doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.045

面向夹持机构的紧凑型串联弹性力控驱动器设计与试验

华洪良[1,2]　廖振强[2]　陈勇将[1]　徐　诚[2]

(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)

摘要:串联弹性驱动器力控性能优异,在机器人无损抓持应用领域具有较好的应用前景。设计一种集成伺服电机、弹性元件、编码器等部件的高度紧凑型串联弹性驱动器。采用试验手段对串联弹性驱动器进行模型辨识,获得控制角度轨迹与驱动力观测模型,并通过 PD 控制器实现力控。通过刚性与超弹性物体力控加载试验,研究串联弹性驱动器力控响应与误差特性。通过物体自适应抓持与人机交互试验分析串联弹性驱动器力控自适应抓持与外力自感知特性。试验结果表明,串联弹性驱动器对刚性物体加载控制较快,力控稳态时间约 0.35 s,且无超调出现。由于超弹性物体变形迟滞特性,其力控响应时间显著高于刚性物体。串联弹性驱动器力控模式能够实现物体自适应抓持,且抓持力度与速度可调。串联弹性驱动器可在不依赖指尖力传感器的情况下实现抓持力感知,有利于简化硬件与控制系统。

关键词:串联弹性驱动器;力控制;感知;夹持机构

中图分类号:TP241　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)12-0426-07　　**OSID**:

Design and Test of Compact Series Elastic Force Actuator for Grasping Mechanism

HUA Hongliang[1,2]　LIAO Zhenqiang[2]　CHEN Yongjiang[1]　XU Cheng[2]

(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*)

Abstract: Series elastic actuators (SEA) have great potential in robotic non-destructive grasping field due to its excellent force control performance. To achieve miniaturizing of the SEA, a highly compact series elastic actuator integrating servo motor, elastic element and encoder was developed. Firstly, model identification experiment of the series elastic actuator was carried out to establish the control angle trajectory actuating force observation models. Then the PD controller was utilized to control the actuating force. Subsequently, loading tests based on the rigid and hyperelastic objects were performed to study the control response, accuracy and steady-state fluctuation error of the actuating force. Finally, grasping and human interaction experiments were performed to study the adaptive grasping performance and external force self-sensing ability of the series elastic actuator. Results revealed that the series elastic actuator had a fast response speed in interacting with the rigid objects. The corresponding settling time and overshoot were about 0.35 s and 0, respectively. Due to the nonlinear deformation characteristics of hyperelastic object, its loading response speed was smaller than that of the rigid one. Grasping experiments demonstrated that the SEA could achieve object grasping adaptively, and the grasping force and speed were adjustable. In addition, the SEA could realize self-perception of the grasping force without relying on fingertip force sensor, which was conducive to simplify the hardware and control system.

Key words: series elastic actuator; force control; sensing; grasping mechanism

0　引言

机器人实现环境交互安全一大关键问题为驱动力矩(或力)控制[1-2]。目前最常用的力矩控制技术主要有:伺服电机力矩闭环控制、串联弹性驱动器技术。目前商业化轻型协作机器人多采用电机力矩

收稿日期:2021-08-28　修回日期:2021-09-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51676099)和江苏省高校面上项目(20KJB460023)

作者简介:华洪良(1990—),男,讲师,博士,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,主要从事特种机械动力学仿真与优化研究,E-mail:zqliao1013@126.com

闭环控制技术来提高机械臂的人机安全交互性。如丹麦 Universal Robots[3]、ABB YUMI[4]、国内遨博协作机器人[5]等通过电机力矩闭环控制技术实现了机器人碰撞保护功能，即机器人本体与外界环境发生意外碰撞时能够快速停止运动，以保护操作人员和机器人本体的安全。电机力矩闭环控制技术具有良好的跟踪性能，能够确保轨迹的精确性。但电机为了达到良好的跟踪性能多采用高增益控制器，容易导致系统输出特性较硬，柔顺性较差[6]。串联弹性驱动器(Series elastic actuator, SEA)通常是指在刚性驱动器与负载之间引入一弹性传动环节并共同构成驱动整体[7]。由于弹性传动环节的存在，SEA 具备一定的结构柔性。同时，通过测量弹性体变形能够方便地实现驱动力的测量与闭环控制。因此，近年来 SEA 得到了学术及产业界的高度关注。

目前关于 SEA 的研究主要集中于以下两大方向：SEA 建模、分析与控制[8-16]；SEA 创新设计。根据输出形式，SEA 主要可分为直线式[17-23]与转动式[24-28]两大类。

机器人与环境的安全交互主要包括：①机器人本体的安全性。将 SEA 用于机器人关节驱动能够使得机器人本体具备一定柔性以及力反馈与控制功能，能够有效提高机器人本体与环境的交互安全性。②机器人末端执行器。机器人为了实现物体抓持功能，其末端通常需要安装特定功能的末端执行器。对于易碎、易破损、柔软易变形物体的抓持或者非正常碰撞，末端执行器抓持力感知与控制至关重要。由于 SEA 的力控性能优势，在机器人抓持领域具有较大的应用潜力。然而，目前 SEA 主要应用于协作机器人关节[6,25]与外骨骼助力系统[17,27-29]。另外，还有一小部分应用于柔性手腕[22]、风电叶片打磨[23]等领域。而 SEA 在机器人抓持应用领域的应用研究较少。SEA 在机器人抓持领域的应用难点在于机器人末端执行器对 SEA 的结构紧凑性提出了更高的要求。而 SEA 包含有电机、减速器、弹性元件、编码器等必备部件，其小微方向的发展十分困难。

本文面向机器人夹持机构，提出一种集成伺服电机、弹性元件、编码器等部件的高度紧凑型串联弹性驱动器。并基于紧凑型串联弹性驱动器物理样机模型开展试验研究，包括：模型辨识、阶跃响应、自适应力控抓持以及外力自感知特性，以期为紧凑型串联弹性驱动器在机器人抓取领域的应用奠定基础。

1　紧凑型 SEA 设计与分析

1.1　驱动器结构设计

紧凑型 SEA 结构如图 1 所示。驱动器主要由伺服电机、输入法兰、输出法兰、编码器、直线弹簧等部件构成。输入法兰由伺服电机驱动。输入法兰与输出法兰通过薄壁轴承同心安装，两者能够产生可靠相对转动。在输入法兰与输出法兰的结合面均设计一对称布置的弹簧半槽。输入法兰与输出法兰结合面的弹簧半槽在装配状态将形成一弹簧槽，用于安装压缩直线弹簧。输入法兰与输出法兰相对转动过程中将进一步压缩弹簧，由此实现输入法兰至输出法兰的串联弹性驱动。在输出法兰一侧表面设计嵌入一转动编码器，用于检测输入法兰与输出法兰之间的相对转动，即直线弹簧的变形程度，从而实现输出法兰载荷输出测量。同时，在输出法兰上设计一输出摇臂与销轴，以便于后续试验研究。

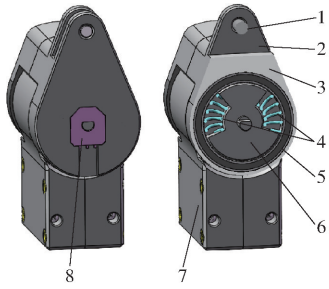

图 1　串联弹性驱动器结构

Fig. 1　Structure of series elastic actuator

1. 销轴　2. 输出摇臂　3. 输出法兰　4. 直线弹簧　5. 轴承　6. 输入法兰　7. 伺服电机　8. 编码器

1.2　驱动器原理与分析

通过输入法兰与输出法兰结合面的弹簧半槽结构，输入法兰与输出法兰能够通过弹簧槽端面实现双向驱动。如图 2 所示，输入法兰的两个弹簧半槽含有 a、b、c、d 4 个端面，输出法兰的两个弹簧半槽含有 A、B、C、D 4 个端面。当弹簧槽内嵌入预压缩直线弹簧后，在弹簧回弹作用下，弹簧槽端面 A 与 a、B 与 b、C 与 c、D 与 d 将自动对齐。当 SEA 在驱动外部负载时，其输出法兰将被负载扰动并与输入法兰产生相对角偏移。当输出法兰相对于输入法兰作顺时针转动时，输出法兰的弹簧槽端面 B 与 D 将分别与输入法兰的弹簧槽端面 a 与 c 对直线弹簧进行压缩。当输出法兰相对于输入法兰作逆时针转动时，输出法兰的弹簧槽端面 A 与 C 将分别与输入法兰的弹簧槽端面 b 与 d 对直线弹簧进行压缩，从而实现输出法兰的双向驱动。由于采用了弹簧半槽设计，SEA 的输入法兰至输出法兰之间的轴向距离能够得到有效缩减。在当前设计样机中，SEA 输入法兰与输出法兰之间的轴向距离仅 11.5 mm，且弹簧能够可靠封闭于弹簧槽内，不需要额外安装结构，使得 SEA 整体结构十分紧凑。最终，获得的 SEA 整体外形尺寸、质量与最大驱动力矩分别为 42.5 mm ×

34 mm×62(77) mm、0.085 kg、1.5 N·m。

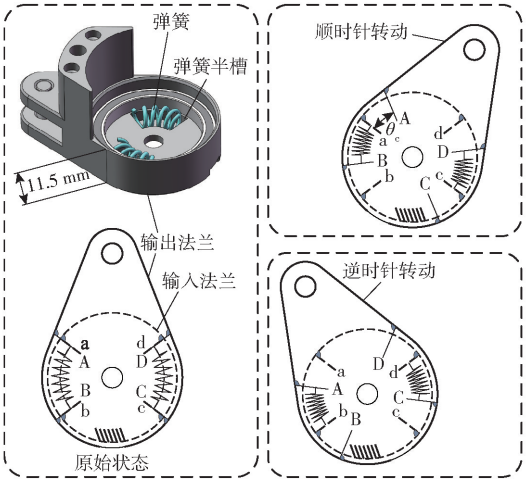

图 2 串联弹性驱动器原理

Fig. 2 Principle of series elastic actuator

如图 3 所示,当 SEA 输出法兰以力矩 T_o 驱动负载工作时,输入法兰产生角位移 θ_a。输入法兰与输出法兰将对直线弹簧进行压缩,并产生相对角偏移 θ_c。压缩后弹簧长度为

$$l_s = r_s(\theta_o - \theta_c) \tag{1}$$

式中 r_s——弹簧中线半径,mm

θ_o——输入法兰与输出法兰上弹簧槽两端面夹角,rad

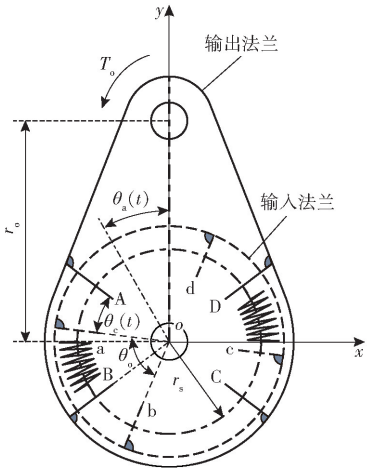

图 3 驱动器受力分析

Fig. 3 Force analysis of actuator

设计定型后,θ_o 为固定值。由于直线弹簧在初始状态为预压缩状态,因此弹簧实际压缩量为

$$l_{sd} = l_{so} - l_s \tag{2}$$

式中 l_{so}——弹簧初始长度,mm

则弹簧输出力矩为

$$T_o = 2kr_s l_{sd} \tag{3}$$

式中 k——弹簧压缩刚度,N/mm

将式(1)、(2)代入式(3),可以得到

$$T_o = 2kr_s[l_{so} - r_s(\theta_o - \theta_c)] \tag{4}$$

式中 $l_{so} - r_s(\theta_o - \theta_c)$ 为弹簧在弹簧槽内许用变形量。由式(3)、(4)可以发现,SEA 输出力矩与弹簧刚度 k、弹簧中线半径 r_s、弹簧压缩量 l_{sd} 呈正相关关系。SEA 设计定型后,弹簧中线半径 r_s 为固定值。因此,可以通过设计不同的弹簧刚度 k 与弹簧压缩量 l_{sd} 来获得不同的力矩输出特性。在本研究样机中,弹簧参数为:初始长度 14 mm、外径6 mm、线径 0.6 mm、有效圈数 5、预压缩量 2 mm、弹簧中线半径 r_s 为 9.5 mm、刚度约为 1.47 N/mm。弹簧槽内弹簧许用变形量约为 8 mm。因此,根据式(4)计算得到最大有效驱动力矩为 0.22 N·m。

2 SEA 模型辨识与控制

如图 4 所示,为便于测试,将 SEA 输出法兰的输出力矩 T_o 等效为销轴处水平方向驱动力 F_o 与负载作用力臂 r_o 乘积,即

$$T_o = F_o r_o \tag{5}$$

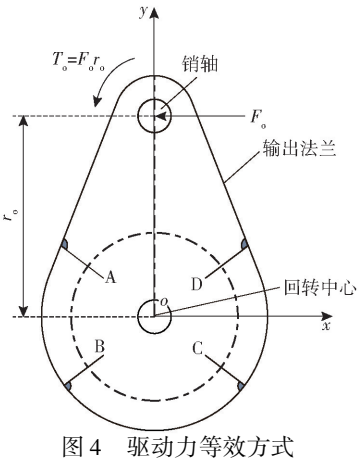

图 4 驱动力等效方式

Fig. 4 Equivalence of actuating force

根据式(4)、(5)由目标驱动力 F_o 获得控制目标 θ_c 为

$$\theta_c = \frac{r_o}{2kr_s^2}F_o + \theta_o - \frac{l_{so}}{r_s} \tag{6}$$

由式(6)可知,控制目标 θ_c 与目标驱动力 F_o 之间呈一阶线性关系。弹簧刚度 k 受装配形式、摩擦等因素扰动而无法准确获得。因此,采用参数辨识方法将式(6)辨识为

$$\tilde{\theta}_c = a_1 F_o + a_0 \tag{7}$$

模型辨识试验过程中,将研制的 SEA 通过固定座进行固定,如图 5 所示。通过控制微型伺服电机驱动输入法兰以序列 $\boldsymbol{L}_a = (\theta_{a,1}, \theta_{a,2}, \cdots, \theta_{a,n})$ 进行定位运动。在定位运动过程中,SEA 将由空载状态转变为负载状态。在空载状态时,SEA 销轴与拉力计 Y 形触头不发生接触。销轴随输出法兰继续转动过程中将被水平布置的刚性 Y 形触头限位从而变为负载状态。当输入法兰以序列 $\boldsymbol{L}_a$ 进行定位运

动时，由于输出法兰的限位，输入法兰与输出法兰之间将产生角偏移序列 $\boldsymbol{L}_c=(\theta_{c,1},\theta_{c,2},\cdots,\theta_{c,n})$。同时，输出法兰将驱动力序列 $\boldsymbol{L}_F=(F_{o,1},F_{o,2},\cdots,F_{o,n})$ 于刚性拉力计 Y 形触头。角偏移序列 $\boldsymbol{L}_c$ 与驱动力序列 $\boldsymbol{L}_F$ 可分别由编码器与拉力计测得。

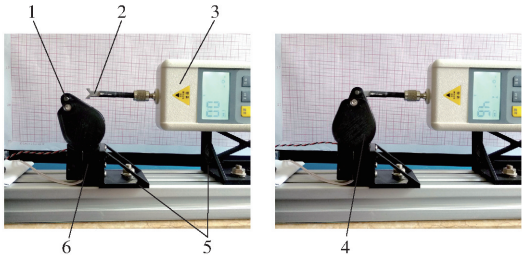

图 5　串联弹性驱动器模型辨识试验

Fig. 5　Model identification test of series elastic actuator

1. 销轴　2. Y 形触头　3. 测力计　4. 负载状态　5. 固定座　6. 串联弹性驱动器

在测试过程中，输入法兰定位运动序列 $\boldsymbol{L}_a$ 包含 3 组连续加载与卸载过程，以考察 SEA 驱动力重复与迟滞特性。根据测得的角偏移序列 $\boldsymbol{L}_c$ 与驱动力序列 $\boldsymbol{L}_F$ 采用移动最小二乘法拟合得到控制目标角 θ_c 一阶拟合模型为

$$\tilde{\theta}_c=5.522\,1F_o+5.127\,4 \tag{8}$$

驱动力 F_o 观测模型为

$$\tilde{F}_o=0.155\,4\theta_c-0.416\,5 \tag{9}$$

控制目标 θ_c 轨迹模型与驱动力 F_o 观测模型分别与试验值对比如图 6、7 所示。

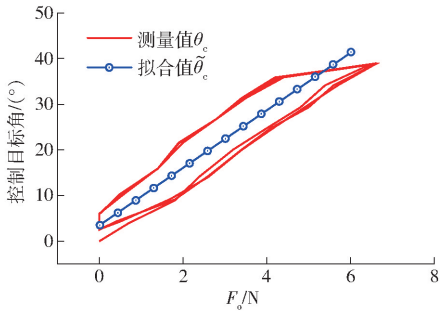

图 6　控制目标 θ_c 一阶拟合模型

Fig. 6　First-order fitting model of control target θ_c

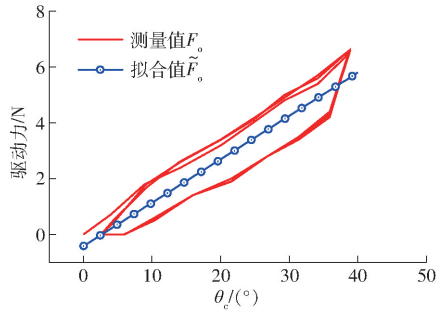

图 7　驱动力 F_o 观测模型

Fig. 7　Observation model of actuating force F_o

为实现驱动力闭环控制，设计 PD 力控制器对电机转角 θ_a 进行控制，实现控制目标 θ_c 跟随，即

$$\theta_a=K_pe+K_d\dot{e} \tag{10}$$

其中

$$e=\tilde{\theta}_c-\theta_{c,j}(t) \tag{11}$$

$$\dot{e}=\theta_{c,j}(t)-\theta_{c,j-1}(t) \tag{12}$$

式中　K_p——PD 控制器比例常数

K_d——PD 控制器微分常数

e——角度跟踪误差，rad

通过测试装置（图 5）对刚性拉力计触头反复加载测试优化，得出 K_p、K_d 分别为 0.07、0.005。基于上述 K_p 与 K_d 参数，SEA 具备较快的响应速度且抖动小。$\theta_{c,j}(t)$ 通过 SV01A103AEA01R00 型微型电位计进行实时测量，下标 j 表示控制器采样序列。其线性度、有效测量角分别为 ±2%、333.3°。

3　力控试验

3.1　刚性物体阶跃力控试验

采用测试装置（图 5），研究 SEA 对刚性物体阶跃力控响应特性。测试中将目标驱动力 F_o 依次设定为 2～7 N，增量为 1 N。力控制达到稳态一定时间后卸载至空载状态，随后根据目标驱动力 F_o 进行下一次阶跃力加载控制。

由于拉力计力反馈采样频率较低，无法较好测试 SEA 阶跃力响应过程。因此，采用驱动力 F_o 观测模型（式（9））研究 SEA 阶跃力加载响应特性。模型中 θ_c 能够直接通过编码器实时测得，并且模型为一阶线性模型，运算量较低，能够在底层运动控制器快速计算得到以保证较高的采样频率。图 8 为 SEA 在不同目标驱动力 F_o 设定值 t_F 下的阶跃力控响应特性。驱动力 F_o 响应曲线表明，其稳态值整体上与目标值呈比例变化。为评估式（9）对输出驱动力 F_o 的观测精度，通过图 8 各驱动力稳态响应观测值与实测值计算观测误差。在 2～7 N 范围内各驱动力观测误差分别为 −0.21、0.14、0.24、−0.02、−0.08、−0.36 N，观测精度较为理想。测试结果表明，对于不同目标驱动力 F_o，力控稳态时间约 0.35 s。F_o 最大稳态波动值约 0.15 N，无超调出现。

为研究力控线性度、重复精度以及滞后特性，对力控正反行程进行连续加载与卸载测试。图 9、10 分别为 2～7 N 范围内力控响应迟滞特性以及力控误差分布特性。图 10 表明，最大力控误差约为 −0.48 N。因此，在 2～7 N 范围内力控线性度约为 9.6%。在力控正反行程过程中，力控迟滞误差平均值分别为 −0.42、0.36 N。由于力控迟滞特性的存在，力控重复精度约为 0.87 N。

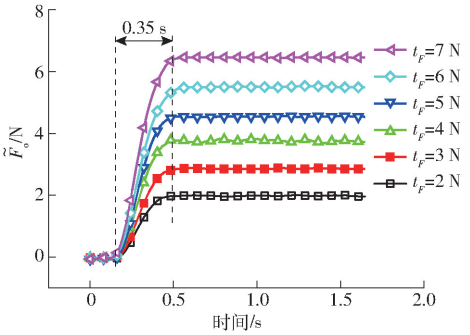

图 8 驱动力阶跃控制响应特性

Fig. 8 Step response characteristics of actuating force

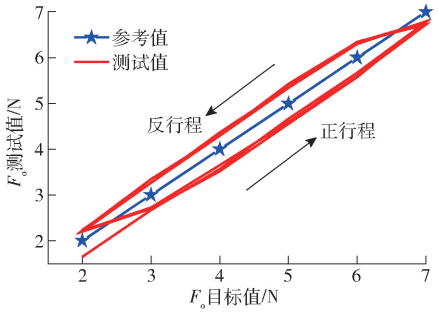

图 9 力控迟滞特性

Fig. 9 Hysteresis characteristic of force control

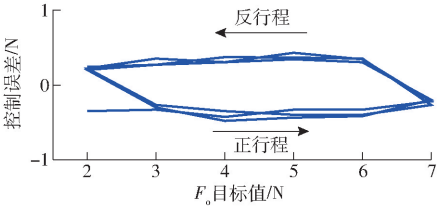

图 10 力控误差特性

Fig. 10 Force control error characteristics

3.2 超弹性物体力控加载试验

将微型 SEA 应用于机器人自动化抓持、农业采摘等领域,不仅需具备易碎、易破损物体抓持所需的力控制功能,还需具备对于柔软易变形物体抓持变形的适应能力。为模拟这一过程,在 SEA 输出法兰销轴与拉力计之间串联一高弹力橡皮圈,以模拟 SEA 与外界超弹性物体的交互过程,如图 11 所示。由于橡胶圈适合承受拉伸载荷,因此在该试验中控制 SEA 以逆时针方向旋转,对橡胶圈施加水平向左拉力。在试验过程中,目标驱动力 F_o 依次设定为 -2 ~ -6 N,增量为 -1 N,图 11 为上述加载过程运动序列。图 12 为橡胶圈加载过程驱动力观测值以及输出法兰相对输入法兰的角偏移 θ_c 响应曲线。其中,灰色背景部分的曲线为稳态响应,其余为力控切换过程瞬态响应。结果表明,目标驱动力 F_o 由 -2 N 增加至 -6 N 过程中,稳态响应时间分别为 1.21、1.59、1.74、1.70 s 左右,显著高于 3.1 节刚性物体加载过程。这一现象主要源于弹性橡胶圈变形迟滞特性,即弹性橡胶圈在驱动力加载作用下因刚

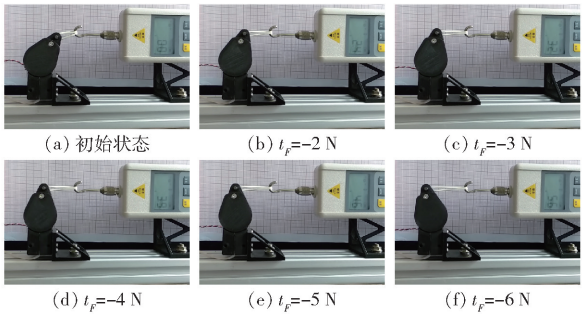

图 11 超弹性物体力加载试验

Fig. 11 Force loading test of hyperelastic object

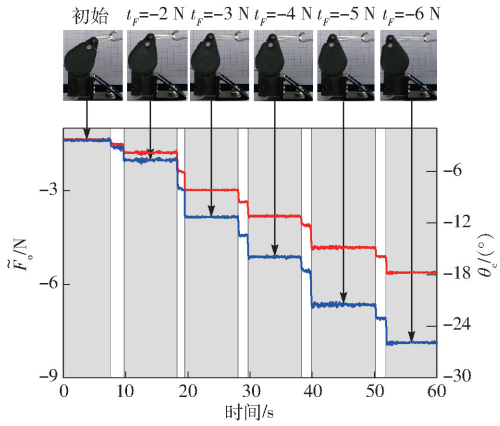

图 12 超弹性物体力控响应特性

Fig. 12 Force loading response characteristics of hyperelastic object

度时变而导致其弹性变形与张力出现时变特性。结果表明,针对具有张力时变不稳定特性的弹性橡胶圈,SEA 仍可实现稳定力控输出。

3.3 自适应抓持试验

通过图 13 所示力控自适应抓持试验装置研究微型 SEA 力控抓持性能。其中,抓持机构为一拟人手指机构。在弹性带张紧作用下,手指机构保持伸直初始状态。在 SEA 驱动下,驱动线缆将逐渐被张紧,从而使得手指结构产生弯曲抓持运动。根据式(5),SEA 驱动力输出能力取决于负载作用力臂 r_o,即驱动力 $F_o = T_o/r_o$。因此,在不同应用场合下,可通过减小负载作用力臂 r_o、增大弹簧刚度两种方式提高 SEA 驱动能力。在自适应抓持试验过程中 r_o 设计值为 15 mm,因此最大驱动力为 14.7 N。

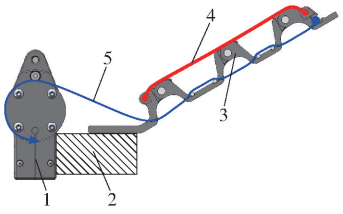

图 13 自适应抓持试验装置

Fig. 13 Experimental platform of adaptive grasping

1. SEA 2. 基座 3. 拟人手指机构 4. 弹性带 5. 驱动线缆

图 14 为一弹性泡沫球自适应抓持过程。试验过程中，SEA 输出驱动力 −5 N 对驱动线缆进行张紧控制。图 14a～14g 中，手指机构各关节依次产生回转运动，并自动适应物体外表面，实现物体力控自适应抓持。在图 14h～14l 中，SEA 输出 0 N 驱动力，手指结构在弹性带作用下伸直，实现物体释放。

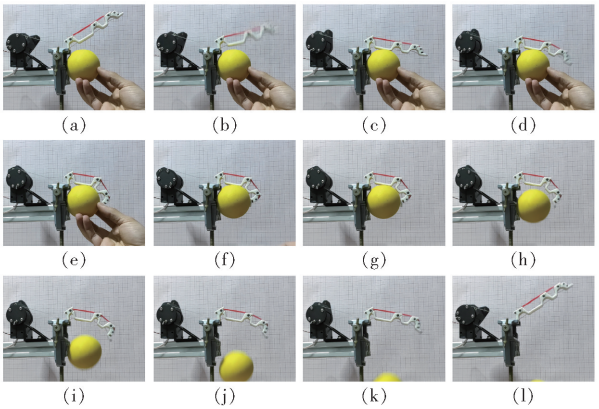

图 14　自适应抓持过程

Fig. 14　Adaptive grasping process

通过 SEA 驱动力设定，可实现物体抓持力度与速度控制。图 15a、15b 分别为驱动力 −5 N 与 −10 N 作用下物体抓持效果。在驱动力 −5 N 作用下，指尖部分未与物体产生接触，如图 15a 所示。随着驱动力由 −5 N 增加至 −10 N，指尖部分与物体产生接触，从而实现更好的物体包络抓持效果，如图 15b 所示。图 15c 为驱动力 −5、−10 N 响应过程，控制完成时间分别为 3.1 s 与 1.2 s，增加驱动力可获得更快的抓持速度。

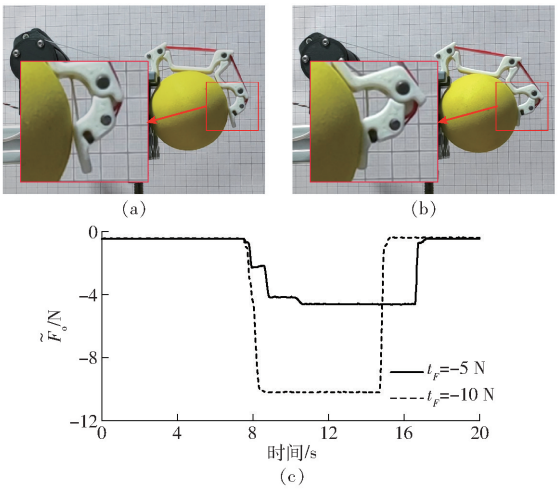

图 15　抓持力度控制

Fig. 15　Grasping strength control

3.4　人机交互试验

人机交互试验中，SEA 首先输出驱动力 −5 N，使得手指机构产生抓持运动至极限状态，如图 16a 所示。对应的响应过程为图 16i 中 0～14 s。随后，通过人手对手指机构施加非规则扰动，如图 16b～16e。由于 SEA 柔顺化驱动特性，手指机构能够产生被动变形运动，以适应外界扰动。在图 16e～16h 中，外界扰动停止，手指机构在驱动力作用下，回到极限抓持状态。图 16i 为人机交互过程中 SEA 基于式(9)感知到的抓持力响应。试验结果表明，通过 SEA 可实现驱动与感知一体化，可在不依赖指尖力传感器的情况下，实现抓持力的感知与控制。

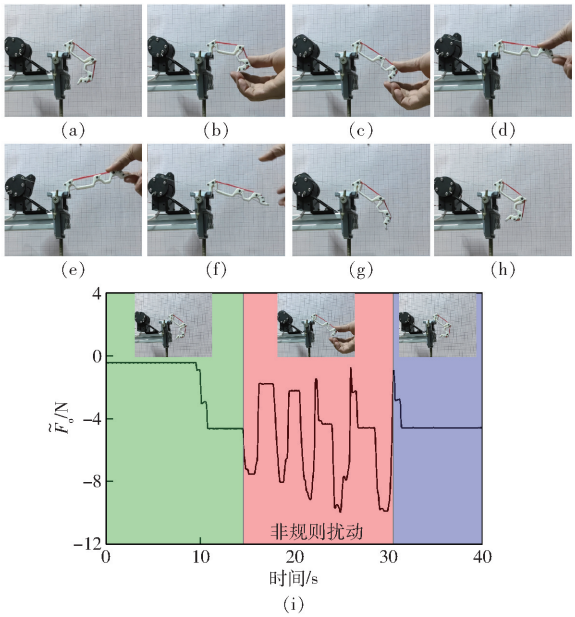

图 16　人机交互试验

Fig. 16　Interaction experiment with human

4　结论

(1)SEA 对刚性物体加载控制过程较快，力控稳态时间约 0.35 s。由于超弹性物体非线性变形特性，其力控加载时间显著高于刚性物体。对于刚性与超弹性物体，串联弹性驱动器均能够实现驱动力稳定控制。

(2)SEA 可实现感知与驱动一体化。一方面，通过 SEA 力控模式能够实现物体自适应抓持，并且抓持力度与速度可调。另一方面，SEA 可在不依赖指尖力传感器的情况下，实现抓持力的间接感知，有利于简化硬件与控制系统。

参　考　文　献

[1]　卢伟，王鹏，王玲，等. 褐菇无损采摘柔性手爪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2020，51(11)：28－36.
LU Wei, WANG Peng, WANG Ling, et al. Design and experiment of flexible gripper for mushroom non-destructive picking[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 28－36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20201103&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.11.

003. (in Chinese)
[2] 姚兴田,王旭光,张磊,等.基于滑块摇杆机构的柔性三指机器人手爪研究[J/OL].农业机械学报,2021,52(8):396-405.
YAO Xingtian, WANG Xuguang, ZHANG Lei, et al. Flexible robot hand based on slider and rocker mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):396-405. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20210841&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.08.041. (in Chinese)
[3] https://www.universal-robots.cn/.
[4] https://new.abb.com/future/pt-PT/yumi.
[5] http://new.aubo-robotics.cn/.
[6] 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)
[7] BRUNO F, MARIANA S, ÓSCAR C, et al. Design, modelling and control of an active weight-bearing knee exoskeleton with a series elastic actuator[C]//2019 IEEE 6th Portuguese Meeting on Bioengineering (ENBENG), 2019: 1-4.
[8] 马洪文, 王立权, 赵朋,等. 串联弹性驱动器力驱动力学模型和稳定性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(11): 1410-1416.
MA Hongwen, WANG Liquan, ZHAO Peng, et al. Research of dynamic dodel and stability of a series elastic actuator[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(11): 1410-1416. (in Chinese)
[9] 马洪文, 赵朋, 王立权, 等. 刚度和等效质量对 SEA 能量放大特性的影响[J]. 机器人, 2012, 34(3): 275-281.
MA Hongwen, ZHAO Peng, WANG Liquan, et al. Effect of stiffness and equivalent mass on energy amplification characteristics of SEA[J]. Robot, 2012, 34(3): 275-281. (in Chinese)
[10] SEHOON O, KYOUNGCHUL K. High-precision robust force control of a series elastic actuator[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 22(1): 71-80.
[11] 陈鹏, 李洪谊. FS-SEA 柔性臂改进的反馈计算力矩控制方法[J]. 载人航天, 2016, 22(2): 233-240.
CHEN Peng, LI Hongyi. An improved feedback computed torque control method for FS-SEA flexible manipulators[J]. Manned Space Flight, 2016, 22(2): 233-240. (in Chinese)
[12] 王萌, 孙雷, 尹伟, 等. 面向交互应用的串联弹性驱动器力矩控制方法[J]. 自动化学报, 2017, 43(8): 1319-1328.
WANG Meng, SUN Lei, YIN Wei, et al. Series elastic actuator torque control approach for interaction application[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(8): 1319-1328. (in Chinese)
[13] 孙雷, 孙伟超, 王萌, 等. 基于 RISE 反馈的串联弹性驱动器最优控制方法[J]. 自动化学报, 2018, 44(12): 2170-2178.
SUN Lei, SUN Weichao, WANG Meng, et al. Optimal control for series elastic actuator using RISE feedback[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(12): 2170-2178. (in Chinese)
[14] 尹伟, 孙雷, 王萌, 等. 针对串联弹性驱动器抖动抑制的轨迹规划和跟踪控制[J]. 自动化学报, 2018, 44(8): 1436-1445.
YIN Wei, SUN Lei, WANG Meng, et al. Motion planning and tracking control of series elastic actuator for vibration suppression[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(8): 1436-1445. (in Chinese)
[15] 于宁波, 邹武林. 有限频域约束下串联弹性驱动器的刚度控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(5): 711-719.
YU Ningbo, ZOU Wulin. Stiffness control of a series elastic actuator with restricted frequency domain specifications[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(5): 711-719. (in Chinese)
[16] 朱安, 陈力. 配置柔顺机构空间机器人双臂捕获卫星操作力学模拟及基于神经网络的全阶滑模避撞柔顺控制[J]. 力学学报, 2019, 51(4): 1156-1169.
ZHU An, CHEN Li. Mechanical simulation and full order sliding mode collision avoidance compliant control based on neural network of dual-arm space robot with compliant mechanism capturing satellite[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(4): 1156-1169. (in Chinese)
[17] JERRY E P, BENJAMIN T K. Series elastic actuators for legged robots[C]//Unmanned Ground Vehicle Technology, 2004: 135-144.
[18] NICHOLAS P, SEHOON O, LUIS S. Design and control considerations for high-performance series elastic actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 19(3): 1080-1091.
[19] ELLIOTT J R, LUKE M M, HUGH M H. Clutchable series-elastic actuator: implications for prosthetic knee design[J]. The International Journal of Robotics Research, 2014, 33(13): 1611-1625.
[20] ARNALDO G L J, RAFHAEL M D A, ANTÔNIO B F. Linear serial elastic hydraulic actuator: digital prototyping and force control[J]. IFAC Papersonline, 2015, 48(6): 279-285.
[21] 韩亚丽, 郝大彬, 于建铭, 等. 新型多模式弹性驱动器的弹跳性能研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(9): 96-104.
HAN Yali, HAO Dabin, YU Jianming, et al. Bounce performance study on novel multi-mode elastic actuator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(9): 96-104. (in Chinese)
[22] 张秀丽, 夏旭. 基于串联弹性驱动器的并联柔顺手腕的设计[J]. 北京交通大学学报, 2017, 41(4): 104-110.
ZHANG Xiuli, XIA Xu. Design of a compliant parallel robotic wrist based on series elastic actuator[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017, 41(4): 104-110. (in Chinese)

(下转第 442 页)