

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2016.010.008

# 基于数据手套的气动灵巧手控制系统设计

郭冰菁, 李鹏杰, 韩建海, 李向攀, 朱玉乐

(河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**设计的气动人工肌肉驱动的灵巧手控制系统,由数据手套完成远端到临近点的主从控制,由分布式二级控制系统完成临近点到接触点的自主控制。两种控制方式相融合,既提高了抓取效率,又保证了抓取的柔性,对灵巧手的智能控制方法的研究有一定的参考价值。

**关键词:**气动人工肌肉;数据手套;灵巧手;主从控制;自主控制

中图分类号:TH137 文献标志码:B 文章编号:1000-4858(2016)010-0042-05

## Design of Pneumatic Dexterous Hand Control System Based on Data Glove

GUO Bing-jing, LI Peng-jie, HAN Jian-hai, LI Xiang-pan, ZHU Yu-le

(School of Mechatronic Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003)

**Abstract:** A dexterous hand control system which is driven by the pneumatic artificial muscle is designed. The master-slave control from the distal to the near point is performed by a data glove, and the autonomous control from the neighboring points to the point of contact is performed by the distributed secondary control system. This system can not only improve the capture efficiency but also ensure the flexible of grab with the two control modes together, which can provide a certain reference value to the intelligent control of dexterous hand.

**Key words:** pneumatic artificial muscle, data glove, dexterous hand, master-slave control, autonomous control

### 引言

随着灵巧手技术的发展,其控制方式也在不断发展。自主控制和主从控制是其主要的两种控制方式。灵巧手的自主控制是指其根据给定任务和外界条件,能够自主的决定操作过程并完成任务,体现了灵巧手的高智能性。在主从控制中,灵巧手从初始位到抓持位的过程由人手来控制,灵巧手的运动被人手运动所决定,将人手直观的映射到灵巧手来完成操作任务。本研究设计的基于数据手套的灵巧手控制系统同时具有主从控制和自主控制,在灵巧手初始位置到临近点之间,采用主从控制;采用自主控制使灵巧手从临近点移动到接触点。这两种方式的融合大大提升了灵巧手的作业能力。

### 1 灵巧手抓取控制系统总体方案

灵巧手抓取控制系统由三级控制器(PC机、DSP和单片机)构成,如图1所示,由数据手套作为外设实

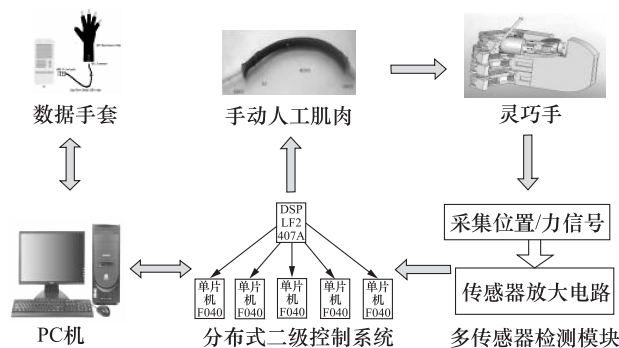


图1 灵巧手抓取控制系统

收稿日期:2016-03-16

基金项目:河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A460025);  
洛阳市科技计划项目(1401006A)

作者简介:郭冰菁(1973—),女,江苏南京人,副教授,硕士,  
主要从事机电控制技术方面的研究和教学工作。

现主从控制,由灵巧手上安装的关节角度传感器和触力传感器作为信息反馈实现闭环自主控制。

### 1.1 控制系统结构

灵巧手从初始位置运动到临近点的过程中,人手(主手)直接操控灵巧手(从手)来实现主从控制。人手操控灵巧手运动到临近点的信息由数据手套采集之后传输给PC机<sup>[1]</sup>。

主从控制中使用的5DT Data Glove 14 Ultra数据手套采用弹力纤维材料制作而成,能够满足各种大小的人手佩戴。手套夹层内置传感器,每跟手指2个,指间各1个,共14个曲形传感器。它们可以测量出手指关节的角度和指间的宽度。

灵巧手在自主控制阶段的轨迹规划是由PC机完成的,通过灵巧手二级分布式控制系统对其内部传感器所采集的关节角度和指端力的信息进行处理,从而控制灵巧手完成抓持动作。因为数据手套在灵巧手到达临近接触点的时候被关闭,所以此过程是脱离手套控制的。

在二级分布式控制系统中,DSPLF2407A主芯片控制灵巧手的运动,并且对其进行负载分配。每根手指都有一个基于C8051F040单片机的控制系统,灵巧手的运动控制协调层和每个手指控制层的通讯是由CAN控制器和总线通讯协议完成的。手指控制器中采用阻抗控来实现灵巧手的柔顺控制,该控制算法不但能够实现位置和力的精确控制,同时也能够实现柔顺控制的设计要求<sup>[2]</sup>。

### 1.2 灵巧手结构

以气压作为所研究灵巧手的驱动动力源,具体采用自制的气动人工肌肉<sup>[3]</sup>为灵巧手的驱动元件,并将一对驱动元件安装在中关节处。为了能够实现灵巧手的灵活性和轻便性<sup>[4]</sup>,柔顺的运动耦合技术被使用到远端关节处,从而实现欠驱动的结构设计来达到目的。图2为单关节控制原理图,该手指关节工作原理为:单片机会产生PWM信号方波,改变高速开关阀的打开与关闭,进而改变人工肌肉的充气和放气量,从而控制肌肉的变化来带动腱传动<sup>[5]</sup>,达到手指关节转动的目的。

由于侧重点不同,本研究重点介绍基于数据手套的主从控制系统的实现及实验过程。

## 2 基于数据手套的主从控制规划

### 2.1 主从控制总流程图

主从控制系统是指由主手操控从手的运动并将该

过程中主手和从手的信息反馈给上位机的实时在线控制方式。该控制方式下的灵巧手机动性好并且完成作业能力强。如图3所示为该灵巧手的主从控制流程图。

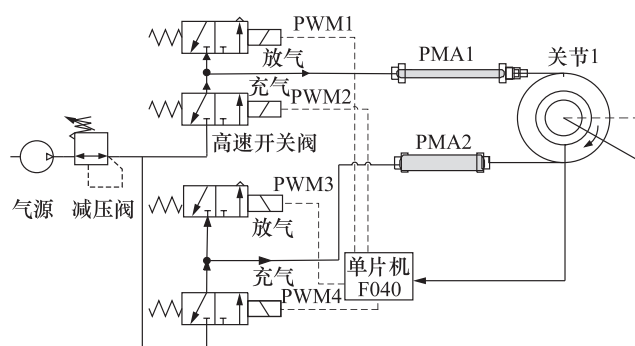


图2 单关节控制原理图

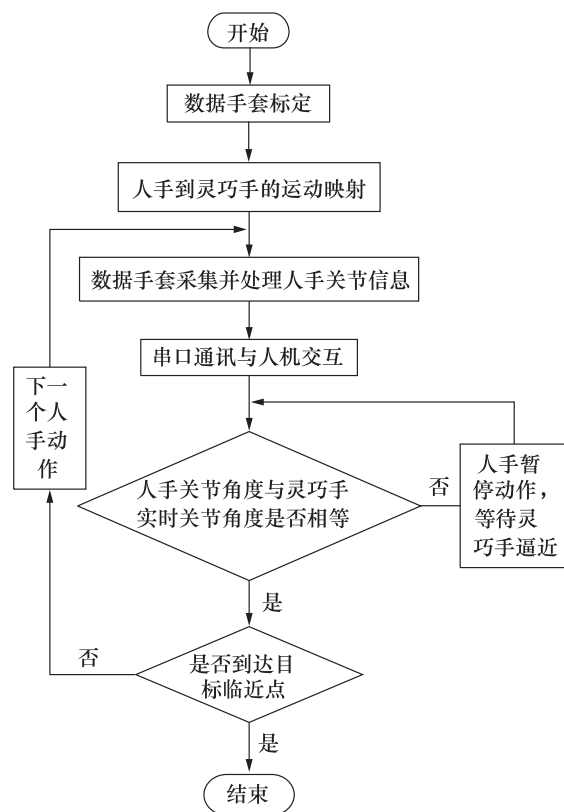


图3 基于数据手套的主从控制规划流程图

### 2.2 人手到灵巧手的运动映射

本研究中的主从控制系统,人手只是完成到抓取临近点的规划,因此位置上的对应关系在人手指尖和所要抓取的物体之间并不成立<sup>[6]</sup>,但是我们可以获得运动过程中人手指尖相对人手掌的位置,使用比例关系的映射,将其映射到灵巧手指指尖在其手掌坐标系(如图4所示)中的位置<sup>[7]</sup>。

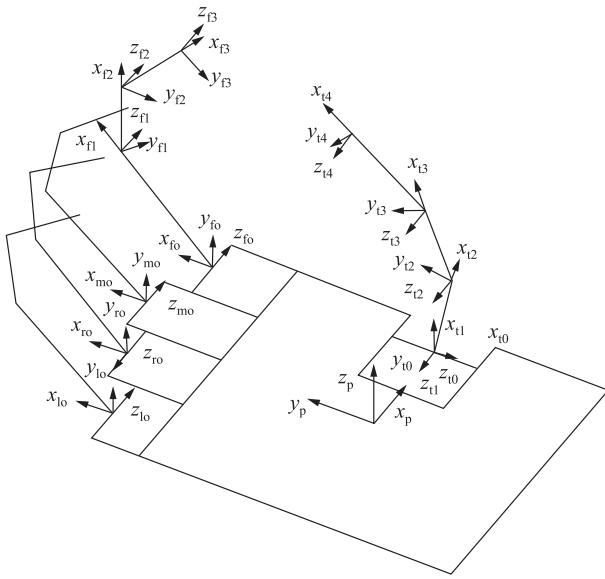


图4 灵巧手掌的坐标系简图

因为直角坐标系空间简单直观,本研究中主从手指尖位置映射在该条件下进行。主从图4中:各手指极坐标系为 $(x_{xo}y_{xo}z_{xo})$ ,手掌坐标系为 $(x_p y_p z_p)$ ,各手指关节坐标系 $(x_{xi}y_{xi}z_{xi})$ ,其中下标 $x$ 代表各指统称,t为拇指,f为食指,m为中指,r为无名指,l为小指。

手在各自手掌所在坐标系中的位置,可写为

$r_{iH}, r_{iR}$ 。

假如,在某次工作情况下, $r_{iH}, r_{iR}$ 表示为:

$$r_{iH} = [x_{iH}, y_{iH}, z_{iH}]^T \quad (1)$$

$$r_{iR} = [x_{iR}, y_{iR}, z_{iR}]^T \quad (2)$$

则  $r_{iR}$  可以用  $r_{iH}$  表示:

$$r_{iR} = k_i r_{iH} \quad (3)$$

式中,  $k_i$  为主从手之间运动映射阵。

主从运动映射的优劣以及主从手指尖映射的运动关系都由矩阵  $k_i$  的选取来决<sup>[8]</sup>。设:

$$k_i = \begin{bmatrix} k_{xxi} & k_{yxi} & k_{zxi} \\ k_{xyi} & k_{yyi} & k_{zyi} \\ k_{xzi} & k_{yzi} & k_{zzi} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(3)得:

$$x_{iR} = k_{xxi}x_{iH} + k_{yxi}y_{iH} + k_{zxi}z_{iH} \quad (5)$$

$$y_{iR} = k_{xyi}x_{iH} + k_{yyi}y_{iH} + k_{zyi}z_{iH} \quad (6)$$

$$z_{iR} = k_{xzi}x_{iH} + k_{yzi}y_{iH} + k_{zzi}z_{iH} \quad (7)$$

主从控制中要求运动映射简单直观<sup>[9]</sup>,在保证主从手指尖运动映射明确的前提下使用尽量简单的矩阵<sup>[10]</sup>。相邻的主手指尖位形在主手以较慢的速度去抓物体的时候相差并不大,因此取:

$$k_{xxi} = k_{yyi} = k_{zzi} = \frac{L_R}{L_H} \quad (8)$$

式中,  $k_i$  中的其它位置取0,可得:

$$k_i = \begin{bmatrix} \frac{L_R}{L_H} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L_R}{L_H} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_R}{L_H} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中,  $L_H, L_R$  为主手和从手指长度。

### 3 基于数据手套的人手运动数据采集与处理

数据手套采集人手信息,经过处理的信息传输给PC机,步骤如图5所示。

人手与灵巧手的比例映射关系由公式(9)可以得到,虽然5DT数据手套不能直接测量各指的远指端关节,但人手除拇指外的四个手指的远端关节存在线性耦合关系,即:

$$\theta_{Dij} = k\theta_{pij} \quad (10)$$

参考人手统计数据, $k$ 取2/3较为合理。

#### 3.1 数据手套的标定

因为不同的操作者,手掌大小不一,为了获得高精度的数据,故手套使用前需要进行标定,将手套灵敏度调到上限。手套的标定:手指在自然弯曲和伸直状态下传感器的响应极限值。如图6所示的两根曲线分别为食指近、中两个关节传感器所采集到的数据信息,标定后食指近指关节的上限值、下限值和信号输入范围

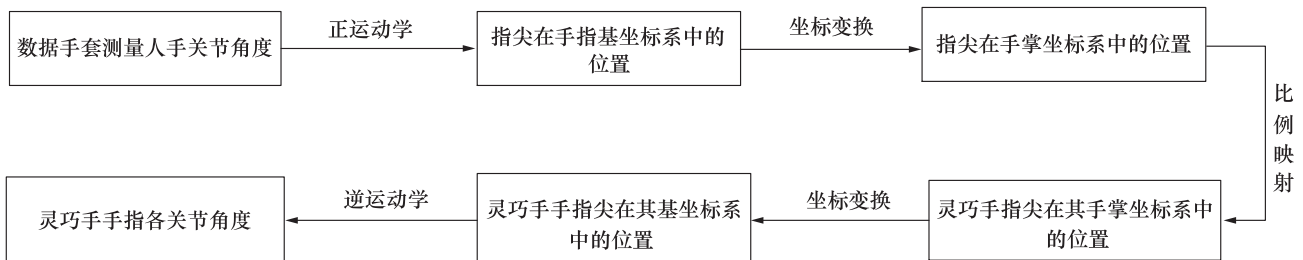


图5 主从手指尖映射步骤

分别 1240、356 和 884,在图示时刻的实际值为 386。标定系数为  $Scaled$ ,它的值可由式(11)求得:

$$Scaled = \frac{Raw - Min}{Max - Min} = \frac{Raw - Min}{Range} \quad (11)$$

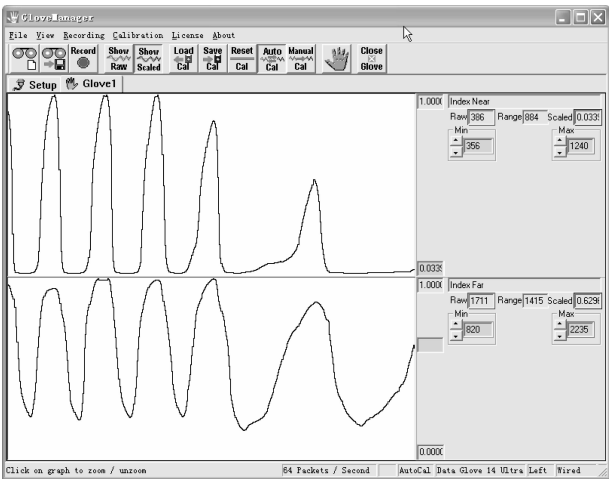


图 6 数据手套采集食指关节角度信息

人手的结构特点决定了每个人手指可转动的范围基本相同,因此对数据手套进行标定时角度可以由输入信号线性表示,即:

$$Ang_{current} = Scaled \times Ang_{range} \quad (12)$$

$$Ang_{range} = Ang_{max} - Ang_{min} \quad (13)$$

3.2 数据手套的消抖处理与实验结果

对数据手套进行延时消抖处理的目的是,为了得到稳定的抓取数据。如果不进行处理,手套中灵敏的传感器会采集到人手微小抖动的数据,从而影响控制过程。

此外,人手从一个动作到下一个动作的过程中存在过渡的状态,若对每一个动作都进行映射控制,灵巧手会出现断断续续运动的情况。所以,实时在线控制的关键点是只有当人手在一定姿势保持一定的时间,用来确认是需要映射的动作。因此,在操作过程中,只有当数据手套采集到的信息中,有大于 5°的关节角度变化才能表明手指在进行下一个操作动作,同时将采集到的数据信息进行保存,否则看作抖动进行处理,即不改变之前的数据信息。此时,数据手套传输的数据,通过软件进行消抖处理,经过人手到灵巧手的映射后传给下位机,从而控制灵巧手的运动。

3.3 实时数据采集与处理

将标定后的数据手套食指两关节角度传感器的数据进行采集,采集频率为 0.03 s 一次。

本研究选取主从映射实验中的一组实时采样数据

为例,对采集的人手数据处理过程进行说明。如表 1 所示。

表 1 数据手套采集食指关节数据

采样次数	近关节实测角度	中关节实测角度	近关节角度标定系数	中关节角度标定系数
1	363°	853	0.006	0.021
2	363°	852	0.006	0.020
3	363°	854	0.006	0.021
4	363°	853	0.006	0.021
5	363°	853	0.006	0.020
6	363°	852	0.006	0.021
7	363°	853	0.006	0.019
8	363°	850	0.006	0.019

以食指为例,人手运动初始时刻,近指关节运动角度变化很小,表 1 第 2 列列出的为前 8 个点,因此近指关节角度是完全相同的。同一时刻,中指关节角度有所变化,如表 1 的第 3 列所示。由公式(11)可计算出两关节的标定系数,如表 1 中的,第 4、5 列可知。按照上文所给公式(12)、公式(13),对数据进行处理,转换为实际人手食指近关节和中关节角度值,消抖处理前后两关节角度曲线图,分别为如图 7、图 8 所示。

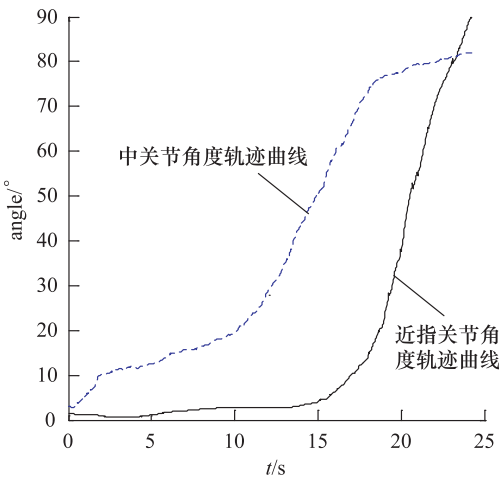


图 7 食指关节角度运动曲线图

远指节的关节角度可通过公式(10),利用中指节实时曲线获取。获得人手某指三关节角度后,通过比例映射转换为灵巧手某指的三关节规划曲线。手指控



制器以规划曲线为设定值,在主从控制阶段因没有接触到物体,此时仅为位置反馈控制。实测灵巧手手指各关节角度,与设定的规划曲线比较,通过调整关节PWM信号,驱动气动高速开关阀,从而控制人工肌肉的变化,最终实现关节角度的闭环控制。

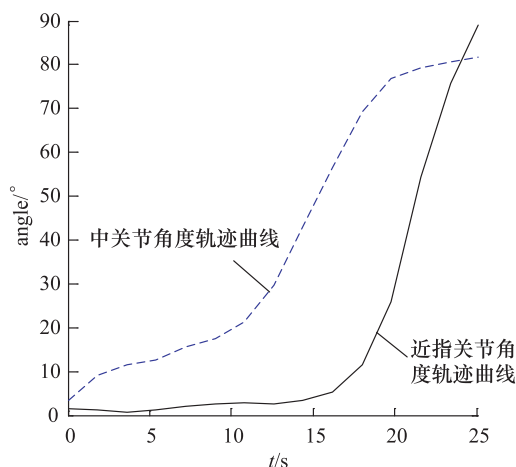


图8 消抖处理后的关节角度轨迹曲线

#### 4 结论

本研究介绍了气动灵巧手控制系统的结构,完整阐述了基于数据手套的主从控制系统的原理、数据采集处理方法及实验。本系统中,数据手套经过标定和消抖处理之后,能够很好的采集人手数据并进行处理。PC机规划指令通过CAN总线传输给二级控制系统,从而控制气动人工肌肉的伸缩来实现灵巧手的抓取。数据手套在主从控制中的使用将灵巧手难解决的高层任务决策让人手来完成,充分利用了人手和灵巧手各自的长处,大大提高了抓取效率。

#### 参考文献:

- [1] 韦婷,肖南峰. 基于数据手套的仿人机械手控制系统[J]. 计算机工程与设计,2009,30(7):1707-1711.  
WEI Ting, XIAO Nanfeng. Humanoid Robot Control System Based on Data Glove [J]. Computer Engineering and Design, 2009, 30(7): 1707-1711.
- [2] 高利斌. 仿人多指灵巧手抓持控制系统及柔顺控制策略研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2012.  
GAO Libin. Humanoid Multi-fingered Dexterous Hand Grasping Control System and Compliance Control Strategy Research [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2012.
- [3] 方得涛,郭冰菁,赵喜荣. 自制气动人工肌肉的基本特性研究[J]. 液压气动与密封,2009,29(1):22-24.  
FANG Detao, GUO Bingqing, ZHAO Xirong. Research on Basic Characteristic of the Home-made Pneumatic Artificial Muscle [J]. Pneumatic and Hydraulic Seals, 2009, 29(1): 22-24.
- [4] 兰天,刘伊威,陈养彬. 机器人灵巧手基关节交叉耦合同步控制[J]. 机器人,2010,32(2):150-156,165.  
LAN Tian, LIU Yiwei, CHEN Yangbin. Base Joint Cross Coupling Synchronization Control of Dexterous Robot Hand [J]. Robot, 2010, 32(2): 150-156, 165.
- [5] 余麟,彭光正,刘昊. 气动肌肉驱动的灵巧手指及模糊PID控制[J]. 液压与气动,2008,(11):37-39.  
YU Lin, PENG Guangzheng, LIU Hao. Nimble Fingers and Fuzzy PID Control Driven by Pneumatic Muscle [J]. Chinese Hydraulic & Pneumatic, 2008, (11): 37-39.
- [6] 刘杰,张玉茹,刘博. 人手到灵巧手的运动映射实现[J]. 机器人,2003,25(5):444-447.  
LIU Jie, ZHANG Yuru, LIU Bo. Movement Mapping Implementation From Personnel to Dexterous Hand [J]. Robot, 2003, 25(5): 444-447.
- [7] 冒娟娟,孙志峻. 三指灵巧手主从控制系统的搭建与实现[J]. 机械与电子,2010,(10):55-58.  
MAO Juanjuan, SUN Zhijun. Construction and Implementation of the Master-slave Control System of a Three-finger Dexterous Hand [J]. Mechanical and Electronic, 2010, (10): 55-58.
- [8] 朱玉乐. 多指灵巧手抓取运动规划的研究[D]. 洛阳:河南科技大学,2013.  
ZHU Yule. Multi-fingered Dexterous Hand Grasping Motion Planning Research [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2013.
- [9] 李继婷,张玉茹. 灵巧手主从抓持中的运动映射[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(7):722-725.  
LI Jiting, ZHANG Yuru. Movement Mapping of the Dexterous Hand Master-slave Grasping [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(7): 722-725.
- [10] 王珺,孙志峻,郭语. 基于特征点集的五指灵巧手主从映射方法[J]. 机械设计与研究,2009,25(5):35-38.  
WANG Jun, SUN Zhijun, GUO Yu. Five Fingers Dexterous Hand Master-slave Mapping Method Based on Feature Point Set [J]. Mechanical Design and Research, 2009, 25(5): 35-38.