

DOI: 10.3901/JME.2023.17.089

# 高抓取能力人工肌肉型柔性机械手设计与验证<sup>\*</sup>

度红望 许晓亚 邵仁波 熊伟 王海涛  
(大连海事大学船舶机电装备研究所 大连 116026)

**摘要:** 针对现有柔性机械手抓取范围有限, 负载能力小的问题, 基于弯曲型人工肌肉设计了一种安装角度可调的四指柔性机械手。基于能量法进行了弯曲型人工肌肉的静力学分析与验证, 单根执行器最大弯曲角度可达 151°, 最大输出力为 3.2 N, 执行器静力学模型平均误差分别为 5.25% 和 8.13%。进一步, 基于设计的四指柔性机械手, 针对不同形状和大小的物体完成了抓取实验。结果表明, 机械手最大抓取物体质量为 1 050 g, 最大尺寸为  $\phi 226$  mm, 在抓取实验中单根执行器最大弯曲角度为 93°。设计的机械手具有稳定的抓取性能, 能够实现日常物品稳定的抓取。

**关键词:** 四指柔性机械手; 气动弯曲型人工肌肉; 高抓取能力; 静力学特性; 抓取实验

**中图分类号:** TG156

## High Grasp Ability Artificial Muscle Flexible Robot Design and Verification

DU Hongwang XU Xiaoya SHAO Renbo XIONG Wei WANG Haitao  
(Marine Electromechanical Equipment Research Institute, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

**Abstract:** In response to the existing flexible robotic scope and small load capacity, this article designed a four-finger flexible robot with an adjustable angle of installation angle. Based on the energy method, the static analysis and verification of bending artificial muscles have been performed. The maximum curved angle of the single actuator can reach 151°, the maximum output force is 3.2 N, and the average error of the actuator's static model is 5.25% and 8.13%, respectively. Further, the design four-finger flexible robotic player completed the crawling experiment for objects of different shapes and sizes. The results show that the maximum grabbing object of the robot is 1 050 g, the maximum size is  $\phi 226$  mm, and the maximum bending angle of the single-rooted actuator in the crawling experiment is 93°. The robots designed in this article have stable grasping performance and can achieve stable grasping daily items.

**Key words:** four-finger flexible manipulator; pneumatic bending artificial muscle; high gripping ability; static characteristics; grabbing experiment

## 0 前言

软体机械手<sup>[1]</sup>是利用软材料<sup>[2]</sup>制成, 具有灵活性好、自适应性强、人机交互能力优秀等优点<sup>[3][4]</sup>, 是当下机器人学科的热点研究内容。柔性机械手不仅可以轻松的适应各种形状和大小的物体<sup>[5]</sup>, 而且不需要复杂的控制就能实现自适应接触<sup>[6]</sup>。软机械手的应用很广泛, 比如医疗康复<sup>[7-8]</sup>、工业分拣<sup>[9]</sup>、海洋勘探<sup>[10]</sup>等, 代替人类完成了很多无法实现的任

务<sup>[11]</sup>。软机械手的控制与其驱动方式<sup>[12]</sup>有关, 目前主要的驱动方式包括流体驱动、绳驱动、智能材料驱动和电磁驱动等。气动柔性机械手因其变形程度大、交互性好并且易于测量和控制等优点, 被广泛应用于软机器人的开发中。但是, 目前的柔性抓手抓取力及抓取空间有限, 如何提升柔性机械手的抓取能力是本文的研究重点。

气动柔性机械手的研究是普遍的。WANG 等<sup>[13]</sup>设计了一种适用于日常抓取的仿人手, 抓取最大质量为 541 g 的椅子; ILIEVSKI 等<sup>[14]</sup>利用嵌入式气动网格法制作了一款柔性抓手, 但只能抓取像鸡蛋大小的物体; ALICI 等<sup>[15]</sup>设计了一款三指柔性机械手,

<sup>\*</sup> 海底工程技术与装备国际联合研究中心开放基金(3132023357)和国家自然科学基金(52075065)资助项目。20221104 收到初稿, 20230323 收到修改稿

通过抓取葡萄柚来验证机械手的可行性; SINATRA 等<sup>[16]</sup>研制了一款用于水下微生物取样的柔性机械手; QI 等<sup>[17-18]</sup>利用形状记忆合金材料和 4D 打印技术, 制作了一款机械手, 但只能抓取螺母等极小的物件。可以看出, 气动驱动柔性机械手的研究非常广泛, 甚至有些已经产品化。但是, 现有的产品抓取范围及抓取力都偏小。为了解决这一问题, 许多学者都做了深入的研究。为提高抓握力, XIE 等<sup>[19]</sup>设计了一款吸盘式的章鱼机械手, 虽然实现了稳定抓取, 但最多抓取 500 g 的物体; WEI 等<sup>[20]</sup>设计的三指柔性抓手, 虽然增大了抓取范围, 但被抓物体最重为 748 g; ABONDANCE 等<sup>[21]</sup>设计了一款用于日常物品抓取的四指柔性机械手, 最高能抓取 0.47 kg 的物体, 被抓物体最大尺寸为直径约 110 mm 的花椰菜; XIAO 等<sup>[22]</sup>通过提高与物体的接触表面来提高机械手的抓取能力, 被抓物体最大尺寸为直径 120 mm 的球体。

总的来看, 学者们在如何提升气动柔性机械手的抓取能力方面已经取得了一定的成果。但是, 目前已有的机械手最大抓取能力还是有限的, 不能满足对常用日常生活用品的抓取需求。针对这一问题, 本文基于弯曲型人工肌肉设计了一种安装角度可调的四指柔性机械手, 以满足高抓取能力的需求。本文的主要贡献如下。

(1) 提出一种高抓取力的五指柔性机械手, 最大抓取力 1 kg 以上, 最大抓取直径 200 mm 以上。

(2) 应用能量法描述柔性机械手单根弯曲执行器的静力学模型, 验证其线性工作区间。

(3) 针对不同尺寸和重量的生活用品, 完成了抓取实验以验证柔性机械手的柔顺性和自适应性。

本文剩余部分的结构安排如下: 第 1 节进行了五指柔性机械手的设计; 第 2 节对弯曲型执行器进行了静力学建模; 第 3 节对模型进行仿真与实验验证; 第 4 节进行了五指柔性机械手的抓取实验验证; 最后对本文进行了总结。

## 1 五指柔性机械手设计

本文设计了一款五指柔性机械手, 结构形式与参数如表 1 所示。机械手采用等距布局的方式, 将四根执行器组装起来, 使其在抓取过程中拥有更好的稳定性。采用直接驱动抓取物品, 设计了三种安装角度, 以适应不同被抓取物的尺寸体积。机械手

的整体模型图如图 1 所示。

表 1 五指柔性机械手结构形式及参数

结构形式	
驱动方式	直接驱动
布局形式	等距布局
手掌接口	固定连接
手指数量	五指
手指长度/cm	20
安装角度/(°)	30、45、60

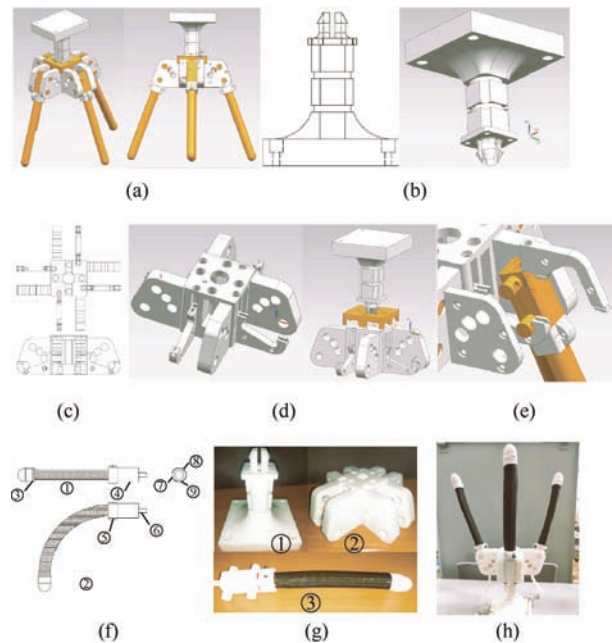


图 1 机械手总体结构示意图

图 1a 为五指柔性机械手的整体模型, 该柔性机械手主要分为三部分, 分别为上连接部件执行器承载底座与气动弯曲型执行器, 其中上连接部件如图 1b 所示, 其主要作用为将该柔性机械手固定至承载其的运动平台上, 上部分连接方式采用螺栓连接, 下部分则设计了榫卯结构与执行器承载底座进行连接并使用螺栓加固, 装配过程如图 1c 所示。如图 1d 所示为执行器的承载底座, 其通过榫卯结构与上部连接件配合, 并在中间部位预留出足够的空间用以气动软管的布局, 在执行器的安装方面采用榫卯结构安装, 安装过程如图 1e 所示。除此之外, 设计了三种执行器的安装角度, 用以适应抓取空间及被抓取物体体积的不同, 并在预留孔处使用螺栓螺母对该柔性机械手的整体结构进行加固。图 1f 为弯曲型执行器, 它是在伸长型 McKibben 人工肌肉的基础上进行了改进设计, 通过在执行器的一侧安装弹性支架, 限制执行器一侧的长度变化, 通过充气后执

行器两侧的位移差实现弯曲。它的结构主要包括始端连接件、始端加固件、硅胶端盖、弹性气囊、弹性支架以及编织网管。在部件制造方面,采用了3D打印技术进行了制作,材料方面选择了一款工业级光敏树脂,实物图和机械手组装图1g和1h所示。

## 2 弯曲型执行器静力学建模

柔性机械手的单根弯曲型执行器如图2所示。

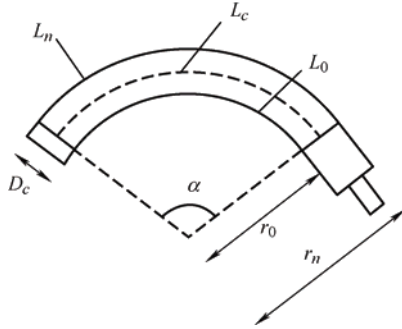


图2 伸长式弯曲型执行器

各个几何结构参数之间有如下关系

$$L_c = \frac{L_0 + L_n}{2} \quad (1)$$

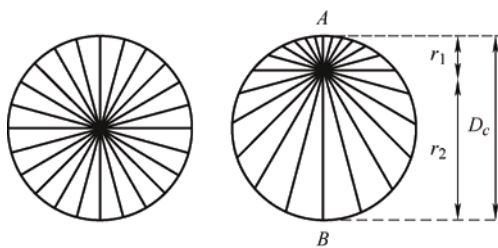
$$L_0 = r_0 \cdot \alpha \quad (2)$$

$$D_c = r_n - r_0 \quad (3)$$

$$L_n = r_n \cdot \alpha \quad (4)$$

式中,  $L_0$  为执行器限制侧长度;  $L_n$  为执行器自由侧长度;  $L_c$  为执行器中心轴线长度;  $D_c$  为执行器直径;  $\alpha$  为执行器弯曲角度;  $r_0$  为执行器限制侧半径;  $r_n$  为执行器自由侧半径。

如图3所示,传统伸长式驱动器在充气过程中,由于其各处的轴向应变相等,因此其表面上各处的编织角相等;而弯曲型执行器在工作时,其同一截面内的编织角从A侧(执行器自由弯曲侧)沿横截面直径方向增加,直到B侧(执行器限制侧)编织角达到最大值,相应的每个编织角都对应着一个执行器直径。



(a) 传统伸长式驱动器

(b) 伸长式弯曲型执行器

图3 两种气动执行器同一截面内的编织角变化

如图3b所示,假设执行器截面是一个严格的圆,那么执行器直径应为其两侧编织角所对应的执行器半径之和。其具体关系式如下

$$r_1 = \frac{b \sin \theta}{2n\pi} \quad (5)$$

$$r_2 = \frac{b \sin \theta_{\max}}{2n\pi} \quad (6)$$

$$D_c = \frac{b \sin \theta + b \sin \theta_{\max}}{2n\pi} \quad (7)$$

式中,  $r_1$  为执行器自由弯曲侧编织角对应半径;  $r_2$  为执行器限制侧编织角对应半径。

综上,可得弯曲型执行器自由弯曲侧的长度  $L_n$  及执行器自由侧编织角  $\theta$  的表达式

$$L_n = (D_c + r_0) \cdot \alpha = b \cdot \cos \theta \quad (8)$$

$$D_c = \frac{b \sin \theta + b \sin \theta_{\max}}{2n\pi} \quad (9)$$

充入压缩空气时,气压作用于执行器的内表面,从而导致执行器的体积变化,可由下述公式表述

$$dW_{in} = \int_{S_i} (P' - P_0) dl_i ds_i = PdV_c \quad (10)$$

式中,  $P$  为输入压力;  $P_0$  为大气压力;  $S_i$  为执行器的横截面积;  $l_i$  为执行器的长度;  $V_c$  为执行器的体积。

根据能量守恒定律可知,在理想状态下,执行器的输入功等于输出功,而弯曲型执行器的输出功与其输出力  $F$  和执行器长度  $L_c$  的增量有关(图4),可由下述公式表示

$$dW_{in} = dW_{out} = FdL_c \quad (11)$$

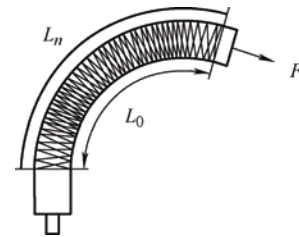


图4 执行器弯曲时产生的输出力及方向

$$F = P \cdot \frac{dV_c}{dL_c} \quad (12)$$

要建立较完整的气动弯曲型执行器的静态数学模型,要考虑弯曲型执行器弹性气囊与编织结构之间的摩擦力,表达式如式(13)和(14)所示

$$F_r = \mu N_f \quad (13)$$

$$N_f = \pi L_c \left( \frac{L_c}{L_0} \right) \left( (P_a D_0 - 2Et_k) \frac{\sin \theta}{\sin \theta_{\max}} + 2Et_k \right) \quad (14)$$

式中,  $F_r$  为弯曲型执行器内部摩擦力;  $N_f$  为弹性气囊与编织结构间的正压力;  $\mu$  为弹性气囊与编织结构之间的摩擦系数;  $E$  为弹性气囊的弹性模量;  $t_k$  为弹性气囊的壁厚。

综合上述分析, 考虑执行器内部摩擦力的影响, 得到较完整的弯曲型执行器的静力学模型

$$F = P \cdot \frac{dV_c}{dL_c} - F_r \quad (15)$$

### 3 执行器的静力学特性研究

本节搭建静力学实验台对弯曲型执行器进行静力学特性分析。通过分析执行器的工作压力与弯曲角度、输出力之间的关系, 并与仿真结果进行对比, 验证数学模型的准确性。此同时, 通过执行器输入输出的线性度评估其性能, 找到执行器的最佳工作工作区间, 从而确定其结构和工作参数。实验用到的执行器系列参数如表 2 所示。

表 2 气动弯曲型执行器的结构参数

编号	初始编织角 / (°)	长度/mm	弹性气囊半径 /mm	弹性气囊厚度 /mm	弹性气囊弹性模量 /MPa	内部摩擦系数
1	56	200	9	2.5	1.2	0.002
2	60	200	9	2.5	1.2	0.002
3	64	200	9	2.5	1.2	0.002
4	68	200	9	2.5	1.2	0.002

图 5 为不同编织角下执行器弯曲角度随充气压力的变化规律。由图可知, 执行器开始充气的一段时间内, 弯曲角度为 0, 这是因为编织结构与弹性气囊之间存在间隙。弹性气囊开始膨胀直到接触到编织结构时的腔室内压力为该执行器的启动压力; 随着充气压力的不断增大, 执行器的弯曲角度也随之增大, 直至达到编织结构的轴向应变上限, 此时执行器的弯曲角度为其弯曲应变的上限, 此时的充气压力为该执行器的最大工作压力, 如若充气压力大于执行器的最大工作压力, 其姿态不仅不会产生变化, 反而会对整体结构产生破坏, 因此在图中,

对超过执行器最大工作压力的曲线部分, 采用水平直线表示, 执行器的启动压力到最大工作压力的范围为其工作压力区间。

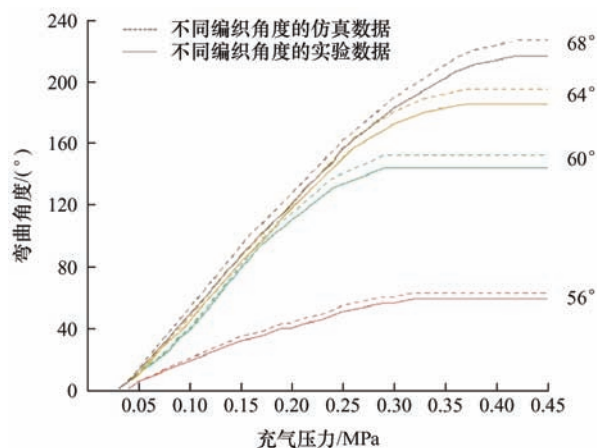
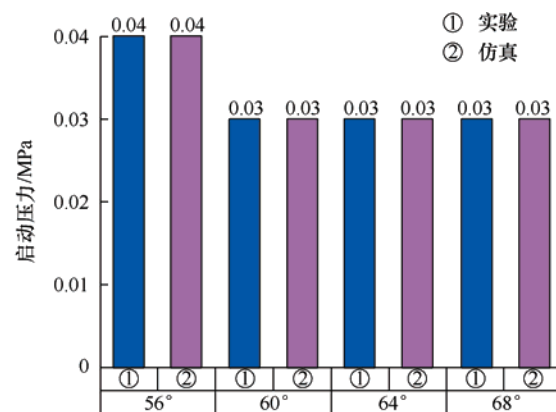
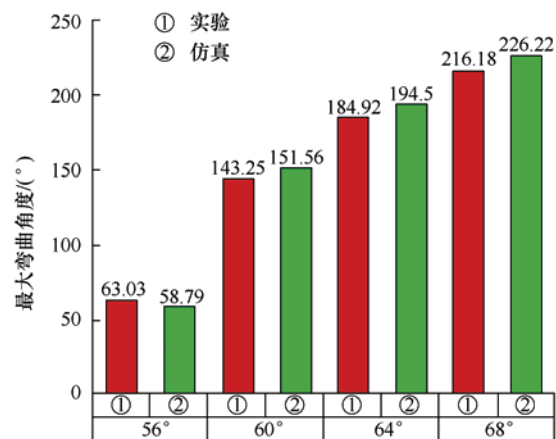


图 5 不同编织角下执行器弯曲角度随充气压力的变化

为了进一步说明机械手的力学特性, 采用柱状图对实验及仿真数据进行了对比分析, 如图 6 所示。可以看出以下几点。



(a) 不同编织角下执行器的启动压力



(b) 不同编织角下执行器的最大弯曲角度



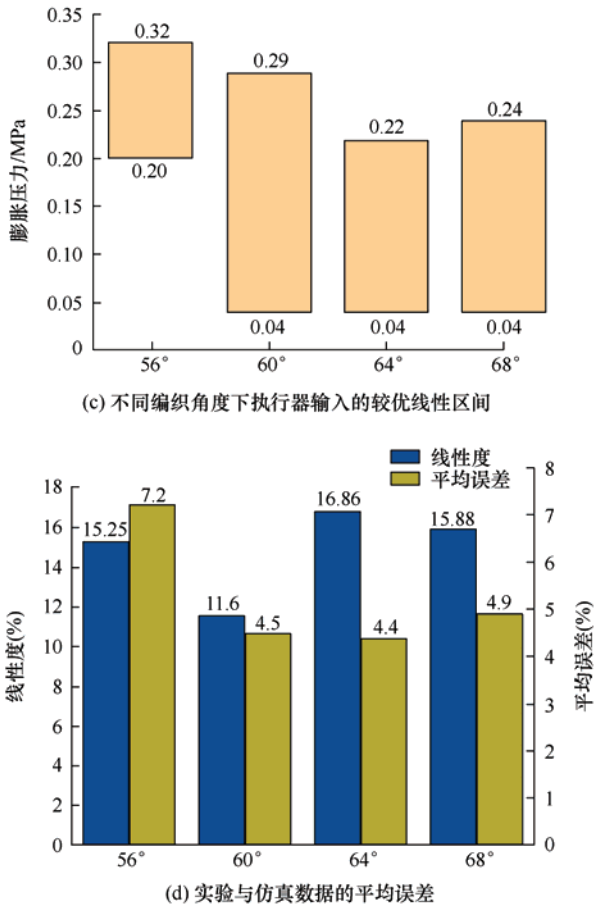


图 6 静力学实验与仿真数据分析

(1) 当执行器编织角为  $56^\circ$  时，启动压力为  $0.04 \text{ MPa}$ 。当编织角增大到  $60^\circ$ 、 $64^\circ$  及  $68^\circ$  时，其启动压力为  $0.03 \text{ MPa}$ ，整体维持在一个较为稳定状态，由此可知，执行器编织角的大小对其启动压力无明显影响。

(2) 当执行器的编织角增大时，其弯曲角度上限也随之增大，相应的其工作压力区间也随之增大。

(3) 当以  $15\%$  为线性度指标时，当执行器编织角为  $60^\circ$  时，其线性度较好，此时其较优线性度对应区间充气压力范围较大为  $0.04 \sim 0.29 \text{ MPa}$ ，较好的线性度一方面可以保证执行器在抓取过程中的稳定，另一方面有利于该执行器的闭环控制。

(4) 仿真与实验两者之间的最大平均误差为  $7.2\%$ ，整体平均误差为  $5.25\%$ ，小于  $10\%$ ，由此证明了上节中推导的弯曲型执行器的静力学模型的正确性。

图 7 为不同编织角下执行器输出力随充气压力的变化规律。由图可知，从 0 开始向执行器腔室内充气时，经过一段时间执行器开始产生输出力；随着充气压力的不断增大，执行器的输出力也随之增

大，直至其输出力无明显变化，此时输出力为该结构执行器输出力上限，此时的充气压力为该执行器的最大工作压力，如若充气压力大于执行器的最大工作压力，其输出力不仅不会产生明显增大，反而会对整体结构产生破坏，因此在图中，对超过执行器最大工作压力的曲线部分，采用水平直线表示，执行器的启动压力到最大工作压力的范围为其工作压力区间。

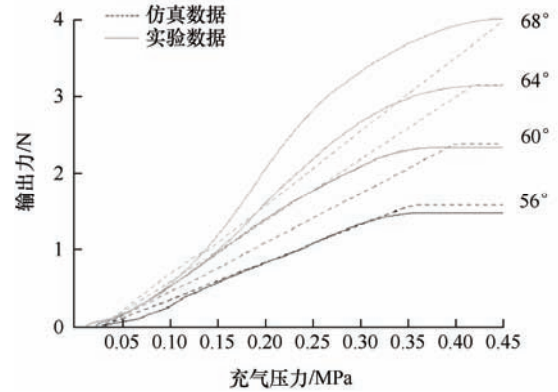
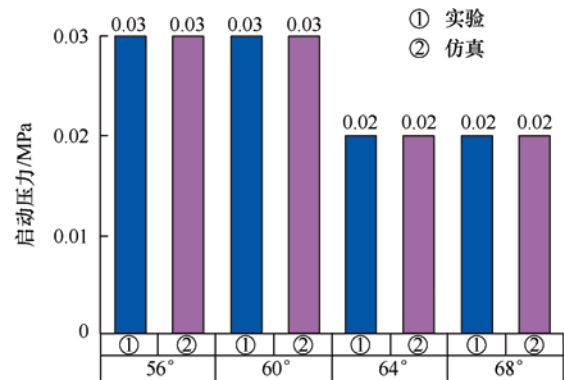


图 7 不同编织角下执行器输出力随充气压力的变化

为了进一步说明机械手的力学特性，对实验及仿真数据进行了对比分析，如图 8 所示。可以看出以下几点。

(1) 当执行器编织角为  $56^\circ$  与  $60^\circ$  时，其启动压力为  $0.03 \text{ MPa}$ ，当编织角为  $64^\circ$  与  $68^\circ$  时，其启动压力为  $0.02 \text{ MPa}$ ，整体维持在一个较为稳定状态，由此可知，执行器编织角的大小对其静态下的启动压力无明显影响。

(2) 当执行器的编织角增大时，其弯曲角度上限也随之增大，相应的其工作压力区间也随之增大。同一结构参数的执行器其输出力极值对应的充气压力大于其弯曲角度极值对应充气压力。



(a) 不同编织角下执行器的启动压力

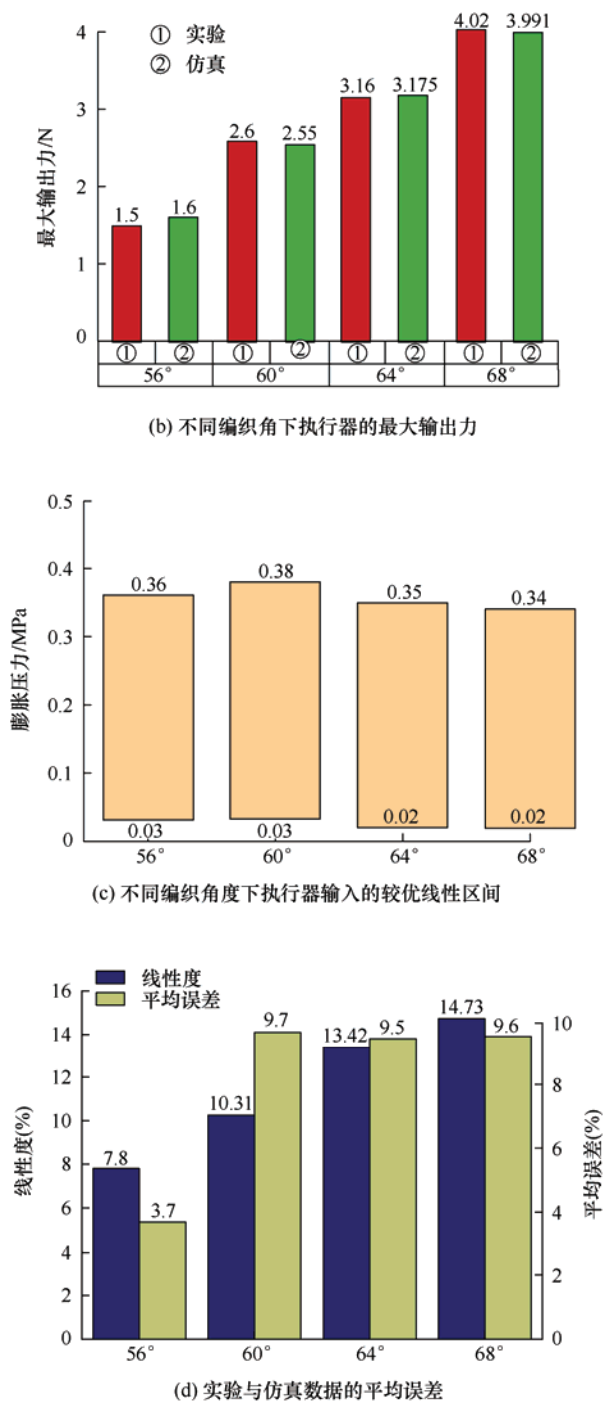


图 8 静力学实验与仿真数据分析

(3) 当以 15% 为线性度指标时, 当执行器编织角为 60° 时, 其线性度较好, 此时其较优线性度对应区间充气压力范围较大为 0.03~0.38 MPa。

(4) 仿真与实验两者之间的最大平均误差为 9.7%, 整体平均误差为 8.13%, 小于 10%, 由此证明了上节中推导的弯曲型执行器的静力学模型的合理性

## 4 四指柔性机械手抓取实验验证

本节对四指柔性仿生手进行了抓取实验验证, 设计并搭建了抓取实验台, 通过抓取不同形状与重量的物品验证了机械手作业性能。如图 9 所示为柔性机械手的安装示意图。该实验台整体为框架式结构, 通过三自由度运动平台搭载机械手从而实现其在空间中的移动。三自由度平台由电机驱动, 并且通过改变脉冲与高低电平的方式控制其各个轴的移动速度与方向, 其中柔性机械手安装在三自由度平台的  $z$  轴滑块上。

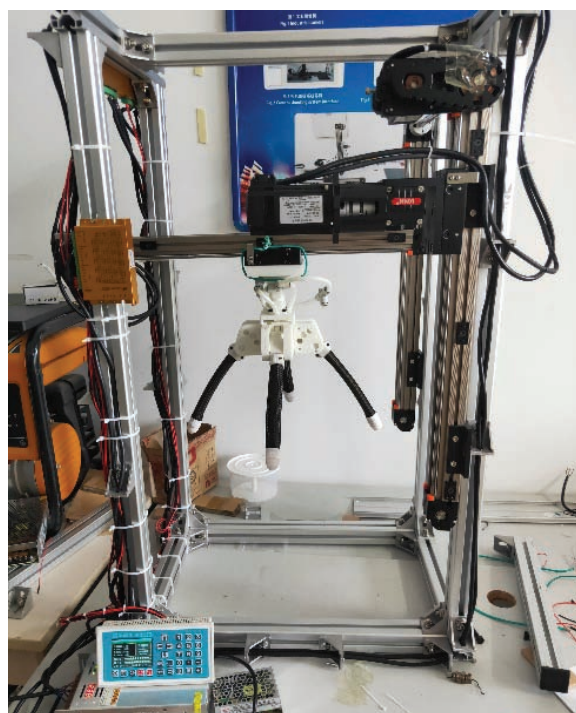


图 9 柔性机械手安装示意图

本文的设计目标为设计一款可用于抓取日常物品的气动四指柔性机械手, 因此选择了若干不同尺寸与重量的物品进行抓取实验, 如表 3 所示为所抓取的物品列表, 图 10~15 为机械手的抓取状态。

表 3 抓取物体参数

物品名称	质量/g	尺寸/mm
长方体	800	90×60×130(长×宽×高)
箱体	200	130×100×130(长×宽×高)
足球	450	Φ226
排球	280	Φ195
不锈钢饭盒	1 050	不规则
玻璃碗	720	不规则



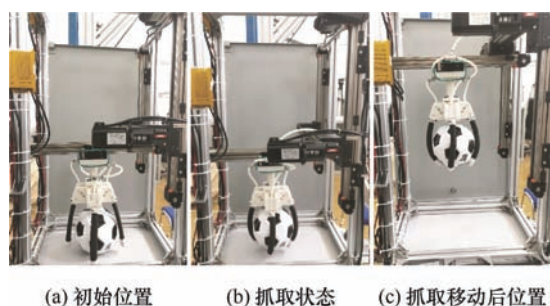


图 10 四指抓取足球(规则物体)

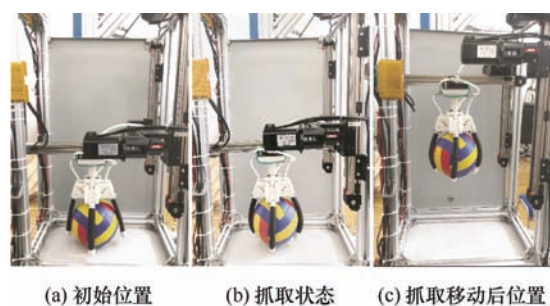


图 11 四指抓取排球(规则物体)

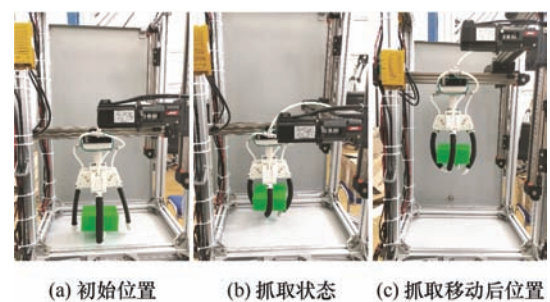


图 12 四指抓取长方体(规则物体)

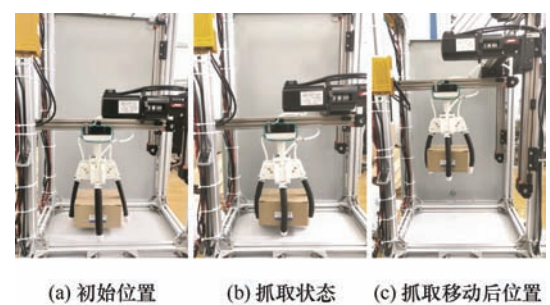


图 13 四指抓取箱体(规则物体)

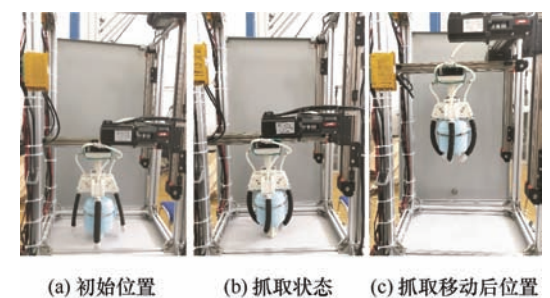


图 14 四指抓取不锈钢饭盒(不规则物体)

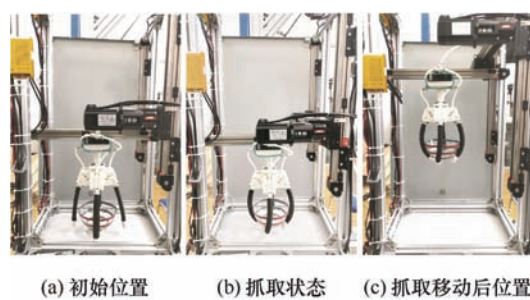


图 15 四指抓取玻璃碗(不规则物体)

本文设计的是执行器等距布局的四指柔性机械手, 根据物体自身外形和质量, 常用抓取模式分为四指包络抓取。在抓取不同尺寸与形状的物品时, 执行器与被抓取物体之间的接触形式也不同, 当握取规则物品例如球体时多为面接触, 通过四指弯曲形成的包络面抓取; 在抓取不规则物体时, 不同接触位置外形则会出现不同的接触方式, 此时机械手主要凭借与被抓取物品之间接触点的数量实现稳定抓取。本文研制的机械手在进行球状物体的抓取时, 能够很好的与物体表面贴合并形成包络面实现稳定抓取, 在进行方形物体的抓取时, 也能够与物体之间实现稳定的四点接触, 在进行不规则物品的抓取时, 该柔性机械手也能尽量使包络被抓取物从而实现稳定的抓取过程, 由此可见, 该机械手在进行工作时拥有较好的柔顺性和自适应性, 能够完成日常物品的抓取任务。

## 5 结论

本文设计了一款安装角度可调的四指柔性机械手, 基于能量法对弯曲型执行器进行了静力学建模, 并利用仿真和实验验证了模型的准确性。进一步, 完成了四指柔性机械手的抓取实验验证。

(1) 以 15% 为线性度指标, 编织角为  $60^\circ$  时, 执行器线性度较好。较好的线性度一方面能保证执行器在抓取过程中的稳定, 另一方面有利于执行器的闭环控制。仿真与实验平均误差分别为 5.25% 和 8.13%, 验证了数学模型的准确性。

(2) 柔性机械手具有较好的柔顺性和自适应性, 能够完成日常物品的抓取。实验中被抓物体的最大质量为 1 050 g, 最大尺寸为  $\Phi 226$  mm, 单根执行器的弯曲角度误差为 6.5%, 在合理范围内。

(3) 机械手在抓取过程中能够实现稳定抓取, 本文四指柔性机械手在抓取物体时依靠其接触点的位置及数量实现接触稳定度, 如不规则物体通过接触点的数量实现稳定抓取, 球体通过四指弯曲形成包络面实现稳定抓取等, 依靠此方法实现机械手的

稳定抓取, 具有较好的柔顺性和自适应性。

未来的工作重点在柔性手指端和包络抓取模型与度量指标等抓取性能的定量分析内容。

### 参 考 文 献

- [1] 陶永, 刘海涛, 王田苗, 等. 我国服务机器人技术研究进展与产业化发展趋势[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 56-74.  
TAO Yong, LIU Haitao, WANG Tianmiao, et al. Research progress and industrialization development trend of service robot technology in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(18): 56-74.
- [2] 张进华, 王韬, 洪军, 等. 软体机械手研究综述[J]. 机械工程学报, 2017, 53(13): 19-28.  
ZHANG Jinhua, WANG Tao, HONG Jun, et al. Summary of software robot hand research[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(18): 56-74.
- [3] GLICK P, SURESH S A, RUFFATTO D, et al. A soft robotic gripper with gecko-inspired adhesive[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(2): 903-910.
- [4] ZHANG M, LI G, YANG X, et al. Artificial muscle driven soft hydraulic robot: Electromechanical actuation and simplified modeling[J]. Smart Materials and Structures, 2018, 27: 1-9.
- [5] WU Z, LI X, GUO Z. A novel pneumatic soft gripper with a jointed endoskeleton structure[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(5): 95-106.
- [6] LASCHI C, MAZZOLAI B, CIANCHETTI M. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities[J]. Science Robotics, 2016, 1(1): eaah3690.
- [7] TANG L, ZHANG Y, LI C, et al. Biological stability of water-based cutting fluids: Progress and application[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022, 35, 3: 7-30.
- [8] O'NEILL C T, PHIPPS N S, CAPPELLO L, et al. A soft wearable robot for the shoulder: Design, characterization, and preliminary testing[C]// IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot, 2017: 1672-1678.
- [9] MAJIDI C. Soft robotics: A perspective—current trends and prospects for the future[J]. Soft Robotics, 2014, 1(1): 5-11.
- [10] MARCHESE A D, KATZSCHMANN R K, RUS D. A recipe for soft fluidic elastomer robots[J]. Soft Robotics, 2015, 2(1): 7-25.
- [11] KANG R, BRANSON D T, ZHENG T, et al. Design, modeling and control of a pneumatically actuated manipulator inspired by biological continuum structures[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2013, 8(3): 036008.
- [12] RUS D, TOLLEY M. Design, fabrication and control of soft robots[J]. Nature, 2015, 521: 467-475.
- [13] WANG H, ABU-DAKKA F J. A novel soft robotic hand design with human-inspired soft palm: Achieving a great diversity of grasps[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2021, 28(2): 37-49.
- [14] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2010(1): 1890-1895.
- [15] ALICI G, CANTY T, MUTLU R, et al. Modeling and experimental evaluation of bending behavior of soft pneumatic actuators made of discrete actuation chambers[J]. Soft Robot, 2018, 5(1): 24-35.
- [16] SINATRA N R, TEEPLE C B, VOGOT D M, et al. Ultrgentle manipulation of delicate structures using a soft robotic gripper[J]. Science Robotics, 2019, 4(33): eaax5425.
- [17] QI G, SAKHAEI A H, LEE H, et al. Multimaterial 4D printing with tailorable shape memory polymers[R]. Sci. Rep, 2016.
- [18] ZHOU J, SHU C, ZHENG W. A soft-robotic gripper with enhanced object adaptation and grasping reliability[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2017(99): 1.
- [19] XIE Z, DOMEL A G, AN N, et al. Octopus arm-inspired tapered soft actuators with suckers for improved grasping[J]. Soft Robotics, 2020, 7(5): 1.
- [20] WEI Y, CHEN Y, REN T, et al. A novel, variable stiffness robotic gripper based on integrated soft actuating and particle jamming[J]. Soft Robotics, 2016(1): soro.2016.0027.
- [21] ABONDANCE S, TEEPLE C B, WOOD R J. A dexterous soft robotic hand for delicate in-hand manipulation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020(99): 1.
- [22] XIAO W, LIU C, HU D, et al. Soft robotic surface enhances the grasping adaptability and reliability of pneumatic grippers[J]. Science Robotics, 2019(1): 60-67.

作者简介: 度红望, 博士, 副教授, 博士研究生导师。主要研究方向为流体传动与控制、数字化设计与装配和海上救助技术与装备。

E-mail: duhw\_1984@dlmu.edu.cn