[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2025.05.002

多用途搬运机器人末端执行器设计

程晶晶，莫培煜，张守京*

（西安工程大学 机械工程学院，陕西 西安 710048）

摘 要：为了实现袜子工厂物料箱搬运和线筒、袜子成品多样化的抓取需求，课题组设计了一款基于双臂搬运机器人的连杆驱动多功能末端执行器。基于模块化设计的托板和机械手分别实现了物料箱的搬运和线筒、袜子的精准抓取，并通过系统化的结构设计使末端执行器的尺寸、形状能够灵活适配工厂多样化搬运需求；采用D-H参数法对该末端执行器进行了正、逆运动学分析，得到了手指末端在三维空间中的精确位置和姿态信息；通过MATLAB与ADAMS进行了仿真抓取实验。仿真结果表明：该末端执行器能够实现大物料箱的搬运和线筒、袜子的精准抓取，末端执行器的设计具有合理性、多功能性和实用性，具备较高的实用价值。

关 键 词：机器人；末端执行器；机械手；D-H参数法；MATLAB软件；ADAMS软件

中图分类号：TP241；TH112　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005-2895(2025)05-0011-07

Design of End-Effector for Multi-Purpose Handling Robot

CHENG Jingjing, MO Peiyu, ZHANG Shoujing*

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi′an Polytechnic University, Xi′an 710048, China)

Abstract: In response to the diverse demands for material boxes handling and spools and sock products grasping in sock factory, a multi-functional end-effector driven by a linkage based on a dual-arm handling robot was designed. Based on modular design, the pallet and mechanical hand have respectively achieved handling of material boxes and precisely grasping of spools and socks. And through systematic structural design, the size and shape of the end-effector could be flexibly adapted to the diverse handling needs of the factory. The forward and inverse kinematics analysis of the end-effector was conducted using the D-H parameter method, the precise position and posture information of the finger end in three-dimensional space were obtained. Simulation verification and grasping experiments were conducted using MATLAB and ADAMS. The results show that the end-effector is capable of handling large material boxes and accurately grasping spools and socks. The design of the end-effector is reasonable, multifunctional, and practical, demonstrating high practical value.

Keywords: robot; end-effector; mechanical hand; D-H parameter method; MATLAB; ADAMS

工业智能化水平的迅速提升，以及袜子等纺织品的市场需求持续增长，推动了袜子工厂生产过程向智能化转型[1]。在传统生产模式中，单调且重复性高的物料搬运工作仍高度依赖人工操作。然而，随着人工成本的持续攀升，用工荒的问题愈发严峻，这一问题已成为阻碍袜子工厂产业升级的关键制约因素[2]。搬运机器人的引入替代了人工。搬运机器人能精准高效地将物料运送至指定地点，显著提升了生产效率并降低了人工成本。然而，传统的搬运机器人末端执行器多是根据抓取单一形状和大小的物体的需求设计的，通常只能实现特定的抓取任务，难以满足袜子工厂中形状多样、尺寸差异显著的搬运需求。在进行不同物体搬运时，传统的搬运机器人需要频繁更换末端执行器，这不仅增加了设备成本，还降低了生产效率[3]。

收稿日期：2025-04-01；**修回日期**：2025-06-20

基金项目：陕西省“秦创原科学家+工程师”队伍建设项目(2024QCY-KXJ-030)。

第一作者简介：程晶晶(1995)，女，硕士研究生，主要研究方向为末端执行器结构设计。**通信作者**：张守京(1976)，男，博士，教授，硕士生导师，主要研究方向为物流工程与供应链管理。E-mail：zhangshoujing@xpu.ed

尽管相关学者针对这一问题提出了多种解决方案,但仍存在诸多局限性,难以满足实际生产中的复杂需求。

因此,针对袜子工厂产品结构复杂、尺寸差异巨大和单一结构机器人适应性不足的问题,课题组设计了一款基于双臂搬运机器人的连杆驱动多功能末端执行器,旨在提升袜子工厂物料搬运的自动化水平。该末端执行器结构简单,集成了机械手模块和托板模块,既能通过机械手模块实现对结构复杂、尺寸较小产品的精准抓取和包络抓取,又能通过托板模块及双臂的协同,完成大尺寸物料箱的稳定搬运。该末端执行器结构简单、控制便捷,能够适应多种复杂场景下的货物搬运需求,为纺织行业的智能化升级提供了参考。

1 末端执行器设计

1.1 整体结构

该末端执行器采用模块化设计,主要包括托板模块和机械手模块 2 部分。其中,机械手模块由手指、手掌和传动系统组成,托板模块安装在手掌的上、下壳体上。末端执行器整体结构如图 1 所示。托板模块专门用于搬运袜子工厂的大尺寸物料箱,为了提高其承载能力和稳定性,使其适配多种规格物料箱的转运需求,该模块采用改良工字钢结构。机械手模块则负责精准抓取线筒和袜子等小型物料,为了能够适应不同形状和尺寸的物料,确保抓取过程中不造成纱线和纺织品损坏,机械手模块采用 3 指协同构型设计,各手指均配置缓冲包覆层及传感系统。机械手模块采用基于连杆传动的多自由度驱动方案,不仅保证了末端执行器的灵活性,而且确保了其在复杂工作环境中的稳定性。模块化设计使得末端执行器能够适应不同的任务需求,显著提升了袜子工厂的自动化水平。

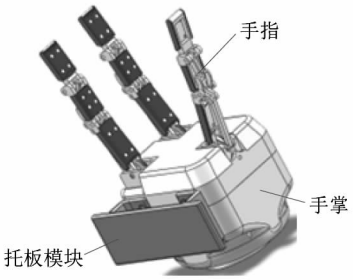

图 1 末端执行器整体结构

Figure 1 Overall structure of end-effector

1.2 手指结构及工作原理

机械手模块单根手指结构如图 2 所示。每根手指都有 3 个关节,即近指节、中指节和远指节,多关节手指在抓取过程中有自适应目标物体形状的能力,确保抓取动作的可靠性和高效性。这种设计不仅提高了机械手的通用性,还使其能够应对袜子工厂中多样化的抓取需求,例如线筒、袜子等形状各异的小型物料的抓取。

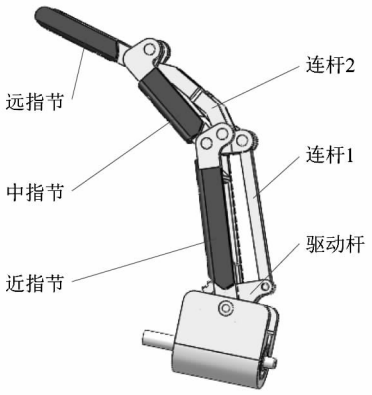

图 2 机械手模块单根手指结构

Figure 2 Single finger structure of mechanical hand module

机械手模块单根手指结构简图如图 3 所示,其中近指节长度 l_{AC} 为 45.0 mm,中指节长度 l_{CE} 为 30.0 mm,远指节长度 l_{EG} 为 30.0 mm。驱动杆长度 l_{AH} 为 11.5 mm,连杆 1 长度 l_{DH} 为 40.0 mm,连杆 2 长度 l_{BF} 为 29.0 mm。

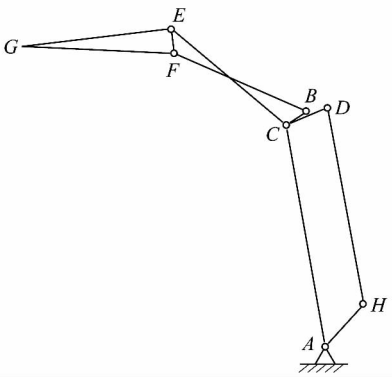

图 3 机械手模块单根手指结构简图

Figure 3 Single finger structure diagram of mechanical hand module

单根手指的抓取方式分为包络抓取和指尖抓取,具体的抓取原理为:

1）包络抓取。伺服电机带动驱动杆 *AH* 转动,在弹性元件的约束下,近指节杆件 *ACB* 随之转动,直至近指节与被抓取物体接触,完全接触后形成机械限位;随后驱动力克服杆件 *ACB* 与驱动杆 *AH* 之间弹性元件的阻尼力,弹性元件释放出 1 个自由度,驱动杆 *AH* 带动中指节杆件 *DCE* 继续运动直至与接触物完全接触,从而完成了单指的包络抓取[4]。

2）指尖抓取。伺服电机带动驱动杆 *AH* 转动,在未接触抓取物时,由于弹性元件的约束,手指仅有 1 个自由度,直到指尖与抓取物接触并形成机械限位,从而实现精准的指尖抓取[5]。

该机械手指采用紧凑型设计,在保持抓取力的同时实现高效包络抓取。这种设计不仅显著提升了抓取过程的稳定性,还增强了机械手对不同形状和尺寸物料的适应能力[6]。

2　运动学分析

机器人运动学分析主要包括正向运动学分析和逆向运动学求解。课题组以机械手为研究对象,基于D-H参数建模理论,建立了完整的末端执行器运动学模型。首先,利用正运动学理论,推导出末端执行器指尖相对于基坐标系的位置和姿态的数学表达式,明确各指节转角与指尖位置之间的映射关系;随后,结合逆运动学理论,进一步探讨如何从目标位置反推出各指节转角的计算方法,为机械手的运动规划提供理论支持[7]。

2.1　正运动学分析

正运动学研究的是在已知机器人各关节变量的情况下,求解末端执行器指尖在空间中的位置和姿态。由于搬运机器人末端执行器的所有手指结构完全相同,因此可以选择其中任意一根手指作为正运动学分析的代表,以简化研究过程并确保分析结果的普适性。如图 4 所示,课题组基于 D-H 模型构建了单根手指的正运动学坐标系,D-H 模型通过定义 4 个参数(连杆长度 a_i、相邻两连杆之间的扭转角 α_i、关节偏移 d_i 和关节转角 θ_i)来描述相邻连杆之间的相对位置和姿态关系,为机械手的正运动学分析提供了清晰的数学框架。

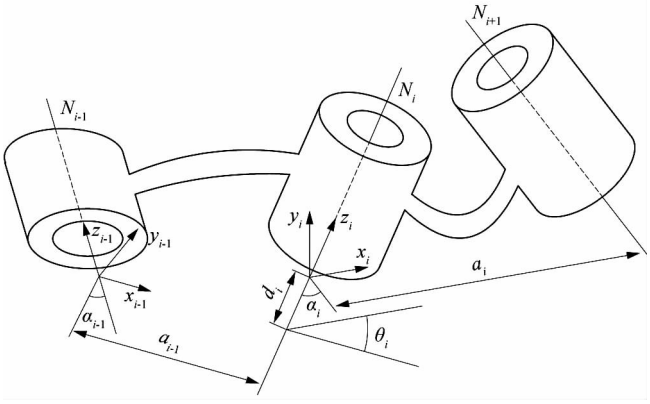

图 4　单根手指 D-H 正运动学坐标系

Figure 4　D-H forward kinematics coordinate system of single finger

在机械手的正运动学分析中,相邻关节坐标系(如 N_{i-1} 指关节坐标系到 N_i 指关节坐标系)的变换可通过旋转矩阵与平移向量的组合运算实现。该过程涉及绕指定轴的旋转变换和沿特定方向的平移变换,这些变换可通过齐次坐标表示法整合为单一的 4×4 变换矩阵。这种矩阵乘法运算能够完整地描述机械系统中关节坐标系间的相对位姿关系,其数学表达式是齐次变换矩阵的连乘[8]。相邻关节坐标系变换具体步骤如下:

1）首先,绕着 x_{i-1} 轴旋转,旋转角度为 α_{i-1},使 z_{i-1} 轴与 z_i 轴平行,得到转换矩阵 $\boldsymbol{R}(x,\alpha_{i-1})$;

2）然后,沿着 x_{i-1} 轴方向移动,移动距离为 a_{i-1},得到转换矩阵 $\boldsymbol{T}(a_{i-1},0,0)$;

3）接着,绕着 z_i 轴旋转,旋转角度为 θ_i,使 x_{i-1} 轴与 x_i 轴平行,得到转换矩阵 $\boldsymbol{R}(z,\theta_i)$;

4）最后,沿着 z_i 轴方向移动,移动距离为 d_i,得到转换矩阵 $\boldsymbol{T}(0,0,d_i)$。

上述 4 个变换矩阵按顺序相乘,得到从 N_{i-1} 指关节坐标系到 N_i 指关节坐标系的总转换矩阵 $\boldsymbol{T}_i$。

$$\boldsymbol{T}_i=\boldsymbol{R}(x,\alpha_{i-1})\boldsymbol{T}(a_{i-1},0,0)\boldsymbol{R}(z,\theta_i)\boldsymbol{T}(0,0,d_i)=$$

$$\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&\cos\alpha_{i-1}&-\sin\alpha_{i-1}&0\\0&\sin\alpha_{i-1}&\cos\alpha_{i-1}&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0&a_{i-1}\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\theta_i&-\sin\theta_i&0&0\\\sin\theta_i&\cos\theta_i&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&d_i\\0&0&0&1\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i\sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i\cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{1}$$

为简化手指正运动学建模,可以将手指抽象为一个由多个连杆和关节组成的机构,并建立如图 5 所示的单根手指坐标系模型,根据该模型建立对应的 D-H 坐标系。图 5 中,o_0-$x_0y_0z_0$ 为基坐标系,此坐标系建立在手指近指节节点处。o_3-$x_3y_3z_3$ 为指尖坐标系,此坐标系建立在手指远指节节点处[9]。其中 l_{AC}为近指节长度,l_{CE}为中指节长度,l_{EG}为远指节长度。

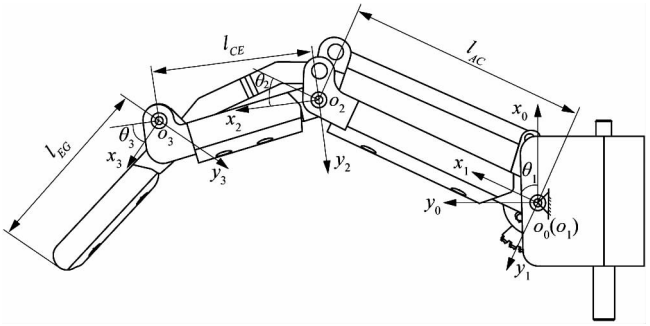

图 5 单根手指坐标系模型

Figure 5 Coordinate system model of single finger

基于 D-H 建模方法,结合机械结构设计,可确定单根手指的 D-H 参数如表 1 所示。

表 1 单根手指 D-H 参数

Table 1 D-H parameters of single finger

连杆号	连杆扭角 α_{i-1}/(°)	连杆长度 a_{i-1}/mm	关节转角 θ_i/(°)	关节偏移 d_i/mm
1	0	0	θ_1	0
2	0	l_{AC}	θ_2	0
3	0	l_{CE}	θ_3	0

将表 1 中的 D-H 参数带入式(1),可以得到搬运机器人末端执行器单根手指各关节坐标系间的转换矩阵${}_i^{i-1}\boldsymbol{T}$。进而求得基坐标系到指尖坐标系的复合变换矩阵${}_3^0\boldsymbol{T}$。指尖在基坐标系中的位姿由${}_3^0\boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{T}(l_3,0,0)$确定。其中,$\boldsymbol{T}(l_3,0,0)$表示指尖相对于指尖关节坐标系的偏移变换。

$${}_i^{i-1}\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{2}$$

式中:$i=1,2,3$。

$${}_3^0\boldsymbol{T}={}_1^0\boldsymbol{T}{}_2^1\boldsymbol{T}{}_3^2\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix} \cos\theta_{123} & -\sin\theta_{123} & 0 & l_{AC}\cos\theta_1+l_{CE}\cos\theta_{12} \\ \sin\theta_{123} & \cos\theta_{123} & 0 & l_{AC}\sin\theta_1+l_{CE}\sin\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \tag{3}$$

$${}_3^0\boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{T}(l_3,0,0)=\begin{bmatrix} \cos\theta_{123} & -\sin\theta_{123} & 0 & l_{AC}\cos\theta_1+l_{CE}\cos\theta_{12} \\ \sin\theta_{123} & \cos\theta_{123} & 0 & l_{AC}\sin\theta_1+l_{CE}\sin\theta_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_{EG} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_{123} & -\sin\theta_{123} & 0 & l_{AC}\cos\theta_1+l_{CE}\cos\theta_{12}+l_{EG}\cos\theta_{123} \\ \sin\theta_{123} & \cos\theta_{123} & 0 & l_{AC}\sin\theta_1+l_{CE}\sin\theta_{12}+l_{EG}\sin\theta_{123} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \tag{4}$$

式中:$\cos\theta_{12}=\cos(\theta_1+\theta_2)$;$\cos\theta_{123}=\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3)$;$\sin\theta_{12}=\sin(\theta_1+\theta_2)$;$\sin\theta_{123}=\sin(\theta_1+\theta_2+\theta_3)$。

可计算出单根手指指尖坐标为:

$$\left.\begin{aligned} x&=l_{AC}\cos\theta_1+l_{CE}\cos\theta_{12}+l_{EG}\cos\theta_{123}; \\ y&=l_{AC}\sin\theta_1+l_{CE}\sin\theta_{12}+l_{EG}\sin\theta_{123}; \\ z&=0。 \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

2.2　逆运动学分析

逆运动学分析旨在根据末端执行器的指尖的目标位姿,反解出各关节变量,使机械结构能够精准到达预定位置并满足姿态约束。课题组采用几何解析法进行求解,根据式(5)的位姿关系,建立关节角度与末端位置的映射模型。该方法通过几何约束关系直接推导关节变量,降低了数值迭代的计算复杂度。

由式(5)可得:

$$\left.\begin{aligned} x - l_{EG}\cos\theta_{123} &= l_{AC}\cos\theta_1 + l_{CE}\cos\theta_{12};\\ y - l_{EG}\sin\theta_{123} &= l_{AC}\sin\theta_1 + l_{CE}\sin\theta_{12}。\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

假设:

$$\left.\begin{aligned} x - l_{EG}\cos\theta_{123} &= k_1;\\ y - l_{EG}\sin\theta_{123} &= k_2。\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

根据余弦定理可得:

$$k_1^2 + k_2^2 = l_{AC}^2 + l_{CE}^2 + 2l_{AC}l_{CE}\cos\theta_2。 \tag{8}$$

解得:

$$\left.\begin{aligned} \theta_1 &= \arctan\left(\frac{k_2}{k_1}\right) + \arctan\left(\frac{\pm\sqrt{4l_{AC}^2l_{CE}^2 - (k_1^2 + k_2^2 - l_{AC}^2 - l_{CE}^2)^2}}{k_1^2 + k_2^2 - l_{AC}^2 - l_{CE}^2}\right);\\ \theta_2 &= \pm\arccos\left(\frac{k_1^2 + k_2^2 - l_{AC}^2 - l_{CE}^2}{2l_{AC}l_{CE}}\right)。\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

由此可以得到在指尖坐标相应的指关节转角。

2.3　单根手指工作空间

手指的工作空间是指其在三维空间内能够到达的所有可能位置的集合,是评估机械手灵活性、运动范围以及任务适应能力的重要指标。课题组采用 MATLAB 中的 Robotics Toolbox 工具箱搭建单根手指的仿真模型如图 6 所示。课题组采用蒙特卡洛随机采样法,结合已建立的 D-H 参数模型,对单根手指指尖的运动空间进行了详细分析。具体实现过程为:首先,在关节变量的取值范围内进行均匀随机采样;随后,通过正运动学方程将每组关节变量转换为指尖的空间坐标;最终,通过大量采样点的空间分布特征来表征手指的可达工作空间。这种基于概率统计的方法避免了复杂的解析计算,能够生成工作空间的点云分布图,为机械手指的性能评估和优化设计提供了量化依据。单根手指工作空间投影如图 7 所示。从图 7 可以看出:单根手指的工作空间呈现出月牙形的分布特征,且内部没有空腔,表明其运动范围连续且无间断。这种连贯的工作空间特性确保了手指能够在任务执行过程中得到平滑、无突变的运动轨迹,从而提高了机械手的操作精度和可靠性。

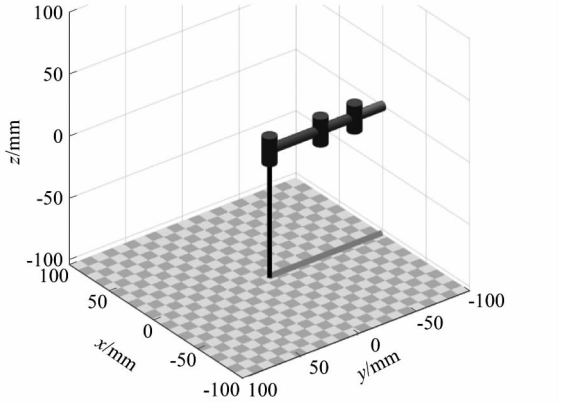

图 6　单根手指的 MATLAB 仿真模型

Figure 6　MATLAB simulation model of single finger

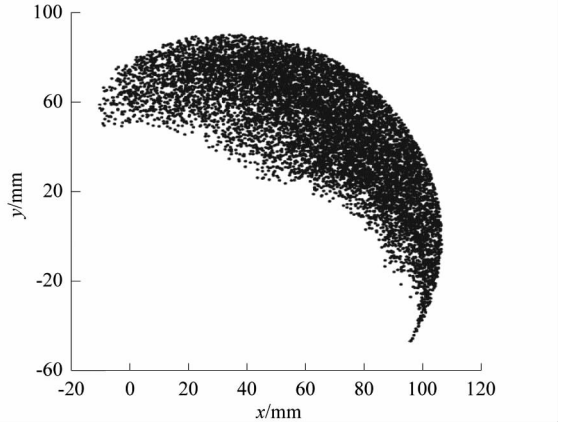

图 7　单根手指工作空间投影

Figure 7　Workspace projection of single finger

3　末端执行器抓取仿真实验

为了验证设计的末端执行器在实际应用中的多功能性和实用性[10],分别对纱线、成品袜子和物料箱进行了抓取仿真实验。通过 ADAMS 仿真软件对抓取过程进行模拟,以验证末端执行器在不同任务中的表现。

纱线作为袜子生产中的主要原材料,对其抓取过程的精准度和稳定性要求极高。为了验证末端执行器在纱线抓取任务中的性能,首先在 SolidWorks 中建立了末端执行器和纱线的三维模型,并将其导入 ADAMS 仿真软件中。在 ADAMS 环境中,纱线模型被精确放

置在预设的抓取位置,同时为末端执行器和纱线添加了必要的运动副、接触力等约束条件,并设置了驱动函数以模拟实际的抓取动作。通过对末端执行器的包络抓取动作进行仿真分析,得到了如图 8 所示的动作过程。仿真结果表明:该末端执行器在抓取纱线过程中能够顺利完成包覆式抓取动作,且在整个过程中未发生纱线滑脱。这一结果充分验证了末端执行器在纱线抓取任务中的可靠性和精准性,表明其能够满足袜子生产中对纱线抓取的要求。

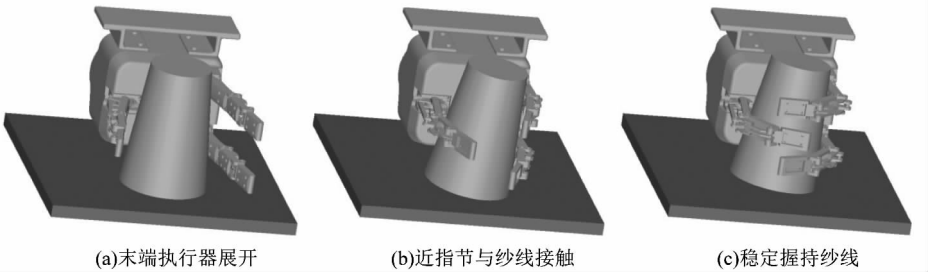

图 8 末端执行器包络抓取纱线仿真实验

Figure 8 Simulation experiment of end-effector envelope grasping yarn

采用与抓取纱线仿真实验相同的方法,进一步对成品袜子的指尖抓取动作以及托板模块对物料箱的搬运动作进行了仿真分析。对于袜子的抓取任务,由于袜子柔软且易变形,为简化仿真过程,将袜子模型用长方体代替。通过 ADAMS 软件对末端执行器的指尖抓取成品袜子进行仿真实验,得到了如图 9 所示的动作过程。仿真结果显示:该末端执行器能够稳定地运用指尖抓取袜子,并成功抓取了不同的袜子模型,验证了其在袜子抓取任务中的适用性和可靠性。这一结果说明该末端执行器能够适应不同尺寸的袜子,满足实际生产中对成品袜子抓取的要求。

针对物料箱搬运任务,课题组还对托板模块进行了仿真实验,动作过程如图 10 所示。仿真过程中设置了物料箱的质量、几何尺寸以及托板的运动路径等参数。仿真结果表明:托板模块能够稳定托起料箱,在搬运过程中物料箱姿态稳定,无倾斜或滑移现象。进一步验证了末端执行器在物料箱搬运任务中的稳定性和高效性,满足袜子厂物料搬运的自动化需求。

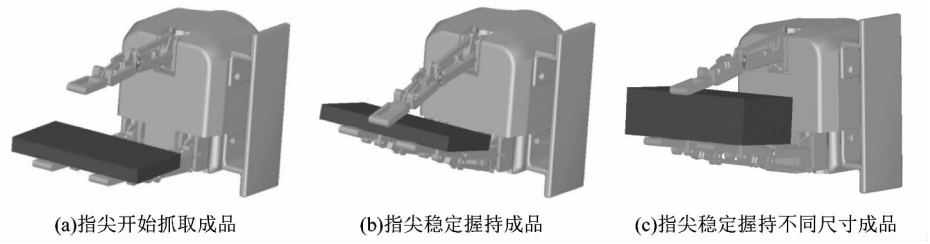

图 9 末端执行器指尖抓取袜子仿真实验

Figure 9 Simulation experiment of end-effector envelope grasping socks

图 10 末端执行器托板模块搬运物料箱仿真实验

Figure 10 Simulation experiment of pallet module of end-effector handling material boxes

4 结语

针对袜子工厂物料箱搬运和线筒、袜子成品抓取的多样化需求,课题组设计了一款双臂搬运机器人末端执行器,包括托板模块和机械手模块,能实现对物料箱与线筒等的稳定搬运与精准抓取。运动学建模与仿真结果表明该末端执行器具备良好的通用性与操作稳定性。相较于传统单功能末端执行器,课题组所提出的设计方案在多任务适应性与结构合理性方面表现出显著优势,具有广泛的工程应用前景。然而,在抓取纱线和纺织成品时其柔性仍显不足,有待通过引入柔性装置或自适应控制策略进一步提升性能。未来研究可进一步结合柔性电子、多模态传感融合和自适应控制算法以增强智能感知与协同作业能力,从而提升袜子工厂智能制造水平。

参考文献:

[1] 王蕾,潘如如,周建,等. 机器视觉在纺织智能化中的应用进展[J]. 棉纺织技术,2021,49(11):9-11.

[2] 李江道. 空间机械臂机电一体化关节的设计与控制[D]. 上海:上海交通大学,2012:2-4.

[3] LIU S,VAN M,CHEN Z,et al. A novel prosthetic finger design with high load-carrying capacity[J]. Mechanism and Machine Theory,2021,156:104121.

[4] 赵志军,张文明,胡成威,等. 空间机器人在轨操作用多指灵巧末端研究[J]. 载人航天,2024,30(6):746-752.

[5] 张林,王兴东,孙伟,等. 欠驱动灵巧手的优化设计及仿真分析[J]. 武汉科技大学学报,2024,47(1):47-54.

[6] TANG S F,YU Y,LIANG L. Structural design and optimization of modular underactuated multi-fingered manipulator[C]//2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC). Chongqing:IEEE,2018:1028-1036.

[7] 龚晓光. 三指机械手结构与控制系统的设计[D]. 重庆:重庆邮电大学,2019:35-41.

[8] HOTA R K,KUMER C S. Effect of hand design and object size on the workspace of three-fingered hands[J]. Mechanism and Machine Theory,2019,133:311-328.

[9] ALI M H,KURALBAY Y,AITMAGANBET A,et al. Design of a 6-DOF robot manipulator for 3D printed construction[J]. Materials Today: Proceedings,2022,49(5):1462-1468.

[10] REN Z Y,ZHOU C X,XIN S Y,et al. HERI hand:aquasi dexterous and powerful hand with asymmetrical finger dimensions and under actuation[C]//2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Vancouver,BC,Canada:IEEE,2017:322-328.

(上接第10页)

[16] 黄真,赵永生,赵铁石. 高等空间机构学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[17] 于靖军,刘辛军,丁希仑. 机器人机构学的数学基础[M]. 北京:机械工业出版社,2008.

[18] 窦玉超,曾达幸,李明洋,等. 一种两转一移完全解耦并联机器人机构及其特性分析[J]. 中国机械工程,2014,25(2):241-245.

[19] 赵延治,梁博文,曹亚超,等. 恒定雅可比3-PRRR移动并联机构及其传递性能研究[J]. 农业机械学报,2017,48(1):333-338.

[20] 唐小强,张化平,刘杰,等. 基于柔索长度偏差的踝关节康复机器人训练模式优化[J]. 机电工程技术,2023,52(11):117-119.