

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.031

# 基于气动柔性驱动器的苹果采摘末端执行器研究\*

杨庆华 金寅德 钱少明 鲍官军

(浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部重点实验室, 杭州 310014)

**【摘要】** 设计了一种基于气动柔性驱动器的苹果采摘末端执行器:以气动柔性驱动器作为其弯曲关节,用力学分析的方法对弯曲关节及末端执行器进行建模,分析建立关节弯曲量及输出力与其内腔气体压力之间的数学关系;建立了末端执行器抓取苹果目标的数学模型。实验结果表明:该末端执行器有较大的输出力,能很好地抓持苹果,并具有很好的柔顺性。

**关键词:** 苹果 采摘机器人 末端执行器 气动柔性驱动器 弯曲关节

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)09-0154-05

## Research on End-effector of Apple Picking Based on New Flexible Pneumatic Actuator

Yang Qinghua Jin Yinde Qian Shaoming Bao Guanjun

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Processing Technology, Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

### Abstract

A new type of end-effector was developed based on flexible pneumatic actuator (FPA), which was designed as a bending joint. The mathematical model of bending joints and end-effector was established with mechanical analysis method, the relationship between pressure and bending capacity, as well as the relationship between pressure and output bending force was analyzed. The mathematical model for end-effector of crawling apple was built. The experimental results show that the force of the end-effector is quite strong and the actuator can grasp apples perfectly and flexibly.

**Key words** Apple, Picking robot, End-effector, Flexible pneumatic actuator (FPA), Bending joint

### 引言

农业机器人通常由移动机构、机械手臂、末端执行器和视觉传感器等组成。末端执行机构<sup>[1-4]</sup>是机器人的核心部分之一,它是直接接触目标物的部件,其作业对象为柔软而易损伤、形状复杂、生长发育程度不一、相互差异很大的果实,从而决定采摘机器人的末端执行器应具有较好的柔软性,以避免碰伤果实。

驱动机构是末端执行器的重要组成部分,其中气动驱动器具有柔顺性好、动作平滑、噪声低、无污染等特点,得到了广泛关注<sup>[5]</sup>。McKibben 驱动

器<sup>[6-7]</sup>,因其运动特性与生物肌肉极为相似,也称之为气动人工肌肉,堪称气动驱动器的代表。此外,还有日本东芝公司研制的三自由度驱动器 FMA<sup>[8]</sup> (flexible microactuator)、日本冈山大学 Noritsugu 等研制的旋转型柔性驱动器<sup>[9]</sup>、德国卡尔斯鲁厄计算机科学应用研究中心提出的柔性流体驱动器<sup>[10]</sup>以及江南大学章军等提出一种基于弹性波壳伸缩的气动驱动器<sup>[11]</sup>。上述驱动器在结构上都各有特色,但都存在摩擦力大,运动效率较低,关节控制复杂,成本高等问题。近年来,浙江工业大学提出了新型气动柔性驱动器 (flexible pneumatic actuator, 简称 FPA)<sup>[12-13]</sup>,并以此为基础设计了气动柔性弯曲关

收稿日期: 2009-11-19 修回日期: 2010-01-25

\* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2009AA04Z209)和浙江省自然科学基金资助项目(R1090674)

作者简介: 杨庆华,教授,主要从事机器人技术及应用和精密锻压技术研究, E-mail: robot@zjut.edu.cn

节<sup>[14-15]</sup>,但由于橡胶管易变形,弯曲关节在载荷方向会产生扭曲变形。本文在弯曲关节原有结构的基础上,加强关节的侧向刚度。由 3 个弯曲关节组成的末端执行器,工作时向弯曲关节气动柔性驱动器 FPA 内充入压缩气体,实现末端执行器的运动。

## 1 弯曲关节

### 1.1 基本结构

弯曲关节的结构和灵活性直接决定着末端执行器的空间尺寸和功能。基于 FPA 的气动柔性弯曲关节由转轴、连杆、联接件、左端盖、右端盖、橡胶管、螺旋钢丝及进气接头组成,如图 1 所示。其中 FPA 由橡胶管和螺旋钢丝组成,螺旋钢丝嵌在橡胶管的壁内,对橡胶管的径向膨胀有很强的约束作用,橡胶管通过强力胶与左端盖及右端盖密封连接。压缩气体从右端盖通入 FPA 的内腔,由于螺旋钢丝的约束作用橡胶管产生轴向伸长,并通过联接件推动连杆以转轴为中心转过一定大小的角度。释放 FPA 内腔的压缩气体,在橡胶管的弹性力的作用下,FPA 恢复到初始状态,关节连杆也回转到原来位置。由于空气的可压缩性,气动驱动器 FPA 的刚度通常很低,即弯曲关节的回转副柔性较好,另一方面,除了气动驱动器,弯曲关节的其他零件均为刚性构件,具有较高的刚度,能较好地模拟人类手指弯曲关节运动。

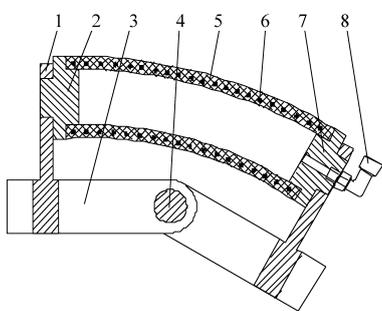


图 1 弯曲关节结构图

Fig. 1 Structure of bending joint

1. 连杆 2. 左端盖 3. 联接件 4. 转轴 5. 橡胶管 6. 螺旋钢丝 7. 右端盖 8. 进气接头

### 1.2 弯曲关节模型

弯曲关节受力变形后的简化模型如图 2 所示。由图 2 可得

$$R = \frac{L_b}{2} \cot \frac{\theta}{2} + H \quad (1)$$

变形后的弯曲关节伸长量<sup>[5]</sup>为

$$L_\phi = R\theta - r_b\theta \cos\phi \quad (2)$$

- 式中  $L_b$ ——弯曲关节橡胶管初始长度  
 $r_b$ ——弯曲关节橡胶管平均半径  
 $H$ ——弯曲关节橡胶管中心到回转中心距离  
 $R$ ——弯曲关节橡胶管弯曲后理论圆半径

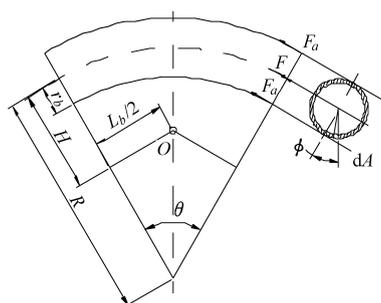


图 2 弯曲关节受力简化模型

Fig. 2 Simplified model of stress on bending joint

$\theta$ ——弯曲关节橡胶管弯曲角度

以  $O$  为回转中心,其摩擦力忽略,关节内腔压力  $p$  与大气压力  $p_{atm}$  产生的力矩应等于橡胶弹性力产生的力矩。由力矩平衡方程可知关节内腔压力为<sup>[5]</sup>

$$p = \frac{2E_b t_b L_b \frac{\theta}{2} \cot \frac{\theta}{2} + H\theta - L_b}{r_b L_b \frac{\theta}{2} \cot \frac{\theta}{2} + H\theta} + p_{atm} \quad (3)$$

式中  $E_b$ ——弯曲关节橡胶管弹性模量  
 $t_b$ ——弯曲关节橡胶管初始壁厚  
 而 FPA 的输出力

$$F = \pi (r_b - t_b/2)^2 \Delta p \quad (4)$$

弯曲关节输出力矩

$$M_{out} = \pi (r_b - t_b/2)^2 H \Delta p \quad (5)$$

其中  $\Delta p = p - p_{atm}$

## 2 末端执行器

如图 3,末端执行器由 3 个分布在末端执行器的两侧的弯曲关节组成,右侧两关节成一个  $\alpha = 50^\circ$  角,以适应苹果的自然形状。

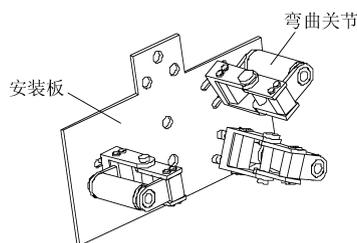


图 3 末端执行器结构图

Fig. 3 Structure of end-effector

由受力平衡(图 4)可知弯曲关节在苹果表面产生的摩擦力与苹果重力平衡。从而可得力矩平衡方程为

$$M_{out} = F_p H = F_f L_{bb} = M_f \quad (6)$$

其中  $F_p = F$   $F_{f1} = F_1$

$$F_1 + F_2 \sin \frac{\alpha}{2} + F_3 \sin \frac{\alpha}{2} = 0$$

$$F_{f2} = F_2 \sin \frac{\alpha}{2} + F_3 \sin \frac{\alpha}{2}$$

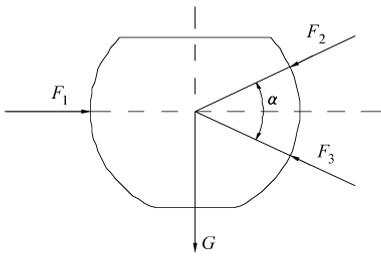


图4 苹果受力

Fig. 4 Forces acted on apple

$L_{bb}$ 为弯曲关节与苹果接触面到回转中心  $O$  的距离,由图2可知

$$L_{bb} = L_b/2 \quad (7)$$

将式(4)(5)(7)代入式(6)得

$$F_f = \frac{2\pi H \left( r_b - \frac{t_b}{2} \right)^2}{L_b} \Delta p \quad (8)$$

而产生的摩擦力为

$$F_M = F_f f = F_{\beta 1} f + F_{\beta 2} f \quad (9)$$

理论计算时,输出力一般按负载的两倍来计算,即  $F_M = 2G$ ;得

$$G = \frac{2\pi f H \left( r_b - \frac{t_b}{2} \right)^2}{L_b} \Delta p \quad (10)$$

其中  $f = 1.35$  为苹果表面与弯曲关节的摩擦因数。

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 弯曲关节

弯曲关节具体结构参数如下:  $r_b = 5.25 \text{ mm}$ ,  $t_b = 2 \text{ mm}$ ,  $L_b = 30 \text{ mm}$ ,  $H = 16.5 \text{ mm}$ ,  $p_{\text{atm}} = 0.1 \text{ MPa}$ , 经实验测定橡胶管的弹性模量  $E_b = 2.3 \text{ MPa}$ , 关节材料用铝材制作,其转动惯量较小。在此基础上可得出相应仿真曲线。弯曲关节特性实验平台如图5所示。其中电气比例阀为 ITV0050-3BS(日本 SMC)可以在调压范围内连续调节电压从而控制进入弯曲

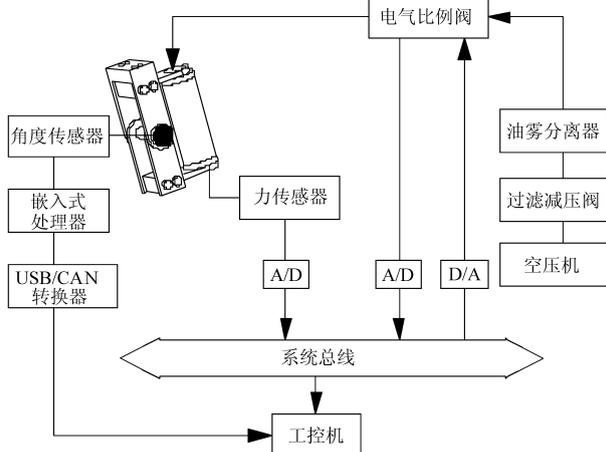


图5 弯曲关节实验原理图

Fig. 5 Experimental schematic of bending joint

关节的压缩气体压力大小,附带压力传感器可及时检测并反馈压力大小。角位移传感器 AS5045(奥地利微电子公司)是用于测量弯曲关节转角的一种非接触式磁旋转编码器,它通过磁感应来测定转角大小,与弯曲关节不接触,二者之间无任何阻尼作用,测量的角度值通过单片机系统以 CAN 总线方式传输给工控机。力传感器 NS-TH1(上海天沐自动化公司)用于测量弯曲关节自由端输出力值,测量时先将弯曲关节的一端固定,随着压缩气体充入 FPA 内腔,自由端发生偏转,将自由端中心与力传感器的测力头垂直接触,然后进一步增大 FPA 中的气压,记录力传感器输出的电压值。

为了有效地消除 FPA 橡胶管的粘滞性,在每次加压完成 5 s 后测弯曲关节的压力转角,曲线如图6所示。

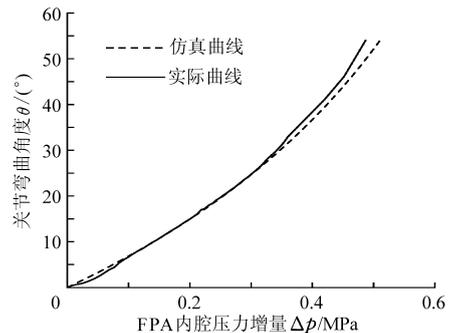


图6 弯曲关节转角实验与仿真曲线

Fig. 6 Experimental and theoretical angles of bending joint

从图6可知,弯曲关节弯曲角度随着 FPA 内腔压力的增大而增大;当压力未达到 0.3 MPa 前实验曲线与理论曲线吻合较好;当压力上升到 0.3 MPa 后,实际转角略大于理论转角,这是由于内嵌螺旋钢丝分布不够均匀,橡胶管在轴线上表现为厚薄不一致所致。

将关节的自由端与力传感器接触相连,逐渐增加 FPA 内腔的气压值,采集气压值和弯曲关节输出力值,得到弯曲关节的压力增值与输出力的曲线,如图7所示。

从图7中可知,弯曲关节的输出力随着 FPA 内腔压力的增大而增大;实际输出力在仿真曲线附近上下波动,但仍能较好吻合,波动的主要原因是电气比例阀对气压控制是一个连续的动态过程,气压的波动造成 FPA 的活动端有冲击振动现象。

#### 3.2 苹果力学分析

利用力学实验装置——RGM 系列(小载荷)双立柱台式电子万能实验机(深圳市瑞格尔仪器有限公司),对苹果进行压缩、剪切等力学性能的测试,如图8所示。

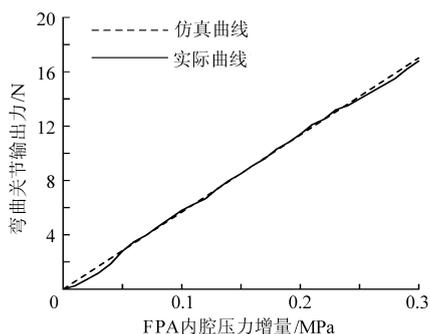


图 7 弯曲关节输出力实验与仿真曲线

Fig. 7 Experimental and theoretical output force of bending joint

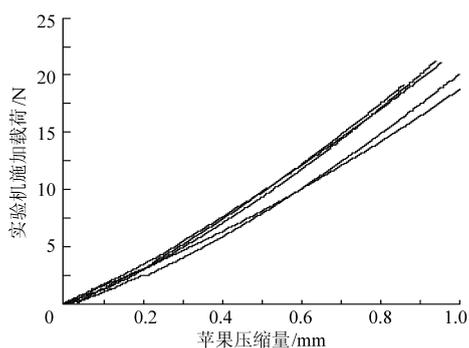


图 9 苹果压缩实验曲线

Fig. 9 Compression of experimental curves of apple

式 SY5320-5LZD-01F-F2(日本 SMC),由于两侧关节的力输出要求不一致,采用了两个电气比例阀对其进行控制;继电器采用 HHG1-0/032F-20(欣灵电气股份有限公司)的固态继电器,输入电压 5~32 V,输出电压 12~250 V,其输出端与电磁阀相连并直接连接到 DC24V 电源,输入端连接到系统总线,由工控机对其进行控制。当苹果靠近末端执行器时,苹果会压迫微动开关(海立 HIGHLY),使其闭合,开关信号传回工控机,再从工控机发出信号使得继电器通电,使得电磁阀左位,弯曲关节充气,最后抓持苹果,如图 11 所示。

当末端执行器抓持苹果时可能会伤及苹果表皮组织,所以在弯曲关节与苹果相接触的表面铺一层硅胶,可以有效地保护水果表皮组织,使其不受损伤。

机械手输出力随 FPA 内腔压力变化曲线如图 12 所示,实际输出力在仿真曲线上下波动,且吻合良好,说明实验结果和模型基本一致,结合图 9,机械手在控制好输入气压的前提下,不会对苹果造成损伤。

苹果品种为红富士,直径为 63.6~90.0 mm,质

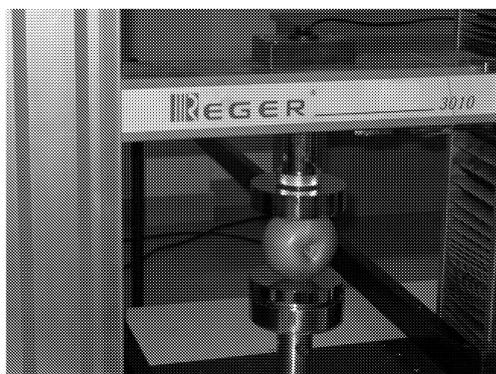


图 8 苹果压缩实验

Fig. 8 Apple's compression experiment

苹果直径:75~80 mm,加载速率:10 mm/min。对苹果两端加载,记录实验数据如图 9 所示。实验结束后,观察苹果表面没有压痕,将苹果放置一周后,加载表面没有出现压痕,证明图 9 所施加的压力作用下不会对苹果造成损伤,即在苹果压缩量在 1 mm 以下时,不会有品质损伤问题。

### 3.3 末端执行器

电气控制原理如图 10 所示,其中电器比例阀为 ITV0050-3BS(日本 SMC);电磁阀为 3 位 5 通中封

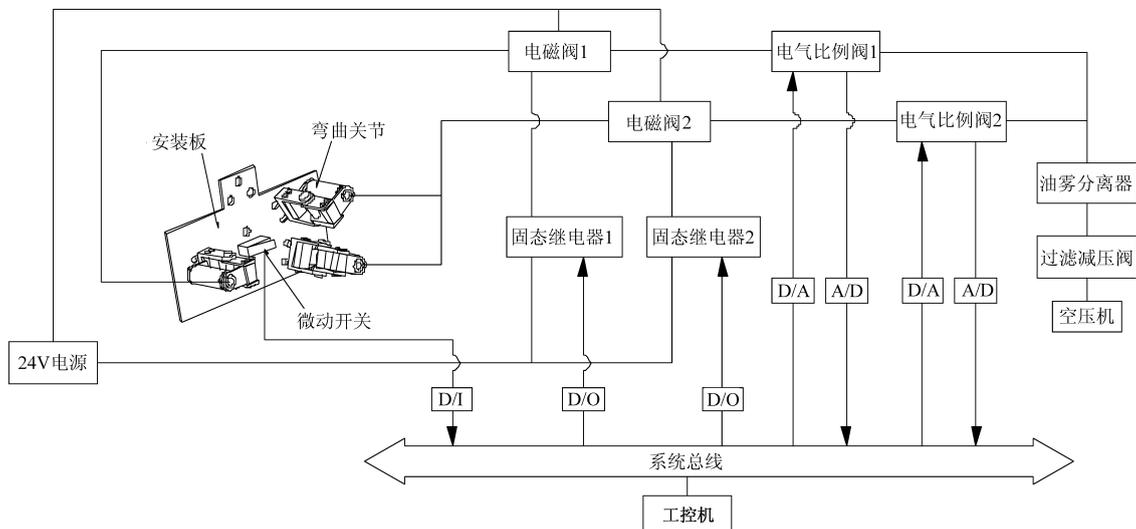


图 10 末端执行器电气控制原理图

Fig. 10 Electrical controlling schematic of end-effector

量为 118.9 ~ 260.7 g。对一组苹果进行了抓持实验,实验结果如表 1 所示。

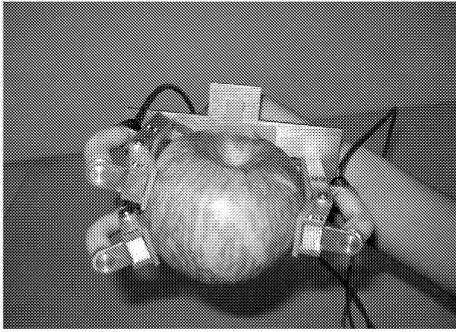


图 11 苹果抓持实物图

Fig. 11 Photo of grasping apple

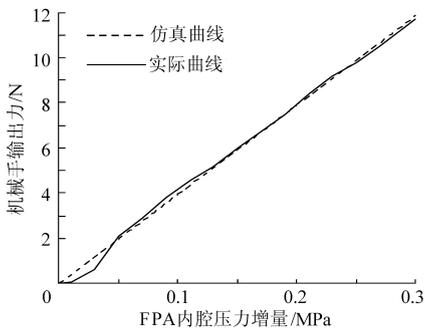


图 12 机械手输出力实验与仿真

Fig. 12 Experimental and theoretical output forces of end-effector

通过工控机调节电气比例阀的输入电压来调整气压输出,弯曲关节承受的气压上限是 0.4 MPa。在苹果外径相似的情况下,接触气压会有不同。当弯曲关节接触苹果表面,此时电气比例阀输出气压为  $p$ ;当苹果表面与 3 个弯曲关节表面内侧安装的 3 个传感器中的任意 2 个发生接触,此时信号反馈

表 1 苹果抓持实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of grasping apples

苹果	苹果直径 /mm	苹果质量 /g	接触时输出气压 $p$ /MPa	抓紧时输入气压 $p + \Delta p$ /MPa
1	76.1	196.6	0.20	0.24
2	79.1	220.8	0.18	0.24
3	80.9	231.5	0.16	0.24
4	81.2	235.5	0.16	0.24
5	83.0	255.3	0.12	0.22

为表面接触,继续往弯曲关节加压,直到末端执行器紧抓苹果;当末端执行器提至空间任一位置时苹果不掉落,此时输入气压为  $p + \Delta p$ 。苹果质量相似的情况下, $\Delta p$  也会有明显差异,其原因是:不规则的苹果外形使弯曲关节不可能完全贴合,另一方面,弯曲关节本身的刚性结构有一定的支撑作用,从而导致接触气压  $p$  不同,在相同加载气压  $\Delta p$  的条件下,能抓持的苹果的质量会发生改变。

#### 4 结论

(1) 基于气动柔性驱动器 FPA 研制气动弯曲关节,分别建立了关节的转角和输出力静态模型。在此基础上成功研制了末端执行器,并建立数学模型。

(2) 建立了实验平台,对弯曲关节进行了实验研究,并得到转角静态特性实验曲线和输出力实验曲线,与仿真曲线进行比较,证明了理论模型的正确性。

(3) 所研制的末端执行器能稳定的抓持苹果,并具有较好的柔顺性。用于果实采摘,可以很好地保护果实表皮组织,使其不受损伤,具有较好的实际应用前景。

#### 参 考 文 献

- 赵匀,武传宇,胡旭东,等. 农业机器人的研究进展及存在的问题[J]. 农业工程学报,2003,19(1):20~24.  
Zhao Yun, Wu Chuanyu, Hu Xudong, et al. Research progress and problems of agricultural robot[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(1): 20~24. (in Chinese)
- Kondo N, Monta M, Fujiura T. Fruit harvesting robot in Japan[J]. Advances in Space Research, 1996, 18(1~2): 181~184.
- Van Henten E J, Van Tuijl B A J, Hemming J. Field test of an autonomous cucumber picking robot[J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(3): 305~313.
- Reed J N, Miles S J, Butler J, et al. AE-automation and emerging technologies: automatic mushroom harvester development[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(1): 15~23.
- 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,2006.  
Bao Guanjun. Research on characteristics of flexible pneumatic actuator FPA and its application in multi-fingered dexterous hand design[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2006. (in Chinese)
- Caldwell D G, Medrano-Cerda G A, Goodwin M J. Control of pneumatic muscle actuators[J]. IEEE Control Systems Magazine, 1995, 15(1): 40~48.
- 李宝仁,刘军,杨钢. 气动人工肌肉系统建模与仿真[J]. 机械工程学报,2003,39(7):23~28.  
Li Baoren, Liu Jun, Yang Gang. Modeling and simulation of pneumatic muscle system[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(7): 23~28. (in Chinese)

1 059 ~ 1 067.

- 3 Dong Sun, James K Mills, Jinjun Shan, et al. A PZT actuator control of a single-link flexible manipulator based on linear velocity feedback and actuator placement[J]. *Mechatronics*, 2004, 14(4) : 381 ~ 401.
- 4 陈定中,魏燕定,程耀东. 车厢壁面的振动控制[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(6):1~4.  
Chen Dingzhong, Wei Yanding, Cheng Yaodong. Study on vibration control for the wall in a cab[J]. *Transactions for the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(6):1~4. (in Chinese)
- 5 唐友刚,潘永皓. 薄壁结构弯扭耦合振动分析[J]. *振动工程学报*, 1993, 6(4):399~405.  
Tang Yougang, Pan Yonghao. Analysis for bending-torsion-coupled vibration of a thin-walled structure [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 1993, 6(4):399~405. (in Chinese)
- 6 李俊,沈荣瀛,华宏星. 考虑翘曲影响的 Bernoulli-Euler 薄壁梁的弯扭耦合振动[J]. *机械强度*, 2003, 25(5): 486~489.  
Li Jun, Shen Rongying, Hua Hongxing. Coupling bending-torsional vibration Bernoulli-Euler thin-walled beam including wrapping effect[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2003, 25(5) : 486 ~ 489. (in Chinese)
- 7 吕永桂. 基于压电致动器的柔性构件振动主动控制技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2007.  
Lü Yonggui. Study on active vibration control techniques for flexible structure using piezoelectric actuators [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- 8 Su W C, Drakunov S V, Ozguner U, et al. Sliding mode control with chattering reduction in sampled data systems [C] // *Proceedings of the 32nd IEEE Conference on Decision and Control*, 1993: 2 452 ~ 2 457.
- 9 Kachroo P, Tomizuka M. Chattering reduction and error convergence in the sliding-mode control of a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(7) : 1 063 ~ 1 068.

(上接第 158 页)

- 8 Tanaka Y, Gofuku A, Fujino Y. Development of a tactile sensing flexible actuator [C] // *Advanced Motion Control*, 1996. AMC' 96-MIE. , 1996, 2: 723 ~ 728.
- 9 Noritsugu Toshiro, Mitsuhiro Kubota, Sadaharu Yoshimatsu. Development of pneumatic rotary soft actuator made of silicone rubber[J]. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2001, 13(1) : 17 ~ 22.
- 10 Schulz S, Pylatiuk C, Bretthauer G. A new ultralight anthropomorphic hand [C] // *Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Seoul, Korea, 2001.
- 11 章军,须文波,范本隽. 板弹簧柔性手指关节弯曲的模型研究[J]. *机械设计与研究*, 2005, 21(2) : 53 ~ 55.  
Zhang Jun, Xu Wenbo, Fan Benjuan. Study on the bending model of pneumatic flexible finger joints of spring beam [J]. *Machine Design and Research*, 2005, 21(2) : 53 ~ 55. (in Chinese)
- 12 张立彬,杨庆华,鲍官军,等. 一种气动柔性驱动器: 中国, 200510049589.5 [P]. 2005-09-21.
- 13 Yang Qinghua, Zhang Libin, Bao Guanjun, et al. Research on novel flexible pneumatic actuator FPA [C] // *2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2004, 1: 385 ~ 389.
- 14 杨庆华,张立彬,阮健. 气动弯曲关节的特性研究[J]. *工程设计学报*, 2002, 9(3) : 159 ~ 161.  
Yang Qinghua, Zhang Libin, Ruan Jian. Investigation to the characteristics of a pneumatic bending joint [J]. *Journal of Engineering Design*, 2002, 9(3) : 159 ~ 161. (in Chinese)
- 15 杨庆华,张立彬,鲍官军,等. 气动柔性弯曲关节的特性及其神经 PID 控制算法研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4) : 88 ~ 91.  
Yang Qinghua, Zhang Libin, Bao Guanjun, et al. Investigation of the characteristics of pneumatic flexible-bending joint and its neural PID controlling algorithm [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4) : 88 ~ 91. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 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)