

基于 SCARA 机器人的包装工作站仿真设计^{*}

庞党锋 王 虎

(天津中德应用技术大学机械工程学院 天津 300350)

摘 要:针对某食品工厂月饼包装生产线需要大量人力且工作效率较低问题,构建了基于 SCARA 机器人的自动化包装工作站,依据包装流程进行离线编程,仿真分析了机器人工作站工作节拍、工作空间和轨迹规划。利用 SolidWorks 和 RobotStudio 搭建了工作站模型,结合实际场景进行规划布局,对机器人吸盘、传送带和包装盒进行了动态 Smart 组件设计,完成 I/O 信号的创建及连接,进行了编程和仿真分析。仿真结果表明,机器人运动轨迹平滑,速度和加速度连续,SCARA 机器人在食品包装生产线的应用后,提高了产线效率,降低了体力劳动强度,为自动化产线的智能升级、改造提供了借鉴。

关键词:SCARA 机器人;智能制造;食品包装;仿真设计

中图分类号: TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

Simulation design of packaging workstation based on SCARA robot

Pang Dangfeng Wang Hu

(School of Mechanical Engineering, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to solve the problem of a food factory moon cake packaging production line requiring a lot of manpower and low efficiency, this paper builds an automated packaging workstation based on SCARA robot, offline programming based on the packaging process, simulation analysis of robot workstation work beat, workspace and trajectory planning. The workstation model is built using SolidWorks and RobotStudio, and the layout is planned with the actual scenario. The dynamic Smart components of robot suction cups, conveyor belts and packaging boxes are designed, I/O signals are created and connected, and programming and simulation analysis are carried out. The results show that the robot motion trajectory is smooth, the speed and acceleration are continuous, and after the application of SCARA robot in food packaging production line, the efficiency of the production line is improved and the manual labor intensity is reduced, which provides a reference for the intelligent upgrade and transformation of the automated production line.

Keywords: SCARA robot; intelligent manufacturing; food packaging; virtual simulation design

0 引 言

近年来,随着全球制造业朝着自动化、智能化和绿色化方向转型,工业机器人作为一种机电一体化的数字装备,在生产现场使用十分广泛^[1-4]。SCARA 机器人精度高,体积小,机动性强,与六轴机器人臂相比成本低较低,已被大量用于装配、检测、搬运及食品工业等领域^[5]。

在食品包装生产过程中,工作人员需要进行大量的重复劳动,这既降低了工作效率,又增加了职业病发生率,使用机器人能降低劳动力数量,有助于降低生产成本,提高

生产效率。机器人在食品加工行业的应用,除了提高产量外,它还有可能在劳动力缺乏的情况下保障食品供应^[6]。寇舒等^[7]为了提升禽蛋包装生产的效率,开发了一套基于并联机器人的禽蛋拾取和放置包装生产线,试验结果表明应用机器人工作站,在保证质量的前提下,可以提高禽蛋拾放速度。赵相博等^[8]针对食品行业冷藏箱的码垛任务,设计了一种基于六轴工业机器人的码垛工作站,并结合灵思创奇机器人仿真平台进行了运动学分析,证明了方案可行性,提高了码垛效率。Borys 等^[9]介绍了一种基于 IRB360 六轴机器人的包装生产线,通过离线编程和测试

收稿日期:2023-03-06

^{*} 基金项目:天津市科技计划项目(22YDTPJC00270)、天津中德应用技术大学校级教学改革与建设项目(ZDJY2022-08)资助

表明,包装质量和效率都得到提升。孟静静等^[10]利用 IRB120 六轴机器人将物料瓶放入包装盒并完成加盖生产流程中,机器人的应用优化了生产线,提高了工作效率。韩基伟等^[11]设计了基于 Delta 机构的并联装箱机器人,为实现食品包装线自动化提供了一种解决方案。为了解决人工月饼装盒效率低、人本高问题,唐霞等^[12]设计了基于工业机器人和 PLC 的月饼包装盒生产线,测试表明,产线运行灵活,生产效度得到提高,这项研究为提高月饼生产线的自动包装效率和食品安全提供了启示。王银明等^[13]为了提高单片装火腿分拣效果,设计了基于机器人的缺陷识别与分拣自动化系统,研究结果显示,机器人系统在分拣系统的应用,提高了食品抓取效率。为了降低人工分拣鸡蛋造成的损害,Prakash 等^[14]将 SCARA 机器人用于鸡蛋的分拣和码垛中,不仅减少鸡蛋的破碎,而且提高了码垛速度,为食品加工行业中的分拣生产过程提供了借鉴。随着快速、精准机器人的发展,机器人在食品加工行业的应用带来的优势包括:提高生产效率与产品质量,降低了食品安全风险,同时提高工作环境安全和生产的灵活性^[15-17]。

上述的食品包装自动化包装生产线多采用六轴工业机器人和并联机器人,存在以下不足:6 轴机器人成本高,性价比较低,体积相较于 4 关节 SCARA 机器人安装空间大。并联机器人工作空间有限,灵巧度比较低,且工作区内部出现奇点。本文设计了一种基于 SCARA 机器人的月饼包装工作站,实现人与机器人协作工作,机器人占地空间小、操作方便低,便于进行编程和重新部署。

1 机器人包装工作站模型

RobotStudio 是基于 ABB 虚拟控制器的机器人离线编程软件,采用与车间实际生产过程一样的机器人程序和配置文件,对实际生产作业进行逼真的模拟和运行^[17]。该软件涵盖 ABB 的所有机器人模具,提供丰富的导轨模型、工具模型和变位器等。同时,该软件支持 SolidWorks、Unigraphics 等软件模型导入,实现了机器人系统的模拟与验证,提升了生产线的规划设计和调试效率^[18]。

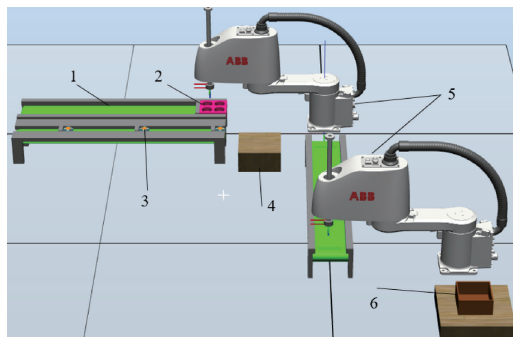
工作站布局如图 1 所示,主要包括 IRB 910SC 机器人、月饼、包装盒、工作台和传送带等。

根据查阅 ABB 工业机器人产品参数文件,工作站使用 IRB 910SC-3/0.55 机器人,3 个转动关节可实现平面内快速定位,1 个移动关节用于提取和放置物品,额定有效负载为 3 kg,最大负载能力 6 kg,工作范围达到 0.45 m。IRB 910SC 各轴工作范围如表 1 所示。

2 仿真系统设计

2.1 系统工作流程

工作站实现的是 SCARA 机器人完成月饼内盒和外包装盒自动包装过程。系统运行开始后,月饼和包装内盒传送带开始运行,当内盒、月饼到达设定位置时,机器人



1—传送带;2—包装内盒;3—月饼;4—中转工作台;
5—SCARA 机器人;6—包装外盒

图 1 机器人工作站布局

表 1 IRB 910SC 各轴工作范围

轴	动作类型	工作范围	轴最大速度
轴 1	旋转动作	$-140^{\circ} \sim +140^{\circ}$	$415^{\circ}/s$
轴 2	旋转动作	$-150^{\circ} \sim +150^{\circ}$	$659^{\circ}/s$
轴 3	线性动作	$-180 \sim 0$ mm	1 m/s
轴 4	旋转动作	$-400^{\circ} \sim +400^{\circ}$	$2\ 400^{\circ}/s$

开始工作。包装过程为机器人从传送带搬运月饼到内盒,每盒 4 个,当数量满足时,搬运内盒到外包装传送带,运行指定位置后,另一台机器人将内盒搬运到外包装底盒内。机器人包装流程如图 2 所示。

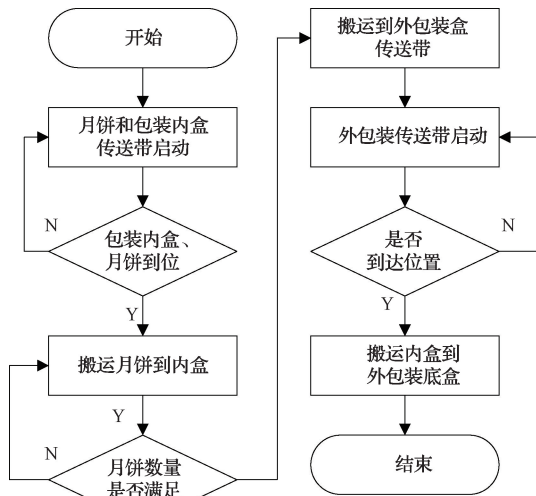


图 2 机器人包装流程

2.2 Smart 组件设计

在 RobotStudio 中建立机器人包装工作站过程中,传送带、月饼、包装盒等装置的动态效果在工作站虚拟仿真中发挥关键作用,对 I/O 信号和 Smart 组件进行关联,可实现包装工作站动态仿真效果。

以工作站传送带运动为例,Smart 组件设计如图 3 所示。Timer 每 3.6 s 发出一个脉冲给 Source,然后 Source 拷贝出包装盒送到 Queue 队列当中,LinearMover 就是移

动 Queue 队列当中的包装盒,保证盒子会在传送带 X 轴的方向上进行传输,当面传感器 PlaneSensor 检测到对象时发出一个输出信号,等待机器人抓取。

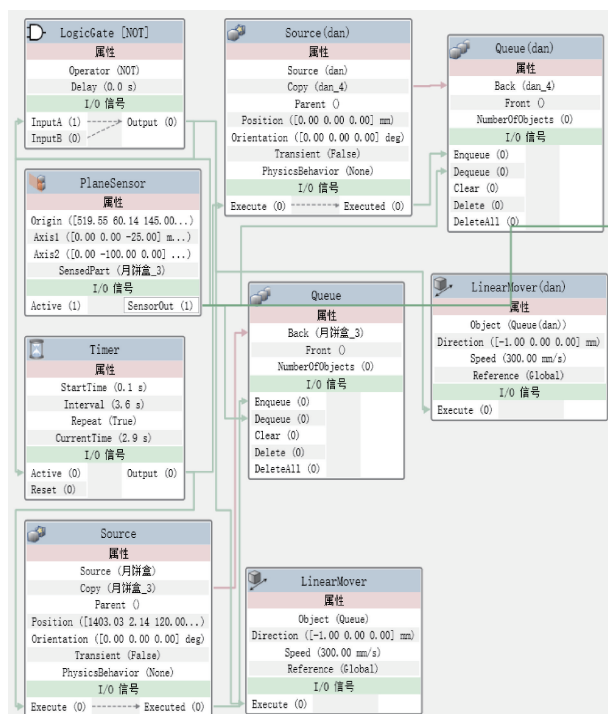


图3 传送带 Smart 组件设计

3 机器人运动学分析

3.1 D-H(Denavit-Hartenberg)坐标系建立

D-H 方法是对具有连杆和关节的机构进行建模的一种非常有效方法^[4,19]。IRB 910SC 型机器人是一个 4 自由度机器人,有 3 个转动关节和 1 个移动关节,机器人结构与连杆坐标系分布情况如图 4 所示。

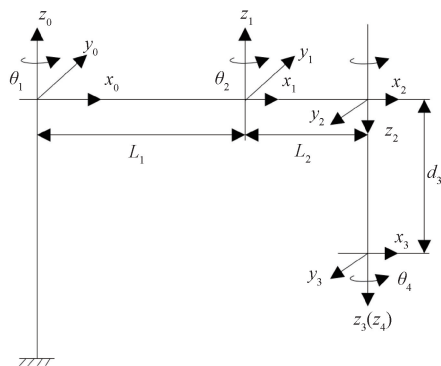


图4 IRB 910SC 结构与连杆坐标系

机器人的 D-H 参数如表 2 所示。

根据 D-H 坐标系建立规则,表 2 中各参数的含义如下: a_i 为沿 x_{i-1} 轴,从 z_{i-1} 轴移动到 z_i 轴的偏置距离, $a_i \geq 0$; α_i 为绕 x_{i-1} 轴(按右手定则),由 z_{i-1} 轴转向 z_i 轴的偏

表2 IRB 910SC 机器人连杆的 D-H 参数

i	a_i/mm	α_i/rad	d_i/mm	θ_i/rad
1	l_1	0	0	θ_1
2	l_2	π	0	θ_2
3	0	0	d_3	0
4	0	0	0	θ_4

角; d_i 为沿 z_{i-1} 轴,从 x_{i-1} 轴移动到 x_i 轴的距离; θ_i 为绕 z_{i-1} 轴(按右手定则),由 x_{i-1} 轴到 x_i 轴的关节角,其中 $l_1 = 300 \text{ mm}$, $l_2 = 250 \text{ mm}$ 。

3.2 机器人正运动学

给定机器人关节角度求解其末端连杆坐标系相对基坐标位姿为机器人正运动学。根据 D-H 参数法,用齐次坐标变换矩阵 ${}^{i-1}\mathbf{T}$ 描述坐标系 $\{i\}$ 的位姿变换成在坐标系 $\{i-1\}$ 中^[20-21]。通过表 2 可以得到 IRB910SC 机器人各连杆坐标系之间的变换矩阵。令 $\cos\theta_i = c\theta_i$, $\sin\theta_i = s\theta_i$, $\sin\theta_{i-1} = s\theta_{i-1}$, $\cos\theta_{i-1} = c\theta_{i-1}$, 坐标变换矩阵 ${}^{i-1}\mathbf{T}$ 如下:

$${}^{i-1}\mathbf{T} =$$

$$\text{Rot}(x, \alpha_{i-1}) \text{Trans}(x, a_{i-1}) \text{Rot}(z, \theta_i) \text{Trans}(z, d_i) \quad (1)$$

展开式(1)得:

$${}^{i-1}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

连杆坐标系 $\{0\}$ 与连杆坐标系 $\{4\}$ 之间的变换矩阵如下:

$${}^0\mathbf{T} = {}^0\mathbf{T}_1 {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 {}^3\mathbf{T}_4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) & s(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) & 0 & 0 \\ s(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) & -c(\theta_1 + \theta_2 - \theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

机器人的末端位置为:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} l_1 c\theta_1 + l_2 c(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 s\theta_1 + l_2 s(\theta_1 + \theta_2) \\ -d_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

3.3 机器人逆运动学

逆运动学是已知机器人 4 个连杆坐标变换矩阵的乘积 ${}^0\mathbf{T}$, 计算得出 4 个关节角 $\theta_1 \sim \theta_4$ 。在齐次变换矩阵 $\mathbf{T}$ 两端依次左乘 ${}^{i-1}\mathbf{T}$ 矩阵的逆矩阵,使两端元素对应相等,通过等式方程求各关节角度^[22]。求关节 θ_1 时,为了分离变量,对式(5)的两边同时左乘 ${}^0\mathbf{T}_1^{-1}$ 得:

$${}^0\mathbf{T}_4^{-1} {}^0\mathbf{T} = {}^1\mathbf{T}_2 {}^2\mathbf{T}_3 {}^3\mathbf{T}_4 \mathbf{T} \quad (5)$$

展开得到:

$$\begin{bmatrix} n_x c\theta_1 + n_y s\theta_1 & o_x c\theta_1 + o_y s\theta_1 \\ -n_x s\theta_1 + n_y c\theta_1 & -o_x s\theta_1 + o_y c\theta_1 \\ n_z & o_z \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x c\theta_1 + a_y s\theta_1 & p_x c\theta_1 + p_y s\theta_1 - l_1 \\ -a_x s\theta_1 + a_y c\theta_1 & -p_x s\theta_1 + p_y c\theta_1 \\ a_z & p_z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\theta_2 - \theta_1) & s(\theta_2 - \theta_1) & 0 & l_2 c\theta_2 \\ s(\theta_2 - \theta_1) & -c(\theta_2 - \theta_1) & 0 & l_2 s\theta_2 \\ 0 & 0 & -1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)第1行和第2行的第4列元素相等得:

$$\begin{cases} \cos\theta_1 \cdot p_x + \sin\theta_1 \cdot p_y - l_1 = \cos\theta_2 \cdot l_2 \\ -\sin\theta_1 \cdot p_x + \cos\theta_1 \cdot p_y = \sin\theta_2 \cdot l_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{A}{\pm \sqrt{1-A^2}}\right) - \varphi \quad (8)$$

式中: $A = \frac{l_1^2 - l_2^2 + p_x^2 + p_y^2}{2l_1 \cdot \sqrt{p_x^2 + p_y^2}}$, $\varphi = \arctan \frac{p_y}{p_x}$, 正负号表示

θ_1 的解可能有2个。由式(6)得到:

$$\theta_2 = \arctan \frac{r \cos(\theta_1 + \varphi)}{r \sin(\theta_1 + \varphi) - l_1} \quad (9)$$

式中: $r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$, $\varphi = \arctan \frac{p_y}{p_x}$ 。式(6)第2行的第1个元素相等得:

$$\theta_4 = \theta_2 - \arcsin(-\sin\theta_1 \cdot n_x + \cos\theta_1 \cdot n_y) \quad (10)$$

4 机器人运行轨迹规划

4.1 MATLAB 构建机器人模型

在 Robotics Toolbox 10.2 工具箱中,利用 robot 和 Link 函数建立 IRB910SC 机器人数学模型,Link 函数的调用格式为 $L = \text{Link}(\alpha, a, \theta, d, \sigma)$, α 为连杆扭转角, a 是连杆长度, θ 为连杆关节角, d 为连杆横距, σ 为关节类型,0 代表转动关节。程序如下:

```
L1 = Link([0,0.620,0,0]);
L2 = Link([0,0,0.300,0]);
L3 = Link([0,0,0.250,pi]);
L4 = Link([0,0,0,0]);
IRB910SC = SerialLink([L1,L2,L3,L4], 'name', 'IRB910SC 机器人');
IRB910SC.fkine([0,0,0,0]);
IRB910SC.teach
```

图5所示 IRB910SC 机器人仿真模型。

4.2 机器人工作空间绘制

机器人工作空间的绘制可为工作站布局提供参考。将给定范围内的足够多的随机数与机器人的关节变量构成关节变量矩阵,然后再对该关节变量矩阵使用正运动求

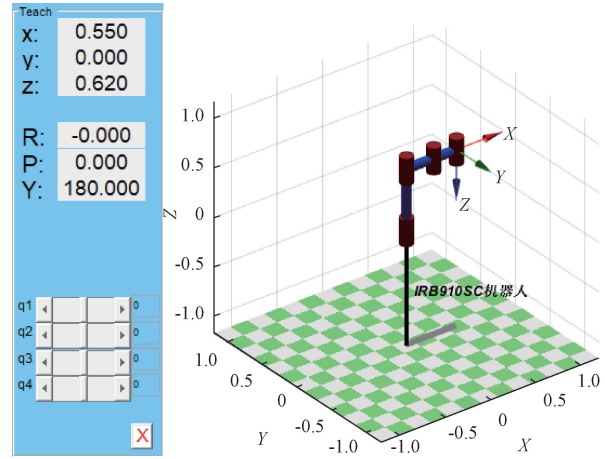


图5 IRB 910SC 机器人仿真模型

解得到机器人的末端位置矢量,应用函数进行散点图绘制,得到机器人的操作空间^[23]。随机数量选取 10 000 时,利用 MATLAB 工具绘制的 SCARA 机器人的工作空间如图6所示。

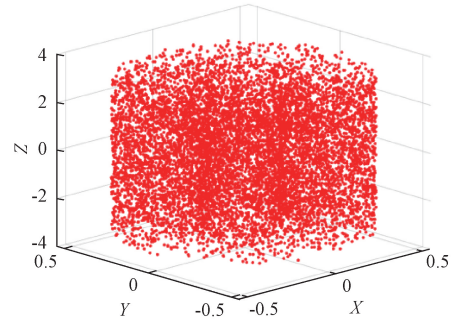


图6 SCARA 机器人工作空间

4.3 五次多项式轨迹规划

在机器人关节空间轨迹规划中,五次多项式函数曲线满足 SCARA 搬运机器人运动的速度、时间及加速度连续性^[24]。采用五次多项式函数曲线对轨迹路径完成插值计算。五次多项式函数通式 $\theta(t)$ 为:

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (11)$$

已知 SCARA 机器人的初始和终止姿态,轨迹函数满足6个约束条件,角度约束条件: $\theta(0) = \theta_0, \theta(t_f) = \theta_f$; 速度约束条件: $\dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0, \dot{\theta}(t_f) = \dot{\theta}_f$; 加速度约束条件: $\ddot{\theta}(0) = \ddot{\theta}_0, \ddot{\theta}(t_f) = \ddot{\theta}_f$ 。将上述约束条件代入五次多项式,得6个方程如下:

$$\begin{cases} \theta_0 = a_0 \\ \theta_f = a_0 + a_1 t_f + a_2 t_f^2 + a_3 t_f^3 + a_4 t_f^4 + a_5 t_f^5 \\ \dot{\theta}_0 = a_1 \\ \dot{\theta}_f = a_1 + 2a_2 t_f + 3a_3 t_f^2 + 4a_4 t_f^3 + 5a_5 t_f^4 \\ \ddot{\theta}_0 = 2a_2 \\ \ddot{\theta}_f = 2a_2 + 6a_3 t_f + 12a_4 t_f^2 + 20a_5 t_f^3 \end{cases} \quad (12)$$

求解方程组式(12),得到五次多项式系数如下:

$$\begin{cases} a_0 = \theta_0 \\ a_1 = \dot{\theta}_0 \\ a_2 = \frac{\ddot{\theta}_0}{2} \\ a_3 = \frac{20\theta_f - 20\theta_0 - (8\dot{\theta}_f + 12\dot{\theta}_0)t_f - (3\ddot{\theta}_0 - 2\ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^3} \\ a_4 = \frac{30\theta_0 - 30\theta_f + (14\dot{\theta}_f + 16\dot{\theta}_0)t_f + (3\ddot{\theta}_0 - 2\ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^4} \\ a_5 = \frac{12\theta_f - 12\theta_0 - (6\dot{\theta}_f + 6\dot{\theta}_0)t_f - (\ddot{\theta}_0 - \ddot{\theta}_f)t_f^2}{2t_f^5} \end{cases} \quad (13)$$

4.4 轨迹规划仿真

利用 Robotics Toolbox 工具箱中的 jtraj 函数进行轨迹仿真。本文采用点运动(PTP)轨迹规划,利用软件中的 jtraj 功能函数进行差值计算,jtraj 功能函数采用的是高次多项式插值法,设起点 $[0,0,0,0]$ 为机器人初始位置,终点 $[\pi/2, \pi/3, -0.1, \pi]$ 为机器人运动终点位置,差值步长为 0.2 s ,时间范围为 2 s ,用函数,使用函数 $\text{plot}(t, q(:,i))$ 、 $\text{plot}(t, v(:,i))$ 和 $\text{plot}(t, a(:,i))$ 来绘制机器人的关节角位移、角速度及角加速度曲线,其中 $i=1,2,3,4$,为4个关节。

机器人关节位移曲线如图7所示,关节速度曲线如图8所示,关节加速度曲线如图9所示。

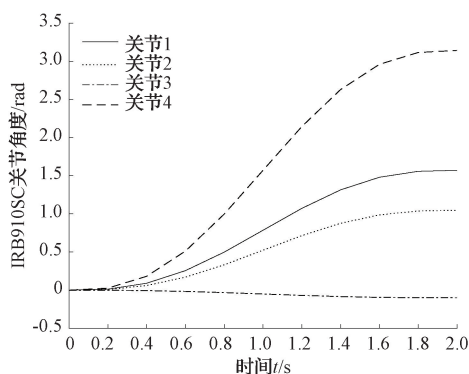


图7 IRB910SC 机器人关节位移曲线

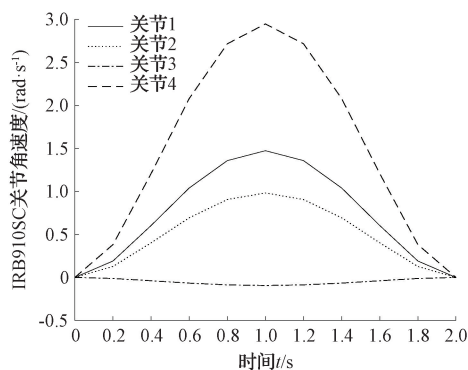


图8 IRB910SC 关节速度曲线

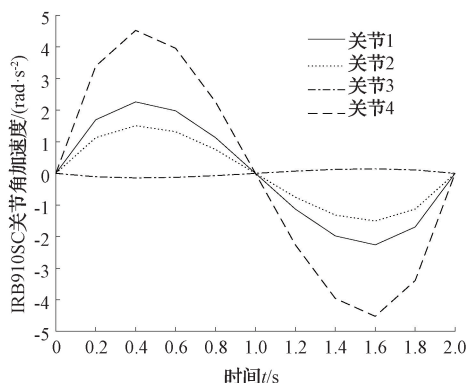


图9 IRB910SC 关节加速度曲线

图7中机器人关节位移曲线表明了4个关节的位姿在 2 s 的时间内运动到了设定终点的位姿,在不考虑机器人运动干涉的情况下,可以满足控制的需求。图8和9的机械臂运动时关节速度和加速度曲线均连续无断点、相对平滑,说明机械臂的动作较为平稳,整体结构不会产生较大振动。

5 程序设计与实验仿真

5.1 机器人程序设计

根据包装流程,利用虚拟示教器完成坐标点示教,程序设计和调试。虚拟示教器程序编辑窗口如图10所示。

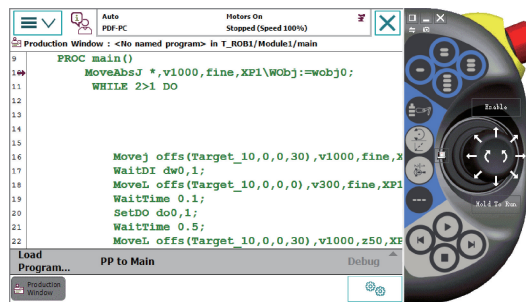


图10 虚拟示教器程序窗口

5.2 实验仿真

完成工作站设计布局后,根据生产流程和轨迹规划,进行 I/O 信号配置和编程设计,启动虚拟示教器进行坐标示教,月饼包装过程仿真效果如图11所示。

图11中,3、5、7为机器人搬运过程空间轨迹曲线。启动传送带后,包装内盒1运动到位,2是传送带上运行的月饼。包装盒4里共有3个月饼,数量还不到4个,所以在机器人按照轨迹3将月饼搬到月饼盒,等待中转工作台上包装盒4数量满足后,机器人按照运动轨迹7将4搬运到外包装传送带。外包装传送带搬运机器人按照轨迹5搬运包装内盒到包装底盒6,单个包装流程结束。

由图11可知,虚拟仿真效果与图2设计的包装流程完全一致,工作站布局的 SCARA 机器人 IRB910SC 从

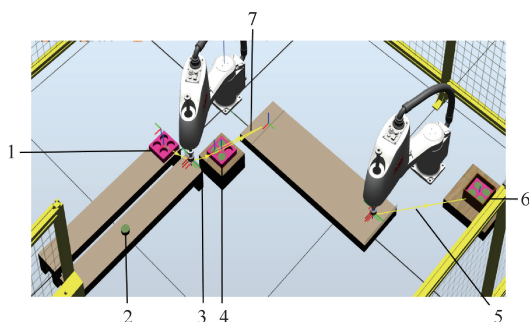


图 11 包装工作站仿真效果

RobotStudio 模型库中选取,机器人运动学和动力学模型精确。虚拟仿真工作站机器人的 RAPID 程序与实物系统程序一致,机器人的运动轨迹来自实际程序驱动实现并记录显示,虚拟仿真实验验证了包装工作站的设计合理性,对实际包装产线的布局和规划具有参考价值。

6 结 论

SCARA 机器人运行速度快,成本效益高,适合于小件装配和物料搬运。本文构建了基于 IRB910SC 机器人的自动包装工作站,在 RobotStudio 机器人虚拟仿真平台上,导入 SolidWorks 创建的传送带等三维建模,通过 Smart 组件设计、I/O 连接和通信设置。依据生产工艺进行离线编程,仿真分析了包装生产节拍和空间轨迹规划,本文建立的机器人工作站虚拟仿真模型,使用机器人实际程序对其进行数字驱动的仿真调试,验证了在真实生产给定时序下,产线设计方案的正确性和机器人程序的正确性,减少了机电联调发现问题修改设计方案所带来的成本和时间消耗,可降低开发设计成本,缩短调试周期,提高了研发效率,为实际生产线设计、调试和升级提供理论依据,对食品工业等领域包装生产线的设计具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] 张华文, 张晓栋, 周航. 基于 RobotStudio 的多功能工作站仿真设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12): 65-69.
- [2] 张春涛, 王勇. 工业机器人六维力传感器在线标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 161-168.
- [3] 张涛, 吕庆海. 车轮生产线中基于视觉引导机械手定位抓取系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(16): 56-61.
- [4] 唐尧, 张恩政, 陈本永, 等. 基于运动学分析的工业机器人轨迹精度补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 175-183.
- [5] 张守丽, 俞玥. SCARA 机械臂在金针菇搬运生产线中的应用研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 220-224.
- [6] LALITA K P. Robotics Intervention in food processing industries: A mini review[J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2022, 41(40): 1-9.
- [7] 寇舒, 王永慧. 基于并联机器人的禽蛋包装生产线的研究与试验[J]. 包装工程, 2023, 44(1): 169-174.
- [8] 赵相博, 潘松峰, 吴贺荣, 等. 食品包装行业的码垛机器人轨迹规划仿真[J]. 包装与食品机械, 2020, 38(4): 61-65.
- [9] BORYS S, KACZMAREK W, LASKOWSKI D. Selection and optimization of the parameters of the robotized packaging process of one type of product[J]. Sensors, 2020, 20(18): 5378-5404.
- [10] 孟静静, 郝睿, 王惠卿, 等. 基于 PLC 与工业机器人的自动生产线智能包装系统设计[J]. 制造技术与机床, 2021(11): 63-67.
- [11] 韩基伟, 孟钢钳. Delta 机构的装箱机器人的工作空间及轨迹规划[J]. 食品工业, 2021, 42(3): 216-219.
- [12] 唐霞, 魏昌洲. 基于 PLC 和工业机器人的月饼自动装盒生产线设计与实现[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 106-112.
- [13] 王银明, 张丹. 基于并联机器人的单片装火腿缺陷识别与分拣系统设计[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 104-109.
- [14] PRAKASH A, RAJENDRAN A, PRANAV V K, et al. Design, analysis, manufacturing and testing of a SCARA robot with pneumatic gripper for the poultry industry[C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1132(1): 1-7.
- [15] E-FATIMA K, KHANDAN R, HOSSEINIAN-FAR A, et al. Adoption and influence of robotic process automation in beef supply chains [J]. Logistics, 2022, 6(3): 48-68.
- [16] GURUSWAMY S, POJIĆ M, SUBRAMANIAN J, et al. Toward better food security using concepts from industry 5.0[J]. Sensors, 2022, 22(21): 8377-8401.
- [17] DUONG L N K, AL-FADHLI M, JAGTAP S, et al. A review of robotics and autonomous systems in the food industry: From the supply chains perspective[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 106: 355-364.
- [18] 陈磊, 朱斌, 罗国虎, 等. 基于 Robot Studio 的多机器人冲压生产线仿真及研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 66-71.
- [19] 庞党锋, 崔世钢, 熊浪. 基于协作机器人的计算机装配工作站设计与仿真分析[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(2): 100-104.
- [20] 严大亮, 张方, 王刚, 等. DH 坐标系中重载机器人

- 参数辨识的研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(11): 76-81.
- [21] 温秀兰, 宋爱国, 冯月贵, 等. 基于最优位姿集的机器人标定及不确定度评定[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 276-283.
- [22] 胡嘉阳, 韦巍. 基于五次 NURBS 曲线的六轴机器人多目标轨迹优化[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 198-203.
- [23] 高雪佳, 廖福元. 上肢康复机器人运动学及轨迹规划仿真[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(7): 1-5.
- [24] 李玉齐. 六自由度机械臂轨迹规划与协调仿真研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(2): 50-54.

作者简介

庞党锋, 博士研究生, 主要研究方向为智能控制、机器人与数字孪生技术。

E-mail: tj dangfeng@163.com