

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.042

基于气动柔性驱动器的球果采摘末端抓持器*

鲍官军 张水波 陈亮 杨庆华

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310032)

摘要:为实现球果的安全、可靠采摘,基于气动柔性驱动器(FPA)设计了球果采摘末端执行器,主要由3个FPA驱动的手指和基座构成。建立了手指指端在基座坐标系内的运动学方程,分析了末端抓持器在任意姿态下进行球果抓握的力学过程,建立了球果抓持数学模型。实验结果表明,所设计的球果采摘末端执行器可对成熟球果进行任意姿态的抓握,建立的数学模型可用于实际的采摘过程控制。

关键词: 采摘机器人 末端执行器 气动柔性驱动器

中图分类号: TP241 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)05-0242-05

Design of Spherical Fruit End-grasper Based on FPA

Bao Guanjun Zhang Shuibao Chen Liang Yang Qinghua

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology,
Ministry of Education and Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: With the aim to realize the safe and stable picking of spherical fruit, a type of picking end-grasper was designed based on the flexible pneumatic actuator (FPA). The end-grasper was mainly composed of a base and three fingers driven by FPAs. The kinematics of finger tips in the base coordinate was established. The force model of spherical fruit grasping under discretional orientation was analyzed and the grasping mathematic model was built. The experimental results showed that the designed spherical fruit end-grasper could pick and hold mature fruit under discretional orientation and the mathematic model could be adopted in fruit-picking practice control.

Key words: Picking robot End-effector Flexible pneumatic actuator

引言

果实采摘季节性强、时间短、劳动强度大、费用高,是水果生产整个周期中最耗时、最费力的一个环节。目前果实采摘基本上还是人工作业,自动化程度低、时效性差、易损伤果实,并且采摘费用占成本的33%~50%^[1]。故进行农业果实的自动化采摘设备研制是非常有必要的。由于一般农业果实较为脆弱或敏感,并且形状各异、生长环境相对复杂,因此农业果实采摘末端抓持器/执行器的设计通常被认为是农业机器人研制的核心技术之一^[2]。

国内外的果蔬采摘末端执行器基本都是刚性的机械手指结构,为保护目标果实,在刚性手指内侧设置柔性衬垫^[3~20]。但即便如此,由于抓持力检测及控制上的困难,其使用过程中依然可能对果实造成损伤。文献[21]提出了完全由气动柔性驱动器(Flexible pneumatic actuator, FPA)作为手指设计的自适应柔性末端执行器,虽然安全性和适应性好,但是其刚度明显不足。为此,本文研究设计一种基于柔性FPA但同时具有一定抓持刚度的球果采摘末端抓持器,详细描述该末端抓持器的机械机构、工作原理,建立抓持过程的数学模型,并进行仿真分析和实验。

收稿日期:2012-03-13 修回日期:2012-04-17

*国家自然科学基金资助项目(51075363)和浙江省自然科学基金杰出青年团队资助项目(R1090674)

作者简介: 鲍官军,副教授,主要从事机器人技术及控制、光伏微网控制研究,E-mail: gjbao@zjut.edu.cn

通讯作者: 杨庆华,教授,主要从事机器人技术及应用、精密锻压研究,E-mail: robot@zjut.edu.cn

1 结构原理

气动柔性驱动器(FPA)是本课题组提出的一种新型柔性驱动器,如图1所示。文献[22]详细阐述了其结构原理,分析了其工作特性。

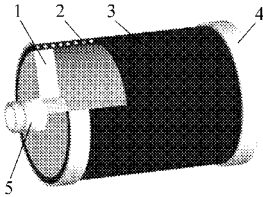


图1 气动柔性驱动器

Fig.1 Flexible pneumatic actuator

1. 端盖 2. 弹簧 3. 橡胶管 4. 紧固圈 5. 管接头

球果采摘末端执行器抓持机构主要由基于FPA的3个手指构成,如图2所示。每个手指由FPA、转轴、上连杆、下连杆、上端盖、下端盖组成。3个相同的手指通过下连杆呈120°均布安装在基座上,手指的弯曲平面均通过整个抓持器的中心轴。在各手指的内侧设置橡胶衬垫以保护目标果实。FPA配以刚性连杆结构,使得整个末端抓持器既保持了柔顺性和安全性的优点,同时增加了抓持的刚度,能够保证对目标果实的安全、可靠抓持作业。

通过通气管同时向3个FPA内腔充入压缩气体,则FPA伸长并驱动连杆机构上连杆同时向内运动,实现夹持、抓握等动作。

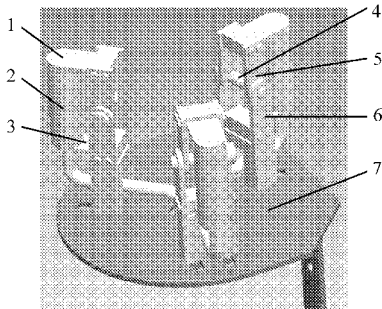


图2 末端抓持器结构

Fig.2 Structure of end-grasper

1. 上端盖 2. FPA 3. 下端盖 4. 转轴 5. 上连杆 6. 下连杆 7. 基座

2 数学模型

2.1 单个手指的数学模型

根据文献[23]的理论分析,单个手指在输出力矩为零的情况下,其内腔压力 p 与弯曲角度 θ 的关系为

$$p = \frac{2E_b t_b L_b \theta \cot\left(\frac{\theta}{2}\right) + r_h \theta - 2L_b}{r_h L_b \theta \cot\left(\frac{\theta}{2}\right) + r_h \theta} + p_{atm} \quad (1)$$

式中 E_b ——橡胶管弹性模量

t_b ——橡胶管壁厚

r_h ——橡胶管内侧与连杆的距离

L_b ——橡胶管长度 p_{atm} ——大气压力

2.2 指端的运动学方程

建立末端抓持器的空间坐标系,如图3所示。则在图3b中,根据几何关系可得手指 $i(i=1, 2, 3)$ 指端 C 相对于其坐标原点 O_i 的位置表达式为

$${}^i \mathbf{p} = \begin{bmatrix} {}^i x \\ {}^i y \\ {}^i z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ r_b + r_h + L_b \sin\theta \\ h + L_b(1 + \cos\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 h ——手指至底座距离

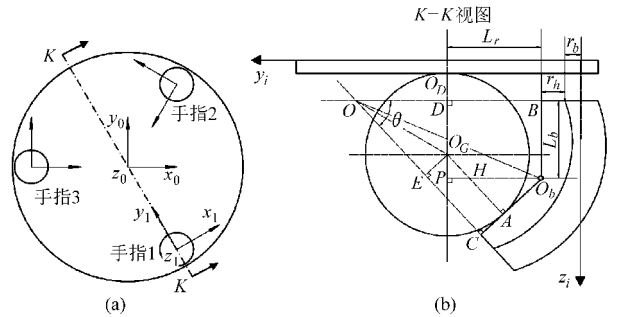


图3 末端抓持器坐标系

Fig.3 Reference frame of end-grasper

(a) 基座坐标系 (b) 手指坐标系

由图3a可知,任一手指 i 的坐标原点 O_i 在基座坐标系 $x_0 z_0 y_0$ 中的表达式为

$${}^0 \mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} (L_r + r_h + r_b) \sin\varphi_i \\ -(L_r + r_h + r_b) \cos\varphi_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 L_r ——手指内侧与基座中心线间距

φ_i —— $x_i z_i y_i$ 相对于 $x_0 z_0 y_0$ 的旋转角度

坐标系 $x_i z_i y_i$ 到 $x_0 z_0 y_0$ 的旋转矩阵

$${}^0 \mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i & 0 \\ \sin\varphi_i & \cos\varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

则手指弯曲 θ 角度的情况下,各手指指端在坐标系 $x_0 z_0 y_0$ 中的位姿表达式为

$${}^0 \mathbf{p} = {}^0 \mathbf{R}^i \mathbf{p} + {}^0 \mathbf{p}_i = \begin{bmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i & 0 \\ \sin\varphi_i & \cos\varphi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ r_b + r_h + L_b \sin\theta \\ h + L_b(1 + \cos\theta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_r + r_h + r_b) \sin\varphi_i \\ -(L_r + r_h + r_b) \cos\varphi_i \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\varphi_i (L_r - L_b \sin\theta) \\ -\cos\varphi_i (L_r - L_b \sin\theta) \\ h + L_b(1 + \cos\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.3 球果抓持模型

末端抓持器抓握球果目标时,球果与其底座接触,3个手指的指端与球果接触,任意手指*i*与球果的几何关系如图3b所示。则由几何分析可得抓握半径为*R*的球果时,手指的弯曲角度表达式为

$$\theta = \arctan \left(\frac{-(L_r \sqrt{L_p^2 - R^2} + L_r^2 - L_p R)}{(R L_r + L_p \sqrt{L_p^2 - R^2} + L_r^2)(L_p^2 + L_r^2)^2} \right) \quad (6)$$

其中 $L_p = L_b - (R - h)$

将式(6)代入式(1)可得抓握半径为*R*的球果所需初始压力(使得手指接触球果表面但不产生正压力) p_0 。

基座坐标系 $x_0 z_0 y_0$ 的 z_0 轴与水平方向有任意倾斜角度 γ 情况下的受力情况如图4所示,假设其中一个手指自身坐标系的 $y_i z_i$ 平面与目标球果所受重力 G 方向所在铅垂平面重合。以目标球体中心 O_G 点为力矩中心,可得力矩平衡关系式

$$f_D - (f_N - f_{N_1}) = 0 \quad (7)$$

式中 f_D ——球果与基座之间的摩擦力

f_N ——手指*i*与球果之间的摩擦力

f_{N_1} ——另外两个手指与球果之间摩擦力在 $y_i z_i$ 平面分力的合成

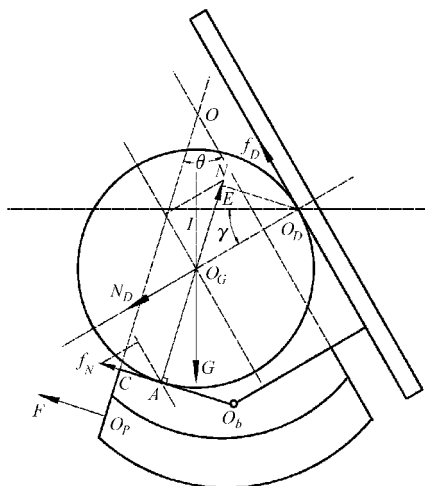


图4 任意角度抓握受力分析图

Fig.4 Force analysis of object holding

以手指底座中心 O_D 点为力矩中心,可得力矩平衡关系式

$$G \cos \gamma = (f_N - f_{N_1})(1 + \sin \theta) \quad (8)$$

由式(7)、(8)可得

$$f_D = \frac{G \cos \gamma}{1 + \sin \theta} \quad (9)$$

由目标球果在 $y_i z_i$ 平面内的受力平衡关系及图4中几何关系可得

$$3N \sin \theta \sin \gamma = G + N_D \sin \gamma + (f_N + 2f_{N_1}) \cos \theta \sin \gamma - f_D \cos \gamma - (f_N - f_{N_1}) \sin \theta \cos \gamma \quad (10)$$

式中 N ——手指*i*与目标球果之间的正压力

N_D ——球果与基座之间的正压力

联立式(7)、(9)、(10),得

$$N = G \frac{\sin \gamma (1 + \sin \theta) + \cos \theta \cos \gamma}{3 \sin \theta (1 + \sin \theta)} + \frac{N_D}{3 \sin \theta} + \frac{f_{N_1}}{\tan \theta} \quad (11)$$

设有系数 μ_1 ,使 $N = \mu_1 f_{N_1}$,则式(11)可表示为

$$N = \left[G \frac{\sin \gamma (1 + \sin \theta) + \cos \theta \cos \gamma}{3 \sin \theta (1 + \sin \theta)} + \frac{N_D}{3 \sin \theta} \right] \frac{\tan \theta}{\tan \theta - \mu_1} \quad (12)$$

设有系数 μ_2 ,使 $f_D = \mu_2 N_D$,则有 $0 \leq \mu_2 \leq \mu_D$ 。当式(12)两个因子都取最小值时有最小的抓握正压力 N_{\min} ,即当 $\mu_1 = \mu_{1\min}$, $N_{D\min} = \frac{f_D}{\mu_{2\max}}$ 时有

$$N_{\min} = G \frac{\sin \gamma (1 + \sin \theta) + \left(\cos \theta + \frac{1}{\mu_D} \right) \cos \gamma}{3 \sin \theta (1 + \sin \theta)} \frac{\tan \theta}{\tan \theta - \mu_{1\min}} \quad (13)$$

对于任意手指*i*,其FPA输出压力*F*与手指对目标果实的正压力*N*建立力矩平衡关系为

$$F(r_b + r_h) = N l_{O_G A} \quad (14)$$

$$\text{则有 } F = N \frac{L_r \sin \theta - [L_b - (R - h)] \cos \theta}{r_b + r_h} \quad (15)$$

根据文献[22]所建立的气动柔性弯曲关节内腔气体压力与输出力表达式

$$F = \pi \left(r_b - \frac{t_b}{2} \right)^2 \Delta p \quad (16)$$

即可得到抓握半径为*R*、重力为*G*的球果所需要的FPA最小充气压力

$$p_{\min} = p + \Delta p \quad (17)$$

其中*p*和 Δp 分别由式(1)和式(16)计算得到。

3 实验与分析

3.1 实验原理与材料

实验原理如图5所示,空压机提供压缩气体,工控机控制软件系统通过PCL-812PG数据采集卡和电气比例阀控制抓持器3个手指FPA内腔的气体压力,采用AS5045型角度传感器测量抓持器轴线与水平方向的夹角 γ 以及手指弯曲角度,利用触片式压力传感器实时测量手指与球果之间的接触压力*N*。

实验用球果采摘末端抓持器如图6所示,其详细结构参数如表1所示。实验选用成熟的宽皮橘,果实横径为55 mm,质量为115 g。

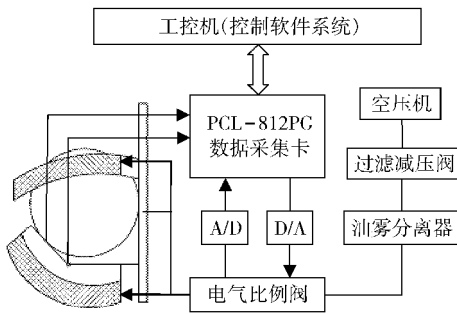


图5 抓握实验原理图

Fig. 5 Experimental schematic of holding

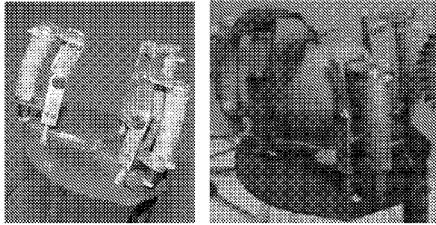


图6 球果采摘末端抓持器照片

Fig. 6 Photos of spherical fruit end-grasper

表1 末端抓持器结构参数

Tab. 1 Parameters of end-grasper

参数	数值
橡胶管弹性模量 E_b /MPa	2.3
摆动关节弧形 FPA 初始壁厚 t_0 /mm	2
橡胶管平均半径 r_b /mm	5.25
橡胶管壁厚 t_b /mm	2.0
手指连杆长度 L_b /mm	30
手指内侧至底座中心距 L_r /mm	40
手指至底座距离 h /mm	20
橡胶管内侧与连杆的距离 r_h /mm	5

3.2 实验步骤

实验初始状态为抓持器竖直向上即其轴线与水平方向的夹角 $\gamma = \pi/2$, 然后顺时针转动抓持器, 每转动 0.2 rad 将其固定, 进行一次抓取操作实验。实验过程首先通过工控机调节电气比例阀的输入电压

值控制 3 个手指 FPA 内腔的气体压力, 每次加压增幅为 0.01 MPa, 逐步增加输入气压, 直至手指刚好可以稳定抓持住球果, 不至于球果滑落, 通过 PCL-812PG 数据采集卡读入并记录电气比例阀反馈的气压, 此即充入 FPA 内腔的压缩气体压力 p_{min} 。

3.3 结果与讨论

实验结果和仿真曲线对比如图 7 所示, 实验数据曲线和仿真曲线略有误差, 但它们的趋势基本保持一致, 说明设计的球果采摘末端抓持器及建立的数学模型是切实可行的。并且由于 FPA 具有充分的柔顺性, 在实际应用中, 可使用适当高于理论计算得到的压缩气体压力进行目标球果的抓持控制, 可以有效提高抓持的稳定性和可靠性, 并且不会造成果实的损伤。

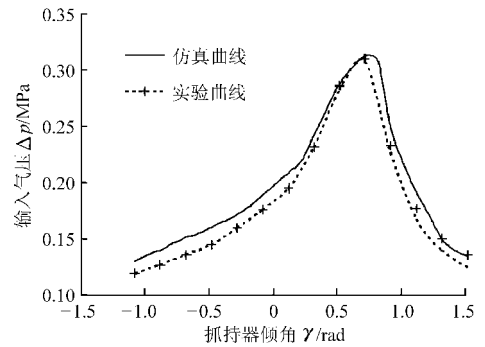


图7 柑橘抓握实验与仿真曲线

Fig. 7 Experimental and simulating curves of citrus holding

误差产生的原因包括 FPA 内嵌弹簧所导致的橡胶管弹性模量变化、橡胶材料的迟滞特性、连杆机构运动副摩擦等。

4 结论

(1) 应用新型气动柔性驱动器 FPA 设计了一种适用于球果采摘的末端抓持器, 具有充分的柔性、适应性和足够的抓持刚度。

(2) 对球果的抓持过程进行详细分析, 建立了球果的抓握模型; 实验验证了所建立模型的正确性。

参 考 文 献

- 崔玉洁, 张祖立, 白晓虎. 采摘机器人的研究进展与现状分析[J]. 农机化研究, 2007, 29(2): 4~7.
Cui Yujie, Zhang Zuli, Bai Xiaohu. Development and present situation of harvesting robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(2): 4~7. (in Chinese)
- Cho S I, Chang S J, Kim Y Y, et al. Development of a three degrees of freedom robot for harvesting lettuce using machine vision and fuzzy logic control[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(2): 143~149.
- Pool T A, Harrell R C. An end-effector for robotic removal of citrus from the tree[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(2): 373~378.
- Simonton W. Robotic end-effector for handling greenhouse plant material[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(6): 2615~2621.
- van Kollenburg-Crisan L M, Werkhoven C, Wennekes P. Development of a mechatronic system for automatic harvesting of cucumbers [C]//Proceedings of Robotics and Automated Machinery for Bio-productions, Valencia, Spain, 1997: 143~148.
- Ling P P, Ehsani R, Ting K C, et al. Sensing and end-effector for a robotic tomato harvester[J]. 2004 ASABE Annual Meeting,

- ASABE Paper 043088, 2004.
- 7 Tanigakia K, Fujiuraa T, Akaseb A, et al. Cherry-harvesting robot[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 63(1): 65 ~ 72.
 - 8 Qiao J, Sasao A, Shibusawa S, et al. Mobile fruit grading robot-concept and prototype[J]. 2004 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper 043086, 2004.
 - 9 Bulanon D M, Kataoka T, Okamoto H, et al. Feedback control of manipulator using machine vision for robotic apple harvesting [J]. 2005 ASABE Annual Meeting, ASABE Paper 053114, 2005.
 - 10 Hayashi S, Shigematsu K, Yamamoto S, et al. Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 160 ~ 171.
 - 11 Kondo N, Yata K, Iida M, et al. Development of an end-effector for a tomato cluster harvesting robot [J]. Engineering in Agriculture, Environment and Food, 2010, 3(1): 20 ~ 24.
 - 12 陆怀民. 林木球果采集机器人设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2001, 32(6): 12 ~ 14.
Lu Huaimin. Design and test of collecting robot of conifer cone [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(6): 12 ~ 14. (in Chinese)
 - 13 张凯良, 杨丽, 张铁中. 草莓收获机器人末端执行器的设计 [J]. 农机化研究, 2009, 31(4): 54 ~ 56.
Zhang Kailiang, Yang Li, Zhang Tiezhong. Design of an end-effector for strawberry harvesting robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(4): 54 ~ 56. (in Chinese)
 - 14 刘长林, 张铁中, 杨丽. 茄子采摘机器人末端执行器的设计 [J]. 农机化研究, 2008, 30(12): 62 ~ 64.
Liu Changlin, Zhang Tiezhong, Yang Li. Design of end-effector of eggplant harvesting robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(12): 62 ~ 64. (in Chinese)
 - 15 刘继展, 李萍萍, 李智国. 番茄采摘机器人末端执行器的硬件设计 [J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 109 ~ 112.
Liu Jizhan, Li Pingping, Li Zhiguo. Hardware design of the end-effector for tomato-harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 109 ~ 112. (in Chinese)
 - 16 马履中, 杨文亮, 王成军, 等. 苹果采摘机器人末端执行器的结构设计与试验 [J]. 农机化研究, 2009, 31(12): 65 ~ 67.
Ma Lüzhong, Yang Wenliang, Wang Chengjun, et al. Structure design and experiment of the end-effector for apple-harvesting robot [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(12): 65 ~ 67. (in Chinese)
 - 17 赵德安, 吕继东, 姬伟, 等. 果树采摘机器人及控制系统研制 [C] // 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011: 157 ~ 161.
 - 18 居洪玲, 姬长英. 一种多用途采摘机器人末端执行器的设计 [J]. 浙江农业学报, 2010, 22(3): 370 ~ 373.
Ju Hongling, Ji Changying. Design of an end-effector for a multi-use picking robot [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2010, 22(3): 370 ~ 373. (in Chinese)
 - 19 陈军, 王虎, 蒋浩然, 等. 猕猴桃采摘机器人末端执行器设计 [J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 151 ~ 154, 199.
Chen Jun, Wang Hu, Jiang Haoran, et al. Design of end-effector for kiwifruit harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 151 ~ 154, 199. (in Chinese)
 - 20 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.
Li Qinchuan, Hu Ting, Wu Chuanyu, et al. Review of end-effectors in fruit and vegetable harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 175 ~ 179. (in Chinese)
 - 21 鲍官军, 荀一, 高峰, 等. 气动柔性末端执行器设计及其抓持模型研究 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 121 ~ 126.
Bao Guanjun, Xun Yi, Gao Feng, et al. Flexible end-effector based on flexible pneumatic actuator and its grasping model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 121 ~ 126. (in Chinese)
 - 22 Qinghua Y, Libin Z, Guanjun B, et al. Research on novel flexible pneumatic actuator FPA [C] // Proceedings of 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, 2004: 385 ~ 389.
 - 23 钱少明, 杨庆华, 鲍官军, 等. 基于气动柔性驱动器的弯曲关节的基本特性研究 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(24): 2 903 ~ 2 907.
Qian Shaoming, Yang Qinghua, Bao Guanjun, et al. Research on basic characteristics of bending joint based on flexible pneumatic actuator [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(24): 2 903 ~ 2 907. (in Chinese)