

DOI: 10.3901/JME.2017.13.029

基于纤维增强型驱动器的气动软体抓手设计*

魏树军^{1,2} 王天宇¹ 谷国迎^{1,2}

(1. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室 上海 200240;

2. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘要: 现有机械抓手多为刚性结构, 对被抓物品的自适应能力差。为实现柔顺抓取常采用欠驱动的方式, 由此带来设计的机械抓手结构复杂、控制难度大的问题, 而且通常只能应用于特定的目标对象。设计一种结构与控制简单、自适应能力强的软体抓手。该抓手由三个具有纤维增强结构的软体弯曲驱动器作为爪子协调配合实现抓取任务, 气体的可压缩性与软体驱动器的弹性使此抓手拥有可对易损物品无损抓取的良好特性。选取合理的性能参数后, 采用 3D 打印出模具浇注硅胶的方式制作出特性优良的驱动器, 同样采用 3D 打印的方式制作抓手的连接基座, 同时, 整个装置的气密性通过独特设计的结构得以保障。该抓手配合 UR 机械臂抓取形状大小各异物品的试验结果表明: 该抓手抓取稳定、自适应能力强、控制简单并且能够很好地实现无损抓取。

关键词: 自适应抓取; 软体抓手; 软体驱动器; 纤维增强型结构

中图分类号: TP241

Design of a Soft Pneumatic Robotic Gripper Based on Fiber-reinforced Actuator

WEI Shujun^{1,2} WANG Tianyu¹ GU Guoying^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: Most of current mechanical grippers are rigid-structured and have poor adaptive ability to target objects. In order to achieve adaptive grasping, the under-actuated mechanisms are usually employed, leading to complicated structure and controlling difficulty. On the other hand, such under-actuated grippers are generally designed for a specific target object. A soft pneumatic robotic gripper which is easy to be controlled and has strong adaptive ability is designed in this paper. The three-finger soft pneumatic robotic gripper achieves grasping tasks through cooperation of three fiber-reinforced soft bending actuators. It can accomplish the no-damage grasping of fragile items because of the compressibility of gas and the elasticity of soft actuators. After selecting appropriate parameters, soft actuators are manufactured by injecting silicon into 3D-printed molds. With 3D-printed connecting base, air-impermeability of the whole equipment can be guaranteed. The experiments are designed as: Grasping different kinds of object with different size by cooperation between the soft pneumatic gripper and UR robot arm. The results of experiments indicate that this developed gripper can realize the expected no-damage grasping function and has the features such as universal grasping, strong adaptive ability, and easy of control.

Key words: adaptive grasping; soft gripper; soft actuator; fiber-reinforced structure

0 前言

机械臂末端夹持装置是自动化生产线的重要组成部分, 如图 1a 所示, 传统的机械抓手与目标抓

取物之间多为刚性接触, 通常是几个点的接触施加压力靠摩擦力来实现抓持功能。这类抓手结构简单, 一般用于外形规则物品的简单抓取任务, 如图 1b 所示。在现代工业生产中, 产品种类较以往大大增加, “多品种、小批量”成为市场需求的一大趋势, 混流生产也应运而生。在混流生产线上, 图 1b 所示的传统机械抓手已不能满足复杂或不规则物品的抓

* 国家自然科学基金(51622506)和上海市科委基础研究(16JC1401000)资助项目。20170302 收到初稿, 20170421 收到修改稿

取要求。此类工作十分需要一个具有很强自适应能力的通用抓取装置。理想抓手应该可以自适应物体的形状并尽可能增加接触面积和接触点,这样可以产生较小的接触应力,保证被抓物体的表面不被损坏^[1]。

大量研究结果表明刚性装置想要实现自适应抓取往往结构和控制复杂,而且只能设计用于特定目标的抓取,对于抓取形状各异、软硬程度不同的物体依然存在诸多挑战。如日本 KONDO 等^[3]针对番茄采摘制作的带有软衬垫吸引器的末端执行机构,SHIGEHICO 等^[4]设计的用于草莓采摘的末端执行器。在国内,姬伟^[5]基于广义积分的抓取力矩控制方法来设计的果蔬采摘末端执行器,浙江大学金波等^[2]采用欠驱动原理设计的果蔬采摘末端执行器(图 1c),还有哈尔滨工业大学李季^[6]设计的用于月壤表层采样的机械臂末端执行机构等。以上机械抓手常采用欠驱动机构设计,自适应抓取一般较为复杂。而使用柔性驱动器制作的软体抓手能够适应不同形状和尺寸的物体,非常适合制作需要操作复杂目标对象的执行机构,逐渐受到研究人员的青睐^[7]。

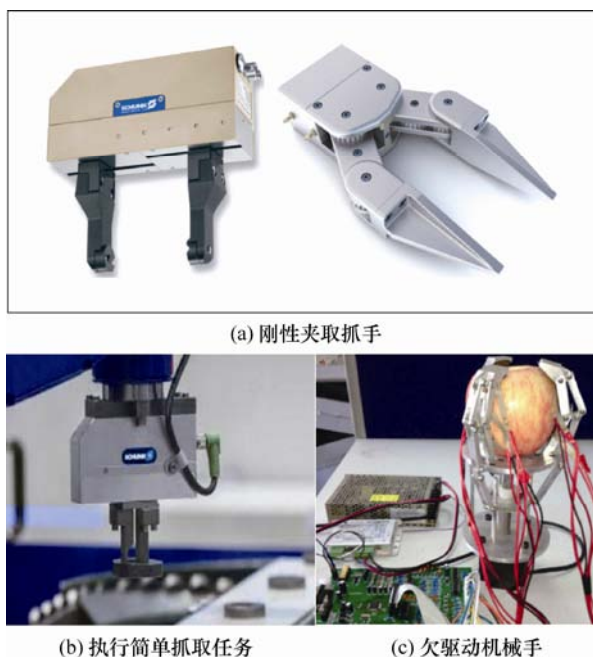


图 1 传统机械手^[2]

软体驱动器通常采用软物质功能材料构成,常用的譬如:电活性聚合物、形状记忆合金、弹性体材料、水凝胶以及经历了固态相变的复合材料等^[8]。软体驱动器的驱动性能多决于所选择的材料和激励方式。常见的激励信号有:气体/流体压强^[9]、电信号^[10]、温度^[11]、pH 值^[12]等。其中,气体/流体驱动的驱动器由于其重量轻、功率质量比高、柔顺性好、

控制简单并且易于采用新兴的加工制造技术低成本做出,拥有很大的优越性^[8]。

人们对气动软体驱动器的研究已有 60 多年历史。早在 1991 年日本学者 SUZUMORI 等^[13]基于气电混合系统发明了一种三自由度柔性驱动器 FMA 并利用该驱动器制作出了一款四指柔性抓手,如图 2a 所示。该抓手可以实现简单的抓取,但是,其控制系统相当复杂。2011 年,哈佛大学的 GEORGE 团队在美国国防部高级研究计划局(DARPA)的支持下研发了一种新型多腔体形式的气动软体抓手^[14](图 2b)。该抓手自适应能力强,但末端弯曲程度较小,对抓取物体的包裹性不强,末端接触力较小,抓取物体时稳定性不够高。基于此, GALLOWAY 等分别利用多气腔结构和纤维增强结构制作了两款海底生物采样软体抓手^[15](图 2c)。

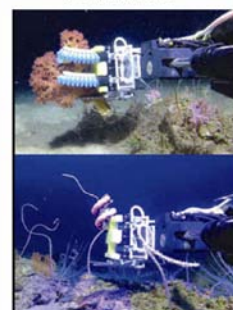
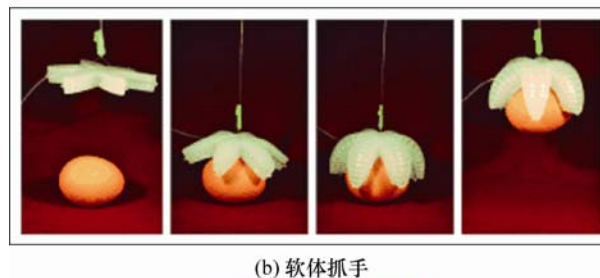
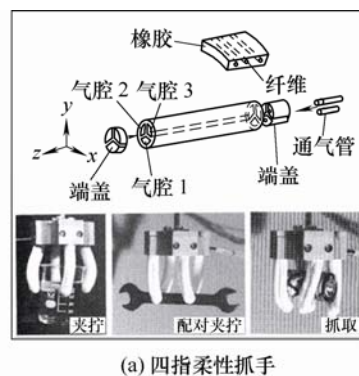


图 2 现有气动软体抓手^[13-15]

综述常用的气动驱动器的结构^[16-19],目前主要分为两类,纤维增强型(图 3a)和多腔体型(图 3b)。采用铸模方法制造,多腔体型由于结构复杂,不容

易一次成型, 气密性较难保证, 在可承受气压范围内提供的末端力较小, 实用性较差; 而纤维增强型结构较简单, 易于制造, 能提供较大的末端力。

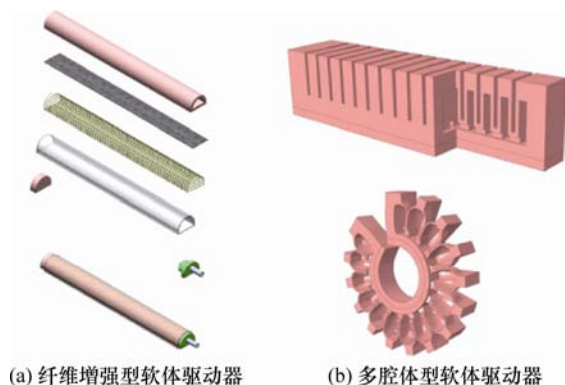


图3 气动软体驱动器^[20]

同样采用铸模方法制造的软体驱动器, 纤维增强型较多腔体型优势明显。美国哈佛大学的 WALSH 团队在这种驱动器的设计、制造和建模分析方面开展了大量工作^[21]。但是鲜有基于这种纤维增强型驱动器的多爪软体抓手的设计。因而, 本文开展了这方面的研究工作, 设计制作了一款三爪纤维增强型气动软体抓手。针对设计的抓手, 进行了单个驱动手指的参数优化, 弯曲角度及末端驱动力测试。进一步的试验结果表明, 所制作的软体抓手具有良好的气密性和抓取能力(抓取质量上限可达 0.8 kg)。通过与基于视觉的 UR 机械臂配合, 该抓手实现了多个不同形状和尺寸物品, 如三通管件、香蕉、猕猴桃等物品的抓放。

1 软体抓手设计

针对理想末端执行器所拥有的特性, 结合软体机器人技术设计了如图 4 所示的三爪软体抓手。此软体抓手主要分为软体驱动器结构和夹具。

软体驱动器结构用于实现物体抓取, 每个驱动器都采用纤维增强结构, 共三只。驱动器制作方法为: 3D 打印模具, 采用配比混合后流动性好且凝固后材质优良的硅胶浇注, 然后配合缠线等工艺制作而成。

配合软体驱动器结构设计的夹具具有夹持驱动器、连接气源并保证气密性和提供该抓手与机械臂连接法兰等多个重要作用。夹具使用 SolidWorks 设计好后直接 3D 打印的方法来完成。

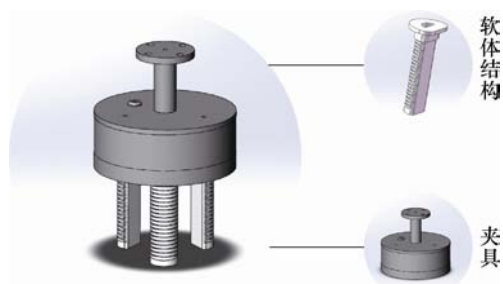


图4 抓手整体结构示意图

1.1 软体驱动器设计

适合制作气动软体抓手的驱动器结构有纤维增强型和多腔体型两大类。相对多腔体型, 纤维增强型有以下优点: 结构较简单, 能提供较大的末端力, 弯曲效率高, 可通过改变缠线角度实现多种驱动动作等^[22-23]。另外, 多腔体型工序数量虽然较少, 但在浇铸复杂腔体结构时容易出现因浇铸不足引起气孔、壁厚不均等缺陷, 即使补加硅胶后可以使用, 驱动器的运动性能会受到影响, 内部存在的缺陷使其容易损坏; 而纤维增强型按照流程可以一次性成型, 没有复杂的内部空腔结构, 不需要后期补胶等繁琐操作, 且性能稳定。从实际应用角度来看, 采用纤维增强型驱动器更易于制作出一个性能优良的驱动器。所以, 本装置的软体驱动器采用纤维增强型, 其结构模型如图 5 所示。

如图 5a、5b 所示, 驱动器的内胆采用 M4601 硅胶制成一个具有内部空腔的半圆柱型结构; 纱网附在驱动器的平面侧; 缠线主要作用是限制驱动器的径向膨胀和固定内胆与纱网。

内胆附上纱网并缠线固定后, 选用同种硅胶浇注一层外包装壁, 其作用为固定、保护缠线和纱网, 使驱动器一体化。驱动器的固定末端作用为与夹具配合实现气密性, 将在下一节具体说明。制作完成后的驱动器剖面图如图 5d 所示。

该驱动器具有向平面侧弯曲的特性, 其弯曲的原理为: 压缩空气进入驱动器的气腔, 在气压的作用下气腔膨胀, 但缠线约束了腔体的径向膨胀, 纱网约束了腔体平面侧轴向的伸长, 于是腔体圆弧面的轴向伸长成为主导因素, 使驱动器整体向平面侧弯曲。

1.2 夹具设计

软体抓手的整体夹具如图 6 所示, 该装置的作用有: 固定驱动器、连接气源并保证气密性和提供可以安装于机械臂末端的连接法兰。

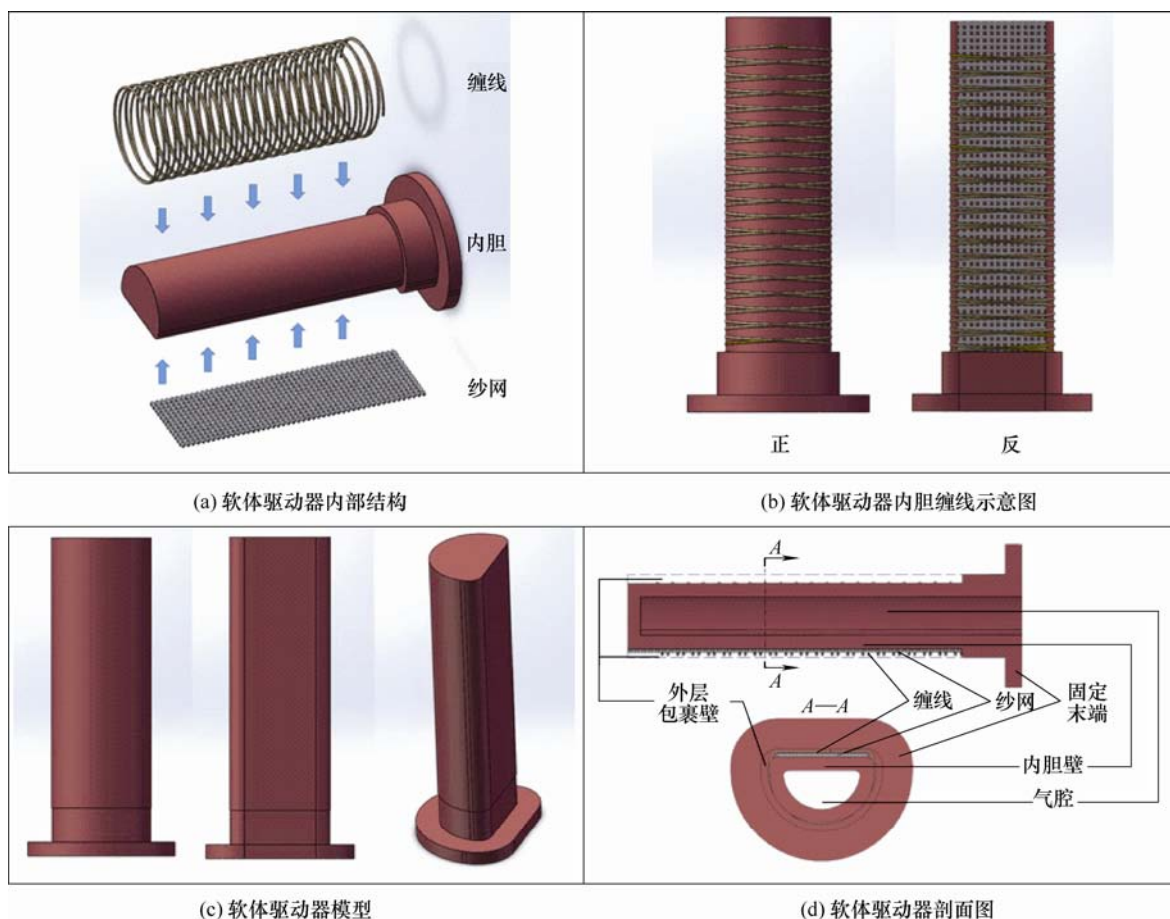


图 5 软体驱动器结构图

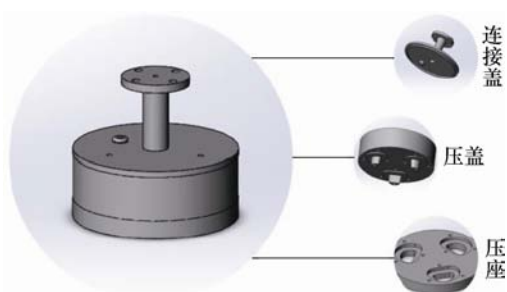


图 6 软体抓手的整体夹具

在三个基本功能中,设法保证装置气密性是软体抓手能否正常工作的关键。所以,设计了多道关口来实现装置的气密性。

以下采用较简单装置解释气密性如何得到保证,气源引入驱动器的方法如图 7a 所示。

气密性防线:① 快接插头的螺纹与夹具上丝锥攻出的内螺纹连接处使用生料带密封;② 半圆锥台的锥度使过盈量逐渐增加,利于安装的同时可以保证气密性;③ 如图 7b 所示,驱动器连接突缘厚

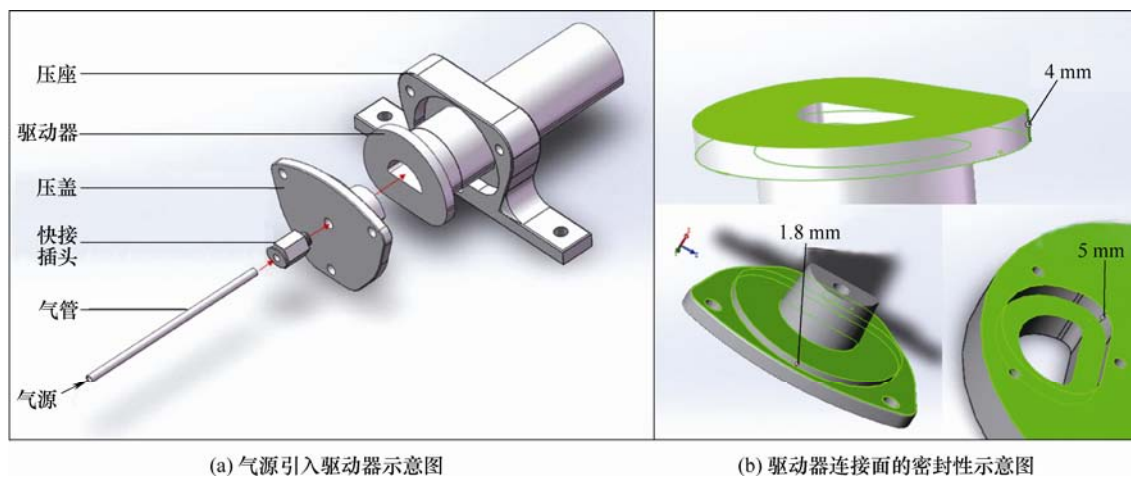


图 7 驱动器连接结构

度为 4 mm，压盖上底部凸台(轮廓比压座上凹槽内缩 1 mm)厚度为 1.8 mm，而压座上凹槽的深度是 5 mm，所以当压盖和压座完全压紧时，0.8 mm 的过盈量会保证驱动器连接面的密封性。

综上三道气密性防线能够保证装置良好的气密性。

2 驱动器参数选取与性能测试

2.1 软体驱动器参数选取

纤维增强型驱动器的驱动性能主要取决于其截面形状、壁厚、长度以及其制作所选用的硅胶。根据文献[8]中纤维增强型驱动器在不同截面形状、壁厚、长度等情况下输入气压与弯曲角度的关系以及输入气压与输出力的关系的结论，我们选取了半圆形截面形状，其中截面半径 $r = 9\text{ mm}$ ，壁厚 $t = 3.2\text{ mm}$ 。需要说明的是，本文的驱动器长度参数是参照人手指长度值来确定的三个值：75 mm、90 mm、105 mm，并将通过试验性能测试选出一个较优长度。

常用硅胶系列有 Ecoflex 系列、Dragon Skin 系列和 M4601。经过多次制作尝试，其他参数相同情况下，M4601 硅胶制作的驱动器能够承受更大的气压从而实现更大的驱动力，更适用于制作本抓手驱动器，所以选用 M4601 硅胶。

2.2 软体驱动器性能测试

2.2.1 弯曲角度试验

当驱动器内部的气压改变，驱动器的弯曲角度也会随之改变。为了对比三种不同长度的驱动器的弯曲性能，测试在相同气压下的弯曲情况。弯曲角度选取末端切线与水平线之间的夹角，以确定当前气压下驱动器的弯曲角度(角度值测量方法见图 8)。气压供应方式：由气源引出经过调压阀供给驱动器，气压值可由调压阀刻度表直接读出。

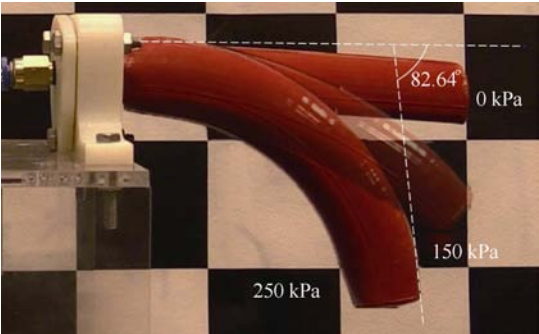


图 8 弯曲角度测量示意图

试验数据和驱动器弯曲角度数据如表 1、图 9 所示。根据试验，可以得出现有参数下该类型的驱

动器的极限弯曲角度约为 90°。根据图 9 所示，长度为 75 mm 的驱动器在相同的气压下弯曲程度明显大于其余两种尺寸的驱动器。在气压为 170 kPa 时长度为 75 mm 的驱动器已经基本达到弯曲极限，而另外两种长度的驱动器在弯曲性能上没有显著的差异，都在气压为 250 kPa 时才达到弯曲极限。因此，在实际应用中，长度为 75 mm 的驱动器凭借较小气压时弯曲程度更大的特性更适合作为软体抓手的驱动器。

表 1 驱动器在不同气压下的弯曲角度(°)

气压/kPa	驱动器长度/mm		
	75	90	105
0	2.68	2.28	3.69
50	23.64	14.52	17.93
100	46.56	28.89	35.25
150	73.08	42.46	49.31
200	—	57.94	64.64
250	—	74.98	85.54

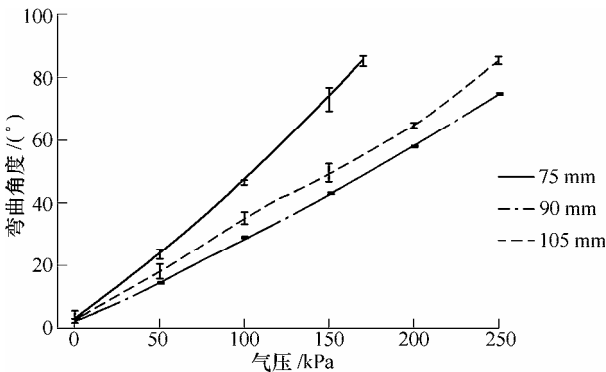


图 9 驱动器在不同气压下的弯曲角度

2.2.2 末端接触力试验

当驱动器的气压改变，驱动器的末端接触力也会随之改变。为了对比三种不同长度的驱动器的末端接触力，试验在相同条件下给驱动器提供相同的气压，在驱动器正常变形范围内，通过置于驱动器末端的力传感器测量三种驱动器的末端接触力。试验数据和驱动器弯曲效果如表 2、图 10 所示。根据图 10，长度为 90 mm 和 105 mm 的驱动器在末端接触力性能上差异不大，而长度为 75 mm 的驱动器在相同的气压下末端接触力有显著的优势。

表 2 驱动器在不同气压下的末端接触力(N)

气压/kPa	驱动器长度/mm		
	75	90	105
0	0	0	0
50	0.88	0.55	0.58
100	1.68	1.36	1.18
150	2.80	1.98	1.86
200	—	2.60	2.53

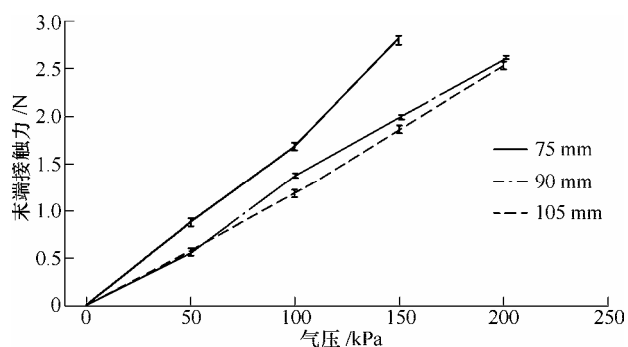


图 10 驱动器在不同气压下的末端接触力

综合考虑以上两个试验结果, 采用长度为 75 mm 的驱动器作为软体抓手的驱动器。

3 软体抓手制作

3.1 软体驱动器制作

试验前准备材料: 模具(3D 打印)、硅胶 M4601、纱网、线等。

仪器: 电子天平、THINKY 混合仪 ARE-310 等。

第一步: 制备硅胶。M4601 硅胶的 A、B 胶以 9 : 1 的质量比充分混合。

第二步: 浇注内胆。将混合脱泡后的硅胶均匀倒入模具中, 成型后的驱动器内胆如图 11a 所示。

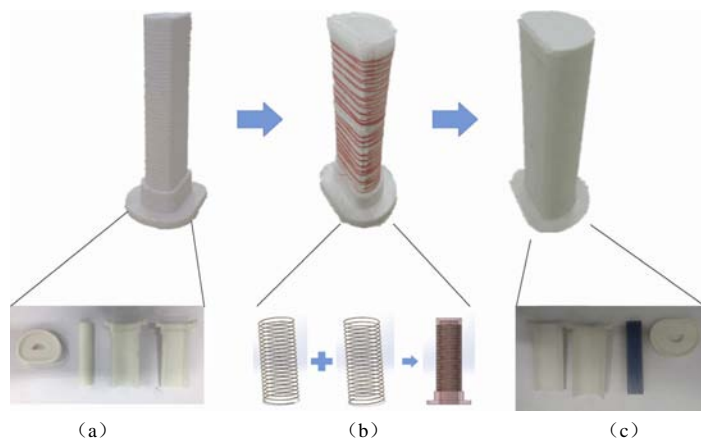


图 11 驱动器制作流程

第三步: 在驱动器平面侧加纱网并缠线(采用 0° 角缠线^[15], 图 11b)。

现有的纤维增强型软体驱动器所采用的不可延展层根据其不同弯曲需求采用不同的材料制成, 如橡胶材料^[8]、软玻璃、高密度聚乙烯纤维^[15]等, 而本抓手的软体驱动器的不可延展层采用纱网, 优势在于, 在保证其不可延展性的同时能更好地将内胆与外壁的硅胶结合在一起, 使驱动器结构稳定,

不易损坏。

第四步: 加外层硅胶。完成后如图 11c 所示。

3.2 软体抓手装配

软体抓手装配所需零件如图 12a 所示。采用四通将气源与三只软体驱动器相连, 相同的气压保证三只软体驱动器工作时弯曲动作的一致性。装配完成后的实体如图 12b 所示。



(a) 软体抓手装配零件图

(b) 软体抓手实体图

图 12 软体抓手实物装配

4 软体抓手性能试验测试

对装配后的软体抓手进行气密性测试,发现该装置气密性良好。为进一步了解软体抓手的抓取性能,做了以下试验。

4.1 抓取直径测试

为测试该抓手抓取物品大小能力,进行了抓取直径测试试验。

试验结果表明:该抓手可以稳定抓取的圆截面直径为 $\Phi 60$ mm(图 13a)。当直径为 $\Phi 65$ mm 时软体抓手可通过自适应实现抓取(图 13b),但不能抓取更大的圆截面。

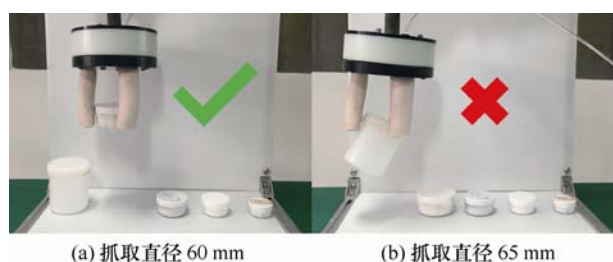


图 13 抓取直径试验

4.2 抓取质量测试

为测试该抓手的抓持重物质量的能力,进行了两组试验。

(1) 测试中,重物质量采用烧杯中添加砝码的方式进行模拟(图 14)。在驱动器所能承受气压范围内测试不同气压下该抓手所能抓取的重物质量以及其所能抓取物体质量的上限。

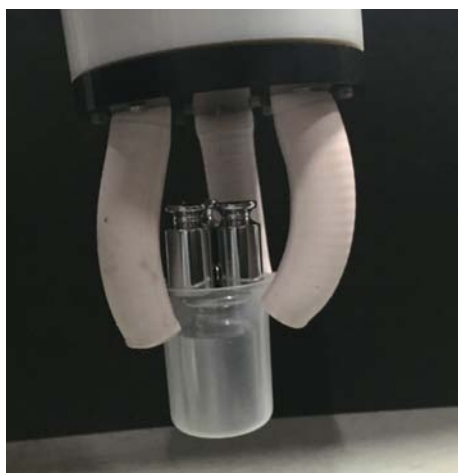


图 14 软体抓手抓取测试图(0.8 kg)

试验结果如图 15 所示,该抓手所能抓起重物的质量与其腔体内的气压近似线性相关,其所能抓起重物质量的上限即为驱动器所能承受气压上限时所抓取重物的质量,在 0.8 kg 左右。

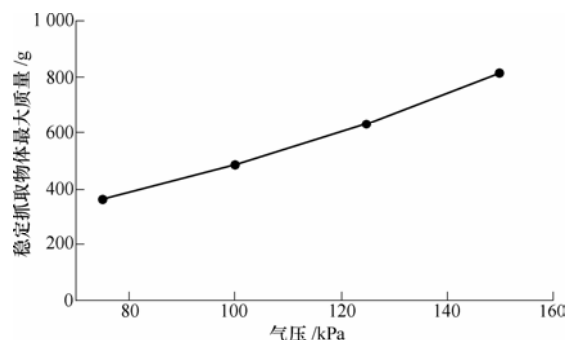


图 15 软体抓手在不同气压下抓取的最大重量

(2) 采用瓶口直径为 $\Phi 26$ mm 的矿泉水瓶中加水的方式测试该抓手在允许气压范围内的最大抓取质量,在 0.7 kg 左右。

4.3 不同形状物品抓取试验

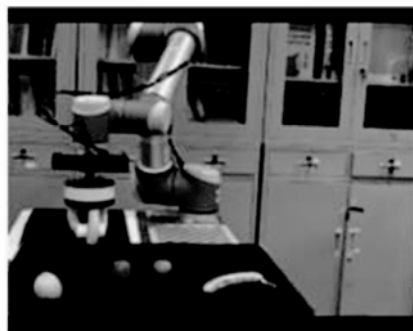
为测试所设计软体抓手对不同形状物体的自适应抓取能力,将该抓手安装于 UR 机械臂末端,基于视觉进行抓取试验。如图 16 所示,抓取的目标物体有:三通管件、香蕉、猕猴桃、橘子等形状大小各异的目标物体。抓放动作实现:通入 130 kPa 气压时抓取;断开气源时释放抓取物。在气压传感器的监测下控制电磁阀的通断来实现物体的抓取和释放。

试验结果:基于视觉并配合简单的气路通断控制下,所设计的软体抓手可以很好地实现对不同物体的无损抓放,而且抓取稳定。

除视频中水果等物品外,还对日常生活中常见物品进行了抓取试验(图 17)。试验结果表明:该软体抓手凭借自适应特性可以抓起各种各样形状不规则的小质量物品(表 3)。



(a) 初始状态



(b) 抓取三通管件

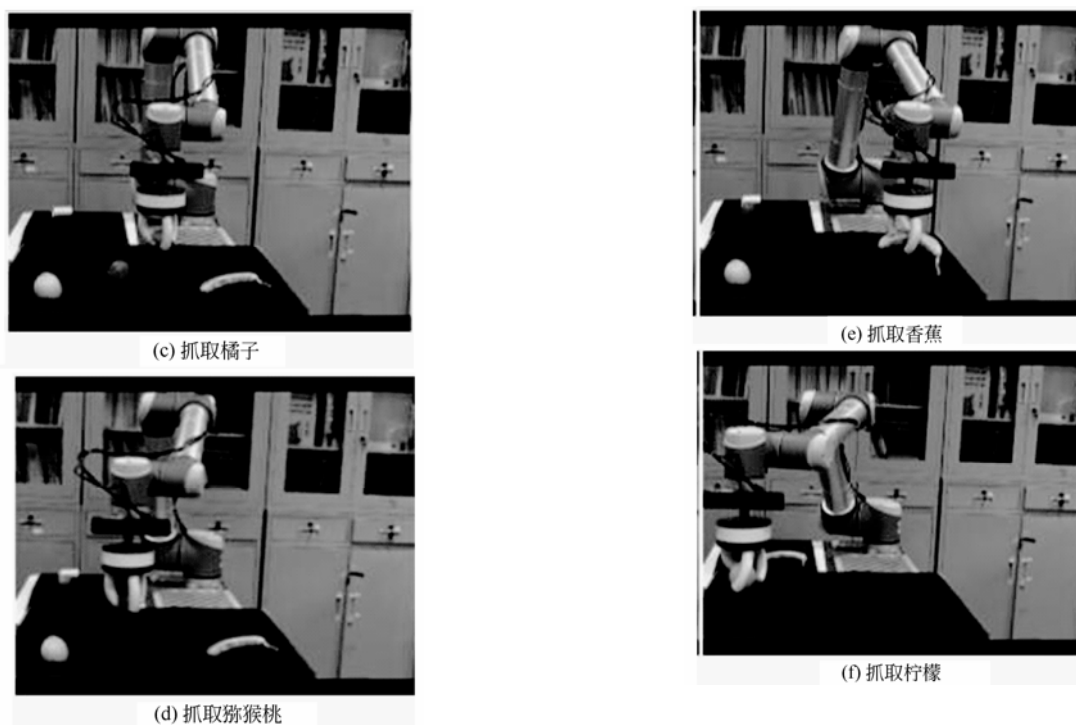


图 16 软体抓手基于机械臂视觉抓取物品测试图



图 17 软体抓手对日常生活中常见物品的抓取试验

表 3 抓持日常生活物品质量

物品名称	质量/g
小包装盒(树莓派)	12.3
订书机	254.6
鼠标	69.2
耳机	180.0
洗手液	308.2
螺丝刀	127.4
大包装盒(可比可咖啡)	93.8
手提礼品盒(校庆喜饼盒)	42.7

5 结论

本文采用新兴的软体机器人技术,通过参数的设计与优化制作出一款异于现有传统机械臂末端抓手的气动三爪软体抓手,并对其抓取性能进行测试,包括抓取直径、抓取重量和自适应能力。

(1) 该抓手配合简单的控制便可实现对不同形状

和大小物品自适应无损抓取, 且抓取稳定可靠。

(2) 该抓手能够抓取 0.7 kg 左右的重物说明该尺寸的这种抓手完全可用于小型果蔬采摘分类、超市零食等日常小型物品的存储摆放等自动化作业流程。

(3) 该抓手由硅胶制备、气动驱动, 因此不需要润滑油润滑等日常维护工作, 相对于传统机械末端执行器在干净卫生方面优势明显。

同时, 如果调整抓手尺寸及软体驱动器的壁厚性能参数、数量和相对位置后可衍生出一系列可以应用于各行各业的此类抓手。

为缩短制作周期, 此抓手设计相关的模具和夹具采用 3D 打印的方式制作, 3D 打印材料不耐高温的特性使硅胶凝固需要在常温下进行。如果对该抓手性能参数充分优化后, 采用金属制备的模具进行生产, 就可以通过调节温度来加快硅胶凝固等方式实现批量化快速生产, 完全可以实现产业化, 这将会创造巨大的价值。

参 考 文 献

- [1] GIANNACCINI M E, GEORGILAS I, HORSFIELD I, et al. A variable compliance, soft gripper[J]. *Autonomous Robots*, 2014, 36(1): 93-107.
- [2] 金波, 林龙贤. 果蔬采摘欠驱动机械手爪设计及其力控制[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(19): 1-8.
JIN Bo, LIN Longxian. Design and force control of an underactuated robotic hand for fruit and vegetable picking[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(19): 1-8.
- [3] KONDA N, TING K C. Robotics for plant production[J]. *Artificial Intelligence Review*, 1998, 12(1-3): 227-243.
- [4] SHIGEHICO H, KENTA S, SATOSHI Y, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 105(2): 160-171.
- [5] 姬伟. 采摘机器人末端执行器的柔顺抓取力控制[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 19-26.
JI Wei. Compliance grasp force control for end-effector of fruit-vegetable picking robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(9): 19-26.
- [6] 李季. 月壤表层采样抓取式末端执行器构型设计与结构参数优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LI Ji. Configuration design and parameter optimization for lunar surface grab sampling end-effector[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [7] HINES L, PETERSEN K, LUM G Z, et al. Soft actuators for small - scale robotics[J]. *Advanced Materials*, 2016, 10: 1603483.
- [8] POLYGERINOS P, WANG Z, OVERVELDE J T B, et al. Modeling of soft fiber-reinforced bending actuators[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2015, 31(3): 778-789.
- [9] FAN Wei, PENG Guangzheng, CHAI Senchun, et al. Study on the control of single pneumatic muscle actuator[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 16(4): 428-432.
- [10] WANG Huaming, ZHU Yinglong, ZHAO Dongbiao, et al. Performance investigation of cone dielectric elastomer actuator using Taguchi method[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(4): 175-182.
- [11] 王广振, 季林红, 温诗铸. 电磁驱动热膨胀型微型机械驱动器[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(2): 79-83.
WANG Guangzhen, JI Linhong, WEN Shizhu. Thermal expansion type microactuator actuated by induction heating[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(2): 79-83.
- [12] LE T S, SCHLEGEL H, DROSSEL W G, et al. Antagonistic shape memory alloy actuators in soft robotics[J]. *Solid State Phenomena*, 2016, 251: 126-132.
- [13] SUZUMORI K, IIKURA S, TANAKA H. Development of flexible microactuator and its applications to robotic mechanisms[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1991. IEEE, 1991: 1622-1627.
- [14] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 50(8): 1890-1895.
- [15] GALLOWAY K C, BECKER K P, PHILLIPS B, et al. Soft robotic grippers for biological sampling on deep reefs[J]. *Soft Robotics*, 2016, 3(1): 23-33.
- [16] POLYGERINOS P, WANG Z, GALLOWAY K C, et al. Soft robotic glove for combined assistance and at-home rehabilitation[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2014, 73: 135-143.
- [17] YAP H, KAMALDIN N, LIM J, et al. A magnetic resonance compatible soft wearable robotic glove for hand rehabilitation and brain imaging[J]. *IEEE Transactions on Neural Systems & Rehabilitation Engineering A Publication of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society*, 2016, 99: 1-12.
- [18] NORITSUGU T. Development of pneumatic rotary soft actuator made of silicon rubber[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2001, 1: 17-22.
- [19] 徐淼鑫. 气压驱动软体夹持装置研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

- XU Xinmiao. Research on a soft pneumatic robotic hand[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2015.
- [20] Toolkit Development Team, Harvard University and Trinity College Dublin[EB/OL]. [2017-01-08]. <http://softroboticstoolkit.com/book/pneunets-bending-actuator>.
- [21] CONNOLLY F, WALSH C J, BERTOLDI K. Automatic design of fiber-reinforced soft actuators for trajectory matching[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(1): 51.
- [22] HOLLAND D P, PARK E J, POLYGERINOS P, et al. The soft robotics toolkit: Shared resources for research and design[J]. 2014, 1(3): 224-230.
- [23] CONNOLLY F, POLYGERINOS P, WALSH C J, et al. Mechanical programming of soft actuators by varying fiber angle[J]. *Soft Robotics*, 2015, 2(1): 26-32.
-
- 作者简介: 魏树军, 男, 1992 年出生。主要研究方向为软体机器人技术。
E-mail: weishujun@sjtu.edu.cn
- 王天宇, 男, 1996 年出生。主要研究方向为软体机器人技术。
E-mail: ty-wang@sjtu.edu.cn
- 谷国迎(通信作者), 男, 1983 年出生, 副教授。主要研究方向为软体机器人学、机器人控制技术。
E-mail: guguoying@sjtu.edu.cn