

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.04.002

基于肌电控制的灵巧手及其控制系统设计^{*}

杨 彬¹, 黄鹏程², 杨庆华¹, 鲍官军¹, 王志恒¹, 高 峰^{1*}

(1. 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, 浙江 杭州 310014;

2. 金华职业技术学院, 浙江 金华 321000)

摘要:针对传统工业/农业机器人在末端执行器结构上的局限性,在结构设计过程中改变了传统的以刚性结构为核心的设计方案,将气动柔性驱动器(FPA)作为基础,并以人手部结构为原型结合其关节的运动特性,设计出了新型灵巧手;同时,针对传统机械手动作方式单一、欠缺灵活性的问题,将肌电信号(EMG 信号)引入到灵巧手的控制策略中,提出了以肌电信号控制的方式,实现了对灵巧手的操作;在保证控制精度的基础上,通过模拟人手动作方式,增加了灵巧手的运动形式。实验结果表明,该仿生灵巧手控制系统的控制精度达到 98%,该灵巧手控制方法的可行性由此得到了验证。

关键词:灵巧手;结构设计;肌电信号;肌电控制;控制算法;气动柔性驱动器

中图分类号:TH122;TH39;TP241

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)04-0388-07

Design of dexterous hand and its control system based on myoelectric control

YANG Bin¹, HUANG Peng-cheng², YANG Qing-hua¹, BAO Guan-jun¹,
WANG Zhi-heng¹, GAO Feng¹

(1. Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Jinhua Polytechnic, Jinhua 321000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional industrial/agricultural robots had limitations in actuator structure, the concept made a difference from the traditional plans with rigid structure as its core, dexterous hand was designed with flexible pneumatic actuator(FPA) as its core component based on the former research foundation and joint motion characteristics of human hand. Because of traditional mechanical hand was too simplistic and inflexible, the myoelectric (EMG) control strategy was proposed to mimic a human's hand. The experimental results indicate that accuracy of control system is 98% and feasibility of control system is verified in position controlling experiment of joint.

Key words: dexterous hand; structural design; electro myograph signal(EMG); myoelectric control; control algorithm; flexible pneumatic actuator(FPA)

0 引 言

20 世纪 90 年代以来,传统工业机器人的技术和应用都趋向饱和^[1-2],伴随仿生学的出现和机器人与人工智能技术的高速发展,关于机器人方面的应用已经从工业领域逐渐延伸到农业、康复医疗、娱乐服务业等

领域中,其操作环境往往是动态非良好的^[3-4]。

因此,不仅机器人的末端执行器需要更加灵活,更能适用各种多变的操作对象,机器人控制系统的控制策略和控制精度也相应地有更高的要求。

无论是工业机器人,还是农业机器人,末端执行器往往是直接接触工件的重要执行部件,其结构和控制

收稿日期:2015-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51405441);浙江省重点科技创新团队资助项目(2011R50011);浙江省自然科学基金资助项目(Q15E050025)

作者简介:杨 彬(1991-),男,彝族,云南个旧人,硕士研究生,主要从事医疗康复训练机器人方面的研究. E-mail: 499728244@qq.com

通信联系人:高 峰,男,副教授,硕士生导师. E-mail: gaofeng@zjut.edu.cn

的灵活性直接关系到整体机器人的工作效果。目前,在机器人末端执行器(机械手)的设计过程当中,大多数的研究人员所选方案为:以人的手作为原型,模拟人手的结构与功能,之后进一步设计出具有多手指、多关节的多自由度灵巧手^[5]。而在机械手控制系统方面,传统的控制策略是以电机驱动的方式控制机械手,其简单、易实现、控制精度高的优点使其广泛地应用于传统机器人的控制中。但是,电机驱动刚性结构的控制方式导致的运动形式单一、缺乏灵活性的问题限制了灵巧手的进一步应用,使其无法在工农业生产过程中胜任更复杂、更精密的工作。

针对传统机械手在结构设计和控制策略方面的局限性,本研究改变传统的以刚性结构为核心的设计方案,将气动柔性驱动器(FPA)作为基础,并以人手部结构为原型,结合其关节的运动特性,设计灵巧手。同时,将肌电信号(EMG 信号)引入到灵巧手的控制策略中,以肌电控制的方式,实现对灵巧手的操作,在保证控制精度的基础上,模拟人手动作方式,增加灵巧手的运动形式,拓展其在工农业方面的应用范围。

1 灵巧手外形结构设计

1.1 单个手指的基本结构

由浙江工业大学所提出的气动柔性驱动器 FPA,通过在橡胶管内嵌入钢丝来限制橡胶管的轴向变形。气动柔性驱动器 FPA 的主要组成部分是两层具有弹性橡胶管,之后把硫化后的弹簧嵌入到橡胶管壁中间所制成的^[6-7]。其工作原理为:将气泵连接 FPA 端盖上的管接头,然后向 FPA 的内腔充入气体并进行压缩,当其内腔当中的气压升高时,橡胶管就好向四周发生膨胀。但是,由于管壁内弹簧的轴向约束,橡胶管只能在轴向伸长变形;当其内腔当中的气压降低时,橡胶管以及弹簧的弹性作用又将它回复到初始的状态。

气动柔性驱动器如图 1 所示。

现阶段灵巧手的主要任务是模拟人类手指的弯曲动作,因此在设计时本研究根据人手的实际尺寸并采用了模块化理念制作出了手指的整体结构。而这种结构的特点就是便于装配和修改。根据人手自然运动规律,结合其手指关节的运动特性,灵巧手采用两个指关节的设计方式,分别对应人手的掌指关节和近指关节,并使用两种不同的弯曲关节^[8-9],其手指基本结构如图 2 所示。

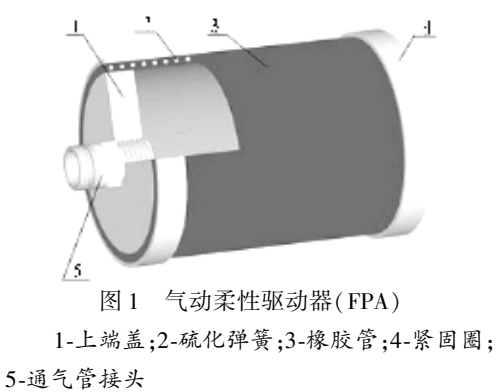


图1 气动柔性驱动器(FPA)

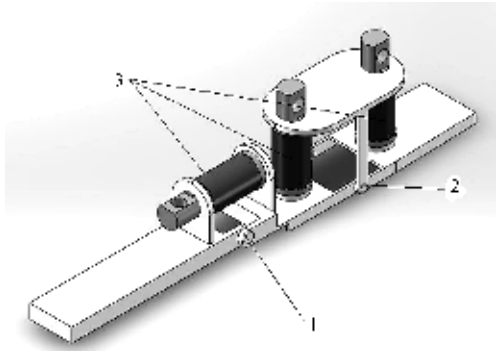


图2 单个手指的基本结构

1-关节 1;2-关节 2;3-FPA

为了简化灵巧手整体结构,本研究忽略不同手指之间和不同指关节之间的耦合作用,采用独立气动的方式对不同的手指与关节进行控制。而在控制的方式上各关节与手指都是相同的。关节 1 中 FPA 采用横向布置,轴线与其所属手指的轴线平行;而关节 2 中 FPA 的轴线则是垂直于手指轴线布置。

1.2 整体布局方案和设计

灵巧手的整体布局方案和结构参数采用了仿生学的优化策略,参考人手的布局及比例^[10-11],考虑关节位置传感器所占的空间之后,本研究以中指轴线为整体结构的轴线(即手轴线),其余手指按照间隔 20° 布置,具体的结构布局如图 3 所示。

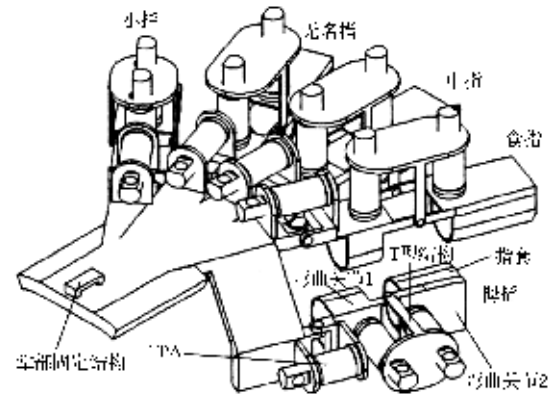


图3 布局方案示意图

本研究结合灵巧手的总体布局方案及其基本结构,设计了灵巧手原型。其中,气动柔性驱动器 FPA 是本题组自制,而灵巧手的其余部分均采用快速成型技术,即激光选择性烧结成型技术加工而成^[12],制作的材料为尼龙(PA12),其强度和韧性均为较好的,满足灵巧手实际应用的需求。其结构的主要参数如表 1 所示。

表 1 灵巧手结构主要参数

参数的名称	参数值
中指的轴线与手轴线的角度/°	0
中指关节 1 的长度/mm	50
中指关节 2 的长度/mm	50
食指的轴线与手轴线的角度/°	20
食指关节 1 的长度/mm	50
食指关节 2 的长度/mm	50
无名指的轴线与手轴线的角度/°	20
无名指关节 1 的长度/mm	50
无名指关节 2 的长度/mm	50
小指的轴线与手轴线的角度/°	40
小指关节 1 的长度/mm	40
小指关节 2 的长度/mm	40
拇指相对于食指的倾斜角度/°	45
拇指关节 1 的长度/mm	35
拇指关节 2 的长度/mm	30
手掌部分的厚度/mm	6
仿生灵巧手本体的重量/g	120

其整体结构的 3D 效果图如图 4 所示。

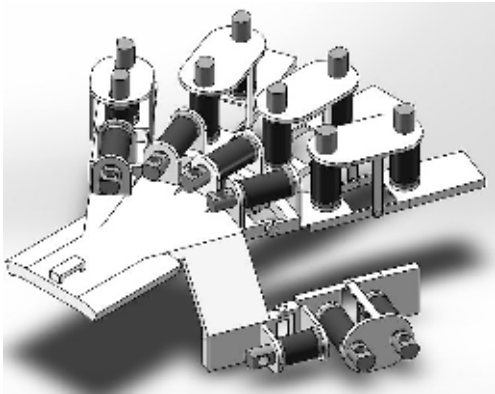


图 4 3D 效果图

2 灵巧手的控制策略

2.1 肌电控制基本原理

肌电控制的原理是通过分析肢体动作状态发生变化时产生的人体电信号(肌电信号)的特征来识别不同的动作模式。肌电控制属于典型的人际交互系统,人体在系统中占有重要地位^[13],目的是控制外部设备模拟人类肢体运动方式。其具体实现步骤如下:首先通过信号采集电极采集肌电信号,并将信号传送至计

算机;然后,计算机中的信号处理系统会基于不同的算法对信号进行分析处理,并得出可以表征信号动作的特征参数值或特征参数向量;最后,通过不同的控制算法来实现对外部设备的控制。

2.2 肌电控制策略

本研究以灵巧手的结构特点和驱动方式为基础,结合文献[14]和文献[15]提出的肌电信号分析处理算法,设计灵巧手的总体控制方案,该方案如图 5 所示。

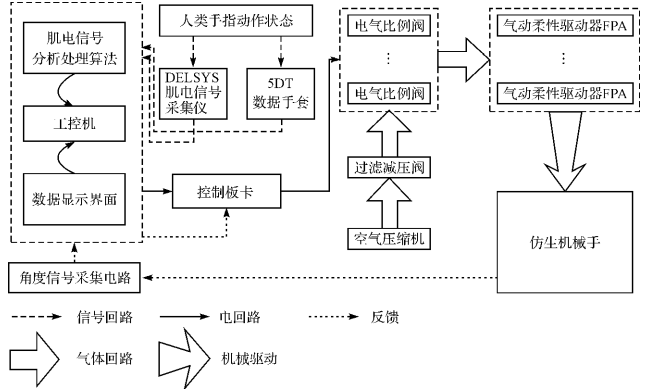


图 5 总体控制方案

灵巧手的控制系统分为 3 个部分:

- (1) 工控机部分。主要包括了肌电信号的采集,处理和分析以及模式识别。通过算法在其内部的计算,从而得出各个关节的弯曲角度。
- (2) 气动回路部分。主要由包括 SMC 公司的 ITV0050-3BS 电气比例阀、过滤减压阀、空气压缩机以及相关的一些气管组成。这个部分主要的任务是为 FPA 提供足够安全稳定的气源。
- (3) 控制器部分。主要包括了电气比例阀的控制和灵巧手的角度反馈控制,根据反馈到工控机的弯曲角度值,经过转换后,对电气比例阀所输出的气压值进行修正,并通过气动柔性驱动器 FPA,实现对灵巧手弯曲动作的控制。

2.3 基于肌电信号的控制算法

控制算法是以稀疏分解算法和幅值奇次乘方法为理论基础,研究肌电信号的变化过程与肢体运动状态的对应关系,将肢体连读动作产生的肌电信号转换成连续的特征参数曲线,并通过特征参数曲线与原始肌电信号的对比,验证算法的有效性。

由总体的控制方案得知,灵巧手关节的直接驱动量为电气比例阀的输出气压,而电气比例阀的输出气压与其输入电压之间存在着一定的对应关系。分析得到的特征参数曲线与输入的电压相对应,实现肌电信号对灵巧手各个关节的控制。本研究提出的灵巧手肌电控制

算法框图如图 6 所示。

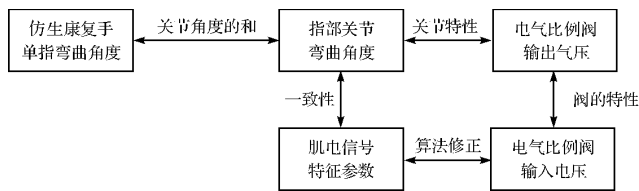


图 6 机电控制算法框图

其中,灵巧手的关节弯曲角度与电气比例阀的输出气压的对应关系是由关节自身的特性所决定的;而电气比例阀所具有的特性也只是决定了其输出的气压与输入的电压之间的映射关系,与外界设备或算法并无关联。指部关节弯曲角度与肌电信号的一致性预期实现的目标。

SMC 公司生产的 ITV0050-3BS 电气比例阀的性能参数说明书如表 2 所示。

表 2 电气比例阀的性能参数说明

主要的性能指标	参数值
型号	ITV0050-3BS
供气压力/MPa	0.1 ~ 1
可调节范围/MPa	0.001 ~ 0.9
最大流量/L · min ⁻¹	6 (ANR)
电源	24 VDC@0.12 A
输入/V	0 ~ 10
输出/V	0 ~ 5
线性度	± 1%

其输入电压与输出气压之间的线性关系如图 7 所示,其中纵坐标表示输出的气压值 (MPa),横坐标为实际输入与最大输入的比值 (% F.S.)。

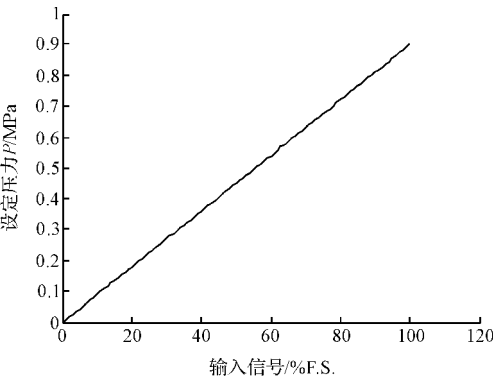


图 7 电气比例阀的直线度

根据表 2 和图 7 的信息,可得电气比例阀输入电压与输出气压之间的关系为:

$$P=0.09 V \tag{1}$$

通过对弯曲关节特性的分析,以及电气比例阀的输入输出对应关系,本研究提出的灵巧手机电控制算法的具体实现步骤如下:

(1) 将分析和处理后得到肌电信号的特征参数值

进行归一化处理:

$$f=\frac{f_m-f_{\max}}{f_{\max}-f_{\min}} \tag{2}$$

式中: f —归一化之后的参数值; f_m —归一化之前的参数值; $f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ —归一化之前参数曲线的最大值和最小值。

(2) 根据实际需求确定灵巧手所需的最大弯曲角度(最小弯曲角度通常为 0°,如有特殊需求,可根据实际情况作相应调整),对归一化后所得的特征参数曲线,进行幅值对应处理,从而获取关节弯曲角度的曲线:

$$\theta_{\text{EMG}}=f\cdot(\theta'_{\max}-\theta'_{\min}) \tag{3}$$

式中: θ_{EMG} —关节弯曲的角度; $\theta'_{\max}$ —灵巧手所需弯曲的最大值, $\theta'_{\min}$ —弯曲角度的最小值。

(3) 由式(3)得,将关节 1 弯曲的角度转换为电气比例阀的输出气压:

$$\Delta P_1=\frac{2Et_1}{r_1}\cdot\frac{L_1\frac{\theta_1}{2}\cot\left(\frac{\theta_1}{2}\right)+H_1\theta_1-L_1}{L_1\frac{\theta_1}{2}\cot\left(\frac{\theta_1}{2}\right)+H_1\theta_1} \tag{4}$$

式中: E —其橡胶管的弹性模量, t_1 —关节 1 的 FPA 初始壁厚, r_1 —其平均半径, L_1 —其初始的长度, H_1 —橡胶管的中心线与关节轴中心线之间的垂直距离。

(4) 基于关节 2 气压与角度的关系式(为了和关节 1 的分析过程一致并简化计算公式,本研究取 FPA 中心线处的伸长量为平均伸长量),将关节 2 的弯曲角度值转换为电气比例阀输出的气压值:

$$\Delta P_2=\frac{2Et_2}{r_2}\cdot\left[1-\frac{2L_2}{\left(\frac{1+\cos(\alpha)}{\sin(\alpha)}+2E_2+2r_2\right)\cdot\alpha}\right] \tag{5}$$

式中: E —橡胶管的弹性模量; t_2 —关节 2 的 FPA 初始壁厚; r_2 —其平均半径; L_2 —其初始的长度; H_2 —橡胶管的中心线与关节轴中心线之间的垂直距离; α —关节 2 弯曲角度的一半,即 $\theta_2=2\alpha$ 。

(5) 根据式(1)所示输入输出的关系,可以得到电气比例阀输入的电压曲线。

由式(1~5),可得肌电信号特征参数与电气比例阀输入电压的基本映射关系为:

$$V_{\text{input1}}=\frac{200Et_1}{9r_1}\cdot\frac{L_1\frac{\theta_1}{2}\cot\left(\frac{\theta_1}{2}\right)+H_1\theta_1-L_1}{L_1\frac{\theta_1}{2}\cot\left(\frac{\theta_1}{2}\right)+H_1\theta_1} \tag{6}$$

$$V_{\text{input2}}=\frac{200Et_2}{9r_2}\cdot\left[1-\frac{2L_2}{\left(\frac{1+\cos(\alpha)}{\sin(\alpha)}+2E_2+2r_2\right)\cdot\alpha}\right] \tag{7}$$

式中: V_{input1} 、 V_{input2} —关节 1 FPA 和关节 2 的两个 FPA 所对应的阀的输入电压。

3 系统平台及软件实现方案

3.1 硬件平台

本研究的仿生灵巧手肌电控制系统的硬件平台是在浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室的气动实验搭建的。气动实验平台主要由电气比例阀、工控机、空气压缩机、运动控制板卡以及过滤减压阀等气动元件组成^[16-17],该气动实验平台所搭建的肌电信号控制系统主要包括原始数据采集系统与关节控制系统两部分。原始数据采集系统是由美国的 DELSYS 公司所生产的 Trigno Wireless System 以及用于配套使用的 EMGworks 软件和 5DT 数据手套组成,分别完成肌电信号和人手关节角度信号的采集任务;关节控制系统则分为关节控制和关节位置反馈两部分。灵巧手的指部关节的控制系统作为整个控制系统的核心,直接决定了整个肌电信号控制的方案效果。实际搭建情况如图 8 所示。

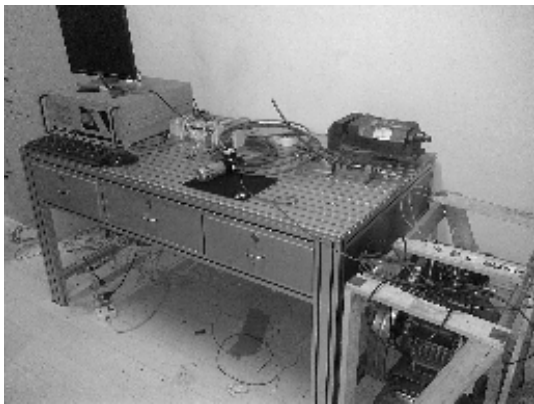


图 8 气动实验平台

本研究以前面所提到 ITV0005 系列电气比例阀和 dsPIC30F4012 单片机为核心,设计出了指部关节的控制系统。由于仿生手的各个关节的控制方案相同,其控制系统的构成也基本相同,其中主要包括了电气比例阀控制器、CAN 总线通信模块、dsPIC30F4012 的最小系统等组成。具体的硬件框图如图 9 所示。

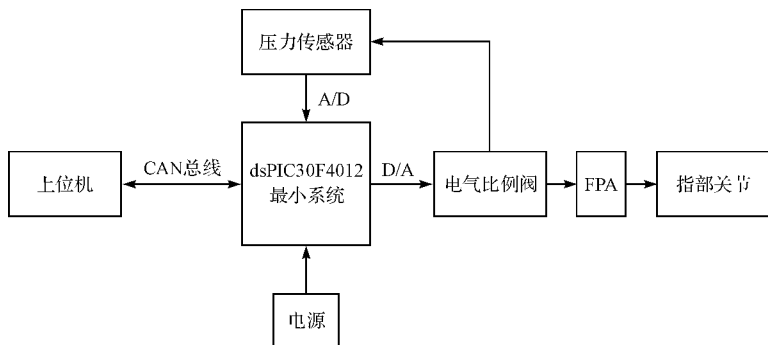


图 9 指部关节的控制硬件框图

单片机 dsPIC30F4012 之中的 D/A 转换模块会根据上位机软件(肌电信号分析软件)的结果,产生模拟的电压信号来控制电气比例阀的输出气压。而电气比例阀内的压力传感器会把输出的气压信号反馈到控制电路,进行反复的修正,直到电气比例阀输入的电压信号与实际所输出的气压信号相对应。其中,所用电气比例阀的气压响应时间约为 100 ms。在得到气压反馈信号并对其进行修正的同时,本研究通过 CAN 总线控制电路把 FPA 中此时的气压值传送至上位机(工控机),进行再一次运算修正。

关节位置反馈系统主要包括主控板卡、FPC 数据线以及载有 AS5045 的 PCB 电路板,其中主控板卡与工控机之间采用 CAN 总线通讯方式。根据测量原理,系统检测仿生灵巧手各个关节的位置信息,只需在关节转轴上放置一个旋转磁铁,且平行置于 AS5045 的上方,关节位置检测系统实物图如图 10 所示。

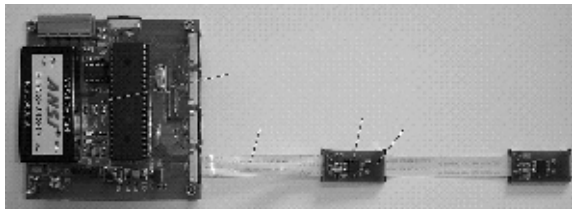


图 10 关节位置检测系统实物图

3.2 软件设计

软件模块在本研究的肌电控制系统中,其功能主要有^[18]:

- (1) 直观地把肌电信号与其对应手指的实际弯曲度在控制系统软件的界面上显示出来,并且通过神经网络分类器进行运动部位的识别;
- (2) 控制算法控制电气比例阀;
- (3) 实时地显示出指部关节弯曲角度,并与相应手指的实际弯曲角度进行对比,完善闭环控制,提高肌

电控制系统的控制精度。

根据软件的功能需求,肌电控制系统软件的设计方案如图 11 所示。

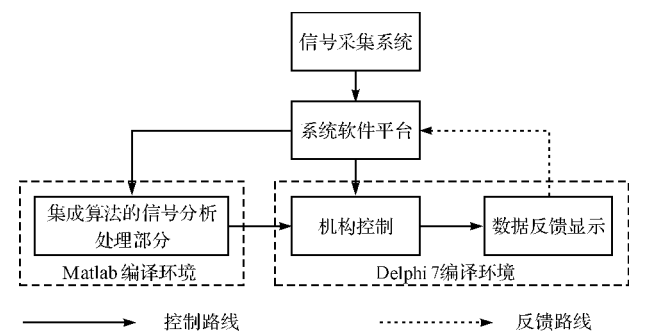


图 11 软件设计方案

其中,集成算法的肌电信号分析处理部分的程序是在 Matlab 中实现的;机构的控制和数据的反馈部分程序所采用的是 Delphi7 编译环境。

4 实验及分析

该实验分别以受试者的 5 个手指的弯曲动作为目标动作,以 2 000 Hz 的采集频率采集对应的肌电信号,通过肌电信号分析处理算法得出信号的特征参数曲线。根据 2.3 节的控制算法的步骤(1~2)可以得到灵巧手的手指弯曲角度的目标曲线。

实验中弯曲关节 2 的 FPA 位置参数因手指不同而有所差别(拇指为 10 mm,食指、中指和无名指为 13 mm,小指为 11 mm)。该实验中用到的弯曲关节参数如表 3 所示。

表 3 弯曲关节 FPA 参数

参数	弯曲关节 1	弯曲关节 2
初始壁厚 t/mm	2.0	2.0
初始长度 L/mm	20.0	20.0
平均半径 r/mm	5.0	5.0
位置参数 H/mm	14	10/13/11
弹性模量 E/MPa	2.0	2.0

实验步骤如下:在得到仿生灵巧手的控制信号曲线后,通过图 9 所示的关节控制系统控制电气比例阀向其所对应的 FPA 当中充入压缩气体,通过指部关节位置反馈系统测量相应关节的弯曲角度值,并在上位机(工控机)上显示。为了消除橡胶的粘滞性对关节弯曲角度的影响,笔者在每次加压之后稳定 1 s~2 s,再记录下关节的实际弯曲角度。在实验过程中,笔者排除肌电信号识别失败的样本,即在信号的动作部位识别成功的基础上讨论控制系统的控制精度。

在 1.1 节中提到,灵巧手 5 个手指的控制方式完全相同,因此本研究以灵巧手食指关节 2 为例,分析系统的控制精度。其目标角度曲线(Step 2 中的最大弯曲角度为 90° ,最小弯曲角度为 0°)与关节 2 实际弯曲角度的对比图如图 12 所示。

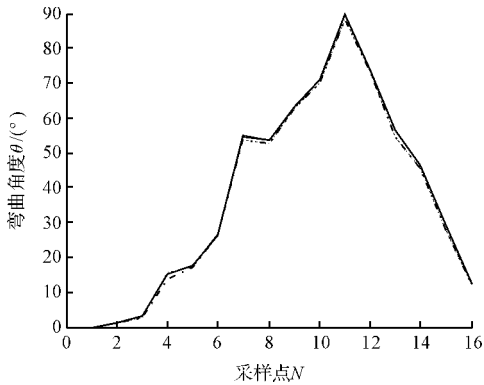


图 12 弯曲角度对比图

具体数值如表 4 所示。

表 4 弯曲角度对比

特征点数	弯曲角度/ $(^\circ)$			相对误差/%
	目标	实际	偏差	
1	0.0	0.0	0.0	0
2	1.0	0.9	0.1	10
3	3.0	2.8	0.2	6.7
4	14.8	13.6	1.2	8.1
5	17.3	16.9	0.4	2.3
6	26.5	26.2	0.3	1.1
7	54.9	53.7	1.2	2.2
8	53.7	52.8	0.9	1.8
9	63.2	62.7	0.5	0.8
10	70.9	69.8	1.1	1.6
11	90	88.2	1.8	2.0
12	74.0	73.6	0.4	0.54
13	56.5	54.9	1.6	2.8
14	46.1	45.5	0.6	1.3
15	29.5	28.2	1.3	4.4
16	12.3	11.8	0.5	4
平均值(除 0° 之外)				3.31

分析表 4 的数据可以发现,除了起始点的目标角度与实际角度完全一致外,其余各点均存在一定的误差,其中最大相对误差发生在点 2(弯曲角度 1°)处,而最小相对误差发生在点 12(弯曲角度 74°)处,分别为 10% 和 0.54%。考虑到仿生康复手关节的起始角度是可以控制的,在计算系统平均相对误差时,需排除起始点的数值。因此,系统的平均相对误差约为 3.3%。

相对误差的变化趋势图如图 13 所示。

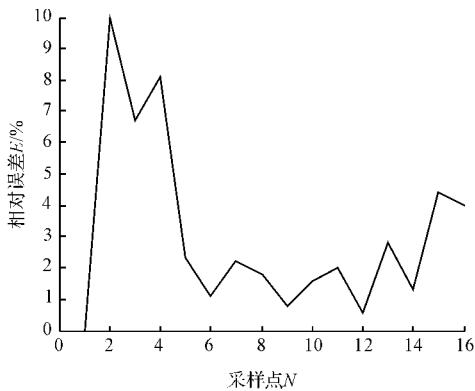


图 13 误差变化趋势图

由图 13 可知,在起始阶段,关节的控制误差从 0% 骤升至 10%,并在 7% 左右有一次波动;在稳定阶段,相对误差降至 2% 左右并趋于平稳;在结束阶段,误差又从 2% 左右升至 4%。其变化的原因,经过分析后可能是:驱动方式上的问题。仿生灵巧手采用的是压缩气体驱动的方式,而在电气比例阀开始输出气压时,由于 FPA 内腔气流影响,会引起内腔气压的不稳定,从而导致了初始阶段的误差较大;而当 FPA 内腔的气压稳定之后,误差则显著下降,最后趋于稳定。

5 结束语

(1) 基于人手指部关节动作特性和尺寸构造,本研究以基于气动柔性驱动器 FPA 为驱动核心,通过两种不同结构的弯曲关节相互组合的形式,设计了仿生灵巧手,作为工业或农业机器人的末端执行器。

(2) 本研究将肌电信号引入到灵巧手的控制策略之中,提出以肌电控制的方式控制灵巧手,使其更好地模拟人手的运动方式。

(3) 基于肌电控制方案,本研究设计了仿生灵巧手控制系统。通过关节位置控制实验,测试仿生灵巧手控制系统的控制精度,结果显示平稳阶段相对误差约为 2%,验证了提出的灵巧手控制方法的可行性以及设计的控制系统的控制效果。

参考文献 (References):

[1] 蔡自兴. 21 世纪机器人技术的发展趋势[J]. 南京化工大学学报,2000,22(4):73-78.

- [2] 刘永安,余天荣. 工业机器人的应用研究[J]. 机电工程技术,2014,43(2):52-53,104.
- [3] 张立娟,姜世公,崔登祺,等. 人体下肢运动康复训练机器人的设计[J]. 兵工自动化,2015,34(5):50-53.
- [4] BELFORTEL G, DEBOLI R, GAY P, et al. Robot design and testing for greenhouse applications[J]. **Biosystems Engineering**, 2006, 95(3):309-321.
- [5] 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.
- [6] YANG Q H, ZHANG L B, BAO G J, et al. Research on Novel Flexible Pneumatic Actuator FPA [C]//Robotics, Automation and IEEE Conference on Mechatronics 2004. New York: IEEE, 2004:384-389.
- [7] 张立彬,鲍官军,杨庆华,等. 一种气动柔性驱动器:中国, ZL200520101465. 2[P], 2006. 3.
- [8] 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):2903~2907.
- [9] 黄鹏程,杨庆华,鲍官军,等. 新型气动弯曲关节的静态特性分析[J]. 机器人,2013,35(1):67-72.
- [10] 张玉茹,李继婷,李剑锋. 机器人灵巧手:建模、规划与仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [11] 张永德,刘廷荣. 机器人多指灵巧手的结构参数优化设计[J]. 机器人,1999,21(3):234~240.
- [12] 刘云峰,杨利平,董星涛,等. 基于现代设计与制造技术的小儿发育性髋脱位精确治疗外科手术研究[J]. 浙江工业大学学报,2009,37(2):208~212.
- [13] 杨大鹏. 仿人型假手多运动模式的肌电控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电工程学院,2011.
- [14] 李 静,赵 丽,任淑艳,等. 基于虚拟仪器的表面肌电信号特征提取算法的研究[J]. 机床与液压,2011,39(3):41-43.
- [15] 黄鹏程,杨庆华,鲍官军,等. 基于幅值立方和 BP 神经网络的表面肌电信号特征提取算法[J]. 中国机械工程,2011,23(11):1332~1336.
- [16] 王志恒,钱少明,杨庆华,等. 气动机器人多指灵巧手 ZJUT HAND[J]. 机器人,2012,34(2):223-230.
- [17] 张海英. 基于 PLC 的气动吸盘式工业机械手设计[J]. 液压气动与密封,2013,33(3):74-76.
- [18] 黄鹏程. 基于多点连续肌电控制的仿生康复手关键技术研究[D] 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2013.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

杨 彬,黄鹏程,杨庆华,等. 基于肌电控制的灵巧手及其控制系统设计[J]. 机电工程,2016,33(4):388-394.

YANG Bin, HUANG Peng-cheng, YANG Qing-hua, et al. Design of dexterous hand and its control system based on myoelectric control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(4):388-394.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>