DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.09.014

基于数据手套的仿生机械手控制与示教再现

李伟峰[1],张久昌[2],宁林祥[3],廖敦明[2]

(1. 浙江红马铸造有限公司,浙江 平湖 314200; 2. 华中科技大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430074; 3. 浙江欧冶达机械制造股份有限公司,浙江 湖州 313000)

摘　要:针对欠驱动仿生机械手的主从控制和示教再现等内容展开研究,构建仿生机械手控制系统实验平台,通过数据手套采集人手运动信息,采用关节角度映射将运动信息转化为机械手运动指令,借助无线通信将运动指令发送给机械手以实现实时在线主从控制;然后,借助主从控制完成仿生机械手的在线示教工作,并将示教期间的运动指令存储起来,顺序读取执行运动指令便可以再现示教动作。最后,通过手势运动测试验证本文设计的主从控制和示教再现的准确性和可靠性。

关键词:仿生机械手;主从控制;示教再现;数据手套

中图分类号: TG231　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)09-0861-06

Biomimetic Robot Control and Teaching Reproduction Based on Data Gloves

LI Weifeng[1], ZHAND Jiuchang[2], NING Linxiang[3], LIAO Dunming[2]

(1. Zhejiang Hongma Casting Co., Ltd., Pinghu 314200, China; 2. School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Zhejiang Ouyeda Machinery Manufacturing Co., Ltd., Huzhou 313000, China)

Abstract: In this paper, the master-slave control and teaching reproduction of under-actuated bionic manipulators are studied. The experimental platform of bionic robot control system is constructed. The data of human hand movement is collected through data gloves, and the motion information is converted into manipulator motion command by joint angle mapping. The communication sends the motion instruction to the robot to realize the real-time online master-slave control; then, the online teaching operation of the bionic robot is completed by the master-slave control, and the motion instruction during the teaching is stored, and the sequential reading execution motion command can be reproduced. Teaching action. Finally, the accuracy and reliability of the master-slave control and teaching reproduction of the design are verified by gesture motion test.

Key words: bionic robot; master-slave control; teaching reproduction; data glove

仿生机械手模仿人手的结构和功能,具有自由度多、灵活性好、通用性强等特点,可以代替人手完成各种复杂操作,如机械制造、军事战争、教学演示和家居生活等[1],是现代多种先进技术和理论相结合的产物,涉及仿生学、机器人学、智能控制技术、先进制造技术、传感器技术和人工智能等,但部分技术和理论尚不成熟,导致机械手的操作能力与人手相比仍有较大差距[2]。

控制是仿生机械手的重点研究内容,科研人员已开发出多种控制模式。自主控制是机器人控制的理想目标,但受到现有传感器技术、控制技术和人工智能的限制,自主控制还难以实现。主从控制是目前的主要控制策略,仿生机械手作为从动端接收采集于主动端的运动信息,模仿主动端完成相应动作。本文将对仿生机械手的主从控制和示教再现等内容展开研究,着重解决传统仿生机械手控制困难的问题,优化控制方式和动作映射算法,使机械手的运动更加准确可靠。

1　仿生机械手控制系统的构建

实现仿生机械手灵巧和准确的运动,需要构建合理的控制系统。根据主从控制和示教再现的相关要求构建仿生机械手控制系统实验平台,平台由操作者、数据手套、仿生机械手和集成电路板组成,如图 1。操作者穿戴数据手套,进行动作演示和路径规划,根据机械手运动结果做出判断和调整,起到决策者的作用;数据手套采集人手运动信息,并对其进行

收稿日期:2020-08-10

作者简介:李伟峰(1980-),浙江平湖人,总经理.主要从事铸造企业管理、铸造工艺设计及装备研究方面的工作.电话:13957315811,E-mail:lwf@phzg.com

通讯作者:廖敦明(1973-),湖北武汉人,教授,博士生导师.研究方向:铸造工艺成形过程.电话:18071121688,E-mail:liaodunming@hust.edu.cn

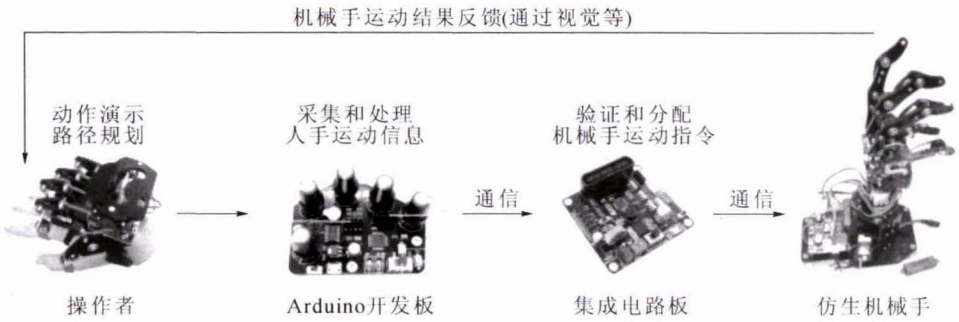


图 1 仿生机械手控制系统实验平台
Fig.1 Bionic robot control system experimental platform

处理以得到机械手运动指令，属于人机交互设备；集成电路板相当于控制器，控制仿生机械手完成相应动作。

1.1 数据手套

采用海灵智电科技公司的数据手套作为人手运动信息采集设备，如图 2。该数据手套实际上是一款外骨骼结构的可穿戴体感机械手套，由 Arduino 开发板、数字倾角传感器、蓝牙、伸张结构、锂电池(可充电)和体感手套支架组成。手套的外形和尺寸与成人手掌相仿，适用于不同的操作者，数据手套的实际穿戴情景如图 3。

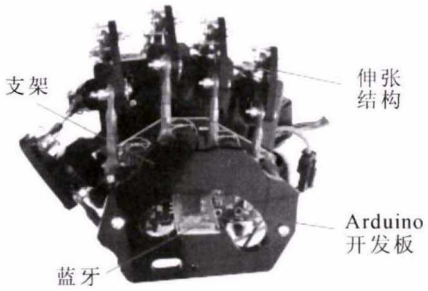


图 2 数据手套
Fig.2 Data glove

海灵智电数据手套的控制核心是一块 Arduino 开发板，开发板主要用于采集、处理和发送人手运动信息，是数据手套的大脑。数据手套通过伸张结构将操作者手指与 Arduino 开发板上的电位器连在一起，当操作者手指关节运动时，伸张结构带动电位器一起转动，Arduino 开发板记录下电位器两端电压，实现对操作者手指关节运动信息的采集。

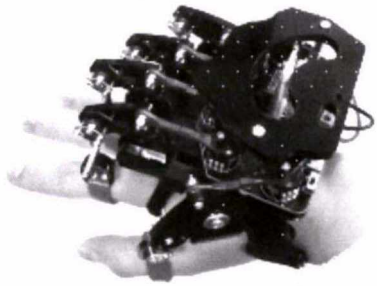


图 3 数据手套实际穿戴情景
Fig.3 Data glove actual wear situation

1.2 仿生机械手

采用海灵智电科技公司的仿生机械手作为终端设备，如图 4。该机械手采用仿生结构设计思想，共 5 个手指，每指 3 个关节，分别为指掌关节(MPJ)、近指关节(PIJ)和远指关节(DIJ)，每个关节 1 个弯曲自由度，5 个手指按照人手生理特征布置在手掌上，其外形和尺寸与人手相近。海灵智电仿生机械手采用欠驱动方式，虽然每指 3 个指节和 3 个关节，但只有指掌关节(MPJ)采用微型防堵转舵机驱动，另外 2 个关节通过耦合连杆驱动，基于欠驱动和耦合连杆驱动原理设计的仿生手指，能够实现弯曲和伸展运动，具有一定的自适应抓取能力。

对仿生机械手进行控制研究，首先要建立其数学模型，即建立机械手的位置和姿势(简称位姿)与

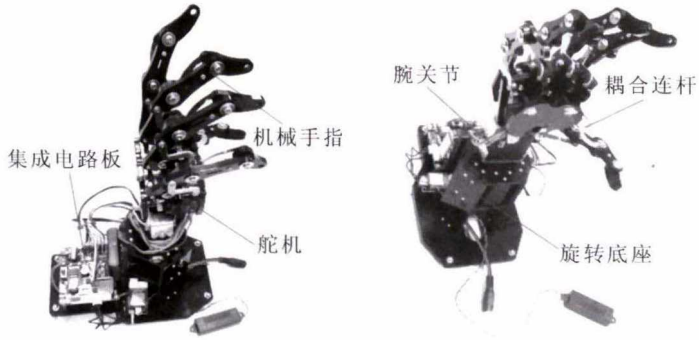


图 4 仿生机械手
Fig.4 Bionic robot

手指关节角度之间的关系。海灵智电仿生机械手具有5个结构相似的手指，每指3个指节和3个关节，下面以中指为例建立机械手位姿与其关节角度之间的关系，采用D-H法建立各指节坐标系[3]，如图5。

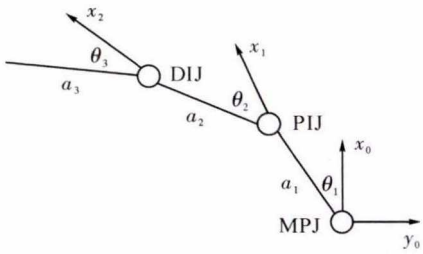


图5 机械手中指各指节坐标系

Fig.5 Mechanical hand refers to the knuckle coordinate system

由机器人正向运动学和D-H变换矩阵，可得相邻坐标系之间的齐次变换矩阵，如式1、2和3。

$$A_1^0=\begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & a_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & a_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$A_2^1=\begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & a_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & a_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$A_3^2=\begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & a_3\cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & a_3\sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

由以上3式，可得仿生机械手指尖位置，如式4、5、6和7。

$$A_3^0=A_1^0=A_2^1=A_3^2\begin{bmatrix} \cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3) & -\sin(\theta_1+\theta_2+\theta_3) & 0 & x \\ \sin(\theta_1+\theta_2+\theta_3) & \cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3) & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

即：

$$x=a_3\cos(\theta_1+\theta_2+\theta_3)+a_2\cos(\theta_1+\theta_2)+a_1\cos\theta_1 \tag{5}$$

$$y=a_3\sin(\theta_1+\theta_2+\theta_3)+a_2\sin(\theta_1+\theta_2)+a_1\sin\theta_1 \tag{6}$$

$$z=0 \tag{7}$$

因此，得到仿生机械手的手指关节角度θ_1、θ_2、θ_3，就可以利用式5、6和7求得其指尖位置x、y、z，确定机械手的位姿。同样，如果已知机械手的指尖位置x、y、z，利用机器人逆向运动学也可以求得其手指关节角度θ_1、θ_2、θ_3。不过，仿生机械手的逆向运动学问题一般没有精确解，通过泰勒展开可以得到近似解，但求解过程繁琐复杂。

2 基于数据手套的仿生机械手主从控制

仿生机械手主从控制的工作流程为：操作者穿戴数据手套，进行动作演示和路径规划；数据手套采集人手运动信息，并将其转化为机械手运动指令；集成电路板根据运动指令控制仿生机械手完成相应动作。

从以上工作流程可以看出：仿生机械手主从控制的实现需要借助可靠的信息采集设备获取准确的人手运动信息，同时采用合适的动作映射方式将运动信息转化为机械手运动指令。所以信息采集和运动映射是仿生机械手主从控制的关键所在。

2.1 人手运动信息的采集

人手运动信息的采集具有多种方式，借助数据手套、机器视觉、6维位置传感器和人手表面肌电信号[4-7]等均可实现。采用海灵智电数据手套作为信息采集设备，当操作者手指关节运动时，伸张结构带动电位器转过一定角度，Arduino开发板的ATmega328P-AU芯片通过其模拟I/O口读取电位器两端的电压，实现对人手运动信息的采集。

操作者手指关节弯曲角度与电位器两端的电压成比例对应关系，但是ATmega328P-AU芯片通过其模拟I/O口读取到的数值并非具体的电压值，而是范围为0~1023的模拟值。容易知道，模拟I/O口的模拟值与操作者手指关节弯曲角度也成比例对应关系。假设操作者某手指关节的最大弯曲角度为Angle_{max}，最小弯曲角度为Angle_{min}，某一时刻模拟I/O口的读数为N，则这一时刻操作者手指关节的弯曲角度Angle_{mid}可由式8求得：

$$\mathrm{Angle}_{mid}=\frac{N}{1\,024}(\mathrm{Angle}_{max}-\mathrm{Angle}_{min})+\mathrm{Angle}_{min} \tag{8}$$

海灵智电数据手套受其机械结构的限制，只能采集操作者5个手指指掌关节(MPJ)的弯曲角度，而人手每指3个关节和4个自由度（拇指5个自由度），因此需要对人手模型进行简化。根据数据手套和仿生机械手的结构特点，可将人手拇指简化为2个关节和2个自由度，简化模型如图6。同理，其余4指可简化为3个关节和3个自由度，去除指掌关节(MPJ)的侧摆自由度，只留下弯曲自由度，简化模型如图7。通过以上工作，复杂的人手结构得到了简

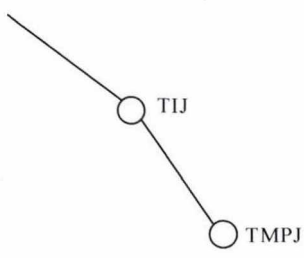


图6 拇指简化模型

Fig.6 Thumb simplified model

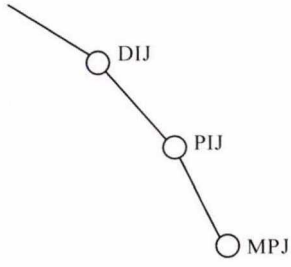


图7 其余4指简化模型

Fig.7 The remaining four-finger simplified model

化，降低了信息采集和运动映射的难度。

2.2 动作映射的比较与选择

目前，适用于仿生机械手主从控制的运动映射方式主要有关键点映射、基于被操作物体的映射、指尖位置映射和关节角度映射等方式[8]。其中，关节角度映射和指尖位置映射因简单易行且较为可靠，是现在最常用的两种映射方式。

指尖位置映射是指将操作者各手指的指尖位置映射给仿生机械手，使得仿生机械手能够在直角空间内准确地再现操作者的动作。因此，在进行指尖位置映射前需要获取操作者各手指的指尖位置；同时，为了保证动作映射能够顺利进行，应在人手和仿生机械手上建立相似的手掌坐标系和关节坐标系，保证两者具有一一对应关系，工作流程如图 8。

指尖位置映射工作流程繁琐复杂，计算量大，甚至没有精确解，而关节角度映射只需要进行简单的比例映射就可以得到仿生机械手运动指令。以中指为例，设操作者中指指掌关节(MPJ)最小弯曲角度为 A_i_{min}，最大弯曲角度为 A_i_{max}；同样，设仿生机械手中指指掌关节(MPJ)最小弯曲角度为 A_s_{min}，最大弯曲角度为 A_s_{max}；某一时刻，操作者和仿生机械手中指指掌关节(MPJ)的弯曲角度分别为 A_i_{mid} 和 A_s_{mid}，则 A_s_{mid} 可由式 9 求得：

$$A_s_{mid}=\frac{A_i_{mid}-A_i_{min}}{A_i_{max}-A_i_{min}}\times(A_s_{max}-A_s_{min})+A_s_{min} \quad (9)$$

综上所述，关节角度映射相比指尖位置映射更加简单易行且能够满足研究要求，因此选用关节角度映射作为人手与仿生机械手之间的运动映射方式。

2.3 动作映射的实现

关节角度映射主要包含两方面内容：人手运动信息的采集和运动映射的实现，在进行关节角度映射前需要分别获取操作者和仿生机械手各手指关节活动范围。海灵智电数据手套通过 Arduino 开发板模拟 I/O 口的模拟值表示人手关节弯曲程度，读数范围为 0~1 023。受数据手套机械结构的限制，Arduino 开发板模拟 I/O 口的读数被限制在 400~600，所以可以将其设为操作者各手指指掌关节(MPJ)的默认活动范围。不同操作者的手部尺寸不尽相同，手指关节的活动范围亦略有差异，为确保数据手套具有普适性，同时提高关节角度映射的准确性，在实际使用数据手套采集人手运动信息前应对其进行校正，具体方法是通过握紧和伸展五指得到操作者 5 个手指指掌关节(MPJ)的实际活动范围。

仿生机械手各手指指掌关节(MPJ)采用微型数字舵机驱动，舵机转动范围为 0~180°，对应的数字信号范围为 500~2 500。受仿生机械手机械结构的限制，各手指指掌关节(MPJ)活动范围为 0~90°，对应的数字信号范围为 1 000~2 000。得到操作者和仿生机械手各手指指掌关节(MPJ)的活动范围，便可以通过映射函数实现人手到机械手的关节角度映射，采用 Arduino 语言中的 map () 函数实现这一功能，map()函数将数字从一个范围重新映射到另一个范围。

以上工作完成了人手到仿生机械手的关节角度映射，实现了人手运动信息到仿生机械手运动指令的转化。最后将运动指令按照事先设定的通信协议通过蓝牙以无线通信的方式定时发送给集成电路板，便可以实现人手对仿生机械手的实时在线控制。

2.4 主从控制实验

为了验证仿生机械手主从控制的准确性和可靠性，构建了基于数据手套的仿生机械手主从控制实验平台，平台由数据手套、仿生机械手和集成电路板等硬件组成，同时包含了人手运动信息采集、数据处理、运动映射和指令发送等软件流程。实验中，作者穿戴数据手套开展“OK”手势运动测试，根据 Arduino IDE 串口监视器反馈的数据和仿生机械手的运动表现，分析验证本文设计的仿生机械手主从控制的准确性与可靠性。

“OK”手势的主从控制运动测试结果如图 9、10。

由图 9 可知，在“OK”手势的运动测试中，仿生机械手的动作与人手基本一致，较为准确可靠。“OK”手势只用到了中指、环指和小指，3 指从小指到中指依次伸展，拇指和食指保持不变。图 10 验证

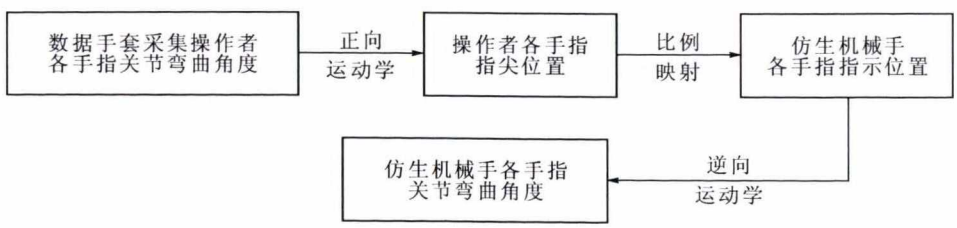
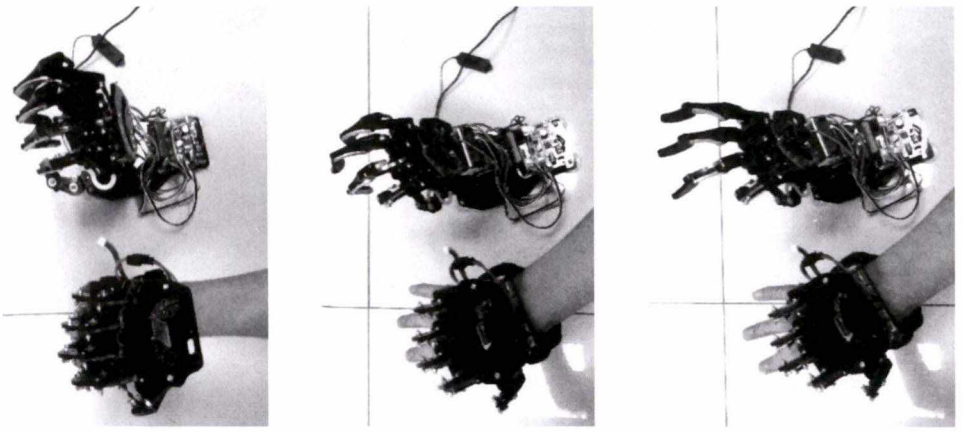


图 8 指尖位置映射工作流程
Fig.8 Fingertip location mapping workflow



(a)起始状态　　(b)中间过程　　(c)最终结果

图 9 “OK”手势主从控制运动测试

Fig.9 “OK” gesture master-slave control exercise test

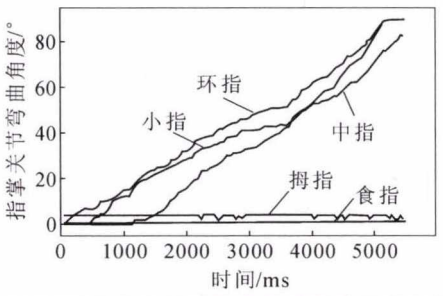


图 10 “OK”手势的机械手指掌关节弯曲角度变化曲线

Fig.10 Curve of the bending angle of the mechanical finger joint of the “OK” gesture

了这一过程，中指、环指和小指的指掌关节(MPJ)弯曲角度从 0 至 90°逐渐增大，而拇指和食指的指掌关节(MPJ)基本保持不动，符合“OK”字型手势中指、环指和小指逐渐伸展的运动特点。前期小指和环指的指掌关节(MPJ)弯曲角度变化曲线在中指之上，验证了“OK”手势小指和环指较中指伸展速度快的特点；后期小指指掌关节(MPJ)弯曲角度变化曲线落后于环指和中指，主要原因是数据手套机械结构不够灵活，小指伸展力量不足，没有带动电位器有效转动。

从以上实验可以发现：仿生机械手的动作较为稳定，延迟和抖动现象不明显；机械手能够实时跟随人手完成相应动作，且与人手动作基本保持一致；但是也存在机械手个别手指运动不够准确、灵活等问题，主要原因是人手和机械手在结构上存在较大差异，数据手套采集的人手运动信息不够丰富，机械手驱动器过少等结构或硬件问题。整体来说，本研究较为精确地实现了仿生机械手主从控制运动，主从控制的信息采集、数据处理、运动映射和指令发送等软件流程比较科学合理。

3　基于数据手套的仿生机械手示教再现

示教再现是指先让机器人按照期望的路径运动一遍，然后将运动路径记录下来，最后不断重复记录的动作。为扩大仿生机械手的应用范围，本文在主从控制的基础上对仿生机械手示教再现进行研究。

3.1　示教再现的 3 个过程

目前，示教主要分为在线示教和离线示教两种方式，在线示教包括人工引导示教、辅助装置示教和示教盒示教等。采用在线示教方式完成仿生机械手的示教工作，具体过程就是操作者穿戴数据手套演示某些动作，仿生机械手实时跟随模仿操作者的动作。

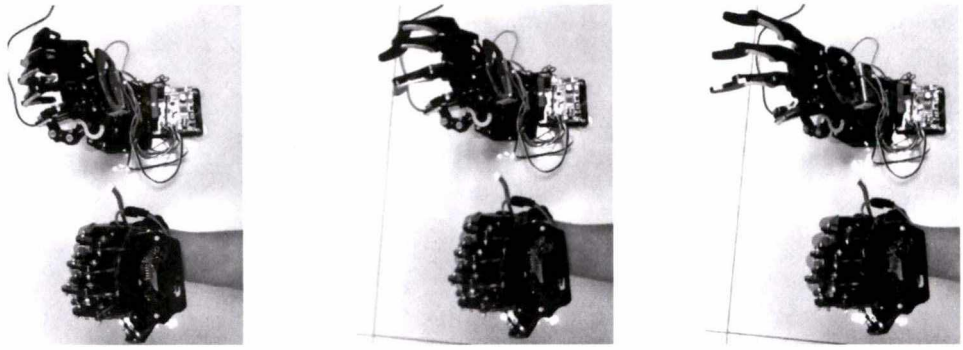
ATmega328P-AU 芯片具有 32KB 的 Flash 存储空间(其中 0.5 KB 用于存储 bootloader)、2 KB 的 SRAM 和 1 KB 的 EEPROM。Flash 存储空间最大，但其在程序运行时不可写；SRAM 是变量和常量的默认存储空间，程序在此运行，但 SRAM 空间较小，存储大量数据时容易溢出；EEPROM 掉电后数据不会丢失，具有 100 000 次的擦写寿命，可以用来存储示教过程中的机械手运动指令，节省宝贵的内存。

机械手运动指令的为 1 000~2 000，而 EEPROM 每个地址只能存储 1B 数据，对应 0~255，因此运动指令不能直接写入 EEPROM，可先将其除 10 得到符合要求的数据。最后，将存储在 EEPROM 的机械手运动指令顺序读取出来并发送给仿生机械手，便可以再现示教动作。

3.2　示教再现实验

实验中，作者穿戴数据手套对机械手进行“OK”手势示教再现运动测试，根据 Arduino IDE 串口监视器反馈的数据和仿生机械手的运动表现，分析验证本文设计的仿生机械手示教再现的可行性。

“OK”手势的示教再现运动测试结果如图 11、12。



(a)起始状态　(b)中间过程　(c)最终结果

图 11 “OK”手势示教再现运动测试

Fig.11 “OK” gesture teaching reproduce motion test

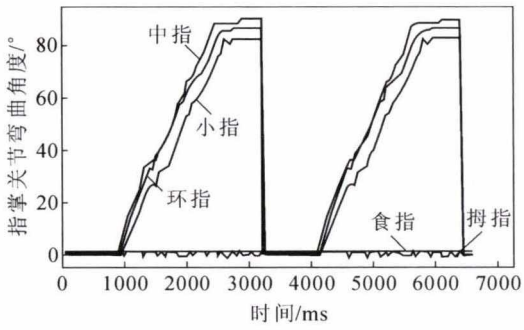


图 12 “OK”手势示教再现的机械手指掌关节弯曲角度变化曲线

Fig.12 “OK” gesture teaches the reconstruction of the mechanical finger palm joint bending angle curve

由图 11 可知，仿生机械手能够准确地再现“OK”手势，整个再现过程连贯流畅，动作协调一致。“OK”手势只用到了中指、环指和小指，3 指从小指到中指依次伸展，其他手指保持不变。图 12 验证了这一过程，机械手中指、环指和小指的指掌关节(MPJ)弯曲角度从 0 至 90°逐渐增大，与“OK”手势的运动特点吻合。此外，中指、环指和小指的指掌关节(MPJ)弯曲角度变化曲线为周期函数，即机械手能够以一定周期重复执行示教动作，满足了示教再现不断重复相同动作的任务要求。但小指指掌关节(MPJ)弯曲角度变化曲线上升的最慢、环指次之、中指最快，表明小指伸展速度比环指和中指慢，这与“OK”手势的运动规律不符，主要原因是数据手套机械结构不够灵活，中指到小指的力量逐渐减弱。

从实验可以发现：仿生机械手的再现动作较为准确可靠，基本与示教动作保持一致，延迟和抖动现象不明显。整体来说，较为精确地实现了仿生机械手的示教再现运动，示教再现过程的在线示教、运动指令的存储和示教动作的再现等软件流程比较科学合理。

4 结束语

(1)搭建基于数据手套的仿生机械手控制系统实验平台，研究了数据手套和仿生机械手的机械结构与工作原理，根据机器人运动学和 D-H 变换矩阵，建立并求解了仿生机械手的运动学方程。

(2)研究数据手套采集人手运动信息的原理与过程，选用关节角度映射将人手运动信息转化为机械手运动指令，并通过手势运动测试验证了本文设计的仿生机械手主从控制的准确性与可靠性。

(3)借助主从控制实现机械手的在线示教，通过编程将运动指令写入 EEPROM，手势运动测试结果验证了本文设计的仿生机械手示教再现的可行性。

(4)简化机械手的控制流程，扩大了其应用范围，可以将其用于铸件智能打磨，操作者在操作室内遥控机械臂实现对铸件的远距离切割或打磨，后续可开展更多相关研究。

参考文献：

[1] 肖南峰. 仿人机器人[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[2] 黄海. 仿人欠驱动作业手及其动态控制技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

[3] Fu K S, Gonzalez R C, Lee C S G. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence[M]. Tata McGraw-Hill Education, 1987.

[4] Kramer, James, M. Yim, and L. Edwards. CyberGlove User's Manual[M]. Virtual Technologies Inc. 1997.

[5] Kang S B, Ikeuchi K. Toward automatic robot instruction from perception-recognizing a grasp from observation [J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1993, 9(4): 432-443.

[6] Ekvall S, Kragic D. Interactive grasp learning based on human demonstration[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004. IEEE, 2004, 4: 3519-3524.

[7] Castellini C, Smagt P, Smagt P V D. ORIGINAL PAPER Surface EMG in advanced hand prosthetics [J]. Biological Cybernetics, 2009, 100(1): 35-47.

[8] 潘康俊. 基于数据手套的灵巧手主从控制 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30(7): 183-190.