

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.12.009

# 柔性吞咽机械手的结构与样机试验\*

董增雅<sup>1</sup>, 高 谦<sup>2</sup>, 高国华<sup>1\*</sup>, 王 皓<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124; 2. 北京生产力促进中心, 北京 100088)

**摘要:**为解决表皮较为脆弱的果实抓取过程中易造成损伤的问题,基于柔性 3D 打印材料提出了一种结构精简、具有吞咽功能的柔性机械手。对柔性机械手的吞咽动作流程进行了分析,结合 D-H 坐标法和常曲率变形建立了单手腕的连杆参数表,得到了单手腕的运动学方程;在搭建柔性机械手样机的基础上,对气动元件的形变量进行了测试试验,采用 Matlab 进行数据拟合,得到了驱动角度与驱动气压的关系式;利用摄像机对机械手抓取西红柿的过程进行了拍摄,通过 GetData 获得驱动元件的角度,得到了机械手抓取过程与驱动角度的关系。试验结果表明:通过角度的改变可以实现对柔软果实的良好抓取和吞咽效果。

**关键词:**柔性机械手;吞咽;结构设计;运动学;3D 打印

中图分类号:TH122;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)12-1304-06

## Structure design and prototype test of flexible swallowing manipulator

DONG Zeng-ya<sup>1</sup>, GAO Qian<sup>2</sup>, GAO Guo-hua<sup>1</sup>, WANG Hao<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Productivity Center, Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the fruit epidermis is easily damaged during the process of harvesting, a flexible manipulator with structural simplification and swallowing function was proposed based on the flexible 3D printing material. The swallowing action flow of a flexible manipulator was analyzed. A single wrist connecting rod parameter was established by combining the D-H coordinate method and the constant curvature deformation, then the kinematic equations of the single wrist were obtained. On the basis of the prototype of the flexible manipulator, the shape variables of the pneumatic components were tested, and the relationship between the driving angle and the driving pressure was obtained by using Matlab to fit the data. The process of grasping tomato by flexible manipulator was captured by camera. The angle of driving element was obtained by GetData, and the relationship between grasping process and driving angle was obtained. The experimental results show that the favorable grasping and swallowing effect of soft fruit can be achieved by changing the driving angle.

**Key words:** flexible manipulator; swallowing; structural design; kinematics; 3D printing

## 0 引 言

目前,我国农业生产领域已经比较广泛使用机器人<sup>[1]</sup>。我国果树种植面积超过 1 000 万公顷,年产量超过 2 亿吨<sup>[2]</sup>。果实采摘是农业生产中最耗时费力的环节。采摘自动化能提高劳动生产率和产品质量,确

保适时采收果蔬,解决劳动力不足等问题<sup>[3-4]</sup>。采摘机器人是智能农业机械化的发展方向之一,具有广阔的应用前景<sup>[5]</sup>。

机械手是采摘机器人实现果实采摘的核心部件,由于果皮较为脆弱,抓取过程中容易造成损伤,对机械手具有一定的柔性要求<sup>[6]</sup>。与传统刚性机械手相比,

收稿日期:2018-05-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675011)

作者简介:董增雅(1991-),女,河北保定人,硕士研究生,主要从事农业机械、柔性机器人、创新方法应用方面的研究。E-mail:15933575526@163.com

通信联系人:高国华,男,教授,博士生导师。E-mail:ggh0912@126.com

柔性机械手具有质量轻、体积小、速度高、负载能力强、能耗小、成本低等优点。

目前,国内外对机械手已开展了大量的研究,但是存在通用性较差、结构复杂、控制困难、柔顺适应性差等问题。加拿大制作了自适应机械手指 PaCoMe,无需传感器,控制简单,但柔顺性较差<sup>[7]</sup>;葡萄牙研制了依据绳线驱动的柔性连接手,机构本身容易倾斜<sup>[8]</sup>;哈佛大学研制了气动型软体机器人,可以抓取鸡蛋但是加工困难<sup>[9]</sup>;美国研制了一种西红柿采摘机械手,属于高度欠驱动机构,手指易发生弯曲而导致果实抓取的失败<sup>[10]</sup>;卧龙岗大学基于 3D 打印制造了柔性手指,刚度可调,能抓取最大重量为 180 g 的瓶子<sup>[11-12]</sup>;浙江大学利用欠驱动原理研制了一款结构简单的末端执行装置<sup>[13]</sup>;南京理工大学基于刚柔相结合的方案制作了一种软体驱动三触手柔性手爪<sup>[14-15]</sup>;浙江工业大学王志恒等人<sup>[16-20]</sup>设计了 ZJUT 气动柔性机械手;杨婕等人<sup>[21-22]</sup>采用铝合金研制了欠驱动灵巧机械手;浙江工业大学以气动柔性关节和扭转关节为基础设计了柔性手爪<sup>[23]</sup>。

通过国内外的研究现状分析可知,机械手的结构分为 2 类:一类多是关节型,手指数目一般为 3~5 个,手指关节的运动副多为转动副,此类机械手一般是刚性接触,通过多关节手指完成抓取,但是结构复杂、质量大、柔顺性差;另一类为基于新技术、新材料的机械手,该类机械手自适应抓取效果好、驱动简单,但存在加工困难、成本高等问题。

因此,本文结合气压驱动设计一款结构精简、柔顺性好、成本低的机械手。

## 1 柔性吞咽机械手结构设计

### 1.1 设计目标

基于前期对机械手的调研和分析,本文确定了具体设计目标:

- (1) 柔顺性。机械手需具有自适应变形的能力和良好的抓取效果;
- (2) 结构简单。结构复杂的机械手造成装配困难、控制复杂,所以结构越简单,性能越优良;
- (3) 结构创新。减少或者合并动作的执行,必将对机械手的抓取性能和效率有所改善。

### 1.2 整体结构设计

柔性吞咽机械手具有柔性自适应抓取和吞咽的功能,结构如图 1 所示。

机械手主要由柔性手指、气动元件、气管接头、手

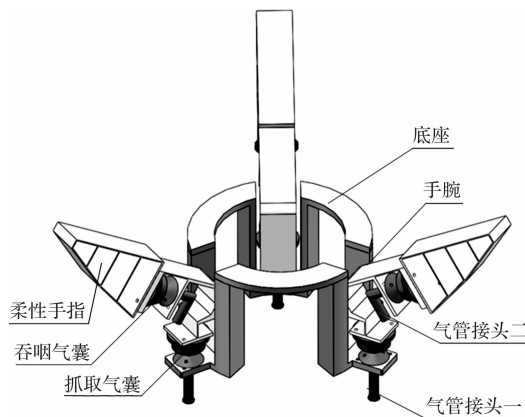


图 1 柔性吞咽机械手

腕和底座组成。柔性手指为三角形结构,底座中间为中空结构。手腕的上、下两部分均可弯曲,气动元件为可以压缩和伸长的气囊。通过气囊的压缩和伸长驱动手腕的变形,实现对球形果实的抓取和吞咽。

手腕设计为一体件,在气动元件的驱动下进行弯曲变形,并具有弹性变形的功能,当驱动完成时,恢复至原状。手腕顶端设有燕尾槽,可与柔性手指底端的燕尾槽相连,由于手腕和柔性手指的材料性能不同,装配牢固可靠。

为了质量轻便,将驱动源后置,本文设计了气动元件,气动元件包括抓取气囊和吞咽气囊。抓取气囊固定在水腕下部,气嘴通过底座的圆孔直接安装在气管接头一上。吞咽气囊固定在水腕上部,通过水腕上的圆孔与气管接头二相连。笔者通过对气动元件气囊的伸长、缩短进行驱动,从而实现柔性吞咽机械手的抓取和吞咽功能。

### 1.3 流程分析

机械手的柔性主要体现在柔性手指和手腕上。气动元件驱动手腕弯曲,与柔性手指的变形协调配合,对接触对象进行抓取。具体的动作流程如图 2 所示。

(1) 抓取球形物。吞咽气囊充入负压气体处于压缩状态,抓取气囊充入正压气体带动手腕弯曲,使得柔性手指处于竖直状态,与物体接触后柔性手指自适应物体变形,完成抓取功能;

(2) 包裹球形物。抓取气囊持续输入正压气体保持不变,吞咽气囊充入正压气体,达到设定值,此时柔性手指底端间距稍微变大,柔性手指指尖聚拢,使得柔性手指适应球形物发生变形,完成包裹;

(3) 吞咽球形物。吞咽气囊充入正压气体至设定值保持不变,减小抓取气囊正压气体,此时柔性手指的上部聚拢,柔性手指底端间距变大,球形物下落,中空底座与手腕的下部组成吞咽通道,物体下落到吞咽

通道内,完成吞咽过程;

(4)减小吞咽气囊正压气体,柔性手指打开恢复至气囊自由状态下,此时抓取气囊和吞咽气囊均充入负压气体处于压缩状态,柔性手指处于打开状态。

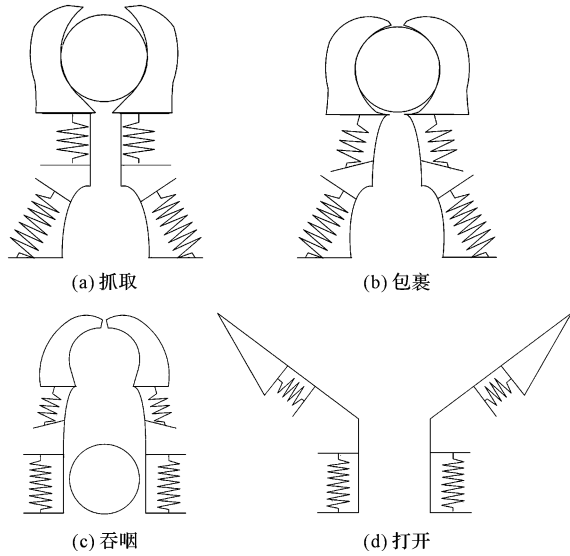


图 2 动作流程示意图

## 2 单手腕运动学分析

手腕下部分相对于底座存在一个转动,手腕上部分相对于中间较厚的部分也有一个转动,故整个手腕有两个转动自由度。手腕不发生弯曲变形的较厚部分直接简化成连杆,发生弯曲变形的两部分简化成常曲率圆弧,柔性手指直接简化成连杆。

平面四杆柔性机械手如图 3 所示。

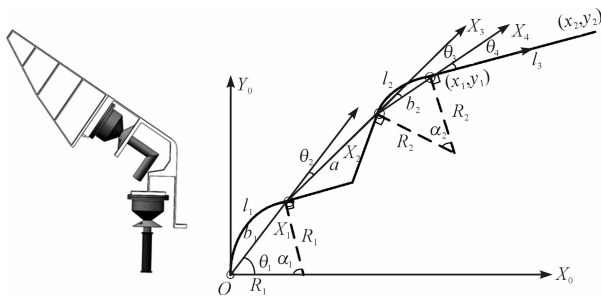


图 3 平面四杆柔性机械手示意图

$b_1$ —连杆 1 长度; $a$ —连杆 2 长度; $b_2$ —连杆 3 长度; $l_3$ —连杆 4 长度; $(x_0, y_0)$ —基础坐标系,固定在底座上; $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$ ,  $(x_4, y_4)$ —连体坐标系,分别固结在连杆 1、2、3、4 并随它们一起运动;关节角顺时针为负逆时针为正,假定  $z_0, z_1, z_2, z_3$  垂直于纸面向外

通过连杆坐标系可以得到柔性机械手的连杆参数,如表 1 所示。

表 1 连杆参数

连杆 $i$	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	$a_{i-1}/\text{mm}$	$d_n/\text{mm}$	$\theta_n/(^{\circ})$
1	0	0	0	$\theta_1$
2	0	$b_1$	0	$\theta_2$
3	0	$a$	0	$\theta_3$
4	0	$b_2$	0	$\theta_4$

本研究运用 D-H 方法建立其运动学方程。

可以得到第  $i$  个坐标系相对于第  $i-1$  个坐标系的齐次变换矩阵分别为:

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & b_1 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_4 & -\sin\theta_4 & 0 & b_2 \\ \sin\theta_4 & \cos\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由此可知,第 4 个连杆相对于基坐标系的变换矩阵为:

$${}^0_4\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} \cdot {}^1_2\mathbf{T} \cdot {}^2_3\mathbf{T} \cdot {}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{1234} & -\sin\theta_{1234} & 0 & b_2\cos\theta_{123} + a\cos\theta_{12} + b_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_{1234} & \cos\theta_{1234} & 0 & b_2\sin\theta_{123} + a\sin\theta_{12} + b_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

那么,连杆 4 末段点在基础坐标系中的位置矢量为:

$${}^T\mathbf{T} = {}^0_4\mathbf{T} \cdot {}^4_T\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{1234} & -\sin\theta_{1234} & 0 & L_3\cos\theta_{1234} + b_2\cos\theta_{123} + a\cos\theta_{12} + b_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_{1234} & \cos\theta_{1234} & 0 & L_3\sin\theta_{1234} + b_2\sin\theta_{123} + a\sin\theta_{12} + b_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$\theta_{1234} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4, \theta_{123} = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3, \theta_{12} = \theta_1 + \theta_2.$$

即端点坐标为:

$$\begin{cases} x_1 = b_2 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a \cos(\theta_1 + \theta_2) + b_1 \cos\theta_1 \\ y_1 = b_2 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) + a \sin(\theta_1 + \theta_2) + b_1 \sin\theta_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_2 = L_3 \cos\theta_{1234} + b_2 \cos\theta_{123} + a \cos\theta_{12} + b_1 \cos\theta_1 \\ y_2 = L_3 \sin\theta_{1234} + b_2 \sin\theta_{123} + a \sin\theta_{12} + b_1 \sin\theta_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\alpha_1$ —圆心角 1; $b_1$ —圆心角  $\alpha_1$  对应的弦长; $L_1$ —圆心角  $\alpha_1$  对应的弧长; $\alpha_2$ —圆心角 2; $b_2$ —圆心角  $\alpha_2$  对应的弦长; $L_2$ —圆心角  $\alpha_2$  对应的弧长。

由弦长公式得:

$$b_1 = 2 \frac{L_1}{\alpha_1} \cdot \sin \frac{\alpha_1}{2} \quad (9)$$

$$b_2 = 2 \frac{L_2}{\alpha_2} \cdot \sin \frac{\alpha_2}{2} \quad (10)$$

由平面几何关系可以得到  $\theta_{1,2}$  与  $\alpha_{1,2}$  的关系:

$$\begin{cases} \theta_1 = \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha_1}{2}, \theta_2 = -\left(\frac{\alpha_1}{2} - \frac{11\pi}{60}\right) \\ \theta_3 = -\left(\frac{\alpha_2}{2} - \frac{2\pi}{15}\right), \theta_4 = -\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) \end{cases} \quad (11)$$

最后得到柔性手指的端点坐标:

$$\begin{cases} x_1 = 2 \frac{L_1}{\alpha_1} \sin \frac{\alpha_1}{2} \cos\left(\frac{1}{2}\pi - \frac{\alpha_1}{2}\right) + a \cos\left(\frac{41}{60}\pi - \alpha_1\right) + \\ 2 \frac{L_2}{\alpha_2} \sin \frac{\alpha_2}{2} \cos\left(\frac{49}{60}\pi - \alpha_1 - \frac{\alpha_2}{2}\right) \\ y_1 = 2 \frac{L_1}{\alpha_1} \sin \frac{\alpha_1}{2} \sin\left(\frac{1}{2}\pi - \frac{\alpha_1}{2}\right) + a \sin\left(\frac{41}{60}\pi - \alpha_1\right) + \\ 2 \frac{L_2}{\alpha_2} \sin \frac{\alpha_2}{2} \sin\left(\frac{49}{60}\pi - \alpha_1 - \frac{\alpha_2}{2}\right) \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + L_3 \cos\left(\frac{49}{60}\pi - \alpha_1 - \alpha_2\right) \\ y_2 = y_1 + L_3 \sin\left(\frac{49}{60}\pi - \alpha_1 - \alpha_2\right) \end{cases} \quad (13)$$

其中, $L_1 = 42, L_2 = 28, L_3 = 102, a = 60.67$ 。

假设给定关节变量  $\alpha_1, \alpha_2$  的值,利用上式就可以计算出柔性机械手的位姿。

### 3 柔性吞咽机械手样机验证

#### 3.1 样机搭建

本文设计的柔性吞咽机械手采用 FDM 型 3D 打印加工制作而成,手腕和底座材料为 PLA(生物降解塑料聚乳酸);柔性手指、抓取气囊、吞咽气囊材料为 TPU(热塑性聚氨酯弹性体)。

组装完成的柔性机械手的质量仅为 385 g。其中气动部分主要包括气管接头和真空发生器,气泵通过气管充入正压气体,气动元件膨胀伸长;依靠真空发生器充入负压气体,气动元件收缩。

#### 3.2 气动元件形变量标定试验

驱动元件安装在样机中,形变量受到手腕的制约,因此若要达到确定的位置,需要对驱动压力和驱动角度进行标定。抓取气囊的驱动角度为  $A$ ,吞咽气囊的驱动角度为  $B$ ,气囊标定试验如图 4 所示。

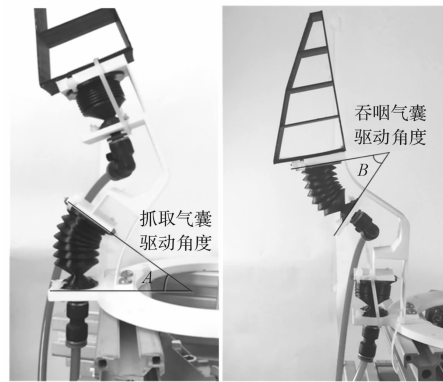
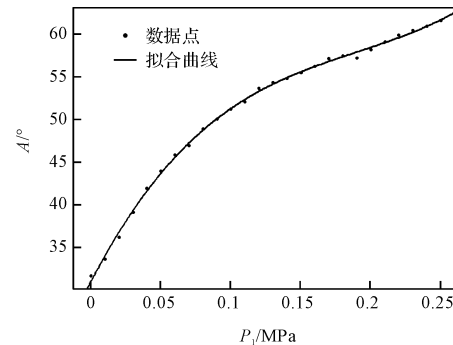


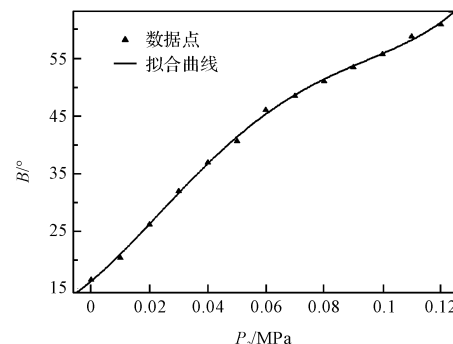
图 4 气囊标定试验

抓取和吞咽气囊的标定试验分开进行。当进行抓取气囊试验时,吞咽气囊用扎带捆住,只对抓取气囊充气,通过气压表来控制压力,并利用摄像机对驱动元件变形过程进行拍摄记录,从而得到角度值  $A$ ,同理得到  $B$ 。

本研究利用 Matlab 软件的数据拟合模块 cftool 对测得数据进行拟合,拟合曲线如图 5 所示。



(a) 抓取气囊拟合曲线



(b) 吞咽气囊拟合曲线

图 5 气动元件拟合曲线

抓取气囊驱动角度  $A$  与气压  $P_1$  最后拟合的公式为:

$$A = a \times P_1^3 + b \times P_1^2 + c \times P_1 + d \quad (14)$$

式中: $a$ —系数,取值为 2 437; $b$ —系数,取值为 -1 385; $c$ —系数,取值为 316.4; $d$ —系数,取值为 31.07。

吞咽气囊驱动角度  $B$  与气压  $P_2$  最后拟合的公式为:

$$B = a \times P_2^4 + b \times P_2^3 + c \times P_2^2 + d \times P_2 + e \quad (15)$$

式中: $a$ —系数, $a = 4.334 \times 10^5$ ; $b$ —系数, $b = -1.018 \times 10^5$ ; $c$ —系数, $c = 5 579$ ; $d$ —系数, $d = 421.6$ ; $e$ —系数, $e = 16.26$ 。

这样,通过拟合公式便可以由气压控制气囊的驱动角度。

### 3.3 抓取试验及结果分析

笔者设定抓取气囊的压力值为 0.25 MPa,吞咽气囊的压力值为 0.12 MPa。本研究对西红柿进行 15 次抓取试验。试验流程如图 6 所示。

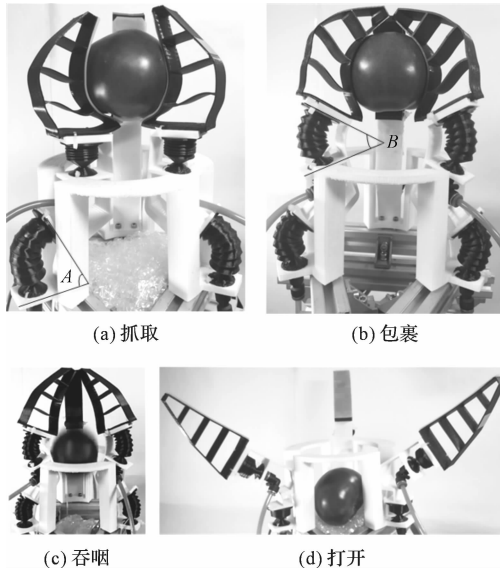


图 6 样机抓取试验

通过样机试验可以发现:柔性手指在与西红柿的接触过程中变形良好,气动元件灵活,果实下落过程顺滑,基本满足柔性机械手的设计要求。

本研究对照片进行处理,通过 GetData 软件得到不同过程中相对应的驱动元件的角度,对 15 次数据取平均值,如表 2 所示。

表 2 驱动角度平均值

动作流程	抓取气囊角度 $A/(\circ)$	吞咽气囊角度 $B/(\circ)$
抓取	60.8	5.4
包裹	56.6	49.9
吞咽	40.3	53.4
打开	0	5.1

通过角度的变化,柔性机械手实现了良好的抓取和吞咽功能,也验证了运动学方程的正确性。按照理论分析,吞咽气囊角度  $B$  在抓取和打开过程中的值都为 0,但由于多次试验气囊内部存有残留气体,使得角度测量值有所误差。

## 4 结束语

本文利用 D-H 坐标法和常曲率变形建立了单手腕的运动学方程,基于 3D 打印搭建了样机,并进行了气动元件形变量的标定试验和对西红柿的抓取试验。试验结果表明:柔性机械手可以实现果实的无损抓取、达到良好的吞咽效果,也验证了运动学分析的正确性。

该结构精简、自适应性强,通过柔性手指的自适应变形抓取对象,通过角度的控制可以实现良好的吞咽效果。

### 参考文献 (References):

- [1] 任 磊. 三自由度机械手控制系统的设计[D]. 沈阳:东北大学信息科学与工程学院,2011.
- [2] 杨光照. 变约束连杆机构机械手的设计研究[D]. 无锡:江南大学机械工程学院,2016.
- [3] 张凯良,杨 丽,王粮局,等. 高架草莓采摘机器人设计与试验[J]. 农业机械学报,2012,43(9):165-172.
- [4] 梁喜凤,苗香雯,崔绍荣,等. 果实采摘机械手机构设计与工作性能分析[J]. 农机化研究,2004(2):133-135,139.
- [5] 田素博,邱立春,秦军伟,等. 国内外采摘机器人机械手结构比较的研究[J]. 农机化研究,2007(3):195-197.
- [6] 李秦川,胡 挺,武传宇,等. 果蔬采摘机器人末端执行器研究综述[J]. 农业机械学报,2008,39(3):175-179,186.
- [7] LIONEL B. Enhancing versatility and safety of industrial grippers with adaptive robotic fingers [C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Hamburg:IEEE,2015.
- [8] TAVAKOLI M, MARQUES L, DE ALMEIDA A T. Flexirigid, a novel two phase flexible gripper[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Tokyo:IEEE,2013.
- [9] ILIEVSKI F, MAZZEO A D, SHEPHERD R F, et al. Soft robotics for chemists[J]. *Angewandte Chemie*, 2011, 123(8):1930-1935.
- [10] LING P P, EHSANI R, TING K C, et al. Sensing and end-effector for a robotic tomato harvester[C]. 2004 ASAE Annual Meeting, St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers,2004.
- [11] MUTLU R, TAWK C, ALICI G, et al. A 3D printed monolithic soft gripper with adjustable stiffness [C]. Confer-

- ence of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing: IEEE, 2017.
- [12] ANVER H M C M, MUTLU R, ALICI G. 3D printing of a thin-wall soft and monolithic gripper using fused filament fabrication [C]. IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, New York: IEEE, 2017.
- [13] 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.
- [14] 徐森鑫. 气压驱动软体夹持装置研究[D]. 南京: 南京理工大学机械工程学院, 2015.
- [15] 徐森鑫, 李小宁, 郭钟华. 新型柔性夹持装置软体手指的数学模型研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(5): 99-102.
- [16] 肖宇. 气动软体机械手设计及实验研究[D]. 南京: 东南大学自动化学院, 2016.
- [17] 王志恒. 基于 FPA 的新型气动机器人多指灵巧手研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2011.
- [18] 钱少明, 王志恒, 杨庆华. 基于气动柔性驱动器的三自由度手指指端输出力特性研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(11): 1438-1442.
- [19] WANG Z, ZHANG L, BAO G, et al. Design and control of integrated pneumatic dexterous robot finger[J]. 中南大学学报: 英文版, 2011, 18(4): 1105-1114.
- [20] ZHANG L, WANG Z, YANG Q, et al. Development and simulation of ZJUT hand based on flexible pneumatic actuator FPA[C]. International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun: IEEE, 2009.
- [21] 杨婕, 赵晓栋, 宋申祥, 等. 果蔬采摘欠驱动灵巧机械手的设计[J]. 机械工程师, 2015(5): 93-95.
- [22] 杜巧连, 陈旭辉, 舒柏和. 汽车离合器磨床自动送料机械手的设计[J]. 机械, 2017(10): 38-41, 77.
- [23] 鲍官军. 气动柔性驱动器 FPA 的特性及其在多指灵巧手设计中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学机械工程学院, 2006.

[编辑: 李辉]

## 本文引用格式:

董增雅, 高谦, 高国华, 等. 柔性吞咽机械手的结构与样机试验[J]. 机电工程, 2018, 35(12): 1304-1309.

DONG Zeng-ya, GAO Qian, GAO Guo-hua, et al. Structure design and prototype test of flexible swallowing manipulator[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(12): 1304-1309. <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1278 页)

- [7] ODEGARD G, KUMOSA M. Elastic-plastic and failure properties of a unidirectional carbon/PMR-15 composite at room and elevated temperatures [J]. **Composites science and technology**, 2000, 60(16): 2979-2988.
- [8] HYER M, HERAKOVICH C, MILKOVICH S, et al. Temperature dependence of mechanical and thermal expansion properties of T300/5208 graphite/epoxy [J]. **Composites**, 1983, 14(3): 276-280.
- [9] ZHANG Z, YE G, WU H, et al. Prediction and control of the bi-stable functionally graded composites by temperature gradient field [J]. **Materials Science**, 2015, 21(4): 543-548.
- [10] 张征, 柴国钟, 姜少飞. 双稳态可变形复合材料结构[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [11] 潘豪, 柴国钟, 张征, 等. 温湿环境反对称铺设圆柱壳结构的双稳态模型与变形调控研究[J]. 机电工程, 2017, 34(11): 1235-1242.
- [12] 张征, 潘豪, 叶钢飞, 等. 温度对 T700/3234 反对称铺设圆柱壳结构的双稳态特性影响[J]. 航空材料学报, 2016, 36(5): 70-76.
- [13] CAMPBELL M D, BURLEIGH D D. Thermophysical properties data on graphite/polyimide composite materials [J]. **Astm Special Technical Publication**, 1982(768): 54-72.
- [14] ESKSTEIN E, PIRRERA A, WEAVER P M. Morphing high-temperature composite plates utilizing thermal gradients [J]. **Composite Structures**, 2013, 100(5): 363-372.
- [15] ZHANG Z, YE G, WU H, et al. Thermal effect and active control on bistable behaviour of anti-symmetric composite shells with temperature-dependent properties [J]. **Composite Structure**, 2015(124): 263-271.

[编辑: 周昱晨]