号要平均分配给相机单元、主设备单元、控制器单元等多个下级负载结构。

1.2 工业相机

工业相机负责捕捉机械臂元件在各个方向上的运动图像, 在符合多自由度原则的情况下, 该设备结构可以提供多个负载接口, 一方面确保系统控制主机能够准确掌握机械臂元件的实时运动行为, 另一方面也可以将完整的机械臂动作分解成多个连续图像, 从而使得 RBF-BP 前馈神经网络中能够生成准确的控制执行指令^[13]。在 RBF-BP 算法作用下, 工业相机模块的连接形式如图 2 所示。

总线单元、图像处理单元、显示器单元共同组成了工

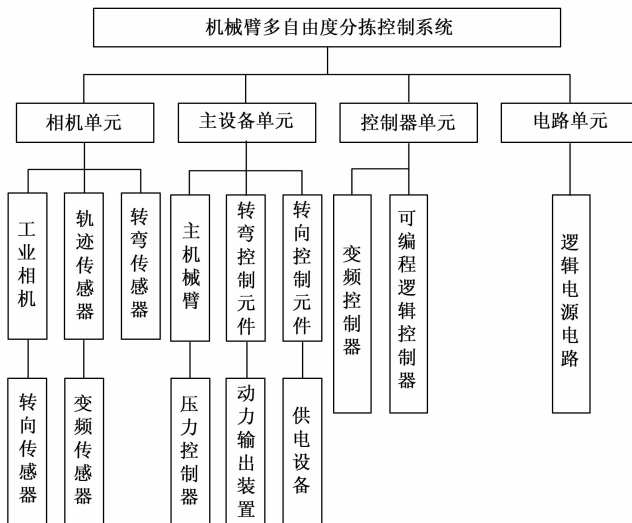


图 1 机械臂多自由度分拣控制系统框架

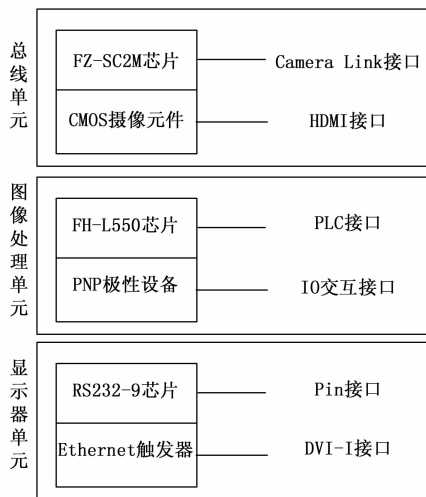


图 2 工业相机内部结构示意图

业相机模块。其中, 总线单元负载了 FZ-SC2M 芯片与 CMOS 摄像元件, 可以在 Camera Link、HDMI 两类接口组织的作用下, 将一幅完整的机械臂分拣运动图像分解成多个完全独立的像素节点^[14]。显示器单元负载了 FH-L550 芯片与 PNP 极性设备, 可以将 PLC 接口与 IO 交互接口关联起来, 从而使得系统控制主机能够准确记录机械臂设备的多自由度分拣运动行为。显示器单元负载了 RS232-9 芯片与 Ethernet 触发器, 能够分析出机械臂元件在当前分拣行为过程中的运动自由度水平。

1.3 机械臂

为满足 RBF-BP 算法在多自由度分拣控制方面的需求, 在选择机械臂元件时, 要求同一连接臂装置上应同时负载两个或两个以上旋调螺母^[15]。在机械臂运动轨迹模型中, 节点坐标平移条件、旋转条件都具有较强的自由性, 所以整个机械臂元件也必须适应多种不同的分拣行为指令。机械臂模型如图 3 所示。

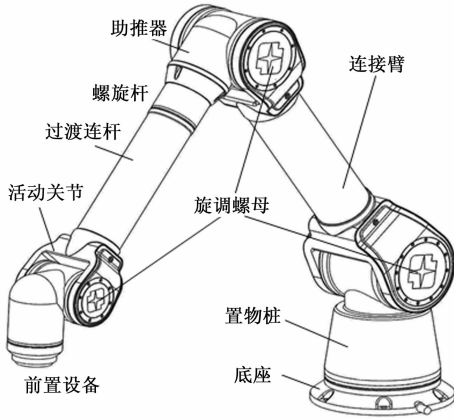


图 3 机械臂模型

在图 3 所示机械臂模型中，前者设备直接与分拣抓手相连，其外侧装有一圈螺旋设备，可以跟随分拣行为指令的变化而呈现出自由旋转状态。活动关节元件将带有螺旋杆的过渡连杆与前置设备连接起来，在机械臂运动过程中，关节元件的行为状态与分拣抓手的运动形式保持一致^[16]。助推器设备接收控制系统应用电机的直接调度，可以根据电信号累积情况，推动过渡连杆不断向下运动，从而使得活动关节结构能够具有足量的运动空间。

1.4 可编程逻辑控制器

可编程逻辑控制器负责协调主机械臂元件与工业相机模块之间的连接关系，可以根据自由度指标的数值水平，更改系统主机中控制指令的实时输出强度，在避免机械臂分拣抓手出现过度偏转行为的同时，实现对控制指令的编码与处理^[17-18]。在 RBF-BP 算法作用下，可编程逻辑控制器对于控制指令的编码遵循按需筛选的原则，即主机械臂元件的分拣运动行为趋向越明显，可编程逻辑控制器设备所承载的数据信息编码任务量也就越大。

1.5 变频控制器

变频控制器具备较强的频率调节能力，在机械臂多自由度分拣控制系统中，能够按照 RBF-BP 算法应用原则，更改系统主机对于分拣运动行为指令的编码频率，从而使主机械臂设备与分拣抓手元件的运动行为能力保持一致^[19-20]。在执行多自由度分拣运动行为时，主机械臂设备所表现出来的运动特征总是呈现出阶段性变化的形式，所以变频控制器 G120X 主板在执行变频调节指令时，需要参考主机械臂设备、分拣抓手元件之间的运动行为关系。

2 基于 RBF-BP 算法的机械臂多自由度分拣控制系统软件设计

2.1 基于 RBF-BP 算法的机械臂运动轨迹模型

机械臂运动轨迹模型的构建，需要在 RBF-BP 算法前馈神经网络的基础上，分析坐标平移与坐标旋转路径的变化形式，本章节将针对上述内容展开研究。

2.1.1 RBF-BP 前馈神经网络

随着机械臂元件加工精度的不断升高，在其执行分拣

行为作业的过程中，不仅仅要考虑到控制指令的运行误差，还要掌握各级关联模块之间的摩擦与扰动关系。RBF-BP 前馈神经网络是一个开放型的互联网环境，可以根据输入信息的分离程度，将这些数据文本整合成多个完全独立的块状存储结构，在同一运动周期内，机械臂设备基本不会出现完全相同的行为状态，所以各个块状信息存储结构之间的关联性相对较小^[5-6]。一个完整的 RBF-BP 前馈神经网络由 a 、 b 、 c 、 d 四个层级结构共同组成，如图 4 所示。其中， a 级结构包含 n 个连接节点，负责对数据信息文本进行分离处理，且每个节点组织对于已输入数据信息参数的提取能力完全相同； b 级结构中连接节点个数是 a 级结构的 n 倍，负责对已分离数据信息文本进行再次整理； c 级结构包含 2 个连接节点，能够根据 RBF-BP 前馈神经网络布局形式，实施对已输入信息重排列处理； d 级结构只包含一个连接节点，可以显示出数据信息文本的当前排列形式。

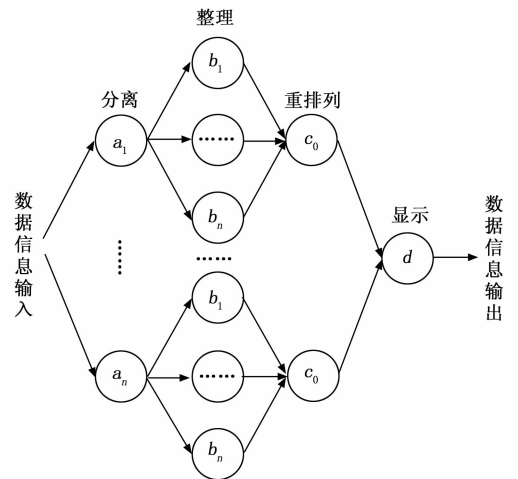


图 4 RBF-BP 前馈神经网络连接模式

为避免机械臂运动数据出现传输损失，在 RBF-BP 前馈神经网络中， a 级结构可以直接收录已输入的数据信息参数， d 级结构则可以将重排后的数据信息参量直接反馈给运动主机。

2.2 轨迹路线

在 RBF-BP 算法原则作用下，对于机械臂运动轨迹路线的分析由坐标平移、坐标旋转两个处理环节共同组成。

2.2.1 坐标平移

坐标平移表达式决定了机械臂运动模型输入量的数值水平，在机械臂运动过程中，由于轨迹建模误差与机械系统滑动摩擦的存在，其运动坐标变化形式很难具有明显规律性，而在 RBF-BP 算法的认知中，为准确把握这种运动轨迹变化规律，人为规定了坐标平移这一概念^[7-8]。一般来说，在多自由度分拣控制系统的作用范围内，位于同一条轨迹路线内的机械臂运动节点都满足统一的坐标平移变化规律。设 $X_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $X_2(x_2, y_2, z_2)$ 表示同一条轨迹路线内两个不重合的机械臂运动节点， x_1 、 x_2 表示两个横轴坐标， y_1 、 y_2 表示两个纵轴坐标， z_1 、 z_2 表示两个空间轴坐标。 Δz 表

示空间轴坐标变化率, 求解表达式为:

$$\Delta z = \frac{z_1 \cdot z_2}{|z_2 - z_1|} \quad (1)$$

在公式 (1) 的基础上, 设 β 表示机械臂运动向量的平移系数, f 表示机械臂运动节点的平移摩擦系数, 联立上述物理量, 可将基于 RBF-BP 算法的机械臂坐标平移表达式定义为:

$$A_1 = \left[\beta \left(\frac{|x_2 - x_1|^2}{f \cdot \Delta z} \right) \right] \quad (2)$$

由于 RBF-BP 前馈神经网络可以同时承载多种类型的数据信息参量, 所以在建立机械臂运动轨迹模型时, 运动节点的坐标平移与坐标旋转可以同时存在。

2.2.2 坐标旋转

坐标旋转表达式决定了机械臂运动模型转向量的数值水平, 在机械臂运动过程中, 由于机械臂运动中轴所处位置始终保持不变, 所以在定义旋转变规律时, 应求解横轴、纵轴、空间轴三个方向上的运动夹角^[9-10]。假设 RBF-BP 前馈神经网络连接形式始终保持不变, 定义 $X'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ 、 $X'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ 表示另一条轨迹路线内两个不重合的机械臂运动节点, x'_1, x'_2 表示两个横轴坐标, y'_1, y'_2 表示两个纵轴坐标, z'_1, z'_2 表示两个空间轴坐标, 联立上述物理量, 可将基于 RBF-BP 算法的机械臂坐标旋转表达式定义为:

$$A_2 = \left(\frac{|x'_2 - x'_1|^2}{\delta_x \cdot \cos\alpha} + \frac{|y'_2 - y'_1|^2}{\delta_y \cdot \cos\chi} + \frac{|z'_2 - z'_1|^2}{\delta_z \cdot \cos\varphi} \right) \quad (3)$$

式中, α 表示横轴方向上的运动夹角, χ 表示纵轴方向上的运动夹角, φ 表示空间轴方向上的运动夹角, δ_x 表示横轴方向上的机械臂运动法向量, δ_y 表示纵轴方向上的运动法向量, δ_z 表示空间轴方向上的运动法向量。在分拣运动行为过程中, 机械臂元件的最大开合角度只能得到 180° , 所以夹角 α, χ, φ 的取值都属于 $[-\pi, \pi]$ 的数值区间。

由于 RBF-BP 算法对于机械臂多自由度分拣控制系统的约束作用能力相对较为局限, 所以为保证主机机械臂设备的自主运动能力, 还需根据 Sorting 分拣指令、ToolControl 控制指令的执行特性, 调节相关运行程序的协调作用能力。

2.3 Sorting 分拣指令

Sorting 分拣指令作用于机械臂多自由度分拣控制系统的主机械臂结构, 能够根据 RBF-BP 算法编码原则, 规划可编程逻辑控制器元件所采集到目标包裹信息的排列形式, 并可以借助信息反馈信道, 将这些数据文件上传至系统控制主机中的 SQL 数据库, 以便于主机模块可以将这些信息参量与原始货物信息进行对比, 从而充分落实已制定的机械臂多自由度分拣控制指令^[21-22]。设 γ 表示趋向性分拣控制指令编码系数的初始取值, \hat{g} 表示 RBF-BP 算法作用下的目标包裹信息记录特征, ΔT 表示多自由度分拣控制指令的单位执行时长, k 表示已记录目标包裹信息的转码系数。在上述物理量的支持下, 联立公式 (2)、公式 (3), 可将 Sor-

ting 分拣指令执行表达式定义为:

$$D = \frac{\sum_{\gamma=1}^{+\infty} (A_1 \times A_2)}{\hat{g} \cdot \left(1 - \frac{k^2}{|\Delta T|} \right)} \quad (4)$$

在机械臂多自由度分拣控制系统中, Sorting 分拣指令可以在编码目标包裹信息的同时, 调节工业相机元件对于机械臂运动图像的处理能力, 一方面避免错误分拣行为的出现, 另一方面也可以使机械臂元件的分拣运动行为处于绝对自由的表现状态。

2.4 ToolControl 控制指令

ToolControl 控制指令的编码遵循 RBF-BP 算法原则, 可以在机械臂运动轨迹模型的基础上, 促使可编程逻辑控制器模块、变频控制器模块快速运行, 从而使得主机机械臂结构能够适应分拣抓手的行为模式, 最大化保障系统主机的自由执行能力^[23-24]。规定 l_1, l_2, \dots, l_n 表示 n 个随机选取的机械臂分拣抓手行为向量, 且 $l_1 \neq l_2 \neq \dots \neq l_n$ 的不等式条件恒成立, λ 表示分拣行为过程中机械臂运动轨迹节点标记系数, φ 表示基于 RBF-BP 算法的控制指令编码系数, j 表示主机机械臂元件的行为自由度定义条件。

ToolControl 控制指令的执行表达式为:

$$H = \frac{\varphi^j}{D^2} - \frac{\lambda}{A_1 \times A_2} (l_1 + l_2 + \dots + l_n)^2 \quad (5)$$

为使主机机械臂元件在执行分拣运动时的自由度行为需求得到保障, Sorting 分拣指令、ToolControl 控制指令的编码必须同时满足 RBF-BP 算法原则。此外, 由于分拣抓手设备的行为模式并不能始终保持稳定, 所以在完善执行指令定义表达式时, 还要参考可编程逻辑控制器元件、变频控制器元件对于主机机械臂设备的控制能力。综上所述, 基于 RBF-BP 算法的机械臂多自由度分拣控制流程如图 5 所示。

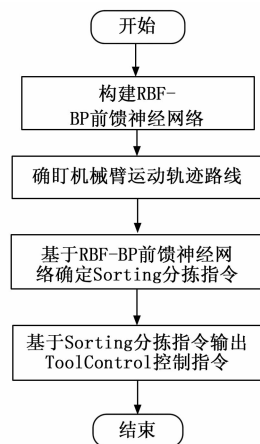


图 5 RBF-BP 算法流程图

3 实例分析

3.1 实验环境

针对所选分拣控制系统的分拣性能进行实验, 选择

RBF-BP 算法作用的控制系统作为实验组测试方法，稳态视觉诱发电位控制系统对照组测试方法。分别采用实验组、对照组系统控制主机械臂元件的分拣运动行为，具体配置参数见表 1。

表 1 实验参数配置

编号	项目	数值与型号
1	主机械臂元件	YOLOv3-tiny-E350
2	分拣抓手	zYfc3Qcta1.3B
3	旋调螺母	M3、M4、M5
4	助推器	NDK-50VA-220/24
5	活动关节	JD-N30001
6	运动角度	(-180°,180°)
7	分拣货物重量	8.2 kg
8	分拣货物体积	1 m×1 m×0.8 m
9	定频功率	870 kw
10	变频功率	560 kw

在连接实验装置时，主机械臂元件与分拣抓手之间的连接借助 M3 型旋调螺母，活动关节与主机械臂元件之间的连接借助 M4 型旋调螺母，助推器与活动关节之间的连接借助 M5 型旋调螺母。机械臂分拣过程实物图如图 6 所示。



图 6 机械臂分拣过程实物图

3.2 数据处理与实验步骤

本次实验将对抓取成功率、分拣成功率两个指标进行评估。其中，抓取成功率是指机械臂抓手是否抓取到了正确的运输工件，分拣成功率是指机械臂抓手是否将工件分拣到了正确的位置。成功抓取不代表一定会分拣成功，但是分拣成功则代表一定抓取成功，故而分拣成功率是比抓取成功率更加严格的实验评估指标。两者的具体计算方法如下：

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{M_1}{M} \times 100\% \\ \omega_2 = \frac{M_2}{M} \times 100\% \end{cases} \quad (6)$$

式中， ω_1 为抓取成功率， M_1 为机械臂成功抓取工件的样本数量， M 为工件样本总数量， M_2 为成功抓取到正确位置的工件样本数量， ω_2 为分拣成功率。

在实验过程中，首先按照顺序将主机械臂元件、分拣抓手、助推器、活动关节等多个实验设备连接起来；其次

利用实验组控制系统对机械臂元件的分拣运动行为进行监测；然后将运输工件、实验元件连接形式全部恢复至初始状态；接着利用对照组控制系统对机械臂元件的分拣运动行为进行监测；最后对比实验组、对照组实验数据，总结实验规律。

3.3 数据分析

规定工件样本总数量等于 20，在所选控制系统作用下，若机械臂元件成功抓取工件或成功将元件抓取到正确位置，则记录本次实验结果为“1”；若机械臂元件未能成功抓取工件或没有成功将元件抓取到正确位置，则记录本次实验结果为“0”。

表 2 记录了实验组、对照组机械臂成功抓取工件的样本数量。

表 2 机械臂成功抓取工件的样本

工件编码	实验组	对照组	工件编码	实验组	对照组
1	1	1	11	1	1
2	1	1	12	1	1
3	1	1	13	1	1
4	1	1	14	1	1
5	1	1	15	1	1
6	1	1	16	1	1
7	1	1	17	1	1
8	1	1	18	1	1
9	1	1	19	1	1
10	1	1	20	1	1

分析表 2 可知，在实验过程中，实验组、对照组机械臂成功抓取工件的样本数量均为 20 件，与工件样本总数量完全相等。根据公式 (6) 可知，若 $M = 20, M_1 = 20$ ，则 ω_1 的计算结果等于 100%，即本次实验过程中，实验组、对照组机械臂均能够正确抓取运输工件。

在抓取成功率等于 100% 的情况下，进行机械臂分拣实验。机械臂分拣轨迹准确度如图 7 所示。实验组、对照组机械臂成功抓取到正确位置的工件样本数量如表 3 所示。

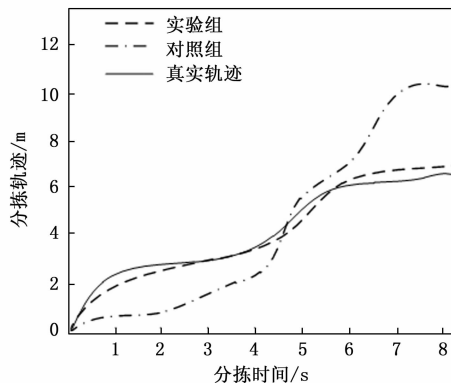


图 7 机械臂分拣轨迹准确度

如图 7 所示，实验组机械臂分拣轨迹控制结果与实际轨迹十分接近，体现了该方法的有效性。分析表 3 可知，

实验组机械臂成功抓取到正确位置的工件样本数量为 19 件, 根据公式 (6) 可知, 若 $M = 20$ 、 $M_2 = 17$, 实验组 ω_2 的计算结果等于 95%。对照组机械臂成功抓取到正确位置的工件样本数量为 15 件, 根据公式 (6) 可知, 若 $M = 20$ 、 $M_2 = 15$, 对照组 ω_2 的计算结果等于 75%, 低于实验组数值水平。

表 3 成功抓取到正确位置的工件样本

工件编码	实验组	对照组	工件编码	实验组	对照组
1	1	1	11	1	1
2	1	1	12	1	0
3	1	1	13	1	1
4	1	0	14	1	1
5	0	1	15	1	1
6	1	1	16	1	0
7	1	1	17	1	1
8	1	0	18	1	1
9	1	1	19	1	1
10	1	0	20	1	1

综上所述, 本次实验结论为: (1) 应用稳态视觉诱发电位控制系统虽然能够成功抓取工件样本, 但在将这些工件样本抓取到正确位置方面的准确性能力则相对较弱; (2) 基于 RBF-BP 算法的多自由度分拣控制系统不但可以确保机械臂元件对工件样本的成功抓取, 还可以使其将工件样本准确抓取到正确的运输位置处, 对于提升机械臂的准确分拣能力可以起到一定的促进性影响作用。

4 结束语

在确保机械臂设备可以成功抓取工件样本的基础上, 针对应用稳态视觉诱发电位控制系统分拣成功率较低的问题, 提出基于 RBF-BP 算法的多自由度分拣控制系统。联合工业相机、可编程逻辑控制器、变频控制器等多个硬件应用模块, 建立完整机械臂运动轨迹模型条件的同时, 求解 Sorting 分拣指令、ToolControl 控制指令的执行表达式。随着多自由度分拣控制系统的应用, RBF-BP 前馈神经网络可以直接作用于工业相机结构, 使其对待运输工件样本进行准确分辨, 不但可以使分拣成功率指标保持在较高的数值水平, 也可以避免工件错误分拣行为的出现, 因此 RBF-BP 算法控制系统确实能够较好地满足提升机械臂准确分拣能力的设计初衷。

参考文献:

[1] 申长捷, 柴志军. 基于 RBF-BP 神经网络的双轮平衡车姿态控制系统 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2021, 38 (3): 355-363.
 [2] 洪昌少, 黄俊, 关应元, 等. BP/RBF 神经网络与模糊规则耦合的电站锅炉燃烧控制 [J]. 热能动力工程, 2021, 36 (4): 142-148.
 [3] 黄自鑫, 赖旭芝, 王亚午, 等. 基于轨迹规划的平面三连杆欠驱动机械臂位置控制 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (2): 382-388.

[4] 陈玲玲, 陈鹏飞, 谢良, 等. 增强现实场景下基于稳态视觉诱发电位的机械臂控制系统 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (2): 496-506.
 [5] 冯瑞龙, 王志飞, 冯海全, 等. 基于 RBF 和 BP 神经网络的低真空管道高速列车气动阻力预测对比研究 [J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40 (9): 827-832.
 [6] 冯宏伟, 刘媛媛, 温子腾, 等. 基于改进型 T-S 模糊 RBF 神经网络的红外火焰探测器识别算法 [J]. 红外技术, 2021, 43 (1): 37-43.
 [7] 王涛, 杨林林, 雷天才, 等. 基于坐标旋转的偏心过渡圆弧定心约束坐标测量方法 [J]. 工具技术, 2021, 55 (7): 114-116.
 [8] 孟庆梅, 李佳宇, 李菊, 等. 半对称三平移 Delta-CU 并联机构运动误差分析与标定 [J]. 农业机械学报, 2021, 52 (1): 393-400.
 [9] 郭海波, 孟祥有. 基于同步旋转坐标下多倍频 DFT 算法和重复控制的 APF 快速控制策略 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41 (3): 26-31.
 [10] 张云飞, 赵晋斌, 周鸣健, 等. 弱电网下自适应同步旋转坐标系锁相环鲁棒性分析及研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (7): 2234-2243, 2402.
 [11] 孙秦豫, 付锐, 王畅, 等. 人机协作系统中车辆轨迹规划与轨迹跟踪控制研究 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (9): 146-160.
 [12] 路正雄, 郭卫, 张帆, 等. 基于数据驱动的综合装备协同控制系统架构及关键技术 [J]. 煤炭科学技术, 2020, 48 (7): 195-205.
 [13] 曹泽宇, 孙毅超, 丁楠木, 等. 基于车速点整定的新型同步调相机并网功率提高方法 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44 (6): 138-145.
 [14] 柴家贺, 董明利, 孙鹏, 等. 工业相机自热引起像点漂移模型与补偿方法 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50 (6): 240-250.
 [15] 李英立, 赵忆文, 王争, 等. 基于深度图像与三维栅格离线映射的机械臂环境建模方法 [J]. 控制与决策, 2020, 35 (7): 1537-1546.
 [16] 刘富, 安毅, 董博, 等. 基于 ADP 的可重构机械臂能耗保代价分散最优控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2020, 50 (1): 342-350.
 [17] 孙巍, 吕勇, 马士全. 基于 Artix-7 系列的 eMMC 阵列控制器设计与实现 [J]. 数据采集与处理, 2020, 35 (4): 771-780.
 [18] 赵国新, 丁若凡, 游建舟, 等. 基于工控业务仿真的高交互可编程逻辑控制器蜜罐系统设计实现 [J]. 计算机应用, 2020, 40 (9): 2650-2656.
 [19] 张利军, 崔晓光, 胡冰, 等. 基于龙伯格观测器的变频一体机谐波电流抑制控制 [J]. 微特电机, 2020, 48 (4): 55-59.
 [20] 康忠健, 李锴绩, 常铮. 基于扩张状态观测器的非线性最优变频空调频率控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48 (13): 91-98.

(下转第 110 页)