doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.09.008

无系留气动自适应球果采摘软体手爪设计与实验

赵云伟　黄浩然　刘晓敏　张维懿　耿德旭
(北华大学机械工程学院, 吉林 132021)

摘要: 为实现球形果实自适应采摘,仿人手触觉传感设计并制作了一种用于球果采摘的无系留智能软体手爪,该手爪采用自循环供气与传感集成,将柔性薄膜触力传感器内嵌于软体手爪内并复合自循环气泵,可实现多尺寸、多类型球果自适应抓取。研究了自循环气泵工作原理,进行了结构优化、压力建模与性能测试。试制了自适应软体手爪原理样机,建立了手爪抓持力模型,并进行了静力学实验,获得了其气压下的弯曲变形和力学特性。建立了球果采摘手爪控制系统与自适应抓取机制,搭建模拟采摘实验平台,进行了自适应抓取实验验证及实验环境下的球果采摘与分拣。结果表明,通过接触力反馈与控制系统,该采摘手爪可安全有效地抓取球果,抓取尺寸范围为 48.5 ~ 97 mm,最大抓取球果质量为 350 g,平均采摘用时 15 s,成功率为 97.46%。

关键词: 球形果实; 无系留; 自适应采摘; 软体手爪; 气动
中图分类号: TH138.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2023)09-0074-11　　**OSID**:

Design and Grasping Experiments on Untethered Adaptive Pneumatic Soft Gripper for Globose Fruit Picking

ZHAO Yunwei　HUANG Haoran　LIU Xiaomin　ZHANG Weiyi　GENG Dexu
(*School of Mechanical Engineering*, *Beihua University*, *Jilin* 132021, *China*)

Abstract: Inspired by the tactile sensation of human hand nerves, an untethered intelligent soft gripper was proposed to adaptively and effectively pick fruits. This soft gripper applied a self-circulation air pump to supply air pressure and integrated a sensor system in which flexible membrane tactile sensors were embedded in the soft gripper fingers, resulting in adaptive grasping of multi-size and multi-type globose fruits. The working principle of the self-circulation air pump was investigated and the structure of the air pump was optimized. In addition, the model was built to predict the output air pressure of the self-circulation air pump and then conduct experiments to demonstrate the performance of the air pump. The adaptive soft gripper was then prototyped and a model was built to analyze the soft gripper grasping force. Static experiments were performed to obtain the flexural deformations and mechanical properties of the soft adaptive gripper under actuation. A control system and grasping rules were developed to perform adaptive grasping, an experimental platform in the laboratory was built to simulate conditions in an orchard, and a series of experiments were conducted to demonstrate the efficacy of adaptive grasping and the capability of picking and sorting globose fruits. The results showed that the soft intelligent gripper was capable of picking globose fruits efficiently with the help of tactile feedback and control systems, and the size range of fruit for picking was 48.5 ~ 97 mm, the maximum mass can reach 350 g, the average time for picking was 15 s and the success rate of picking was 97.46%.

Key words: globose fruit; untethered; adaptive picking; soft gripper; pneumatic

收稿日期: 2023-04-17　修回日期: 2023-06-16
基金项目: 吉林省科技发展项目(YDZJ202201ZYTS624)、国家自然科学基金项目(51275004)、吉林省教育厅科学技术研究项目(JJKH20220049KJ)和吉林市科技发展计划项目(20230302027、20156413)
作者简介: 赵云伟(1978—),男,副教授,博士,主要从事智能精密制造、柔性驱动器和软体机器人研究,E-mail: jluzyw@163.com
通信作者: 刘晓敏(1980—),女,副教授,博士,主要从事软体驱动器和软体机器人研究,E-mail: jlulxm@163.com

0　引言

为实现果实自动化采摘作业，节约人工成本，提高采摘效率，需要研制高效灵活、便携安全、可靠性高和自适应强的采摘手爪[1-4]。近年来，采摘手爪的发展历经“系留到无系留，刚性到柔性，适应到自适应”过程。系留结构采摘手爪，其结构和控制系统较为复杂且缆线冗余便携性差[5-6]，难以适应复杂环境下的自动化采摘。而无系留结构紧凑[7]、去除缆线便携灵活，适合全方位自动化采摘作业。其集材料、驱动、传感与控制于一体，实现方式有机电集成、场效转化和生化反应等[8]。常见的驱动方式有电机直接驱动或利用电机拉线驱动[9]；嵌入微泵[10-12]与储能罐或燃烧膨胀与化学反应产气等，如H_2O_2分解产生高压气体驱动[13]；场效应作用下电致或磁致变形驱动[14]，如采用电介质弹性体[15]及利用热敏和光敏等功能材料变形驱动等[16]。

作为执行器的采摘手爪也逐渐由刚性向柔性发展，采用类似生物特性的柔性驱动器代替刚性杆件作为爪指[17-22]，提升执行器对多类型球果的物性适应性，并在接触球果过程中避免表面损伤保证球果品质。同时为实现自适应采摘，国内外相继提出了类皮肤传感软体手爪[23-24]。将可识别触觉压力、温度和位置等传感器内嵌于软体驱动器内，在抓持过程中实现自身变形监测、接触力控制和温度感知[25-27]。本文无系留驱动采用直供自循环方式，无需借助外界气源，较传统的泵与阀组集成方式气路简单易于小型化。所设计自适应软体手爪与气泵直连，利用自身密闭气腔往复循环供气，即可实现增压减压完成手爪收拢释放。通过爪指内嵌柔性薄膜压力传感器反馈压力信号调控电机驱动活塞改变供气压力，快速实现力反馈与力控制，适合安装在自动化移动平台上作为采摘执行器。

本文针对球形果实，采用自循环供气与传感集成设计一种无系留气动自适应球果采摘软体手爪，研究自循环气泵性能与自适应采摘手爪结构设计及制作工艺，建立气泵压力模型与手爪抓持力模型，建立自适应控制系统和抓取机制，并在实验环境下模拟球果采摘与分拣，验证其性能。

1　无系留自适应手爪结构设计

1.1　整体设计

无系留自适应采摘软体手爪采用模块化集成式设计，可分为控制模块、动力模块和执行模块。其中控制模块包含控制器与电池组，动力模块为自循环气泵，夹持模块为多类型自适应手爪。各模块间串联集成，可灵活组配。整体结构如图 1 所示，自循环气泵与自适应手爪复合一体，手爪位于自循环气泵前端，便携式控制器位于气泵后方，气泵作为手臂支撑手爪同时为球果采摘提供动力。控制器可匹配 42 系列各型号步进电机，气泵与软体手爪可拆卸更换。采摘手爪为 950 g，设计采摘质量小于 500 g、直径为 45 ~ 100 mm 球果[28]；为实现球果无损抓取，设计手爪的夹持力 F 的范围为 $F_{min} \leqslant F \leqslant F_{max}$，式中 F_{min} 为抓取目标苹果所需最小夹持力（因目标球果尺寸和质量各异，由抓取实验确定），F_{max} 为苹果破坏压力（$F_{max}=20$ N[29]）。

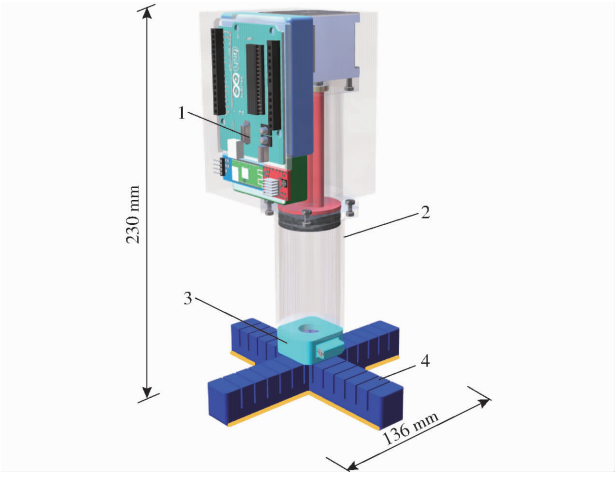

图 1　无系留自适应球果采摘手爪整体结构图

Fig. 1　Diagram of structure of untethered adaptive soft gripper for globose fruit picking

1. 控制器　2. 自循环气泵　3. 连接座　4. 自适应软体手爪

为提高结构空间利用率，采用可拆卸外壳将控制系统与自循环气泵连接为一体，便于拆卸安装。采摘手爪各部件连接如图 2 所示，控制器与电机通过快接插头快速接线便于更换。气泵与手爪通过基座连接，由密封环密封形成统一密闭空间，压力传感器接线经由软体手爪与气泵连至电机底座。

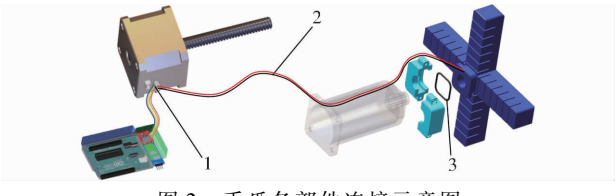

图 2　手爪各部件连接示意图

Fig. 2　Connection of components of gripper

1. 快接插头　2. 传感器导线　3. 密封圈

1.2　自循环气泵设计

自循环气泵采用柱塞式设计，气泵结构见图 3。在工作中，气泵内腔与手爪内腔相连构成封闭空间，通过活塞运动将气泵内腔内气体压入手爪内，实现软体手爪无系留自循环供气（增压/减压），完成手爪采摘所需动作。电机驱动丝杠通过法兰螺母

(图 4a)带动导向杆推动活塞在泵腔内滑动。由图 3 可知,泵体内丝杠隐藏于导向杆内部圆柱空腔中,导向杆两侧具有 U 形台肩(图 4b),台肩内部设有连接螺纹孔通过螺栓与法兰螺母连接,导向座内部同样为圆柱空腔结构(图 4c),其近气腔端面部分留有限转通槽,用于限制导向杆转动,同时底部设有方形法兰盘,用于连接丝杠电机。泵嘴位置增设方形台肩(图 4d)连接软体手爪。气泵轴向最大长度为210 mm,最大径向长度为 55 mm,活塞最大行程为 60 mm,质量为 510 g。

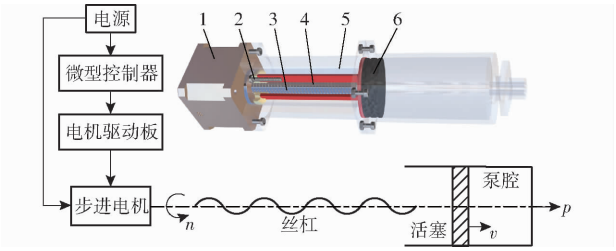

图 3 自循环微型气泵工作原理与结构图

Fig. 3 Working principle and structure of self-circulation air pump

1. 步进电机 2. 法兰螺母 3. 丝杠 4. 导向杆 5. 导向座 6. 活塞

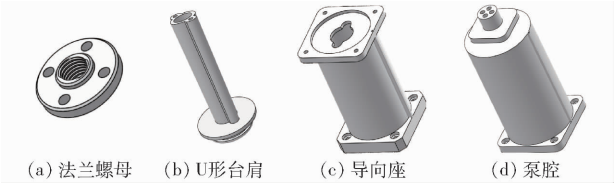

图 4 自循环气泵关键部件结构图

Fig. 4 Details of key components of pump

1.3 气泵压力数学模型

假设气腔内部空气为理想气体,根据波义耳定律,在恒温密闭空间下,腔内气体压缩前后气压变化关系为

$$pV = p_0 V_0 \tag{1}$$

式中 p、V——压缩后的气压与容积

p_0、V_0——初始气压与容积

气泵内气腔为圆柱状,其初始容积为

$$V_0 = \frac{\pi(L_0 D^2 + L_1 d_1^2)}{4} \tag{2}$$

式中 L_0——活塞最大行程

D——气泵内腔直径

L_1、d_1——喷嘴长度和内径

由活塞推进行程可知,变化后的气腔容积为

$$V = V_0 - \Delta V = \frac{\pi[(L_0 - vt)D^2 + L_1 d_1^2]}{4} \tag{3}$$

其中

$$v = \frac{nd}{60} \tag{4}$$

式中 t——活塞运行时间

ΔV——变化容积

v——活塞移动速度

n——电机转速 d——丝杠导程

将式(2)~(4)代入式(1)中,可得到经活塞压缩后泵腔内的气压为

$$p = \frac{p_0(L_0 D^2 + L_1 d_1^2)}{\left(L_0 - \frac{ndt}{60}\right)D^2 + L_1 d_1^2} \tag{5}$$

由式(5)可知,通过调节电机转速与活塞运行时间即脉冲数可控制输出气体压力。

1.4 自适应软体手爪设计

针对球果尺寸和采摘环境分别设计了 3 种类型软体手爪(图 5),分为四指十字对称结构(Ⅰ型和Ⅱ型)和三指中心对称结构(Ⅲ型),其中四指十字对称结构分为爪指平行布局和爪指倾斜外展。Ⅰ型手爪的末端粗壮(图 5a)且横向空间占比较大,适合用于果树枝杈相对稀疏且采摘环境良好的温室和实验环境。较Ⅰ型手爪,Ⅱ型和Ⅲ型手爪爪指相对于手掌平面呈一定角度倾斜外展(图 5b 和图 5c),缩小了手爪末端的横向尺寸,动作更为灵活,减少了在实际果园采摘时不必要的碰撞。且由软体手爪对不同尺寸球果的抓取仿真(图 6)可知,Ⅰ型软体手爪适合采摘直径略小球果(D_s为球果直径,$D_s \leqslant 60$ mm);由于Ⅱ型软体手爪的爪指更为细长,较Ⅰ型手爪可实现较大尺寸球果的包络,避免抓取时滑移、过载和超调等,适合用于外形较大(60 mm < D_s < 80 mm)的球果。Ⅲ型软体手爪采用三指,更为简洁灵活,适合用于采摘大尺寸和果树茂密的球果($D_s \geqslant 80$ mm)。

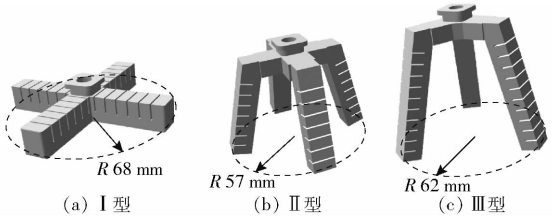

图 5 软体手爪类型

Fig. 5 Three types of soft grippers

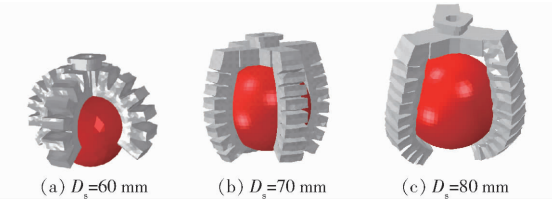

图 6 手爪抓取仿真

Fig. 6 Grasping simulation of soft gripper

所设计软体手爪采用柔顺灵巧的网格型腔气动软体驱动器。以Ⅰ型软体手爪为例,软体驱动器结构见图 7a,其内部采用宽大的矩形气室以增加横截

面积获得足够的输出力，底部为薄而宽的限制层以提高手爪柔性和物形适应性，并避免抓取时应力过大损伤球果。同时为实现球果自适应采摘，模拟人手神经触觉，爪指内侧嵌入柔性薄膜压力传感器（图 7b）。传感器可作为爪指限制层与手爪复合一体，使软体手爪具有类人手皮肤的力感知能力，以识别手爪与球果间的接触状态，并进行实时力反馈。软体手爪中心设有手爪基座，基座内壁增厚，用于与泵嘴间连接与密封。

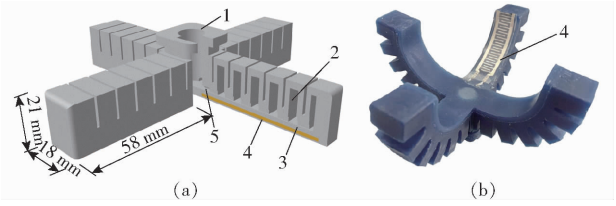

图 7　Ⅰ型自适应软体手爪结构

Fig. 7　Structure of adaptive soft gripper Ⅰ

1. 手爪基座　2. 气室　3. 限制层　4. 薄膜压力传感器　5. 气道

1.5　自适应软体手爪制作工艺

为保证手爪四指变形一致性，采用一体浇铸成形工艺，将传感器与手爪直接复合一体。以Ⅰ型软体手爪为例，其制作工艺流程如图 8 所示，首先制作手爪腔体上下模具及限制层模具（图 8a）；其次组装腔体上下模具（图 8b）；然后使用脱泡后的 E630 硅橡胶溶液进行浇铸（图 8c）；待硅胶半固化后装配手掌基座模具（图 8d）并进行二次浇铸（图 8e）；至完全固化后脱模分离腔体下模具（图 8f），最后将腔体与限制层和传感器依次套装粘接（图 8g）并连接导线，二次脱模后完成自适应软体手爪制作（图 8h）。

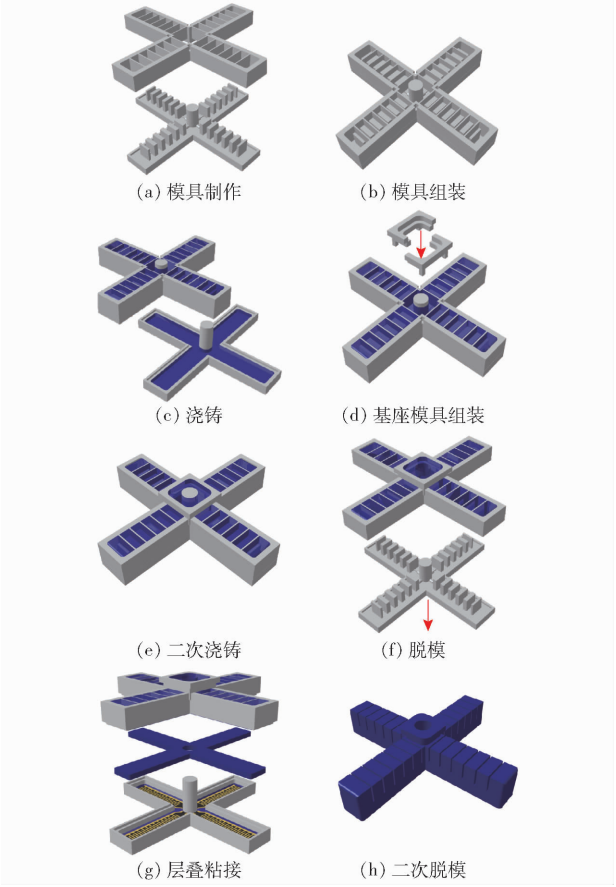

图 8　手爪制作工艺

Fig. 8　Fabrication of gripper

2　球果自适应抓取分析

在球果采摘过程中，当手爪与球果接触后可通过爪指内嵌的力传感器反馈抓持力，配合程序调控以适应多尺寸、多类型球果抓取。

2.1　抓持力分析

手爪与球果接触后产生的抓持力包括正压力 F_n 和摩擦力 F_f，可分别描述为

$$\begin{cases} F_n = \sum_{i=1}^{4} F_{ni} \leqslant F_{\max} \\ F_f = \mu F_n \end{cases} \tag{6}$$

式中　F_{ni}——第 i 指与球果接触正压力

μ——摩擦因数

软体爪指在气压作用下弯曲变形与目标球果接触，其正压力为爪指输出力分力，则 F_{ni} 可表示为

$$F_{ni} = KpS_i \quad (i = 1,2,3,4) \tag{7}$$

式中　K——比例协调系数

S_i——气室横截面积

以软体手爪垂直抓取球果为例，手爪抓持力模型见图 9。

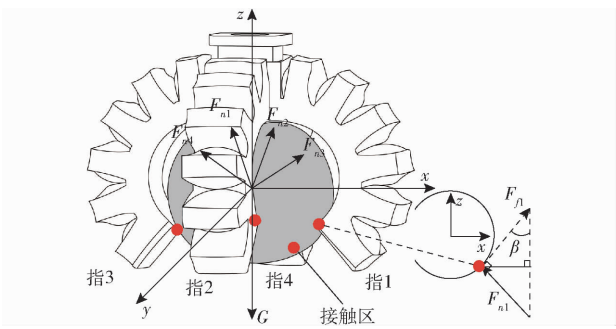

图 9　手爪抓持力模型

Fig. 9　Model for the analysis of the grasping force of the finger

以球果中心为坐标原点，图中红色阴影区域为各爪指与球果接触区域。假设手爪 4 指变形一致同时接触球果，由力平衡分析可知，摩擦力与球果重力 G 关系为

$$G = \sum_{i=1}^{4} 4KpS_i \left(\frac{1}{\sin\beta} + \frac{\mu}{\cos\beta} \right) \tag{8}$$

式中　β——摩擦力与重力方向夹角

由式（8）可知，当爪指与目标球果接触后，可通过调节爪指内腔气体压力控制夹持力以实现不同质量球果抓取。

2.2 采摘手爪自适应控制系统

软体手爪自适应控制系统见图 10,由图可见系统组成与接线方式(图 10a)。蓝牙模块将接收遥控器传输的信号传递给控制器,控制器(Arduino Uno)发出控制指令,经由电机驱动模块控制自循环气泵电机(42BYGH48 型步进电机)推进活塞给手爪供压。在抓持过程中产生的接触力信号通过转换模块转换后反馈给控制器,经控制器判断后再次向电机发出指令,调整活塞位置进而调整手爪夹持力完成球果自适应抓取(图 10b)。

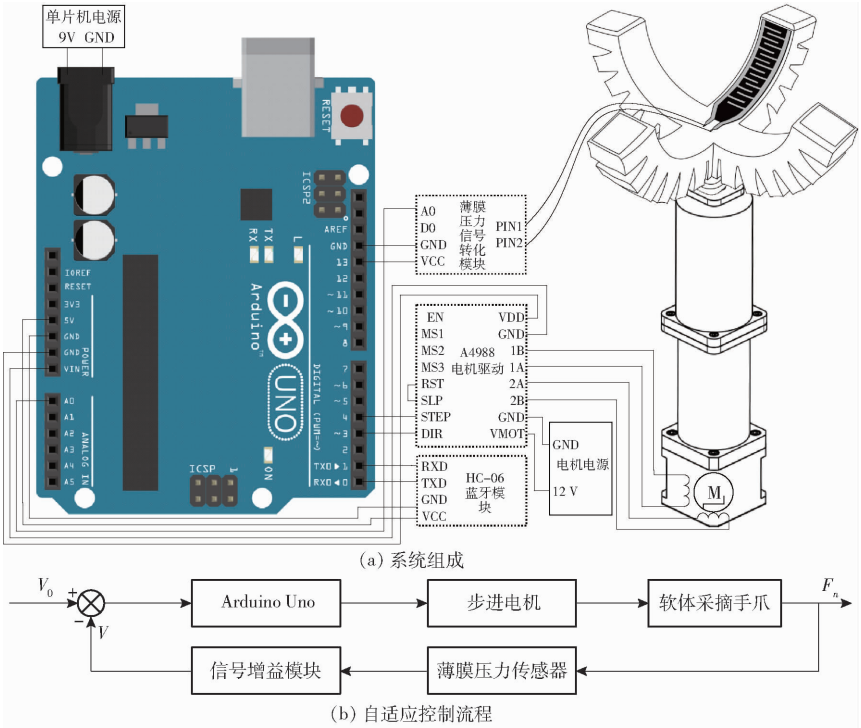

图 10 球果采摘自适应控制系统

Fig. 10 Adaptive control system for globose fruit picking

2.3 自适应抓取机制

为成功采摘球果,基于图 10 所示控制系统,建立自适应抓取机制。球果尺寸识别算法为:

If (Grasping Force < 0.35 N && current piston position < a);

//若夹持力小于接触判别力 F_{con}(F_{con} = 0.35 N),且活塞未达到最大行程

grasping motion; //执行抓取动作

Current piston position = Calculate Piston position; //记录当前活塞位置

If (Grasping Force = > 0.35 N); //若夹持力大于等于 0.35 N 时进入抓取模式选择

Adaptive grasping; //自适应抓取

识别手爪与球果接触后,选择相应抓取模式进行球果抓取;若夹持力过小($F < F_{min}$)出现滑移时,电机快速正转推进活塞以增加夹持力抓紧球果;若夹持力过大($F > F_{max}$)超过球果破坏力,则控制电机快速反转令活塞后移以减小夹持力避免损伤球果。具体算法为:

Adaptive grasping( ); //执行自适应抓取

Switch( ); //选择抓取模式

Case (current piston position > min && current piston position < max); //执行抓取动作

If (Grasping Force < Minimum grasping force (F_{min}))

//若夹持力小于抓取所需最小夹持力

grasping motion; //快速增加夹持力

If (Grasping Force > Damaged force (F_{max}))

//若夹持力大于球果破坏力

release motion; //执行释放动作,减小夹持力

If (Grasping Force > = F_{min} && Grasping Force < = F_{max})

//若夹持力在合理范围内

Keep grasping motion; //保持夹持力状态

…其他尺寸球果相应抓取模式

3 实验

3.1 自供气气泵性能测试

图 11 为自循环气泵性能测试系统,利用安装于气泵前端的气压传感器(PSE560 - 01 型)测试不同电机转速时正负压全域下的自循环气泵气压性能。具体实验和气泵参数见表 1。

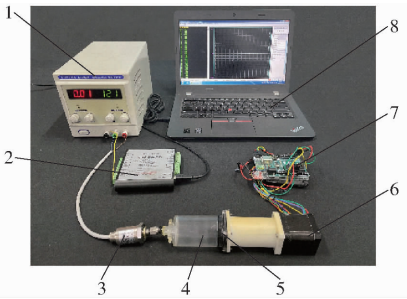

图 11　气泵性能测试系统

Fig. 11　Experiment system for testing performance of self-circulation air pump

1. 电源　2. 数据采集卡　3. 气压传感器　4. 气缸　5. 活塞　6. 电机　7. 控制器　8. 计算机

表 1　实验条件与气泵参数

Tab. 1　Experimental conditions and parameters of pump

参数	数值
电机转速 n/(r·min^{-1})	100、125、150、175、200、225、250
采样频率 f/Hz	15 000
气泵内径 D/mm	35
活塞行程 L_{max}/mm	60

电机正转通过丝杠推进活塞压缩泵腔气体，由图 12 测得转速 250 r/min 下泵出口压力变化，可知气压随活塞行程增加，出口压力随之呈非线性增加。由式(5)得到的泵压力理论计算结果与实验数据对比可知，二者趋势一致，吻合较好，建立的气压模型能够真实反映活塞挤压下气泵输出压力变化。

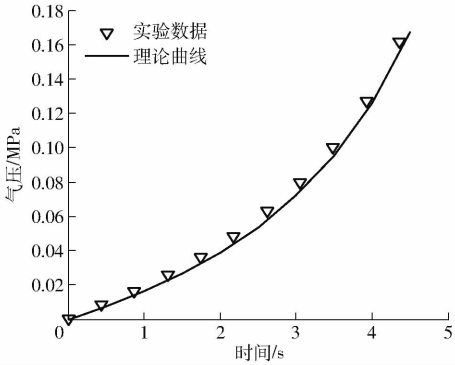

图 12　气泵气压随时间变化曲线

Fig. 12　Curves of air pump pressure and time

图 13 为不同转速下自循环气泵峰值气压与电机转速关系。由图中可见，电机转速为 100 r/min 时气泵可提供最大 0.185 MPa 峰值气压，此后，随电机转速增加，即活塞推进速度增加，气压有所下降。在电机转速 200 r/min 下，峰值气压明显下降，压力最小值为 0.165 MPa。当电机转速 250 r/min 时，活塞快速移动，此时峰值气压产生较大波动。在转速 175 r/min 下，波动最小工作稳定。测试结果表明，不同电机转速下气泵皆可为手爪提供足够气压。

在转速 250 r/min 下，自循环气泵由增压至减压，正压至负压全域内气压变化见图 14。实验中，给定活塞 20 mm 最大负压行程以实现气泵压力由正到负的全域变化。由图 14 可知，0 ~ 3 s 内为升压区间，随活塞移动，气压快速上升直至峰值气压。此时步进电机依然维持一定转矩，使活塞保持位置而不回退为稳压阶段。6 s 后电机反转，随活塞加速后移，压力快速下降。活塞至初始位置后，电机继续反转活塞向后移动，抽取气体。当活塞移动至最大负压位置时，负压最低可至 −0.03 MPa。在升压区间内，气压下爪指逐步弯曲收拢(Abaqus 仿真)，至峰值气压时爪指四指弯曲闭合，减压区间内，随电机反转爪指快速释放，负压区间内四指反向弯曲，增加抓取空间。

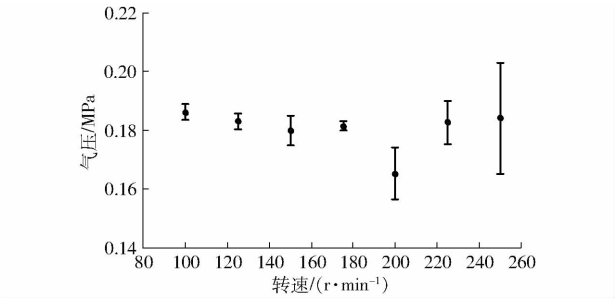

图 13　气泵峰值气压与电机转速关系图

Fig. 13　Relationship between peak air pressure of pump and speed of motor

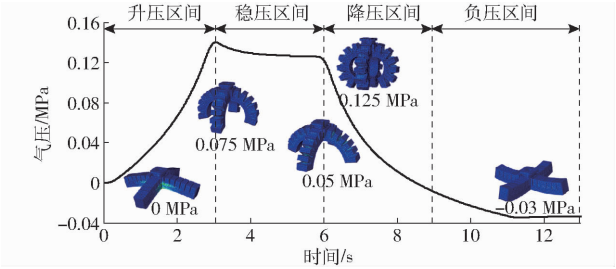

图 14　自循环气泵气压全域变化

Fig. 14　Pressure range of self-circulation air pump

由自循环气泵气压测试实验与手爪变形仿真分析可知，气泵可实现由正压至负压的全域气压变化，提供稳定的输出气压，满足手爪变形的动力需求。

3.2　手爪静力学实验

以Ⅰ型软体手爪为例，制作物理样机并进行相关测试实验。

(1)弯曲变形

图 15 为Ⅰ型软体手爪弯曲变形随气压变化，由图中可见手爪端面转角与气压成正比，随气压增加软体手爪随之呈类似手指弧状弯曲。在 0.12 MPa 下手爪收拢闭合。

(2)抓持力

气泵供压后手爪弯曲变形与目标球果接触产生

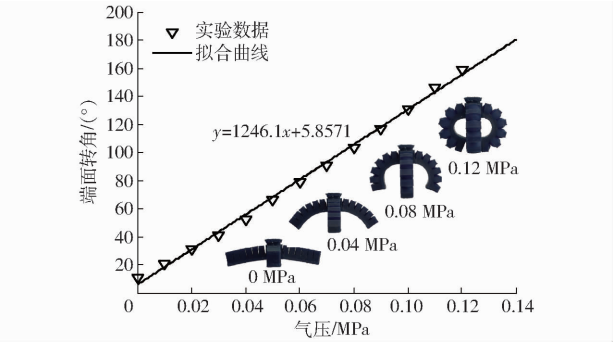

图 15 爪指端面转角随气压变化曲线

Fig. 15 Curve of angle of the end face of the finger and air pressure

正压力,接触点的正压力可通过固定于爪指下方的六维力传感器测得,传感器上方设有球形触点,其位于球果轮廓上。图 16 为电机转速 250 r/min 下手爪发生相应弯曲变形后与接触点产生正压力随活塞推进时间变化。由图中可见,手爪与接触点正压力随活塞推进呈非线性增加,理论模型与实验结果吻合,通过调整气泵供压可控制手爪抓取球果时的夹持力,且产生的正压力远小于破坏力 F_{max}。可见应用该手爪采摘球果主动、安全且夹持力可控,可实现无损采摘。

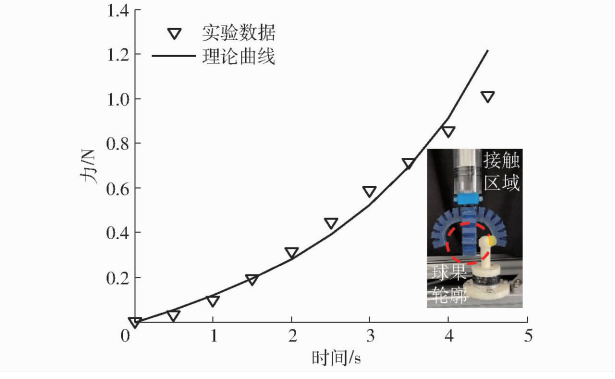

图 16 正压力随时间变化曲线

Fig. 16 Curve of normal force of the soft gripper and time

图 17 为气泵电机间隔转速 50 r/min 下,手爪正压力随时间变化。由图中可见,不同转速下正压力皆可达到峰值压力 1.75 N。随转速增加,达到峰值气压的响应时间随之减少,在转速 250 r/min 下,手爪输出力达到峰值最小响应时间为 7.2 s。

3.3 压力传感器性能测试

采用测力计(HF-100 型)触压薄膜压力传感器(SF15-54 型),进行传感器反馈力标定,其标定结果如图 18 所示,从图中可知,压力与电压呈线性关系,对其拟合可得图 18 所示公式,该式可用于计算薄膜压力传感器反馈力。

图 19 为传感器在整体弯曲 30°时的压敏测试,测试过程中随机选取 4 点,冲击力依次增加,最大冲

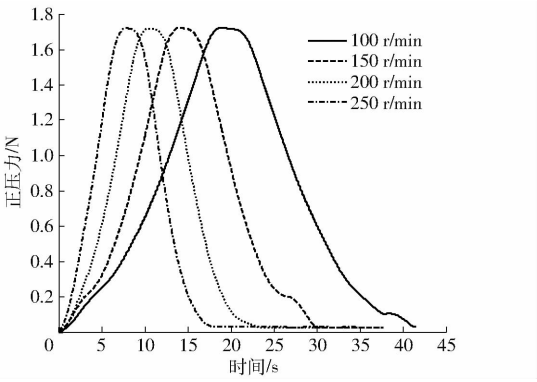

图 17 不同转速时正压力变化曲线

Fig. 17 Effect of rotational speed of motor on normal force

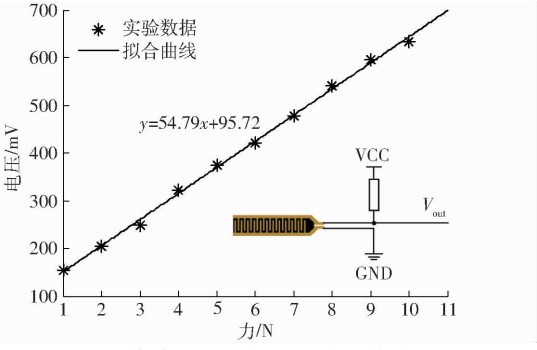

图 18 传感器压力与电压关系曲线

Fig. 18 Curve of pressure of the sensor and the voltage

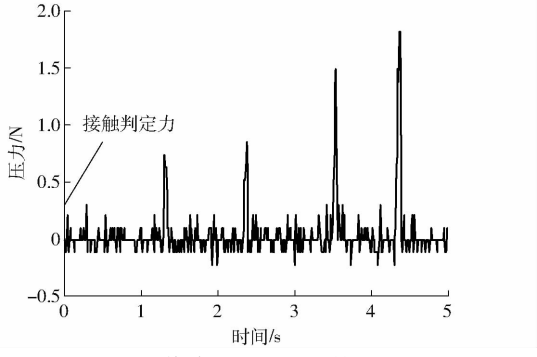

图 19 传感器压敏测试结果

Fig. 19 Pressure sensitive test of sensor

击力为 1.7 N。无压力触发时,薄膜压力传感器压力信号在 ±0.2 N 区间内波动,结果表明,传感器对 4 次微小力触压均可做出灵敏反应,响应速度小于 30 ms,该薄膜触力传感器可灵敏有效反馈采摘手爪抓持力。

3.4 球果自适应抓取实验

由自适应抓取算法完成控制与传感联合自适应抓取效能验证,实验结果见图 20,实验中选取直径为 86 mm、质量为 270 g 的目标球果。图中展示了手爪抓取球果从接触、抓紧与释放,滑移与过载全程触力变化。气泵供压后至 t_0 时刻手爪变形与球果接触识别球果尺寸,选取预设抓取模式(表 2)抓紧球果;t_2 时刻内手爪抓住球果向下滑移,此时控制器接收反馈力信号,电机正转活塞下移增压直至抓紧球果;

t_4－t_5时刻内过载判别，此时通过手指触压手爪，施加外力致使过载触发程序，电机反转使活塞上移减压，手爪释放球果避免球果损伤。经程序辨别后，t_5～t_6时刻内二次加压抓取球果。结果表明，文中设计的软体手爪通过接触力反馈与程序控制可以有效实现球果自适应抓取。

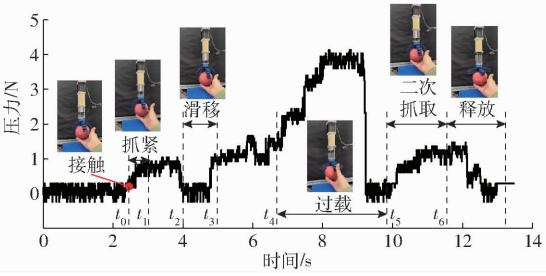

图 20　自适应抓取实验结果

Fig. 20　Demonstration of adaptive grasping

表 2　球果抓取实验参数

Tab. 2　Experimental parameters for global fruits to grasp

序号	种类	直径 D_s/mm	质量 m/g	转速 n/(r·min^{-1})	接触时间 t_c/s	时间增量 Δt/s
1	苹果	48.5	50	250	6.72	0.48
3		60	120	250	5.40	0.60
4		67	132	250	5.28	0.84
5		71	158	250	5.16	0.56
6		75	180	250	5.04	1.92
7		77	183	250	4.56	1.44
8		82	240	250	4.12	2.36
9		86	270	250	3.84	3.36
10		91	315	250	3.60	3.66
11		97	350	250	3.24	3.96
12	橘	64	105	250	5.4	0.24
13	橙	75	227	250	4.2	3
14	梨	76	225	250	4.2	3

3.5　采摘和分拣实验

实验室环境下模拟采摘系统和球果自适应控制原理见图 21 与图 22，无系留自适应软体手爪安装于地面移动机器人平台上，利用视觉传感系统捕捉球果位置，通过六自由度机械臂伸展达到目标球果位置，由六自由度机械臂驱动完成采摘。当目标球果位于采摘范围时，由控制器发出控制指令控制自循环气泵电机正转，推动活塞将泵腔内气体压入软体手爪抓取球果；爪指内嵌薄膜压力传感器将测得爪指与球果夹持力反馈给控制器。控制器依据反馈的夹持力信号识别手爪与球果接触后，选择相应抓取模式开始抓取，并在抓持过程中进行夹持判断，如正常抓取、滑移或过载等，直至安全可靠地抓紧球果。

Ⅰ型软体手爪在自循环气泵驱动下，做出采摘动作对不同尺寸球果抓取（图 23）。图 24 中所示多

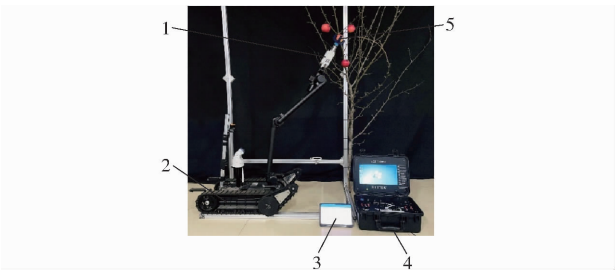

图 21　模拟采摘实验系统

Fig. 21　Experiment setup of picking in laboratory

1. 无系留软体手爪　2. 六自由度机械臂移动平台　3. 软体手爪控制器　4. 移动平台控制器　5. 目标球果

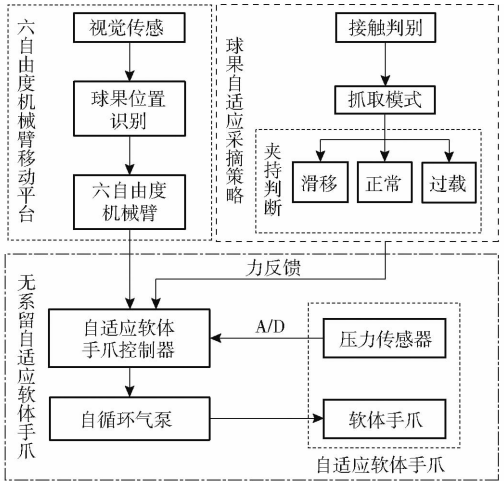

图 22　球果自适应采摘控制原理图

Fig. 22　Control principle of adaptive picking

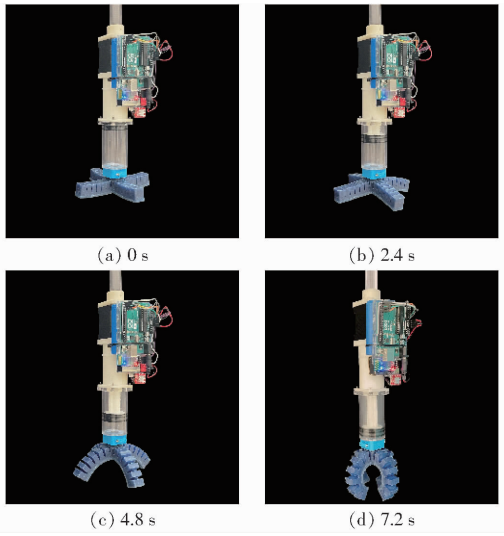

图 23　手爪采摘动作

Fig. 23　Gesture of gripper for picking

种球果抓取，具体实验参数见表 2，表中 t_c 时刻为爪指与球果接触时活塞运行时间，继续推进活塞运行时间增量 Δt，抓紧球果，由于球果质量与尺寸不同，抓持所需要的 t_c 与 Δt 不同。

在理想化实验条件下，从表 2 中任选 5 种球果分别进行抓取，成功率见表 3。实验中每种球果分别进行55次抓取，且在抓稳后实施人为扰动。经

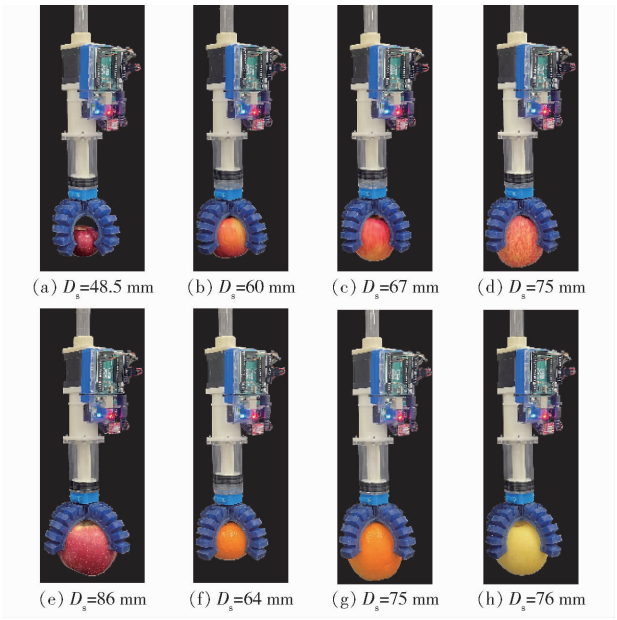

图 24 多种球果抓取

Fig. 24 Demonstration of picking multiple of fruits

表 3 球果抓取成功率

Tab. 3 Rate of success of gripping globose fruit

球果序号	成功率/%	
	无自适应	自适应
5	54.5	100
7	72.7	100
8	90.9	100
10	63.6	100
11	36.4	87.3

对比可知,应用自适应控制后球果平均抓取成功率从 63.62% 提升至 97.46% 。

球果模拟采摘与分拣见图 25 ~ 27,采摘过程分为 4 步,平均用时 15 s。以Ⅰ型软体手爪采摘苹果为例,首先通过视觉传感单元捕捉球果位置(图 25),操控地面移动机器人接近目标球果(图 26a);展开机械臂使球果位于采摘范围(图 26b);调控自循环气泵施加气压驱动手爪弯曲包裹球果,当爪指与球果接触后,辨别球果尺寸并选择相应抓取模式抓取球果(图 26c);最后通过机械臂回转扭断果梗完成采摘(图 26d),采摘后即可进行分拣作业,见图 27。球果采摘实验表明,该无系留自适应球果采摘软体手爪便携、灵活和易于控制,可实现多尺寸多类型球果无损伤自适应采摘。



图 25 目标球果影像

Fig. 25 Images of target fruits

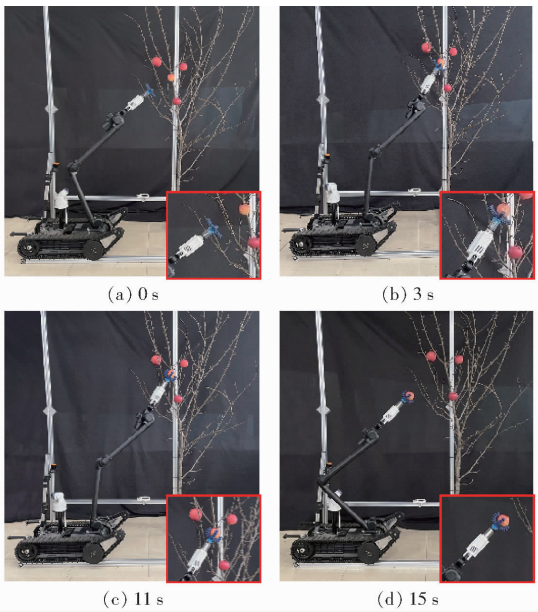

图 26 球果采摘过程

Fig. 26 Picking process of globose fruit

4 结论

(1)设计了无系留气动自适应球果采摘软体手爪,并以Ⅰ型软体手爪为例研制了物理样机。手爪

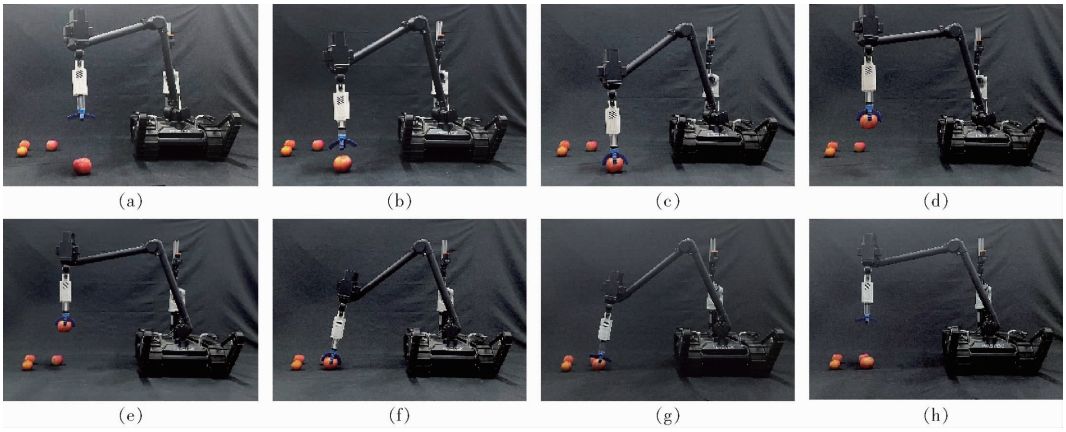

图 27 球果分拣流程

Fig. 27 Process of sorting globose fruits

连同自循环气泵长为 230 mm，质量为 950 g，手掌宽为 136 mm。其中自循环气泵可提供的气压范围为 -0.03 ~ 0.185 MPa，软体手爪在 0.12 MPa 下收拢闭合，完成球果抓取动作。

（2）建立了自循环气泵压力模型与手爪抓持力模型并进行了相关实验验证，获得了气泵驱动性能和手爪夹持力特性。气泵电机转速为 250 r/min，脉冲时间为 7.2 s 时峰值压力可达 0.185 MPa，爪指最大正压力为 1.75 N。结果表明，自循环气泵可提供稳定的输出气压，满足手爪变形的动力需求，且通过调整气泵供压可以控制手爪抓取球果时的夹持力。

（3）建立了自适应控制系统和抓取机制，进行了自适应抓取实验验证与直径范围从 48.5 ~ 97 mm、质量从 50 ~ 350 g 的 14 种球果抓取实验，并在实验环境下完成了球果采摘与分拣实验。结果表明，内嵌薄膜压力传感器的无系留自适应球果采摘软体手爪可有效反馈爪指与球果间的抓持力，配合自适应控制程序可实现多尺寸、多类型球果无损伤自适应采摘，平均采摘用时为 15 s，成功率为 97.46%。

参 考 文 献

[1] 尚书旗，李成鹏，何晓宁，等. 高酸苹果振动式采摘机设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：115 - 125，168.
SHANG Shuqi, LI Chengpeng, HE Xiaoning, et al. Design and experiment of high-acid apple vibrating picker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2023，54(3)：115 - 125，168. (in Chinese)

[2] SETIAWAN A I, FURUKAWA T, PRESTON A. A low-cost gripper for an apple picking robot[C]// Robotics and Automation, ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on. IEEE, 2004.

[3] 陈青，殷程凯，郭自良，等. 苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业工程学报，2023，39(4)：1 - 15.
CHEN Qing, YIN Chengkai, GUO Ziliang, et al. Current status and future development of the key technologies for apple picking robots[J]. Transactions of the CSAE，2023，39(4)：1 - 15. (in Chinese)

[4] 权龙哲，赵琳，李星辉，等. 多功能蜻爪式仿生末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报，2017，48(8)：33 - 42，52.
QUAN Longzhe, ZHAO Lin, LI Xinghui, et al. Design and test of multifunctional dragonfly claws form bio-mimetic end effector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(8)：33 - 42，52. (in Chinese)

[5] 赵云伟，耿德旭，刘晓敏，等. 气动柔性果蔬采摘机械手运动学分析与实验[J]. 农业机械学报，2019，50(8)：31 - 42.
ZHAO Yunwei, GENG Dexu, LIU Xiaomin, et al. Kinematics analysis and experiment on pneumatic flexible fruit and vegetable picking manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(8)：31 - 42. (in Chinese)

[6] 刘佳鹏，王江北，赵威，等. 多功能软体机械手的设计与建模[J]. 机械工程学报，2022，58(9)：1 - 9.
LIU Jiapeng, WANG Jiangbei, ZHAO Wei, et al. Design and modeling of multifunctional soft manipulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9): 1 - 9. (in Chinese)

[7] 李海利，姚建涛，周盼，等. 无系留大负载软体抓持机器人研究发展综述[J]. 机械工程学报，2020，56(19)：28 - 42.
LI Haili, YAO Jiantao, ZHOU Pan, et al. Untethered, high-load soft gripping robots: a review[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(19): 28 - 42. (in Chinese)

[8] XIONG L L, LI F, WU K, et al. Bio-inspired untethered fully soft robots in liquid actuated by induced energy gradients[J]. National Science Review, 2019，6(5)：970 - 981.

[9] LI Y, REN T, LI Y, et al. Untethered-bioinspired quadrupedal robot based on double-chamber pre-charged pneumatic soft actuators with highly flexible trunk[J]. Soft Robotics, 2021, 8(1): 97 - 108.

[10] LI H, YAO J, WEI C, et al. An untethered soft robotic gripper with high payload-to-weight ratio[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 158: 104226.

[11] BELL M A, GORISSEN B, BERTOLDI K, et al. A modular and self-contained fluidic engine for soft actuators[J]. Advanced Intelligent Systems, 2021, 4: 2100094.

[12] TOLLEY T, SHEPHERD F, GALLOWAY C, et al. A resilient, untethered soft robot[J]. Soft Robotics, 2014, 1(3): 213 - 223.

[13] WEHNER M, TRUBY R L, FITZGERALD D J, et al. An integrated design and fabrication strategy for entirely soft, autonomous robots[J]. Nature, 2016, 536(7617): 451 - 455.

[14] LUM G Z, YE Z, DONG X, et al. Shape-programmable magnetic soft matter[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(41): 6007 - 6015.

[15] LI T, LI G, LIANG Y, et al. Fast-moving soft electronic fish[J]. Science Advances, 2017, 3(4): e1602045.

[16] PARK S J, GAZZOLA M, PARK K S, et al. Phototactic guidance of a tissue-engineered soft-robotic ray[J]. Science, 2016, 353(6295): 158 - 162.

[17] 李国利，姬长英，顾宝兴，等. 多末端苹果采摘机器人机械手运动学分析与试验[J]. 农业机械学报，2016，47(12)：14 - 21，29.
LI Guoli, JI Changying, GU Baoxing, et al. Kinematics analysis and experiment of apple harvesting robot manipulator with multiple end-effectors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(12)：14 - 21，29. (in Chinese)

[18] 鲍官军，张水波，陈亮，等. 基于气动柔性驱动器的球果采摘末端抓持器[J]. 农业机械学报，2013，44(5)：242 - 246.
BAO Guanjun, ZHANG Shuibo, CHEN Liang, et al. Design of spherical fruit end-grasper based on FPA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2013，44(5)：242 - 246. (in Chinese)

[19] 徐丰羽，郭义全，周映江，等. 软体机器人的驱动器及制作方法研究综述[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版)，2018，

38(4):69 - 80.
XU Fengyu, GUO Yiquan, ZHOU Yingjiang, et al. Review of actuator and manufacturing methods in soft robots[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018,38(4):69 - 80. (in Chinese)
[20] PI J, LIU J, ZHOU K, et al. An octopus-inspired bionic flexible gripper for apple grasping[J]. Agriculture, 2021, 11(10): 1014.
[21] 贾江鸣,叶玉泽,程培林, 等. 细长果蔬采摘软体气动抓手设计与参数优化[J]. 农业机械学报,2021,52(6):26 - 34.
JIA Jiangming, YE Yuze, CHENG Peilin, et al. Design and parameter optimization of soft pneumatic gripper for slender fruits and vegetables picking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 26 - 34. (in Chinese)
[22] 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)
[23] ELGENEIDY K, LOHSE N, JACKSON M. Bending angle prediction and control of soft pneumatic actuators with embedded flex sensors—a data-driven approach[J]. Mechatronics, 2018, 50: 234 - 247.
[24] CHEN Y, GUO S, LI C, et al. Size recognition and adaptive grasping using an integration of actuating and sensing soft pneumatic gripper[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 104:14 - 24.
[25] YAMAGUCHI T, KASHIWAGI T, ARIE T, et al. Human-like electronic skin-integrated soft robotic hand[J]. Advanced Intelligent Systems, 2019, 1(2):1900018.
[26] YANG M, LIU Q, NAQAWE H S, et al. Movement detection in soft robotic gripper using sinusoidally embedded fiber optic sensor[J]. Sensors, 2020, 20(5): 1312.
[27] 朱银龙,赵虎,苏海军,等. 四指软体机械手机械特性分析与抓取试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):434 - 442.
ZHU Yinlong, ZHAO Hu, SU Haijun, et al. Mechanical performance analysis and grasping experiment for four-finger soft manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(9):434 - 442. (in Chinese)
[28] 刘晓敏,田德宝,宋懋征, 等. 气动球果采摘柔性手爪设计与实验[J]. 农业机械学报,2021,52(2):30 - 43.
LIU Xiaomin, TIAN Debao, SONG Maozheng, et al. Design and experiment on pneumatic flexible gripper for picking globose fruit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(2):30 - 43. (in Chinese)
[29] 杨庆华,金寅德,钱少明,等. 基于气动柔性驱动器的苹果采摘末端执行器研究[J]. 农业机械学报,2010,41(9): 154 - 158.
YANG Qinghua, JIN Yinde, QIAN Shaoming, et al. Research on end-effector of apple picking based on new flexible pneumatic actuator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(9):154 - 158. (in Chinese)

(上接第 64 页)

[17] JIN Yucheng,LIU Jizhan,WANG Jie,et al. Far-near combined positioning of picking-point based on depth data features for horizontal-trellis cultivated grape[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022,194:106791.
[18] ZHONG Zhuo,XIONG Juntao,ZHENG Zhenhui,et al. A method for litchi picking points calculation in natural environment based on main fruit bearing branch detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2021,189:106398.
[19] 张勤,陈建敏,李彬,等. 基于 RGB - D 信息融合和目标检测的番茄串采摘点识别定位方法[J]. 农业工程学报,2021,37(18):143 - 152.
ZHANG Qin,CHEN Jianmin,LI Bin,et al. Method for recognizing and locating tomato cluster picking points based on RGB - D information fusion and target detection[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(18):143 - 152. (in Chinese)
[20] 麦春艳,郑立华,孙红,等. 基于 RGB - D 相机的果树三维重构与果实识别定位[J]. 农业机械学报,2015,46(增刊):35 - 40.
MAI Chunyan,ZHENG Lihua,SUN Hong,et al. Research on 3D reconstruction of fruit tree and fruit recognition and location method based on RGB - D camera[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(Supp.):35 - 40. (in Chinese)
[21] 刘德儿,朱磊,冀炜臻,等. 基于 RGB - D 相机的脐橙实时识别定位与分级方法[J]. 农业工程学报,2022,38(14):154 - 165.
LIU De'er,ZHU Lei,JI Weizhen,et al. Real-time identification, localization, and grading method for navel oranges based on RGB - D camera[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(14):154 - 165. (in Chinese)
[22] 姬丽雯,刘永华,高菊玲,等. 温室草莓采摘机器人设计与试验[J]. 中国农机化学报,2023,44(1):192 - 198.
JI Liwen,LIU Yonghua,GAO Juling,et al. Design and experiment of strawberry picking robot in greenhouse[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2023,44(1):192 - 198. (in Chinese)
[23] 罗陆锋,邹湘军,熊俊涛,等. 自然环境下葡萄采摘机器人采摘点的自动定位[J]. 农业工程学报,2015,31(2):14 - 21.
LUO Lufeng,ZOU Xiangjun,XIONG Juntao,et al. Automatic positioning for picking point of grape picking robot in natural environment[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(2):14 - 21. (in Chinese)
[24] 王丹丹,徐越,宋怀波,等. 基于平滑轮廓对称轴法的苹果目标采摘点定位方法[J]. 农业工程学报,2015,31(5):167 - 174.
WANG Dandan,XU Yue,SONG Huaibo,et al. Localization method of picking point of apple target based on smoothing contour symmetry axis algorithm[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(5):167 - 174. (in Chinese)
[25] 司永胜,乔军,刘刚,等. 苹果采摘机器人果实识别与定位方法[J]. 农业机械学报,2010,41(9):148 - 153.
SI Yongsheng,QIAO Jun,LIU Gang,et al. Recognition and location of fruits for apple harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(9):148 - 153. (in Chinese)