

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.051

变驱动布局 5R 机构选型设计与实验

侯志利 武文革 李瑞琴 秦慧斌
(中北大学机械与动力工程学院, 太原 030051)

摘要: 提出了变驱动布局的平面 5R 机构的选型设计方法, 对其进行运动学分析, 利用几何法建立了不同驱动位置的工作空间图谱, 并提出了跟踪运动轨迹搜索可达工作空间的方法, 为纸箱定制封装机构的构型应用提供了优选依据。通过分析纸箱摇盖折合的工艺流程, 选择两个驱动电机轴线重合的 5R 机构, 作为摇盖折合的手指机构原型。通过运动仿真提取了驱动电机的运动参数, 将拟合的解析函数输入手指机构的控制程序中, 经实验验证, 实现了纸箱摇盖折合的预期运动轨迹, 表明该手指机构运动具有良好的可控性。在此基础上, 设计了一种区别于生产线作业的可重构纸箱包装机, 通过装置模块结构的重组和控制程序重构, 末端执行器的运动输出柔性可控, 完成了不同尺寸规格纸箱的包装、胶带十字封装工作。

关键词: 5R 机构; 变驱动布局; 工作空间; 运动可控; 可重构包装机

中图分类号: TP24; TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)02-0378-07

Lectotype Design and Experiment of Variable Actuated Layout 5R Parallel Kinematic Mechanism

HOU Zhili WU Wen'ge LI Ruiqin QIN Huibin
(School of Mechanical and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Considering the packaging requirements of different sizes of customized cartons, the design method of variable actuated layout for 5R parallel kinematic mechanism was proposed. The kinematic analysis of 5R parallel mechanism was carried out, and different workspace maps were drawn by geometric method. A method of searching the reachable workspace through tracing the motion trajectory was proposed. These provided the basis for configuration application of the carton packaging mechanism. The folding process of carton cover was analyzed, and the 5R mechanism of the two actuated motors with coincident joint was selected as finger prototype to fold the flap. The motion parameters of actuated motors were extracted through the motion simulation, the fitted analytic function was input into the control program of finger mechanism. The experimental results verified that the expected motion trajectory of carton flap and finger mechanism had good controllability. Thus a reconfigurable carton packaging machine was developed to demonstrate the ability to erect different sizes of the cartons, which was different from the production line. By means of restructuring module structure and reconfiguration control program, the end effector was flexibility and controllable. The device had the characteristics of small space occupation and flexible control. It would be helpful for the delivery staff to improve the working efficiency and reduce the workload.

Key words: 5R mechanism; variable actuated layout; workspace; controllable motion; reconfigurable carton packing machine

引言

可重构机构是基于机构的拓扑相似性, 利用特

定方法, 将原有构型转换为一种或几种新构型, 完成机构的自重组和重构, 以满足不同运动要求, 实现一机多用, 是当前机构学的研究热点^[1-3]。变驱动布

收稿日期: 2016-10-28 修回日期: 2016-12-07
基金项目: 国家自然科学基金项目(51275486)
作者简介: 侯志利(1978—), 女, 博士生, 主要从事机构与机器人设计及可重构机构设计研究, E-mail: whitelily9988@163.com
通信作者: 李瑞琴(1964—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事机构与机器人技术研究, E-mail: 1085223859@qq.com

局是改变机构驱动电机轴线几何关系的变换方式,是实现并联机构构型创新设计的一种新方法,也是机构实现可重构设计的一种新途径,能综合大量新构型,为构型优选提供依据。机构运动的可控是针对机构中驱动元件的输入参数及其位姿实现实时受控变化,使执行器运动达到柔性输出,因此,同时考虑机构的驱动布局及运动实时可控可调,既能快速响应多场合应用需求的变化,也能改善机构的运动学、动力学性能^[4]。

平面二自由度 5R 机构既可以作为独立的机器人本体结构^[5],也可以作为并联机构的运动支链^[6]。其闭环结构刚度好,运动轨迹丰富,可满足驱动布局变换、运动可控柔性输出的性能要求,常被用于产品精密抓取、组装与包装作业领域。文献[5-11]研究涉及 5R 机构的构型分析、重构设计、运动可控性等关键问题,为其应用研究提供了理论与实验参考,但没有提供选型应用的方法。而对于一种构型而言,其运动关节轴线、驱动布局等位姿不同,其运动性能则不同。因此,实际应用中进行构型对比与优选尤为重要。

我国快递业发展快速,2015 年全年业务件量达 200 亿件,同比增长 52%,已成为世界快递业第一大国^[12]。性价比好的纸箱成为电商首选的包装方式,但是纸箱的折盖、胶带封装等工作大多由手工完成。当快递订单量激增时,就会出现人手少、硬件设备自动化水平低等问题。而目前市场上的包装机械多为定制流水线作业^[13-14],占地空间大、装置转型柔性差,不适合中小型电商使用。戴建生等^[15-17]提出并设计了可重构多指式糖果纸盒折叠机器人,将闭环五杆手指机构用于纸盒折叠,通过其构型分析、模块重组,实现了不同规格、不同外形的糖果纸盒的折叠,适应性强,拓展了可重构机构的应用市场。

本文通过平面 5R 机构的不同驱动布局位形的运动学对比分析,研究驱动布局对工作空间有效工作空间的影响,绘制变驱动布局的工作空间分布图谱。优选驱动轴线重合的 5R 闭环构型作为纸箱摇盖折合的手指原型,用于折合摇盖,并设计一种可控可重构手指式纸箱包装机^[18],基于运动逆解控制摇盖的运动轨迹,进行不同规格纸箱的摇盖折合与十字胶封实验,以期验证 5R 并联机构的运动可控性。

1 变驱动布局的平面 5R 机构选型

1.1 变驱动布局的 5R 机构构型分析

变驱动布局是改变机构驱动电机轴线布局位置的变换方式,即调节、规划机架位置,是同一构型驱动位置的不同布局位形,是实现机构可重构设计的

一种方式。驱动元件一般安装在机架或静平台上,两自由度驱动关节常见的几何关系有轴线平行、轴线重合、轴线相交。

并联机构新构型生成方法为将 2 条或 2 条以上运动支链,分别与机架、动平台/末端执行器连接而成,由于机架布局位置、运动支链不同,则可综合出丰富的机构类型,从而创新生成 2 种新构型族。选取平面 5R 型机构,可生成 2 种布局的构型,如图 1 所示。

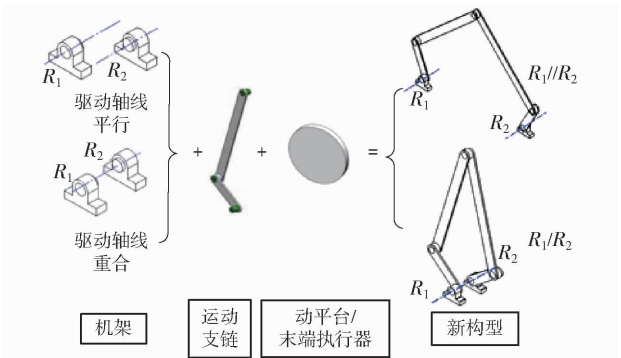


图 1 平面 5R 型机构构型综合

Fig. 1 Synthesis of 5R parallel kinematic mechanism

图 2 所示为 2 种驱动位置的 5R 机构运动简图,以机架的一个转动关节中心 A 为原点建立坐标系 xAy ,2 个驱动电机位置用 A 和 E 表示,2 个驱动连杆 AB 和 ED 与 x 轴的夹角分别记作 θ_1 和 θ_4 。图 2a 中 2 个驱动电机 A 、 E 轴线平行且不重合,图 2b 中 2 个驱动电机 A 、 E 轴线重合。图 2b 是图 2a 的一种特殊位置模式,图 2b 是串联机构并联化的典型,能有效拓展并联机构的工作空间。设 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 和 l_p 分别是连杆 AB 、 BC 、 CD 、 DE 和 BP 的长度, l_5 是机架 AE 长度。对称 5R 并联机构中, $l_1 = l_4$, $l_2 = l_3$ 。

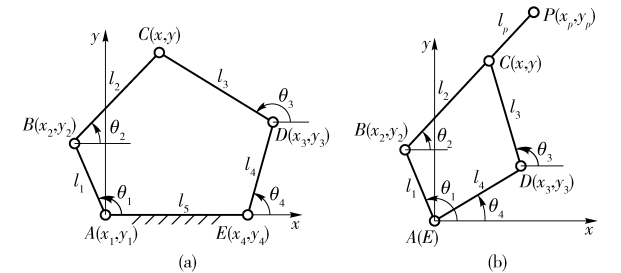


图 2 2 种驱动布局的 5R 机构运动简图

Fig. 2 Motion diagrams of 5R mechanism with two driven layouts

1.2 5R 并联机构的运动学分析

由图 2a 得点 B 、 D 的位置

$$x_2 = l_1 \cos \theta_1 + x_1 \tag{1}$$

$$y_2 = l_1 \sin \theta_1 + y_1 \tag{2}$$

$$x_3 = l_4 \cos \theta_4 + x_4 \tag{3}$$

$$y_3 = l_4 \sin \theta_4 + y_4 \tag{4}$$

图 2a 满足直角三角关系,得

$$l_2^2 = (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2$$

(5)

$$l_3^2 = (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2$$

(6)

代入消元,输入与输出的位移关系为

$$F(\theta, p) =$$

$$\begin{bmatrix} (x - l_1 \cos \theta_1)^2 + (y - l_1 \sin \theta_1)^2 - l_2^2 \\ [x - (l_4 \cos \theta_4 + x_4)]^2 + (y - l_4 \sin \theta_4)^2 - l_3^2 \end{bmatrix} = 0$$

(7)

速度方程表达式为

$$A\dot{p} + B\dot{\theta} = 0$$

(8)

令

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad \dot{p} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} \quad A = \frac{\partial F}{\partial p} \quad B = \frac{\partial F}{\partial \theta}$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} x - l_1 \cos \theta_1 & y - l_1 \sin \theta_1 \\ x - l_4 \cos \theta_4 - x_4 & y - l_4 \sin \theta_4 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} (x \sin \theta_1 - y \cos \theta_1) l_1 & 0 \\ 0 & [(x - x_4) \sin \theta_4 - y \cos \theta_4] l_4 \end{bmatrix}$$

该机构的雅可比矩阵为

$$J = -B^{-1}A = \begin{bmatrix} a_1/d_1 & b_1/d_1 \\ a_2/d_2 & b_2/d_2 \end{bmatrix}$$

(9)

其中

$$a_1 = x - l_1 \cos \theta_1 \quad a_2 = x - l_4 \cos \theta_4 - x_4$$

$$b_1 = y - l_1 \sin \theta_1 \quad b_2 = y - l_4 \sin \theta_4$$

$$d_1 = -(x \sin \theta_1 - y \cos \theta_1) l_1$$

$$d_2 = -[(x - x_4) \sin \theta_4 - y \cos \theta_4] l_4$$

由位移方程可知,末端输出 C 点的运动轨迹由式(5)、(6)决定。式(7)可以逆解求出输入参数。上述运动学分析表明, J 只与各构件的运动尺寸和位置有关,而与其他量无关。因此,当机架长度变化时,仅影响末端输出位置,而不影响速度、加速度。

图 2b 指尖 P 位置由传动杆 AB 和延伸杆 BP 的矢量来描述

$$p = l_{AB} + l_{BP} = \begin{bmatrix} l_1 \cos \theta_1 + l_p \cos \theta_2 \\ l_1 \sin \theta_1 + l_p \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

(10)

式中, θ_2 是指尖 P 与 x 轴之间的方位夹角,决定了连杆的方向性。

1.3 变机架长度对 5R 机构工作空间的影响

工作空间决定了机构与机器人的运动输出和跟踪能力,是衡量其运动特性的主要性能指标之一。工作空间的几何法就是借助连杆的两种极限位置,即分别以最短重叠杆长 $(l_2 - l_1)$ 与最长共线杆长 $(l_1 + l_2)$ 为半径,绘制同心圆来描述机构运动的可达工作空间边界。以 $(l_2 - l_1)$ 为半径绘制的圆称为空圆,其内部是运动不可达区域;以 $(l_1 + l_2)$ 为半径绘制的圆称为最大工作空间边界圆。

图 3 所示为 5R 机构的工作空间的几何法原理,用最大工作空间圆与空圆求差求解可达工作空间。随着机架长度的变化,5R 并联机构的工作空间存在 6 种可能的几何关系,即:

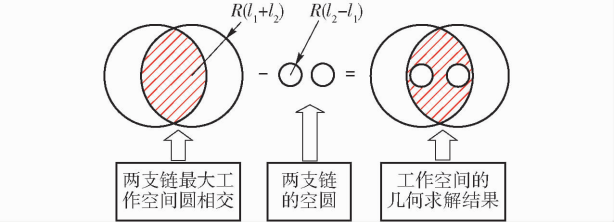


图 3 5R 机构的工作空间的几何法

Fig. 3 Geometric approach for workspace of 5R planar parallel manipulator

(1) 两个空圆彼此不相交,且在最大工作空间相交的圆之内,满足

$$\begin{cases} 2l_1 > l_5 > 2(l_2 - l_1) \\ 2l_1 > l_2 \end{cases}$$

(11)

(2) 两个空圆彼此相交,且在最大工作空间圆之内,满足

$$\begin{cases} l_5 < 2(l_2 - l_1) \\ l_5 < 2l_1 \end{cases}$$

(12)

(3) 两个空圆彼此不相交,且与最大工作空间圆相交,满足

$$\begin{cases} l_5 > 2(l_2 - l_1) \\ l_5 > 2l_1 \end{cases}$$

(13)

(4) 两个空圆彼此相交,且与最大工作空间圆相交,满足

$$\begin{cases} 2l_1 < l_5 < 2(l_2 - l_1) \\ 2l_1 < 2(l_2 - l_1) \end{cases}$$

(14)

(5) 两个空圆彼此不相交,且在最大工作空间圆之外,满足

$$\begin{cases} l_5 > 2(l_2 - l_1) \\ l_5 > 2l_2 \end{cases}$$

(15)

(6) 两个空圆重合,且在最大工作空间圆之内,满足

$$l_5 = 0$$

(16)

6 种可能的几何关系表达图例如表 1 所示。

由式(11)~(16)可绘出对称 5R 机构变机架长度工作空间的分布图,如图 4 所示,描述了其不同机架长度条件下的工作空间分布图谱,其工作空间与有效工作面积随空圆中心位置的变化而变化。

图 4 中,位置①表示式(16)描述的几何关系即两个空圆重合;位置②、③表示式(12)的几何关系图,位置③为式(12)临界关系图,其余位置关系依此类推。位置①两个大圆相交,有效面积最大;当 2 个大圆几何相交渐变到位置⑩时,不相交,此时没有

表 1 变机架长度 5R 对称型机构的工作空间图例

Tab.1 Workspace of 5R symmetrical parallel mechanism with variable base length

	情形 1	情形 2	情形 3
几何图形			
几何关系	$\begin{cases} 2l_1 > l_3 > 2(l_2 - l_1) \\ 2l_1 > l_2 \end{cases}$	$\begin{cases} l_3 < 2(l_2 - l_1) \\ l_3 < 2l_1 \end{cases}$	$\begin{cases} l_3 > 2(l_2 - l_1) \\ l_3 > 2l_1 \end{cases}$
	情形 4	情形 5	情形 6
几何图形			
几何关系	$\begin{cases} 2l_1 < l_3 < 2(l_2 - l_1) \\ 2l_1 < 2(l_2 - l_1) \end{cases}$	$\begin{cases} l_3 > 2(l_2 - l_1) \\ l_3 > 2l_2 \end{cases}$	$l_3 = 0$

注：设 $l_2 > l_1$ ，几何关系参考具体尺寸而确定；阴影区域为机构的可达工作空间区域。

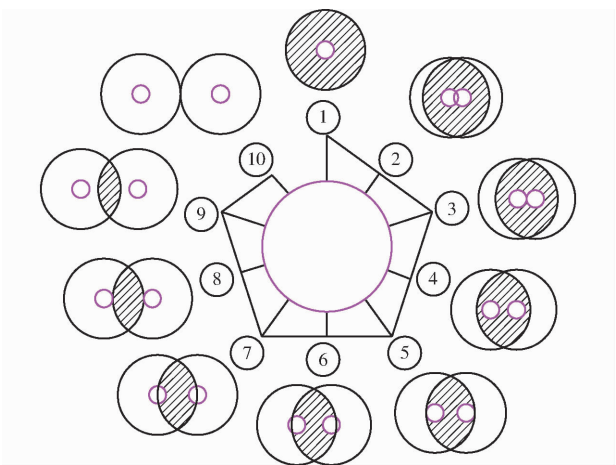


图 4 变机架长度的 5R 并联机构工作空间分布图谱

Fig. 4 Distribution of theoretical workspace shape of 5R mechanism with variable base length

有效工作区域。表 1 中，情形 6 的空圆在大圆内，其有效工作空间面积为

$$S = \pi[(l_1 + l_2)^2 - (l_2 - l_1)^2] = 4\pi l_1 l_2 \quad (17)$$

由图 4 和式(17)得出，选取位置①驱动轴线重合的构型，其工作空间有效面积最大，是拓展并联机构工作空间区域的有效途径之一。

2 基于驱动位置变换的运动轨迹分析

含两运动支链或两运动支链以上的几何结构对称的并联机构，当其中两个运动支链的原动件输入传动比(频率比)为不可整除的循环小数时，可引起末端输出运动轨迹的规律性偏移，且随着运动时间的递增，末端输出的运动轨迹会逐渐达到一个周期，直至绘出整个可达工作空间，如图 5 阴影区域所示。这种轨迹跟踪搜索工作空间的方法可以利用

SolidWorks Motion 分析模块进行运动仿真实现，能减少求解工作空间的运算过程^[19-20]。轨迹跟踪搜索工作空间的区域方法与初始位置、杆长条件有密切关系，应避开机构的奇异位置。

图 5 所示变驱动布局的 5R 并联机构中， $l_{AB} = l_{DE} = 100\text{ mm}$ ， $l_{BC} = l_{CD} = 300\text{ mm}$ ，初始输入角 $\theta_1 = 120^\circ$ ， $\theta_2 = 60^\circ$ ，输入传动比 $\lambda = 16/15$ 。图 5a 中 $l_A = 360\text{ mm}$ ，图 5b 中 $l_A = 0$ 。

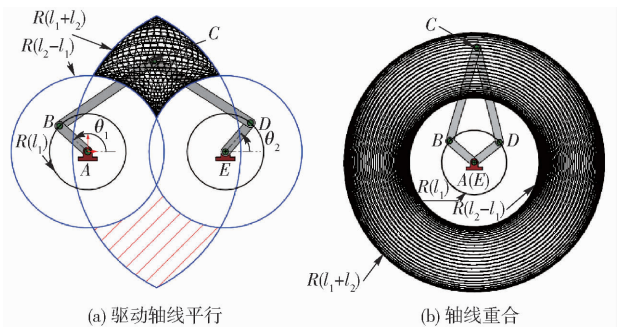


图 5 两种驱动布局的工作空间

Fig. 5 Two workspaces of different actuated layouts

图 5 表明，随着机架 AE 间距变小至重合，3 个半径分别为 l_1 、 $l_2 - l_1$ 、 $l_2 + l_1$ 的几何圆重合并渐变为连通区域。

3 纸箱结构与摇盖折合机构选型

3.1 纸箱结构

纸箱由一块瓦楞纸板开槽而成，经过分切、压痕、开槽、开角、钉合或粘合等操作后制成。纸箱由面板和折痕线组成，展开图如图 6 所示。纸箱一般带有箱盖与箱底的两组摇盖，分内、外摇盖，上、下摇盖。纸箱结构如图 7 所示。

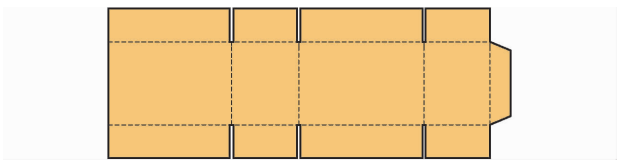


图 6 瓦楞纸板展开图

Fig. 6 Corrugated board in flattened state

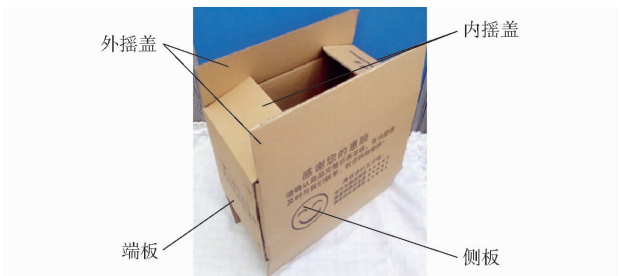


图 7 纸箱结构

Fig. 7 Carton structure

3.2 纸箱摇盖折合封装过程

纸箱箱盖/箱底的摇盖折叠过程就是改变内、外摇盖的相对位置。图 8 所示为箱盖内外摇盖的折合

运动轨迹。

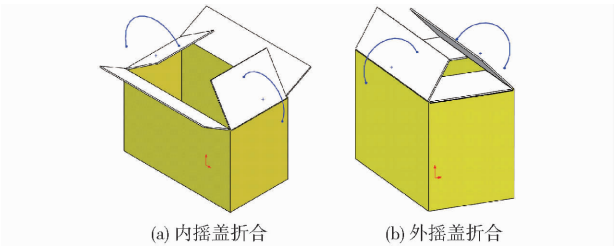


图 8 纸箱摇盖折合轨迹

箱盖/箱底折合顺序依次为上摇盖折合(内、外摇盖折合),胶带十字封箱,下摇盖折合(内、外摇盖折合),胶带十字封箱。根据纸箱的折合顺序,选取合适的构型设计封装机,适合不同规格纸箱摇盖的折合与封装。2 个驱动电机轴线重合布局的 5R 机构刚度大,运动空间大,可控性好,成为纸箱折合的首选手指构型。

3.3 5R 手指实验装置原型

选取标准开槽瓦楞纸箱作为中小型商品包装的快递纸箱。根据第 1 节构型分析,采用两组 5R 手指模仿纸箱摇盖折合的运动轨迹,手指位姿可调,用于纸箱外摇盖的折合。选择步进电机作为驱动元件,为纸箱包装提供保证需求的速度和足够扭矩。图 9a 所示为手指装置模型,图 9b 所示为原型样机。

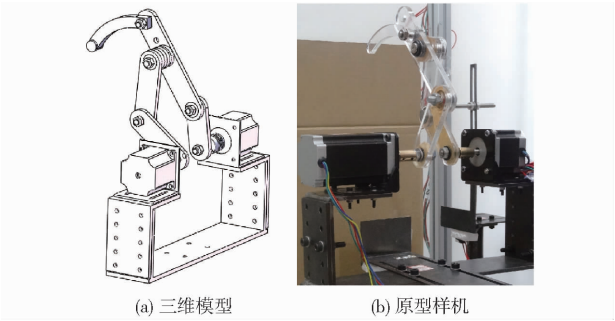


图 9 5R 手指折合装置

2 个步进电机安装在原型手指两端,驱动 5R 手指机构执行运动指令,实现初始位置和末端位置之间的前、后往复运动。初始位置由编码器定位。末端位置取决于电机的控制程序和纸箱的类型及规格,其运动范围控制在从初始位置开始的 180°范围之内。

3.4 纸箱摇盖折合运动轨迹仿真

将折痕作为转动关节,摇盖面板作为连杆,建立纸箱的数学模型,描述纸箱的折叠运动过程,不同规格纸箱折合运动轨迹不同,需要建立不同纸箱数学模型进行折合运动轨迹仿真。利用 SolidWorks Motion 分析模块跟踪纸箱内、外摇盖的折合运动轨迹。采用运动逆解求解方法,模拟仿真纸箱摇盖的

折合过程,从而根据轨迹跟踪反求 5R 手指机构的 2 个驱动电机的角速度输入曲线,并输出数据结果。然后利用 Matlab 将输出的数据结果进行数值拟合为解析函数,最后将解析函数输入到手指机构的控制程序中,从而实现预期的纸箱摇盖的折合轨迹。

调整手指初始位置、杆长和运动轨迹,实现不同规格纸箱的折合可重构,如图 10 所示。图 11 所示为左、右电机输入的角速度曲线及末端输出位置角速度曲线。

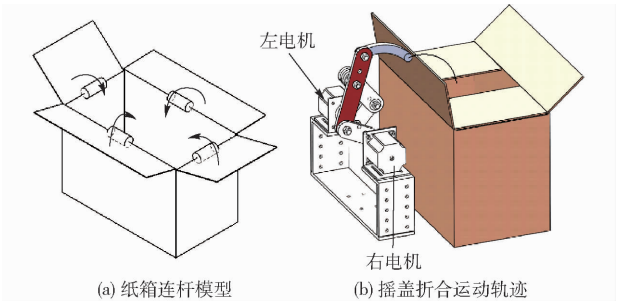


图 10 纸箱摇盖折合轨迹仿真

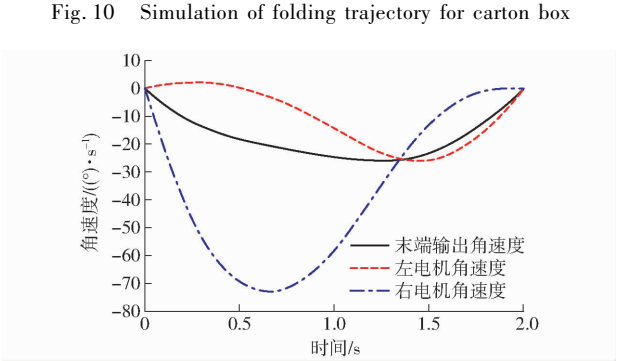


图 11 输入与输出的角速度曲线

Fig. 11 Angular velocity curves

3.5 5R 手指运动可控实现

5R 手指实验装置电气控制连接原理图如图 12 所示。

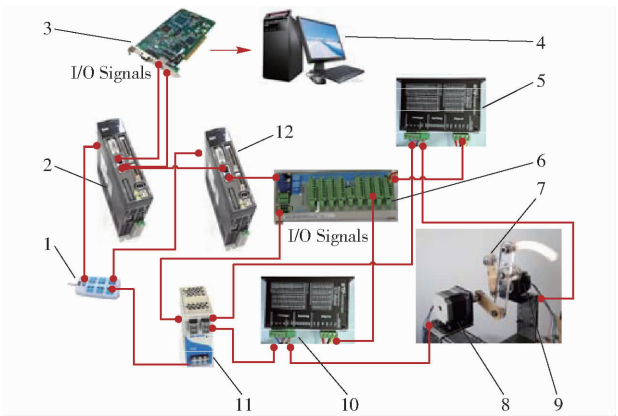


图 12 电气控制连接原理图

Fig. 12 Electric control schematic diagram

1. 220 V 电源 2. 控制器 3. 运动控制卡 4. 计算机 5. 控制器
6. 脉冲模块 7. 5R 手指装置 8. 左步进电机 9. 右步进电机
10. 步进电机驱动器 11. 24 V 电源 12. 控制器

控制系统由上位机控制程序、运动控制轴卡 (PCI - DMC - F01)、控制器 (ASD - A2 - 0421 - F)、脉冲模块 (ASD - DMC - RM04PI)、步进电机驱动模块、DMCNET 连接线、通讯终端电阻 (ASD - TR - DM0008) 和开关电源组成。上位机控制程序控制运动轴卡并向脉冲模块发出控制指令,脉冲模块向步进电机驱动模块发出可控脉冲,步进电机驱动模块接收脉冲信号控制步进电机运转。针对机构构型变化/结构变化,可实现其运动控制程序的可重构,达到末端运动系统的柔性控制。

4 可重构纸箱包装机

4.1 实验样机

基于前文所述纸箱摇盖折合和运动轨迹分析,设计了纸箱包装机,机械本体模型如图 13 所示^[18],由胶带封装装置、5R 手指折合装置、旋转装置、对正调整装置、底座支撑装置 5 大模块组成。各模块安装在铝型材框架上,该系统可以手调快速组装。各组件的模块化表明纸箱包装机器人系统的可重构性。

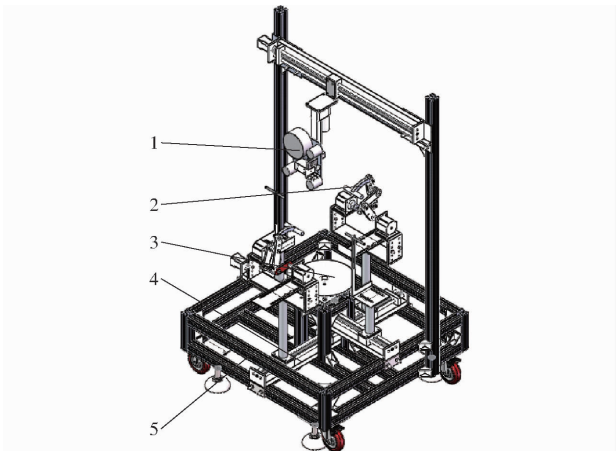


图 13 可控可重构小型快递纸箱包装机

Fig. 13 Controllable and reconfigurable small express carton packing machine

1. 胶带封装装置 2. 5R 手指折合装置 3. 旋转装置 4. 对正调整装置 5. 底座支撑装置

包装机的实验系统由 3 部分组成。第 1 部分为机械装置本体,包含 5 个基本模块;第 2 部分为系统控制硬件部分,包括步进电机、驱动器、控制器、运动控制卡及推杆电机等硬件控制系统;第 3 部分为人机交互软件部分,即基于运动控制卡开发的系统控制程序,实验样机如图 14 所示。

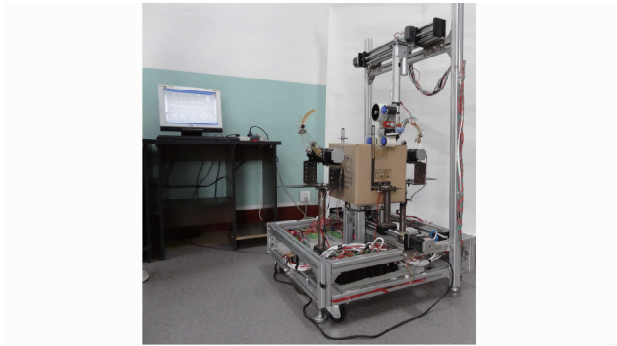


图 14 包装机实验样机

Fig. 14 Experimental prototype of packing machine

4.2 实验结果

实验装置最大有效工作空间为 550 mm × 450 mm × 300 mm,能够对纸箱外形尺寸 140 mm × 140 mm × 180 mm ~ 550 mm × 450 mm × 300 mm 范围的纸箱进行封装。选择外形尺寸 350 mm × 190 mm × 230 mm、320 mm × 270 mm × 270 mm、250 mm × 250 mm × 250 mm 3 种规格纸箱作为实验对象,实现了纸箱内外摇盖折合、一字封装、纸箱旋转、纸箱十字封装动作。两组 5R 手指机构调节手指位姿以实现不同运动轨迹,满足不同规格纸箱外摇盖的折合动作。两组退化手指机构手工调节工作高度,以适应不同高度纸箱的调节并压紧内摇盖。四组手指机构体现了该装置机械结构的可重构性。

5 结论

(1)选择平面 5R 机构,进行构型设计分析与运动学分析,通过工作空间的几何特性分析,建立了变驱动位置对称型 5R 机构的工作空间图谱,便于寻找最优工作空间,并提出了运动轨迹搜索机构可达运动空间的方法,为构型优选设计与应用提供选择依据。

(2)以折痕作为转动关节,摇盖面板作为连杆,建立了不同规格尺寸的纸箱模型。优选了两驱动电机轴线重合的 5R 机构构型,作为摇盖折合的 5R 手指折合装置。采用运动逆解求解方法,进行摇盖折合的运动轨迹仿真,跟踪末端轨迹并反求 5R 手指装置的 2 个驱动电机的角速度输入曲线。设计了 5R 手指折合装置,实验验证了其运动可控性。

(3)设计了可控可重构手指式纸箱包装机,经纸箱封装实验,可完成不同型号纸箱的折合、胶带十字封装工作。

参 考 文 献

1 ZHANG K T, DAI J S. Screw-system-variation enabled reconfiguration of the Bennett plano-spherical hybrid linkage and its evolved parallel mechanism[J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2015,137(6): 062303 - 062303 - 10.
2 AIMEDEE F, GOGU G, DAI J S, et al. Boutona systematization of morphing in reconfigurable mechanisms[J]. Mechanism and

- Machine Theory, 2016, 96(Part 2): 215 – 224.
- 3 王肖锋, 张明路, 葛为民. 可重构机器人动力学自动建模研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 355 – 361, 377. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151248&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 12. 048.
- WANG Xiaofeng, ZHANG Minglu, GE Weimin. Automatic modeling of dynamics for a reconfigurable robot[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 355 – 361, 377. (in Chinese)
- 4 王汝贵, 石光林, 蔡敢为, 等. 两自由度可控闭链机构系统运动实施[J]. 中国机械工程, 2013, 24(5): 569 – 572.
- WANG Rugui, SHI Guanglin, CAI Ganwei, et al. Movement implementation of 2-DOF controllable closed-chain linkage mechanism system[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(5): 569 – 572. (in Chinese)
- 5 AHMED Joubair, MOHAMED Slamani, ILIANA Bonev. Kinematic calibration of a five-bar planar parallel robot using all working modes[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2013, 29(4): 15 – 25.
- 6 RAINER Müller, MARTIN Riedel, MATTHIAS Vette, et al. Reconfigurable self-optimising handling system[J]. Precision Assembly Technologies and Systems, 2010, 315(1): 255 – 262.
- 7 YE Wei, FANG Yuefa, GUO Sheng. Reconfigurable parallel mechanisms with planar five-bar metamorphic linkages[J]. Science China Technological Sciences, 2014, 57(1): 210 – 218.
- 8 GIBERTI H, CINQUEMANI S, AMBROSETTI S. 5R 2dof parallel kinematic manipulator—a multidisciplinary test case in mechatronics[J]. Mechatronics, 2013, 23(8): 949 – 959.
- 9 李仁军, 刘宏昭, 李鹏飞. 混合输入机构实现给定轨迹的模糊控制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 199 – 202.
- LI Renjun, LIU Hongzhao, LI Pengfei. Hybrid machine for implementing given trajectory by fuzzy controller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 199 – 202. (in Chinese)
- 10 LIU Xinjun, WANG Jinsong, PRITSCHOW G. Kinematics, singularity and workspace of planar 5R symmetrical parallel mechanisms[J]. Mechanism & Machine Theory, 2006, 41(2): 145 – 169.
- 11 BIHARI B, KUMAR D, JHA C, et al. A geometric approach for the workspace analysis of two symmetric planar parallel manipulators[J]. Robotica, 2016, 34(4): 738 – 763.
- 12 中国机械工程学会物流工程分会. 物流工程技术路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2015.
- 13 孙西卓, 冯小平, 贾同飞, 等. 一种自动化包装装置: 中国, 201210309131. 9[P]. 2015 – 02 – 18.
- SUN Xizhuo, FENG Xiaoping, JIA Tongfei, et al. An automatic packaging device; CN, 201210309131. 9[P]. 2015 – 02 – 18. (in Chinese)
- 14 李丽阁, 张有良, 段移丽, 等. 纸箱包装机纸板取送机构的设计与研究[J]. 包装与食品机械, 2014, 32(4): 28 – 30.
- LI Lige, ZHANG Youliang, DUAN Yili, et al. Design and research of the sucking and delivery mechanism for the carton packing machine[J]. Packaging and Food Machinery, 2014, 32(4): 28 – 30. (in Chinese)
- 15 FERDINANDO C, DAI J S. Origami-carton tuck-in with a reconfigurable linkage[C] // ASME/IFToMM International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots, 2009: 512 – 520.
- 16 YAO W, DAI J S. A reconfigurable robotic folding system for confectionery industry [J]. Industrial Robot: An International Journal, 2010, 37: 542 – 551.
- 17 YAO W, CANNELLA F, DAI J S. Automatic folding of cartons using a reconfigurable robotic system [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(3): 604 – 613.
- 18 侯志利, 秦慧斌, 李瑞琴, 等. 一种可控五杆机构手指式纸箱包装机: 中国, 201510681385. 7[P]. 2016 – 05 – 25.
- HOU Zhili, QIN Huibin, LI Ruiqin, et al. A controllable five bar mechanism manipulator type carton packing machine; CN, 201510681385. 7[P]. 2016 – 05 – 25. (in Chinese)
- 19 HOU Zhili, LI Ruiqin, WU Wen'ge, et al. Kinematic analysis and experimental verification of a controllable five-bar parallel kinematic manipulator[C] // The Fourth International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS 2015), 2015: 486 – 490.
- 20 侯志利, 武文革, 李瑞琴, 等. 可控 5R 平面并联机构构型重构设计与实验研究[J]. 机械传动, 2016, 40(9): 56 – 60.
- HOU Zhili, WU Wen'ge, LI Ruiqin, et al. Configuration reconfigurable design and experimental study of controllable 5R planar parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(9): 56 – 60. (in Chinese)