

doi:10.3969/j.issn.1006-8023.2022.04.012

面向无损采摘的腔室化气动柔性驱动器研制

李健, 闫杰, 黄美珍, 王扬威

(东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘要:为实现对易损果蔬的无损采摘及提高采摘效率,该研究在捕蝇草叶片的启发下,以硅胶作为本体材料,采用气体驱动,提出腔室化设计思路,设计并制作气动柔性驱动器。通过有限元仿真和实验验证方法探究驱动器的可行性和可靠性,验证驱动器在稳定抓取和无损采摘领域的应用,实现驱动器对于不同形状物体的稳定抓取和对草莓和花生柿子易损果蔬的采摘。研究表明,腔室化设计的气动柔性驱动器能够在0.3 kPa的气压激励和3 L/min的流速下,3 s内完成2个维度的弯曲变形,可以实现对目标物的包裹或者半包裹式抓取,能够完成对于不同形状大小的物体自适应抓取和对采摘目标的无损采摘。此研究表明研制的软体机械手和驱动器可以在一定程度上解放劳动力、提高生产效率以及保证果蔬品质。

关键词:无损采摘;腔室化设计;气体驱动;柔性驱动器;自适应抓取

中图分类号:S225;TP249

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2022)04-0098-08

Development of Chamber-oriented Pneumatic Flexible Driver for Nondestructive Picking

LI Jian, YAN Jie, HUANG Meizhen, WANG Yangwei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to realize the nondestructive picking of vulnerable fruits and vegetables and improve picking efficiency, inspired by the leaves of Venus flytrap, this study proposed the idea of chamber design with silica gel as the body material and gas driven, and designed and manufactured a pneumatic flexible driver. The feasibility and reliability of the driver were explored by finite element simulation and experimental verification method, and the application of the driver in the field of stable grasping and nondestructive picking was verified. The driver can stably grasp objects of different shapes and pick vulnerable fruits and vegetables of strawberries, peanuts and persimmons. Research showed that: the flexible pneumatic driver of the chamber design can complete the bending deformation in two dimensions within 3 s under the air pressure excitation of 0.3 kPa and the flow rate of 3 L/min, and can realize the wrapping or semi wrapping grasping of the target. It can achieve adaptive grasping of objects of different shapes and sizes and nondestructive picking of targets. The results showed that the soft manipulator and driver can liberate labor force, improve production efficiency and guarantee fruit and vegetable quality to a certain extent.

Keywords: Nondestructive picking; chamber design; gas drive; flexible driver; adaptive grasping

0 引言

蔬菜水果蛋白质和脂类含量低,而人体必需的无机盐及维生素含量很丰富^[1-2],是人们生活中必不可少的食物。中国是一个农业大国,水果产量和

消费量巨大,目前果蔬的种植面积仍呈波动性增加趋势^[3-4]。在果蔬生产销售的全产业链环节中,果蔬采摘无疑是最耗时、费力的一个环节,由于目前的果蔬采摘仍大量依赖于人工,因此存在采摘效率低、采摘成本高和劳动量大等问题。果蔬的生长环境复杂多样,且形状复杂多变,容易在采摘过程中受到伤害,导致出现破损甚至无法食用的情况,会直接影响果蔬的储存、加工和销售^[5]。

因此,研究能够减小果蔬损伤率的机械手和驱动器,对于解放劳动力、提高生产效率以及保证果蔬品质等具有重要意义。由于果蔬采摘环境的特殊性,驱动器需要一定的适应性,能够尽可能地避免周围环境以及驱动器本体对果蔬造成破坏伤害,

收稿日期:2022-01-15

基金项目:国家自然科学基金(51905084)

第一作者简介:李健,博士,副教授。研究方向为增材制造技术和机器人技术。E-mail: lijian499@163.com

引文格式:李健,闫杰,黄美珍,等.面向无损采摘的腔室化气动柔性驱动器研制[J].森林工程,2022,38(4):98-105.

LI J, YAN J, HUANG M J, et al. Development of chamber-oriented pneumatic flexible driver for nondestructive picking[J]. Forest Engineering, 2022, 38(4): 98-105.

且能够较好地应对采摘对象的质地脆弱易伤特性,具有较好的包裹性。除此之外,驱动器和采摘机械手的结构应简单可靠,可控性好,价格合理,能够大面积推广及应用^[6-10]。

针对果蔬采摘的特点,国内外学者对果蔬采摘机械手进行了大量的研究,研制出许多果蔬采摘装置。传统的果蔬采摘机械手存在动作僵硬、环境适应性差、采摘专一性高、效率低、损坏率高、装置复杂和造价昂贵等缺陷,无法适应对于易损果蔬的采摘,不能实现真正的商业化推广应用,缺少实用价值。与刚性机械手相比,软体机械手具有高度的灵活性、柔韧性和通用性,因此采用软体机械手作为果蔬采摘装置的末端执行器可以最大程度地适应易损果蔬的采摘要求。软体手的设计灵感来源于自然界中的软体动物触角,如水母、章鱼和海星等,通常由柔软材料制成,具有较大的变形能力和无限的自由度,可在较大范围内根据目标物体的形状改变自身的形状和尺寸,因此软体手可通过变形实现与被抓取物体的形态匹配,并最终实现稳定的抓取动作^[11-14]。以气压和线缆作为驱动,德国 festo 和北京航空航天大学合作研制了象鼻、章鱼触手和气动肌肉等^[15]。美国哈佛大学 Whiteside 课题组以弹性硅胶作为材料,结合 3D 打印技术,设计制造了以气动网格为执行器的软体手,具有承压小、变形大、运动灵活、能够与环境实现互容等特点。有关研究提出一种新的 4D 打印技术可使软体手根据被抓物体形状尺寸调整其有效长度。智能材料的运用,能够实现将物理刺激转化为位移,如介电弹性体、导电聚合物、相形状记忆合金和形状聚合物等在软体机器人上的应用,使其具有广阔的发展前景和应用价值^[16-21]。因此,结合软体机械手和驱动器的优点,综合改进果蔬的栽植方式,软体机械手和驱动器在无损采摘领域和提高采摘效率方面将会发挥巨大的作用。

1 捕蝇草启发的腔室化驱动器结构设计

捕蝇草在捕捉昆虫时主要由 4 个步骤组成:引诱昆虫、捕捉昆虫、分解与吸收,以维持自身生长。捕蝇草的捕捉过程极为复杂,对称的叶片通过叶柄相连接。捕蝇草引诱虫子主要依靠叶片边缘的蜜腺所分泌的蜜汁。昆虫被吸引落在叶片上时,当捕蝇草一定时间间隔内受到昆虫 2 次刺激时,通过传

递信号,叶片会迅速闭合,完成捕捉动作。叶片边缘有规则状的刺毛,在叶片闭合时,刺毛正好交错排布,形成一个笼子,使昆虫无法逃出。且在刺毛的终端存在分泌黏液的系统,黏液可以黏住昆虫,防止昆虫逃脱。随后昆虫会被消化吸收,吸收的营养用来维持捕蝇草的自身生长。捕蝇草叶片经过透明化处理后得到捕蝇叶片的叶脉和微观结构,如图 1 所示。捕蝇草的叶脉结构具有明显的层次特征,轴向叶脉呈扇形规则分布,径向叶脉将叶片划分为不同大小的细胞腔室,形成一个网状结构。叶片的细胞腔室大小越靠近刺毛附近,腔室越致密且越小。刺毛呈一定间隔均匀分布在叶片的顶端。整个叶片的顶部和底部呈现出一条椭圆曲线。叶片在不闭合时呈现外凸状态,在闭合时呈现内凹状态。



图 1 捕蝇草叶片透明化处理

Fig. 1 Transparent treatment of blades of the Venus flytrap

很多植物的运动都是依靠膨压驱动,即细胞内的水对细胞壁的压力驱动。同样,在捕蝇草叶片感触运动的初始阶段,叶片在细胞膨压驱动下进行运动。离子的运动引起水在细胞和组织间的输送,进而导致细胞的膨胀和压缩,在呈现一定排列规律的细胞群的变形累积下,整体叶片发生缓慢运动和刚度的变化。捕蝇草的叶片运动是最震撼的快速感触运动,速度在毫秒量级,其运动的一般过程为:捕蝇草叶片初始状态为向外侧弯曲,当内侧触发绒毛感受到机械刺激后,电信号会引起组织内离子的定向运动,形成化学势差,并引起水的流动,在水压的作用下引起细胞壁的缓慢变形,并存储了弹性势能,叶片的曲率逐渐变平;当水压到达一个临界阈值时,在几何约束的作用下,本体弹性势能突然释放并转换成动能,叶片快速屈曲,实现曲率从凸到凹的变化,引起的被动流可以提供黏性阻力以平衡弹性,持续的压力供给使得叶片保持在向内弯曲的状态。

捕蝇草启发的驱动器结构设计,首先选取合适的捕蝇草叶片,如图 2(a)所示,通过三维扫描仪对

捕蝇草叶片进行三维扫描获得捕蝇草的叶片点云数据,然后对叶片的点云数据进行数据处理和筛选得到捕蝇草叶片优质的点云数据。根据点云数据对捕蝇草叶片进行逆向建模,从而得到捕蝇草的三维叶片模型。提取捕蝇草叶片表面,同时对叶片表面进行关键尺寸测量,得到捕蝇草叶片的二维尺寸参数,最终对参数进行适当的调整得到捕蝇草叶片的二维模型参数。由于捕蝇草叶片本体尺寸较小,不利于后期仿真和制作,因此对捕蝇草叶片的二维模型尺寸参数进行5倍放大,得到捕蝇草叶片放大后的模型,如图2(b)所示。

受捕蝇草启发的气动柔性驱动器主要由变形层和限制层组成,其工作原理是通过利用变形层与限制层延展性的较大差异及硅橡胶基体结构的不对称性实现腔室的弯曲变形。通过对气动柔性驱动器的变形层腔室进行设计规则的制定,从而得到具有一定规则的腔室设计方案。图2(c)为气动柔性驱动器腔室的设计规则。黑色粗实线为气动柔性驱动器的边界曲线,蓝色实线为气动柔性驱动器的内边界曲线,黑色虚线为无效网格线,绿色虚线为有效网格线,绿色实线为有效腔室外边界,黑色细实线为腔室内边界线,红色点划线为中心线,蓝色实线为角度线。具体规则如下。

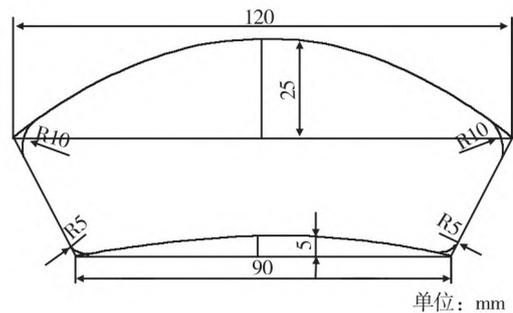
(1)对气动柔性驱动器进行扇形网格划分。对于气动柔性驱动器,考虑到气动柔性驱动器内部腔室边界与驱动器边缘距离较小时,会增加气动柔性驱动器的制作难度以及出现驱动器在压力作用下破裂的情况,因此以距离外边缘为 d_1 建立驱动器的内边界。在对驱动器进行扇形网格划分时,对驱动器上边界曲线以 d_2 为标尺进行等间距纵向平移画线,平移得到的等间距曲线与以 O 点为圆心的角度线相交,其中角度线以 θ 为标尺进行旋转画线,从而得到以 d_1 、 d_2 、 θ 为标尺的叶片网格划分方案。 O 点是上边界曲线的最小曲率半径为标尺的圆的圆心。选择划分后有效的网格,以 d_4 为腔室厚度,得到驱动器的腔室划分方案,从而得到驱动器的扇形腔室设计方案,如图2(d)所示。

(2)通过对气动柔性驱动器的整体结构和腔室设计规则的确定,制作了驱动器并进行弯曲变形预实验。根据驱动器的预实验结果确定驱动器的关键尺寸参数:限制层的厚度设置为 $t=2\text{ mm}$,变形层厚度为 $t_1=4\text{ mm}$,腔室高度 $t_3=2\text{ mm}$,边缘距离 $d_1=2\text{ mm}$,腔室纵向间距 $d_2=4\text{ mm}$,腔室厚度 $d_4=$

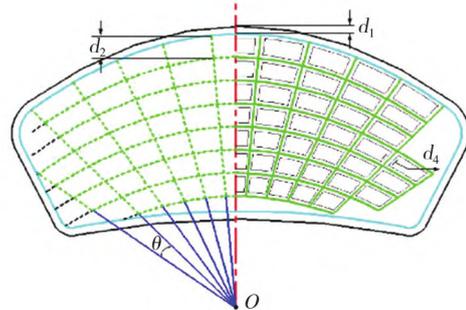
2 mm ,角度 $\theta=5^\circ$ 。通过三维实体建模软件建立气动柔性驱动器的实体模型,为后续的仿真以及实验提供结构和模型基础。



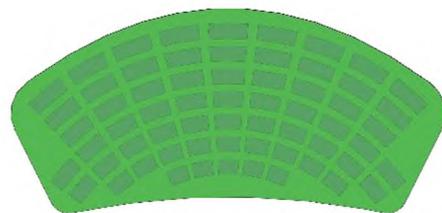
(a) 捕蝇草叶片
(a) Venus flytrap blade



(b) 叶片二维模型
(b) Blade two-dimensional model



(c) 腔室设计规则
(c) Chamber design rules



(d) 驱动器实体模型
(d) Driver solid model

图2 驱动器结构设计

Fig. 2 Structural design of driver

2 气动柔性驱动器的仿真分析与流道设计

2.1 气动柔性驱动器的仿真分析

为了使气动柔性驱动器在实现抓取以及面向无损采摘时能够产生较好的效果,驱动器需要实现多个维度的屈曲变形,呈现包裹状态,且具有一定的刚度,从而达到完全封闭的抓取采摘效果。

对腔室化设计的气动柔性驱动器结构进行仿真分析,采用硅橡胶作为驱动器的基体材料,对硅橡胶进行配比实验、拉伸实验、硬度实验,选择既能够满足大变形要求,又具有较好的形状保持能力的硅橡胶配比组合,结合硅橡胶的本构模型和理论基础确定仿真分析的材料参数。基于超弹性材料的非线性力学理论模型(yeoh 模型),运用 Abaqus 有限元分析软件对驱动器进行仿真分析研究。

在 Abaqus 中对气动柔性驱动器进行有限元仿真分析,流体设置为空气,驱动气压设置为 0.3 kPa,仿真步时为 6 s。根据仿真分析结果观察驱动器的变形情况,图 3 为驱动器的变形情况示意图。仿真的响应指标是 2 个维度的弯曲角度以及变形协调性,2 个维度上的弯曲变形情况会影响驱动器的弯曲性能以及驱动器的包裹性。通过仿真结果不难看出,气动柔性驱动器可以发生 2 个维度变形,呈包裹状态,与真实捕蝇草的变形和捕捉状态相比,具有较高的一致性,达到了较好的仿生设计效果,在实现抓取和无损采摘方面,呈现出较好的性能表现。

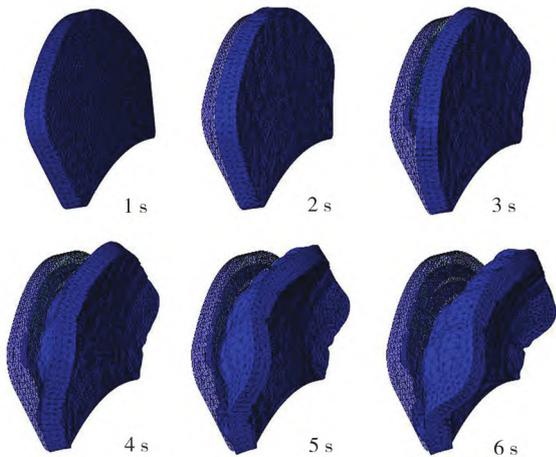


图 3 驱动器的变形仿真结果分析

Fig. 3 Analysis of deformation simulation results of driver

2.2 气动柔性驱动器的流道设计及优化分析

通过对腔室化设计的气动柔性驱动器进行仿

真分析,验证了结构弯曲变形的可行性。在此基础上,对气动柔性驱动器进行基于腔室化的流道设计,通过改变驱动器内部的流道设计方案,研究最佳的流道路径和驱动器腔室布局。流道设计方案的改变会直接影响到驱动器本体的孔隙率和腔室占比,驱动器的孔隙率和腔室占比越大,驱动器结构的抵抗变形能力随之降低,驱动器整体的弯曲变形情况也会发生改变。优化驱动器内部的流道设计,使其不仅能够达到最佳的弯曲变形效果,而且具有较好的形状保持性能和变形恢复能力。

驱动器流道设计仿真如图 4 所示,流道方案 1 为在上述腔室设计规则下的腔室布局,全部腔室在气压激励下发生变形,此时驱动器在 X-Y 面内的弯曲角度为 38.11°,X-Z 面内弯曲角度为 24.46°。在此基础上对其进行流道设计,由图 4 可知,驱动器在 X-Y 面内的最大弯曲角度为 58.96°,发生在方案 5 的流道设计中,此时驱动器在 X-Z 面内的弯曲角度为 32°。驱动器在 X-Z 面内的最大弯曲角度为 33.18°,发生在方案 2 的流道设计中,此时驱动器在 X-Y 面内的弯曲角度为 41.04°。综合考虑 2 个方向上的弯曲情况以及变形协调性,选择流道设计方案 5 进行驱动器性能实验和可行性实验。

编号	流道方案	X-Y视图	X-Z视图	Y-Z视图
1				
2				
3				
4				
5				
6				

图 4 驱动器流道设计仿真

Fig. 4 Flow channel design and simulation of driver

不同流道设计方案与弯曲角度之间的关系如图 5 所示,通过对仿真数据的分析可得,随着气腔占比和气腔孔隙率的升高,气动柔性驱动器在 X-Z 面内的弯曲角度呈现不规则波动,流道的设计方案对于 2 个方向的弯曲有着至关重要的影响,在不同腔

室耦合变形结果下,气动柔性驱动器可以发生较大的弯曲变形。

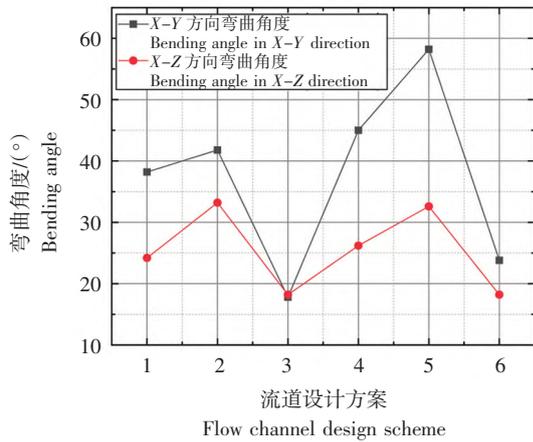


图 5 流道设计方案与弯曲角度之间的关系

Fig. 5 Flow design scheme and the relationship between the bending angle

3 气动柔性驱动器的性能测试与对比分析

3.1 气动柔性驱动器的制作与实验测试平台搭建

通过对气动柔性驱动器进行腔室设计和流道设计,在驱动器仿真结果的指导下,得到了最佳的流道设计方案。气动柔性驱动器的制作,通过 3D 打印的制造方法打印模具,通过模具浇注制造工艺制作驱动器。由图 6 可知,气动柔性驱动器的制作分为两部分:一部分为变形层的制作,一部分为限制层的制作。对于变形层,通过模具运用硅胶填充浇注;对于限制层,在气动柔性驱动器底面铺设编织网,用硅胶填充浇注。再对两者进行复合浇注,使两者能够完整黏合在一起,从而完成气动柔性驱动器的制作。

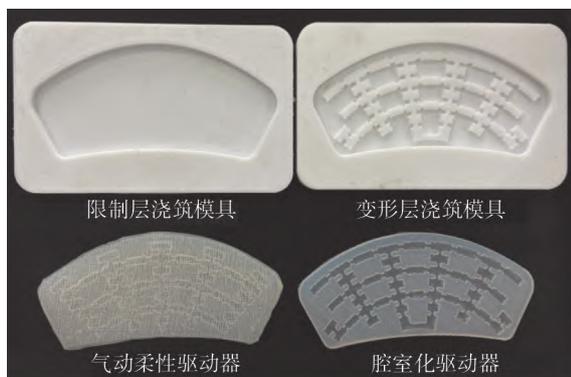


图 6 气动柔性驱动器的制作

Fig. 6 Pneumatic flexible driver production

气动柔性驱动器的实验测试平台如图 7 所示,实验台主要设备有:电源、气泵、PWM 驱动板、外置电位器调速器、气阀和泵管。通过气泵和气阀为气动柔性驱动器提供稳定的气压激励,通过 PWM 驱动板和外置电位器调速器调节气泵电机,实现对气泵流量和流速的调节,从而探索气动柔性驱动器在不同的气压激励情况下的变形情况,以及在不同的流量和流速下响应时间的变化情况。

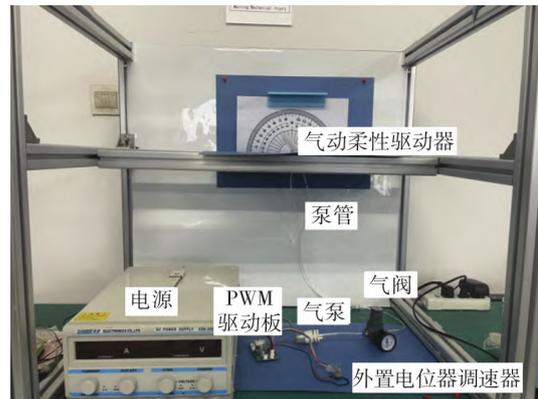


图 7 气动柔性驱动器的实验测试平台

Fig. 7 Experimental test platform for pneumatic flexible driver

3.2 测试与对比

气动柔性驱动器采用气体驱动方式,以硅胶作为本体材料,驱动硅胶发生变形,可以重复使用。对气动柔性驱动器进行弯曲实验,如图 8 所示,由图 8 可知,在 0.3 kPa 气压激励,以及 3 L/min 的流量下,气动柔性驱动器能够在 3 s 内达到稳态。在 2 个维度上对气动柔性驱动器的仿真与实验结果进行了对比,如图 9 所示。通过实验发现,采用腔室化设计的气动柔性驱动器能够发生 2 个维度的弯曲变形。气压为 0.3 kPa 时,气动柔性驱动器 X-Y 面内的弯曲角度为 48.9°,相较于仿真结果,误差为 6°;X-Z 面内弯曲角度为 24.18°,相较于仿真结果,误差为 2.62°。

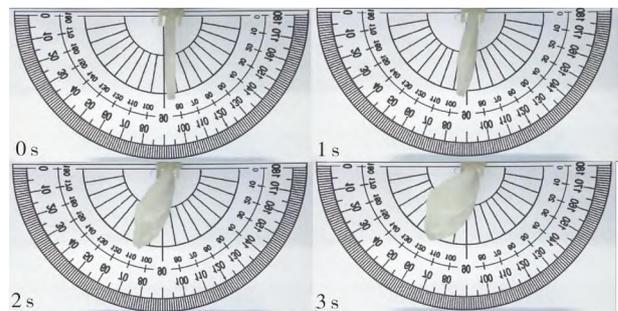


图 8 气动柔性驱动器弯曲实验

Fig. 8 Bending experiments of the pneumatic flexible driver

气动柔性驱动器的弯曲角度随气压的增高而增大,且与仿真结果误差较小,进一步验证了仿真结果的可靠性。受气泵功率限制,气泵最大仅提供 0.35 kPa 的气压,因此可预见,随着气压增大,气动柔性驱动器的弯曲角度也会继续增大,直至气动柔性驱动器腔室破裂。

气动柔性驱动器响应时间与流量的关系如图 10 所示。通过调节气压阀门使其气压值为 0.3 kPa,通过 PWM 驱动板和外置电位器调速器调节气泵电机,从而实现对气泵流量在 0~4 L/min 调节,研究气泵流量与气动柔性驱动器的响应时间之间的关系。流量的大小取决于流体流速与横截面积,由于气泵出口的横截面积一定,因此流量的变化趋势在一定程度上也表征了流速的大小变化,且具有正相关关系。实验表明,随着气泵流量/流速的增加,气动柔性驱动器的响应时间呈现递减趋势,当流量为 3 L/min 时,叶片能够在 3 s 内完成变形,达到稳态。

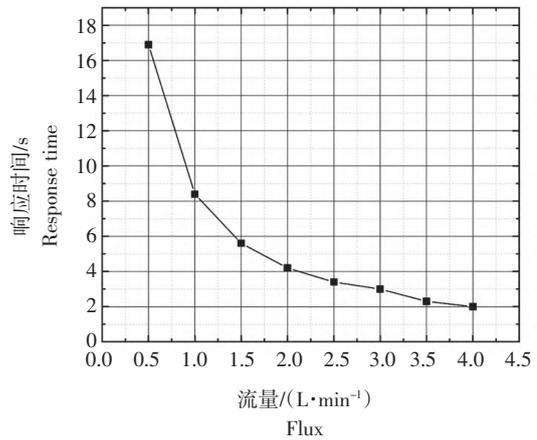


图 10 气动柔性驱动器响应时间与流量的关系

Fig. 10 Relationship between response time and traffic of the pneumatic flexible driver

4 气动柔性驱动器的抓取与无损采摘实验

4.1 气动柔性驱动器的抓取实验

通过气泵和气阀为气动柔性驱动器提供稳定的气压激励,如图 11 所示。将气动柔性驱动器通过夹具以一定的夹角固定,本实验中两驱动器的夹角设置为 80°。当气源打开时,驱动器在气压激励下迅速变形,驱动器末端开始接触。在实验中,通过对不同物体进行抓取,观察其抓取效果。

对正四棱锥、正方体、长方体、球体进行抓取,驱动器发生 2 个维度的耦合弯曲变形,在 X-Y 面内,驱动器能够很好地贴合以及包裹抓取物;在 X-Z 面内,驱动器对于小物体实现全包裹,且贴合度良好。通过对正四棱锥、正方体、长方体、球体进行抓取,气动柔性驱动器能够完成对于规则物体不同形状的

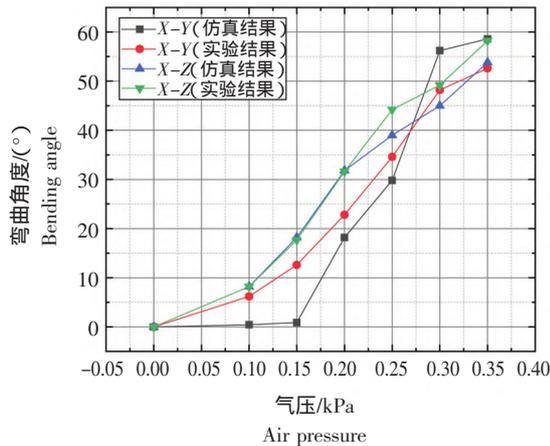


图 9 气动柔性驱动器弯曲角度与气压的关系

Fig.9 Bending angle and pressure relationship of the pneumatic flexible driver

抓取物	X-Y视图	X-Z视图	抓取物	X-Y视图	X-Z视图
 正四棱锥 30 mm × 30 mm × 30 mm			 乒乓球 40 mm		
 正方体 30 mm × 30 mm × 30 mm			 核桃 40 mm 25 mm		
 长方体 30 mm × 30 mm × 100 mm			 小玩偶 60 mm		

图 11 气动柔性驱动器抓取实验

Fig. 11 Grab experiment of the pneumatic flexible driver

自适应抓取,并能够对抓取物实现包裹或者半包裹式抓取,且抓取牢固。在对不规则物体,例如核桃和小玩偶的抓取过程中,基于腔室化设计的气动柔性驱动器,能够很好地完成抓取,对不规则物体实现包裹式与半包裹式自适应抓取。气动柔性驱动器能够在3 s内完成对于目标物体的抓取,在关闭气压激励时,驱动器能够在室温下快速恢复至初始状态,能够在短时间内实现精准抓取任务,具有良好的抓取性能。驱动器的响应时间以及抓取周期可以根据抓取任务进行有针对性地设置和调整,从而适应不同的抓取任务。受限于气动柔性驱动的结构尺寸,驱动器在实现包裹式抓取时,对于抓取目标具有一定的尺寸要求。通过改变气动柔性驱动的结构尺寸能够实现对于不同尺寸大小的物体包裹式抓取和半包裹式自适应抓取。

4.2 气动柔性驱动器的无损采摘实验

对草莓以及花生柿子进行抓取实验,如图12所示。实验选取草莓的小果和大果进行采摘实验,小果草莓直径为45 mm,质量约25 g;大果草莓直径为55 mm,质量约42 g。气动柔性驱动器在气压激励下,发生弯曲变形,对草莓进行抓取。对于小果草莓,驱动器能够实现2个维度的包裹式自适应抓取,对于大果能够实现2个维度的半包裹式自适应抓取,且抓取牢固,抓取效果良好。通过调节气泵可以实现对于驱动器抓取时间和周期的精确控制,通过改变输入气压激励大小可以实现对于抓取力的精确调控,从而实现对于不同成熟度草莓的无损采摘。

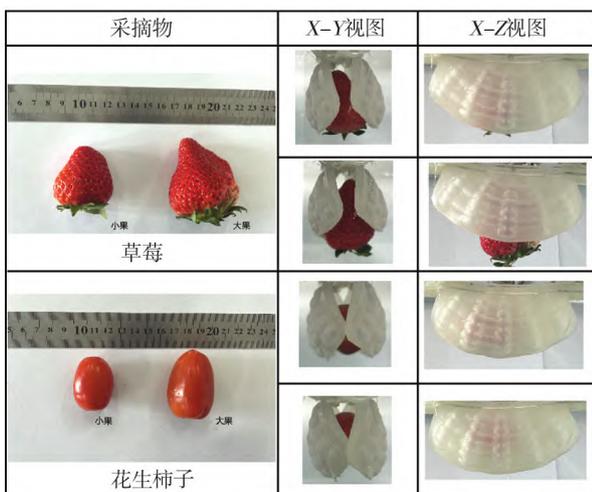


图12 气动柔性驱动器采摘实验

Fig. 12 Picking experiment of the pneumatic flexible driver

在对花生柿子进行抓取采摘时,同样选取小果和大果,小果花生柿子的直径为25 mm,质量约20 g;大果花生柿子直径为35 mm,质量约35 g。气动柔性驱动器在气压激励下,发生弯曲变形,对花生柿子进行抓取。对于花生柿子,驱动器能够实现2个维度的包裹式自适应抓取,且抓取牢固,抓取效果良好。

5 结论

本研究提出并设计了一种面向无损采摘的腔室化设计驱动器,在捕蝇草叶片的启发下,对驱动器进行腔室化设计,制定了腔室设计规则;在此基础上对驱动器进行了仿真分析以及流道设计仿真分析,研究探索了流道设计思路 and 方案;对驱动器进行了性能测试和对比分析,验证了结构设计的可行性和可靠性。在0.3 kPa的气压激励和3 L/min的流速下,驱动器能够在3 s内完成2个维度的弯曲变形,在X-Y面内的弯曲角度为48.9°,X-Z面内弯曲角度为24.18°,与仿真结果具有较高的一致性。最后,完成了气动柔性驱动器的抓取实验和无损采摘实验,气动柔性驱动器能够完成对于不同形状大小的物体自适应抓取和对采摘物体的无损采摘,能够对抓取物实现包裹或者半包裹式抓取,且抓取效果与采摘效果良好。在本研究中对气动柔性器本体进行了设计以及性能分析,气动柔性驱动器作为末端执行器,结合机械臂以及其他作业平台可以适应不同工作的需要完成不同的任务,下一步将对驱动器结合草莓采摘平台,辅助以相应装置,实现对草莓的定位、采摘和收集等功能,为驱动器的进一步应用和无损采摘研究应用提供参考价值和研究思路。

【参 考 文 献】

- [1] 王丽丽,郭艳玲,王迪,等. 果蔬采摘机器人研究综述[J]. 林业机械与木工设备,2009,37(1):10-11,14.
WANG L L, GUO Y L, WANG D, et al. Overview of study on fruit and vegetable picking robots[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2009, 37(1): 10-11, 14.
- [2] 逮泽鹏,许威. 振动式果蔬采摘机械的研究现状与发展趋势[J]. 林业机械与木工设备,2022,50(3):30-36.
LU Z P, XU W. Research status and development trend of vibrating fruit and vegetable picking machinery[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2022, 50(3): 30-36.
- [3] 孙燕良,张厚江,翟艳凤,等. 基于PLC气动机械手的研究设计[J]. 森林工程,2011,27(3):45-50.

- SUN Y L, ZHANG H J, ZHAI Y F, et al. Research design of pneumatic manipulator based on PLC [J]. *Forest Engineering*, 2011, 27(3): 45-50.
- [4] 李志鹏,张超,王博男,等. 基于振动策略的蓝莓采摘机的设计研究[J]. *森林工程*, 2020, 36(2): 55-61.
- LI Z P, ZHANG C, WANG B N, et al. Research on design of blueberry picker based on vibration strategy [J]. *Forest Engineering*, 2020, 36(2): 55-61.
- [5] 李志鹏,王茜,杨凤英. 蓝莓采摘车车架刚度有限元分析及弯曲扭转刚度试验[J]. *森林工程*, 2013, 29(6): 82-85.
- LI Z P, WANG Q, YANG F Y. Rigidity ANSYS analysis for body and frame of blueberry harvesters and torsional and bending rigidity experiment [J]. *Forest Engineering*, 2013, 29(6): 82-85.
- [6] 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 J H, WANG T, HONG J, et al. Review of soft-bodied manipulator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(13): 19-28.
- [7] 许继葵,石银霞,单鲁平,等. 隧道复杂障碍物环境中机械臂避障方法研究[J]. *自动化技术与应用*, 2020, 39(1): 88-92.
- XU J K, SHI Y X, SHAN L P, et al. Research on rapid determination of joint fault of series manipulator [J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2020, 39(1): 88-92.
- [8] 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 Y W, GENG D X, LIU X M, 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.
- [9] 彭艳,刘勇敢,杨扬,等. 软体机械手爪在果蔬采摘中的应用研究进展[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(9): 11-20.
- PENG Y, LIU Y G, YANG Y, et al. Research progress on application of soft robotic gripper in fruit and vegetable picking [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(9): 11-20.
- [10] 王田苗,郝雨飞,杨兴帮,等. 软体机器人: 结构、驱动、传感与控制[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(13): 1-13.
- WANG T M, HAO Y F, YANG X B, et al. Soft robotics: structure, actuation, sensing and control [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(13): 1-13.
- [11] HUGHES J, CULHA U, GIARDINA F, et al. Soft manipulators and grippers: a review [J]. *Frontiers in Robotics and AI*, 2016, 3: 69.
- [12] RUS D L, TOLLEY M. Design, fabrication and control of soft robots [J]. *Nature*, 2015, 521(7553): 467-475.
- [13] BOGUE R. Flexible and soft robotic grippers: the key to new markets? [J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2016, 43(3): 258-263.
- [14] WANG L Y, IIDA F. Deformation in soft-matter robotics: a categorization and quantitative characterization [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2015, 22(3): 125-139.
- [15] 侯涛刚,王田苗,苏浩鸿,等. 软体机器人前沿技术及应用热点 [J]. *科技导报*, 2017, 35(18): 20-28.
- HOU T G, WANG T M, SU H H, et al. Review on soft-bodied robots [J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(18): 20-28.
- [16] ELANGO N, FAUDZI A A M. A review article: investigations on soft materials for soft robot manipulations [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 80(5/6/7/8): 1027-1037.
- [17] WANG H M, ZHU Y L, ZHAO D B, et al. Performance investigation of cone dielectric elastomer actuator using Taguchi method [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(4): 685.
- [18] SHINTAKE J, ROSSET S, SCHUBERT B, et al. Versatile soft grippers with intrinsic electroadhesion based on multifunctional polymer actuators [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(2): 231-238.
- [19] SHENQ, TRABIA S, STALBAUM T, et al. A multiple-shape memory polymer-metal composite actuator capable of programmable control, creating complex 3D motion of bending, twisting, and oscillation [J]. *Scientific reports*, 2016, 6(1): 24462.
- [20] LASCHI C, CIANCHETTI M, MAZZOLAI B, et al. Soft robot arm inspired by the Octopus [J]. *Advanced Robotics*, 2012, 26(7): 709-727.
- [21] FIROUZEH A, SALERNO M, PAIK J. Soft pneumatic actuator with adjustable stiffness layers for Multi-DoF Actuation [C]// 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). September 28 - October 2, 2015, Hamburg, Germany. IEEE, 2015: 1117-1124.