

面向机器人抓取的小型直线串联弹性驱动器设计与控制

华洪良^{1,2} 宋杰¹ 廖振强² 赵景波³

(1. 常州工学院航空与机械工程学院, 常州 213032; 2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094;
3. 常州工学院汽车工程学院, 常州 213032)

摘要: 面向机器人力控自适应抓取,设计一种微型直线串联弹性驱动器及其机电一体化系统。开展非线性校正试验,采用 BCM 法对微型直线串联弹性驱动器感知系统进行校正,以提高力控系统测量精度。基于双位移传感器构建驱动力、位移同步感知方法,并开展模型辨识试验建立目标变形轨迹及驱动力观测模型,根据目标变形轨迹模型建立驱动力 PID 控制策略。开展阶跃力控与自适应抓取试验,优化力控制器参数并研究串联弹性力控自适应抓取特性。试验结果表明,建立的微型串联弹性驱动器具备感知驱动一体化特性,可在无力传感器的情况下实现驱动力准确感知与控制。微型串联弹性驱动器力控超调量极低,当目标驱动力幅值为 15 N 时,超调量为 0.6%。在机器人力控自适应抓取试验中,指尖抓持姿态可通过驱动力控制实现调控,使指尖抓持力方向指向物体质心,从而达到增强抓持稳定性的目的。

关键词: 驱动器; 感知; 夹持机构; 力控制; 机器人

中图分类号: TP241 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)12-0445-07 OSID: 

Design and Experiment of Miniature Linear Series Elastic Actuator
for Robotic Grasping

HUA Hongliang^{1,2} SONG Jie¹ LIAO Zhenqiang² ZHAO Jingbo³

(1. School of Aeronautics and Mechanical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China
2. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China
3. School of Automotive Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213032, China)

Abstract: A micro linear series elastic actuator (LSEA) and its mechatronic system were designed for force controlled robotic adaptive grasping. To enhance the measurement accuracy of the force control system, nonlinearity calibration experiment was performed to calibrate the nonlinearity of sensing system of the micro linear series elastic actuator by utilizing Bezier calibration method (BCM). An actuating force and displacement synchronous sensing method, which is based on dual displacement sensors, was proposed. Identification experiments were performed to develop the target deformation trajectory and actuating force observation models. A PID control strategy based on the target deformation trajectory model was established for actuating force control. Step force control and adaptive grasping experiments were performed to obtain the optimal parameters of the force controller and study the adaptive grasping characteristics of the series elastic actuated grasping system. Experimental results revealed that the micro LSEA could exhibit an accurate sensing and control ability without a force sensor. The LSEA had an extremely low overshoot in actuating force control. For the actuating force with a amplitude of 15 N, the percent overshoot was only 0.6%. In the force controlled robotic adaptive grasping experiment, the grasping posture of the fingertip could be adjusted by the actuating force control. As a result, the direction of the grasping force could be optimized to point to the object center of mass and enhance the grasping stability.

Key words: actuator; sensing; grasping mechanism; force control; robot

收稿日期: 2022-08-13 修回日期: 2022-10-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(51676099)、江苏省高校园上项目(20KJB460023)和中国博士后科学基金面上项目(2022M721613)
作者简介: 华洪良(1990—),男,副教授,南京理工大学博士后,主要从事机器人力控抓取研究,E-mail: huahl123@126.com
通信作者: 廖振强(1950—),男,教授,博士生导师,主要从事动力学仿真与控制研究,E-mail: zqliao1013@126.com

0 引言

力控抓取是机器人实现任务操作的关键,在农业采摘^[1-2]、医疗手术器械^[3-5]、工业自动化^[6-7]等领域具有广阔的应用背景。结构紧凑、安全性是力控驱动技术的关键指标^[8]。

串联弹性驱动原理由于其驱动柔顺化、力控精度高等优点^[9-10],在机器人抓取应用领域具有较好应用前景。目前,串联弹性驱动器研究主要集中于轻型协作机械臂^[11-12]、人工外骨骼^[13]等领域,性能方面主要侧重于瞬态大功率、大力矩输出。而面向机器人抓取的串联弹性力控驱动技术研究则更侧重于微型化与柔顺安全性等方面^[14],并存在以下问题:①微型化串联弹性驱动系统组成原理与结构方案。机器人末端夹持机构对内部驱动器、传感器以及支撑传动结构紧凑性提出了极高要求^[15]。探索满足机器人抓取紧凑性要求的新型串联弹性驱动系统组成原理与结构方案是串联弹性驱动器小微化发展的关键问题之一^[16]。②紧凑空间下驱动力位感知。在紧凑空间条件下,夹持部集成力位传感器容易导致夹持结构复杂、质量增加,从而影响动态抓取性能及运动可靠性^[17-18]。如何面向紧凑空间环境构建驱动力位感知系统与方法是串联弹性驱动器小微化发展的另一关键问题。AGARWAL 等^[16]基于线缆驱动原理设计了一种微型串联弹性驱动器LC-SEA,用于手指穿戴康复训练,由于采用电机远程驱动的方式,结构整体紧凑性不佳。其中,弹性体部分外形体积约为 44 mm×36 mm×17 mm,驱动力峰值约 12 N。CHEN 等^[19]通过在微型伺服电机输出端增加扭簧结构,设计了一种微型转动输出式串联弹性驱动器,并实现未知物体力控自适应抓取。华洪良等^[20]基于腔式结构设计了一种高度紧凑型串联弹性驱动器,实现电机、弹性耦合结构与传感器的一体化设计。其外形体积约为 42.5 mm×34 mm×62 mm,驱动力峰值可达 40 N。目前,微型串联弹性驱动器研究主要集中于转动输出型,采用多级齿轮传动结构实现减速增力。由于齿轮传动结构的可反向驱动特性,电机断电情况下驱动力无法保持。因此,在机器人抓取驱动应用中存在一定安全性问题^[21-22]。

针对串联弹性驱动器小微化发展所面临的问题,提出一种微型紧凑直线串联弹性驱动器(Linear series elastic actuator, LSEA)系统组成原理及其机电一体化系统方案。对微型紧凑直线串联弹性驱动器设计与控制所面临的感知系统标定、模型辨识、控制策略与抓持应用问题进行研究,揭示微型紧凑直

线串联弹性驱动器驱控特性,以期微型紧凑直线串联弹性驱动器工程应用提供参考。

1 直线串联弹性驱动器机电系统设计

1.1 结构设计

直线串联驱动器原理如图 1 所示。微型电机回转运动通过丝杆转换为驱动螺母直线运动。驱动块含有一腔体,弹簧 1、驱动螺母与弹簧 2 以串联压缩的形式嵌于驱动块腔内。在空载状态下,驱动螺母线性运动将通过弹簧 1 与弹簧 2 传递至驱动块,实现位移输出。在负载状态下,驱动块的线性运动将受到限制,驱动螺母的线性运动对弹簧 1 或弹簧 2 进行压缩,弹簧 1、弹簧 2 弹性恢复力将传递至驱动块,对外输出驱动力。采用两个微型位移传感器分别测量驱动块、驱动螺母位移,通过计算差值获得弹簧组综合变形量。

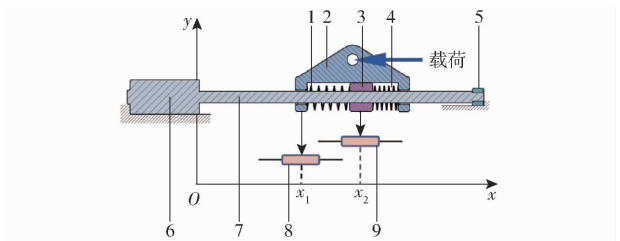


图 1 LSEA 驱动原理

Fig. 1 Actuating principle of LSEA

1. 弹簧 1 2. 驱动块 3. 驱动螺母 4. 弹簧 2 5. 轴承 6. 微型电机 7. 丝杆 8. 微型位移传感器 1 9. 微型位移传感器 2

为实现紧凑设计,采用一体化微型 N20 丝杆电机进行驱动。N20 电机头部含有一速比 1:50 微型减速机,丝杆极限扭矩为 0.3 N·m。弹簧 1 与弹簧 2 中径、线径、圈数分别为 6 mm、1 mm、10。采用 RS6011Y19004 型微型位移传感器分别测量驱动块位移 x_1 与驱动螺母位移 x_2 。建立紧凑型 LSEA 虚拟样机模型如图 2 所示,其长、宽、高分别为 127、27.4、25.6 mm,有效力控行程约 60 mm,驱动力峰值

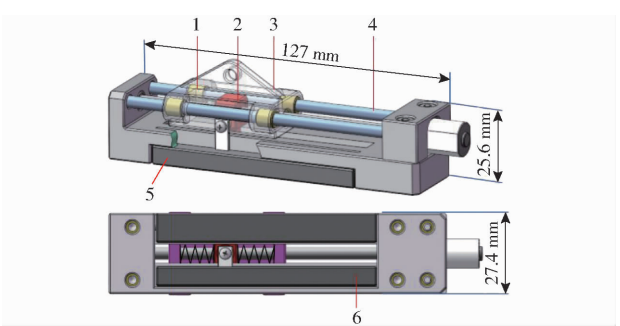


图 2 LSEA 虚拟样机三维模型

Fig. 2 3D virtual prototype of LSEA

1. 微型直线轴承 2. 驱动螺母 3. 驱动块 4. 直线导轨 5. 微型位移传感器 1 6. 微型位移传感器 2

约为 48 N。

1.2 传感系统标定

LSEA 力控精度直接取决于微型位移传感器 1 与微型位移传感器 2 测量精度。然而,微型位移传感器由于其内部碳膜厚度制造误差而存在固有非线性,从而导致位移测量精度受到较大影响^[23]。为此,建立微型位移传感器固有非线性校正试验平台如图 3 所示,对 LSEA 感知系统进行标定。非线性校正试验中,将微型位移传感器探针与活塞杆相连,通过控制伺服阀驱动压力 p_a 实现气缸往复运动控制。气缸活塞杆往复运动位移由微型位移传感器、激光位移传感器同步测量,进而获得微型位移传感器非线性响应 x 及其对应位移真值 x_{ref} 。被校正微型位移传感器标称量程为 60 mm,其响应 x 通过 MCU 内部 Analog - to - Digital - Converter (ADC) 采样获得。激光位移传感器型号为松下 HG - C1200,其量程为 160 mm、重复精度为 0.2 mm、线性度为 $\pm 0.2\%$ F. S.,通过 16 位 ADS1115 模块采样获得其响应 x_{ref} 。

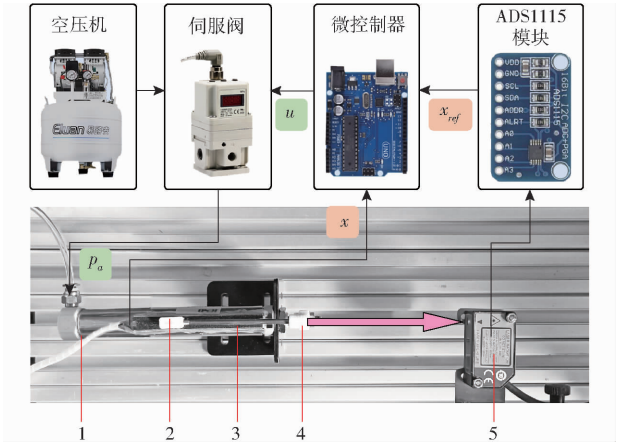


图 3 微型位移传感器非线性校正试验
Fig. 3 Nonlinearity calibration experiment of micro displacement sensor

1. 气缸 2. 传感器探针 3. 微型位移传感器 4. 活塞杆 5. 激光位移传感器

图 4 为测得的微型位移传感器非线性响应特性。结果表明,传感器量程两端各存在一个饱和域,导致量程内部存在两处拐点,整体响应特性呈强非线性。并且,微型位移传感器正逆向运动过程中存在迟滞特性。

采用具有局部-全局协同逼近能力的 BCM 法^[23]对微型位移传感器初始响应 x 进行校正,即

$$f_{bcm}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} C_{n+1}^{i-1} w_{i-1} p_{i-1} b_{i-1}}{\sum_{i=1}^{n+1} C_{n+1}^{i-1} w_{i-1} b_{i-1}} \quad (1)$$

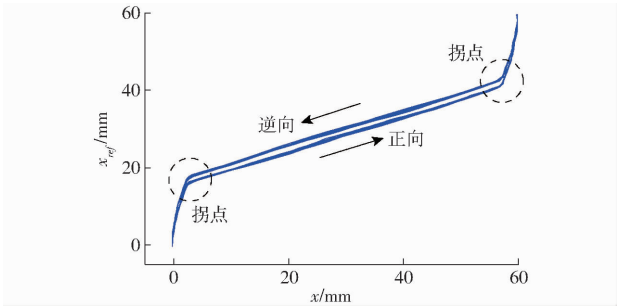


图 4 微型位移传感器非线性响应特性
Fig. 4 Nonlinear response characteristic of micro displacement sensor

其中 $b_{i-1} = \left(\frac{x - l_x}{u_x - l_x} \right)^{i-1} \left(\frac{u_x - x}{u_x - l_x} \right)^{n-i+1}$ (2)
式中 n ——模型阶数
 p_{i-1} ——节点位置
 w_{i-1} ——节点权重系数
 l_x ——传感器响应下限
 u_x ——传感器响应上限

通过求解数值优化问题得出节点位置与权重系数 p_{i-1} 、 w_{i-1} ,即

$$O_{bcm} = \min(\text{RMS}(e_b)) \quad (3)$$

其中 $e_b = f(x) - x_{ref}$ (4)

式中 e_b ——校正残差

式(3)具体优化过程可参照文献[23]。根据运动状态将响应特性数据进行分割并构建基于状态变量的非线性校正策略^[24]

$$f(x) = \begin{cases} f_{bcm}(x_i) & (x_i = x \cap (\dot{x} \geq 0)) \\ f_{bcm}(x_d) & (x_d = x \cap (\dot{x} < 0)) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $\dot{x}$ ——运动状态变量

由于非线性校正模型实时求解速度受控于模型阶数,因此通过模型阶数遍历优化方式计算式(3)目标函数最小值。 O_{bcm} 越小,模型校正精度越高。目标函数 O_{bcm} 随模型阶数分布特性如图 5 所示。计算结果表明,对于当前微型位移传感器非线性特性,BCM 模型阶数增加至 5 阶后,校正精度不再显著增加。因此,5 阶 BCM 非线性校正模型可在精度与实

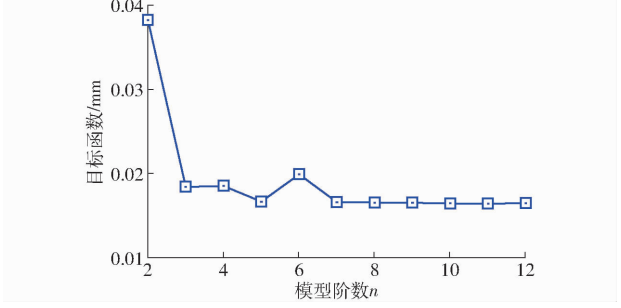


图 5 校正残差随模型阶数分布特性
Fig. 5 Residual calibration error under different model orders

时求解速度方面获得较好的平衡。校正结果与激光位移传感器真值对比如图 6 所示,5 阶 BCM 模型可实现迟滞与全局非线性特性逼近校正。

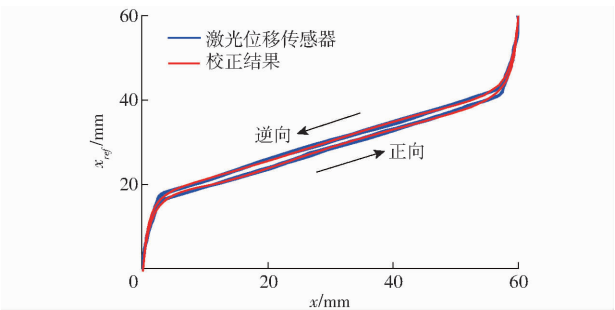


图 6 微型位移传感器非线性校正结果

Fig. 6 Nonlinearity calibration of micro displacement sensor

2 控制系统设计

2.1 模型辨识

如图 1、2 所示,虽然电机至驱动块传动链路中存在丝杆传动环节,摩擦力较大,但丝杆摩擦力不会对驱动块输出载荷造成扰动。因为驱动块与驱动螺母通过弹簧 1 与弹簧 2 实现弹性耦合,其驱动力由弹簧 1 与弹簧 2 弹性恢复力提供。因此,驱动力建模精度受控于驱动力 F_a 与弹簧综合变形量 d 之间映射关系,其主要扰动因素为驱动块与直线导轨间摩擦力。采用微型直线轴承对驱动块进行支撑与运动导向,并充分往复跑合,从而减小驱动块与直线导轨间摩擦力对建模精度的影响。由于串联弹性驱动器内部弹簧制造不可控因素,弹簧刚度存在固有非线性特性,从而影响驱动力建模及控制精度。因此,采用试验手段辨识驱动力 F_a 与弹簧综合变形量 d 表征模型。试验方案如图 7 所示,将串联弹性驱动器与力传感器通过工装固定于固定座,以确保驱动块能够通过凯夫拉线缆以水平方向对力传感器加载驱动力。通过驱动力加载与卸载,使驱动块内部弹簧在其极限变形范围内连续变化。考虑到弹簧变形迟滞特性,驱动力加载与卸载过程连续重复进行 10 次,进而同步测量 F_a 与 d 响应过程。其中, F_a 响应通过力传感器测量。弹簧综合变形量 d 计算式为

$$d=f(x_1)-f(x_2) \tag{6}$$

式中 $f(x_1)$ ——微型位移传感器 1 校正结果
 $f(x_2)$ ——微型位移传感器 2 校正结果

测得的驱动力 F_a 与弹簧综合变形量 d 响应如图 8、9 所示。基于测得响应,采用多项式模型分别构建驱动力 F_a 与弹簧综合变形量 d 近似模型 $\tilde{F}_a$ 与 $\tilde{d}$ 。通过计算 $\tilde{F}_a$ 、 $\tilde{d}$ 建模误差二范数 $\|e_f\|_2=\tilde{F}_a-$

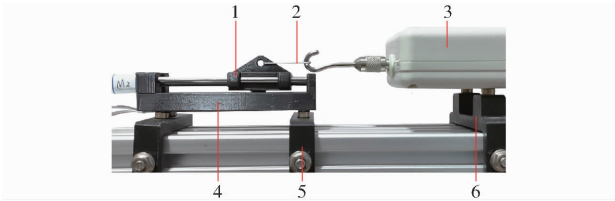


图 7 模型辨识试验平台

Fig. 7 Experimental platform for model identification

1、4. 驱动器 2. 凯夫拉线缆 3. 力传感器 5、6. 固定座

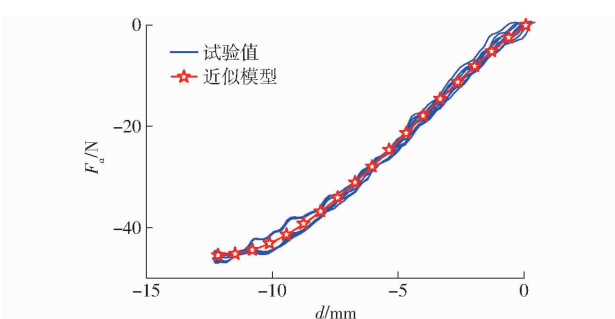


图 8 驱动力模型辨识

Fig. 8 Identified model of actuating force

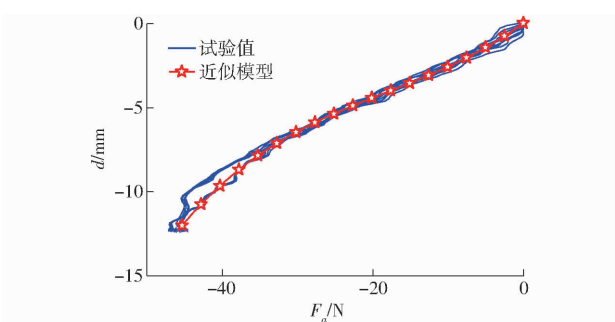


图 9 弹簧综合变形量模型辨识

Fig. 9 Identified model of spring deformation

F_a 、 $\|e_d\|_2=\tilde{d}-d$ 随模型阶数的变化特性确定最佳模型阶数。 $\|e_f\|_2$ 与 $\|e_d\|_2$ 变化特性如图 10 所示。

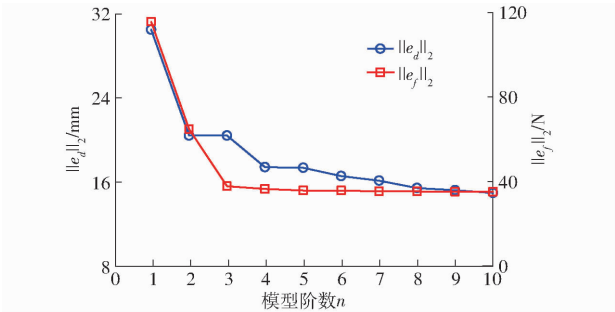


图 10 $\tilde{F}_a$ 与 $\tilde{d}$ 建模误差随模型阶数分布特性

Fig. 10 Modeling error of $\tilde{F}_a$ and $\tilde{d}$ under different model orders

计算结果表明, $\tilde{F}_a$ 、 $\tilde{d}$ 模型阶数取为 3 阶、4 阶时,即

$$\tilde{F}_a=-2.91\times10^{-2}d^3-3.81\times10^{-1}d^2+3.34d-0.53 \tag{7}$$

$$\tilde{d} = -2.12 \times 10^{-7} F_a^4 + 1.41 \times 10^{-4} F_a^3 + 8.10 \times 10^{-3} F_a^2 + 3.26 \times 10^{-1} F_a + 0.163 \quad (8)$$

可获得较为理想的建模精度与实时求解速度。式(7)、(8)与试验结果对比见图 8、9。根据相应 $\|e_f\|_2$ 与 $\|e_d\|_2$ 值计算得式(7)、(8)建模误差均方根值约为 0.1 N、0.05 mm。整体上辨识模型 $\tilde{F}_a$ 、 $\tilde{d}$ 与试验结果吻合较好,可满足力控要求。

2.2 控制策略

串联弹性驱动器力控策略如图 11 所示。对于给定目标驱动力 F_a ,首先采用式(8)计算弹簧目标变形轨迹 $\tilde{d}$,并通过式(6)计算弹簧变形控制偏差 E_d 。随后,基于弹簧变形控制偏差 E_d 构建 PID 控制^[25]对微型电机驱动电压 u 进行控制,即

$$u = k_p E_{d,j} + k_i E_{dsum,j} + k_d \dot{E}_{d,j} \quad (9)$$

其中
$$E_{dsum,j} = \sum_{i=1}^n E_{d,i} \quad (10)$$

$$\dot{E}_{d,j} = E_{d,j} - E_{d,j-1} \quad (11)$$

式中 k_p ——比例系数
 k_i ——积分系数
 k_d ——微分系数
 $E_{d,j}$ ——弹簧变形控制偏差离散形式
 $E_{dsum,j}$ ——误差积分项
 $\dot{E}_{d,j}$ ——误差微分项

通过弹簧两端位移测量,获得弹簧综合变形量 d ,进而实现弹簧目标变形轨迹及驱动力闭环控制。

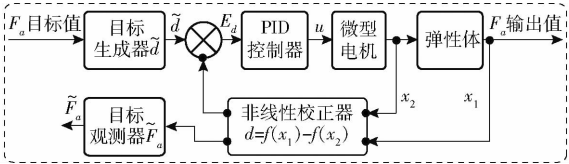


图 11 LSEA 力控策略

Fig. 11 Actuating force control strategy of LSEA

基于式(7)及测得弹簧综合变形量 d 构建驱动力观测器,实现驱动力实时观测。

3 试验

3.1 阶跃力控试验

基于图 7 所示力控试验平台,开展驱动力阶跃控制试验。通过试验对 PID 控制器系数 k_p 、 k_i 、 k_d 进行优化。当 $k_p = 50$ 、 $k_i = 15$ 、 $k_d = 20$ 时,驱动力控制可在快速响应、低超调、低稳态误差等指标间达成理想平衡。

图 12 为不同驱动力目标下阶跃控制与观测响应。表 1 为不同驱动力目标下阶跃控制稳态时间、稳态误差、超调量特性。试验结果表明,力控稳态误差幅值低于 0.4 N。驱动力控制稳态时间随着驱动力目标值增加呈微小增长趋势。这是因为驱动力幅值与弹簧综合变形量 d 呈正相关关系,大驱动力导致驱动螺母运动位移增加,从而导致稳态时间增加。图 12 及表 1 表明,微型串联弹性驱动器力控的显著特征在于超调量极低,当目标驱动力幅值为 15 N 时,超调幅值仅约 0.09 N(即超调量为 0.6%)。

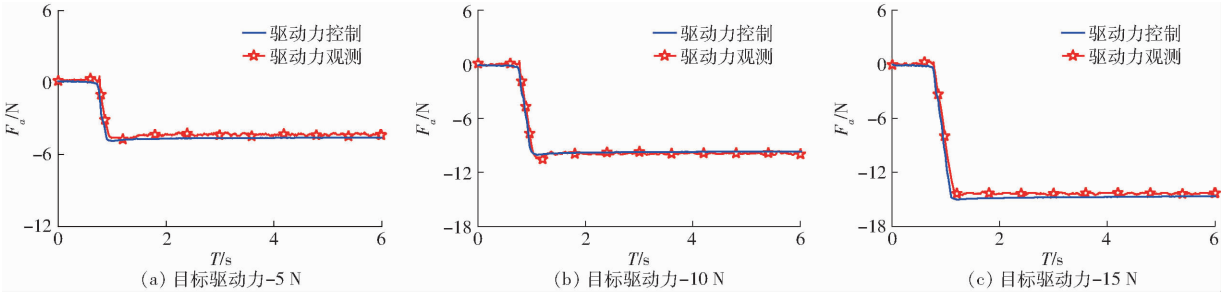


图 12 驱动力阶跃控制响应

Fig. 12 Step control response of actuating force

表 1 阶跃力控响应特性

Tab. 1 Step control characteristic of actuating force

目标驱动力/N	稳态时间/s	稳态误差/N	超调量/%
-5	0.18	-0.25	0.4
-10	0.29	-0.38	-0.3
-15	0.30	-0.28	0.6

当目标驱动力为 -5、-10、-15 N 时,驱动力观测模型(式(7))感知误差为 -0.54、0.24、-0.64 N。由于驱动力控制与观测模型均依赖于弹簧综合变形量 d ,因此驱动力观测响应与控制响应

整体吻合度较高。试验结果表明,建立的驱动力观测与控制模型可在无力传感器的情况下实现驱动力准确感知与控制。由于上述特性,微型串联弹性驱动器在紧凑空间下力控应用场景极具优势。

3.2 机器人力控抓取试验

通过拟人机器人手力控自适应抓取试验,评估微型串联弹性夹持系统对未知刚度、形状物体的自适应夹持特性。试验平台如图 13 所示,将微型串联弹性驱动器与拟人手指机构固定于基座。拟人手指驱动线缆的驱动端固定于驱动块。通过

驱动块线性运动实现驱动线缆张紧控制。驱动块向左运动过程中,驱动线缆将被张紧并驱动拟人手指机构产生弯曲抓持运动。驱动线缆在低张力情况下,拟人手指抓持机构将在张紧带作用下复位并保持伸直状态。

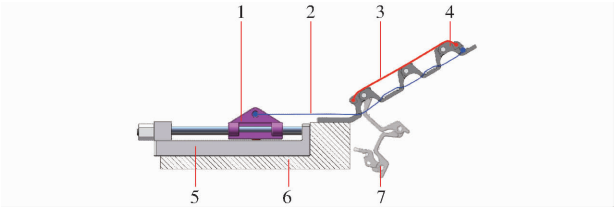


图 13 机器人力控自适应抓取试验

Fig. 13 Experimental platform for robotic adaptive grasping by actuating force control

1. 驱动块 2. 驱动线缆 3. 张紧带 4. 拟人手指机构 5. LSEA
6. 基座 7. 抓持状态

在力控自适应抓取试验中,将目标驱动力设置为 -15 N 。驱动块向左运动并驱动手指机构实现抓取运动。图 14 为一弹性泡沫球力控自适应抓取过程。图 15 为自适应抓取过程中驱动力响应观测结果。驱动力响应通过图 11 所示目标观测器实现实时测量。首先采用微型位移传感器分别测量驱动块位移响应 x_1 与驱动螺母位移响应 x_2 ,并采用 BCM 法进行非线性校正。随后,通过式(6)计算弹簧综合变形量 d ,并根据驱动力观测模型式(7)实现驱动力观测。结果表明,物体自适应抓取时间约 2.2 s 。在力控抓取过程中,随着驱动力增加,手指关节 1~3 将依次产生弯曲运动实现物体外形自适应包络抓取。当驱动力幅值增加至设定目标,力控自适应抓取完成。

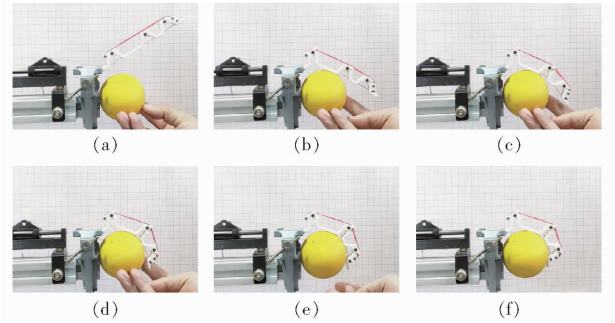


图 14 物体力控自适应抓取过程

Fig. 14 Adaptive grasping of object by actuating force control

在机器人力控自适应抓取应用中,物体抓持稳定性可通过驱动力幅值实现调控。如图 16 所示,首先将驱动力设置为 -15 N 实现物体自适应抓取。稳态抓持结果如图 17 所示,由于驱动力较小,指尖与物体表面接触角导致指尖抓持力偏离物体质心,并呈发散状,不利于物体抓持力封闭,从而影响抓持

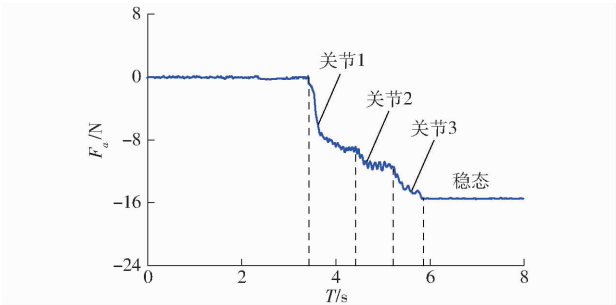


图 15 物体自适应抓取过程驱动力响应

Fig. 15 Response of actuating force in adaptive object grasping

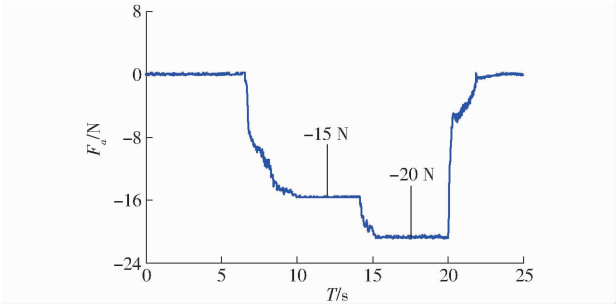


图 16 物体抓持力度调控

Fig. 16 Grasping strength control of object

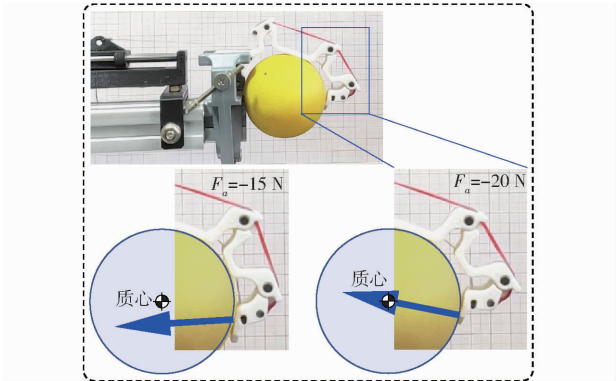


图 17 不同驱动力下物体抓持

Fig. 17 Object grasping under different actuating forces

稳定性。通过增加驱动力至 -20 N ,指尖关节姿态将被进一步调控,使指尖抓持力方向指向物体质心,从而增强抓持稳定性。

4 结论

(1)建立的微型串联弹性驱动器具备感知驱动一体化特性,可在无力传感器情况下实现驱动力准确感知与控制。微型串联弹性驱动器力控超量极低,当目标驱动力幅值为 15 N 时,超量为 0.6% 。由于上述特性,微型串联弹性驱动器在力控安全性高要求应用场景中具有较好的应用前景。

(2)通过驱动力控制,可实现物体自适应抓取。并且可通过驱动力幅值实现指尖抓持姿态调控,使指尖抓持力方向指向物体质心,从而达到增强抓持稳定性的目的。

参 考 文 献

- [1] JI Wei, QIAN Zhijie, XU Bo, et al. Apple viscoelastic complex model for bruise damage analysis in constant velocity grasping by gripper[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 162(1): 907–920.
- [2] ZHANG Baohua, XIE Yuanxin, ZHOU Jun, et al. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: a review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 177(1): 1–20.
- [3] GUO Jin, LOW Jin-Huat, LIANG Xinquan, et al. A hybrid soft robotic surgical gripper system for delicate nerve manipulation in digital nerve repair surgery[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(4): 1440–1451.
- [4] TAKIZAWA T, KANNO T, MIYAZAKI R, et al. Grasping force estimation in robotic forceps using a soft pneumatic actuator with a built-in sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 271(1): 124–130.
- [5] GERBONI G, BRANCADORO M, TORTORA G, et al. A novel linear elastic actuator for minimally invasive surgery: development of a surgical gripper[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(10): 105025.
- [6] HUA Hongliang, LIAO Zhenqiang, ZHAO Jingbo. Design, analysis, and experiment of an underactuated robotic gripper actuated by linear series elastic actuator[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, 15(2): 021002.
- [7] HUA Hongliang, LIAO Zhenqiang, CHEN Yongjiang. A 1-dof bidirectional graspable finger mechanism for robotic gripper[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2020, 34(11): 4735–4741.
- [8] WANG Daoming, XIONG Yan, ZI Bin, et al. Design, analysis and experiment of a passively adaptive underactuated robotic hand with linkage-slider and rack-pinion mechanisms[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 155(1): 104092.
- [9] RAMPELTSHAMMER W F, KEEMINK A Q L, VAN D K H. An improved force controller with low and passive apparent impedance for series elastic actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2020, 25(3): 1220–1230.
- [10] ZHONG Bin, GUO Kaiqi, YU Haoyong, et al. Toward gait symmetry enhancement via a cable-driven exoskeleton powered by series elastic actuators[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 7(2): 786–793.
- [11] 张秀丽, 谷小旭, 赵洪福, 等. 一种基于串联弹性驱动器的柔顺机械臂设计[J]. *机器人*, 2016, 38(4): 385–394
ZHANG Xiuli, GU Xiaoxu, ZHAO Hongfu, et al. Design of a compliant robotic arm based on series elastic actuator[J]. *Robot*, 2016, 38(4): 385–394. (in Chinese)
- [12] SHI Yanlei, ZHANG Minglu, ZHANG Xiaojun, et al. Design and analysis of a rotary-type robot flexible joint[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(18): 2494–2499, 2500.
- [13] CHEN Bing, ZHAO Xuan, MA Hao, et al. Design and characterization of a magneto-rheological series elastic actuator for a lower extremity exoskeleton[J]. *Smart Materials and Structures*, 2017, 26(10): 105008.
- [14] 崔永杰, 马利, 何智, 等. 基于最优空间的猕猴桃双臂并行采摘平台设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(8): 132–143.
CUI Yongjie, MA Li, HE Zhi, et al. Design and experiment of dual manipulators parallel harvesting platform for kiwifruit based on optimal space[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(8): 132–143. (in Chinese)
- [15] 于丰华, 周传琦, 杨鑫, 等. 日光温室番茄采摘机器人设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 41–49.
YU Fenghua, ZHOU Chuanqi, YANG Xin, et al. Design and experiment of tomato picking robot in solar greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 41–49. (in Chinese)
- [16] AGARWAL P, DESHPANDE A D. Series elastic actuators for small-scale robotic applications[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2017, 9(3): 031016.
- [17] KIM U, JEONG H, DO H, et al. Six-axis force/torque fingertip sensor for an anthropomorphic robot hand[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2020, 5(4): 5566–5572.
- [18] BALLESTEROS J, PASTOR F, GÓMEZDEGABRIEL J M, et al. Proprioceptive estimation of forces using underactuated fingers for robot-initiated pHRI[J]. *Sensors*, 2020, 20(10): 1–13.
- [19] CHEN Tianjian, CIOCARLIE M. Proprioception-based grasping for unknown objects using a series-elastic-actuated gripper[C]// 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018: 6675–6681.
- [20] 华洪良, 廖振强, 陈勇将, 等. 面向夹持机构的紧凑型串联弹性力控驱动器设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 426–432, 442.
HUA Hongliang, LIAO Zhenqiang, CHEN Yongjiang, et al. Design and test of compact series elastic force actuator for grasping mechanism[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12): 426–432, 442. (in Chinese)
- [21] MATSUKI H, NAGANO K, FUJIMOTO Y. Bilateral drive gear—a highly backdrivable reduction gearbox for robotic actuators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2019, 24(6): 2661–2673.
- [22] OSTYN F, VANDERBORGHT B, CREVECOEUR G. Design and control of a quasi-direct drive robotic gripper for collision tolerant picking at high speed[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(3): 7692–7699.
- [23] HUA Hongliang, LIAO Zhenqiang, WU Xiaofeng, et al. A Bezier based state calibrating method for low-cost potentiometer with inherent nonlinearity[J]. *Measurement*, 2021, 178(1): 109325.
- [24] HUA Hongliang, LIAO Zhenqiang, SONG Jie, et al. A sparse piecewise calibration method for potentiometer with inherent nonlinearity: a comparison study[J]. *Measurement*, 2022, 179(1): 112033.
- [25] KANG I, PETERSON R R, HERRIN K R, et al. Design and validation of a torque-controllable series elastic actuator-based hip exoskeleton for dynamic locomotion[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, 15(2): 021007.