

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2021.09.016

一种新型欠驱动机器人手的设计与静力学分析

Design and statics analysis of a novel under-actuated robot hand

蒋瑞斌¹ 左萃¹ 黄龙² 厉佐葵³ 刘柏海³JIANG Rui-bing¹ ZUO Cui¹ HUANG Long² LI Zuo-kui³ LIU Bo-hai³

(1. 湖南生物机电职业技术学院车辆工程学院, 湖南 长沙 410127; 2. 长沙理工大学汽车与机械工程学院, 湖南 长沙 410076; 3. 湖南生物机电职业技术学院机电工程学院, 湖南 长沙 410127)

(1. School of Vehicle Engineering, Hunan Biological & Electromechanical Polytechnic, Changsha, Hunan 410127, China; 2. School of Automotive and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410076, China; 3. School of Mechanical and Electronic Engineering, Hunan Biological & Electromechanical Polytechnic, Changsha, Hunan 410127, China)

摘要:目的:解决传统机器人手运动模式和夹持功能单一,难以对不同摆放位置的食品包装盒进行夹持操作的问题。方法:提出了一种基于绳轮传动的欠驱动机器人手构型,实现机器人手左右两指间的平行夹持运动模式和指间自适应夹持模式。在此基础上,利用虚功原理对该欠驱动机器人手进行静力学分析,并对其两指间的末端夹持力进行求解。结果:无论包装盒是否位于中间位置,该机器人手的两指夹持力能保证包装盒的有效夹持。结论:该欠驱动机器人手的平行夹持运动稳定,且左右两指间可实现自适应夹持运动。

关键词:绳轮传动;欠驱动;机器人手;虚功原理;静力学分析

Abstract: Objective: Here in this study, we focus on solving the pick-and-place problem of the food packaging boxes in different positions. **Methods:** A novel design of under-actuated robotic hand was proposed, and two motion patterns of the robotic hand were realized based on cable-pulley transmission, which were parallel gripping and adaptive gripping between the fingers. On this basis, the statics of the robotic hand was analyzed through the principle of virtual work, and the gripping forces between the fingers were obtained. **Results:** The force between the fingers can ensure the effective gripping of the packaging box no matter whether the box is in the middle position or not. **Conclusion:** The performance of the parallel gripping motion is stable, and the a-

daptive gripping between the fingers can be realized.

Keywords: cable-pulley transmission; under-actuated; robotic hand; virtual work principle; statics analysis

机器人的末端执行器,又称机器人手,是直接执行作业任务的装置^[1-2]。对于生产线上的搬运作业,机器人手的结构通常为根据具体任务要求而设计的单自由度夹持器。这种单自由度夹持器的功能单一,难以适应不同形状和尺寸的目标物体。机器人手的自适应性需要其机构的多自由度来实现,然而完全控制这些自由度需要较为庞大的驱动控制系统和较为复杂的控制算法。为了降低机器人手的控制难度,欠驱动机器人手被广泛应用于工业上。机器人手的欠驱动特性是指其驱动电机的数目小于其自由度数目^[3-4]。在夹持目标物体时,其手指可自动适应目标物体的不同形状或摆放位置,从而实现稳定有效的夹持作业。

欠驱动机器人手的传动方式主要包括绳轮传动、刚性连杆传动、气压传动、齿轮传动等类型。夏海超等^[5]基于绳轮传动提出了一种可实现双向平夹的自适应机器人手,通过在指段上设计压力传感器使得该机器人手具有感知功能,并对其夹持动作过程和夹持力进行了仿真分析。马涛等^[6]基于绳轮传动设计了一种双指欠驱动机器人手,并进行了结构优化和运动学分析,有效简化了机器人手结构和控制系统。Birglen等^[7]通过串联多个刚性连杆关节设计了一种欠驱动机器人手,具有较好的自适应夹持性能。宾朋等^[8]基于变自由度与机构死点理论设计了一种连杆传动式机器人手,可满足制药厂对药盒夹持的要求。王宜磊等^[9]提出了一种用于采摘猕猴桃的连杆传动式机器人手,可有效避免对猕猴桃果实的磨损。通过对称布置两个平行四边形机构,Zuo等^[10]设计了一种

基金项目:湖南省自然科学基金青年项目(编号:2019JJ50664);湖南省自然科学基金科教联合基金项目(编号:2017JJ5040)

作者简介:蒋瑞斌,男,湖南生物机电职业技术学院副教授,硕士。
通信作者:左萃(1988—),女,湖南生物机电职业技术学院讲师,硕士。E-mail: pfsyzc@163.com

收稿日期:2021-06-03

欠驱动机器人手,实现了平行夹持运动。王通等^[11]提出了一种夹持果实的欠驱动机器人手,实现了手指机构包络式夹持果实。郭晓峰等^[12]通过共圆连杆齿轮实现了平行夹持运动的欠驱动机器人手。张文增等^[13]基于闭环柔性齿轮传动设计了一种平夹自适应的机器人手。然而,现有的机器人手大多结构复杂,在夹持过程时仅考虑了对目标物体的自适应包络夹持,难以实现各手指位置的自适应调整。此外,为了保证机器人手有效实现自适应夹持操作,还须对其进行力学分析,建立夹持力与驱动力之间的映射关系。机器人手的力学模型一般通过虚功原理建立^[14],即作用在系统上的所有主动力在任何虚位移中所做的虚功之和为零。

针对上述问题,试验拟结合食品加工厂对包装盒的夹持要求,基于绳轮传动原理提出一种新型欠驱动机器人手;同时,结合动滑轮机构和恒力弹簧,实现机器人手的指间自适应,从而适应食品包装盒在一定范围内的位置变动;并基于虚功原理分析机器人手末端对包装盒的夹持力,验证机器人手的可行性,旨在为实际控制提供理论依据。

1 夹持过程及要求

机器人手自动夹持食品包装盒的工艺流程为:机器人手在预定位置等待食品包装盒—水平移动夹持食品包装盒—上升一定高度—移动至另一条生产线上—放置食品包装盒—移动到原生产线,继续夹持方形食品包装盒。机器人手在操作过程中的状态如图 1 所示,当食品包装盒放置在机器人手的两手指中间位置时,两手指的夹持运动规律相同;当食品包装盒放置未在两手指的中间

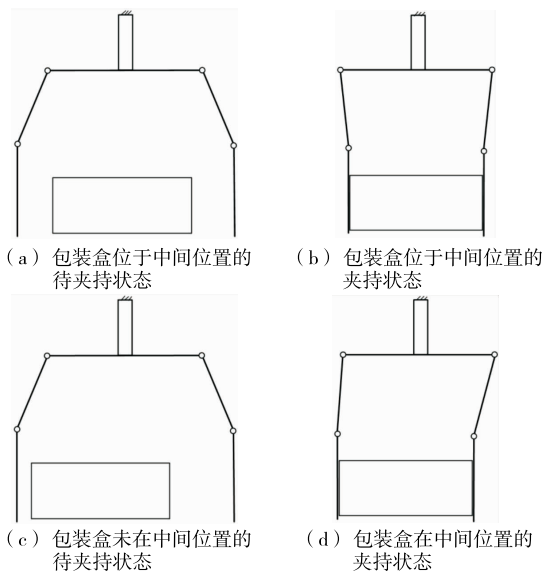


图 1 机器人手的不同夹持状态

Figure 1 Analysis of the motion mode of the robot hand

位置时,两手指之间需具有自适应夹持能力。

机器人手在夹持包装盒过程中需满足以下要求:

- ① 当机器人手在流水线上做水平运动时,两手指不会触碰食品包装盒;
- ② 机器人手在夹持过程中应保证足够的夹持力和摩擦力来提升食品包装盒;
- ③ 在机器人手夹持状态下突然发生断电情况时,需保证机器人手仍然夹紧食品盒;
- ④ 当生产线上的包装盒摆放存在较小误差时,机器人手指在平行夹取时需要保证两指间自适应的性能。

2 机构组成及欠驱动原理

2.1 机构组成

为满足机器人手自动夹持食品包装盒的工艺流程和夹持要求,提出一种基于绳轮传动的欠驱动机器人手,如图 2 所示。该机器人手由两个手指和指间动滑轮等部分组成,左侧手指由连杆 AB、连杆 BC、滑轮 A₁、滑轮 A₂、滑轮 B₂ 组成,滑轮 A₁ 与连杆 AB 固连,滑轮 A₂ 与机架固连,滑轮 B₂ 与连杆 BC 固连,滑轮 A₂ 与滑轮 B₂ 之间通过闭环钢丝绳传动,滑轮 A₁ 与机架之间通过恒力扭簧连接。而右侧手指由连杆 A'B'、连杆 B'C'、滑轮 A'₁、滑轮 A'₂、滑轮 B'₂ 组成,具体连接关系与左侧手指完全相同。滑轮 A₁ 和滑轮 A'₁ 之间则通过开环钢丝绳和动滑轮 M 连接,即钢丝绳的一端固定于滑轮 A₁ 上,顺时针绕过滑轮 A₁,然后逆时针绕过动滑轮 M,顺时针绕过滑轮 A',其另一端与滑轮 A' 固定。

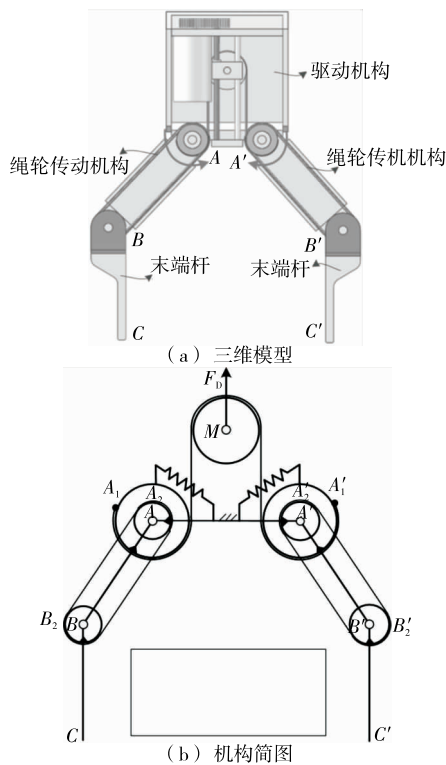


图 2 欠驱动机器人手设计

Figure 2 Design of the under-actuated robot hand

2.2 平行夹持原理

要实现机器人手的平行夹持,需要使连杆 BC 和连杆 $B'C'$ 在运动中始终保持平行。该运动特点可以通过滑轮 A_2 与滑轮 B_2 之间的钢丝绳传动来实现。假设滑轮 A_2 的转速为 n_{A_1} , 滑轮 B_2 的转速为 n_{A_2} , 连杆 AB 的转速为 n_{BC} 。根据周转运动可知

$$n_{A_2} - n_{AB} = i_{AB} (n_{B_2} - n_{AB}) \quad (1)$$

根据各构件连接关系可知, $n_{A_2} = 0, n_{B_2} = n_{BC}$, 传动比 $i_{AB} = 1$ 。因此, $n_{BC} = 0$, 即连杆 BC 始终做平面平移运动。若连杆 BC 的内表面在初始状态下与地面垂直, 则该表面在运动过程中始终与地面垂直。同样约束下, 连杆 $B'C'$ 的内表面也始终与地面垂直。因此, 连杆 BC 与连杆 $B'C'$ 始终保持平行。

2.3 机构自由度

该机构中的可动构件数量 n 为 6, 低副数量 p_L 为 6, 高副(绳轮副)数量 p_H 为 4, 则机构的自由度为

$$df = 3n - 2p_L - p_H = 2。$$

然而, 该机器人手只有一个输入, 即直线运动单元驱动动滑轮在竖直方向的位置。当动滑轮中心向下移动时, 滑轮 A_1 和滑轮 A'_1 在绳的作用下分别做顺时针和逆时针旋转, 使得两个手指向内夹持; 当动滑轮中心向上移动时, 滑轮 A_1 和滑轮 A'_1 在扭簧的回复力作用下分别做逆时针和顺时针旋转, 使得两个手指张开。

2.4 机构指间欠驱动原理

机器人的多指协同作业, 一般通过各指独立驱动的协同控制来实现, 这种协同方式具有较好的适应性, 但存在控制复杂和成本较高的问题。因此, 指间欠驱动机构在机器人手中逐渐得到应用。文中提出的机器人手采用动滑轮机构实现指间欠驱动。动滑轮机构的输入运动只有一个, 即动滑轮沿竖直方向的移动; 其输出运动有两个, 即滑轮 A_1 和滑轮 A'_1 的转动。当两个输出运动所承受的负载已知时, 两个输出运动的具体特征也随之确定。当滑轮 A_1 和滑轮 A'_1 所承受的负载相等时, 两个滑轮的转速相等, 转向相反。当滑轮 A_1 和滑轮 A'_1 所承受的负载不相等时, 负载较大的滑轮将停止运动, 负载较小的滑轮会继续转动, 直至负载增加到与另一侧滑轮的负载相等, 此时达到平衡状态。

3 静力学分析

在平行夹取食品包装盒过程中, 当两手指的结构设计参数一定时, 即各手指上杆件的长度、弹簧刚度、滑轮半径、食品包装盒的形状及尺寸等参数一定, 两手指的夹持力仅取决于手指的驱动力。因此, 需对该机器人手的末端杆件对包装盒的夹持力进行分析和求解, 并建立夹持力与驱动力之间的映射关系。为便于分析该机器人手的夹持平衡状态, 文中基于虚功原理^[14]进行机器人手的

静力学分析。假设该机器人手为理想约束的质点系, 首先建立末端杆 $BC、B'C'$ 对食品包装盒的夹持力与总驱动力 F_s 之间的静力学模型。当机器人手恰好接触到食品包装盒时, 动滑轮 M 继续移动距离 d , 进而使得机器人手的末端杆 $BC、B'C'$ 可夹紧该包装盒。由于滑轮 A_1 和滑轮 A'_1 分别通过恒力弹簧与机架相连接, 且在初始状态下, 恒力弹簧的回复力已趋于稳定。其受力分析如图 3 所示。

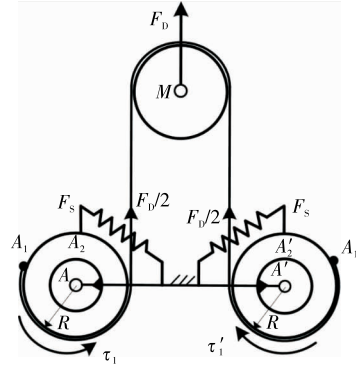


图 3 机器人手的驱动机构受力分析

Figure 3 Force analysis of driving mechanism of the robot hand

因此, 动滑轮 M 产生的总驱动力 F_D 与滑轮 A_1 和滑轮 A'_1 处的力矩 τ 和 τ' 的关系为:

$$\tau_1 = \tau_1' = \frac{F_D}{2} \cdot R - F_s \quad (2)$$

式中:

F_s ——恒力弹簧的回复力, N。

通过对机器人手驱动位置的特殊设置, 可假设恒力弹簧在机器人手的两手指运动时 F_s 为常数。

考虑食品包装盒放置在中间位置的情形, 此时两侧手指的运动规律相同。由于该机器人手是对称式结构, 在稳定夹取食品包装盒后, 末端杆 $BC、B'C'$ 上的夹持力和摩擦力分别相等, 机器人手的受力如图 4 所示。

考虑左侧手指, 假设在夹紧食品包装盒过程中, 在铰链 A 处的虚转角为 $d\theta_A$, 则力矩 τ_1 产生的虚功为 $\tau_1 \cdot d\theta_A$ 。基于虚功原理可知:

$$\tau_1 d\theta_A = F dx + f_m dy \quad (3)$$

式中:

F ——末端杆 $BC、B'C'$ 上的夹持力, N;

$dx、dy$ ——末端杆 BC 在水平方向和垂直方向上的虚位移, mm;

f_m ——摩擦力, N。

假设包装盒所受重力为 G , 由垂直方向上的合力为零可知 $f_m = G/2$ 。

由图 5 可知, 左右两侧手指上的杆长度分别相等, 令连杆 AB 的杆长为 l 。根据该机器人手的平面几何关系

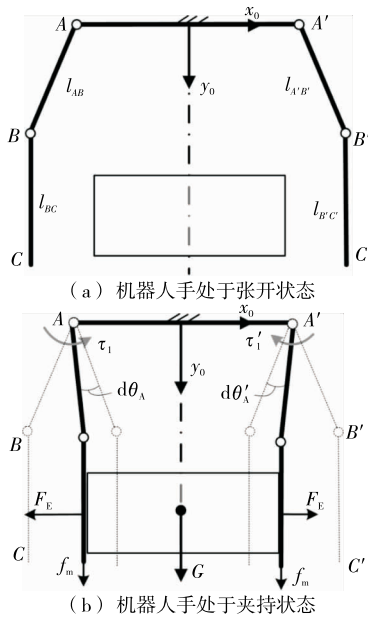


图 4 包装盒位于机器人手的中间位置时力学分析
Figure 4 Mechanics modeling when the box is in the non-intermediate position

可知,在夹紧食品包装盒过程中两方向上产生的虚位移为

$$\begin{cases} dx = d(l \cos \theta) = -l \sin \theta d\theta \\ dy = d(l \sin \theta) = l \cos \theta d\theta \end{cases} \quad (4)$$

因此,式(3)可重新表达为

$$\tau_1 d\theta_A = -F_E l \sin \theta_A d\theta_A + f_m l \cos \theta_A d\theta_A \quad (5)$$

根据牛顿第三定律可知,当末端杆 BC 夹紧包装盒的同时,包装盒也同时给末端杆 BC 产生相同大小的法向力。因此,夹紧状态下,末端杆 BC 和包装盒间的最大静摩擦力 $f_m = \mu F_E$ 。

根据式(5)和式(2)可知,末端杆 BC、B'C' 上的夹持力 F_E 与总驱动力 F_s 之间的关系为

$$F_E = \frac{F_D R - 2F_s - \frac{G}{2} l \cos \theta_A}{l \sin \theta_A} \quad (6)$$

为满足在机器人手夹持状态下,该机器人手夹紧食品盒的要求,则当食品包装盒在机器人手的中间位置时,总驱动力 F_s 需要满足

$$F_D \geq \max \left\{ \frac{\frac{G}{2} l \cos \theta_A - F_E l \sin \theta_A + 2F_s}{R} \right\} \quad (7)$$

在生产线上,食品包装盒的摆放位置与机器人两手指的中间位置会存在少许误差。假设包装盒中心与机器人手 y_0 坐标轴之间的偏距为 e ,如图 5(a)所示。在两侧手指均未接触到食品包装盒之前,滑轮 A_1 和滑轮 A'_1 的转动速率相等,即末端杆 BC、B'C' 的位移量相等。当左侧手指先接触到食品包装盒后,滑轮 A_1 停止转动,滑轮

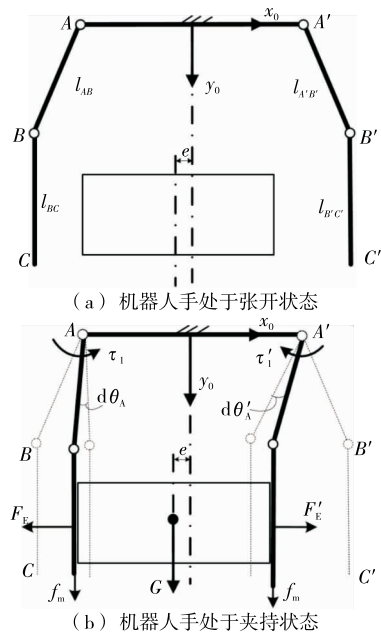


图 5 包装盒位于机器人手的非中间位置时力学分析
Figure 5 Mechanics modeling when the box is in the non-intermediate position

A'_1 仍会继续转动使得右侧手指的末端杆 B'C' 继续做平移运动,直至夹紧食品包装盒。综上,需对食品包装盒处于非对称位置时进行受力分析,如图 5(b)所示。

为便于分析两侧手指上末端杆 BC、B'C' 上的夹持力变化情况,基于虚功原理对机器人手的两手指进行力学分析。夹紧包装盒过程中,假设铰链 A 处的虚转角为 $d\theta_A$,则力矩 τ_1 产生的虚功为 $\tau_1 \cdot d\theta_A$,铰链 A' 处的虚转角为 $d\theta'_A$,则力矩 τ'_1 产生的虚功为 $\tau'_1 \cdot d\theta'_A$ 。由于初始状态下,滑轮 A_1 和滑轮 A'_1 分别与机架相连接的恒力弹簧的回弹力已趋于稳定,式(3)仍成立,即 $\tau_1 = \tau'_1$ 。然而,铰链 A 和 A' 处的虚转角不相等,即 $d\theta_A \neq d\theta'_A$ 。因此, $\tau_1 \cdot d\theta_A \neq \tau'_1 \cdot d\theta'_A$ 。

根据图 5 所示,假设该机器人手的左手先接触到食品包装盒,其左手手指的末端杆 BC 上的夹持力仍可通过式(6)进行计算。综上,右侧手指上末端杆 B'C' 在水平和垂直方向上的虚位移分别为:

$$\begin{cases} dx' = d(l \cos \theta'_A) = -l \sin \theta'_A d\theta'_A \\ dy' = d(l \sin \theta'_A) = l \cos \theta'_A d\theta'_A \end{cases} \quad (8)$$

根据式(3)可知,右侧手指上末端杆 B'C' 的力平衡方程为

$$\tau'_1 d\theta'_A = F'_E dx' + f_m dy' \quad (9)$$

当左侧手指上的末端杆 BC 接触到食品包装盒后,假设末端杆 BC 上的夹持力 F_E 保持不变。然而,右侧手指上的末端杆 B'C' 仍需继续平行移动偏距 e ,则杆 A'B' 绕铰链 A' 的旋转角 $\theta'_A = \theta_A + \theta$ 。其中 θ 为末端杆 B'C' 平移偏距 e 使得杆 A'B' 所旋转的角度,可通过几何结构关

系进行计算:

$$\theta = \arccos\left(\cos\theta_A - \frac{e}{l}\right) - \theta_A. \quad (10)$$

此时,式(10)可重写为

$$\tau'_1 d(\theta_A + \theta) = F'_E [l \sin(\theta_A + \theta)] d(\theta_A + \theta) - f_m l \cos(\theta_A + \theta) d(\theta_A + \theta). \quad (11)$$

综上,右侧手指上末端杆 $B'C'$ 上的夹持力

$$F'_E = \frac{F_D R - 2F_S - \frac{G}{2} l \cos\theta \cos(\theta_A + \theta)}{l \sin(\theta_A + \theta)}. \quad (12)$$

根据某生产线的夹持要求,给定机器人手的结构设计参数和夹持包装盒重量,即食品包装盒重 1 kg,驱动力 $F_D = 200$ N,恒力弹簧的回复力 $F_S = 50$ N,杆的长度 $l = 200$ mm,大滑轮的半径 $R = 15$ mm。当包装盒位于中间位置时,两手指的夹持力 F_E 随转角 θ_A 变化情况如图 6 所示。当包装盒位于图 5 所示的非中间位置时,两手指的夹持力 F_E 随转角 θ_A 变化曲线如图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知,该机器人手的两手指末端夹持力随转角的增大而增大。当包装盒处于中间位置时,该机器人手的左右两手指的末端夹持力相等。当包装盒处

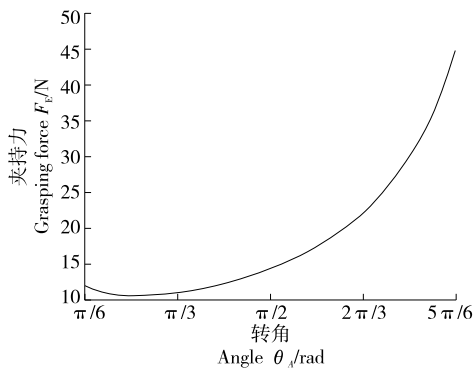


图 6 包装盒位于中间位置时末端夹持力分析

Figure 6 The grasping force analysis when the box is in the middle position

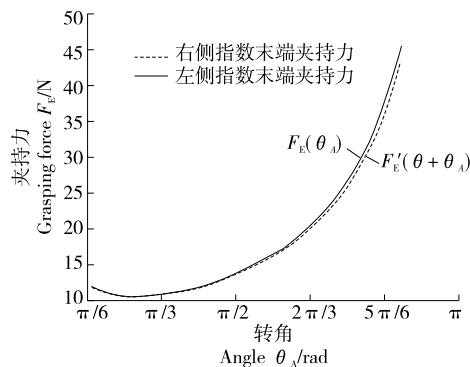


图 7 包装盒位于非中间位置时两手指的末端夹持力分析

Figure 7 The grasping force analysis when the box is in the non-middle position

于非中间位置时,偏距 $e \neq 0$ 。因此,当机器人手的左侧手指先接触到包装盒,且其末端的夹持力保持不变时,右侧手指的末端杆件还需继续移动偏距 e ,使得末端夹持力与左侧手指的末端夹持力相等。综上,该机器人手的两手指之间可实现自适应夹持运动,满足夹持要求。

4 结论

基于绳轮传动提出了一种新型欠驱动机器人手,可用于生产线上不同尺寸的包装盒的夹持作业。通过机构组成和运动原理分析可知,该机器人手具有平行夹持运动模式,并且具有指间欠驱动特征,可通过一个电机驱动,实现对不同摆放位置的包装盒的夹持。综上,无论包装盒是否位于中间位置,该机器人手的两指夹持力能保证包装盒的有效夹持。试验只对该欠驱动机器人手的机构组成、欠驱动原理以及静力学进行了分析。为了更好地适应实际的工作环境,后续有必要搭建机器人手样机,并对其进行动力学分析和夹持试验分析。

参考文献

- [1] KIM Y J, SONG H, MAENG C Y. Blt gripper: An adaptive gripper with active transition capability between precise pinch and compliant grasp[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 5 518-5 525.
- [2] AMEND J, CHENG N, FAKHOURI S, et al. Soft robotics commercialization: Jamming grippers from research to product[J]. Soft Robotics, 2016, 3(4): 213-222.
- [3] ZHANG WEN-zeng, CHEN Qiang, SUN Zhen-guo, et al. Under-actuated passive adaptive grasp humanoid robot hand with control of grasping force[C]// 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei: IEEE, 2003: 696-701.
- [4] LUO Chao, ZHANG Wen-zeng. A flexible self-adaptive under actuated hand with series passive joints[J]. Industrial Robot (An International Journal), 2018, 45(4): 516-525.
- [5] 夏海超, 白国振, 王潇榕, 等. 一种双向平夹感知自适应机器人手指设计[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(1): 14-18. XIA Hai-chao, BAI Guo-zhen, WANG Xiao-rong, et al. Design of a novel robotic finger with sensing parallel and self-adaptive grasp in two directions[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(1): 14-18.
- [6] 马涛, 杨冬, 赵海文, 等. 一种新型欠驱动机械手爪的夹持分析和优化设计[J]. 机器人, 2020, 42(3): 354-364. MA Tao, YANG Dong, ZHAO Hai-wen, et al. Grasp analysis and optimal design of a new Underactuated Manipulator[J]. Robot, 2020, 42(3): 354-364.
- [7] BIRGLEN L, GOSSELINC M. Kinetostatic analysis of under actuated fingers[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(2): 211-221.

(下转第 132 页)

University, 2019: 15-27.

[6] 海兵帅. 基于集成学习的苹果品质高光谱检测方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017: 12-14.
HAI Shuai-bing. Research on hyperspectral detection of apple quality based on ensemble learning [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017: 12-14.

[7] TIAN Xiao-yu, AHETO J H, BAI Jun-wen, et al. Quantitative analysis and visualization of moisture and anthocyanins content in purple sweet potato by Vis-NIR hyperspectral imaging[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 45(2): e15128.

[8] LEE D, LOHUMI S, CHO B K, et al. Determination of drying patterns of radish slabs under different drying methods using hyperspectral imaging coupled with multivariate analysis[J]. Foods, 2020, 9(4): 484.

[9] MARAPHUM K, SAENGPRACHATANARUG K, APARATANA K, et al. Spatial mapping of Brix and moisture content in sugarcane stalk using hyperspectral imaging[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2020, 28(4): 167-174.

[10] 高新浩, 刘斌. 基于机器视觉的鲜食玉米品质检测分类器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 298-303.
GAO Xin-hao, LIU Bin. Design and experiment of fresh corn quality detection classifier based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(1): 298-303.

[11] KANDPAL L M, LOHUMI S, KIM M S, et al. Near -infrared hyperspectral imaging system coupled with multivariate methods to predict viability and vigor in muskmelon seeds[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2016(1): 534-544.

[12] 沈凌雁, 牛丽影, 刘春菊, 等. 不同品种鲜食糯玉米清汁与籽粒中挥发性成分比较[J]. 核农学报, 2021, 35(4): 902-910.
SHEN Ling-yan, NIU Li-ying, LIU Chun-ju, et al. Comparison of volatile components in clear juice and kernel of different fresh-edible waxy corn cultivars[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(4): 902-910.

[13] YU Ke-qiang, ZHAO Yan-ru, LIU Zi-yi, et al. Application of visible and nearinfrared Hyperspectral imaging for detection of defective features in Loquat[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(11): 3 077-3 087.

[14] 孙世鹏, 彭俊, 李瑞, 等. 基于近红外高光谱图像的冬枣损伤早期检测[J]. 食品科学, 2017, 38(2): 301-305.
SUN Shi-peng, PENG Jun, LI Rui, et al. Early detection of mechanical damage in Chinese winter jujube using NIR hyperspectral images[J]. Food Science, 2017, 38(2): 301-305.

[15] 刘蒋龙, 张淑娟, 孙海霞, 等. 基于二维相关光谱的壶瓶枣室温贮藏硬度动力学模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(3): 813-817.
LIU Jiang-long, ZHANG Shu-juan, SUN Hai-xia, et al. A kinetic model of hardness in storage periods of fresh jujubes at room temperature using Two Dimensional Correlation Spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(3): 813-817.

[16] 蒋锦琳. 基于高光谱成像技术的辣椒疫病和品质分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019: 55-56.
JIANG Jin-lin. Study on analysis of pepper phytophthora blight and quality based on hyperspectral imaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019: 55-56.

[17] 张金龙. 基于高光谱成像技术检测柿果货架期的研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2015: 20.
ZHANG Jin-long. Research of persimmon during shelf life based on hyperspectral imaging[D]. Jinzhong: Shanxi Agricultural University, 2015: 20.

[18] YANG Qian, SUN Da-wen, CHENG Wei-wei. Development of simplified models for nondestructive hyperspectral imaging monitoring of TVB-N contents in cured meat during drying process[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 192: 53-60.

[19] HE Hong-ju, SUN Da-wen. Toward enhancement in prediction of Pseudomonas counts distribution in salmon fillets using NIR hyperspectral imaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 11-18.

(上接第 103 页)

[8] 宾朋, 蒋刚, 程乾. 一种新型欠驱动机械手设计[J]. 机械传动, 2015, 39(3): 86-89.
BIN Peng, JIANG Gang, CHENG Qian. Design of a new type under actuated manipulator [J]. Mechanical Transmission, 2015, 39(3): 86-89.

[9] 王宜磊, 陈霖, 易柳舟, 等. 猕猴桃采摘机械手末端执行机构的设计[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 89-91, 148.
WANG Yi-lei, CHEN Lin, YI Liu-zhou, et al. Design of the end actuator of kiwi fruit picking manipulator [J]. Food & Mechanical, 2018, 34(1): 89-91, 148.

[10] ZUO Shi-ping, LI Jian-feng, DONG Ming-jie. Design, modeling, and manipulability evaluation of a novel four-DOF parallel gripper for dexterous in-hand manipulation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(7): 1-16.

[11] 王通, 尹建军. 一种夹持果实的欠驱动手指机构设计与静力学分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(3): 110-114.
WANG Tong, YIN Jian-jun. Design and statics analysis of an under-actuated finger mechanism for grasping fruit[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(3): 110-114.

[12] 郭晓峰, 莫岸, 张文增. 共圆连杆齿轮滑轴式直线平夹自适应手指装置: CN108818580A[P]. 2018-11-16.
GUO Xiao-feng, MO An, ZHANG Wen-zeng. Coaxial connecting rod gear sliding shaft type linear flat clip adaptive finger device: CN108818580A[P]. 2018-11-16.

[13] 张文增, 梁达尧, 杨思成, 等. 闭环柔性件齿轮传动平夹自适应机器人手指装置: CN105583832A[P]. 2016-05-18.
ZHANG Wen-zeng, LIANG Da-yao, YANG Si-cheng, et al. Closed-loop flexible gear drive flat-clip adaptive robot finger device: CN105583832A[P]. 2016-05-18.

[14] APPLETON A. Thermodynamic equilibrium and the principle of virtual work[J]. European Journal of Physics, 1990, 11(5): 297.