

# 七自由度气动人工肌肉机械手臂的设计及研究

王龙辉, 金英子, 朱红亮, 钱红玉, 赵 屹

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 设计了一种气动肌肉驱动的七自由度仿人机械手臂。肩部采用球铰形式, 实现类人肩关节旋内/旋外、屈/伸及内收/外展三个自由度, 旋转运动范围为  $-39.5^{\circ} \sim 39.5^{\circ}$ , 屈伸运动范围为  $-44.5^{\circ} \sim 44.5^{\circ}$ , 收展运动范围为  $0^{\circ} \sim 35.0^{\circ}$ 。肘部和腕部均采用虎克铰形式, 实现肘关节的屈/伸、旋内/旋外以及腕关节的内收/外展、屈/伸, 其中肘关节旋转运动范围为  $-39.5^{\circ} \sim 39.5^{\circ}$ , 屈伸运动范围为  $-60.5^{\circ} \sim 32.5^{\circ}$ ; 腕关节收展运动范围为  $-70.5^{\circ} \sim 70.5^{\circ}$ , 抬伸运动范围为  $-39.5^{\circ} \sim 39.5^{\circ}$ 。对机构进行了仿真分析, 并搭建了手臂实物系统进行测试。实验结果表明, 该手臂重量轻, 受控性好, 能够很好地实现人类关节的柔顺运动。

**关键词:** 气动肌肉; 仿人手臂; 结构设计; 仿真; 实验测试

**中图分类号:** TP242.6

**文献标识码:** A

## 0 引 言

作为机器人机械系统的基础部件, 驱动器起着至关重要的作用。区别于传统的驱动器, 气动人工肌肉(pneumatic muscle actuator, PMA)作为一种新型的机器人驱动器, 以其结构简单紧凑、重量轻、柔性好、使用安全方便和独特的仿生性等优点正日益展现出良好的应用发展态势<sup>[1-2]</sup>。

在各类机器人中, 模拟人体手臂构成的关节型机器人, 具有机构简单、占用空间小、相对工作空间大等优点, 是应用最为广泛的机器人之一<sup>[3]</sup>。而随着对仿人手臂要求的不断加深, 气动肌肉在仿人手臂中的研究越来越受到关注。美国华盛顿大学的 Hannaford 等<sup>[4]</sup>用 15 条气动肌肉设计了一条仿人手臂, 采用模拟的脊髓神经网络控制, 用于研究人类低级神经反射及脊髓控制反射。日本冈山大学的 Toshio<sup>[5]</sup>研制出气动肌肉驱动的两自由度康复机器人, 外形类似人的手臂, 通过对气动肌肉的闭环控制, 它可以带动患者手臂进行等速或等张运动, 从而帮助患者训练受损手臂的运动功能。南京理工大学

的卫玉芬<sup>[6]</sup>设计了包括前臂、手腕和手三部分的气动肌肉柔顺机器人手臂, 等等。

本文采用气动人工肌肉作为驱动器, 研制由肩关节、肘关节和腕关节组成的七自由度仿人手臂。对其进行运动仿真, 并搭建了手臂实物系统进行测试。

## 1 手臂的总体结构

仿人手臂依据人手臂通过拮抗肌的伸缩相互对抗实现关节运动的生物学机理, 使用类似于拮抗肌的一对气动肌肉并联相互对抗来驱动关节, 如图 1 所示。

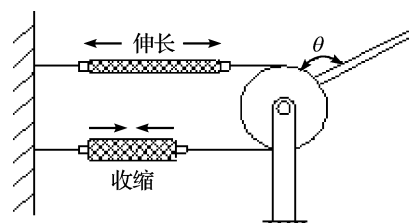


图 1 关节的基本驱动方式

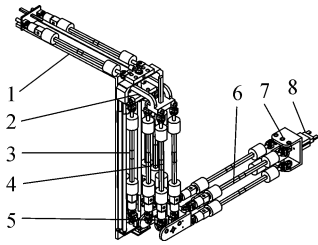
收稿日期: 2011-04-25

基金项目: 浙江省自然科学基金(R107635); 国家自然科学基金(50735004)

作者简介: 王龙辉(1985-), 男, 湖南宁乡人, 硕士研究生, 主要从事流体机械及工程的研究。

通讯作者: 金英子, 电子邮箱: jin\_yz@163.com

仿人机械手臂的基本结构见图 2。仿人手臂主要由起固定支撑作用的机架和手臂两部分组成,手臂能够实现 7 个自由度,各自由度均由气动肌肉驱动:机架上安装有 6 根人工肌肉,实现类人手臂肩关节旋内/旋外、屈/伸及内收/外展 3 个自由度;上臂安装 4 根人工肌肉,实现肘关节屈/伸、旋内/旋外两个自由度;前臂安装 4 根人工肌肉,实现腕关节内收/外展、屈/伸的 2 个自由度。



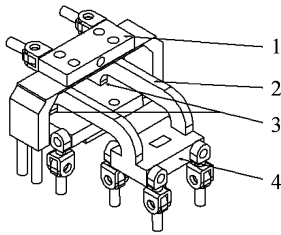
1. 机架,2. 肩关节,3. 气动人工肌肉,4. 上臂,5. 肘关节,6. 前臂,7. 腕关节,8. 手爪

图 2 手臂结构

2 手臂的关节设计及运动学仿真

2.1 肩关节设计及仿真

人类的肩关节属于球窝关节,为全身最为复杂的关节之一,具有 3 个自由度。考虑到其控制的复杂性,采用自由度分解的方法,设计成球铰加回转关节。将肩关节分解为两个关节,肩关节 1 和肩关节 2。肩关节 1 通过顶端的滑轮带动手臂旋转运动,实现一个自由度。肩关节 2 通过球铰带动手臂实现屈伸和收展运动,实现 2 个自由度,如图 3 示。



1. 肩关节 1 连接件,2. 肩关节 2 连接件,3. 球铰连接处,4. 前臂连接件

图 3 肩关节

图 4 为肩关节在三维软件上的仿真,其中图 4(a)为肩关节的初始位置,图 4(b)及图 4(c)分别为肩关节 1 和肩关节 2 的运动仿真。利用三维造型软件 CATIA 的运动学模块对机构进行运动学的分析并改进,得到机械手臂肩关节理论运动角度:旋转运动范围为 $-39.5^{\circ} \sim 39.5^{\circ}$ ,屈伸运动范围为 $-44.5^{\circ} \sim 44.5^{\circ}$ ,收展运动范围为 $0^{\circ} \sim 35.0^{\circ}$ 。

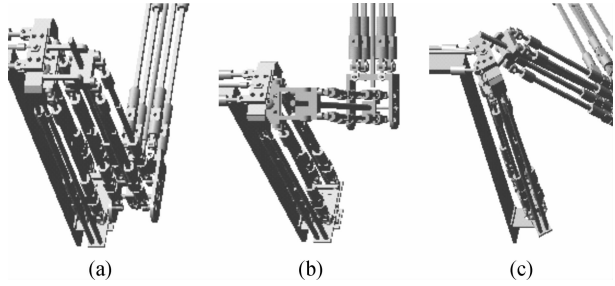
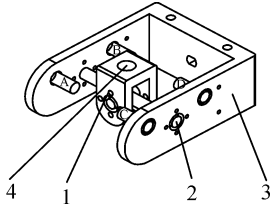


图 4 肩关节的仿真

2.2 肘关节设计及仿真

肘关节设计成 2 个旋转自由度,采用并联机构驱动,如图 5 所示。由于驱动方式的限制,虎克铰在机器人中的应用不是很常见。该手臂采用气动肌肉作为驱动器,能够方便地对虎克铰进行控制,实现 2 个自由度的运动。肘关节的驱动肌肉安装于上臂,以减轻前臂重量。



1. 上臂连接件,2. 十字交叉轴,3. 前臂连接件,4. 肘关节支撑杆安装孔,A、B、C、D 肌肉安装销

图 5 肘关节

肘关节的初始位置以及旋转和屈伸仿真分别如图 6(a)、图 6(b)、图 6(c)所示,通过仿真得到的手臂肘关节的理论运动角度为:旋转运动角度为 $-39.5^{\circ} \sim 39.5^{\circ}$ ,见图 6(b);屈伸运动角度为 $-60.5^{\circ} \sim 32.5^{\circ}$ ,见图 6(c)。

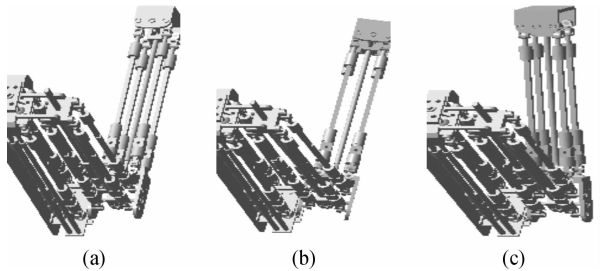
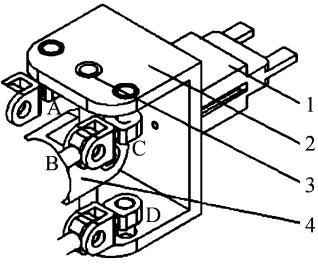


图 6 肘关节仿真

2.3 腕关节设计及仿真

腕关节设计同肘关节相似,设计成 2 个旋转自由度,采用并联机构驱动。腕关节驱动肌肉安装于前臂,见图 7。

腕关节的收展及抬伸状态分别如图 8(b)、图 8(c)所示。仿真测得手臂腕关节的理论运动角度为:收展运动角度为 $-70.5^{\circ} \sim 70.5^{\circ}$ ,抬伸运动角度为 $-39.5^{\circ} \sim 39.5^{\circ}$ 。



1. 手爪, 2. 手爪连接件, 3. 十字交叉轴, 4. 前臂连接件, A、B、C、D 肌肉安装销

图7 腕关节

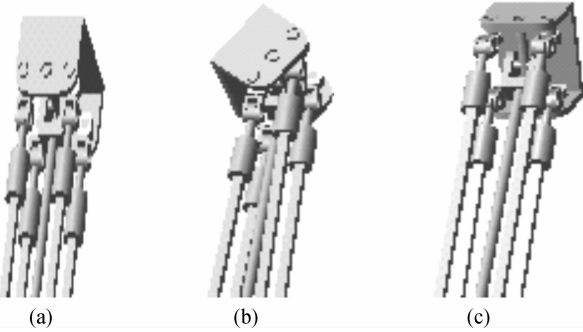


图8 腕关节仿真

依据关节构造,建立手臂基本机构。应用软件的运动学模块对其进行仿真和干涉分析等,通过分析调试机构的可行性,确立机构形态。仿人手臂肩关节到肘关节的长度为 360 mm,肘关节到腕关节的长度为 300 mm,运动部分的质量约为 3.5 kg。

3 手臂实验研究

依据确立好的机构形态搭建如图 10 所示的手

臂样机,建立合适的控制系统对手臂的运动进行实验研究。



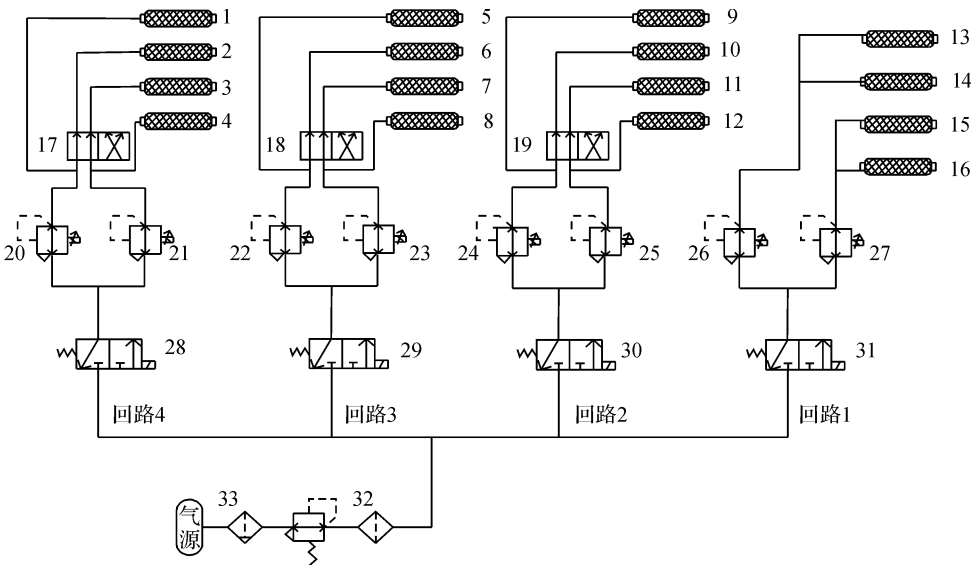
图10 手臂实物图

3.1 气动回路设计

气动肌肉机械手臂共有 7 个自由度,关节的驱动通过气动肌肉的相互对抗实现。其中腕关节两个自由度采用 4 根气动肌肉驱动;肘关节 2 个自由度采用 4 根气动肌肉驱动;肩关节 3 个自由度,其中对于肩关节的旋转运动采用 4 根气动肌肉驱动,以求更加稳定地实现关节运动,因而肩关节采用 8 根气动肌肉驱动。根据以上理论,设计了如图 11 所示的气动回路。气动回路主要由 4 个子回路构成。其中,回路 1 和 2 为控制肩关节的运动;回路 3 为控制肘关节运动;回路 4 控制腕关节运动。通过控制电磁阀的通断和调节比例压力阀控制肌肉气压以控制各关节的运动。

3.2 控制系统的设计

手臂的运动通过驱动关节旋转来实现,为了提高气动肌肉机械手臂关节的运动控制精度,这里利



1~16. 气动肌肉, 17~19. 两位四通电磁阀, 20~27. 比例压力阀, 28~31. 两位三通电磁阀, 32. 气动三联件, 33. 气源

图11 机械手臂的气动回路

用多个角位移传感器、压力传感器分别测量与反馈关节的转角信号,以构成位置闭环反馈控制系统,如图 12 所示。该系统主要由 USB2089 数据采集卡、比例压力阀组(每组有两个比例压力阀)、气动人工肌肉、角度传感器和压力传感器组成。其工作原理为:数据采集卡 USB2089 接收 PC 机发送的压力信号和角度信号,数据处理后经 D/A 转换后输出,输出的压力值和角度值控制比例压力阀组,比例压力阀组输出压力信号调节所对应的两对气动人工肌肉内部压力。系统反馈信号(压力信号或角度信号)经 A/D 转换后作用于数据采集卡 USB2089,经过一定的控制算法(PID 和单神经元算法)进行处理,数据采集卡将处理后的数据经 D/A 转换后控制比例压力阀组,从而控制气动肌肉机械手臂各个关节,实现各关节的闭环反馈控制,使各关节产生相应的运动结果。

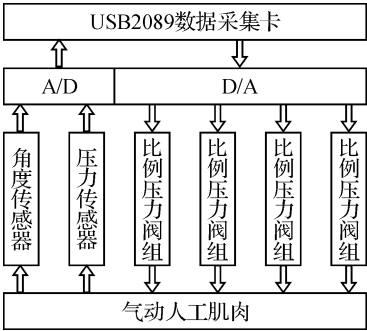


图 12 控制系统框图

图 13 例举了肘关节阶跃响应的跟踪曲线。跟踪值在 2 s 左右达到稳定,稳定后跟踪值在 19.7~20.4°之间波动。并且没有超调和震荡现象,稳态误差在±0.4°。该控制系统很好地实现了对手臂位置的跟踪控制,使关节达到预期运动结果。

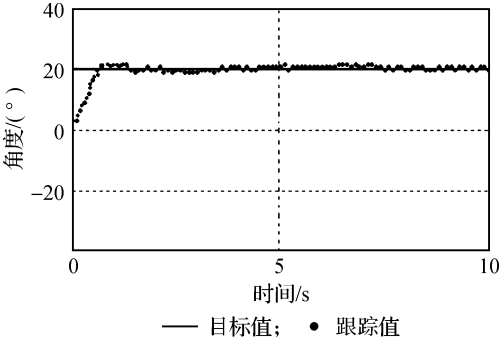


图 13 关节阶跃响应跟踪曲线

3.3 手臂总体实验

实验针对机械手臂的各个关节,从远程控制界面发送关节角度值,通过控制器控制气动肌肉气压,实现机械手臂各个关节的运动。

图 14(a)、(b)、(c)、(d)分别为肩关节旋转 35°、抬伸 30°和外展 20°以及肩关节综合运动图。

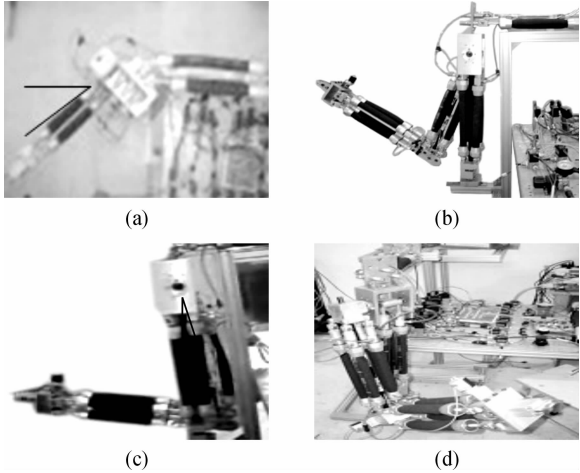


图 14 肩关节运动

图 15 为肘关节运动图。肘关节分别处在初始以及旋转 10°和展开 25°的位置,分别如图 15(a)、(b)、(c)所示。

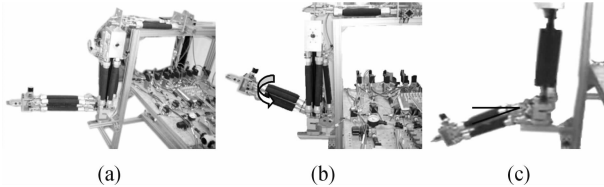


图 15 肘关节运动

图 16 为腕关节伸 10°,如图 16(a),和外展 25°,如图 16(b)所示。

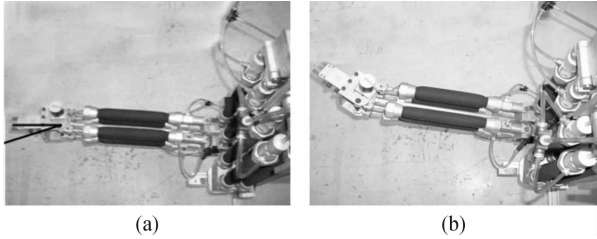


图 16 腕关节运动

实验结果表明该机构安全,柔顺性高,可控性好,能够很好地实现仿人手臂多个自由度的运动。

4 结 语

本文依据仿生学特点,构造手臂关节,设计并搭建了由气动人工肌肉驱动的七自由度机械手臂。通过软件分析及实验测试证明,该机构结构稳定、轻巧、安全,且具有良好的柔顺性及可控性,能够很好地实现人类关节的柔顺运动;该设计中将肩关节分解自由度等构造关节的方法,有效且符合实际,为气动肌肉驱动机构的进一步设计和研究打下了基础。

参考文献:

[1] 殷际英,何广平. 关节型机器人[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.

[2] 彭光正,王毅枫,孙海默. 一种气动人工肌肉驱动的七自由度仿人手臂的设计[J]. 液压与气动, 2007(1): 1-2.

[3] 隋立明,王祖温,包 钢. 气动肌肉驱动仿人臂的设计[J]. 液压与气动, 2004(9): 7-8.

[4] Chou Ching-ping, Hannaford B. Study of human forearm posture maintenance with a physiologically based robotics arm and spinal level neural controller[J]. Biological Cybernetics, 1997, 76 (4): 285-300.

[5] Toshiro N, Yoshio T, Kazutoshi I T O. Improvement of control performance of pneumatic artificial muscle manipulator by using electroreological fluid damper[C]// Proceeding of the IEEE International on Systems, Man and Cybernetics. Tokyo, Jpn, 1999.

[6] 卫玉芬. 气动肌肉驱动机器人手臂的设计与控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.

Design and Research of Seven Degrees of Freedom Robotic Arm  
Driven by Pneumatic Artificial Muscle

WANG Long-hui, JIN Ying-zi, ZHU Hong-liang, QIAN Hong-yu, ZHAO Yi

(School of Machinery and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A seven DOF humanoid robotic arm driven by pneumatic artificial muscles is designed. The shoulder of the arm uses a sphere wring to accomplish the 3 rotation DOF, which are rotation, flexion and extension. And the motion rang is  $(-39.5^{\circ}, 39.5^{\circ})$ ,  $(-44.5^{\circ}, 44.5^{\circ})$ ,  $(0^{\circ}, 35.0^{\circ})$ , respectively. While the elbow and the wrist respectively adopt a Hooke's joint to make the two rotations come true. The rotation motion rang of elbow is  $(-39.5^{\circ}, 39.5^{\circ})$ , extension motion rang is  $(-60.5^{\circ}, 32.5^{\circ})$ , The flexion motion rang of wrist is  $(-70.5^{\circ}, 70.5^{\circ})$ , extension motion rang is  $(-39.5^{\circ}, 39.5^{\circ})$ . The model is simulated and analysed in three-dimensional modeling software and the real arm is established and tested, proving to be light, soft and convenient to be controlled, it's able to achieve the compliant movement as well as the human arm.

**Key words:** pneumatic muscle; robotic arm; structure design; simulation; experiment test  
(责任编辑: 杨元兆)